



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

Τηλεδιαχείριση σε έργα ηλεκτροφωτισμού οδικών αρτηριών, με εφαρμογή της τεχνολογίας LED

Κοταράς Πόθος

Επιβλέπων καθηγητής: Πανάς Αντώνιος

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2023

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Τηλεδιαχείριση σε έργα ηλεκτροφωτισμού οδικών αρτηριών, με
εφαρμογή της τεχνολογίας LED

Κοταράς Πόθος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Πανάς Αντώνιος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Κουλουριώτης Δημήτριος

Καθηγητής Δ.Π.Θ

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2023

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η λειτουργία της τεχνολογίας LED στον οδοφωτισμό συγκριτικά με παλαιότερες τεχνολογίες και ερευνώνται οι δυνατότητες και προοπτικές που παρουσιάζει σε εφαρμογές τηλεδιαχείρισης και ευφυών συστημάτων ελέγχου.

Στην αρχή της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες και τα μεγέθη της φωτομετρίας και ειδικά σε έννοιες που σχετίζονται με τον οδοφωτισμό. Αναλύονται οι κυριότερες φωτεινές πηγές που χρησιμοποιούνται, από τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως και τους λαμπτήρες εκκένωσης, μέχρι τις σύγχρονες τεχνολογίες με φωτιστικά LED και γίνεται μια σύντομη επισκόπηση των βασικών διατάξεων φωτιστικών που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

Στη συνέχεια γίνεται μια πιο αναλυτική παρουσίαση της τεχνολογίας LED και των ημιαγωγών, αναλύεται η επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά τους, η δυνατότητα dimming και η αξιοποίησή τους στον οδοφωτισμό. Έπειτα από τη θεωρητική ανάλυση των LED, γίνεται μια κριτική επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τη χρήση, τα πλεονεκτήματα και τις προβληματικές που παρουσιάζει η εφαρμογή τους. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν αφορούν διαφορετικές πτυχές της χρήσης τους, όπως η κατανάλωση ενέργειας και η οικονομική απόδοση, το οικολογικό αποτύπωμα, η ασφάλεια και η ποιότητα φωτισμού, οι δυνατότητες ελέγχου και τηλεδιαχείρισης, καθώς και η αισθητική σκοπιά της χρήσης τους. Σε αυτήν την επισκόπηση επιβεβαιώθηκαν τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή, αλλά αναδείχθηκαν και ζητήματα που πρέπει μελλοντικά να ερευνηθούν.

Ακολούθως, αναλύεται η έννοια και οι βασικές μέθοδοι τηλεδιαχείρισης στον οδοφωτισμό και αναφέρονται τα κύρια μέσα που παρέχουν δεδομένα από το δρόμο, ειδικά τα μέσα παρακολούθησης της κυκλοφορίας και των μετεωρολογικών συνθηκών.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας αναπτύσσεται η έννοια του ευφυούς συστήματος φωτισμού και διαχείρισης της κυκλοφορίας, οι εφαρμογές και τα πλεονεκτήματά του, καθώς και οι μέθοδοι της Μηχανικής Εκμάθησης και των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων που αξιοποιούνται σε αυτό. Στο τέλος προσεγγίζεται το μοντέλο και η μεθοδολογία λειτουργίας ενός συστήματος ρύθμισης του οδοφωτισμού με βάση τον κυκλοφοριακό φόρτο.

Λέξεις – Κλειδιά

Τηλεδιαχείριση, Τεχνολογία LED, Οδοφωτισμός, Έξυπνα συστήματα

Remote control in street lighting projects, applying LED technology.

Poθος Kotaras

Abstract

In this work, the function of LED technology in street lighting is examined compared to older technologies and the possibilities and perspectives it presents in applications of remote management and intelligent control systems.

At the beginning of the paper, an introduction is made to the basic concepts and quantities of photometry and especially to concepts related to street lighting. The main light sources used are analyzed, starting from traditional incandescent and discharge lamps to modern LED lighting technologies and a brief overview of the main lighting arrangements used to date is given.

Then, there is a more detailed presentation of LED technology and semiconductors, the effect of temperature on their characteristics, the dimming option and their use in street lighting is analyzed. After the theoretical analysis of LEDs, a critical overview of the international bibliography is made regarding the use, advantages and problems presented by their application. The criteria chosen concern different aspects of their utilization, such as energy consumption and economic performance, ecological footprint, safety and lighting quality, control and remote management capabilities, as well as the aesthetic point of view of their use. This review confirmed the advantages of this technology, but also highlighted issues that need to be investigated in the future.

Next, the concept and basic methods of remote management in street lighting are analyzed and the main means that provide data from the road are mentioned, especially the means of monitoring traffic and meteorological conditions.

In the last part of the work, the concept of intelligent lighting and traffic management system is developed, its applications and advantages, as well as the methods of Machine Learning and Artificial Neural Networks that are developed. In the end we approach the model and operation methodology of a traffic-based automated street lighting regulation system.

Keywords

Remote Control, Road Lighting, LED Technology, Intelligent Systems

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract	vi
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	x
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός	1
1.2 Ερευνητικό υπόβαθρο	1
1.3 Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.4 Αναγκαιότητα της έρευνας.....	2
1.5 Στόχοι και σκοπός της εργασίας.....	2
1.6 Μεθοδολογία της εργασίας	3
1.7 Ευνοϊκές συνθήκες και περιορισμοί διεξαγωγής της έρευνας	4
1.8 Κύρια συμπεράσματα της εργασίας	4
1.9 Δομή της διπλωματικής εργασίας	5
Κεφάλαιο 2 Βασικές έννοιες και μέσα φωτισμού	7
2.1 Σκοπός	7
2.2 Εισαγωγή	7
2.3 Βασικές έννοιες και μεγέθη φωτομετρίας	7
2.3.1 Όραση και φως.....	7
2.3.2 Βασικά φωτομετρικά μεγέθη	9
2.3.3 Φωτομετρικά μεγέθη που σχετίζονται με τον οδοφωτισμό	14
2.3.4 Χαρακτηριστικά των φωτιστικών οδοφωτισμού	17
2.4 Φωτεινές πηγές οδοφωτισμού	18
2.4.1 Εισαγωγή.....	18
2.4.2 Εισαγωγή στις κατηγορίες λαμπτήρων	18
2.5 Φωτιστικά σώματα και οδοφωτισμός.....	30
2.5.1 Κατανομή φωτός σωμάτων φωτισμού.....	30
2.5.2 Διατάξεις φωτιστικών σωμάτων	34
2.6 Σύνοψη κεφαλαίου	37
Κεφάλαιο 3 Η Τεχνολογία L.E.D.	38
3.1 Σκοπός	38
3.2 Εισαγωγή	38
3.3 Ημιαγωγοί και τεχνολογία LED	38
3.3.1 Θεωρητικά στοιχεία τεχνολογίας LED	38
3.3.2 Διάρκεια ζωής φωτιστικών LED.....	42
3.3.3 Θερμοκρασία και λειτουργία	43
3.3.4 Διαχείριση θερμότητας	46
3.4 Τα οπτικά μέσα LED στον οδοφωτισμό.....	47
3.4.1 Οδοφωτισμός με χρήση LED.....	47
3.4.2 Παράμετροι αξιολόγησης και αξιοπιστίας.....	47
3.4.3 Τα είδη των φακών στον οδοφωτισμό	48
3.5 Ρύθμιση φωτεινότητας LED (Dimming).....	49
3.6 Αξιολόγηση χρήσης της τεχνολογίας LED	51
3.6.1 Ενεργειακή κατανάλωση.....	52
3.6.2 Οικονομική απόδοση	53

3.6.3	Οικολογικό αποτύπωμα	55
3.6.4	Ασφάλεια.....	57
3.6.5	Προοπτικές ελέγχου	59
3.6.6	Ποιότητα φωτισμού και τεχνικά στοιχεία.....	61
3.6.7	Αισθητική.....	62
3.7	Σύνοψη κεφαλαίου και συμπεράσματα	63
Κεφάλαιο 4	Μέθοδοι τηλεδιαχείρισης και όργανα ελέγχου	66
4.1	Σκοπός	66
4.2	Εισαγωγή	66
4.3	Η έννοια της τηλεδιαχείρισης.....	66
4.4	Συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας.....	67
4.5	Μέθοδοι και μέσα τηλεδιαχείρισης.....	67
4.5.1	Τοπικός Έλεγχος	68
4.5.2	Απομακρυσμένος έλεγχος	68
4.5.3	Διαλειτουργικότητα.....	70
4.6	Όργανα ελέγχου και εποπτείας.....	71
4.6.1	Όργανα ανίχνευσης κυκλοφορίας	71
4.6.2	Μετεωρολογικά Δεδομένα	75
4.7	Σύνοψη κεφαλαίου	79
Κεφάλαιο 5	Ευφυή συστήματα ελέγχου οδοφωτισμού.....	80
5.1	Σκοπός	80
5.2	Εισαγωγή	80
5.3	Ευφυή συστήματα φωτισμού και διαχείρισης κυκλοφορίας.....	81
5.3.1	Εφαρμογές συστημάτων διαχείρισης κυκλοφορίας	82
5.3.2	Πλεονεκτήματα ευφύων συστημάτων	85
5.4	Μηχανική Εκμάθηση (Machine Learning).....	87
5.4.1	Κατηγορίες μεθόδων μηχανικής μάθησης	88
5.5	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	91
5.5.1	Δομικές μονάδες.....	91
5.5.2	Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης	93
5.5.3	Επαναληπτικά νευρωνικά δίκτυα.....	93
5.5.4	Υπερπαράμετροι νευρωνικών δικτύων	95
5.6	Μελέτη συστήματος ελέγχου οδοφωτισμού.....	96
5.6.1	Περιγραφή συστήματος	96
5.6.2	Βασικές αρχές και μεθοδολογία μελέτης.....	98
5.6.3	Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις συστήματος.....	98
5.6.4	Μοντέλο ανάπτυξης λογισμικού	100
5.6.5	Ασαφής Λογική και Dimming	101
5.6.6	Μοντέλο πρόβλεψης κυκλοφορίας και ρύθμιση φωτισμού.....	102
5.7	Σύνοψη κεφαλαίου και συμπεράσματα	104
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα.....	106
6.1	Σκοπός	106
6.2	Σύνοψη εργασίας.....	106
6.3	Παρουσίαση συμπερασμάτων	107
6.4	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	110
Βιβλιογραφικές Αναφορές		112

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 2.1 Φάσμα ορατού φωτός (“The Electromagnetic Spectrum”, 2016)	8
Εικόνα 2.2 Βασικά φωτομετρικά μεγέθη (TOTTE 20701-7, 2021)	10
Εικόνα 2.3 Λαμπρότητα (Τοπαλής, 1994)	12
Εικόνα 2.4 Φασματική κατανομή λαμπτήρα HPS και μεταλλικών αλογονιδίων (Τοπαλής 1994)	13
Εικόνα 2.5 Δείκτης χρωματικής απόδοσης (Τοπαλής, 1994)	13
Εικόνα 2.6 Θερμοκρασία χρώματος (Τοπαλής κ.α., 2010)	14
Εικόνα 2.7 Λαμπτήρας πυρακτώσεως (“An Incandescent light bulb”, n.d.)	21
Εικόνα 2.8 Λαμπτήρας ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (“Sodium Vapour Lamp Working Principle”, 2018)	22
Εικόνα 2.9 Φάσμα λαμπτήρα νατρίου (“BLV HPS 600W”, 2020)	23
Εικόνα 2.10 Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης (“Welcome to the Museum of Electric Lamp Technology”, n.d.)	24
Εικόνα 2.11 Λαμπτήρας υδραργύρου υψηλής πίεσης (Τοπαλής, 1994)	25
Εικόνα 2.12 Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων (Τοπαλής, 1994)	27
Εικόνα 2.13 Συμπαγείς CFL και σωληνωτοί (Τοπαλής, 1994)	28
Εικόνα 2.14 Φωτιστικό σώμα LED (“Schematic diagram of 114-W LED street lamp”, n.d.)	29
Εικόνα 2.15 Φωτιστικό τύπου cutoff (Τοπαλής, 1994)	31
Εικόνα 2.16 Φωτιστικό τύπου non-cutoff (Τοπαλής, 1994)	31
Εικόνα 2.17 Φωτιστικό τύπου semi-cutoff (Τοπαλής, 1994)	32
Εικόνα 2.18 Φωτιστικό τύπου full-cutoff (Τοπαλής, 1994)	32
Εικόνα 3.1 Απεικονίσεις δομής LED (“Basic parts of a modern LED structure”, n.d.)	39
Εικόνα 3.2 Απεικόνιση λειτουργίας LED (“LED working principle”, n.d.)	40
Εικόνα 3.3 Φασματική διαφορά εκπομπής (“Warm vs Cool White”, n.d.)	41
Εικόνα 3.4 Χρόνος ζωής LED σε σχέση με θερμοκρασία λειτουργίας ([Degradation graph of luminous output], n.d.)	42
Εικόνα 3.5 χρόνος ζωής λαμπτήρων (“LED Technology”, n.d.)	43
Εικόνα 3.6 Μεταβολή φωτεινής ροής χρώματος με τη θερμοκρασία (“High-Performance Heat Sink for Solid-State Lighting”, n.d.)	44
Εικόνα 3.7 Απόδοση συγκριτικά με το χρόνο λειτουργίας, διαφορετικών χρωμάτων LED (Narendran & Gu, 2005)	46
Εικόνα 3.8 Συμμετρικός φακός LED ([Symmetrical LED lens], n.d.)	48
Εικόνα 3.9 Ασύμμετρος φακός LED ([Asymmetric LED lens], n.d.)	49
Εικόνα 3.10 Υβριδικοί φακοί LED ([Hybrid LED lens], n.d.)	49
Εικόνα 3.11 Μέθοδοι Dimming (“What is PWM Dimming”, 2022)	50
Εικόνα 4.1 Ενδεικτική τοπολογία συστήματος απομακρυσμένης διαχείρισης δικτύου οδοφωτισμού (TOTTE, 2018)	69
Εικόνα 4.2 Επαγωγικός βρόχος (“Elements of an inductive loop detector”, n.d.)	72
Εικόνα 4.3 Κάμερα αναγνώρισης κυκλοφορίας (“Everett considers red-light camera proposal”, 2019)	73
Εικόνα 4.4 Μετεωρολογικός Σταθμός ([Meteostation], n.d.)	76
Εικόνα 4.5 Φωτόμετρο (“Photometer for tunnel, Tunnel Photometer, Luminance meter for tunnel”, n.d.)	79
Εικόνα 5.1 Ανίχνευση κίνησης από κάμερα (“TrafficVision”, n.d.)	82

Εικόνα 5.2 Δομή Τεχνητού Νευρώνα (Amit, 1989)	92
Σχήμα 2.1 Τύπος 1	33
Σχήμα 2.2 Τύπος 2	33
Σχήμα 2.3 Τύπος 3	33
Σχήμα 2.4 Τύπος 4	34
Σχήμα 2.5 Τύπος 5	34
Σχήμα 2.6 Μονόπλευρη διάταξη φωτιστικών	36
Σχήμα 2.7 Αμφίπλευρη διάταξη φωτιστικών	36
Σχήμα 2.8 Χιαστί διάταξη φωτιστικών	36
Σχήμα 2.9 Κεντρική διάταξη φωτιστικών	36
Σχήμα 2.10 Αξονική διάταξη φωτιστικών	37
Σχήμα 5.1 Το ευφύες σύστημα οδοφωτισμού	97
Σχήμα 5.2 Λειτουργικές Απαιτήσεις Συστήματος	99
Σχήμα 5.3 Λειτουργία συστήματος ασαφούς λογικής	101

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να παραθέσει τους στόχους για τους οποίους εκπονήθηκε η διπλωματική εργασία και να περιγράψει τα βασικά σημεία της δομής της.

1.2 Ερευνητικό υπόβαθρο

Η τεχνολογία του οδοφωτισμού και του φωτισμού εν γένει είναι ένας ερευνητικός τομέας που έχει εξελιχθεί αρκετά κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα. Η ανάδειξη της τεχνολογίας LED ως μία νέα λύση σε σχέση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες, έδωσε το έναυσμα για να γίνουν πολλές μελέτες για να φανούν τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και οι ελλείψεις της. Έχοντας ήδη φανεί η αξία της, λόγω της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας, τώρα αρχίζουν και συγκροτούνται μελέτες από τα εμπειρικά δεδομένα της χρήσης τους, κάτι που δεν ήταν εφικτό αρχικά, αφού οι μελέτες ήταν κυρίως πειραματικές και δεν υπήρχαν αρκετές εφαρμογές σε έργα ακόμη.

Αν και οι προηγούμενες έρευνες εξέταζαν τα φωτιστικά LED κυρίως σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας και το κόστος κατασκευής τους, δεν έχει γίνει τόσο εκτεταμένη έρευνα στις δυνατότητες που παρουσιάζουν οι νέες τεχνολογίες για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων, με μοντέλα πρόβλεψης, απομακρυσμένο έλεγχο και τηλεδιαχείριση. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε σε αυτές τις νέες δυνατότητες που παρουσιάζονται και αξίζει να μελετηθούν πιο αναλυτικά.

1.3 Αντικείμενο της εργασίας

Στην εργασία αυτή, επιχειρείται μια συντεταγμένη επισκόπηση της έρευνας που έχει γίνει μέχρι τώρα στον τομέα του οδοφωτισμού, τόσο αναφορικά με τα μέσα και τις τεχνολογίες παραγωγής φωτός, όσο και με τη δυνατότητα ελέγχου και απομακρυσμένης διαχείρισης αυτών των συστημάτων. Έπειτα από την ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών των φωτιστικών LED, γίνεται μια πιο αναλυτική διερεύνηση των δεδομένων από τη χρήση τους με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η οικονομική βιωσιμότητα, η οικολογική σκοπιά, η

ασφάλεια, η ενεργειακή κατανάλωση κ.α. και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τα θετικά και αρνητικά στοιχεία της χρησιμοποίησής τους.

Επίσης, αναλύεται η έννοια της τηλεδιαχείρισης και του ελέγχου σε έργα, καθώς και της βελτιστοποίησης των διαδικασιών και της λειτουργίας του φωτισμού. Μέσα από την ανάλυση των δυνατοτήτων που μας παρέχει η τεχνολογία, γίνεται μια προσπάθεια να εξεταστούν ευφυή συστήματα, σε σχέση με τα φωτιστικά LED. Με τις δυνατότητες dimming και ελέγχου που παρουσιάζουν, έχουν τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή νέων μεθόδων ελέγχου, εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης του κόστους.

1.4 Αναγκαιότητα της έρευνας

Η αναγκαιότητα της έρευνας αυτής της εργασίας έγκειται στους εξής λόγους:

- 1 Γίνεται αξιολόγηση της τεχνολογίας οδοφωτισμού με LED, όχι μόνο με μια απλή σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπου είναι πλέον δεδομένα τα πλεονεκτήματα της χρήσης της, αλλά και από τη σκοπιά της τηλεδιαχείρισης εγκαταστάσεων του αυτόματου ελέγχου και της βελτιστοποίησης των μεθόδων και της ποιότητας φωτισμού.
- 2 Γίνεται αξιολόγηση της χρήσης των φωτιστικών LED σε πραγματικές εφαρμογές, πέρα από τις θεωρητικές αναλύσεις, καθώς η γενικευμένη αξιοποίηση τους σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού επιβεβαιώνει τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, αλλά αναδεικνύει και νέα ζητήματα που δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς μέχρι τώρα.
- 3 Συνδυάζεται η βελτιστοποίηση της απόδοσής τους με τη χρήση νέων ευφών συστημάτων και τεχνολογιών, που μπορούν να μεγιστοποιήσουν εντυπωσιακά την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτίωση των αποτελεσμάτων σε όλα τα κριτήρια της μελέτης.

1.5 Στόχοι και σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να ερευνηθεί σε βάθος τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας LED στον οδοφωτισμό, καθώς και να εξερευνηθεί τις δυνατότητες ανάπτυξης ευφών συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου για βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη βελτίωση

στις μεθόδους και στα μέσα φωτισμού και οι λαμπτήρες LED είναι η βασική επιλογή για αντικατάσταση φωτιστικών σωμάτων ή για νέες εγκαταστάσεις. Με τη γενικευμένη χρήση τους και την ταυτόχρονη ανάπτυξη του τομέα των τηλεπικοινωνιών και δικτύων, ανοίγονται νέες δυνατότητες για συστήματα προηγμένου ελέγχου και τηλεδιαχείρισης. Αν και έχουν ακόμα μεγαλύτερο κόστος αγοράς, οι λαμπτήρες LED έχουν ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων και χαρακτηριστικών που αλλάζουν τον τρόπο οδοφωτισμού και ταυτόχρονα μας παρέχουν δυνατότητες ευφυούς απομακρυσμένου ελέγχου, της εξοικονόμησης ενέργειας και των διασυνδεδεμένων συστημάτων. Επίσης, οι δυνατότητες δυναμικής ρύθμισης του φωτισμού (dimming) που έχουν ανοίγει νέες δυνατότητες προσαρμογής της έντασης του εκπεμπόμενου φωτός ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες. Τέλος, λόγω της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας και της μεγάλης διάρκειας ζωής, μπορεί να μελετηθεί το πλαίσιο στο οποίο είναι συμφέρουσα τέτοια επένδυση, άμεσα και σε βάθος χρόνου.

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι να μελετηθεί σε βάθος η πραγματική χρήση και λειτουργία οδοφωτισμού με LED, πέρα από τα προφανή τεχνικά πλεονεκτήματα, όπως η κατανάλωση ενέργειας και να περιγραφεί ένα πρότυπο ευφυούς συστήματος, να γίνει καταγραφή των απαιτήσεων και της μεθοδολογίας ανάπτυξής του.

1.6 Μεθοδολογία της εργασίας

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, για να δομηθεί η εργασία, είναι η αξιοποίηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την τεχνολογία οδοφωτισμού και με τη χρήση της τεχνολογίας φωτιστικών LED, ώστε να αξιολογηθεί η μέχρι τώρα λειτουργία τους όπου χρησιμοποιήθηκαν. Αντίστοιχα, έγινε αξιολόγηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις μεθόδους τηλεδιαχείρισης και ελέγχου και με τις νέες δυνατότητες που ανοίγονται από τα ευφυή συστήματα πρόβλεψης και διαχείρισης. Με τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί από τη χρήση τέτοιων συστημάτων έως τώρα, καθώς και την υπάρχουσα θεωρία πάνω στα ευφυή συστήματα, επιχειρείται στο τέλος να περιγραφεί ένα τέτοιο σύστημα, ώστε να αναδειχθούν οι δυνατότητες και οι προοπτικές του, καθώς και περαιτέρω πεδία έρευνας πάνω σε αυτόν τον τομέα.

1.7 Ευνοϊκές συνθήκες και περιορισμοί διεξαγωγής της έρευνας

Ευνοϊκή συνθήκη για την έρευνα που έγινε σχετικά με το θέμα είναι ότι υπάρχει πλέον εμπειρία αρκετών ετών με χρήση φωτιστικών LED, συνεπώς μπορεί να αξιολογηθεί στην πράξη η χρήση της σε έργα και υπάρχουν αρκετές μελέτες παγκοσμίως που ερευνούν διάφορες πτυχές της χρήσης τους. Δεν είναι πια μια νέα πειραματική τεχνολογία, αλλά μια δοκιμασμένη λύση προς αξιολόγηση. Επίσης, ένα θετικό στοιχείο είναι η ανάδειξη νέων τεχνολογιών έξυπνων συστημάτων και ελέγχου, που μπορούν να συνδυαστούν με τις τεχνολογίες φωτισμού πιο αποδοτικά και αποτελούν ένα νέο πεδίο προς έρευνα, για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος.

Από την άλλη μεριά, ένας περιορισμός της έρευνας σχετίζεται με την πρόσβαση σε πειραματικά δεδομένα. Αν και υπάρχουν μελέτες κατά την εφαρμογή, κυρίως σε Δήμους και τοπικές εφαρμογές, η διαχείριση και λειτουργία ανήκει σε ιδιώτες ή φορείς που δεν δημοσιεύουν δεδομένα λειτουργίας των έργων.

1.8 Κύρια συμπεράσματα της εργασίας

Από την έρευνα που έγινε, ως πρώτο συμπέρασμα αναδείχθηκαν τα σημαντικά πλεονεκτήματα της εφαρμογής της τεχνολογίας LED σε σχέση με πιο παραδοσιακές τεχνολογίες οδοφωτισμού. Αυτά δεν προκύπτουν μόνο από τεχνική σκοπιά, όπου είναι γνωστό ότι τα LED έχουν σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, αλλά σε σχέση και με άλλα κριτήρια, όπως η οικονομική βιωσιμότητα, το οικολογικό αποτύπωμα, την ασφάλεια των χρηστών και το αισθητικό αποτέλεσμα, από το φωτισμό. Παράλληλα, από αυτή τη μελέτη προέκυψαν και συγκεκριμένα στοιχεία της τεχνολογίας που χρήζουν βελτίωσης και περαιτέρω μελέτης, όπως το υψηλό ακόμα αρχικό κόστος εξοπλισμού και η χρήση τοξικών στοιχείων σε μικρές ποσότητες στην κατασκευή των ημιαγωγών.

Το δεύτερο συμπέρασμα έχει σχέση με τις ίδιες τις δυνατότητες που παρέχει η τεχνολογία LED, όσον αφορά τον ευφυή έλεγχο. Αν και εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων που παρέχει είναι από μόνη της αξιοσημείωτη και αρκεί για να επιλέξουμε τη μετάβαση σε νέα φωτιστικά για τον οδοφωτισμό, αυτό που αναδεικνύεται είναι ότι με νέες ευφυείς μεθόδους, με τη χρήση τεχνολογιών όπως το machine learning, αλλά και μεθόδους αυτοματισμού,

μπορούμε να επιτύχουμε ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους, μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον, μεγαλύτερη ασφάλεια για τους πολίτες και αξιοπιστία της λειτουργίας των συστημάτων αυτών.

1.9 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή: Είναι ένα εισαγωγικό κεφάλαιο όπου ορίζονται τα βασικά στοιχεία της διπλωματικής εργασίας όπως: το ερευνητικό υπόβαθρο, το αντικείμενο, ο σκοπός, οι στόχοι, η μεθοδολογία, τα κύρια συμπεράσματα, καθώς και η αναγκαιότητα της έρευνας μαζί με τις ευνοϊκές συνθήκες και τους περιορισμούς διεξαγωγής της. Επίσης, παρουσιάζεται ένας συνοπτικός οδηγός των κεφαλαίων που δομούν την εργασία.

Κεφάλαιο 2. Βασικές έννοιες και μέσα φωτισμού: Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση των βασικών στοιχείων θεωρίας γύρω από την έννοια του φωτισμού, των μέσων παραγωγής φωτός και των βασικών μεθόδων εφαρμογής οδοφωτισμού σήμερα.

Κεφάλαιο 3. Η τεχνολογία LED: Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά της θεωρίας της τεχνολογίας LED και έπειτα μια κριτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας αναφορικά με την έως τώρα χρήση της. Αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα με τη χρήση διαφόρων κριτηρίων και εξερευνώνται και νέες οπτικές με τις οποίες μπορούμε να εξετάσουμε τη λειτουργία των LED, πέρα από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, που είναι εμφανής.

Κεφάλαιο 4. Μέθοδοι τηλεδιαχείρισης και όργανα ελέγχου: Γίνεται εισαγωγή στις έννοιες της τηλεδιαχείρισης και του ελέγχου, καθώς και ανάλυση των υπάρχουσών μεθόδων σε έργα οδοφωτισμού. Επίσης αναφέρονται τα μέσα και τα όργανα ελέγχου ώστε να υλοποιείται η τηλεδιαχείριση.

Κεφάλαιο 5. Ευφυή συστήματα ελέγχου οδοφωτισμού: Αναλύονται οι βασικές αρχές των συστημάτων διαχείρισης κυκλοφορίας, τα πλεονεκτήματά τους και η σύνδεσή τους με τον οδοφωτισμό. Στη συνέχεια γίνεται η θεωρητική επισκόπηση των μεθόδων μηχανικής εκμάθησης και των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, που συνδέονται με τις πιο σύγχρονες μεθόδους διαχείρισης πληροφορίας και μπορούν να αξιοποιηθούν σε συστήματα

οδοφωτισμού. Στο τελευταίο μέρος, αναλύονται οι προϋποθέσεις δημιουργίας και λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος και περιγράφεται η δομή που μπορεί να έχει.

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα: Γίνεται σύνοψη των βασικών σημείων της εργασίας και παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της βιβλιογραφίας και των δεδομένων που συλλέχθηκαν.

Κεφάλαιο 2 Βασικές έννοιες και μέσα φωτισμού

2.1 Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η επισκόπηση των βασικών εννοιών σχετικά με το φωτισμό και η περιγραφή κυρίως των παραδοσιακών τεχνολογιών λαμπτήρων, που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό. Επίσης, η ανάλυση των βασικών μεθόδων χρήσης και διατάξεων των φωτιστικών σωμάτων, που αξιοποιούνται μέχρι σήμερα σε τέτοια έργα.

2.2 Εισαγωγή

Ο φωτισμός είναι ένα απαραίτητο στοιχείο για κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα. Η αποτελεσματική και οικονομική του διαχείριση είναι όμως ένα ζητούμενο, ειδικά σε μια εποχή όπου η εξοικονόμηση ενέργειας και η αντιμετώπιση της οικολογικής κρίσης, είναι στις πρώτες προτεραιότητες κάθε κράτους. Η τεχνολογία και τα είδη λαμπτήρων εξελίσσονται διαρκώς, για να ανταποκρίνονται στις νέες απαιτήσεις και να προσαρμόζονται στις νέες δυνατότητες που υπάρχουν σήμερα. Από τους παλιούς λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουμε φτάσει στα φωτιστικά LED και η τεχνολογία φωτισμού συνεχίζει να εξελίσσεται με βάση τις νέες ανάγκες που προκύπτουν για τα πιο σύγχρονα συστήματα.

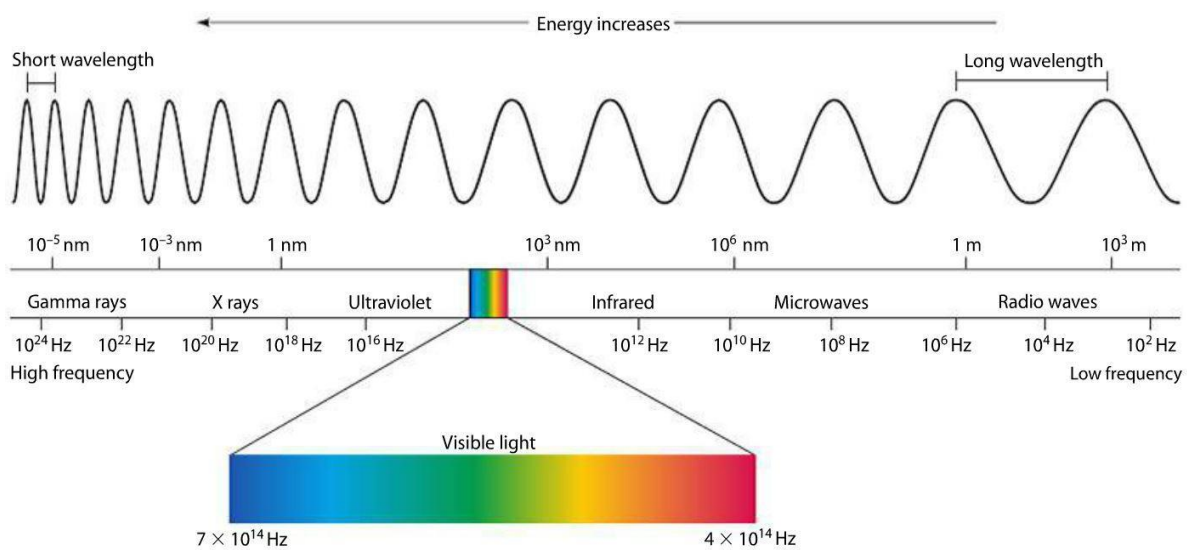
2.3 Βασικές έννοιες και μεγέθη φωτομετρίας

2.3.1 Όραση και φως

Το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται από κάποια πηγή. Τα βασικά μεγέθη που το περιγράφουν είναι η συχνότητά του και το μήκος κύματος. Το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ονομάζεται φάσμα. Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία του φωτός χρησιμοποιούμε τη θεωρία του μέλανος σώματος (Καγκαράκης, 1992). Ως μέλαν σώμα εννοούμε ένα θεωρητικό ιδανικό μοντέλο σώματος που μπορεί, από την ακτινοβολία που δέχεται, να απορροφά όλα τα μήκη κύματος, χωρίς αντανάκλαση και να εκπέμπει σε όλα τα μήκη κύματος και τις διευθύνσεις, με τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, κάθε αντικείμενο, ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής

ακτινοβολίας, σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Ο ήλιος είναι το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, καθώς εκπέμπει τεράστιες ποσότητες ενέργειας ως φως, που κομμάτι τους φτάνει στη Γη. Αντίστοιχα, τα αντικείμενα που δέχονται την ακτινοβολία, απορροφούν ένα μέρος της, ανάλογα με τις ιδιότητες κάθε υλικού και ανακλούν το υπόλοιπο. Έτσι καθίστανται ορατά τα αντικείμενα για τον άνθρωπο και αποκτούν ιδιότητες όπως το χρώμα.

Η ανθρώπινη όραση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που μας επιτρέπει να αναγνωρίζουμε το περιβάλλον γύρω μας. Το μάτι είναι ένα όργανο που μετατρέπει την εισερχόμενη σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων στον αμφιβληστροειδή χιτώνα, σε ηλεκτρικά σήματα που μεταφέρονται στον εγκέφαλο. Το ορατό για τον άνθρωπο φως, δηλαδή αυτό που μπορεί να γίνει αντιληπτό από το μάτι, αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Εικόνα 2.1), συγκεκριμένα σε μήκη κύματος από 380 nm έως 780 nm.



Εικόνα 2.1 Φάσμα ορατού φωτός (“The Electromagnetic Spectrum”, 2016)

Στον αμφιβληστροειδή του οφθαλμού υπάρχουν δύο είδη φωτοευαίσθητων κυττάρων (ραβδία και κωνία), που ενεργοποιούνται ανάλογα με την ένταση του φωτισμού. Τα ραβδία λειτουργούν σε φωτισμό χαμηλής έντασης, όμως δεν έχουν τη δυνατότητα αναγνώρισης χρώματος και αξιοποιούνται για την όραση σε σκοτεινό περιβάλλον. Τα κωνία, από την άλλη μεριά, επιτελούν όλη τη βασική λειτουργία της όρασης και της αναγνώρισης χρωμάτων.

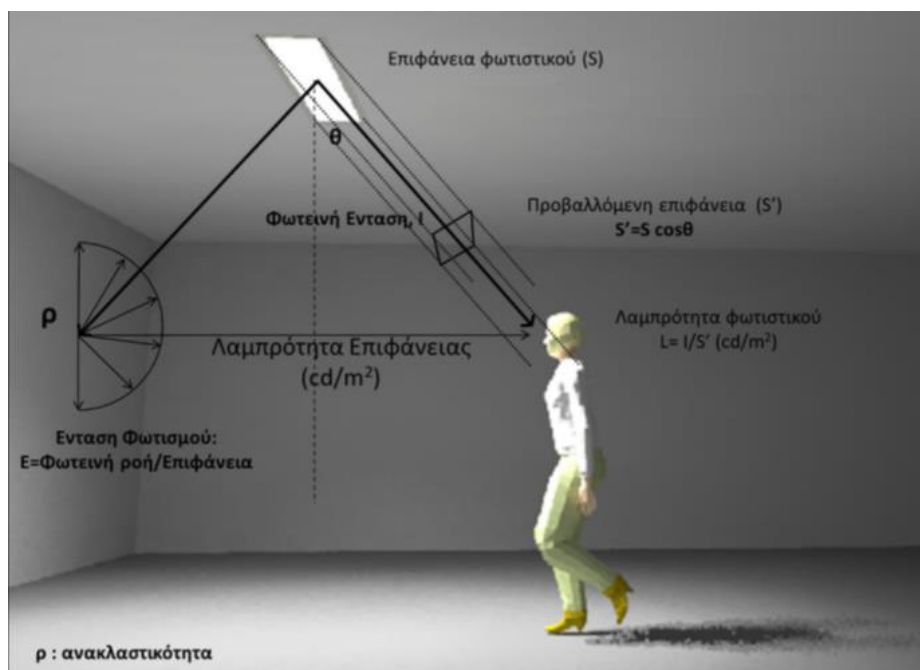
Η ανθρώπινη όραση, συνεπώς, μεταβάλλεται και προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού και άλλες παραμέτρους. Με βάση τον τύπο των κυττάρων που επιτελούν κάθε φορά τη λειτουργία έχουμε τρία είδη όρασης:

- Φωτοπική: Είναι η όραση όπου χρησιμοποιούνται τα κωνία και έχουμε πλήρη αναγνώριση των διαφορετικών χρωμάτων των αντικειμένων. Η όραση αυτή εμφανίζεται για λαμπρότητες μεγαλύτερες των 5 cd/m^2 .
- Μεσοπική: Είναι η όραση όπου λειτουργούν και τα κωνία και τα ραβδία. Η περιοχή λειτουργίας της μεσοπικής όρασης είναι από $0.001 \text{ cd/m}^2 \leq L \leq 5 \text{ cd/m}^2$.
- Σκοτοπική: Είναι η όραση στην οποία λειτουργούν μόνο τα ραβδία και δεν υπάρχει η δυνατότητα αναγνώρισης χρωμάτων. Η περιοχή λειτουργίας της είναι $L \leq 0.001 \text{ cd/m}^2$.

Επίσης, ένα άλλο στοιχείο της όρασης είναι η διαφορετική ευαισθησία σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, πέρα από αυτή σε σχέση με τη λαμπρότητα. Για να προσεγγίσουμε αυτό το μέγεθος χρησιμοποιούμε το συντελεστή φασματικής ευαισθησίας $V(\lambda)$.

2.3.2 Βασικά φωτομετρικά μεγέθη

Η λειτουργία του οδοφωτισμού μπορεί να χαρακτηριστεί από διάφορα μεγέθη που την περιγράφουν (Εικόνα 2.2). Αυτά αποτελούν βασικά στοιχεία της θεωρίας της φωτομετρίας και αναλύονται παρακάτω βάσει της αντίστοιχης βιβλιογραφίας (Τοπαλής, 1994, Τοπαλής κ.α., 2010).



Εικόνα 2.2 Βασικά φωτομετρικά μεγέθη (TOTTE 20701-7, 2021)

Φωτεινή ενέργεια (Luminous Energy)

Ως φωτεινή ενέργεια ορίζεται το ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός αντικειμένου, που εμπίπτει στη ζώνη φάσματος που ανήκει στο ορατό φως, δηλαδή στο κομμάτι αυτό της ακτινοβολίας που μπορεί να γίνει αντιληπτό από τον άνθρωπο. Το μέγεθος αυτό είναι ίσο με το ολοκλήρωμα του γινομένου της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας μιας φωτεινής πηγής $W(\lambda)$ επί τον συντελεστή φασματικής ευαισθησίας $V(\lambda)$, με διάστημα ολοκλήρωσης τα μήκη κύματος του ορατού φάσματος.

Φωτεινή ροή (Luminous Flux)

Φωτεινή Ροή Φ είναι η ποσότητα της φωτεινής ενέργειας που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή σε κάθε χρονική στιγμή, προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η φωτεινή ροή δεν εκπέμπεται ομοιόμορφα στο χώρο και επίσης εκφράζει την φωτεινή ενέργεια που εκπέμπεται αν αυτή κανονικοποιηθεί από τη φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας του ματιού. Μονάδα μέτρησής της είναι το Lumen (Lm).

Φωτεινή απόδοση (Luminous Efficiency)

Η φωτεινή απόδοση αντιστοιχεί στην ποσότητα της φωτεινής ροής που αποδίδει ένας λαμπτήρας, για κάθε Watt ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνει. Αυτό σημαίνει ότι όσο πιο μεγάλη η απόδοση ενός λαμπτήρα, τόσο λιγότερη ενέργεια θα καταναλωθεί για το ίδιο

αποτέλεσμα. Η μονάδα μέτρησής της είναι τα Lumen/Watt (Lm/W). Η μεγαλύτερη θεωρητικά απόδοση που μπορεί να παραχθεί από τη μετατροπή φωτεινής ενέργειας σε ορατό φως είναι τα 683 Lm/W.

Φωτεινή ένταση (*Luminous Intensity*)

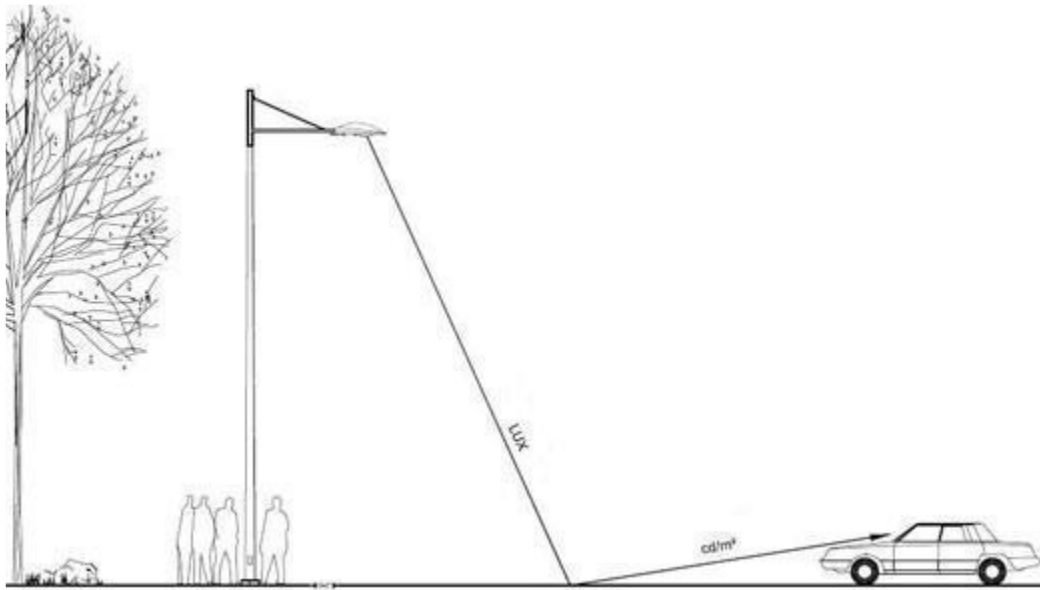
Η φωτεινή ένταση ορίζεται ως το διανυσματικό μέγεθος που καθορίζει την ποσότητα της φωτεινής ροής που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή προς μια κατεύθυνση στο χώρο, που ορίζεται από τη στέρεα γωνία (sr). Μονάδας μέτρησής της είναι η candela (Cd) που ισοδυναμεί με Lm/sr.

Ένταση φωτισμού επιφάνειας (*Illuminance*)

Η ένταση φωτισμού επιφάνειας ορίζεται ως το κλάσμα της φωτεινής ροής Φ που προσπίπτει σε στοιχειώδη επιφάνεια dA, όπως μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι, χωρίς να εξαρτάται αυτό από την κατεύθυνση από την οποία πηγάζει η φωτεινή ροή προς την επιφάνεια. Ενώ η φωτεινή ροή και ένταση είναι ιδιότητες της φωτεινής πηγής, η ένταση φωτισμού επιφάνειας εκφράζει το αποτέλεσμα του φωτισμού στο δρόμο και η μέτρησή του χρησιμεύει στη αξιολόγηση του αποτελέσματος της λειτουργίας των φωτιστικών. Μονάδα μέτρησής της είναι το Lux και ισχύει ότι $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen/m}^2$.

Λαμπρότητα (*Luminance*)

Η λαμπρότητα (Εικόνα 2.3) ορίζεται ως η ένταση του φωτός στην κατεύθυνση του παρατηρητή, προς την επιφάνεια της πηγής που βλέπει ο παρατηρητής. Η λαμπρότητα είναι το μόνο φωτομετρικό μέγεθος που αντιλαμβάνεται το μάτι και εκφράζει τη φωτεινότητα ύστερα από αντανάκλαση σε μια δοσμένη επιφάνεια και σε συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το μέγεθος αυτό είναι διανυσματικό και μονάδα μέτρησής του είναι η candela/m² (Cd/m²).

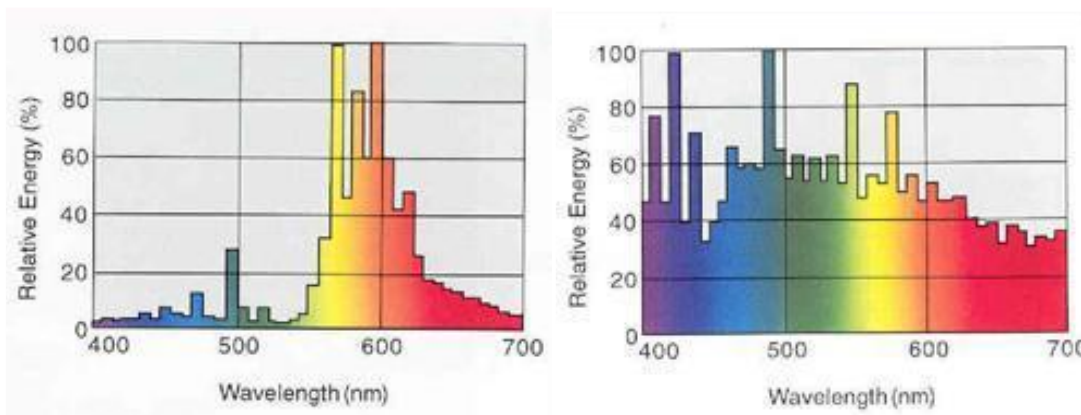


Εικόνα 2.3 Λαμπρότητα (Τοπαλής, 1994)

Ενεργειακή φασματική κατανομή

Η ενεργειακή φασματική κατανομή εκφράζει το σύνολο των μηκών κύματος ακτινοβολίας που περιλαμβάνει το φως μίας φωτεινής πηγής. Το φως του ήλιου περιέχει όλο το ορατό φάσμα και πολύ περισσότερα μήκη κύματος πάνω και κάτω από αυτό. Αντίθετα οι τεχνητές πηγές φωτισμού (λαμπτήρες), έχουν ένα πολύ περιορισμένο φάσμα, απόρροια του οποίου είναι ότι το φως ποικίλει στη χρωματική ακτινοβολία που περιέχει, ανάλογα με την ενεργειακή φασματική κατανομή του. Αυτή η κατανομή διαφοροποιεί και το ποσοστό της χρωματικής ακτινοβολίας που έχει παράγει κάθε λαμπτήρας και αντιλαμβανόμαστε μέσω της όρασης.

Έτσι, λαμπτήρες διαφορετικής τεχνολογίας και χαρακτηριστικών έχουν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς τους σε διαφορετικά μήκη κύματος και διαφορετική φασματική κατανομή και χρωματική απόδοση σε σχέση με άλλα. Χαρακτηριστικά, ένας λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης, έχει μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς του στο πορτοκαλί χρώμα, σε σύγκριση με ένα λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων που παρουσιάζει πιο ομοιόμορφη κατανομή και προσεγγίζει το λευκό χρώμα (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4 Φασματική κατανομή λαμπτήρα HPS και μεταλλικών αλογονιδίων (Τοπαλής 1994)

Δείκτης χρωματικής απόδοσης (Color rendering index)

Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης Ra ή CRI εκφράζει τη δυνατότητα μιας φωτεινής πηγής να απεικονίζει τα χρώματα των αντικειμένων χωρίς να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις αποχρώσεις τους σε σχέση με την πραγματική τους εικόνα (Εικόνα 2.5). Ο δείκτης αυτός εκφράζει το χρωματικό εύρος μιας πηγής ή αλλιώς τη δυνατότητα να επεκτείνεται σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Έτσι, η χαμηλή τιμή του CRI σημαίνει ότι τα αντικείμενα φαίνονται λιγότερο ρεαλιστικά, ενώ υψηλή τιμή σημαίνει ότι αποδίδονται περισσότερο ρεαλιστικά. Η μέγιστη τιμή του είναι το 100. Ο κάθε τύπος λαμπτήρα εμφανίζει διαφορετικό δείκτη, με τους λαμπτήρες LED να παρουσιάζουν τιμές πάνω από 80, τους λαμπτήρες φθορίου να έχουν δείκτη CRI από 50 έως και 90 και του νατρίου χαμηλής πίεσης να εμφανίζουν αρνητικές τιμές του δείκτη χρωματικής απόδοσης.



Εικόνα 2.5 Δείκτης χρωματικής απόδοσης (Τοπαλής, 1994)

Θερμοκρασία χρώματος (*Color Correlation Temperature*)

Η θερμοκρασία χρώματος T_c , που μετράται σε βαθμούς Kelvin (K), είναι ένα μέτρο για να περιγραφεί το χρώμα μιας πηγής φωτός συγκρίνοντας το με το ιδανικό μοντέλο του μέλανος σώματος (Εικόνα 2.6). Εκφράζει την ισοδύναμη θερμοκρασία, στην οποία όταν βρεθεί ένα μέλαν σώμα, θα παράγεται φως ίδιου χρώματος με την φωτεινή πηγή. Σε αυτή διακρίνονται 3 χρωματικές ομάδες:

- Ζεστό λευκό (warmwhite): για θερμοκρασία χρώματος $< 3.300\text{ K}$
- Ουδέτερο λευκό (neutralwhite): για $3.300\text{ K} < \text{θερμοκρασία χρώματος} < 5.000\text{ K}$
- Λευκό ημέρας (daylightwhite): για θερμοκρασία χρώματος $> 5.000\text{ K}$



Εικόνα 2.6 Θερμοκρασία χρώματος (Τοπαλής κ.α., 2010)

2.3.3 Φωτομετρικά μεγέθη που σχετίζονται με τον οδοφωτισμό

Αντίθεση (Contrast)

Για να γίνει ένα αντικείμενο αντιληπτό στο δρόμο, θα πρέπει να έχει διαφορετική λαμπρότητα από το περιβάλλον του, ώστε να ξεχωρίζει από αυτό. Η διαφορά αυτή λέγεται αντίθεση λαμπρότητας και υπολογίζεται από τη διαφορά της φωτεινότητας του αντικειμένου με το περιβάλλον, προς τη φωτεινότητα του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με αυτόν τον τύπο, για ένα αντικείμενο το οποίο είναι πιο «σκούρο» από το περιβάλλον του η αντίθεση έχει αρνητική τιμή, ενώ για ένα αντικείμενο το οποίο είναι πιο «φωτεινό» από το περιβάλλον του, αυτή έχει θετική τιμή.

Ένα στοιχείο που αφορά άμεσα τα κριτήρια για την επιλογή του οδοφωτισμού είναι η τιμή της αντίθεσης, που να επιτρέπει την αντίληψη των αντικειμένων από τους οδηγούς και τους πεζούς στο δρόμο, ώστε να υπάρχει ασφάλεια και εύρυθμη λειτουργία. Το μέγεθος της αντίθεσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η αντίληψη των οδηγών (που επηρεάζεται από την ηλικία, την υγεία, την κόπωση κ.α.), τη λαμπρότητα του δρόμου, τη θάμβωση κ.α. Η ελάχιστη αντίθεση ονομάζεται κατώφλι αντίθεσης (threshold contrast) και ορίζεται ως η αντίθεση στην οποία υπάρχει η πιθανότητα ενός ατόμου να αναγνωρίσει ένα αντικείμενο στις μισές τουλάχιστον περιπτώσεις, δηλαδή για ποσοστό 50%. Στόχος του φωτισμού στο δρόμο είναι να δημιουργείται θετική αντίθεση στα αντικείμενα, μεγαλύτερη από το κατώτατο όριο, δηλαδή την τιμή κατωφλιού αντίθεσης. Για να επιτευχθεί καλή ορατότητα απαιτείται αυτή να βρίσκεται 3-4 φορές παραπάνω από το κατώφλι. Άλλη μια παράμετρος αντίθεσης είναι το χρώμα, καθώς έτσι αυξάνεται η αντίθεση και βελτιώνεται η αντιληπτική ικανότητα του ατόμου, αν και αυτή επίσης εξαρτάται από άλλες παραμέτρους του φωτισμού.

Ομοιομορφία

Ως ομοιομορφία ορίζουμε την κατανομή της λαμπρότητας ενός αντικειμένου πάνω στο οδόστρωμα. Από την ομοιομορφία εξαρτάται το πόσο ορατό θα είναι ένα αντικείμενο από ένα παρατηρητή σε σχέση με το περιβάλλον. Το μέγεθος αυτό περιγράφεται από τους εξής συντελεστές:

- Ο γενικός συντελεστής ομοιομορφίας (U_0): ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης λαμπρότητας στο σύνολο της επιφάνειας του οδοστρώματος προς τη μέση τιμή της λαμπρότητας στη συγκεκριμένη περιοχή.
- Ο συντελεστής διαμήκουσ ομοιομορφίας (U_l): ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης προς τη μέγιστη λαμπρότητα σε ευθείες παράλληλες προς τον άξονα του δρόμου και εκφράζει την ομοιομορφία που αντιλαμβάνεται ο οδηγός κινούμενος κατά τον άξονα του οδοστρώματος. Ο συντελεστής αυτός παίζει σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση του οδοφωτισμού, αφού σχετίζεται με την ασφαλή και άνετη διέλευση των οδηγών στο δρόμο.
- Ο συντελεστής εγκάρσιας ομοιομορφίας (U_v): ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης προς τη μέγιστη λαμπρότητα σε ευθείες κάθετες προς τον άξονα της οδού. Ικανοποιητική τιμή εγκάρσιας ομοιομορφίας επιτρέπει στον οδηγό να διακρίνει την επιφάνεια του οδοστρώματος σε όλο το πλάτος.

Θάμβωση

Η θάμβωση είναι μια μορφή ενόχλησης των οδηγών και δυσκολία στην αναγνώριση των αντικειμένων στο δρόμο κατά την οδήγηση. Αυτή μπορεί να προέρχεται από υψηλές τιμές ή αντιθέσεις λαμπρότητας, είτε από την κακή κατανομή της και αποτελεί ένα κίνδυνο για τους οδηγούς που οι μελέτες οδοφωτισμού προσπαθούν να αποφύγουν. Η θάμβωση διακρίνεται σε τρεις τύπους:

- Τη θάμβωση ενόχλησης, η οποία δημιουργεί ταλαιπωρία στον οδηγό αλλά δεν εμποδίζει τη λειτουργία της όρασης.
- Τη θάμβωση ανικανότητας, που συνδέεται με την ποσότητα του φωτός στο προσπίπτει στο μάτι επηρεάζει την αντίθεση λαμπρότητας μεταξύ αντικειμένων και περιβάλλοντος και τα καθιστά δυσδιάκριτα στον οδηγό.
- Την απόλυτη θάμβωση, όπου είναι αδύνατο για τον οδηγό να διακρίνει οποιοδήποτε αντικείμενο, λόγω του υπερβολικού φωτισμού.

Η CIE (International Commission of Illumination) χρησιμοποιεί για την μέτρηση της θάμβωσης τον δείκτη TI (Threshold Increment), που εκφράζει το πόσο πρέπει να αυξηθεί η αντίθεση στα αντικείμενα και το περιβάλλον για να υπάρχει πιθανότητα 50% αυτά να γίνουν πάλι ορατά.

Φωτεινή μαρμαρυγή (flicker)

Η φωτεινή μαρμαρυγή περιγράφει το μέγεθος των διακυμάνσεων του φωτός που αποδίδει μία φωτεινή πηγή, όταν αυτή τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση (Τ.Ο.Τ.Τ.Ε. 20701-7, 2021). Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι το φως τρεμοπαίζει, έστω και αν δε γίνεται πάντα αντιληπτό από το μάτι.

Χρόνος αντίδρασης

Ως χρόνος αντίδρασης ορίζεται ο χρόνος τον οποίο χρειάζεται ένας οδηγός ώστε να αντιληφθεί ένα απρόσμενο συμβάν και να λάβει δράση ως προς αυτό. Αυτός εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, σχετιζόμενους με τον ίδιο τον οδηγό, όπως η ηλικία, η κόπωση, κ.α. Οι χρόνοι κατηγοριοποιούνται ως εξής, ανάλογα με τον τύπο συμβάντος (Green, 2000):

- Αναμενόμενο συμβάν: ο οδηγός είναι σε ετοιμότητα και γνωρίζει ότι υπάρχει πιθανότητα να χρειαστεί να αντιδράσει. Ο χρόνος αντίδρασης είναι περίπου 0.7

δευτερόλεπτα, από τα οποία τα 0.5 αφορούν την αντίληψη του συμβάντος και 0.2 είναι ο χρόνος μέχρι να υπάρξει η αντίδραση.

- Μη αναμενόμενο συμβάν: ο οδηγός αντιδρά απότομα διότι ο μπροστινός του προχώρησε σε μια μη αναμενόμενη κίνηση, όπως το απότομο φρενάρισμα. Ο χρόνος αντίληψης τότε φτάνει τα 1.25 δευτερόλεπτα, με τον χρόνο αντίδρασης να μην αλλάζει.
- Παντελώς ξαφνικό συμβάν: Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος αντίληψης αυξάνεται αρκετά περισσότερο. Επίσης ο χρόνος αντίδρασης αυξάνεται φτάνει τα 0.3 δευτερόλεπτα.

Η μείωση του χρόνου αντίληψης και αντίδρασης των οδηγών είναι βασικό στοιχείο κατά το σχεδιασμό του φωτισμού των δρόμων, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής και ομαλή κυκλοφορία.

2.3.4 Χαρακτηριστικά των φωτιστικών οδοφωτισμού

Εκτός από τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το φωτισμό και την επίδρασή του στους οδηγούς, υπάρχουν και τα παρακάτω χαρακτηριστικά των λαμπτήρων οδοφωτισμού που χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη και αφορούν τη γενικότερη λειτουργία και χρήση τους.

Χρόνος προθέρμανσης

Εκφράζει το χρόνο που απαιτείται ώστε ένα φωτιστικό να φτάσει στο 100% της φωτεινότητάς του. Ανάλογα με το είδος της λάμπας, αυτός ο χρόνος μπορεί να είναι από στιγμιαίος μέχρι και 5 λεπτά και μπορεί να επηρεάσει το σχεδιασμό μια εγκατάστασης, ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις φωτισμού, ειδικά στην περίπτωση που απαιτείται άμεση ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του φωτιστικού σώματος κατά την εντολή. Οι λάμπες LED και αλογόνου έχουν πάντως σχεδόν μηδενικό χρόνο προθέρμανσης και άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλων των ειδών τις εφαρμογές.

Θερμοκρασία λειτουργίας

Το εύρος θερμοκρασίας στην οποία λειτουργεί ένα φωτιστικό, σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στο σημείο που είναι εγκατεστημένο μπορεί να επηρεάσει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής. Ειδικά οι λαμπτήρες φθορισμού και LED έχουν ιδιαίτερη ευαισθησία σε αποκλίσεις από τις ενδεδειγμένες τιμές. Ιδιαίτερα για τα φωτιστικά σε εξωτερικό χώρο και

σε περιοχές με εχθρικό κλίμα, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η αντοχή του λαμπτήρα στο πολύ κρύο ή ζέστη και σε δύσκολες καιρικές συνθήκες εν γένει.

Διάρκεια ζωής

Κατά τη διάρκεια του χρόνου, με τη χρήση των φωτιστικών παρατηρείται φθορά που οδηγεί σε βλάβες ή σε μειωμένη αποδοτικότητα. Έτσι η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση ως το χρονικό διάστημα στο οποίο, σε ένα μεγάλο δείγμα λαμπτήρων θα εμφανιζόταν βλάβη στο 50% αυτών ή θα όταν η φωτεινότητα τους πέσει κάτω από το 70% σε ένα ποσοστό αυτών. Προφανώς αυτό είναι ένα ενδεικτικό μέγεθος που δείχνει την πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο ανάλογα με το χρόνο χρήσης του λαμπτήρα.

2.4 Φωτεινές πηγές οδοφωτισμού

2.4.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία φωτισμού έχει εξελιχθεί δραματικά από την εφεύρεση του πρώτου λαμπτήρα μέχρι σήμερα. Με την ανάπτυξη των οδικού ιστού και τις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες οδοφωτισμού, η εμφάνιση νέων τεχνολογιών φωτισμού βοηθά στη βελτίωση της λειτουργίας των αυτοκινητοδρόμων και την προσαρμογή στις μεγάλες απαιτήσεις που υπάρχουν στα νέα έργα.

2.4.2 Εισαγωγή στις κατηγορίες λαμπτήρων

Οι λαμπτήρες μπορούν να βασίζονται σε πολλές διαφορετικές τεχνολογίες για την παραγωγή φωτός. Οι βασικές κατηγορίες είναι οι εξής:

1. Λαμπτήρες πυρακτώσεως, όπου η παραγωγή φωτός επιτυγχάνεται μέσω της πυράκτωσης και ανάπτυξης υψηλής θερμοκρασίας του νήματος εντός της λάμπας, σύμφωνα με το νόμο του Joule. Με τη μέθοδο αυτή δεν απαιτείται οποιαδήποτε βοηθητική διάταξη για τη λειτουργία. Αυτός ο τύπος χωρίζεται σε κοινούς και σε λαμπτήρες αλογόνου.
2. Λαμπτήρες εκκένωσης, όπου η παραγωγή φωτός οφείλεται στο φαινόμενο της εκκένωσης, όταν τα άτομα του στοιχείου εντός του λαμπτήρα ιονίζονται και διεγείρονται. Αυτού του είδους οι λαμπτήρες διακρίνονται σε Υψηλής Πίεσης και Χαμηλής Πίεσης, ανάλογα με την πίεση στην οποία βρίσκεται το υλικό εντός του

λαμπτήρα. Στους λαμπτήρες υψηλής πίεσης επικρατεί πίεση περίπου 200mm Hg, ενώ στους χαμηλής επικρατεί πίεση περίπου 5-10mm Hg. Μερικά χαρακτηριστικά είδη που χρησιμοποιούνται στον φωτισμό είναι τα παρακάτω:

- Λαμπτήρες Μεταλλικών Αλογονιδίων
 - Λαμπτήρες Ατμών Υδραργύρου Υψηλής Πίεσης
 - Λαμπτήρες Μεικτού Φωτισμού ή Βολφραμίου
 - Λαμπτήρες Ατμών Νατρίου Χαμηλής Πίεσης
 - Λαμπτήρες Ατμών Νατρίου Υψηλής πίεσης
 - Λαμπτήρες φθορισμού
 - Λαμπτήρες επαγωγής
3. Λαμπτήρες LED, που αξιοποιούν την τεχνολογία φωτισμού στερεάς κατάστασης (Solid State Lighting), μέσα από μια διάταξη με ημιαγωγούς και αναλύονται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως που εκπέμπουν φως με τη θέρμανση του νήματος, οι λαμπτήρες εκκένωσης έχουν σημαντικές διαφορές, καθώς για να την παραγωγή φωτός χρειάζεται η διέγερση του αερίου. Αυτό έχει κάποιες ιδιαιτερότητες, όπως ότι παρουσιάζουν αρνητική αντίσταση εκκένωσης και για αυτό το λόγο, για να λειτουργήσουν σωστά χρειάζονται συνδεδεμένη σε σειρά στο κύκλωμά τους μια διάταξη, που ονομάζεται στραγγαλιστικό πηνίο ή αλλιώς Ballast. Η μόνη περίπτωση που δε χρησιμοποιείται Ballast είναι στους λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσεως, όπου εκεί χρησιμοποιείται αυτομετασχηματιστής.

Τα στραγγαλιστικά πηνία χωρίζονται στα ηλεκτρομαγνητικά και στα ηλεκτρικά υψηλής και χαμηλής συχνότητας. Τα ηλεκτρικά επίσης χωρίζονται σε κανονικά και σε αυτά που μπορούν να είναι ρυθμιζόμενα (dimnable).

Πολλά χαρακτηριστικά του λαμπτήρα, όπως η φωτεινή ισχύς και η διάρκεια ζωής του εξαρτώνται από την επιλογή του κατάλληλου Ballast, που θα παρουσιάζει τα αντίστοιχα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Οι βοηθητικές αυτές διατάξεις, έχουν επίσης μια κατανάλωση ενέργειας και έτσι ο λόγος Lumen/Watt καταλήγει να είναι μικρότερος από αυτόν που έχει ο λαμπτήρας.

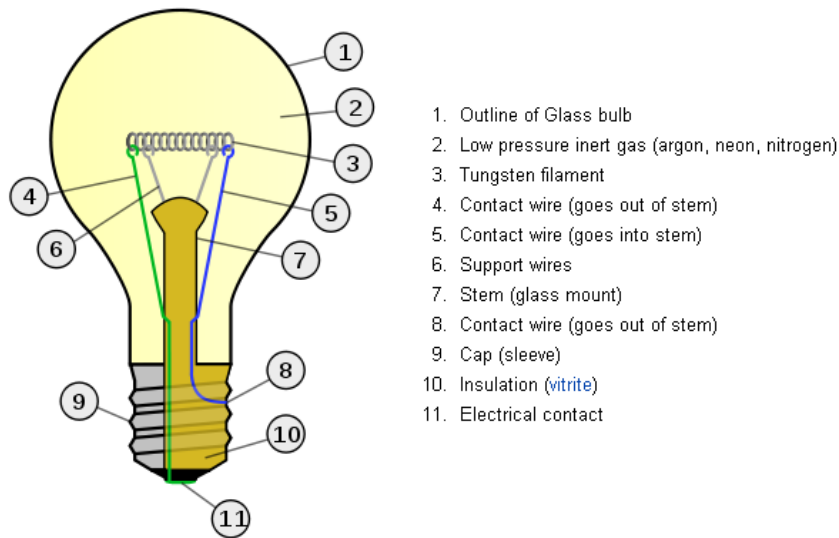
Επίσης, η τάσης έναυσης των λαμπτήρων εκκένωσης επηρεάζεται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και για το λόγο αυτό, σε εξωτερικές εγκαταστάσεις σε περιοχές με ψυχρό κλίμα ενδείκνυται η χρήση υψηλότερης τάσης έναυσης, από τις ονομαστικές. Τα

Ballast σε εφαρμογές οδοφωτισμού είναι μελετημένα ώστε να λειτουργούν, παρέχοντας την αναγκαία τάση έναυσης, μέχρι και σε θερμοκρασίες της τάξης των -29C° .

Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί μια συνοπτική επισκόπηση των βασικών χαρακτηριστικών των πιο διαδεδομένων τύπων λαμπτήρα, από αυτούς που αναφέρθηκαν.

2.4.2.1 Λαμπτήρες πυρακτώσεως

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως (Εικόνα 2.7) είναι η παλαιότερη μέθοδος ηλεκτροφωτισμού, που εφευρέθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα κοινό λαμπτήρα αυτού του είδους είναι η βάση, το νήμα, τα άκρα στήριξης, το γυάλινο περίβλημα και το αέριο εντός του. Η λειτουργία του για την παραγωγή φωτός στηρίζεται στο φαινόμενο Joule, σύμφωνα με το οποίο, όταν περνάει ηλεκτρικό ρεύμα από έναν αντιστάτη, αυτός αυξάνει τη θερμοκρασία του. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, εντός του λαμπτήρα βρίσκεται ένα νήμα σε σπειροειδή διάταξη, συνήθως φτιαγμένο από βολφράμιο, που έχει υψηλή θερμοκρασία τήξης και όταν διαρρέεται από ρεύμα, αναπτύσσει θερμοκρασίες που οδηγούν στην παραγωγή ορατού φωτός. Με την άνοδο της θερμοκρασίας έχουμε και περισσότερη ακτινοβολία ενέργειας, αυτή όμως έχει ένα όριο, πέρα από το οποίο το νήμα εξαχνώνεται και καταστρέφεται. Αυτό το φαινόμενο προσπαθεί να αντιμετωπίσει η ύπαρξη αδρανών αερίων εντός του λαμπτήρα. Η χρήση των λαμπτήρων πυρακτώσεως ήταν κυρίαρχη τα προηγούμενα χρόνια, κυρίως λόγω του θερμού χρώματος φωτισμού και της λειτουργικότητάς τους, αλλά τείνουν να αντικατασταθούν πλήρως από νέες τεχνολογίες με καλύτερη ενεργειακή και χρωματική απόδοση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία. Μια εξέλιξη σε αυτό το είδος ήταν οι λαμπτήρες αλογόνου. Αν και οι βασική τους λειτουργία δεν διαφέρει από τους κοινούς, η χρήση ατμών αλογόνου επιβραδύνουν την εξάχνωση του νήματος, δημιουργώντας νέες επικαθίσεις υλικού σε αυτό, βελτιώνοντας τη λειτουργία και διπλασιάζοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του.

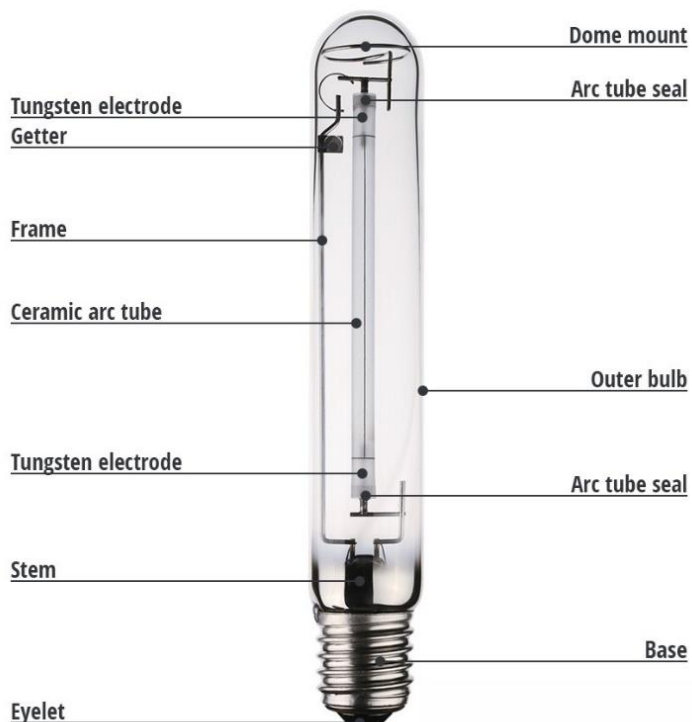


Εικόνα 2.7 Λαμπτήρας πυρακτώσεως (“An Incandescent light bulb”, n.d.)

2.4.2.2 Λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης

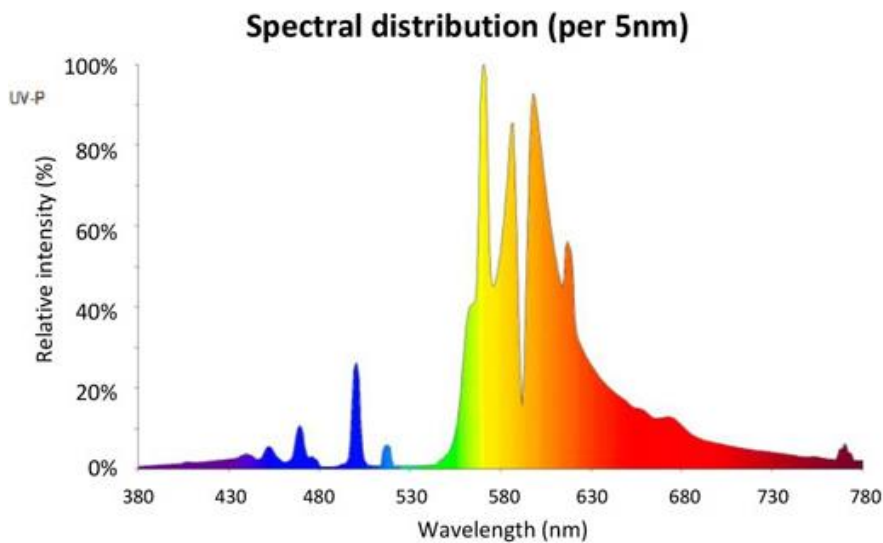
Η λειτουργία αυτών των λαμπτήρων, βασίζεται στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τους ατμούς του νατρίου. Η δομή του (Εικόνα 2.8) αποτελείται από δύο σωλήνες όπου ο ένας περικλείει τον άλλο και ο εσωτερικός κατασκευάζεται από πολυκρυσταλλική αλουμίνα, ένα υλικό που έχει αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, υψηλό σημείο τήξης και μεγάλη απόδοση παραγωγής φωτός, λόγω της διαφάνειάς του. Μεταξύ των δύο σωλήνων παρεμβάλλεται ένα σφράγισμα, που μπορεί να είναι γυάλινο, από ατσάλι ή και κεραμικό, το οποίο δίνει στην αλουμίνα μεγαλύτερη αντοχή στην υψηλή θερμοκρασία. Εντός του σωλήνα, υπάρχει ξένο, που χρησιμεύει ως αέριο έναυσης και επίσης ένα μίγμα νατρίου και υδραργύρου. Όταν ο λαμπτήρας φτάσει σε θερμοκρασία λειτουργίας, αυτό το μίγμα έχει μετατραπεί κατά ένα ποσοστό σε ατμό και ο υδράργυρος έχει τη λειτουργία του αερίου απομόνωσης, αυξάνοντας την πίεσης και την τάση λειτουργίας του. Αντίθετα, ο εξωτερικός σωλήνας ή κάλυμμα είναι κενός, ώστε να απομονώνεται ο εσωτερικός κύλινδρος από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και να εμποδίζεται η αντίδραση των μετάλλων που περιέχει.

HIGH PRESSURE SODIUM LAMP STRUCTURE



Εικόνα 2.8 Λαμπτήρας ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (“Sodium Vapour Lamp Working Principle”, 2018)

Το φάσμα εκπομπής ακτινοβολίας (Εικόνα 2.9) απλώνεται σε όλο το ορατό φάσμα, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερη ένταση κυρίως μεταξύ 550nm και 650nm. Με την αύξηση της πίεσης του νατρίου έχουμε μετατόπιση μεγαλύτερου ποσοστού της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε μεγαλύτερα μήκη κύματος αλλά με τίμημα τη μείωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής του λαμπτήρα.



Εικόνα 2.9 Φάσμα λαμπτήρα νατρίου (“BLV HPS 600W”, 2020)

Σε αυτόν τον τύπο λαμπτήρα δεν έχουμε ηλεκτρόδιο έναυσης, αλλά χρησιμοποιείται παλμός υψηλής συχνότητας, ώστε να ιονιστεί το ξένο που υπηρετεί το ρόλο του αερίου έναυσης. Όταν λειτουργήσει, ο λαμπτήρας ανεβάζει θερμοκρασία, μέχρι να επιτύχει τη μέγιστη απόδοση, κατά τη διάρκεια της οποίας το χρώμα που εκπέμπει μεταβάλλεται σταδιακά μέχρι να φτάσει σε σταθερό σημείο.

Η τάση των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης επηρεάζεται από την ισχύ, για αυτό και έχουν οριστεί παράμετροι για μέγιστη και ελάχιστη ισχύ λειτουργίας. Επίσης, η διάρκεια ζωής τους επηρεάζεται αρνητικά από την αύξηση της τάσης λειτουργίας, που προκαλείται από τις εκπομπές του ηλεκτροδίου που μαυρίζουν το γυαλί. Αυτό απορροφά ακτινοβολία, που θερμαίνει περαιτέρω το άκρο του γυαλιού και οδηγεί σε μεγαλύτερη εξάτμιση νατρίου. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αυξάνεται η πίεση και άρα και η τάση. Ακόμη, παράγοντες αύξησης της τάσης είναι η παρουσία σκόνης στον σωλήνα και η διάχυση νατρίου από τα στεγανοποιημένα άκρα. Ο χρόνος ζωής ενός λαμπτήρα ατμών νατρίου υψηλής πίεσης είναι περίπου 24000 ώρες, ανάλογα και με το μοντέλο και το σχεδιασμό του.

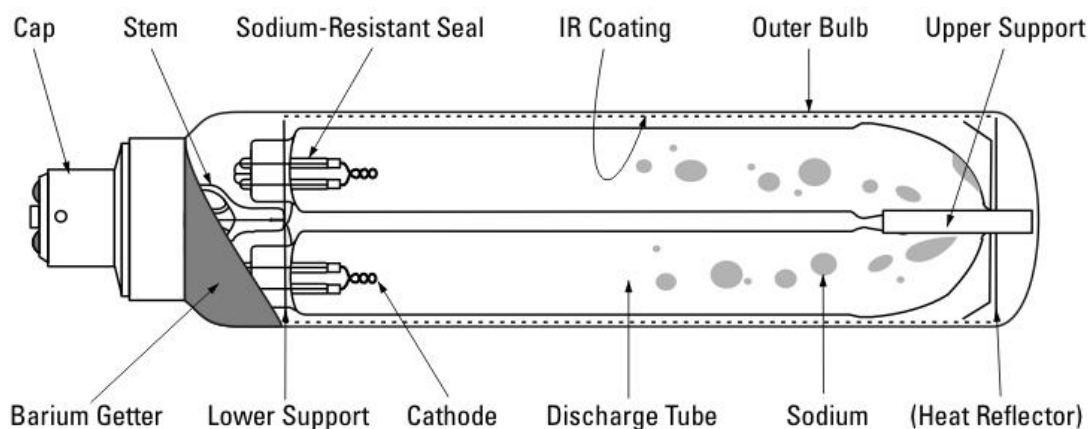
Σημαντικό πλεονέκτημα των λαμπτήρων ατμών νατρίου υψηλής πίεσης είναι η υψηλή απόδοσή τους, που μπορεί να κυμαίνεται έως και στα 150 lm/W.

Από την άλλη μεριά, ως μειονέκτημα τους θεωρείται η χαμηλή χρωματική απόδοση, καθώς για μικρότερη φωτεινότητα ή κατανάλωση απαιτούμενη ισχύς δεν έχει αντίστοιχη μείωση και είναι δυσανάλογη σε σχέση με τη φωτεινή ροή. Επίσης, παρουσιάζουν μια δυσκολία να ενταχθούν σε συστήματα εφαρμογής προσαρμοσμένου φωτισμού και dimming, καθώς η

εφαρμογή του σε ισχύ μικρότερη από τη μισή της ονομαστικής έχει αρνητική επίδραση στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής. Ακόμη, ένας λόγος είναι η εμφάνιση φωτεινής μαρμαρυγής (flicker), δηλαδή η γρήγορη μεταβολή του φωτισμού μιας πηγής, που προκαλεί δυσφορία στον άνθρωπο και είναι απευκταία για τα φωτιστικά σώματα.

2.4.2.3 Λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης

Η λειτουργία τους (Εικόνα 2.10) βασίζεται στη δημιουργία τόξου από το νάτριο που βρίσκεται σε κατάσταση ατμών, σε χαμηλή πίεση. Το φως που παράγεται από εκεί έχει πολύ μικρό φάσμα, που θεωρείται μονοχρωματικό, κοντά στα 589 nm (με διπλή γραμμή). Ως αέριο έναυσης χρησιμοποιείται το νέο, με μικρά πρόσθετα από άλλα στοιχεία ξένου, αργού ή ηλίου. Η βέλτιστη λειτουργία του λαμπτήρα, για μέγιστη απόδοση, η πίεση του νατρίου πρέπει να κυμαίνεται στα 0,7Pa, που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα εκκένωσης κοντά στους 260 °C. Επειδή οποιαδήποτε αλλαγή της πίεσης έχει επίδραση στην απόδοση του λαμπτήρα, ο σωλήνας εκκένωσης βρίσκεται συνήθως σε κενό, για να διατηρείται η θερμοκρασία και η πίεση σταθερή.



Εικόνα 2.10 Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης (“Welcome to the Museum of Electric Lamp Technology”, n.d.)

Οι λαμπτήρες αυτοί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα τους, στους επιμήκεις και σε αυτούς με σχήμα U. Οι επιμήκεις έχουν ηλεκτρόδια σε κάθε άκρο του σωλήνα εκκένωσης, από ειδικό, ανθεκτικό στο νάτριο, γυαλί, ενώ εξωτερικά έχει περίβλημα με κενό. Από την άλλη, οι λαμπτήρες σχήματος U έχουν το σωλήνα σε αυτό το σχήμα και τα ηλεκτρόδια είναι στην ίδια πλευρά.

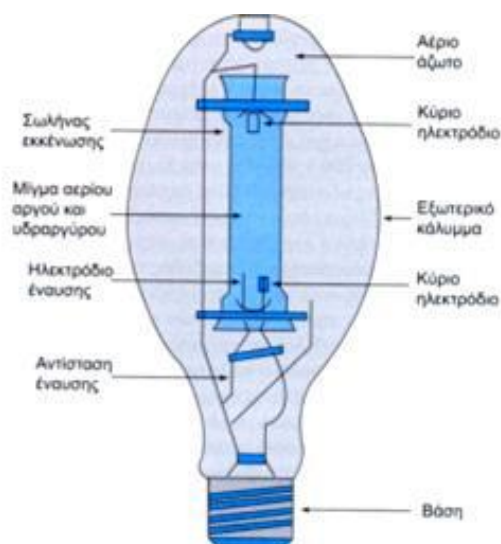
Βασικό ζήτημα είναι η διατήρηση της ομοιομορφίας κατανομής του νατρίου στο σωλήνα, ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευσή του στα ψυχρά σημεία, που οδηγεί με τη σειρά της σε

χαμηλή περιεκτικότητα ατμών νατρίου και θύλακες νέου ή αργού. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με εξογκώματα στην εξωτερική πλευρά του σωλήνα ή με την εφαρμογή στην εσωτερική πλευρά του περιβλήματος ενός θερμοανακλαστικού φιλμ.

Για να φτάσουμε στη βέλτιστη απόδοση από την ενεργοποίηση του φωτιστικού μεσολαβούν 7-15 λεπτά, ενώ το χρώμα που αποδίδει ξεκινάει στο κόκκινο και μετατοπίζεται στο φάσμα σταδιακά προς το κίτρινο, όσο το νάτριο εξατμίζεται. Σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας, οι λαμπτήρες λειτουργούν κανονικά αμέσως, χωρίς πρόβλημα, όσο βρίσκονται ακόμα σε κατάλληλη θερμοκρασία.

2.4.2.4 Λαμπτήρες ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες περιπτώσεις, στους λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης (Εικόνα 2.11), έχουμε παραγωγή φωτός από τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τους ατμούς υδραργύρου. Αποτελούνται από ένα εξωτερικό και ένα εσωτερικό περίβλημα, όπου το εσωτερικό περικλείει το τόξο που σχηματίζεται και το εξωτερικό επιτελεί πολλούς ρόλους, θωρακίζοντας το εσωτερικό από θερμοκρασιακές μεταβολές, αποτρέποντας την οξείδωση του εσωτερικού και αποκόπτοντας κομμάτια υπερϊώδους ακτινοβολίας που παράγονται.



Εικόνα 2.11 Λαμπτήρας υδραργύρου υψηλής πίεσης (Τοπαλής, 1994)

Κατά την έναρξη της λειτουργίας, πριν ακόμα φτάσουμε στη βέλτιστη θερμοκρασία, η έναυση γίνεται με τη χρήση αργού, που ιονίζεται και δημιουργεί τόξο. Έπειτα, με την σταδιακή άνοδο της θερμοκρασίας έχουμε την σταδιακή εξάτμιση του υδραργύρου. Όταν

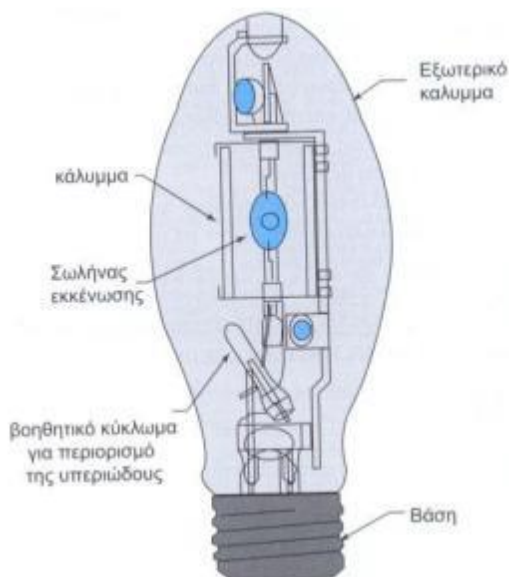
ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, τότε η παραγωγή φωτός γίνεται από τους ατμούς υδραργύρου. Ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να εξατμιστεί ο υδράργυρος (χρόνος έναυσης) και ο λαμπτήρας να αποδώσει το 80% της μέγιστης φωτεινής του ροής είναι περίπου 4 λεπτά.

Το φως που αποδίδουν οι λαμπτήρες υδραργύρου βρίσκεται στο ορατό φάσμα, αλλά ένα σημαντικό κομμάτι του βρίσκεται στο υπεριώδες. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιούνται καλύμματα από φώσφορο στην εσωτερική επιφάνεια του περιβλήματος, που απορροφούν μέρος αυτής της ακτινοβολίας και την μετατρέπουν σε ορατό φως. Έτσι έχουμε καλύτερη απόδοση και χρώματα.

Στα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας λαμπτήρων είναι η μείωση της έντασης φωτισμού με την πάροδο του χρόνου και για ίδια κατανάλωση ενέργειας, ειδικά μετά το πέραςμα της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής τους. Επίσης, το χρώμα που αποδίδεται προσεγγίζει κυρίως το μπλε και το πράσινο, δεν είναι θερμό και έτσι χρησιμοποιείται κυρίως για φωτισμό εξωτερικών χώρων και βιομηχανικών κτιρίων.

2.4.2.5 Λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων

Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων (Εικόνα 2.12) έχουν πολλές ομοιότητες στη δομή και λειτουργία τους, με τους λαμπτήρες υδραργύρου, με μόνη διαφορά ότι στον σωλήνα εκκένωσης βρίσκονται, πέρα από τον υδράργυρο και το αργό και μεταλλικά αλογονίδια. Κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα, οι ατμοί τους έχουν μια κυκλική λειτουργία, όπου αρχικά φτάνουν σε υψηλή θερμοκρασία κοντά στον πυρήνα εκκένωσης και διασπώνται σε αλογόνα και μέταλλα, που εκπέμπουν στο δικό τους φάσμα, ενώ στη συνέχεια τα αλογόνα φτάνουν στα τοιχώματα, επανασυνδέονται και ξαναρχίζουν την ίδια πορεία.



Εικόνα 2.12 Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων (Τοπαλής, 1994)

Τα χρώματα που αποδίδουν οι λαμπτήρες αυτής της τεχνολογίας, εξαρτώνται από τα συγκεκριμένα αλογονίδια που χρησιμοποιούνται κάθε φορά. Με τον κατάλληλο συνδυασμό, επιτυγχάνεται η απόδοση πιο πλήρους φάσματος φωτός. Ενισχυτικά σε αυτό, αλλά και για προστασία από τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, χρησιμοποιούνται και εδώ φωσφορικές επικαλύψεις στο εξωτερικό περίβλημα. Η απόδοση τέτοιων λαμπτήρων εμπορίου, κυμαίνεται από 75 μέχρι και 125 lm/W, χωρίς να υπολογίζονται απώλειες από το ballast. Η μεγάλη πλειοψηφία των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων με λευκό φως παράγουν απόδοση χρώματος εξίσου καλή ή και ανώτερη από αυτή που παράγουν οι λαμπτήρες υδραργύρου με επικάλυψη φωσφόρου.

Η τάση έναυσης τους είναι υψηλότερη από του υδραργύρου, λόγω της παρουσίας αλογονιδίων. Κατά την έναρξη λειτουργίας, μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία, έχουμε μεταβολές στο χρώμα που αποδίδεται. Αυτό επιτυγχάνεται μετά από 2-10 λεπτά. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, ο χρόνος επανέναυσης είναι μεγαλύτερος, περίπου 15 λεπτά.

Σε σχέση με άλλες τεχνολογίες φωτισμού με εκκένωση, έχουν καλύτερη ποιότητα φωτισμού και μεγαλύτερη ποικιλία χρωμάτων, ενώ το χρώμα τους είναι πιο οικείο στο ανθρώπινο μάτι.

2.4.2.6 Λαμπτήρες φθορισμού

Αυτού του είδους οι λαμπτήρες ανήκουν στην κατηγορία της χαμηλής πίεσης και έχουν αντίστοιχη λειτουργία. Μια άλλη ονομασία που έχουν είναι λαμπτήρες οικονομίας. Διακρίνονται σε δύο είδη (Εικόνα 2.13), τους λαμπτήρες σωλήνα και τους συμπαγείς. Από τα δύο είδη οι τύπου σωλήνα θεωρούνται πιο αποδοτικοί. Η παραγωγή φωτεινής ενέργειας προέρχεται από την ηλεκτρική εκκένωση μέσα στο αέριο, το οποίο είναι υδράργυρος μαζί με κάποιο αδρανές αέριο, όπως το αργό. Η έναρξη της λειτουργίας δε μπορεί να γίνει μόνη της και υπάρχει η ανάγκη ενός εκκινητή (starter), που είναι ένα έλασμα. Για να διατηρηθεί η ένταση του ρεύματος, μέσα στο σωλήνα, στην τιμή που επιθυμούμε, είναι απαραίτητο ένα στραγγαλιστικό πηνίο (ballast), όπως και σε άλλους λαμπτήρες εκκενώσεως.



Εικόνα 2.13 Συμπαγείς CFL και σωληνωτοί (Τοπαλής, 1994)

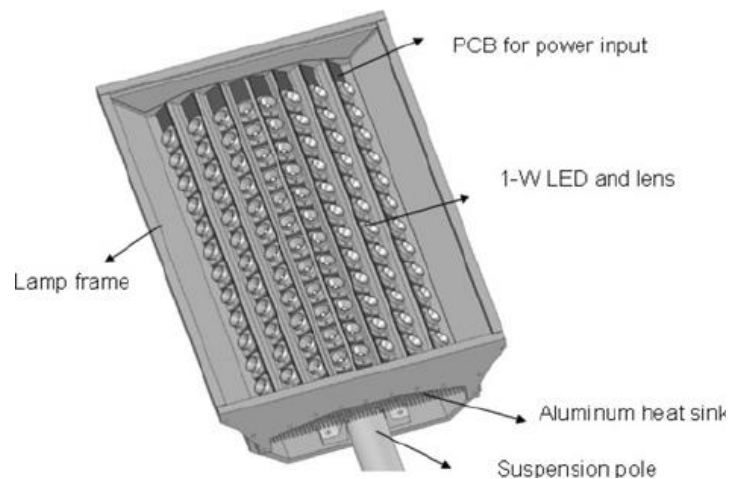
2.4.2.7 Λαμπτήρες επαγωγής

Οι λαμπτήρες επαγωγής, είναι μια τεχνολογία που έχει το χαρακτηριστικό να μην απαιτείται η ύπαρξη ηλεκτροδίων για την εκκένωση ώστε να λειτουργήσουν. Αυτό τους δίνει πολύ μεγαλύτερο χρόνο ζωής συγκριτικά με τους λαμπτήρες εκκένωσης, οι οποίοι παρουσιάζουν σταδιακά φθορά στα ηλεκτρόδια τους και τελικά μειωμένο χρόνο ζωής.

Από την άλλη μεριά, όμως, παρουσιάζουν πολύ υψηλό κόστος, που δεν επιτρέπει την χρήση τους σε κλασικές εφαρμογές, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου ο λαμπτήρας είναι δύσκολα προσβάσιμος και έτσι απαιτείται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Για τον ίδιο λόγο, δεν είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται στον οδοφωτισμό.

2.4.2.8 Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι LED

Αυτός ο τύπος λαμπτήρα έχει τελείως διαφορετικές αρχές λειτουργίας από τους λαμπτήρες εκκένωσης και πυρακτώσεως. Η λειτουργία του βασίζεται στο ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνά ένα συνδυασμό ημιαγωγών p-n και δεν απαιτεί κάποια βοηθητική διάταξη, ούτε αέρια προς εκκένωση. Οι λαμπτήρες LED (Εικόνα 2.14) έχουν ήδη αρχίσει να κυριαρχούν στην αγορά λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της διάρκειας ζωής τους. Σε μεγάλο βαθμό η τεχνολογία αυτή τείνει να αντικαταστήσει τις παλαιότερες σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού, ειδικά όσο μειώνεται το κόστος παραγωγής και βελτιώνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της. Η τεχνολογία LED αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.14 Φωτιστικό σώμα LED (“Schematic diagram of 114-W LED street lamp”, n.d.)

2.5 Φωτιστικά σώματα και οδοφωτισμός

Εκτός από τον λαμπτήρα, που είναι το μέσο παραγωγής φωτεινής ενέργειας, για να επιτύχουμε το φωτισμό των δρόμων χρειαζόμαστε ένα ολόκληρο φωτιστικό σώμα, που είναι μια διάταξη που αποτελείται από διάφορα στοιχεία, που στηρίζουν το λαμπτήρα, περιλαμβάνουν τις απαραίτητες βοηθητικές ηλεκτρονικές διατάξεις για τη λειτουργία του, ενισχύουν το φωτισμό και προστατεύουν το σύστημα από εξωτερικούς παράγοντες. Τα βασικά στοιχεία ενός φωτιστικού σώματος είναι:

- Το φωτιστικό, τα χαρακτηριστικά του οποίου αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους
- Ο ανακλαστήρας, που είναι φτιαγμένος από αλουμίνιο και αξιοποιείται στην κατεύθυνση του φωτός στα σημεία που επιθυμούμε κάθε φορά να φωτιστούν
- Το κάλυμμα, που είναι διάφανο, φτιαγμένο από γυαλί ή πλαστικό και προστατεύει τον λαμπτήρα από εξωτερικούς παράγοντες
- Το κυρίως σώμα, το οποίο περικλείει την όλη διάταξη, είναι συνήθως κατασκευασμένο από αλουμίνιο, με επικάλυψη ηλεκτροστατικής βαφής
- Ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου ή controller (σε ορισμένες περιπτώσεις)

2.5.1 Κατανομή φωτός σωμάτων φωτισμού

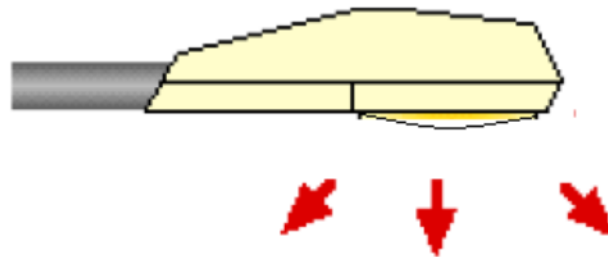
Τα φωτιστικά που χρησιμοποιούνται για τον οδοφωτισμό και γενικά το φωτισμό εξωτερικών χώρων, έχουν τα εξής χαρακτηριστικά, που δίνονται κάθε φορά από τον κατασκευαστή:

- Τη διάχυση του φωτός
- Την κάθετη διασπορά του φωτός
- Την πλευρική διασπορά του φωτός
- Το συντελεστή χρησιμοποίησης (coefficient of utilisation ή για συντομία CU)

2.5.1.1 Διάχυση

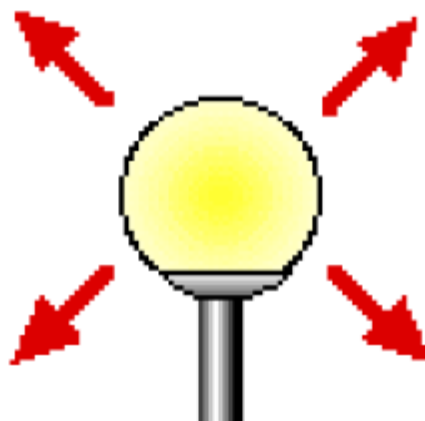
Τα φωτιστικά σώματα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε την επιθυμητή, κάθε φορά, διάχυση του φωτός, ανάλογα με τις απαιτήσεις μας. Τα φωτιστικά διαχωρίζονται σε τέσσερα είδη, όπου το καθένα έχει διαφορετική γωνία που εκπέμπεται φως. Τα είδη αυτά είναι τα cut-off, non-cutoff, semi-cutoff και full-cutoff:

- Αποκοπής (cutoff): Αυτού του είδους τα φωτιστικά (Εικόνα 2.15) διαχέουν ένα πολύ μικρό ποσοστό του φωτός στην κατεύθυνση πάνω από τις 90°, με μέγιστο το 2,5%. Ο τύπος αυτός προσφέρει ευρύτερη διάδοση φωτός από άλλους, όπως της πλήρους αποκοπής και για το λόγο αυτό αξιοποιείται σε εφαρμογές που είναι επιθυμητή η μεγάλη απόσταση μεταξύ των τοποθετούμενων ιστών, όπως για παράδειγμα σε χώρους στάθμευσης.



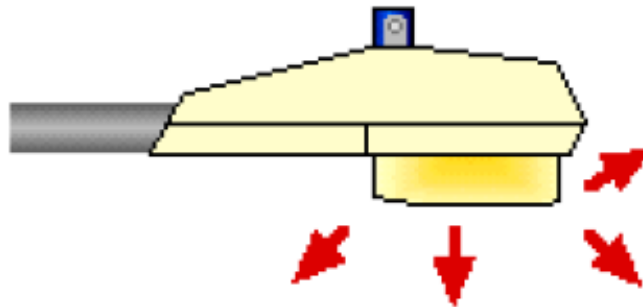
Εικόνα 2.15 Φωτιστικό τύπου cutoff (Τοπαλής, 1994)

- Μη αποκοπής (non-cutoff): Αυτού του είδους τα φωτιστικά (Εικόνα 2.16) διαχέουν το φως προς όλες τις κατευθύνσεις, συνεπώς δεν είναι τα πιο αποδοτικά για να φωτιστεί ο χώρος από κάτω τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως για το φωτισμό ανοιχτών εξωτερικών χώρων, όμως αυτή η διάχυση του φωτός είναι παράγοντας φωτορύπανσης. Τα φωτιστικά non-cutoff δεν χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό γιατί δεν παρουσιάζουν την ίδια απόδοση με τους άλλους τύπους που αναφέρονται.



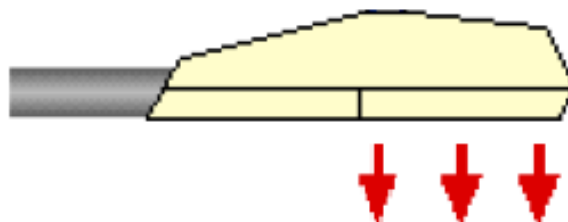
Εικόνα 2.16 Φωτιστικό τύπου non-cutoff (Τοπαλής, 1994)

- Ημιαποκοπής (semi-cutoff): Σε αυτήν την περίπτωση (Εικόνα 2.17), τα φωτιστικά διαχέουν το μεγαλύτερο ποσοστό του φωτός τους προς τα κάτω. Όμως, ένα μικρό ποσοστό, έως 5 %, κατευθύνεται πάνω από τις 90°. Το βασικό τους μειονέκτημα, είναι ότι, ενώ κατευθύνουν ικανοποιητικά το φως προς την κατεύθυνση του εδάφους, προκαλούν έντονη θάμβωση και για αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκαταστάσεις σε ιστούς μεγάλου ύψους.



Εικόνα 2.17 Φωτιστικό τύπου semi-cutoff (Τοπαλής, 1994)

- Πλήρους αποκοπής (full-cutoff): Τα φωτιστικά πλήρους αποκοπής (Εικόνα 2.18) δεν στέλνουν καθόλου φως προς τα επάνω, αλλά μόνο στην κατεύθυνση του εδάφους. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη θάμβωση και φωτορύπανση, όμως εξαιτίας της στενής κατανομής φωτός που παράγεται, απαιτείται πιο πυκνή κατανομή ιστών και φωτιστικών σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις ή εγκατάστασή τους σε ιστούς μεγαλύτερου ύψους.



Εικόνα 2.18 Φωτιστικό τύπου full-cutoff (Τοπαλής, 1994)

2.5.1.2 Κάθετη διασπορά

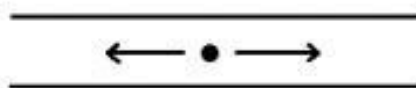
Η κάθετη διασπορά του φωτός διακρίνεται σε τρία είδη, στην βραχεία, τη μέση και τη μακρά, ανάλογα με την απόσταση που μεσολαβεί από το φωτιστικό στο σημείο με τη μέγιστη ένταση του φωτός. Από αυτό το χαρακτηριστικό, μπορούμε να προσδιορίσουμε

την απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους οι ιστοί, όταν σχεδιάζουμε το σύστημα και τη διάταξη του οδοφωτισμού.

2.5.1.3 Πλευρική διασπορά

Η πλευρική διασπορά του φωτός προσδιορίζει τη μέγιστη ακτίνα πρόσπτωσης της φωτεινής έντασης του φωτιστικού, στο πλάτος του δρόμου. Με βάση αυτό το μέγεθος, τα φωτιστικά σώματα χωρίζονται σε πέντε τύπους, που σχετίζονται με το πλάτος του δρόμου και στην τοποθέτησή τους σε αυτόν και παρατίθενται στα Σχήματα (2.1-2.5) (Τοπαλής, 1994):

Τύπος I:



Σχήμα 2.1 Τύπος 1

Ο τύπος I είναι μακρόστενος και χρησιμοποιείται σε αντίστοιχους δρόμους, όπως ποδηλατοδρόμους και διαβάσεις πεζών.

Τύπος II:



Σχήμα 2.2 Τύπος 2

Αυτός ο τύπος, έχει μεγαλύτερη διασπορά και χρησιμοποιείται σε δρόμους παρόμοιους με του τύπου I, αλλά μεγαλύτερου πλάτους.

Τύπος III:



Σχήμα 2.3 Τύπος 3

Αυτός ο τύπος, είναι πιο συνηθισμένος σε αυτοκινητόδρομους με πλάτος μεγαλύτερο από 2 λωρίδες κυκλοφορίας.

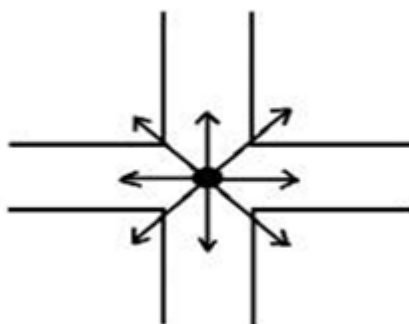
Τύπος IV:



Σχήμα 2.4 Τύπος 4

Ο τύπος IV φωτίζει περισσότερο το δρόμο παρά το πεζοδρόμιο και χρησιμοποιείται σε χώρους πάρκινγκ, καθώς αφορά κυρίως φωτιστικά που στερεώνονται σε τοίχους.

Τύπος V:



Σχήμα 2.5 Τύπος 5

Ο τύπος V είναι συμμετρικός και χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να φωτίσουμε προς όλες τις κατευθύνσεις, όπως στις διασταυρώσεις. Σε αυτόν τον τύπο αξιοποιούνται φωτιστικά που τοποθετούνται σε υψηλούς ιστούς.

2.5.1.4 Συντελεστής Χρησιμοποίησης

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Coefficient of Utilization ή CU) είναι ένα μέγεθος που απεικονίζει το ποσοστό από τη φωτεινή ροή που εκπέμπεται από τον λαμπτήρα, που καταλήγει τελικά στο σημείο του δρόμου όπου γίνεται η μέτρηση.

2.5.2 Διατάξεις φωτιστικών σωμάτων

Για την κατανομή και τοποθέτηση των φωτιστικών στα κατάλληλα σημεία, απαιτείται συνήθως η χρήση πρόσθετων διατάξεων στήριξης, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις αξιοποιούνται οι υπάρχουσες υποδομές, όπως ιστοί ή άλλες κατασκευές, είτε με τη χρήση βραχίονα ή και απευθείας επάνω, όπως σε περιπτώσεις σηράγγων. Η πιο συνηθισμένη

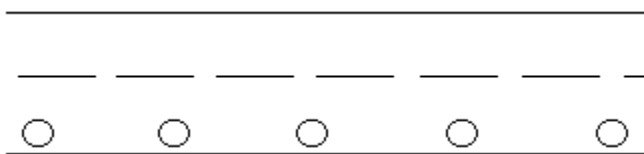
μέθοδος είναι η χρήση ιστών ή στύλων, φτιαγμένων από υλικά όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας, γαλβανισμένος ή ανοξείδωτος. Επίσης, ως υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το σπλισμένο σκυρόδεμα, αν και αυτό εμφανίζει συχνότερα φαινόμενα διάβρωσης. Για λόγους προστασίας από τη φθορά, οι ιστοί αυτοί είναι βαμμένοι ή έχουν πλαστικό κάλυμμα.

Το σχήμα των ιστών μπορεί να είναι κυλινδρικό με σταθερή ή και μεταβαλλόμενη διάμετρο ή και πολυγωνικού σχήματος. Οι μόνοι ιστοί που είναι υποχρεωτικά κυκλικοί είναι του σκυροδέματος. Αναφορικά με τον τρόπο στήριξης τους, οι μεταλλικοί ιστοί κοχλιώνονται σε βάση από σκυρόδεμα, ενώ για τους ιστούς σκυροδέματος γίνεται έμπηξη στο έδαφος.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας για τον κατανομή και εγκατάσταση των φωτιστικών στο δρόμο, είναι το ύψος τους πάνω στον ιστό. Ανάλογα με το πόσο ψηλά ή χαμηλά βρίσκεται το φωτιστικό, έχουμε διαφορετικά χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου φωτισμού, της ακτίνας που φωτίζεται και του πως επιδρούν στους περαστικούς. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του ιστού και του φωτιστικού, τόσο μεγαλύτερη ομοιομορφία θα έχουμε, όπως επίσης και μειωμένη θάμβωση. Όμως από την άλλη μεριά, έχουμε και μείωση της λαμπρότητας του φωτιστικού. Αντίθετα, για τοποθέτηση σε μικρότερο ύψος, έχουμε προβληματικές τιμές ομοιομορφίας που επιβάλλουν τη χρήση περισσότερων φωτιστικών, σε πυκνότερη διάταξη, ως αντιστάθμισμα. Συνήθως το ύψος των ιστών είναι 9-15 μέτρα, ενώ για περιπτώσεις υψηλών ιστών αυτό ξεπερνά τα 30 μέτρα. Πέρα από τις ίδιες τις απαιτήσεις φωτισμού του δρόμου, περιοριστικοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάζουν το ύψος των ιστών είναι η ύπαρξη υπέργειων γραμμών κοινής ωφέλειας, κοντινά αεροδρόμια ή κατοικημένες περιοχές, όπου προκαλείται ενόχληση.

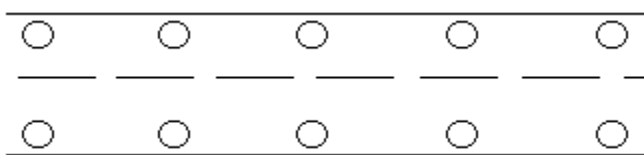
Η κατανομή των ιστών κατά μήκος του δρόμου, μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Έτσι, έχουμε τις ακόλουθες διατάξεις της θέσεως των ιστών (Τοπαλής, 1994):

A) Μονόπλευρη Διάταξη (Σχήμα 2.6): Στη μονόπλευρη διάταξη τα φωτιστικά τοποθετούνται στην μία πλευρά του δρόμου. Αυτή η διάταξη εφαρμόζεται συνήθως όταν το πλάτος του δρόμου είναι κατά προσέγγιση ίσο με το ύψος του φωτιστικού.



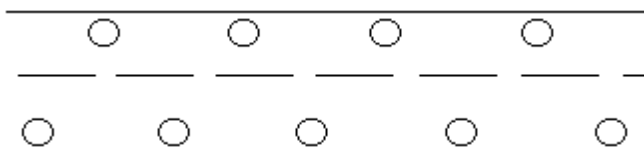
Σχήμα 2.6 Μονόπλευρη διάταξη φωτιστικών

Β) Αμφίπλευρη Διάταξη (Σχήμα 2.7): Στη αμφίπλευρη διάταξη τα φωτιστικά τοποθετούνται το ένα απέναντι από το άλλο και εφαρμόζεται σε δρόμους με υψηλότερες απαιτήσεις φωτισμού.



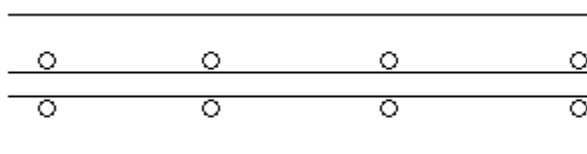
Σχήμα 2.7 Αμφίπλευρη διάταξη φωτιστικών

Γ) Χιαστί Διάταξη (Σχήμα 2.8): Στη χιαστί διάταξη κάθε φωτιστικό τοποθετείται απέναντι από το μέσο της απόστασης των δύο πλησιέστερων φωτιστικών που βρίσκονται στην απέναντι πλευρά του δρόμου. Αυτού του είδους η διάταξη εφαρμόζεται σε δρόμους με υψηλές απαιτήσεις φωτισμού, για να επιτυγχάνεται ο κατάλληλος φωτισμός σε όλο το πλάτος του δρόμου.



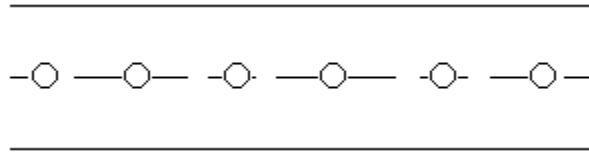
Σχήμα 2.8 Χιαστί διάταξη φωτιστικών

Δ) Κεντρική Διάταξη (Σχήμα 2.9): Η κεντρική διάταξη εφαρμόζεται κυρίως σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας και σε δρόμους με νησίδα.



Σχήμα 2.9 Κεντρική διάταξη φωτιστικών

Ε) Αξονική Διάταξη (Σχήμα 2.10): Στην αξονική διάταξη τα φωτιστικά τοποθετούνται στο κέντρο του δρόμου, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλές τιμές ομοιομορφίας.



Σχήμα 2.10 Αξονική διάταξη φωτιστικών

2.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια επισκόπηση της θεωρίας που αφορά τα φωτομετρικά μεγέθη και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης, έγινε μια ανάλυση των τύπων λαμπτήρων, από τις πιο παραδοσιακές τεχνολογίες των λαμπτήρων πυρακτώσεως και εκκένωσης, μέχρι και τα LED που είναι τα πιο σύγχρονα. Τέλος αναλύθηκαν οι διαφορετικές διατάξεις των ιστών και η σημασία που έχουν στην απόδοση και την αποτελεσματικότητα του φωτισμού στο δρόμο.

Κεφάλαιο 3 Η Τεχνολογία L.E.D.

3.1 Σκοπός

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά μια επισκόπηση της τεχνολογίας φωτισμού στερεάς κατάστασης, με βάση την οποία κατασκευάζονται τα φωτιστικά LED. Στη συνέχεια γίνεται μελέτη με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία ώστε να αναλυθεί σε βάθος η πραγματική συμπεριφορά των λαμπτήρων LED σε εφαρμογές οδοφωτισμού. Γίνεται επίσης σύγκριση της τεχνολογίας αυτής σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους οδοφωτισμού και αναλύονται οι χρήσεις, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζει σε διάφορους τομείς, με τα κριτήρια που ορίζουμε, σύμφωνα με την βιβλιογραφία και με παραδείγματα εφαρμογής σε αντίστοιχα έργα.

3.2 Εισαγωγή

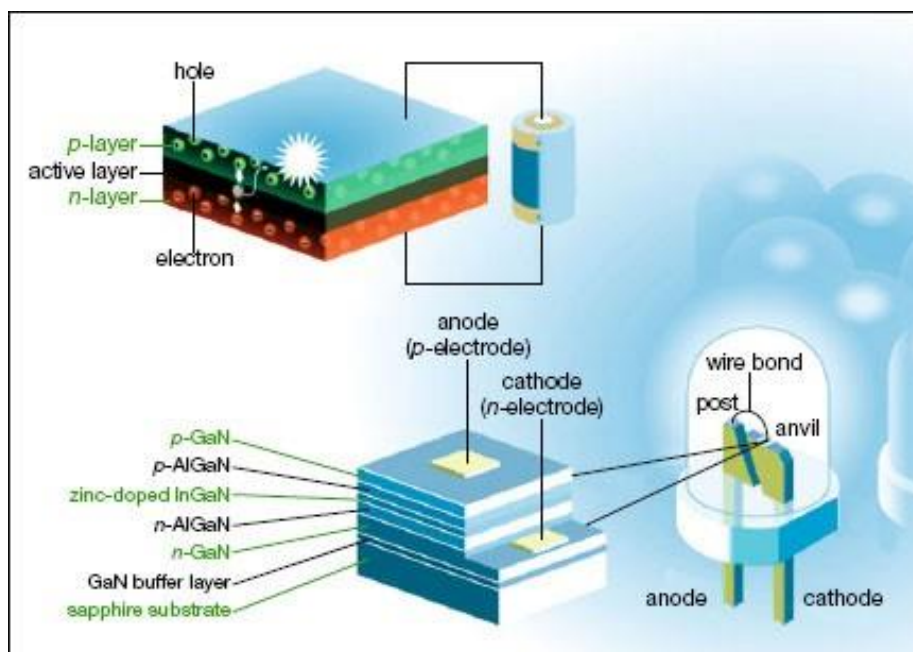
Οι εξελίξεις στις τεχνολογίες οδοφωτισμού και η χρήση νέων τύπων φωτιστικών έχει προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και νέες προοπτικές. Η νέα τάση που τείνει να κυριαρχήσει είναι τα φωτιστικά LED που θα αναλυθούν στο κεφάλαιο αυτό. Με βάση τη θεωρητική ανάλυση και την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, μπορούμε να μελετήσουμε σε βάθος τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων LED, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τις δυνατότητές τους.

3.3 Ημιαγωγοί και τεχνολογία LED

3.3.1 Θεωρητικά στοιχεία τεχνολογίας LED

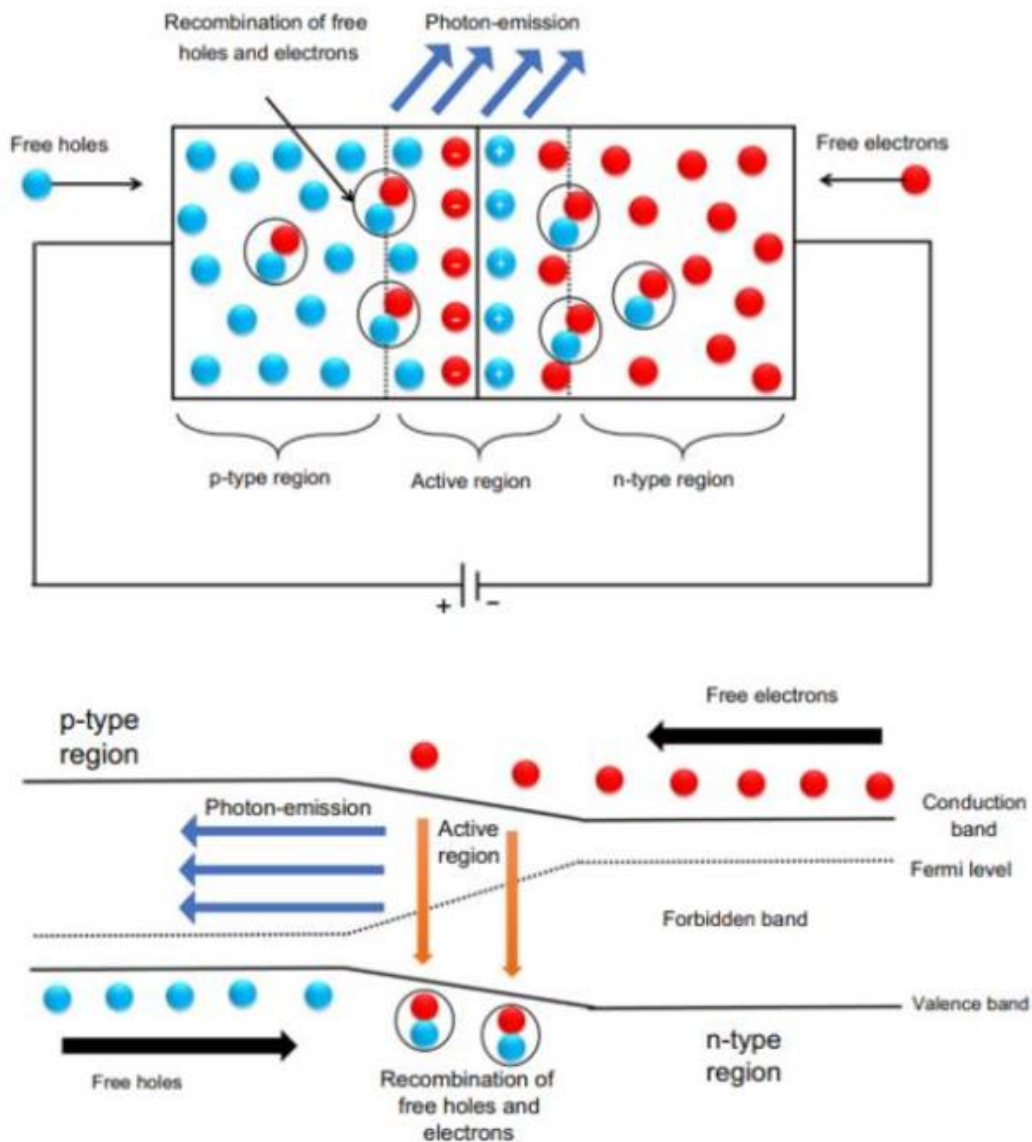
Βασικό στοιχείο της τεχνολογίας φωτισμού στερεάς κατάστασης (Solid State Lighting) των φωτιστικών LED είναι οι ημιαγωγοί. Οι ημιαγωγοί είναι μία κατηγορία υλικών, που η ειδική τους αντίσταση δεν είναι σταθερή, αλλά κυμαίνεται σε τιμές ανάμεσα σε αυτές των μονωτών (μεγάλη) και των αγωγών (μικρή) και που εμφανίζει ραγδαία μείωση με την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Με στοχευμένη χρήση και συνδυασμό ημιαγωγών υλικών επιτυγχάνεται η δημιουργία διατάξεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή φωτισμού. Πιο συγκεκριμένα, οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (Light Emitting Diodes),

αποτελούνται από ένα συνδυασμό ημιαγωγών p-n (Εικόνα 3.1), που όταν βρίσκονται υπό τάση, εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή φως. Καθώς η ακτινοβολία αυτή μπορεί να βρίσκεται σε διάφορα σημεία του φάσματος, για να παραχθεί φως στο επιθυμητό χρώμα απαιτείται η κατάλληλη χρήση και ο αντίστοιχος συνδυασμός των ημιαγωγών.



Εικόνα 3.1 Απεικονίσεις δομής LED (“Basic parts of a modern LED structure”, n.d.)

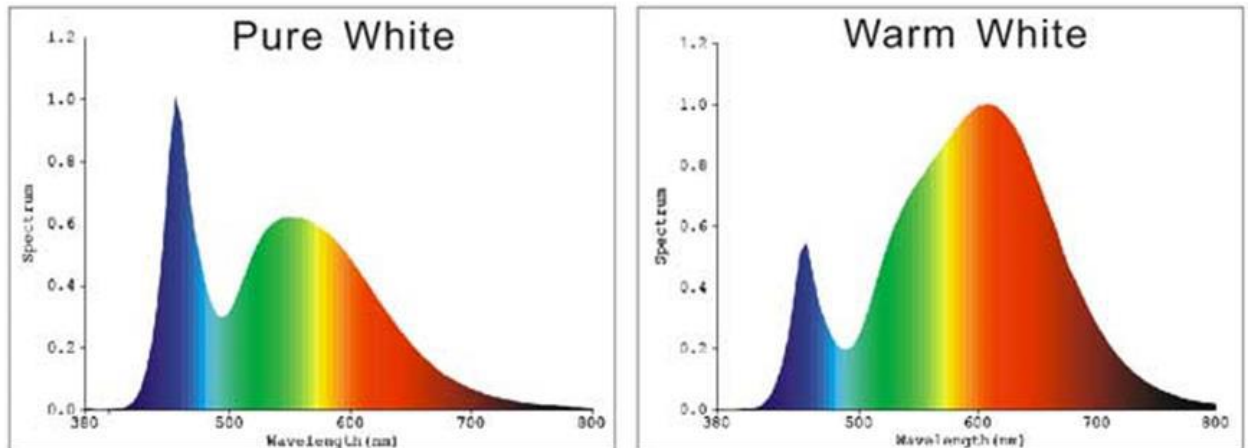
Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται στα φωτιστικά LED πρέπει να έχουν υψηλή καθαρότητα και μικρές ποσότητες από προσμίξεις, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργικότητα του υλικού ως ημιαγωγός. Οι προσμίξεις αυτές δημιουργούν τον κατάλληλο συνδυασμό ώστε με την κατάλληλη πόλωση, να παρουσιάσουν κινητικότητα των σωματιδίων με ροή ρεύματος και εκπομπή φωτός. Στη διάταξη p-n, ο ημιαγωγός τύπου n είναι υλικό με πλεόνασμα ηλεκτρονίων, λόγω των προσμίξεων, συνεπώς είναι φορτισμένο αρνητικά, ενώ από την άλλη μεριά ο ημιαγωγός τύπου p εμφανίζει περισσότερες οπές, λόγω των προσμίξεων, συνεπώς έχει πλεόνασμα θετικού ηλεκτρικού φορτίου (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 Απεικόνιση λειτουργίας LED (“LED working principle”, n.d.)

Ο συνδυασμός ημιαγωγών p-n, περιλαμβάνει τους δύο ημιαγωγούς, οι οποίοι συνδέονται και σχηματίζουν έτσι μια διεπιφάνεια (junction), μεγέθους της τάξης των 0,25mm. Με την ύπαρξη τάσης στα δύο άκρα της διάταξης και με την πόλωση που εμφανίζεται, έχουμε ροή ηλεκτρονίων και αντίστοιχα οπών (έλλειψη ηλεκτρονίων) προς τη διεπιφάνεια. Κατά την συνάντηση των ηλεκτρονίων με τις οπές, εκπέμπεται ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολία, δηλαδή φως. Για τα περισσότερα στοιχεία LED η απαιτούμενη τάση είναι μικρή, της τάξεως των 1-3V και το ίδιο ισχύει για το ηλεκτρικό ρεύμα που περνάει ,που είναι μεγέθους 1-100 mA.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των LED, λόγω της συνεχούς ροής ηλεκτρικού φορτίου εκλύεται ενέργεια και κατά επέκταση θερμότητα σε μεγάλες ποσότητες, με συνέπεια να απαιτείται η χρήση μεθόδων ψύξης και θερμικής διάχυσης για να έχουμε απρόσκοπτη λειτουργία.

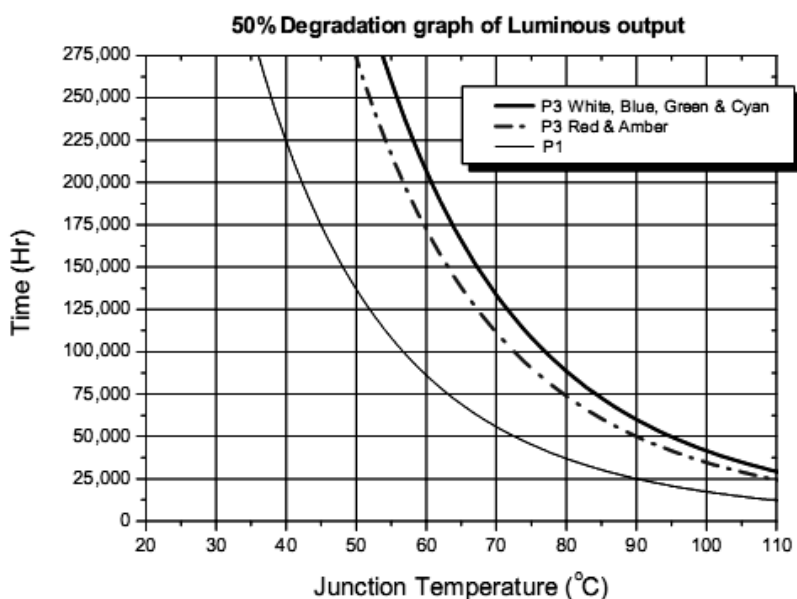


Εικόνα 3.3 Φασματική διαφορά εκπομπής (“Warm vs Cool White”, n.d.)

Καθώς το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμψει μια πηγή είναι πολύ ευρύ, το φως που τελικά θα παραχθεί από έναν λαμπτήρα LED εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που μπορούν να διαφοροποιήσουν το τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα 3.3). Κυρίως εξαρτάται από το ίδιο το ημιαγωγικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί, από τα χημικά πρόσθετα και από το περίβλημα κάθε λαμπτήρα. Τα υλικά που αξιοποιούνται σε τέτοιες χρήσεις είναι συνήθως ενώσεις φωσφόρου, αργιλίου, γαλλίου και ινδίου ή ενώσεις αργιλίου, γαλλίου και αρσενίου.

Ειδικά για τους λαμπτήρες LED, το παραγόμενο φάσμα που εκπέμπεται από την ψηφίδα κάθε λαμπτήρα είναι πολύ μικρό, τόσο που ουσιαστικά προσεγγίζει μόνο ένα χρώμα κάθε φορά. Για να επιτευχθεί ένα μεγαλύτερο εύρος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φώσφοροι, οι οποίοι διεγείρονται από την παραγόμενη ακτινοβολία. Τα χρώματα που μπορεί να αποδώσει ένας λαμπτήρας LED, κυμαίνονται από πράσινα, κόκκινα και πορτοκαλί, έως και λευκά. Ειδικά για την παραγωγή λευκού φωτός, αυτό μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση φωσφόρου που να δεσμεύει το μπλε και να το εκπέμπει πίσω ως λευκό, ή με έναν συνδυασμό από ψηφίδες άλλων χρωμάτων, που το τελικό φάσμα φωτός που εκπέμπουν να έχει ως συνισταμένη το λευκό.

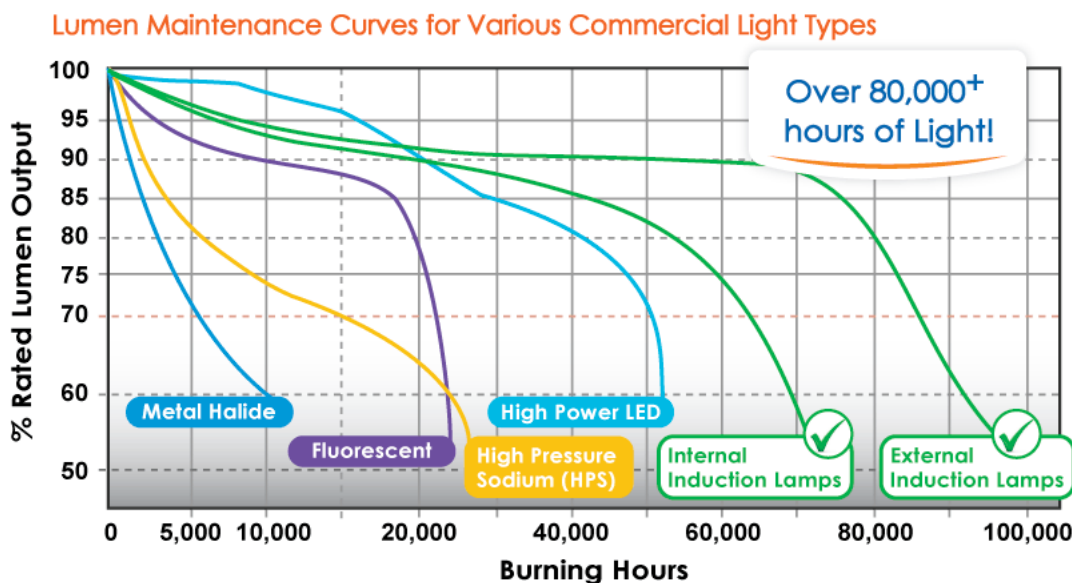
Πέρα από το οπτικό αποτέλεσμα και τις επιλογές στο χρώμα που αποδίδει ένα LED φωτιστικό, σημασία έχει και η διάρκεια ζωής αυτού του εξοπλισμού. Σύμφωνα με τα δεδομένα που υπάρχουν μέχρι τώρα, εκτιμάται ότι ο ονομαστικός χρόνος ζωής ενός φωτιστικού LED είναι μεταξύ 50000 και 100000 ωρών λειτουργίας, αν και αυτός επηρεάζεται άμεσα από τη θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν (Εικόνα 3.4), γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση για τη βέλτιστη χρήση και αξιοποίηση λαμπτήρων αυτής της τεχνολογίας.



Εικόνα 3.4 Χρόνος ζωής LED σε σχέση με θερμοκρασία λειτουργίας ([Degradation graph of luminous output], n.d.)

3.3.2 Διάρκεια ζωής φωτιστικών LED

Για να προσεγγίσουμε την έννοια της διάρκειας ζωής ενός υλικού θα χρησιμοποιήσουμε στατιστικές μεθόδους. Ως διάρκεια ζωής ενός φωτιστικού LED θεωρούμε το χρονικό διάστημα μεσολαβεί μέχρι, μία δοκιμαστική ομάδα φωτιστικών, να χάσει το 30% της ονομαστικής φωτεινής ροής, στο 50% των φωτιστικών της ομάδας αυτής. Από τα πειραματικά δεδομένα των LED λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται αυτήν την περίοδο και θα αναλυθούν και παρακάτω, φαίνεται ότι η διάρκεια ζωής ξεπερνάει αυτήν των παραδοσιακών μέσων που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό (Εικόνα 3.5), κρατώντας αντίστοιχα καλό επίπεδο απόδοσης.



Εικόνα 3.5 χρόνος ζωής λαμπτήρων (“LED Technology”, n.d.)

3.3.3 Θερμοκρασία και λειτουργία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η θερμοκρασία είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών, οπότε, κατά επέκταση έχει μεγάλη επίδραση και στη λειτουργία των λαμπτήρων LED.

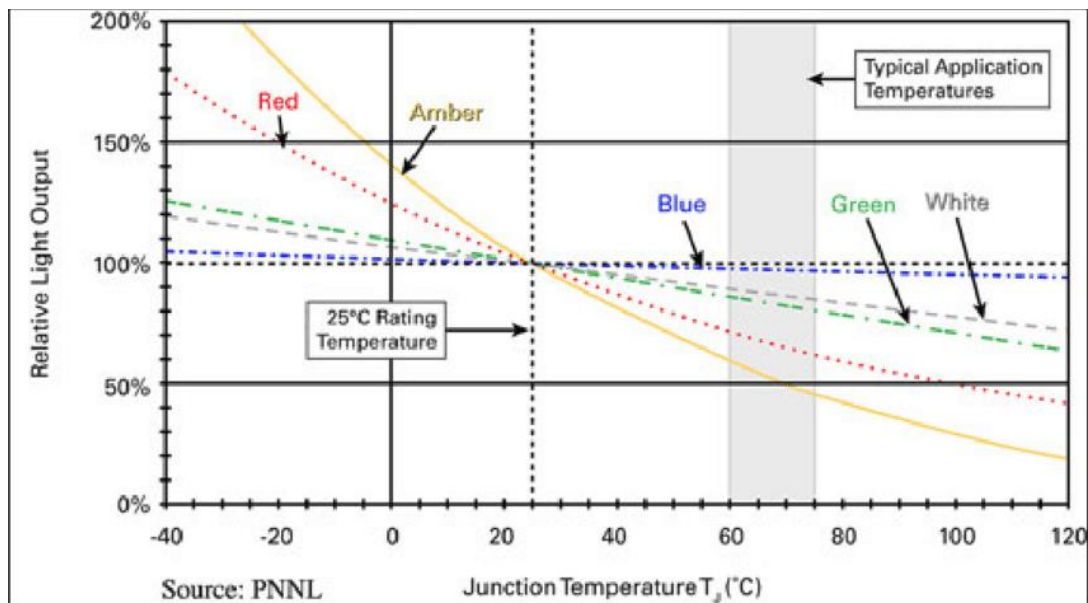
3.3.3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση

Κάθε φωτιστικό LED αποτελεί μια σύνθετη συσκευή που αποτελείται από διαφορετικά επιμέρους στοιχεία. Απαρτίζεται από την ψηφίδα, που εκπέμπει ακτινοβολία στο κομμάτι τους φάσματος που ανήκει το μπλε. Επίσης υπάρχει ο φώσφορος που απορροφά το μπλε χρώμα και εκπέμπει στη θέση του λευκό, με μικρές απώλειες. Ακόμη, υπάρχει ο προστατευτικός φακός της ψηφίδας, αλλά και η βάση όπου όλα αυτά τοποθετούνται. Ο μεγάλος αριθμός εξαρτημάτων σημαίνει ότι κάθε ένα από αυτά επηρεάζει με το δικό του ξεχωριστό τρόπο τη φθορά και τη γήρανση του φωτιστικού, εξαιτίας της θερμότητας.

Για την κατασκευή της ψηφίδας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά, τα οποία έχουν διαφορετική συμπεριφορά στην επίδραση της θερμότητας, όμως ένα φωτιστικό LED, συνήθως χαρακτηρίζεται από μεγέθη που περιγράφουν τη συνολική του συμπεριφορά, ως ένα πολύπλοκο σύστημα εξαρτημάτων. Ειδικά για την ψηφίδα, έχει κάποια θερμοκρασιακά όρια στα οποία λειτουργεί φυσιολογικά και αν αυτά ξεπεραστούν τότε αυτή σταματά να λειτουργεί. Σε ένα κομμάτι όμως εκτός αυτών των ορίων, μπορεί η ψηφίδα να λειτουργεί, αλλά στρεβλά, εκπέμποντας ακτινοβολία σε φάσμα πέρα από το καθιερωμένο

μονοχρωματικό μπλε. Αυτό μπορεί να έχει πολύ αρνητικές συνέπειες, καθώς επηρεάζει με τη σειρά της την ικανότητα του φωσφόρου να το απορροφά, προκαλώντας έτσι τη μείωση της απόδοσης του φωτιστικού.

Οι φώσφοροι, επηρεάζονται ακόμη περισσότερο από την οποιαδήποτε θερμοκρασιακή αύξηση. Δυσχεραίνεται η απορρόφηση συγκεκριμένων μηκών κύματος (Εικόνα 3.6) και έτσι μειώνεται η συνολική απόδοση του φωτιστικού.



Εικόνα 3.6 Μεταβολή φωτεινής ροής χρώματος με τη θερμοκρασία (“High-Performance Heat Sink for Solid-State Lighting”, n.d.)

Όσον αφορά τον προστατευτικό φακό της ψηφίδας, αυτός πρέπει να συνδυάζει ανθεκτικότητα με καθαρότητα για να μην επηρεάζει το οπτικό αποτέλεσμα. Ειδικά η καθαρότητα επηρεάζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς ο φακός αποκτά ένα χρώμα κοντά στο κίτρινο και έτσι επηρεάζει το φάσμα εκπομπής της ψηφίδας, την ακόλουθη απορρόφηση από το φώσφορο και τελικά την ίδια την απόδοση του LED. Μία σημαντική πρόκληση, λοιπόν, είναι ο σχεδιασμός των προστατευτικών φακών ώστε να αντέχουν τις υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χωρίς να επηρεάζουν την απόδοση των φωτιστικών.

3.3.3.2 Επίδραση θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Μία από τις βασικότερες επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας σχετικά με τη συμπεριφορά ενός LED είναι η πτώση της τάσης πόλωσης που εμφανίζει. Το ποσοστό και

το μέγεθος αυτής δεν είναι συγκεκριμένο και εξαρτάται από τον κατασκευαστή και τα χαρακτηριστικά του LED. Συνήθως αυτή η πτώση κυμαίνεται από $-2\text{mV}/\text{C}^\circ$ έως $-4\text{mV}/\text{C}^\circ$ αλλά δεν υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση ή καμπύλη που να μπορεί να αποτυπώσει με ακρίβεια τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της τάσης πόλωσης.

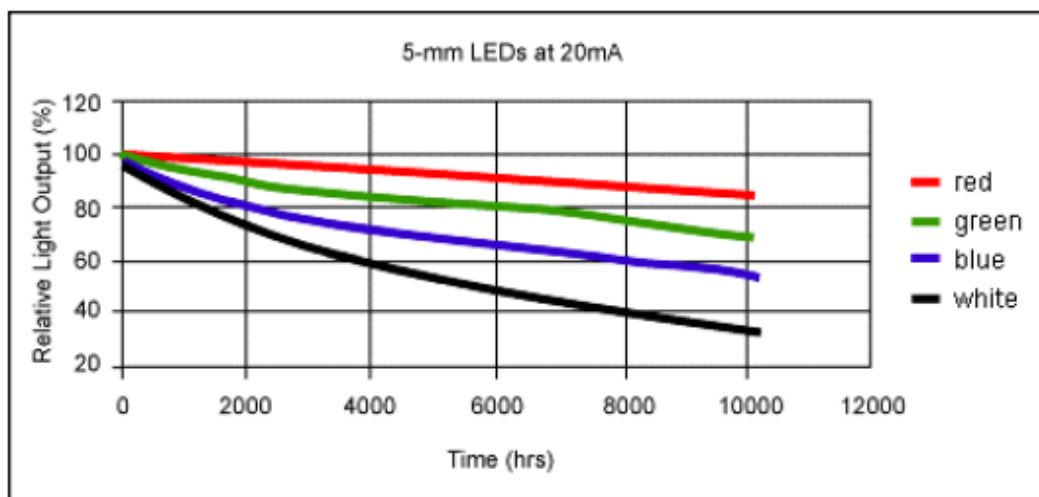
Κατά τη λειτουργία του LED, όταν έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας με ταυτόχρονα σταθερή τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, τότε παρατηρείται πτώση της τάσης πόλωσης, που με τη σειρά της προκαλεί πτώση της ηλεκτρικής ισχύος που απορροφάται και τελικά μείωση της φωτεινής ροής που εκπέμπεται από το φωτιστικό. Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι να κρατηθεί η ισχύς των φωτοδιόδων σταθερή, για να μην επηρεαστεί η φωτεινή ροή από την πτώση της τάσης πόλωσης. Όμως για να το επιτύχουμε αυτό θα πρέπει ταυτόχρονα να αυξάνουμε το ηλεκτρικό ρεύμα.

3.3.3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην οπτική συμπεριφορά

Η θερμοκρασιακές μεταβολές έχουν αναμφίβολα μεγάλη επίδραση στην οπτική συμπεριφορά των LED, καθώς επιδρούν σε κάθε επιμέρους στοιχείο τους και τελικά στη συνολική συμπεριφορά του φωτιστικού. Μερικές βασικές επιπτώσεις είναι στην φωτεινότητα και στην απόδοση σε Lumen/Watt. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατά τη λειτουργία του φωτιστικού, με αύξηση της θερμοκρασίας υπό σταθερό ρεύμα, έχουμε πτώση της τάσης πόλωσης και κατά συνέπεια μείωση της ισχύος του φωτιστικού και πτώση της απόδοσης του LED.

3.3.3.4 Επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων LED. Ειδικά η υψηλή θερμοκρασία επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και οδηγεί σε φθορά. Αντίστοιχα, η χαμηλή θερμοκρασία, επίσης δημιουργεί φθορά. Ακόμη, ανάλογα με το χρώμα του LED έχουμε και διαφοροποίηση σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του (Εικόνα 3.7) και την απόδοσή του σε ικανοποιητικό επίπεδο.



Εικόνα 3.7 Απόδοση συγκριτικά με το χρόνο λειτουργίας, διαφορετικών χρωμάτων LED (Narendran & Gu, 2005)

3.3.4 Διαχείριση θερμότητας

Η διευρυμένη χρήση των LED, έχει οδηγήσει αντίστοιχα και στην ανάπτυξη μεθόδων ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας να μην επηρεάζει τόσο έντονα τη λειτουργία τους. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, καθίσταται δύσκολο για τη θερμότητα να φεύγει χωρίς ένα σύστημα που να το υποστηρίζει. Έτσι, είναι αναγκαία η χρήση εξωτερικού συστήματος ψύξης, ώστε αυτή να απάγεται και η θερμοκρασία να διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα. Η ψήκτρα που χρησιμοποιείται διαδίδει τη θερμότητα στο περιβάλλον μέσω της ροής του αέρα, αλλιώς η λυχνία δε θα μπορούσε να αντέξει για πάνω από μερικά λεπτά και για αυτό είναι σημαντικό να υπάρχει απρόσκοπτη ροή αέρα στην ψήκτρα, που εξασφαλίζει αυτή τη λειτουργία.

Βασικό μέγεθος που χαρακτηρίζει αυτή τη διαδικασία είναι η θερμοκρασία διεπιφάνειας. Αυτή πρέπει να παραμένει εντός των προκαθορισμένων ορίων, που δίνονται από τον κατασκευαστή. Αν δεν τηρούνται αυτά τα όρια λειτουργίας, τότε επηρεάζεται ο χρόνος ζωής και η απόδοση του LED. Έτσι, είναι εμφανές ότι η αποτελεσματική ψύξη των φωτιστικών LED είναι μια πολύ σημαντική υπόθεση για τους κατασκευαστές, ώστε να έχουμε τη αξιοποιείται ανάλογα η τεχνολογία αυτή σε όλο της το εύρος.

3.4 Τα οπτικά μέσα LED στον οδοφωτισμό

3.4.1 Οδοφωτισμός με χρήση LED

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των αναγκών, οι απαιτήσεις για τον οδοφωτισμό σήμερα είναι αναβαθμισμένες, βάσει του κανονιστικού πλαισίου και των οδηγιών που υπάρχουν. Τα LED έχουν εκείνα τα χαρακτηριστικά ώστε να μπορούν να προσφέρουν λύσεις και ευελιξία, ανάλογα με το έργο που χρησιμοποιούνται. Η διαρκώς βελτιούμενη απόδοσή τους και η εξέλιξη τους τα καθιστά την προτιμότερη επιλογή σε πληθώρα περιπτώσεων, λόγω της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας, αλλά παραμένει ζητούμενο ο φωτισμός να έχει και άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η φωτεινή ροή και η κατανομή στο οδόστρωμα.

Η ραγδαία αύξηση της ζήτησης φωτιστικών LED ενέχει τον κίνδυνο της χρήσης ακατάλληλων και χαμηλής ποιότητας φακών, καθώς επίσης και της λανθασμένης αξιοποίησης τους, λόγω ελλιπούς σχεδίασης. Είναι λοιπόν ζητούμενο να προσδιοριστούν ποιοτικές λύσεις φωτιστικών LED με τα κατάλληλα υλικά και να εξελεχθεί η σχεδίαση των φακών ώστε να ανταποκρίνονται πλήρως στα αυστηρά κριτήρια που υπάρχουν.

3.4.2 Παράμετροι αξιολόγησης και αξιοπιστίας

Η έννοια του οπτικού συστήματος αποτυπώνει το συνδυασμό της φωτεινής πηγής με το οπτικό μέσο, δηλαδή το φακό. Για να ελέγξουμε το σχεδιασμό και την αποτελεσματικότητα ενός οπτικού συστήματος χρησιμοποιούμε τις εξής παραμέτρους αξιολόγησης:

- Η απόδοση τους (lens efficiency). Η απόδοση ενός φακού αποτυπώνεται από το ποσοστό της φωτεινής ροής που εξέρχεται από ένα LED συγκριτικά με αυτό που εισέρχεται.
- Η γωνία ημίσειος εύρους (Full Width Half Maximum, FWHM angle). Μέσω του πολικού διαγράμματος μπορούμε να προσδιορίσουμε πώς γίνεται η κατανομή της φωτεινής ροής στα επίπεδα C του χώρου. Η μορφή αυτής της καμπύλης μας δίνει στοιχεία για τον τύπο του δρόμου που μπορεί να καλύψει ένα φωτιστικό.
- Τα υλικά κατασκευής. Αυτά πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας, είτε από πλαστικά ή και υψηλής καθαρότητας γυαλί.

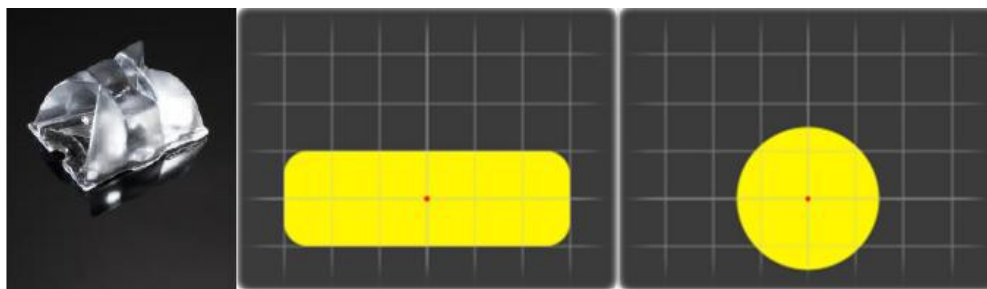
- Ο χρόνος λειτουργικής ζωής. Με τη χρήση κατάλληλων υλικών πρέπει να εξασφαλίζεται μεγάλη διάρκεια ζωής και να αντιμετωπίζεται η διαρκής φθορά από τα καιρικά φαινόμενα και την φυσική καταπόνηση.
- Επίπεδο θάμβωσης. Για να αποφύγουμε τη θάμβωση στον οδοφωτισμό πρέπει να αποφεύγονται οι γωνίες από 75 έως και 90 μοίρες. Στην πράξη το ζητούμενο είναι το σχήμα πεταλούδας, δηλαδή οι μεγάλη φωτεινή ένταση σε μεγάλες γωνίες, ώστε το φως που ξεπερνά αυτές τις γωνίες να είναι αμελητέο.

3.4.3 Τα είδη των φακών στον οδοφωτισμό

Οι φακοί των φωτιστικών LED που χρησιμοποιούνται σε έργα δρόμων σχεδιάζονται ξεχωριστά, ανάλογα με τον τύπο του LED. Έτσι εξασφαλίζεται η καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων αυτής της τεχνολογίας, αν και αυτό στοιχίζει σε χρόνο και κόστος. Στην αγορά εμφανίζονται δύο κατηγορίες φακών LED, αυτοί που έχουν συμμετρική κατανομή και αυτοί που έχουν ασύμμετρη. Η επιλογή του κατάλληλου φακού, έγκειται έπειτα στις συγκεκριμένες ανάγκες και τις προδιαγραφές κάθε έργου.

Συμμετρικοί

Αυτοί οι φακοί απαιτούν μεγάλο βραχίονα και κλίση ώστε να παρέχουν επαρκή φωτισμό στο οδόστρωμα. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.8, το φωτιστικό (η κόκκινη κουκίδα στο κέντρο) φωτίζει συμμετρικά την περιοχή γύρω απ' αυτό. Σε αυτήν την περίπτωση το φως μοιράζεται σε όλα τα επίπεδα και δεν επιτυγχάνεται αποτελεσματικός φωτισμός στο δρόμο.

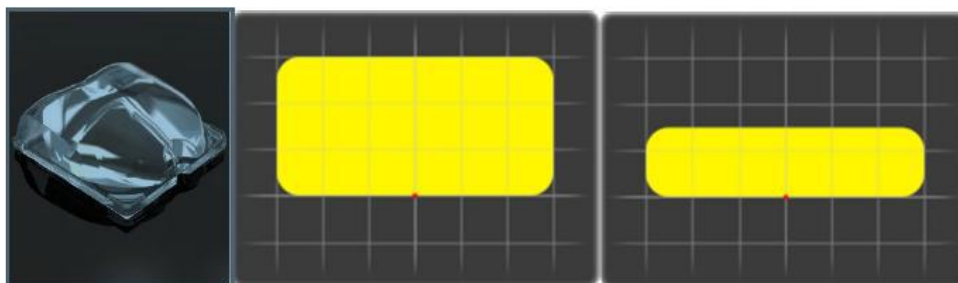


Εικόνα 3.8 Συμμετρικός φακός LED ([Symmetrical LED lens], n.d.)

Ασύμμετροι

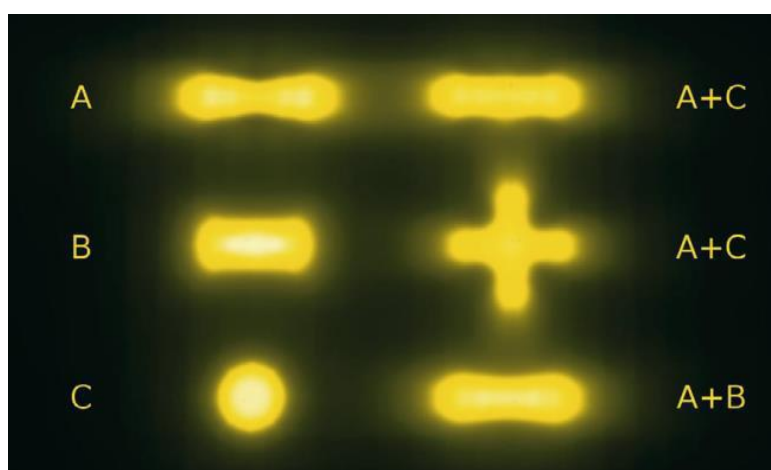
Αυτός ο τύπος φακού (Εικόνα 3.9) παρουσιάζει βελτιώσεις στις απόδοση σε σχέση με το συμμετρικό. Το χαρακτηριστικό του είναι ότι είναι συμμετρικός στο επίπεδο παράλληλα

του δρόμου και ασύμμετρος στο επίπεδο κάθετα του διαμήκους άξονα του δρόμου, ώστε να φωτίζεται μόνο το οδόστρωμα. Τοποθετούνται σε μικρού μήκους βραχίονα στήριξης με μηδενική κλίση.



Εικόνα 3.9 Ασύμμετρος φακός LED ([Asymmetric LED lens], n.d.)

Επιπρόσθετα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των φακών είναι εφικτή η μίξη διαφορετικών ειδών ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, προσαρμοσμένο στις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε έργου. Στην Εικόνα 3.10 φαίνονται τα ιδιαίτερα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας.



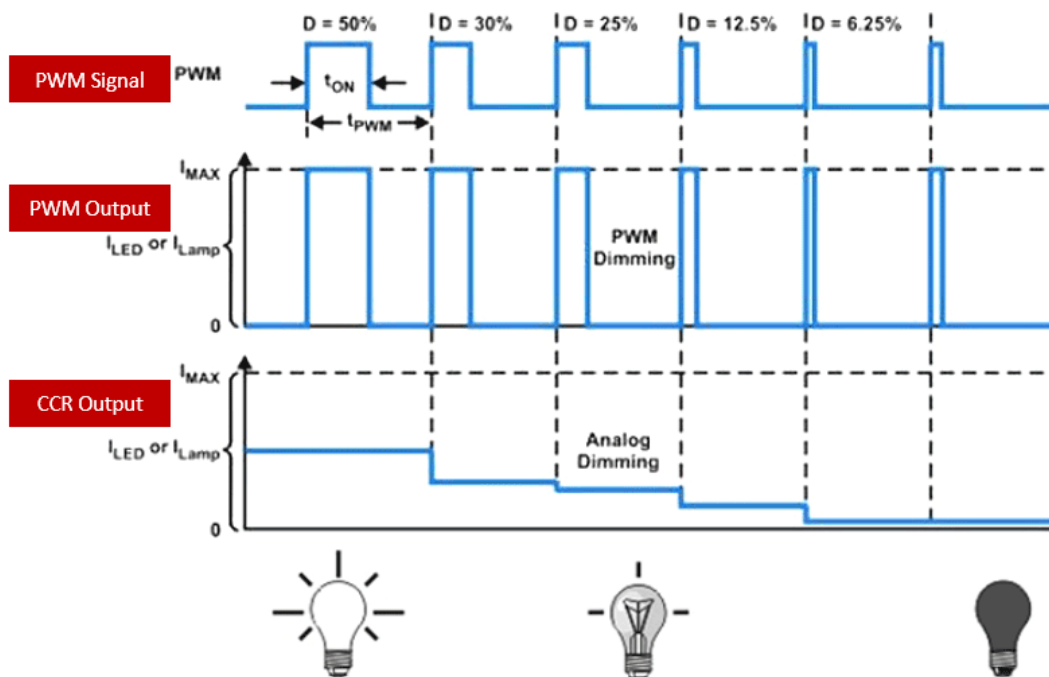
Εικόνα 3.10 Υβριδικό φακό LED ([Hybrid LED lens], n.d.)

3.5 Ρύθμιση φωτεινότητας LED (Dimming)

Ένα από τα βασικά στοιχεία των φωτιστικών LED, που τους δίνει πλεονέκτημα έναντι των παραδοσιακών μεθόδων οδοφωτισμού, είναι η δυνατότητα που παρουσιάζουν για εύκολη και αποτελεσματική ρύθμιση της φωτεινότητάς τους (dimming), ειδικά τώρα που το ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης του κόστους βρίσκεται στο επίκεντρο του σχεδιασμού αντίστοιχων συστημάτων.

Για το Dimming των φωτιστικών LED σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές, η ρύθμιση με μείωση του ρεύματος οδήγησης και η διαμόρφωση της διάρκειας παλμού (Εικόνα 3.11). Στη ρύθμιση με μείωση του ρεύματος οδήγησης (constant current reduction dimming), για να επιτύχουμε την αλλαγή στο επίπεδο φωτισμού μεταβάλλουμε το συνεχές ρεύμα που τροφοδοτεί το φωτιστικό μέσω ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δε μπορούμε να επιτύχουμε τόσο χαμηλό ποσοστό dimming όσο με την τεχνική PWM.

Στη διαμόρφωση της διάρκειας παλμού (pulse width modulation – PWM) για να αλλάξουμε το επίπεδο φωτισμού χρησιμοποιούμε παλμούς υψηλής συχνότητας, ώστε να μεταβάλλουμε τη μέση τιμή του ρεύματος που τροφοδοτεί τη LED. Ανάλογα με τη διάρκεια των παλμών αλλάζει η μέση τιμή του ρεύματος και αντίστοιχα της φωτεινότητας. Η τεχνική αυτή μπορεί να επιτύχει χαμηλότερα επίπεδα στάθμης φωτισμού, όμως έχει το αρνητικό να εμφανίζει το φαινόμενο της φωτεινής μαρμαρυγής (flicker), ειδικά σε χαμηλές συχνότητες και αντίστοιχα ρεύμα και επίπεδα φωτισμού.



Εικόνα 3.11 Μέθοδοι Dimming (“What is PWM Dimming”, 2022)

Η δυνατότητες dimming των φωτιστικών LED, είναι απαραίτητο στοιχείο ώστε να μπορούν να αξιοποιούνται σε σύγχρονα ευφυή συστήματα ελέγχου και τηλεδιαχείρισης οδοφωτισμού, όπου ανάλογα με τις ανάγκες ή τον προγραμματισμό, η φωτεινότητα του δρόμου θα προσαρμόζεται δυναμικά.

3.6 Αξιολόγηση χρήσης της τεχνολογίας LED

Έχοντας αναλύσει τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας φωτισμού στερεάς κατάστασης, μπορούμε τώρα να μελετήσουμε τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εφαρμογής της και να τα συγκρίνουμε με τις παραδοσιακές μεθόδους οδοφωτισμού. Τα τεχνικά πλεονεκτήματα των LED σε σχέση με άλλες τεχνολογίες φωτιστικών, ειδικά όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας θεωρούνται πια δεδομένα. Όμως, αν και στη θεωρία η σύγκριση με άλλα είδη λαμπτήρων αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, με την πάροδο του χρόνου μπορούμε να συλλέξουμε στοιχεία για την απόδοσή τους σε πραγματικές συνθήκες. Ειδικά τώρα που η χρήση των LED έχει αυξηθεί ραγδαία, υπάρχει πια πληθώρα μελετών, που να αξιολογούν τα πραγματικά αποτελέσματα, τα οφέλη και τα προβλήματα της. Επίσης, η ανάλυση της συμπεριφοράς και των αποτελεσμάτων της χρήσης LED δε χρειάζεται να περιοριστεί στο αμιγώς τεχνικό κομμάτι, αλλά μπορεί να εξετάσει το θέμα πολύπλευρα, με διαφορετικά κριτήρια και από πολλές σκοπιές. Τα συμπεράσματα αυτών των ερευνών δεν αφορούν μόνο τους κατασκευαστές ή τους μηχανικούς, αλλά και επιστήμονες πολλών κλάδων, όπως της οικονομίας, της μελέτης περιβάλλοντος κ.α.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει μια κριτική ανάλυση της χρήσης της τεχνολογίας LED στον οδοφωτισμό, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, χωρισμένη σε κατηγορίες μελέτης. Τα κριτήρια με τα οποία χωρίστηκαν οι κατηγορίες που εξετάζουμε και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, βασίστηκε στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και στους επιμέρους τομείς έρευνας που υπήρχε αντίστοιχο υλικό προς επεξεργασία. Με βάση τα παραπάνω, οι κατηγορίες αυτές είναι η ενεργειακή κατανάλωση/εξοικονόμηση, η οικονομική απόδοση, το οικολογικό αποτύπωμα, η ασφάλεια, οι δυνατότητες ελέγχου και εφαρμογής έξυπνων μεθόδων, η ποιότητα φωτισμού και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά, καθώς και το αισθητικό αποτέλεσμα. Στόχος αυτής της κατηγοριοποίησης είναι να αναδειχθούν και νέες πτυχές πάνω στη χρήση αυτής της τεχνολογίας, προβλήματα που δεν είχαν προβλεφθεί θεωρητικά και να αναλυθούν case studies, ώστε να εμβαθύνουμε την κατανόηση μας και να αναδειχθούν νέοι τομείς μελέτης, για μελλοντικές έρευνες. Ο διαχωρισμός και η εξειδίκευση της ανάλυσης με αυτά τα κριτήρια δε μπορεί να είναι απόλυτος, καθώς όλα τα επιμέρους χαρακτηριστικά της εφαρμογής LED και τα πλεονεκτήματα της συσχετίζονται και πολλές φορές συμπληρώνουν το ένα το άλλο. Η αξιολόγηση αυτή, πέρα από τη γενική

απόδοση τους, είναι βασισμένη στη σύγκριση των LED κυρίως με λαμπτήρες HPS, που είναι οι πιο συνηθισμένοι σε παραδοσιακές εφαρμογές οδοφωτισμού.

3.6.1 Ενεργειακή κατανάλωση

Ο βασικός λόγος που τα φωτιστικά LED είναι η προτιμότερη επιλογή και αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο στη χρήση τους είναι η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση που παρουσιάζουν. Από τη σκοπιά της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης του κόστους, η επιλογή LED φαίνεται η προτιμότερη, ειδικά αν αναλογιστούμε ότι σε έναν αυτοκινητόδρομο μπορεί να υπάρχουν χιλιάδες φωτιστικά κατά μήκος του δρόμου, τόσα που η εξοικονόμηση ενέργειας αθροιστικά να είναι πολύ μεγάλη. Αυτό το χαρακτηριστικό των LED είναι και το πιο συχνά εξεταζόμενο στις επιστημονικές έρευνες και υπάρχουν πάρα πολλές μελέτες την τελευταία δεκαετία σχετικές με τα οφέλη της αντικατάστασης παλαιότερων λαμπτήρων με LED. Σταχυολογώντας συγκεκριμένες περιπτώσεις, η μαζική αντικατάσταση των λαμπτήρων ατμών υδραργύρου από φώτα LED παρουσιάζει εξοικονόμηση της τάξης του 50% στην ηλεκτρική ενέργεια (Huang et al., 2012) και με το επίπεδο αποδοχής του ευρύτερου κοινού να φτάνει στο 80%, άρα εμφανίζεται κατάλληλη για να προωθηθεί για ευρεία και γενικευμένη χρήση έναντι των παλαιότερων μεθόδων οδοφωτισμού. Αν και το 83% των ερωτηθέντων έχουν θετική γνώμη για τα φώτα LED, οι ίδιοι άνθρωποι εντοπίζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως υψηλή θερμοκρασία χρώματος, το έντονο φως δυσφορίας, υψηλότερες ετικέτες τιμής και συγκριτικά μικρότερη επάρκεια στον φωτισμό της γύρω περιοχής, χωρίς όμως αυτό να είναι αρκετό για να απορρίπτουν το φωτισμό με LED.

Η εξοικονόμηση ενέργειας όμως, δεν βρίσκεται μόνο στη χαμηλότερη κατανάλωση των λαμπτήρων LED σε σχέση με τους συμβατικούς λαμπτήρες, αλλά και στη δυνατότητα που παρέχουν για πιο εξελιγμένες μεθόδους χειρισμού και διαχείρισης ενέργειας, όπως το dimming. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αναβάθμιση του φωτισμού συνδυάζεται με σχέδια περαιτέρω εξοικονόμησης, όπως μέσω του part-night-lighting (Pagden et al., 2019), όπου η φωτεινότητα διαμορφώνεται τη νύχτα σε 4 διαφορετικές φάσεις, ανάλογα με την ώρα και τις αντίστοιχες ανάγκες και με αυτόν τον τρόπο έχει υπολογιστεί εξοικονόμηση ενέργειας ως και 44%. Αντίστοιχες μελέτες συστημάτων, σε εγκαταστάσεις κτιρίων (Modabbir & Mohammad, 2021) με τη χρήση αισθητήρων υπέρυθρων και τεχνολογία LED για το φωτισμό, εμφανίζουν επίσης μείωση κατά 55% στην κατανάλωση και βελτιστοποιημένη συμπεριφορά.

Γενικότερα, ένα ζήτημα που αναδεικνύεται μέσα από τη μελέτη των πιο αποδοτικών μεθόδων εξοικονόμησης ενέργειας, πέρα από την ίδια την αντικατάσταση των λαμπτήρων με LED, είναι το επίπεδο φωτεινότητας και ο χρόνος λειτουργίας των φωτιστικών κατά τη διάρκεια της νύχτας. Έτσι τίθεται το δίλλημα αν είναι επαρκής και προτιμότερη η επιλογή εξαρχής μιας σταθερής χαμηλής στάθμης φωτισμού για τον οδοφωτισμό ή αν είναι προτιμότερη η ρύθμιση του δυναμικά ή μέσω κάποιου χρονοδιαγράμματος. Από τα δεδομένα μελετών (Jägerbrand, 2016) η λειτουργία με χρονοδιάγραμμα θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας έως 49%, από το να έχουμε υποβιβασμό κατά μια τάξη ή προσαρμογή στο ελάχιστο όριο της υπάρχουσας κατηγορίας οδικού φωτισμού. Αν και η προσαρμογή στην ελάχιστη στάθμη για την κατηγορία φωτισμού πιθανότατα δεν θα επηρεάσει την ασφάλεια της κυκλοφορίας, η δραστική μείωση της στάθμης φωτισμού θα μπορούσε ενδεχομένως να αυξήσει τον κίνδυνο τροχαίων ατυχημάτων λόγω μειωμένης ορατότητας. Αντίθετα, ένα χρονοδιάγραμμα μείωσης της έντασης θα μπορούσε να προσαρμοστεί στην ένταση της κυκλοφορίας και έτσι να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος για την ασφάλεια της κυκλοφορίας. Φαίνεται λοιπόν ότι ανάμεσα στις επιλογές για εξοικονόμηση ενέργειας είναι αποδοτικότερο το dimming από το να μειώνεται η κλάση του οδοφωτισμού.

Ένα ακόμη ζήτημα που αναδείχθηκε μελετώντας την πλειοψηφία των προηγούμενων ερευνών που ασχολούνται με τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης των LED και των συμβατικών λαμπτήρων, κυρίως των HPS, στον οδοφωτισμό, είναι ότι τα επίπεδα φωτεινότητας στα πλαίσια της σύγκρισης των εγκαταστάσεων διέφεραν σημαντικά, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των φωτιστικών υπό σύγκριση. Κατά συνέπεια, τα συμπεράσματα σχετικά με πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας κατά την αντικατάσταση HPS με φωτιστικά LED μπορούσαν να τεθούν υπό αμφισβήτηση, στη λογική ότι τα κριτήρια σύγκρισης δεν ήταν τα κατάλληλα. Για να ξεπεραστεί αυτή η ανεπάρκεια, μια προσέγγιση που βασιζόταν σε ίσα φωτοπικά ή μεσοπικά επίπεδα φωτεινότητας των συγκριτικών εγκαταστάσεων οδικού φωτισμού LED και HPS εφαρμόστηκε σε έρευνά (Djuretic & Kostic, 2018). Και σε αυτήν την περίπτωση όμως επιβεβαιώθηκε η ανώτερη απόδοση των LED, με βελτιωμένη κατανάλωση 31% και ακόμα περισσότερο με χρήση dimming.

3.6.2 Οικονομική απόδοση

Πέρα από το προφανές πλεονέκτημα της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και κατά συνέπεια του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας, η αποτίμηση της οικονομικής απόδοσης

και βιωσιμότητας μιας τεχνολογίας και κάθε επένδυσης, λαμβάνει υπόψη πολλούς περισσότερους παράγοντες. Αυτό είναι τώρα ακόμα πιο εμφανές, ειδικά σε μια εποχή που η τιμή της ενέργειας αλλάζει συνεχώς και οι υπολογισμοί που λαμβάνουν υπόψη μόνο μια σταθερή τιμή ενέργειας, για να αξιολογήσουν μια επένδυση, αδυνατούν να κάνουν έγκυρες προβλέψεις.

Ένα βασικό ζήτημα προβληματισμού σχετικά με την αξία της επένδυσης σε λαμπτήρες LED είναι το μεγάλο αρχικό κόστος αντικατάστασης που εμφανίζει. Πολλοί επενδυτές έχουν ενδοιασμούς να προχωρήσουν σε τέτοιες δράσεις, αλλά αποδεικνύεται ότι τελικά οι επενδύσεις αυτού του τύπου είναι συμφέρουσες (Campisi et al., 2018) σε βάθος χρόνου και πολλές φορές ακόμα και άμεσα. Ο λόγος είναι ότι ακόμα και έτσι η τεχνολογία LED έχει τόσο μεγάλη διαφορά στην απόδοση που μπορεί να καλύπτει αυτό το κόστος, καθώς επίσης και μειωμένα έξοδα συντήρησης. Επίσης, οι τεχνικές βελτιστοποίησης και έξυπνου ελέγχου που εφαρμόζονται στα LED αποδίδουν ακόμα πιο γρήγορα κέρδος και επιταχύνουν την απόσβεση της επένδυσης. Σε κάθε περίπτωση, η έμφαση και διάδοση της τεχνολογίας LED, οδηγεί ταυτόχρονα σε νέες μεθόδους βελτιστοποίησης της παραγωγής και μείωσης του κόστους. Άρα αυτός ο παράγοντας προβλέπεται να παρουσιάσει τάσεις περαιτέρω μείωσης μελλοντικά.

Επίσης, η μεγάλη διάρκεια ζωής είναι σημαντικός παράγοντας, καθώς η αλλαγή σε λαμπτήρες LED σημαίνει ότι δε θα προκύψει άμεση ανάγκη αντικατάστασης του εξοπλισμού, όπως σε άλλες τεχνολογίες. Ένας κίνδυνος για τη διάρκεια ζωής και την οικονομική λειτουργία των φωτιστικών είναι η επίδραση εξωγενών παραγόντων όπως η σκόνη που μειώνει τη φωτεινότητα και τη λαμπρότητα τους και δημιουργεί φθορά στο εσωτερικό. Αν και για λαμπτήρες με προστασία IP6X αυτή είναι μειωμένη, μελλοντικά όλοι οι LED λαμπτήρες θα κατασκευάζονται με υψηλό δείκτη IP, οπότε θα έχουν καλύτερη αντιμετώπιση από τη φθορά (Coureaux & Manzano, 2013).

Μια πτυχή που αξίζει να αναλυθεί είναι η χρήση των LED σε υβριδικά συστήματα, όπως σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά, για εξωτερικό φωτισμό. Από άποψη κόστους και κατανάλωσης, μια τέτοια λύση είναι επίσης προτιμότερη σε σχέση με τις παραδοσιακές λάμπες HPS, κυρίως επειδή έχουν χαμηλότερο κόστος ανά κύκλο ζωής (Das et al., 2015).

Πολλές φορές πάντως η στρατηγική του βέλτιστου κόστους δεν ευθυγραμμίζεται με την περιβαλλοντικά βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης, καθώς από οικολογική σκοπιά συμφέρει

η τακτική αναβάθμιση τεχνολογίας φωτισμού για να αξιοποιούνται τα οφέλη από τις νέες δυνατότητες που θα παρουσιάζουν, όπως η ακόμη μικρότερη κατανάλωση, αλλά αυτά στο οικονομικό σκέλος εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα, το κόστος αγοράς και τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης. Από την σκοπιά του συνολικού κόστους κάθε επένδυσης, κάνοντας τους υπολογισμούς, φαίνεται ότι συμφέρει η χρήση εξοπλισμού για όσο το δυνατό περισσότερο (Dzombak et al., 2019).

3.6.3 Οικολογικό αποτύπωμα

Πέρα από τα προφανή οφέλη της χρήσης LED από οικολογική σκοπιά, λόγω της μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης και κατά επέκταση του μικρότερου αποτυπώματος, οφείλουμε να εξετάσουμε την τεχνολογία αυτή υπό τη γενικότερη οπτική της οικολογικής βιωσιμότητας καθώς και άλλους παράγοντες. Άλλες παράμετροι μπορούν να είναι η τοξικότητα και η δυνατότητα ανακύκλωσης των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, η διάρκεια ζωής και ο χρόνος που απαιτείται για αντικατάσταση, η επίδραση στην πανίδα και τη χλωρίδα λόγω φωτορύπανσης κ.α.

Πολλές μελέτες πάνω στην εξοικονόμηση ενέργειας στον τομέα του φωτισμού συγκλίνουν ότι οι βασικοί παράγοντες που αφορούν την οικολογική επίπτωση των φωτιστικών είναι η ενέργεια που καταναλώνουν, οι ώρες που λειτουργούν και ο τρόπος που διαχέουν το φως στον περιβάλλοντα χώρο τους. Και ενώ οι σύγχρονοι HPS και LED λαμπτήρες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την εξοικονόμηση ενέργειας που παρέχουν, ένα δεύτερο θέμα είναι αυτό των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Έτσι, ενώ τα LED έχουν το καταγεγραμμένο πλεονέκτημα ότι δε χρησιμοποιούν υδράργυρο, που είναι ένα πολύ τοξικό στοιχείο, από την άλλη για την κατασκευή των ημιαγωγών, στις προσμίξεις χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες από γάλιο, ίνδιο, αρσενικό και αντιμόνιο. Η παρουσία αυτών των στοιχείων και άλλων μικροϋλικών των φωτιστικών μπορεί επίσης να προκαλέσει προβλήματα (Shahzad et al., 2018), ειδικά κατά την φάση της αποκομιδής και διαχείρισης τους ως απορρίμματα.

Από τη σκοπιά της αντοχής στο χρόνο και στη φθορά, έχει αναλυθεί προηγουμένως στο κεφάλαιο αυτό, ότι σε σχέση με άλλα διαδεδομένα είδη λαμπτήρων, τα LED έχουν τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ο βασικός παράγοντας που μπορεί να επιδράσει αρνητικά

είναι η θερμοκρασία, αλλά εκτός από μερικές περιπτώσεις έργων σε ειδικές συνθήκες, η πλειοψηφία των έργων οδοφωτισμού υλοποιείται αποδοτικά με αυτά.

Επίσης, ένα από τα βασικά προβλήματα σχετικά με το φωτισμό των δρόμων είναι η επίδραση που έχει στην πανίδα και τη χλωρίδα κάθε περιοχής. Σε αυτήν την προβληματική η χρήση της τεχνολογίας LED καλείται να δώσει λύσεις και να ανακουφίσει τα συμπτώματα της αναπόφευκτης αύξησης του φωτισμού, που συνδέεται με την ανάπτυξη του αστικού ιστού και της ανθρώπινης παρουσίας σε οικοσυστήματα που μέχρι πρότινος ήταν ελεύθερα από τον ανθρώπινο παράγοντα. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα από μελέτες που υποδεικνύουν ότι ο φωτισμός των δρόμων τη νύχτα επηρεάζει τη συμπεριφορά και τη ζωή της πανίδας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, η επίδραση στα πρότυπα του κύκλου αναπαραγωγής πληθυσμών, όπως στα ψάρια του γλυκού νερού, για παράδειγμα το σολομό υπό εκκόλαψη, όπου επηρεάζεται η περίοδος επώασης των αυγών του σε σχέση με σημεία που δεν έχει τεχνητό φωτισμό (Riley et al, 2013). Επίσης, επηρεάζει τη συμπεριφορά νυκτόβιων ζώων, όπως οι νυχτερίδες και ορισμένα έντομα (Bolliger et al., 2020), δημιουργεί σύγχυση και μπορεί να οδηγήσει και στο θάνατο τους.

Ακόμη, πέρα από την επίδραση στην πανίδα, αξίζει να μελετηθεί και η επίδραση του φωτισμού στη χλωρίδα. Μελέτες δείχνουν ότι ανάλογα με το είδος φωτισμού και την απόσταση, επηρεάζονται οι επικονιαστές και κατά επέκταση η ίδια η αναπαραγωγή και άνθιση των λουλουδιών. Αυτό δεν έχει απαραίτητα αρνητικά αποτελέσματα, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση της νυχτερινής δραστηριότητας λόγω του φωτισμού (Macgregor et al., 2019), αν και γίνεται προσπάθεια, σε κάθε περίπτωση, να μην υπάρχουν εξωτερικές επιδράσεις στη φυσική λειτουργία. Από την άλλη μεριά, αξίζει να εξεταστεί και η αντίστροφη οπτική, δηλαδή να μελετήσουμε την επίδραση της χλωρίδας στον φωτισμό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τα τούνελ, όπου διαφορετικά αναρριχητικά φυτά στις εισόδους έχουν διαφορετική επίδραση στη λαμπρότητα του σημείου (Peña-García et al., 2015) και επειδή τη μέρα στα τούνελ χρειάζεται μεγάλη ένταση φωτισμού για να εξισώνει την εξωτερική και εσωτερική φωτεινότητα, η κατάλληλη επιλογή χλωρίδας βοηθάει τελικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, κυρίως μειώνοντας την εξωτερική φωτεινότητα και αντίστοιχα την ανάγκη του εσωτερικού φωτισμού για να την εξισορροπήσει.

3.6.4 Ασφάλεια

Η βελτίωση της ασφάλειας κατά την κυκλοφορία στους δρόμους, για τους οδηγούς και τους πεζούς, είναι ίσως το σημαντικότερο κριτήριο κατά την επιλογή της τεχνολογίας οδοφωτισμού. Τα ατυχήματα κάθε χρόνο έχουν μεγάλο κόστος, τόσο σε ανθρώπινες ζωές και σοβαρούς τραυματισμούς, όσο και οικονομικά. Αν και η εκτίμηση του ετήσιου κόστους των ατυχημάτων διαφέρει από χώρα σε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, λόγω διαφορών στη μεθοδολογία μέτρησης και συστήματος αποζημιώσεων, υπολογίζεται ότι αυτό κυμαίνεται από 0.4% έως και 4.1% του ΑΕΠ κάθε χώρας (σε μέτρηση του 2015) (Wijnen et al., 2018). Από μόνη της η διαδικασία αξιολόγησης και εκτίμησης των ατυχημάτων στις οδούς παρουσιάζει τις δικές της προβληματικές. Οι αναλύσεις βασίζονται σε βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν οι βασικές παράμετροι κάθε ατυχήματος, κυρίως με βάση 5 βασικά ερωτήματα, το τι, πότε, ποιος, που, γιατί. Τυχόν ανακρίβειες και μεθοδολογικά λάθη δυσχεραίνουν τη δουλειά αυτή και τα συμπεράσματα στα οποία θα μας οδηγούσε (Imprialou & Quddus, 2017).

Η σημασία του σωστού οδοφωτισμού φαίνεται και από την πληθώρα μελετών που δείχνουν ότι στατιστικά η πλειοψηφία των ατυχημάτων στους δρόμους γίνεται τη νύχτα σε σχέση με την ημέρα, συνεπώς ο ρόλος του φωτισμού σε σχέση με τα ατυχήματα είναι πολύ μεγάλος (Raynham et al., 2019). Η σημασία του σωστού φωτισμού στις οδούς για την ασφάλεια των οδηγών, εξάλλου, δεν εξαντλείται στις λάμπες αλλά και στις υπόλοιπες πηγές και πιο συγκεκριμένα στα φώτα των ίδιων των οχημάτων. Ειδικά στις περιπτώσεις που τα οχήματα χρησιμοποιούν ακατάλληλες λάμπες HID στα φώτα πορείας, που να υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια φωτεινότητας, να τυφλώνουν τους οδηγούς και να δυσχεραίνουν την κυκλοφορία (Zalcmanis et al., 2019).

Ειδική μέριμνα πρέπει να υπάρξει στις περιπτώσεις μετάβασης από καθεστώς μια κλίμακας φωτισμού σε μια άλλη, καθώς αυτή η απότομη αλλαγή μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στους οδηγούς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο φωτισμός των σηράγγων, όπου απαιτείται προσαρμογή σε σχέση με τον εξωτερικό φωτισμό, είτε τη μέρα όπου έξω υπάρχει μεγάλη λαμπρότητα, είτε και τη νύχτα που συμβαίνει το αντίθετο και οδηγεί σε θανατηφόρα ατυχήματα (He et al., 2017).

Εκτός από την ασφάλεια των οδηγών, η διατήρηση της ασφάλειας έχει ακόμη μεγαλύτερη αξία στην περίπτωση των πεζών, καθώς οι πεζοί είναι πολύ συχνά θύματα ατυχημάτων και

εμφανίζουν μεγαλύτερη σοβαρότητα τραυματισμών όταν εμπλέκονται ,σε σχέση με τους οδηγούς, που έχουν πλέον μια σειρά συστημάτων προστασίας εντός των οχημάτων τους (Pour-Rouholamin & Zhou, 2016). Επίσης, μια ομάδα υψηλού κινδύνου στην μετακίνηση είναι οι ποδηλάτες. Γίνονται μεγάλες προσπάθειες στα αστικά κέντρα ώστε να ενισχυθεί η χρήση των MMM και εναλλακτικών τρόπων μετακίνησης και ένα βασικό μέσο είναι το ποδήλατο. Η γενικευμένη χρήση του ανοίγει νέα ζητήματα για την ασφάλεια των χρηστών ποδηλάτων στις οδούς, καθώς τη νύχτα ο χαμηλός φωτισμός παρατηρείται ότι δυσχεραίνει την αντίληψη τους από τους οδηγούς και αυξάνει τον κίνδυνο ατυχήματος, που για τους ποδηλάτες επιφέρει και σοβαρά τραύματα (Fotios et al., 2016)

Επίσης, εκτός από το ρόλο της ομαλής λειτουργίας της κυκλοφοριακής ροής, ο οδοφωτισμός παίζει σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της ασφάλειας των πολιτών, στον αστικό ιστό γενικότερα. Άλλωστε, η αλλαγή στα πρότυπα του οδοφωτισμού, ειδικά στα αστικά κέντρα, πέρα από τα τυπικά στοιχεία φωτισμού που έχουμε, μπορεί να έχει επίδραση στο αίσθημα της ασφάλειας που νιώθουν οι κάτοικοι. Έτσι υπάρχει μια αντίθεση ανάμεσα στην τάση για περισσότερο φωτισμό και λίγα σκοτεινά σημεία, που δημιουργούν μια αίσθηση ασφάλειας και μειώνουν την αίσθηση κινδύνου και πιθανών εστιών παρανομίας, με την αντίθετη τάση για δυναμικό φωτισμό, μείωση της φωτορύπανσης στις πόλεις και εξοικονόμηση ενέργειας, που σε μεγάλο βαθμό θα κρίνεται και αξιολογείται και από υποκειμενικά κριτήρια, αφού η ίδια η αίσθηση της ασφάλειας δημιουργείται από την ορατότητα και την έλλειψη κρυφών σημείων (Haans & De Kort., 2012). Είναι πλέον αποδεκτό ότι η διατήρηση ενός αισθήματος ασφάλειας των πεζών στα αστικά κέντρα, λόγω επαρκούς φωτισμού δεν απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Αλλά αντίθετα μπορεί να επιτευχθεί με την προσαρμογή του χρώματος του φωτισμού για να μειώσει την κατανάλωση χωρίς πρόβλημα (Saad et al., 2021). Ακόμη, αυτή η έννοια της ασφάλειας παίρνει και νέες διαστάσεις, υπό το πρίσμα του βέλτιστου σχεδιασμού πόλεων. Ακόμα και χώροι που υπό το φως της ημέρας είναι χρήσιμοι και έχουν κόσμο, υπό το καθεστώς της νύχτας και του χαμηλού φωτισμού δημιουργούν αισθήματα φόβου και απομόνωσης (Rahm et al., 2021), που ο σωστός φωτισμός μπορεί να αντιμετωπίσει, όπως συμβαίνει με τα πάρκα.

Έχοντας υπόψη όλα τα παραπάνω στοιχεία διενεργούνται μελέτες για να αξιολογήσουν τη συμπεριφορά των φωτιστικών LED σε σχέση με τον παραδοσιακό οδοφωτισμό, όσον αφορά την αίσθηση ασφάλειας που δημιουργεί στους πολίτες. Ειδικά αν λάβουμε υπόψη ότι το κοινό είναι συνηθισμένο σε ένα συγκεκριμένο πρότυπο φωτισμού και οι αλλαγές σε

ένα άλλο μπορεί να του προκαλέσει δυσφορία και φόβο. Από τα δεδομένα μελετών φαίνεται ότι η χρήση LED αξιολογήθηκε θετικότερα από τις άλλες μεθόδους από πεζούς και οδηγούς, όπως για παράδειγμα στη Βιέννη (Markvica et al., 2019).

3.6.5 Προοπτικές ελέγχου

Η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου, προγραμματισμού και παρακολούθησης της λειτουργίας των λαμπτήρων LED είναι ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας. Οι δυνατότητες και οι εφαρμογές μπορούν να είναι από απλό άνοιγμα τη σωστή ώρα, μέχρι δυναμικά μοντέλα άμεσης απόκρισης. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται και η βελτιστοποίηση της λειτουργίας που εμφανίζουν συμβάλουν στην καλύτερη απόδοση των φωτιστικών.

Βασικό εργαλείο ελέγχου και αυτοματισμού είναι τα PLC (Programmable Logic Controller). Αυτός ο εξοπλισμός παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, καθώς μπορεί να προγραμματιστεί για να εφαρμόζει μια λογική, να ανοίγει και να κλείνει τα φώτα ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Επίσης έχει επαφές για εισόδους εξόδους και μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο. Ουσιαστικά μας παρέχει μια εύκολη λύση αυτομάτου ελέγχου και χρονοπρογραμματισμού, που εξοικονομεί έως και 35% ενέργεια με χρήση LED, ενώ σαν λύση απαιτεί μικρό αρχικό κεφάλαιο (Pasc & Dumitru, 2017).

Η έως τώρα μεθοδολογία ρύθμισης του φωτισμού γίνεται με αστρονομικά ρολόγια, με προρυθμισμένες τιμές, που όμως δε λαμβάνουν υπόψη τους άλλου παράγοντες όπως ο καιρός. Γενικά αυτές οι μέθοδοι είναι παρωχημένες και έχουν όρια στις δυνατότητές τους. Ειδικά με τη μεταβολή της αναλογίας ημέρας με νύχτα, ανάλογα με την εποχή του χρόνου, αλλάζουν οι ανάγκες φωτισμού, ειδικά στις οριακές συνθήκες ανατολής και δύσης του ήλιου, όπου τα επίπεδα φωτός διαφέρουν πολύ ανάλογα με την εποχή και τον συνηθισμένο καιρό, χωρίς το σύστημα να προσαρμόζεται αναλόγως. Αντί για μια σταθερή ώρα, καλύτερη λύση είναι η ενεργοποίηση του φωτισμού LED, όταν η αντίθεση λαμπρότητας έχει κατάλληλες τιμές και αυτή η μέθοδος είναι ανώτερη (Gălățanu, 2020), γιατί προσδιορίζει το πραγματικό όριο αλλαγής κατάστασης φωτισμού on/off.

Κατά καιρούς, πολλά συστήματα με αυτοματισμό και έλεγχο έχουν δοκιμαστεί. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αντικατάσταση με λαμπτήρες LED, και ο έλεγχος τους απομακρυσμένα με προγράμματα πρόβλεψης της κυκλοφορίας και απόκρισης στα πραγματικά δεδομένα, με αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 30%

(Marino et al., 2017). Βασικό στοιχείο είναι η διαδικασία εκπαίδευσης και αξιολόγησης των μεθόδων πρόβλεψης της κυκλοφορίας και η αντίστοιχη απόκριση, μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη διαδικασία επεξεργασίας και αντίδρασης στον όγκο των δεδομένων. Η αξιολόγηση των μεθόδων και των στρατηγικών είναι κομβική για την ανάπτυξη αποτελεσματικών ευφυών συστημάτων.

Η δημιουργία τέτοιων συστημάτων, που να ελέγχουν το φωτισμό σε εγκαταστάσεις μπορεί να είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία, καθώς αυτά πρέπει να λαμβάνουν συνεχώς πληροφορίες από εξωτερικές πηγές, όπως σένσορες, με σύνθετες και πολύπλοκες απαιτήσεις, όπως η δυναμική ρύθμιση φωτισμού, πολλαπλά επίπεδα φωτισμού κ.α. Οι ιδιαίτερες απαιτήσεις του σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων οδηγούν στη χρήση διάφορων μεθόδων, όπως των γράφων για να γίνει σωστή μοντελοποίηση των διεργασιών και της εφαρμοσμένης λογικής (Wojnicki et al., 2014). Η χρήση PLC επιτρέπει τον προγραμματισμό με πολλές μεθόδους και το ίδιο ισχύει για τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται.

Ένας ακόμα τομέας, όπου είναι αναγκαίος ο έλεγχος, είναι οι σήραγγες. Και σε αυτήν την περίπτωση ένα PLC συλλέγει όλα τα δεδομένα από τους αισθητήρες εντός και εκτός της σήραγγας και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους αλγορίθμους ρυθμίζει τις ζώνες φωτεινότητας εντός, με προσοχή να μην υπάρχει ανομοιομορφία (Shuguang, 2015). Μία άλλη επιλογή, είναι η χρήση LED με PID ελεγκτές και μεθόδους, όπου όταν δεν υπάρχει κυκλοφοριακός φόρτος, η φωτεινότητα αλλάζει για εξοικονόμηση ενέργειας και αναβαθμισμένη ασφάλεια (Qin et al., 2017).

Μια μέθοδος επικοινωνίας που μπορεί να εφαρμοστεί και να αξιοποιήσει το δίκτυο ηλεκτροδότησης, είναι μέσω power line. Σε μελέτη που έγινε παρατηρήθηκε, για απλό άνοιγμα και κλείσιμο φώτων σε δρόμο μελέτης, εξοικονόμηση της τάξης του 9.6% (Farkas et al., 2018). Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου ήδη υπάρχει δίκτυο παροχής. Βασικές απαιτήσεις του συστήματος αυτού είναι η ύπαρξη σταθμού βάσης (base station), modem and repeater για να μπορεί να λειτουργήσει.

Εκτός από τα συστήματα οδοφωτισμού, που είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, τα φωτιστικά LED μπορούν να ενταχθούν και σε αυτόνομα συστήματα. Όπως έχει αναφερθεί, τα μεγαλύτερα προβλήματα στον οδοφωτισμό είναι η υψηλή κατανάλωση και το κόστος λειτουργίας. Ενώ συνήθως θεωρούμε δεδομένο ότι τα

συστήματα αυτά είναι διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο παροχής ενέργειας, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν υβριδικά συστήματα, με φωτιστικά LED για εξοικονόμηση, αυτόνομα με φωτοβολταϊκά και μπαταρίες. Για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενετικός αλγόριθμος, που ρυθμίζει την ένταση φωτισμού για να μπορεί το σύστημα να διατηρεί ενέργεια και μπαταρία. Μάλιστα η χρήση τέτοιων αλγορίθμων που ελέγχουν το σύστημα, έδειξε επάρκεια ενέργειας από το φωτοβολταϊκό και πλεόνασμα αυτού (Ramadhani et al., 2016).

Σε παρόμοια λογική βρίσκεται μια ακόμα εναλλακτική για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που είναι τα υβριδικά συστήματα, που τροφοδοτούνται ταυτόχρονα από φωτοβολταϊκό και από το δίκτυο, φτιάχνοντας ένα υποδίκτυο που θα έχει θετικό ισοζύγιο ενέργειας και θα δίνει πίσω το πλεόνασμα, ενώ σε περιπτώσεις ανάγκης θα μπορεί να δεσμεύει ενέργεια για να καταναλώσει και να συνεχίσει να λειτουργεί. Τέτοια συστήματα με φωτιστικά LED μπορούν να εφαρμόσουν έξυπνο έλεγχο, μέσω ενός ελεγκτή. Αυτός μπορεί να είναι web based software application στο cloud και να παρέχει ευφυή έλεγχο (Konacs et al., 2016), εντάσσοντας την εγκατάσταση στο ευρύτερο πλαίσιο ενός προγράμματος έξυπνης πόλης (smart city).

Τέλος, σε περίπτωση που απαιτείται, ο έλεγχος του οδοφωτισμού, πέρα από τα LED, μπορεί να εφαρμοστεί και στις παραδοσιακές τεχνολογίες, αν και έχει πιο περιορισμένες δυνατότητες. Αν και η αύξηση του ποσοστού των LED σε σχέση με τις HPS λάμπες είναι ραγδαία, υπάρχουν ακόμα πάρα πολλές εγκαταστάσεις με αυτές, αν και στο μέλλον θα είναι ακόμα πιο συμφέρον οικονομικά να αλλαχθούν. Προς το παρόν, όμως προκύπτει η ανάγκη να αξιοποιηθούν και αυτές και να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία τους. Έτσι είναι εφικτός ο έλεγχός τους μέσω της μετατροπής των controller της λάμπας σε συσκευές IoT και της εφαρμογής πρωτοκόλλων επικοινωνίας για το άνοιγμα τους. Βασική λειτουργία είναι, όπως και στα LED, να κλείνουν τα περιττά φώτα το βράδυ, όταν δεν υπάρχει πολλή κίνηση (Thungtong et al., 2021).

3.6.6 Ποιότητα φωτισμού και τεχνικά στοιχεία

Αν και οι μελέτες φωτισμού ακολουθούν όλα τα απαραίτητα πρότυπα λειτουργίας, το ζήτημα της ποιότητας του φωτισμού παραμένει ένα σημαντικό στοιχείο, πέρα από την οικονομία ή την ένταση, γιατί αποτυπώνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν άμεση και έμπρακτη επίδραση στον οδηγό. Μπορεί δηλαδή δύο λάμπες να έχουν παρόμοια

χαρακτηριστικά, αλλά τελικά να αποδίδουν φως με πολύ διαφορετικές ιδιότητες. Η ποιότητα του φωτισμού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το ύψος του ιστού, η διάταξη τους, η γωνία πρόσπτωσης και η αντανάκλαση στο οδόστρωμα. Ένα χαρακτηριστικό που εξετάζεται είναι η απόδοση σε διαφορετικές επιφάνειες οδοστρώματος και η συνολική απόδοση και προσαρμογή. Σύμφωνα με αντίστοιχη μελέτη (Yoomak & Ngaoritakkul, 2018) οι λαμπτήρες HPS έχουν πράγματι καλύτερη φωτεινή ροή που οδηγεί σε καλύτερη μέση λαμπρότητα και μέση φωτεινή ένταση επιφάνειας, όμως τα LED παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία, που τελικά οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα διάχυσης του φωτός. Επίσης, τα HPS έχουν παρόμοια απόδοση σε όλες τις διατάξεις, ενώ τα LED όχι, ειδικά η διάταξη single sided έχει αποτελέσματα κάτω του μέσου όρου. Για το λόγο αυτό χρειάζεται πιο προσεκτική μελέτη κατανομής στύλων και του ύψους της διάταξης.

Κατ' επέκταση, ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη, είναι η δυνατότητα που μπορούν να έχουν τα LED σε έργα μετασκευής (retrofit). Όπως είναι προφανές, πέρα από τις μελέτες για φωτισμό και το σχεδιασμό με νέες τεχνολογίες, η πλειοψηφία των φωτιστικών θα εγκατασταθεί σε ήδη υπάρχουσες δομές και με μελέτες που είχαν γίνει έχοντας υπόψη άλλα είδη λαμπτήρων (κυρίως HPS) με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η προσαρμοστικότητα εδώ είναι απαραίτητη γιατί μπορεί τα πραγματικά αποτελέσματα σε τέτοιες συνθήκες να είναι πολύ διαφορετικά από τα θεωρητικά μοντέλα και τους υπολογισμούς. Στις μελέτες που έγιναν πάνω σε αυτό το θέμα (Beccali et al., 2019), παρατηρήθηκε μεγάλη ικανοποίηση των χρηστών (user satisfaction) και μείωση κατανάλωσης, γεγονός που επιβεβαιώνει την δυνατότητα της αντικατάστασης των παλαιών φωτιστικών με LED, χωρίς να αλλοιώνεται η ποιότητα του οδοφωτισμού.

3.6.7 Αισθητική

Τέλος, μια όψη του θέματος που συχνά παραβλέπεται είναι η αισθητική σκοπιά. Ο φωτισμός πέρα από ασφάλεια και λειτουργικότητα μπορεί να παίζει και ένα άλλο ρόλο, του να δίνει ομορφιά στην πόλη, να αναδεικνύει τα αξιοθέατα και οπτικά να βελτιώνει την ποιότητα ζωής και τη διαβίωση των κατοίκων. Έτσι ο φωτισμός μπορεί να αναδεικνύει ιστορικά κτίρια (Cucchiella et al., 2017) και είναι ζήτημα εκτός των μηχανικών αλλά και των city planners. Με τη χρήση LED είναι πολύ πιο εύκολο σήμερα να υποστηριχθούν τέτοιες προσπάθειες καθώς το μικρό μέγεθος, η οικονομική απόδοση και η ποιότητα

φωτισμού επιτρέπουν να ενταχθεί σε ένα γενικότερο σχεδιασμό ανάδειξης των σημαντικότερων σημείων κάθε πόλης.

3.7 Σύνοψη κεφαλαίου και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε αρχικά η θεώρηση της τεχνολογίας των ημιαγωγών και των λαμπτήρων LED και αναλύθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, όπως η διάρκεια ζωής, η επίδραση της θερμοκρασίας και οι διατάξεις φωτιστικών που χρησιμοποιούνται. Έγινε εμφανές ότι σε θεωρητικό επίπεδο, τα φωτιστικά LED έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η διάρκεια ζωής και η προσαρμοστικότητά τους.

Ένα σημείο που αναδείχτηκε είναι επίσης η δυνατότητα που παρέχουν τα LED για δυναμική ρύθμιση της φωτεινότητάς τους (dimming). Η ευκολία και ευελιξία που παρέχει η τεχνολογία LED στη δυναμική ρύθμιση είναι πολύ σημαντική, ειδικά από τη σκοπιά της τηλεδιαχείρισης, όπου η φωτεινότητα των λαμπτήρων χρειάζεται να αλλάζει, είτε ανάλογα με την εποχή και τον καιρό, είτε με δυναμικό τρόπο ανάλογα με τις ανάγκες σε προηγμένα ευφυή συστήματα ελέγχου και διαχείρισης.

Στη συνέχεια έγινε κριτική επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να αναλυθεί σε βάθος η πραγματική συμπεριφορά των λαμπτήρων LED σε εφαρμογές οδοφωτισμού. Έγινε σύγκριση της τεχνολογίας αυτής σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους οδοφωτισμού και αναλύθηκαν τα θετικά και αρνητικά στοιχεία που παρουσιάζει, σε διάφορους τομείς, σύμφωνα με κριτήρια από ένα εύρος αντικειμένων και από την εμπειρία της χρήσης τους σε έργα και εγκαταστάσεις.

Ένα βασικό συμπέρασμα, από αυτήν την ανάλυση, είναι ότι πράγματι με τη χρήση των LED υπήρξε εξοικονόμηση ενέργειας στις εγκαταστάσεις οδοφωτισμού. Η εξοικονόμηση οφείλεται αφενός στην χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των λαμπτήρων και αφετέρου στην δυνατότητα dimming, που οδηγεί σε χρήση των φωτιστικών μόνο όταν είναι αναγκαίο και στην αναγκαία στάθμη φωτισμού, που μπορεί να είναι χαμηλότερη από το μέγιστο. Έτσι έγινε σαφές ότι η αντικατάσταση παλαιότερων τύπων λαμπτήρων όπως οι HPS, είχε άμεση επίδραση στη μείωση του κόστους, αλλά και στις ίδιες τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν LED, όπου με τη χρήση του dimming παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στην καταναλισκόμενη ενέργεια.

Επίσης, μελετώντας την οικονομική πλευρά της χρήσης LED, έγινε φανερό ότι παρά το αρχικά μεγάλο κόστος αντικατάστασης λαμπτήρων, η απόδοση και ειδικά σε συστήματα με ρύθμιση φωτισμού, είναι τόσο καλή που οδηγεί σε γρήγορη απόσβεση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή των LED, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τη γενικευμένη χρήση τους τείνει να μειωθεί, αυτό σημαίνει ότι οι προοπτικές επένδυσης σε φωτιστικά LED είναι ακόμα καλύτερη, ειδικά στη μαζική κλίμακα που απαιτούν τα έργα οδοφωτισμού. Βοηθητικό ρόλο παίζει και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, που σημαίνει ότι μελλοντική νέα αντικατάστασή τους θα γίνει πολύ αργά, γεγονός που κάνει την επένδυση σε αυτά ακόμα πιο συμφέρουσα.

Όσον αφορά την οικολογική πτυχή της χρήσης, είναι σαφές ότι η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και ο μεγάλος κύκλος ζωής είναι πολύ θετικά στοιχεία. Από την άποψη των υλικών που χρησιμοποιούνται, αν και οι παλαιότερες τεχνολογίες φωτιστικών που αντικαθίστανται από τα LED είχαν τοξικά στοιχεία και καλώς αποσύρονται, για την κατασκευή των ημιαγωγών χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες από γάλιο, ίνδιο, αρσενικό, αντιμόνιο και άλλα μικροϋλικά που επίσης εμφανίζουν προβληματικές, ειδικά κατά τη διαχείρισή τους ως απορρίμματα. Πέρα από αυτό, η λειτουργία των LED έχει επιπτώσεις, όπως και όλα τα φωτιστικά δρόμου στη χλωρίδα και πανίδα κάθε περιοχής, γεγονός που με το dimming μπορεί να αντιμετωπιστεί πιο αποτελεσματικά και να μειωθεί ο αντίκτυπος του φωτισμού σε σημεία που είναι αναγκαίο.

Η ασφάλεια είναι ένας τομέας με μεγάλη σημασία, καθώς ο σχεδιασμός του οδοφωτισμού έχει ως στόχο την ομαλή κυκλοφορία των οχημάτων και την αίσθηση ασφάλειας από τους πεζούς, ειδικά εντός του αστικού ιστού. Με τη ρύθμιση της στάθμης των LED επιτυγχάνεται η μείωση της θάμβωσης των οδηγών που παρατηρείται σε λαμπτήρες HPS ή και στα φώτα πορείας των οχημάτων. Ένας τομέας που χρειάζεται περισσότερη ανάπτυξη αφορά τους πεζούς και τους ποδηλάτες και τις ιδιαίτερες ανάγκες που έχουν για φωτισμό στο δρόμο, καθώς είναι τα συχνότερα θύματα και με τους σοβαρότερους τραυματισμούς, σε σχέση με τους οδηγούς αυτοκινήτων. Επιπρόσθετα, αναφορικά με την αίσθηση ασφάλειας που νιώθουν οι πολίτες, ο φωτισμός με LED αξιολογείται πολύ θετικά, ειδικά αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι οι άνθρωποι δυσκολεύονται να προσαρμοστούν στην αλλαγή φωτισμού και συνήθως τους δημιουργεί αρνητικά συναισθήματα. Αυτά τα δεδομένα θα είναι χρήσιμα αν ληφθούν υπόψη σε μελέτες χωροταξίας και σχεδιασμού πόλεων.

Ένα ακόμη βασικό στοιχείο είναι ο έλεγχος των φωτιστικών, με τα LED να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες. Πολλά συστήματα λειτουργούν με χρονοπρογραμματισμό και ελέγχονται με PLC και σε ορισμένες περιπτώσεις αυτά τα συστήματα, πέρα από το να εκτελούν ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα, μπορούν να προσαρμόζονται δυναμικά στα δεδομένα που λαμβάνουν από το δρόμο. Σε τέτοια συστήματα, καθώς και σε υβριδικά, παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Ακόμη, εξετάζοντας την ποιότητα φωτισμού που παράγουν οι διατάξεις στο δρόμο, αν και τα LED δεν υπερέχουν σε όλες τις κατηγορίες, εμφανίζοντας χειρότερη μέση λαμπρότητα στο οδόστρωμα από τους HPS, αυτό εξισορροπείται με την εμφάνιση μεγαλύτερης ομοιομορφίας και διάχυσης του φωτός. Από αισθητική σκοπιά επίσης, η τεχνολογία LED αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη για την ανάδειξη αξιοθέατων και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις πόλεις.

Σε τελική ανάλυση, στην παρούσα εργασία επιβεβαιώνονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας LED στον οδοφωτισμό και αναδεικνύονται οι ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες της, αν αυτή αξιοποιηθεί σε συστήματα με ρύθμιση φωτισμού και δυναμική προσαρμογή σε συστήματα τηλεδιαχείρισης.

Κεφάλαιο 4 Μέθοδοι τηλεδιαχείρισης και όργανα ελέγχου

4.1 Σκοπός

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η ανάλυση των εννοιών της τηλεδιαχείρισης και του ελέγχου, η περιγραφή των υπάρχουσών μεθόδων, που εφαρμόζονται σε έργα οδοφωτισμού, καθώς και η καταγραφή των μέσων και των οργάνων που είναι απαραίτητα για την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας.

4.2 Εισαγωγή

Από τα προηγούμενα κεφάλαια έγινε φανερό ότι η τεχνολογία φωτισμού με LED έχει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν. Αυτό σημαίνει ότι η αντικατάσταση των λαμπτήρων σε όλο το οδικό δίκτυο και στον αστικό ιστό μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή εξοικονόμηση, το κόστος και την ποιότητα του φωτισμού. Όμως, πέρα από τα δεδομένα πλεονεκτήματα που αναλύθηκαν προηγουμένως, ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα των LED είναι η δυνατότητα ελέγχου και τηλεδιαχείρισης. Ειδικά με την πρόοδο της τεχνολογίας στα δίκτυα και στα έξυπνα συστήματα, οι προοπτικές που ανοίγονται για εφαρμογές έξυπνου ελέγχου, πρόγνωσης, πρόληψης και αυτοματοποίησης είναι ολοένα και αυξανόμενες.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναλυθούν οι κλασικές τεχνικές διαχείρισης και ελέγχου των συστημάτων οδοφωτισμού, όπως εφαρμόζονται μέχρι σήμερα. Επίσης, θα αναλυθεί η έννοια της τηλεδιαχείρισης συστημάτων και θα γίνει μια επισκόπηση των τεχνολογιών ανίχνευσης της κυκλοφορίας και συλλογής δεδομένων, που αξιοποιεί κάθε σύστημα εποπτείας και ελέγχου ώστε να παρέχει στο χρήστη ή στο σύστημα τις αναγκαίες πληροφορίες για την βέλτιστη λειτουργία του οδοφωτισμού και του δρόμου γενικότερα.

4.3 Η έννοια της τηλεδιαχείρισης

Με την αύξηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων, την πρόοδο της τεχνολογίας στα υπολογιστικά συστήματα και στα δίκτυα και τον διαρκώς αυξανόμενο όγκο πληροφοριών και παραμέτρων, είναι εμφανές ότι η διαχείριση ενός έργου ή οποιασδήποτε διεργασίας δε

μπορεί να μένει σε τοπικό επίπεδο και να επαφίεται μόνο στον ανθρώπινο παράγοντα. Η τηλεδιαχείριση, ή ομοίως τηλεέλεγχος, είναι η παρακολούθηση από απόσταση, ενός συστήματος, με χρήση τηλεπικοινωνιακών και ηλεκτρονικών μέσων. Η εποπτεία αυτή, δεν είναι πάντα παθητική, αλλά ανάλογα με την περίπτωση και τις ανάγκες, μπορεί να κάνει παρεμβάσεις, να στέλνει εντολές και να αναλύει δυναμικά τα δεδομένα που λαμβάνει.

Η ανάγκη για τηλεδιαχείριση είναι σήμερα ακόμα πιο έντονη, καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις για απόδοση, ασφάλεια, ταχύτητα απόκρισης και αποτελεσματικότερο έλεγχο. Όλα αυτά διασφαλίζονται με συστήματα που μπορούν να επεξεργάζονται μεγάλο όγκο πληροφορίας γρήγορα, να ειδοποιούν τους χειριστές σε περίπτωση προβλήματος ή ακόμα και να λαμβάνουν αποφάσεις με βάση τον προγραμματισμό τους και προκαθορισμένα σενάρια λειτουργίας.

4.4 Συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας

Τα συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας (Traffic Management Systems – TMS) αυτοκινητόδρομων είναι ένα σύνολο συστημάτων και προγραμμάτων παρακολούθησης, ελέγχου και διαχείρισης της κυκλοφορίας των δρόμων, με τη αξιοποίηση ανιχνευτών κυκλοφορίας, αισθητήρων μηχανικής όρασης και άλλων μέσων εποπτείας της κυκλοφοριακής ροής. Ο έλεγχος του οδοφωτισμού εντάσσεται σε αυτά τα συστήματα, ως επιμέρους κομμάτι. Οι βασικές λειτουργίες που επιτελούν είναι η επιτήρηση της κυκλοφορίας στον αυτοκινητόδρομο, ο έλεγχος της κυκλοφορίας στις ράμπες εισόδου, η διαχείριση των λωρίδων κυκλοφορίας, η διαχείριση της κυκλοφορίας σε περιπτώσεις έκτακτων γεγονότων (προγραμματισμένων ή μη), η παροχή πληροφόρησης στους ταξιδιώτες και η αστυνόμευση των μέτρων ελέγχου της κυκλοφορίας. Ως έκτακτα γεγονότα μπορούν να χαρακτηριστούν συμβάντα όπως ακινητοποιημένο όχημα, ατύχημα, πυρκαγιά, πεζός (ή ζώο / αντικείμενο) στο οδόστρωμα, κυκλοφοριακή συμφόρηση, επικίνδυνα καιρικά φαινόμενα, κατολίσθηση, διαρροή βενζίνης, πετρελαίου ή χημικής ουσίας κ.α.

4.5 Μέθοδοι και μέσα τηλεδιαχείρισης

Όπως αναλύεται και στην αντίστοιχη τεχνική οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2018), όταν δεν υπάρχει έλεγχος του φωτισμού, αυτά θα λειτουργούν στη

μέγιστη ισχύ για όλο το χρονικό διάστημα. Μέσω του ελέγχου της φωτεινής ροής ή και της εν γένει λειτουργίας ενός φωτιστικού, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο έλεγχος στις εγκαταστάσεις οδοφωτισμού μπορεί να γίνει είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα. Στην περίπτωση του τοπικού ελέγχου, χρησιμοποιούνται αυτοματισμοί και κυκλώματα που ρυθμίζουν κάθε φωτιστικό ή συστοιχίες αυτών. Στην περίπτωση του απομακρυσμένου ελέγχου, ο χώρος ευθύνης είναι διευρυμένος και καλύπτει περισσότερα φωτιστικά σώματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός συστημάτων ελέγχου, που σημαίνει μεγαλύτερο κόστος και πολυπλοκότητα, όμως ταυτόχρονα παρέχει περισσότερες δυνατότητες και ελευθερίες στο χειρισμό.

4.5.1 Τοπικός Έλεγχος

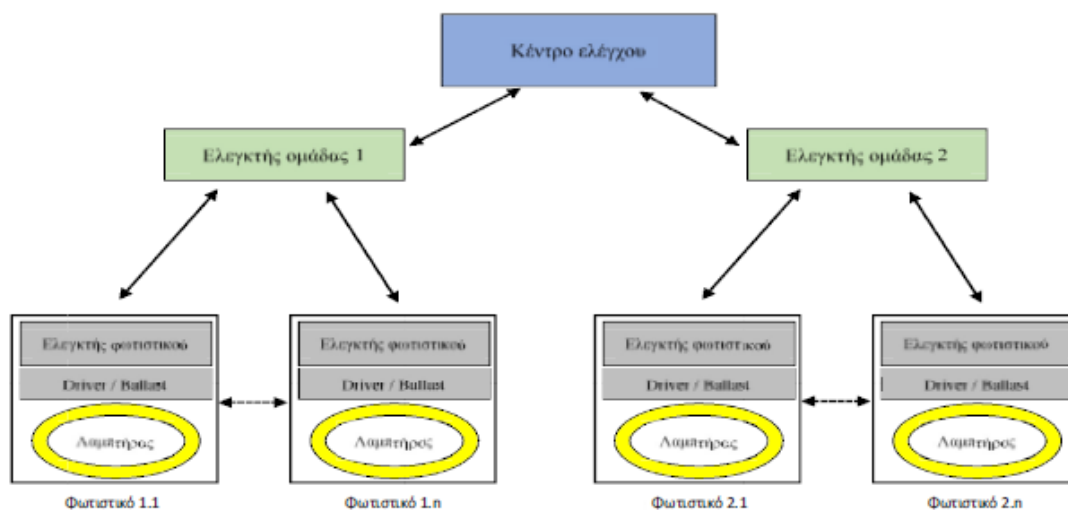
Ο τοπικός έλεγχος αφορά διατάξεις με ένα ή περισσότερα φωτιστικά, που τροφοδοτούνται όλα από τον ίδιο παροχικό πίνακα. Αυτός μπορεί να χωριστεί στις εξής κατηγορίες:

1. Απλό άνοιγμα και κλείσιμο των φωτιστικών, είτε με τη χρήση σήματος στο κύκλωμα παροχής ισχύος, τον αστρονομικό διακόπτη ή το φωτοκύτταρο. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τεχνολογία φωτισμού, από τα συμβατικά φωτιστικά μέχρι και αυτά τεχνολογίας LED.
2. Προγραμματισμένη μείωση της φωτεινότητας, κατά τη διάρκεια της νύχτας, με τη χρήση του κατάλληλου ελεγκτή φωτιστικού (step dimming). Επίσης αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα είδη φωτιστικών.
3. Προγραμματισμένη δυναμική ρύθμιση της φωτεινής ροής κάθε φωτιστικού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως στα φωτιστικά LED που διαθέτουν τα κατάλληλα συστήματα διαχείρισης και ελέγχου, όπως ειδικούς drivers που να υποστηρίζουν προφίλ λειτουργίας και χρονοπρογραμματισμό.

4.5.2 Απομακρυσμένος έλεγχος

Ο απομακρυσμένος έλεγχος του οδοφωτισμού (Εικόνα 4.1) αποτελεί την πιο σύγχρονη μέθοδο διαχείρισης, όντας ουσιαστικά μέθοδος τηλεδιαχείρισης και προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τον τοπικό έλεγχο, στο χειρισμό των φωτιστικών σωμάτων, αλλά και στην επιτήρηση του συστήματος κατά τη λειτουργία. Τα περισσότερα συστήματα απομακρυσμένου ελέγχου έχουν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Άμεσο δυναμικό έλεγχο κάθε φωτιστικού ή συστοιχίας φωτιστικών, μέσω της ενεργοποίησης και απενεργοποίησης, καθώς και του dimming
2. Διαγνωστικό έλεγχο της κατάστασης του εξοπλισμού και παρακολούθηση της λειτουργίας του
3. Απομακρυσμένη πρόσβαση στους τοπικούς ελεγκτές, με δυνατότητα προγραμματισμού και ρύθμισης αυτών
4. Παρακολούθηση και επεξεργασία των δεδομένων από τους αισθητήρες που βρίσκονται εγκατεστημένοι κατά μήκος του δρόμου (αναγνώρισης οχημάτων, κίνησης, καιρικών συνθηκών κ.α.), που αυξάνουν τη λειτουργικότητα του συστήματος και παρέχουν πληροφορίες προς τους χειριστές ή ακόμα και συναγερμούς σε περιπτώσεις παραβάσεων ή προβλημάτων.



Εικόνα 4.1 Ενδεικτική τοπολογία συστήματος απομακρυσμένης διαχείρισης δικτύου οδοφωτισμού (TOTTE, 2018)

Για να καταστεί εφικτή η απομακρυσμένη διαχείριση του οδικού δικτύου, είναι απαραίτητη η αδιάκοπη ροή δεδομένων στο κέντρο, μέσω σημάτων από τα τοπικά σημεία ελέγχου. Η επικοινωνία αυτή μπορεί να γίνεται είτε ενσύρματα ή ασύρματα, από τους σταθμούς ελέγχου προς τα φωτιστικά σώματα. Ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους, αυτά τα συστήματα μπορεί να έχουν ελεγκτές σε κάθε ομάδα φωτιστικών ή να επικοινωνούν απευθείας με κάθε ένα ξεχωριστά. Μια βασική τοπολογία έχει τα ακόλουθα στοιχεία:

- **Κέντρο ελέγχου:** Είναι το κεντρικό στοιχείο της διαδικασίας του συστήματος ελέγχου. Έχει όλα τα απαραίτητα μέσα και το προσωπικό, ώστε να διαχειρίζεται

καταστάσεις, να λαμβάνει αποφάσεις και να αντιδρά σε τυχόν. Στο κέντρο ελέγχου γίνεται η εποπτεία του συστήματος σε οθόνες και υπάρχουν μέσα διαχείρισης και αποθήκευσης δεδομένων, καθώς επίσης δημιουργία αναφορών λειτουργίας, έλεγχος σφαλμάτων και ομαδοποίηση των φωτιστικών σωμάτων.

- **Ελεγκτής ομάδας φωτιστικών:** Ο ελεγκτής, όπου υπάρχει, αποτελεί τον ενδιάμεσο σταθμό που συνδέει το κέντρο ελέγχου με τα φωτιστικά. Η βασική του λειτουργία είναι να μεταφέρει τις εντολές από το κέντρο προς τα φώτα.
- **Ελεγκτής φωτιστικού σώματος:** Ο ελεγκτής έχει ως βασική λειτουργία τη μεταφορά των σημάτων από τον ελεγκτή ομάδας προς τα φωτιστικά σώματα για την ενεργοποίηση και απενεργοποίησή τους ή και τη ρύθμιση της φωτεινότητάς τους. Αντίστοιχα μεταφέρει σήματα από τα φωτιστικά προς το κέντρο, κυρίως δεδομένα λειτουργίας και μετρήσεις καθώς και τυχόν ειδοποιήσεις για βλάβη ή συναγερμούς της συσκευής.
- **Driver/ballast:** Είναι το σύστημα που τροφοδοτεί τα φωτιστικά. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και για τη ρύθμιση της φωτεινής καθώς επίσης και την τροφοδοσία κάποιων δευτερευόντων συστημάτων των διατάξεων των φωτιστικών.
- **Λαμπτήρας:** Είναι η κατάληξη όλου το συστήματος που αναφέρθηκε. Αν το είδος του λαμπτήρα το επιτρέπει, τότε εκτός από το άνοιγμα και κλείσιμο, μπορεί να υπάρχει η βηματικής ή δυναμικής ρύθμισης της φωτεινής του ροής

4.5.3 Διαλειτουργικότητα

Κάθε σύστημα ελέγχου εγκατάστασης οφείλει να έχει τα κατάλληλα μέσα ώστε να είναι εφικτή η διαλειτουργικότητα με άλλα συστήματα ελέγχου. Η αναφορά στη διαλειτουργικότητα σχετίζεται με τα ακόλουθα στοιχεία:

α) Τη δυνατότητα ελέγχου ενός φωτιστικού σώματος από οποιοδήποτε σύστημα ελέγχου, ανεξάρτητα αν είναι του ίδιου κατασκευαστή ή κάποιου άλλου. Δηλαδή κάθε κατασκευαστής θα πρέπει να υποστηρίζει όλα τα συστήματα ελέγχου, αν τηρούν κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές.

β) Τη δυνατότητα ανταλλαγής λειτουργικών στοιχείων και σημάτων ελέγχου μεταξύ των συστημάτων ελέγχου, ανεξάρτητα από τον αριθμό και τους κατασκευαστές αυτών, υπό ένα κοινό λογισμικό ελέγχου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών από τον εκάστοτε κατασκευαστή ενός συστήματος ελέγχου.

γ) Την αποσύνδεση από την ανάγκη να προέρχονται από τον ίδιο κατασκευαστή τα φωτιστικά σώματα και τα συστήματα ελέγχου ταυτόχρονα. Για να υπάρξει διαλειτουργικότητα θα μπορούσαν τα συστήματα ελέγχου των ελεγκτών των φωτιστικών να τοποθετούνται στο εξωτερικό του φωτιστικού σώματος, στο κέλυφος ή στον ιστό φωτισμού και να συνδέονται με τυποποιημένες επαφές.

4.6 Όργανα ελέγχου και εποπτείας

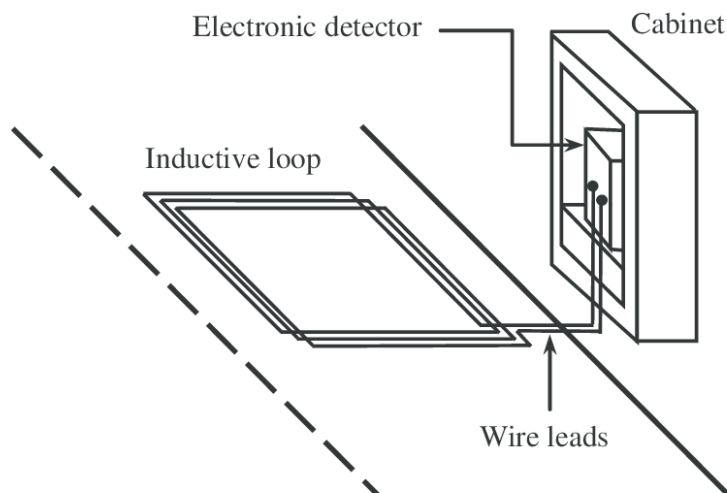
Βασικό στοιχείο για να μπορεί να γίνεται αποτελεσματική τηλεδιαχείριση του φωτισμού είναι η διαχείριση της πληροφορίας που έρχεται από το δρόμο. Ένα σημαντικό κομμάτι λοιπόν του συστήματος είναι τα όργανα που συλλέγουν δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια μπορεί να τα αξιολογήσει ένας χειριστής ή να τροφοδοτήσουν ένα αυτόματο σύστημα που λαμβάνει αποφάσεις με βάση κάποιο πρότερο προγραμματισμό. Τα όργανα αυτά, μπορεί να είναι ανιχνευτές της κυκλοφορίας, μετρητές φωτεινότητας ή καιρικών συνθηκών κ.α.

4.6.1 Όργανα ανίχνευσης κυκλοφορίας

Τα μέσα ανίχνευσης της κυκλοφορίας είναι κομβικό κομμάτι του ελέγχου. Ανάλογα με το φόρτο, τις ειδικές συνθήκες και την οποιαδήποτε έκτακτη ανάγκη, μπορούμε να ρυθμίσουμε τη φωτεινότητα ώστε να προσαρμόζεται στις ανάγκες της κυκλοφορίας και να διασφαλίζει την ομαλή ροή, καθώς επίσης και την αποδοτικότερη λειτουργία του δρόμου. Οι ανιχνευτές αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους παρεμβατικούς και τους μη παρεμβατικούς. Οι παρεμβατικοί είναι αυτοί που απαιτούν την εγκατάστασή τους στο οδόστρωμα, ενώ οι μη παρεμβατικοί μπορούν να τοποθετηθούν πάνω από αυτό, χωρίς να γίνει παρέμβαση στο δρόμο. Παρακάτω αναφέρονται μερικά βασικά μέσα.

4.6.1.1 Επαγωγικοί βρόγχοι (*vehicle loop detectors*)

Ο επαγωγικός βρόγχος (Εικόνα 4.2) είναι ένα πηνίο από το οποίο περνάει ηλεκτρικό ρεύμα και τοποθετείται εντός του οδοστρώματος ώστε να ανιχνεύει την κυκλοφορία. Όταν περάσει από δίπλα του ένα μεταλλικό αντικείμενο ή κάτι που θα διαταράξει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του, τότε θα μεταβληθεί η αυτεπαγωγή του και έτσι θα ανιχνεύσει ότι πέρασε ένα όχημα από το σημείο ελέγχου. Μία τέτοια διάταξη αποτελείται συνήθως από ένα καλώδιο, που τοποθετείται κάθετα στο δρόμο και έναν ελεγκτή.



Εικόνα 4.2 Επαγωγικός βρόχος (“Elements of an inductive loop detector”, n.d.)

4.6.1.2 Ανιχνευτές μαγνητικού πεδίου (μαγνητόμετρα)

Οι ανιχνευτές μαγνητικού πεδίου είναι αισθητήρες που ανιχνεύουν το μαγνητικό πεδίο της γης και εγκαθίστανται εντός του οδοστρώματος. Όταν ένα όχημα περάσει εντός του χώρου ανίχνευσης του αισθητήρα, θα μεταβληθούν οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου και το μαγνητόμετρο, διαβάζοντας αυτήν την μεταβολή, ανιχνεύει την παρουσία του οχήματος. Μετά την ανίχνευση, οι αισθητήρες στέλνουν την πληροφορία αυτή στα αντίστοιχα σημεία πρόσβασης (access points) και από κει στο κεντρικό σύστημα και τον τελικό δέκτη. Η διαδικασία τοποθέτησης του εξοπλισμού είναι αρκετά απλή, αφού περιλαμβάνει τη διάνοιξη μιας μικρής οπής στο οδόστρωμα. Αυτό είναι και ένα πλεονέκτημα του συστήματος, όταν είναι δύσκολη ή μη συμφέρουσα η τοποθέτηση καλωδίων στο οδόστρωμα. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα μαγνητόμετρα είναι η αδυναμία τους να εντοπίσουν οχήματα, όταν αυτά είναι ακινητοποιημένα, καθώς και ότι λειτουργούν με μπαταρίες, οι οποίες πρέπει να αντικαθίστανται σε περιοδικά χρονικά διαστήματα.

4.6.1.3 Ανιχνευτές πίεσης

Οι ανιχνευτές πίεσης μετράνε την ασκούμενη σε αυτούς επίδραση από το επερχόμενο όχημα. Συνήθως πρόκειται για λεπτούς σωλήνες που συνδέονται με το οδόστρωμα έτσι ώστε όταν ένα όχημα περνά από πάνω τους, η πίεση του αέρα να αυξάνεται. Η πίεση αυτή μετριέται με μια ηλεκτρονική συσκευή και κατά αυτόν τον τρόπο ανιχνεύεται η παρουσία του οχήματος. Οι ανιχνευτές πίεσης χρησιμοποιούνται συνήθως για υπολογισμό πλήθους οχημάτων και ταχύτητας και τυπικά δεν έχουν την δυνατότητα κατηγοριοποίησής τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί μη παρεμβατικοί ανιχνευτές.

4.6.1.4 Κάμερες με δυνατότητα ανίχνευσης

Ένας τρόπος ανίχνευσης των οχημάτων είναι η παρακολούθηση και μέτρηση της ροής της κυκλοφορίας και η αυτόματη ανίχνευση συμβάντων, με τη χρήση βιντεοκάμερας. Οι κάμερες αυτές (Εικόνα 4.3) μπορούν να τοποθετηθούν σε ιστούς δίπλα ή πάνω από τον δρόμο, όπως σε γερανογέφυρες. Το βίντεο από τις κάμερες εισέρχεται σε ειδικές κάρτες, οι οποίες επεξεργάζονται τα δεδομένα και αναλύουν τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά της εικόνας, καθώς περνούν τα οχήματα. Βασικοί παράγοντες για την αξιοπιστία των δεδομένων με αυτή τη μέθοδο είναι οι συνθήκες φωτισμού, η σταθερότητα της κάμερας και η σωστή θέση της, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα όπως η διπλή καταμέτρηση.



Εικόνα 4.3 Κάμερα αναγνώρισης κυκλοφορίας (“Everett considers red-light camera proposal”, 2019)

4.6.1.5 Ραντάρ μικροκυμάτων

Οι συσκευές ραντάρ ανιχνεύουν τα οχήματα μέσω της ανάκλασης των ραδιοκυμάτων. Ειδικότερα, ένας πομπός εκπέμπει ραδιοκύματα τα οποία ανακλώνται από τα διερχόμενα οχήματα και συλλέγονται ξανά από τη συσκευή. Τα ραντάρ μικροκυμάτων εγκαθίστανται σε ιστούς για να επιτευχθεί βέλτιστη κάλυψη του δρόμου.

4.6.1.6 Παθητικοί και ενεργητικοί υπέρυθροι αισθητήρες

Οι υπέρυθροι αισθητήρες έχουν ως βασική λειτουργία τη μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας εντός του χώρου ελέγχου τους. Οι παθητικοί αισθητήρες δεν εκπέμπουν ενέργεια και απλά ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπουν τα οχήματα. Οι ενεργητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν συνήθως διόδους λέιζερ ή εκπομπής φωτός (LED) ως πηγές σήματος οι οποίες εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας στην περιοχή ελέγχου. Έπειτα, οι ίδιοι αισθητήρες ανιχνεύουν την ενέργεια όταν ανακλάται από κάθε διερχόμενο όχημα.

4.6.1.7 Ακουστικοί αισθητήρες

Οι ακουστικοί αισθητήρες ανιχνεύουν το επίπεδο του ήχου στην περιοχή ενδιαφέροντος μέσω μικροφώνων που καταγράφουν τα ηχητικά κύματα. Ο εντοπισμός ενός οχήματος επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής της ηχητικής ενέργειας που προκαλεί καθώς περνάει στο δρόμο από ένα σημείο. Σε γενικές γραμμές, οι μη παρεμβατικοί αισθητήρες έχουν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Ωστόσο, είναι περισσότερο ευαίσθητοι στις εξωτερικές συνθήκες και συνήθως έχουν μεγαλύτερο κόστος αγοράς.

4.6.1.8 Bluetooth

Το Bluetooth είναι ένα πρότυπο ασύρματων δικτύων επικοινωνίας που υποστηρίζεται και χρησιμοποιείται ευρέως από τα κινητά των περισσότερων οδηγών αλλά και από τα ίδια τα οχήματα. Σαρωτές Bluetooth μπορούν να τοποθετηθούν σε ιστούς κοντά στο οδόστρωμα και να διαβάζουν τις μοναδικές διευθύνσεις Ελέγχου Πρόσβασης Μέσων (MAC address) όλων των συσκευών που έχουν ενεργοποιημένο το Bluetooth και κινούνται στο δρόμο. Αν και η τεχνολογία αυτή δεν επιτρέπει την αναγνώριση του τύπου του οχήματος ή της ταχύτητάς του, οι αισθητήρες Bluetooth μπορούν να αξιοποιηθούν για την εξακρίβωση της διαδρομής και του χρόνου μετάβασης των οχημάτων από ένα σημείο σε ένα άλλο.

4.6.1.9 GPS

Το GPS είναι ένα σύστημα γεωεντοπισμού, προσδιορισμού της θέσης και της ώρας ενός χρήστη με τη χρήση δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη. Τέτοια συστήματα υπάρχουν πλέον ενσωματωμένα σε μεγάλο αριθμό οχημάτων, ειδικά στα καινούρια μοντέλα αλλά και σχεδόν σε όλα πλέον τα κινητά τηλέφωνα των οδηγών. Για τη χρήση της τεχνολογίας αυτής δεν απαιτείται καμία παρέμβαση ή χρήση εξοπλισμού στο

οδικό δίκτυο, αφού χρησιμοποιείται ο εξοπλισμός που έχουν τα οχήματα και οι οδηγοί. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της τεχνολογίας αυτής είναι η εφαρμογή “Χάρτες” της εταιρίας Google, η οποία με βάση τα δεδομένα αυτά μπορεί να υπολογίσει σημεία συμφόρησης και να προτείνει εναλλακτικές διαδρομές (Αντωνίου & Σπυροπούλου, 2015).

4.6.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Η ακριβής ενημέρωση για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στο δρόμο, όπως επίσης και η πρόγνωση του καιρού, είναι σημαντικά στοιχεία για ένα σύστημα τηλεδιαχείρισης, που συλλέγει δεδομένα και καλείται να λάβει αποφάσεις σχετικά με το φωτισμό και άλλες κυκλοφοριακές ρυθμίσεις. Ανάλογα με τις προβλέψεις και τη παρούσα κατάσταση, είναι εφικτό σε ένα τέτοιο σύστημα να ρυθμίζει το επίπεδο φωτισμού των LED μέσω dimming, να κρίνει αν υπάρχουν έκτακτα φαινόμενα που να απαιτούν ιδιαίτερους χειρισμούς και να προβαίνει σε ενέργειες ή να ειδοποιεί τους αρμόδιους. Παρακάτω, αναλύονται μερικά από τα μέσα που παρέχουν τέτοιες πληροφορίες στο σύστημα.

4.6.2.1 Μετεωρολογικοί Σταθμοί

Οι Μετεωρολογικοί Σταθμοί (Εικόνα 4.4) που είναι εγκατεστημένοι στο οδικό δίκτυο, αποτελούν ένα μηχανισμό παρακολούθησης περιβάλλοντος και καιρού σε πραγματικό χρόνο. Αποτελούνται από αισθητήρες που μελετούν την κατάσταση στην επιφάνεια του οδοστρώματος (αν είναι στεγνό, νωπό, βρεγμένο, αν έχει επικάλυψη από χιόνι ή πάγο) και μετρούν τη θερμοκρασία του. Οι σταθμοί συλλέγουν δεδομένα σε περιοδικά χρονικά διαστήματα και τα μεταδίδουν στο κεντρικό σύστημα μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Τα δεδομένα αυτά είναι πολύ χρήσιμα για την πρόγνωση του καιρού ακριβώς στο σημείο ενδιαφέροντος.

Υπάρχουν δύο τύποι Μετεωρολογικών Σταθμών, ανάλογα με τον τρόπο που εγκαθίστανται και το επίπεδο της παρέμβασης που απαιτείται για αυτό. Ο πρώτος τύπος είναι οι μη παρεμβατικοί, που εγκαθίστανται σε κολώνες ή γερανογέφυρες κοντά ή πάνω από το δρόμο. Έχουν εύκολη εγκατάσταση, γιατί δεν είναι αναγκαίο να κοπεί το οδόστρωμα και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και σε περιπτώσεις που η παρέμβαση τέτοιου είδους είναι αδύνατη, όπως σε γέφυρες. Οι σταθμοί αυτού του τύπου χρησιμοποιούν μεθόδους οπτικής φασματοσκοπίας βασισμένους σε υπέρυθη ακτινοβολία ή σε ακτίνες laser. Η θερμοκρασία του οδοστρώματος μετρείται με τη χρήση πυρομέτρων. Οι ενσωματωμένοι Μετεωρολογικοί Σταθμοί τοποθετούνται εντός του οδοστρώματος, είτε στο μέσο της

λωρίδας, είτε στην αριστερή λωρίδα. Μπορούν να μετρήσουν επιπλέον τη θερμοκρασία σε διαφορετικά βάθη του οδοστρώματος. Η μέθοδος μέτρησής τους βασίζεται είτε σε ραντάρ απορρόφησης είτε σε παθητική θερμογραφία (Haug & Grosanic, 2016).



Εικόνα 4.4 Μετεωρολογικός Σταθμός ([Meteostation], n.d.)

4.6.2.2 Δεδομένα πρόγνωσης καιρού

Πληροφορίες για την πρόγνωση καιρού μπορεί να αντλήσει κανείς και από ειδικές ιστοσελίδες ή εφαρμογές. Υπάρχουν εφαρμογές που παρέχουν προγνώσεις υψηλής ακρίβειας με μία συνδρομή. Συγκεντρώνουν στοιχεία από εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες, έχουν δικά τους μοντέλα καιρού και μπορούν να παρέχουν ενδεχομένως πληροφορίες για τις περιοχές ενδιαφέροντος.

4.6.2.3 Δεδομένα μέτρησης ανέμων

Τα ανεμόμετρα είναι όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητα ή και της φοράς του αέρα είτε αυτός ακολουθεί μια συγκεκριμένη ροή, όπως σε έναν αγωγό, είτε όχι, όπως ο ατμοσφαιρικός άνεμος.

Υπάρχουν διάφορα είδη ανεμομέτρων, τα συνηθέστερα όμως που χρησιμοποιούνται είναι τα ανεμόμετρα κυπέλων, τα ανεμόμετρα έλικας και τα θερμικά ανεμόμετρα.

Ανεμόμετρα κυπέλλων

Ένας απλός τύπος ανεμόμετρου είναι το ανεμόμετρο κυπέλλων. Αποτελείται από έναν κατακόρυφο άξονα, στον οποίο προσαρμόζονται κάθετα τρία ή τέσσερα στελέχη που έχουν στα άκρα τους κοίλα μεταλλικά ημισφαίρια. Όταν φυσά άνεμος, πιέζεται περισσότερο το κοίλο μέρος των ημισφαιρίων από το κυρτό. Έτσι το σύστημα αρχίζει να περιστρέφεται με τέτοια φορά, ώστε να προηγείται το κυρτό μέρος των ημισφαιρίων. Στη βάση του άξονα περιστροφής υπάρχει κατάλληλος μετρητής, ο οποίος μετράει τον αριθμό των στροφών που εκτελεί το σύστημα και προσδιορίζει τη σχετική ταχύτητα του ανέμου.

Ανεμόμετρα έλικας

Το ανεμόμετρο έλικας, αποτελείται από μία μικρή έλικα και από ένα μικρό πτερύγιο στο πίσω μέρος. Από την ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η έλικα, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ανέμου. Ακόμη, λόγω της παρουσίας του πτερυγίου, μπορούμε να γνωρίζουμε συνεχώς και τη φορά του ανέμου. Τα ανεμόμετρα έλικας πολλές φορές διαθέτουν πρόσθετες λειτουργίες, όπως μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και δυνατότητα καταγραφής δεδομένων.

Θερμικά ανεμόμετρα

Τα θερμικά ανεμόμετρα χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό σύρμα, συνήθως από βολφράμιο, το οποίο θερμαίνεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτή του περιβάλλοντος. Ο αέρας που ρέει γύρω από το μέταλλο έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη του. Καθώς η ηλεκτρική αντίσταση των περισσότερων μετάλλων εξαρτάται από τη θερμοκρασία τους, μπορεί να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ της αντίστασης του καλωδίου και της ταχύτητας ροής του αέρα (OMEGA Engineering inc., 2020).

4.6.2.4 Δεδομένα μέτρησης ορατότητας

Η ορατότητα είναι δυνατόν να μετρηθεί με μετρητές διαπερατότητας. Τα όργανα αυτά στην ουσία αποτελούνται από έναν πομπό και δύο δέκτες, οπτικά ευθυγραμμισμένους μεταξύ τους, και τοποθετημένους σε επακριβώς καθορισμένη απόσταση. Ο πομπός εκπέμπει βραχείς παλμούς φωτός σε συγκεκριμένη συχνότητα και σταθερή ένταση. Οι δέκτες ανταποκρίνονται μόνο στους συγκεκριμένους παλμούς και μετράνε την έντασή τους. Καθώς η ορατότητα ελαττώνεται, η ένταση των παλμών φωτός που φτάνουν στους δέκτες

είναι μειωμένη. Έτσι μπορούν να προσδιοριστούν τα επίπεδα ορατότητας (Mali & Vashistha, 2003).

4.6.2.5 Δεδομένα μέτρησης φωτεινότητας

Βασική παράμετρος για την εύρυθμη λειτουργία ενός συστήματος τηλεδιαχείρισης είναι η μέτρηση της υπάρχουσας φωτεινότητας, ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα το κατάλληλο επίπεδο του οδοφωτισμού. Η φωτεινότητα του δρόμου αποτελεί είσοδο στο σύστημα το οποίο θα αποφασίσει το ποσοστό του dimming των φωτιστικών LED με βάση τον προγραμματισμό του και τις λειτουργικές απαιτήσεις.

4.6.2.6 Μονάδες μέτρησης φωτεινότητας

Οι μονάδες μέτρησης της φωτεινότητας, που μπορούν να μετρούν τα φωτόμετρα, είναι το Lumen, η Καντέλα και το LUX:

- Lumen: Είναι η μονάδα μέτρησης της φωτεινής ροής, δηλαδή της δύναμης του φωτός όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Τα lumen είναι ανεξάρτητα από την επιφάνεια ή τη γωνία υπό την οποία πέφτει το φως σε μια επιφάνεια.
- Καντέλα: Είναι η μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης, δηλαδή της δύναμης του φωτός που εκπέμπεται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση από μια πηγή φωτός.
- Lux: Είναι η μονάδα μέτρησης της φωτεινής ισχύος ανά περιοχή, δηλαδή της έντασης του φωτός που πέφτει σε μια επιφάνεια ανά τετραγωνικό μέτρο όπως λαμβάνεται από το ανθρώπινο μάτι ($lux=lm/m^2$).

4.6.2.7 Φωτόμετρα

Για τη μέτρηση της φωτεινότητας στην οδοποιία χρησιμοποιούνται φωτόμετρα. Τα φωτόμετρα (Εικόνα 4.5) είναι όργανα που μετρούν την ένταση του φωτός.



Εικόνα 4.5 Φωτόμετρο (“Photometer for tunnel, Tunnel Photometer, Luminance meter for tunnel”, n.d.)

Τα είδη των φωτομέτρων που χρησιμοποιούνται κυρίως στην οδοποιία είναι δύο: αυτά που μετρούν καντέλες (luminance) και αυτά που μετρούν Lux (illuminance). Τα φωτόμετρα που χρησιμοποιούνται στους δρόμους συνήθως δίνουν μια αναλογική έξοδο για τη μετρούμενη ένταση του φωτός καθώς και μερικές ψηφιακές εξόδους για σφάλματα στη λειτουργία.

4.7 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε η έννοια της τηλεδιαχείρισης και η αναγκαιότητα της στις σύγχρονες εγκαταστάσεις αυτοκινητοδρόμων. Έγινε σαφές ότι με τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα που υπάρχουν, τα μέσα παρακολούθησης της κυκλοφορίας και της κατάστασης στο δρόμο, τα δεδομένα που συλλέγονται είναι αρκετά για να μπορεί ο χειριστής να λαμβάνει τις βέλτιστες αποφάσεις και να αντιδρά άμεσα σε οποιοδήποτε συμβάν. Ακόμα περισσότερο, αυτός ο όγκος πληροφορίας καθιστά δυνατό τον ευφυή και αυτόματο έλεγχο και τα προηγμένα μέσα τηλεδιαχείρισης και παρακολούθησης της κυκλοφορίας, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5 Ευφυή συστήματα ελέγχου οδοφωτισμού

5.1 Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να αναλυθεί διεξοδικά η έννοια του ευφυούς συστήματος στον οδοφωτισμό, πέρα από την απλή τηλεδιαχείριση, καθώς επίσης και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματά του. Στη συνέχεια του κεφαλαίου σκοπός μας είναι να περιγράψουμε ένα τέτοιο σύστημα, να προσδιορίσουμε τις βασικές απαιτήσεις του και την αρχιτεκτονική του. Πιο συγκεκριμένα, ένα ευφύες σύστημα που να ρυθμίζει το φωτισμό με προηγμένες μεθόδους πρόβλεψης και μηχανικής εκμάθησης, με βάση την κυκλοφορία.

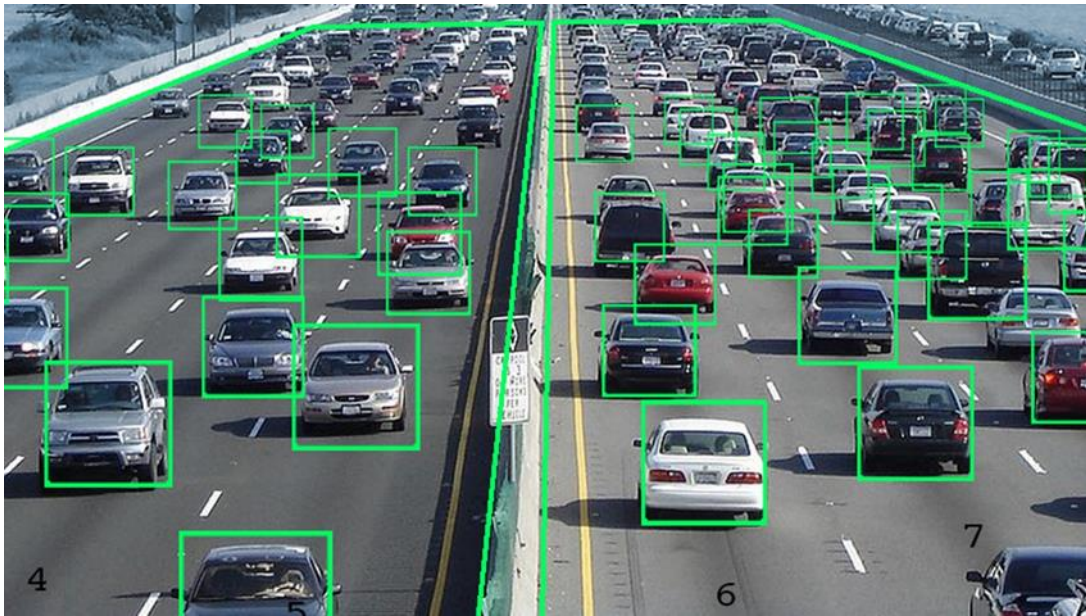
5.2 Εισαγωγή

Η βασική διαφορά ενός ευφυούς συστήματος οδοφωτισμού από την απλή τηλεδιαχείριση, είναι η δυνατότητα που δίνει για τη διαχείριση της φωτεινότητας με τρόπους που είναι πιο γρήγοροι, πιο αποδοτικοί και πιο αποτελεσματικοί. Βασικό στοιχείο του είναι ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, παρακάμπτεται ο ανθρώπινος παράγοντας και το σύστημα μπορεί να λειτουργεί μόνο του, βάσει του προγραμματισμού του, έχοντας έτσι πολύ πιο άμεση απόκριση ακόμα και σε πολύ σύνθετα προβλήματα. Ένα ευφύες σύστημα διαχείρισης οδοφωτισμού, αποτελεί μια νέα και πρωτοποριακή μέθοδο ρύθμισης των επιπέδων φωτεινότητας του δρόμου σύμφωνα με τις πραγματικές ανάγκες και τυχόν εναλλαγές και απρόοπτα, χρησιμοποιώντας στο μέγιστο τις πληροφορίες που λαμβάνονται από όλα τα μέσα παρακολούθησης της κυκλοφορίας, του καιρού και της κατάστασης στο δρόμο. Μέσα από προηγμένες διαδικασίες, μπορούν να γίνουν προβλέψεις της κυκλοφορίας, παρακολούθηση της φωτεινότητας και εντοπισμός έκτακτων συνθηκών. Οι προβλέψεις κυκλοφορίας μπορούν να τροποποιούν τη φωτεινότητα, ανάλογα με τα συμπεράσματα των αλγοριθμικών διαδικασιών ώστε να υπάρχει πάντα η βέλτιστη απόδοση και η πιο οικονομική λειτουργία.

5.3 Ευφυή συστήματα φωτισμού και διαχείρισης κυκλοφορίας

Ο έξυπνος φωτισμός εντάσσεται σε ένα ευρύτερο φάσμα διαδικασιών που είναι το ευφυές σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας, που ορίζεται ως μια προηγμένη εφαρμογή που στοχεύει στην παροχή καινοτόμων υπηρεσιών που σχετίζονται με διαφορετικούς τρόπους μεταφοράς και διαχείρισης της κυκλοφορίας (Janušová & Čičmancová, 2016). Το ευφυές σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας (Intelligent Traffic Management System - ITMS) δίνει τη δυνατότητα στους οδηγούς να κάνουν ασφαλέστερη χρήση των δρόμων, να έχουν πληρέστερη ενημέρωση, πιο έξυπνη και αποτελεσματική χρήση του οδικού δικτύου. Παράλληλα με τους οδηγούς, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ως ένα μέσο σύνδεσης με άλλους τρόπους μεταφοράς, εντάσσοντας όλη την κυκλοφορία σε ένα ενιαίο πλαίσιο και βελτιώνοντας έτσι την διαχείριση όλου του συστήματος των μετακινήσεων.

Τα ευφυή συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας, μπορούν να χρησιμοποιούν και να συνδυάζουν τεχνολογίες επικοινωνίας και πληροφοριών και να τις εφαρμόζουν στη στον τομέα των οδικών μεταφορών, των χρηστών και των οχημάτων τους. Ειδικά, νέοι κλάδοι της επιστήμης των υπολογιστών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), και η διαχείριση Μεγάλου Όγκου Δεδομένων (Big Data) βρίσκουν πλέον εφαρμογή σε τέτοιου τομείς έρευνας. Αυτό έχει ως πλεονεκτήματα την αυτοματοποίηση των διαδικασιών και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ανθρώπινου λάθους, καθώς επίσης και την βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμών και προβλέψεων. Αυτά τα συστήματα, για να μπορέσουν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά, αξιοποιούν όλο τον όγκο δεδομένων που προέρχεται από τα μέσα παρακολούθησης που ενσωματώνουν τα παραδοσιακά συστήματα τηλεδιαχείρισης (Εικόνα 5.1), όπως κάμερες, αισθητήρες και μετρητές, αλλά ακόμα και πιο εξειδικευμένα σε κάθε οδηγό, όπως το κινητό του τηλέφωνο ή το στίγμα του οχήματος. Έπειτα, όλα αυτά τα δεδομένα αξιολογούνται και οδηγούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων, σε πραγματικό χρόνο και με άμεση απόκριση, κάνοντας έτσι εφικτή την δυναμική προσαρμογή του συστήματος, στις ανάγκες και τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν στη λειτουργία του δρόμου.



Εικόνα 5.1 Ανίχνευση κίνησης από κάμερα (“TrafficVision”, n.d.)

5.3.1 Εφαρμογές συστημάτων διαχείρισης κυκλοφορίας

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται ορισμένες από τις συνηθέστερες εφαρμογές των συστημάτων διαχείρισης κίνησης.

Δυναμική λειτουργία φωτεινών σηματοδοτών

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία των οδικών δικτύων είναι οι φωτεινοί σηματοδότες, η αποτελεσματικότητα των οποίων καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την εύρυθμη λειτουργία τους. Σε ένα παραδοσιακό σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας, η λειτουργία των φωτεινών σηματοδοτών είναι συνήθως προκαθορισμένη. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα σταθερό χρονοπρόγραμμα (το οποίο μπορεί και να βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα και μακροπρόθεσμες προβλέψεις) που καθορίζει την κυκλοφοριακή ροή. Αντιθέτως ένα ευφυές σύστημα είναι σε θέση να αξιοποιεί τρέχοντα δεδομένα, όπως δεδομένα κίνησης ή χρόνο αναμονής οχημάτων την προηγούμενη ώρα και να προσαρμόζει αντίστοιχα το χρονοδιάγραμμα με βάση κατάλληλους αλγορίθμους χρονοδρομολόγησης. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται ο μέσος χρόνος παραμονής στο δίκτυο, το οποίο αποσυμφορίζεται και ως αποτέλεσμα έχουμε τη βελτίωση της ροής των οχημάτων (Roc et al., 2018).

Ρύθμιση επιπέδου φωτισμού

Η ρύθμιση του επιπέδου φωτισμού των αυτοκινητόδρομων αποτελεί μία από τις κυριότερες προκλήσεις στα σύγχρονα ITMS. Βασικός στόχος είναι η μείωση της έντασης του φωτισμού

και κατά επέκταση η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους λειτουργίας, ικανοποιώντας συγχρόνως τις απαιτήσεις ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία και η ασφάλεια στον αυτοκινητόδρομο. Επομένως πρέπει, ιδανικά, να μπορεί να υπολογιστεί ανά πάσα στιγμή το επίπεδο φωτισμού που είναι ικανό να πληροί τις αναγκαίες προϋποθέσεις με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας (Fanoon & A.R.F., 2020).

Αυτό το πρόβλημα είναι αρκετά περίπλοκο στην προσέγγισή του, ενώ υπάρχουν και επιπλέον περιορισμοί τεχνικής φύσεως που περιπλέκουν την επίλυση του. Μια βασική δυσκολία είναι η αδυναμία ακαριαίας μεταβολής της έντασης του φωτισμού καθώς χρειάζεται να περάσει χρόνος από τη στιγμή που θα δοθεί η εντολή μέχρι να φτάσει η ένταση στο επιθυμητό επίπεδο. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ύπαρξη ενός ευφυούς συστήματος ικανού να επεξεργαστεί και αξιοποιήσει κατάλληλα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο είναι πολύ σημαντική. Ένα ITMS μπορεί να χρησιμοποιήσει τα τρέχοντα δεδομένα κίνησης, προβλέψεις για καιρικά φαινόμενα καθώς και έκτακτα συμβάντα όπως τροχαία ατυχήματα ή έργα στο δρόμο και να κάνει βραχυπρόθεσμες προβλέψεις για τη ροή της κίνησης, οι οποίες ανανεώνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Έτσι θα καθίσταται ικανό να υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια το επιθυμητό σημείο της φωτεινότητας που εξισορροπεί το κόστος λειτουργίας με την οδική ασφάλεια.

Δυναμική δέσμευση πόρων λειτουργίας

Ένα κατάλληλα σχεδιασμένο ευφύες σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας μπορεί να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση των πόρων λειτουργίας του οδικού δικτύου. Συγκεκριμένα, με τη δυναμική πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου μπορεί με αυτοματοποιημένο τρόπο να προσδιοριστεί ο απαιτούμενος αριθμός ανοιχτών θυρίδων στα διόδια ή προσωπικού ασφαλείας ή βάρδιας σε επιφυλακή για ατυχήματα. Προσφέρεται επομένως η δυνατότητα για περεταίρω μείωση του λειτουργικού κόστους των υποδομών στις περιόδους με χαμηλή κυκλοφοριακή ροή με την αξιοποίηση της πληροφορίας που μπορεί να παρέχει ένα ITMS.

Διαχείριση κίνησης μέσω συνεργατικών υποσυστημάτων

Μια ακόμη δυνατότητα ενός ITMS αφορά τη διαχείριση του κυκλοφοριακού φόρτου με χρήση τεχνολογιών επικοινωνίας και ανίχνευσης. Ένα ITMS με υποσυστήματα ανίχνευσης μπορεί να συγκεντρώνει πληροφορίες από τους χρήστες ανάλογα με τη διαδρομή και τον προορισμό που έχουν, να εντοπίζει προβλήματα στην κυκλοφοριακή ροή και να προτείνει εναλλακτικές διαδρομές, με στόχο την αποσυμφόρηση του δικτύου. Ένας κεντρικός

εξυπηρετητής συλλέγει τα δεδομένα και αφού τα επεξεργαστεί, υπολογίζει με χρήση ευφυών μεθόδων διαδρομές τις οποίες μεταδίδει στους οδηγούς είτε μεμονωμένα είτε ανά ομάδες. Ένα τέτοιο συνεργατικό σύστημα προϋποθέτει την αλληλεπίδραση με τους χρήστες, από τη μία για τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και από την άλλη για την πρόταση της βέλτιστης διαδρομής και την απόκρισή τους σε αυτές τις οδηγίες, ώστε να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες που ανοίγει η επεξεργασία όλων αυτών των δεδομένων. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των οχημάτων και η καθολική πλέον χρήση συνδεδεμένων συσκευών, όπως κινητά τηλέφωνα, από τους οδηγούς, δείχνει ότι αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να αξιοποιηθεί ακόμη περισσότερο.

Ενίσχυση οδικής ασφάλειας

Η βασικότερη απαίτηση σε ένα οδικό δίκτυο είναι η διατήρηση της ασφάλειας των οδηγών. Σε αυτή την κατεύθυνση ένα ευφύες σύστημα διαχείρισης μπορεί να συμβάλλει αναγνωρίζοντας καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Τέτοια περιστατικά μπορεί να είναι κάποιο ατύχημα ή κάποια άλλη επικίνδυνη κατάσταση, όπως ένα σταματημένο όχημα σε μια λωρίδα του δρόμου, που μπορούν να αναγνωριστούν μέσω επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας από το ITMS καθώς και ασυνήθιστα συμβάντα όπως απότομη αυξομείωση της ταχύτητας των οχημάτων ή του αριθμού των οχημάτων που διέρχονται από ένα τμήμα του αυτοκινητόδρομου. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις μπορούν να σταλούν μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας τα απαραίτητα στοιχεία στο πλησιέστερο σημείο έκτακτης ανάγκης προκειμένου να γίνουν αμέσως οι απαραίτητες ενέργειες για την αντιμετώπιση του περιστατικού (π.χ. ενημέρωση οχήματος βοήθεια/έκτακτης ανάγκης) (Hilal & Yurdakul, 2020).

Επίσης, πολύ σημαντικός είναι ο προσδιορισμός και η τήρηση των ορίων ταχύτητας, για την ασφαλή διέλευση των οδηγών. Ένα ευφύες σύστημα μπορεί να επαναπροσδιορίζει τα όρια ταχύτητας σε συγκεκριμένα τμήματα του δρόμου λαμβάνοντας υπόψη τις προδιαγραφές του δρόμου, αλλά και δυναμικά στοιχεία όπως ο καιρός (για παράδειγμα ομίχλη ή έντονη βροχόπτωση), ο κυκλοφοριακός φόρτος ή τυχόν ατυχήματα και να τα μειώνει όταν προβλέπεται υψηλότερος βαθμός επικινδυνότητας, σε αντίθεση με ένα παραδοσιακό σύστημα όπου τα όρια ταχύτητας είναι προκαθορισμένα και αμετάβλητα.

5.3.2 Πλεονεκτήματα ευφυών συστημάτων

Στη συνέχεια, αναλύονται τα βασικά οφέλη που μπορεί να έχει ένα σύστημα διαχείρισης κίνησης από τη χρήση ευφυών μεθόδων συγκριτικά με τα παραδοσιακά συστήματα.

5.3.2.1 Προσαρμογή σε αλλαγές συνθηκών

Σε ένα οδικό δίκτυο είναι πιθανό να προκύψουν μεταβολές καθώς αυτό εξελίσσεται, όπως για παράδειγμα η δημιουργία νέων δρόμων ή η αλλαγή του τρόπου μετάβασης μεταξύ των υπαρχόντων. Τέτοιου είδους αλλαγές έχουν προσωρινή ή και μόνιμη επίδραση στη ροή της κίνησης προκαλώντας αύξηση ή μείωση των διερχόμενων οχημάτων από τα αντίστοιχα σημεία. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένα συμβατικό σύστημα διαχείρισης κίνησης θα έπρεπε να αναπροσαρμόσει τις σχετικές παραμέτρους και ρυθμίσεις με χειροκίνητο τρόπο, κάθε φορά που θα προέκυπτε κάποια αλλαγή. Αυτή η διαδικασία αφενός είναι πολύ χρονοβόρα, αφετέρου είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένη σε σφάλματα που μπορεί να οφείλονται στην ανθρώπινη παρέμβαση. Ένα σύστημα που ενσωματώνει ευφυείς μεθόδους προσφέρει ιδιαίτερη ευελιξία καθώς το μόνο που χρειάζεται είναι να εκπαιδευτεί ξανά στα δεδομένα που προκύπτουν μετά τις μεταβολές του περιβάλλοντος, σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα. Ακόμη, δεν υπάρχει κανένα επιπλέον κόστος εφόσον ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία με την αρχική εκπαίδευση, απλά η τροφοδοσία του συστήματος γίνεται με ένα καινούριο σύνολο δεδομένων. Ανάλογα δε με το ρυθμό που πραγματοποιούνται οι αλλαγές, είναι εφικτή και η εκπαίδευση του συστήματος ενώ βρίσκεται ήδη σε κανονική λειτουργία, αν οι μεταβολές γίνονται σταδιακά (Crammer et al., 2006).

5.3.2.2 Δυνατότητα πρόβλεψης

Τα ευφυή συστήματα μπορούν με χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) να κάνουν προβλέψεις αναφορικά τόσο με την κυκλοφορία στο οδικό δίκτυο όσο και με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα στοιχεία του περιβάλλοντος, όπως ο δρόμος ή τα συστήματα φωτισμού. Έτσι, πέραν του βασικού πλεονεκτήματος που αφορά τη διαχείριση του κυκλοφοριακού φόρτου μέσω της πρόβλεψης, ένα έξυπνο σύστημα συμβάλει και στην πρόληψη και άμεση επιδιόρθωση βλαβών (Pecar & Papa, 2017).

Ένα ευφυές σύστημα παίζει ένα διπλό ρόλο, σε σχέση με το φωτισμό. Αρχικά, η μεγάλη ακρίβεια πρόβλεψης του κυκλοφοριακού φόρτου (σε συνδυασμό και με επιπλέον πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στο σύστημα) επιτρέπει τον υπολογισμό του βέλτιστου

επιπέδου φωτεινότητας στο οδικό δίκτυο. Καθώς στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, διατηρώντας το μέγιστο επίπεδο ασφάλειας, το ITMS κάνοντας χρήση των προβλέψεων προσδιορίζει με μικρό περιθώριο σφάλματος τη βαθμίδα φωτεινότητας που ικανοποιεί συγχρόνως τους δύο περιορισμούς. Συγκεκριμένα, το επίπεδο φωτεινότητας μειώνεται στις περιόδους κατά τις οποίες προβλέπεται σχετικά χαμηλός φόρτος κίνησης, ενώ αυξάνεται στα διαστήματα που αναμένεται αύξησή του, δεδομένου ότι μεταξύ των δύο παραμέτρων δίνεται προτεραιότητα στην εξασφάλιση της οδικής ασφάλειας στο μέγιστο βαθμό. Εκτός αυτού, με τη χρήση ITMS είναι δυνατός ο εντοπισμός φωτιστικών με αυξομειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας και η άμεση αντικατάστασή τους προλαμβάνοντας πιθανά προβλήματα από βλάβες στο φωτισμό του δικτύου.

5.3.2.3 Διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων

Με το όρο μεγάλο όγκο δεδομένων (Big Data) εννοούνται σύνολα δεδομένων τόσο μεγάλα ή σύνθετα που ξεφεύγουν από τις δυνατότητες καταγραφής, αποθήκευσης και ανάλυσης των παραδοσιακών τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων (Laudon & Laudon, 2015). Είναι σαφές ότι τέτοιου τύπου δεδομένα δεν είναι διαχειρίσιμα από ένα συμβατικό σύστημα, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η πλήρης αξιοποίηση της πληροφορίας που μπορούν να παρέχουν τα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης και προέρχεται από πολλαπλές πηγές (κάμερες, αισθητήρες κ.α.). Ένα ευφυές σύστημα, από την άλλη, μπορεί να αξιοποιεί αποτελεσματικά πολύ μεγάλους όγκους δεδομένων καθώς και να συνδυάζει δεδομένα από διαφορετικές πηγές (Nallaperuma, et al., 2019). Σε συνδυασμό με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών μηχανικής μάθησης καθίσταται έτσι δυνατή η εξόρυξη πληροφοριών, των οποίων η συνεισφορά σε μία πρόβλεψη ή ένα συμπέρασμα ενδεχομένως να μην είναι προφανής και ως εκ τούτου θα παρέμεναν αναξιοποίητες.

5.3.2.4 Αυτόματη εκμάθηση κανόνων

Ένα βασικό πλεονέκτημα των ευφύων συστημάτων είναι ότι απαιτούν ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση κατά τον σχεδιασμό τους. Εφόσον οριστούν σωστά τα μοντέλα και ολοκληρωθεί η επεξεργασία των δεδομένων για την εκπαίδευση, δεν απαιτείται σαφής καθορισμός των πιθανών περιπτώσεων χρήσης και των αντίστοιχων ενεργειών που πρέπει να εκτελεστούν. Το ευφυές σύστημα “μαθαίνει” τις συσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών-παραμέτρων και εξάγει αυτόματα τους κανόνες που προβλέπουν την επιθυμητή έξοδο με βάση τις εκάστοτε εισόδους. Με αυτόν τρόπο εξαλείφεται και η

πιθανότητα παράλειψης κάποιου σεναρίου καθώς το σύστημα δεν ορίζει διακριτές περιπτώσεις αλλά μπορεί να αντιστοιχίσει οποιονδήποτε συνδυασμό παρατηρήσεων σε μία ή περισσότερες ενέργειες.

5.4 Μηχανική Εκμάθηση (Machine Learning)

Η Μηχανική Μάθηση ορίζεται ως η μελέτη αλγορίθμων υπολογιστών που μπορούν να βελτιωθούν αυτόματα μέσω της εμπειρίας και με τη χρήση δεδομένων (Mitchell, 1997). Αυτό σημαίνει ότι δε χρειάζεται να είναι ρητά προγραμματισμένες οι ενέργειες που θα πρέπει να εκτελεστούν αλλά το σύστημα μπορεί, κατά μία έννοια, να εκπαιδευτεί πάνω σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα και στη συνέχεια να παίρνει αποφάσεις ή να κάνει προβλέψεις με βάση προηγούμενα δείγματα.

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αρχικά τροφοδοτούνται με δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούν προκειμένου να “αναγνωρίσουν” συσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών. Το στάδιο αυτό καλείται φάση εκπαίδευσης και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό δεδομένα εκπαίδευσης (training data). Μέσω αυτής της διαδικασίας ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης επεξεργάζεται επαναληπτικά τα διαθέσιμα δεδομένα και επαναξιολογείται ανά χρονικά διαστήματα μέχρι να σταματήσει να βελτιώνεται (ή να φτάσει σε ένα προκαθορισμένο επιθυμητό επίπεδο), οπότε και ολοκληρώνεται η εκπαίδευση του. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία φάση αξιολόγησης κατά την οποία το μοντέλο ελέγχεται σε διαφορετικά δεδομένα από αυτά που είχε εκπαιδευτεί, που ονομάζονται δεδομένα ελέγχου (test data) και γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί ώστε να μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η απόδοση του. Με την ολοκλήρωση του σταδίου αξιολόγησης, το μοντέλο επανεκπαιδεύεται στο σύνολο των δεδομένων και είναι πλέον διαθέσιμο για λειτουργία.

Μία χρήσιμη εφαρμογή των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης είναι σε προβλήματα για τα οποία δεν υπάρχει γνωστός, βέλτιστος τρόπος επίλυσης για όλες τις περιπτώσεις ή υπάρχει αλλά είναι αδύνατο ή μη αποδοτικό να υλοποιηθεί στην πράξη (λόγω υπολογιστικού κόστους και χρονικών περιορισμών). Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης επεκτείνονται σε ένα πάρα πολύ ευρύ πεδίο κλάδων πέραν της επιστήμης των υπολογιστών όπως ιατρική, τηλεπικοινωνίες, οικονομικές επιστήμες και έχουν πολλές εφαρμογές.

5.4.1 Κατηγορίες μεθόδων μηχανικής μάθησης

Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, τον τύπο των δεδομένων και την προσέγγιση της διαδικασίας εκπαίδευσης των μοντέλων, οι τεχνικές μηχανικής μάθησης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες, στις τεχνικές Επιβλεπόμενης Μάθησης (Supervised Learning), Μη Επιβλεπόμενης Μάθησης (Unsupervised Learning) και Ενισχυτικής Μάθησης (Reinforcement Learning).

5.4.1.1 Επιβλεπόμενη Μάθηση

Στην επιβλεπόμενη μάθηση, ανήκουν οι περιπτώσεις στις οποίες το διαθέσιμο σύνολο δεδομένων αποτελείται από ζεύγη εισόδων – επιθυμητής εξόδου (Mohri et al., 2012). Κάθε είσοδος είναι ουσιαστικά ένα σύνολο από μεταβλητές/χαρακτηριστικά (features) και κάθε ζεύγος εισόδου – εξόδου καλείται δείγμα (sample), ενώ οι εξοδοί καλούνται και ετικέτες (labels). Στα προβλήματα επιβλεπόμενης μάθησης υπάρχουν κάποια (παρελθοντικά) δείγματα για τα οποία είναι γνωστή η έξοδος που προήλθε από κάθε είσοδο χωρίς ωστόσο να υπάρχει πληροφορία για τον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται μεταξύ τους. Αυτή την αντιστοίχιση καλείται να “ανακαλύψει” ένας αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα προκειμένου να γενικεύσει τις μεταξύ τους συσχετίσεις και να “κατασκευάσει” μία συνάρτηση με την οποία θα μπορεί να προβλέψει την επιθυμητή έξοδο για οποιαδήποτε νέα είσοδο (Russell & Norvig, 2010).

Ένας αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης δίνει τυχαίες αρχικές τιμές στις εσωτερικές παραμέτρους του μοντέλου και ξεκινά να κάνει προβλέψεις για τις εισόδους των διαθέσιμων δεδομένων. Στη συνέχεια οι προβλέψεις αυτές συγκρίνονται με τις πραγματικές εξόδους και υπολογίζεται ένα σφάλμα εκπαίδευσης. Το σφάλμα εκπαίδευσης χρησιμοποιείται έπειτα για την ανανέωση των παραμέτρων με στόχο τη βελτίωση του συστήματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Με ορθή χρήση των κατάλληλων αλγορίθμων το σφάλμα εκπαίδευσης μειώνεται σταδιακά και τελικά συγκλίνει, οπότε και η εκπαίδευση σταματάει.

Η πλειοψηφία των προβλημάτων μηχανικής μάθησης εμπίπτουν στην κατηγορία της επιβλεπόμενης μάθησης, όπου εντοπίζονται δύο βασικές κατηγορίες προβλημάτων, τα προβλήματα ταξινόμησης (classification) και παλινδρόμησης (regression). Η διαφορά τους έγκειται στον τύπο των δεδομένων εξόδου. Στα προβλήματα ταξινόμησης η έξοδος παίρνει

διακριτές τιμές και στόχος είναι η πρόβλεψη της κατηγορίας στην οποία ανήκει η εκάστοτε είσοδος ενώ στα προβλήματα παλινδρόμησης οι έξοδοι μπορούν να πάρουν συνεχείς τιμές και στόχος είναι η ακριβέστερη δυνατή προσαρμογή της καμπύλης που τις προσεγγίζει.

5.4.1.2 Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση

Η μη επιβλεπόμενη μάθηση, περιλαμβάνει τα προβλήματα μηχανικής μάθησης στα οποία τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεση μας δεν περιλαμβάνουν ετικέτες (εξόδους) (Hinton & Sejnowski, 1999). Σε αντίθεση με την επιβλεπόμενη μάθηση όπου η έξοδος που θέλουμε να προβλέψουμε είναι γνωστή για τα δεδομένα που έχουμε, σε αυτού του τύπου τα προβλήματα δεν υπάρχει σαφής στόχος, με την έννοια ότι δεν απαιτείται η πρόβλεψη κάποιας συγκεκριμένης τιμής. Συνήθως, τα μοντέλα μη επιβλεπόμενης μάθησης καλούνται να προσαρμοστούν στις στατιστικές ιδιότητες των δεδομένων εκπαίδευσης και να εντοπίσουν πιθανά μοτίβα (Haykin, 2009). Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζουν εσωτερικές αναπαραστάσεις με τις οποίες κωδικοποιούν τα δεδομένα και εντοπίζουν κοινά χαρακτηριστικά και ιδιότητες.

Ένα πλεονέκτημα των αλγορίθμων μη επιβλεπόμενης μάθησης είναι ότι απαιτείται μικρότερος βαθμός αρχικής επεξεργασίας των δεδομένων σε σύγκριση με τους αλγορίθμους επιβλεπόμενης μάθησης, εν μέρει επειδή η σύνθεση των ετικετών απαιτεί ανθρώπινη παρέμβαση, καθώς τις περισσότερες φορές δεν είναι δυνατή η αυτοματοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας. Ωστόσο, στη μη επιβλεπόμενη μάθηση χρειάζεται μεγαλύτερος όγκος δεδομένων κατά την εκπαίδευση για να έχουμε ικανοποιητικά επίπεδα απόδοσης. Επιπλέον παρουσιάζουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε αποθηκευτικούς και υπολογιστικούς πόρους καθώς και μεγαλύτερη ευαισθησία σε ανωμαλίες των δεδομένων.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή μη επιβλεπόμενης μάθησης είναι η συσταδοποίηση, δηλαδή η διαδικασία διαχωρισμού των δεδομένων σε ομάδες. Σε αυτήν την περίπτωση όμως δεν υπάρχουν προκαθορισμένες κλάσεις στις οποίες πρέπει να ταξινομηθούν τα δεδομένα, αλλά αυτές καθορίζονται δυναμικά από τον αλγόριθμο με βάση ομοιότητες που εντοπίζονται από τις αναπαραστάσεις των δεδομένων.

Επιπροσθέτως, αλγόριθμοι μη επιβλεπόμενης μάθησης χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τη μείωση της διαστατικότητας (dimensionality reduction) των δεδομένων. Σε πολλές περιπτώσεις, έχουμε πολύ μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών των δειγμάτων, καθιστώντας ιδιαίτερα χρονοβόρα και αναποτελεσματική την εκπαίδευση των μοντέλων μηχανικής

μάθησης. Μέσω της μη επιβλεπόμενης μάθησης, μπορούν να εντοπιστούν τα χαρακτηριστικά που περιέχουν τη “σημαντικότερη” πληροφορία και να χρησιμοποιηθούν μόνο αυτά κατά την εκπαίδευση. Με αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται η διαστατικότητα (και κατά συνέπεια ο χρόνος εκπαίδευσης) με το ελάχιστο δυνατό κόστος, καθώς απορρίπτονται τα χαρακτηριστικά με τη μικρότερη συνεισφορά στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέτοιου είδους εφαρμογές υλοποιούνται συχνά στο στάδιο της προεπεξεργασίας των δεδομένων, προτού αυτά χρησιμοποιηθούν από αλγορίθμους επιβλεπόμενης ή μη επιβλεπόμενης μάθησης κατά την εκπαίδευση.

5.4.1.3 Ενισχυτική Μάθηση

Η ενισχυτική μάθηση είναι η μελέτη αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που έχουν στόχο να παίρνουν αποφάσεις με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιούν το μακροπρόθεσμο κέρδος, ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση σε ένα περιβάλλον (Sutton & Barto, 1998). Σε αντίθεση με τα προβλήματα επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης μάθησης, δεν υπάρχει διαθέσιμο σύνολο δεδομένων για εκπαίδευση αλλά η εκπαίδευση βασίζεται στην αλληλεπίδραση ενός ευφυούς πράκτορα με το περιβάλλον του. Πιο συγκεκριμένα, ένα πρόβλημα ενισχυτικής μάθησης αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία:

- Ένα περιβάλλον το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο από δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί.
- Ένα σύνολο ενεργειών οι οποίες προκαλούν μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων.
- Έναν ευφυή πράκτορα που αποφασίζει και εκτελεί ενέργειες ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση.
- Ένα μοντέλο μετάβασης που καθορίζει την επόμενη κατάσταση με βάση την τρέχουσα κατάσταση και την ενέργεια που εκτελείται.
- Ένα μοντέλο ανταμοιβών που καθορίζει την άμεση ανταμοιβή που προκύπτει από την εκτέλεση μίας ενέργειας σε μια συγκεκριμένη κατάσταση και την αντίστοιχη μετάβαση.

Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης ο πράκτορας, ξεκινώντας με μία τυχαία στρατηγική και αλληλοεπιδρώντας σταδιακά με το περιβάλλον, καλείται να εντοπίσει μια βέλτιστη στρατηγική, δηλαδή μία αντιστοίχιση καταστάσεων-ενεργειών η οποία θα οδηγεί στη μέγιστη συνολική ανταμοιβή. Μία από τις βασικότερες προκλήσεις σε τέτοιου τύπου προβλήματα είναι η εξισορρόπηση μεταξύ εξερεύνησης-εκμετάλλευσης, δηλαδή η μέθοδος

με την οποία ο πράκτορας αποφασίζει αν πρέπει να επιλέξει μία ενέργεια με υψηλή μέχρι στιγμής αναμενόμενη ανταμοιβή ή μία ενέργεια για την οποία δεν έχει συλλέξει ακόμα αρκετή πληροφορία και που ίσως να αποδειχθεί πιο αποδοτική.

Η ενισχυτική μάθηση είναι κατάλληλη για προβλήματα στα οποία υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης ενός περιβάλλοντος αλλά δεν υπάρχει η γνώση για τον τρόπο λειτουργίας του. Συνεπώς ο μόνος τρόπος εκμάθησης είναι μέσω αλληλεπίδρασης με αυτό και συλλογής δειγμάτων κατάστασης-ενέργειας-ανταμοιβής.

5.5 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

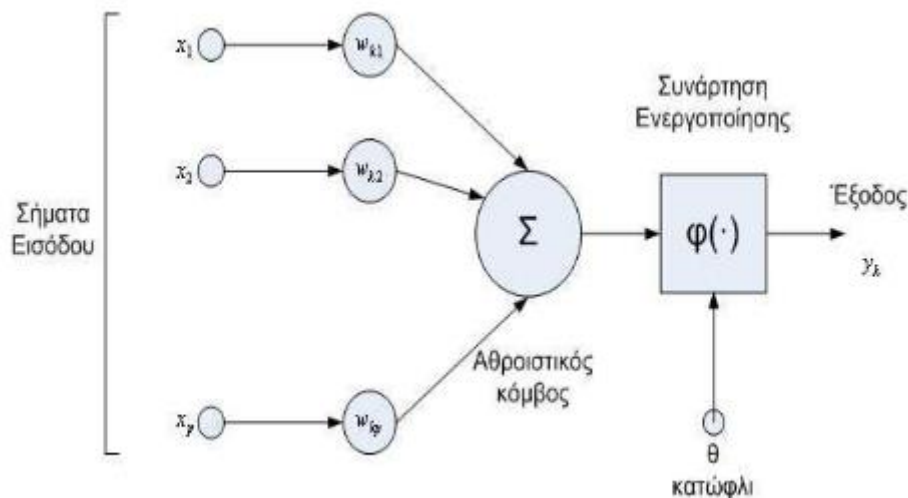
Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks) είναι υπολογιστικά μοντέλα εμπνευσμένα από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα και συγκεκριμένα από τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου (Bishop, 2006). Πρόκειται για μια σειρά αλγορίθμων που έχουν στόχο να αναγνωρίσουν συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων και να προσαρμόζονται σε αυτά, μιμούμενοι βιολογικά μοντέλα. Αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνική στον κλάδο της μηχανικής μάθησης καθώς έχουν αναπτυχθεί αρχιτεκτονικές κατάλληλες για όλους τους τύπους προβλημάτων και πλέον πετυχαίνουν υψηλότερες επιδόσεις από τους κλασσικούς αλγορίθμους στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να προσεγγίσουν εξαιρετικά μη γραμμικές συναρτήσεις, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε προβλήματα για τα οποία δεν υπάρχει γνωστή αναλυτική μέθοδος επίλυσης. Όπως σε όλες σχεδόν τις μεθόδους μηχανικής μάθησης υπάρχουν δύο βασικά στάδια, το στάδιο εκπαίδευσης όπου το νευρωνικό δίκτυο τροφοδοτείται επαναληπτικά με δεδομένα και το στάδιο συμπερασμάτων κατά το οποίο το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνει προβλέψεις σε νέα δεδομένα.

5.5.1 Δομικές μονάδες

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από μία συλλογή τεχνητών νευρώνων που συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε νευρώνας υλοποιείται ως ένας κόμβος που επικοινωνεί με τους υπόλοιπους μέσω συνδέσεων οι οποίες είναι εμπνευσμένες από τις βιολογικές συνάψεις.

Οι τεχνητοί νευρώνες αποτελούν δομικές μονάδες του δικτύου που δέχονται μία ή περισσότερες εισόδους και παράγουν μία έξοδο την οποία μπορούν να μεταβιβάσουν σε άλλους νευρώνες. Η είσοδος μπορεί ανάλογα με την αρχιτεκτονική του δικτύου και τη θέση των νευρώνων να είναι είτε τα χαρακτηριστικά ενός δείγματος από το σύνολο δεδομένων είτε η έξοδος ενός άλλου νευρώνα. Όλες οι συνάψεις εισόδου έχουν ένα βάρος, δηλαδή μια αριθμητική τιμή που αντικατοπτρίζει τη σημαντικότητα της κάθε εισόδου και σε κάθε νευρώνα ανατίθεται μία επιπλέον τιμή που ονομάζεται πόλωση.

Προκειμένου να οριστεί η έξοδος ενός νευρώνα αρχικά υπολογίζεται το άθροισμα των γινομένων όλων των εισόδων με τα αντίστοιχα βάρη. Στο άθροισμα αυτό προστίθεται εν συνεχεία η πόλωση του νευρώνα και το αποτέλεσμα το οποίο προκύπτει καλείται ενεργοποίηση. Έπειτα η ενεργοποίηση δίνεται ως είσοδος σε μία (κατά βάση) μη γραμμική συνάρτηση η οποία καλείται συνάρτηση ενεργοποίησης και προκύπτει η τελική έξοδος. Η δομή ενός τυπικού τεχνητού νευρώνα απεικονίζεται διαγραμματικά (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2 Δομή Τεχνητού Νευρώνα (Amit, 1989)

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι συνήθως μη γραμμικές συναρτήσεις οι οποίες καθορίζουν την τελική έξοδο των νευρώνων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς συμβάλλουν στην προσέγγιση πολύπλοκων, μη γραμμικών συσχετίσεων μεταξύ εισόδων και εξόδων από τα νευρωνικά δίκτυα. Ανάλογα με την αρχιτεκτονική του δικτύου και το επίπεδο στο οποίο βρίσκονται οι νευρώνες ενδεχομένως να ενδείκνυνται διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης· παρόλα αυτά η συνάρτηση ενεργοποίησης αποτελεί παράμετρο του συστήματος και δεν μπορεί να υπάρξει εκ των προτέρων βέλτιστη επιλογή.

5.5.2 Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης

Στη γενική του μορφή, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται όπως έχει ήδη αναφερθεί από ένα σύνολο τεχνητών νευρώνων. Ο τρόπος με τον οποίο οι νευρώνες οργανώνονται και συνδέονται μεταξύ τους, ορίζει την αρχιτεκτονική του δικτύου. Στην πλειοψηφία των αρχιτεκτονικών οι νευρώνες είναι τοποθετημένοι σε επίπεδα, δηλαδή είναι χωρισμένοι σε ομάδες και οι νευρώνες κάθε επιπέδου επικοινωνούν με τους νευρώνες των υπόλοιπων επιπέδων και όχι μεταξύ τους. Τα επίπεδα ενός νευρωνικού δικτύου μπορούν, ανάλογα με τη θέση και το σκοπό που επιτελούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Επίπεδο εισόδου: είναι το πρώτο επίπεδο του δικτύου το οποίο λαμβάνει την είσοδο. Ο αριθμός των νευρώνων του επιπέδου εισόδου είναι ίσος με τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων καθώς κάθε ένα από αυτά τροφοδοτείται σε έναν ξεχωριστό νευρώνα.

- Επίπεδο εξόδου: είναι το τελευταίο επίπεδο το οποίο παράγει την τελική έξοδο δηλαδή την πρόβλεψη για την αντίστοιχη είσοδο. Και σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των νευρώνων είναι προκαθορισμένος και ίσος με τις εξόδους που προκύπτουν.

- Κρυφά επίπεδα: όλα τα ενδιάμεσα επίπεδα μεταξύ εισόδου και εξόδου. Ο αριθμός τους μπορεί να ποικίλλει και συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερα κρυφά επίπεδα ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Τα νευρωνικά δίκτυα στα οποία οι νευρώνες κάθε επιπέδου μεταβιβάζουν τις εξόδους τους μόνο στους νευρώνες του επόμενου επιπέδου ονομάζονται δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης. Σε αυτή την περίπτωση η ροή της πληροφορίας έχει μόνο μία κατεύθυνση, από την είσοδο προς την έξοδο.

Συνήθως κάθε νευρώνας συνδέεται με όλους τους νευρώνες του αμέσως επόμενου επιπέδου, συνθέτοντας ένα πλήρως διασυνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο. Ωστόσο, ανάλογα με την αρχιτεκτονική είναι δυνατόν να υπάρξουν διάφορες παραλλαγές.

5.5.3 Επαναληπτικά νευρωνικά δίκτυα

Τα επαναληπτικά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μία κατηγορία τεχνητών νευρωνικών δικτύων στα οποία οι συνάψεις μεταξύ των νευρώνων σχηματίζουν έναν κατευθυνόμενο γράφο. Η κύρια διαφορά τους με τα δίκτυα πρόσθιας διάδοσης είναι ότι οι νευρώνες μπορούν να έχουν συνάψεις και με νευρώνες προηγούμενων επιπέδων ή και με τον εαυτό τους (Géron, 2018). Στην τελευταία περίπτωση ένας νευρώνας λαμβάνει ως είσοδο τόσο τα

χαρακτηριστικά του εκάστοτε δείγματος (ή τις εξόδους των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου αν δε βρίσκεται στο επίπεδο εισόδου) όσο και την προηγούμενη δική του έξοδο. Αυτή η δυνατότητα ροής της πληροφορίας και προς την αντίθετη κατεύθυνση επιτρέπει στα επαναληπτικά δίκτυα να έχουν δυναμική συμπεριφορά ως προς τις χρονικές μεταβλητές.

Τα επαναληπτικά νευρωνικά δίκτυα μπορούν επίσης να επεξεργάζονται εισόδους μεταβλητού μήκους (δηλαδή διαφορετικού πλήθους χαρακτηριστικών) χάρη στην εσωτερική κατάσταση (memory) που διατηρούν, κάτι που δεν είναι εφικτό στα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης.

Σε συνάρτηση με τα προς μελέτη ευφυή συστήματα τηλεδιαχείρισης, το πρόβλημα της πρόβλεψης της κυκλοφοριακής κίνησης για την προσαρμογή του οδοφωτισμού παρουσιάζει εγγενώς την ιδιαιτερότητα της μεταβλητής εισόδου, καθώς το χρονικό διάστημα που λαμβάνεται ως είσοδος για κάθε πρόβλεψη μπορεί να έχει διαφορετική διάρκεια, συνεπώς διαφορετικό πλήθος χαρακτηριστικών. Οι δύο βασικότεροι τύποι επαναληπτικών δικτύων είναι οι εξής:

Δίκτυα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης

Μία ιδιαίτερα αποτελεσματική αρχιτεκτονική επαναληπτικών νευρωνικών δικτύων με πληθώρα εφαρμογών είναι τα δίκτυα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (long short-term memory – LSTM) (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Τα LSTMs έχουν συνάψεις ανατροφοδότησης και μπορούν να επεξεργαστούν ολόκληρες ακολουθίες εισόδων, γεγονός που έχει συμβάλει στην ιδιαίτερα διαδεδομένη χρήση τους, κυρίως σε προβλήματα ταξινόμησης, επεξεργασίας και πρόβλεψης δεδομένων χρονοσειρών όπου μπορεί να υπάρξει καθυστέρηση μεταξύ δύο σημαντικών γεγονότων. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους, η υλοποίηση των LSTMs ήταν εξαιρετικά δύσκολη και χρειάστηκε η εξέλιξη της τεχνολογίας με την πάροδο του χρόνου, ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί ευρέως.

Το κύριο πλεονέκτημα των LSTMs έναντι των κλασικών επαναληπτικών δικτύων είναι ότι μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά το πρόβλημα της εξαφανιζόμενης κλίσης που παρουσιάζεται κατά την εκπαίδευση των παραδοσιακών μεθόδων. Επιπλέον, παρότι τα περισσότερα απλά συστήματα είναι ευαίσθητα στο χρονικό περιθώριο μεταξύ των σημαντικών συμβάντων, τα LSTMs δεν αντιμετωπίζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Αυτό

έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να αξιοποιούν μακροπρόθεσμη γνώση από ιστορικά δεδομένα και να είναι συνεπώς ιδανικά για προβλήματα πρόβλεψης χρονοσειράς.

Φραγμένα επαναληπτικά δίκτυα

Μία πιο πρόσφατη υποκατηγορία των επαναληπτικών δικτύων είναι τα φραγμένα επαναληπτικά δίκτυα (gated recurrent units – GRUs) (Cho et al., 2014). Η αρχιτεκτονική τους είναι παρόμοια με αυτή των LSTMs με κυριότερη διαφορά ότι στα GRUs δεν υπάρχει πύλη εξόδου.

Επιπλέον, τα GRUs δεν έχουν κατάσταση κελιού και η ροή της πληροφορίας γίνεται αποκλειστικά μέσω της κρυμμένης κατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν λιγότερες εσωτερικές παραμέτρους, γεγονός που καθιστά ευκολότερη τη διαδικασία της εκπαίδευσης.

Λόγω της ιδιότητάς τους να αξιοποιούν πληροφορία από προηγούμενες εισόδους τα GRUs χρησιμοποιούνται (όπως και τα LSTMs) κυρίως σε προβλήματα χρονοσειρών όπως η πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών. Συνολικά, τα φραγμένα επαναληπτικά δίκτυα έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τα LSTMs και ενδεχομένως μικρότερη απόδοση σε σύνθετα προβλήματα με μεγάλα σύνολα δεδομένων. Το πλεονέκτημα τους βρίσκεται στην απλούστερη δομή τους που διευκολύνει την εκπαίδευση και τη σύγκλισή τους και για αυτό το λόγο συνήθως επιλέγονται σε λιγότερο πολύπλοκα προβλήματα όπου μπορούν να πετύχουν παρόμοια αποτελέσματα με τα LSTMs, καταναλώνοντας σημαντικά λιγότερους υπολογιστικούς πόρους.

5.5.4 Υπερπαραμέτροι νευρωνικών δικτύων

Οι υπερπαραμέτροι (hyperparameters) είναι τιμές, οι οποίες, σε αντίθεση με τις παραμέτρους των μοντέλων που ανανεώνονται και προσαρμόζονται κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης, καθορίζονται κατά το σχεδιασμό του συστήματος και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ταχύτητα σύγκλισης και την απόδοση του (Claesen & De Moor, 2015). Για τις παραμέτρους αυτές δεν είναι δυνατόν να προκαθοριστεί μία βέλτιστη τιμή και απαιτούνται συνήθως αρκετές δοκιμές πριν την τελική τους επιλογή. Ορισμένες από τις σημαντικότερες υπερπαραμέτρους ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι οι ακόλουθες:

- Αριθμός κρυφών επιπέδων: περισσότερα κρυφά επίπεδα αυξάνουν τη χωρητικότητα του δικτύου και συμβάλλουν στην αναγνώριση μοτίβων υψηλότερης πολυπλοκότητας.

Συγχρόνως όμως καθιστούν δυσκολότερη την εκπαίδευση του δικτύου και αυξάνουν το συνολικό χρόνο που απαιτείται για σύγκλιση.

- Αριθμός νευρώνων κρυφών επιπέδων: όπως και με τον αριθμό των κρυφών επιπέδων ο αριθμός των νευρώνων επηρεάζει την απόδοση αλλά και την εκπαίδευση του μοντέλου.

- Συνάρτηση ενεργοποίησης για κάθε επίπεδο: η συνάρτηση ενεργοποίησης παράγει την τελική έξοδο του κάθε νευρώνα, λαμβάνοντας ως είσοδο το σταθμισμένο άθροισμα των εισόδων του. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης, η καταλληλότητα των οποίων εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος. Συνήθως μεγαλύτερη σημασία έχει η επιλογή της συνάρτησης ενεργοποίησης στο επίπεδο εξόδου από όπου και προκύπτει η τελική πρόβλεψη του δικτύου.

- Συνάρτηση κόστους: είναι η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του μοντέλου κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Και σε αυτή την περίπτωση η τελική επιλογή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τύπο του προβλήματος προς επίλυση.

- Ρυθμός μάθησης: καθορίζει το βαθμό ανανέωσης των εσωτερικών παραμέτρων του μοντέλου. Όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός μάθησης τόσο περισσότερο καθυστερεί η σύγκλιση του μοντέλου, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται ο κίνδυνος η σύγκλιση να γίνει σε μη βέλτιστες παραμέτρους.

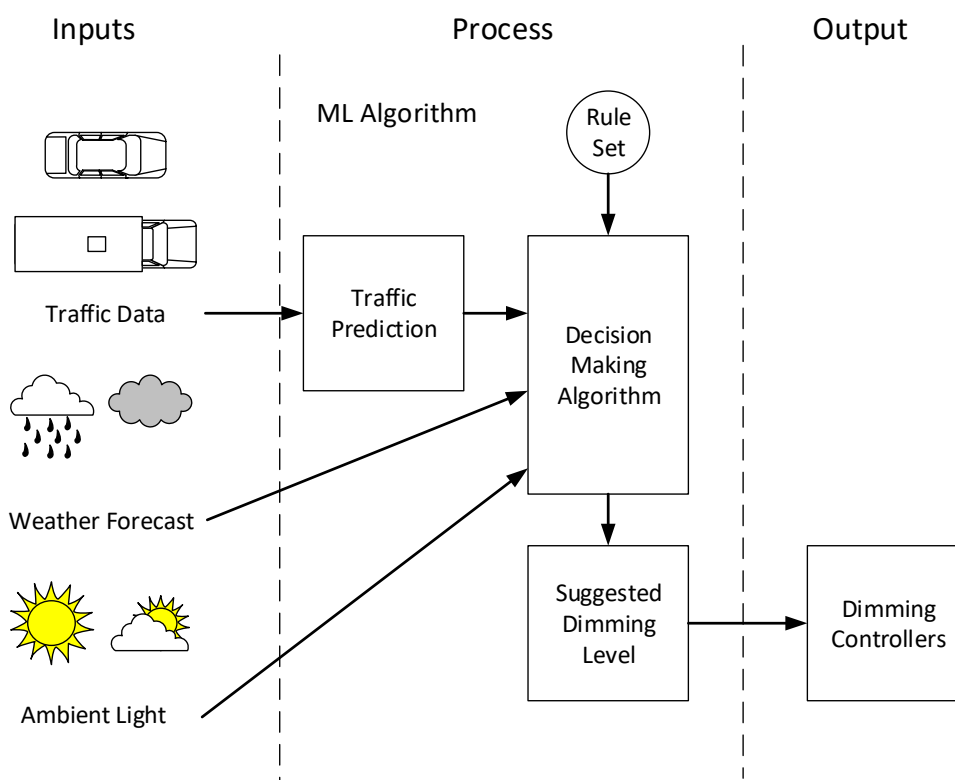
5.6 Μελέτη συστήματος ελέγχου οδοφωτισμού

Με βάση την περιγραφή των ευφυών συστημάτων και των προηγμένων τεχνικών μηχανικής εκμάθησης και νευρωνικών δικτύων, μπορούμε να προσεγγίσουμε την αρχιτεκτονική και τις βασικές προϋποθέσεις και αρχές λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, ενταγμένο σε ένα σύστημα ελέγχου του οδοφωτισμού. Πιο συγκεκριμένα η μελέτη θα γίνει για ένα σύστημα τηλεδιαχείρισης, που να μπορεί να εφαρμόζει προηγμένες τεχνικές όπως η μηχανική εκμάθηση, για να μπορεί να ρυθμίζει αυτόματα, με βάση κάποιες παραμέτρους που θα του ορίζονται, τη λειτουργία και την ένταση του οδοφωτισμού.

5.6.1 Περιγραφή συστήματος

Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι ένα ευφύες σύστημα λογισμικού, βασισμένο σε τεχνολογίες νευρωνικών δικτύων και ασαφών συστημάτων, το οποίο θα καθορίζει τη

φωτεινότητα των LED φωτιστικών στα τμήματα ανοιχτής οδοποιίας των αυτοκινητοδρόμων μέσω επεξεργασίας κυκλοφοριακών, μετεωρολογικών και φωτομετρικών δεδομένων (Σχήμα 5.1). Κάνοντας χρήση των δεδομένων κυκλοφοριακού φόρτου, το σύστημα θα μπορεί να προβλέψει τον μέσο μελλοντικό κυκλοφοριακό φόρτο αξιοποιώντας τις δυνατότητες των νευρωνικών δικτύων και της μηχανικής μάθησης. Χρησιμοποιώντας ασαφή λογική θα συνδυάζεται ο αναμενόμενος βαθμός κυκλοφοριακού φόρτου με τις αναμενόμενες καιρικές συνθήκες και άλλα συμβάντα στον αυτοκινητόδρομο και θα υπολογίζεται το απαιτούμενο ποσοστό φωτεινότητας (το ποσοστό dimming των LED φωτιστικών) ώστε να καλύπτονται οι προβλεπόμενες ανάγκες, αλλά και να περιορίζεται στο ελάχιστο που να επιτρέπουν οι συνθήκες.



Σχήμα 5.1 Το ευφυές σύστημα οδοφωτισμού

Το σύστημα θα βασιστεί στην λήψη δεδομένων των αντιστοίχων διατάξεων που έχουν ήδη τα απλά συστήματα τηλεδιαχείρισης, από ελεγκτές, που μπορούν να είναι εγκατεστημένοι στους περισσότερους σύγχρονους αυτοκινητόδρομους.

Βασικά πλεονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι, μεταξύ άλλων, η βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας και της φωτεινής κάλυψης, ο περιορισμός της φθοράς του εξοπλισμού, η μείωση της φωτορύπανσης και η αύξηση της ασφάλειας των οδηγών.

5.6.2 Βασικές αρχές και μεθοδολογία μελέτης

Προσεγγίζοντας τη δημιουργία ενός τέτοιου συστήματος, πρέπει να περιγραφεί η δομή και η λογική της λειτουργίας του, οι βασικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να περιγραφεί το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει. Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί είναι αρχικά, να προσδιοριστούν οι βασικές λειτουργικές και μη απαιτήσεις του λογισμικού που θα πρέπει να αναπτυχθεί, καθώς και να προσδιοριστεί το μοντέλο ανάπτυξης του λογισμικού μας. Έπειτα, θα προσδιοριστεί η λογική της λειτουργίας του dimming, τα επίπεδα και οι ανάγκες φωτισμού και το τεχνικό μέρος του εξοπλισμού που απαιτείται. Τέλος, θα προσδιοριστούν τα μοντέλα πρόβλεψης κυκλοφορίας που αποφασίζουν πότε υπάρχει ανάγκη για ρύθμιση της φωτεινότητας.

5.6.3 Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις συστήματος

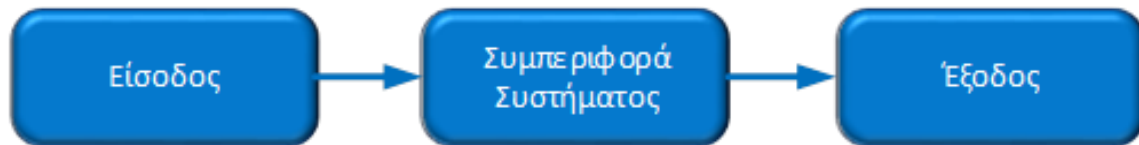
Ο προσδιορισμός των λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων ενός συστήματος λογισμικού αποτελεί κομβικό βήμα στη διαδικασία του σχεδιασμού και της υλοποίησης του, καθώς αυτές περιγράφουν τις λειτουργίες και τη λογική που θα υλοποιεί το σύστημα, καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του.

Λειτουργικές Απαιτήσεις

Οι λειτουργικές απαιτήσεις ενός συστήματος λογισμικού είναι χαρακτηριστικά του συστήματος τα οποία του επιτρέπουν να λειτουργεί ως απαιτείται, καθώς καθορίζουν τη βασική συμπεριφορά του. Αποτελούν το σύνολο του τι μπορεί ή τι δεν πρέπει να κάνει το σύστημα (QRA, 2019) και ουσιαστικά περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα ανταποκρίνεται στις εισόδους του.

Μια λειτουργική απαίτηση είναι μια περιγραφή της υπηρεσίας που πρέπει να παρέχει ένα σύστημα λογισμικού, καθώς περιγράφει το σύστημα ή τις επιμέρους συνιστώσες του. Μια λειτουργία αποτελείται ουσιαστικά από μια είσοδο δεδομένων στο σύστημα λογισμικού, από τη συμπεριφορά του συστήματος και από τα δεδομένα εξόδου (Σχήμα 5.2). Επομένως, μπορεί να είναι ένας υπολογισμός, μια διαχείριση δεδομένων, μια επιχειρησιακή διεργασία,

μια αλληλεπίδραση με τον χρήστη ή οποιαδήποτε άλλη συγκεκριμένη λειτουργικότητα, η οποία καθορίζει τη λειτουργία που πρόκειται να πραγματοποιήσει το σύστημα.



Σχήμα 5.2 Λειτουργικές Απαιτήσεις Συστήματος

Οι λειτουργικές απαιτήσεις θα πρέπει να περιλαμβάνουν:

- Περιγραφή των δεδομένων εισόδου του συστήματος
- Περιγραφή της ροής εργασιών που πραγματοποιούνται από το σύστημα
- Περιγραφή των αναφορών του συστήματος ή άλλων δεδομένων εξόδου
- Ποιος έχει δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων στο σύστημα
- Πώς το σύστημα ικανοποιεί εφαρμόσιμες ρυθμιστικές απαιτήσεις

Μη λειτουργικές απαιτήσεις

Σε αντίθεση με τις Λειτουργικές Απαιτήσεις που καθορίζουν το τι πρέπει ή δεν πρέπει να κάνει ένα σύστημα λογισμικού, οι Μη Λειτουργικές Απαιτήσεις καθορίζουν το πώς θα το κάνει. Για παράδειγμα, απαιτήσεις σχετικά με την απόδοση του λειτουργικού συστήματος, την αλληλεπίδρασή του με άλλα συστήματα, ειδικές απαιτήσεις στο σχεδιασμό του και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του, αποτελούν Μη Λειτουργικές Απαιτήσεις του συστήματος. Αυτές δεν επηρεάζουν τη βασική λειτουργικότητα και ακόμα και εάν δεν ικανοποιούνται, το σύστημα θα μπορεί να εκτελέσει τον βασικό του σκοπό (Thayer & Dorfman, 1990).

Λειτουργικές απαιτήσεις συστήματος

Το σύστημα αυτό θα βασίζεται στην πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου η οποία επιτυγχάνεται με τη λήψη δεδομένων πλήθους οχημάτων από Σταθμούς Μέτρησης. Οι Σταθμοί Μέτρησης, θα πρέπει να είναι τοποθετημένοι σε καθορισμένα σημεία του οδικού δικτύου και εξοπλισμένοι με ειδικούς ελεγκτές καθώς και διατάξεις ανίχνευσης κυκλοφορίας, που να συλλέγουν συνεχώς κυκλοφοριακά δεδομένα όπως πλήθος, ταχύτητα, κατηγορία και μήκος οχήματος, μέση ταχύτητα οχημάτων κ.α.

Επίσης, απαιτείται ένας Νευρωνικός Προβλέπτης, που θα πρέπει να τροφοδοτείται από κυκλοφοριακά δεδομένα από Σταθμούς Μέτρησης (ΣΜ), ιστορικά δεδομένα κυκλοφορίας

από βάσεις δεδομένων, καθώς και ημερολογιακά δεδομένα (όπως αργίες, σαββατοκύριακα, διακοπές, τριήμερά κ.α.).

Η Μηχανική μάθηση του Νευρωνικού Προβλέπτη Κυκλοφορίας θα μπορούσε να στηριχθεί σε έναν από τους τύπους επαναληπτικών νευρωνικών δικτύων, με προτιμότερο τα δίκτυα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (Long short-term memory – LSTM), που αναλύθηκαν προηγουμένως. Θα παράγεται η πρόβλεψη της κλάσης κυκλοφορίας ανά σταθμό μέτρησης για το επόμενο χρονικό διάστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς θα δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να εφαρμόζει την κατάλληλη ρύθμιση φωτισμού και να αποφεύγονται αυξομειώσεις που θα υπήρχαν εάν βασιζόταν μόνο στην τρέχουσα κυκλοφοριακή κατάσταση.

Ακόμη είναι απαραίτητη η παρουσία ενός Ελεγκτή Dimming, που να επιτελεί την κεντρική λειτουργία του συστήματος ρύθμισης φωτισμού, δηλαδή τον υπολογισμό της εντολής φωτισμού προς τα φωτιστικά σώματα στο δρόμο.

Ο Ελεγκτής Dimming τροφοδοτείται με δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς, από μετρητές ορατότητας, από ανεμόμετρα, από φωτόμετρα, καθώς και με δεδομένα συμβάντων και υπολογίζει τη φωτεινότητα μέσω μεθόδων ασαφούς λογικής.

5.6.4 Μοντέλο ανάπτυξης λογισμικού

Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις πλέον συνήθειες μεθοδολογίες ανάπτυξης λογισμικού με σκοπό την επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας για την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου οδοφωτισμού:

- Το μοντέλο του καταρράκτη (Waterfall): Πρόκειται για Μεθοδολογία Δομημένης Σχεδίασης, κατά το οποίο κάθε φάση θα πρέπει να ολοκληρώνεται πριν ξεκινήσει η επόμενη. Στο τέλος κάθε φάσης το έργο αξιολογείται.
- Το ευέλικτο μοντέλο (Agile): Οι ευέλικτες μεθοδολογίες επικεντρώνονται στον προγραμματισμό δίνοντας έμφαση στην απλή και επαναληπτική ανάπτυξη και στη στενή σχέση με τον πελάτη. Ακολουθούν λίγους και εύκολους κανόνες και στοχεύουν στην εξάλειψη του κόστους της μοντελοποίησης και τεκμηρίωσης.
- Η ορθολογική Ενοποιημένη Διαδικασία: Η Ορθολογική Ενοποιημένη Διαδικασία (Rational Unified Process, RUP) διαχωρίζει τη διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού σε τέσσερεις διακριτές φάσεις, τη σύλληψη, την επεξεργασία, την κατασκευή και τη μετάβαση.

Από τις παραπάνω μεθοδολογίες ανάπτυξης λογισμικού, το σύστημά μας θα μπορούσε να γίνει με την Ορθολογική Ενοποιημένη Διαδικασία καθώς συνδυάζει την ευελιξία, ταχύτητα και επαναληψιμότητα της Agile με τα καθορισμένα στάδια της Waterfall που διευκολύνουν τη διαδικασία ανάπτυξης.

5.6.5 Ασαφής Λογική και Dimming

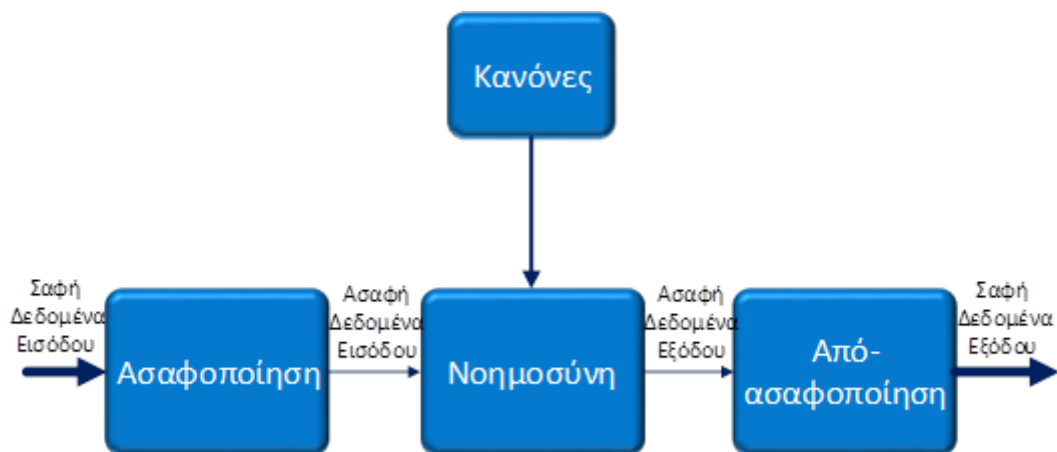
Ο Ελεγκτής Dimming του συστήματος θα πρέπει να χρησιμοποιεί μεθοδολογίες Ασαφούς Λογικής προκειμένου να υπολογίσει το κατάλληλο ποσοστό dimming των φωτιστικών LED.

Η ασαφής λογική είναι μια υπολογιστική μεθοδολογία που βασίζεται στην ανθρώπινη σκέψη. Προσεγγίζει τον κόσμο με μη ακριβείς όρους, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που ο ανθρώπινος εγκέφαλος λαμβάνει πληροφορίες (π.χ. η θερμοκρασία είναι υψηλή, η ταχύτητα είναι χαμηλή) και μετά ανταποκρίνεται με συγκεκριμένες ενέργειες.

Ο άνθρωπος μπορεί να συλλογιστεί με αβεβαιότητες, ασάφεια και κρίσεις. Οι υπολογιστές μπορούν να χειριστούν μόνο ακριβείς εκτιμήσεις. Η ασαφής λογική είναι μια προσπάθεια συνδυασμού των δύο τεχνικών.

Ο όρος "ασαφής" είχε αρχικά ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη αντίληψη ότι η ασαφής λογική είναι λιγότερο απαιτητική από την παραδοσιακή λογική, ενώ στην πραγματικότητα, είναι μια ακριβής μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων. Είναι σε θέση να χειρίζεται ταυτόχρονα αριθμητικά δεδομένα και γλωσσικούς όρους, τεχνική η οποία διευκολύνει τον έλεγχο ενός περίπλοκου συστήματος χωρίς γνώση της μαθηματικής του περιγραφής.

Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος έχει την εξής λογική (Σχήμα 5.3):



Σχήμα 5.3 Λειτουργία συστήματος ασαφούς λογικής

- Κανόνες: Καθορισμός ενός συνόλου ασαφών κανόνων που περιγράφουν τη λογική του συστήματος.
- Ασαφοποίηση: Μετατροπή σαφών δεδομένων εισόδου (π.χ. θερμοκρασία) σε ασαφή σύνολα, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής.
- Νοημοσύνη: Πέρασμα των ασαφών εισόδων στους κανόνες και παραγωγή της ασαφούς εξόδου.
- Από-ασαφοποίηση: Μετατροπή των ασαφών δεδομένων εξόδου σε πραγματική τιμή.

Ο συνδυασμός της ασαφούς λογικής με τα νευρωνικά δίκτυα και τους εξελκτικούς αλγορίθμους οδήγησε στη δημιουργία συστημάτων με ικανότητες μάθησης, γενίκευσης και συμπερασμού. Η μοντελοποίηση και ο έλεγχος σύνθετων φυσικών διεργασιών, των οποίων η σχέση διέγερσης-απόκρισης χαρακτηρίζεται από ισχυρές μη γραμμικότητες, από ανακρίβειες, ακόμα και από αντιφάσεις, είναι εφικτή στο πλαίσιο της ασαφούς λογικής. Οι δυνατότητες αυτές, που δεν παρέχονται επαρκώς από τα κλασικά αυστηρά μαθηματικά εργαλεία μοντελοποίησης και ελέγχου, καθιέρωσαν την ασαφή λογική ως ένα από τα ποιο αποτελεσματικά και καθιερωμένα πλέον εργαλεία για το σύγχρονο μηχανικό και επιστήμονα, με εφαρμογές της να εμφανίζονται σε πεδία μοντελοποίησης, πρόβλεψης, ελέγχου, αναγνώρισης προτύπων κ.α.

5.6.6 Μοντέλο πρόβλεψης κυκλοφορίας και ρύθμιση φωτισμού

Συνοψίζοντας την ανάλυση που προηγήθηκε, το σύστημα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της φωτεινότητας των φωτιστικών LED, θα αποτελείται ουσιαστικά από δύο επιμέρους υποσυστήματα:

1. Προσαρμοστικό Σύστημα Πρόβλεψης Κυκλοφορίας (ΠΣΠΚ)
2. Ελεγκτή Dimming (ED)

Το πρώτο είναι υπεύθυνο για την πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου αξιοποιώντας τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους σταθμούς μέτρησης που είναι εγκατεστημένοι στον αυτοκινητόδρομο. Με βάση αυτές τις επεξεργασίες θα καθορίζεται η ανάγκη τροποποίησης του φωτισμού, ώστε να ανταποκρίνεται στις προβλεπόμενες συνθήκες. Το δεύτερο υποσύστημα, (Ελεγκτής Dimming) θα αναλαμβάνει την τελική επιλογή της φωτεινότητας,

συνδυάζοντας την πρόβλεψη από το ΠΣΠΚ με επιπλέον πληροφορίες όπως μετεωρολογικά δεδομένα, εξωτερικά συμβάντα κ.λπ.

Μορφή του προβλήματος πρόβλεψης κυκλοφορίας

Όπως αναφέρθηκε, η πρόβλεψη της κυκλοφορίας βασίζεται σε δεδομένα που προέρχονται από τους σταθμούς μέτρησης. Τα δεδομένα αυτά είναι ουσιαστικά μετρήσεις που αφορούν τον αριθμό των διερχόμενων αυτοκινήτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα και στόχος είναι η πρόβλεψη του αριθμού των οχημάτων σε κάποια μελλοντική στιγμή. Η δομή αυτή των δεδομένων εντάσσει αυτό το πρόβλημα στην κατηγορία των προβλημάτων πρόβλεψης χρονοσειρών, δηλαδή περιπτώσεις στις οποίες με δεδομένα παρελθοντικών και ή και παροντικών παρατηρήσεων, έχουμε ως στόχο την πρόβλεψη της μελλοντικής τιμής κάποιας μεταβλητής ενδιαφέροντος.

Από τη σκοπιά της μηχανικής μάθησης, η πρόβλεψη χρονοσειρών αποτελεί μία ιδιαίτερη κατηγορία προβλημάτων που παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις. Η προσθήκη της συνιστώσας του χρόνου, παρότι προσφέρει επιπλέον πληροφορία, εισάγει επίσης μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας, καθιστώντας το πρόβλημα ακόμη πιο σύνθετο.

Μοντέλο πρόβλεψης κυκλοφοριακής ροής

Το Προσαρμοστικό Σύστημα Πρόβλεψης Κυκλοφορίας χρησιμοποιεί τα δεδομένα κίνησης που λαμβάνονται από τους σταθμούς μέτρησης με στόχο την πρόβλεψη της κυκλοφοριακής κίνησης σε κάποια μελλοντική στιγμή. Συγκεκριμένα κάθε σταθμός μέτρησης παρέχει στο σύστημα δεδομένα σχετικά με τον αριθμό των διερχόμενων οχημάτων περιοδικά και η τελική πρόβλεψη του μοντέλου που αφορά το επίπεδο κίνησης θα μπορούσε να γίνεται ωριαία.

Είναι αρχικά σημαντικό να καθοριστεί ο χρονικός ορίζοντας που θα λάβει υπόψη το μοντέλο στο παρελθόν, δηλαδή από ποιο χρονικό σημείο και έπειτα θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα κίνησης. Σε αυτή τη σχεδιαστική απόφαση είναι κομβικής σημασίας να βρεθεί το σημείο ισορροπίας μεταξύ αξιοποίησης όλης της χρήσιμης πληροφορίας και φιλτραρίσματος του θορύβου. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μόνο τα πολύ πρόσφατα δεδομένα υπάρχει ο κίνδυνος να μην αξιοποιηθεί πληροφορία που θα μπορούσε να βοηθήσει στην εκπαίδευση του μοντέλου ενώ στην αντίθετη περίπτωση που τροφοδοτηθούν στο δίκτυο υπερβολικά πολλά δεδομένα είναι πιθανό να εισαχθεί περιττή πληροφορία η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως θόρυβος, μειώνοντας την απόδοση του

συστήματος. Για το λόγο αυτό, μία προσέγγιση θα ήταν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα χρονικής διάρκειας ίσης με το διάστημα για το οποίο θα γίνει η πρόβλεψη.

Υπερπαραμέτροι συστήματος

Η λειτουργία και η απόδοση ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις τιμές των υπερπαραμέτρων του. Η διαδικασία της επιλογής τους αποτελεί το τελευταίο στάδιο της εκπαίδευσης και είναι συχνά ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική, χρήζει όμως ιδιαίτερης προσοχής καθώς μπορεί να καθορίσει τελικά την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Ένα μοντέλο πρόβλεψης κυκλοφορίας περιλαμβάνει πληθώρα παραμέτρων, ορισμένες από τις οποίες ορίζονται θεωρητικά με βάση τη φύση του προβλήματος και τη βιβλιογραφία ενώ οι υπόλοιπες επιλέγονται μέσω συγκεκριμένων διαδικασιών, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος που κατασκευάζεται.

5.7 Σύνοψη κεφαλαίου και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά μία ανάλυση των συστημάτων ελέγχου του οδοφωτισμού, πέρα από τις κλασικές μεθόδους τηλεδιαχείρισης. Η διαφορά είναι ότι στα έξυπνα αυτόματα συστήματα, δεν περιοριζόμαστε στην απλή εποπτεία του δρόμου, αλλά έχουμε δυνατότητες ρύθμισης και προσαρμογής του φωτισμού στις άμεσες και προβλεπόμενες ανάγκες καθώς και σε έκτακτα περιστατικά. Η ύπαρξη συστημάτων που παρακάμπτουν τον ανθρώπινο παράγοντα, οδηγεί σε πιο αποδοτική, γρήγορη και ασφαλή διαχείριση των απαιτήσεων για κατάλληλο οδοφωτισμό, καθώς και σε πιο οικονομική λειτουργία.

Τα συστήματα ρύθμισης κυκλοφορίας είναι στενά συνδεδεμένα με τη διαχείριση του οδοφωτισμού, καθώς αυτή αποτελεί μία από τις βασικές εφαρμογές τους, αξιοποιώντας τις πληροφορίες από το δρόμο για να παρακολουθήσουν τη λειτουργία του συστήματος. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η προσαρμογή σε αλλαγές, η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, η δυνατότητα πρόβλεψης και η δυνατότητα αυτόματης εκμάθησης κανόνων.

Στη συνέχεια αναλύεται η έννοια της Μηχανικής Εκμάθησης και αναλύονται οι βασικές μέθοδοι της επιβλεπόμενης εκμάθησης, της μη επιβλεπόμενης και της ενισχυτικής. Επίσης

γίνεται ανάλυση και της έννοιας των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, ως υπολογιστικά μοντέλα και αναλύονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Από τη θεωρητική προσέγγιση αυτών των εννοιών φαίνεται ότι μπορούν να αξιοποιηθούν σε συστήματα τηλεδιαχείρισης, που θα διαχειρίζονται το φωτισμό και την κυκλοφορία, όχι με όρους απλής παρακολούθησης και αντίδρασης σε συμβάντα, αλλά με όρους επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, ώστε να γίνεται πρόβλεψη του φόρτου στο δρόμο και να προετοιμάζεται το σύστημα για να ανταποκριθεί στις εκάστοτε συνθήκες.

Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου γίνεται η μελέτη και περιγραφή των παραμέτρων ενός τέτοιου θεωρητικού συστήματος διαχείρισης φωτισμού με βάση την πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου.

Από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, προσδιορίστηκε η δυνατότητα να κατασκευαστεί ένα σύστημα ελέγχου του οδοφωτισμού, που να λειτουργεί χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις του κυκλοφοριακού φόρτου και άλλων αναγκών λειτουργίας και να προσαρμόζει το φωτισμό αναλόγως. Για τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται η δημιουργία δύο υποσυστημάτων.

Το πρώτο υποσύστημα θα είναι υπεύθυνο για την πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου αξιοποιώντας τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους σταθμούς μέτρησης που είναι εγκατεστημένοι στον αυτοκινητόδρομο. Με βάση αυτές τις επεξεργασίες θα καθορίζεται η ανάγκη τροποποίησης του φωτισμού, ώστε να ανταποκρίνεται στις προβλεπόμενες συνθήκες. Η επεξεργασία των δεδομένων θα γίνεται με μοντέλα μηχανικής εκμάθησης και Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, που θα αναλύουν και θα προβλέπουν τις ανάγκες στο δρόμο.

Το δεύτερο υποσύστημα, θα αναλαμβάνει την τελική επιλογή της φωτεινότητας, συνδυάζοντας την πρόβλεψη κυκλοφορίας με επιπλέον πληροφορίες όπως μετεωρολογικά δεδομένα και εξωτερικά συμβάντα, ώστε να ανταποκρίνεται στα αναγκαία πρότυπα φωτισμού.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

6.1 Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των κυριότερων συμπερασμάτων της έρευνας που εκπονήθηκε. Γίνεται επίσης μία συνοπτική επισκόπηση της εργασίας καθώς και η συμβολή της στην έρευνα, ενώ τέλος διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του αντικειμένου.

6.2 Σύνοψη εργασίας

Η τεχνολογία LED τείνει να κυριαρχήσει στις εγκαταστάσεις και εφαρμογές οδοφωτισμού, καθώς παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στη χρήση της. Βασικό της στοιχείο είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης της φωτεινότητας και η εφαρμογή της τηλεδιαχείρισης.

Σε αυτήν την εργασία έγινε αρχικά μια επισκόπηση της θεωρίας που αφορά τα φωτομετρικά μεγέθη και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης έγινε μια ανάλυση των τύπων λαμπτήρων, από τις πιο παραδοσιακές τεχνολογίες των λαμπτήρων πυρακτώσεως και εκκένωσης, μέχρι και τα LED που είναι τα πιο σύγχρονα και παρατέθηκαν οι διαφορετικές διατάξεις των ιστών και η σημασία που έχουν στην απόδοση και την αποτελεσματικότητα του φωτισμού στο δρόμο.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η τεχνολογία των ημιαγωγών και των λαμπτήρων LED και αναλύθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, όπως η διάρκεια ζωής, η επίδραση της θερμοκρασίας και οι διατάξεις φωτιστικών που χρησιμοποιούνται. Έγινε εμφανές ότι σε θεωρητικό επίπεδο, τα φωτιστικά LED έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η διάρκεια ζωής και η απόδοσή τους. Μέσα από την κριτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας, από τα δεδομένα και τις αναλύσεις της χρήσης τους σε πραγματικές εφαρμογές, επιβεβαιώθηκαν αυτά τα στοιχεία και αναδείχθηκαν νέοι τομείς μελέτης και αξιολόγησης αυτής της τεχνολογίας.

Ένα σημείο που αναδείχτηκε είναι επίσης η δυνατότητα που παρέχουν τα LED για δυναμική ρύθμιση της φωτεινότητάς τους (dimming). Η ευκολία και ευελιξία που παρέχει η τεχνολογία LED στη δυναμική ρύθμιση είναι πολύ σημαντική, ειδικά από τη σκοπιά της τηλεδιαχείρισης, όπου η φωτεινότητα των λαμπτήρων χρειάζεται να αλλάζει, είτε ανάλογα

με την εποχή και τον καιρό, είτε δυναμικά με βάση τις ανάγκες, στα πλαίσια λειτουργίας με προηγμένα ευφυή συστήματα ελέγχου και διαχείρισης.

Έπειτα, αναλύθηκε η έννοια της τηλεδιαχείρισης και η αναγκαιότητα της στις σύγχρονες εγκαταστάσεις αυτοκινητοδρόμων. Έγινε σαφές ότι με τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα που υπάρχουν, τα μέσα παρακολούθησης της κυκλοφορίας και της κατάστασης στο δρόμο, τα δεδομένα που συλλέγονται είναι αρκετά για να μπορεί ο χειριστής να λαμβάνει τις βέλτιστες αποφάσεις και να αντιδρά άμεσα σε οποιοδήποτε συμβάν. Ακόμα περισσότερο, αυτός ο όγκος πληροφορίας καθιστά δυνατό και αναγκαίο τον ευφυή και αυτόματο έλεγχο και τα προηγμένα μέσα τηλεδιαχείρισης και παρακολούθησης της κυκλοφορίας.

Τέλος, έγινε μια επισκόπηση των συστημάτων ελέγχου του οδοφωτισμού και διαχείρισης της κυκλοφορίας, αναλύθηκαν τα πλεονεκτήματά τους και οι βασικές εφαρμογές τους. Αναλύθηκε η έννοια της Μηχανικής Εκμάθησης και οι βασικές μέθοδοι της επιβλεπόμενης εκμάθησης, της μη επιβλεπόμενης και της ενισχυτικής. Επίσης έγινε ανάλυση και της έννοιας των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, ως υπολογιστικά μοντέλα και αναλύθηκαν οι δομικές τους μονάδες και άλλες παράμετροι της λειτουργίας τους. Από τη θεωρητική προσέγγιση αυτών των εννοιών φάνηκε ότι μπορούν να αξιοποιηθούν σε συστήματα τηλεδιαχείρισης.

Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου έγινε η μελέτη και περιγραφή των παραμέτρων ενός τέτοιου θεωρητικού συστήματος διαχείρισης φωτισμού, με βάση την πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου.

6.3 Παρουσίαση συμπερασμάτων

Από την κριτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας και τη μελέτη παραδειγμάτων εφαρμογής της τεχνολογίας LED, αναδείχθηκαν πολλά στοιχεία που αξίζει να αναφερθούν.

Ένα σημείο που αναδείχτηκε είναι η δυνατότητα που παρέχουν τα LED για δυναμική ρύθμιση της φωτεινότητάς τους (dimming). Αυτή η ευκολία και ευελιξία στη δυναμική ρύθμιση είναι πολύ χρήσιμη, ειδικά κατά την εφαρμογή της τηλεδιαχείρισης, όπου η φωτεινότητα των λαμπτήρων χρειάζεται να προσαρμόζεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες ή τις απαιτήσεις λειτουργίας του δρόμου, εντασσόμενη σε προηγμένα ευφυή συστήματα ελέγχου και διαχείρισης.

Ένα βασικό συμπέρασμα, από την ανάλυση της εργασίας, είναι η επιβεβαίωση ότι με τη χρήση των LED υπήρξε εξοικονόμηση ενέργειας, κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων οδοφωτισμού. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται αφενός στην ίδια τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των λαμπτήρων και αφετέρου στην δυνατότητα τους για dimming, που διευκολύνει τη χρήση των φωτιστικών μόνο στις περιπτώσεις που αυτό είναι απαραίτητο και στην κατάλληλη στάθμη φωτισμού, που μπορεί να είναι χαμηλότερη από το μέγιστο. Έτσι έγινε σαφές ότι η αντικατάσταση παλαιότερων τύπων λαμπτήρων όπως οι HPS, είχε άμεση επίδραση στη μείωση του κόστους, αλλά και σε εγκαταστάσεις που ήδη χρησιμοποιούσαν φωτιστικά LED, με τη χρήση του dimming παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στην καταναλισκόμενη ενέργεια και καλύτερη αξιοποίηση.

Επίσης, εξετάζοντας την οικονομική πλευρά της χρήσης LED, φάνηκε ότι παρά το συγκριτικά μεγαλύτερο κόστος προμήθειας και αντικατάστασης των λαμπτήρων LED, η επένδυση σε αυτήν την τεχνολογία παραμένει η πιο συμφέρουσα επιλογή, καθώς η απόδοση τους, ιδιαίτερα σε συστήματα με ρύθμιση φωτισμού, είναι τόσο καλή που οδηγεί σε γρήγορη απόσβεση. Ειδικά αν λάβουμε υπόψη ότι η τιμή των LED, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τη γενικευμένη χρήση τους τείνει να μειωθεί, αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν ακόμη θετικότερες προοπτικές για την επένδυση σε φωτιστικά LED, ειδικά στη μαζική κλίμακα που απαιτούν τα έργα οδοφωτισμού. Σημαντικό ρόλο παίζει και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, που σημαίνει ότι μελλοντική νέα αντικατάστασή τους θα γίνει πολύ αργά, γεγονός που κάνει την επένδυση σε αυτά ακόμα πιο συμφέρουσα.

Όσον αφορά την οικολογική πτυχή της χρήσης τους, έγινε φανερό ότι η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και ο μεγάλος κύκλος ζωής είναι πολύ θετικά στοιχεία και μεγάλο πλεονέκτημα. Από την άποψη των υλικών που χρησιμοποιούνται, αν και η παλαιότερες τεχνολογίες φωτιστικών που αντικαθιστούν τα LED είχαν τοξικά στοιχεία και καλώς αποσύρονται, για την κατασκευή των ημιαγωγών χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες από γάλιο, ίνδιο, αρσενικό, αντιμόνιο και άλλα μικροϋλικά που επίσης χρειάζονται προσοχή, ειδικά κατά τη διαχείρισή τους ως απορρίμματα. Πέρα από αυτό, η λειτουργία των LED έχει επιπτώσεις, όπως και όλα τα φωτιστικά δρόμου στη χλωρίδα και πανίδα κάθε περιοχής, φαινόμενο που με το dimming μπορεί να αντιμετωπιστεί πιο αποτελεσματικά και να μειωθεί ο αντίκτυπος του φωτισμού και η φωτορύπανση, όπου είναι εφικτό.

Η ασφάλεια είναι επίσης ένας τομέας με μεγάλη σημασία, καθώς ο σχεδιασμός του οδοφωτισμού έχει ως στόχο την ομαλή κυκλοφορία των οχημάτων και την αίσθηση

ασφάλειας από τους πεζούς, ειδικά εντός του αστικού ιστού. Με τη ρύθμιση της στάθμης των LED επιτυγχάνεται η μείωση της θάμβωσης των οδηγών που παρατηρείται σε λαμπτήρες HPS ή και στα φώτα πορείας των οχημάτων. Ένας τομέας που χρειάζεται να αναπτυχθεί περισσότερο αφορά τους πεζούς και τους ποδηλάτες και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις τους για τον οδοφωτισμό, καθώς είναι τα συχνότερα θύματα και με τους σοβαρότερους τραυματισμούς, συγκριτικά με τους οδηγούς αυτοκινήτων. Επιπρόσθετα, αναφορικά με την αίσθηση ασφάλειας που νιώθουν οι πολίτες, ο φωτισμός με LED εμφανίζει πολύ θετικές αξιολογήσεις, παρά το γεγονός ότι τέτοιες αλλαγές στην καθημερινότητα αντιμετωπίζονται συνήθως με επιφύλαξη από τους ανθρώπους. Αυτά τα δεδομένα θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ευρύτερα, σε μελέτες χωροταξίας και σχεδιασμού πόλεων.

Ένα βασικό στοιχείο είναι οι δυνατότητες ελέγχου των φωτιστικών, όπου τα LED παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες. Πολλά αυτόματα συστήματα λειτουργούν με χρονοπρογραμματισμό και ελέγχονται με PLC, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, προσαρμόζονται δυναμικά στα δεδομένα που λαμβάνουν από το δρόμο, πέρα από το να εκτελούν ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα. Σε τέτοια συστήματα, καθώς και σε υβριδικά, παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Ακόμη, με βάση το κριτήριο της ποιότητας φωτισμού που παράγουν οι διατάξεις στο δρόμο, φάνηκε ότι τα LED δεν υπερέχουν σε όλες τις κατηγορίες, καθώς εμφανίζουν χειρότερη μέση λαμπρότητα στο οδόστρωμα από τους λαμπτήρες HPS, αλλά το αντισταθμίζουν με μεγαλύτερη ομοιομορφία και διάχυση του φωτός. Από αισθητική σκοπιά όμως, η τεχνολογία LED αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη για την ανάδειξη αξιοθέατων και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις πόλεις.

Από την κριτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας, στην παρούσα εργασία, επιβεβαιώθηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας LED στον οδοφωτισμό και αναδείχθηκαν οι ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες της, αν αυτή αξιοποιηθεί σε συστήματα με ρύθμιση φωτισμού και δυναμική προσαρμογή σε συστήματα τηλεδιαχείρισης.

Ένα άλλο συμπέρασμα από την παρούσα έρευνα είναι οι μεγάλες δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τηλεδιαχείριση τέτοιων έργων και ειδικά τα πιο προηγμένα συστήματα ελέγχου, που θα αξιοποιούν τις νέες μεθόδους της Μηχανικής

Εκμάθησης και των Νευρωνικών Δικτύων για την επεξεργασία δεδομένων και την πρόβλεψη της κυκλοφορίας, για την αντίστοιχη προσαρμογή του φωτισμού.

Από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, προσδιορίστηκε η δυνατότητα να κατασκευαστεί ένα σύστημα ελέγχου του οδοφωτισμού, που να λειτουργεί χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις του κυκλοφοριακού φόρτου και άλλων αναγκών λειτουργίας και να προσαρμόζει το φωτισμό αναλόγως. Για τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται η δημιουργία δύο υποσυστημάτων, όπου το πρώτο θα είναι υπεύθυνο για την πρόβλεψη του κυκλοφοριακού φόρτου αξιοποιώντας τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους σταθμούς μέτρησης που είναι εγκατεστημένοι στον αυτοκινητόδρομο και το δεύτερο υποσύστημα, θα αναλαμβάνει την τελική επιλογή της φωτεινότητας, συνδυάζοντας την πρόβλεψη κυκλοφορίας με επιπλέον πληροφορίες όπως μετεωρολογικά δεδομένα και εξωτερικά συμβάντα, ώστε να ανταποκρίνεται στα αναγκαία πρότυπα φωτισμού. Μέσω των μεθόδων που αναλύθηκαν, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να έχει πολύ γρήγορη και αποτελεσματική λειτουργία να ανταποκρίνεται στις πραγματικές απαιτήσεις, να συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας στον οδοφωτισμό και να βελτιώσει την ασφάλεια στις οδούς, τόσο με την ποιότητα του παρεχόμενου φωτισμού, όσο και με την άμεση απόκριση και προσαρμογή σε οποιοδήποτε συμβάν.

6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από αυτήν την εργασία αναδείχθηκαν οι δυνατότητες που υπάρχουν τόσο από τη χρήση της τεχνολογίας LED όσο και από τα συστήματα τηλεδιαχείρισης και τα μοντέλα πρόβλεψης κυκλοφορίας. Μερικές από τις προοπτικές για περαιτέρω έρευνα, ύστερα από τη μελέτη αυτής της εργασίας, είναι οι εξής:

- Ανάλυση και εφαρμογή νέων κριτηρίων με τα οποία θα εξεταστεί η λειτουργία των φωτιστικών LED
- Εξειδικευμένη έρευνα πάνω στους αλγόριθμους, στις προδιαγραφές της λειτουργίας της Μηχανικής Εκμάθησης και στα δεδομένα που θα επεξεργάζεται
- Ανάλυση της λειτουργίας των Νευρωνικών Δικτύων, με εξειδίκευση των παραμέτρων που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν
- Διερεύνηση νέων μεθόδων και οργάνων παρακολούθησης της κυκλοφορίας

- Προσαρμογή της τηλεδιαχείρισης στις νέες δυνατότητες συνδεσιμότητας και δικτύων, που ανοίγει η εξέλιξη αυτού του τεχνολογικού τομέα

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Amit, D. J. (1989), “Modeling Brain Functions: The World of Attractor Neural Networks”. Cambridge University Press. New York

An Incandescent light bulb. (n.d.). ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-An-Incandescent-light-bulb_fig1_267598738 (Accessed at 01/09/2023)

Basic parts of a modern LED structure. (n.d.) Retrieved from <https://media.springernature.com> (Accessed at 01/09/2023)

Beccali, M., Lo Brano, V., Di Dio, V., Giuseppina, C., Massaro, F., Favuzza, S. & Bonomolo, M. (2019). Energy saving and user satisfaction for a new advanced public lighting system. *Energy Conversion and Management*. 195. pp. 943-957. doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.070

Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

BLV HPS 600W. (2020). OCL Lighting. Retrieved from <https://www.oclighting.com/products/lamps/blv-hps-600w-de-el> (Accessed at 01/09/2023)

Bolliger, J., Hennet, T., Wermelinger, B., Bösch, R., Pazur, R., Blum, S., Haller, J. & Obrist, M. (2020). Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic and Applied Ecology*. 47. doi: 10.1016/j.baae.2020.06.003

Campisi, D., Gitto, S. & Morea, D. (2018). Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome. *Journal of Cleaner Production*. 175. pp. 190-198. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.063

Cho, K., Van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H. & Bengio, Y. (2014). *Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation*

Claesen, M. & De Moor, B. (2015). Hyperparameter search in machine learning.

Coureaux, I.O. & Manzano, E. (2013). The energy impact of luminaire depreciation on urban lighting. *Energy for Sustainable Development*. 17. pp. 357–362. doi: 10.1016/j.esd.2013.03.006

- Crammer, K., Dekel, O., Keshet, J., Shalev-Shwartz, S. & Singer, Y. (2006). Online Passive-Aggressive Algorithms. *Journal of Machine Learning Research*, vol. 7, pp 551-585
- Cucchiella, F., Berardinis, P., Koh, L. & Rotilio, M. (2017). Planning restoration of a historical landscape: A case study for integrating a sustainable street lighting system with conservation of historical values. *Journal of Cleaner Production*. 165. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.089
- Das, N., Pal, N. & Pradip, S. (2015). Economic Cost Analysis of LED over HPS Flood Lights for an Efficient Exterior Lighting Design Using Solar PV. *Building and Environment*. doi: 10.1016/j.build.env.2015.03.005
- Djuretic, A. & Kostic, M. (2018). Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting, *Energy, Volume 157*, pp. 367-378, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.179
- Dzombak, R., Kasikaralar, E. & Dillon, H. (2019). Exploring Cost and Environmental Implications of Optimal Technology Management Strategies in the Street Lighting Industry. *Resources, Conservation & Recycling: X*. 6. doi: 100022. 10.1016/j.rcrx.2019.100022
- Elements of an inductive loop detector. (n.d.). ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Elements-of-an-inductive-loop-detector_fig1_306268424 (Accessed at 01/09/2023)
- Everett considers red-light camera proposal. (2019). 790 KGMI. Retrieved from <https://kgmi.com/news/007700-everett-considers-red-light-camera-proposal> (Accessed at 01/09/2023)
- Fanoon, A. & A.R.F., S. (2020). Smart Lighting System for Efficient Street Lighting
- Farkas, T., Király, T., Pardy, T., Rang, T. & Rang, G. (2018). Application of power line communication technology in street lighting control. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 13. doi: 10.2495/DNE-V13-N2-176-186
- Fotios, S., Qasem, H., Cheal, C. & Uttley, J. (2016). A pilot study of road lighting, cycle lighting and obstacle detection. *Lighting Research and Technology*. 49. doi: 10.1177/1477153515625103
- Gălăţanu, C. (2020). On / Off Optimization of Public Lighting Systems Depending on the Road Class. *Procedia Manufacturing*. 46. pp. 378-383. doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.055

- Géron, A. (2018). *Neural networks and deep learning*. O'Reilly Media, Inc
- Green, Marc. (2000). "How Long Does It Take to Stop?" Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. *Transportation Human Factors*. 2. pp. 195-216
- Haans, A. & De Kort, Y. (2012). Light distribution in dynamic street lighting: Two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape. *Journal of Environmental Psychology*. 32. pp. 342-352. doi: 10.1016/j.jenvp.2012.05.006
- Haug, A., & Grosanic, S. (2016). Usage of Road Weather Sensors for automatic traffic control on motorways. *Transportation Research Procedia*, 15, 537–547
- Haykin, S. S. (2009). *Neural networks and learning machines*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education
- He, S., Tähkämö, L., Maksimainen, M., Liang, B., Pan, G.B. & Halonen, L. (2017). Effects of transient adaptation on drivers' visual performance in road tunnel lighting. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 70. pp. 42-54. doi: 10.1016/j.tust.2017.07.008
- High-Performance Heat Sink for Solid-State Lighting. (n.d.). ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/John-Vetrovec/publication/244844625_High-Performance_Heat_Sink_for_Solid-State_Lighting (Accessed at 01/09/2023)
- Hilal, N. & Yurdakul, A. (2020). Model-based Design of a Roadside Unit for Emergency and Disaster Management. *NOMS 2020 - 2020 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. pp. 1-6. IEEE
- Hinton, G. & Sejnowski, T. (1999). *Unsupervised Learning: Foundations of Neural Computation*. MIT Press
- Hochreiter, S. & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. pp. 1735-80
- Huang, S., Lee, L., Jeng, M. & Hsieh, Y. (2012). Assessment of energy-efficient LED street lighting through large-scale demonstration. 1-5. doi: 10.1109/ICRERA.2012.6477444
- Imprialou, M.I. & Quddus, M. (2017). Crash data quality for road safety research: Current state and future directions. *Accident Analysis & Prevention*. 130. doi: 10.1016/j.aap.2017.02.022

- Jägerbrand, A. (2016). LED (Light-Emitting Diode) Road Lighting in Practice: An Evaluation of Compliance with Regulations and Improvements for Further Energy Savings. *Energies*. 9. 357. doi: 10.3390/en9050357
- Janušová, L. & Čičmancová, S. (2016). Improving Safety of Transportation by Using Intelligent Transport Systems. *Procedia Engineering*, 14-22
- Kovacs, A., Bártai, R., Csáji, B., Dudas, P., Háty, B., Pedone, G., Révész, T. & Váncza, J. (2016). Intelligent control for energy-positive street lighting. *Energy*. 114. doi: 10.1016/j.energy.2016.07.156
- Laudon, K. & Laudon, J. (2015). Πληροφοριακά Συστήματα Διοίκησης: 11η αμερικανική έκδοση (μετάφρ. Αρκουδέας Π, επιμελ. Μάνθου Β.). Κλειδάριθμος
- LED Technology. (n.d.). GAP Lighting. Retrieved from <https://gaplighting.co.uk/technical/led-technology> (Accessed at 01/09/2023)
- LED working principle. (n.d.). ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/LED-working-principle-with-details-for-the-semiconductor-P-N-junction-depletion-region_fig1_366004092 (Accessed at 01/09/2023)
- Macgregor, C., Pocock, M., Fox, R. & Evans, D. (2019). Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant. *Ecosphere*. 10. doi: 10.1002/ecs2.2550
- Mali, R. R., & Vashista, R. D. (2003). Visibility measurement technique and its application in aviation services at international airports in India. Pune: Instruments Division, India Meteorological Department.
- Marino, F., Leccese, F. & Pizzuti, S. (2017). Adaptive Street Lighting Predictive Control. *Energy Procedia*. 111. pp. 790-799. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.241
- Markvica, K., Richter, G. & Lenz, G. (2019). Impact of urban street lighting on road users' perception of public space and mobility behavior. *Building and Environment*. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.009
- Mitchell, T. (1997). *Machine Learning*. McGraw Hill
- Modabbir, & Mohammad, A. (2021). Energy and Economic Analysis of Smart Technologies on Street Lighting System. pp. 389-392. doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9441734

- Mohri, M., Rostamizadeh, A. & Talwalkar, A. (2012). *Foundations of Machine Learning*. The MIT Press
- Nallaperuma, D., Nawaratne, R., Bandaragoda, T., Adikari, A., Nguyen, S., Kempitiya, T., Silva, D., Alahakoon, D. & Pothuhera, D. (2019). Online Incremental Machine Learning Platform for Big Data-Driven Smart Traffic Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. pp. 1-12. doi: 10.1109/TITS.2019.2924883
- Narendran, N. & Gu, Y. (2005). Life of LED-based white light sources. *Display Technology, Journal of*. pp. 167-171 doi: 171. 10.1109/JDT.2005.852510
- OMEGA Engineering inc. (2020). Retrieved from: <https://sea.omega.com/sg/prodinfo/anemometers.html>
- Pagden, M., Ngahane, K. & Amin, S. (2019). Changing the colour of night on urban streets - LED vs. part-night lighting system. *Socio-Economic Planning Sciences*. 69. doi: 10.1016/j.seps.2019.02.007
- Pasc, P.C. & Dumitru, C.D. (2017). Energy-efficient Street Lighting Using a Mitsubishi Alpha 2 PLC Based Solution, *Procedia Engineering, Volume 181*, pp. 824-828, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.473
- Pecar, M. & Papa, G. (2017). Transportation problems and their potential solutions in smart cities. *International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*. pp. 195-199. IEEE
- Peña-García, A., López, J. & Grindlay, A. (2015). Decrease of energy demands of lighting installations in road tunnels based in the forestation of portal surroundings with climbing plants. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 46. doi: 111-115. 10.1016/j.tust.2014.11.010
- Photometer for tunnel, Tunnel Photometer, Luminance meter for tunnel. (n.d.). Photometertunnel. Retrieved from <https://www.photometertunnel.com> (01/09/2023)
- Pour-Rouholamin, M. & Zhou, H. (2016). Investigating the Risk Factors Associated with Pedestrian Injury Severity in Illinois. *Journal of Safety Research*. 57. pp. 9-17. doi: 10.1016/j.jsr.2016.03.004
- Qin, L., Dong, L., Xu, W., Zhang, L., Yan, Q. & Chen, X. (2017). A “vehicle in, light brightens; vehicle out, light darkens” energy-saving control system of highway tunnel

lighting. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 66. pp. 147-156. doi: 10.1016/j.tust.2017.04.014

QRA, C. (2019). Functional vs Non-Functional Requirements: The Definitive Guide. Retrieved from <https://qracorp.com/functional-vs-non-functional-requirements/>

Rahm, J., Sternudd, C. & Johansson, M. (2021). “In the evening, I don’t walk in the park”: The interplay between street lighting and greenery in perceived safety. *URBAN DESIGN International*. 26. doi: 10.1057/s41289-020-00134-6

Ramadhani, F., Abu Bakar, K., Hussain, M., Erixno, O. & Nazir, R. (2016). Optimization with traffic-based control for designing standalone streetlight system: A case study. *Renewable Energy*. 105. pp. 149-159. doi: 10.1016/j.renene.2016.12.050

Raynham, P., Unwin, J., Khazova, M. & Tolia, S. (2019). The role of lighting in road traffic collisions. *Lighting Research & Technology*. 52. doi: 10.1177/1477153519870857

Riley, W., Davison, P., Maxwell, D. & Bendall, B. (2013). Street lighting delays and disrupts the dispersal of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry. *Biological Conservation*. 158. pp. 140–146. doi: 10.1016/j.biocon.2012.09.022

Roc, A., Banuprakash, P., Raj, G., & Prasad, L. (2018). Smart Traffic Light Systems. *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*, 243

Russell, S. J. & Norvig, P. (2010). Artificial Intelligence: A Modern Approach, Third Edition. Prentice Hall

Saad, R., Portnov, B. & Trop, T. (2021). Saving energy while maintaining the feeling of safety associated with urban street lighting. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 23. pp. 3. doi: 10.1007/s10098-020-01974-0

Schematic diagram of 114-W LED street lamp. (n.d.). ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-114-W-LED-street-lamp_fig1_224588290 (Accessed at 01/09/2023)

Shahzad, K., Čuček, L., Sagir, M., Ali, N., Rashid, M., Nazir, R., Nizami, A., Al-Turaif, H. & Ismail, I. (2018). An ecological feasibility study for developing sustainable street lighting system. *Journal of Cleaner Production*. 175. pp. 683-695. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.057

- Shuguang, L. (2015). An optimal model for tunnel lighting control systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 49. doi: 10.1016/j.tust.2015.05.001
- Sodium Vapour Lamp Working Principle. (2018). Hiten Techno Products Corporation. Retrieved from <https://www.hitentechno.in/sodium-vapour-lamp-working-principles> (Accessed at 01/09/2023)
- Sutton, R. S. & Barto, A. G. (1998). Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge: MIT Press
- Thayer, R. H., & Dorfman, M. (1990). System and Software Requirements Engineering. IEEE Computer Society Press.
- The Electromagnetic Spectrum. (2016). Mini Physics. Retrieved from https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html (Accessed at 01/09/2023)
- Thungtong, A., Chaichan, C. & Suwannarat, K. (2021). A web-based control system for traditional street lighting that uses high-pressure sodium lamps. *Heliyon*. 7. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08329
- TrafficVision. (n.d.). Retrieved from <https://www.trafficvision.com> (Accessed at 01/09/2023)
- Warm vs Cool White. (n.d.). Retrieved from https://cdn.shopify.com/s/files/1/0230/7266/9773/files/Warm_vs_Cool_White-1_large.jpg?v=1586528527 (Accessed at 01/09/2023)
- Welcome to the Museum of Electric Lamp Technology. (n.d.). Retrieved from <http://www.lamptech.co.uk> (Accessed at 01/09/2023)
- What is PWM Dimming. (2022). uPowerTek. Retrieved from <https://www.upowertek.com/what-is-pwm-dimming> (Accessed at 01/09/2023)
- Wijnen, W., Weijermars, W., Schoeters, A., Berghe, W., Bauer, R., Carnis, L., Elvik, R., & Martensen, H. (2018). An analysis of official road crash cost estimates in European countries. *Safety Science*. 113. doi: 10.1016/j.ssci.2018.12.004
- Wojnicki, I., Ernst, S., Kotulski, L. & Sędziwy, A. (2014). Advanced street lighting control. *Expert Systems with Applications*. 41. pp. 999–1005. doi: 10.1016/j.eswa.2013.07.044

Yoomak, S. & Ngaopitakkul, A. (2018). Optimisation of lighting quality and energy efficiency of LED luminaires in roadway lighting systems on different road surfaces. *Sustainable Cities and Society*. 38. doi: 10.1016/j.scs.2018.01.005

Zalcmanis, G., Punculis, R. & Vonda, E. (2019). Impact of the use of inappropriate HID lamps on illumination and dazzling. *Procedia Computer Science*. 149. pp. 130-137. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.116

Αντωνίου, Κ., & Σπυροπούλου, Ι. (2015). *Αρχές κυκλοφοριακής τεχνικής και προσομοίωσης*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11419/5793>

Καγκαράκης, Κ. (1992). *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία

Τεχνική Οδηγία Τ.Ε.Ε. 20701-7: «Τεχνητός και Φυσικός Φωτισμός Κτιρίων», Απρίλιος 2021 - Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας

Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, «Σχεδιασμός και Έλεγχος Εγκαταστάσεων Οδοφωτισμού», ΤΕΕ, 2018

Τοπαλής, Φ. Β. *Φωτοτεχνία*. (1994). Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ

Τοπαλής, Φ. Β., Οικονόμου, Λ. & Κουρτέση, Σ. (2010). *ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑ*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

[Asymmetric LED lens]. (n.d.). Retrieved from <https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/> (Accessed at 01/06/2021)

[Degradation graph of luminous output] (n.d.). Retrieved from <https://electricalnotes.wordpress.com> (Accessed at 05/10/2021)

[Hybrid LED lens]. (n.d.). Retrieved from <https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/> (Accessed at 01/06/2021)

[Meteostation]. (n.d.). Retrieved from <https://www.physics.uoc.gr/sites/files/physics/images/meteostation.png> (Accessed at 01/09/2023)

[Symmetrical LED lens]. (n.d.). Retrieved from <https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/> (Accessed at 01/06/2021)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.