



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Ανθρωποκεντρικός Φωτισμός»

Σάββας Μιχαλάκης

Επιβλέπων καθηγητής : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Ομότιμος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2025



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Ανθρωποκεντρικός Φωτισμός»

Σάββας Μιχαλάκης

Επιβλέπων καθηγητής : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Ομότιμος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6η Οκτωβρίου 2025.

Τριμελής Επιτροπή Εξέτασης

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομότιμος Καθηγητής
ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής
ΕΜΠ

.....
Χρήστος Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2025

(Υπογραφή)

.....

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

Copyright © Σάββας Ι. Μιχαλάκης, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικό ή ερευνητικό σκοπό, υπό την προϋπόθεση ότι θα αναφέρεται ρητά η πηγή προέλευσης και θα διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα σχετικά με τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικούς σκοπούς θα πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη του ανθρωποκεντρικού φωτισμού σε γραφειακό χώρο. Σκοπός είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο φωτισμός επηρεάζει όχι μόνο την οπτική άνεση, αλλά και την ψυχολογική διάθεση και την αποδοτικότητα των εργαζομένων. Στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάζονται βασικές αρχές φωτισμού, οι κανονισμοί που ισχύουν, καθώς και οι απαιτήσεις που αφορούν χώρους γραφείων. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα λογισμικά σχεδιασμού και προσομοίωσης, ώστε να εξεταστούν διαφορετικά σενάρια φωτισμού και να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εφαρμογή ανθρωποκεντρικού φωτισμού σε γραφειακούς χώρους μπορεί να συμβάλει τόσο στη βελτίωση της οπτικής άνεσης όσο και στη γενικότερη ευεξία των χρηστών. Παράλληλα, αναδεικνύεται η σημασία της σωστής επιλογής φωτιστικών σωμάτων και θερμοκρασίας χρώματος για την επίτευξη ισορροπίας ανάμεσα στη λειτουργικότητα, την άνεση και την ενεργειακή κατανάλωση. Τέλος, η εργασία υπογραμμίζει ότι ο φωτισμός δεν αποτελεί απλά μια τεχνική ανάγκη, αλλά εργαλείο που μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα ζωής στον εργασιακό χώρο.

Λέξεις κλειδιά: Ανθρωποκεντρικός φωτισμός, Κιρκάδιος ρυθμός, Φωτισμός γραφείων, Relux, Θερμοκρασία χρώματος

Abstract

This diploma thesis focuses on the implementation of human-centric lighting in office environments. Its purpose is to examine how lighting affects not only visual comfort but also employees' mood and productivity. The study presents the fundamental principles of lighting design, the applicable regulations, and the specific requirements for office spaces. Specialized lighting design and simulation software were used to evaluate different scenarios and compare their performance.

The findings indicate that adopting human-centric lighting can significantly improve both visual comfort and overall user well-being. Furthermore, the work highlights the importance of selecting appropriate luminaires and color temperatures to achieve a balance between functionality, comfort, and energy efficiency. Overall, the thesis emphasizes that lighting should not be seen merely as a technical requirement, but as a tool that can genuinely enhance the quality of life in the workplace.

Keywords: Human-centric lighting, Circadian rhythm, Office lighting, Relux, Color temperature

Ευχαριστίες

Με βαθιά εκτίμηση θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Φραγκίσκο Τοπαλή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση και την πολύτιμη στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η εμπειρία, οι γνώσεις και η διάθεσή του να μοιραστεί μαζί μου την πολύχρονη ακαδημαϊκή του πορεία αποτέλεσε καθοριστικό φάρο σε κάθε στάδιο αυτής της προσπάθειας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Ευάγγελο Μαδιά, ο οποίος στάθηκε δίπλα μου με αμέριστη προθυμία, υπομονή και ενθάρρυνση. Η συμβολή του, τόσο σε τεχνικό επίπεδο όσο και σε ανθρώπινη υποστήριξη, ήταν ανεκτίμητη και τον ευχαριστώ από καρδιάς.

Τέλος, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στην οικογένειά μου, για την αδιάκοπη αγάπη, την κατανόηση και τη στήριξή της σε κάθε βήμα της πορείας μου στην Αθήνα. Η παρουσία τους υπήρξε δύναμη και στήριγμα σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και χωρίς αυτούς η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας δεν θα ήταν εφικτή.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 1°- Εισαγωγή στο φως	15
1.1 Το ορατό φως	15
1.2 Φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού	16
1.3 Ανθρώπινη όραση	17
1.4 Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα	17
1.4.1 Θέση του T.O.T.E.E. για τους φωτουποδοχείς	20
1.5 Είδη ανθρώπινης όρασης	20
1.6 Χρώμα φωτεινής πηγής	21
1.6.1 Chromaticity-Χρωματικότητα	21
1.6.2 Θερμοκρασία χρώματος και σχετική θερμοκρασία χρώματος	22
1.6.3 Ποιότητα χρώματος φωτεινής πηγής	26
1.6.4 Χρωματομετρία, χρωματικά συστήματα	26
1.6.5 Το χρωματικό σύστημα RGB	27
1.6.6 Το χρωματικό σύστημα x, y, z της CIE	29
1.7 Φωτεινές πηγές	33
1.7.1 Λαμπτήρες φθορισμού	33
1.7.2 Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (LED)	38
Κεφάλαιο 2°- Ανθρωποκεντρικός φωτισμός	43
2.1 Κιρκαδικός ρυθμός	43
2.2 Διατήρηση του κιρκάδιου ρυθμού	45
2.3 Μη οπτικά αποτελέσματα φωτισμού	46
2.3.1 Μετρικά συστήματα μη οπτικών αποτελεσμάτων	48
2.4 Η απόκριση των γαγγλιακών κυττάρων στο φως	48
2.5 Σύνδεση του ανθρωποκεντρικού φωτισμού με τον κιρκαδικό κύκλο	49
2.6 Ορισμός του Ανθρωποκεντρικού φωτισμού, HCL	49
2.7 Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού	51
2.8 Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού φωτισμού	53
2.9 Κιρκαδικό ερέθισμα	55
2.9.1 Υπολογισμός κιρκαδικού ερεθίσματος	56
2.10 Οικονομική και Κοινωνική διάσταση του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού	59
Κεφάλαιο 3° - Πειραματικό μέρος	61
3.1 Μέθοδοι υπολογισμού, EML, MDEI, CS	61
3.2 Ανάλυση φωτιστικών σωμάτων βάση τον κιρκάδιο φωτισμό	62

Κεφάλαιο 4° - Φωτισμός εσωτερικών χώρων.....	71
4.1 Κριτήρια μελέτης φωτισμού	71
4.2 Μεθοδολογία μελέτης	73
4.3 Αρχιτεκτονική διάταξη του χώρου	74
4.4 Καταγραφή υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού	76
4.5 Αποτύπωση και ανάλυση της υφιστάμενης ισχύος του συστήματος τεχνητού φωτισμού	78
4.6 Ενεργειακή κατανάλωση της υφιστάμενης εγκατάστασης	80
4.7 Μελέτη φωτισμού για τον χώρο του τεχνικού γραφείου – 4,000 K.....	81
4.7.1 Σενάριο Α.1.....	81
4.7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Α.1	85
4.7.3 Σενάριο Β.1	85
4.7.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Β.1.....	87
4.7.5 Σενάριο Γ.1	88
4.7.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Γ.1	90
4.7.7 Σενάριο Δ.1.....	91
4.7.8 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Δ.1.....	92
4.8 Μελέτη φωτισμού για τον χώρο του τεχνικού γραφείου – 3,000 K.....	93
4.8.1 Σενάριο Α.2.....	93
4.8.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Α.2	95
4.8.3 Σενάριο Β.2.....	96
4.8.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Β.2.....	97
4.8.5 Σενάριο Γ.2	98
4.8.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Γ.2	100
4.8.7 Σενάριο Δ.2.....	100
4.8.8 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Δ.2.....	102
Κεφάλαιο 5° – Συγκριτική αξιολόγηση.....	105
5.1 Αξιολόγηση και επιλογή καταλληλότερης θερμοκρασίας χρώματος.....	105
5.2 Αξιολόγηση και τελική επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου στα 4,000 K.....	110
5.3 Ενεργειακή σύγκριση του σεναρίου Δ.1 με την υφιστάμενη εγκατάσταση.....	110
Κεφάλαιο 6° – Συμπεράσματα	113
Βιβλιογραφία	116

Εισαγωγή

Ο φωτισμός αποτελεί βασικό παράγοντα στη διαμόρφωση ενός εσωτερικού χώρου, επηρεάζοντας τόσο την ορατότητα όσο και την ψυχολογική διάθεση και την απόδοση των ανθρώπων. Ειδικά στους χώρους γραφείων, η σωστή μελέτη φωτισμού έχει άμεση σχέση με την παραγωγικότητα και την άνεση των εργαζομένων. Η ανάπτυξη του ανθρωποκεντρικού φωτισμού τα τελευταία χρόνια έφερε στο προσκήνιο νέες προσεγγίσεις, όπου δεν λαμβάνεται υπόψη μόνο η ποσότητα του φωτός, αλλά και η ποιότητά του, καθώς και η επίδρασή του στον κιρκαδικό ρυθμό.

Η εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη ενός γραφειακού χώρου, όπου εξετάζονται οι απαιτήσεις φωτισμού σύμφωνα με τα πρότυπα, καθώς και η απόδοση διαφορετικών σεναρίων φωτισμού με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού. Στόχος είναι να φανεί με ποιον τρόπο η εφαρμογή του ανθρωποκεντρικού φωτισμού μπορεί να βελτιώσει την καθημερινή εμπειρία των χρηστών, χωρίς να αγνοείται η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας.

Η δομή της εργασίας έχει ως εξής: αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο και η βιβλιογραφική ανασκόπηση, στη συνέχεια αναλύονται οι έννοιες του ανθρωποκεντρικού φωτισμού και των κανονισμών που αφορούν τον φωτισμό σε γραφεία, έπειτα περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης και τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 1^ο- Εισαγωγή στο φως

1.1 Το ορατό φως

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή ηλεκτρομαγνητική ενέργεια απαρτίζεται από κύματα που έχουν ηλεκτρική και μαγνητική ενέργεια, οποία ακτινοβολούνται στον ελεύθερο χώρο. Τα κύματα αυτά παρουσιάζονται με αρκετές μορφές κινούνται στον αέρα με την ταχύτητα του φωτός. Τα κύρια χαρακτηριστικά των διάφορων τύπων κυμάτων είναι η συχνότητα του κύματος που είναι ο αριθμός των κυμάτων που θα διέλθει από κάποιο σημείο σε ένα δευτερόλεπτο και το μήκος κύματος που είναι η απόσταση που θα καλύψει ένας κύκλος κύματος. Οι πιο σημαντικές διαφορές των διαφορετικών τύπων κυμάτων είναι σχετικά με την συχνότητα. Για όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματος η ταχύτητα διάδοσης του v ισούται με το γινόμενο της συχνότητας f και του μήκους κύματος λ :

$$v = \lambda \times f \quad (\text{εξ-1.1})$$

όπου:

λ το μήκος κύματος σε m και έχει μονάδα μέτρησης nm (10^{-9})

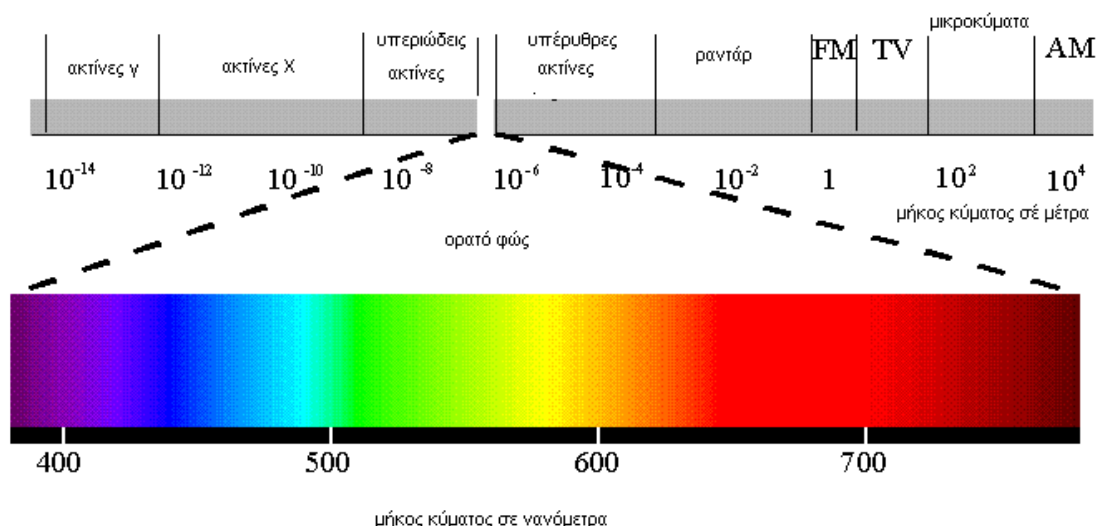
f συχνότητα σε Hz

v η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε m/s.

Ακόμα για το κάθε μέσο που διαδίδονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν χαρακτηριστική ταχύτητα και στο κενό, δηλαδή στον αέρα είναι ίση με:

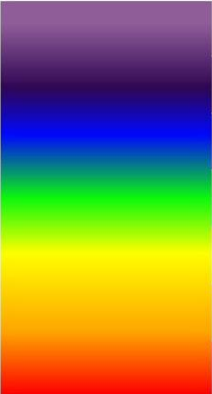
$$C = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 300.000 \text{ km/s} \quad (\text{εξ-1.2})$$

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τον ανθρώπινο οφθαλμό είναι το ορατό φως. Το φως καταλαμβάνει ένα μικρό μέρος του συνολικού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που αποτελείται από ραδιοφωνικά κύματα με μερικά μέτρα μήκη κύματος, μέχρι τις κοσμικές ακτίνες με μήκη κύματος μικρότερα από ένα τρισεκατομμυριοστό του μέτρου (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολίας.

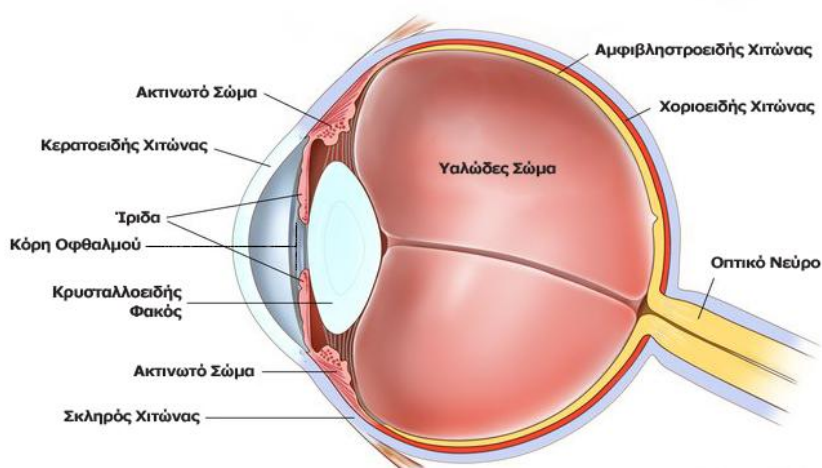
Το ορατό φως βρίσκεται στην περιοχή ανάμεσα στις υπέρυθρες(IR=infrared) και στις υπεριώδεις (UV = ultra violet) ακτινοβολίες και απλώνονται από τα 380 nm μέχρι τα 780 nm. Καθεμία ακτινοβολία με το μήκος κύματος της δημιουργούν στον άνθρωπο την εντύπωση ενός χρώματος (Πίνακας 1.1). Όλες οι ακτινοβολίες μαζί με μήκη κύματος από 380 nm μέχρι 780 nm δημιουργούν την εντύπωση του λευκού φωτός [1].

Color	Spectrum	Wavelength (nm)	Frequency (THz)
Violet		380 – 425	789 – 705
Indigo		425 – 450	705 – 668
Blue		450 – 495	668 – 606
Green		495 – 570	606 – 526
Yellow		570 – 590	526 – 508
Orange		590 – 620	508 – 484
Red		620 – 750	484 – 400

Πίνακας 1.1: Τα χρώματα του ορατού φάσματος[1].

1.2 Φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού

Το βασικό όργανο του οπτικού συστήματος είναι το μάτι- οφθαλμός



Εικόνα 1.2: Ο ανθρώπινος οφθαλμός.

Πιο αναλυτικά κάποια από τα βασικά μέρη του οφθαλμού τα οποία θα χρειαστούν για την επεξήγηση της ανθρώπινης όρασης:

Ο Κερατοειδής χιτώνας είναι το διαφανές, εξωτερικό «παράθυρο» και κυριότερο στοιχείο εστίασης του ματιού. Η εξωτερική στιβάδα του κερατοειδούς είναι γνωστή ως επιθήλιο. Ο κύριος σκοπός του είναι να προστατεύει το μάτι. Το επιθήλιο είναι φτιαγμένο από διαυγή κύτταρα που έχουν την ικανότητα να αναγεννούνται γρήγορα. Η έσω στιβάδα του κερατοειδούς είναι επίσης φτιαγμένη από διαφανή ιστό, που επιτρέπει τη διέλευση του φωτός.

Ο Αμφιβληστροειδής είναι η μεμβράνη που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ματιού και περιέχει τους φωτοϋποδοχείς. Οι φωτοϋποδοχείς αντιδρούν στην παρουσία και την ένταση του φωτός, στέλνοντας το ερέθισμα στον εγκέφαλο μέσω του οπτικού νεύρου. Στον εγκέφαλο, ένα πλήθος νευρικών ερεθισμάτων λαμβάνονται από τους φωτοϋποδοχείς του αμφιβληστροειδούς και μετατρέπονται σε εικόνα. Υπάρχουν δύο τύποι φωτοϋποδοχέων, τα κωνία (6-7 εκατομμύρια) και τα ραβδία (110-125 εκατομμύρια).

Το οπτικό νεύρο είναι η δομή η οποία λαμβάνει την πληροφορία από τον αμφιβληστροειδή σαν ηλεκτρικά σήματα και την μεταφέρει στον εγκέφαλο, όπου αυτή η πληροφορία μετατρέπεται σε οπτική εικόνα. Το οπτικό νεύρο αποτελείται από μία δέσμη περίπου ενός εκατομμυρίου νευρικών ινών.

1.3 Ανθρώπινη όραση

Το οπτικό σύστημα του ανθρώπου είναι πολύ σημαντικό καθώς συνδέει τον εξωτερικό κόσμο με τον εγκέφαλό του. Η ερμηνεία που δίνει σε αυτά που βλέπει εξαρτάται από τις εμπειρίες, τις γνώσεις, την διάθεση της στιγμής αλλά και την ιδιοσυγκρασία του.

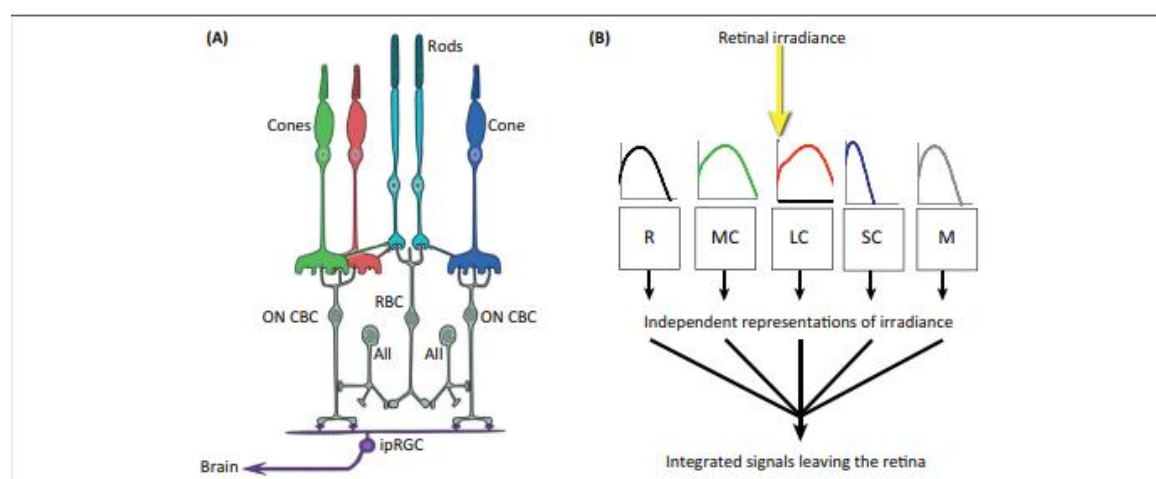
Η ανθρώπινη όραση θεωρείται η ανώτερη αισθητηριακή αντίληψη του φωτός των χρωμάτων και των αντικειμένων. Η όραση είναι το μέσο με το οποίο ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή με τον έξω κόσμο και κατανοεί τη θέση του μέσα στο χώρο. Η αίσθηση της όρασης είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που ακόμα και σήμερα ο άνθρωπος δεν την έχει κατανοήσει πλήρως. Συμπεριλαμβάνει την ακαριαία αλληλεπίδραση του ματιού και του εγκεφάλου μέσω ενός δικτύου νευρώνων αλλά και άλλων αντίστοιχων κυττάρων. Αναλυτικότερα, οι φωτεινές ακτίνες όταν πέφτουν στο μάτι, περνούν τα διαφανή στοιχεία του (τον κερατοειδή το υδατοειδές υγρό, το φακό και το υαλοειδές σώμα) που ονομάζονται και διαθλαστικά μέσα και συγκεντρώνονται στον αμφιβληστροειδή. Οι ακτίνες αυτές διεγείρουν τους φωτοανιχνευτές του ανθρώπινου οφθαλμού (κωνία και ραβδία) δημιουργώντας τις φωτοχημικές αντιδράσεις και βιοηλεκτρικές μεταβολές οι οποίες τελικά παράγουν ηλεκτρικά σήματα που μεταβιβάζονται με το οπτικό νεύρο στον εγκέφαλο. Στον εγκέφαλο (στον ινιακό βολβό αυτού) τα σήματα αυτά κατά κάποιο τρόπο «κωδικοποιούνται» και ολοκληρώνεται η όλη λειτουργία της όρασης [1].

1.4 Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα

Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα ή αλλιώς φωτοϋποδοχείς και οι δύο κατηγορίες φωτοανιχνευτών: τα κωνία και τα ραβδία, που έχουν παρόμοια κατασκευή αλλά παρουσιάζουν ευαισθησία σε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού. Ένα μάτι περιέχει περίπου 7 εκατομμύρια κωνία, πυκνά τοποθετημένα στην περιοχή της ωχράς κηλίδας (κεντρικό σημείο του αμφιβληστροειδή), τα οποία είναι ευαίσθητα σε μεγάλα επίπεδα φωτός και ευθύνονται για την όραση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Τα κύτταρα απορροφούν επιλεκτικά το φως το οποίο φθάνει σε αυτά, έχουν την ικανότητα να βελτιώνουν την ποιότητα της εικόνας και ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος της οπτικής οξύτητας. Για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή οπτική οξύτητα είναι αναγκαίο η ένταση του φωτός να φθάνει πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Τα κωνία είναι τα κύτταρα που καταλαβαίνουν τα χρώματα. Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη κωνίων, καθένα από τα οποία είναι εξειδικευμένο να ανιχνεύει επιλεκτικά το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο φως του φάσματος (1). Όλα τα θηλαστικά έχουν αρκετά γονίδια για να κωδικοποιούν φασματικά την οψίνη των κωνίων (οψίνη είναι η πρωτεΐνη που βρίσκεται στα κωνία και είναι φωτοαπορροφητική). Οι άνθρωποι και άλλα πρωτεύοντα θηλαστικά έχουν τρεις τύπους κωνίων, όπως αναφέρθηκε

και παραπάνω. Στους ανθρώπους τα κωνία S περιέχουν μια κωνική οψίνη ευαίσθητη σε βραχύ μήκος κύματος (επιλεκτικά στο κυανό χρώμα), με μέγιστη ευαισθησία σε μήκη κύματος 420 nm. Τα κωνία τύπου M περιέχουν διαφορετική κωνική οψίνη με ευαισθησία κορυφής στα 535 nm (επιλεκτικά στο πράσινο χρώμα). Τα κωνία τύπου L περιέχουν μια κωνική οψίνη που είναι επιλεκτική στο ερυθρό χρώμα με ευαισθησία κορυφής σε μήκη κύματος 565 nm. Άλλα θηλαστικά στερούνται τη διάκριση πράσινου/ερυθρού χρώματος και έχουν μια μόνο κωνική οψίνη με μέγιστη ευαισθησία στο μέσο του ανθρώπινου ορατού φάσματος. Υπάρχουν, επίσης, σημαντικές διαφορές ειδών στη φασματική ευαισθησία των χρωστικών του ερυθρού. Για παράδειγμα, πολλοί αμφιβληστροειδείς χιτώνες τρωκτικών έχουν μια φωτοχρωστική ουσία που έχει μέγιστη ευαισθησία στην σχεδόν υπεριώδη ακτινοβολία. Στους ανθρώπους, το φιλτράρισμα πριν από τον υποδοχέα μετατοπίζει την ευαισθησία κορυφής των μικρού και μεσαίου μήκους κύματος σε μεγαλύτερο μήκος κύματος (440 και 545 nm, αντίστοιχα [2]).

Αν η ένταση του φωτός είναι σε χαμηλό επίπεδο τα κωνία δεν διεγείρονται και μειώνεται έντονα η ικανότητα των ματιών να «αντιληφθεί» τα χρώματα. Τότε ενεργοποιούνται τα ραβδία. Το μάτι περιέχει περίπου 120 εκατομμύρια ραβδία, καταναμημένα κυρίως στην περιφέρεια του αμφιβληστροειδούς χιτώνα, τα οποία περιέχουν τη χημική ουσία ροδοψίνη (παράγωγο της βιταμίνης A) η οποία είναι ευαίσθητη σε πολύ χαμηλά επίπεδα έντασης του φωτός. Μέσα στην ημέρα, που τα επίπεδα του φωτός είναι αρκετά υψηλά, η ροδοψίνη απενεργοποιείται (αποχρωματίζεται) δημιουργώντας κάποια καθυστέρηση στην προσαρμογή των ματιών στο σκοτάδι, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την ευαισθησία τους σε χαμηλά επίπεδα φωτός. Τα κωνία όπως και τα ραβδία αντιδρούν στο φως με βραδείες, κλιμακωτές αλλαγές του δυναμικού της μεμβράνης τους. Τα ραβδία αντιδρούν αργά έτσι ώστε φωτόνια που δεσμεύονται σε χρονικό διάστημα 100 ms, να αθροίζονται. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση ακόμα και πολύ μικρών ποσοτήτων φωτός [1]. Η ροδοψίνη, η φωτοχρωστική ουσία των φωτουποδοχέων των ραβδίων, εμφανίζει μέγιστη ευαισθησία (λ_{max}) σε μήκος κύματος περίπου στα 500 nm σε όλα τα είδη θηλαστικών. Το προ-υποδοχικό φιλτράρισμα το μετατοπίζει προς κάπως μεγαλύτερο μήκος κύματος στον τυπικό ανθρώπινο παρατηρητή (507 nm) [2].



Εικόνα 1.3: Α) Πώς τα κωνία και τα ραβδία του αμφιβληστροειδούς συνδέονται με τα υπόλοιπα κύτταρα και στέλνουν σήματα στον εγκέφαλο. Β) Το φως ανιχνεύεται από διαφορετικά κύτταρα που

«βλέπουν» διαφορετικά χρώματα και στο τέλος όλες οι πληροφορίες ενώνονται και φεύγουν σαν ένα ενιαίο σήμα προς τον εγκέφαλο.

Όλες οι κατηγορίες φωτοϋποδοχέων του αμφιβληστροειδούς συμμετέχουν στις οδούς που καταλήγουν στις κερκαδικές, νευροενδοκρινικές και νευροσυμπεριφορικές αποκρίσεις στο φως. Στο Σχήμα Α της Εικόνας 1.3 φαίνεται μια σχηματική απεικόνιση του σχετικού κυκλώματος του αμφιβληστροειδούς στον άνθρωπο. Οι φωτοαντιληπτικές αποκρίσεις που δεν σχετίζονται με την όραση προέρχονται από τον αμφιβληστροειδή και έχουν αποδοθεί κυρίως σε μια ειδική κατηγορία γαγγλιακών κυττάρων, τα ipRGCs (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells). Αυτά τα κύτταρα είναι άμεσα φωτοευαίσθητα, καθώς εκφράζουν τη μελανοψίνη, γεγονός που τους επιτρέπει να ανταποκρίνονται στο φως ακόμη και όταν απομονώνονται από τον υπόλοιπο αμφιβληστροειδή.

Παράλληλα, δέχονται εισροές από τις ράβδους και τους κώνους μέσω του συμβατικού κυκλώματος του αμφιβληστροειδούς. Οι λεπτομέρειες αυτών των ενδοαμφιβληστροειδικών συνδέσεων δεν είναι πλήρως κατανοητές και φαίνεται να διαφέρουν ανάλογα με τον υπότυπο των ipRGCs. Στο σχήμα φαίνονται οι βασικές συνδέσεις με διπολικά κύτταρα κώνου (CBC), που τα συνδέουν με τους κωνικούς φωτοϋποδοχείς, καθώς και με διπολικά κύτταρα ράβδου (RBC) μέσω των αμακρίνων κυττάρων τύπου AII, δημιουργώντας διασυνδέσεις και με τις ράβδους. Έτσι, το μοτίβο ενεργοποίησης των ipRGCs επηρεάζεται τόσο από την εγγενή φωτοαντίληψη μέσω της μελανοψίνης, όσο και από τα εξωτερικά σήματα που λαμβάνουν από τις ράβδους και από κάθε φασματική κατηγορία κώνων (κόκκινο, πράσινο, μπλε).

Για το Β σχήμα της Εικόνας 1.3: το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αποδίδεται σχηματικά, σε μια πολύ απλοποιημένη μορφή, ως το άθροισμα διαφορετικών φωτοαντιληπτικών μηχανισμών. Αυτοί απεικονίζονται με τα σύμβολα R (ράβδος-οψίνη), M (μελανοψίνη), SC (S-κώνος), MC (M-κώνος) και LC (L-κώνος). Ο καθένας από αυτούς τους υποδοχείς έχει το δικό του φασματικό προφίλ απορρόφησης του φωτός—κάτι που φαίνεται στα διαγράμματα του σχήματος, όπου απεικονίζεται η ευαισθησία τους σε διάφορα μήκη κύματος από τα 400 ως τα 700 nm. Κάθε μηχανισμός παράγει έτσι ένα ξεχωριστό σήμα που μετρά τον φωτισμό σύμφωνα με τη δική του φασματική ευαισθησία. Αυτά τα πέντε σήματα συνδυάζονται αθροιστικά μέσω της ενδοαμφιβληστροειδικής καλωδίωσης, αλλά και στο ίδιο το ipRGC, ώστε να παραχθεί ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο σήμα. Το σήμα αυτό στη συνέχεια μεταδίδεται σε εγκεφαλικές περιοχές που ρυθμίζουν λειτουργίες ανεξάρτητες από τη δημιουργία εικόνας. Η συνεισφορά κάθε φωτοαντιληπτικού μηχανισμού στο τελικό σήμα εξαρτάται από το δικό του προφίλ φασματικής ευαισθησίας. Αυτό καθορίζει τελικά και τη φασματική εξάρτηση των αποκρίσεων που προκύπτουν στις δομές που λαμβάνουν αυτό το σήμα "κατάντη" του κυκλώματος.

Συμπερασματικά, εκτός από τα κωνία και τα ραβδία υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία φωτοϋποδοχέων, τα εγγενώς φωτοευαίσθητα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς (ipRGCs). Η παρουσία των κυττάρων αυτών έγινε για πρώτη φορά αντιληπτή το 1927 όταν μια έρευνα πάνω σε ποντίκια χωρίς ραβδία και κωνία, εξακολουθούσαν να ανταποκρίνονται σε ελαφρύ ερέθισμα φωτός και ήταν ικανά να ρυθμίζουν τους κερκάδιους ρυθμούς τους. Ωστόσο, η έρευνα αυτών προχώρησε μετά την δεκαετία του 1980. Έτσι τα ipRGCs είναι υπεύθυνα για τις βιολογικές επιδράσεις (συναισθηματικές διαταραχές, προβλήματα ύπνου και ρύθμιση του κερκάδιου ρυθμού). Τα φωτοευαίσθητα γαγγλιακά κύτταρα επηρεάζουν αυτές τις φυσιολογικές αποκρίσεις του φωτός στους ζωντανούς οργανισμούς μέσω της συστολής της κόρης του ματιού. Επίσης, τα κύτταρα περιέχουν μια φωτοχρωστική ουσία με

βάση την οψίνη/ την βιταμίνη Α, ουσία που ονομάζεται και μελανοψίνη. Η μελανοψίνη είναι ευαίσθητη στο μπλε χρώμα του φάσματος του φωτός, ενώ η φασματική ευαισθησία της φωτοχρωστικής των ipRGCs, είναι παρόμοια αμετάβλητη μεταξύ των ειδών, με λmax περίπου στα 480 nm μήκος κύματος [2].

1.4.1 Θέση του Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. για τους φωτουποδοχείς.

Σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021 η εναλλαγή που πραγματοποιείται ανάμεσα στο φως και στο σκοτάδι μεταφέρεται στο πίσω μέρος του ματιού και εκεί μετατρέπεται σε νευρικά σήματα με σκοπό τον συγχρονισμό του «βιολογικού ρολογιού» του σώματος με τον τοπικό χρόνο. Επομένως, το μάτι διατηρεί επικοινωνία με τον εγκέφαλο μέσω δύο οδών. Η μία οδός είναι με τα κωνία και τα ραβδία (με τα ραβδία και τα κωνία) και μέσω του ινιακού λοβού (οδός που μεταφέρει την έγχρωμη όραση και καθορίζει την οπτική απόδοση αλλά και την αντίληψη κίνησης) και η άλλη οδός είναι με τα ipRGC (αμφιβλυστροειδοϋποθαλαμική οδός) μέσω του υπερχιασματικού πυρήνα (οδός που καθορίζει τους βιολογικούς ρυθμούς, την έκκριση ορμονών και τις κεντρικές λειτουργίες συγχρονισμού κ.λπ.) [3].

1.5 Είδη ανθρώπινης όρασης

Τα δύο διαφορετικά είδη ανιχνευτών φωτός στον ανθρώπινο οφθαλμό, των κωνίων και των ραβδίων, έχει ως αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα του φαινομένου της οράσεως και την δημιουργία τριών διαφορετικών ειδών όρασης.

α) Φωτοπική όραση: Στην περίπτωση αυτού του είδους όρασης, η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός είναι σε υψηλά επίπεδα. Τα ενεργά στοιχεία σε αυτόν τον τύπο όρασης είναι κυρίως τα κωνία, τα οποία βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο κέντρο του αμφιβλυστροειδούς, ενώ περιφερειακά μειώνονται γρήγορα. Τέτοιου είδους όραση είναι η συνήθης με το φως της ημέρας, γι' αυτό και ονομάζεται και όραση ημέρας (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Φωτοπική όραση.

β) Σκοτοπική όραση: Στην περίπτωση της σκοτοπικής όρασης η λαμπρότητα που καταλαβαίνει ο οφθαλμός είναι σε χαμηλά επίπεδα. Τα ενεργά στοιχεία στην περίπτωση αυτή είναι τα ραβδία, τα οποία λείπουν από το κέντρο του αμφιβλυστροειδούς, ενώ υπάρχουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες περιφερειακά. Τέτοιου είδους όραση επιτυγχάνεται τη νύχτα με το φως των αστερών γι' αυτό το λόγο την καλείται και όραση νύχτας. (Εικόνα 1.5)



Εικόνα 1.5: Σκοτοπική όραση.

γ) Μεσοπική όραση: Τέλος στη μεσοπική όραση τα επίπεδα λαμπρότητας του φωτός είναι μεταξύ των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Ενεργά στοιχεία εδώ είναι και τα ραβδία και τα κωνία, σε διαφορετικό όμως βαθμό το κάθε ένα είδος. Η περίπτωση αυτής της όρασης είναι υπό το φωτισμό μικρών δρόμων (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Μεσοπική όραση.

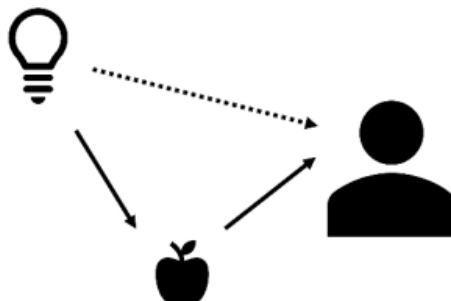
Η διεθνής επιτροπή φωτισμού (CIE-Commission Internationale de l'Éclairage) το 1920 είχε προτείνει κάποιο φωτομετρικό σύστημα το οποίο να χρησιμοποιείται στην φωτοπική όραση. Αυτό όμως δεν έδινε αποτελέσματα σε άλλες περιοχές οράσεως. Την περίοδο του 1950 έγινε πρόταση για ένα παράλληλο φωτομετρικό σύστημα για την σκοτοπική περιοχή, κάτι που δεν είχε καμία εφαρμογή. Για την μεσοπική περιοχή δεν υπήρχε καμία πρόταση παρά τις μελέτες, διότι είναι πολύ πολύπλοκη και είχε πολλές παραμέτρους σαν περιοχή. Παράλληλα οι μελέτες διατύπωσαν δύο σημαντικές παρατηρήσεις. Αρχικά διαπιστώθηκε ότι η ευαισθησία του οφθαλμού στον άνθρωπο δεν είναι σταθερή και δεδομένη, όπως είναι στην φωτοπική και σκοτοπική όραση, αλλά μεταβαλλόμενη και εξαρτώμενη από το «πόσο δυνατό είναι το φως». Ακόμα διαπιστώθηκε με μελέτες ότι κάποιες ικανότητες του ανθρώπινου οφθαλμού όπως είναι η αντίληψη των χρωμάτων, η αντίληψη της φωτεινότητας και εκείνη της κινήσεως, δεν έχουν σχέση σταθερή μεταξύ τους κάτι που συμβαίνει στη φωτοπική και σκοτοπική όραση, αλλά μεταβάλλεται. Τα συμπεράσματα αυτά οφείλονται στο ότι υπάρχει μεταβλητή συνεισφορά των κωνίων και ραβδίων στην όραση. Επομένως το ότι δεν υπάρχει μέχρι τώρα ένα σύστημα φωτομετρικό για την μεσοπική όραση, μας αναγκάζει να αντιμετωπίζουμε κάθε περίπτωση που δεν είναι σκοτοπική, με την χρήση φωτοπικού συστήματος [1].

1.6 Χρώμα φωτεινής πηγής

1.6.1 Chromaticity-Χρωματικότητα

Η χρωματική εμφάνιση των αντικειμένων και οι πηγές φωτός ποσοτικοποιούνται χρησιμοποιώντας διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα λόγω της διαφοράς στα συστατικά του φωτός που φτάνει στο οπτικό σύστημα. Ενώ η χρωματική εμφάνιση ενός αντικειμένου είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της πηγής φωτός, της λειτουργίας της

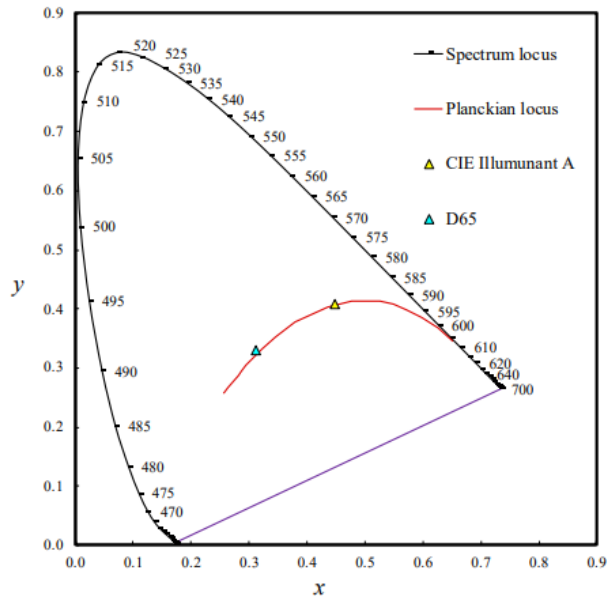
φασματικής ανάκλασης των αντικειμένων και την οπτική ευαισθησία των κωνίων κυττάρων που είναι υπεύθυνα για την ανθρώπινη έγχρωμη όραση, η χρωματική εμφάνιση μιας πηγής φωτός δεν επηρεάζεται από ανάκλαση των αντικειμένων. Η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων υπολογισμού είναι ότι οι πηγές φωτός είναι απευθείας προβολή χωρίς ανακλάσεις από αντικείμενα, όπως φαίνεται στο σκίτσο στην Εικόνα 1.7 [4].



Εικόνα 1.7: Το αντιληπτό χρώμα των αντικειμένων μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας το φάσμα μιας φωτεινής πηγής, φάσμα αντικειμένου ανακλαστικότητα και φασματική ευαισθησία του οπτικού συστήματος (συνεχή βέλη). Το αντιληπτό χρώμα του φωτός Οι πηγές μοντελοποιούνται μόνο χρησιμοποιώντας το φάσμα μιας φωτεινής πηγής και τη φασματική ευαισθησία του οπτικού συστήματος (διακεκομμένο βέλος) [4].

1.6.2 Θερμοκρασία χρώματος και σχετική θερμοκρασία χρώματος

Η φασματική κατανομή ισχύος (SPD) μιας φωτεινής πηγής είναι η ποσότητα ενέργειας που εκπέμπεται ως μια συνάρτηση του μήκους κύματος, και είναι ένα θεμελιώδες φυσικό χαρακτηριστικό μιας φωτεινής πηγής. Οι συντεταγμένες χρωματικότητας υπολογίζονται με βάση το SPD μιας φωτεινής πηγής και σχεδιάζονται σε ένα δισδιάστατο γράφημα για να παρέχουν ακριβή χρωματική επικοινωνία για τις πηγές φωτός. Από το καρτεσιανό Το σύστημα συντεταγμένων μπορεί να μην είναι διαισθητικό για πολλούς ανθρώπους, συχνά απαιτείται ένα οπτικό βοήθημα για τη βελτίωση την προσβασιμότητα και την ευκολία χρήσης της έγχρωμης επικοινωνίας. Για παράδειγμα, το Σχήμα 1.1 δείχνει το ο τύπος Planckian και οι συντεταγμένες χρωματικότητας δύο τυπικών φωτιστικών (φως ημέρας και πυρακτώσεως) στο διάγραμμα χρωματικότητας CIE 1931 (x,y). Ωστόσο, μια μέτρηση με έναν αριθμό, όπως η θερμοκρασία χρώματος, είναι ευκολότερο να κατανοηθεί και να απεικονιστεί σε σύγκριση με την ερμηνεία συντεταγμένες χρωματικότητας που συνήθως αναφέρονται χρησιμοποιώντας τέσσερα δεκαδικά ψηφία στην πρακτική φωτισμού [4].



Σχήμα 1.1: Ο τόπος του φάσματος (μαύρη γραμμή) αντιπροσωπεύει μονοχρωματικά ερεθίσματα, τα οποία κατασκευάζουν το όριο του διαγράμματος χρωματικότητας CIE 1931 (x, y). Ο τόπος Planckian (κόκκινη γραμμή) αντιπροσωπεύει τη χρωματικότητα συντεταγμένες των θερμαντικών σωμάτων Planckian (μαύρο σώμα) σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η μωβ γραμμή στο κάτω μέρος του διαγράμματος είναι η ευθεία γραμμή μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου μονοχρωματικού μήκους κύματος ερεθίσματα. Το κίτρινο τρίγωνο αντιπροσωπεύει το πρότυπο CIE φωτιστικό A (πυρακτώσεως) και το μπλε τρίγωνο αντιπροσωπεύει το τυπικό φωτιστικό φωτός ημέρας CIE στα 6,500 K (D65).

Η θερμοκρασία χρώματος φωτός T_c (σε Kelvin, K) αποτελεί βασικό στοιχείο του φωτισμού καθώς είναι ένα μέτρο για να περιγράψει το χρώμα των φωτεινών πηγών σε απλό τρόπο. Εκφράζεται με την ισοδύναμη θερμοκρασία στην οποία όταν βρεθεί το μέλαν σώμα θα παράγει φως του ίδιου χρώματος με την πηγή. Με άλλα λόγια το χρώμα φωτεινής πηγής εκφράζεται με τη θερμοκρασία του αντίστοιχου μέλανος σώματος με ομοιόχρωμο φως. Στο σχήμα της Εικόνας 1.8 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες χρώματος διάφορων φωτεινών πηγών.

Η έννοια της θερμοκρασίας χρώματος είναι εντελώς αντίθετη με αυτό που περιγράφεται ως ζεστό ή ψυχρό σώμα. Το ερυθρωπό φως που παράγεται από ένα λαμπτήρα πυράκτωσης, για παράδειγμα, έχει χαμηλή θερμοκρασία χρώματος σε αντίθεση με το φως της ημέρας το οποίο έχει πάρα πολύ υψηλή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός του ότι όταν ένα σώμα θερμαίνεται, το φως του μεταβάλλεται από κόκκινο σε πορτοκαλί, κίτρινο, άσπρο και τελικά μπλε καθώς βαίνει ολοένα προς το θερμότερο (Πίνακας 1.2).



Εικόνα 1.8: Θερμοκρασία χρώματος διαφόρων φωτεινών πηγών.

Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο ψυχρότερη είναι η απόχρωση της φωτεινής πηγής. Θερμοκρασίες χρώματος των 5,300 K και άνω αντιστοιχούν σε λευκή και ψυχρή απόχρωση. Θερμοκρασίες χρώματος μικρότερες των 3,300 K αντιστοιχούν σε θερμές αποχρώσεις π.χ. λαμπτήρες πυρακτώσεως. Η ψυχρή απόχρωση παράγει υψηλότερη ένταση φωτός από τη θερμή απόχρωση. Έτσι ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως δημιουργεί συνήθως μία «θερμή» εντύπωση στον χώρο που φωτίζει, ενώ αν χρησιμοποιήσουμε για τον φωτισμό ενός δωματίου ή ενός γραφείου ένα λαμπτήρα ατμών υδραργύρου μη διορθωμένου φάσματος η εντύπωση η οποία θα προκύψει θα είναι «ψυχρή». Η «θερμή» εντύπωση προκύπτει από το πλούσιο σε ερυθρές ακτινοβολίες φως του λαμπτήρα πυρακτώσεως ενώ η «ψυχρή» εντύπωση προκαλείται από το μεγάλο ποσοστό κυανής και κίτρινης ακτινοβολίας του φωτός του εκπέμπεται από τον λαμπτήρα υδραργύρου.

Η επίδραση του χρώματος του φωτός στη συναισθηματική διάθεση του ανθρώπου είναι αναμφίβολα πάρα πολύ σημαντική. Τα συναισθήματα που δημιουργούνται από ένα περιβάλλον με συγκεκριμένη κατηγορία συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος εξαρτάται από την ένταση φωτισμού του χώρου. Όσο υψηλότερος είναι η φωτισμός, τόσο πιο άνετα νιώθει ο άνθρωπος με τις ψυχρές θερμοκρασίες χρώματος. Το χρώμα δε συμβάλλει μόνο στην εμφάνιση των αντικειμένων και επιφανειών του εσωτερικού των κτιρίων, αλλά επιπλέον επηρεάζει την ανθρώπινη διάθεση (Πίνακας 1.3).

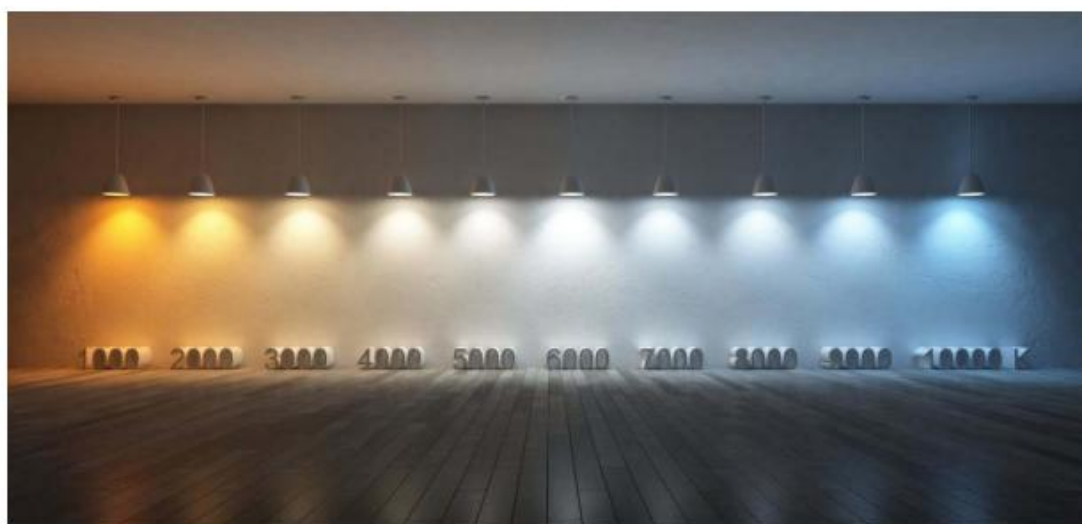
Πίνακας 1.2: Κατηγορίες χρώματος.

Θερμοκρασία	Απόχρωση
Κάτω από 3300K	Ζεστή
3300...5300K	Ενδιάμεση
Πάνω από 5300K	Ψυχρή

Πίνακας 1.3 Η συναισθηματική αντίδραση εξαρτώμενη από το περιβάλλον επίπεδο φωτισμού

Ένταση φωτισμού (lux)	Χρώμα φωτεινής πηγής		
	Ζεστό	Ουδέτερο	Ψυχρό
	Συναισθηματική επίδραση		
Κάτω από 500	Ευχάριστη	Ουδέτερη	ψυχρή
500 ... 1000			
1000 ... 2000	Διεγερτική	Ευχάριστη	Ουδέτερη
2000 ... 3000			
Πάνω από 3000	Μη φυσική	Διεγερτική	Ευχάριστη

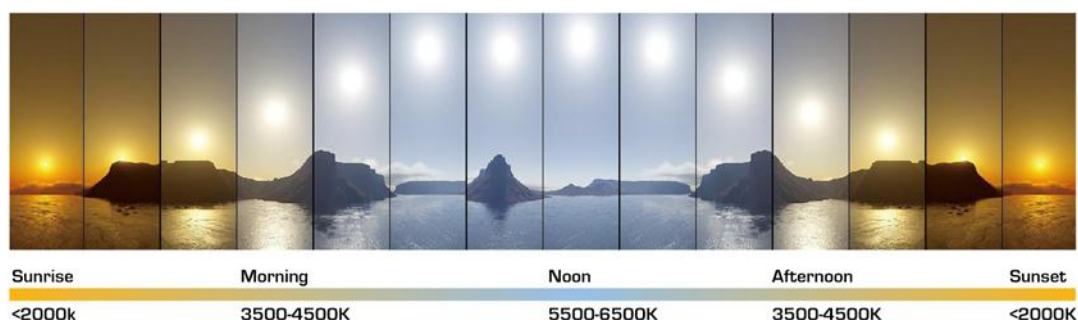
Οι μικρότερες θερμοκρασίες χρώματος αποδίδουν καλύτερα τις θερμότερες αποχρώσεις και οι μεγαλύτερες τις πιο ψυχρές [5].



Εικόνα 1.9: Κλίμακα θερμοκρασίας χρώματος.

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και οι φθορισμού δεν παρείχαν τη δυνατότητα απόδοσης διαφορετικής θερμοκρασίας χρώματος καθώς η απόδοση τους ήταν προκαθορισμένη. Οι σύγχρονες τεχνολογίες φωτισμού με τους λαμπτήρες LED έχουν προσφέρει διάφορες αποχρώσεις του λευκού φωτός. Για την απόδοση του λευκού φωτός χρησιμοποιήθηκε η ανάμειξη χρωμάτων RGB, μεταβάλλοντας τις θερμοκρασίες χρώματος των LED RGB λαμπτήρων παράγονται διαφορετικές αποχρώσεις του λευκού φωτός. Στις μέρες μας οι λαμπτήρες LED παρέχουν τη δυνατότητα εναλλαγής της θερμοκρασίας χρώματος και της έντασης φωτισμού σε ένα χώρο άμεσα με τον ίδιο λαμπτήρα. Έτσι πλέον, ο φωτισμός παρέχει ευελιξία και μπορεί να βοηθήσει ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες και η επιθυμητή ατμόσφαιρα ενός χώρου. Ένας χώρος στον οποίο χρησιμοποιείται συντονισμένος λευκός φωτισμός LED (Ρυθμιζόμενος Λευκός φωτισμός LED διαφέρει από τον παραδοσιακό λευκό φωτισμό σε θερμοκρασία ενός χρώματος επιτρέποντας στους χρήστες να προσαρμόσουν το χρώμα του λευκού φωτός ή για την ακρίβεια, τη θερμοκρασία χρώματος του λευκού φωτός) μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα ζωής των ανθρώπων αφού μπορούν να προσαρμόσουν

τον φωτισμό ανάλογα την στιγμή της ημέρας. Το πρωί θα αυξάνεται η θερμοκρασία του φωτισμού και το βράδυ να μειώνεται παρακάτω φαίνεται η μεταβολή του φυσικού φωτισμού μέσα στην ημέρα (Εικόνα 1.10) .



Εικόνα 1.10 Η θερμοκρασία χρώματος του φωτός από την ανατολή μέχρι και τη δύση του ηλίου.

1.6.3 Ποιότητα χρώματος φωτεινής πηγής

Η ποιότητα του χρώματος μιας φωτεινής πηγής αποτελεί ένδειξη της ικανότητας ρεαλιστικής αναπαραγωγής του χρώματος ενός αντικειμένου. Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de l' Eclairage - CIE) η ποιότητα του χρώματος μιας φωτεινής πηγής εκφράζεται από το δείκτη χρωματικής απόδοσης R ή αλλιώς CRI (Colour Rendering Index). Ο δείκτης αυτός εκφράζει κατά πόσο η φασματική κατανομή της πηγής είναι ευρεία, έτσι ώστε να καλύπτει όσο το δυνατόν περισσότερα μήκη κύματος. Μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Ra = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (100 - 4.6 \cdot \Delta E_i) \quad (\text{εξ.1-3})$$

όπου:

ΔE είναι οι αποστάσεις στον χρωματικό χώρο (ο χρωματικός χώρος ορίζεται σε επόμενη παράγραφο). Χαμηλές τιμές του δείκτη αυτού υποδεικνύουν κακή ποιότητα χρώματος ενώ υψηλές τιμές καλή ποιότητα χρώματος. Οι λαμπτήρες κατατάσσονται σε κατηγορίες απόδοσης χρωμάτων (Πίνακας 1.4) σύμφωνα με την τιμή του δείκτη Ra.

Στο Εικόνα 1.13 παρουσιάζεται μια μέθοδος σύγκρισης της χρωματικής απόδοσης λαμπτήρων, όπου μετράται το ανακλώμενο φως από τυποποιημένα έγχρωμα δείγματα.

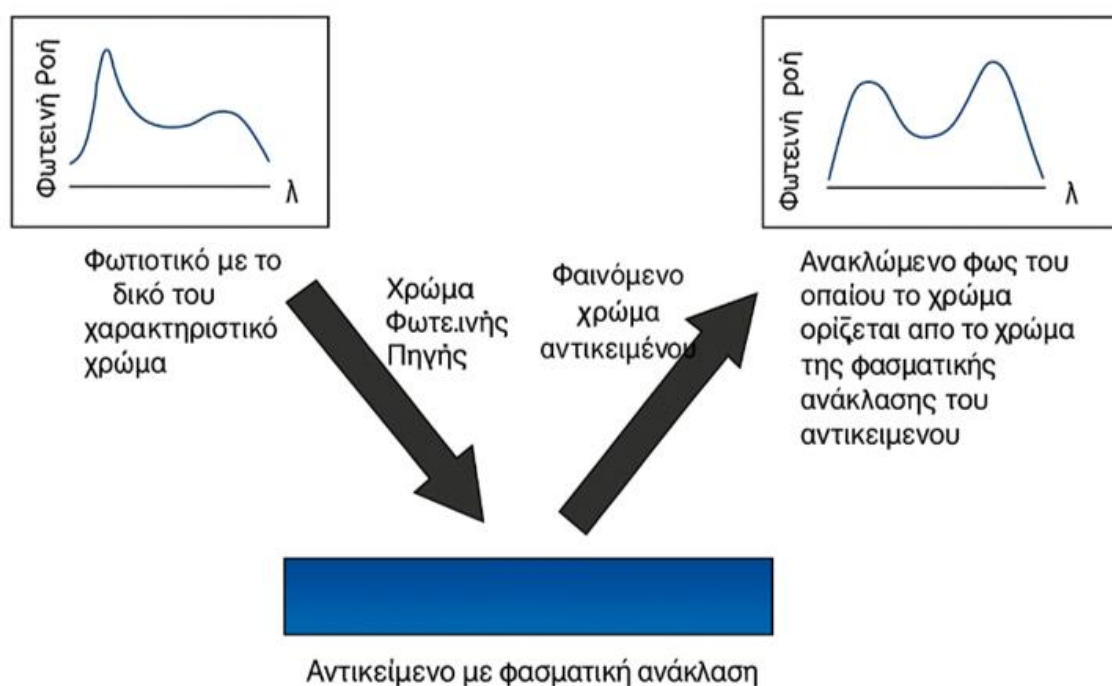
Στις δραστηριότητες όπου απαιτείται υψηλή διακριτικότητα σε συνδυασμούς χρωμάτων όπως π.χ. στις επιχειρήσεις εκτύπωσης, θα πρέπει να επιλέγονται λαμπτήρες με πολύ υψηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης (1A). Σε χώρους εργασίας με συνήθεις δραστηριότητες αρκεί η χρησιμοποίηση λαμπτήρων κατηγορίας 1B ή και 2 όπως π.χ. οι απλοί λαμπτήρες φθορισμού.

Ο λόγος της χρήσης λαμπτήρων με χαμηλή ποιότητα χρώματος, όπως για παράδειγμα λαμπτήρων νατρίου υψηλής και χαμηλής πίεσης, είναι η υψηλή απόδοσή τους. Οι λαμπτήρες αυτοί παράγουν περισσότερη ποσότητα φωτός ανά W καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τους λαμπτήρες με υψηλή ποιότητα χρώματος [1].

1.6.4 Χρωματομετρία, χρωματικά συστήματα

Η χρωματική αντίληψη είναι θεωρητικά μια ψυχοφυσιολογική διαδικασία. Έτσι είναι διαφορετική σε κάθε άνθρωπο. Σαν χρώμα ενός αντικειμένου θεωρείται το χρώμα του φωτός

που λαμβάνει το άτομο από αυτό, παράλληλα το χρώμα αποτελεί συνδυασμό των φασματικών ιδιοτήτων ανάκλασης του αντικειμένου και της φασματικής κατανομής της φωτεινής πηγής (Σχήμα 1.2). Όταν γίνεται εκπομπή του φωτός τα μήκη κύματος «αθροίζονται» για τη δημιουργία του χρωματικού αποτελέσματος, αντίθετα όταν γίνεται απορρόφηση του φωτός από τα υλικά τα μήκη κύματος «αφαιρούνται» και παράγουν το χρωματικό αποτέλεσμα. Για να γίνεται περιγραφή και αναπαραγωγή των χρωμάτων, έχουν δημιουργηθεί τα λεγόμενα χρωματικά μοντέλα. Το κάθε μοντέλο-σύστημα στηρίζεται σε ορισμένα χρώματα (πρωτογενή χρώματα). Πόσο ακριβές είναι το κάθε σύστημα περισσότερο ή λιγότερο εξαρτάται από την εφαρμογή, η επιστήμη που μετράει και μελετά τα χρώματα καλείται χρωματομετρία [1].



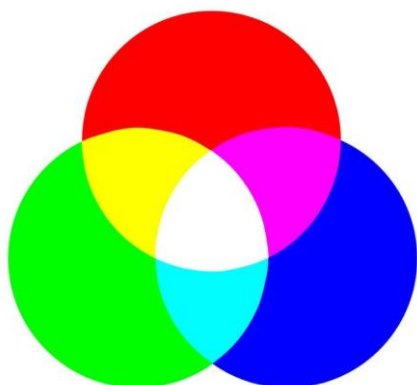
Σχήμα 1.2 Το χρώμα αντικειμένου.

1.6.5 Το χρωματικό σύστημα RGB

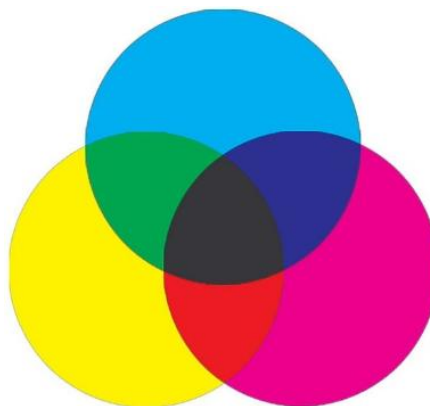
Το χρωματικό σύστημα RGB που προέρχεται από τα αρχικά του Red-Green-Blue είναι το διασημότερο, αφού χρησιμοποιείται περισσότερο από τα άλλα στα γραφικά του υπολογιστή, στην τηλεόραση, που η εικόνα συγκροτείται από εκπομπούς μικροσκοπικούς φωτεινής ακτινοβολίας που είναι κόκκινοι, πράσινοι και μπλε. Αυτό ο συνδυασμός ονομάζεται εικονοστοιχείο (pixel). Τα βασικά ή πρωτογενή χρώματα δεν μπορούν να δημιουργηθούν από την μίξη άλλων χρωμάτων όπως συμβαίνει στα υπόλοιπα όλα. Το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε αποτελούν τα βασικά χρώματα. Ακόμα είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ανάμιξη ακριβώς ίσων ποσοτήτων και από τα τρία βασικά χρώματα δημιουργούν το λευκό χρώμα.

Εκτός από τα τρία βασικά χρώματα, τα οποία δεν μπορούν να δημιουργηθούν από την ανάμιξη άλλων χρωμάτων, υπάρχουν και τα συμπληρωματικά. Τα χρώματα αυτά προκύπτουν με τον συνδυασμό των βασικών χρωμάτων ανά 2. Τα συμπληρωματικά χρώματα

είναι το κυανό (γαλάζιο), ιώδες και το κίτρινο. Τέλος, η ανάμιξη ίσων ποσοτήτων και των τριών συμπληρωματικών χρωμάτων δημιουργεί το μαύρο χρώμα. Στις Εικόνες 1.11 και 1.12 φαίνονται οι πιθανοί σχηματισμοί των βασικών και των συμπληρωματικών χρωμάτων [1].



Εικόνα 1.11: Τα πρωτογενή χρώματα RGB.



Εικόνα 1.12: Τα δευτερογενή χρώματα.

Πίνακας 1.4: Κατηγορίες χρωματικής απόδοσης λαμπτήρων.

Κατηγορία	CRI	Σπουδαιότητα	Εφαρμογές
1A	90≤Ra	ακριβής συνδυασμός χρώματος	Εκθέσεις, ιατρικές εξετάσεις, μίξη χρώματος, επιχειρήσεις ρούχων και γραφικών
1B	80≤Ra≤90	ακριβής αντίληψη χρώματος	Οικίες, ξενοδοχεία, γραφεία, σχολεία
2	60≤Ra≤80	μέτρια ποιότητα χρώματος	Βιομηχανία, γραφεία, σχολεία
3	40≤Ra≤60	ακριβής ποιότητα χρώματος μικρής σπουδαιότητας	Βιομηχανία, αθλητικές εγκαταστάσεις
4	20≤Ra≤40	ακριβής ποιότητα χρώματος άνευ σπουδαιότητας	Φωτεινοί σηματοδότες



Εικόνα 1.13: Σύγκριση χρώματος λαμπτήρων (αριστερά) και απόδοση χρωμάτων από λαμπτήρες διαφορετικής χρωματικής κατηγορίας (δεξιά)

Πυρακτώσεως /Μεταλ. Αλογονιδίων/φθορισμού/Νατρίου υψ. Πίεσης/Νατρίου χαμ. Πίεσης



1A

1A...2

1A...3

1B...4

4

Εικόνα 1.14: Κατηγορίες χρωματικής απόδοσης διαφόρων φωτεινών πηγών.

1.6.6 Το χρωματικό σύστημα x, y, z της CIE

Η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de l'Éclairage – CIE) πρότεινε το 1931 σαν βασικά χρώματα αναφοράς τρεις συναρτήσεις $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ τις οποίες τις ονομάζουν Συναρτήσεις Χρωματικής Συνθέσεως (Color Matching Functions - CMF) και αντιστοιχούν στο κόκκινο, πράσινο και μπλε. Το Σχήμα 1.3 παρουσιάζει αυτές τις φασματικές κατανομές.

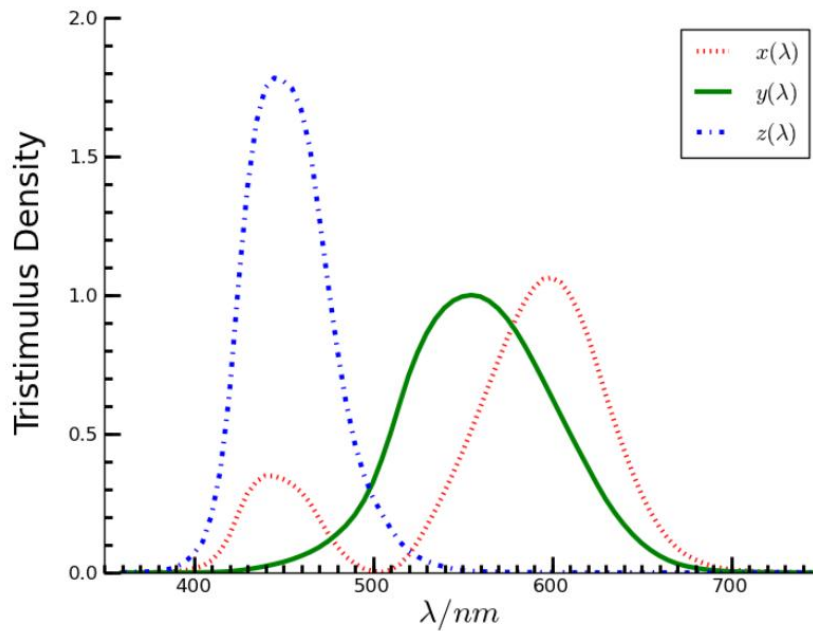
Για ένα χρώμα με φυσική πυκνότητα φωτεινής ακτινοβολίας $q_i(\lambda)$ ορίζονται οι τριχρωματικοί αριθμοί:

- $X = \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) q_i(\lambda) d\lambda$
- $Y = \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) q_i(\lambda) d\lambda$
- $Z = \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) q_i(\lambda) d\lambda$

(εξ.1-4)

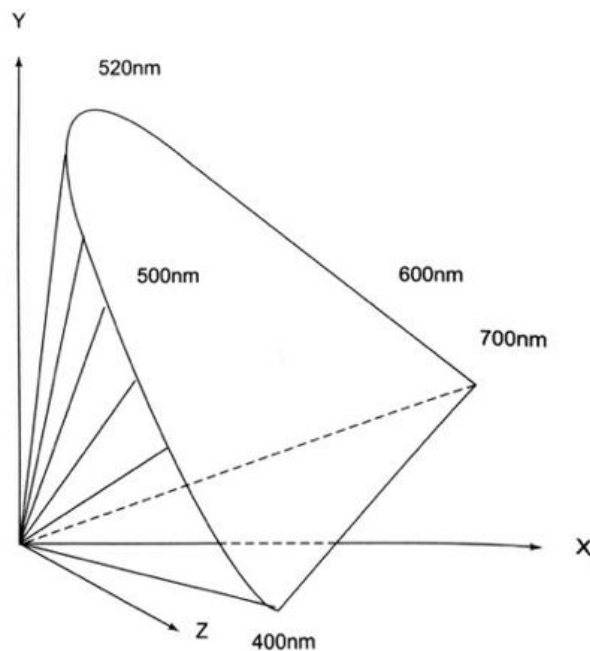
Όπου λ είναι το μήκος κύματος της ισοδύναμης μονοχρωματικής ακτινοβολίας.

Επομένως για να γίνει η σύνθεση του χρώματος κάποια συγκεκριμένης μονοχρωματικής ακτινοβολίας, κάνοντας χρήση του διαγράμματος στο σχήμα 1.3 (CIE To 1931), θα πρέπει να χαράσσεται μια κάθετη γραμμή στο συγκεκριμένο μήκος κύματος και διαβάζονται οι τιμές των τριών συναρτήσεων.



Σχήμα 1.3: Γραφική παράσταση των συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης προτύπου χρωματικού παρατηρητή.

Όλες οι δυνατές τιμές των X , Y , Z δύνανται να παρασταθούν σε ένα τρισδιάστατο διάγραμμα βρισκόμενες στο θετικό ογδομήριο, μέσα σε ένα κωνοειδές στερεό με κορυφή την αρχή των αξόνων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Χρωματικός χώρος - παράσταση των X , Y , Z τριχρωματικών αριθμών σε τρισδιάστατο διάγραμμα. [1]

Για την παράσταση του χρώματος (των τριχρωματικών αριθμών X , Y , Z) στο δισδιάστατο σύστημα θα μπου κανονικοποιημένοι χαρακτηριστικοί αριθμοί ή χρωματικές συντεταγμένες που δίνονται από τις εξισώσεις:

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z) \quad (\text{εξ-1.4})$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

$$\text{και } x + y + z = 1.$$

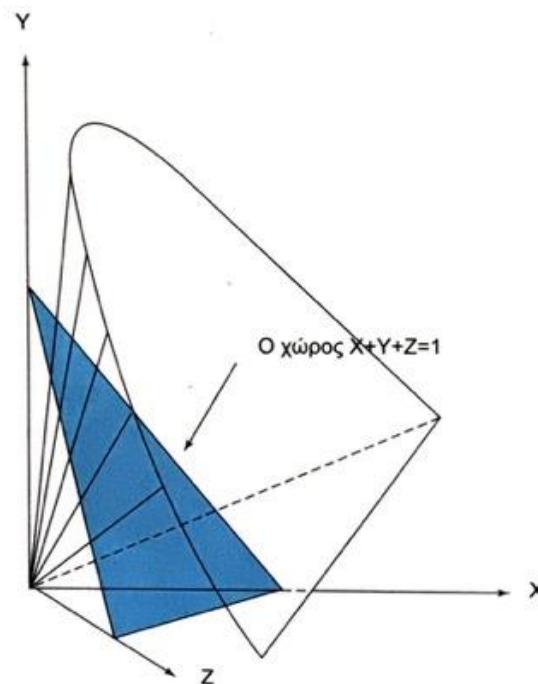
Αυτός ο τρόπος θα καταργήσει την συντεταγμένη z , καθώς είναι εξαρτώμενη από τις άλλες δύο και παράγεται ένα δισδιάστατο διάγραμμα $x - y$, ισοδύναμο με την προβολή του XYZ κωνοειδούς στερεού στο επίπεδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι τρεις άξονες δε είναι μέσα στον κώνο τα X , Y , Z δεν είναι πραγματικά χρώματα. Για παράδειγμα το μαύρο που αντιστοιχεί σε έλλειψη χρώματος και λαμπρότητας, είναι η αρχή των αξόνων. Η συνοριακή καμπύλη στην επιφάνεια του κώνου, που ονομάζεται καμπύλη των φασματικών χρωμάτων (spectra locus) εκφράζει τις τριχρωματικές τιμές των καθαρά μονοχρωματικών φασματικά χρωμάτων, τα οποία έχουν το μέγιστο κορεσμό. Η ευθεία γραμμή που ενώνει τα άκρα του γεωμετρικού τόπου του φάσματος ονομάζεται πορφυρή γραμμή και απεικονίζει τα πορφυρά χρώματα (χρώματα που δημιουργούνται από την ανάμιξη ερυθρού και ιώδους), Σχήμα 1.5. Στο Σχήμα 1.5 τα χρώματα δεν είναι ομαλά κατανομημένα κατά μήκος του γ.τ του φάσματος. Γι αυτό το λόγο η CIE άλλαξε την κλίμακα ως εξής:

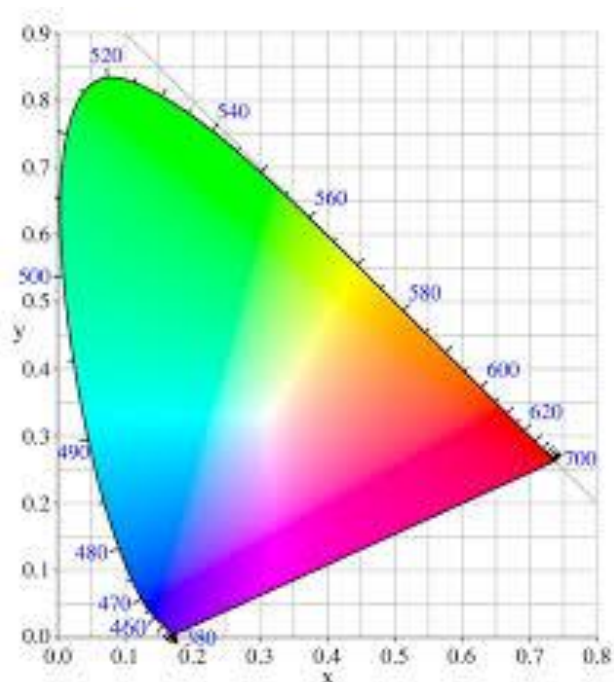
$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z) = 4x / (-2x + 12y + 3)$$

$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z) = 9y / (-2x + 12y + 3) \quad (\text{εξ-1.5})$$

$$w' = 1 - u' - v'$$



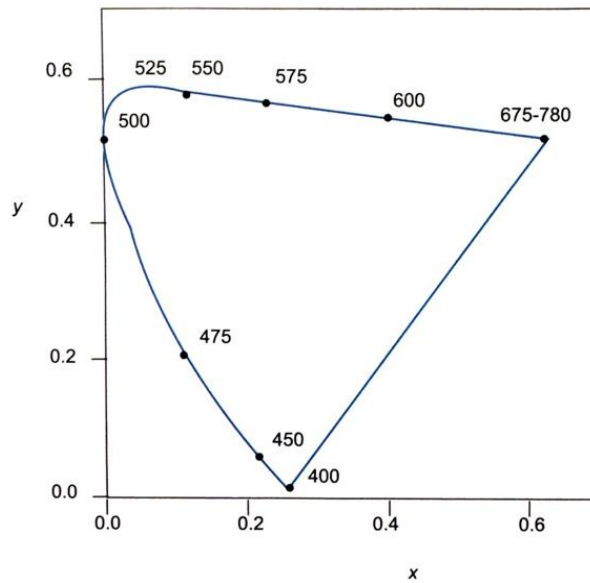
Σχήμα 1.5: Χρωματικός χώρος - αναπαράσταση του XYZ κωνοειδούς στερεού σε δισδιάστατο διάγραμμα.



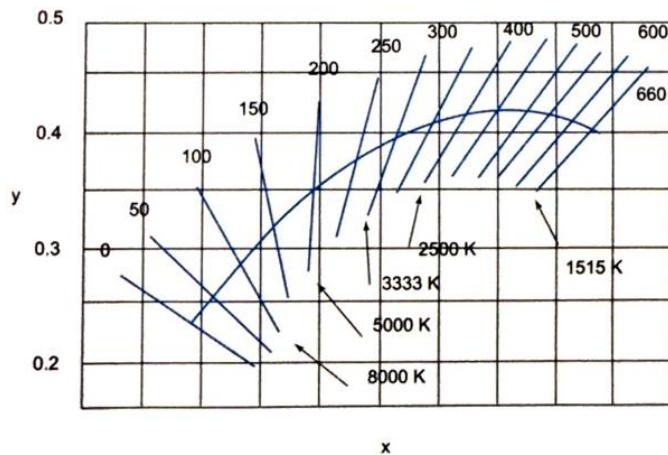
Σχήμα 1.6: Χρωματικό διάγραμμα.

Το διάγραμμα που δημιουργείται έχει την ίδια μορφή συνολικά, αλλά είναι πολύ ομαλότερο, κάτι που φαίνεται στο Σχήμα 1.6.

Σε κάθε χρωματικό διάγραμμα η θέση που κατέχει το λευκό χρώμα είναι συγκεκριμένη. Όσο απομακρύνεται ένα σημείο από το λευκό σημείο τόσο αυξάνει ο κορεσμός του και το χρώμα του γίνεται πιο έντονο. Εκτός από το λευκό, σε κάθε σημείο διακρίνεται εκτός από τον κορεσμό και το κυρίαρχο μήκος κύματος. Αυτό είναι το σημείο τομής της ευθείας που περνάει από το συγκεκριμένο χρώμα και από το λευκό, με το γεωμετρικό τόπο του φάσματος. Ασχέτως από την φασματική σύνθεση του χρώματος που εξετάζεται, δίνεται η αίσθηση του χρώματος του κυρίαρχου μήκους κύματος, σε αραιώση με λευκό. Στο Σχήμα 1.7 γίνεται παρουσίαση στο διάγραμμα XYZ της CIE του 1931 οι γραμμές σταθερής θερμοκρασίας για ένα μέλαν σώμα. Με την βοήθεια αυτών των γραμμών θα μπορέσει να εντοπιστεί σε τι θερμοκρασία χρώματος αντιστοιχεί κάθε χρώμα.



Σχήμα 1.7: Τροποποιημένο χρωματικό διάγραμμα.



Σχήμα 1.8: Χρωματικές συντεταγμένες μέλανος σώματος και ισοθερμοκρασιακές γραμμές.

1.7 Φωτεινές πηγές

Τα τελευταία χρόνια, στις επαγγελματικές εγκαταστάσεις και ιδιαίτερα στα κτήρια γραφείων, παρατηρείται μια ξεκάθαρη κατεύθυνση όσον αφορά τις επιλογές τεχνητού φωτισμού. Οι λύσεις που εφαρμόζονται σήμερα επικεντρώνονται κυρίως σε δύο βασικές κατηγορίες φωτεινών πηγών, οι οποίες έχουν καθιερωθεί λόγω της ενεργειακής τους απόδοσης και της λειτουργικής τους ευελιξίας. Από τη μία πλευρά, συναντάμε τα φωτιστικά που χρησιμοποιούν λαμπτήρες φθορισμού και, από την άλλη, αυτά που βασίζονται στις φωτοεκπέμπουσες διόδους, ευρέως γνωστές ως LED. Αυτές οι δύο τεχνολογίες αποτελούν πλέον τις πιο διαδεδομένες επιλογές στον τεχνητό φωτισμό επαγγελματικών χώρων, με την καθεμία να προσφέρει τα δικά της πλεονεκτήματα, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

1.7.1 Λαμπτήρες φθορισμού

Οι λαμπτήρες φθορισμού ανήκουν στην κατηγορία των λαμπτήρων χαμηλής πίεσης και λειτουργούν με έναν ιδιαίτερο μηχανισμό παραγωγής φωτός. Στο εσωτερικό τους περιέχουν ατμούς υδραργύρου σε χαμηλή πίεση, καθώς και μια μικρή ποσότητα αδρανούς αερίου που

βοηθά στην έναυση. Όταν εφαρμοστεί η κατάλληλη ηλεκτρική τάση, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, το οποίο διαπερνά το αέριο μείγμα. Κατά τη διαδικασία αυτή, παράγεται κυρίως υπεριώδης (UV) ακτινοβολία και ένα μικρό ποσοστό ορατού φωτός. Η υπεριώδης ακτινοβολία ενεργοποιεί τις ειδικές φθορίζουσες επιστρώσεις που καλύπτουν το εσωτερικό τοίχωμα του λαμπτήρα, οι οποίες με τη σειρά τους μετατρέπουν την αόρατη ακτινοβολία σε ορατό φως. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο φωτισμός στους λαμπτήρες φθορισμού [1].

Δομή

Ο λαμπτήρας φθορισμού περιλαμβάνει διάφορα μέρη που συνεργάζονται για να παράγουν φως. Η λειτουργία του βασίζεται σε έναν συνδυασμό εκπομπής αερίου και φωσφορικών επιστρώσεων. Τα βασικά του γνωρίσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

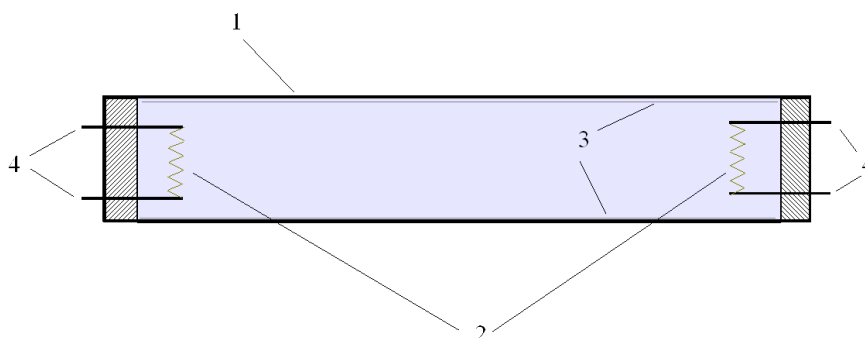
Σχήμα: οι λαμπτήρες φθορισμού είναι κυρίως ευθύγραμμοι. Ο βασικός σκελετός τους κατασκευάζεται συνήθως από γυαλί ή πλαστικό και έχει τη μορφή ενός μακρόστενου, λεπτού σωλήνα, με φθορίζουσα επιστρώση στο εσωτερικό του. Οι διαστάσεις τους ποικίλλουν, με διαμέτρους που κυμαίνονται από 12 έως 54 χιλιοστά και μήκη από περίπου 100 έως 2440 χιλιοστά. Ο τύπος κάθε λαμπτήρα προσδιορίζεται με ένα γράμμα που δηλώνει το σχήμα και έναν αριθμό που αντιστοιχεί στη διάμετρο. Για παράδειγμα, ο τύπος T-17 αναφέρεται σε έναν σωληνωτό λαμπτήρα με διάμετρο 17/8 της ίντσας, δηλαδή περίπου 54 χιλιοστά.

Ηλεκτρόδια: Τοποθετημένα στα δύο άκρα του σωλήνα, τα ηλεκτρόδια είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στον λαμπτήρα. Είναι φτιαγμένα από σύρμα βολφραμίου και μπορούν να λειτουργούν είτε ως ψυχρές είτε ως θερμής καθόδου, ανάλογα με τον τύπο του λαμπτήρα. Όταν περάσει ρεύμα από αυτά, ιονίζει το αέριο που υπάρχει στο εσωτερικό του σωλήνα. Το πιο διαδεδομένο είδος είναι το θερμής καθόδου, κατά την λειτουργία αυτού του είδους το σύρμα αποκτά θερμοκρασίες 1100°C, όπου ιονίζει το αέριο με μικρή τάση 10-12V και το ρεύμα λειτουργίας είναι 1.5A.

Αέριο πλήρωσης: Το εσωτερικό του σωλήνα είναι γεμισμένο με ένα αέριο χαμηλής πίεσης, συνήθως αργόν, καθώς και με μικρή ποσότητα ατμών υδραργύρου. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνά αυτό το μείγμα, το αέριο ιονίζεται και δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο.

Φωσφορίζουσα επιστρώση: Η εσωτερική πλευρά του σωλήνα είναι καλυμμένη με ειδικά υλικά που φθορίζουν. Όταν το ιονισμένο αέριο παράγει υπεριώδη (UV) ακτινοβολία, αυτή προσπίπτει στην επιστρώση, η οποία την απορροφά και την μετατρέπει σε ορατό φως. Το χρώμα του φωτός εξαρτάται από το είδος της φθορίζουσας ουσίας που έχει χρησιμοποιηθεί σαν κάλυμμα των τοιχωμάτων του σωλήνα.

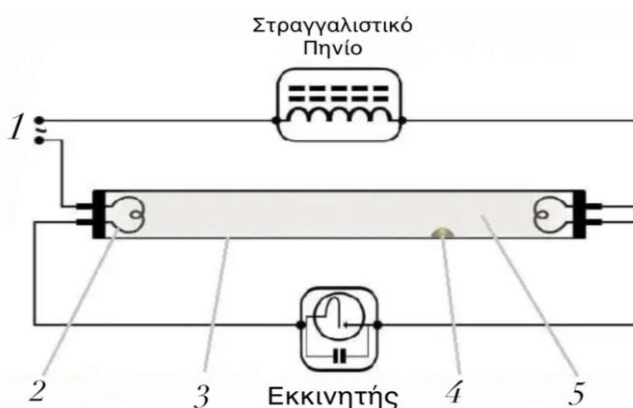
Άκρα ή βάσεις: Τα άκρα του σωλήνα χρησιμεύουν για να τον συγκρατούν στη θέση του και να συνδέουν ηλεκτρικά τα ηλεκτρόδια. Σε ορισμένα μοντέλα, οι βάσεις περιλαμβάνουν και τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα που χρειάζονται για την έναυση του λαμπτήρα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις αυτά τα κυκλώματα προστίθενται εξωτερικά.



Σχήμα 1.9: Τυπική αναπαράσταση λαμπτήρα φθορισμού (συνδεσμολογία, εσωτερική διάταξη)

1. Σωλήνας από γυαλί
2. Ηλεκτρόδιο
3. Φθορίζουσα επίστρωση
4. Επαφές

Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στα ηλεκτρόδια που βρίσκονται στις άκρες του σωλήνα του λαμπτήρα, το αέριο που υπάρχει μέσα σε αυτόν (συνήθως υδράργυρος σε αέρια μορφή) ιονίζεται, δηλαδή τα άτομα του χάνουν ή κερδίζουν ηλεκτρόνια. Μέσω αυτής της διαδικασίας παράγεται υπεριώδης ακτινοβολία, η οποία από μόνη της δεν είναι ορατή στο ανθρώπινο μάτι. Ωστόσο, το εσωτερικό του σωλήνα είναι καλυμμένο με μια ειδική φθορίζουσα επίστρωση, που έχει την ιδιότητα να μετατρέπει την υπεριώδη ακτινοβολία σε ορατό φως. Όταν λοιπόν η υπεριώδης ακτινοβολία προσπίπτει σε αυτήν την επίστρωση, προκαλείται μια χημική αντίδραση που καταλήγει στην παραγωγή φωτός που μπορούμε να δούμε. Με αυτόν τον τρόπο, ο λαμπτήρας φθορισμού παράγει φωτισμό, αξιοποιώντας μια συνδυαστική διαδικασία ηλεκτρικών και χημικών φαινομένων. Είναι ένας αποδοτικός τρόπος φωτισμού, που χρησιμοποιείται ευρέως σε σπίτια, γραφεία και δημόσιους χώρους [1].



Σχήμα 1.10: Τρόπος σύνδεσης λαμπτήρα φθορισμού

1. Πηγή ρεύματος 2. Ηλεκτρόδιο 3. Σωλήνας 4. Υδράργυρος 5. Αέριο πλήρωσης

Σύμφωνα με το σχετικό Σχήμα 1.24 , εκτός από τα βασικά δομικά στοιχεία ενός λαμπτήρα φθορισμού –δηλαδή τον σωλήνα, τα ηλεκτρόδια και τη φθορίζουσα επίστρωση– για να λειτουργήσει σωστά και με ασφάλεια χρειάζονται και δύο πρόσθετα εξαρτήματα. Αυτά είναι το **ballast** (Εικόνα 1.16) και, σε παλαιότερους τύπους, ο **εκκινητής**. Οι δύο αυτές μικροσυσκευές παίζουν καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο του ηλεκτρικού ρεύματος, εξασφαλίζοντας ότι ο φωτισμός που παράγεται είναι σταθερός, αποδοτικός και χωρίς προβλήματα.

Ο **εκκινητής** χρησιμοποιούνταν κυρίως στα παλιότερα, πιο απλά κυκλώματα, με σκοπό να βοηθήσει στην αρχική εκκίνηση της λάμπας, δηλαδή να ξεκινήσει η ροή του ρεύματος μέσα από τα ηλεκτρόδια. Στα σύγχρονα φωτιστικά, όμως, αυτή η λειτουργία έχει συνήθως ενσωματωθεί μέσα στο ηλεκτρονικό ballast, με αποτέλεσμα ο εκκινητής να μην είναι πλέον απαραίτητος ως ξεχωριστό εξάρτημα.

Το ballast, είτε πρόκειται για παλιότερου τύπου μαγνητικό είτε για σύγχρονο ηλεκτρονικό, είναι απαραίτητο για τρεις βασικούς λόγους [6]:

1. **Εκκίνηση της λάμπας:** Όταν ανοίγουμε τον διακόπτη και δώσουμε τάση στον λαμπτήρα, το αέριο που περιέχει μέσα του δεν άγει ρεύμα από μόνο του. Το ballast ανεβάζει την τάση για να προκληθεί η απαραίτητη ηλεκτρική εκκένωση που ιονίζει το αέριο. Με αυτόν τον τρόπο ξεκινά η λειτουργία του λαμπτήρα.
2. **Σταθεροποίηση του ρεύματος:** Αφού ξεκινήσει να λειτουργεί η λάμπα, το ballast συνεχίζει να είναι απαραίτητο γιατί ρυθμίζει τη ροή του ρεύματος. Οι φθορισμού λαμπτήρες, από τη φύση τους, τείνουν να μειώνουν την αντίστασή τους μόλις ξεκινήσει η αγωγιμότητα. Αν δεν υπήρχε το ballast, το ρεύμα θα μπορούσε να αυξηθεί επικίνδυνα, προκαλώντας υπερθέρμανση και πιθανώς καταστροφή της λάμπας. Το ballast λοιπόν λειτουργεί σαν «ρυθμιστής», προστατεύοντας το σύστημα.
3. **Μείωση του φαινομένου flickering (τρεμοπαίξιμο):** Οι διακυμάνσεις στην τάση του ρεύματος μπορεί να προκαλέσουν ανεπαίσθητο ή και εμφανές τρεμοπαίξιμο του φωτός (flickering), κάτι που κουράζει τα μάτια και είναι ενοχλητικό, ειδικά σε χώρους με συνεχή χρήση φωτισμού όπως γραφεία και σχολεία. Τα σύγχρονα **ηλεκτρονικά ballast** έχουν σχεδιαστεί ώστε να περιορίζουν δραστικά αυτό το φαινόμενο, προσφέροντας πιο ομαλό και σταθερό φωτισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρότι τα ballast είναι απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού, έχουν και κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η επιπλέον κατανάλωση ενέργειας, που οφείλεται στη θερμότητα και τα μαγνητικά πεδία που παράγουν κατά τη λειτουργία τους. Ωστόσο, τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ballast έχουν μειώσει σε σημαντικό βαθμό αυτές τις απώλειες, σε σχέση με τα παλαιότερα μαγνητικά, καθιστώντας τους λαμπτήρες φθορισμού πιο οικονομικούς και φιλικούς προς το περιβάλλον.



Εικόνα 1-16 Ενδεικτική εικόνα από μαγνητικό μαγνητικό και ηλεκτρικό ballast.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι 5 πιο γνωστοί τύποι λαμπτήρα φθορισμού [7]:

- Λαμπτήρας φθορισμού T-12: Μέχρι το 1992, ο πιο συνηθισμένος λαμπτήρας φθορισμού που χρησιμοποιούσαν σχεδόν παντού σε ΗΠΑ και Καναδά ήταν ο γνωστός T-12, 40W, μήκους 4 ft (1.22 μέτρα). Ήταν ο "κλασικός" σωλήνας ταχείας έναυσης, διαθέσιμος σε ψυχρό ή θερμό λευκό, και χρησιμοποιούνταν από σπίτια μέχρι γραφεία και βιομηχανικούς χώρους. Ωστόσο, από το 1995 και έπειτα, η παραγωγή αυτών των

λαμπτήρων σταμάτησε, καθώς σταδιακά αντικαταστάθηκαν από πιο αποδοτικές τεχνολογίες φωτισμού.

- Λαμπτήρες φθορισμού εξοικονόμησης ενέργειας: Μετά την ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του 1970, οι κατασκευαστές λαμπτήρων προσπάθησαν να δώσουν λύσεις για μικρότερη κατανάλωση. Έτσι, παρουσίασαν μια νέα γενιά λαμπτήρων T-12, τους λεγόμενους αλοφωσφορικούς, που αντί για απλό αργό αέριο είχαν στο εσωτερικό τους μείγμα αργού και κρυπτού. Αυτή η αλλαγή όμως είχε και μειονεκτήματα. Οι νέοι λαμπτήρες δεν ήταν τόσο εύκολα ρυθμιζόμενοι όσο οι παλαιότεροι T-12 και επιπλέον ήταν πιο ευαίσθητοι στις χαμηλές θερμοκρασίες, κυρίως όταν έπρεπε να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους (έναυση). Σε κρύα περιβάλλοντα, η απόδοση εκκίνησης ήταν προβληματική.
- Λαμπτήρες φθορισμού T-8: Οι συγκεκριμένοι λαμπτήρες φθορισμού ανήκουν στην οικογένεια λαμπτήρων που είναι σωλήνες με διάμετρο 1 ίντσα (25.4 mm). Έχουν ευθύ σωλήνα και κατασκευάζονται σε μήκη αντίστοιχα με τους παλαιότερους T-12, για να μπορούν να τους αντικαταστήσουν εύκολα. Η πιο συνηθισμένη εκδοχή είναι αυτή των 4 ft (1,22 m), η οποία καταναλώνει 32W. Υπάρχουν όμως διαθέσιμα και άλλα μεγέθη, από 2 έως 8 ft (0,61 m έως 2.44 m). Λόγω της καλύτερης ενεργειακής απόδοσης που προσφέρουν τα συστήματα T-8, οι λαμπτήρες αυτοί σταδιακά αντικατέστησαν τους συμβατικούς T-12 σε πολλές εφαρμογές. Σήμερα όμως, και οι T-8 βρίσκονται σε διαδικασία απόσυρσης στην Ευρώπη, στο πλαίσιο της μετάβασης σε ακόμη πιο αποδοτικές λύσεις φωτισμού.
- Λαμπτήρες φθορισμού T-5: Οι λαμπτήρες T-5 ανήκουν στην κατηγορία των ευθύγραμμων φθορισμού με μικρότερη διάμετρο και χρησιμοποιούν τριφωσφορική τεχνολογία για υψηλότερη απόδοση και καλύτερη ποιότητα φωτισμού. Διατίθενται σε συγκεκριμένα μήκη και σε σύγκριση με τους T-8, προσφέρουν μεγαλύτερη φωτεινότητα και καλύτερο έλεγχο της φωτεινής δέσμης. Οι T-5 λαμπτήρες έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρονικά ballast και δεν είναι συμβατοί με τα παραδοσιακά μαγνητικά στραγγαλιστικά πηνία. Επιπλέον, διαθέτουν ειδικές διπλές, που σημαίνει ότι προορίζονται για συγκεκριμένα φωτιστικά σώματα και εγκαταστάσεις, και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως απευθείας αντικατάσταση παλαιότερων T-8 ή T-12 σωλήνων.
- Συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (Compact Fluorescent Lamps – CFL): Η εξέλιξη στις φθορίζουσες επιστρώσεις επέτρεψε τη δημιουργία μιας μεγάλης γκάμας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού, οι οποίοι διαθέτουν ένα μόνο άκρο. Αρχικά, αυτοί οι λαμπτήρες σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να μπορούν να αντικαταστήσουν τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως, από 25W έως 100W, προσφέροντας σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Σήμερα, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (CFL) κυκλοφορούν και σε μεγέθη που μπορούν να αντικαταστήσουν ακόμα και τους κλασικούς γραμμικούς φθορισμού σε μικρότερα φωτιστικά. Οι πιο συνηθισμένες εκδόσεις τους έχουν ισχύ από 5W έως 55W και καλύπτουν φωτεινές αποδόσεις από 250 έως 4800 lumen. Λόγω της υψηλής απόδοσης σε σχέση με το μέγεθός τους, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, τόσο οικιακές όσο και επαγγελματικές.



Εικόνα 1-17: Οι δημοφιλέστεροι τύποι λαμπτήρων φθορισμού.

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα

Οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν αρκετά πλεονεκτήματα που τους καθιστούν δημοφιλή επιλογή στον φωτισμό. Καταρχάς, παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, καθώς μπορούν να αποδώσουν από 40 έως και 80 lm/W, δηλαδή περίπου το 85% της ενέργειας μετατρέπεται σε φως. Ένα άλλο σημαντικό θετικό στοιχείο είναι ότι δεν ανεβάζουν υψηλές θερμοκρασίες κατά τη λειτουργία τους, κάτι που τους κάνει πιο ασφαλείς και αποδοτικούς ενεργειακά. Επιπλέον, προσφέρουν φωτισμό που μοιάζει με το φυσικό φως, κάτι που είναι ιδανικό για καθημερινή χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, ενώ η διάρκεια ζωής τους μπορεί να φτάσει τις 10.000 ώρες περίπου.

Παρόλο που οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν αρκετά θετικά, δεν λείπουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ένα από αυτά είναι το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες φωτισμού. Επίσης, έχουν μεγαλύτερο μέγεθος και βάρος σε σχέση με την ποσότητα φωτός που παράγουν, γεγονός που τους κάνει λιγότερο πρακτικούς σε ορισμένες εφαρμογές. Λόγω της χαμηλής φωτεινής έντασης που εκπέμπουν, είναι συχνό το φαινόμενο να τοποθετούνται δύο λάμπες σε κάθε φωτιστικό για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο φωτισμού. Επιπλέον, η ποιότητα του φωτός που αποδίδουν μπορεί να επηρεαστεί αισθητά από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος, κάτι που τους καθιστά λιγότερο σταθερούς σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

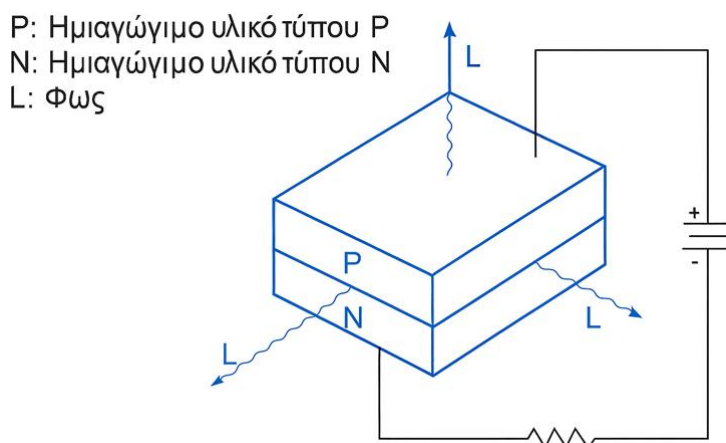
1.7.2 Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (LED)

Ένας ακόμη διαδεδομένος τύπος λαμπτήρων είναι οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι, οι οποίες είναι περισσότερο γνωστές με τον όρο LED (Light-Emitting Diodes). Τα LED αποτελούν ουσιαστικά έναν συνδυασμό ημιαγωγών τύπου p-n. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στα δύο αυτά στρώματα ημιαγωγών, τα ηλεκτρόνια και οι οπές επανασυνδέονται στην περιοχή της ένωσης και απελευθερώνουν ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή

μπορεί να βρίσκεται είτε στο φάσμα της υπέρυθρης περιοχής είτε στο ορατό φάσμα, ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

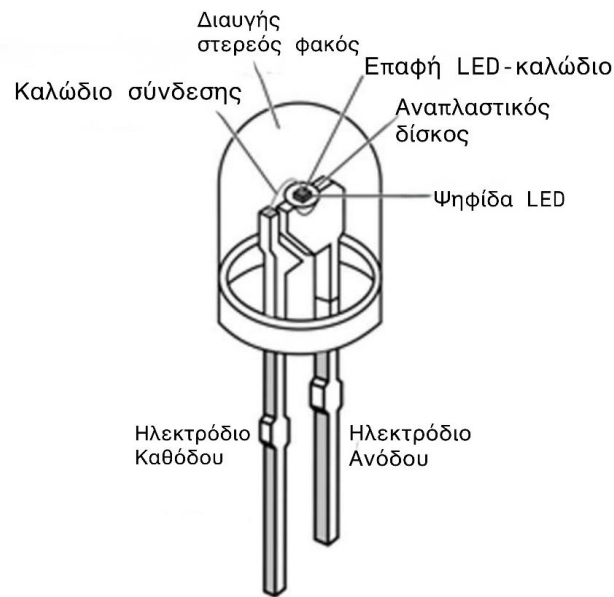
Το φως που εκπέμπεται από τα LED καλύπτει ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος μηκών κύματος· ξεκινά από τα χαμηλά όρια της ορατής ακτινοβολίας και μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά μήκη κύματος στην υπέρυθρη περιοχή. Το τελικό χρωματικό αποτέλεσμα που επιθυμείται σε κάθε εφαρμογή προκύπτει από τον προσεκτικό συνδυασμό διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών, καθένα από τα οποία εκπέμπει σε συγκεκριμένο μήκος κύματος.

Η βασική διάταξη που απαιτείται για τη λειτουργία των LED φαίνεται στο Σχήμα 1.11, όπου παρουσιάζονται τα κύρια μέρη και ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η εκπομπή φωτός.



Σχήμα 1.11: Σχεδιάγραμμα κυκλώματος λειτουργίας LED.

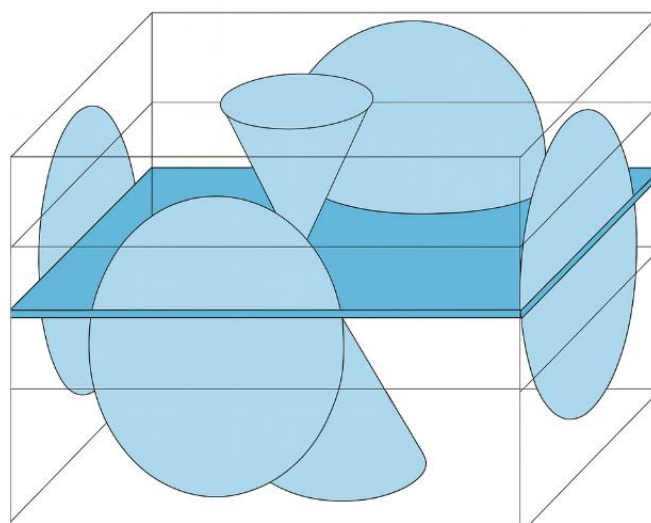
Με την εφαρμογή τάσης στα δύο ηλεκτρόδια του LED, τα ηλεκτρόνια και οι οπές μετακινούνται προς την περιοχή επαφής. Κατά τη σύγκλισή τους παράγονται φωτόνια, με αποτέλεσμα την εκπομπή φωτός. Η απαιτούμενη τάση κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 3 V, ενώ το ρεύμα λειτουργίας βρίσκεται στην περιοχή 1-100 mA (συνεχές ρεύμα). Σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας απαιτείται είτε ψύξη είτε διακοπτόμενη λειτουργία, προκειμένου να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης και η υποβάθμιση της φωτεινής εκπομπής. Στο Σχήμα 1.12 παρουσιάζεται αναλυτικά η εσωτερική δομή ενός τυπικού LED. Το τμήμα που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή φωτός είναι η ημιαγωγική ψηφίδα (chip).



Σχήμα 1.12: Η δομή και τα βασικά μέρη της φωτοεκπέμπουσας διόδου LED [8].

Από τη δομή του LED προκύπτει ότι, λόγω της ύπαρξης της μονωτικής ανακλαστικής επιφάνειας και των ανακλαστήρων που ενσωματώνονται στην ψηφίδα, η φωτεινή ροή κατευθύνεται αποκλειστικά προς τα επάνω. Αυτός είναι ο τρόπος λειτουργίας των συμβατικών και ευρέως διαδεδομένων LED. Ωστόσο, υπάρχει και τύπος LED που έχει σχεδιαστεί ώστε να εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία και από τις έξι γεωμετρικές πλευρές της ψηφίδας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13. Τα συγκεκριμένα LED χαρακτηρίζονται ως υψηλής φωτεινότητας (High-brightness LED) και επιτυγχάνουν σημαντικά αυξημένη φωτεινή ροή.

Στους λαμπτήρες φθορισμού είναι απαραίτητο το ballast για να δουλεύουν σωστά, έτσι και στα φωτιστικά LED χρησιμοποιούνται ειδικοί οδηγοί, οι λεγόμενοι LED drivers. Ουσιαστικά, οι οδηγοί αυτοί φροντίζουν να δίνουν στο φωτιστικό την κατάλληλη παροχή ρεύματος, ώστε να αποδίδει στο μέγιστο.



Σχήμα 1.13: Η δομή των High-brightness LED.

Μία βασική λειτουργία που συντελούν οι drivers είναι η μετατροπή τάσης. Τα περισσότερα LED λειτουργούν με χαμηλή τάση συνεχούς ρεύματος, περίπου 12–24V. Από την άλλη, το ηλεκτρικό δίκτυο στα σπίτια και στις περισσότερες περιοχές δίνει εναλλασσόμενο ρεύμα και μάλιστα αρκετά υψηλής τάσης (120–277V). Ο οδηγός LED (Εικόνα 1.19) λοιπόν αναλαμβάνει να μετατρέψει αυτό το εναλλασσόμενο ρεύμα σε χαμηλής τάσης συνεχές, για να μπορούν να δουλέψουν σωστά τα LED. Άλλη μία λειτουργία που έχουν οι drivers led είναι η προστασία από διακυμάνσεις. Οι οδηγοί προστατεύουν επίσης τα LED από πιθανές αυξομειώσεις στην τάση ή το ρεύμα. Ακόμα και μια μικρή αλλαγή στην τάση μπορεί να αλλάξει το ρεύμα που φτάνει στο φωτιστικό, κάτι που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία του [9].

Η φωτεινότητα ενός LED εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα που περνάει μέσα του. Τα LED είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε συγκεκριμένο εύρος ρεύματος. Αν το ρεύμα είναι παραπάνω από όσο πρέπει, υπάρχει κίνδυνος να ανεβάσει θερμοκρασία, να φθαρεί πιο γρήγορα ή να χάσει αποδοτικότητα. Αν είναι λιγότερο, τότε η φωτεινότητά του πέφτει και δεν αποδίδει όπως πρέπει.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο γνωστοί τύποι φωτεινών πηγών LED:



Εικόνα 1.18: Λαμπτήρας LED E27 - Σποτ LED GU10 – Ταινία LED – Σωληνωτός λαμπτήρας LED.



Εικόνα 1.19: Ορισμένα δείγματα οδηγών για φωτιστικά LED.

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα

Τα LED έχουν αρκετά πλεονεκτήματα που τα κάνουν να ξεχωρίζουν σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές φωτισμού, όπως οι λάμπες αλογόνου ή φθορισμού. Καταρχάς, είναι πολύ πιο αποδοτικά ενεργειακά, αφού καταναλώνουν πολύ λιγότερο ρεύμα για την ίδια φωτεινότητα. Αυτό σημαίνει χαμηλότερους λογαριασμούς ρεύματος και ταυτόχρονα μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, κάτι που τα καθιστά πιο φιλικά προς το

περιβάλλον. Επιπλέον, έχουν τεράστια διάρκεια ζωής – μιλάμε για 50.000 έως και 100.000 ώρες λειτουργίας – γεγονός που μειώνει δραστικά την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις και, κατά συνέπεια, το κόστος συντήρησης. Ακόμα, τα LED θεωρούνται και πιο οικολογική επιλογή, μιας και δεν περιέχουν τοξικές ουσίες όπως υδράργυρο και μπορούν να ανακυκλωθούν πιο εύκολα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες φωτισμού [1].

Στα σύγχρονα έργα φωτισμού για σχολικά και πανεπιστημιακά κτήρια προτιμώνται πλέον σχεδόν αποκλειστικά φωτιστικά τύπου LED. Ο λόγος είναι προφανής αν σκεφτεί κανείς τα πλεονεκτήματα που έχουν αναφερθεί: τα LED υπερτερούν ξεκάθαρα σε σχέση με τα κλασικά φωτιστικά φθορισμού. Πιο συγκεκριμένα, τα LED προσφέρουν σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς στο λειτουργικό κόστος, καθώς η φωτεινή τους απόδοση φτάνει ακόμη και τα 130 lm/W, τη στιγμή που τα φωτιστικά φθορισμού σπάνια ξεπερνούν τα 80 lm/W. Ένα ακόμη θετικό είναι ότι δεν απαιτούν τη χρήση ballast, κάτι που όχι μόνο μειώνει το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, αλλά αποφεύγει και τις επιπλέον ενεργειακές απώλειες που αυτά προκαλούσαν [10].

Παρόλο που τα LED έχουν πολλά πλεονεκτήματα, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να αναφέρονται σε μία τέτοια παράγραφο. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος αγοράς, που αν και η τιμή τους έχει μειωθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια τα LED παραμένουν πιο ακριβά σε σχέση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες φθορισμού. Επίσης τα LED παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις υψηλές θερμοκρασίες καθώς παθαίνουν μεγάλες φθορές, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής τους.

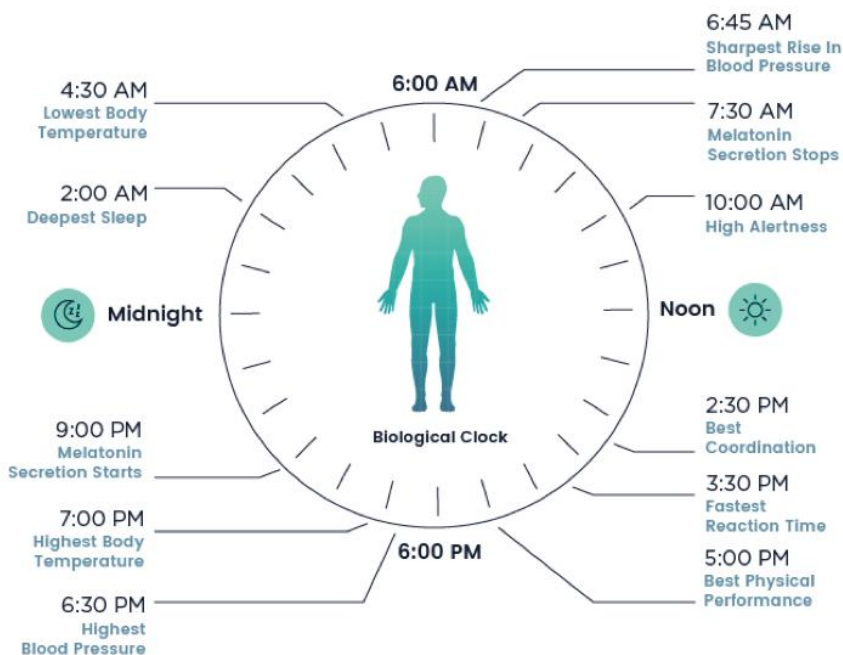
Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα των LED είναι τόσα πολλά που τα καθιστούν την προφανή επιλογή για σύγχρονες εγκαταστάσεις φωτισμού. Δεν είναι τυχαίο ότι έχουν πλέον κυριαρχήσει στα εκπαιδευτικά κτήρια, καθώς καλύπτουν πλήρως τις απαιτήσεις των σύγχρονων ευρωπαϊκών προτύπων φωτισμού για χώρους μάθησης.

Κεφάλαιο 2ο- Ανθρωποκεντρικός φωτισμός

2.1 Κιρκαδικός ρυθμός

Ο κιρκάδιος κύκλος είναι θεωρητικά ένα «βιολογικό ρολόι» που ρυθμίζει όλες τις φυσιολογικές λειτουργίες του σώματος ενός ζωντανού οργανισμού σε μία περίοδο ημέρας, καθώς και την καθημερινή επανάληψή τους. Οι κύκλοι των ζωντανών οργανισμών συνδέονται γενικά με περιόδους φωτός και σκοταδιού. Αυτοί οι ρυθμοί που καθορίζονται από βιολογικά ή κιρκάδια ρολόγια ονομάζονται κιρκαδικοί ρυθμοί.

Η παρακάτω εικόνα περιγράφει το κιρκάδιο ρολόι:



Εικόνα 2.1: Ο ανθρώπινος κιρκάδιος ρυθμός σε διάγραμμα [11].

Οι κιρκαδικοί ρυθμοί ευθύνονται για τη διατροφική συμπεριφορά, τη θερμοκρασία του σώματος, την ισορροπία του ανοσοποιητικού συστήματος των ανθρώπων [12]. Για παράδειγμα, η ανεπάρκεια ύπνου μπορεί να επηρεάσει την σωματική και ψυχική υγεία των ανθρώπων και μπορεί να συμβάλει σε μια σειρά από χρόνιες παθήσεις όπως ο διαβήτης, η παχυσαρκία, οι καρδιακές παθήσεις ακόμα και καρκίνο, σύμφωνα με την Ιατρική Σχολή του Χάρβαρντ [11]. Επίσης, οι κιρκάδιοι ρυθμοί επηρεάζουν την ισορροπία των ορμονών. Κάποιες βασικές ορμόνες που παράγονται κατά τη διάρκεια της ημέρας (κιρκαδιανός ρυθμός) είναι η ντοπαμίνη, η σερατονίνη, η κορτιζόνη, η μελατονίνη [3]. Αναλυτικότερα:

Η **ντοπαμίνη** αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους νευροδιαβιβαστές του εγκεφάλου, καθώς συμμετέχει τόσο στη ρύθμιση βασικών λειτουργιών του οργανισμού όσο και στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς. Η έκκρισή της συνδέεται άμεσα με την έννοια της ανταμοιβής: όταν το άτομο εκτελεί μια πράξη που του προσφέρει ικανοποίηση, ο εγκεφάλος παράγει ντοπαμίνη, ενισχύοντας έτσι την επιθυμία για επανάληψη της συγκεκριμένης δραστηριότητας. Αυτός ο μηχανισμός αποτελεί θεμέλιο της μαθησιακής διαδικασίας και της ενίσχυσης συνηθειών.

Ωστόσο, η ντοπαμίνη δεν περιορίζεται αποκλειστικά στη λειτουργία της ανταμοιβής. Η παραγωγή της αυξάνεται επίσης σε καταστάσεις έντονου στρες ή κινδύνου, σε συνδυασμό με άλλες χημικές ουσίες, προκειμένου να διευκολύνει την ταχεία αντίδραση του οργανισμού. Με τον τρόπο αυτό συμβάλλει στην επιβίωση, ενεργοποιώντας μηχανισμούς που μας επιτρέπουν να ανταποκριθούμε σε απρόβλεπτες και απαιτητικές συνθήκες. Οι λειτουργίες στις οποίες εμπλέκεται η ντοπαμίνη είναι πολυάριθμες: η κινητικότητα, η διαδικασία της ανταμοιβής και της ευχαρίστησης, η γνωστική λειτουργία, η ρύθμιση των συναισθημάτων, ο σεξουαλικός ερεθισμός, αλλά και η ισορροπία ορμονικών επιπέδων στον οργανισμό. Η επαρκής έκκρισή της συνδέεται με την ικανότητα συγκέντρωσης, την ορθολογική λήψη αποφάσεων και τη διατήρηση θετικής ψυχικής διάθεσης. Αντίθετα, χαμηλά επίπεδα ντοπαμίνης συσχετίζονται με αναποφασιστικότητα, έλλειψη κινήτρου και ενθουσιασμού, αναβλητικότητα, αυξημένο σωματικό βάρος και καταθλιπτικά συμπτώματα. Η ισορροπημένη διατροφή, η ενασχόληση με δραστηριότητες που προκαλούν ενδιαφέρον και η καλλιέργεια υγιεινών συνηθειών συμβάλλουν σημαντικά στη διατήρηση ικανοποιητικών επιπέδων ντοπαμίνης και, κατ' επέκταση, στη βέλτιστη λειτουργία του οργανισμού [13].

Σερατονίνη Σύμφωνα με τους ερευνητές του Πανεπιστημίου του Χάρβαρντ, κάποιοι άνθρωποι που υποφέρουν από κατάθλιψη, είναι πιθανό να έχουν υπερβολικά χαμηλά επίπεδα σεροτονίνης, γεγονός που εξηγεί γιατί οι επιλεκτικοί αναστολείς επαναπρόσληψης σεροτονίνης (SSRIs), οι οποίοι αυξάνουν τα επίπεδα σεροτονίνης στον εγκέφαλο, αποτελούν βασικό παράγοντα στη θεραπεία της κατάθλιψης. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι ασθενείς με κατάθλιψη παρουσιάζουν μειωμένα επίπεδα αυτής. Επίσης, εμφανίζουν μειωμένη σεξουαλική επιθυμία. Απεναντίας, όταν έχουμε υψηλά επίπεδα σεροτονίνης μαθαίνουμε και θυμόμαστε αρκετά πιο εύκολα. Χαρούμενες σκέψεις, συντροφικότητα, αναγνώριση όλων αυτών που έχουμε καταφέρει και πίστη στον εαυτό μας είναι αρκετά για να εκτοξεύσουν τα επίπεδά της στα ύψη. Όταν όμως απουσιάζει, πιθανά η κατάθλιψη να «χτυπάει την πόρτα» [13].

Κορτιζόλη ή κορτιζόνη Θεωρείται η κυρίαρχη ορμόνη του άγχους. Σε καταστάσεις που το στρες αυξάνει πάνω από το μέσο όρο (για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως για παράδειγμα στην κατάθλιψη) τα επίπεδα της κορτιζόλης στον οργανισμό, μπορούν να προκληθούν ανεπιθύμητες ενέργειες, φθείροντας τον οργανισμό.

Η κορτιζόλη είναι μια στεροειδής ορμόνη που παράγεται από το φλοιό των επινεφριδίων. Όπως συμβαίνει με όλες τις στεροειδείς ορμόνες, συντίθεται από τη χοληστερόλη, μετά από μια αλληλουχία βιοχημικών αντιδράσεων. Η κορτιζόλη, με τις πολυποικίλες δράσεις της, βοηθά τον οργανισμό να ανταπεξέρχεται στις μακροχρόνιες καταστάσεις στρες. Είναι ορμόνη απαραίτητη για τη ζωή, και αυτό φαίνεται σε καταστάσεις έλλειψής της (φλοιοεπινεφριδιακή ανεπάρκεια), οπότε μπορεί να επέλθει ακόμη και ο θάνατος. Η κορτιζόλη είναι υπεύθυνη για καταστάσεις όπως η βουλιμία, η απώλεια μυϊκού όγκου, ο διαβήτης, η απώλειας μνήμης, η κατάθλιψη ακόμα και ο καρκίνος του προστάτη.

Σε φυσιολογικά επίπεδα, είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού, καθώς βοηθάει το σώμα μας με τους ακόλουθους τρόπους:

- Βοηθάει στη διαχείριση του άγχους
- Διατηρεί την αρτηριακή πίεση σε καλά επίπεδα
- Συμβάλλει στην καλή λειτουργία της καρδιάς και του ανοσοποιητικού συστήματος

Βοηθάει στη μετατροπή του λίπους, των υδατανθράκων και των πρωτεϊνών σε ενέργεια [14].

Η μελατονίνη αποτελεί ορμονικό προϊόν της επίφυσης και εμφανίζει έναν ημερήσιο ρυθμό έκκρισης, που συγχρονίζεται με τον κύκλο φωτός σκότους. Έρευνες έχουν δείξει ότι η παραγωγή και η απελευθέρωση της μελατονίνης μειώνονται κατά τη φυσιολογική διαδικασία της γήρανσης του ανθρώπου. Στον κιρκάδιο ρυθμό, η έκκριση της μελατονίνης προκαλεί χημικά την υπνηλία, μειώνοντας τη θερμοκρασία του σώματος και καταστέλλοντας το νευρικό σύστημα, γεγονός που φανερώνει την ύπαρξη στενής σχέσης ανάμεσα στην έκκριση της μελατονίνης και της πιθανότητας εμφάνισης του ύπνου ή της επιρρέπειας για ύπνο. Η απελευθέρωση της μελατονίνης στον εγκέφαλο έχει άμεση σχέση με την ώρα της ημέρας. Για την ακρίβεια, απελευθερώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό κατά τις βραδινές ώρες, όπου υπάρχει σκοτάδι, και σε πολύ μικρότερο κατά την διάρκεια της ημέρας. Έτσι, τα επίπεδα της μελατονίνης στο αίμα αυξάνονται και μειώνονται ανάλογα με τον ημερήσιο κύκλο. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η ρύθμιση του κιρκάδιου ρυθμού και ο προγραμματισμός του ύπνου. Για αυτό, άλλωστε, συνηθίζεται να λέγεται και «ορμόνη του ύπνου».

Πιο συγκεκριμένα, η μελατονίνη του πλάσματος στον άνθρωπο καταστέλλεται σε σημαντικότερο βαθμό κατά τη νυκτερινή έκθεση σε φως μεγάλης εντάσεως (φωτεινότητα > 2500 lx), αλλ' όχι και μικρότερης εντάσεως (π.χ. < 500 lx). Η καταστολή αυτή εξαρτάται και διαφοροποιείται ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο τμήμα του φωτεινού φάσματος: το πράσινο φως είναι δραστικότερο και το κόκκινο ανενεργό. Έχει, εν τούτοις, διαπιστωθεί σημαντική καταστολή της νυκτερινής έκκρισης μελατονίνης, ακόμη και μετά από έκθεση σε φως της τάξεως των 500 lx, σε διπολικούς ασθενείς στη μανιακή φάση της νόσου, φαινόμενο που αποδόθηκε στην ύπαρξη "υπερευαισθησίας" των ασθενών στο φως αναφορικά με την έκκριση μελατονίνης. Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη της υπερευαισθησίας αυτής έχει αμφισβητηθεί, καθόσον έχουν αναφερθεί αρνητικά αποτελέσματα και, επιπλέον, έχει καταδειχθεί ότι μπορεί να προκληθεί σημαντική καταστολή της νυκτερινής έκκρισης μελατονίνης σε φυσιολογικά άτομα μετά από έκθεση σε φως εντάσεως 250-350 lx, φαινόμενο που υποδηλώνει μεγάλη διακύμανση της ευαισθησίας της έκκρισης μελατονίνης στο φως από άτομο σε άτομο [15].

2.2 Διατήρηση του κιρκάδιου ρυθμού

Σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται εύκολα κατανοητό πόσο σημαντικό είναι να διατηρηθεί ο κιρκάδιος ρυθμός και να μην διαταράσσεται. Σε αυτή την υποενότητα θα γίνει αναφορά σε τέσσερις βασικούς παράγοντες που βοηθούν να διατηρηθεί ο κιρκάδιος ρυθμός.

Για αρχή, θα πρέπει το άτομο να διατηρεί έναν σταθερό χρόνο αφύπνισης. Μπορεί να είναι πιο δύσκολο από όσο ακούγεται, ειδικά αν κάποιος προτιμάει να κοιμάται πολύ περισσότερο μέσα τα Σαββατοκύριακα. Όμως, η τήρηση ενός σταθερού προγράμματος αφύπνισης θα προετοιμάσει το άτομο ώστε να πετύχει ένα ικανοποιητικό πρόγραμμα ύπνου μακροπρόθεσμα. Έτσι, οι ώρες ύπνου γίνονται πιο προβλέψιμες. Το μόνο πράγμα που μπορεί ένας άνθρωπος να ελέγξει είναι η ώρα που ξυπνάει, οπότε για άτομα που έχουν αϋπνία, αυτή είναι μια καλύτερη προσέγγιση. Αυτό σημαίνει ότι, αντί να καταβάλλει όλη την προσπάθεια για να κοιμάται νωρίτερα (και δυνητικά να απογοητεύεται ακόμη περισσότερο), ο έλεγχος της ώρας αφύπνισης κάθε πρωί μπορεί να βοηθήσει τον εγκέφαλο να μάθει αυτόν τον κύκλο ύπνου - αφύπνισης [12].

2.3 Μη οπτικά αποτελέσματα φωτισμού

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, το φως θεωρείται ρυθμιστής της φυσιολογίας και της συμπεριφοράς του ανθρώπου. Κατά την διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών τα στοιχεία που έδωσαν οι έρευνες είναι ότι πολλές πτυχές της ανθρώπινης φυσιολογίας και συμπεριφοράς επηρεάζονται από τον φωτισμό του αμφιβληστροειδούς. Οι αποκρίσεις που προέρχονται από το μάτι αλλά είναι διαφορετικές από τις πτυχές της όρασης και δεν συσχετίζονται με συγκεκριμένο χωρικό μοτίβο έκθεσης στο φως, μπορούν να επιβιώνουν ακόμη και σε ορισμένα τυφλά άτομα. Κατά συνέπεια, αυτοί οι τύποι φωτεινών αποκρίσεων αναφέρονται ως μη απεικονιστικές ή μη-οπτικές αποκρίσεις φωτός.

Οι μη-οπτικές αποκρίσεις ή αλλιώς τα μη οπτικά αποτελέσματα φωτισμού, περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τύπων απόκρισης. Η πιο σημαντική απόκριση από τον φωτισμό στους ζωντανούς οργανισμούς είναι η επαναφορά των ενδογενών κιρκάδιων ρυθμών καθώς κιρκάδια ρολόγια ή κιρκαδικούς κύκλους έχει κάθε φυσιολογικός ζωντανός οργανισμός. Το φαινόμενο αυτό επιφέρει ένα ευρύ φάσμα βιολογικών διεργασιών το οποίο ελέγχει έμμεσα ο αμφιβληστροειδής. Πέρα από αυτό, ο όρος μη οπτικές αποκρίσεις περιλαμβάνει έναν αυξημένο κατάλογο πιο οξέων επιδράσεων του φωτός που μαζί εξασφαλίζουν μια φυσιολογική κατάσταση στους ζωντανούς οργανισμούς.

Κάποιες άλλες επιδράσεις του φωτός είναι ότι συστέλλει την κόρη του ματιού και καταστέλλει την παραγωγή της μελατονίνης από την επίφυση. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ότι αυξάνεται ο καρδιακός παλμός και η θερμοκρασία του σώματος- έτσι διεγείρει την παραγωγή κορτιζόνης και δρα ως νευροφυσιολογικό διεγερτικό (αυξάνοντας τις υποκειμενικές και αντικειμενικές μετρήσεις της εγρήγορσής και του ψυχοκινητικού χρόνου αντίδρασης και μειώνοντας τα κενά προσοχής). Η εκτίμηση αυτής της βασικής βιολογίας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών θεραπευτικών εφαρμογών με βάση το τεχνητό φωτισμό.

Το φως έχει αποδειχθεί ότι έχει αντικαταθλιπτικές ιδιότητες, ιδιαίτερα στη θεραπεία της εποχικής συναισθηματικής διαταραχής SAD (Seasonal Affective Disorder: πρόκειται για μια μορφή κατάθλιψης που έρχεται κατά την ίδια περίοδο κάθε χρόνο, συνήθως το χειμώνα, και επηρεάζει τη διάθεση, τον ύπνο, την ενέργεια), και της υποκλινικής παραλλαγής sSAD. Η έκθεση σε κατάλληλα χρονικά προσδιορισμένο φως έχει επίσης αναπτυχθεί ως θεραπεία για τις διαταραχές του κιρκαδιανού ρυθμού του ύπνου και της κιρκαδιανής διαταραχής που σχετίζεται με το jetlag (πρόβλημα διαταραχής του βιολογικού ρολογιού που συμβαίνει ότι ταξιδεύουμε και όταν κινούμαστε γρηγορότερα από την προσαρμοστικότητα μας). Τέλος, το φως έχει διερευνηθεί ως θεραπεία για τη εποχιακή κατάθλιψη, για προβλήματα που σχετίζονται με τον εμμηνορροϊκό κύκλο, για τη νευρική βουλιμία και για γνωστικά προβλήματα και προβλήματα κόπωσης που σχετίζονται με γεροντική άνοια, χημειοθεραπεία και τραυματική εγκεφαλική βλάβη.

Αυτές οι επιδράσεις του φωτός στη φυσιολογία και τη συμπεριφορά εξελίχθηκαν σε χιλιετίες κατά τις οποίες ο περιβαλλοντικός φωτισμός παρείχε ένα συγκεκριμένο και αξιόπιστο χρονικό διάστημα μέσα στην ημέρα. Η έλευση του ηλεκτρικού φωτισμού έχει διαταράξει την σχέση αυτή, καθώς οι άνθρωποι έχουν πρότυπο έκθεσης στο φως που προσαρμόζεται, σύμφωνα με τις προσωπικές και τις κοινωνικές τους προτιμήσεις. Επομένως, είναι σημαντικό όταν γίνεται σχεδιασμός φωτισμού σε κάποιο χώρο να λαμβάνονται υπόψιν και οι μη οπτικές επιδράσεις του φωτός. Έτσι, για παράδειγμα, θα μπορούσε κανείς να ρωτήσει σε ποιο βαθμό ένας συγκεκριμένος αρχιτεκτονικός φωτισμός αναπαράγει τις βιολογικές επιδράσεις του

φυσικού φωτός της ημέρας, και πως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ελαχιστοποιηθούν οι βλαβερές συνέπειες της εργασίας σε βάρδιες, προάγοντας παράλληλα την εγρήγορση και την ασφάλεια ή πώς θα μπορούσε να βελτιωθεί η φωτοθεραπεία.

Η βιομηχανία φωτισμού και οι ακαδημαϊκοί ερευνητές έχουν αρχίσει να αντιμετωπίζουν αυτά τα προβλήματα. Η πρόοδος σε αυτές τις προσπάθειες, ωστόσο, απαιτεί πρώτα την κατάλληλη ποσοτικοποίηση του τρόπου με τον οποίο το φως επηρεάζει την ανθρώπινη φυσιολογία και συμπεριφορά. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες τεχνικών μέτρησης του φωτός: η ραδιομετρία και η φωτομετρία. Η ραδιομετρία βασίζεται στον χαρακτηρισμό των φυσικών ιδιοτήτων του μήκους κύματος και της ενέργειας του φωτός. Ένα ραδιόμετρο ποσοτικοποιεί την ισχύ της ακτινοβολίας σε ένα καθορισμένο εύρος ζώνης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Η φωτομετρία είναι ένας εξειδικευμένος κλάδος της ραδιομετρίας που λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι οι βιολογικοί φωτούποδοχείς δεν είναι εξίσου ευαίσθητοι στο φως σε όλα τα μήκη κύματος. Το φωτόμετρο είναι ένα ραδιόμετρο που χρησιμοποιεί φίλτρα για να σταθμίσει την απόκριση του ανιχνευτή σε διαφορετικά μήκη κύματος σύμφωνα με τη φασματική ευαισθησία μιας πτυχής της ανθρώπινης όρασης. Τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα φωτόμετρα χρησιμοποιούν μια συνάρτηση στάθμισης που ονομάζεται συνάρτηση φωτοπικής φωτεινής απόδοσης (ή $V(\lambda)$), η οποία αντικατοπτρίζει τη φασματική ευαισθησία των κωνίων που είναι ευαίσθητα σε μεγάλα και μεσαία μήκη κύματος. Ανάλογα με τις γεωμετρικές ιδιότητες ενδιαφέροντος, η φωτεινή ένταση (μονάδες lm/sr ή candelas , cd), η φωτεινότητα (cd/m^2) ή η φωτεινότητα (lm/m^2 ή lx) μπορούν να προσδιοριστούν από την έξοδο αυτών των συσκευών.

Στο χρονικό διάστημα 1980 με 2000, η μεγάλη πλειοψηφία των μελετών σχετικά με τις ανθρώπινες κερκαδικές, ενδοκρινικές και θεραπευτικές αποκρίσεις στο φως ασχολήθηκε με την ποσοτικοποίηση των ερεθισμάτων σε όρους φωτοπικού φωτισμού (lx). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι μετρητές για τα lx ήταν εύκολα διαθέσιμοι και φθηνοί, επειδή ήταν το εργαλείο επιλογής στα επαγγέλματα του φωτισμού και της φωτογραφίας. Δύο συναφείς κλάδοι έρευνας έχουν έκτοτε δείξει ότι η πρακτική αυτή είναι ανεπαρκής. Πρώτον, την τελευταία δεκαετία ανακαλύφθηκε ότι ενώ η ικανότητα του αμφιβληστροειδούς να αντιλαμβάνεται το φως κυριαρχείται από τα ραβδία και τα κωνία, μερικοί από τους νευρώνες του αμφιβληστροειδούς (γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς) είναι επίσης άμεσα φωτοευαίσθητοι. Αυτά τα εγγενώς φωτοευαίσθητα κύτταρα δημιουργούν την ιδέα ότι η φασματική ευαισθησία των αποκρίσεων που δεν σχηματίζουν εικόνες μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική από εκείνη της όρασης που βασίζεται στα ραβδία και στα κωνία. Δεύτερον, οι εμπειρικές παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι οι κερκαδικές και άλλες φυσιολογικές αποκρίσεις μπορούν πράγματι να έχουν πολύ διακριτή φασματική ευαισθησία [16].

Συνολικά, τα δεδομένα αυτά καταδεικνύουν ότι τα καθιερωμένα φωτομετρικά μέτρα φωτός που χρησιμοποιούν τη συνάρτηση φασματικής στάθμισης $V(\lambda)$, όπως τα φωτοπικά lx , είναι ανεπαρκή για την ποσοτικοποίηση του φωτός που προορίζεται για τη ρύθμιση της μη οπτικής φυσικής και συμπεριφοράς. Δυστυχώς, δεν υπάρχει καθιερωμένη μέθοδος για την μέτρηση των μη οπτικών αποτελεσμάτων του φωτισμού. Η απουσία μιας κατάλληλης, συμφωνημένης μεθόδου μέτρησης του φωτισμού καθιστά δύσκολη την σύγκριση των ευρημάτων ή την επανάληψη των πειραματικών συνθηκών. Αποτελεί, επιπλέον, σημαντικό εμπόδιο για την συσχέτιση των εργαστηριακών ευρημάτων με τις εφαρμογές φωτισμού με αποτέλεσμα να δυσχεραίνει την δυνατότητα της βιομηχανίας φωτισμού και των ρυθμιστικών αρχών να προβλέψουν τις επιπτώσεις διαφορετικών συστημάτων φωτισμού στην συμπεριφορά και τα

φυσιολογικά συστήματα. Το θεμελιώδες πρόβλημα για την αντιμετώπιση αυτής της ανάγκης ήταν η δυσκολία προσδιορισμού μιας φασματικής συνάρτησης στάθμισης (ισοδύναμης με $V(\lambda)$) κατάλληλης για μη οπτικές αποκρίσεις. Για την κατανόηση αυτής της δυσκολίας είναι πρώτα απαραίτητο να γίνει ανασκόπηση της βασικής νευροφυσιολογίας των ipRGCs..

2.3.1 Μετρικά συστήματα μη οπτικών αποτελεσμάτων

Με την είσοδο και την εξερεύνηση των μη οπτικών αποτελεσμάτων του φωτισμού στον άνθρωπο, ο σχεδιασμός του φωτισμού, όπως έγινε αναφορά και στα προηγούμενα κεφάλαια, έχει διαφορετικούς στόχους. Δεν είναι φρόνιμο να δίνεται βαρύτητα μόνο στο οπτικό αποτέλεσμα. Τα κωνία και τα ραβδία αποτελούν φωτοϋποδοχείς για τα οπτικά αποτελέσματα, την ημερήσια και νυχτερινή όραση, και τα συναντάμε στον αμφιβληστροειδή του ανθρώπινου ματιού. Ωστόσο, τα μετρικά συστήματα των μη οπτικών αποτελεσμάτων δεν είναι τόσο γνωστά, ούτε διαδεδομένα και διαφέρουν από τα τυποποιημένα που χρησιμοποιούν στις μέρες μας οι σχεδιαστές φωτισμού.

Οι επιδράσεις των μη οπτικών αποτελεσμάτων συγκεντρώνονται στα γαγγλιακά κύτταρα (ή φωτοϋποδοχείς ipRGCs) που εντοπίζονται και αυτά στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού. Τα συγκεκριμένα φωτοευαίσθητα γαγγλιακά κύτταρα ipRGC είναι φωτοϋποδοχείς που δεν συμβάλουν στην δημιουργία εικόνας, αλλά ρυθμίζουν την ανθρώπινη κίρκαδιανή απόκριση στο φως. Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί των μη οπτικών αποτελεσμάτων, δεν έχουν μέχρι τώρα υποχρεωτικά όρια συμμόρφωσης από κάποια πρότυπα, παρά μόνο από ιδιωτικά σήματα πιστοποίησης του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός κτιρίου. Παρ' όλα αυτά, έχουν ήδη γίνει προτάσεις για μονάδες μέτρησης από τεχνικές οδηγίες της ΕΕ (CEN/TR 16791), της διεθνούς επιτροπής φωτισμού (CIE S026) και διάφορες ερευνητικές ομάδες [3].

2.4 Η απόκριση των γαγγλιακών κυττάρων στο φως.

Η μελανοψίνη (φωτοευαίσθητη πρωτεΐνη στον αμφιβληστροειδή) ουσία των γαγγλιακών κυττάρων είναι δομικά και γενετικά στενά συνδεδεμένη με τις οψίνες των ραβδίων και των κωνίων κυττάρων. Με αυτές τις ραβδοψίνες ο «καταρράκτης φωτομετατροπής» (οπτική φωτομετατροπή είναι η διαδικασία αισθητηριακής μεταγωγής του οπτικού συστήματος μέσω της οποίας ανιχνεύεται το φως, για να δώσει νευρικά ερεθίσματα στα κύτταρα, στα ραβδία και τα κωνία κύτταρα στον αμφιβληστροειδή του ματιού) που σχετίζεται την μελανοψίνη οδηγεί σε κυτταρική αποπόλωση. Ως αποτέλεσμα, η θεμελιώδης απόκριση των ipRGCs στο φως είναι εξαρτώμενη από την φωτεινή ακτινοβολία και τα εξωγενή ραβδία και κωνία.

Η κβαντική απόδοση της μελανοψίνης είναι συγκρίσιμη με εκείνη των οψινών των κωνίων και των ραβδίων. Ωστόσο, τα ipRGCs, δεν διαθέτουν εξειδικευμένα οργανίδια συγκέντρωσης φωτοχρωστικών ενώσεων (όπως έχουν τα εξωτερικά μέρη των ραβδίων και τα κωνίων) για να μεγιστοποιήσουν την πιθανότητα σύλληψης φωτονίων. Ως αποτέλεσμα, η πιθανότητα απορρόφησης ενός φωτονίου είναι 1 εκατομμύριο φορές χαμηλότερη από ότι στα άλλα δυο είδη κυττάρων για μία δεδομένη περιοχή διέγερσης. Κατά συνέπεια, ακόμη και παρόλο που ο «καταρράκτης φωτομεταγωγής» γίνεται πολύ αισθητός στα ipRGC, η φωτοαντίληψη της μελανοψίνης είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητη από εκείνη των ραβδίων ή των κωνίων. Μόλις το κατώφλι για την ενεργοποίηση της μελανοψίνης έχει επιτευχθεί, ωστόσο, η φωτεινή απόκριση κλιμακώνεται όταν η ένταση του φωτισμού αυξηθεί κατά πολύ και διατηρείται όταν υπάρχει μεγάλη διάρκεια σταθερού φωτισμού.

Παρόλο που η φωτομεταγωγή της μελανοψίνης εμπλέκεται μόνο σε μέτρια έως υψηλή ακτινοβολία, οι μη οπτικές αποκρίσεις ipRGCs έχουν ανταπόκριση σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού. Για παράδειγμα, αρχικά θεωρήθηκε ότι απαιτείται φωτισμός 2,500 lx για την καταστολή της νυχτερινής μελατονίνης στους ανθρώπους, αλλά αργότερα μελέτες έδειξαν ότι υπό ορισμένες συνθήκες 1 lx ή και λιγότερο μπορεί να καταστείλει τη μελατονίνη στους ανθρώπους.

Η ευαισθησία του συστήματος αντίληψης των ipRGCs λαμβάνει σήματα από το εξωτερικό του αμφιβληστροειδούς χιτώνα μέσω των ραβδίων και των κωνίων αλλά και των ενδογενών αποκρίσεων στο φως (φωτοαντίληψη μελανοψίνης). Γι' αυτό το μοτίβο πυροδότησης των ipRGCs είναι αρκετά σύνθετο και επεκτείνει σημαντικά το φάσμα των ερεθισμάτων που μπορούν να προκαλέσουν κερκαδιανές και νευροφυσιολογικές αποκρίσεις και εξηγεί γιατί τα ζώα που γενετικά έχουν μηδενικά επίπεδα μελανοψίνης συνεχίζουν να παρουσιάζουν αποκρίσεις που δεν σχηματίζουν εικόνα στο φως [16].

2.5 Σύνδεση του ανθρωποκεντρικού φωτισμού με τον κερκαδικό κύκλο.

Οι παραπάνω βιολογικοί κύκλοι (κερκάδιοι κύκλοι) πραγματοποιούνται καθημερινά και ρυθμίζονται από ερεθίσματα του περιβάλλοντος. Η εναλλαγή του φωτός μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι ο σημαντικότερος κύκλος και η οποία μεταφέρεται στο πίσω μέρος του ματιού και μετατρέπεται σε νευρικά σήματα για τον συγχρονισμό του βιολογικού ρολογιού του σώματος με τον τοπικό χρόνο. Αν αυτός ο συγχρονισμός δεν γίνει, ο άνθρωπος βρίσκεται σε κίνδυνο. Αυτό συμβαίνει διότι ο άνθρωπος ενδέχεται να αντιμετωπίζει μακροχρόνιες επιπλοκές στην φυσιολογική λειτουργία του, την απόδοση της νευρολογικής λειτουργίας και τον ύπνο διατρέχοντας έτσι και μεγαλύτερο κίνδυνο για καρδιαγγειακές παθήσεις καθώς και διαβήτη.

Επίσης, τα αισθήματα που δημιουργούνται σε έναν άνθρωπο από την ατμόσφαιρα που επικρατεί στον χώρο που βρίσκεται, ανήκουν στα μη οπτικά αποτελέσματα του φωτισμού. Για παράδειγμα, μια ευχάριστη, ασφαλής καθώς και οικεία ατμόσφαιρα, η οποία παρέχει ένα χαμηλό και ομοιόμορφο επίπεδο φωτισμού, θα χαλαρώνει το άτομο. Αντίθετα, μια ατμόσφαιρα με έντονες αντιθέσεις φωτισμού και απότομες εναλλαγές φωτεινών και σκοτεινών περιοχών δημιουργεί υπερένταση. Ο φωτισμός θερμοκρασίας < 3,300 K προκαλεί σημαντικά πιο ευχάριστα συναισθήματα καθώς συνδέεται με την αύξηση αντίληψης, άνεσης και την μείωση της έντασης.

Το παραπάνω σύνολο των παραμέτρων σχεδιασμού που περιλαμβάνουν τα οπτικά και μη οπτικά αποτελέσματα του φωτισμού αποτελούν τον Ανθρωποκεντρικό Φωτισμό (Human Centric Lighting, HCL). Ο Α.Φ θεωρείται ο καταλληλότερος φωτισμός την πιο κατάλληλη στιγμή, δηλαδή προσφέρει την απαιτούμενη ποσότητα φωτισμού αλλά και τα κατάλληλα μήκη κύματος (εννοώντας αυτό που το μάτι καταλαβαίνει σαν χρώμα) για τις ατομικές ανάγκες διαβίωσης και εργασίας κατά την διάρκεια όλης της ημέρας. Σε γενικές γραμμές, ο φωτισμός έχει μια σειρά από επιδράσεις στον άνθρωπο όπως είναι η οπτική, η συναισθηματική και βιολογική. Ο ΑΦ στοχεύει να έχει θετική επίδραση στην υγεία, στην ευημερία αλλά και στην παραγωγικότητα του ατόμου [3].

2.6 Ορισμός του Ανθρωποκεντρικού φωτισμού, HCL

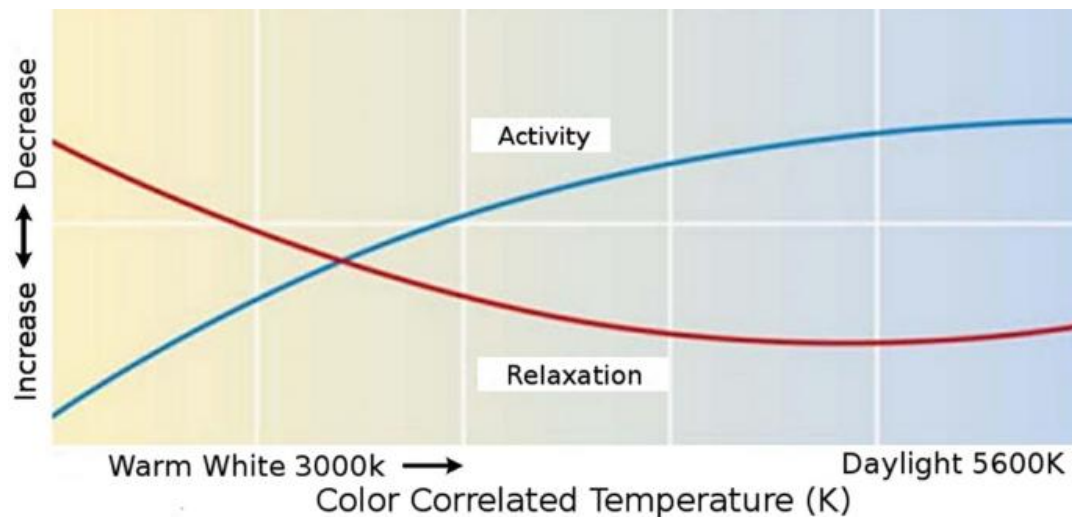
Ο όρος Ανθρωποκεντρικός φωτισμός (HCL-Human Centric Lighting) αναπτύχθηκε το 2010 και χρησιμοποιείται εντατικά από το 2013 για να δείξει ότι ο φωτισμός πρέπει να υπερβαίνει την όραση και την εξοικονόμηση ενέργειας. Το φως πρέπει να εστιάζει στις ανθρώπινες ανάγκες

και να υποστηρίζει όλες τις πτυχές της ανθρώπινης διαβίωσης, όσο το φως μπορεί να το κάνει αυτό. Βάζει τους ανθρώπους στο κέντρο του σχεδιασμού φωτισμού και είναι συντομευμένο συνώνυμο της ανάγκης να συμπεριληφθούν οι οπτικές, βιολογικές και συναισθηματικές πτυχές του φωτός στο σχεδιασμό φωτισμού. Όπως γίνεται και αναφορά από την ZVEI (ZVEI - Κεντρική Ένωση Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Βιομηχανίας Ηλεκτρονικών), ο ανθρωποκεντρικός φωτισμός παρέχει στοχευμένη υποστήριξη στον άνθρωπο λαμβάνοντας υπόψιν τις οπτικές, συναισθηματικές και ειδικότερα τις βιολογικές επιδράσεις του φωτός πάνω του [17].

Το δυναμικό του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού αποδείχτηκε για πρώτη φορά σε οίκους ευγηρίας. Η επιτυχία και η βελτίωση της κατάστασης του κατοίκου με καλύτερο φως, το οποίο υποστηρίζει ειδικά εκείνους που δεν είναι πλέον σε θέση να φύγουν από το σπίτι, ήταν τόσο ξεκάθαρη και εντυπωσιακή, που οι λύσεις HCL, συμπεριλαμβανομένου του φωτός της ημέρας και του τεχνητού φωτισμού, εξελίχθηκαν σε ένα είδος προτύπου στους σύγχρονους οίκους ευγηρίας. Αυτό επεκτάθηκε σε πολλά περισσότερα πεδία εφαρμογών αφού έγιναν διάφορες μελέτες, οι οποίες έδειξαν σταθερά αποτελέσματα σε διάφορες εφαρμογές: από σχολεία και νοσοκομεία, έως γραφεία, εργοστάσια και ιδιωτικές κατοικίες. Κάθε μέρος όπου οι άνθρωποι περνούν το χρόνο τους σε εσωτερικούς χώρους χωρίς επαρκές φως της ημέρας, είναι ένα μέρος για HCL. Στα νοσοκομεία, για παράδειγμα, η έρευνα έχει αποδείξει ότι ο φωτισμός πιο κοντά στον φυσικό φωτισμό υποστηρίζει ουσιαστικά την περίθαλψη και την ανάρρωση. Βοηθά στην αποκατάσταση των μοτίβων ύπνου σε μονάδες εντατικής θεραπείας και αποτρέπει την κατάθλιψη. Στα σχολεία, οι μαθητές και οι εκπαιδευτικοί επωφελούνται από τα επίπεδα φωτισμού προσανατολισμένα στο φως της ημέρας. Αυξάνεται η συγκέντρωση και η εγρήγορση, ενώ τα χαμηλότερα επίπεδα φωτός μπορούν να υποστηρίξουν τη χαλάρωση δημιουργώντας ένα ήρεμο περιβάλλον. Επίσης, στο εργασιακό περιβάλλον, ο HCL βοηθά τους εργαζόμενους να αποδίδουν καλύτερα και να κάνουν τη δουλειά τους με επιτυχία και χωρίς να αισθάνονται πολύ εξαντλημένοι στο τέλος της ημέρας. Συμπερασματικά, γίνεται απόλυτα κατανοητό ότι, σύμφωνα με τον HCL, ο σχεδιασμός του φωτισμού πρέπει να χρησιμοποιεί το φως με σωστό τρόπο, ώστε ο χρήστης να παίρνει το μέγιστο δυνατό όφελος από αυτό.

Ο φυσικός φωτισμός προσφέρει ιδανικές συνθήκες για να διατηρηθεί το φυσικό, βιολογικό ανθρώπινο ρολόι. Ωστόσο, ο σύγχρονος τρόπος ζωής μας έχει μειώσει πολύ την παρουσία μας στο εξωτερικό περιβάλλον με αποτέλεσμα το ερέθισμα για την ρύθμιση του κιρκάδιου ρυθμού να πρέπει να δίνεται με τεχνητού φωτισμό ή ακόμα καλύτερα με συνδυασμό φυσικού και τεχνητού φωτισμού.

Η εγρήγορση του ανθρώπινου οργανισμού δεν πρέπει να πραγματοποιείται πέραν του απογεύματος γιατί η κατάσταση της εγρήγορσης θα μετατραπεί σε μία στρεσογόνο κατάσταση με αποτέλεσμα τη δημιουργία δυσάρεστων καταστάσεων για τον ανθρώπινο οργανισμό. Ένα πλούσιο φάσμα σε μπλε ακτινοβολία, που αντιστοιχεί σε μία πηγή με συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος 5,000 K, προκαλεί εγρήγορση, ενώ ένα πλούσιο φάσμα σε κόκκινη ακτινοβολία, όπως αυτό που αντιστοιχεί συνήθως σε μια φωτεινή πηγή με συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος 2,800 K, δημιουργεί χαλάρωση (Σχήμα 2.1) [3].



Σχήμα 2.1: Μια φωτεινή πηγή με θερμοκρασία χρώματος περίπου 5.000 K βοηθά στην εγρήγορση και είναι κατάλληλη για δραστηριότητες, ενώ μια πηγή με 2.800 K δημιουργεί πιο χαλαρή ατμόσφαιρα.

2.7 Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού

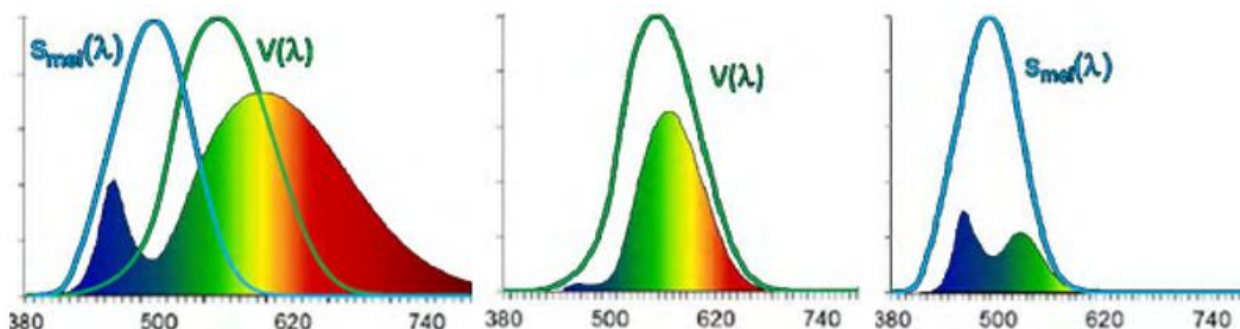
Το φως είναι ένα μέσο το οποίο διατηρεί τους κirkάδιους ρυθμούς σε συγχρονισμό. Η διαδικασία αυτή διευκολύνεται από εγγενώς φωτοευαίσθητα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς (ipRGCs). Οι βιολογικές επιδράσεις του φωτός στον άνθρωπο μπορούν να μετρηθούν σε Equivalent Melanopic Lux (EML) ή αλλιώς Ισοδύναμη Μελανοπική Ένταση Φωτισμού. Η EML σταθμίζεται στην απόκριση των ipRGC στο φως και καταδεικνύει πόσο το φάσμα μιας πηγής φωτισμού θα διεγείρει τα κύτταρα αυτά, ώστε να επηρεάζουν το κirkαδικό σύστημα του ανθρώπου Σχήμα 2.2 [3].



Σχήμα 2.2: Σύνολο των παραμέτρων για έναν ορθό ανθρωποκεντρικό φωτισμό. (TOTEE)

Η πιο μεγάλη μελέτη πάνω στις μονάδες αυτές γίνεται από το σύστημα ποιότητας εσωτερικών περιβάλλοντος κτιρίων (Well Building Standard), το οποίο έχει ως στόχο την υγεία αλλά και ευεξία των ατόμων και, ενώ επεκτείνει την έρευνα του στον Α.Φ., δεν εστιάζει αποκλειστικά στην εξοικονόμηση της ενέργειας. Το Well Building Standard βασίζεται στα ισοδύναμα melanopic lx (EML) και ορίζει τα όρια σύμφωνα με το κάθετο στο επίπεδο των ματιών, αντί για το οριζόντιο επίπεδο. Με την χαμηλότερη τιμή ορίζονται τα 200 EML με ανάμιξη φυσικού και τεχνητού φωτισμού, αλλιώς 150 EML από την χρήση αποκλειστικά του τεχνητού φωτισμού, με την προϋπόθεση φυσικά ότι οι απαιτήσεις σχεδιασμού για το επίπεδο της έντασης του φωτισμού στο επίπεδο εργασίας έχει καλυφθεί. Ο ορισμός της τιμής

της EML δίνεται από το γινόμενο της έντασης φωτισμού (L , L_x) με έναν συντελεστή R , ή MEER (μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, Melanopic Equal-energy Efficacy Ratio) που συνιστούν την αναλογία της ανταπόκρισης των ipRGC σε σχέση με την φωτοπική απόκριση για κάθε εξεταζόμενη πηγή-φάσμα ($EML = L(x) \cdot MEER$). Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές της μελανοπικής αναλογίας, ενώ στον Πίνακα 2.2 δίνεται μια αντιστοίχιση επιπέδων έντασης φωτισμού 100 lx με επίπεδα ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού (EML) για κάποιες πηγές φωτισμού.



Σχήμα 2.3: Γραφική παρουσίαση του υπολογισμού του τμήματος της ακτινοβολίας μιας φωτεινής πηγής (αριστερή παράσταση) που χρειάζεται για τον καθορισμό της έντασης φωτισμού (lx) (μεσαία παράσταση) και της ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού (EML) (δεξιά παράσταση).

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα τιμών του συντελεστή MEER ή R (Μελανοπική Αναλογία Ίσης Ενεργειακής Απόδοσης) για διαφορετικές τεχνολογίες φωτιστικών πηγών και για διάφορες τιμές συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος.

A/A	Τεχνολογία φωτεινής πηγής	Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος [K]	Μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, MEER ή R
1	LED	2,700	0.45
2	Φθορισμός	3,000	0.45
3	Αλογόνου πυράκτωσης	2,800	0.54
4	Φθορισμός	4,000	0.58-0.62
5	LED	4,000	0.74-0.76
6	Πρότυπη πηγή CIE E	5,450	1
7	Φθορισμός	6,500	1.02
8	Φυσικός φωτισμός	6,500	1.10
9	Φθορισμός	7,500	1.11

Πίνακας 2.2 Υπολογισμός της αντίστοιχης μελανοπικής έντασης φωτισμού για κάθε 100 lx φωτισμού, ανάλογα με την πηγή φωτός.

A/A	Τεχνολογία φωτεινής πηγής	Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (Κ)	Ένταση φωτισμού (lx)	Ισοδύναμη μεελανοπική ένταση φωτισμού (EML)
1	Illuminant P (φωτισμόςκεριού)	1,800	100	30
2	Φθορισμός	2,700	100	38
3	Standard illuminant A	2,856	100	55
4	Αλογόνου πυράκτωσης	3,000	100	56
5	Φθορισμός	3,000	100	45
6	LED	3,000	100	45
7	Φθορισμός	4,000	100	58-62
8	LED	4,000	100	74-76
9	LED	5,400	100	87
10	D55	5,500	100	100
11	Standard illuminant D65	6,500	100	110
12	LED	6,500	100	88
13	Φθορισμός	8,000	100	106

2.8 Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού φωτισμού

Για να καθοριστούν οι παράμετροι των μη οπτικών αποκρίσεων του φωτισμού, πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα τελευταία 20 χρόνια, με περισσότερες δραστηριότητες να έχουν γίνει στο χρονικό διάστημα μεταξύ 2016 με 2022. Έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες διεθνείς επιστημονικές συζητήσεις και πειράματα για να γίνει προσδιορισμός των σωστών μετρικών συστημάτων για τα μη οπτικά αποτελέσματα, κάνοντας χρήση συνόλων δεδομένων από πειράματα διαφορετικών ερευνητικών ομάδων σχετικά με την νυχτερινή καταστολή της μελατονίνης ως βάση. Οι Rea et al καθόρισαν και βελτίωσαν το μοντέλο του CS-κικκάδιου ερεθίσματος (έκδοση 2018) τα δύο έτη 2020 και 2021, όπου συνυπολογίζουν τον χρόνο έκθεσης t και το οπτικό πεδίο, καθώς επίσης, μοντελοποίησαν τις συνεισφορές του ipRGCs, των κωνίων και των ραβδίων (L+M). Αυτή η βελτιωμένη διατύπωση επικυρώθηκε με την χρήση της καταστολής της μελατονίνης. Η μέθοδος μέτρησης της παραμέτρου του CS (κικκάδιου ερεθίσματος) στην έκδοση του 2018 ήταν δημοσιευμένη από τους Truong κα. Επίσης, η διεθνής επιτροπή για τον φωτισμό (CIE) και επιστήμονες στους τομείς της νευροφυσιολογίας, της έρευνας γύρω από τον ύπνο και της τεχνολογίας φωτισμού, έχουν καταβάλει προσπάθειες για να βρουν αποτελεσματικές παραμέτρους με βάση την αξιολόγηση των πέντε φωτοϋποδοχέων (κωνία L-M-S, ραβδία, γαγγλιακά κύτταρα ipRGC) και των αντίστοιχων εργαλείων υπολογισμού.

Όλες αυτές οι επιστημονικές διαδικασίες οδήγησαν στους ορισμούς του Μελανοπικού Ισοδύναμου Φωτισμού Ημερήσιου Φωτός (D65-mDEI) και του «λόγου αποδοτικότητας μελανοπικού ημερήσιου φωτός» (D65) mDER. Αυτοί οι ορισμοί έχουν αναγνωριστεί και χρησιμοποιούνται από διεθνείς εμπειρογνώμονες εδώ και αρκετά χρόνια. Με παρόμοια θέματα έχει ασχοληθεί το πρότυπο WELL Building Standard V2, το οποίο περιλαμβάνει συστάσεις για την μελανοπική ισοδύναμη φωτεινότητα ημέρας (mEDI) > 136, 109, 218 ή ανάλογα με το τύπο της πηγής φωτός). Επιπλέον, οι διεθνείς ερευνητές ύπνου και οι επιστήμονες της νευρολογίας έκαναν ορισμένες συστάσεις το 2022 σχετικά με τις μη οπτικές επιδράσεις του φωτός, τις φυσιολογικές πτυχές, τον ύπνο και την εγρήγορση με βάση τις βιβλιογραφικές τους ανασκοπήσεις. Οι φυσιολογικές πτυχές περιλάμβαναν την ορμονική

ρύθμιση του κύκλου, τον καρδιακό ρυθμό, τη θερμοκρασία του πυρήνα του σώματος και ορισμένες εγκεφαλικές δραστηριότητες. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα ήταν τα εξής:

(α) Συστάσεις για τον ημερήσιο φωτισμό σε εσωτερικούς χώρους: καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, η συνιστώμενη ελάχιστη μελανοπική EDI (Equivalent Daylight Illuminance) είναι 250 lx στο μάτι, μετρούμενα στο κατακόρυφο επίπεδο, στο ύψος περίπου 1.2 m (δηλαδή, η κατακόρυφη ένταση φωτισμού στο επίπεδο των ματιών όταν το άτομο κάθεται σε μια κλασική θέση γραφείου).

(β) Συστάσεις βραδινού φωτισμού για κατοικίες και άλλα εσωτερικά περιβάλλοντα: Κατά τη διάρκεια του βραδιού, ξεκινώντας τουλάχιστον 3 ώρες πριν από την ώρα του ύπνου, η συνιστώμενη μέγιστη μελανοπική EDI είναι 10 lx, μετρούμενα στο μάτι στο κατακόρυφο επίπεδο, σε ύψος περίπου 1.2 m. Για να μπορεί να επιτευχθεί αυτό, όπου είναι δυνατόν, το λευκό φως θα πρέπει να έχει φάσμα που εξαντλείται σε μικρά μήκη κύματος κοντά στην κορυφή του μελανοπικού φάσματος δράσης.

(γ) Συστάσεις για το νυχτερινό φως στο περιβάλλον ύπνου: Το περιβάλλον ύπνου θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σκοτεινό. Το συνιστώμενο μέγιστο μελανωπικό EDI περιβάλλοντος είναι 1 lx μετρούμενο στο μάτι.

Η πρώτη σύσταση, με ελάχιστη τιμή "μελανοπικό EDI = Melanopic Equivalent φωτεινότητας ημέρας (D65), mEDI" των 250 lx μετρούμενη κάθετα στο μάτι του παρατηρητή, είναι σχετική και παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τον επαγγελματικό τομέα κατά τη διάρκεια της ημέρας (γραφεία, βιομηχανίες, αίθουσες, εγκαταστάσεις εκπαίδευσης και υγείας). Οι άλλες δύο συστάσεις αφορούν τις βραδινές ώρες στο σπίτι [18]. Το WELL Building Institute συνιστά 240 ισοδύναμο μελανοπικό lx (EML, ισοδύναμο με περίπου 217 μελανοπική EDI) [19]. Η ισοδύναμη μελανοπική φυσικού φωτισμού (Melanopic Daylight Equivalent Illuminance MDEI) ορίζεται ως το γινόμενο της κάθετης έντασης φωτισμού (LV, lx) και του MDER (Melanopic Daylight Efficacy Ratio), με απλή σχέση $mV_{mel,D65}$ ($MDEI = LV(lx) \cdot MDER$). Το όριο για ενεργοποίηση του κirkάδιου ερεθίσματος έχει διατυπωθεί με την ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού φωτισμού στην τιμή των 240 lx (DIN SPEC 5031-100). Κάποιες ενδεικτικές τιμές MDER ή $mV_{mel,D65}$ καθώς και η αντιστοίχιση επιπέδων κάθετης έντασης φωτισμού 100 lx σε ύψος 1.2 m με επίπεδα ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φυσικού φωτισμού (MDEI ή $E_{V,mel,D65}$) για διάφορες πηγές φωτισμού παρατίθενται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακα 2.3). Πολλές εταιρίες που εξειδικεύονται στην παραγωγή φωτιστικών σωμάτων παραδίδουν μαζί με τα φωτομετρικά δεδομένα και τους αντίστοιχους πίνακες τιμών MDER για τον υπολογισμό της ενεργοποίησης του κirkάδιου ερεθίσματος.

Πίνακας 2.3: Παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές του MDER για διαφορετικές τεχνολογίες φωτεινών πηγών και αντίστοιχες συσχετισμένες θερμοκρασίες χρώματος. Επιπλέον, υπολογίζεται η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού φωτισμού ανά 100 lx φωτισμού για διάφορους τύπους πηγών, καθώς και οι ελάχιστες απαιτούμενες τιμές κάθετης έντασης φωτισμού ($L_{v,MDEI}$) που απαιτούνται για την πρόκληση κirkάδιου ερεθίσματος ($MDEI$ ή $E_{v,mel,D65} > 240 \text{ lx}$).

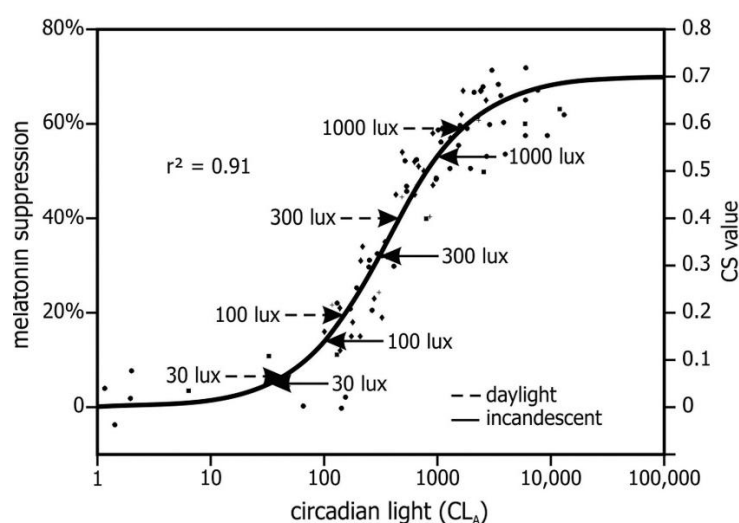
Τεχνολογία φωτεινής πηγής	Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT[K]	Συντελεστής MDER	Ένταση φωτισμού [lx]	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού φωτισμού (MDEI)	Ελάχιστες τιμές κάθετης έντασης φωτισμού $L_{v,MDEI}$ [lx]
Illuminant P (φωτισμός κεριού)	1,800	0.267	100	27	899
Φθορισμός	2,700	0.348	100	35	690
Standard illuminant A	2,856	0.496	100	50	484
Πυράκτωσης αλογόνου	3,000	0.507	100	51	474
Φθορισμός	3,000	0.404	100	40	595
LED	3,000	0.408	100	41	589
Φθορισμός	4,000	0.563	100	56	426
LED	4,000	0.672	100	67	357
LED	5,400	0.787	100	79	305
D55	5,500	0.904	100	90	265
Standard illuminant D65	6,500	1.00	100	100	240
LED	6,500	0.800	100	80	300
Φθορισμός	8,000	0.958	100	96	251

2.9 Κιρκαδικό ερέθισμα

Το κέντρο φωτισμού Lighting Research Center του πανεπιστημίου Rensselaer Polytechnic Institute στις ΗΠΑ, μετά από έρευνες του προτείνει ένα άλλο μετρητικό σύστημα για τον κιρκάδιο φωτισμό, το Circadian Stimulus (CS)- κιρκαδικό ερέθισμα. Αξίζει να σημειωθεί πως η πρώτη του αναφορά έγινε το 2005, ενώ η μέτρηση του κιρκαδικού ερεθίσματος κατέχει καθοριστικό ρόλο στο τομέα σχεδιασμού του φωτισμού ενός υγιούς κτιρίου. Το κιρκαδικό ερέθισμα (CS) είναι θεωρητικά ένα μέτρο καταστολής της μελατονίνης και αποτελεί μια παράμετρο που ρυθμίζει τους κιρκάδιους κύκλους [3].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, ο κορεσμός του κιρκάδιου ερεθίσματος που προκαλείται από το φως της ημέρας παρατηρείται στην τιμή 0.7, ενώ και άλλες μεταβλητές επηρεάζουν την

καταστολή της μελατονίνης. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες (Figueiro et al., 2017), μία τιμή CS ίση με 0.3 κατά τις πρωινές ώρες είναι κατάλληλη για την προώθηση ενός καλού κιρκάδιου συγχρονισμού [20].



Σχήμα 2.4: Η σχέση που συνδέει τα φασματικά σταθμισμένα επιπέδα κιρκάδιου φωτός (CLA) και των μετρούμενων επιπέδων νυχτερινής καταστολής μελατονίνης (Figueiro et al., 2011).

2.9.1 Υπολογισμός κιρκάδικου ερεθίσματος

Για να διαπιστωθεί ότι ένα σύστημα φωτισμού θα δώσει μια καθορισμένη ποσότητα φωτισμού (κιρκάδιου φωτισμού) για το κιρκάδικο σύστημα, θα πρέπει να προσδιοριστεί η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας του φωτός που προσπίπτει στον κερατοειδή χιτώνα. Από αυτή την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας είναι δυνατός ο υπολογισμός του κιρκάδιου φωτός CLA. Θεωρητικά, είναι η ακτινοβολία που δέχεται ο κερατοειδής σταθμισμένη ώστε να αντανakλά την φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου κιρκάδιου συστήματος, όπου μετριέται με οξεία καταστολή μελατονίνης μετά από έκθεση μιας ώρας. Η σταθμισμένη φασματικά ακτινοβολία στον κερατοειδή (κιρκάδικο ερέθισμα) έχει κατώφλι (CS = 0.1) έως κορεσμό (CS = 0.7). Παράλληλα, μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε πάνω σε ασθενείς με νόσο αλτσχάιμερ, σε εργαζομένους γραφείου και υγιή άτομα, εξήγαγε το συμπέρασμα ότι οι ηλικιωμένοι δείχνουν ότι η έκθεση σε CS = 0.3 ή μεγαλύτερο στο μάτι για τουλάχιστον μια ώρα στις αρχές της ημέρας είναι αρκετό για να τους τονώσει το κιρκάδιο σύστημα, το οποίο μεταφράζεται σε καλύτερο ύπνο και καλύτερη συμπεριφορά και ανεβασμένη διάθεση [21].

Στους χώρους εργασίας προτείνονται πηγές φωτός και επίπεδα φωτός που θα αυξήσουν τη δυνατότητα για κατάλληλη έκθεση σε κιρκάδιο φως στις εγκαταστάσεις την κατάλληλη στιγμή. Για τις πρωινές ώρες οι τιμές που προτείνονται είναι μεγαλύτερες από το CS = 0.1 [3].

Οι υπολογισμοί έχουν μειονέκτημα ότι απαιτούν τα φάσματα των πηγών φωτισμού, διότι η συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (CCT) δεν συγκροτεί κύριο κριτήριο για να καθοριστεί το αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά, οι πηγές με συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος μεγαλύτερη των 5,000 K προσφέρουν μεγαλύτερες τιμές CS, αλλά είναι κάτι που δεν αποτελεί κανόνα: για παράδειγμα, δυο πηγές που έχουν ίδια Σ.Θ.Χ π.χ. 4,000 K, μπορεί να τύχει να δίνουν διαφορετικές τιμές CS ανάλογα με τα φάσματα τους. Γενικά, τα χαμηλά

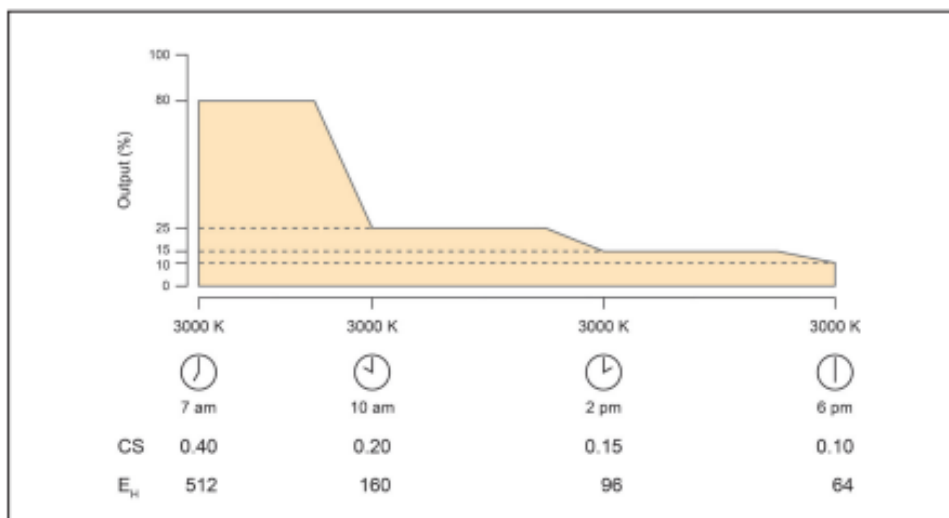
επίπεδα φωτισμού πετυχαίνουν χαμηλές τιμές CS εκτός και αν αντισταθμιστούν με πηγές πλούσιες σε μπλε χρώμα (ψυχρές πηγές > 5,300 K). Αν υποτεθεί ότι έχουμε μια πηγή με θερμοκρασία χρώματος 6,000 K και επίπεδο φωτισμού 3,000 lx, η συγκεκριμένη πηγή παράγει ίδια τιμή CS = 0.3 με μια πηγή με θερμοκρασία χρώματος 4,500 K και επίπεδα φωτισμού 400 lx [3].

Κάποιοι κανόνες για τον σχεδιασμό φωτισμού (φωτοτεχνικές μελέτες) λαμβάνοντας υπόψιν το κίρκαδικό ερέθισμα είναι οι εξής:

Α) Θα πρέπει να συγκεντρωθούν τα SPD (spectral power distribution) στη φασματική κατανομή ισχύος των φωτεινών πηγών που είναι υπό εξέταση και προσέχουμε να μην βασιστούμε στο CCT τους. Αν και τις περισσότερες φορές οι πηγές φωτός με υψηλότερη θερμοκρασία (5,000 K - 6,500 K) προσφέρουν μεγαλύτερο CS, αυτό δεν συμβαίνει πάντα, καθώς υπάρχουν και πηγές με 3,500 K που προσφέρουν μικρότερη τιμή CS από πηγές με 3,000 K. Επιπλέον, μπορεί να αξιολογηθούν δυο πηγές με ίδια συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος και να παρέχουν πολύ διαφορετικές τιμές CS ανάλογα με τα SPD τους.

Β) Το επίπεδο φωτισμού και το φάσμα είναι δυο πλευρές στο ίδιο νόμισμα. Τα χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού θα παρέχουν σχετικά χαμηλότερες τιμές CS, εκτός εάν αντισταθμιστούν από ένα SPD με μεγαλύτερη ισχύ σε μικρότερα μήκη κύματος. Εάν υπάρχουν περιορισμοί σχεδιασμού, όπως τα σταθερά επίπεδα οριζόντιου φωτισμού στο επίπεδο εργασίας, τότε θα πρέπει να επιλέγεται μια πηγή που θα εκπέμπει περισσότερο φως μικρού μήκους κύματος. Μετά από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι όταν στοχεύουμε σε έναν οριζόντιο φωτισμό σε επίπεδο εργασίας 300 lx, για παράδειγμα ένα SPD που εκπέμπει περισσότερο φως μικρού μήκους κύματος (CCT 6,000 K), αυτός ήταν ικανός για την επίτευξη στόχου CS = 0.3, ενώ για ένα επίπεδο φωτισμού 400lux, ένα SPD που εκπέμπει μεγαλύτερο μήκος κύματος (CCT 4,500 K), το φως είναι ικανό να φτάσει στο ίδιο CS.

Γ) Το φως κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας είναι επίσης σημαντικό. Αν και το πρωινό φως είναι απαραίτητο για τον κίρκαδικό συγχρονισμό (circadian entrainment), το φως σε άλλες ώρες της ημέρας μπορεί να προκαλέσει άμεση διεγερτική (alerting) επίδραση στους ανθρώπους, κάτι που ίσως να μην είναι πάντα επιθυμητό. Οι άνθρωποι δεν πρέπει να μένουν στο σκοτάδι καμία στιγμή της ημέρας. Ωστόσο, εάν ο χώρος χρησιμοποιείται και το βράδυ, το σύστημα φωτισμού πρέπει να χαμηλώνει (dimming) ή να ρυθμίζεται η φασματική κατανομή του (SPD – Spectral Power Distribution), ώστε να εκπέμπει λιγότερο CS. Παρακάτω στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα χρονοδιάγραμμα που πρέπει να αποτελεί μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού και αλλάζει ανάλογα την εφαρμογή.



Σχήμα 2.5: Οι μεταβολές στις τιμές του Κιρκαδικού Ερεθίσματος (CS) μπορούν να επιτευχθούν απλά με την αύξηση ή μείωση της φωτεινής έντασης του συστήματος, διατηρώντας σταθερή τη Συσχετισμένη Θερμοκρασία Χρώματος (CCT). Το πρόγραμμα που παρουσιάζεται εδώ αποτελεί ένα συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής και όχι έναν γενικό κανόνα.

Δ) Ακόμα όταν γίνεται σχεδιασμός φωτισμού που να υπολογίζει το κιρκαδικό ερέθισμα θα πρέπει να εξετάζεται για ποια άτομα προορίζεται η χρήση του χώρου. Συστήματα φωτισμού σε σχολεία θα είναι διαφορετικά από ότι είναι στα γηροκομεία, καθώς τα παιδιά κοιμούνται αργά την νύχτα και δεν ξυπνάνε νωρίς ενώ οι μεγαλύτερης ηλικίας ενήλικες ξυπνάνε νωρίς και κοιμούνται νωρίς.

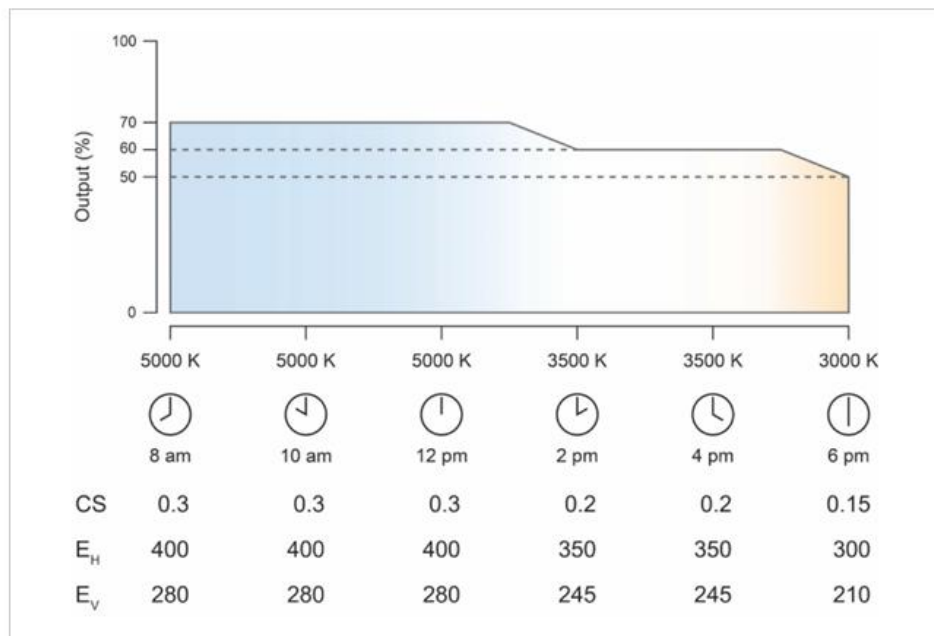
Ε) Σε περιπτώσεις που περιορισμοί στην σχεδίαση ενός συστήματος φωτισμού, εμποδίζουν την επίτευξη των στόχων όσο αναφορά το CS, μπορούν να χρησιμοποιούνται LED με κορεσμένο μπλε (π.χ μήκος κύματος κορυφής = 470 nm) για να ενισχυθεί το CS. Ενώ μια άλλη σχετικά απλή σχεδιαστική λύση θα ήταν η εγκατάσταση φωτεινών διαχωριστικών σταθμών εργασίας για την παροχή επιπλέον CS σε κάποιους χώρους (Εικόνα 2.2Α). Τα φωτεινά διαχωριστικά στους σταθμούς εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν παραπάνω κιρκαδικό ερέθισμα (CS) στους ανθρώπους που βρίσκονται στον χώρο, δηλαδή να ενισχύσουν την επίδραση του φωτός στο βιολογικό τους ρολόι. Αντίθετα για τη μεσημεριανή μείωση της εγρήγορσης μετά το φαγητό, όπου το CS δεν είναι απαραίτητα ο κύριος στόχος σχεδιασμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κόκκινο φωτεινό διαχωριστικό, το οποίο προσφέρει διεγερτική (alerting) επίδραση – παρόμοια με αυτή που δίνει ένας καφές – χωρίς όμως να αυξάνει το CS των ατόμων (Εικόνα 2.2Β). Τα κόκκινα διαχωριστικά συμβάλλουν στην ενίσχυση της εγρήγορσης και της δραστηριότητας, χωρίς να επηρεάζουν τον κιρκαδικό ρυθμό, στοιχείο σημαντικό όταν δεν επιδιώκεται μεταβολή του βιολογικού ρολογιού. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι το κόκκινο φως, το οποίο δεν καταστέλλει τη μελατονίνη κατά τη νύχτα, μπορεί να έχει άμεση διεγερτική δράση [21].



Εικόνα 2.2Α: Μπλε διαχωριστικό σε γραφεία.



Εικόνα 2.2Β: Κόκκινο διαχωριστικό σε γραφεία.



Σχήμα 2.6: Τα tunable luminaires (ρυθμιζόμενα φωτιστικά σώματα που μπορούν να αλλάξουν χρώμα (φάσμα) και ένταση φωτισμού ανάλογα με τις ανάγκες) μπορούν να προγραμματιστούν και να προσφέρουν εξατομικευμένες λύσεις ανάλογα με την ώρα της ημέρας.

2.10 Οικονομική και Κοινωνική διάσταση του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού

Ο ανθρωποκεντρικός φωτισμός δεν περιορίζεται σε τεχνικό ή αισθητικό επίπεδο· έχει έντονη οικονομική και κοινωνική προέκταση. Σύμφωνα με μελέτη της A.T. Kearney, η αγορά του HCL στην Ευρώπη υπολογιζόταν ήδη από το 2013 ότι θα μπορούσε να φτάσει τα 1.4 δισ. € μέχρι το 2020, καλύπτοντας περίπου το 7 % της συνολικής αγοράς φωτισμού και έως το 25 % του «premium» τμήματος της αγοράς. Παράλληλα, μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή του HCL σε εργασιακούς χώρους μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα έως και 7.7 %, κάτι που για μια μικρή ομάδα εργαζομένων μπορεί να μεταφραστεί σε επιπλέον χιλιάδες ευρώ κέρδους ετησίως [22].

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναγνωρίσει τον HCL ως στρατηγικό τομέα και τον εντάσσει στον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό της βιομηχανίας φωτισμού. Η πρωτοβουλία LightingEurope, η οποία εκπροσωπεί περισσότερες από 1,000 εταιρείες του κλάδου, προωθεί τον ανθρωποκεντρικό φωτισμό ως εργαλείο που συνδυάζει καινοτομία, ενεργειακή αποδοτικότητα και ευεξία εργαζομένων. Παρότι δεν υπάρχει ακόμη ενιαίο ευρωπαϊκό πρότυπο για τον HCL, γίνονται προσπάθειες εναρμόνισης κανονισμών ώστε να ενσωματωθεί σε πρότυπα οικολογικού σχεδιασμού και βιώσιμων κτιρίων [22]. Ενδεικτικά, το πρόγραμμα της Ε.Ε. WEL-LED-BEING χρηματοδοτείται για να αναπτύξει νέα φωτιστικά LED με υψηλή χρωματική πιστότητα και χαρακτηριστικά ανθρωποκεντρικού φωτισμού [23].

Η κοινωνική διάσταση είναι ακόμη πιο καθοριστική. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, μέσω της Διεθνούς Υπηρεσίας Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC), έχει χαρακτηρίσει τη μακροχρόνια νυχτερινή εργασία ως «πιθανώς καρκινογόνο», λόγω της διαταραχής του κιρκαδικού ρυθμού [24]. Αυτό δείχνει ότι ο φωτισμός δεν επηρεάζει μόνο την άνεση και την απόδοση, αλλά και τη δημόσια υγεία. Επιπλέον, διεθνείς οργανισμοί όπως το World Green Building Council αναδεικνύουν ότι ο σωστός φωτισμός βελτιώνει την ψυχολογική διάθεση, μειώνει τις ημέρες απουσίας λόγω ασθένειας και ενισχύει την ευεξία των εργαζομένων [25]. Με άλλα λόγια, η επένδυση σε HCL δεν είναι μόνο τεχνολογική και οικονομική επιλογή· αποτελεί και μέτρο κοινωνικής πολιτικής που μπορεί να αναβαθμίσει ουσιαστικά την ποιότητα ζωής.

Κεφάλαιο 3^ο - Πειραματικό μέρος

3.1 Μέθοδοι υπολογισμού, EML, MDEI, CS

Οι οπτικές επιδράσεις του φωτός βασίζονται στους δύο κλασικούς τύπους φωτοϋποδοχέων, τα ραβδία και τα κωνία, οι οποίοι έχουν διαφορετικές ευαισθησίες, συνδέσεις με άλλα κύτταρα του αμφιβληστροειδούς και κατανομές σε ολόκληρο τον αμφιβληστροειδή. Τα ραβδία έχουν πολύ χαμηλή χωρική ανάλυση αλλά είναι πολύ ευαίσθητα στο φως, ιδίως σε χαμηλά επίπεδα ή σκοτοπική όραση. Αντίθετα, τα κωνία είναι πολύ αποτελεσματικά στην διάκριση των λεπτομερειών αλλά είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητοι στο φως και ενεργοποιούνται σε υψηλά επίπεδα ή σε φωτοπική όραση [19].

Η φωτοπική ένταση φωτισμού, E_{photopic} , και ο ορισμός της στη φωτομετρία υπολογίζεται από την (Εξ.3-1), όπου $K_m = 683 \text{ lm/W}$ και $V(\lambda)$ είναι η φωτοπική φασματική απόκριση του οφθαλμού [26].

$$E_{\text{photopic}} = K_m \int_{380}^{780} SPD(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (\text{Εξ.3-1})$$

Αντίθετα, οι μη οπτικές επιδράσεις του φωτός βασίζονται στα ipRGC, τα οποία μεταδίδουν σήματα μέσω του οπτικού νεύρου στον εγκέφαλο και ελέγχουν λειτουργίες, καθώς και το κρκαδιανό σύστημα. Από την ανακάλυψη των ipRGCs, οι μέθοδοι των μετρήσεων των επιδράσεων που ήταν οι επικρατέστεροι βασίζονται σε προτάσεις που εκπονήθηκαν από το Διεθνές Ινστιτούτο WELL Building Institute (WELL) [27]. Το WELL συνιστά ως προσέγγιση μια παράμετρο γνωστή ως ισοδύναμο μελανοπικό lux (EML), η οποία είναι ένα κριτήριο για τον «σχεδιασμό του κρκαδίου φωτισμού». Υπολογίζεται με την Εξ.3-2, με $K_{\text{melanopic}, E} = 831.8 \text{ lm/melanopic, E}$ και $S_{\text{mel}}(\lambda)$ το μελανοπικό φασματικό απόκριση του οφθαλμού. Για να πραγματοποιηθεί μια πλήρη αναλογία μεταξύ των φωτοπικών με μελανοπικών ακτινοβολιών, ορίστηκε ο συντελεστής $K_{\text{melanopic}}$ ορίζεται από τις κανονικοποιήσεις που επιβάλλονται από διάφορα πρότυπα.

$$\text{EML} = K_{\text{melanopic}, E} \int_{380}^{780} SPD(\lambda) S_{\text{mel}}(\lambda) d\lambda \quad (\text{Εξ.3-2})$$

Το πρότυπο CIE όρισε την παράμετρο ισοδύναμου μελανοπικού φωτισμού (EDI) στο φως της ημέρας (D65), που ορίζεται ως πηγή φωτός τύπου D65, η οποία χρησιμοποιεί φωτοπική φωτεινότητα E_{photopic} D65 για να παρέχει την ίδια μελανοπική ακτινοβολία με μια πηγή φωτός με SPD και φωτοπική ένταση φωτισμού E_{photopic} SPD. Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται με την Εξ.3-3, με τη σταθερή παράμετρο $K_{\text{melanopic}, D65} = 753.8 \text{ lm/Wmelanopic, D65}$.

$$\text{EDI} = K_{\text{melanopic}, D65} \int_{380}^{780} SPD(\lambda) S_{\text{mel}}(\lambda) d\lambda \quad (\text{Εξ.3-3})$$

Η MAF ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ μελανοπικής και φωτοπικής ακτινοβολίας σχέση (Εξ.3.4). Με βάση αυτών των σχέσεων, η ένταση φωτισμού που μετράται με ένα παραδοσιακό λουξόμετρο και μας επιτρέπει να επιβεβαιώσουμε τα φωτοπικά επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με τις προδιαγραφές και τις μη οπτικές συνεισφορές σε μελανοπικά lux (m-lux) μπορούν εύκολα να αξιολογηθούν σύμφωνα με το πρότυπο CIE και τη θέση του WELL με βάση το γνωστό SPD του φωτός [28].

Το EML επίσης σχετίζεται με τη φωτοπική φωτεινότητα μέσω της σχέσης (3.5) και το EDI μέσω της σχέσης (εξ.3-6):

$$\text{Melanopic action Factor (MAF)} = \text{MAF} = \frac{\int_{380}^{780} \text{SPD}(\lambda) \text{Smel}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \text{SPD}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (\text{Εξ.3-4})$$

$$\text{EML} = 1.218 \frac{\int_{380}^{780} \text{SPD}(\lambda) \text{Smel}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \text{SPD}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} E_{\text{photopic}} = 1.218 \text{MAF} E_{\text{photopic}} \quad (\text{Εξ.3-5})$$

$$\text{EDI} = 1.104 \text{MAF} E_{\text{photopic}} \quad (\text{Εξ.3-6})$$

Χρησιμοποιώντας αυτούς τους συντελεστές μετατροπής και τις φωτοπικές τιμές φωτισμού, δηλαδή μετρήσεις της έντασης φωτός με βάση την όραση των κωνίων, οι μετατροπές από μία μελανοπική μονάδα μέτρησης (EML και EDI) σε άλλη υπολογίζονται εύκολα [26].

$$\text{EML} = 1.104 \text{EDI} \quad (\text{Εξ.3-7})$$

Ακόμα από την οδηγία του T.O.T.E.E η τιμή της EML ορίζεται από το γινόμενο της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (L, lx) και ενός συντελεστή R (μελανόπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, Melanopic Equal-energy Efficacy Ratio που αποτελεί την αναλογία της απόκρισης των ipRGC ως προς την φωτοπική απόκριση για κάθε εξεταζόμενη πηγή – φάσμα. Ο τύπος δίνεται παρακάτω:

$$\text{EML} = L (lx) \cdot \text{MEER} \quad (\text{Εξ.3-8})$$

3.2 Ανάλυση φωτιστικών σωμάτων βάση τον κηκτικό φωτισμό

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιήθηκε μια πιο αναλυτική διαδικασία επιλογής φωτιστικών σωμάτων, με στόχο να εντοπιστούν εκείνα που ταιριάζουν καλύτερα στις ανάγκες και τις συνθήκες του χώρου που πρόκειται να μελετηθεί. Συλλέχθηκαν φωτιστικά διαφορετικού φάσματος και συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος, ώστε να υπάρχει ποικιλία στις επιλογές και να μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό οπτικό και λειτουργικό αποτέλεσμα. Όλες οι επιλεγμένες λύσεις αφορούν φωτιστικά LED οροφής για εσωτερικούς χώρους, τα οποία διακρίνονται για την καλή τους απόδοση και συμμορφώνονται με τα πρότυπα που θα περιγράφουν αναλυτικά σε επόμενες ενότητες (βλ. ενότητα 4.2).

Για να γίνει σωστή ανάλυση του ανθρωποκεντρικού φωτισμού, εξετάζονται ξεχωριστά οι βασικές παράμετροι που σχετίζονται με αυτόν για κάθε φωτιστικό σώμα. Η αξιολόγηση γίνεται με τη χρήση των τύπων και των μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.1, προκειμένου να διαπιστωθεί πώς ανταποκρίνεται κάθε φωτιστικό στις απαιτήσεις του ανθρωποκεντρικού φωτισμού και ποια είναι η συνολική επίδρασή του στο χώρο.

Ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση, όπου καταγράφονται οι τιμές των ανθρωποκεντρικών παραμέτρων για εντάσεις φωτισμού αντίστοιχες με αυτές που θα εφαρμοστούν στον χώρο, όπως για παράδειγμα τα 500 lx. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν κυρίως το κηκτικό ερέθισμα (Circadian Stimulus - CS) καθώς και τους συντελεστές R (μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης), που θεωρούνται κρίσιμοι δείκτες για την επιλογή των κατάλληλων φωτιστικών.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα μετρήσεων για EML και MEER των επιλεγμένων φωτιστικών.

Περιγραφή φωτεινής πηγής	Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση φωτισμού [lx]	Melanopic Ratio MEER	Ισοδύναμη μελανοπική (EML)
Φωτιστικά 3,000 K				
LEDVANCE DOWNLIGHT SLIM ALU GEN 1	3,104	100	0.52	52
A.L.S. -DDH-30WW11P	3,106	100	0.55	55
Siteco Apollon 41	3,109	100	0.46	46
Philips CoreLine Panel RC125B W60L60_830	2,964	100	0.49	49
Φωτιστικά 4,000 K				
BRIGHT BSL PAN-MY6060	4,071	100	0.68	68
PHILIPS DN471B LED30S840 PSU-E C SI 28.2W	3,912	100	0.68	68
SLS OFFICE REFLECT 6060	4,004	100	1	100
CREE LR22-34L-40K-23-ADIM 34W	3,901	100	0.72	72
BRIGHT HONOR L N0 SSL 17W 840 60D	4,083	100	0.74	74
Philips DN471B_840/DN471B 1 xLED30S/840 C	3,908	100	0.60	60
3F Filippi - 23953 - L340 25W DT8 TW LGS	3,890	100	0.59	59
Advance PC7 59 37 40 80 WH ND	3,962	100	0.64	64
LEDVANCE DOWNLIGHT UGR19 DN195 21 W 840 WT IP54	4,043	100	0.74	74
Fluolite ARO-15WWSCW1 000 2,026 lm 15W	3,889	100	0.58	58
Φωτιστικά 6,000 K				
A.L.S ELEDN – 40WW / SCW11	5,912	100	0.93	93
LEDVANCE Downlight Alu 200 35 W, 6500 K	6,367	100	0.99	99

Ο Πίνακας 3.1 με τα φωτιστικά δείχνει ξεκάθαρα τη σχέση της θερμοκρασίας χρώματος (CCT) με την κερκαδική τους απόδοση, όπως αυτή εκφράζεται από το EML και τον συντελεστή MEER. Τα φωτιστικά στους 3,000 K παρουσιάζουν χαμηλές τιμές EML και MEER (MEER < 0.3, EML συνήθως < 30 lx), κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για απογευματινές ή βραδινές ώρες, αφού δεν επηρεάζουν έντονα τον κερκαδικό ρυθμό και δεν καταστέλλουν σημαντικά τη μελατονίνη. Στους 4,000 K παρατηρούμε αισθητή αύξηση, με τιμές MEER γύρω στο 0.7–1.0 και EML κοντά στα 70–100 lx· αυτό τα καθιστά ιδανικά για πρωινές και εργασιακές συνθήκες, καθώς υποστηρίζουν την εγρήγορση και τον συγχρονισμό του κερκαδικού ρυθμού. Τέλος, στα 6,000 K οι τιμές EML και MEER παραμένουν υψηλές (MEER ~0.9, EML > 90 lx), όμως δεν είναι απαραίτητα ανώτερες από κάποια καλά σχεδιασμένα 4,000 K φωτιστικά, γεγονός που δείχνει ότι η κερκαδική αποτελεσματικότητα δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία χρώματος αλλά και από τη φασματική κατανομή του φωτός. Συνεπώς, για ανθρώπινες εφαρμογές, τα 4,000–6,000 K είναι κατάλληλα για χρήση ημέρας, ενώ τα 3,000 K προτιμώνται για πιο χαλαρές ή βραδινές συνθήκες.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα μετρήσεων για MDER και CS των επιλεγμένων φωτιστικών.

Περιγραφή φωτεινής πηγής	Συντελεστής MDER (LUOX)	Ένταση φωτισμού [lx]	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού (MDEI)	Circadian Stimulus		
				100lx	300lx	500lx
Φωτιστικά 3,000 K						
LEDVANCE DOWNLIGHT SLIM ALU GEN 1	0.45	100	45	0.13	0.31	0.41
A.L.S. -DDH-30WW11P	0.48	100	48	0.14	0.32	0.42
Siteco Apollon 41	0.35	100	35	0.1	0.25	0.35
Philips CoreLine Panel RC125B W60L60_830	0.45	100	45	0.13	0.30	0.4
Φωτιστικά 4,000 K						
BRIGHT BSL PAN-MY6060	0.62	100	62	0.08	0.22	0.32
PHILIPS DN471B LED30S840 PSU-E C SI 28.2W	0.62	100	62	0.09	0.23	0.32
SLS OFFICE REFLECT 6060	0.85	100	85	0.09	0.22	0.32
CREE LR22-34L-40K-23-ADIM 34W	0.65	100	65	0.09	0.23	0.33
BRIGHT HONOR L NO SSL 17W 840 60D	0.67	100	67	0.09	0.24	0.33
Philips DN471B_840/DN471B 1 xLED30S/840 C	0.55	100	55	0.08	0.2	0.29
3F Filippi - 23953 - L340 25W DT8 TW LGS	0.52	100	52	0.07	0.19	0.28
Advance PC7 59 37 40 80 WH ND	0.57	100	57	0.08	0.21	0.3
LEDVANCE DOWNLIGHT UGR19 DN195 21 W 840 WT IP54	0.66	100	66	0.09	0.24	0.34
Fluolite ARO-15WWSCW1 000 2,026 lm 15W	0.52	100	52	0.07	0.19	0.29
Φωτιστικά 6,000 K						
A.L.S ELEDN – 40WW / SCW11	0.84	100	84	0.15	0.34	0.44
LEDVANCE Downlight Alu 200 35 W, 6500 K	0.9	100	90	0.17	0.37	0.46

Ο Πίνακας 4.2 με τις τιμές του Circadian Stimulus (CS) μας δείχνει πώς επηρεάζει ο φωτισμός τον κερκαδικό ρυθμό σε διαφορετικές θερμοκρασίες χρώματος. Παρατηρούμε ότι, γενικά, όσο αυξάνεται η ένταση φωτισμού (100, 300, 500 lx), τόσο αυξάνεται και το CS, φτάνοντας κοντά στο 0.3 στα 500 lx, που θεωρείται το ελάχιστο όριο για να έχουμε σημαντική κερκαδική διέγερση. Τα φωτιστικά στους 3,000 K συνήθως έχουν χαμηλότερο MDER και έτσι δίνουν χαμηλότερο CS, κάτι που τα κάνει κατάλληλα για βραδινές ώρες ώστε να μην επηρεάζεται η μελατονίνη. Τα 4,000 K, με μέτριο προς υψηλό MDER (0.6 – 0.7) και CS περίπου 0.32 στα 500 lx, είναι ιδανικά για πρωινές και εργασιακές ώρες, ειδικά για γραφεία, αφού υποστηρίζουν την εγρήγορση και τον συγχρονισμό του κερκαδικού ρυθμού χωρίς να είναι υπερβολικά έντονα. Αντίστοιχα, τα 6,000 K είναι κατάλληλα για έντονη κερκαδική διέγερση σε χώρους όπου απαιτείται υψηλή εγρήγορση.

Ωστόσο, στον πίνακα βλέπουμε κάτι ενδιαφέρον: κάποια φωτιστικά στα 3,000 K έδωσαν υψηλότερη τιμή CS από αντίστοιχα στα 6,000 K. Αυτό συμβαίνει γιατί το CS δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία χρώματος, αλλά από τη φασματική κατανομή και

ιδιαίτερα από την ποσότητα μπλε φωτός (~480nm) που εκπέμπεται. Έτσι, ένα φωτιστικό 3,000 K με "εμπλουτισμένο" φάσμα στο μπλε μπορεί να έχει υψηλότερο κίρκαδικό αποτέλεσμα από ένα ψυχρότερο 6,000 K που ίσως δίνει περισσότερο φως σε πράσινες ή κόκκινες περιοχές του φάσματος, οι οποίες έχουν μικρότερη επίδραση στους κίρκαδικούς υποδοχείς.

Με βάση την αξιολόγηση αυτή, επιλέχθηκαν τέσσερα από τα πιο κατάλληλα φωτιστικά σώματα όσο αφορά την θερμοκρασία των 4,000 K, τα οποία πληρούν τόσο τις τεχνικές όσο και τις ανθρωποκεντρικές προδιαγραφές, και πάνω σε αυτά θα βασιστούν οι τελικές μελέτες φωτισμού του χώρου. Παρακάτω δίνονται οι περιγραφές καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 3.3) τους σύμφωνα με το ReluxNet:

A) Εταιρεία: **Philips**

Αρ. Παραγγελίας : DN471B_840/DN471B 1 xLED30S/840 C

Όνομα φωτιστικού : GreenSpace

Εξοπλισμός : 1 x LED30S/840 29 W / 3,200 lm

B) Εταιρεία: **3F Filippi**

Αρ.Παραγγελίας: 3F Filippi - 23953 - L340 25W DT8 TW LGS 596x596 (CCT 4000)

Όνομα φωτιστικού: 3F Filippi - L340 Tunable White LGS

Εξοπλισμός : 1 x LED 30 W / 3,785 lm

Γ)Εταιρεία: **Advance LED**

Αρ. Παραγγελίας : PC7 59 37 40 80 WH ND

Όνομα φωτιστικού : Carina

Εξοπλισμός : 1 x LED 30 W / 3,532 lm

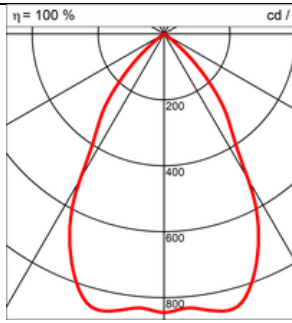
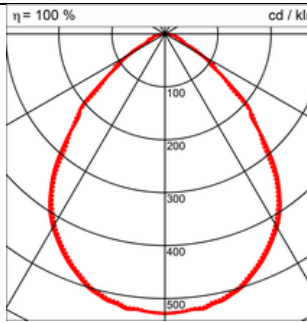
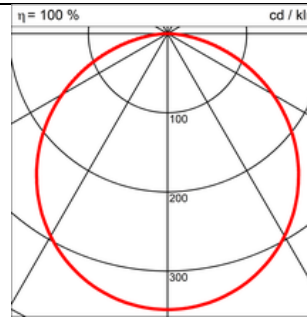
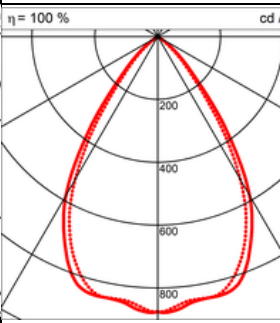
Δ)Εταιρεία: **LEDVANCE**

Αρ. Παραγγελίας : 4058075459274

Όνομα φωτιστικού : DOWNLIGHT UGR19 DN195 21 W 840 WT IP54

Εξοπλισμός : 1 x 21 W / 2,520 lm

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά επιλεγμένων φωτιστικών σωμάτων 4,000 K.

Τύπος φωτιστικού	A) Philips DN471B_840 – 30S840 29W	B)3F Filippi- L340 23953 - L340 25W	Γ) Advance Carina PC7 59 37 40 80 WH ND	Δ)LEDADVANCE DOWNLIGHT UGR19
Εικόνα φωτιστικού				
Τοποθέτηση	Χωνευτό – οροφής	Χωνευτό – οροφής	Χωνευτό – οροφής	Χωνευτό – οροφής
Σχήμα	Κυκλικό	Τετράγωνο	Τετράγωνο	Κυκλικό
Διαστάσεις	D.218 mm/H.93 mm	596mm/596mm/80mm (L/W/H)	595mm/595mm/80mm (L/W/H)	D.220mm /H.82mm
Στυλ φωτισμού	Άμεσου	Άμεσου	Άμεσου	Άμεσου
Φωτεινή απόδοση [lm/W]	110	126	118	120
Ισχύς [W]	29	30	30	21
Κατανομή φωτεινής έντασης				
Φωτεινή ροή [lm]	3200	3785	3532	2520
Δείκτης θάμβωσης UGR	19	16.4	-	19
Φωτεινής πηγής	LED	LED	LED	LED
Θερμοκρασία χρώματος	4,000 K	4,000 K	4,000 K	4,000 K
Απόχρωση	Ουδέτερο λευκό	Ουδέτερο λευκό	Ουδέτερο λευκό	Ουδέτερο λευκό
Χρωματική απόδοση	80	80	80	80
Διάρκεια ζωής	L90 – 50,000 h	L90 – 50,000 h	L70 – 50,000 h	L90 – 40,000 h

Στην περίπτωση των φωτιστικών με θερμοκρασία χρώματος 3,000 K, ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων επιλογών ήταν τέσσερα φωτιστικά σώματα. Και τα τέσσερα πληρούσαν τις βασικές τεχνικές και ποιοτικές προδιαγραφές, οπότε επιλέχθηκαν όλα για να χρησιμοποιηθούν στην τελική μελέτη φωτισμού με θερμό φως. Παρακάτω δίνονται οι περιγραφές καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 3.4) τους σύμφωνα με το ReluxNet:

A) Εταιρεία: **LEDVANCE**

Αρ. Παραγγελίας : 4058075063921

Όνομα φωτιστικού : DOWNLIGHT SLIM ALU GEN 1 180 17 W 3000 K WT

Εξοπλισμός : 1X17 W / 1,350 lm

B) Εταιρεία: **A.L.S.**

Αρ. Παραγγελίας : DDH-30WW11P

Όνομα φωτιστικού : DDH

Εξοπλισμός : 1 x LED 29 W / 3,575 lm

Γ) Εταιρεία: **Siteco**

Αρ. Παραγγελίας : 51MH11W72343

Όνομα φωτιστικού : Apollon 41

Εξοπλισμός : 1 x LED 28 W / 3,500 lm

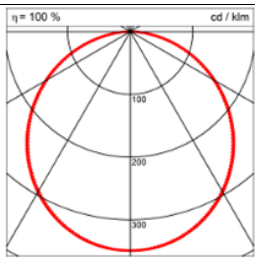
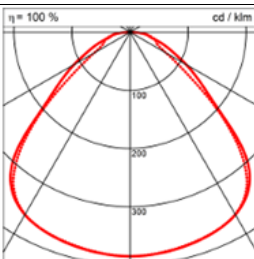
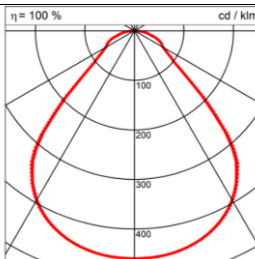
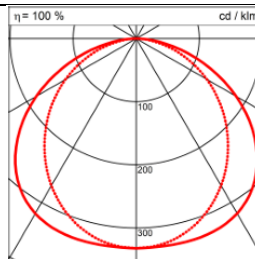
Δ) Εταιρεία: **Philips**

Αρ. Παραγγελίας : RC125B W60L60_830/RC125B W60L60 1 xLED34S/830 NOC

Όνομα φωτιστικού : CoreLine Panel

Εξοπλισμός : 1 x LED34S/830 36 W / 3,400 lm

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά επιλεγμένων φωτιστικών σωμάτων 3,000 K.

Τύπος φωτιστικού	A) LEDVANCE DOWNLIGHT SLIM ALU GEN 1	B) A.L.S. -DDH-30WW11P	Γ) Siteco Apollon 41	Δ) Philips CoreLine Panel RC125B W60L60_830
Εικόνα φωτιστικού				
Τοποθέτηση	Χωνευτό – οροφής	Χωνευτό – οροφής	Χωνευτό – οροφής	Χωνευτό – οροφής
Σχήμα	Κυκλικό	Τετράγωνο	Τετράγωνο	Τετράγωνο
Διαστάσεις	D.180mm/H.23mm	620mm/620mm/9mm (L/W/H)	620mm/620mm/28mm (L/W/H)	597mm/597mm/43mm (L/W/H)
Στυλ φωτισμού	Άμεσου	Άμεσου	Άμεσου	Άμεσου
Φωτεινή απόδοση [lm/W]	79	123	125	94
Ισχύς [W]	17	29	28	36
Κατανομή φωτεινής έντασης				
Φωτεινή ροή [lm]	1343	3567	3500	3400
Δείκτης θάμβωσης UGR	-	19	-	-
Φωτεινής πηγής	LED	LED	LED	LED
Θερμοκρασία χρώματος	3,000 K	3,000 K	3,000 K	3,000 K
Απόχρωση	Θερμό λευκό	Θερμό λευκό	Θερμό λευκό	Θερμό λευκό
Χρωματική απόδοση	80	80	80	80
Διάρκεια ζωής	L70 – 50,000 h	L70 – 50,000 h	L70 – 50,000 h	L70 – 50,000 h

Στην περίπτωση των φωτιστικών με θερμοκρασία χρώματος 6,000 K, ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων επιλογών ήταν τέσσερα φωτιστικά σώματα. Όλα τα φωτιστικά πληρούσαν τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές, με έμφαση στη φωτεινή ροή, την ενεργειακή απόδοση και τον υψηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης (CRI), καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται έντονος και ψυχρός φωτισμός. Αν και η συγκεκριμένη θερμοκρασία χρώματος είναι πιο “σκληρή” σε σύγκριση με τις ουδέτερες επιλογές (όπως τα 4,000 K), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χώρους που απαιτούν υψηλή ορατότητα και εγρήγορση. Για τον λόγο αυτό, τα τέσσερα φωτιστικά επιλέχθηκαν ώστε να χρησιμοποιηθούν στην τελική μελέτη φωτισμού με ψυχρό φως. Παρακάτω παρουσιάζονται οι περιγραφές και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, όπως καταγράφονται στη βάση ReluxNet (Πίνακας 3.6).

A) Εταιρεία: **A.L.S**

Αρ. Παραγγελίας : ELEDN – 40WW / SCW11

Όνομα φωτιστικού : ELEDN

Εξοπλισμός : 1 X LED 38 W / 3,807 lm

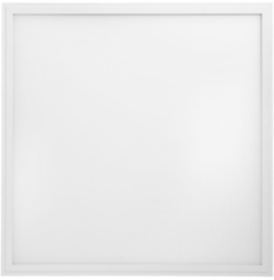
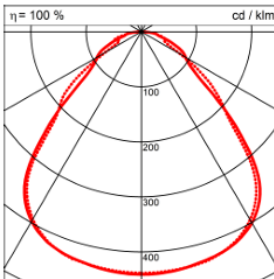
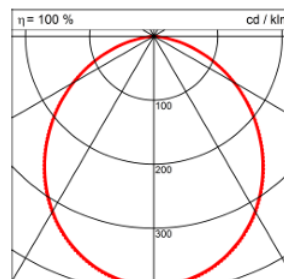
B) Εταιρεία: **LEDVANCE**

Αρ. Παραγγελίας : 4058075204362

Όνομα φωτιστικού : LEDVANCE Downlight Alu 200 35 W, 6500 K IP44WT

Εξοπλισμός : 1 X LED 35 W / 3,150 lm

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά επιλεγμένων φωτιστικών σωμάτων 6,000 K.

Τύπος φωτιστικού	A) A.L.S ELEDN – 40WW / SCW11	B) LEDVANCE Downlight Alu 200 35 W, 6500 K
Εικόνα φωτιστικού		
Τοποθέτηση	Χωνευτό – οροφής	Χωνευτό – οροφής
Σχήμα	Τετράγωνο	Τετράγωνο
Διαστάσεις	622mm/622mm/9mm (L/W/H)	D.215mm/H.61mm
Στυλ φωτισμού	Άμεσου	Άμεσου
Φωτεινή απόδοση [lm/W]	100	90
Ισχύς [W]	38	35
Κατανομή φωτεινής έντασης		
Φωτεινή ροή [lm]	3,807	3,105
Δείκτης θάμβωσης UGR	19	-
Φωτεινής πηγής	LED	LED
Θερμοκρασία χρώματος	6,000 K	6,500 K
Απόχρωση	Ψυχρό λευκό	Ψυχρό λευκό
Χρωματική απόδοση	80	80
Διάρκεια ζωής	L70 – 50,000 h	L70 – 50,000 h

Τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν καλύπτουν τις απαιτήσεις του EN12464-1, του KENAK και του Τ.Ο.Τ.Ε.Ε., αφού παρουσιάζουν στάθμη $CS \approx 0.3$ και θερμοκρασία χρώματος (CCT) μεταξύ 3,000 – 4,000 K, ενώ παράλληλα προσφέρουν υψηλή απόδοση (π.χ. ≥ 100 lm/W). Σε αυτό το στάδιο δεν έχει γίνει ακόμα αναλυτική μελέτη για να υπολογιστεί με ακρίβεια η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Παρ' όλα αυτά, με βάση τα χαρακτηριστικά των φωτιστικών, αναμένεται ότι οι συνολικές απαιτήσεις θα παραμείνουν μέσα στα όρια που θέτει το Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.

Κεφάλαιο 4^ο - Φωτισμός εσωτερικών χώρων

4.1 Κριτήρια μελέτης φωτισμού

Μια μελέτη φωτισμού θα πρέπει να γίνεται με στόχο να εξασφαλιστεί για τους χρήστες του χώρου η απαιτούμενη ποσότητα και ποιότητα φωτισμού, ώστε να καλυφθούν και απαιτήσεις τους για το κερκάδιο ρυθμό. Σύμφωνα με τεχνική οδηγία του Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-72021 οι απαιτήσεις φωτισμού ενός χώρου εξαρτώνται από την χρήση του, την δραστηριότητα που πραγματοποιείται στο χώρο. Τα επίπεδα που έχει ο φωτισμός έχουν άμεση σχέση με τις οπτικές εργασίες αφού επηρεάζονται από αυτόν ως προς την ταχύτητα, ευκολία και την αξιοπιστία που εκτελούνται. Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε χώρο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1). Στον πίνακα αυτό αποτυπώνονται τέσσερα βασικά και ουσιώδη μεγέθη που σχετίζονται με την ποιότητα του φωτισμού: η στάθμη ή το επίπεδο φωτισμού, το επίπεδο αναφοράς στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση, ο βαθμός ομοιομορφίας του φωτισμού στον χώρο και ο δείκτης θάμβωσης (UGR), ο οποίος σχετίζεται με την οπτική άνεση των χρηστών. Παράλληλα, μια τεκμηριωμένη και επαρκής φωτοτεχνική μελέτη δεν αρκεί να καλύπτει μόνο τις ποιοτικές απαιτήσεις φωτισμού, αλλά οφείλει επίσης να συμμορφώνεται με τις υφιστάμενες ενεργειακές προδιαγραφές. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να τηρεί τα προβλεπόμενα όρια εγκατεστημένης ισχύος ανά κατηγορία χώρου, όπως αυτά καθορίζονται από την Τεχνική Οδηγία του ΤΕΕ, ΤΟΤΕΕ 20701-1. Για περισσότερες πληροφορίες για απαιτήσεις ανάλογα με την χρήση ενός χώρου δίνονται στο πρότυπο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12464-1 Light and lighting-lighting of work places [10].

Πίνακας 4.1: Απαιτήσεις φωτισμού για χώρους γραφείων σύμφωνα με το EN12464-1.

Χώρος/Δραστηριότητα	Ελάχιστη φωτεινή ένταση [lx]	Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m]	Ομοιομορφία φωτισμού U_0 Min /av. (-)	Δείκτης θάμβωσης UGR [-]
Γραφείο- χώρος εργασίας (θέσεις με σχέδιο, Η/Υ, ανάγνωση)	500	0.8	0.6	19

Ενα κριτήριο που είναι βασικό για τον φωτισμό ενός χώρου είναι η μέση ένταση φωτισμού. Είναι ένα μέγεθος που παρουσιάζει μια τιμή σε κάθε σημείο μιας επιφάνειας. Έτσι η επιφάνεια χωρίζεται σε τετράγωνα, ενώ λαμβάνονται υπόψη τα σημειακά κέντρα αυτών των τετραγώνων, αποτέλεσμα αυτού δημιουργείται το δικτυωτό διάγραμμα φωτισμού. Η μέση ένταση φωτισμού θα υπολογιστεί διαιρείται το άθροισμα της έντασης φωτισμού στα κέντρων των επιμέρους τετραγώνων «Εi» προς των αριθμό των τετραγώνων «n». Η επιφάνεια που θα εξεταστεί θα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που ορίζεται από το πρότυπο. Με άλλα λόγια η μέση ένταση (στάθμη) φωτισμού μια επιφάνειας E_m που βλέπουμε στο Πίνακα 4-1 παραπάνω είναι η ελάχιστη τιμή κάτω από την οποία η μέση ένταση φωτισμού στην επιφάνεια αναφοράς δεν πρέπει να είναι χαμηλότερη σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος φωτισμού. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να γίνονται δράσεις συντήρησης ή αντικατάστασης του συστήματος φωτισμού.

Ενώ η ομοιομορφία φωτισμού ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης προς τη μέση ένταση φωτισμού μιας καθορισμένης περιοχής και παρουσιάζει τις έντονες διακυμάνσεις της έντασης φωτισμού ενός χώρου. Πράγματι είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, αφού οι έντονες διακυμάνσεις του φωτισμού γύρω από την επιφάνεια εργασίας μπορεί να

οδηγήσουν σε οπτικό στρες και οπτική δυσφορία στον χρήστη εκτός και αν η έντονη αντίθεση αποτελεί μέρος της ιδέας φωτισμού (concept) (TOTEE). Ο τρόπος υπολογισμού και η μαθηματική εξίσωση είναι :

$$U_o = \frac{E_{min}}{E_{μεσο}}.$$

Ένα άλλο κριτήριο που θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στην μελέτη φωτισμού σε εσωτερικό χώρο είναι η θάμβωση (Glare), αφού αν παραλειφθεί μπορεί να προκαλέσει προβλήματα. Τα είδη της θάμβωσης είναι η άμεση και η ανακλώμενη. Η άμεση θάμβωση δημιουργείται όταν υπάρχει άμεση οπτική επαφή με την φωτεινή πηγή, γενικότερα όταν παρατηρείται μεγάλη αντίθεση με το περιβάλλον. Ο λαμπτήρας θεωρείται λάθος επιλογή σε μία μελέτη φωτισμού καθώς προκαλεί μεγάλη θάμβωση παρόλο που είναι το αποδοτικότερο φωτιστικό σώμα. Η ανακλώμενη θάμβωση προκαλείται αν ο παρατηρητής βλέπει την ανάκλαση μιας φωτεινής πηγής σε μια λεία επιφάνεια. Κάποια παραδείγματα επιφανειών είναι οι οθόνες υπολογιστών, το πλαστικοποιημένα έγγραφα, τα τζάμια, οι καθρέπτες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ανακλώμενη θάμβωση και να βοηθήσουν στην μείωση της άνεσης και της όρασης του παρατηρητή. Ωστόσο σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1, η θάμβωση μπορεί να υπολογιστεί με την μέθοδο UGR. Αυτή στο τρόπο υπολογισμού συμπεριλαμβάνει όλα τα φωτιστικά, τα οποία αποτελούν ένα σύστημα φωτισμού και εκβάλλουν στην θάμβωση, η περιοχή που θα εξεταστεί θα πρέπει να έχει μικρότερη από την αντίστοιχη που ορίζει το πρότυπο (την τιμή που ορίζει ο Πίνακας 4.1).

Τέλος, ως βασικό ενεργειακό κριτήριο εξετάζεται το όριο της εγκατεστημένης ισχύος, σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, η οποία καθορίζει τα ανώτατα επιτρεπτά όρια εγκατεστημένης ισχύος τεχνητού φωτισμού, καθώς και τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Οι απαιτήσεις αυτές τίθενται σε συνάρτηση με τη φωτεινή ένταση που απαιτείται ανάλογα με τη χρήση και τις ανάγκες του εκάστοτε χώρου. Στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι σχετικές τιμές και τα όρια.

Πίνακας 4.2: Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού (W/m^2) κτιρίου αναφοράς ανάλογα της στάθμης φωτισμού για τον υπολογισμό της ενεργειακής του απόδοσης

Ζώνες τεχνητού φωτισμού / Στάθμη φωτισμού [lx]	Ισχύς για κτίριο αναφοράς [W/m^2]	Ισχύς για ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης κτιρίων [W/m^2]
1000	32	28
500	16	14
400	12.8	11
300	9.6	8.4
250	8	7
200	6.4	5.6
100	3.2	2.8

4.2 Μεθοδολογία μελέτης

Ο χώρος που επιλέχθηκε είναι ένας χώρος γραφείων τεχνικής εταιρίας 65 τετραγωνικά μέτρα, ο οποίο μέχρι και σήμερα, ο τεχνητός φωτισμός καλυπτόταν με τη χρήση φωτιστικών σωμάτων τύπου πάνελ 600 X 600 mm, ενσωματωμένων σε ψευδοροφή, τα οποία έφεραν λαμπτήρες φθορισμού (τύπου T8), τεχνολογίας συμβατής με την εποχή εγκατάστασης. Η υφιστάμενη αυτή διάταξη αποτελούσε μια διαδεδομένη λύση για επαγγελματικούς χώρους, παρέχοντας επαρκή επίπεδα φωτισμού για βασικές λειτουργίες γραφείου. Ωστόσο, η τεχνολογία φθορισμού παρουσιάζει πλέον σημαντικά μειονεκτήματα σε σχέση με τις σύγχρονες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, τόσο ως προς την κατανάλωση ενέργειας όσο και ως προς τη διάρκεια ζωής και τη φωτεινή απόδοση (lm/W).

Ο χώρος θα μελετηθεί με το πρόγραμμα Relux με βάση τα πρότυπα και τους κανονισμούς και με χρήση αποδοτικών φωτιστικών σωμάτων. Το σενάριο φωτισμού θα προσαρμοστεί για τις θέσεις τωρινών χρηστών του γραφείου με στόχο να πετύχει την επιθυμητή ένταση σε όλες τις θέσεις εργασίας ταυτόχρονα και τις απαιτήσεις για τον κirkάδιο ρυθμό. Στην υλοποίηση της μελέτης θα αξιοποιηθούν για την επίτευξη της κατάλληλης στάθμης έντασης φωτισμού, ωστόσο θα γίνει υπολογισμός της μελανοπικής έντασης φωτισμού Equivalent Melanopic Lux (EML) καθώς και του κirkάδιου ερεθίσματος Circadian Stimulus (CS), για να βεβαιωθεί ότι το σύστημα φωτισμού πληροί τις προτεινόμενες τιμές που προδιαγράφηκαν για τον κirkάδιο φωτισμό.

Θα εκπονηθούν μελέτες φωτισμού κάνοντας χρήση δέκα φωτιστικών, τέσσερα με CCT 3,000 K και τέσσερα με 4,000 K τα σενάρια θα είναι εννιά, ένα σενάριο για κάθε φωτιστικό και ένα το οποίο θα συνδυάζει δύο φωτιστικά. Τα τέσσερα φωτιστικά θα επιλεγθούν με βάση τα αποτελέσματα που μας έδωσαν στις μετρήσεις του CS και του EML, καθώς και οι αποδόσεις τους. Το βοηθητικό λογισμικό της μελέτης θα είναι το Relux για όλα τα σενάρια. Οι θέσεις είναι καθορισμένες και δεν μεταβάλλονται, η θέση και η ποσότητα των φωτιστικών σωμάτων θα καθοριστούν από τα πρότυπα EN12464-1 2021 και την οδηγία του TOTEE, αφού τα πρότυπα θα διαμορφώσουν τα επιθυμητά επίπεδα έντασης φωτισμού.

Η περιοχή που επιλέχθηκε (γραφείο τεχνικής εταιρίας) θα χωριστεί σε δύο είδη επιφανειών στην επιφάνεια εργασίας (Task area) και την περιβάλλουσα ζώνη (surrounding area). Τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για το συγκεκριμένο χώρο σύμφωνα με το EN12464-1:2021

Πίνακας 4.3: Προδιαγραφές για μελέτη φωτισμού του τεχνικού γραφείου.

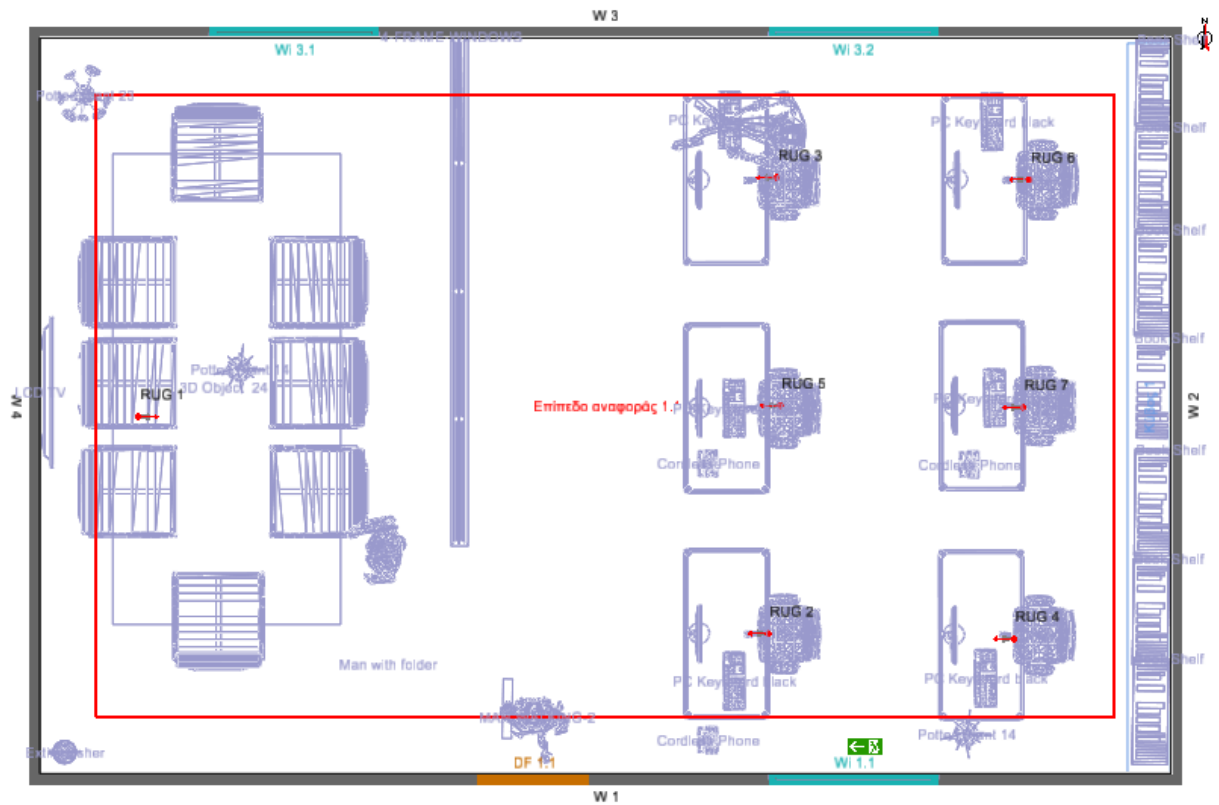
Τύπος εργασίας	Em[lx]	Uo	UGRL	Ra
CAD work stations	500	0.6	19	80

- Η μέση ένταση (στάθμη) φωτισμού μια επιφάνειας $E_m \geq 500$.
- Δείκτης χρωματικής απόδοσης $R_a \geq 80$.
- Ομοιομορφία φωτισμού $U_o \geq 0.6$.
- Όριο δείκτη θάμβωσης $UGR \leq 19$
- Όριο μέγιστης εγκατεστημένης ισχύς εσωτερικών χώρων σύμφωνα με το TOTEE $2.0W/(m^2 \cdot 100 lx)$ ανάλογα με την στάθμη, στα 500 lx στάθμης όριο εγκατεστημένης ισχύς $14 W/m^2$ KENAK 2017 [29].

- Στις νέες εγκαταστάσεις η φωτεινή απόδοση φωτιστικών σωμάτων πρέπει να είναι $> 60 \text{ lm/W}$ [29].
- Όριο στάθμης φωτισμού θα πρέπει να μην υπερβαίνει 20% του ορίου της βασικής επιφάνειας φωτισμού.
- Τα ισοδύναμα melanopic lx (EML) από τεχνητό φωτισμό 150 lux (standard well) [3].
- Κιρκάδιο ερέθισμα ≈ 0.3 για τις πρωινές ώρες [3]. Ο φωτισμός θα μιμείται το ηλιακό φως ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Τις πρωινές ώρες το κιρκάδιο ερέθισμα ιδανικά θα πρέπει να είναι 0.3 ώστε να ευνοεί την εγρήγορση αλλά και την συγκέντρωση των χρηστών του χώρου (μηχανικοί της εταιρίας).

4.3 Αρχιτεκτονική διάταξη του χώρου

Ο χώρος γραφείων της τεχνικής εταιρίας είναι 65m^2 (διαστάσεις: 10 m μήκος, 6.5 m πλάτος) υπάρχει νοητά χωρισμένος χώρος για meeting μεταξύ των συναδέλφων αλλά αυτό δεν επηρεάζει την μελέτη μας καθώς το είδος του χώρου είναι το ίδιο, ως προς της απαιτήσεις φωτισμού.



Εικόνα 4.1: Ο χώρος γραφείου που εξετάζεται στην μελέτη.



Εικόνα 4.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση του γραφειακού χώρου προς μελέτη.

Στην εικόνας της κάτοψης διακρίνονται τα γραφεία και ο χώρος των meeting όπου οι συνάδελφοι μαζεύονται για να ανοίξουν σχέδια είτε να ανταλλάξουν απόψεις. Το εσωτερικό ύψος του χώρου είναι 3,8m τα φωτιστικά θα τοποθετηθούν σε αυτό το ύψος καθώς η οροφή αποτελείται από γυψοσανίδα που επιτρέπει να τοποθετηθούν με άνεση φωτιστικά σώματα τύπου πάνελ που θα επιλέξουμε. Η επιφάνεια εργασίας όλων θέσεων ορίζεται στο 0,8m από το δάπεδο. Οι τοίχοι έχουν διαφορετικό χρώμα οι W3, W4 είναι γκρι μπλε και ο συντελεστής ανάκλασης σύμφωνα με το EN12464-1:2021 είναι 0.2 ή 20%, το ίδιο συμβαίνει και στο γκρι δάπεδο, ο τοίχος W1 είναι ανοιχτού χρώματος προς το λευκό με συντελεστή ανάκλασης 0.7, ο τοίχος W2 είναι λευκός και έχει και μία μεγάλη λευκή βιβλιοθήκη, το ίδιο λευκή είναι και η οροφή που αποτελείται από γυψοσανίδα βαμμένη λευκή αυτές οι επιφάνειες έχουν συντελεστή 0.93.

Ο χώρος του γραφείου βρίσκεται μέσα σε κτίριο που υπάρχουν και άλλα γραφεία τα παράθυρα δεν έχουν άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και κατ' επέκταση με το φυσικό φωτισμό, τις πρωινές ώρες ετσι η μελέτη θα γίνει μόνο με τεχνητό φωτισμό.

4.4 Καταγραφή υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η αναλυτική αποτύπωση όλων των φωτιστικών σωμάτων της υφιστάμενης ηλεκτρολογικής εγκατάστασης φωτισμού. Καταγράφηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτιστικών, η ισχύς τους, καθώς και η διάταξή τους στους υπό μελέτη χώρους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος φωτισμού, καθώς και εκτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας για τα τρία εξεταζόμενα επίπεδα του κτιρίου, βάσει των ωρών λειτουργίας και του είδους των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιούνται. Η καταγραφή αυτή αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο για τη σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης με τις απαιτήσεις του KENAK και την τεκμηρίωση της αναγκαιότητας ενεργειακής αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε επιτόπια επιθεώρηση στο γραφείο, με σκοπό την καταγραφή του υφιστάμενου εξοπλισμού τεχνητού φωτισμού. Κατά την αυτοψία, διαπιστώθηκε ότι στο χώρο χρησιμοποιούνται ένας συγκεκριμένος τύπος φωτιστικού και λαμπτήρων. Το φωτιστικό είναι πάνελ οροφής με 4 λαμπτήρες T8 της EUROLAMP τα αναλυτικά χαρακτηριστικά τους καθώς και εικόνες παρουσιάζονται παρακάτω:

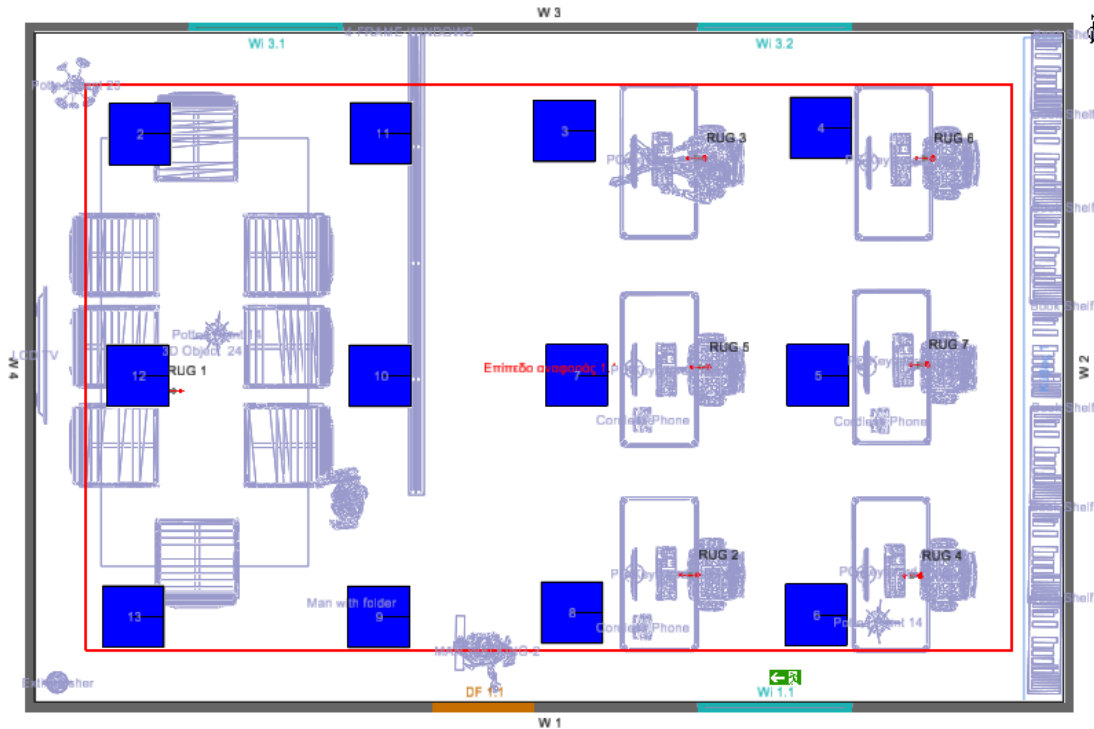


Εικόνα 4.3: Φωτιστικό Σποτ Χωνευτό T8, από αλουμίνιο, 72W, IP20 λευκό της Eurolamp.



Εικόνα 4.4: Λαμπτήρας φθορισμού T-8 18W 60CM

Τύπος φωτιστικού	Eurolamb PANEL T8 72W
Τύπος λαμπτήρα	OSRAM T8 18 W/840 – φυσικό λευκό (4,000 K)
Ντουί λαμπτήρα	G13
Ισχύς λαμπτήρα [w]	18
Ονομαστική τάση λαμπτήρα [V]	57
Αριθμός λαμπτήρων	4
Τοποθέτηση	Χωνευτό – οροφής
Σχήμα	Τετράγωνο
Διαστάσεις	640mm/640mm/70mm (L/W/H)
Στυλ φωτισμού	Άμεσου
Φωτεινή απόδοση [lm/W]	72
Ισχύς φωτιστικού [W]	$4 \times 18 = 72$
Φωτεινή ροή [lm]	$1,300 \times 4 = 5,200$
Φωτεινής πηγής	Φθορισμού
Θερμοκρασία χρώματος	4,000 K
Απόχρωση	Ουδέτερο λευκό
Χρωματική απόδοση	80



Εικόνα 4.5: Η κάτοψη της υφιστάμενης εγκατάστασης με τις θέσεις των φωτιστικών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την λειτουργία των φωτιστικών σωμάτων φθορισμού χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά ballasts, γεγονός που επιβαρύνει την κατανάλωση ενέργειας λόγω των απωλειών ισχύος και της μειωμένης απόδοσης σε σύγκριση με τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα οδήγησης. Η χρήση ξεπερασμένης τεχνολογίας φωτισμού, σε συνδυασμό με τον παλαιωμένο εξοπλισμό, επιβεβαιώνει την ανάγκη για ενιαία και αποδοτική λύση φωτιστικής αναβάθμισης, προσανατολισμένη σε τεχνολογίες υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

4.5 Αποτύπωση και ανάλυση της υφιστάμενης ισχύος του συστήματος τεχνητού φωτισμού

Η εκτίμηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του φωτισμού σε έναν χώρο, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021, βασίζεται στον αριθμό και τον τύπο των φωτιστικών σωμάτων που έχουν τοποθετηθεί. Κατά τη φάση της αποτύπωσης του κτηρίου, πραγματοποιήθηκε καταμέτρηση των φωτιστικών ανά τύπο, ενώ τα στοιχεία για την ισχύ κάθε φωτιστικού προέρχονται από το σχετικό δελτίο τεχνικών χαρακτηριστικών του εκάστοτε προϊόντος. Επομένως, ο υπολογισμός της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος φωτισμού [W] για την υπό μελέτη αίθουσα πραγματοποιείται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο, όπως ορίζεται στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021:

$$P_l = \sum n_{lum} \cdot P_{lum} \quad [\text{εξ.4-1}]$$

Όπου P_l [W]: η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος φωτισμού του χώρου

n_{lum} [-]: ο αριθμός των ίδιων φωτιστικών σωμάτων

P_{lum} [W]: η ονομαστική ισχύς του κάθε τύπου φωτιστικού

Στην παρούσα περίπτωση όμως, λόγω έλλειψης διαθέσιμων τεχνικών στοιχείων από τον κατασκευαστή, η συνολική ισχύς εκτιμάται βάσει της ονομαστικής ισχύος όλων των λαμπτήρων που περιλαμβάνονται στον συγκεκριμένο τύπο φωτιστικού. Κατά την εκτίμηση αυτή, λαμβάνονται υπόψη οι προσαυξήσεις ισχύος που σχετίζονται με τον τύπο του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος έναυσης και ελέγχου (ballast), μέσω της χρήσης κατάλληλου συντελεστή προσαύξησης ισχύος. Συνεπώς, ο αρχικός Τύπος (εξ. 4-1) προσαρμόζεται ως εξής:

$$P_l = \sum n_{lum} \cdot P_{lamp} \cdot f_{gear} \quad [\text{εξ. 4-2}]$$

Όπου $P_l[W]$: η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος φωτισμού του χώρου

$n_{lum}[-]$: ο αριθμός των φωτιστικών σωμάτων της εγκατάστασης

$P_{lamp}[W]$: το άθροισμα της ισχύος των λαμπτήρων του κάθε φωτιστικού σώματος της εγκατάστασης

f_{gear} : ο συντελεστής προσαύξησης ισχύος (Πίνακας 4.4)

Πίνακας 4.4: Συντελεστής προσαύξησης ισχύος f_{gear} λόγω ύπαρξης ballast TOTEE 20701-7

Τύπος	Ο συντελεστής προσαύξησης ισχύος f_{gear}
Ηλεκτρομαγνητικό ballast	1.20
Ηλεκτρονικό ballast	1.05
Driver	1.00
Χωρίς ballast	1.00

Πίνακας 4.5: Ισχύς της υφιστάμενης εγκατάστασης του χώρου του τεχνικού γραφείου

Πλήθος φωτιστικών	Τύπος λαμπτήρων	Πλήθος λαμπτήρων ανά φωτιστικό	Ισχύς λαμπτήρα [W]	Εγκατεστημένη ισχύς [W]
12	φθορισμού	4	18	1036.8

Το αποτέλεσμα της τιμής της εγκατεστημένης ισχύς προέκυψε κάνοντας χρήση της εξίσωσης 4-2 και απλής αντικατάστασης των δεδομένων.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της συνολικής ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας του επιπέδου λειτουργίας της εγκατάστασης φωτισμού. Η συγκεκριμένη παράμετρος προσδιορίζει πόσα W καταναλώνονται για κάθε τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) του εξεταζόμενου χώρου και αποτελεί βασικό δείκτη για την αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του φωτισμού. Ο υπολογισμός έγινε με βάση την παρακάτω μαθηματική σχέση, η οποία συσχετίζει τη συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ των φωτιστικών σωμάτων με την επιφάνεια του επιπέδου εργασίας:

$$P_{\text{ανά } m^2} = \frac{P_{\text{συνολική}}}{A} \quad [\text{εξ. 4-3}]$$

Όπου $P_{\text{ανά } m^2}$: η ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο [W/m^2]

$P_{\text{συνολική}}$: η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού [W]

A: η συνολική επιφάνεια του χώρου [m^2]

Τα αποτελέσματα για την συγκεκριμένη υφιστάμενη εγκατάσταση του γραφείου παρουσιάζονται στο Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Δεδομένα υφιστάμενης εγκατεστημένης ισχύος.

Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m^2]	W/ m^2
1036.8	65	16

Ο συγκεκριμένος υπολογισμός κρίθηκε αναγκαίος, καθώς συμβάλλει ουσιαστικά στην αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του φωτιστικού συστήματος, σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις του εξεταζόμενου χώρου και τις ισχύουσες προδιαγραφές. Από τα αποτελέσματα του υπολογισμού διαπιστώθηκε ότι η εγκατεστημένη ισχύς είναι δυσανάλογα υψηλή σε σχέση με την επιφάνεια του χώρου, γεγονός που υποδηλώνει πιθανή μειωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος φωτισμού.

4.6 Ενεργειακή κατανάλωση της υφιστάμενης εγκατάστασης

Για να κατανοηθεί πιο ολοκληρωμένα η ανάγκη αναβάθμισης του συστήματος τεχνητού φωτισμού, κρίθηκε απαραίτητο να προηγηθεί η καταγραφή της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης στους τρεις ορόφους του κτηρίου. Η τεκμηρίωση αυτής της κατανάλωσης αποτελεί τη βάση για την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και την πρόταση βελτιωτικών παρεμβάσεων.

Στους υπολογισμούς της καταναλισκόμενης ενέργειας για φωτισμό λαμβάνονται υπόψη δύο βασικά στοιχεία:

- Οι ώρες λειτουργίας του κτηρίου με φυσικό φωτισμό (TD [h]), δηλαδή οι ώρες κατά τις οποίες υπάρχει διαθέσιμο φυσικό φως (συνήθως κατά τη διάρκεια της ημέρας).
- Οι ώρες λειτουργίας χωρίς φυσικό φωτισμό (TN [h]), που αντιστοιχούν κυρίως στις βραδινές ώρες.

Τα παραπάνω στοιχεία καθορίζουν τις συνολικές απαιτήσεις φωτισμού του κτηρίου και, κατά συνέπεια, την ενεργειακή κατανάλωση. Παράλληλα, καθορίζουν και τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ που διαχειρίζονται ενδεχομένως οι αυτοματισμοί, όπως οι αισθητήρες φωτός, τόσο τη μέρα όσο και τη νύχτα.

Οι υπολογισμοί βασίζονται σε τυπικά προγράμματα λειτουργίας: ημέρες ανά εβδομάδα και μήνες ανά έτος, ανάλογα με τη χρήση του κτηρίου και τη γεωγραφική του τοποθεσία. Σε κτήρια με 24ωρη λειτουργία, λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα περιορισμού του φωτισμού τις νυχτερινές ώρες σε χώρους που δεν χρησιμοποιούνται.

Για παράδειγμα, στα κτήρια γραφείων συνιστάται η χρήση χρονοδιακοπών που διακόπτουν τον γενικό φωτισμό μεταξύ 23:30 και 05:30, τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συμμόρφωση με τις ελάχιστες προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης. Αν όμως υπάρχει παρουσία εργαζομένου κατά τη διάρκεια αυτών των ωρών, το σύστημα επιτρέπει την παράκαμψη του χρονοπρογραμματισμού. Εξαιρείται, φυσικά, ο φωτισμός ασφαλείας, ο οποίος παραμένει ενεργός.

Οι ετήσιες ώρες λειτουργίας ανάλογα με τη χρήση του εκάστοτε χώρου δίνονται αναλυτικά στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-6 Συνολικές ώρες χρήσης ανά χώρο το χρόνο

Βασική χρήση χώρου	Ώρες λειτουργίας ημέρας (T_D)[h]	Ώρες λειτουργίας νύχτας (T_N)[h]	Σύνολο ωρών ($T_T = T_D + T_N$)[h]
Γραφεία	2250	250	2500
Βιβλιοθήκη	1040	520	1560

Η ενέργεια που καταναλώνει κάθε χώρος σε ετήσια βάση προκύπτει από τον συνδυασμό της εγκατεστημένης ισχύος του και του αριθμού των ωρών που χρησιμοποιείται ο φωτισμός του μέσα στη χρονιά.

$$E_{\gamma\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\iota\omicron\upsilon} = P_{\gamma\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\iota\omicron\upsilon} \times T_T \quad [\text{εξ. 4-4}]$$

Όπου $E_{\gamma\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\iota\omicron\upsilon}$: η ενέργεια που ξοδεύεται στο χώρο κάθε χρόνο [kWh]

$P_{\gamma\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\iota\omicron\upsilon}$: η συνολική ισχύς των φωτιστικών που υπάρχουν στο χώρο [kW]

T_T : οι συνολικές ώρες λειτουργίας του χώρου σε ένα έτος

Τα στοιχεία που προέκυψαν από τους υπολογισμούς κάνοντας χρήση της εξίσωσης 4-4 και απλή αντικατάσταση δεδομένων καταγράφονται στους επόμενο πίνακα

	Κατανάλωση [kWh]
Γραφείο 65τμ	2592

4.7 Μελέτη φωτισμού για τον χώρο του τεχνικού γραφείου – 4,000 K

4.7.1 Σενάριο A.1

Η επιλογή και ο έλεγχος των φωτιστικών σωμάτων πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης Relux, το οποίο βασίζεται στην πλατφόρμα RADIANCE. Αρχικά, σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα όλοι οι χώροι των τριών επιπέδων, αξιοποιώντας τις κατόψεις σε μορφή AutoCAD, από τις οποίες εισήχθησαν και τα γεωμετρικά δεδομένα. Στη συνέχεια, μέσω της ηλεκτρονικής βιβλιοθήκης ReluxNet, εισήχθησαν τα φωτομετρικά αρχεία των φωτιστικών σωμάτων και εκτελέστηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1: Light and lighting – Lighting of work places – Indoor work places. Για την ακρίβεια των υπολογισμών, ο συντελεστής συντήρησης (maintenance factor) θεωρήθηκε ίσος με 0.8, ώστε να ληφθεί υπόψη η μείωση της απόδοσης των φωτιστικών με την πάροδο του χρόνου.

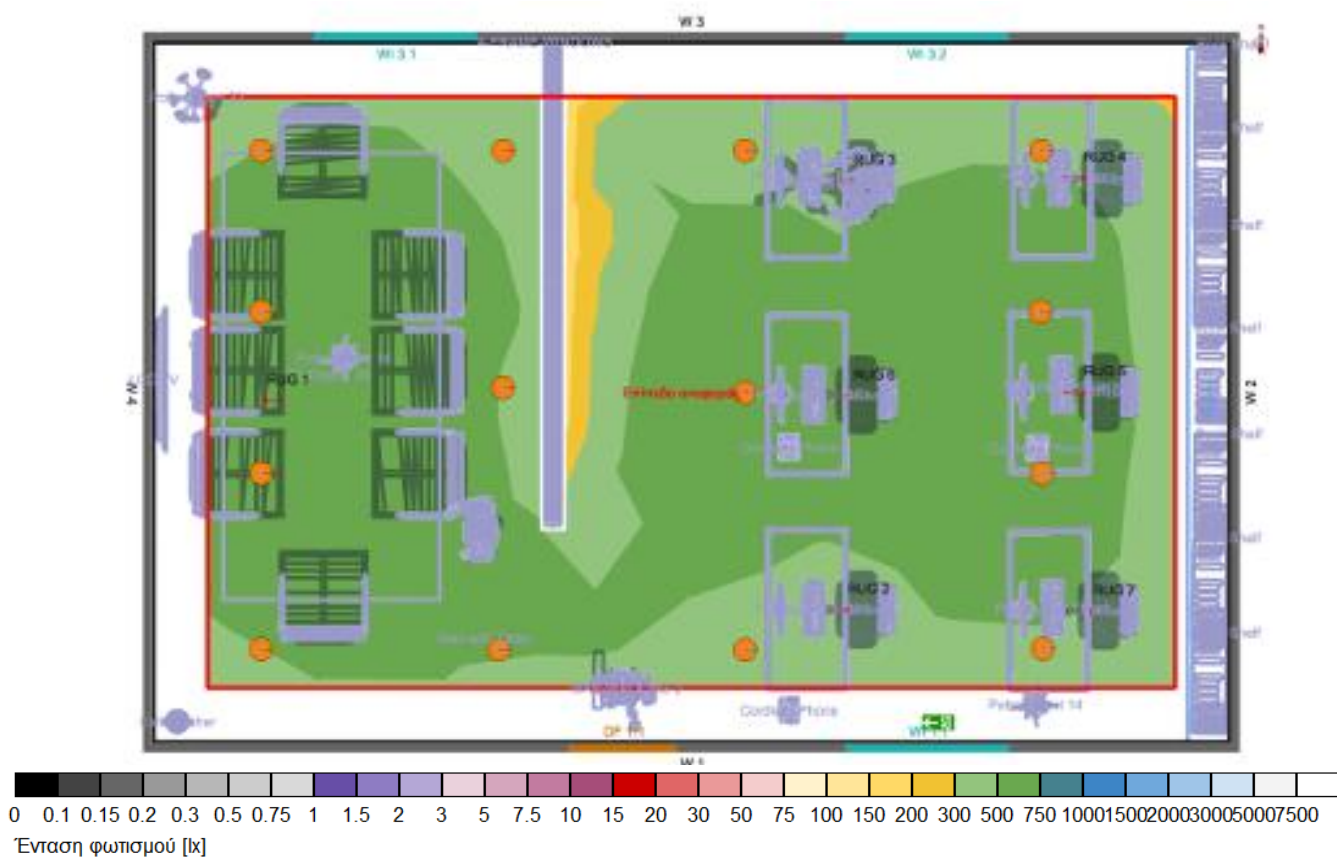
Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις που σχετίζονται με τις τιμές Em, UGR και Uo, όπως ορίζονται στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021 (Πίνακας 4.3) και έχουν αναφερθεί αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το προτεινόμενο σύστημα τεχνητού φωτισμού αποτελείται αποκλειστικά από φωτιστικά τύπου LED, τα οποία προσφέρουν υψηλή ενεργειακή απόδοση και ποιότητα φωτισμού.

Στο πλαίσιο του Σεναρίου A.1, πραγματοποιήθηκε αναλυτική μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά φωτιστικά τύπου Philips GreenSpace DN471B_840/DN471B 1xLED30S/840 C τα οποία είναι θερμοκρασίας 4,000 K (ουδέτερο λευκό). Με τη βοήθεια του λογισμικού Relux και με δεδομένα που εισήχθησαν από το ReluxNet, υπολογίστηκαν οι φωτομετρικές επιδόσεις του συστήματος και τα αποτελέσματα παρατίθενται στη συνέχεια.

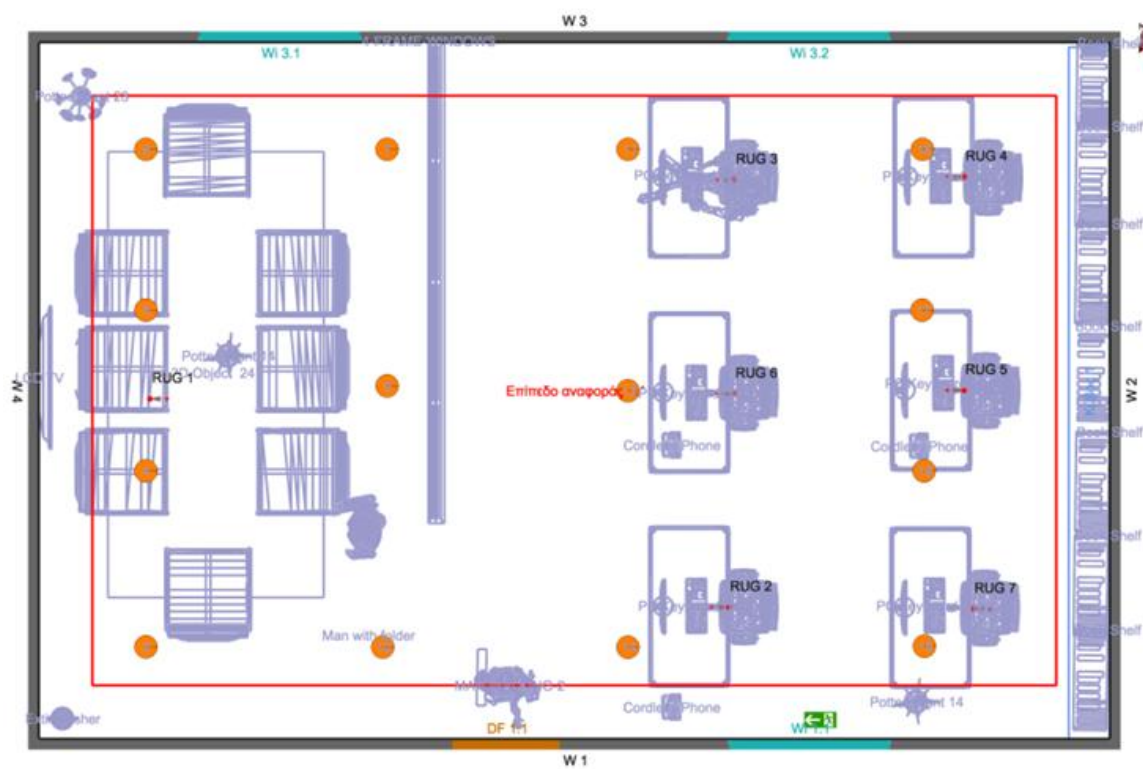
Μαζί με τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας, ο αριθμός των φωτιστικών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και μία τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου με την τοποθέτηση των φωτιστικών.

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο Α

Θέσεις εργασίας : 7	Αριθμός φωτιστικών: 14
Em(lux)	516.8
Uo	0.77
UGR1	18.3
UGR2	12.7
UGR3	14.7
UGR4	11.7
UGR5	11.7
UGR6	14
UGR7	10



Εικόνα 4.4 Αποτελέσματα μελέτης φωτισμού στο Relux για το σενάριο Α.



Υπολογισμοός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Σύμφωνα με την εκτενή αναφορά που έγινε στο κεφάλαιο 2.7, τα EML στηρίζονται στην κάθετη ένταση στο ύψος του οφθαλμού και στη φασματική κατανομή ισχύος του εκπεμπόμενου φωτός στο σημείο της μέτρησης. Στο κεφάλαιο 3.1 για τον υπολογισμό του Melanopic Lux (EML) θα πρέπει να γίνεται πολλαπλασιασμός του φωτοπικού Lux (L) με το συντελεστή R.

$$EML = L (lx) \cdot MEER \quad (Εξ. 3-8)$$

R ή MEER μελανόπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, Melanopic Equal-energy Efficacy Ratio που αποτελεί την αναλογία της απόκρισης των ipRGC ως προς την φωτοπική απόκριση για κάθε εξεταζόμενη πηγή – φάσμα.

Με βάση αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω και με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν με τις μελέτες με την βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης Relux, θα προκύψει ο παρακάτω Πίνακας 4.9 με τα αποτελέσματα για τα EML το σενάριο A.1. Τον συντελεστεί R για κάθε φωτιστικό έχει γίνει υπολογισμός του στο κεφάλαιο 3.2.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα μελέτης σεναρίου A.1 για το EML.

	Σενάριο A.1
Em(lx)	516.8
EML	312.15

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Για την τιμή του κιρκάδιου ερεθίσματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι ώρες που θα πραγματοποιούνται δραστηριότητες στο χώρο. Οι ώρες αυτές στη συγκεκριμένη μελέτη είναι οι ώρες λειτουργίας του τεχνικού γραφείου, οι οποίες είναι μεταξύ 7:00 AM – 4:00 PM. Έτσι προκύπτει για το κιρκάδιο ερέθισμα ότι η τιμή που θα πρέπει να επιτευχθεί είναι το 0,3 σύμφωνα πάντα με τον παρακάτω πίνακα του ερευνητικού κέντρου **Lighting Research Center (LRC)** [21] που είναι αφιερωμένο στην μελέτη και την προώθηση της επιστήμης του φωτισμού αλλά και την οδηγία του TOTEE 20701-7/2021 [3]. Αν το ωράριο ήταν διαφορετικό ήταν διαφορετικό τότε η τιμή του κιρκάδιου ερεθίσματος θα έπρεπε να διαμορφώνονταν σύμφωνα με τον προαναφερόμενο πίνακα.

Πίνακας 4.10: Τιμές CS ανάλογα με την ώρα μέσα στην ημέρα για μελέτες που χρησιμοποιούν φωτιστικά με σταθερή θερμοκρασία και κατανομή φασματικής ισχύος (LRC) [21].

CS για τεχνικό γραφείο	
Ώρα	Χαμηλότερο όριο
7:00 AM – 4:00 PM	0.3
4:00 PM – 5:00 PM	0.2
5:00 PM – 7:00 PM	0.2
7:00 PM – 8:00 PM	0.2
8:00 PM – Τέλος ημέρα	0.1

Στον υπολογισμό του κερκάρδιου ερεθίσματος (CS) θα γίνει εφαρμογή του λογισμικού του LRC θέτοντας τις τιμές έντασης (Em) που υπολογίστηκαν παραπάνω και έτσι θα προκύψει ο Πίνακας 4.8 των αποτελεσμάτων για του CS για το σενάριο φωτισμού A.1.

	Σενάριο A.1
Em(lux)	516.8
CS	0.296

4.7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου A.1

Για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της πρότασης A, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης ολόκληρης της εγκατάστασης. Παράλληλα, εξετάστηκαν και τα αποτελέσματα που παρείχε το λογισμικό Relux, ώστε να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με την αποδοτικότητα της προτεινόμενης λύσης.

Αρχικά έγινε ο υπολογισμός της εγκατεστημένης ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο, χρησιμοποιώντας τον τύπο της εξίσωσης 4-3. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.8. Από τη σύγκριση με τα όρια που είχαν καθοριστεί (στην αρχή του κεφαλαίου 4-1), προκύπτει ότι η προτεινόμενη εγκατάσταση οδήγησε σε σημαντική μείωση της εγκατεστημένης ισχύος.

Πίνακας 4.12: Δεδομένα της εγκατεστημένης ισχύος του σεναρίου A.1.

Σενάριο A.1	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m ²]	[W/m ²]
	14	406	65	6.25

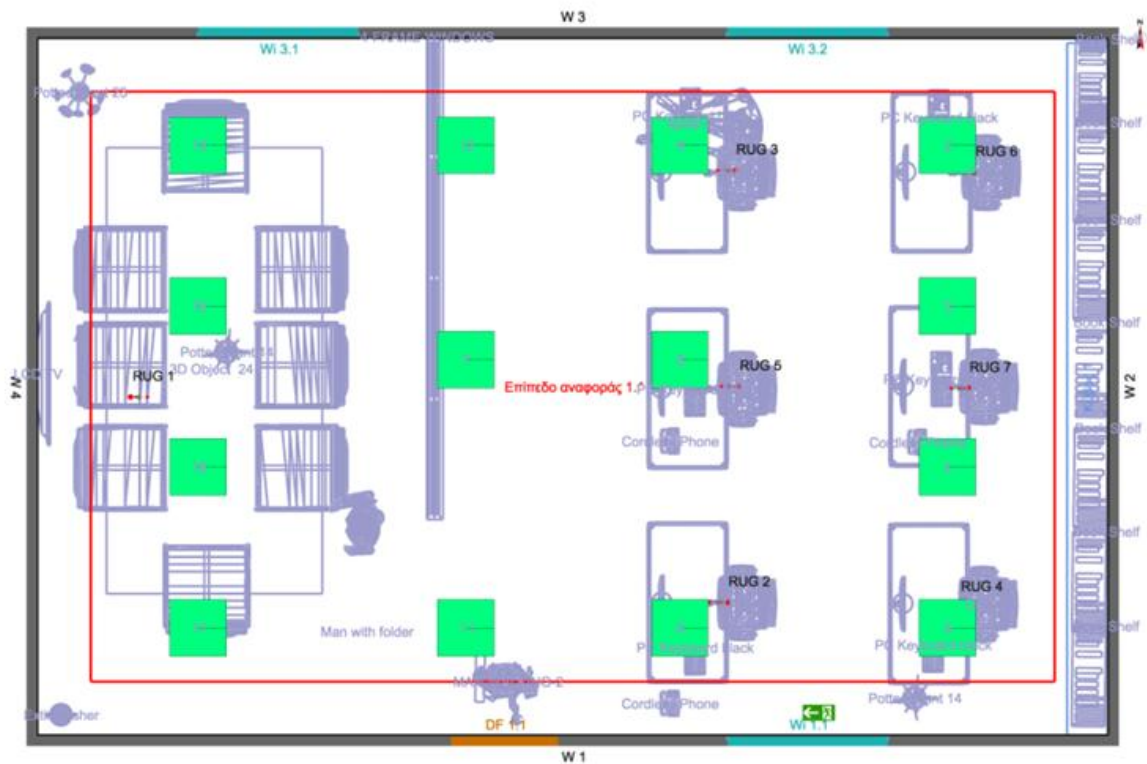
Η μελέτη φωτισμού για το σενάριο A.1 που πραγματοποιήθηκε για τον χώρο των γραφείων που πρόκειται να γίνει νέα εγκατάσταση φωτισμού φαίνεται να καλύπτει πλήρως όλες τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Η μέση στάθμη φωτισμού είναι 516.8 lx, τιμή που ξεπερνά το όριο των 500 lx, ενώ η ομοιομορφία είναι 0.77, δηλαδή αρκετά καλύτερη από το ελάχιστο απαιτούμενο 0,6. Ο δείκτης θάμβωσης (UGR) κυμαίνεται από 10 έως 18,3, οπότε δεν δημιουργείται δυσφορία στους εργαζόμενους, ενώ και ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (Ra = 80) είναι στο αποδεκτό όριο. Τα φωτιστικά που χρησιμοποιήθηκαν έχουν υψηλή απόδοση (110 lm/W), κάτι που συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 406 W, που αντιστοιχεί σε μόλις 6.25 W/m² (Πίνακας 4-8) , πολύ χαμηλότερη από το επιτρεπόμενο όριο των 14 W/m² σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ και ακόμα πιο χαμηλή από την υφιστάμενη εγκατάσταση που ήταν στα 16W/m². Σημαντικό είναι επίσης ότι το κερκάρδιο ερέθισμα (CS = 0.3) και τα melanopic lux (312.15 EML) βρίσκονται στα επιθυμητά επίπεδα, κάτι που ευνοεί την εγρήγορση και τη συγκέντρωση των εργαζομένων κατά τις πρωινές ώρες. Συνολικά, η προτεινόμενη λύση θεωρείται ιδιαίτερα αποδοτική τόσο από ενεργειακής πλευράς όσο και από άποψη οπτικής και βιολογικής άνεσης.

4.7.3 Σενάριο B.1

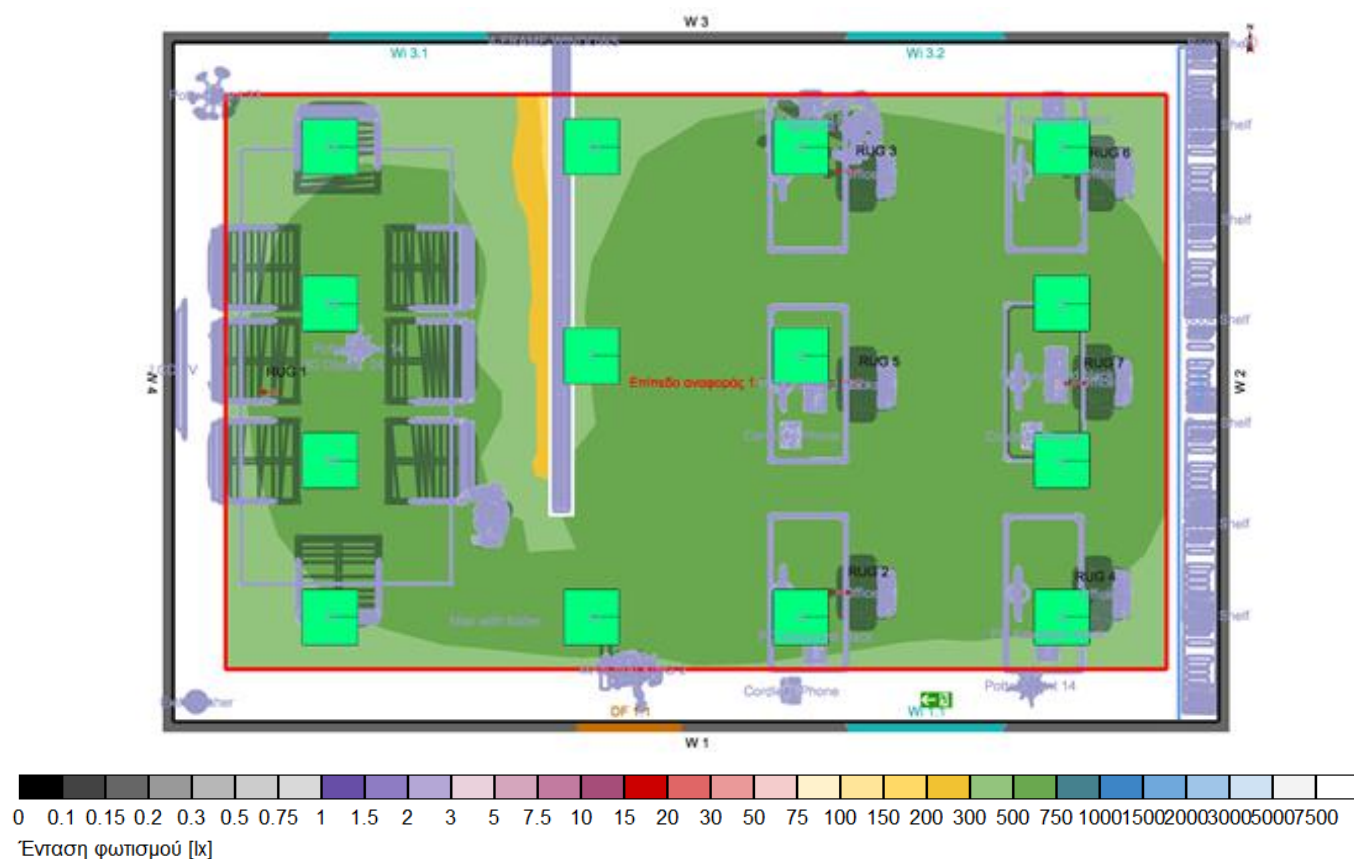
Το σενάριο B θα πραγματοποιηθεί η μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο φωτιστικά του τύπου 3F Filippi - 23953 - L340 25W L340 Tunable White LGS τα οποία είναι 4,000 K. Με τη βοήθεια του λογισμικού Relux, στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα του φωτιστικού από το Reluxnet, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός και παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα. Μαζί με τα αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας και ο αριθμός των φωτιστικών και μία τρισδιάστατη απεικόνιση.

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο B.1.

Θέσεις εργασίας :7	Αριθμός φωτιστικών: 14
Em(lux)	557.9
Uo	0.72
UGR1	13.2
UGR2	13.5
UGR3	14.6
UGR4	14.7
UGR5	13.7
UGR6	14.5
UGR7	14.7



Εικόνα 4.3: Κάτοψη γραφείου με τις θέσεις των φωτιστικών του σεναρίου B.



Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα μελέτης φωτισμού στο Relux για το σενάριο B.1.

Υπολογισμός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.2, ο υπολογισμός του EML βασίζεται στην κάθετη ένταση φωτισμού στο ύψος του οφθαλμού και στη φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής. Με χρήση του λογισμικού Relux για το Σενάριο B.1, προέκυψε τιμή φωτισμού $E_m = 557.9 \text{ lx}$, η οποία αντιστοιχεί σε $EML = 328.6$ μετά τον υπολογισμό με τον αντίστοιχο συντελεστή R, σύμφωνα με την εξίσωση 3-8.

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Λαμβάνοντας υπόψη το ωράριο λειτουργίας (07:00–16:00), σύμφωνα με τις οδηγίες του Lighting Research Center (LRC) και της TOTEE 20701-7/2021, η ελάχιστη τιμή CS που απαιτείται είναι 0.3. Με βάση τους υπολογισμούς μέσω του λογισμικού LRC και τις τιμές έντασης E_m που αναφέρθηκαν παραπάνω, το Σενάριο B.1 εμφανίζει τιμή $CS = 0.308$, καλύπτοντας έτσι τις προτεινόμενες προδιαγραφές.

4.7.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου B.1

Όπως και για το σενάριο A.1, έτσι και για το B.1 για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του σεναρίου, θα γίνει υπολογίστηκε η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο, χρησιμοποιώντας τον τύπο της εξίσωσης 4-8. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 4.14. Από τη σύγκριση με τα όρια που είχαν καθοριστεί (στην αρχή του κεφαλαίου 4-1), προκύπτει ότι η προτεινόμενη εγκατάσταση οδήγησε σε σημαντική μείωση της εγκατεστημένης ισχύος.

Πίνακας 4.13: Εγκατεστημένη ισχύς σενάριο B.1.

Σενάριο B.1	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m ²]	[W/m ²]
	14	420	65	6.46

Η μελέτη φωτισμού για το Σενάριο B.2 που πραγματοποιήθηκε για τον χώρο των γραφείων φαίνεται να καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις για τη νέα εγκατάσταση φωτισμού. Η μέση στάθμη φωτισμού είναι 557.9 lx, τιμή που υπερβαίνει το ελάχιστο απαιτούμενο όριο των 500 lx, ενώ η ομοιομορφία είναι 0.72, αρκετά υψηλότερη από το αποδεκτό 0.6, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφο φωτισμό στον χώρο εργασίας.

Ο δείκτης θάμβωσης (UGR) κυμαίνεται από 13.2 έως 14.7, χαμηλές τιμές που δεν προκαλούν οπτική δυσφορία στους εργαζόμενους, και ο δείκτης χρωματικής απόδοσης ($R_a = 80$) βρίσκεται στο αποδεκτό όριο για εργασιακούς χώρους. Τα φωτιστικά διαθέτουν υψηλή φωτεινή απόδοση (126 lm/W), συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του χώρου είναι 420 W, τιμή που παραμένει κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια του KENAK ακόμα πιο χαμηλή από την υφιστάμενη εγκατάσταση που ήταν στα 16W/m².

Σε ό,τι αφορά τα βιολογικά κριτήρια, τόσο το κερκάδιο ερέθισμα ($CS = 0.31$) όσο και τα Melanopic lux (328.6 EML) βρίσκονται σε επίπεδα που ευνοούν την εγρήγορση και τη συγκέντρωση των εργαζομένων κατά τη διάρκεια της εργασίας.

4.7.5 Σενάριο Γ.1

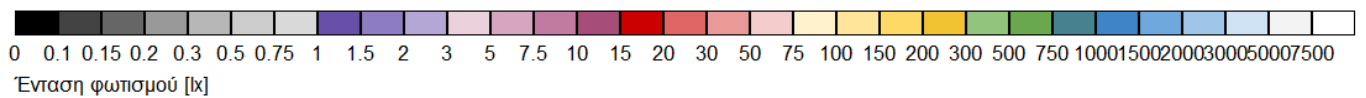
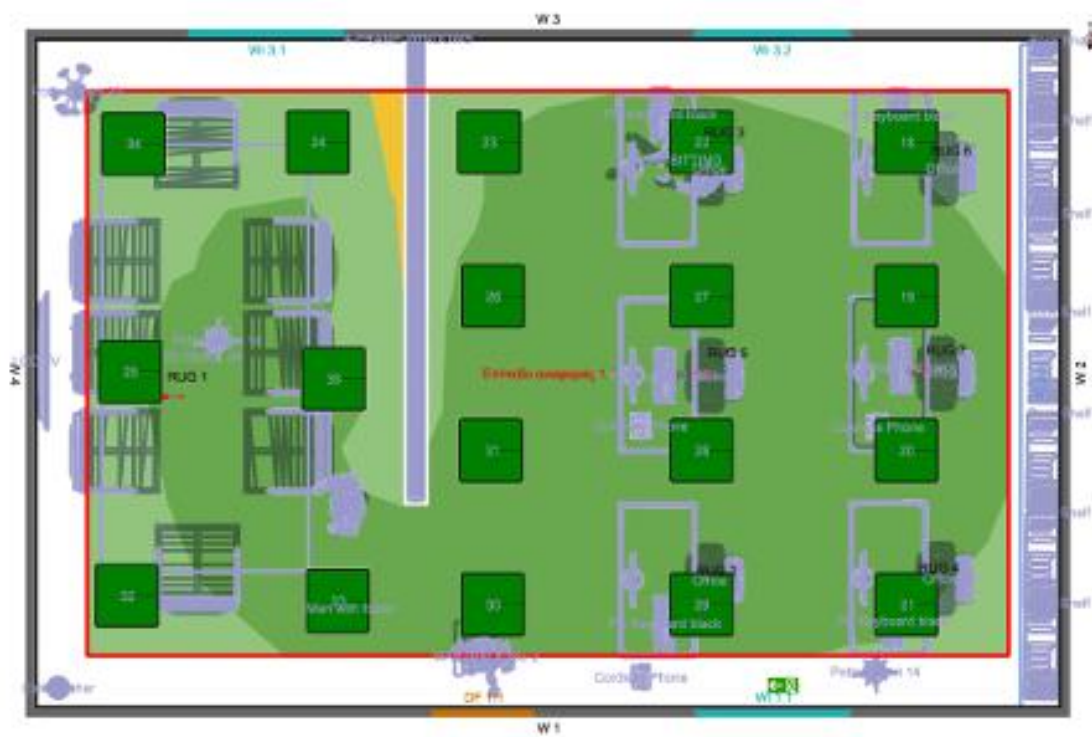
Το σενάριο Γ θα πραγματοποιηθεί η μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο φωτιστικά του τύπου Advance Carina LED PC7 59 37 40 80 WH ND τα οποία είναι 4,000 K. Με τη βοήθεια του λογισμικού Relux, στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα του φωτιστικού από το Reluxnet., πραγματοποιήθηκε υπολογισμός και παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα. Μαζί με τα αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας και ο αριθμός των φωτιστικών και μία τρισδιάστατη απεικόνιση.

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο Γ.1.

Θέσεις εργασίας :7	Αριθμός φωτιστικών: 18
Em(lux)	572.4
Uo	0.67
UGR1	18.1
UGR2	16.7
UGR3	18.2
UGR4	19
UGR5	16.9
UGR6	18.9
UGR7	19



Εικόνα 4.7 Κάτοψη γραφείου με τις θέσεις των φωτιστικών του σεναρίου Γ



Εικόνα 4.8: Αποτελέσματα μελέτης φωτισμού στο Relux για το σενάριο Γ.1.

Υπολογισμός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2, ο υπολογισμός του EML βασίζεται στην κάθετη ένταση φωτισμού στο ύψος του οφθαλμού και στη φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής. Για το Σενάριο Γ.1, μέσω του λογισμού Relux, υπολογίστηκε ένταση φωτισμού $E_m = 572.4 \text{ lx}$, η οποία αντιστοιχεί σε $EML = 366.34$ μετά την εφαρμογή του συντελεστή R σύμφωνα με την εξίσωση 3.8.

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Σύμφωνα με τις οδηγίες του Lighting Research Center (LRC) και της TOTEE 20701-7/2021, η ελάχιστη τιμή CS που απαιτείται για το ωράριο λειτουργίας (07:00–16:00) είναι 0.3. Βάσει των υπολογισμών με τα δεδομένα έντασης φωτισμού που προέκυψαν, το Σενάριο Γ.1 παρουσιάζει τιμή $CS = 0.334$, καλύπτοντας τις προτεινόμενες προδιαγραφές.

4.7.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Γ.1

Όπως και για τα προηγούμενα σενάρια (Α.1 και Β.1), έτσι και για το Γ.1, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του σεναρίου, υπολογίστηκε η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο, κάνοντας χρήση της εξίσωσης 4-8. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 4.15. Από τη σύγκριση με τα καθορισμένα όρια (στην αρχή του κεφαλαίου 4-1), παρατηρείται ότι και στην περίπτωση του σεναρίου Γ.1 η προτεινόμενη εγκατάσταση συμβάλλει στη μείωση της εγκατεστημένης ισχύος, διατηρώντας την εντός των αποδεκτών ορίων

Πίνακας 4.15: Εγκατεστημένη ισχύς σενάριο Γ.1.

Σενάριο Β.1	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m^2]	[W/m^2]
	18	540	65	8.3

Η μελέτη φωτισμού για το Σενάριο Γ.1, που αφορά τον χώρο των γραφείων, παρουσιάζει μέση στάθμη φωτισμού 572.4 lx , υπερκαλύπτοντας το ελάχιστο απαιτούμενο όριο των 500 lx . Η ομοιομορφία του φωτισμού είναι 0.67, τιμή άνω του αποδεκτού 0.6, εξασφαλίζοντας ικανοποιητική κατανομή φωτισμού στις θέσεις εργασίας.

Ο δείκτης θάμβωσης (UGR) κυμαίνεται μεταξύ 16.7 και 19, με το συνιστώμενο όριο να είναι <19 για χώρους γραφείων. Παρατηρείται ότι σε δύο θέσεις εργασίας το UGR φτάνει το όριο (19), γεγονός που απαιτεί προσοχή στον σχεδιασμό για αποφυγή πιθανής οπτικής δυσφορίας. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης ($R_a = 80$) είναι αποδεκτός για γραφειακό περιβάλλον, ενώ τα φωτιστικά διαθέτουν απόδοση $118 \text{ lm}/\text{W}$, συμβάλλοντας σε σχετικά καλή ενεργειακή απόδοση. Η εγκατεστημένη ισχύς για τον χώρο είναι 540 W , τιμή εντός των ορίων του KENAK και ακόμα πιο χαμηλή από την υφιστάμενη εγκατάσταση που ήταν στα $16 \text{ W}/\text{m}^2$, παρότι υψηλότερη από άλλες εναλλακτικές λύσεις.

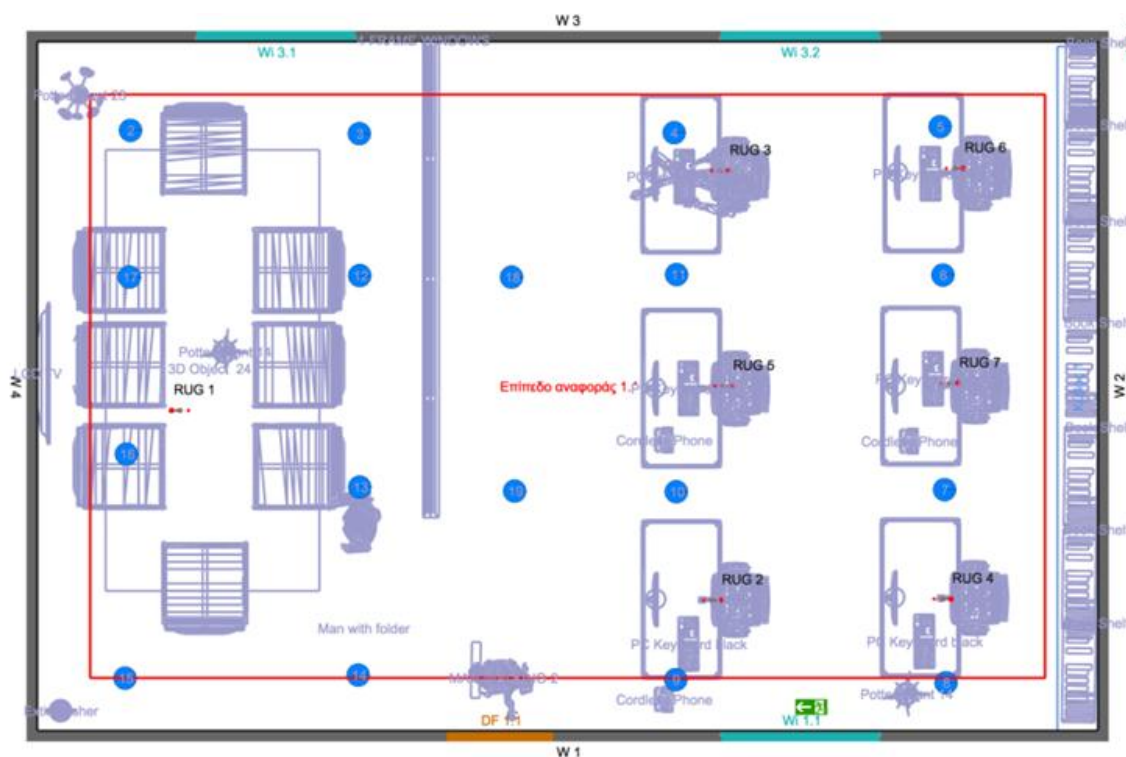
Σε σχέση με τα βιολογικά κριτήρια, το κιρκάδιο ερέθισμα ($CS = 0.334$) και τα melanopic lux (366.34 EML) βρίσκονται σε επίπεδα που υποστηρίζουν την εγρήγορση και τη συγκέντρωση κατά τη διάρκεια του εργασιακού ωραρίου. Συνολικά, το σενάριο Γ.1 ικανοποιεί τις βασικές προδιαγραφές φωτισμού, με μικρό περιθώριο βελτίωσης όσον αφορά τον περιορισμό της θάμβωσης και την ελάττωση της εγκατεστημένης ισχύος

4.7.7 Σενάριο Δ.1

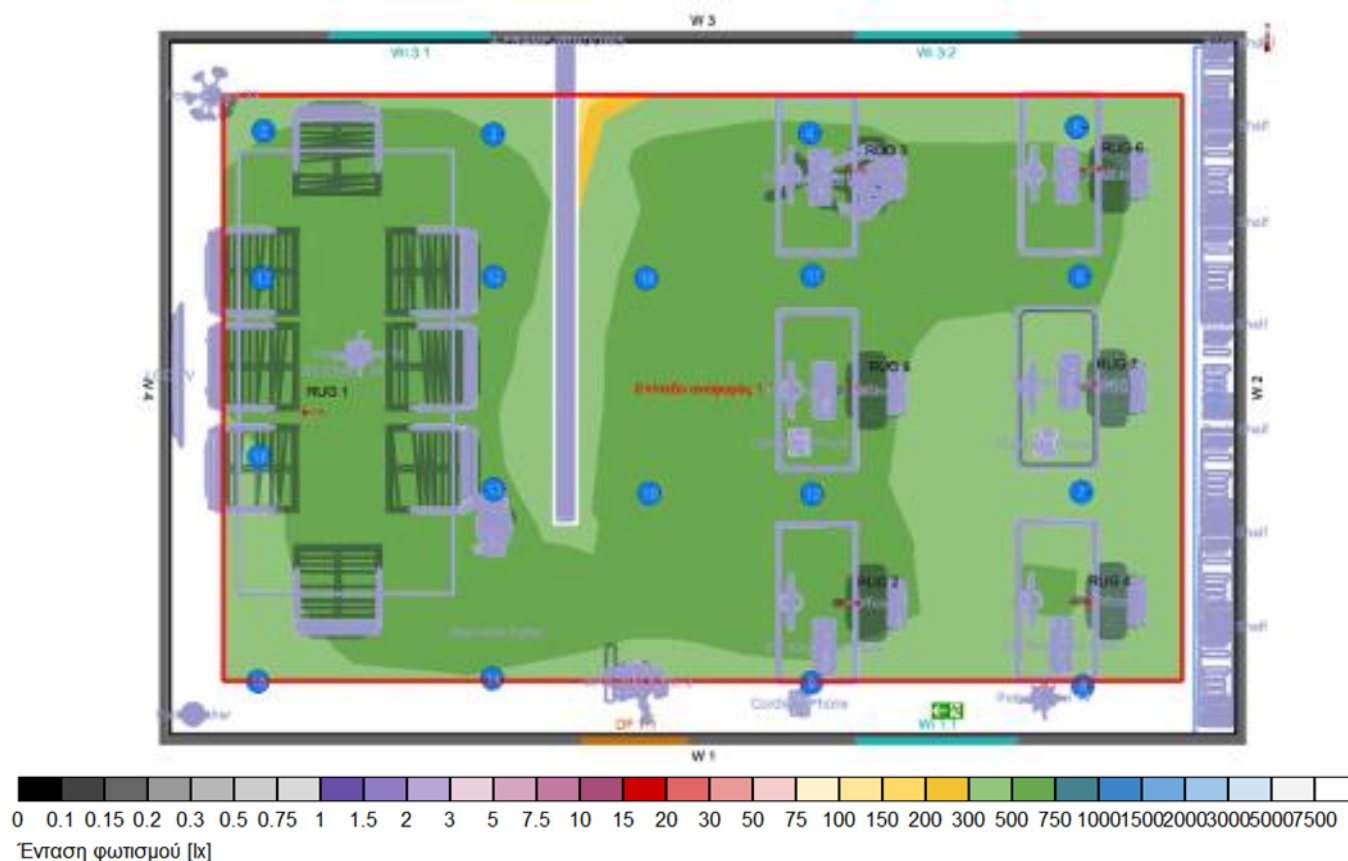
Το σενάριο Δ.1 θα πραγματοποιηθεί η μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο φωτιστικά του τύπου LEDVANCE DOWNLIGHT UGR19 DN195 21 W 840 WT τα οποία είναι 4,000 K. Με τη βοήθεια του λογισμικού Relux, στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα του φωτιστικού από το Reluxnet, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός και παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα. Μαζί με τα αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας και ο αριθμός των φωτιστικών και μία τρισδιάστατη απεικόνιση.

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο Δ.1.

Θέσεις εργασίας : 7	Αριθμός φωτιστικών: 18
Em(lux)	549.4
Uo	0.77
UGR1	16.7
UGR2	13.2
UGR3	13.6
UGR4	14.3
UGR5	16.3
UGR6	12.7
UGR7	12.9



Εικόνα 4.9 Κάτοψη γραφείου με τις θέσεις των φωτιστικών του σεναρίου Δ.1.



Εικόνα 4.10 Αποτελέσματα μελέτης φωτισμού στο Relux για το σενάριο Δ.1.

Υπολογισμός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.2, για το Σενάριο Δ.1 μέσω λογισμικού του Relux προέκυψε τιμή έντασης φωτισμού $E_m = 549.4 \text{ lx}$, η οποία αντιστοιχεί σε $EML = 406.56$ μετά τον υπολογισμό με τον συντελεστή R σύμφωνα με την εξίσωση 3.8.

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Με βάση τις οδηγίες του LRC και τις απαιτήσεις της TOTEE 20701-7/2021 για το ωράριο 07:00–16:00 (ελάχιστη τιμή $CS = 0.3$), το Σενάριο Δ.1 παρουσίασε $CS = 0.367$, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις για την ενίσχυση του κιρκάδιου ρυθμού.

4.7.8 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Δ.1.

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με τα προηγούμενα σενάρια, για το Δ.1 έγινε εκ νέου ο υπολογισμός της εγκατεστημένης ισχύος ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο του χώρου, σύμφωνα με την εξίσωση 4-8. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 4.16 και συγκρίθηκαν με τα όρια που τέθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου 4-1. Η ανάλυση δείχνει ότι η εφαρμογή του σεναρίου Δ.1 οδηγεί επίσης σε αισθητή μείωση της εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

Πίνακας 4.16: Εγκατεστημένη ισχύς σενάριο Δ.1.

Σενάριο B.1	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m ²]	[W/m ²]
	18	378	65	5.81

Η μελέτη φωτισμού για το Σενάριο Δ.1 παρουσιάζει μέση στάθμη φωτισμού 549.4 lx, τιμή που υπερβαίνει το ελάχιστο όριο των 500 lx. Η ομοιομορφία είναι 0.77, υψηλότερη από το αποδεκτό 0.6, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού στις θέσεις εργασίας.

Οι τιμές του δείκτη θάμβωσης (UGR) κυμαίνονται από 12.7 έως 16.7, πολύ κάτω από το συνιστώμενο όριο των <19, γεγονός που εξασφαλίζει οπτική άνεση χωρίς θάμβωση για τους εργαζομένους. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (Ra = 80) βρίσκεται σε αποδεκτό επίπεδο, ενώ η απόδοση των φωτιστικών φτάνει τα 120 lm/W, ενισχύοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του χώρου είναι 378 W, χαμηλότερη από τις περισσότερες προτάσεις και εντός των επιτρεπόμενων ορίων του ΚΕΝΑΚ.

Τα βιολογικά κριτήρια παρουσιάζονται σε καλό επίπεδο, με κινκάρδιο ερέθισμα (CS = 0.367) και melanopic lux (406.56 EML) που συμβάλλουν στην εγρήγορση και στην ευεξία των εργαζομένων. Συνολικά, το σενάριο Δ.1 αποτελεί μια αποδοτική και ισορροπημένη λύση, προσφέροντας υψηλή ποιότητα φωτισμού, χαμηλή θάμβωση και μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση.

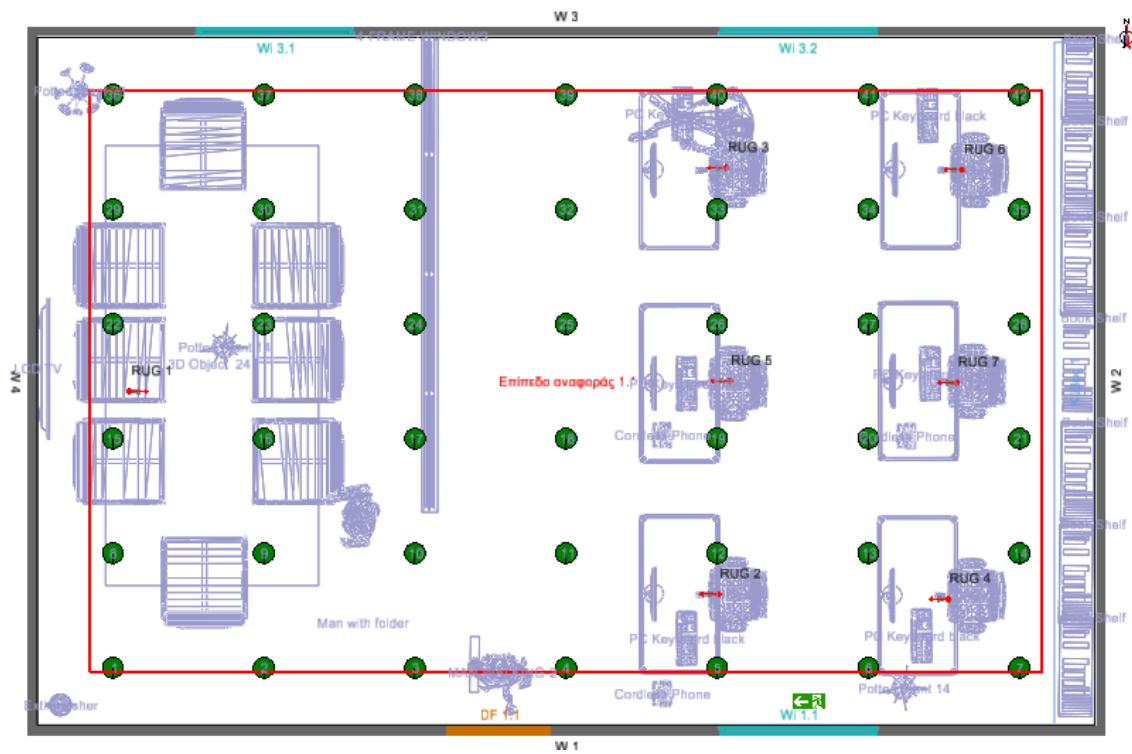
4.8 Μελέτη φωτισμού για τον χώρο του τεχνικού γραφείου – 3,000 K

4.8.1 Σενάριο A.2

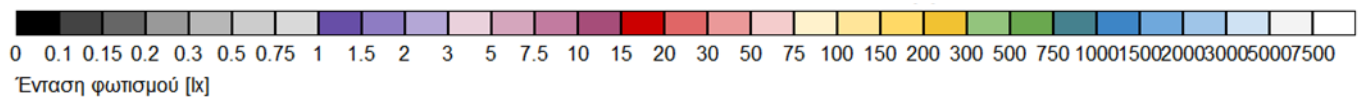
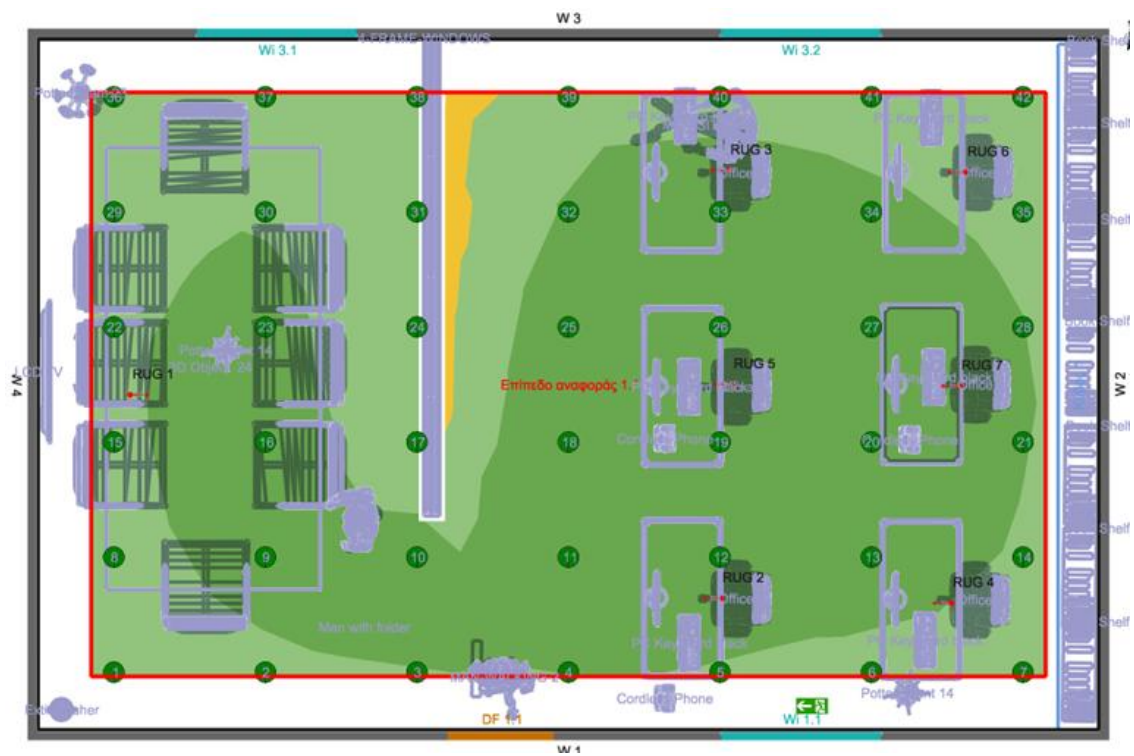
Το σενάριο A.2 όσο αφορά τα φωτιστικά της Warm white (3,000 K) κατηγορίας θα πραγματοποιηθεί η μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο φωτιστικά του τύπου LEDVANCE DOWNLIGHT SLIM ALU GEN 1 180 17 W 3000 K WT. Με τη βοήθεια του λογισμικού Relux, στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα του φωτιστικού από το Reluxnet, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός και παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα. Μαζί με τα αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας και ο αριθμός των φωτιστικών και μία τρισδιάστατη απεικόνιση.

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο A.2 (3,000 K).

Θέσεις εργασίας : 7	Αριθμός φωτιστικών: 42
Em(lx)	517.7
Uo	0.72
UGR1	25.5
UGR2	24.7
UGR3	26.2
UGR4	24.9
UGR5	26.3
UGR6	26.7
UGR7	25.3



Εικόνα 4.10 Κάτοψη γραφείου με τις θέσεις των φωτιστικών του σεναρίου A.2 (3,000 K).



Εικόνα 4.6 Αποτελέσματα μελέτης φωτισμού στο Relux για το σενάριο A (3,000 K).

Υπολογισμός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.2, ο υπολογισμός του EML βασίζεται στην κάθετη ένταση φωτισμού στο ύψος του οφθαλμού καθώς και στη φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής. Για το Σενάριο A.2, μέσω του λογισμικού Relux υπολογίστηκε ένταση φωτισμού $E_m = 517.7 \text{ lx}$, η οποία αντιστοιχεί σε $EML = 269.2$ μετά την εφαρμογή του συντελεστή R, σύμφωνα με την εξίσωση 3.8.

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Λαμβάνοντας υπόψη το ωράριο λειτουργίας (07:00–16:00), και σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Lighting Research Center (LRC) και της TOTEE 20701-7/2021 για ελάχιστη τιμή $CS = 0.3$, το Σενάριο A.2 παρουσιάζει $CS = 0.41$, υπερκαλύπτοντας τις προδιαγραφές για την ενεργοποίηση του κιρκάδιου ρυθμού.

4.8.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου A.2

Όπως και για τα προηγούμενα σενάρια με φωτισμό θερμοκρασίας 4,000 K, έτσι και για το A.2, το οποίο αποτελεί το πρώτο σενάριο για θερμοκρασία χρώματος 3,000 K, προκειμένου να αξιολογηθεί η ενεργειακή του αποτελεσματικότητα, υπολογίστηκε η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο, σύμφωνα με την εξίσωση 4-8. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.18. Από τη σύγκριση με τα καθορισμένα όρια που παρουσιάζονται στην αρχή του κεφαλαίου 4.1, παρατηρείται ότι η προτεινόμενη εγκατάσταση του σεναρίου A.2 κινείται εντός των αποδεκτών ορίων.

Πίνακας 4.18: Εγκατεστημένη ισχύς σενάριο A.2.

Σενάριο A.2	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m^2]	[W/m^2]
	42	714	65	11

Η μελέτη φωτισμού για το Σενάριο A.2 παρουσιάζει μέση στάθμη φωτισμού 517.7 lx , καλύπτοντας το ελάχιστο όριο των 500 lx για εργασιακούς χώρους. Η ομοιομορφία ($U_0 = 0.72$) είναι επίσης υψηλότερη από το αποδεκτό κατώφλι των 0.6 , διασφαλίζοντας επαρκή κατανομή φωτός στις επιφάνειες εργασίας.

Οι τιμές του δείκτη θάμβωσης (UGR) κυμαίνονται από 24.7 έως 26.7 , υπερβαίνοντας το προτεινόμενο ανώτατο όριο του <19 . Αυτό ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την οπτική άνεση, καθώς αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης ενοχλητικής θάμβωσης σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης ($R_a = 80$) βρίσκεται εντός αποδεκτών επιπέδων, ωστόσο η φωτεινή απόδοση των φωτιστικών ($79 \text{ lm}/\text{W}$) είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με άλλες λύσεις που εξετάστηκαν, γεγονός που επηρεάζει την ενεργειακή απόδοση του σεναρίου. Η εγκατεστημένη ισχύς του χώρου φτάνει τα 714 W , τιμή υψηλότερη από άλλες εναλλακτικές αλλά εντός των επιτρεπόμενων ορίων του KENAK, ακόμα πιο χαμηλή από την υφιστάμενη εγκατάσταση που ήταν στα $16 \text{ W}/\text{m}^2$, υποδηλώνοντας αυξημένη κατανάλωση.

Από την πλευρά των βιολογικών κριτηρίων, τα αποτελέσματα είναι θετικά, με $EML = 269.2$ και $CS = 0.41$, προσφέροντας ικανοποιητικό επίπεδο κιρκάδιου ερεθίσματος και ενίσχυσης της ευεξίας των χρηστών. Συνολικά, το Σενάριο A.2 αποτελεί μια φωτοτεχνικά αποδεκτή

λύση, με θετικές επιδόσεις σε στάθμη φωτισμού, ομοιομορφία και κινκίδιο ερέθισμα, αλλά μειωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα και περιορισμένη οπτική άνεση λόγω αυξημένων τιμών UGR.

4.8.3 Σενάριο B.2

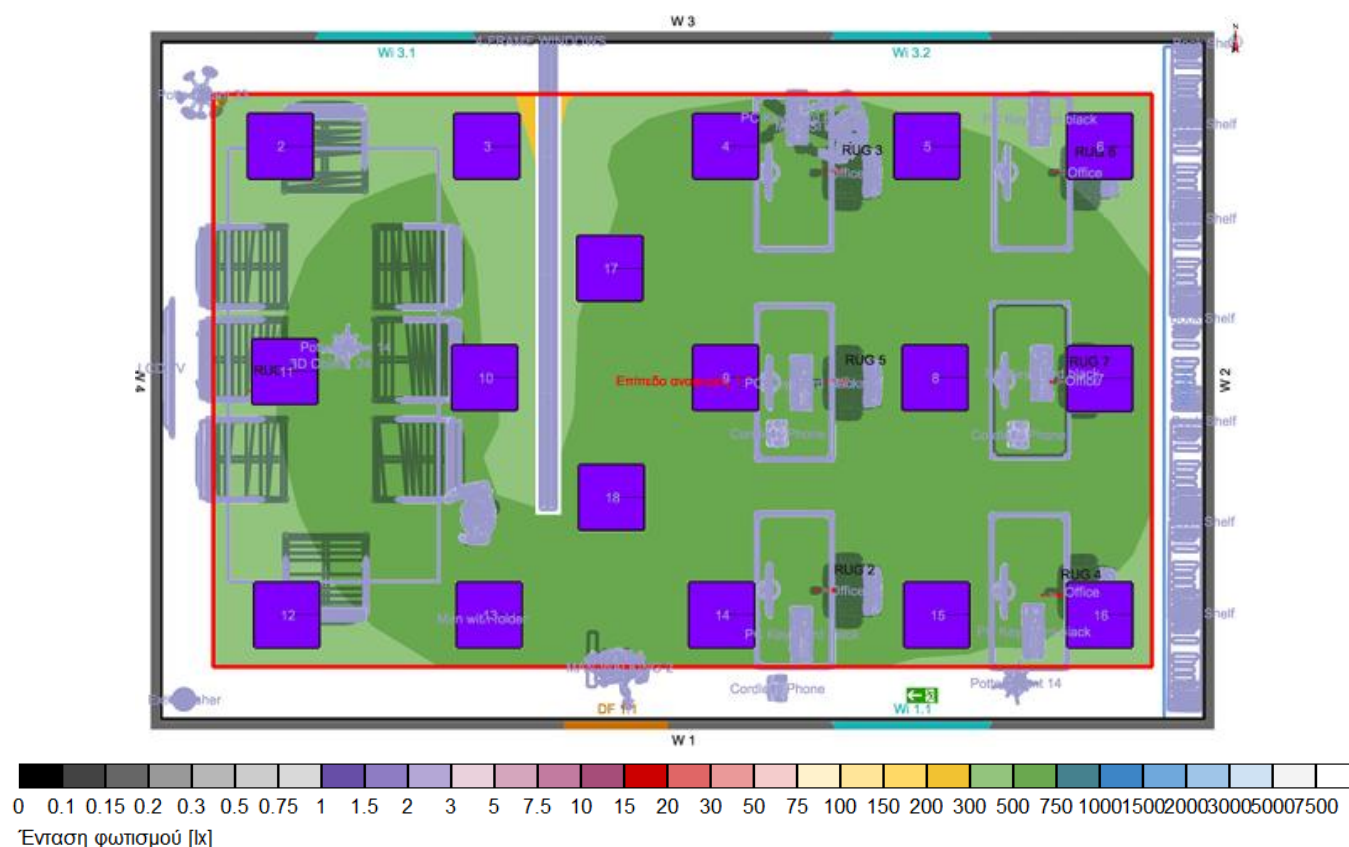
Το σενάριο B.2 θα πραγματοποιηθεί η μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο φωτιστικά του τύπου A.L.S. -DDH-30WW11P τα οποία είναι 3,000 K. Με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης Relux, στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα του φωτιστικού από το Reluxnet, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός και παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα. Μαζί με τα αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας και ο αριθμός των φωτιστικών και μία τρισδιάστατη απεικόνιση.

Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο B.2.

Θέσεις εργασίας :7	Αριθμός φωτιστικών: 17
Em(lux)	576.2
U ₀	0.64
UGR1	16.8
UGR2	15.5
UGR3	15.9
UGR4	16.4
UGR5	15.8
UGR6	16.5
UGR7	16.7



Εικόνα 4.12: Κάτοψη γραφείου με τις θέσεις των φωτιστικών του σεναρίου B.2 (3,000 K)



Εικόνα 4.13: Αποτελέσματα μελέτης στο Relux για το σενάριο B.2 (3,000 K).

Υπολογισμός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, ο υπολογισμός του EML βασίστηκε στην κάθετη ένταση φωτισμού στο ύψος του οφθαλμού και στη φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής, σύμφωνα με τη μεθοδολογία του κεφαλαίου 4.2. Από τον φωτιστικό υπολογισμό με το λογισμικό προσομοίωσης Relux για το Σενάριο B.2, προέκυψε ένταση φωτισμού $E_m = 576.2$ lx, η οποία μεταφράζεται σε $EML = 316.91$ με την εφαρμογή του συντελεστή R, όπως προβλέπεται στην εξίσωση 3.8.

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Λαμβάνοντας υπόψη το ωράριο λειτουργίας (07:00–16:00) και τις απαιτήσεις του Lighting Research Center (LRC) και της TOTEE 20701-7/2021, η ελάχιστη αποδεκτή τιμή είναι $CS = 0.3$. Για το Σενάριο B.2, ο υπολογισμός με βάση τα δεδομένα φωτισμού απέδωσε $CS = 0.44$, ικανοποιώντας πλήρως τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

4.8.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου B.2

Σε συνέχεια της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε και στο προηγούμενο σενάριο, έτσι και για το B.2, το οποίο αποτελεί το δεύτερο σενάριο για θερμοκρασία χρώματος 3,000 K, προκειμένου να αξιολογηθεί η ενεργειακή του αποτελεσματικότητα, υπολογίστηκε η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο, σύμφωνα με την εξίσωση 4-8. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.19. Από τη σύγκριση με τα καθορισμένα

όρια που παρουσιάζονται στην αρχή του κεφαλαίου 4.1, παρατηρείται ότι η προτεινόμενη εγκατάσταση του σεναρίου B.2 κινείται εντός των αποδεκτών ορίων.

Πίνακας 4.19: Εγκατεστημένη ισχύς σενάριο B.2.

Σενάριο B.2	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m ²]	[W/m ²]
	17	493	65	7.58

Η μελέτη φωτισμού για το Σενάριο B.2 δείχνει μέση στάθμη φωτισμού 576.2 lx, τιμή που υπερβαίνει το ελάχιστο αποδεκτό όριο των 500 lx για χώρους γραφείου. Η ομοιομορφία είναι 0.64, επίσης εντός των επιθυμητών ορίων (>0.6), εξασφαλίζοντας επαρκή κατανομή του φωτός στους σταθμούς εργασίας.

Οι τιμές του δείκτη θάμβωσης (UGR) κυμαίνονται μεταξύ 15.5 και 16.8, σαφώς κάτω από το όριο των <19, κάτι που εξασφαλίζει υψηλή οπτική άνεση χωρίς ενοχλητική θάμβωση. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (Ra = 80) είναι ικανοποιητικός, ανταποκρινόμενος στις απαιτήσεις για χώρους με οπτικές απαιτήσεις.

Η φωτεινή απόδοση των φωτιστικών είναι υψηλή (123 lm/W), γεγονός που ενισχύει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Η εγκατεστημένη ισχύς του χώρου ανέρχεται σε 493 W, αρκετά χαμηλότερη από άλλες εναλλακτικές, και εντός των προβλεπόμενων ορίων του KENAK και ακόμα πιο χαμηλή από την υφιστάμενη εγκατάσταση που ήταν στα 16W/m². Στην πλευρά των βιολογικών παραμέτρων, το Σενάριο B.2 παρουσιάζει EML = 316.91 και CS = 0.44, εξασφαλίζοντας ικανοποιητικό κερκάρδιο ερέθισμα, το οποίο μπορεί να συμβάλει θετικά στην ευεξία και τη γνωστική απόδοση των εργαζομένων.

Συνολικά, το Σενάριο B.2 αποτελεί μια ιδιαίτερα ισορροπημένη πρόταση, συνδυάζοντας αποτελεσματικά την ποιοτική στάθμη φωτισμού, την οπτική άνεση και τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.

4.8.5 Σενάριο Γ.2

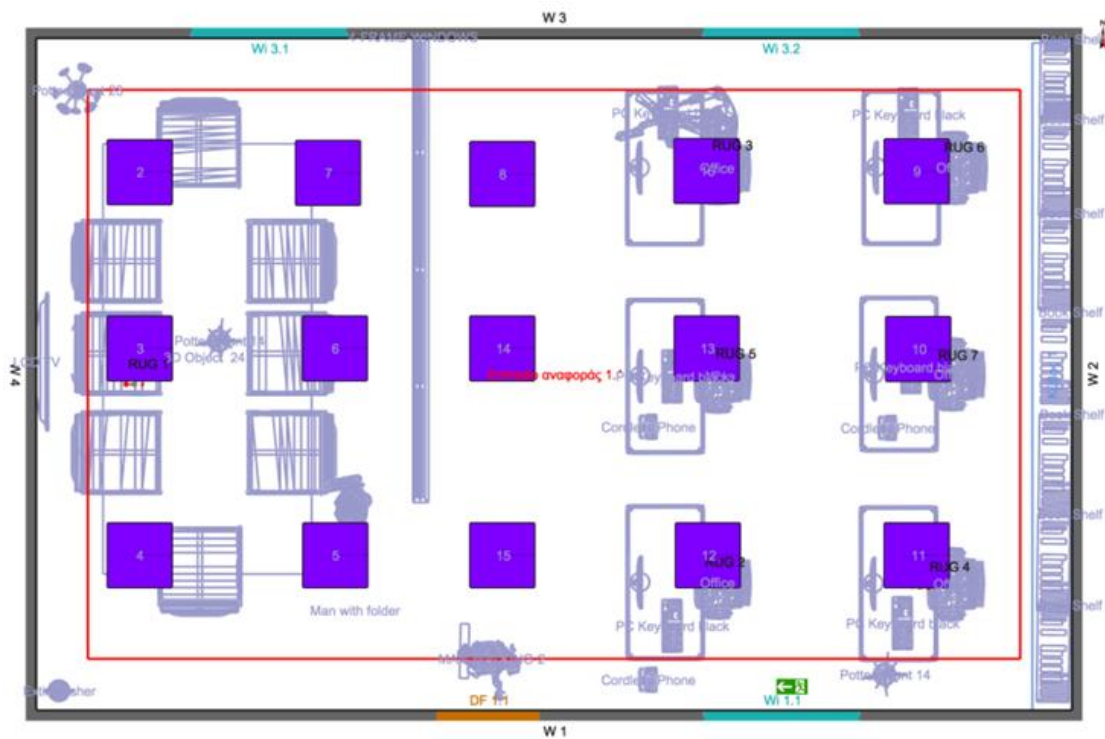
Το σενάριο Γ.2 θα πραγματοποιηθεί η μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο φωτιστικά του τύπου Siteco Apollon 41 τα οποία είναι 3,000 K. Με τη βοήθεια του λογισμικό προσομοίωσης Relux, στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα του φωτιστικού από το Reluxnet, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός και παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα. Μαζί με τα αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας και ο αριθμός των φωτιστικών και μία τρισδιάστατη απεικόνιση.

Πίνακας 4-4 Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο Γ.2

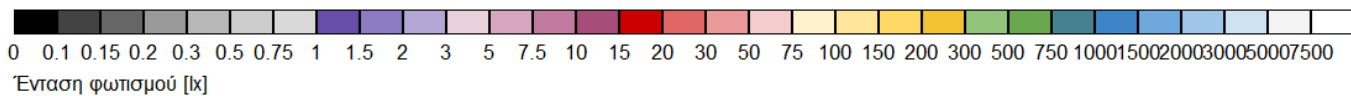
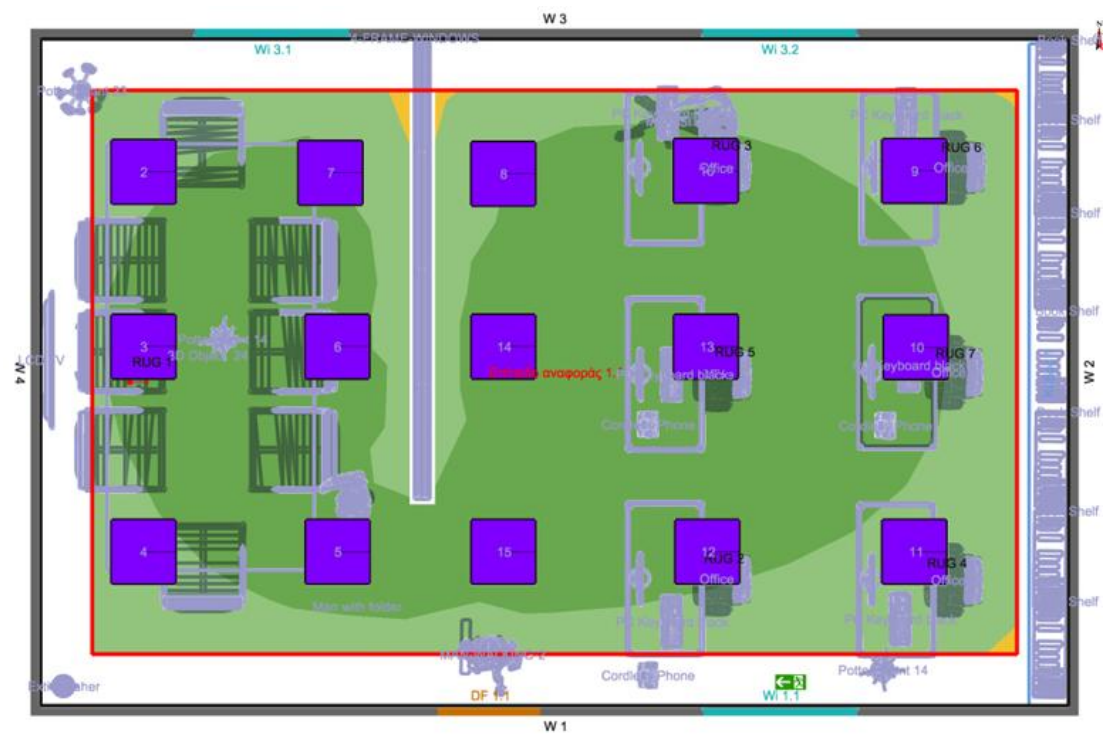
Θέσεις εργασίας :7	Αριθμός φωτιστικών: 15
Em(lux)	540
Uo	0.64
UGR1	15.3
UGR2	15.4
UGR3	15.8
UGR4	16.8
UGR5	15.3
UGR6	16.7

UGR7

16.7



Εικόνα 4.14: Κάτοψη γραφείου με τις θέσεις των φωτιστικών του σεναρίου Γ.2 (3,000 K).



Εικόνα 4.14: Αποτελέσματα μελέτης στο Relux για το σενάριο Γ.2 (3,000 K).

Υπολογισμός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.2, ο υπολογισμός του EML πραγματοποιείται βάσει της κάθετης έντασης φωτισμού στο ύψος του οφθαλμού και της φασματικής κατανομής της φωτεινής πηγής. Στο Σενάριο Γ.2, μέσω του λογισμικού προσομοίωσης Relux, υπολογίστηκε τιμή $E_m = 540 \text{ lx}$, η οποία αντιστοιχεί σε $EML = 248.4$, βάσει της εξίσωσης 3.8 και του σχετικού συντελεστή R.

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Για το ωράριο λειτουργίας 07:00–16:00 και με ελάχιστη απαιτούμενη τιμή $CS = 0.3$, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του LRC και της TOTEE 20701-7/2021, το Σενάριο Γ.2 παρουσιάζει $CS = 0.40$, πληρώνοντας επαρκώς τις απαιτήσεις για την υποστήριξη του κιρκάδιου ρυθμού.

4.8.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Γ.2

Για το Γ.2, το οποίο αποτελεί το τρίτο σενάριο για θερμοκρασία χρώματος 3,000 K, προκειμένου να αξιολογηθεί η ενεργειακή του αποτελεσματικότητα, υπολογίστηκε η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο, σύμφωνα με την εξίσωση 4-8. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.20. Από τη σύγκριση με τα καθορισμένα όρια που παρουσιάζονται στην αρχή του κεφαλαίου 4.1, παρατηρείται ότι η προτεινόμενη εγκατάσταση του σεναρίου Γ.2 κινείται εντός των αποδεκτών ορίων.

Πίνακας 4.20: Εγκατεστημένη ισχύς σενάριο Γ.2.

Σενάριο Γ.2	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m^2]	[W/m^2]
	15	420	65	6.46

Η μελέτη φωτισμού για το Σενάριο Γ.2 καταγράφει μέση στάθμη φωτισμού 540 lx , η οποία υπερβαίνει το ελάχιστο απαιτούμενο όριο των 500 lx για χώρους εργασίας. Η ομοιομορφία ($U_o = 0.64$) είναι ικανοποιητική και εντός του επιθυμητού εύρους, διασφαλίζοντας καλή κατανομή φωτός στις επιφάνειες εργασίας.

Οι τιμές του δείκτη θάμβωσης (UGR) κυμαίνονται από 15.3 έως 16.8, διατηρώντας τη θάμβωση σε χαμηλά επίπεδα και εξασφαλίζοντας υψηλή οπτική άνεση. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης ($R_a = 80$) είναι επαρκής για τον συγκεκριμένο τύπο εφαρμογής, καλύπτοντας τις βασικές απαιτήσεις ποιότητας φωτός. Η απόδοση των φωτιστικών είναι ιδιαίτερα υψηλή, φτάνοντας τα $125 \text{ lm}/\text{W}$, ενισχύοντας έτσι σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του σεναρίου. Παράλληλα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε 420 W , που αποτελεί μια χαμηλή και ενεργειακά αποδοτική επιλογή, εντός των ορίων του KENAK και ακόμα πιο χαμηλή από την υφιστάμενη εγκατάσταση που ήταν στα $16 \text{ W}/\text{m}^2$.

Όσον αφορά τα βιολογικά κριτήρια, το σενάριο παρέχει $EML = 248.4$ και $CS = 0.4$, καλύπτοντας τις ελάχιστες απαιτήσεις για κιρκάδιο ερέθισμα, με στόχο την υποστήριξη της εγρήγορης και της γενικότερης ευεξίας των εργαζομένων. Συνοψίζοντας, το Σενάριο Γ.2 αποτελεί μια αποδοτική και εργονομικά ισορροπημένη πρόταση, με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, ικανοποιητική ποιότητα φωτισμού και βελτιωμένα βιολογικά χαρακτηριστικά.

4.8.7 Σενάριο Δ.2

Το σενάριο Δ.2 θα πραγματοποιηθεί η μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο φωτιστικά του τύπου Philips CoreLine Panel RC125B W60L60_830. Με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης Relux, στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα του φωτιστικού από το

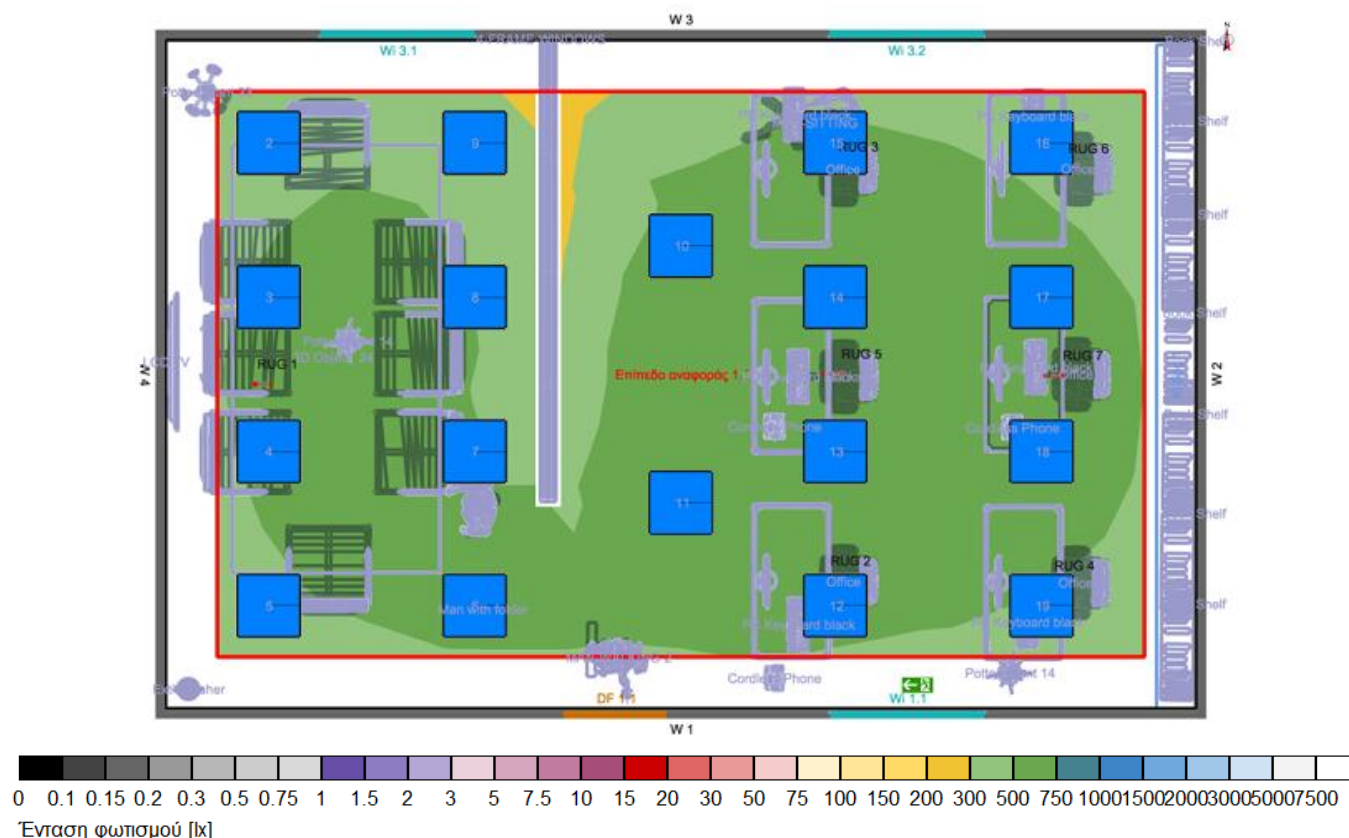
Reluxnet, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός και παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα. Μαζί με τα αποτελέσματα παρουσιάζονται η κάτοψη του χώρου, οι θέσεις εργασίας και ο αριθμός των φωτιστικών και μία τρισδιάστατη απεικόνιση.

Πίνακας 4.21: Αποτελέσματα μελέτης τεχνητού φωτισμού- σενάριο Δ.2

Θέσεις εργασίας :7	Αριθμός φωτιστικών: 18
Em(lux)	548
Uo	0.74
UGR1	19.2
UGR2	18.4
UGR3	18.8
UGR4	19.9
UGR5	19
UGR6	20
UGR7	20.4



Εικόνα 4.15: Κάτοψη γραφείου με τις θέσεις των φωτιστικών σεναρίου Δ.2 (3,000 K).



Εικόνα 4.16:Αποτελέσματα μελέτης στο Relux για το σενάριο Δ.2 (3,000 K).

Υπολογισμός Equivalent Melanopic Lux (EML)

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.2, ο υπολογισμός του EML βασίζεται στην ένταση φωτισμού σε κατακόρυφη επιφάνεια στο ύψος του οφθαλμού και στη φασματική σύσταση της φωτεινής πηγής. Στο πλαίσιο του Σεναρίου Δ.2, μέσω του λογισμικού Relux, υπολογίστηκε ένταση φωτισμού $E_m = 548 \text{ lx}$, η οποία οδηγεί σε $EML = 268.52$, σύμφωνα με την εξίσωση 3.8.

Κιρκάδιο ερέθισμα – Circadian Stimulus (CS)

Για το ωράριο 07:00–16:00, και με βάση τις οδηγίες του LRC και της TOTEE 20701-7/2021, απαιτείται τουλάχιστον $CS = 0.3$. Το Σενάριο Δ.2 εμφανίζει τιμή $CS = 0.41$, επιτυγχάνοντας επαρκές κιρκάδιο ερέθισμα για τους χρήστες του χώρου.

4.8.8 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων Σεναρίου Δ.2

Για το Δ.2, το οποίο αποτελεί το τέταρτο σενάριο για θερμοκρασία χρώματος 3,000 K, προκειμένου να αξιολογηθεί η ενεργειακή του αποτελεσματικότητα, υπολογίστηκε η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε επίπεδο, σύμφωνα με την εξίσωση 4-8. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.21. Από τη σύγκριση με τα καθορισμένα όρια που παρουσιάζονται στην αρχή του κεφαλαίου 4.1, παρατηρείται ότι η προτεινόμενη εγκατάσταση του σεναρίου Δ.2 κινείται εντός των αποδεκτών ορίων.

Πίνακας 4.21: Εγκατεστημένη ισχύς σενάριο Δ.2.

Σενάριο Δ.2	Αριθμός φωτιστικών	Εγκατεστημένη ισχύς [W]	Επιφάνεια [m ²]	[W/m ²]
	18	648	65	10

Το Σενάριο Δ.2 παρουσιάζει μέση στάθμη φωτισμού 548 lx, επαρκής για την κάλυψη των οπτικών απαιτήσεων σε χώρους γραφείου. Η ομοιομορφία είναι ιδιαίτερα καλή ($U_o = 0.74$), υπερβαίνοντας το ελάχιστο όριο του 0.6 και διασφαλίζοντας ομοιόμορφη φωτιστική κάλυψη στους σταθμούς εργασίας.

Οι τιμές του δείκτη θάμβωσης (UGR) κυμαίνονται από 18.4 έως 20.4, με ορισμένα σημεία να πλησιάζουν ή και ξεπερνούν το συνιστώμενο ανώτατο όριο των 19, γεγονός που υποδεικνύει πιθανή εμφάνιση τοπικής θάμβωσης και περιορισμένη οπτική άνεση σε συγκεκριμένες περιοχές. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης ($R_a = 80$) είναι αποδεκτός και ικανοποιεί τις απαιτήσεις του εργασιακού περιβάλλοντος. Η απόδοση των φωτιστικών είναι 94 lm/W, μέτρια σε σύγκριση με άλλα σενάρια, και αυτό αντικατοπτρίζεται και στη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του χώρου, η οποία φτάνει τα 648 W — εντός των ορίων του KENAK και ακόμα πιο χαμηλή από την υφιστάμενη εγκατάσταση που ήταν στα 16W/m², αλλά σαφώς υψηλότερη από πιο αποδοτικές επιλογές.

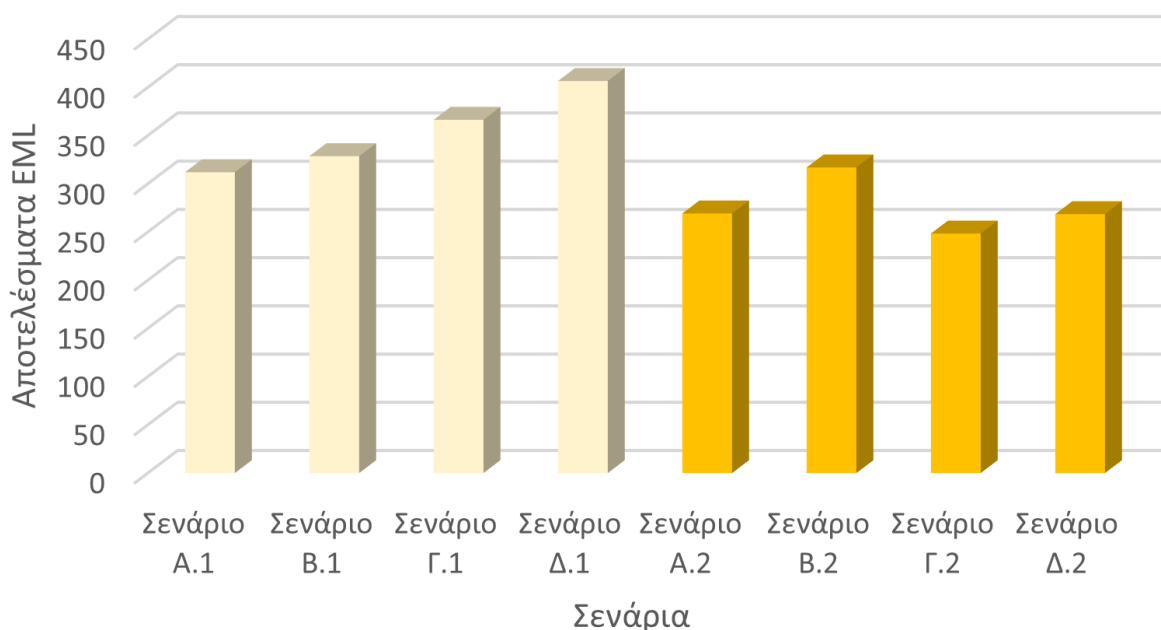
Σε επίπεδο βιολογικών χαρακτηριστικών, το σενάριο επιτυγχάνει $EML = 268.52$ και $CS = 0.41$, εξασφαλίζοντας θετική επίδραση στην κirkάδια λειτουργία των χρηστών και συμβάλλοντας στην ενίσχυση της ευεξίας και της γνωστικής απόδοσης. Συνολικά, το Σενάριο Δ.2 αποτελεί μια επαρκώς λειτουργική λύση, με πολύ καλή ομοιομορφία και θετικά βιολογικά αποτελέσματα, αλλά με περιορισμούς στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στην οπτική άνεση, λόγω αυξημένων τιμών UGR και ισχύος.

Κεφάλαιο 5° – Συγκριτική αξιολόγηση.

5.1 Αξιολόγηση και επιλογή καταλληλότερης θερμοκρασίας χρώματος

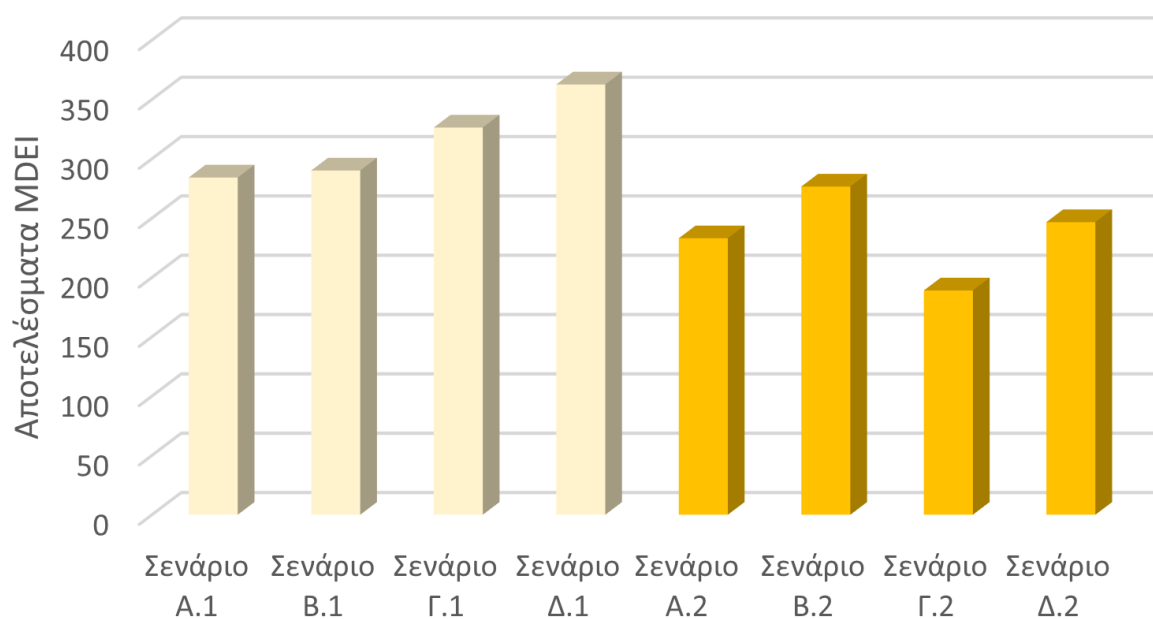
Η συγκριτική αξιολόγηση των τριών θερμοκρασιών χρώματος σύμφωνα με τα αποτελέσματα φωτοτεχνικών και βιολογικών αναλύσεων για τα σενάρια φωτισμού που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο στις θερμοκρασίες χρώματος 3,000 K, 4,000 K και 6,000 K, ανέδειξε τα 4,000 K ως την πλέον κατάλληλη επιλογή για τον υπό μελέτη χώρο, καθώς συνδυάζουν επαρκή βιολογική απόδοση με υψηλά επίπεδα οπτικής άνεσης και ενεργειακής αποδοτικότητας. Ειδικότερα, τα σενάρια στα 4 000 K παρουσίασαν Equivalent Melanopic Lux (EML) που φθάνουν έως 406.56 lx (Σχήμα 5.1) και Circadian Stimulus (CS) έως 0.37 (Σχήμα 5.2), επιτυγχάνοντας τα προτεινόμενα όρια για αποτελεσματική κirkάδια διέγερση σε χώρους εργασίας, όπως αυτά περιγράφονται σε διεθνή πρότυπα και επιστημονικές μελέτες [30]. Παράλληλα, οι χαμηλές τιμές Unified Glare Rating (UGR) —με ελάχιστες τιμές έως και 10 σε ορισμένες θέσεις εργασίας— μειώνουν τον κίνδυνο θάμβωσης και βελτιώνουν την οπτική άνεση, ενώ η ενεργειακή απόδοση παραμένει σε υψηλά επίπεδα σε σχέση με τις άλλες θερμοκρασίες χρώματος έως 5.8 W/m² (Σχήμα 5.5), κάτι που βοηθά στη μείωση της σπατάλης ενέργειας και του κόστους λειτουργίας, αυτό θα επιβεβαιωθεί και με τα σχήματα που συγκρίνουν την εγκατεστημένη ισχύ κάθε σεναρίου (Σχήμα 5.9). Επίσης, το σύστημα φωτισμού ακολουθεί τις βασικές αρχές της αειφορίας, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτιρίου. Η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σημαίνει και λιγότερες εκπομπές ρύπων, συμβάλλοντας έτσι σε έναν πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον σχεδιασμό.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων EML



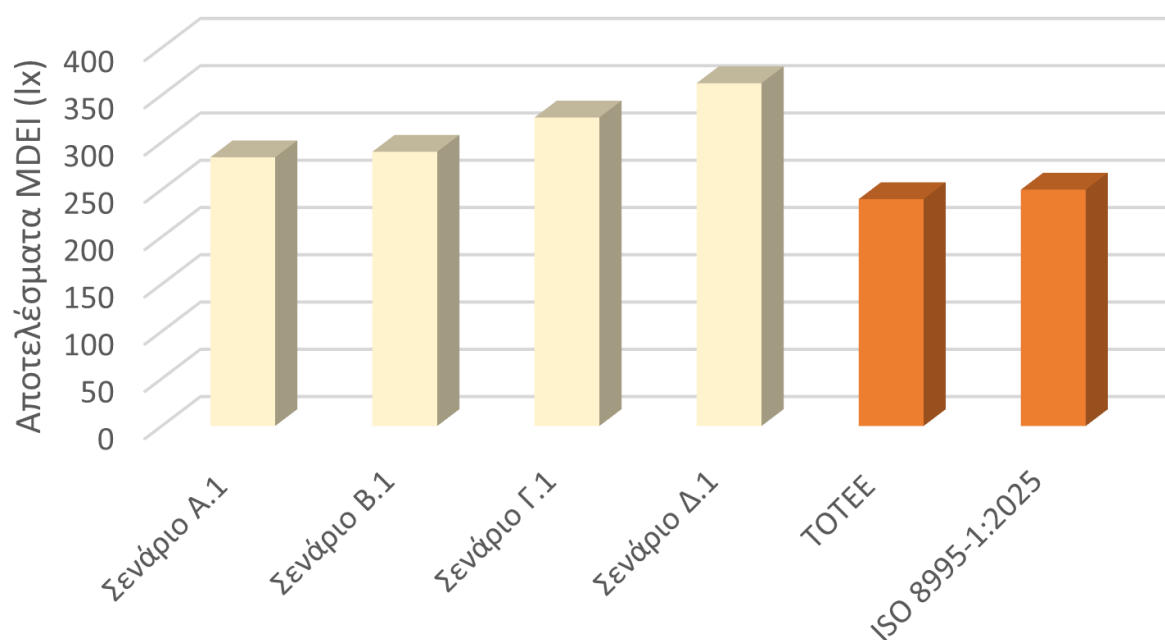
Σχήμα 5.1: Σύγκριση τιμών EML ανά σενάριο φωτισμού.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων MDEI



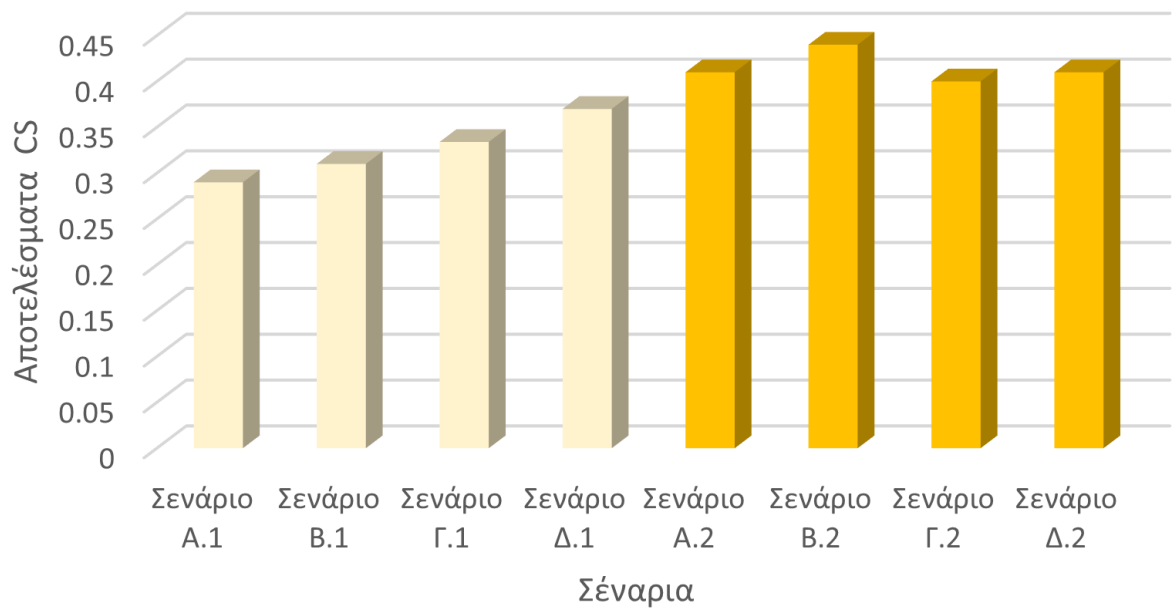
Σχήμα 5.2 : Σύγκριση των τιμών MDEI (Ix) ανά σενάριο φωτισμού.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων MDEI

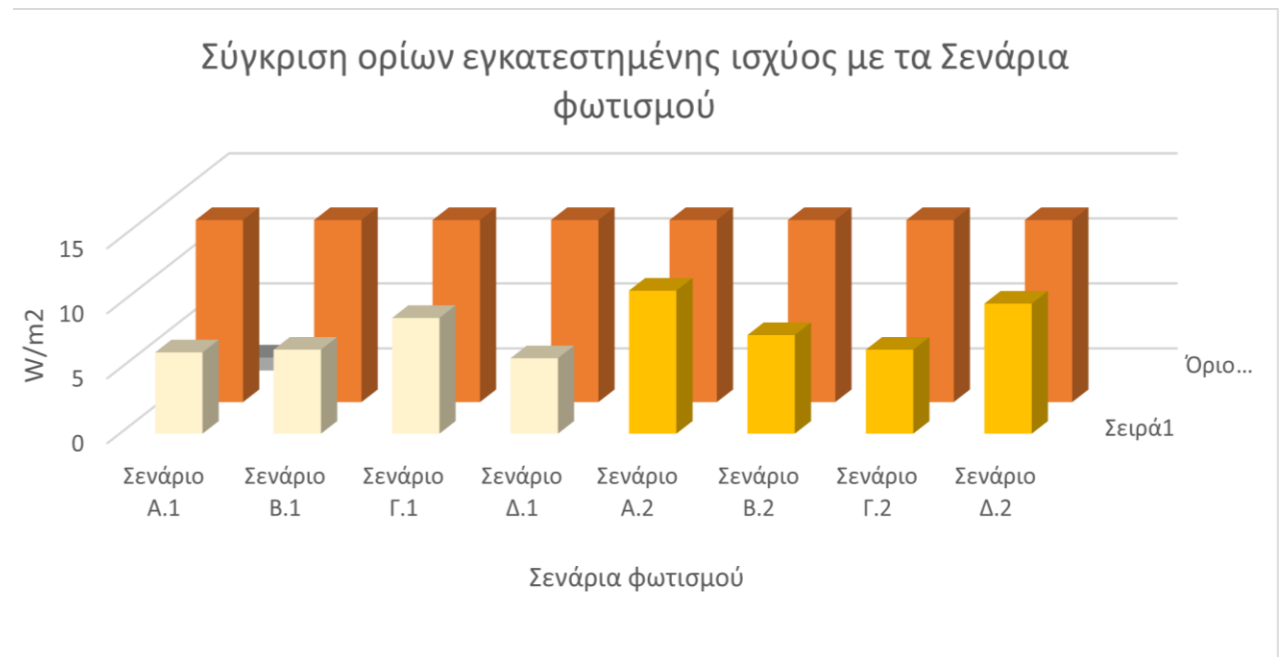


Σχήμα 5.3 : Σύγκριση των τιμών MDEI (Ix) των σεναρίων των 4,000 K με τα πρότυπα ISO 8995-1:2025 και TOTE.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων CS



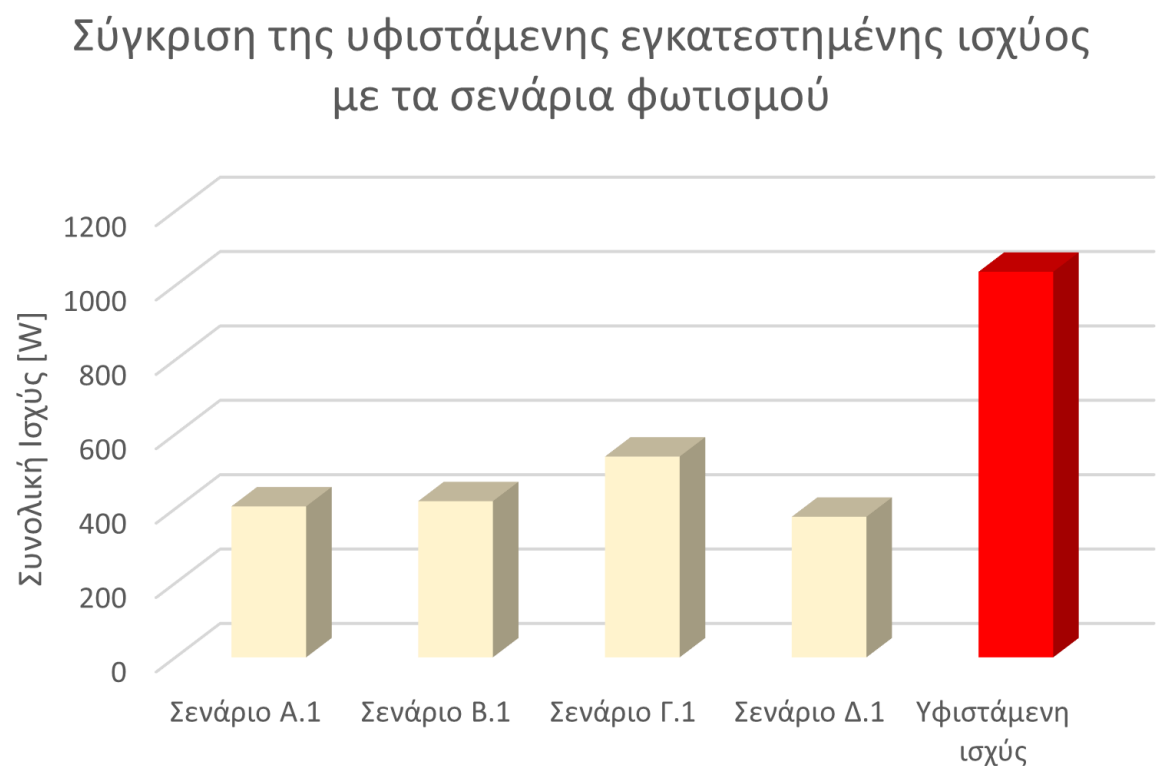
Σχήμα 5.4: Σύγκριση τιμών CS ανά σενάριο φωτισμού.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση σεναρίων τεχνητού φωτισμού σε σχέση με τα όρια της TOTEE, με βάση την εγκατεστημένη ισχύ ανά επιφάνεια [W/m^2]

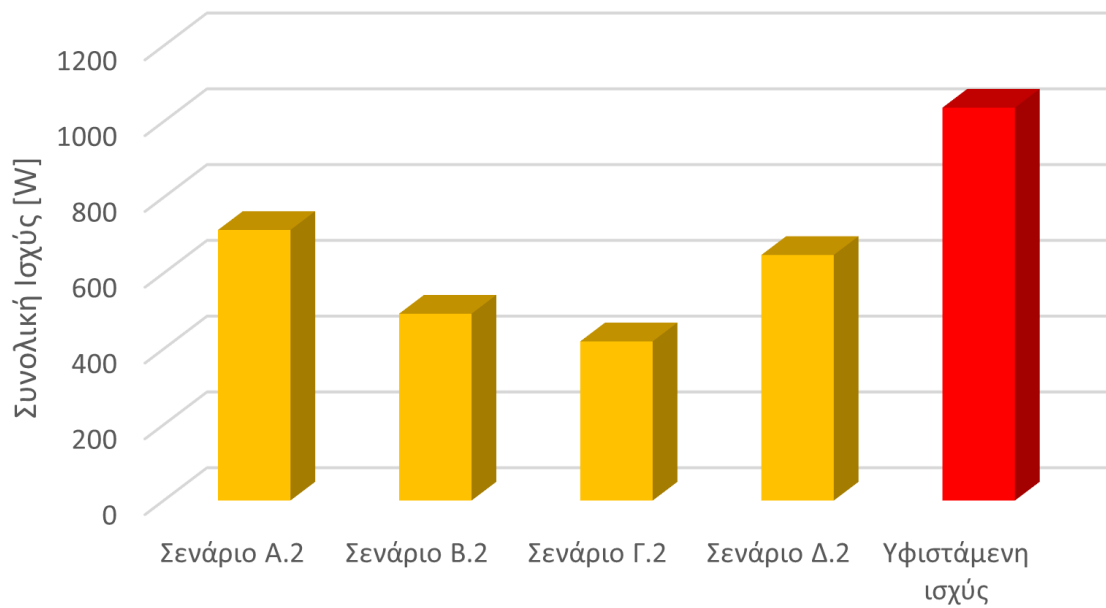


Σχήμα 5.6 : Αποδόσεις φωτιστικών ανά σενάριο και σύγκριση με το όριο 60 lm/W του ΚΕΝΑΚ.



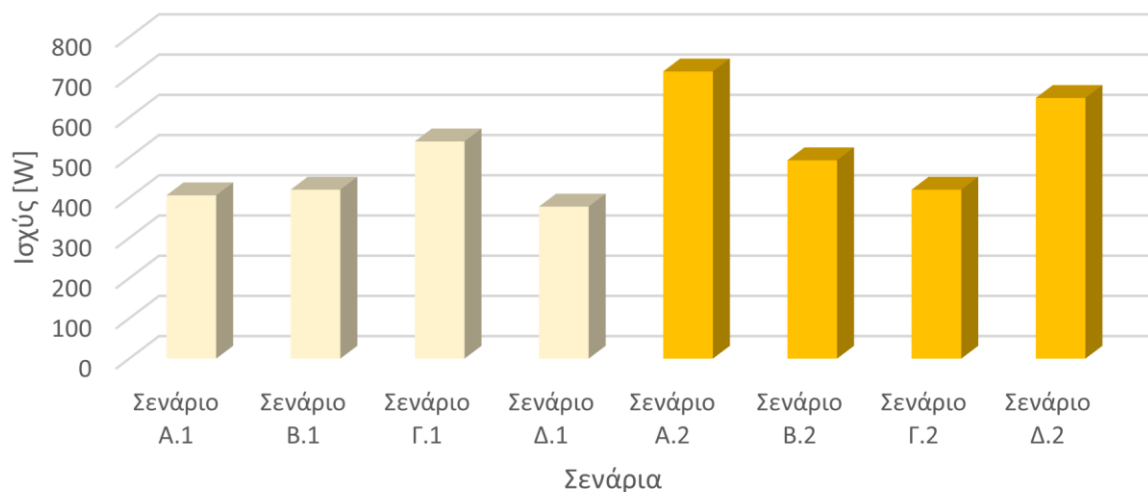
Σχήμα 5.7: Σύγκριση της υφιστάμενης εγκατεστημένης ισχύος [W] με τα σενάρια φωτισμού (θερμοκρασία χρώματος 4000 K).

Σύγκριση της υφιστάμενης εγκατεστημένης ισχύος με τα σενάρια φωτισμού



Σχήμα 5.8: Σύγκριση της υφιστάμενης εγκατεστημένης ισχύος [W] με τα σενάρια φωτισμού (θερμοκρασία χρώματος 3000 K).

Σύγκριση συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των Σεναρίων



Σχήμα 5.9: Συγκριτική απεικόνιση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των σεναρίων φωτισμού.

5.2 Αξιολόγηση και τελική επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου στα 4,000 K

Η συγκριτική ανάλυση των τεσσάρων σεναρίων για θερμοκρασία χρώματος 4,000 K ανέδειξε το Σενάριο Δ.1 ως την πιο ισορροπημένη και αποδοτική λύση για τον υπό μελέτη χώρο. Το Δ.1 πέτυχε την υψηλότερη τιμή Equivalent Melanopic Lux (EML) στα 406,56 lux και το μέγιστο Circadian Stimulus (CS) στα 0.37, υπερβαίνοντας τα ελάχιστα όρια που προτείνονται για την επίτευξη επαρκούς κirkάδιας διέγερσης σύμφωνα με διεθνή πρότυπα (Lucas et al., 2014· Rea et al., 2021). Ταυτόχρονα, η ενεργειακή απόδοση του Δ.1 (5.8 W/m²) είναι η καλύτερη μεταξύ των υποψήφιων σεναρίων, με τη χαμηλότερη εγκατεστημένη ισχύ (378 W), γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του λειτουργικού κόστους και στη βιωσιμότητα του σχεδιασμού.

Η ομοιομορφία φωτισμού ($U_0 = 0.77$) διασφαλίζει οπτικά ισορροπημένη κατανομή της φωτεινότητας στον χώρο, περιορίζοντας τις έντονες αντιθέσεις που μπορούν να προκαλέσουν κόπωση στα μάτια. Οι τιμές Unified Glare Rating (UGR) στο εύρος 12.7–16.3 υποδηλώνουν ελεγχόμενα επίπεδα θάμβωσης, προσφέροντας άνετη οπτική εμπειρία στους χρήστες. Σε σύγκριση, το Γ.1 εμφανίζει χαμηλότερες τιμές EML και CS, μειωμένη ομοιομορφία και υψηλότερο UGR, ενώ απαιτεί και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας (8.3 W/m²).

Λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις βιολογικές παραμέτρους όσο και τα κριτήρια οπτικής άνεσης και ενεργειακής αποδοτικότητας, το Σενάριο Δ.1 ανταποκρίνεται πληρέστερα στις απαιτήσεις της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021 και στις εργονομικές κατευθύνσεις του ISO 11064-6 για κέντρα ελέγχου. Συνεπώς, αποτελεί την προτεινόμενη λύση για την εφαρμογή στα 4,000 K, διασφαλίζοντας τον συνδυαστικό στόχο υψηλής ποιότητας φωτισμού, βιολογικής υποστήριξης και ενεργειακής βιωσιμότητας.

5.3 Ενεργειακή σύγκριση του σεναρίου Δ.1 με την υφιστάμενη εγκατάσταση

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ενεργειακή αξιολόγηση του σεναρίου Δ.1 σε σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση φωτισμού. Το σενάριο Δ.1 υλοποιείται με το φωτιστικό LEDVANCE DOWNLIGHT UGR19 DN195 21 W 840 WT, το οποίο συνδυάζει ικανοποιητική φωτοτεχνική απόδοση με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Για να αποτιμηθεί η ενεργειακή βελτίωση, γίνεται σύγκριση τόσο ως προς τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ όσο και ως προς την ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες, όπου αποτυπώνονται τα ποσοστά μείωσης που επιτυγχάνονται με την εφαρμογή του νέου συστήματος φωτισμού. Η ανάλυση αυτή δείχνει με ποσοτικό τρόπο το ενεργειακό όφελος της πρότασης και επιβεβαιώνει τη συμβολή της στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κτιρίου.

Η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος ανά επιφάνεια υπολογίστηκε βάσει του ακόλουθου τύπου:

$$Rp = \frac{P_{tot,Y\phi} - P_{tot,\Delta 1}}{P_{tot,Y\phi}} * 100\% \quad [\text{εξ. 5-1}]$$

Όπου R_p : Ποσοστό μείωσης της εγκατεστημένης ισχύος ανά επιφάνεια [%]

$P_{tot,Y\phi}$: Η ισχύς της υφιστάμενης εγκατάστασης ως προς τα m² του χώρου [W/m²]

$P_{tot,\Delta 1}$: Η προτεινόμενη ισχύς του σεναρίου Δ.1 ως προς τα m² του χώρου [W/m²]

Τα στοιχεία που προέκυψαν από τους υπολογισμούς κάνοντας χρήση της εξίσωσης 5-1 και απλή αντικατάσταση δεδομένων καταγράφονται στον επόμενο πίνακα

Πίνακας 5.1: Μείωση της εγκατεστημένης ισχύος.

Τεχνικό γραφείο	Υφιστάμενη εγκατάσταση [W/m ²]	Σενάριο Δ.1 [W/m ²]	Μείωση ισχύος [%]
	16	5.81	63.7

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της υφιστάμενης εγκατάστασης για όλο το χώρο που βρίσκεται υπό μελέτη (δλδ το τεχνικό γραφείο) φτάνει τα 1036.8 W, ενώ για την Πρόταση που γίνεται μέσω του Σεναρίου Δ.1 περιορίζεται στα 378 W. Παρότι το νέο σύστημα φωτισμού βρίσκεται εντός των προβλεπόμενων ορίων ισχύος, καταφέρνει να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση, με μείωση που φτάνει το 63.7% σε σύγκριση με την υπάρχουσα κατάσταση

Ενώ η μείωση της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης υπολογίστηκε με βάσει του ακόλουθου τύπου:

$$Pp = \frac{E_{tot,Y\phi} - E_{tot,\Delta 1}}{E_{tot,Y\phi}} * 100\% \text{ [εξ. 5-2]}$$

Όπου

P_p : Μείωση σε ποσοστό της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας [%]

$E_{tot,Y\phi}$: Η ετήσια κατανάλωση της υφιστάμενης εγκατάστασης [kWh/έτος]

$E_{tot,\Delta 1}$: Η ετήσια κατανάλωση του Σεναρίου Δ.1 [kWh/έτος]

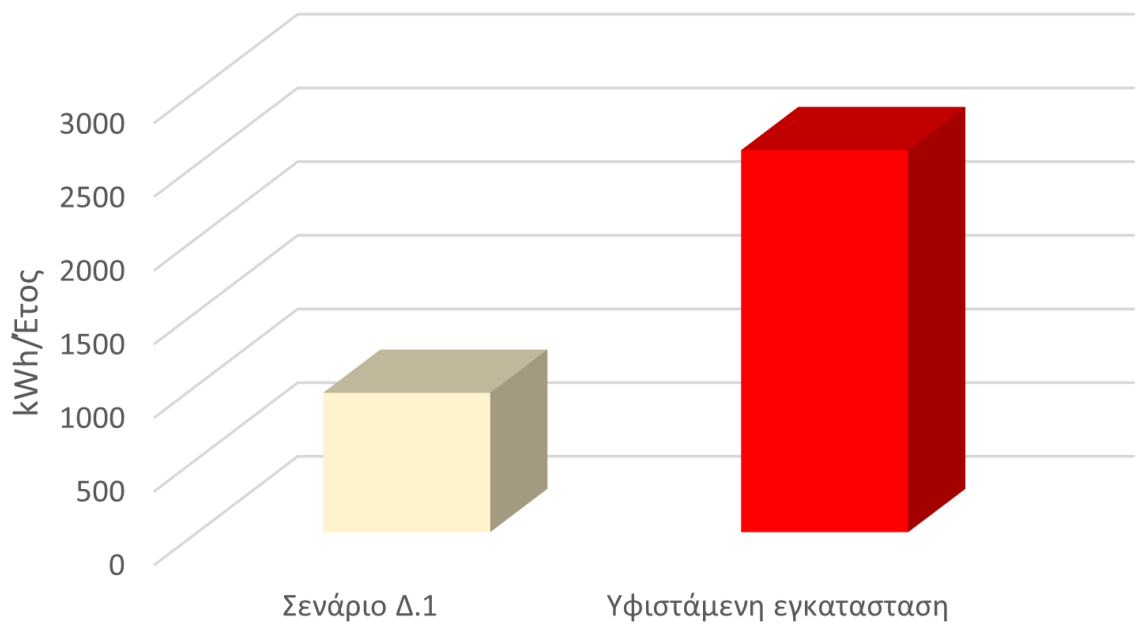
Τα στοιχεία που προέκυψαν από τους υπολογισμούς με τη χρήση των εξισώσεων [5-2] και [4-4], για την εκτίμηση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας στο σενάριο Δ.1, παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα. Οι τιμές προέκυψαν με απλή αντικατάσταση των δεδομένων στις αντίστοιχες εξισώσεις.

Πίνακας 5.2: Εξοικονόμηση της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας

Τεχνικό γραφείο	Υφιστάμενη εγκατάσταση [kWh/έτος]	Σενάριο Δ.1 [kWh/έτος]	Μείωση ετήσιας ενέργειας [%]
	2592	945	63.5

Στον Πίνακα 5.2 φαίνεται ότι η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας της υφιστάμενης εγκατάστασης ήταν 2592 kWh, ενώ για την Πρόταση που γίνεται μέσω του Σεναρίου Δ.1 με την μειώνεται στις 945 kWh. Αυτό σημαίνει ότι το νέο σύστημα φωτισμού προσφέρει πολύ μεγάλη εξοικονόμηση, με μείωση που φτάνει το 63.5% στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας για τα τρία επίπεδα.

Σύγκριση ετήσιας ενέργειας



Σχήμα 5.8: Σύγκριση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ της υφιστάμενης εγκατάστασης και του Σεναρίου Δ.1.

Κεφάλαιο 6^ο – Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στη μελέτη, ανάλυση και αξιολόγηση της φωτιστικής απόδοσης και των βιολογικών επιπτώσεων διαφορετικών σεναρίων φωτισμού, με εφαρμογή σε έναν χώρο τεχνικού γραφείου. Παρότι πρόκειται για περιβάλλον γραφείου, οι απαιτήσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες, καθώς οι εργαζόμενοι περνούν σε αυτό μεγάλο μέρος της ημέρας τους και χρειάζονται συνθήκες που να υποστηρίζουν την παραγωγικότητα αλλά και τη συνολική τους ευεξία. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην έννοια του ανθρωποκεντρικού φωτισμού, καθώς αναδείχθηκε ο καθοριστικός ρόλος που διαδραματίζει το φως στην καθημερινή λειτουργία, την υγεία και τον κirkάδιο ρυθμό του ανθρώπου. Παράλληλα, εξετάστηκε η διαφορετική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι ποικίλες θερμοκρασίες χρώματος και τα διαφορετικά φωτιστικά σώματα ως προς το κirkάδιο αποτύπωμα, αναδεικνύοντας πώς οι φωτιστικές παράμετροι επηρεάζουν όχι μόνο την οπτική άνεση, αλλά και τις μη οπτικές αποκρίσεις. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε αναλυτική μελέτη με εναλλακτικά σενάρια φωτισμού, ώστε να διερευνηθεί το ζήτημα σε μεγαλύτερο βάθος και να αποτυπωθούν οι επιδράσεις του φωτιστικού σχεδιασμού τόσο στη λειτουργικότητα όσο και στη βιολογική αποτελεσματικότητα. Στόχος της μελέτης ήταν να αναδειχθεί η αλληλεπίδραση ανάμεσα στη φωτεινή άνεση, την ενεργειακή αποδοτικότητα και τις μη οπτικές επιδράσεις του φωτισμού, ώστε να προταθεί μια λύση που να ικανοποιεί ταυτόχρονα τις απαιτήσεις των σχετικών κανονισμών και προτύπων, αλλά και τις πραγματικές ανάγκες των χρηστών του χώρου.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τον ρόλο του φωτισμού στις οπτικές και βιολογικές λειτουργίες του ανθρώπου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα τελευταία ερευνητικά δεδομένα για τον κirkάδιο ρυθμό και τη σημασία του φωτός μικρού μήκους κύματος, τα οποία έχουν οδηγήσει σε νέα κριτήρια αξιολόγησης όπως τα Equivalent Melanopic Lux (EML) και Circadian Stimulus (CS). Μέσα από τη μελέτη αυτή αναδείχθηκε ότι ο φωτισμός δεν αποτελεί πλέον μόνο εργαλείο για την κάλυψη των βασικών οπτικών αναγκών, αλλά και σημαντικό παράγοντα για τη ρύθμιση της ανθρώπινης υγείας, της ευεξίας και της απόδοσης στον χώρο εργασίας.

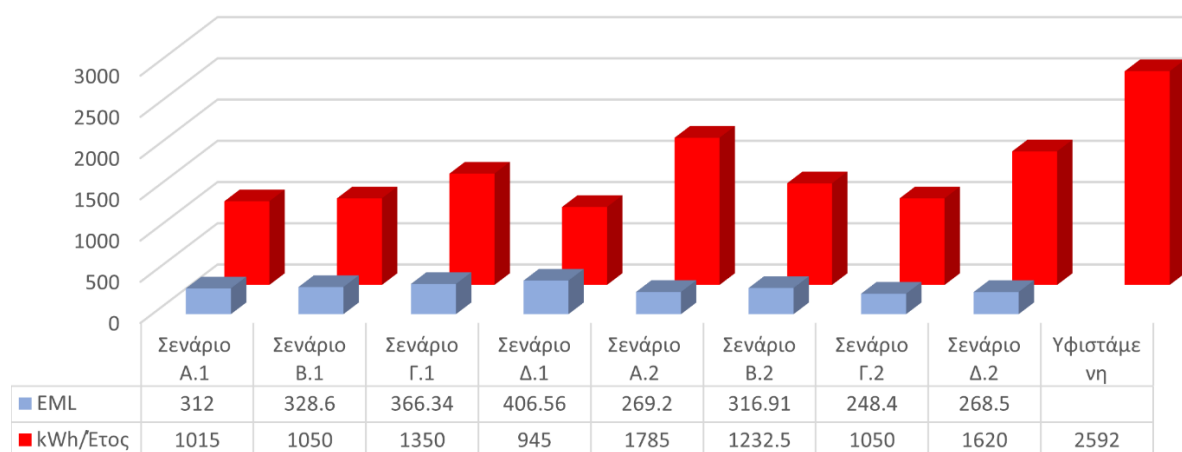
Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας LED τα τελευταία χρόνια έπαιξε καθοριστικό ρόλο στο να καταστεί δυνατή η εφαρμογή αυτών των νέων αντιλήψεων για τον φωτισμό. Οι σύγχρονες πηγές LED μπορούν να παρέχουν με ακρίβεια σχεδόν οποιοδήποτε φωτιστικό ερέθισμα κirkθεί απαραίτητο για την υποστήριξη του κirkάδιου ρυθμού και της ανθρώπινης υγείας, ενώ παράλληλα συνδυάζουν υψηλή ενεργειακή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός φωτισμού δεν περιορίζεται πλέον μόνο στις κλασικές απαιτήσεις έντασης ή ομοιομορφίας, αλλά μπορεί να στοχεύει σε πιο σύνθετους στόχους, όπως η ενίσχυση της βιολογικής αποτελεσματικότητας χωρίς να θυσιάζεται η αειφορία και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της φωτοτεχνικής ανάλυσης μέσω προσομοιώσεων, προκειμένου να εκτιμηθούν τόσο οι φωτομετρικές παράμετροι (ένταση φωτισμού, ομοιομορφία, θάμβωση, UGR) όσο και οι βιολογικοί δείκτες (EML και CS) για τρία διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας χρώματος: 3,000 K, 4,000 K και 6,000 K. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επιλογή της θερμοκρασίας χρώματος παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική ποιότητα του φωτισμού, καθώς επηρεάζει τόσο την οπτική άνεση όσο και την κirkάδια διέγερση των χρηστών.

Η συγκριτική αξιολόγηση κατέδειξε ότι τα σενάρια στα 4,000 K αποτελούν την πλέον ισορροπημένη επιλογή. Οι τιμές EML έφτασαν έως 406.56 lx και οι τιμές CS έως 0.37, επίπεδα που καλύπτουν ή προσεγγίζουν τα όρια που προτείνονται για την υποστήριξη του κιρκάδιου ρυθμού. Ταυτόχρονα, οι χαμηλές τιμές θάμβωσης (UGR) και η ομοιομορφία του φωτισμού διασφάλισαν υψηλά επίπεδα οπτικής άνεσης. Αντίθετα, τα 3,000 K απαιτούσαν υψηλότερη ένταση φωτισμού για να επιτύχουν αντίστοιχες βιολογικές αποδόσεις, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση, ενώ τα 6,000 K παρείχαν υπερβολικά υψηλά επίπεδα κιρκάδιου ερεθίσματος, με κίνδυνο υπερδιέγερσης και στρεσογόνων αποκρίσεων σε μακροχρόνια έκθεση.

Μεταξύ των σεναρίων στα 4,000 K, η επιλογή του σεναρίου Δ.1 με το φωτιστικό LEDVANCE DOWNLIGHT UGR19 DN195 21 W 840 WT αποδείχθηκε η βέλτιστη. Για την καλύτερη απεικόνιση των τελικών αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh) και ο δείκτης EML για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Με αυτόν τον τρόπο αναδεικνύεται πιο καθαρά η μεταξύ τους διαφοροποίηση και διευκολύνεται η αξιολόγηση του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων.

Συνολική σύγκριση ενέργειας και EML



Σχήμα 6.1: Συνολική κατανάλωση ενέργειας και EML στα σενάρια της μελέτης φωτισμού.

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι ορισμένα σενάρια υπερέχουν ενεργειακά, ενώ άλλα προσφέρουν υψηλότερες τιμές EML. Συνεπώς, η τελική επιλογή εξαρτάται από το αν προτεραιότητα τίθεται η εξοικονόμηση ενέργειας ή η ποιοτική ενίσχυση του φωτισμού ως προς τον κιρκάδιο ρυθμό. Η απεικόνιση αυτή επιτρέπει μια πιο άμεση και οπτική σύγκριση των σεναρίων, ενισχύοντας την κατανόηση των συμπερασμάτων της μελέτης. Το σενάριο αυτό πέτυχε την καλύτερη ισορροπία ανάμεσα στην τήρηση των κανονιστικών απαιτήσεων (EN 12464-1, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021), στην υποστήριξη των βιολογικών λειτουργιών μέσω των κατάλληλων τιμών EML και CS, αλλά και στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Η ενεργειακή αξιολόγηση έδειξε ότι η προτεινόμενη λύση οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση, τόσο σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος όσο και σε επίπεδο ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στην επίτευξη αιεφόρων προτύπων λειτουργίας.

Συνοψίζοντας, η εργασία ανέδειξε την αναγκαιότητα του ολιστικού σχεδιασμού φωτισμού που να συνδυάζει οπτική απόδοση, βιολογική αποτελεσματικότητα και ενεργειακή αποδοτικότητα. Η εφαρμογή του σεναρίου Δ.1 στα 4,000 K επιβεβαίωσε ότι είναι δυνατή η δημιουργία ενός φωτιστικού περιβάλλοντος το οποίο όχι μόνο πληροί τις τεχνικές και εργονομικές προδιαγραφές, αλλά παράλληλα ενισχύει την ευεξία των χρηστών και μειώνει το ενεργειακό κόστος. Η συμβολή αυτής της μελέτης έγκειται στο ότι επιβεβαιώνει την κατεύθυνση που δίνουν τα σύγχρονα πρότυπα, όπως το WELL Building Standard και το ISO 11064-6, για έναν φωτισμό που εστιάζει στον άνθρωπο και την αειφορία.

Βιβλιογραφία

- [1] Φ. Τοπαλής, Λ. Οικονόμου και Σ. Κουρτέση, Φωτοτεχνία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018.
- [2] R. J. Lucas, S. N. Peirson, D. M. Berson, T. M. Brown, H. M. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene, and G. C. Brainard, "Measuring and using light in the melanopsin age", *Trends in Neurosciences*, vol. 37, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2014.
- [3] Λ. Δούλος, Π. Κονταξής, Κ. Λάσκος, Φ. Τοπαλής και Α. Τσαγκρασούλης, *Ανθρωποκεντρικός φωτισμός*, Αθήνα, Ελλάδα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021), 2021.
- [4] D. Durmus, "Correlated colour temperature: Use and limitations," *Lighting Research & Technology*, vol. 54, no. 4, pp. 363-375, Jul. 2021, DOI:10.1177/14771535211034330. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/353459223_Correlated_color_temperature_Use_and_limitations [Accessed: Jul. 5, 2025].
- [5] Χ. Καμπεζίδης, *Γενικές αρχές φωτισμού: Χρώμα και φως*, Τόμος Α. Πάτρα, Ελλάδα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (ΕΑΠ), 2014
- [6] National Lighting Product Information Program, *Electronic ballasts: Non-dimming electronic ballasts for 4-foot and 8-foot fluorescent lamps*, Έκθεση, 2000.
- [7] M. G. Abeywickrama, *Fluorescent lamps*. London, U.K.: Arnold, 1996
- [8] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2003
- [9] ANSI/IEEE, Standard C82.77: *LED drivers – performance and application guidelines*. New York, NY, USA: IEEE, 2014.
- [10] European Committee for Standardization (CEN), EN 12464-1: Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places. Brussels, Belgium: CEN, 2018.
- [11] Delos, "Get your dream sleep with circadian lighting systems," άρθρο, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://www.realestate.com.au/news/get-your-dream-sleep-with-circadian-lighting-systems/> [Accessed: Jul. 15, 2025].
- [12] J. Wachob, "4 tricks to train your circadian rhythm for better metabolism & longevity," *Mindbodygreen*, άρθρο, Νοέμβριος 2022. [Online]. Available: <https://www.mindbodygreen.com/articles/4-tricks-to-train-your-circadian-rhythm-from-sleep-expert-better-metabolism-and-longevity> [Accessed: Jul. 18, 2025].

- [13] K. Petropoulou, “Σεροτονίνη, Ντοπαμίνη, Αδρεναλίνη: Οι αγγελιοφόροι της συμπεριφοράς μας,” *Citycampus*, άρθρο, Jan. 4, 2018. [Online]. Available: <https://citycampus.gr/> [Accessed: Jun. 20, 2025].
- [14] A. Miliou, “Τι είναι η κορτιζόλη; Πόσο σημαντική είναι στον οργανισμό μας και πώς επιδρά στο στρες, στην παχυσαρκία, στην απώλεια μνήμης, στο διαβήτη, στην κατάθλιψη”, *Υγεία Διαγνωστικό Κέντρο*, άρθρο, Oct. 21, 2018. [Online]. Available: <https://www.ygeia-petani.gr/2018/10/ti-einai-h-kortizolh/> [Accessed: Jun. 15, 2025].
- [15] Κ. Παπαρρηγόπουλος και Κ. Κουτοάγγελος, *Μελατονίνη και ψυχικές διαταραχές*. Αθήνα, Ελλάδα: Ψυχιατρική Κλινική, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2002.
- [16] J. Meuret and Y. Cerpentier, “Fundamental spectral boundaries of circadian tunability,” in *Proc. IEEE*, Jul. 2021.
- [17] ZVEI Die Elektroindustrie and LightingEurope, *Quantified benefits of human centric lighting*. Frankfurt, Germany, Apr. 2015. [Online]. Available: https://www.lightingeurope.org/images/publications/general/150420_From_Barriers_to_Measures_-_Final_Results_-_Complete_vF_004.pdf [Accessed: Apr. 28, 2025].
- [18] V. Q. Trinh, P. Bodrogi, and T. Q. Khanh, “Determination and measurement of melanopic equivalent daylight (D65) illuminance (mEDI) in the context of smart and integrative lighting,” *Sensors*, vol. 23, no. 11, article 5000, 2023.
- [19] E. Kolberg, S. Pallesen, G. J. Hjetland, I. H. Nordhus, E. Thun, and E. Flo-Groeneboom, “Insufficient melanopic equivalent daylight illuminance in nursing home dementia units across seasons and gaze directions,” *Lighting Research & Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 1–15, Feb. 2021, DOI:10.1177/1477153521994539.
- [20] I. Acosta, M. Á. Campano, R. Leslie, and L. Radetsky, “Daylighting design for healthy environments: analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus”, *Solar Energy*, vol. 193, pp. 584–596, Nov. 2019.
- [21] M. G. Figueiro, K. Gonzales, and D. Pedler, “Designing with circadian stimulus”, *Lighting Design + Application (LD+A)*, pp. 30–34, Oct. 2016.
- [22] LightingEurope, ZVEI, and A.T. Kearney, *Human centric lighting: Going beyond energy efficiency*. Brussels, Belgium: LightingEurope, 2013.
- [23] CORDIS (Horizon), *WEL-LED-BEING project – new generation of LED luminaries for human-centric lighting*. Brussels, Belgium: CORDIS, Feb.–May 2019.
- [24] TRILUX, *Human Centric Lighting – Knowledge Base*. TRILUX, [Online]. Available: <https://www.trilux.com/>
- [25] World Green Building Council, *Building for body clocks: how human centric lighting can improve people’s wellbeing and performance*. WorldGBC Thought Leadership. [Online]. Available: <https://worldgbc.org/> [Accessed: Aug. 4, 2025]

- [26] A. Sánchez-Cano and J. Aporta, "Optimization of lighting projects including photopic and circadian criteria: a simplified action protocol", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, article 8068, 2020.
- [27] International WELL Building Institute (IWBI), *WELL Building Standard v2*. [Online]. Available: <https://standard.wellcertified.com/v2/> [Accessed: Jun. 15, 2025]
- [28] S. Ezpeleta, E. Orduna-Hospital, T. Solana, J. Aporta, I. Pinilla, and A. Sánchez-Cano, "Analysis of photopic and melanopic lighting in teaching environments", *Buildings*, vol. 11, no. 10, article 439, 2021
- [29] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Αθήνα, Ελλάδα: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, Σεπτέμβριος 2017
- [30] M. S. Rea, R. Nagare, and M. G. Figueiro, "Modeling circadian phototransduction: retinal neurophysiology and neuroanatomy," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, article 615305, 2021.