



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη, ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογή
ανθρωποκεντρικού φωτισμού
σε γραφεία και αίθουσες διδασκαλίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νεκταρία Π. Βερροίου

Επιβλέπων Καθηγητής: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπων: Ευάγγελος – Νικόλαος Δ. Μαδιάς
Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη, ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογή
ανθρωποκεντρικού φωτισμού
σε γραφεία και αίθουσες διδασκαλίας**

Νεκταρία Π. Βερροίου

Επιβλέπων Καθηγητής : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπων : Ευάγγελος – Νικόλαος Μαδιάς
Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Ιουνίου 2025.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025

.....
Νεκταρία Π. Βερροίου

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

Copyright © Νεκταρία Βερροίου, 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 σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων του *ανθρωποκεντρικού φωτισμού (Human Centric Lighting - HCL)*, τόσο θεωρητικά όσο και μέσω πρακτικών εφαρμογών σε εργασιακά και εκπαιδευτικά περιβάλλοντα. Η μελέτη επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της επίδρασης του ανθρωποκεντρικού φωτισμού στην οπτική άνεση, την υγεία και την ευεξία/διάθεση των χρηστών (με έμμεσο στόχο και την παραγωγικότητα και ποιότητα εκπαίδευσης). Συμπεριλαμβάνεται επίσης οικονομοτεχνική μελέτη που αξιολογεί τα οικονομικά οφέλη (OPEX reduction & Payback period) από την αντικατάσταση παλαιάς τεχνολογίας φωτισμού και τη χρήση νέων τεχνολογιών (LED) που ικανοποιεί τις βασικές προϋποθέσεις ανθρωποκεντρικότητας.

Στο θεωρητικό μέρος παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις έννοιες του φωτός, της όρασης και των επιπτώσεων του φωτισμού στον άνθρωπο. Επίσης, εξετάζεται ο τεχνητός φωτισμός και παρουσιάζεται διεξοδικά η πρόοδος που έχει επιτευχθεί στον ανθρωποκεντρικό φωτισμό, οι μετρικές αξιολόγησής του και προϊόντα που έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινής στάθμης και της θερμοκρασίας χρώματος.

Στο πρακτικό μέρος υλοποιείται σχεδιασμός φωτισμού με φωτιστικά Tunable White LED, αξιολογώντας τις μετρικές: *ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού (EML)* και *κιρκάδιο ερέθισμα (CS)*. Μέσω των προσομοιώσεων εξετάζεται η καταλληλότητα και η αποδοτικότητα τέτοιων συστημάτων σε εργασιακούς και εκπαιδευτικούς χώρους.

Από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα του ανθρωποκεντρικού φωτισμού στην αύξηση της παραγωγικότητας, τη βελτίωση της συγκέντρωσης και τη μείωση της κόπωσης και του στρες. Συγκεκριμένα, σε εργασιακούς χώρους μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της υγείας και της ευεξίας των εργαζομένων, αυξάνοντας την ικανοποίηση και την αποδοτικότητα, κάτι που ωφελεί τους ίδιους και προσδίδει οικονομικό όφελος στην επιχείρηση που τους υιοθετεί. Αντίστοιχα, στον εκπαιδευτικό χώρο, η εφαρμογή HCL ενισχύει την εγρήγορση, τη συμμετοχή και την απόδοση των μαθητών, συμβάλλοντας σε βελτιωμένα μαθησιακά αποτελέσματα και προσφέροντας καλύτερες συνθήκες διδασκαλίας για τους καθηγητές.

Η τεχνοοικονομική μελέτη δείχνει ότι παρά το αρχικό κόστος επένδυσης, η υιοθέτηση ανθρωποκεντρικών λύσεων φωτισμού κρίνεται οικονομικά βιώσιμη, λόγω και της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται.

Τέλος, οι αρχές και τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν και σε άλλους χώρους (εκτός δηλαδή της εργασίας και της εκπαίδευσης), όπως υγείας και φιλοξενίας, αναδεικνύοντας τον ανθρωποκεντρικό φωτισμό ως ουσιαστικό παράγοντα βελτίωσης της καθημερινότητας και της αποδοτικότητας σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Λέξεις κλειδιά

Ανθρωποκεντρικός φωτισμός, Κιρκάδιος ρυθμός, Ισοδύναμη Μελανοπική ένταση φωτισμού, Κιρκάδιο ερέθισμα, Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος, Ρυθμιζόμενο λευκό LED φωτιστικό, Εσωτερικός φωτισμός κτιρίων, Ενεργειακή αποδοτικότητα

Abstract

The purpose of this thesis is to evaluate the advances of *Human Centric Lighting* (HCL), both theoretically and through practical applications in work and educational environments.

The study focuses on assessing the impact of HCL on visual comfort, health and user's well-being/mood (with an indirect aim of enhancing productivity and the quality of education). An accompanying techno-economic study evaluates the financial benefits (OPEX reduction & payback period) from replacing outdated lighting technologies with new ones (LED), which meet the basic requirements of human-centric design.

The theoretical section presents the fundamental concepts of light, vision and the effects of lighting on humans. It also examines artificial lighting and thoroughly presents the progress achieved in the field of HCL, the metrics used to evaluate it and products capable of adjusting brightness and color temperature.

In the practical section, a lighting design is implemented utilizing Tunable White LED luminaires, evaluating the following metrics: Equivalent Melanopic Lux (EML) and Circadian Stimulus (CS). Through simulations, the suitability and efficiency of such systems in work and educational spaces are examined.

From the literature review, conclusions are drawn about the effectiveness of Human Centric Lighting in increasing productivity, improving concentration, and reducing fatigue and stress. Specifically, in work environments, it can lead to improved health and well-being of employees, increasing satisfaction and efficiency, which benefits both themselves and the businesses that adopt such systems. Similarly, in educational settings, the implementation of HCL enhances alertness, engagement and student performance, contributing to improved learning outcomes and providing better teaching conditions for educators.

The techno-economic analysis shows that, despite the initial investment cost, adopting Human Centric Lighting solutions is economically viable, also due to the energy savings achieved.

Finally, the principles and conclusions of this study can be readily applied to other environments (beyond work and education), such as healthcare and hospitality, highlighting the importance of Human Centric Lighting as an essential factor in improving daily life and efficiency across many areas of human activity.

Key words

Human Centric Lighting, Circadian Rhythm, Equivalent Melanopic Lux – EML, Circadian Stimulus – CS, Correlated Color Temperature – CCT, Tunable White LED, Indoor Lighting, Energy Efficiency

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τόσο για την ανάθεση του θέματος όσο και για το ενδιαφέρον και την υποστήριξή του. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση, με τον οποίο άρχισα την μελέτη του θέματος αυτού και στον τωρινό επιβλέποντα, κ. Ευάγγελο-Νικόλαο Μαδιά, υποψήφιο Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με την καθοδήγηση και τη στήριξη του οποίου ολοκλήρωσα την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Τηλέμαχο Δούκογλου, του οποίου η ενθάρρυνση και οι πολύτιμες συμβουλές υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ οφείλω ιδιαίτερα στον Λευτέρη καθώς και στην Δέσποινα, την Αμαλία και την Ιωάννα για τη διαρκή βοήθεια και την υποστήριξη που μου προσέφεραν, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, το βαθύτερο και θερμότερο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένειά μου. Γνωρίζω καλά πως χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση, την κατανόηση, την υπομονή και την αγάπη τους, δεν θα είχα φτάσει ως εδώ. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους γονείς μου, καθώς και τα αδέρφια μου. Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται σε εκείνους.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Λέξεις	5
Abstract	6
Key words.....	6
Ευχαριστίες	7
Κατάλογος Γραφημάτων.....	11
Κατάλογος Εικόνων	13
Κατάλογος Πινάκων	16
Εισαγωγή	18
Μέρος Α. Θεωρητικό μέρος.....	19
1 Φως - όραση.....	19
1.1 Εισαγωγή.....	19
1.2 Ορατό φως.....	19
1.3 Όραση	19
1.4 Οφθαλμός.....	19
1.5 Οπτική οδός	20
1.5.1 Τύποι όρασης.....	21
1.6 Τρίτος φωτοϋποδοχέας.....	21
1.7 Αμφιβληστροειδοϋποθαλαμική οδός.....	22
1.7.1 Υπερχιασματικός πυρήνας.....	22
1.7.2 Επίφυση	23
1.8 Σύστημα Κιρκάδιου ρυθμού	24
2 Φωτισμός.....	26
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.2 Θερμοκρασία χρώματος.....	26
2.3 Μη οπτικά αποτελέσματα φωτός	27
2.4 Ορμόνες	28
2.4.1 Βασικές ορμόνες.....	28
2.4.2 Κιρκάδια διακύμανση μελατονίνης.....	29
2.4.3 Κιρκάδια διακύμανση κορτιζόλης.....	29
2.4.4 Σύγκριση έκκρισης μελατονίνης και κορτιζόλης	30
2.5 Φωτισμός για οπτικά αποτελέσματα	30
2.6 Φωτισμός για μη οπτικά αποτελέσματα	30
3 Ανθρωποκεντρικός φωτισμός.....	32
3.1 Εισαγωγή.....	32
3.2 Παράμετροι σχεδιασμού ανθρωποκεντρικού φωτισμού	33

3.3	Επίδραση χρόνου.....	35
3.4	Μετρικά συστήματα των μη οπτικών αποτελεσμάτων.....	37
3.4.1	Εισαγωγή.....	37
3.4.2	Μετρικό σύστημα α-οπικό.....	37
3.4.3	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού.....	40
3.4.4	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού φωτισμού.....	42
3.4.5	Κιρκάδιο ερέθισμα και κιρκάδιο φως.....	43
3.4.6	Κιρκάδιος παράγοντας δράσης.....	47
3.4.7	Κιρκάδια αποδοτικότητα.....	47
3.4.8	Καθολική φωτεινότητα.....	48
3.4.9	Σχετική φασματική αποδοτικότητα.....	49
3.4.10	Κιρκάδια ισχύς.....	51
3.4.11	Αποτελεσματική ισχύς και μελανοπικός - φωτοπικός λόγος.....	52
3.4.12	Σχολιασμός μετρικών.....	53
4	Προϊόντα για τον Ανθρωποκεντρικό Φωτισμό.....	54
4.1	Εισαγωγή.....	54
4.2	Ιστορική αναδρομή των διόδων εκπομπής φωτός.....	54
4.3	Βασικά στοιχεία για την τεχνολογία των διόδων εκπομπής φωτός.....	55
4.4	Δίοδοι εκπομπής φωτός για φωτισμό.....	56
4.4.1	Ρυθμιζόμενοι λευκοί δίοδοι εκπομπής φωτός.....	58
4.4.2	Επιπλέον παραδείγματα ρυθμιζόμενων λευκών διόδων εκπομπής φωτός ..	60
5	Πρότυπα.....	66
5.1	Κ.Εν.Α.Κ.	66
5.2	Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.	66
5.3	Πρότυπο κτιρίου.....	67
	Μέρος Β. Πρακτικό μέρος.....	68
	Εισαγωγή.....	68
6	Περιγραφή του φωτιστικού.....	68
6.1	Φωτομετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτιστικού ρυθμιζόμενων λευκών διόδων εκπομπής φωτός.....	68
6.2	Μετρήσεις φωτιστικού.....	71
7	Περιγραφή των χώρων προς μελέτη.....	80
7.1	Εισαγωγή.....	80
7.2	Χώρος γραφείων.....	80
7.2.1	Περιγραφή του χώρου γραφείου προς μελέτη.....	82
7.2.2	Περιγραφή υφιστάμενου τεχνητού φωτισμού και συνολικής ισχύος.....	83
7.3	Αίθουσα διδασκαλίας.....	85
7.3.1	Περιγραφή της αίθουσας προς μελέτη.....	86

7.3.2	Περιγραφή υφιστάμενου τεχνητού φωτισμού και συνολικής ισχύος.....	88
8	Προσομοίωση φωτισμού με τα φωτιστικά «ΠΕΤΡΙΔΗ»	90
8.1	Προσομοίωση φωτισμού στον χώρο γραφείου.....	90
8.1.1	Ρύθμιση της φωτεινής στάθμης των φωτιστικών.....	91
8.2	Προσομοίωση φωτισμού στην αίθουσα διδασκαλίας.....	92
8.2.1	Ρύθμιση της φωτεινής στάθμης των φωτιστικών.....	93
8.3	Υπολογισμός μετρικών συστημάτων.....	94
8.3.1	Εισαγωγή.....	94
8.3.2	Υπολογισμός ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού.....	95
8.3.3	Μέτρηση κirkάδιου ερεθίσματος.....	101
9	Σενάρια φωτισμού των χώρων με χρήση Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού	104
9.1	Εισαγωγή.....	104
9.2	Προτάσεις χρονοδιαγράμματος Φωτισμού με βάση τις Αρχές του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού (HCL) σε περιβάλλον γραφείου.	104
9.2.1	Σενάριο πρώτο.....	104
9.2.2	Σενάριο δεύτερο	109
9.2.3	Σενάριο τρίτο.....	111
9.3	Προτάσεις χρονοδιαγράμματος φωτισμού με βάση τις αρχές του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού (HCL) σε αίθουσα διδασκαλίας του Πολυτεχνείου.	114
9.3.1	Σενάριο πρώτο.....	114
9.3.2	Σενάριο δεύτερο	119
9.3.3	Σενάριο τρίτο.....	122
9.4	Σύγκριση σεναρίων	124
10	Συμπεράσματα.....	128
	Πίνακας Συντομογραφιών.....	130
	Παράρτημα Α	136
	Παράρτημα Β.....	141

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1 Ο χρόνος που χρειάζεται για να γίνει καταστολή της μελατονίνης στο 25%, για ένταση στα 200 lx, 500 lx και 1000 lx, αντίστοιχα.	36
Γράφημα 2 Διάγραμμα φωτεινής ροής για τις θερμοκρασίες χρώματος 2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6500 K.	71
Γράφημα 3 Διάγραμμα SPD για τις πέντε τιμές CCT που εξετάστηκαν.	72
Γράφημα 4 Σχέση της φωτεινής ροής με τη ρύθμιση φωτεινής έντασης του φωτιστικού. ..	74
Γράφημα 5 Γραφική αναπαράσταση φωτεινότητας.....	74
Γράφημα 6 Γραφική αναπαράσταση ισχύος.	75
Γράφημα 7 Διακύμανση ισχύος για τις διάφορες τιμές θερμοκρασίας χρώματος στου φωτιστικού.	76
Γράφημα 8 Γραφική απεικόνιση με ράβδους της φωτεινής ροής για τις 5 διαφορετικές CCT.	78
Γράφημα 9 Γραφική απεικόνιση με ράβδους της ισχύος για τις 5 διαφορετικές τιμές CCT.	79
Γράφημα 10 Διακύμανση τιμών EML για τον χώρο γραφείου, από 2700 K έως 6500 K.....	97
Γράφημα 11 Διακύμανση τιμών EML για την αίθουσα διδασκαλίας, από 2700 K έως 6500 K.	100
Γράφημα 12 Διακύμανση τιμών CS για τον χώρο γραφείου, από 2700 K έως 6500 K.	102
Γράφημα 13 Διακύμανση τιμών CS για την αίθουσα διδασκαλίας, από 2700 K έως 6500 K.	103
Γράφημα 14 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στον χώρο γραφείου.	105
Γράφημα 15 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στον χώρο γραφείου.	106
Γράφημα 16 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το πρώτο σενάριο στο γραφείο.	108
Γράφημα 17 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στον χώρο γραφείων.	109
Γράφημα 18 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στον χώρο γραφείων.	110
Γράφημα 19 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το δεύτερο σενάριο.	111
Γράφημα 20 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στον χώρο γραφείων.	112
Γράφημα 21 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στον χώρο γραφείων.	112
Γράφημα 22 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το τρίτο σενάριο.	113
Γράφημα 23 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.	115
Γράφημα 24 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.	116
Γράφημα 25 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το πρώτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.....	119
Γράφημα 26 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.	120
Γράφημα 27 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.	120
Γράφημα 28 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.....	121

Γράφημα 29 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.....	122
Γράφημα 30 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.	123
Γράφημα 31 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.....	124
Γράφημα 32 Αναπαράσταση κατανάλωσης ενέργειας στον χώρο γραφείου, με σύγκριση της υφιστάμενης τιμής με την νέα, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια.	125
Γράφημα 33 Αναπαράσταση νέου κόστους κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με το υφιστάμενο, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια που μελετήθηκαν στον χώρο γραφείου. .	126
Γράφημα 34 Αναπαράσταση κατανάλωσης ενέργειας στην αίθουσα διδασκαλίας, με σύγκριση της υφιστάμενης τιμής με την νέα, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια.	127
Γράφημα 35 Αναπαράσταση νέου κόστους κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με το υφιστάμενο, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια που μελετήθηκαν στην αίθουσα διδασκαλίας.....	127

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Φωτοευαίσθητα γαγγλιακά κύτταρα, κωνία και ραβδία [4].	20
Εικόνα 2 Απεικόνιση των συνδέσεων μεταξύ του ματιού και του εγκεφάλου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, υπάρχουν δύο οδοί, η κύρια οπτική οδός, η οποία τροφοδοτείται με σήματα από τα κωνία και τα ραβδία, που οδηγεί στον οπτικό φλοιό και η αμφιβληστροειδοϋποθαλαμική οδός που τροφοδοτείται με σήματα από τα ipRGCs και οδηγεί στον υπερχιασματικό πυρήνα [13].	22
Εικόνα 3 Απλοποιημένη απεικόνιση της αμφιβληστροειδοϋποθαλαμικής οδού [5].	23
Εικόνα 4 Κλίμακα θερμοκρασίας χρώματος φυσικού φωτισμού και φωτός από διάφορες πηγές φωτισμού [90].	27
Εικόνα 5 Επίδραση του φυσικού φωτός στα επίπεδα κορτιζόλης και μελατονίνης στον ανθρώπινο οργανισμό [4].	30
Εικόνα 6 Σύνολο των παραμέτρων για έναν πετυχημένο ανθρωποκεντρικό φωτισμό [13].	32
Εικόνα 7 Μια φωτεινή πηγή με θερμοκρασία χρώματος 2800 K δημιουργεί συνθήκες χαλάρωσης, ενώ αντίστοιχα με 5000 K αυξάνει την εγρήγορση [13].	33
Εικόνα 8 Αντίκτυπο της κατεύθυνσης που πέφτει το φως στο μάτι [4].	34
Εικόνα 9 Αποτελεσματικός ανθρωποκεντρικός φωτισμός, ανάλογα με την ώρα της ημέρας [13].	34
Εικόνα 10 Αποκρίσεις των κωνίων (μπλε, πράσινων, κόκκινων), των ραβδίων και των ipRGCs φωτοϋποδοχέων [13].	38
Εικόνα 11 Γραφική απεικόνιση του υπολογισμού του μέρους της ακτινοβολίας μιας πηγής (πρώτο γράφημα) που χρειάζεται για τον καθορισμό της έντασης φωτισμού [lx] (δεύτερο γράφημα) και της ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού (EML) (τρίτο γράφημα) [13].	41
Εικόνα 12 Καμπύλες στάθμισης για τα τρία μοντέλα, ψυχρό CS, θερμό CS, μελανοπικό WELL	44
Εικόνα 13 Τα φωτεινά χωρίσματα θέσεων εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επιπλέον CS στους χρήστες ενός χώρου [33].	45
Εικόνα 14 Για την παροχή εγρήγορσης κατά τη διάρκεια της απογευματινής ύφεσης μετά το γεύμα, τα κόκκινα φωτεινά χωρίσματα σταθμών εργασίας θα παρέχουν ένα ερέθισμα εγρήγορσης χωρίς να αυξάνουν το CS [33].	45
Εικόνα 15 Οι φωτεινές οάσεις διαφορετικής διαμόρφωσης αποτελούν ευέλικτες και προσιτές λύσεις για την παροχή CS [33].	45
Εικόνα 16 Τα ρυθμιζόμενα φωτιστικά σώματα μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να παρέχουν προσαρμοσμένα προγράμματα δοσολογίας CS [33].	46
Εικόνα 17 Οι αλλαγές των τιμών CS επιτυγχάνονται με απλή αύξηση ή μείωση της φωτεινής απόδοσης του συστήματος, διατηρώντας την ίδια CCT [33].	46
Εικόνα 18 Συνάρτηση καθολικής φωτεινής απόδοσης σε σχέση με τις συναρτήσεις σκοτοπικής και φωτοπικής απόδοσης [57].	48
Εικόνα 19 Σχετική κερκάρδια φασματική ευαισθησία για τον υπολογισμό της κερκάρδιας ισχύος [62].	51
Εικόνα 20 Κατασκευαστική διαμόρφωση LED [66].	55
Εικόνα 21 Φάσμα που εκπέμπεται από ένα μπλε LED καλυμμένο με κίτρινους φωσφόρους [1].	56
Εικόνα 22 Λυχνία LED ισχύος (α) και λυχνία LED πολλαπλών κυκλωμάτων (b) [1].	56
Εικόνα 23 COB LED συστοιχίες [1].	57
Εικόνα 24 Ποσοστό θερμού λευκού και ψυχρού λευκού φωτός που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής CCT [1].	58
Εικόνα 25 SPD της συστοιχίας LED Sharp Tiger Zenigata σε θερμοκρασία 3700 K [1].	59
Εικόνα 26 SPD του ρυθμιζόμενου λευκού συστήματος Tridonic [1].	59

Εικόνα 27 Σχεδιασμός COB της Samsung, με ομόκεντρη, κυκλική διάταξη τσιπ.....	62
Εικόνα 28 Δύο LED με υψηλό και χαμηλό επίπεδο CCT ενωμένα σε ένα Tunable White LED.	63
Εικόνα 29 Σύγκριση εναλλάξ θερμών και ψυχρών πηγών και tunable white φωτιστικών της NICHIA.....	64
Εικόνα 30 Συμβατικά LED, με CCT 2700 K και 6500 K εναλλάξ. Εικόνα 31 Tunable white LED Nichia's.....	64
Εικόνα 32 Συμβατικά LED με CCT 2700 και 6500 K εναλλάξ. Εικόνα 33 Tunable white LED Nichia's.....	64
Εικόνα 34 Διάγραμμα κατανομής φωτεινής έντασης και γωνία ακτινοβολίας της φωτεινής πηγής.....	68
Εικόνα 35 Φωτιστικό Tunable White LED Panel.....	68
Εικόνα 36 Γωνιοφωτομέτρηση.....	69
Εικόνα 37 Αισθητήρας.....	69
Εικόνα 38 Γωνιοφωτόμετρο	70
Εικόνα 39 Κάτοψη του χώρου.....	82
Εικόνα 40 Κάτοψη του χώρου με τα βασικά αντικείμενα.....	82
Εικόνα 41 Τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου στο RELUX.	83
Εικόνα 42 Φωτογραφία του χώρου στην πραγματικότητα.	83
Εικόνα 43 Γραμμικό φωτιστικό οροφής, φθορισμού T8 με 36W.	84
Εικόνα 44 Κάτοψη του χώρου, χωρίς αντικείμενα, στο RELUX.	87
Εικόνα 45 Κάτοψη του χώρου στο RELUX.....	87
Εικόνα 46 Τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου στο RELUX.	88
Εικόνα 47 Φωτογραφία του χώρου στην πραγματικότητα.	88
Εικόνα 48 Φωτιστικό αίθουσας διδασκαλίας 6.....	89
Εικόνα 49 Απαιτήσεις για χώρο γραφείων, όπως αυτές επιλέγονται στο πρόγραμμα RELUX.	90
Εικόνα 50 Κάτοψη του χώρου με τα φωτιστικά.....	91
Εικόνα 51 Απαιτήσεις για αίθουσα διδασκαλίας, όπως αυτές επιλέγονται στο πρόγραμμα RELUX.....	92
Εικόνα 52 Κάτοψη του αμφιθεάτρου με τοποθετημένα τα φωτιστικά.	93
Εικόνα 53 Η θέση του παρατηρητή φαίνεται στην κάτοψη του χώρου γραφείου. Αυτή είναι η ένταση κατακόρυφου φωτισμού για θερμοκρασία χρώματος στους 2700 K, όπως παρουσιάζεται στο RELUX.	95
Εικόνα 54 Γράφημα στο WELL calculator για προσδιορισμό του ratio R – SPD των 5000 K για το φωτιστικό tunable white LED «PETRIDI» (υπολογίστηκε R = 0.930).	96
Εικόνα 55 Η θέση του παρατηρητή φαίνεται στην παραπάνω κάτοψη της αίθουσας διδασκαλίας. Υπολογίζεται η τιμή της έντασης κατακόρυφου φωτισμού για θερμοκρασία χρώματος στους 2700 K.	98
Εικόνα 56 Γράφημα στο WELL calculator για προσδιορισμό του ratio R – SPD των 6000 K για το φωτιστικό tunable white LED “PETRIDI” (υπολογίστηκε R = 1.052).	99
Εικόνα 57 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 2700 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	136
Εικόνα 58 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 2700 K.....	136
Εικόνα 59 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 3000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	137
Εικόνα 60 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 3000 K.....	137
Εικόνα 61 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 4000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	138

Εικόνα 62 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 4000 K.	138
Εικόνα 63 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 5000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	139
Εικόνα 64 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 5000 K.	139
Εικόνα 65 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 6500 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	140
Εικόνα 66 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 6500 K.	140
Εικόνα 67 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, με θερμοκρασία χρώματος ίση με 2700K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	141
Εικόνα 68 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 2700 K.	141
Εικόνα 69 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 3000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	142
Εικόνα 70 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 3000 K.	142
Εικόνα 71 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 4000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	143
Εικόνα 72 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 4000 K.	143
Εικόνα 73 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 5000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	144
Εικόνα 74 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 5000 K.	144
Εικόνα 75 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 6500 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.....	145
Εικόνα 76 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 6500 K.	145

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Μελανοπικές μετρήσεις για τυπικούς φωτιστικούς παράγοντες: E, A, D ₅₅ και D ₆₅ (*) και ένα μοντέλο ενός τοπικού φωτιστικού με ρυθμιζόμενες λυχνίες LED σε διαφορετικές ρυθμίσεις CCT.	40
Πίνακας 2 Υπολογισμός ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού, με ενδεικτικές τιμές συντελεστή MEER ή R, ανά 100 lx έντασης φωτισμού, για διάφορες τεχνολογίες φωτεινών πηγών και θερμοκρασίας χρώματος.	42
Πίνακας 3 Ενδεικτικές τιμές συντελεστή MDER για διάφορες τεχνολογίες φωτεινών πηγών και συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος, υπολογισμός ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φυσικού φωτισμού ανά 100 lx έντασης φωτισμού για διάφορες πηγές φωτισμού και ελάχιστες τιμές κάθετης έντασης φωτισμού LV, MDEI για την επίτευξη του κικράδιου ερεθίσματος (MDEI ή E _{v, mel, D65} > 240 lx).....	43
Πίνακας 4 Τιμές LER και χρωματική απόδοση που μετρήθηκαν για το LED Sharp Tiger Zenigata [1].....	58
Πίνακας 5 Dynamic COB Four Channel RGBW Tunable (με τα κανάλια να είναι κόκκινο, πράσινο, μπλε και θερμό λευκό) LEDs MP-1616 XNOVA Cube σε μεταλλική πλακέτα PC. ...	60
Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά Gen 2 CCT tunable COBs φωτιστικών της LUMINUS.	61
Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά των Tunable White COB LED φωτιστικών.	62
Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά των τριών LED Tunable COB της Samsung.....	63
Πίνακας 9 Σύγκριση των tunable white προϊόντων της NICHIA. Τα δύο πρώτα ανήκουν στην κατηγορία series και τα 3 επόμενα στα COB.	65
Πίνακας 10 Φωτομετρικά, ηλεκτρικά και χρωματικά αποτελέσματα μετρήσεων για τα βασικά μεγέθη του φωτιστικού.....	70
Πίνακας 11 Μετρήσεις μεταβάλλοντας τη φωτεινή στάθμη με βήμα 10% και κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία χρώματος στους 4000 K.....	73
Πίνακας 12 Μετρήσεις διατηρώντας σταθερή τη φωτεινή στάθμη στο 100%, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία χρώματος.....	76
Πίνακας 13 Μετρήσεις για πέντε θερμοκρασίες χρώματος, μεταβάλλοντας σε κάθε μια τη φωτεινή στάθμη, από 100% μέχρι 0.....	77
Πίνακας 14 Απαιτήσεις φωτισμού για χώρο γραφείου, ανάλογα με τη χρήση του.....	81
Πίνακας 15 Απαιτούμενα όρια φωτισμού σε χώρους διδασκαλίας, ανάλογα με τη χρήση τους.	86
Πίνακας 16 Μεταβολή της οριζόντιας έντασης φωτισμού, μετά από μείωση της φωτεινής στάθμης του φωτιστικού.....	92
Πίνακας 17 Μεταβολή της οριζόντιας έντασης φωτισμού, μετά από μείωση της φωτεινής στάθμης του φωτιστικού.....	94
Πίνακας 18 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στον χώρο γραφείου, για τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.....	95
Πίνακας 19 Μετρήσεις R και υπολογισμός EML για κάθε μια από τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος που εξετάζονται στον χώρο γραφείου προς μελέτη.....	96
Πίνακας 20 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στον χώρο γραφείου, μετά από κατάλληλη ρύθμιση της έντασης φωτισμού για τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.....	97
Πίνακας 21 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στην αίθουσα διδασκαλίας, για τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.....	98
Πίνακας 22 Μετρήσεις R και υπολογισμός EML για κάθε μια από τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος που εξετάζονται στην προς μελέτη αίθουσα διδασκαλίας.	100
Πίνακας 23 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στην αίθουσα διδασκαλίας, μετά από κατάλληλη ρύθμιση της έντασης φωτισμού για τις 5 θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.....	101

Πίνακας 24 Υπολογισμός CS και CLA στον χώρο γραφείου.	102
Πίνακας 25 Υπολογισμός CS και CLA στην αίθουσα διδασκαλίας.	103
Πίνακας 26 Πρώτο σενάριο φωτισμού για τον χώρο γραφείου.	105
Πίνακας 27 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το πρώτο σενάριο φωτισμού του χώρου γραφείων.	106
Πίνακας 28 Δεύτερο σενάριο φωτισμού για τον χώρο γραφείου.	109
Πίνακας 29 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το δεύτερο σενάριο φωτισμού του χώρου γραφείων.	110
Πίνακας 30 Τρίτο σενάριο φωτισμού για τον χώρο γραφείου.	111
Πίνακας 31 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το τρίτο σενάριο φωτισμού του χώρου γραφείων.	113
Πίνακας 32 Πρώτο σενάριο φωτισμού για την αίθουσα 6 της σχολής ΗΜΜΥ.	115
Πίνακας 33 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το πρώτο σενάριο φωτισμού της αίθουσας πανεπιστημιακών διαλέξεων.	117
Πίνακας 34 Δεύτερο σενάριο φωτισμού για την αίθουσα 6 της σχολής ΗΜΜΥ.	119
Πίνακας 35 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το δεύτερο σενάριο φωτισμού της αίθουσας πανεπιστημιακών διαλέξεων.	121
Πίνακας 36 Τρίτο σενάριο φωτισμού για την αίθουσα 6 της σχολής ΗΜΜΥ.	122
Πίνακας 37 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το τρίτο σενάριο φωτισμού της αίθουσας πανεπιστημιακών διαλέξεων.	123
Πίνακας 38 Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ υφιστάμενης κατάστασης και των τριών σεναρίων, για τον χώρο γραφείου.	125
Πίνακας 39 Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ υφιστάμενης κατάστασης και των τριών σεναρίων, για την αίθουσα 6.	126

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα του ανθρωποκεντρικού φωτισμού (Human Centric Lighting), ο οποίος αναφέρεται στον σχεδιασμό φωτιστικών συστημάτων που λαμβάνουν υπόψη τις βιολογικές και ψυχολογικές ανάγκες των ανθρώπων, πέρα από τις καθαρά οπτικές απαιτήσεις. Αποτελείται από δύο μέρη, ένα θεωρητικό και ένα πρακτικό, από πέντε κεφάλαια το καθένα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες του φωτός, της όρασης και της επίδρασης τους στον ανθρώπινο οργανισμό. Αναλύεται ιδιαίτερα η σημασία του τρίτου φωτοϋποδοχέα και η σχέση του με τον κιρκάδιο ρυθμό.

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην επίδραση του φωτός στον ανθρώπινο οργανισμό, αναλύοντας την οπτική και βιολογική ανταπόκριση στον φωτισμό.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η έννοια του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού, οι αρχές που τον διέπουν και τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του καθώς και αρκετές μετρικές αξιολόγησής του, όπως η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού (EML) και το κιρκάδιο ερεθισμα (CS).

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή και φωτιστικά προϊόντα LED που χρησιμοποιούνται για επίτευξη Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα πρότυπα, σύμφωνα με τα οποία ρυθμίζεται ο φωτισμός των κτιρίων.

Στη συνέχεια εισάγεται το πρακτικό μέρος.

Το έκτο κεφάλαιο αναλύει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτιστικών τύπου Tunable White LED, που χρησιμοποιούνται στη μελέτη, εστιάζοντας στις δυνατότητες ρύθμισης της θερμοκρασίας χρώματος και της φωτεινής στάθμης.

Το έβδομο κεφάλαιο αναφέρεται στους δύο χώρους προς μελέτη, έναν τυπικό μεσαίο χώρο εργασίας (γραφείο) και έναν μέτριας έκτασης εκπαιδευτικό χώρο (αίθουσα διδασκαλίας της σχολής ΗΜΜΥ του Πολυτεχνείου). Εξετάζεται ο υφιστάμενος φωτισμός σε αυτούς τους χώρους.

Το όγδοο κεφάλαιο αναφέρεται στα αποτελέσματα της μελέτης στο RELUX και παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα σχετικά με τη φωτεινή απόδοση και τις μετρήσεις ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού και κιρκάδιου ερεθίσματος, καθώς και την ενεργειακή κατανάλωση.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τέσσερα σενάρια φωτισμού που υλοποιήθηκαν σε κάθε χώρο, με υπολογισμό των μετρικών και σύγκριση της κατανάλωσης σε σχέση με τον υφιστάμενο φωτισμό.

Στο δέκατο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια συνολική αξιολόγηση της εργασίας, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμοσιμότητα και την αποτελεσματικότητα του ανθρωποκεντρικού φωτισμού, ενώ παράλληλα προτείνονται ιδέες για μελλοντικές έρευνες και επεκτάσεις της παρούσας μελέτης.

Μέρος Α. Θεωρητικό μέρος

1 Φως - όραση

1.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο μισό του δέκατου ενάτου αιώνα ο James Clerk Maxwell όρισε τις εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τις οποίες κατάφερε να δώσει μια ενιαία περιγραφή των ηλεκτρικών, μαγνητικών και οπτικών φαινομένων. Ο ακριβέστερος ορισμός που διαθέτει η σύγχρονη επιστήμη προέρχεται από την περιγραφή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον επιστήμονα Albert Einstein, με βάση την οποία ορίστηκε το φως μέσω των κβάντων φωτός ή αλλιώς φωτονίων. Τα φωτόνια είναι πακέτα ενέργειας που έχουν τόσο κυματοειδή όσο και σωματιδιακή συμπεριφορά.

Στην καθημερινή μακροσκοπική πραγματικότητα τα φαινόμενα διάδοσης του φωτός και η αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον μπορούν να περιγραφούν επαρκώς από τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, η οποία θεωρεί το φως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητές του μπορούν να μεταβληθούν σε ταχύτητες κοντά σε αυτές του φωτός ή σε παρουσία ισχυρών βαρυτικών πεδίων, συνθήκες που δεν υφίστανται στον σχεδιασμό φωτισμού [1, p. 4].

1.2 Ορατό φως

Ως ορατό φως θεωρείται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Καλύπτει ένα πολύ μικρό μέρος του συνολικού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που περιλαμβάνει από ραδιοκύματα με μήκη κύματος μερικών μέτρων έως τις κοσμικές ακτίνες με μήκη κύματος μικρότερα από ένα τρισεκατομμυριοστό του μέτρου. Το ορατό φως αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα που έχουν μήκος κύματος μεταξύ 380 nm και 780 nm περίπου και βρίσκεται στην περιοχή ανάμεσα στις υπέρυθρες και στις υπεριώδεις ακτινοβολίες. Κάθε μια ακτινοβολία με το δικό της μήκος κύματος αντιστοιχεί σε διαφορετικά αντιληπτά χρώματα. Όλες οι ακτινοβολίες μαζί συνθέτουν το λευκό φως [2, p. 16].

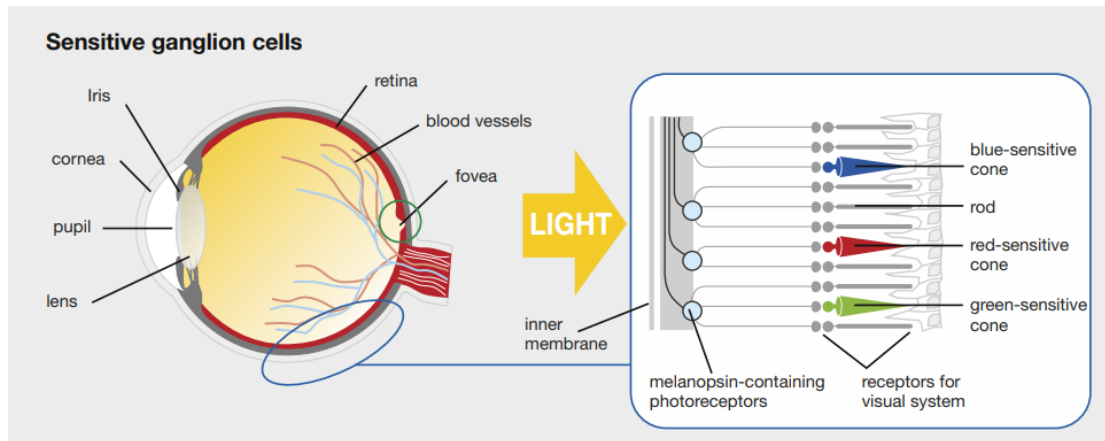
1.3 Όραση

Η όραση είναι μια από τις πέντε βασικές αισθήσεις του ανθρώπου και επιτρέπει την αντίληψη του φωτός, των αντικειμένων και των χρωμάτων. Χάρη σε αυτή την ικανότητα ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή με τον κόσμο που τον περιβάλλει και συνειδητοποιεί τη θέση και την κίνησή του μέσα στο χώρο, ενώ ρυθμίζει και το βιολογικό του ρολόι. Η όραση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που συνδυάζει τη φυσιολογία των ματιών και την επεξεργασία πληροφοριών από τον εγκέφαλο μέσω ενός δικτύου νευρώνων και άλλων κυττάρων, επιτρέποντας στους ανθρώπους να αλληλεπιδρούν με τον κόσμο γύρω τους [2, p. 20].

1.4 Οφθαλμός

Το φως εισέρχεται στο μάτι από τον κερατοειδή χιτώνα και στη συνέχεια μέσω ενός κυκλικού ανοίγματος, της κόρης, της οποίας η διάμετρος ελέγχεται από τους μύες της ίριδας. Σύμφωνα με τους Duke-Elder, το μέγεθος της κόρης ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα του φωτός που φτάνει στον αμφιβληστροειδή. Επηρεάζεται επίσης από την απόσταση του αντικειμένου από το μάτι, την ηλικία του παρατηρητή και διάφορους συναισθηματικούς παράγοντες, όπως ο φόβος και ο θυμός [3]. Πίσω από την ίριδα βρίσκεται ο φακός, ο οποίος παραμένει ακίνητος στη θέση του, μεταβάλλοντας το πλάτος εστίασής του, αλλάζοντας το σχήμα του. Το φως περνάει μετά τον φακό από το υαλοειδές σώμα και συγκεντρώνεται στο πίσω μέρος του ματιού, στον αμφιβληστροειδή. Στη συνέχεια, το φως που φθάνει στον αμφιβληστροειδή

διέρχεται μέσα από τα στρώματα γαγγλιακών και συλλεκτικών κυττάρων πριν φτάσει στους οπτικούς φωτοϋποδοχείς, όπως παρουσιάζεται παρακάτω στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1 Φωτοευαίσθητα γαγγλιακά κύτταρα, κωνία και ραβδία [4].

Ο αμφιβληστροειδής έχει τέσσερα είδη οπτικών φωτοϋποδοχέων: τρεις τύπους κωνίων, ο καθένας με διαφορετική φωτοχρωστική ουσία και έναν τύπο ραβδίου με μια φωτοχρωστική ουσία διαφορετική από αυτές των κωνίων. Αυτοί οι τέσσερις τύποι φωτοευαίσθητων φωτοϋποδοχέων ομαδοποιούνται συμβατικά σε δύο κατηγορίες, κωνία και ραβδία. Οι φωτοϋποδοχείς είναι υπεύθυνοι για τη διαδικασία της μετατροπής της ενέργειας του αισθητηριακού ερεθίσματος, δηλαδή των φωτονίων του φωτός, σε ηλεκτρικό σήμα, που μεταδίδεται και αναλύεται από τα κύτταρα του νευρικού συστήματος.

Τα κύτταρα-νευρώνες του αμφιβληστροειδή διαχωρίζονται σε πέντε γενικές κατηγορίες νευρώνων. Μία από αυτές, τα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς, χρησιμοποιούν τους άξονές του για να σχηματίσουν το οπτικό νεύρο, το οποίο μεταφέρει οπτικές πληροφορίες από το μάτι στα οπτικά κέντρα του εγκεφάλου [5, pp. 46-52].

1.5 Οπτική οδός

Οι φωτοανιχνευτές του αμφιβληστροειδή, τα κωνία και τα ραβδία, είναι ευαίσθητα σε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού.

Σε κάθε μάτι υπάρχουν περίπου 7 εκατομμύρια κωνία στην ωχρά κηλίδα, το κεντρικό σημείο του αμφιβληστροειδούς, τα οποία είναι ευαίσθητα σε υψηλά επίπεδα φωτός και είναι υπεύθυνα για την όραση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Απορροφούν επιλεκτικά το φως που φτάνει σε αυτά, έχουν την ικανότητα να βελτιώνουν την ποιότητα της εικόνας και συμβάλλουν κατά πολύ στην οπτική οξύτητα. Τα κωνία ευθύνονται επίσης για την αντίληψη των χρωμάτων. Καθένα από τα τρία διαφορετικά είδη κωνίων είναι εξειδικευμένο να ανιχνεύει επιλεκτικά το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο φως του φάσματος.

Όταν η ένταση του φωτός είναι χαμηλή, τα κωνία δεν διεγείρονται, περιορίζοντας έτσι δραματικά την ικανότητα των ματιών να διακρίνουν τα χρώματα. Σε αυτή ακριβώς τη συνθήκη ενεργοποιούνται τα ραβδία. Υπάρχουν περίπου 120 εκατομμύρια ραβδία, δηλαδή κατά πολύ περισσότερα από τα κωνία, κατανομημένα στην περιοχή του αμφιβληστροειδούς χιτώνα. Τα ραβδία περιέχουν μια χημική ουσία ευαίσθητη σε πολύ χαμηλά επίπεδα έντασης του φωτός, η οποία ονομάζεται ροδοψίνη και είναι παράγωγο της βιταμίνης Α. Κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν το φως είναι πολύ και δυνατό, η ροδοψίνη απενεργοποιείται (αποχρωματίζεται) προκαλώντας έτσι μια καθυστέρηση στην προσαρμογή των ματιών στο σκοτάδι και μειώνοντας την ευαισθησία τους σε χαμηλά επίπεδα φωτός.

Τα κωνία και τα ραβδία αντιδρούν στο φως με αργές, κλιμακωτές αλλαγές του δυναμικού της μεμβράνης τους. Τα ραβδία έχουν βραδεία αντίδραση, έτσι ώστε φωτόνια που

απορροφούνται σε χρονικό διάστημα 100 ms, να αθροίζονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιτρέπεται η ανίχνευση ακόμη και πολύ μικρών ποσοτήτων φωτός [2, pp. 20-21].

1.5.1 Τύποι όρασης

Η όραση είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι όρασης ανάλογα με τα επίπεδα φωτεινότητας.

Πρώτη είναι η φωτοπική όραση, κατά την οποία η λαμπρότητα που προσλαμβάνει ο οφθαλμός είναι σε υψηλά επίπεδα. Τα κωνία, που είναι υπεύθυνα για την όραση σε φωτεινές συνθήκες βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο κέντρο του αμφιβληστροειδούς, ενώ περιφερειακά είναι ελαττωμένα. Είναι αυτά που επιτρέπουν στον άνθρωπο να διακρίνει διάφορες αποχρώσεις. Αυτό το είδος όρασης συναντάται με το φως της ημέρας, γι' αυτό και ονομάζεται όραση ημέρας.

Δεύτερο είδος είναι η σκοτοπική όραση, κατά την οποία η φωτεινότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός, είναι σε χαμηλά επίπεδα. Τα ραβδία, που είναι ευαίσθητα στον χαμηλό φωτισμό, προσφέρουν μονόχρωμη όραση, ασπρόμαυρη δηλαδή. Δεν ανιχνεύονται στο κέντρο του αμφιβληστροειδούς, ενώ υπάρχουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες περιφερειακά. Τέτοιου είδους όραση παρατηρείται σε συνθήκες πολύ χαμηλού φωτισμού και τη νύχτα με το φως των αστεριών και ονομάζεται νυχτερινή όραση.

Τέλος, υπάρχει η μεσοπική όραση, σε συνθήκες μέτριας φωτεινότητας, όπου τα επίπεδα λαμπρότητας του φωτός είναι μεταξύ των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Σε αυτό τον τύπο όρασης συμβάλλουν αμφότερα και τα κωνία και τα ραβδία, σε διαφορετικό όμως βαθμό το καθένα [2, pp. 22-25].

1.6 Τρίτος φωτοϋποδοχέας

Μελέτες πολλών δεκαετιών έχουν δείξει ότι το φως επηρεάζει πολλές πτυχές της ανθρώπινης φυσιολογίας και συμπεριφοράς, πέρα από την ενεργοποίηση του οπτικού συστήματος.

Έπειτα από μια σειρά πειραμάτων σε ποντίκια στις αρχές της νέας χιλιετίας ανακαλύφθηκε ότι στον αμφιβληστροειδή του οφθαλμού του ανθρώπου υπάρχει άλλος ένας φωτοϋποδοχέας, διαφορετικός από τους τρεις τύπους κωνίων και τα ραβδία που ήταν γνωστοί μέχρι τότε. Ο νέος φωτοϋποδοχέας, που ονομάζεται εγγενώς φωτοευαίσθητο γαγγλιακό κύτταρο του αμφιβληστροειδούς ή εν συντομία ipRGC, δεν βρίσκεται στην ίδια στιβάδα με τους άλλους, ήδη γνωστούς φωτοϋποδοχείς. Έχει εντοπιστεί σε ορισμένα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς και περιέχει μια πρωτεΐνη που ονομάζεται μελανοψίνη [6].

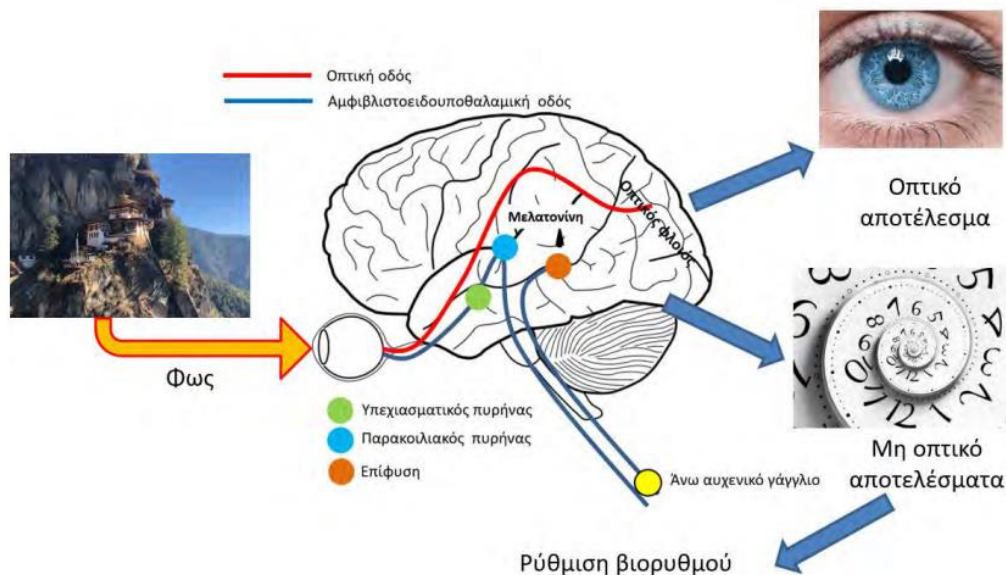
Μόνο ορισμένα από τα γαγγλιακά κύτταρα περιέχουν μελανοψίνη, η οποία είναι μια διαφορετική πρωτεΐνη από τις άλλες τέσσερις ανθρώπινες οψίνες. Όταν εκχυλίζεται, η μελανοψίνη έχει μέγιστη απορρόφηση σε μήκος κύματος 480 nm, δηλαδή είναι πιο ευαίσθητη στο φως μικρού μήκους κύματος [7]. Κάθε ipRGC έχει μια εκτεταμένη δενδριτική μορφή που εξαπλώνεται σε όλο τον αμφιβληστροειδή και διεγείρεται στο προσπίπτον φως [8]. Από τα εν λόγω πειράματα που αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνεται ότι στους αμφιβληστροειδείς θηλαστικών τα ipRGCs είναι σχετικά σπάνια, καθώς εντοπίζονται μόνο στο 1%-2% των γαγγλιακών κυττάρων του αμφιβληστροειδούς [9]. Κατανέμονται αρκετά ομοιόμορφα στον αμφιβληστροειδή, όμως ούτε τα ipRGCs ούτε οι δενδρίτες τους εμφανίζονται στο βοθρίο όπου συγκεντρώνονται οι φωτοϋποδοχείς των κωνίων. Τα ipRGCs έχουν πολύ πιο αργή απόκριση σε σύγκριση με τους άλλους φωτοϋποδοχείς και λόγω της σπανιότητας και της δομής τους, έχουν επίσης πολύ μικρότερη πιθανότητα σύλληψης φωτονίων από τα κωνία και τα ραβδία [10]. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται έντονος φωτισμός για να επάγει απόκριση από τα ipRGCs [11], [5, pp. 91-92].

1.7 Αμφιβληστροειδοϋποθαλαμική οδός

Υπάρχουν δύο κύριες οδοί που έχουν διερευνηθεί μέχρι σήμερα, η πρωτογενής οπτική οδός (POT), που αναλύσαμε παραπάνω, η οποία τροφοδοτείται από σήματα από τα κωνία και τα ραβδία και οδηγεί στον οπτικό φλοιό και η αμφιβληστροειδοϋποθαλαμική οδός (RHT) η οποία δέχεται σήματα από τα ipRGCs και οδηγεί στον υπερχιασματικό πυρήνα (SCN) του εγκεφάλου. [12]

Πιο αναλυτικά, τα κωνία και τα ραβδία δέχονται το φως και, ανάλογα με το φασματικό του περιεχόμενο, παράγουν νευροδιαβιβαστές που μεταδίδονται μέσω των συνάψεων στα διπολικά νευρικά κύτταρα. Αυτά με τη σειρά τους μεταδίδουν τα σήματα στα γαγγλιακά κύτταρα. Τα γαγγλιακά κύτταρα συλλέγουν πληροφορίες είτε από έναν μεμονωμένο φωτοϋποδοχέα είτε από σύνολα φωτοϋποδοχέων και οι πληροφορίες αυτές μεταδίδονται μέσω του άξονά τους στο οπτικό νεύρο.

Όσον αφορά την αμφιβληστροειδοϋποθαλαμική οδό, το σήμα που συλλέγεται από τα ipRGCs και προωθείται προς τον SCN δεν επηρεάζει τη διαδικασία της οπτικής αντίληψης, αλλά ενεργοποιεί το αντανακλαστικό της κόρης στο φως και επιδρά στη ρύθμιση του επιπέδου της μελατονίνης. Ειδικότερα, το μη οπτικό σύστημα μετά το μάτι συνεχίζει με την υποθαλαμική οδό, προχωρά στον SCN του εγκεφάλου, στη συνέχεια στον παρακοιλιακό πυρήνα (PVN), στον έξω θωρακικό πυρήνα, στο ανώτερο αυχενικό γάγγλιο (SCG) και καταλήγει στην επίφυση. Σε συνθήκες σκότους, η επίφυση συνθέτει την ορμόνη μελατονίνη, η οποία διανέμεται σε άλλους ιστούς και όργανα του σώματος μέσω του αίματος. [1, pp. 40-41].



Εικόνα 2 Απεικόνιση των συνδέσεων μεταξύ του ματιού και του εγκεφάλου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, υπάρχουν δύο οδοί, η κύρια οπτική οδός, η οποία τροφοδοτείται με σήματα από τα κωνία και τα ραβδία, που οδηγεί στον οπτικό φλοιό και η αμφιβληστροειδοϋποθαλαμική οδός που τροφοδοτείται με σήματα από τα ipRGCs και οδηγεί στον υπερχιασματικό πυρήνα [13].

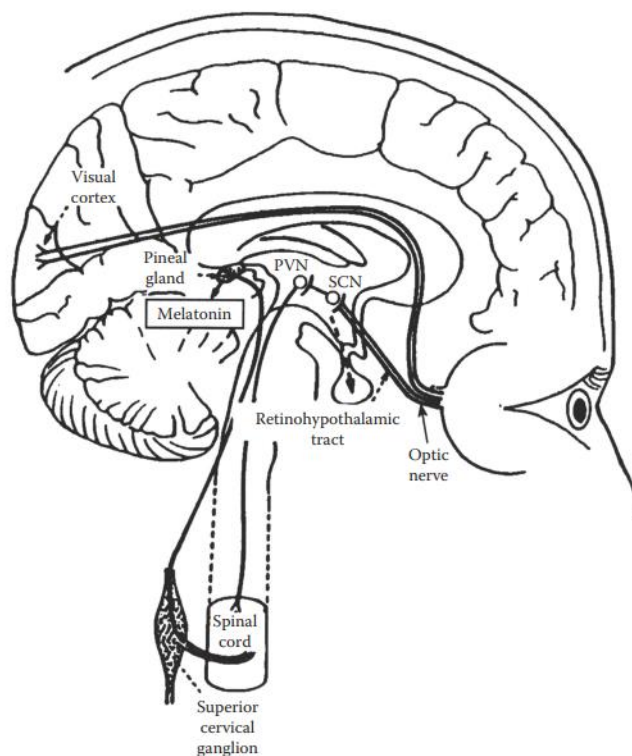
1.7.1 Υπερχιασματικός πυρήνας

Τα φωτοευαίσθητα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς, ipRGCs, βρίσκονται στα βαθιά στρώματα του αμφιβληστροειδούς χιτώνα και έχουν άμεση σύνδεση με τον εγκεφαλο ή, πιο συγκεκριμένα, με τον υπερχιασματικό πυρήνα του υποθαλάμου πίσω από τη ρίζα της μύτης, ακριβώς πάνω από το σημείο διασταύρωσης των δύο οπτικών νεύρων. Ο SCN αποτελείται από δύο εγκεφαλικούς πυρήνες στο μέγεθος ενός κόκκου ρυζιού. Κάθε πυρήνας αποτελείται από χιλιάδες νευρικά κύτταρα, ο ρυθμός των οποίων επανασυγχρονίζεται

καθημερινά με το φως της ημέρας. Είναι ο μεσολαβητής μεταξύ του φωτός και της αντίδρασης του σώματος σε αυτό.

Ο SCN αναγνωρίζεται ως το «βιολογικό ρολόι» των θηλαστικών, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου [14]. Είναι το κεντρικό σημείο ελέγχου, ο ενδογενής χρονοδιακόπτης και συγχρονίζεται βάσει των φωτεινών εξωγενών σημάτων της ημέρας και της νύχτας. Είναι υπεύθυνος για το χρονοδιάγραμμα πολλών διαφορετικών φυσιολογικών λειτουργιών στο σώμα, συμπεριλαμβανομένης της επιδιόρθωσης του DNA. Από εδώ εκκινούν οι νευροδιαβιβαστές, προσαρμόζοντας τον μεταβολισμό στην ώρα της ημέρας. Έτσι τα ένζυμα ενεργοποιούνται ή αναστέλλονται και των ορμονών οι οποίες εκκρίνονται ή καταστέλλονται [4, p. 15].

Ωστόσο η φυσική εικοσιτετράωρη φάση μπορεί να μεταβληθεί εάν υπάρξουν φωτεινά ερεθίσματα ικανά να επιδράσουν στον SCN. Αυτό μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, στην περίπτωση διηπειρωτικών πτήσεων μεταξύ πολλαπλών ζωνών ώρας, που τροποποιούν το ημερήσιο μοτίβο φωτισμού, ή στην περίπτωση έκθεσης σε τεχνητό φως, με κirkάδια χαρακτηριστικά, μετά τη δύση του ηλίου. Όπως είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους, ο SCN μπορεί να διαταραχθεί και κατά την απουσία επαρκούς κirkάδιου φωτισμού κατά τις ώρες της ημέρας, διότι σε αυτή την περίπτωση χάνεται το φυσικό πρότυπο έκθεσης στον κανονικό κύκλο του φυσικού φωτός.



Εικόνα 3 Απλοποιημένη απεικόνιση της αμφιβληστροειδοϋποθαλαμικής οδού [5].

1.7.2 Επίφυση

Τα ipRGCs συνδυασμένα με τον SCN, σχηματίζουν ουσιαστικά ένα φωτοκύτταρο σηματοδότησης παρουσίας ή απουσίας φωτός. Ένα από τα μέρη στα οποία αποστέλλεται αυτό το σήμα είναι η επίφυση.

Η επίφυση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συνθέτει και εκκρίνει την ορμόνη μελατονίνη κατά τη διάρκεια της σκοτεινής φάσης του 24ωρου κύκλου φωτός-σκότους, ανεξάρτητα από το αν ο οργανισμός έχει ημερήσιο ή νυχτερινό μοτίβο δραστηριότητας. Η μελατονίνη εκκρίνεται στην κυκλοφορία του αίματος και δρα ως χημικός αγγελιοφόρος σε όλο το σώμα [15].

Φυσιολογικά, υψηλά επίπεδα μελατονίνης εκκρίνονται τη νύχτα και τα επίπεδα μειώνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, η παρουσία φωτός τη νύχτα καταστέλλει τη σύνθεση της μελατονίνης. Ο βαθμός καταστολής καθορίζεται από το φάσμα και την ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στον αμφιβληστροειδή και από τη διάρκεια της έκθεσης [16], [5, pp. 95-96].

1.8 Σύστημα Κιρκάδιου ρυθμού

Ο Franz Halberg από το Πανεπιστήμιο της Μινεσότα και θεμελιωτής της χρονοβιολογίας, εισήγαγε τον όρο circadian (από τα λατινικά circa = περίπου και diem = ημέρα), για να περιγράψει έναν περιοδικό βιολογικό κύκλο διάρκειας περίπου 24 ωρών [17]. Ο ανθρώπινος κιρκάδιος ρυθμός καθορίζει τον χρόνο και την διάρκεια βασικών βιολογικών λειτουργιών, όπως ο ύπνος και η λήψη τροφής, καθώς η ισορροπία αυτών των λειτουργιών είναι καθοριστική για την ευημερία του οργανισμού. Στον ημερήσιο αυτόν κύκλο παρατηρούνται περιοδικές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του σώματος, στην έκκριση ορμονών, στη λειτουργία του εγκεφάλου, στην κυτταρική αναγέννηση και σε λοιπές βιολογικές δραστηριότητες [1, p. 41].

Το φως αποτελεί τον κύριο ρυθμιστή του βιολογικού ρολογιού στον άνθρωπο. Έχει τη δυνατότητα να μετατοπίσει τη φάση του κιρκάδιου ρυθμού και να καθορίσει το χρόνο του κύκλου ύπνου/έγερσης.

Αν και ο όρος κιρκάδιος καθιερώθηκε σχετικά πρόσφατα, οι πρώτες σχετικές παρατηρήσεις χρονολογούνται ήδη από τον 18^ο αιώνα. Ο Jean Jacques d'Ortous de Mairan μελέτησε τη *Mimosa pudica* (Μιμόζα «μη μου άπτου») και διαπίστωσε ότι τα άνθη της άνοιγαν και έκλειναν σύμφωνα με το φως της ημέρας, ακόμη και όταν το φυτό διατηρούνταν σε συνθήκες απόλυτου σκοταδιού. Υπέθεσε, εσφαλμένα, ότι το φυτό «αισθανόταν» την παρουσία του ήλιου, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει ένας ενδογενής βιολογικός μηχανισμός που λειτουργεί ως ρολόι [18].

Σχεδόν έναν αιώνα αργότερα, ο Augustin Pyramus de Candolle επανέλαβε τα πειράματα στη *Mimosa pudica* και παρατήρησε πως, εν απουσία φωτός, το φυτό ακολουθούσε έναν κύκλο διάρκειας 22-23 ωρών, μικρότερο από το ηλιακό 24ωρο. Κατέληξε έτσι στο συμπέρασμα ότι τα φυτά διαθέτουν ενδογενές ρολόι που λειτουργεί ανεξάρτητα από εξωτερικά ερεθίσματα [1, p. 1].

Το 1866, ο William Ogle κατέγραψε αντίστοιχο φαινόμενο στους ανθρώπους διαπιστώνοντας ότι η θερμοκρασία του σώματος αυξανόταν το πρωί και μειωνόταν το βράδυ, ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η έννοια του κιρκάδιου συστήματος χρονισμού διαμορφώθηκε ουσιαστικά τη δεκαετία του 1930 από τον Bunnning (1936), ο οποίος παρατήρησε ότι οι κιρκάδιοι ρυθμοί ελέγχονται από ένα ενδογενές (εσωτερικό) ρολόι, το οποίο ευθυγραμμίζεται από εξωγενή (εξωτερικά) σήματα, όπως η εναλλαγή φωτός και σκότους [19], [20]. Ο Bunnning υπέθεσε επίσης πως διακοπές στον κύκλο φωτός - σκότους θα μπορούσαν να μετατοπίσουν τη φάση του ρολογιού και ότι ο χρόνος της διακοπής καθορίζει την κατεύθυνση και το μέγεθος αυτής της μετατόπισης. Ειδικότερα, η έκθεση σε έντονο φως νωρίς το βράδυ προκαλεί καθυστέρηση φάσης, ενώ η έκθεση σε φως αργά τη νύχτα προκαλεί επιτάχυνση φάσης [21].

Παρά τις παραπάνω διαπιστώσεις, για πολλά χρόνια η ιδέα ύπαρξης εσωτερικού βιολογικού ρολογιού στους οργανισμούς δεν είχε ευρεία αποδοχή. Αντιθέτως, κυριαρχούσε η άποψη ότι οι κιρκάδιες μεταβολές οφείλονται σε εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες και ιδιαίτερα στον υποτιθέμενο «παράγοντα Χ», ο οποίος σχετιζόταν με την περιστροφή της Γης. Η αναζήτηση αυτού του παράγοντα συνεχίστηκε μέχρι τα μέσα του 20ού αιώνα, οπότε και τέθηκαν τα θεμέλια της χρονοβιολογίας, μιας επιστήμης που μελετά τα περιοδικά βιολογικά φαινόμενα των έμβιων όντων, σε σχέση με τους ηλιακούς και σεληνιακούς κύκλους [1, p. 1]. Τα επόμενα τριάντα χρόνια, εκτενής ερευνητική εργασία επιβεβαίωσε το μοντέλο ενδογενούς/εξωγενούς ρυθμού και την παρουσία του σε πλήθος μορφών ζωής, μεταξύ των

οποίων και οι άνθρωποι ([22], [23], [24], [25], [26]). Ωστόσο, η σημασία του φωτός ως ρυθμιστικού παράγοντα για τον άνθρωπο αμφισβητήθηκε μέχρι τη μελέτη του Czeisler (1981), η οποία απέδειξε ότι υψηλής έντασης φως, σε συνδυασμό με απόλυτο σκοτάδι κατά τις σκοτεινές περιόδους της ημέρας, μπορεί να λειτουργήσει ως ισχυρό ερέθισμα καθορισμού της φάσης [27]. Έκτοτε, πολυάριθμες μελέτες κατέδειξαν ότι η έκθεση στο φως αποτελεί τον κυρίαρχο εξωγενή παράγοντα για τη ρύθμιση του κιρκάδιου συστήματος στον άνθρωπο [28].

Η επίδραση αυτή του φωτός στον κιρκάδιο ρυθμό και τον ύπνο έχει επιβεβαιωθεί και σε πρόσφατες μελέτες, όπως αυτή των Cajochen, Chellappa και Schmidt (2019), οι οποίοι αναδεικνύουν ότι ο τύπος, η διάρκεια και η χρονική στιγμή της έκθεσης στο φως επηρεάζουν δραστικά τη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού. Συγκεκριμένα, τονίζεται πως η έκθεση σε έντονο, μικρού μήκους κύματος φως (μπλε φως) κατά τις πρωινές ώρες ενισχύει τη γνωστική απόδοση και τη διάθεση, ενώ η ίδια έκθεση κατά τις βραδινές ώρες μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές στον ύπνο μέσω καταστολής της μελατονίνης και καθυστέρησης της έναρξης του ύπνου. Η μελέτη αυτή επιβεβαιώνει ότι το φως δεν είναι μόνο απλώς ένας εξωγενής ρυθμιστικός παράγοντας, αλλά ένας ισχυρός διαμορφωτής της συνολικής φυσιολογίας και ψυχολογίας του ανθρώπου.

Η κυριότερη λειτουργία του κύκλου φωτός/σκότους είναι να ευθυγραμμίζει τον ενδογενή κιρκάδιο ρυθμό με το εικοσιτετράωρο του περιβάλλοντος. Εάν αυτός ο συγχρονισμός διαταραχθεί, για παράδειγμα με έκθεση στο φως κατά τη διάρκεια της νύχτας, προκαλείται μετατόπιση φάσης, της οποίας το μέγεθος εξαρτάται από την ώρα έκθεσης στο φως [5, pp. 93-95].

2 Φωτισμός

2.1 Εισαγωγή

Η ζωή στη Γη είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την παρουσία του ηλιακού φωτός. Το φυσικό φως, το οποίο αποτελούσε την κυρίαρχη πηγή φωτισμού για τον άνθρωπο επί χιλιάδες χρόνια, θεωρείται έως σήμερα ο πλέον κατάλληλος τύπος φωτισμού για τις ανθρώπινες ανάγκες [29]. Με τον όρο φυσικό φως ή φως της ημέρας, νοείται το άθροισμα του φωτός που προέρχεται από τον ήλιο όσο και από τον ουρανό (περιλαμβάνει δηλαδή το άμεσο ηλιακό φως, το διαχεόμενο φως της ατμόσφαιρας και το ανακλώμενο φως από το έδαφος, τη θάλασσα, τα δάση, τη γεωμορφολογία και τις αστικές κατασκευές).

Στους εξωτερικούς χώρους η ένταση του φωτός είναι πολύ μεγαλύτερη από την ένταση φυσικού ή τεχνητού φωτός που παρατηρείται σε εσωτερικούς χώρους [1, p. 47].

Ο ανθρώπινος οργανισμός είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί και να συγχρονίζεται με τον ρυθμό των μεταβολών του φυσικού φωτός της ημέρας. Η φυσιολογία του απαιτεί έκθεση στο φυσικό φως κατά τη διάρκεια της ημέρας και απόλυτο σκοτάδι τη νύχτα, ώστε να υποστηρίζεται ο ύπνος και οι αναγεννητικοί του κύκλοι, οι οποίοι διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στην υγεία, την ψυχοσωματική ισορροπία και τη γενικότερη ευημερία του ατόμου. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η έκθεση στο φυσικό φως αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ενίσχυση της ανθρώπινης υγείας και ευζωίας [30].

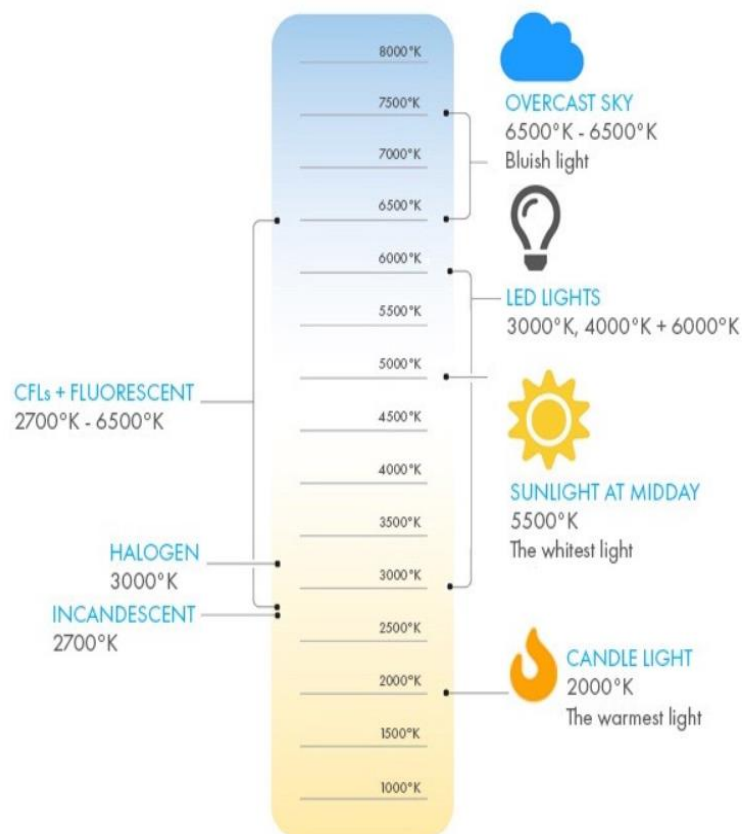
Ωστόσο, μέσα σε λίγες μόλις γενιές, οι ρυθμοί και οι συνθήκες ζωής άλλαξαν ριζικά, κυρίως ως αποτέλεσμα της δεύτερης φάσης της Βιομηχανικής Επανάστασης, κατά το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίστηκε από ραγδαίες καινοτομίες, τεχνολογικές εφευρέσεις και ανακαλύψεις, με σημαντικότερη ίσως την αξιοποίηση του ηλεκτρισμού, η οποία οδήγησε στη δημιουργία και ευρεία χρήση του τεχνητού φωτισμού.

Ενώ δεν θα πρέπει να παραληφθεί ότι τα τελευταία περίπου εκατόν πενήντα χρόνια, οι ανθρώπινες δραστηριότητες συγκεντρώθηκαν σταδιακά στις πόλεις. Η εργασία, που παλιότερα διεξαγόταν κυρίως σε εξωτερικούς, υπαίθριους χώρους, σήμερα εκτελείται σχεδόν αποκλειστικά σε εσωτερικά περιβάλλοντα, τα οποία φωτίζονται τεχνητά και διαθέτουν περιορισμένη πρόσβαση σε φυσικό φως.

Επομένως, τα κρίσιμα ερωτήματα που προκύπτουν πλέον στον σχεδιασμό φωτισμού με βάση τα παραπάνω δεδομένα αφορούν την ελάχιστη ή μέγιστη απαιτούμενη έκθεση σε φυσικό φως για τον άνθρωπο και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί ο τεχνητός φωτισμός να αντισταθμίσει την έλλειψη φυσικού φωτός στο σύγχρονο αστικό περιβάλλον [1, pp. 4-6].

2.2 Θερμοκρασία χρώματος

Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και για μια ευρεία ποικιλία ανθρώπινων δραστηριοτήτων απαιτούνται επαρκή επίπεδα φυσικού και τεχνητού φωτισμού. Ένα από τα χαρακτηριστικά του φωτισμού, φυσικού και τεχνητού, είναι η θερμοκρασία χρώματος. Η θερμοκρασία χρώματος αναφέρεται στην απόχρωση του φωτός και περιγράφει το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή. Η μονάδα μέτρησής της είναι οι βαθμοί Kelvin (K). Με βάση τη θερμοκρασία χρώματος το χρώμα του φωτός χαρακτηρίζεται ως "θερμό" ή "ψυχρό" ανάλογα με το αν η φωτεινή πηγή είναι πιο κοντά στο κόκκινο ή στο μπλε χρώμα αντίστοιχα.



Εικόνα 4 Κλίμακα θερμοκρασίας χρώματος φυσικού φωτισμού και φωτός από διάφορες πηγές φωτισμού [90].

Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο ψυχρότερη είναι η απόχρωση της φωτεινής πηγής. Συγκεκριμένα:

- Θερμοκρασίες χρώματος, άνω των 5300 K, αντιστοιχούν σε ψυχρές αποχρώσεις. Το φως τότε θεωρείται κρύο και πλησιάζει το μπλε και το λευκό.
- Θερμοκρασίες χρώματος κάτω από τους 3300 K αντιστοιχούν σε θερμές αποχρώσεις. Το φως τότε θεωρείται ζεστό και πλησιάζει χρωματικά το κόκκινο και το πορτοκαλί.

Επίσης, η ψυχρή απόχρωση παράγει υψηλότερη ένταση φωτός από τη θερμή απόχρωση [2, pp. 30-31].

Στο σχεδιασμό φωτισμού, για την ακριβή περιγραφή του χρωματικού τόνου μιας λευκής πηγής φωτός, χρησιμοποιείται ο όρος συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (Correlated Color Temperature - CCT). Ως CCT ορίζεται η θερμοκρασία ενός ιδανικού μέλανος σώματος, το οποίο παράγει φασματική εκπομπή με χρωματικά χαρακτηριστικά παρόμοια με εκείνα της υπό εξέταση πηγής [1, p. 63].

2.3 Μη οπτικά αποτελέσματα φωτός

Η επιστημονική έρευνα έχει καταλήξει ότι το φως επηρεάζει πολλές πτυχές της ανθρώπινης φυσιολογίας πέρα από την όραση. Διαθέτει σημαντική βιολογική επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό, επηρεάζοντας παραμέτρους όπως η θερμοκρασία σώματος, η έκκριση ορμονών, η μετατόπιση του κιρκάδιου ρυθμού, καθώς και την ανθρώπινη ψυχολογία, επιδρώντας στην απόδοση, στη διάθεση και στην αίσθηση ευημερίας.

Αυτές οι επιδράσεις, γνωστές ως μη οπτικές (non-image-forming, NIF), αν και μεταδίδονται μέσω του οφθαλμού, δεν συνδέονται με την οπτική αντίληψη, ούτε σχετίζονται με φαινόμενα όπως η παραγωγή βιταμίνης D ή δερματικές επιδράσεις (π.χ. καρκίνος του δέρματος). Εξαρτώνται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- την φασματική κατανομή ισχύος του φωτός,
- την χωρική κατανομή του στο περιβάλλον,
- τον χρονισμό και η διάρκεια της έκθεσης
- αλλά και εσωτερικές παραμέτρους του οργανισμού, όπως την κιρκάδια φάση του κάθε ατόμου και το ιστορικό έκθεσής του στο φως.

Σύμφωνα με τον Boyce, η παρουσία χρονικών ενδείξεων, ιδιαίτερα ενός κύκλου φωτός/σκότους, είναι απαραίτητη όχι μόνο για την ευθυγράμμιση του κιρκάδιου χρονισμού, αλλά και για τη σηματοδότηση των εποχιακών αλλαγών. Το γεωγραφικό πλάτος επηρεάζει τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της νύχτας, τόσο αυξάνεται ο χρόνος έκκρισης της μελατονίνης. Ωστόσο, η χρήση του ηλεκτρικού φωτισμού έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει και να τροποποιήσει αυτή την εποχιακή ρύθμιση.

Σύμφωνα με τους Wehr et al (1995), οι άνθρωποι που ζουν σε σύγχρονα αστικά περιβάλλοντα εύκρατων περιοχών, δεν παρουσιάζουν σημαντικές εποχιακές διακυμάνσεις στην έκκριση μελατονίνης [31]. Το στοιχείο αυτό υποδηλώνει ότι η συνεχής χρήση τεχνητού φωτισμού από τις βραδινές έως τις πρώτες πρωινές ώρες ενδέχεται να αναστέλλει την έκκριση μελατονίνης, καταργώντας την εποχιακή διακύμανση [32], [5, pp. 97-98].

Βιβλιογραφικά αναφέρεται ότι το μπλε φως:

- αυξάνει τον κιρκάδιο ρυθμό. Η έκθεση στο φως προκαλεί ταχείες αποκρίσεις, για παράδειγμα αντανάκλαστική συστολή της κόρης και μεταβολή της εγκεφαλικής δραστηριότητας για απειροελάχιστη διάρκεια χιλιοστών του δευτερολέπτου έως λίγα δευτερόλεπτα. Αντίθετα, χωρίς την παρουσία φωτός το βιολογικό ρολόι αποσυγχρονίζεται, γεγονός που συνδέεται με μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στη φυσιολογική λειτουργία, την νευροσυμπεριφορική απόδοση και τον ύπνο. Μακροπρόθεσμα, η παρατεταμένη διαταραχή του κιρκάδιου ρυθμού αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης καρδιαγγειακών παθήσεων, διαβήτη και ορισμένων μορφών καρκίνου [33, p. 30].
- βελτιώνει την εγρήγορση. Έχει βρεθεί ότι μεγαλύτερο μη οπτικό αποτέλεσμα προκύπτει όταν το φως έχει μήκος κύματος περίπου 480nm, δηλαδή στην περιοχή του μπλε φωτός. Το μπλε λευκό φως της ημέρας σε συνδυασμό με υψηλή φωτεινότητα διεγείρει τους υποδοχείς στον αμφιβληστροειδή, αλλά και το κέντρο ελέγχου του εγκεφάλου δρώντας διεγερτικά και ευεργετικά ως προς τη συγκέντρωση.
- ανακουφίζει την εποχική και μη εποχική κατάθλιψη. Ένας ζεστός» φωτισμός (< 3300 K) ή ένας φωτισμός με χαμηλά και ομοιόμορφα επίπεδα φωτός που εστιάζει σε επιλεγμένες περιοχές ενός χώρου προκαλεί αισθήματα άνεσης, αυξημένη ευχαρίστηση και μειωμένη ένταση, συμβάλλοντας θετικά στη συνολική αντίληψη του χώρου. Αντίθετα, έντονες αντιθέσεις φωτισμού και απότομες εναλλαγές φωτεινών και σκοτεινών περιοχών μπορεί να προκαλέσουν υπερένταση ή δυσφορία [13, pp. 91-92].
- επηρεάζει τη θερμορύθμιση και το φάσμα του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (EEG) [5, pp. 100-101].

2.4 Ορμόνες

2.4.1 Βασικές ορμόνες

Σημαντική είναι η συμβολή του φωτός στη ρύθμιση της έκκρισης ορμονών, η οποία αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μη οπτικές επιδράσεις του. Στη διάρκεια της ημέρας, βάσει του κιρκάδιου ρυθμού παράγονται οι ακόλουθες βασικές ορμόνες:

- ντοπαμίνη,
- σεροτονίνη,
- μελατονίνη,

- κορτιζόλη.

Οι ορμόνες ρυθμίζουν την πέψη της τροφής, την αντίδραση του οργανισμού σε συνθήκες πίεσης και άγχους και την επιβράδυνση των λειτουργιών κατά τη διάρκεια του ύπνου. Η ντοπαμίνη βοηθάει στην κίνηση, καθώς ευθύνεται για το συντονισμό των μυών. Συμβάλλει στον έλεγχο της διάθεσης και του στρες και φέρνει ευχαρίστηση. Η σεροτονίνη δρα ως φυσικό αντικαταθλιπτικό, ως αγγελιοφόρος που ανεβάζει και σταθεροποιεί τη διάθεση.

2.4.2 Κιρκάδια διακύμανση μελατονίνης

Η μελατονίνη παράγεται από τον ανθρώπινο εγκέφαλο κατά τη διάρκεια του σκοταδιού και προετοιμάζει τον οργανισμό για ανάπαυση. Προκαλεί υπνηλία, επιβραδύνει τις σωματικές λειτουργίες, φέρνει χαλάρωση και διευκολύνει τον ύπνο. Η καταστολή ή η απουσία της μελατονίνης διατηρεί τον οργανισμό σε εγρήγορση και τον καθιστά έτοιμο να εργαστεί τόσο σωματικά όσο και πνευματικά. Η μελατονίνη ρυθμίζει την ενεργοποίηση πολλών άλλων φυσιολογικών λειτουργιών, στις κατάλληλες χρονικές στιγμές του κιρκάδιου κύκλου [34]. Φυσιολογικά, η συγκέντρωση της μελατονίνης αυξάνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας και μειώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, το επίπεδο παραγωγής της αρχίζει να μειώνεται προς το τέλος της νύχτας, ακόμη και με απουσία φωτός. Η μελατονίνη μεγιστοποιείται στο σκοτάδι, δηλαδή από τις 00:00 έως τις 04:00 και ελαχιστοποιείται από τις 12:00 έως τις 20:00. Επίσης, είναι διαφορετική για κάθε άνθρωπο, καθώς επηρεάζεται από την ηλικία και το φύλο. Το επίπεδο μελατονίνης είναι ο κύριος δείκτης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του κιρκάδιου συγχρονισμού ενός ατόμου, αλλά δεν είναι το μόνο στοιχείο που καθορίζει τον κιρκάδιο ρυθμό.

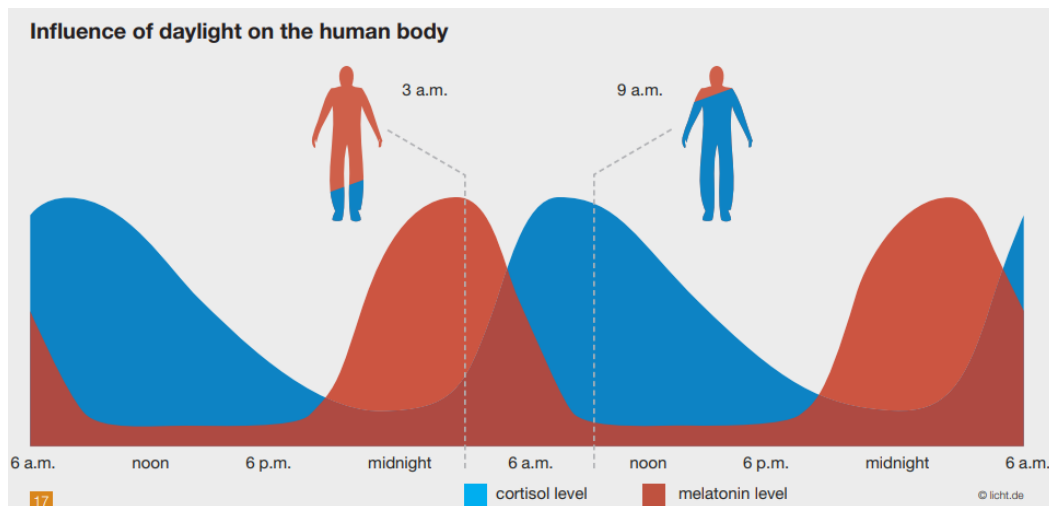
Μια πολύ σημαντική πτυχή του ανθρώπινου κιρκάδιου ρυθμού είναι το γεγονός ότι ο κύκλος της μελατονίνης μπορεί να μετατοπιστεί ή να επηρεαστεί από το χρονοδιάγραμμα, λόγω φωτεινών ερεθισμάτων, αλλά δεν επηρεάζεται από την ώρα που κάποιος πέφτει για ύπνο ή από την ώρα που αναγκάζεται να ξυπνήσει [35], [36]. Αυτός είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο όλοι οι άνθρωποι που πάσχουν από καθυστερημένο κιρκάδιο ρυθμό (σύνδρομο της κουκουβάγιας) και εξακολουθούν να έχουν υψηλά επίπεδα μελατονίνης το πρωί, παρουσιάζουν γνωστικές και κινητικές δυσκολίες αν αναγκαστούν να ξυπνήσουν πριν από τη φυσική πτώση της. Όταν συμβαίνει αυτό για κοινωνικούς, σπουδαστικούς ή εργασιακούς λόγους, τα άτομα αυτά που ξυπνούν σε διαφορετική ώρα από το βιολογικό τους ρολόι θα πρέπει να παραμένουν σε κατάσταση λήθαργου μέχρι τα επίπεδα μελατονίνης τους να πέσουν στα επίπεδα της ημέρας. Η έκθεση σε επαρκές φως στη φάση αφύπνισης ή αργότερα στο φυσικό φως επιταχύνει την ελάττωση των επιπέδων μελατονίνης στο αίμα. Το τεχνητό φως, εάν επαναλαμβάνεται για αρκετές ημέρες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να «διορθώσει» με τον κατάλληλο τρόπο τον κιρκάδιο κύκλο σε σχέση με το πρόγραμμα δραστηριότητας και ανάπαυσης που αναμένεται κατά τη διάρκεια της περιόδου και στο συγκεκριμένο κοινωνικό πλαίσιο [1, pp. 44-46].

2.4.3 Κιρκάδια διακύμανση κορτιζόλης

Η κορτιζόλη είναι μια ορμόνη απόκρισης στο στρες, που παράγεται περίπου από τις τρεις το πρωί και μετά. Διεγείρει το μεταβολισμό και προγραμματίζει το σώμα για τη λειτουργία της ημέρας. Προάγει τον μεταβολισμό των λιπών, των πρωτεϊνών, των υδατανθράκων, συμβάλλει στην αύξηση του διαθέσιμου σακχάρου στο αίμα και επομένως της διαθέσιμης ενέργειας στους μυς. Η κορτιζόλη παράγεται από τα επινεφρίδια κατόπιν διέγερσης της υπόφυσης, η οποία διεγείρεται από τον υποθάλαμο. Η μέγιστη συγκέντρωση κορτιζόλης εμφανίζεται κατά την ώρα της αφύπνισης και μειώνεται αργά μέχρι να φτάσει στην ελάχιστη τιμή της τη νύχτα. Το πρώτο φως της ημέρας διεγείρει τα ipRGCs στο μάτι και καταστέλλει την παραγωγή μελατονίνης στην υπόφυση. Ενώ το επίπεδο της κορτιζόλης στο αίμα ελαττώνεται καθώς προχωρά η ημέρα, το αντίθετο συμβαίνει με τη μελατονίνη. Όταν το φως της ημέρας εξασθενεί, το εσωτερικό ρολόι μεταπίπτει σε νυχτερινή λειτουργία [4, p. 17].

2.4.4 Σύγκριση έκκρισης μελατονίνης και κορτιζόλης

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η έκκριση της κορτιζόλης είναι, στην πράξη, αντίθετη από εκείνη της μελατονίνης. Η μελατονίνη εκκρίνεται για να προετοιμάσει τον ανθρώπινο οργανισμό για ύπνο και ανάπαυση, ενώ η κορτιζόλη τον προετοιμάζει για εγρήγορση και δραστηριότητα. Ωστόσο, όταν η κορτιζόλη παραμένει σε υψηλά επίπεδα για πολύ καιρό, το σώμα τείνει να χάνει την αποδοτικότητα και την ενέργειά του, με αποτέλεσμα να εξαντλείται. Αν και η κορτιζόλη έχει αυτή την αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τη μελατονίνη, δύο κλινικές μελέτες έχουν δείξει ότι η πρωινή παραγωγή κορτιζόλης σχετίζεται περισσότερο με την ώρα αφύπνισης και λιγότερο με το βιολογικό ρολόι που ρυθμίζεται από τον υπερκείμενικό πυρήνα ([37], [38]).



Εικόνα 5 Επίδραση του φυσικού φωτός στα επίπεδα κορτιζόλης και μελατονίνης στον ανθρώπινο οργανισμό [4].

2.5 Φωτισμός για οπτικά αποτελέσματα

Ο σχεδιασμός φωτισμού σε έναν χώρο επικεντρώνεται στην επίτευξη της οπτικής άνεσης, στη διατήρηση των απαραίτητων επιπέδων φωτισμού, στην απόδοση των χρωμάτων, στη μείωση της θάμβωσης και των σκιών, στην ασφάλεια, στην εμφάνιση του χώρου κ.λπ. Ο φωτισμός των επιφανειών εργασίας μπορεί να παρέχει την απαραίτητη ποσότητα φωτισμού στους χώρους συνολικά, χωρίς να φωτίζονται υπερβολικά οι περιμετρικοί/βοηθητικοί χώροι. Η σύζευξη ενός ρυθμιζόμενου άμεσου φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας και ενός έμμεσου ή διάχυτου φωτισμού, χαμηλότερης έντασης στις περιοχές που περιβάλλουν την επιφάνεια εργασίας, επιτρέπει την ευκολότερη οπτική προσαρμογή του χρήστη, την αύξηση της οπτικής οξύτητάς του και παρέχει ταυτόχρονα έναν κατάλληλο φωτισμό υποβάθρου. Οι απαιτήσεις φωτισμού για τις επιφάνειες εργασίας και του περιβάλλοντος φωτισμού, τα συνολικά δηλαδή οπτικά αποτελέσματα ενός χώρου, καθορίζονται από πρότυπα (EN 12464-1,2 [39], [40]) και τεχνικές οδηγίες (T.O.T.E.E., CIE) [13, pp. 91-92].

2.6 Φωτισμός για μη οπτικά αποτελέσματα

Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 εμφανίζονται νέες λύσεις στον τομέα του φωτισμού, οι οποίες αξιοποιούν τα σύγχρονα επιστημονικά δεδομένα σχετικά με τις μη οπτικές επιδράσεις του φωτός στον ανθρώπινο οργανισμό. Ο σχεδιασμός φωτισμού που βασίζεται στο κirkάδιο σύστημα διαφέρει αρκετά από τον παραδοσιακό αρχιτεκτονικό φωτισμό, ο οποίος επικεντρωνόταν κυρίως στην επίτευξη της οπτικής άνεσης (visual effect). Πλέον, ο σχεδιασμός φωτισμού οφείλει να ενσωματώνει και τις μη οπτικές επιδράσεις (non-visual effects), όπως την κirkάδια ρύθμιση και την εγρήγορση. Αυτό συνεπάγεται την υιοθέτηση νέων σχεδιαστικών στόχων και μετρήσεων, διαφορετικών από εκείνες που

χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά από τους σχεδιαστές φωτισμού. Παράλληλα, η διεύρυνση των εφαρμογών του φωτισμού, ειδικά σε εργασιακούς χώρους, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη του δυναμικού φωτισμού και στην υιοθέτηση νέων κιρκάδιων μετρικών.

Σε οποιοδήποτε περιβάλλον (εξωτερικό, οικιακό, μαθησιακό ή εργασιακό), η επάρκεια φωτισμού αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ποιότητα ζωής. Στο σύγχρονο αστικό περιβάλλον, οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο μέρος της καθημερινότητάς τους σε κλειστούς, εσωτερικούς χώρους, συχνά με ανεπαρκή φυσικό φωτισμό, ιδιαίτερα σε εργασιακά περιβάλλοντα που στερούνται φυσικών ανοιγμάτων. Η εκτεταμένη χρήση τεχνητού φωτισμού έχει υποκαταστήσει σε μεγάλο βαθμό το φυσικό φως υψηλής έντασης κατά τη διάρκεια της ημέρας, επεκτείνοντας παράλληλα τις ώρες δραστηριότητας και εργασίας κατά τη νύχτα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα επίπεδα φωτισμού σε εσωτερικούς χώρους είναι αισθητά χαμηλότερα από εκείνα του εξωτερικού φυσικού φωτισμού, ενώ τις βραδινές ώρες είναι σημαντικά υψηλότερα από τα αντίστοιχα φυσικά επίπεδα φωτισμού. Κατ' επέκταση, ο σύγχρονος τρόπος ζωής χαρακτηρίζεται από περιορισμένη έκθεση στο φυσικό δυναμικό φως και αυξημένη έκθεση σε τεχνητό φωτισμό. Συνεπώς, τα ερεθίσματα που λαμβάνει το κιρκάδιο σύστημα προέρχονται κυρίως ή αποκλειστικά από τεχνητές πηγές φωτός. Ωστόσο, τα επίπεδα φωτισμού των 500 lx, που συστήνονται για τους εργασιακούς χώρους, είναι ανεπαρκή για τη διέγερση του κιρκάδιου συστήματος. Δεδομένου λοιπόν ότι μεγάλο μέρος του χρόνου οι άνθρωποι παραμένουν εκτεθειμένοι σε τεχνητό φωτισμό χαμηλής έντασης, θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι ζουν σε συνθήκες «βιολογικού σκοταδιού».

Ένα άρθρο που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Nature αναφέρει τη δραματική αύξηση της συχνότητας εμφάνισης μυωπίας σε παιδιά και ενήλικες τα τελευταία εξήντα χρόνια ως αποτέλεσμα της ανεπαρκούς έκθεσης σε έντονο φως. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στην Ανατολική Ασία, όπου σε αυτό το διάστημα, από 10-20%, πλέον το 90% των έφηβων και των νεαρών ενηλίκων πάσχει. Οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ευρώπη ακολουθούν. Το να περνάει κάποιος και ιδιαίτερα ένα παιδί πολύ χρόνο σε κλειστούς χώρους θεωρείται πλέον παράγοντας κινδύνου ανάπτυξης μυωπίας [41].

Η ένταση του φυσικού φωτός παρουσιάζει αξιοσημείωτη διακύμανση ανάλογα με γεωγραφικούς παράγοντες, καιρικές συνθήκες, εποχές και την ώρα της ημέρας. Ενδεικτικά, μια ηλιόλουστη ημέρα παρέχει επίπεδα φωτισμού της τάξης των 10000 lx. Στην Κεντρική Ευρώπη, για παράδειγμα, οι εσωτερικοί χώροι μπορούν να φωτίζονται φυσικά κατά το διάστημα από τις 8:00 έως τις 17:00, ενώ ακόμη και κατά τη διάρκεια μιας συννεφιασμένης ημέρας, η ένταση του εξωτερικού φωτός είναι κατά πολύ υψηλότερη από την αντίστοιχη τεχνητή σε εσωτερικούς χώρους. Συγκεκριμένα, κοντά στα παράθυρα η ένταση φωτισμού μπορεί να φτάνει τα 1000 lx, ενώ στα σημεία που βρίσκονται μακριά από αυτά μπορεί να κυμαίνεται μόλις μεταξύ 250 - 500 lx. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ωστόσο, το φυσικό φως δεν εισέρχεται επαρκώς στο βάθος των κτιρίων.

Εξαιτίας τεχνικών περιορισμών και αναγκών εξοικονόμησης ενέργειας, ο τεχνητός φωτισμός δεν είναι εφικτό να προσομοιώσει πλήρως το φυσικό φως. Παρά ταύτα, μπορεί να προσφέρει πολύτιμη υποστήριξη. Έρευνες υποστηρίζουν ότι ο φωτισμός με ένταση 500 έως 1500 lx μπορεί να επιφέρει σημαντικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό εντός εργασιακών χώρων [4, p. 19]. Επίσης, καθοριστικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία χρώματος, η οποία θα πρέπει κατά τη διάρκεια της ημέρας να προσεγγίζει το φυσικό φως, δηλαδή μπλε/λευκό μέχρι το μεσημέρι, ενώ το βράδυ να μεταβάλλεται προς θερμότερους τόνους. Ως εκ τούτου, ο τεχνητός φωτισμός θα πρέπει να είναι δυναμικός, προσαρμοσμένος κατάλληλα, τόσο ως προς την ένταση όσο και ως προς τη θερμοκρασία χρώματος, προσομοιώνοντας τις μεταβολές του φυσικού φωτισμού (Φ.Φ.). Επομένως, αφού η ένταση, το φάσμα, η συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος και η κατεύθυνση του φυσικού φωτός, μεταβάλλονται διαρκώς καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, είναι απαραίτητο ο τεχνητός φωτισμός να ακολουθεί ανάλογη διαδρομή [13, p. 93].

3 Ανθρωποκεντρικός φωτισμός

3.1 Εισαγωγή

Ο Ανθρωποκεντρικός Φωτισμός (Α.Φ.) ή Human Centric Lighting (HCL) αποτελεί μία ολοκληρωμένη προσέγγιση στον σχεδιασμό φωτισμού, η οποία συνδυάζει τόσο τα οπτικά όσο και τα μη οπτικά αποτελέσματα του φωτός στον άνθρωπο. Η εφαρμογή των αρχών του Α.Φ. καθιστά κρίσιμες παραμέτρους όπως το φάσμα της ακτινοβολίας, τη συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος και την ένταση φωτισμού, σε συνδυασμό με τη φύση του χώρου και την ανθρώπινη αντίληψη, σε καθοριστικά στοιχεία του σχεδιασμού. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η οπτική άνεση, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η βελτίωση της βιολογικής λειτουργίας του ανθρώπου. Ο Ανθρωποκεντρικός Φωτισμός στοχεύει στη χορήγηση του κατάλληλου φωτισμού την κατάλληλη στιγμή, παρέχοντας συγκεκριμένες εντάσεις και φασματικά χαρακτηριστικά (τα οποία γίνονται αντιληπτά ως χρώμα από το ανθρώπινο μάτι), ανταποκρινόμενος στις εξατομικευμένες ανάγκες τόσο της καθημερινής διαβίωσης όσο και της εργασίας. Δεδομένου ότι το φως επηρεάζει τον άνθρωπο σε οπτικό, συναισθηματικό και βιολογικό επίπεδο, ο Α.Φ. επιδιώκει μακροπρόθεσμα τη θετική επίδραση στην υγεία, την ευεξία και την παραγωγικότητα μέσω ενός ολοκληρωμένου και ολιστικού σχεδιασμού [13, p. 92].



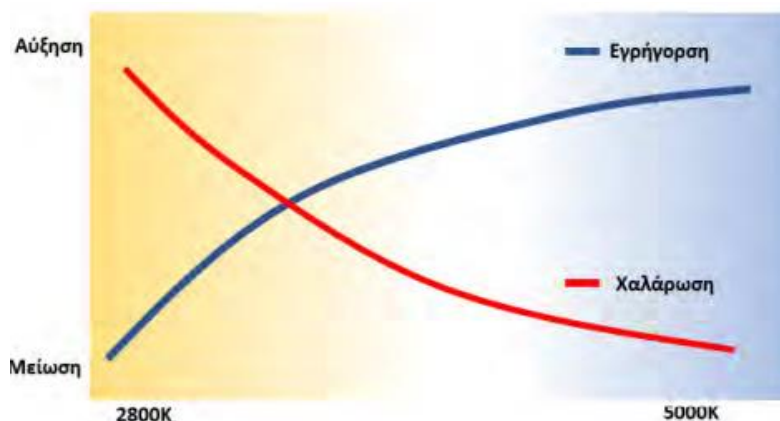
Εικόνα 6 Σύνολο των παραμέτρων για έναν πετυχημένο ανθρωποκεντρικό φωτισμό [13].

Η ενσωμάτωση των αρχών του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού πρέπει να γίνεται από τα πρώιμα στάδια του σχεδιασμού, διαμορφώνοντας έτσι μια ισχυρή βάση για έναν ολιστικό και διεπιστημονικό σχεδιασμό. Το φυσικό φως της ημέρας πρέπει να αξιοποιείται πλήρως, όπου είναι εφικτό. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η ενημέρωση και η εκπαίδευση των χρηστών, ώστε να κατανοήσουν τα οφέλη του συστήματος φωτισμού και να μπορούν να το διαχειρίζονται αποτελεσματικά.

Το φως έχει διαφορετική επίδραση στον άνθρωπο κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Επομένως, το σχέδιο του φωτισμού θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτή την ημερήσια διακύμανση φωτός και να προσφέρει επιλογές για την προσαρμογή του φωτισμού. Επιπλέον, τα σχέδια φωτισμού επηρεάζουν άμεσα την αντίληψη του χώρου, καθώς η εικόνα του δωματίου μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη μετάβαση από το φυσικό στο τεχνητό φως. Ωστόσο, είναι απαραίτητο η ταυτότητα και ο χαρακτήρας του χώρου να διατηρούνται αναλλοίωτα.

Τέλος, δεδομένου ότι το φως έχει βιολογικό αντίκτυπο, ο σχεδιασμός φωτισμού θα πρέπει να ανταποκρίνεται στις ημερήσιες ανάγκες του ανθρώπινου οργανισμού. Κατά τη διάρκεια της ημέρας απαιτείται φωτισμός με διεγερτική δράση, ενώ κατά τις βραδινές ώρες αυτός πρέπει να αποφεύγεται, ώστε να σταθεροποιείται ο κιρκάδιος ρυθμός. Επομένως, ο φωτισμός είναι αναγκαίο να επιτρέπει μια δυναμική μετάβαση μεταξύ πολλαπλών σεναρίων φωτισμού, από το πρωί, κατά τη διάρκεια της ημέρας, έως το βράδυ και τη νύχτα. Σε πολλές

περιπτώσεις, υιοθετείται η προσέγγιση του έντονου φωτισμού, παρόμοιου με το φυσικό φως, κατά τη διάρκεια της ημέρας και θερμότερου λευκού φωτισμού, με χαμηλότερα επίπεδα έντασης το βράδυ. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις όπου ισχύουν ειδικές συνθήκες και ο φωτισμός λειτουργεί με βάση άλλες προϋποθέσεις. Μια τέτοια περίπτωση είναι ο φωτισμός χώρων όπου εκτελείται εργασία σε βάρδιες κατά τη νύχτα [41, p. 5].

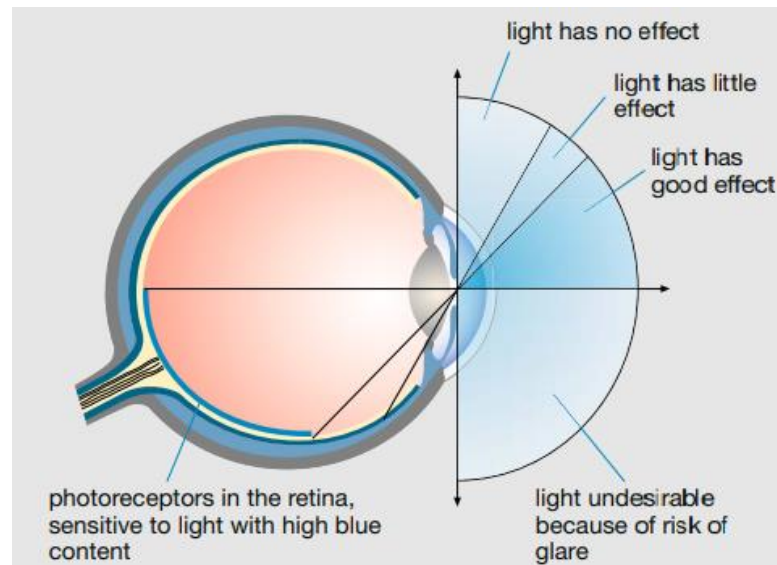


Εικόνα 7 Μια φωτεινή πηγή με θερμοκρασία χρώματος 2800 K δημιουργεί συνθήκες χαλάρωσης, ενώ αντίστοιχα με 5000 K αυξάνει την εγρήγορση [13].

3.2 Παράμετροι σχεδιασμού ανθρωποκεντρικού φωτισμού

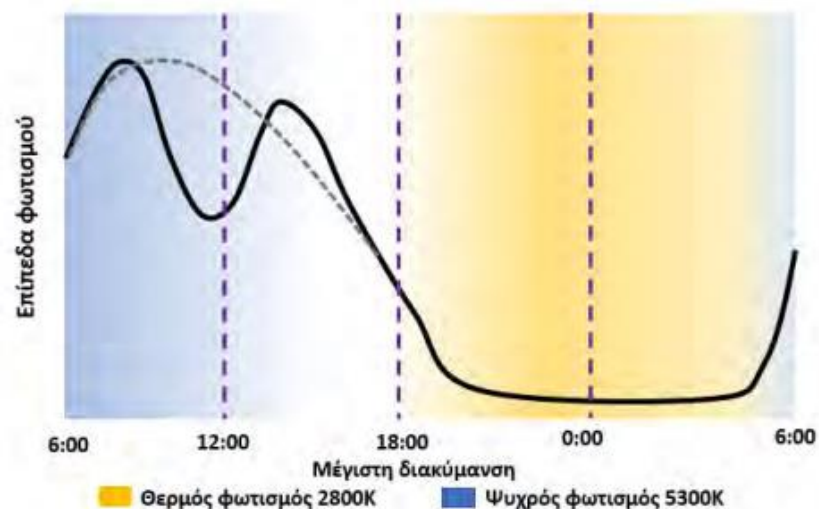
Για να επιτευχθεί ένας αποτελεσματικός Ανθρωποκεντρικός Φωτισμός, στα πλαίσια της βιολογικής του επίδρασης, ο μελετητής φωτισμού θα πρέπει να λάβει υπόψη του στο σχεδιασμό τις εξής παραμέτρους:

- Η επίτευξη του επιθυμητού βιολογικού ερεθίσματος για τους χρήστες μπορεί να γίνει μέσω της προσαρμογής του φωτισμού σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα, ακόμη και με χρήση υψηλότερων επιπέδων φωτεινότητας, χωρίς απαραίτητα με χρήση ψυχρής θερμοκρασίας χρώματος. Για παράδειγμα, η ρύθμιση ενός φωτιστικού σώματος σε θερμοκρασία χρώματος 3000 K με αυξημένη φωτεινή ισχύ κατά τις πρωινές ώρες, μπορεί να προσφέρει τα ίδια αποτελέσματα με την έκθεση σε 5000 K.
- Η διάχυση του φωτισμού αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Όπου είναι εφικτό, ο φωτισμός πρέπει να διαχέεται ομοιόμορφα μέσω μεγάλων επιφανειών φωτισμού, όπως τα πάνελ. Φωτιστικά που με μεγάλες, επίπεδες επιφάνειες, μπορούν να δημιουργήσουν φωτεινές οροφές ή άλλα, κρεμαστά φωτιστικά, που διαχέουν μέρος του φωτός προς την οροφή (μέχρι 30%) και/ή προς το πάνω μέρος των τοίχων (στο άνω 1/3 του ύψους από το δάπεδο) αποτελούν συνηθισμένες προτιμήσεις. Επίσης, φωτιστικά που προκαλούν το φαινόμενο του wallwash μπορούν να ενσωματωθούν με αποτελεσματικό τρόπο στον σχεδιασμό του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού.
- Η κατεύθυνση του φωτισμού έχει καθοριστική σημασία. Είναι απαραίτητο ο φωτισμός να διαχέεται έτσι ώστε να εισέρχεται στο μάτι από ψηλά και μπροστά, προσομοιάζοντας έτσι το φυσικό φως, ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη πρόσπτωση στους κατάλληλους υποδοχείς στο εσωτερικό του ματιού. Κατά τον σχεδιασμό του φωτισμού και την επιλογή των φωτιστικών σωμάτων, πρέπει να συνυπολογίζεται και ο κάθετος φωτισμός μαζί με τον οριζόντιο, καθώς επηρεάζει την πρόσληψη από το ανθρώπινο μάτι. Η καθορισμένη κυλινδρική ένταση φωτισμού συμβάλλει στην επίτευξη αυτού του στόχου [39].



Εικόνα 8 Αντίκτυπο της κατεύθυνσης που πέφτει το φως στο μάτι [4].

- Κατά τις πρωινές ώρες, ενδείκνυται η επιλογή μιας πηγής φωτός με θερμοκρασία χρώματος παρόμοια με αυτή του φυσικού φωτισμού, συμπεριλαμβανομένου ενός φάσματος με βιολογικά αποδοτικό μπλε φως. Αν και η ακριβής απόδοση της δυναμικής του φυσικού φωτισμού με τον τεχνητό φωτισμό είναι δύσκολο να επιτευχθεί, ένας δυναμικός τεχνητός φωτισμός που αντικατοπτρίζει το φυσικό φως συμβάλλει σημαντικά στην ευεξία και την αύξηση της παραγωγικότητας. Οι πηγές τεχνητού φωτισμού που συνιστώνται περιλαμβάνουν λαμπτήρες φθορισμού και LED με ψυχρή θερμοκρασία χρώματος, τουλάχιστον 5300 K και ευρύ φάσμα, πλούσιο σε μπλε χρώματα. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της πρωινής εγρήγορσης, προτιμάται αυτό το είδος φωτισμού, ενώ κατά τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας προτιμάται ένας φωτισμός με θερμή θερμοκρασία χρώματος μικρότερη από 3300 K. Το βράδυ, ο φωτισμός θα πρέπει να είναι μειωμένος και με θερμή θερμοκρασία χρώματος.



Εικόνα 9 Αποτελεσματικός ανθρωποκεντρικός φωτισμός, ανάλογα με την ώρα της ημέρας [13].

- Όταν επιλέγεται δυναμικός φωτισμός, είναι σημαντικό η φασματική σύνθεση του φωτισμού να μην αλλοιώνεται από τα φωτιστικά σώματα ούτε από τα χρώματα του περιβάλλοντος χώρου. Στην περίπτωση των φωτιστικών σωμάτων, ορισμένα οπτικά

στοιχεία ελέγχου της φωτεινής κατανομής, όπως οι περσίδες, το κάλυμμα ή/και ο διαχύτης, μπορούν να μειώσουν τη βιολογική επίδραση του φωτισμού μειώνοντας την μπλε συνιστώσα του λευκού φωτός. Επιπλέον, τα χρώματα της οροφής, των τοίχων και των επίπλων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το τελικό αισθητικό αποτέλεσμα του φωτισμού στον χώρο, καθώς ανακλούν και απορροφούν διαφορετικά μέρη του ορατού φάσματος. Τα σκούρα χρώματα ανακλούν λιγότερο φως από τα ανοιχτά, ενώ το ξύλο και τα γήινα χρώματα απορροφούν τη μπλε ακτινοβολία, μειώνοντας το βιολογικό ερέθισμα. Τα έντονα κίτρινα και κόκκινα χρώματα επίσης παίζουν σημαντικό ρόλο στον τελικό χρωματικό τόνο.

- Ένα φωτιστικό με δυναμικά μεταβαλλόμενο φάσμα εκπομπής (δηλαδή με δυνατότητα αλλαγής της θερμοκρασίας χρώματος από ψυχρή σε θερμή και αντίστροφα) συνδυάζει διαφορετικές πηγές φωτισμού, οι οποίες δεν λειτουργούν ταυτόχρονα. Κάθε πηγή έχει διαφορετική φωτεινή απόδοση (lm/W). Η ψυχρή θερμοκρασία χρώματος είναι πιο αποδοτική στην τεχνολογία των LED, ενώ η θερμή θερμοκρασία χρώματος προσφέρει καλύτερη απόδοση στην τεχνολογία των λαμπτήρων φθορισμού. Για τον ενεργειακό έλεγχο των φωτιστικών με δυναμικό φωτισμό, η φωτεινή απόδοση θα λαμβάνεται ίση με την ελάχιστη τιμή που προκύπτει από το συνδυασμό λειτουργίας των φωτεινών πηγών του φωτιστικού.

Εκτός από την βιολογική, εξετάζεται και η συναισθηματική επίδραση του φωτός. Σε ένα αποτελεσματικό εργασιακό περιβάλλον, η αίσθηση θα πρέπει να είναι ευχάριστη και να επιτρέπει στους χρήστες να συνδέονται με τον χώρο. Τα χρώματα και τα υλικά, σε συνδυασμό με τον επιλεγμένο φωτισμό (όπως το φάσμα ακτινοβολίας, η θερμοκρασία χρώματος και η χρωματική απόδοση), καθώς και η εσωτερική διακόσμηση, μπορούν να ενισχύσουν την ευεξία. Ο χώρος δεν θα πρέπει να δημιουργεί μόνο εγρήγορση, αλλά και να προσφέρει ιδιωτικότητα, ώστε οι χρήστες να μπορούν να ξεκουραστούν σε ένα διάλειμμα. Ο θερμός φωτισμός και η κατάλληλη διακόσμηση μπορούν να ικανοποιήσουν αυτή την απαίτηση [13, pp. 95-96].

Η εφαρμογή του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού είναι πολύ απαιτητική και ξεφεύγει από την απλή προσαρμογή του φωτισμού και της θερμοκρασίας χρώματος, καθώς η επίδραση του πρώτου εξετάζεται ως ενιαίο σύνολο. Εκτός από τις οπτικές εργασίες και τις βιολογικές και συναισθηματικές επιπτώσεις, εξετάζει επίσης το πλαίσιο στο οποίο χρησιμοποιείται ο φωτισμός. Πρόκειται για ένα εστιασμένο, προσανατολισμένο στην απόδοση περιβάλλον ή πρέπει ο φωτισμός να έχει πιο χαλαρωτικό αποτέλεσμα; Αλλάζουν οι απαιτήσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας; Υπάρχουν διαφορετικές χωρικές περιοχές για διαφορετικές εργασίες; Επίσης και άλλες πτυχές (π.χ. φως για υποστήριξη της δημιουργικότητας ή για ηρεμία) ενδέχεται να παρουσιάζουν περαιτέρω απαιτήσεις για την ιδέα του φωτισμού. Ο βασικότερος στόχος όμως του φωτός, σύμφωνα με την ιδέα του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού, είναι να εξυπηρετεί τον χρήστη, να ρυθμίζεται από αυτόν και να ανταποκρίνεται στις προσδοκίες του μακροπρόθεσμα [41, p. 5].

3.3 Επίδραση χρόνου

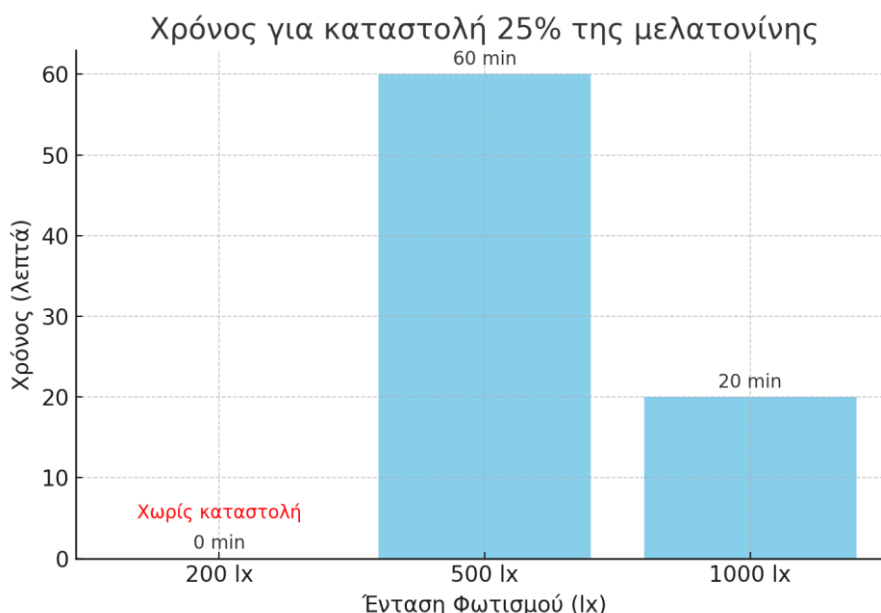
Οι συνθήκες φωτισμού σχετίζονται άμεσα με το χρονικό σημείο της ημέρας και αφορούν γενικότερα την ένταση φωτισμού και τη θερμοκρασία χρώματος του. Έτσι αν χωριστεί η ημέρα σε τρεις χρονικές περιόδους προκύπτουν:

- Πρωί (6:00-10:00). Ο φωτισμός που προέρχεται από το φυσικό φως θα πρέπει να συγχρονίζεται με το κερκάδιο βιολογικό ρολόι και να ενεργοποιεί τη συγκέντρωση και την παραγωγικότητα στους περισσότερους ανθρώπους. Αντίστοιχα λοιπόν ο τεχνητός φωτισμός πρέπει να έχει υψηλή ένταση και ψυχρή, λευκή απόχρωση, για να παρέχει κατά το δυνατόν ίδια αποτελέσματα.

- Μέσα του πρωινού και απόγευμα (10:00 - 18:00). Κατά την περίοδο αυτή, τα υψηλά επίπεδα φωτισμού μπορούν να συμβάλουν στην αύξηση της εγρήγορσης και της συγκέντρωσης. Παραμένουν υψηλά, αλλά με χαμηλότερες τιμές σε σχέση με αυτές του πρωινού.
- Αργά το απόγευμα και τη νύχτα (18.00 - 6:00). Σε αυτές τις φάσεις της ημέρας θα πρέπει να αποφεύγεται η έκθεση σε έντονο, ψυχρό φωτισμό, καθώς μπορεί να μειώσει την παραγωγή μελατονίνης και να διατηρήσει την κορτιζόλη σε υψηλά επίπεδα. Κατά συνέπεια, θα υπάρξει αλλοίωση του φυσιολογικού ανθρώπινου κιρκάδιου κύκλου, δηλαδή αποσυγχρονισμός του οργανισμού σε σχέση με την ηλιακή ημέρα. Ο τεχνητός φωτισμός αυτές τις ώρες πρέπει να είναι θερμός.

Επίσης, όσον αφορά τον παράγοντα χρόνο, ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η διάρκεια έκθεσης στο φως στις διάφορες φάσεις της ημέρας. Για να υπάρξει επίδραση στο κιρκάδιο σύστημα, είναι απαραίτητη μεγαλύτερη έκθεση στο φως από αυτή που απαιτείται για την όραση. Το ανθρώπινο κιρκάδιο σύστημα λειτουργεί με πολύ πιο αργούς ρυθμούς, μιας και βασίζεται κυρίως στην έκκριση ορμονών στο αίμα, όπως η μελατονίνη και η κορτιζόλη, και λιγότερο σε νευρολογικές διεργασίες για τον συγχρονισμό των διαφόρων οργάνων του σώματος.

Επιστημονικές έρευνες έχουν δείξει ότι, με την ίδια φασματική κατανομή ισχύος (SPD), όσο αυξάνεται η ποσότητα φωτισμού στα μάτια, τόσο ταχύτερη είναι η καταστολή της έκκρισης μελατονίνης στο αίμα τη νύχτα [42]. Η καταστολή της μελατονίνης κατά 25% μπορεί να επιτευχθεί μόλις σε 20 λεπτά με ένταση φωτισμού στα μάτια 1000 lx - διαφορετικά, αν η ένταση φωτισμού πέσει κάτω από 500 lx, χρειάζονται περίπου 60 λεπτά για να επιτευχθεί η ίδια καταστολή της μελατονίνης. Επίσης, κάτω από μια σχετικά χαμηλή τιμή περίπου 200 lx, δεν εμφανίζεται καταστολή της μελατονίνης άνω του 25%.



Γράφημα 1 Ο χρόνος που χρειάζεται για να γίνει καταστολή της μελατονίνης στο 25%, για ένταση στα 200 lx, 500 lx και 1000 lx, αντίστοιχα.

Αν και πρόκειται για ένα θέμα που ακόμα συζητείται και στο οποίο θα χρειαστούν περαιτέρω έρευνες για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικής διάρκειας της φωτοθεραπείας για την καταστολή της μελατονίνης, οι Rea et al. (2002) προτείνουν μια πρώτη προσέγγιση. Σύμφωνα με αυτήν, ένας λευκός φωτισμός το πρωί με ένταση, περίπου 1000 lx στον κερατοειδή και με SPD που χαρακτηρίζεται από μια κορυφή στην περιοχή των 420 - 480 nm, θα πρέπει να έχει

διάρκεια έκθεσης τουλάχιστον μια με δύο ώρες, έτσι ώστε να επιφέρει αποτελεσματική επίδραση στον κιρκάδιο ρυθμό [1, pp. 125-126].

3.4 Μετρικά συστήματα των μη οπτικών αποτελεσμάτων

3.4.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός φωτισμού καθορίζεται πλέον με βάση ευρήματα πρόσφατων ερευνών σχετικά με τις μη οπτικές επιδράσεις του φωτός στον κιρκάδιο ανθρώπινο ρυθμό. Η αναζήτηση των συγκεκριμένων μηκών κύματος που καταστέλλουν επαρκώς τη μελατονίνη και επάγουν την απόκριση της μελανοψίνης στο φως, αποτελούν στοιχεία που ο εκάστοτε σχεδιαστής φωτισμού οφείλει να λάβει υπόψη. Ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση του φωτισμού σε έναν χώρο διεξάγεται με χρήση φωτομετρικών παραμέτρων, που αντικατοπτρίζουν την οπτική επίδραση του φωτός. Η μέτρηση του οπτικού αποτελέσματος δίνεται σε τιμές έντασης φωτισμού (lx) ή λαμπρότητας (cd/m^2). Αυτές μπορούν να μετρούν την οπτική ακρίβεια και αντικατοπτρίζουν την απόκριση του ματιού στο οπτικό περιβάλλον, όμως δεν υπολογίζουν τις βιολογικές μη οπτικές επιδράσεις.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές καινούργιες κιρκάδιες μετρικές, ενώ ο αριθμός τους αυξάνεται συνεχώς. Ωστόσο, τα μετρητικά συστήματα για τα μη οπτικά αποτελέσματα δεν έχουν τύχει ακόμη ευρείας αποδοχής. Μονάδες μέτρησης και υπολογισμοί για την αξιολόγηση των μη οπτικών αποτελεσμάτων δεν έχουν καταστεί ακόμη υποχρεωτικοί σύμφωνα με τα πρότυπα, αλλά έχουν γίνει προτάσεις από ευρωπαϊκά τεχνικά έγγραφα, τη Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN/TR 16791), τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (CIE, Commission Internationale de l'Eclairage - International Commission on Illumination S026) και άλλες ερευνητικές ομάδες.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται εννέα διαφορετικές προσεγγίσεις (και οι σχετικές μετρικές) για τον προσδιορισμό της επίδρασης του φωτός στην απόκριση της μελανοψίνης ή στο κιρκάδιο σύστημα. Πρόκειται τόσο για τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μετρήσεις, όπως η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού (EML), το κιρκάδιο φως (CLA), το κιρκάδιο ερέθισμα (CS), όσο και για τις α-οπικές μετρικές, που εισήγαγε πρόσφατα η CIE, αλλά και εκείνες που χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά, όπως: η καθολική φωτεινότητα, ο κιρκάδιος παράγοντας δράσης ή εκείνες που μόλις προτάθηκαν για χρήση, δηλαδή η κιρκάδια ισχύς και η αποτελεσματική ισχύς. Παρουσιάζονται επίσης το ουσιαστικό σκεπτικό της δημιουργίας αυτών των μετρικών, καθώς και ενδείξεις των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων και των αλληλεπιδράσεών τους [43].

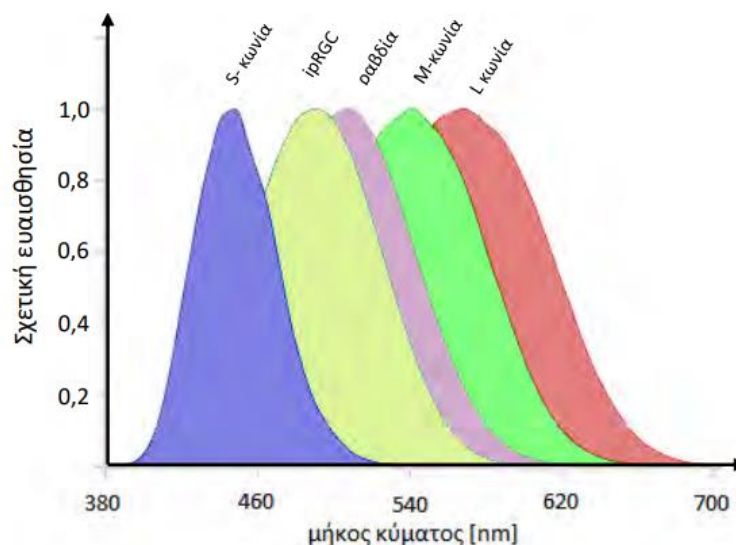
Στις παραπάνω προσεγγίσεις, κατά τον σχεδιασμό του φωτισμού, ο σχεδιαστής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα επίπεδα φωτισμού (οριζόντιος φωτισμός στο επίπεδο εργασίας και κάθετος φωτισμός στο επίπεδο του ματιού), το φάσμα της φωτεινής πηγής, τη χρονική στιγμή έκθεσης, τη διάρκεια της έκθεσης και τη χρονική εξέλιξη της έντασης του φωτισμού στο χώρο [13, pp. 96-97].

3.4.2 Μετρικό σύστημα α-οπικό

Για την ποσοτική αξιολόγηση της έκθεσης στο φως, η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού (CIE), συνιστά τη χρήση της απόκρισης των πέντε φωτοϋποδοχέων του ανθρώπινου αμφιβληστροειδούς:

- S-cone (κυανικό ή S-opic),
- M-cone (χλωροπικό ή M-opic),
- L-cone (ερυθρόπικό ή L-opic),
- Rod (ραβδοπικό ή rhodopic),
- ipRGC [44]

Αυτό βασίζεται στη θέση της CIE ότι η μη οπτική απόκριση στο φως δεν μπορεί να περιγραφεί από μία μόνο φασματική καμπύλη, όπως π.χ. η καμπύλη απόκρισης της μελανοψίνης. Αντίθετα, για να εκφραστεί συνολικά η επίδραση του φωτός στην ανθρώπινη υγεία και ευεξία, πρέπει να συνυπολογίζονται όλοι οι φωτοϋποδοχείς που συνεισφέρουν σε αποκρίσεις επηρεαζόμενες από τα ipRGCs.



Εικόνα 10 Αποκρίσεις των κωνίων (μπλε, πράσινων, κόκκινων), των ραβδίων και των ipRGCs φωτοϋποδοχέων [13].

Οι α-οπικές (a-opic) αποκρίσεις ονομάζονται έτσι επειδή προκύπτουν από το είδος της οψίνης (opsin) που περιέχει κάθε φωτοϋποδοχέα. Οι αντίστοιχες μετρικές περιλαμβάνουν:

- a-opic irradiance
- a-opic efficacy of luminous radiation
- a-opic equivalent daylight (D65) illuminance
- a-opic radiance / flux / luminance

Οι παρακάτω εξισώσεις και όροι αφορούν τον υπολογισμό α-οπικών μετρικών όπως αυτές περιγράφονται από την CIE S 026:2018, και εφαρμόζονται για την αξιολόγηση της βιολογικής επίδρασης του φωτός βάσει των επιμέρους φωτοϋποδοχέων.

Εξισώσεις των a-opic μετρικών:

1. Φασματικά Σταθμισμένη Α-οπική Ακτινοβολία (A-opic irradiance):

$$E_{\alpha} = \int E_{e,\lambda}(\lambda) * S_{\alpha}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Όπου:

- $E_{e,\lambda}(\lambda)$ η φασματική ακτινοβολία της φωτεινής πηγής (σε W/m²/nm)
- $S_{\alpha}(\lambda)$ η φασματική καμπύλη δράσης για κάθε φωτοϋποδοχέα

2. A-opic Equivalent Daylight (D65) Illuminance:

$$E_{\alpha,eq}^{D65} = \frac{E_{\alpha}}{K_{\alpha,v}^{D65}} = E_v * \gamma_{\alpha,v}^{D65} \quad (2)$$

Όπου:

- E_v η φωτεινότητα υπό φωτοπική όραση
- Η $K_{\alpha,v}^{D65}$ αντιπροσωπεύει πόση α-οπική ενέργεια παράγεται ανά μονάδα φωτοπικής φωτεινής ροής για το πρότυπο φως ημέρας D65

3. A-opic Efficacy of Luminous Radiation for D65:

$$K_{\alpha,v}^{D65} = \frac{\Phi_{\alpha}^{D65}}{\Phi_v^{D65}} \quad (3)$$

Όπου:

- Φ_{α}^{D65} η α-οπική φωτεινή ροή της D65
- Φ_v^{D65} η φωτοπική φωτεινή ροή της D65

4. Αναλογία αποδοτικότητας D65 για a-opic απόκριση (A-opic Daylight (D65) efficacy ratio):

$$\gamma_{\alpha,v}^{D65} = \frac{K_{\alpha,v}}{K_{\alpha,v}^{D65}} \quad (4)$$

Οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας (a-opic action spectra) καθορίστηκαν από την CIE S 026 (2018), λαμβάνοντας υπόψη ονομαστικές τιμές (π.χ. πρότυπο παρατηρητή ηλικίας 32 ετών). Παρέχονται επίσης διορθωτικές καμπύλες για διαφορετικές ηλικίες, λόγω της μείωσης της διαπερατότητας του ματιού.

Εάν επιλεγεί η μελανοπική καμπύλη $S_{mel}(\lambda)$, τότε:

- E_{mel} η μελανοπική ακτινοβολία (W/m^2)
- $K_{mel,v}^{D65} = 1.3262 \text{ mW/lm}$ η μελανοπική αποδοτικότητα φωτεινής ακτινοβολίας για D65
- $\gamma_{mel,v}^{D65}$ ο μελανοπικός λόγος αποδοτικότητας
- $E_{mel,eq}^{D65}$ η μελανοπική ισοδύναμη φωτεινότητα ημέρας D65 (MEDI) σε lux

Η μετρική που αξίζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η μελανοπική ισοδύναμη φωτεινότητα ημέρας D65 (MEDI), με μονάδα μέτρησης τα lx [44].

Η χρήση του προτύπου φωτιστικού D65 ως σημείο αναφοράς είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αντιπροσωπεύει το φυσικό φως ημέρας, το οποίο αποτελεί τη βασική αναφορά για τις αρχές του ανθρωποκεντρικού φωτισμού (HCL).

Πιο συγκεκριμένα η μελανοπική ισοδύναμη φωτεινότητα ημέρας D65:

- παρέχει μια συγκρίσιμη βάση μεταξύ τεχνητών πηγών φωτός και φυσικού φωτός ημέρας,
- επιτρέπει την αξιολόγηση φωτεινών πηγών με βάση τη βιολογική διέγερση της μελανοψίνης,
- είναι συμβατή με το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) και συνοδεύεται από υπολογιστικό εργαλείο (Excel Toolbox) που διατίθεται δωρεάν (EDI 65 calculator).

Αξίζει να αναφερθεί ότι, παρόλο που οι αρχικές μετρικές για μελανοπική φωτεινότητα βασίζονταν σε φασματική αναφορά "equal-energy radiator" (φωτιστικό τύπου E), το πρότυπο της CIE (2018) πλέον υιοθετεί το φως ημέρας τύπου D65, προσφέροντας πιο ρεαλιστικές συνθήκες αναφοράς.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει διάφορες φωτεινές πηγές (standard και LED) υπό τις ίδιες συνθήκες φωτοπικής φωτεινότητας (300 lx), συγκρίνοντάς τις ως προς τις:

- Μελανοπική απόδοση (mW/lm)
- Μελανοπική ακτινοβολία (W/m^2)
- Μελανοπική απόδοση σε σχέση με D65 (efficacy ratio)
- MEDI (lx)

Πίνακας 1 Μελανοπικές μετρήσεις για τυπικούς φωτιστικούς παράγοντες: E, A, D₅₅ και D₆₅ (*) και ένα μοντέλο ενός τοπικού φωτιστικού με ρυθμιζόμενες λυχνίες LED σε διαφορετικές ρυθμίσεις CCT.

Φωτεινή Πηγή	Φωτεινότητα E (lx)	Μελανοπική Απόδοση (mW/lm)	Μελανοπική Ακτινοβολία (W/m ²)	Μελανοπικός Λόγος Απόδοσης D65	MEDI (lx)
Equal-energy illuminant E	300	1.201	360.3	0.906	271.8
Standard illuminant A	300	0.657	197.1	0.496	148.8
Standard illuminant D55	300	1.199	359.7	0.904	271.2
Standard illuminant D65	300	1.326	397.8	1.000	300.0
LED 3000 K	300	0.675	202.5	0.509	152.7
LED 3500 K	300	0.810	243.0	0.611	183.3
LED 4000 K	300	0.930	279.0	0.702	210.6
LED 4500 K	300	1.035	310.5	0.78	234.0
LED 5000 K	300	1.118	335.4	0.843	252.9
LED 5500 K	300	1.197	359.1	0.903	270.9
LED 6000 K	300	1.270	381.0	0.958	287.4

Γίνεται αντιληπτό από τον παραπάνω πίνακα, ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία χρώματος (CCT) μιας πηγής LED, αυξάνεται και η μελανοπική της απόδοση, άρα αυξάνεται και το κερκάρδιο αποτέλεσμα που προκαλεί. Οι LED πηγές ψυχρού λευκού (5000 - 6000 K) έχουν τιμές MEDI κοντά στο πρότυπο D65.

Παρότι οι a-opic μετρικές που έχουν προταθεί από τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (CIE 2018) αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για τη χαρακτηριστική περιγραφή μιας φωτεινής πηγής ή για τη σύγκριση διαφορετικών πηγών ως προς την επίδρασή τους σε επιμέρους φωτοϋποδοχείς, αξιοποιούνται κυρίως για την περιγραφή και συγκριτική αξιολόγηση φωτεινών πηγών σε ερευνητικά πλαίσια και όχι για τον σχεδιασμό εσωτερικού φωτισμού. Ο λόγος είναι ότι δεν υπάρχουν ακόμη σαφείς προδιαγραφές ή απαιτήσεις για το ποιες τιμές θα πρέπει να πληρούνται σε ένα πλαίσιο ολοκληρωμένου και βιολογικά βελτιστοποιημένου φωτισμού (integrative lighting).

Εξάριση αποτελεί η μελανοπική ισοδύναμη φωτεινότητα ημέρας D65 (MEDI), η οποία έχει προοπτική ευρύτερης πρακτικής εφαρμογής, εφόσον υιοθετηθεί ως τυπική απαίτηση από οργανισμούς όπως η CIE και η CEN, στο πλαίσιο μελλοντικών ευρωπαϊκών προτύπων.

Η χρήση της MEDI λόγω της σαφούς φυσικής της αναφοράς στο φως ημέρας, μπορεί να χρησιμεύσει ως τυποποιημένη μετρική για την αξιολόγηση του φωτισμού σε περιβάλλοντα που αποσκοπούν στη στήριξη του ανθρώπινου βιολογικού ρυθμού (π.χ. σχολεία, γραφεία, νοσοκομεία, γηροκομεία).

3.4.3 Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού

Ο Lucas και άλλοι [45] εισήγαγαν την Ισοδύναμη Μελανοπική Ένταση Φωτισμού (EML) προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν τις μελανοπικές επιδράσεις του φωτός. Η EML σταθμίζεται στην απόκριση των ipRGCs στο φως, μεταφράζοντας τον βαθμό που το φάσμα μιας φωτεινής πηγής διεγείρει το κερκάρδιο σύστημα του ανθρώπου (Εικόνα 11). Το πρότυπο ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος κτιρίων, WELL Building Standard [46], αναφέρεται εκτενώς σε αυτές τις μονάδες, στοχεύοντας κυρίως στην υγεία και ευεξία των χρηστών χωρίς να δίνει έμφαση αποκλειστικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το στάνταρ WELL εστιάζει στα

EML και θέτει όρια με βάση τον κάθετο φωτισμό στο ύψος των ματιών, αντί για το οριζόντιο επίπεδο. Η τιμή της EML δίνεται από τον τύπο:

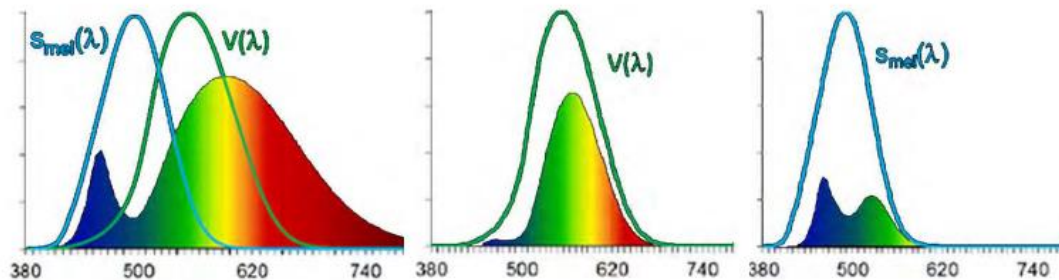
$$EML = K_{melanopic,E} \times \int_{\lambda=380}^{780} SPD(\lambda) \times S_{mel}(\lambda) \times d\lambda \quad (5)$$

$$\text{όπου } K_{melanopic,E} = 831.8 \frac{lm}{melanopic_E}$$

Σύμφωνα με το πρότυπο WELL [46], για συνδυασμό φυσικού και τεχνητού φωτισμού συνιστάται η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού να είναι τουλάχιστον στα 200 EML ή για χρήση μόνο τεχνητού στα 150 EML. Εξετάζεται στο κατακόρυφο επίπεδο, σε ύψος 1.2 m. Επιτρέπεται η μείωση των επιπέδων τεχνητού φωτισμού λόγω της χρήσης φυσικού φωτισμού, αλλά τα φωτιστικά σώματα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν τα παραπάνω επίπεδα φωτισμού ανεξάρτητα από την παρουσία ή την απουσία φυσικού φωτισμού [13, p. 97].

Με την προϋπόθεση ότι καλύπτονται οι απαιτήσεις σχεδιασμού για την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας το EML μπορεί επίσης να υπολογιστεί από το γινόμενο της φωτοπικής έντασης φωτισμού, με τον Μελανοπικό Συντελεστή Ισοδύναμης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (R ή MEER - Melanopic Equal Energy Efficacy Ratio). Ο MEER εξαρτάται από τη φασματική κατανομή ισχύος της φωτεινής πηγής. Ο παρακάτω τύπος εκφράζει την αναλογία της απόκρισης των ipRGCs σε σχέση με την φωτοπική απόκριση για κάθε εξεταζόμενη φωτεινή πηγή – φάσμα.

$$EML = L \cdot MEER \quad (6)$$



Εικόνα 11 Γραφική απεικόνιση του υπολογισμού του μέρους της ακτινοβολίας μιας πηγής (πρώτο γράφημα) που χρειάζεται για τον καθορισμό της έντασης φωτισμού [lx] (δεύτερο γράφημα) και της ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού (EML) (τρίτο γράφημα) [13].

Ο ακόλουθος πίνακας παρέχει αντιπροσωπευτικές τιμές του MEER. Με χρήση της εξίσωσης 2, υπολογίζονται για ένταση φωτισμού 100 lx, οι αντίστοιχες τιμές του EML, για κάποιες τυπικές πηγές φωτός.

Πίνακας 2 Υπολογισμός ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού, με ενδεικτικές τιμές συντελεστή MEER ή R, ανά 100 lx έντασης φωτισμού, για διάφορες τεχνολογίες φωτεινών πηγών και θερμοκρασίας χρώματος.

Τεχνολογία φωτεινής πηγής	Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος [K]	Μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, MEER ή R	Ένταση φωτισμού [lx]	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού [EML]
Φωτισμός κεριού (<i>illuminant P</i>)	1800	0.30	100	30
LED	2700	0.45	100	45
Αλογόνου πυράκτωσης	2800	0.54	100	54
Φθορισμός	3000	0.45	100	45
LED	3000	0.45	100	45
Φθορισμός	4000	0.58-0.62	100	58-62
LED	4000	0.74-0.76	100	74-76
LED	5400	0.87	100	87
Φυσικός φωτισμός (<i>D55</i>)	5500	1.00	100	100
LED	6500	0.88	100	88
Φυσικός φωτισμός (<i>D65</i>)	6500	1.10	100	110

3.4.4 Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φυσικού φωτισμού

Αξίζει να σημειωθεί ότι το *EML* δεν έχει το ίδιο μέτρο με την Ισοδύναμη Μελανοπική Ένταση Φυσικού Φωτισμού (*Melanopic Daylight Equivalent Illuminance, MDEI*) που εισάγεται από τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού η οποία δίνεται από το γινόμενο:

$$MDEI = K_{melanopic,D65} \times \int_{\lambda=380}^{780} SPD(\lambda) \times S_{mel}(\lambda) \times d\lambda \quad (7)$$

$$\text{Όπου } K_{melanopic,D65} = 753.8 \frac{lm}{melanopic_{D65}}$$

Το MDEI είναι το ολοκλήρωμα του γινομένου της καμπύλης της φασματικής απόκρισης της φωτεινής πηγής επί το φάσμα της μελανοπικής απόκρισης του ανθρώπινου οφθαλμού επί τη σταθερά $K_{(melanopic,D65)}$ [47].

Το MDEI μπορεί επίσης να υπολογιστεί ως το γινόμενο της φωτοπικής φωτεινότητας με τον μελανοπικό λόγο αποτελεσματικότητας του φωτός της ημέρας (*Melanopic Daylight Efficacy Ratio, MDER* ή $m_{v,mel,D65}$). Σε ένα φάσμα αναφοράς του φωτός της ημέρας, ο MDER ισούται με 1. Γενικά, ο τεχνητός φωτισμός έχει λιγότερο σημαντικές βιολογικές επιπτώσεις από ότι το φως της ημέρας, όπου $MDER < 1$ [48].

$$MDEI = E_v \cdot MDER \quad (8)$$

Σταθμίζεται διαφορετικά:

$$1 \text{ EML} = 0.91 \text{ Melanopic Daylight Equivalent D65} \quad (9)$$

[13, p. 98].

Ο ακόλουθος πίνακας παρέχει αντιπροσωπευτικές τιμές του MDER. Με χρήση της εξίσωσης 8, υπολογίζονται για ένταση φωτισμού 100 lx, οι αντίστοιχες τιμές του MDEI, για κάποιες τυπικές πηγές φωτός.

Πίνακας 3 Ενδεικτικές τιμές συντελεστή MDER για διάφορες τεχνολογίες φωτεινών πηγών και συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος, υπολογισμός ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φυσικού φωτισμού ανά 100 lx έντασης φωτισμού για διάφορες πηγές φωτισμού και ελάχιστες τιμές κάθετης έντασης φωτισμού $L_{V,MDEI}$ για την επίτευξη του κιρκάδιου 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]
Φωτισμός κεριού (illuminant P)	1800	0.267	100	27	899
Φθορισμός	2700	0.348	100	35	690
Αλογόνου πυράκτωσης	3000	0.507	100	51	474
Φθορισμός	3000	0.404	100	40	595
LED	3000	0.408	100	41	589
Φθορισμός	4000	0.563	100	56	426
LED	4000	0.672	100	67	357
LED	5400	0.787	100	79	305
Φυσικός Φωτισμός (D55)	5500	0.904	100	90	265
LED	6500	0.800	100	80	300
Φυσικός φωτισμός (D65)	6500	1.000	100	100	240

3.4.5 Κιρκάδιο ερέθισμα και κιρκάδιο φως

Το Ερευνητικό Κέντρο Φωτισμού (Lighting Research Center) του Πολυτεχνικού Ινστιτούτου Rensselaer (Rensselaer Polytechnic Institute, ΗΠΑ), ανέπτυξε ένα μετρητικό σύστημα και σχετικά εργαλεία για την κατανόηση και εφαρμογή του κιρκάδιου φωτός (Circadian Light - CLA) στο δομημένο περιβάλλον. Το μετρητικό σύστημα αυτό περιγράφεται μέσω της μετρικής Circadian Stimulus (CS).

Η διαδικασία υπολογισμού του CS ξεκινά με τον προσδιορισμό της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας που προσπίπτει κατακόρυφα στον κερατοειδή. Η ακτινοβολία αυτή σταθμίζεται με τα φάσματα δράσης των φωτοϋποδοχέων (S-cone, M-cone, L-cone, rod και ipRGC), ώστε να αντικατοπτρίζει τη φασματική ευαισθησία του κιρκάδιου συστήματος ως προς την καταστολή της μελατονίνης έπειτα από έκθεση μιας ώρας τη νύχτα. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η αντίθεση μπλε - κίτρινου φωτός [33, pp. 30-31].

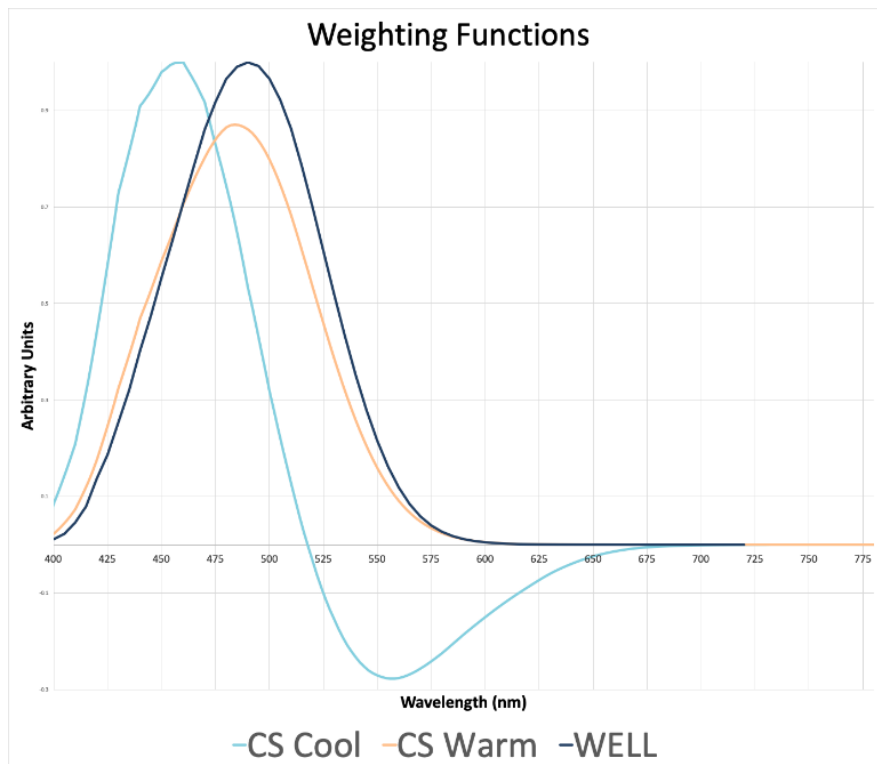
Από τη σταθμισμένη αυτή φασματική κατανομή υπολογίζεται το κιρκάδιο φως, που αφορά την ένταση και το φάσμα του φωτός που επιδρούν στην καταστολή της μελατονίνης. [43]. Οι τιμές του CS κυμαίνονται μεταξύ 0.1 και 0.7, με τιμές άνω του 0.3, να θεωρούνται αποτελεσματικές όταν παρέχονται για τουλάχιστον μια ώρα νωρίς το πρωί, βελτιώνοντας τον ύπνο, τη συμπεριφορά και τη διάθεση διάφορων πληθυσμιακών ομάδων (εργαζόμενους σε γραφεία, εφήβους, ασθενείς με νόσο Αλτσχάιμερ και υγιείς ηλικιωμένους). Αντίθετα, το απόγευμα οι τιμές του CS θα πρέπει να είναι μικρότερες από 0.3 [13, p. 100].

Το μοντέλο CS περιλαμβάνει δύο συναρτήσεις στάθμισης, ανάλογα με τη θερμοκρασία χρώματος.

- Ψυχρή στάθμιση για CCT > 3500 K, με μέγιστη ευαισθησία στα 465 nm.
- Θερμή στάθμιση για CCT < 3500 K, με μέγιστη ευαισθησία στα 485 nm.

Για σύγκριση, σημειώνεται ότι το μελανοπικό μοντέλο (WELL v2 - L03) εμφανίζει μέγιστη ευαισθησία στα 490 nm, με αποτέλεσμα το φως με υψηλή περιεκτικότητα σε μπλε-πράσινο φάσμα να ενεργοποιεί εντονότερα τα ipRGCs, από το φως ίδιας έντασης που είναι πιο κοντά στο πορτοκαλί-κόκκινο φάσμα.

Καθεμία από τις τρεις συναρτήσεις στάθμισης που αναφέρονται παραπάνω, εμφανίζεται στην εικόνα 13.



Εικόνα 12 Καμπύλες στάθμισης για τα τρία μοντέλα, ψυχρό CS, θερμό CS, μελανοπικό WELL.

Η συνάρτηση στάθμισης για ψυχρές πηγές δείχνει ότι το πολυχρωματικό φως μπορεί να έχει μικρότερη επίδραση από το μονοχρωματικό σε ορισμένες περιπτώσεις. Το κιρκάδιο σύστημα δεν λειτουργεί προσθετικά. Αρνητικές τιμές για μήκη κύματος $\lambda > 525$ nm αντικατοπτρίζουν την αντισταθμιστική επίδραση της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος στην καταστολή της μελατονίνης. Μελέτες έχουν δείξει ότι πολυχρωματικό λευκό φως θερμής (3000 K) και ψυχρής (5500 K) CCT, καταστέλλουν τη μελατονίνη στον ίδιο βαθμό, ενώ ενδιάμεσες τιμές (4100 K) έχουν περίπου τη μισή επίδραση [49].

Για τον σχεδιασμό συστήματος φωτισμού με τη μετρητική CS, οι βασικές αρχές περιλαμβάνουν:

1. Προτεραιότητα στο φάσμα (SPD) έναντι της συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος (CCT), καθώς φωτιστικά ίδιας CCT μπορεί να έχουν διαφορετικό CS λόγω διαφορετικού SPD.
2. Έμφαση στον κατακόρυφο φωτισμό (E_V) και χρήση φωτιστικών άμεσης-έμμεσης κατανομής για καλύτερη αναλογία E_V/E_H .
3. Αντισταθμιστική σχέση μεταξύ έντασης φωτισμού και φάσματος. Χαμηλότερη ένταση απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ στα μικρά μήκη κύματος για επίτευξη του ίδιου CS. Για παράδειγμα, για να επιτευχθεί μια μέση $E_H = 300$ lx, χρειάζεται ένα SPD που εκπέμπει περισσότερο φως μικρού λ (δηλαδή με CCT 6000 K), έτσι ώστε $CS = 0.3$, ενώ για μια μέση $E_H = 400$ lx, αρκεί ένα SPD με λιγότερο φως μικρού λ (CCT 4500 K) για να προκύψει το ίδιο CS. Οι τιμές CS μπορούν επίσης να αλλάξουν απλά αυξάνοντας ή μειώνοντας τη φωτεινή απόδοση του συστήματος, διατηρώντας την ίδια CCT.
4. Χρονισμός και προσαρμογή του φωτισμού στη διάρκεια της ημέρας, με υψηλότερες τιμές CS το πρωί και χαμηλότερες το βράδυ.
5. Εξατομίκευση του φωτισμού ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών (π.χ. μαθητές, ηλικιωμένοι).

6. Χρήση ειδικών φωτιστικών ή LED συγκεκριμένων μηκών κύματος (π.χ. 470 nm), όταν υπάρχουν περιορισμοί που δεν επιτρέπουν την επίτευξη στόχων CS. Μια άλλη, απλή λύση θα μπορούσε να είναι η εγκατάσταση φωτεινών διαχωριστικών στον χώρο εργασίας. Το απόγευμα, στην περίπτωση που η εγρήγορση είναι σημαντική αλλά το CS δεν είναι το μόνο κριτήριο, ένα κόκκινο διαχωριστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει την εγρήγορση, παρόμοια με την επίδραση ενός φλιτζανιού καφέ, χωρίς να αυξάνει το CS των ατόμων.



Εικόνα 13 Τα φωτεινά χωρίσματα θέσεων εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επιπλέον CS στους χρήστες ενός χώρου [33].



Εικόνα 14 Για την παροχή εγρήγορσης κατά τη διάρκεια της απογευματινής ύφεσης μετά το γεύμα, τα κόκκινα φωτεινά χωρίσματα σταθμών εργασίας θα παρέχουν ένα ερέθισμα εγρήγορσης χωρίς να αυξάνουν το CS [33].

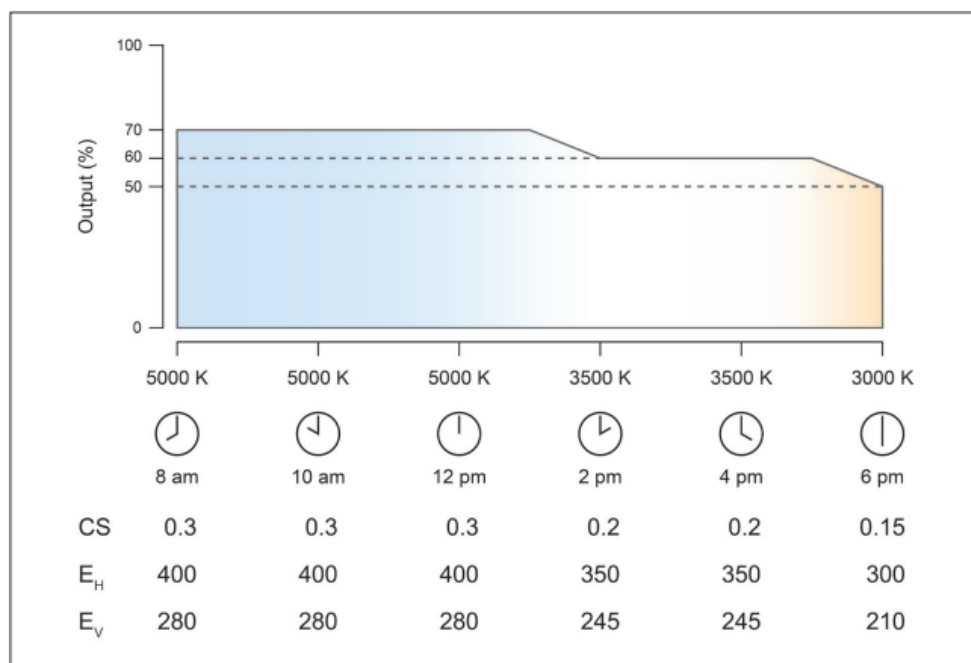
Τέλος, ο σχεδιασμός φωτισμού με CS δεν συνεπάγεται απαραίτητα τεράστιο κόστος. Σε περιπτώσεις οικονομικών ή αρχιτεκτονικών περιορισμών, η δημιουργία «φωτεινών οάσεων» χαμηλού κόστους και αντίκτυπου, μπορεί να προσφέρει οφέλη για την υγεία, την αισθητική και τη λειτουργικότητα του φωτισμού [33, pp. 31-34].



Εικόνα 15 Οι φωτεινές οάσεις διαφορετικής διαμόρφωσης αποτελούν ευέλικτες και προσιτές λύσεις για την παροχή CS [33].

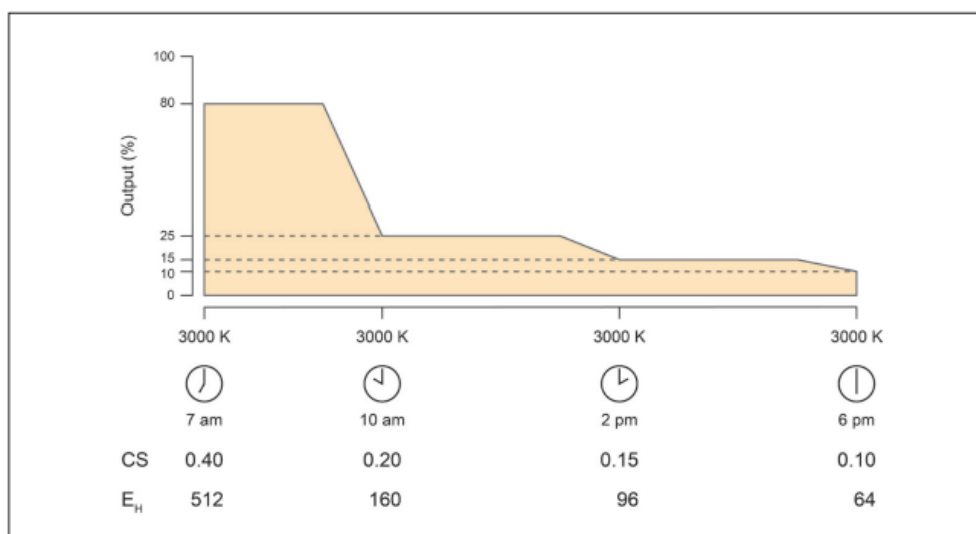
Στη συνέχεια εξετάζονται δύο παραδείγματα φωτισμού ενός χώρου με τα αντίστοιχα διαγράμματα. Το πρώτο είναι ένα τυπικό παράδειγμα, στο οποίο μεταβάλλεται τόσο η φωτεινή ρύθμιση του φωτιστικού, όσο και η θερμοκρασία χρώματος κατά τη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου, από τις 8:00 μέχρι τις 18:00. Η τιμή του CS μεταβάλλεται και όσο μειώνονται τα δύο στοιχεία του φωτιστικού που αναφέρθηκαν παραπάνω, από 0.3 καταλήγει να βρίσκεται στο 0.15 το απόγευμα. Το CS 0.3 είναι χαμηλό για την αρχή της ημέρας. Πιο κατάλληλο θα ήταν ίσως να έφτανε το 0.4, αλλά για φωτεινή ρύθμιση στο 70%, είναι αναμενόμενο να είναι μειωμένο. Στο τέλος της ημέρας το 0.15 είναι ιδιαίτερα χαμηλό, προσεγγίζει στην τιμή κατωφλίου του CS. Μήπως εννοείς κάτι τύπου:

Χωρίς να είναι γνωστός ο χώρος ή η χρήση του, γίνεται αντιληπτό πως είναι χώρος στον οποίο πραγματοποιούνται εργασίες που απαιτούν υψηλή εγρήγορση το πρωί, ενώ όσο προχωράει η ημέρα επιλέγεται ένας φωτισμός που να επιφέρει χαλάρωση.



Εικόνα 16 Τα ρυθμιζόμενα φωτιστικά σώματα μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να παρέχουν προσαρμοσμένα προγράμματα δοσολογίας CS [33].

Το επόμενο παράδειγμα παρουσιάζει μια περίπτωση όπου η CCT παραμένει ίδια, στους 3000 K καθ' όλη τη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου, από τις 7:00 δηλαδή μέχρι τις 18:00. Η φωτεινή ροή παρουσιάζει πολύ μεγάλη πτώση, καθώς από το 80% πέφτει στο τέλος της ημέρας στο 10%. Το CS έχει κατά συνέπεια μεγαλύτερη πτώση από ότι στο προηγούμενο παράδειγμα και από 0.4 καταλήγει στο 0.1. Στο χώρο αυτό μέχρι τις 10:00 υπάρχει ανάγκη για εγρήγορση και οπτική άνεση, αλλά μετά η απότομη μείωση της φωτεινής ροής δημιουργεί ένα ήπιο και χαλαρό περιβάλλον. Αξιοσημείωτο είναι πως η τιμή της CCT παραμένει ίδια και μόνο με τη ρύθμιση της φωτεινής στάθμης μεταβάλλεται το CS.



Εικόνα 17 Οι αλλαγές των τιμών CS επιτυγχάνονται με απλή αύξηση ή μείωση της φωτεινής απόδοσης του συστήματος, διατηρώντας την ίδια CCT [33].

3.4.6 Κιρκάδιος παράγοντας δράσης

Ο Κιρκάδιος Παράγοντας Δράσης (Circadian Action Factor - a_{cv}) είναι μια μετρική που αναπτύχθηκε από τους Gall και Bieske [50] με σκοπό την εκτίμηση της κιρκάδιας αποδοτικότητας φωτεινών πηγών με διαφορετική θερμοκρασία χρώματος (CCT).

Οι ερευνητές βασίστηκαν:

- σε πειραματικά δεδομένα για την ύπαρξη ενός νέου φωτοϋποδοχέα που δεν σχετίζεται με τα γνωστά ραβδία και κωνία [51] και [52],
- στην ανάπτυξη μιας σχετικής κιρκάδιας συνάρτησης δράσης $c(\lambda)$ με μέγιστο τα 450 nm
- και στον ορισμό του a_{cv} ως τον λόγο της κιρκάδιας προς την φωτοπική φασματικά σταθμισμένη ακτινοβολία της ίδιας φωτεινής πηγής.

Πρότειναν τους ακόλουθους τρεις τρόπους υπολογισμού:

1. Την φασματική μέτρηση μέσω σπεκτροραδιόμετρου.
2. Την ολοκληρωμένη μέτρηση με ανιχνευτή προσαρμοσμένο στην $c(\lambda)$.
 - Διαπίστωσαν ότι το μπλε κανάλι ψηφιακής κάμερας LMK μοιάζει με την $c(\lambda)$.
3. Την προσέγγιση μέσω χρωματικών συντεταγμένων:
 - Παρατήρησαν ομοιότητα της $c(\lambda)$ με τη συνάρτηση $z(\lambda)$ του προτύπου CIE.
 - Αντιστοιχούν $c(\lambda) \approx z(\lambda)$, και $V(\lambda) \approx$ φωτεινότητα $\Rightarrow$

Άρα:

$$a_{cv} = \frac{\int_{\lambda} X_{\lambda} * c(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} X_{\lambda} * V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{z}{y} \quad (10)$$

Όπου:

- a_{cv} ο Κιρκάδικος Συντελεστής Δράσης (Circadian Action Factor)
- X_{λ} η φασματική κατανομή ισχύος της φωτεινής πηγής
- $c(\lambda)$ η κιρκάδια συνάρτηση δράσης, με μέγιστο στα 450 nm
- $V(\lambda)$ η φωτοπική συνάρτηση αποδοτικότητας της CIE
- z, y οι χρωματικές συντεταγμένες της CIE

Δηλαδή ο a_{cv} μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από τις χρωματικές συντεταγμένες μιας πηγής φωτός. Αυτός ο τρόπος είναι πολύτιμος σε φωτομετρικές προσομοιώσεις ή όταν δεν υπάρχει φασματική πληροφορία για την πηγή.

Η συσχέτιση του δείκτη με τη θερμοκρασία χρώματος (CCT) είναι η ακόλουθη:

- $a_{cv} < 0.4 \rightarrow$ ζεστό λευκό φως, CCT < 3000 K
- $a_{cv} > 0.7 \rightarrow$ ψυχρό λευκό φως, CCT > 5300 K [53]

Ο a_{cv} είναι χρήσιμος για συγκρίσεις μεταξύ φασματικών κατανομών φωτεινών πηγών. Περιλαμβάνεται και στις τεχνικές σημειώσεις της CIE ([54]) για τα φωτοβιολογικά αποτελέσματα, όμως έχει ένα μειονέκτημα. Βασίζεται σε μια συνάρτηση δράσης $c(\lambda)$ για μονοχρωματικό φως, και δεν λαμβάνει υπόψη:

- την επίδραση των κωνίων και των ραβδίων σε πολυχρωματικό φως,
- την πλήρη πολυπλοκότητα του κιρκάδιου συστήματος.

3.4.7 Κιρκάδια αποδοτικότητα

Η κιρκάδια αποδοτικότητα (circadian efficiency) αποτελεί μία σχετική μετρική που προτάθηκε από τους Bellia et al. (2011), με σκοπό την αξιολόγηση της ικανότητας μιας πηγής φωτός να προκαλεί κιρκάδια διέγερση, με βάση το φασματικό του περιεχόμενο.

Σε αντίθεση με άλλες μετρικές, όπως ο κιρκάδιος συντελεστής δράσης (circadian action factor), η κιρκάδια αποδοτικότητα δεν βασίζεται σε φασματικά σταθμισμένες ποσότητες, αλλά στον λόγο της κιρκάδιας ποσότητας προς τη συνολική ακτινοβολούμενη ενέργεια του φωτός στο ορατό φάσμα. Δηλαδή: «Η κιρκάδια αποδοτικότητα στο ορατό φάσμα αντιπροσωπεύει τη δυνητική κιρκάδια επίδραση που αντιστοιχεί σε μία μονάδα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στο ορατό» [55].

Υπολογισμοί της μετρικής αυτής σε διάφορες φωτεινές πηγές έδειξαν ότι:

- Η κερκάδια αποδοτικότητα αυξάνεται γενικά με την αύξηση της συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος (CCT).
- Φωτεινές πηγές με υψηλές τιμές κερκάδιου παράγοντα δράσης παρουσιάζουν επίσης υψηλή κερκάδια αποδοτικότητα, εφόσον η συνθήκη φωτεινής ροής παραμένει σταθερή.

Ωστόσο, υπάρχουν και εξαιρέσεις, καθώς η μετρική εξαρτάται όχι μόνο από τη θερμοκρασία χρώματος αλλά και από τη φασματική σύσταση της εκάστοτε πηγής.

Η κερκάδια αποδοτικότητα περιλαμβάνεται στις τεχνικές σημειώσεις της CIE [54] για τα φωτοβιολογικά αποτελέσματα του φωτός, όμως:

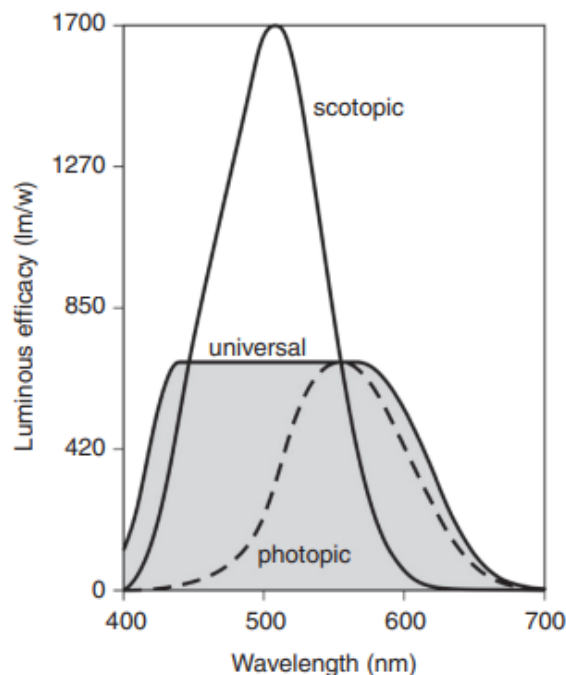
- Δεν έχει υιοθετηθεί ευρέως στην πράξη.
- Δεν χρησιμοποιείται ως τυπικό εργαλείο σχεδιασμού φωτισμού, όπως άλλες μετρικές (π.χ. melanopic EDI ή circadian stimulus) [56].

3.4.8 Καθολική φωτεινότητα

Η έννοια του καθολικού φωτισμού εισήχθη από τον Mark Rea, έναν από τους σημαντικότερους ερευνητές στον χώρο της επιστήμης του φωτισμού. Το 2015, ο Rea πρότεινε μια νέα φασματική σταθμιστική συνάρτηση για τη μέτρηση της φωτεινής απόδοσης της ακτινοβολίας, με την ονομασία καθολική συνάρτηση φωτεινής αποδοτικότητας ($U(\lambda)$).

Η παραδοσιακή φωτοπική συνάρτηση $V(\lambda)$, η οποία καθιερώθηκε το 1924, βασίζεται στην απόκριση μόλις δύο τύπων φωτοϋποδοχέων (M-cone και L-cone). Παρόλα αυτά, η σύγχρονη επιστήμη αναγνωρίζει πέντε λειτουργικά φωτοευαίσθητα κύτταρα στο ανθρώπινο μάτι, S-cone, M-cone, L-cone, rod, ipRGC. Η $U(\lambda)$ ενσωματώνει την απόκριση και των πέντε φωτοϋποδοχέων, με αποτέλεσμα να καλύπτει ένα πολύ ευρύτερο φασματικό εύρος από την $V(\lambda)$, αποτυπώνοντας έτσι τόσο οπτικές όσο και μη οπτικές (βιολογικές) επιδράσεις του φωτός στον άνθρωπο.

Όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, η φωτοπική συνάρτηση $V(\lambda)$, περιορίζεται στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος από την καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του κωνίου L, αλλά στην περιοχή των μικρών μηκών κύματος, περιορίζεται από την καμπύλη φασματικής απόδοσης του κωνίου S (και όχι του κωνίου M, όπως στην περίπτωση της $V(\lambda)$). Με αυτόν τον τρόπο η $U(\lambda)$ «καλύπτει» το πλήρες εύρος της φασματικής απόδοσης όλων των γνωστών φωτοϋποδοχέων» [57].



Εικόνα 18 Συνάρτηση καθολικής φωτεινής απόδοσης σε σχέση με τις συναρτήσεις σκοτοπικής και φωτοπικής απόδοσης [57].

Βάσει της νέας συνάρτησης $U(\lambda)$, ο Rea ορίζει:

- Καθολική φωτεινή ροή (universal lumen): Η φωτεινή ισχύς μιας πηγής, σταθμισμένη με βάση την $U(\lambda)$.
- Καθολικός φωτισμός (universal illuminance): Η φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας, με σταθμιστική βάση την $U(\lambda)$, δηλαδή:

$$\text{Universal Illuminance} = \frac{\text{Universal Luminous Flux}}{\text{Surface area}} \quad (11)$$

Η πρόταση του Rea είναι να χρησιμοποιείται αυτός ο ενιαίος δείκτης για σχεδιασμό φωτισμού, αντί να λαμβάνονται υπόψη διαφορετικά μετρικά ή πολύπλοκοι βιολογικοί υπολογισμοί (π.χ. circadian stimulus, μελανοπική απόκριση κ.ά.). Παρότι πιο απλοποιημένος, ο καθολικός δείκτης προσφέρει σχετικά ανεκτά αποτελέσματα και ικανοποιεί τόσο τις οπτικές απαιτήσεις όσο και τις βιολογικές ανάγκες του ανθρώπου. Όμως η χρήση ενός πολύ απλού κριτηρίου σχεδιασμού δίνει σχετικά μικρότερη ακρίβεια στα αποτελέσματα [58].

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα των απαιτήσεων φωτισμού για αίθουσες διδασκαλίας και υιοθετώντας τη σύσταση με σχετική οπτική απόδοση (Relative Visual Performance) $RVP = 0.97$ και το κίρκαδικό ερέθισμα $CS = 0.3$, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των κριτηρίων για την καθολική φωτεινότητα (στο επίπεδο των ματιών και στο επίπεδο εργασίας). Ως αποτέλεσμα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν τόσο για τις θερμές όσο και για τις ψυχρές λευκές πηγές φωτός, προτείνονται οι εξής τιμές καθολικού φωτισμού:

- 500 lx (universal) στο ύψος των ματιών: επαρκές για κίρκαδια ρύθμιση.
- 300 lx (universal) στο επίπεδο εργασίας: ικανοποιητική οπτική απόδοση.

Με παρόμοιο τρόπο όπως υποστηρίζουν οι Rea et al, μπορούν να υπολογιστούν καθολικές τιμές φωτισμού και για άλλους τύπους οπτικής εργασίας (άλλες τιμές RVP) και άλλες τιμές CS [58].

Ο καθολικός φωτισμός μπορεί να μετρηθεί με σπεκτροραδιόμετρα ή ραδιόμετρα εφοδιασμένα με φίλτρα προσαρμοσμένα στη συνάρτηση $U(\lambda)$.

Παρότι η έννοια της καθολικής φωτεινότητας είναι ελκυστική λόγω της απλότητας της, δεν σχετίζεται άμεσα με καμία από τις θεμελιώδεις συνιστώσες της ανθρώπινης όρασης, και επομένως δεν αποτελεί φωτομετρική ποσότητα, όπως υπογραμμίζουν οι Berman et al. Βέβαια, προσεγγίζει την αρχή της προσθετικότητας του Abney, αλλά η γενικότητά της μπορεί να υποκρύπτει τη σημασία επιμέρους φωτοϋποδοχέων (π.χ. μελανοπική δράση) [59].

3.4.9 Σχετική φασματική αποδοτικότητα

Μια εναλλακτική και καινοτόμος προσέγγιση για την εκτίμηση των μη οπτικών επιδράσεων του φωτός παρουσιάστηκε από τους Amundadottir et al. (2017), με την πρόταση ενός ενιαίου θεωρητικού πλαισίου που επιτρέπει την ανάλυση της φασματικής σύστασης του φωτός σε σχέση με πέντε διαφορετικούς τύπους φωτοϋποδοχέων του ανθρώπινου οφθαλμού, τόσο για οπτικές όσο και για βιολογικές λειτουργίες.

Η προτεινόμενη μετρική ονομάζεται Relative Spectral Effectiveness (RSE), δηλαδή Σχετική Φασματική Αποτελεσματικότητα. Πρόκειται για αδιάστατη ποσότητα (unitless metric), η οποία συγκρίνει τη φασματική απόδοση μιας φωτεινής πηγής σε σχέση με ένα πρότυπο φωτιστικό ισοενεργειακής κατανομής (equal-energy illuminant E).

Η μετρική μπορεί να εφαρμοστεί:

- είτε με βάση την οπτική απόκριση (vision-related RSE),
- είτε με βάση την ενεργειακή συνεισφορά (energy-related RSE), για οποιονδήποτε από τους πέντε φωτοϋποδοχείς, όπως τα ipRGCs, τα ραβδία και τα τρία είδη κωνίων.

Η οπτική εκδοχή της RSE (RSE_{vi}) επιτρέπει την αξιολόγηση του κατά πόσο μια φωτεινή πηγή είναι αποτελεσματική στην ενεργοποίηση ενός συγκεκριμένου τύπου φωτοϋποδοχέα, σε σύγκριση με το πρότυπο φωτοπικό σύστημα που περιγράφεται από τη συνάρτηση $V_{10}(\lambda)$ της CIE. Η μετρική αυτή βασίζεται στη σύγκριση φασματικά σταθμισμένων τιμών ακτινοβολίας, κανονικοποιημένων ως προς το φάσμα ορατού φωτός, και μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς την ανάγκη πρακτικής μέτρησης, προσφέροντας ένα ενιαίο θεωρητικό εργαλείο ερμηνείας της "αίσθησης φωτεινότητας" για κάθε φωτοϋποδοχέα.

Ο τύπος για τον οπτικά σχετιζόμενο δείκτη σχετικής φασματικής αποτελεσματικότητας των ipRGCs ($RSE_{v,ipRGC}$) παρουσιάζεται παρακάτω:

$$RSE_{v,ipRGC} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda) * S_{ipRGC}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda) * V_{10}(\lambda) d\lambda} * A_v \quad (12)$$

Όπου:

- $RSE_{v,ipRGC}$ ο οπτικός δείκτης σχετικής φασματικής αποτελεσματικότητας για τα ipRGCs
- $E_{e,\lambda}(\lambda)$ η φασματική ακτινοβολία της υπό εξέταση φωτεινής πηγής (σε $W/m^2/nm$)
- $S_{ipRGC}(\lambda)$ η φασματική καμπύλη ευαισθησίας των ipRGCs
- $V_{10}(\lambda)$ η φωτοπική συνάρτηση αποδοτικότητας της CIE για 10° οπτικό πεδίο (τυπική για ανθρώπινη οπτική απόκριση)
- λ_1, λ_2 το φασματικό εύρος ολοκλήρωσης (συνήθως 380–780 nm)
- A_v συντελεστής κανονικοποίησης, ίσος με το εμβαδόν κάτω από τη $V_{10}(\lambda)$ στο ίδιο φάσμα

Η ενεργειακή RSE (RSE_{ei}) αντιστοιχεί στον λόγο της φασματικά σταθμισμένης ενέργειας βάσει της ευαισθησίας ενός φωτοϋποδοχέα προς το ολικό ενεργειακό φάσμα του φωτός. Εδώ, η κανονικοποίηση γίνεται με βάση το ισοδύναμο εμβαδόν (equal-area normalization), με την περιοχή αναφοράς να είναι ένα "ορθογώνιο" (uniform) φως ύψους ένα σε όλο το φάσμα.

$$RSE_{e,ipRGC} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda) * S_{ipRGC}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda} * A_e \quad (13)$$

Όπου:

- $RSE_{e,ipRGC}$ ο οπτικός δείκτης σχετικής φασματικής αποτελεσματικότητας για τα ipRGCs
- A_e συντελεστής κανονικοποίησης, που ισούται με το εύρος $\lambda_2 - \lambda_1$, δηλαδή το μήκος κύματος του φασματικού διαστήματος.

Η εξίσωση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της σχετικής ενεργειακής απόδοσης της φωτεινής πηγής ως προς συγκεκριμένες βιολογικές αποκρίσεις, χωρίς τη σύγκριση με οπτικό μοντέλο (όπως το φωτοπικό $V(\lambda)$). Η RSE_e μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για τη βιολογική συνιστώσα φωτισμού, ειδικά σε εφαρμογές σχεδιασμού φωτιστικών που στοχεύουν στη ρύθμιση του κερκιδίου ρυθμού.

Η βασική καινοτομία της μετρικής RSE έγκειται στο γεγονός ότι:

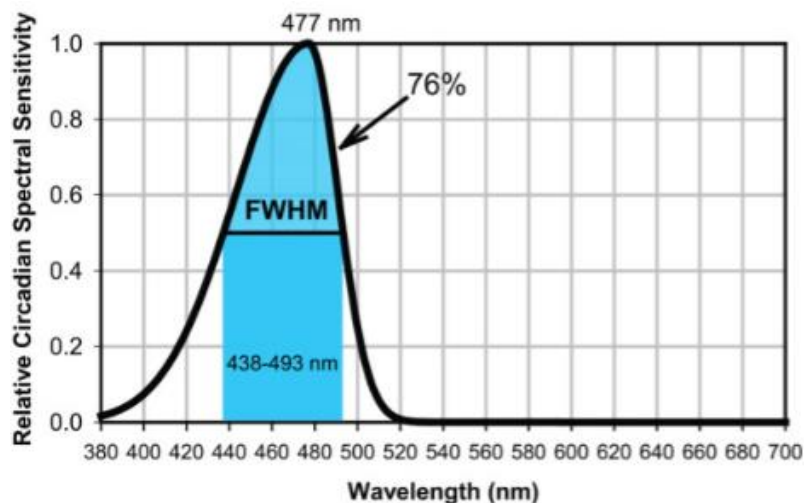
- Μπορεί να υπολογιστεί τόσο για φωτεινή ένταση (illuminance) όσο και για ακτινοβολία (irradiance).
- Συνδυάζει τόσο οπτική όσο και μη-οπτική αξιολόγηση φασματικών χαρακτηριστικών.
- Δεν απαιτεί κανονικοποίηση με βάση τη μέγιστη τιμή της φασματικής απόκρισης, κάτι που θεωρείται πιο συνεπές, ειδικά όταν δεν γνωρίζουμε πλήρως τη συμβολή κάθε φωτοϋποδοχέα στη συνολική μη-οπτική αντίδραση του οργανισμού.

Συνεπώς, η συγκεκριμένη μετρική προσφέρει έναν ενιαίο και συγκριτικό δείκτη για τον σχεδιασμό φωτιστικών συνθηκών που λαμβάνουν υπόψη τόσο τις οπτικές ανάγκες όσο και τις βιολογικές επιπτώσεις του φωτός [60].

3.4.10 Κιρκάδια ισχύς

Στο πλαίσιο της αναζήτησης βελτιωμένων μετρικών για την αξιολόγηση των κιρκάδιων επιδράσεων του φωτός, παρουσιάστηκε πρόσφατα μια νέα προσέγγιση από την εταιρεία CIRCADIAN ZircLight [61] σε συνεργασία με την επιστημονική ομάδα του Martin Moore-Ede [62]. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε ιατρική και βιολογική έρευνα που διεξήχθη σε συνθήκες προσομοίωσης ενός τυπικού εργασιακού περιβάλλοντος, με χρήση διαφορετικών πολυχρωματικών φασμάτων λευκού φωτός.

Μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, καθορίστηκε μία νέα σχετική φασματική καμπύλη ευαισθησίας του ανθρώπινου κιρκάδικου συστήματος, η οποία βασίζεται σε σταθερής κατάστασης διέγερση (steady-state response) υπό παρατεταμένη έκθεση σε τεχνητό φως. Η ανάλυση έδειξε ότι το φάσμα από 437 nm έως 493 nm (κυρίως μπλε φως) είναι υπεύθυνο για το 76% της κιρκάδικης διέγερσης (circadian potency), όπως αποτυπώνεται στη σκιασμένη περιοχή στην καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στην Εικόνα 20. Οι μικρότερες και μεγαλύτερες τιμές μήκους κύματος εκτός αυτού του εύρους έχουν παροδικό χαρακτήρα δράσης στο κιρκάδικο σύστημα.



Εικόνα 19 Σχετική κιρκάδια φασματική ευαισθησία για τον υπολογισμό της κιρκάδιας ισχύος [62].

Η μετρική Circadian Potency ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που περιέχεται στο κρίσιμο φάσμα 437–493 nm προς την ολική ενέργεια σε όλο το ορατό φάσμα. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ως:

$$\text{Circadian Potency} = \frac{\text{Εμβαδόν κάτω από την καμπύλη (AUC) στο φάσμα 437–493 nm}}{\text{Συνολικό AUC στο ορατό φάσμα}} \quad (14)$$

Αυτός ο υπολογισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα και πρακτικά, με φορητά σπεκτροραδιόμετρα, χωρίς την ανάγκη πολύπλοκης φασματικής ανάλυσης ή μετρολογικών διαδικασιών.

Η μετρική Circadian Potency έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση φωτιστικών προϊόντων, όπως οι “night-safe” LED λυχνίες της Circadian ZircLight, οι οποίες εκπέμπουν λευκό φως με περιεκτικότητα σε μπλε φως κάτω από 2% ενέργειας στο κρίσιμο φάσμα 437–493 nm. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χώρους εργασίας νυχτερινής βάρδιας, χωρίς να καταστέλλουν την παραγωγή μελατονίνης και άρα χωρίς να διαταράσσουν τον κιρκάδιο ρυθμό.

Η μετρική Circadian Potency προσφέρει μια φυσιολογικά βασισμένη και εύχρηστη προσέγγιση για την αξιολόγηση του φωτός από την πλευρά της κιρκάδικης επίδρασης. Σε αντίθεση με άλλες μετρικές που στηρίζονται μόνο σε φωτοπικές ή μελανοπικές συνιστώσες,

η νέα αυτή προσέγγιση προτείνει έναν ποσοτικό δείκτη που συνδέεται άμεσα με τις βιολογικές επιδράσεις του φωτός στον άνθρωπο, σε πραγματικές συνθήκες.

3.4.11 Αποτελεσματική ισχύς και μελανοπικός- φωτοπικός λόγος

Η έλλειψη ενός καθολικά αποδεκτού μετρολογικού συστήματος που να ευθυγραμμίζεται με την φασματική απόκριση των ipRGCs, έχει οδηγήσει στην αναζήτηση κατάλληλων μετρικών για την μελανοψινική απόκριση του ανθρώπινου οργανισμού στο φως. Ανάμεσα στις πιο πρόσφατες προτάσεις, περιλαμβάνονται οι μετρικές "Effective Watts" και "Μελανοπικός-Φωτοπικός Λόγος", όπως παρουσιάστηκαν από τους Berman και Clear [63, 59]. Αυτές οι μετρικές είναι απλές και απόλυτα ευθυγραμμισμένες με τους ορισμούς των τυποποιημένων μονάδων της CIE.

Ο όρος Effective Watts (W_{eff}) αναφέρεται στην ποσότητα ενέργειας που είναι βιολογικά ενεργή για την ενεργοποίηση συγκεκριμένων φωτοϋποδοχέων, όπως τα κύτταρα ipRGCs που ευθύνονται για την μελανοψινική απόκριση. Ο υπολογισμός τους βασίζεται σε μια φασματική ενσωμάτωση της ισχύος της φωτεινής πηγής με κατάλληλη σταθμιστική συνάρτηση για κάθε φωτοϋποδοχέα:

$$W_{eff} = \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} P(\lambda) * S(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

Όπου

- $P(\lambda)$ η φασματική ισχύς της υπό εξέταση φωτεινής πηγής και
- $S(\lambda)$ η σταθμισμένη φασματική απόκριση ενός συγκεκριμένου φωτοϋποδοχέα.

Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας την μελανοπική καμπύλη ευαισθησίας, προκύπτουν τα Effective Melanopic Watts. Η μετρική αυτή διευκολύνει την άμεση σύγκριση μεταξύ της απορροφηθείσας ενέργειας και της συνολικής ισχύος της πηγής, επιτρέποντας την αξιολόγηση της βιολογικής απόδοσης μίας φωτεινής πηγής. Σε αντίθεση με τις μονάδες σε lumens ή lux, δεν συγχέεται με τις καθαρά οπτικές παραμέτρους, όπως η φωτοπική ή σκοτοπική απόκριση.

Η δεύτερη προτεινόμενη μετρική είναι ο Melanopic-Photopic Ratio, δηλαδή ο λόγος των αποτελεσματικών μελανοπικών milliwatts προς τα φωτοπικά lumens:

$$M/P \text{ Ratio} = \frac{\text{Μελανοπικά mW}}{\text{Φωτοπικά lm}} \quad (16)$$

Η μονάδα μέτρησης είναι effective mW/lm (αποτελεσματικά milliwatts ανά φωτοπικά lumen). Αυτή η μετρική διαφέρει από τον συχνότερα χρησιμοποιούμενο λόγο M/P που βασίζεται σε φωτιστική ισχύ (irradiance) και φωτεινή ένταση (illuminance), και χρησιμοποιείται από οργανισμούς όπως ο WELL Building Standard.

Ο λόγος αυτός βοηθά στον ποσοτικό προσδιορισμό της ικανότητας ενός φωτός να προκαλεί μελανοπική διέγερση, χωρίς να απαιτείται ειδικός εξοπλισμός μέτρησης ή πλήρες φασματικό προφίλ της φωτεινής πηγής. Επίσης, μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα μέσω του λόγου scotopic/photopic lumens (S/P), όταν δεν διατίθενται άμεσα M/P τιμές από τον κατασκευαστή.

Οι μετρικές W_{eff} και M/P είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στη μελέτη των μη οπτικών επιδράσεων του φωτός, όπως:

- η ρύθμιση της κόρης (μέγεθος της κόρης υπό διαφορετικά φασματικά ερεθίσματα),
- η αντίληψη της χωρικής φωτεινότητας,
- η πρόκληση κίρκαδικής διέγερσης, χωρίς να αλλοιώνεται το φωτοπικό περιβάλλον.

Ο M/P λόγος, όπως αναφέρουν και οι Berman et al., είναι αριθμητικά ταυτόσημος με την έννοια της "μελανοπικής απόδοσης φωτεινής ακτινοβολίας", όπως έχει οριστεί από την CIE

(2018) [44]. Επιπλέον, παρέχεται τύπος μετατροπής από το λόγο M/P σε μελανοπικά lux, επιτρέποντας τον υπολογισμό μελανοπικού φωτισμού με βάση το συνολικό φωτοπικό lux και τον M/P λόγο:

$$\text{Μελανοπικά lux} = 4.213 \times (\text{M/P} \times \text{Φωτοπικά lux}) \quad (17)$$

Η θεωρητική προσέγγιση των μετρικών Effective Watts και Melanopic-Photopic Ratios παρέχει ένα χρήσιμο πλαίσιο για την αξιολόγηση του βιολογικού αντίκτυπου του φωτός, ειδικά στο πλαίσιο του ανθρωποκεντρικού φωτισμού (HCL). Αν και δεν χρησιμοποιούνται ακόμη ευρέως στην πράξη, αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την ανάπτυξη πιο υγιεινών και φυσιολογικά συμβατών φωτιστικών συνθηκών.

3.4.12 Σχολιασμός μετρικών

Οι περισσότερες από τις μετρικές που έχουν προταθεί για την αξιολόγηση της κirkάδιας επίδρασης του φωτός βασίζονται στη νυχτερινή καταστολή της μελατονίνης ως μετρήσιμο βιολογικό δείκτη [56]. Αν και η μελατονίνη θεωρείται αξιόπιστος βιοδείκτης, ο προσδιορισμός της κάθε μετρικής απαιτεί γνώση της φασματικής κατανομής της φωτεινής πηγής, ώστε να εφαρμοστεί η αντίστοιχη καμπύλη φασματικής απόδοσης.

Ωστόσο, επειδή κάθε μετρική βασίζεται σε διαφορετικά πρότυπα κλιμάκωσης, κανονικοποίησης και μονάδων, δεν είναι δυνατό να συγκριθούν απευθείας μεταξύ τους. Αντίθετα, επιτρέπουν συγκρίσεις μεταξύ φωτεινών πηγών μόνο σε σχετική (τακτική) κλίμακα. Δηλαδή, μπορούν να κατατάξουν πηγές ως προς την kirkάδια επίδρασή τους, αλλά όχι να δώσουν απόλυτη μέτρηση συγκρίσιμη με άλλες μετρικές.

Στο πλαίσιο σχετικής βιβλιογραφίας, έχουν αναπτυχθεί πολλές μετρικές. Από αυτές, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιλεγμένες, που είναι:

- Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες στην πράξη, όπως οι:
 - Circadian Stimulus (CS)
 - Equivalent Melanopic Lux (EML)
- Καθώς και μετρικές που έχουν προταθεί από σημαντικούς διεθνείς οργανισμούς όπως η CIE (International Commission on Illumination), η οποία καθορίζει πρότυπα φωτισμού, μεθοδολογίες μέτρησης καθώς και την ορολογία τους.

Η επιλογή της καθολικά αποδεκτής "καλύτερης" μετρικής παραμένει ανοιχτή, καθώς κάθε μια από αυτές έχει πλεονεκτήματα και περιορισμούς, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, την ακρίβεια και τη δυνατότητα χρήσης.

Κατά τη χρήση μιας kirkάδιας μετρικής, είναι σημαντικό να εξετάζονται τα εξής:

- Ποια φασματική συνάρτηση δράσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό;
- Πώς έχει γίνει η κανονικοποίηση και η κλιμάκωση των τιμών;
- Ποια είναι η πραγματική μονάδα μέτρησης (π.χ. είναι όντως "lux" ή melanopic lux ή άλλη);
- Πληροί η μετρική τον νόμο της προσθετικότητας του Abney (δηλαδή αν μπορεί να συνδυάζεται φασματικά σωστά);

Παρά την ευρεία αποδοχή και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τον ανθρωποκεντρικό φωτισμό, υπάρχουν ορισμένες κριτικές που υπογραμμίζουν τους περιορισμούς της προσέγγισης αυτής. Οι Houser et al. (2021) επισημαίνουν ότι, παρόλο που ο HCL θεωρείται ως λύση που συνδυάζει θετικά την οπτική άνεση, την ψυχολογία και τη φυσιολογία του ανθρώπου, η υλοποίησή του δεν είναι πάντα ξεκάθαρη ή επιστημονικά επαρκώς τεκμηριωμένη. Οι συγγραφείς προτείνουν προσεκτική χρήση των υπαρχόντων εργαλείων μέτρησης, όπως το CS και το EML, ώστε να αποφεύγονται απλουστεύσεις και μη τεκμηριωμένες γενικεύσεις. Συνεπώς, ο επιστημονικά υπεύθυνος σχεδιασμός και η κριτική αξιολόγηση των εφαρμογών του HCL αποτελούν αναγκαία προϋπόθεση για την αποτελεσματική εφαρμογή του στην πράξη [64].

4 Προϊόντα για τον Ανθρωποκεντρικό Φωτισμό

4.1 Εισαγωγή

Πολυετείς έρευνες έχουν αναδείξει τη σημασία του ανθρωποκεντρικού ή κερκάρδιου φωτισμού στην ανθρώπινη υγεία. Μια πηγή φωτός ή ένα προϊόν φωτισμού δεν είναι από μόνο του κερκάρδιο ή ανθρωποκεντρικό, καθώς ο κερκάρδιος φωτισμός αξιολογείται στο επίπεδο των ματιών, στις τυπικές θέσεις των ανθρώπων μέσα σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Εξαρτάται επίσης από το συνδυασμό φυσικού και τεχνητού φωτισμού, καθώς και άλλων στοιχείων του χώρου, όπως τοίχοι και επίπλωση. Έτσι ο ανθρωποκεντρικός φωτισμός αφορά το σύνολο του συστήματος φωτισμού, σε σχέση με τους ανθρώπους, τους χώρους που χρησιμοποιούν, τις δραστηριότητες που εκτελούν και τον παράγοντα χρόνο.

Οι τεχνολογίες παρέχουν πολύτιμα εργαλεία για τον σχεδιασμό συστημάτων κερκάρδιου φωτισμού, με τις διόδους εκπομπής φωτός (Light Emitting Diodes - LED) να διακρίνονται για θεμελιώδη χαρακτηριστικά που είτε δεν διέθεταν είτε δεν ήταν αποδοτικά σε προηγούμενες πηγές φωτός.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των LED που υποστηρίζουν τον ανθρωποκεντρικό φωτισμό είναι:

- Ευρεία διαθεσιμότητα διαφορετικών θερμοκρασιών χρώματος (CCT).
- Μη εκπομπή υπέρυθρης ή υπεριώδους ακτινοβολίας.
- Ευκολία ρύθμισης της φωτεινής ροής (easily dimmable).
- Δυνατότητες σχεδιασμού ελεγχόμενης κατανομής φωτός.
- Ηλεκτρονικός έλεγχος τροφοδοσίας.
- Παραγωγή στοχευμένου φωτισμού υψηλής έντασης.
- Λειτουργία υπό χαμηλή τάση.
- Υψηλή ενεργειακή απόδοση.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής και αντοχή σε θερμοκρασιακές μεταβολές και κραδασμούς.
- Μείωση κόστους με την πάροδο του χρόνου λόγω χαμηλού κόστους συντήρησης [1, p. 157].

4.2 Ιστορική αναδρομή των διόδων εκπομπής φωτός

Οι δίοδοι LED εκπέμπουν φως σε περιορισμένο εύρος μήκους κύματος, παράγοντας έτσι έγχρωμο φως. Το 1962, ο Nick Holonyak Jr. κατασκεύασε το πρώτο LED με ορατό κόκκινο φως. Κατά τη δεκαετία του 1970, δημιουργήθηκαν LED διάφορων χρωμάτων, εκτός από το μπλε, το οποίο επιτεύχθηκε μόλις το 1994 από τους επιστήμονες Shuji Nakamura, Hiroshi Amano και Isamu Akasaki, οι οποίοι βραβεύτηκαν με το Νόμπελ Φυσικής το 2014. Η ανακάλυψή τους δημιούργησε μια νέα βιομηχανία, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη αποδοτικού φωτισμού και ηλεκτρικών οθονών [65].

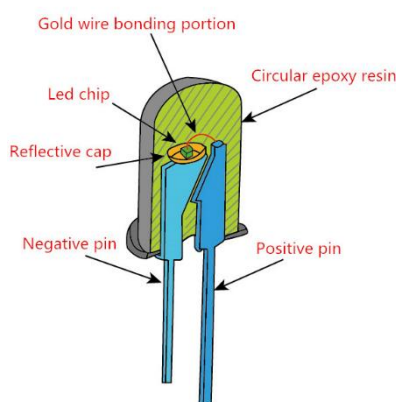
Πριν από την εφεύρεση του μπλε LED ήταν δυνατή η δημιουργία λευκού φωτός μέσω συνδυασμού LED διάφορων χρωμάτων. Η τεχνική αυτή όμως παρουσίαζε σοβαρά μειονεκτήματα. Κύριος περιορισμός ήταν η χαμηλή πραγματική χρωματική απόδοση του παραγόμενου φωτός και οι δυσκολίες λόγω διαφορετικών υλικών και απαιτήσεων τροφοδοσίας για κάθε χρώμα LED. Ένα λευκό φως υψηλής ποιότητας και χαμηλής πολυπλοκότητας επιτεύχθηκε μέσω μπλε LED επικαλυμμένου με κίτρινο φωσφορίζον υλικό, το οποίο μετασχημάτιζε το εκπεμπόμενο φάσμα σε ευρύτερο φάσμα που γίνεται αντιληπτό αντιλαμβάνεται ως λευκό φως το ανθρώπινο μάτι.

Στις αρχές της τρίτης χιλιετίας, οι διαθέσιμες στην αγορά λευκές λυχνίες LED είχαν περιορισμένη φωτεινή ροή, χαμηλότερη απόδοση συγκριτικά με τους λαμπτήρες φθορισμού και υψηλό κόστος. Κατά συνέπεια, οι περισσότεροι κατασκευαστές δεν τις θεωρούσαν ανταγωνιστική επιλογή έναντι των παραδοσιακών πηγών φωτισμού, τόσο για εσωτερική όσο και για εξωτερική χρήση. Ωστόσο, γύρω στο 2010, εμφανίστηκαν στην αγορά οι πρώτες λευκές λυχνίες LED με ενεργειακή απόδοση που ξεπερνούσε τους λαμπτήρες φθορισμού και μεταλλικών αλογονιδίων. Μέσα στα επόμενα χρόνια, αναπτύχθηκαν πηγές LED υψηλότερης

απόδοσης, χαμηλότερου κόστους και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής. Το 2014, η εταιρεία CREE ανακοίνωσε την κατασκευή της πρώτης λευκής λυχνία LED με απόδοση άνω των 300 lm/W, ένα εντυπωσιακό επίτευγμα συγκριτικά με τα 10-15 lm/W των παραδοσιακών λαμπτήρων πυρακτώσεως. Από το 2010 έως το 2016, οι λαμπτήρες LED αντικατέστησαν σταδιακά τους κοινούς λαμπτήρες.

Σήμερα, η διαδικασία εξέλιξης των λαμπτήρων LED βρίσκεται στο απόγειό της, με τα εσωτερικά νήματα των λαμπτήρων να κατασκευάζονται από ημιαγωγούς που προσομοιάζουν την κατανομή φωτεινών εντάσεων και την αισθητική των κλασικών λαμπτήρων πυρακτώσεως. Ταυτόχρονα, από το 2010, έχει αρχίσει μια νέα τάση σχεδιασμού στον τομέα του φωτισμού δρόμων, χώρων εργασίας και κατοικιών, με την ενσωμάτωση των πηγών φωτός LED απευθείας στα φωτιστικά σώματα, χωρίς τη χρήση λυχνιολαβής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χάνεται ο διαχωρισμός μεταξύ λαμπτήρα και φωτιστικού σώματος.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ολοκλήρωση της διάρκειας ζωής του προϊόντος συνεπάγεται την αποσυναρμολόγηση ολόκληρου του φωτιστικού. Παρόλα αυτά, ενώ παλιότερα η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων κυμαινόταν μεταξύ 1000 έως 10000 ωρών, σήμερα η διάρκεια ζωής ενός φωτιστικού LED μπορεί φτάσει τις 25000 έως 50000 ώρες και περιορίζεται κυρίως από τη διάρκεια ζωής της εσωτερικής μονάδας τροφοδοσίας. Συνεπώς, ένα φωτιστικό LED που λειτουργεί οκτώ ώρες την ημέρα μπορεί να διαρκέσει από 8 έως 17 χρόνια, ενώ αν χρησιμοποιείται για λίγες ώρες την ημέρα, αναμένεται να φτάσει έως και πενήντα χρόνια [1, pp. 158-160].



Εικόνα 20 Κατασκευαστική διαμόρφωση LED [66].

4.3 Βασικά στοιχεία για την τεχνολογία των διόδων εκπομπής φωτός

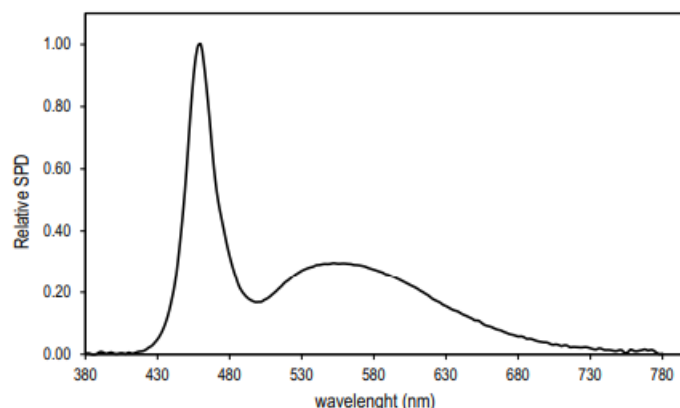
Οι φωτοεκπέμπουσες διόδοι (LED) αποτελούν οπτικοηλεκτρονικά στοιχεία που κατασκευάζονται με τη σύζευξη δύο τύπων ημιαγωγών, τύπου P και N, με προσμίξεις χημικών στοιχείων. Οι προσμίξεις αυτές αυξάνουν ή μειώνουν τον αριθμό ηλεκτρονίων στους δεσμούς του κρυσταλλικού πλέγματος. Η απουσία ηλεκτρονίων στους ατομικούς δεσμούς δημιουργεί οπές. Όταν ρέει ηλεκτρικό ρεύμα από τη ζώνη N (πλούσια σε ηλεκτρόνια) προς τη ζώνη P (πλούσια σε οπές), τα ηλεκτρόνια γεμίζουν τις οπές, μειώνοντας την ενέργειά τους και εκπέμποντας φωτόνια. Το μήκος κύματος του φωτός εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ζώνης P και της ζώνης N, δηλαδή από τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, εκπέμπουν μόνο έγχρωμο φως, το οποίο έχει υψηλό επίπεδο κορεσμού.

Η διαδικασία συνοδεύεται από παραγωγή θερμότητας, η οποία πρέπει να απάγεται από το τσιπ ημιαγωγού που περιέχει τη ζεύξη PN, για την αποφυγή βλάβης. Το φως εκπέμπεται μόνο όταν το LED είναι άμεσα πολωμένο και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα (DC).

Αν η τροφοδοσία γίνει με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), το LED παραμένει ενεργό για μικρό χρονικό διάστημα εντός κάθε κύκλου, με ενδεχόμενο να προκαλέσει φαινόμενα τρεμοπαίγματος (flickering). Για σταθερή λειτουργία απαιτείται σταθεροποίηση του ρεύματος.

Δεδομένου ότι τα LED εκπέμπουν μόνο έγχρωμο φως, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες για την παραγωγή λευκού φωτός. Η πιο συνηθισμένη περιλαμβάνει τη χρήση μπλε LED σε συνδυασμό με φωσφορίζον υλικό μετατροπής μήκους κύματος. Το μπλε φως διεγείρει το φωσφορίζον υλικό και μετατρέπεται σε φως μεγαλύτερου μήκους κύματος, με κορυφή συνήθως στην κίτρινη περιοχή, παράγοντας λευκό φως όπως το αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Σε παλαιότερες εκδόσεις παρατηρούνταν το φαινόμενο του «κίτρινου δακτυλίου», που σχετιζόταν με ανομοιόμορφη κατανομή του μπλε και του κίτρινου φωτός [67], πρόβλημα που έχει περιοριστεί σημαντικά με την πρόοδο των τεχνολογιών.

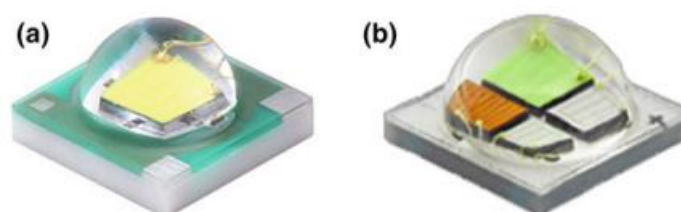
Η επιλογή του μπλε LED και του φωσφορίζοντος υλικού καθορίζουν τη θερμοκρασία χρώματος (CCT), τη χρωματική και τη φωτεινή απόδοση της πηγής. Οι πιο διαδεδομένες και οικονομικά αποδοτικές τεχνικές βασίζονται στη χρήση μπλε ή υπεριωδών LED (InGaN), με επικάλυψη από κίτρινο φώσφορο (Ce:YAG). Η μετατροπή φωσφόρου προσφέρει υψηλά επίπεδα χρωματικής απόδοσης, αλλά αυτό επιτυγχάνεται σε βάρος της συνολικής απόδοσης. Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται το σχετικό SPD ενός από τα πρώτα LED λευκού φωτός (CCT $\approx$ 10000 K), το οποίο βασίζεται σε μπλε LED, με μέγιστο μήκος κύματος 460 nm και επικάλυψη με κίτρινους φωσφόρους. Η καμπυλότητα στα 560 nm οφείλεται στο μετασχηματισμένο φως από τους κίτρινους φωσφόρους και το εκπεμπόμενο φως γίνεται αντιληπτό ως ψυχρό λευκό, με γαλάζια απόχρωση [1, pp. 161-162].



Εικόνα 21 Φάσμα που εκπέμπεται από ένα μπλε LED καλυμμένο με κίτρινους φωσφόρους [1].

4.4 Δίοδοι εκπομπής φωτός για φωτισμό

Για λόγους που οφείλονται στα κατασκευαστικά όρια των ημιαγωγών, η σύζευξη PN των LED έχει περιορισμένο μέγεθος με αποτέλεσμα ένα μεμονωμένο LED να μην είναι σε θέση να εκπέμψει την ίδια φωτεινή ροή με άλλες συμβατικές ηλεκτρικές πηγές φωτός. Επίσης, το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται από ένα LED δεν μπορεί να υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση της λυχνίας LED και να μην καεί. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα έχει επομένως αναπτύξει σύνθετες πηγές φωτός LED, που συνδυάζουν πολλαπλά LED για μεγαλύτερη φωτεινή ροή και απόδοση.



Εικόνα 22 Λυχνία LED ισχύος (α) και λυχνία LED πολλαπλών κυκλωμάτων (β) [1].

Οι λυχνίες LED πολλαπλών κυκλωμάτων συνδυάζουν LED διαφορετικών χρωμάτων και θερμοκρασιών (CCT), επιτυγχάνοντας μεγάλη ποικιλία αποχρώσεων και υψηλή χρωματική απόδοση. Αυτές οι συχνά μικρού μεγέθους πηγές επιτρέπουν τη συγκέντρωση μεγάλης ροής φωτός σε περιορισμένο χώρο και είναι ιδανικές για εφαρμογές όπως προβολείς.

Τα LED πολλαπλών κυκλωμάτων αποτελούν μια εναλλακτική μέθοδο της χρήσης μπλε LED και κίτρινων φωσφόρων, για την παραγωγή λευκού φωτός. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό LED διαφορετικών χρωμάτων, συνήθως RGB (κόκκινο, πράσινο και μπλε). Το πλεονέκτημά αυτής της μεθόδου είναι η δημιουργία μιας ποικιλίας λευκών χρωμάτων, από ψυχρό έως θερμό λευκό. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος αυτή παρέχει μειωμένη χρωματική απόδοση και αυξημένο κόστος, λόγω της πολυπλοκότητας του ηλεκτρονικού συστήματος τροφοδοσίας. Ορισμένοι κατασκευαστές δημιούργησαν πολύπριζα τύπου RGBW (κόκκινο, πράσινο, μπλε και λευκό), για καλύτερη απόδοση. Η μέθοδος αυτή πάντως δε συνιστάται σε εφαρμογές που απαιτούν μόνο λευκό φως [68].

Οι συστοιχίες LED, τεχνολογίας chip on board (COB), ενσωματώνουν μεγάλο αριθμό LED ισχύος σε μία πλακέτα. Χαρακτηρίζονται από ένα μόνο στρώμα φωσφόρου, οπότε η περιοχή εκπομπής φωτός είναι μεγαλύτερη από ότι στα συστήματα πολλαπλών τσιπ. Προσφέρουν υψηλή φωτεινή ροή και απόδοση συγκρίσιμη με συμβατικές πηγές φωτισμού, μεγαλύτερης όμως αποτελεσματικότητας. Η εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών απαιτεί μεγαλύτερη ηλεκτρονική πολυπλοκότητα, καθώς οι λυχνίες LED διαφορετικών χρωμάτων προϋποθέτουν ξεχωριστούς οδηγούς, που μπορεί να αυξήσουν το κόστος παραγωγής. Ωστόσο, η ύπαρξη διαφορετικών χρωματικών LED στο ίδιο προϊόν επιτρέπει την ανάμειξη χρωμάτων και την παραγωγή ευρείας ποικιλίας αποχρώσεων.



Εικόνα 23 COB LED συστοιχίες [1]

Στη συνέχεια, η ανάγκη για την απόκτηση πηγών φωτός με βελτιωμένα χαρακτηριστικά και μεγαλύτερη δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικούς τύπους εφαρμογών οδήγησε στην ανάπτυξη των μονάδων LED, ή αλλιώς μηχανών φωτός. Αυτές ενσωματώνουν υψηλή φωτεινή απόδοση και προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος, διαχείρισης και ελέγχου σε ένα συμπαγές πακέτο, διευκολύνοντας τη διαδικασία σχεδίασης φωτιστικών. Αυτές οι πηγές φωτός χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά εύκολη εφαρμογή και υψηλή αποδοτικότητα.

Μια νέα καινοτόμα προσέγγιση αποτελεί η τεχνολογία απομακρυσμένου φωσφόρου, όπου τα μπλε LED τοποθετούνται σε ένα θάλαμο ανάμειξης, βελτιώνοντας την απόδοση και τη διάρκεια ζωής, μειώνοντας την πιθανότητα επαναπορρόφησης φωτός.

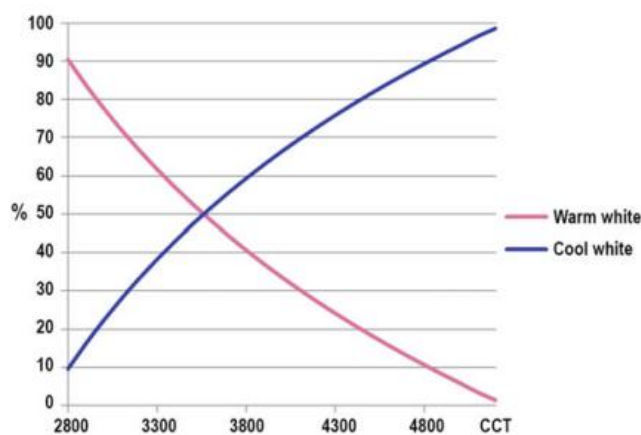
Υβριδικές λυχνίες LED που συνδυάζουν κόκκινα και λευκά LED, παρέχουν υψηλή χρωματική απόδοση και ομοιομορφία. Εταιρείες όπως η CREE και η Osram αναπτύσσουν τέτοιες καινοτόμες υβριδικές λύσεις για την επίτευξη λευκού φωτός. Τέλος, η Toshiba παρουσίασε την τεχνολογία TRI-R, που αναπαράγει με υψηλή χρωματική ακρίβεια το ηλιακό φως, χρησιμοποιώντας ειδικά LED και φωσφόρους.

Αυτές οι εξελίξεις δείχνουν τη συνεχιζόμενη πρόοδο στην τεχνολογία φωτισμού LED, επισημαίνοντας τις δυνατότητες προσαρμογής και βελτίωσης της ποιότητας του φωτός σε διάφορες εφαρμογές.

4.4.1 Ρυθμιζόμενοι λευκοί δίοδοι εκπομπής φωτός

Το ανθρώπινο κυκλώδιο σύστημα συγχρονίζεται στη φύση με τη διακύμανση του φυσικού φωτός ως προς την ποσότητα, την κατεύθυνση και τη θερμοκρασία χρώματος, από την ανατολή έως τη δύση του ήλιου. Η φυσική διακύμανση του φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη LED πηγών φωτισμού που επιτρέπουν χειροκίνητη ή με προγραμματισμένο σύστημα ελέγχου ρύθμιση της CCT.

Μία αξιόπιστη επιλογή είναι οι συστοιχίες LED COB για τη δημιουργία ρυθμιζόμενων λευκών συστημάτων σε εφαρμογές φωτισμού. Μεταξύ των διαφόρων προϊόντων που διατίθενται στην αγορά, ενδιαφέρον παρουσιάζει η τεχνολογία του προϊόντος Tiger Zenigata της Sharp (2014). Η πηγή αυτή αποτελείται από ένα COB στο οποίο δύο τύποι διαφορετικών φωσφόρων, με εναλλασσόμενες λωρίδες, τοποθετούνται σε μήτρα μπλε LED, με στόχο την παραγωγή μεταβλητής εκπομπής, από θερμό σε ψυχρό φως, εντός της ίδιας και συμπαγούς πηγής φωτός. Στη μήτρα, οι λυχνίες LED είναι συνδεδεμένες σε ξεχωριστά ηλεκτρικά κυκλώματα και επομένως μπορούν να ελέγχονται ανεξάρτητα σε δύο κανάλια. Όπως φαίνεται στην εικόνα 25, ρυθμίζοντας κατάλληλα το ποσοστό των ρευμάτων στα δύο κανάλια, επιτυγχάνεται μια λευκή πηγή φωτός, που παρέχει εύρος CCT και κυμαίνεται από 2800 έως 5500 K.



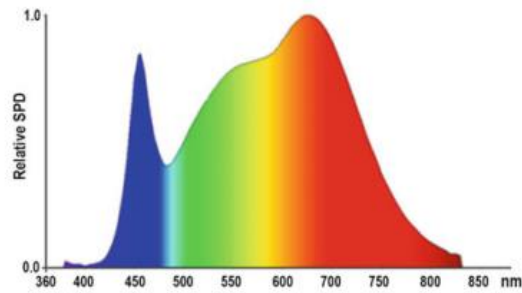
Εικόνα 24 Ποσοστό θερμού λευκού και ψυχρού λευκού φωτός που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής CCT [1].

Για παράδειγμα, αν ο στόχος είναι να επιτευχθεί CCT 3000 και 4000 K με την ανάμειξη δύο καναλιών, μπορούν να μετρηθούν οι κύριες τιμές της χρωματικής απόδοσης, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή χρωματική απόδοση: $R_a > 96$ (πίνακας 4). Επιπλέον, παρέχουν καλά αποτελέσματα οι δείκτες απόδοσης του κόκκινου (R_9) και του ροζ (R_{13}), δύο χρωμάτων που συνήθως καθίστανται δυσχερή στις λυχνίες LED.

Πίνακας 4 Τιμές LER και χρωματική απόδοση που μετρήθηκαν για το LED Sharp Tiger Zenigata [1].

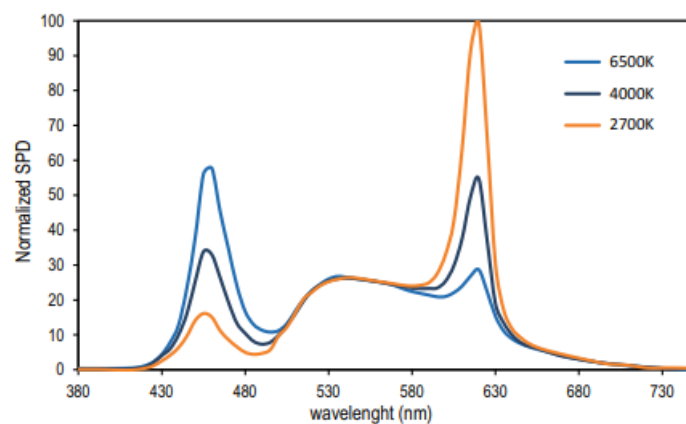
LED	Target CCT (K)	Measured CCT (K)	Warm (%)	Cool (%)	R_a	R_9	R_{13}	LER (lm/W)
Tiger Zenigata	3,000	2,929	83.43	16.57	97	85	100	269
Tiger Zenigata	4,000	3,946	38.37	61.63	96	86	98	279

Παρακάτω στην εικόνα 26 παρουσιάζεται το σχετικό SPD της πηγής όταν αυτή ρυθμίζεται ώστε να παρέχει CCT 3700 K. Από τη μορφή του φάσματος, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί η κορυφή εκπομπής που οφείλεται στο μπλε LED και οι δύο κορυφές εκπομπής, μία στην κίτρινη-πράσινη ζώνη και μία στην πορτοκαλί ζώνη, που οφείλονται στους δύο διαφορετικούς τύπους φωσφόρων που εφαρμόζονται στη μήτρα LED.



Εικόνα 25 SPD της συστοιχίας LED Sharp Tiger Zenigata σε θερμοκρασία 3700 K [1].

Άλλο παράδειγμα είναι στο σύστημα Tridonic Tunable White, το οποίο διαθέτει μονάδες LED με προηγμένες δυνατότητες ελέγχου. Στην εικόνα 27 παρουσιάζονται οι μετρούμενες τιμές SPD, κανονικοποιημένες στα 560 nm.



Εικόνα 26 SPD του ρυθμιζόμενου λευκού συστήματος Tridonic [1].

Αυτή η οικογένεια προϊόντων ήταν από τις πρώτες που κυκλοφόρησαν στην αγορά (2013) και σήμερα έχει χρωματική απόδοση (R_a) που μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 80 ή 90, ανάλογα με το μοντέλο. Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου στο σύστημα μονάδων LED καθιστούν δυνατή τη ρύθμιση της CCT διατηρώντας σταθερή τη ροή, η οποία με τη σειρά της μπορεί να ρυθμιστεί, από 3 έως 100%, ανεξάρτητα από την CCT. Η συγκεκριμένη οικογένεια προσφέρει τις κλασικές συμπαγείς μονάδες LED, με διάμετρο 5 cm, γραμμικές λύσεις μήκους έως και σχεδόν 30 cm, καθώς και τετράγωνες πηγές επιφάνειας με πλευρά 27 cm ή στρογγυλές με διάμετρο έως και 31 cm. Υπάρχουν επίσης αρθρωτά στοιχεία που μπορούν να συναρμολογηθούν για την κατασκευή μεγαλύτερων μηκών και ευρύτερων περιοχών. Το εύρος διακύμανσης της CCT εξαρτάται από τα μοντέλα και κυμαίνεται μεταξύ 2700 και 6500 K. Μια ενδιαφέρουσα πτυχή αυτού του συστήματος φωτισμού είναι ότι μπορεί να ελεγχθεί μέσω ασύρματης τεχνολογίας με το πρότυπο διεπαφής ψηφιακού διευθυνσιοδοτούμενου φωτισμού DALI (DALI 2017) που χρησιμοποιείται στον αυτοματισμό κτιρίων.

Ένα άλλο ενδιαφέρον σύστημα μονάδων LED είναι το LED Engine LuxiTune της Osram (2017), το οποίο παρέχει CCT και ροή που ρυθμίζονται ανεξάρτητα. Το σύστημα προσφέρει ανεξάρτητη ρύθμιση της CCT και της φωτεινής ροής, με εύρος 1800 – 6500 K και δυνατότητα προσομοίωσης λαμπτήρων αλογόνου, όταν χαμηλώνει η θερμοκρασία (δηλαδή στα 1600 – 3000 K). Διαθέτει μια μονάδα LED και οπτικά εξαρτήματα που καθιστούν δυνατή τη λήψη φωτεινών ακτίνων με διαφορετικά ανοίγματα, από 21° έως 45°. Για CCT 3000 K η πηγή αυτή έχει χρωματική απόδοση $R_a > 90$, ενώ ο μέσος όρος είναι 85. Η μονάδα μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα LMS χάρη σε μια σειρά ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ελέγχου και

επικοινωνίας. Αυτό το χαρακτηριστικό διευκολύνει την ενσωμάτωση των προϊόντων φωτισμού LED στον αυτοματισμό κτιρίων και τον ανθρωποκεντρικό φωτισμό του μέλλοντος. Πράγματι, εκτός από την κλασική συνδεσιμότητα με τα πρότυπα DALI και ψηφιακού πολυπλέκτη DMX512a με RDM (USITT 2013), προσφέρει επίσης τη δυνατότητα επικοινωνίας και ελέγχου μέσω ασύρματων δικτύων. Χάρη στα διαμορφώσιμα εξαρτήματα, το σύστημα υποστηρίζει επικοινωνία μέσω ασύρματων δικτύων χαμηλής ισχύος, όπως το Zigbee (2006) και το Bluetooth (2010) χαμηλής ενέργειας (BLE), τα οποία καθιστούν δυνατό τον έλεγχο και διευκολύνουν την ενσωμάτωση σε συστήματα αυτοματισμού κτιρίων.

Οι παραπάνω τεχνολογίες επιτρέπουν τη δημιουργία εξελιγμένων συστημάτων φωτισμού που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και στον ανθρωποκεντρικό φωτισμό μέσω έξυπνης ενσωμάτωσης αισθητήρων και συστημάτων διαχείρισης [1, pp. 162-170].

4.4.2 Επιπλέον παραδείγματα ρυθμιζόμενων λευκών διόδων εκπομπής φωτός

Οι ρυθμιζόμενες λύσεις φωτισμού LED αποτελούν βασικό μέσο για τη διαμόρφωση της ατμόσφαιρας ενός χώρου, καθώς επιτρέπουν αλλαγές στον φωτισμό, χωρίς αντικατάσταση ή προσθήκη νέων λαμπτήρων. Τα περισσότερα από αυτά τα προϊόντα διαθέτουν μονάδες LED με δύο θερμοκρασίες χρώματος (CCT), προσφέροντας ποικιλία αποχρώσεων.

Η Luminus παρουσίασε τη σειρά Gen 2 CCT tunable COBs, βελτιώνοντας τα προϊόντα της πρώτης γενιάς. Τα COB Gen 2 διαθέτουν δύο ανεξάρτητα κανάλια με Δείκτη χρωματικής απόδοσης (CRI) πάνω από 90 σε θερμό και ψυχρό λευκό, διατεταγμένα σε πολλαπλές λωρίδες για εξαιρετική ανάμειξη χρωμάτων και υψηλή πυκνότητα φωτεινής ροής. Επιτρέπουν γωνίες δέσμης από 10 έως 40 μοίρες χρησιμοποιώντας τυπικά οπτικά μέσα, παρέχοντας ομοιόμορφο χρώμα και υψηλή ποιότητα φωτός. Το εύρος CCT κυμαίνεται από 2700 K έως 6500 K, με σταθερό λευκό φως. Είναι ιδανικά για εμπορικές, οικιακές και κερκτικές εφαρμογές.

Τα συγκεκριμένα εύρη CCT είναι:

- 1800 K έως 4000 K για κατοικίες και χώρους φιλοξενίας
- 5000 K έως 2200 K για ανθρωποκεντρικό φωτισμό
- 2700 K έως 6500 K για εμπορικό φωτισμό

Πρόσθετα χαρακτηριστικά είναι η στιβαρή κατασκευή τεχνολογίας COB LM-80 και η εργοστασιακή δοκιμή στους $T_j = 85^\circ\text{C}$.

Για εύκολη μετάβαση από Gen 1 σε Gen 2, διατηρήθηκαν τα τυποποιημένα αποτυπώματα 12x15 mm και 20x24 mm, επιτρέποντας τη χρήση υπάρχοντος εξοπλισμού και υποδομών.

Πίνακας 5 *Dynamic COB Four Channel RGBW Tunable* (με τα κανάλια να είναι κόκκινο, πράσινο, μπλε και θερμό λευκό) *LEDs MP-1616 XNOVA Cube* σε μεταλλική πλακέτα PC.

Product image	Part number	LES diameter	Nominal watts per channel @200mA	Nominal voltage per channel @200mA	White (2700K, 90CRI) typical flux @200mA, 85°C	Blue (458nm dominant) typical flux @ 200mA, 85°C	Red (625nm dominant) typical flux @ 200mA, 85°C	Green (530nm dominant) @200mA, 85°C
	CTM-9-RGBW-12-TW01	9.5 mm	2 W	12 V	219	58	47	325
	CTM-14-RGBW-24-TW01	14 mm	4 W	24 V	438	115	94	650

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά Gen 2 CCT tunable COBs φωτιστικών της LUMINUS.

Product Image	Part Number	CRI (min)	Nom. Watts per Channel	CCT of Cool White	Nominal Lumens @ Tj=85°C	CCT of Warm White	Nominal Lumens @ Tj=85°C
	CTM-6-6527-90-36-TWD6-F3-3	90	5W	6500K	630 lm	2700K	550 lm
	CTM-6-4018-90-36-TWD6-F3-3	90	5W	4000K	660 lm	1800K	420 lm
	CTM-6-5022-90-36-TWD6-F3-3	90	5W	5000K Salud	590 lm	2200K	510 lm
	CTM-9-6527-90-36-TWD6-F3-3	90	8W	6500K	1065 lm	2700K	930 lm
	CTM-9-4018-90-36-TWD6-F3-3	90	8W	4000K	1120 lm	1800K	690 lm
	CTM-9-5022-90-36-TWD6-F3-3	90	8W	5000K Salud	1005 lm	2200K	855 lm
	CTM-14-6527-90-36-TWD6-F3-3	90	24 W	6500K	3080 lm	2700K	2700 lm
	CTM-14-4018-90-36-TWD6-F3-3	90	24 W	4000K	3315 lm	1800K	1940 lm
	CTM-14-5022-90-36-TWD6-F3-3	90	24 W	5000K Salud	2775 lm	2200K	2375 lm
	CTM-18-6527-90-36-TWD6-F3-3	90	30 W	6500K	5770 lm	2700K	5080 lm
	CTM-18-4018-90-36-TWD6-F3-3	90	30 W	4000K	5600 lm	1800K	3755 lm
	CTM-18-5022-90-36-TWD6-F3-3	90	30 W	5000K Salud	4760 lm	2200K	4160 lm
	CTM-22-6527-90-36-TWD6-F3-3	90	36 W	6500K	6480 lm	2700K	6010 lm
	CTM-22-4018-90-36-TWD6-F3-3	90	36 W	4000K	6440 lm	1800K	4400 lm
	CTM-22-5022-90-36-TWD6-F3-3	90	36 W	5000K Salud	5740 lm	2200K	5040 lm

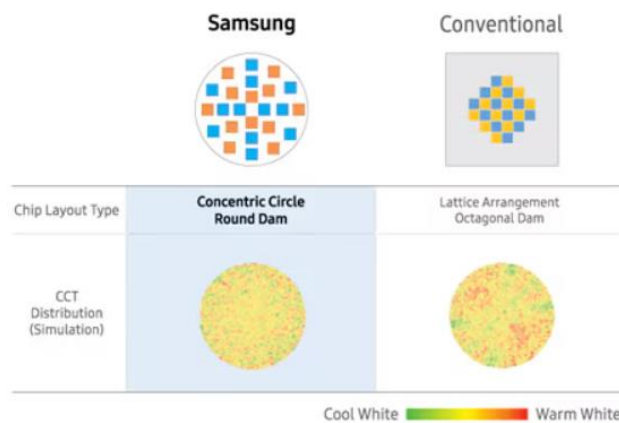
[69]

Η νέα σειρά Tunable LED, «T-series» chip-on-board (COB) της Samsung Electronics διαθέτει δυνατότητα συντονισμού λευκού χρώματος μέσα σε ένα ενιαίο πακέτο LED με τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας φωσφόρου και σχεδιασμό συσκευασίας σε κλίμακα τσιπ, προσφέροντας εξαιρετική ανάμειξη χρωμάτων. Κατά συνέπεια, οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται LED της σειράς T της Samsung μπορούν να παρέχουν κορυφαία απόδοση φωτός με σημαντικά βελτιωμένη ποιότητα χρώματος και μεγάλο εύρος στη θερμοκρασία χρώματος.

Οι συμβατικές ρυθμιζόμενες μονάδες LED απαιτούν διαχύτη για την ομαλή ανάμειξη των χρωμάτων, προσθέτοντας ένα επιπλέον στρώμα για να περάσει το φως και προκαλώντας πτώση στα επίπεδα φωτεινής απόδοσης. Αντίθετα η σειρά T δεν απαιτεί διαχύτη χάρη στην πλήρη κάλυψη των τσιπ με πράσινο φώσφορο, ο οποίος επιτρέπει σε φώτα με διαφορετικές θερμοκρασίες χρώματος να αναμειγνύονται και να παράγουν ένα ομοιογενές χρώμα μειώνοντας την απώλεια απόδοσης.

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά των Tunable White COB LED φωτιστικών.

	Wattage	FORWARD VOLTAGE	LUMINOUS FLUX @ 2700K	LUMINOUS FLUX @ 6500K	CONDITION	SIZE	LES
LC010T	10.0 W	35.5 V	1011 lm	1313 lm	280 mA, 35 V	19.0 x 19.0 mm	9.8 mm
LC020T	20.0 W	35.5 V	2022 lm	2626 lm	560 mA, 35 V	19.0 x 19.0 mm	13.0 mm
LC035T	35.0 W	35.5 V	3698 lm	4802 lm	980 mA, 35 V	28.0 x 28.0 mm	22.0 mm



Εικόνα 27 Σχεδιασμός COB της Samsung, με ομόκεντρη, κυκλική διάταξη τσιπ.

Ο σχεδιασμός COB της Samsung επιτρέπει στη σειρά T να προσφέρει υψηλό ποσοστό παραγωγής φωτός ανά επιφάνεια εκπομπής φωτός (LES) και χαμηλή θερμική αντίσταση σε ένα ενιαίο πακέτο LED. Επιπλέον, η μοναδική, ομόκεντρη κυκλική διάταξη τσιπ παρέχει υψηλή ομοιομορφία. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τη σειρά T ιδανική για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών φωτισμού εσωτερικών χώρων - ιδιαίτερα σε καταστήματα λιανικής πώλησης, ξενοδοχεία μπουτίκ και καφετέριες, όπου ο προβολέας υψηλής ποιότητας είναι απαραίτητος για την δημιουργία μιας ελκυστικής ατμόσφαιρας χώρου.

- Πιο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα:
 - Chip on Board (COB) το οποίο διευκολύνει το σχεδιασμό
 - Απλή συναρμολόγηση και μειωμένο κόστος κατασκευής
 - Χαμηλή θερμική αντίσταση
 - Αξιόπιστα LED InGaN/GaN MQW για μεγάλη διάρκεια ζωής
- Εφαρμογές:
 - Προβολέας / Downlights
 - Αναβαθμίσεις LED λαμπτήρων
 - Εξωτερικός φωτισμός

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά των τριών LED Tunable COB της Samsung.

LC010T



- White tunable with 2700K & 6500K color mixing
- LES: 9.8mm
- Footprint: 19mm x 19mm

CCT (K)	Luminous Flux (lm)	Efficacy (lm/W)
2700	1011	103
6500	1313	134

LC020T



- White tunable with 2700K & 6500K color mixing
- LES: 13mm
- Footprint: 19mm x 19mm

CCT (K)	Luminous Flux (lm)	Efficacy (lm/W)
2700	2022	103
6500	2626	134

LC035T



- White tunable with 2700K & 6500K color mixing
- LES: 22mm
- Footprint: 28mm x 28mm

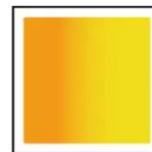
CCT (K)	Luminous Flux (lm)	Efficacy (lm/W)
2700	3698	108
6500	4802	140

[70]

Tunable White LED παράγει επίσης η Nichia. Συνδυάζοντας την τεχνογνωσία των LED και την τεχνολογία φωσφόρου, το 2 σε 1 Tunable White LED αναπτύχθηκε για να ελέγχει την ομαλή μετάβαση των CCT από 2700 K έως 6500 K σε μια ενιαία επιφάνεια εκπομπής φωτός ενός LED. Η δομή αυτή, βελτιώνει την απόδοση και την αισθητική, καθώς παράγει μικρότερα συστήματα και κομψότερα σχέδια φωτιστικών σωμάτων, χωρίς ογκώδεις θαλάμους ανάμειξης χρωμάτων.



Conventional method
(Low CCT+High CCT)



Tunable White

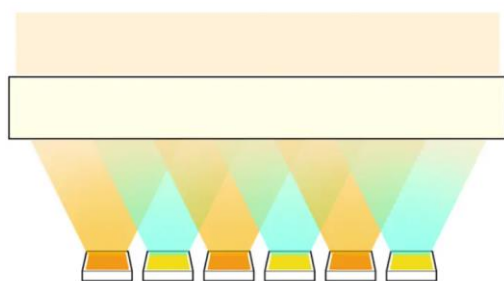
Εικόνα 28 Δύο LED με υψηλό και χαμηλό επίπεδο CCT ενωμένα σε ένα Tunable White LED.



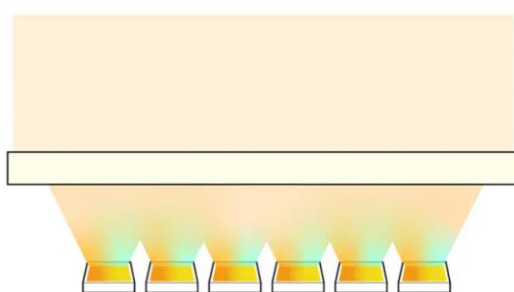
Εικόνα 29 Σύγκριση εναλλάξ θερμών και ψυχρών πηγών και tunable white φωτιστικών της NICHIA.

Πλεονεκτήματα της λύσης Nichia:

1. Δυνατότητα κατασκευής λεπτών, πιο συμπαγών φωτιστικών, με ομοιόμορφη εκπομπή φωτός.
2. Βελτιωμένη απόδοση φωτοεκρόφησης λόγω λεπτότερων διαχυτών.



Εικόνα 30 Συμβατικά LED, με CCT 2700 K και 6500 K εναλλάξ.

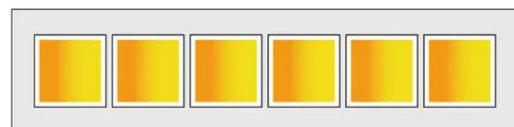


Εικόνα 31 Tunable white LED Nichia's.

3. Απλοποιημένος σχεδιασμός πλακέτας χάρη στην εναλλάξ ενσωμάτωση δύο θερμοκρασιών σε μία επιφάνεια LED.



Εικόνα 32 Συμβατικά LED με CCT 2700 και 6500 K εναλλάξ.



Εικόνα 33 Tunable white LED Nichia's.

4. Αλλαγή θερμοκρασίας χρώματος, ανέξοδα και άμεσα, χωρίς να απαιτείται αντικατάσταση των φωτιστικών.
5. Μειωμένη ανάγκη για μεγάλα αποθέματα διαφορετικών LED και φωτιστικών.

Η Nichia παρέχει δύο κατηγορίες tunable white LED φωτιστικών, τα series και τα COB. Τα COB διατίθενται σε εκδόσεις COB-B για υψηλή απόδοση και COB-Z για εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα φωτεινής ροής.

Πίνακας 9 Σύγκριση των *tunable white* προϊόντων της NICHIA. Τα δύο πρώτα ανήκουν στην κατηγορία *series* και τα 3 επόμενα στα COB.

										
Part No.	NF2W757G-MT (Tunable White, CRI 90)		NF2W757G-MT (Tunable White, CRI 80)		NJNWS012Z-V1MT (Tunable White)		NVCWJ024Z-V1MT (Tunable White)		NJCWL024Z-V1MT (Tunable White)	
Product Image										
Size (mm)	3×3×0.75		3×3×0.75		15×12×2		24×19×2		19×16×2	
Color	White	Warm White	White	Warm White	White	Warm White	White	Warm White	White	Warm White
Color Temperature (K)	6500	2700	6500	2700	5000	2700	5000	2700	5000	2700
Chromaticity Coordinate (x)	0.3123	0.4578	0.3123	0.4578	0.3447	0.4540	0.3447	0.4540	0.3447	0.4540
Chromaticity Coordinate (y)	0.3282	0.4101	0.3282	0.4101	0.3553	0.4000	0.3553	0.4000	0.3553	0.4000
Color Rendering Index	Ra≥90, R9≥50	Ra≥90, R9≥50	Ra≥80, R9>0	Ra≥80, R9>0	Ra≥90, R9≥50	Ra≥90, R9≥50	Ra≥90, R9≥50	Ra≥90, R9≥50	Ra≥90, R9≥50	Ra≥90, R9≥50
Forward Current (I _F) (mA)	65	65	65	65	280	280	600	600	250	250
Luminous Flux(Typ.) (lm)	27.5	26.5	32	31	630	460	2730	2080	1120	850
Luminous Intensity(Typ.) (cd)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Radiant Flux(Typ.) (W)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forward Voltage (Typ.) (V)	2.84	2.84	2.84	2.84	17.9	17.9	35.4	35.4	35.8	35.8
Directivity (degree)	120		120		120		120		120	
Thermal Resistance(R _{θJS}) (°C/W)	21		21		-		-		-	
Thermal Resistance(R _{θJC}) (°C/W)	-		-		3.6		0.53		2.1	
T _{opr} Max. (°C)	-40~100		-40~100		-40~105		-40~105		-40~105	
T _{stg} Max. (°C)	-40~100		-40~100		-40~100		-40~100		-40~100	
I _F Max. (mA)	180		180		450		1500		450	
T _J Max. (°C)	120		120		150		150		150	
Production Status	In production (Recommended model)		In production (Recommended model)		In production (Recommended model)		In production (Older model)		In production (Older model)	

[71]

5 Πρότυπα

5.1 Κ.Εν.Α.Κ.

Η ανάγκη για προστασία του περιβάλλοντος, μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οδήγησε την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) στην έκδοση της Κοινοτικής Οδηγίας 2002/91/ΕΚ, με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Η Ελλάδα ως μέλος και αυτή της ΕΕ, καθιέρωσε τον Νόμο 3661/2008, (ΦΕΚ Α' 89) «Μέτρα για τη μείωση της Ενεργειακής Κατανάλωσης των Κτιρίων και άλλες διατάξεις» και στη συνέχεια ακολούθησε έκδοση νέου νόμου, 4122/2013 (ΦΕΚ Α' 42) «Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων - Εναρμόνιση με την οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις». Οι νόμοι αυτοί κατέστησαν την εφαρμογή των προτύπων της Κοινοτικής Οδηγίας 2002/91/ΕΚ υποχρεωτική. Η αντίστοιχη αρμόδια ελληνική αρχή, το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (Τ.Ε.Ε) ανέλαβε, βασιζόμενη στην Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ και στο ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13790, την έκδοση του «Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων» (Κ.Εν.Α.Κ.) και των Τεχνικών Οδηγιών του Τ.Ε.Ε (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε) που τον απαρτίζουν.

Ο Κ.Εν.Α.Κ. εστιάζει στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, στοχεύοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, προάγει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την ενεργειακή αναβάθμιση και την εφαρμογή τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας. Καθιερώνει την έκδοση ενεργειακών πιστοποιητικών (Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης - Π.Ε.Α.) για τα κτίρια, τα οποία είναι απαραίτητα για την πώληση ή την ενοικίαση ακινήτων. Οι προδιαγραφές του Κ.Εν.Α.Κ. αφορούν τόσο τον εξωτερικό όσο και τον εσωτερικό σχεδιασμό των κτιρίων, περιλαμβάνοντας την κατασκευή, την αξιολόγηση της θερμομόνωσης, τα συστήματα θέρμανσης, κλιματισμού, αερισμού, φωτισμού και λοιπών ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου.

5.2 Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.

Το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (Τ.Ε.Ε.) ως τεχνικός Σύμβουλος της Πολιτείας συνέβαλε καθοριστικά στη σύνταξη του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) και των Τεχνικών Οδηγιών του Τ.Ε.Ε. (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.), όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι Τ.Ο.Τ.Ε.Ε συντάχθηκαν με σκοπό να αποτελέσουν εργαλείο για όλους τους συντελεστές που συμμετέχουν και συνεργάζονται για την ολοκλήρωση ενός έργου. Εξειδικεύουν τα πρότυπα των μελετών και των επιθεωρήσεων της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων στα ελληνικά κλιματικά δεδομένα, καθώς και στα δεδομένα τους.

Η εκπόνηση της παρούσας μελέτης βασίστηκε στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-7/2021: Τεχνητός και φυσικός φωτισμός κτιρίων. Καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας υπάρχουν οι αντίστοιχες αναφορές σε αυτήν όπου θεωρείται απαραίτητο.

Στόχος της Τεχνικής Οδηγίας «Τεχνητός και φυσικός φωτισμός των κτιρίων» είναι:

- να προσδιορίσει τα απαραίτητα βήματα μίας ορθής και τεκμηριωμένης μελέτης φωτισμού
- να καθορίσει τις απαιτήσεις φωτισμού για τον κατάλληλο σχεδιασμό ενός ανθρωποκεντρικού και βιώσιμου φωτισμού, ο οποίος ικανοποιεί την οπτική άνεση, την απόδοση και την ασφάλεια των χρηστών οι οποίοι έχουν απόκριση στο φως
- να διευρύνει το πεδίο γνώσης για την επίδραση της ποσότητας και της ποιότητας του φωτισμού στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον
- να αναδείξει τη σπουδαιότητα του φυσικού φωτισμού με χρήση μετρήσιμων μεγεθών, καθώς και τη συμβολή του στην εξοικονόμηση ενέργειας
- να καθορίσει τη μεθοδολογία υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας και της επιτυγχανόμενης εξοικονόμησης ενέργειας για φωτισμό
- να καθορίσει τον τρόπο οικονομοτεχνικής αξιολόγησης ενός έργου φωτισμού

- να θέσει σε επαγρύπνηση τους μελετητές φωτισμού για τη σημασία του έργου, λαμβάνοντας υπόψη τους μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία σχεδιασμού (integrative lighting) με την οποία παρέχεται φωτισμός όπου, όταν και όσο χρειάζεται (proper light at the proper time).

Η παραπάνω οδηγία δεν δίνει ειδικές λύσεις, ούτε απαιτήσεις για αισθητικό ή ατμοσφαιρικό φωτισμό. Επιπλέον, δεν περιορίζει την ελευθερία των μελετητών από το να εξερευνούν νέες τεχνικές και να κάνουν χρήση καινοτόμου εξοπλισμού και φωτιστικών σωμάτων [13, p. 1].

5.3 Πρότυπο κτιρίου

Το πρότυπο WELL Building Standard® εστιάζει στην υγεία, την ευεξία και την άνεση των ανθρώπων που διαβιούν και εργάζονται στα κτίρια, καλύπτοντας παραμέτρους όπως τον αέρα, το νερό, τη διατροφή, το φως, τη φυσική δραστηριότητα, την άνεση και την ψυχική υγεία. Βασίζεται σε επιστημονικά δεδομένα προκειμένου να προσδιορίσει πώς ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία ενός κτιρίου μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής των χρηστών του. Το πρότυπο εφαρμόζεται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους, όπως γραφεία, εκπαιδευτικά ιδρύματα, κέντρα υγείας, ξενοδοχεία και άλλους χώρους όπου η ευεξία των χρηστών αποτελεί προτεραιότητα. Επιπλέον, παρέχει ένα σύστημα πιστοποίησης και αξιολόγησης κτιρίων με βάση συγκεκριμένα κριτήρια που σχετίζονται με την ανθρώπινη ευεξία.

Οι ισχύοντες κώδικες και οδηγίες φωτισμού παρέχουν συστάσεις για διάφορους τύπους χώρων, βασισμένες στις τυπικές απαιτήσεις φωτισμού ανάλογα με τις δραστηριότητες που εκτελούνται σε αυτούς. Τα εν λόγω πρότυπα, που έχουν αναπτυχθεί από εξειδικευμένους φορείς όπως η Illuminating Engineering Society (IES), διασφαλίζουν κατάλληλες συνθήκες οπτικής άνεσης και ευκρίνειας, συμβάλλοντας έτσι στην αποφυγή της κόπωσης των ματιών, στην πρόληψη των πονοκεφάλων και στην ελαχιστοποίηση των διαταραχών του κιρκάδιου συστήματος, τη βελτίωση της παραγωγικότητας, την υποστήριξη της καλής ποιότητας ύπνου, καθώς και την εξασφάλιση επαρκούς οπτικής άνεσης και ευκρίνειας, ανάλογα με τις ανάγκες του χώρου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις βιολογικές επιδράσεις του φωτισμού, με την εισαγωγή και εφαρμογή συγκεκριμένων μετρικών, όπως η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού (Equivalent Melanopic Lux – EML), η οποία αποτελεί το βασικό κριτήριο αξιολόγησης της κιρκάδιας αποτελεσματικότητας του φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο WELL Building Standard v2 (2019). Αυτή η προσέγγιση υπογραμμίζει τη σημασία της σωστής έκθεσης στο φως για τη βελτίωση της συνολικής ευεξίας των χρηστών και αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την καθιέρωση ανθρωποκεντρικών κριτηρίων στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των κτιριακών εγκαταστάσεων [46].

Μέρος Β. Πρακτικό μέρος

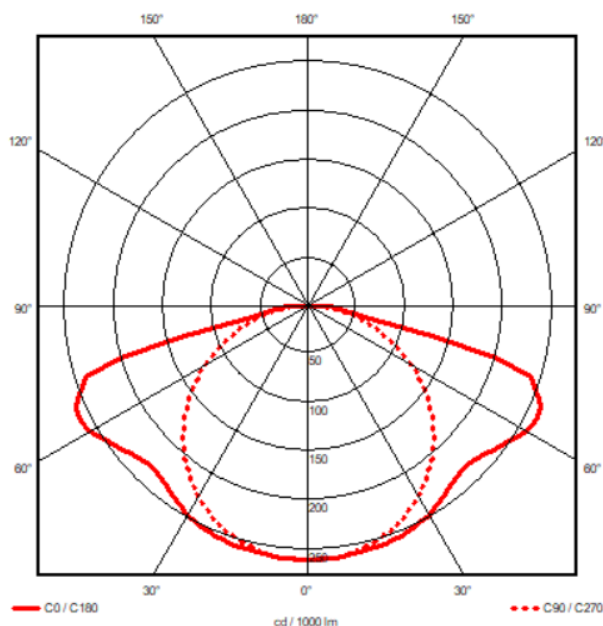
Εισαγωγή

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία. Αρχικά επιλέγεται το φωτιστικό σώμα Tunable White LED Panel. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι κατάλληλες μετρήσεις για τον προσδιορισμό των τεχνικών παραμέτρων του επιλεγμένου φωτιστικού, δηλαδή των φωτομετρικών, ηλεκτρικών και φασματικών παραμέτρων. Το επόμενο βήμα είναι η αξιοποίηση ενός λογισμικού προσομοίωσης φωτισμού (στη συγκεκριμένη εργασία αυτό είναι το RELUX [72]) για τη διενέργεια υπολογισμών σε έναν τυπικό χώρο γραφείων και σε μια τυπική αίθουσα διαλέξεων πανεπιστημίου. Μετά από τις προσομοιώσεις φωτισμού υπολογίζονται στο RELUX η φωτοπική και η μελανοπική ένταση φωτισμού και έπειτα οι μετρικές του ανθρωποκεντρικού φωτισμού. Το τελικό βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού φωτισμού λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας καθώς και τις φωτοπικές και μελανοπικές επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού.

6 Περιγραφή του φωτιστικού

6.1 Φωτομετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτιστικού ρυθμιζόμενων λευκών διόδων εκπομπής φωτός.

Το φωτιστικό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη είναι το Tunable White LED Panel της εταιρείας PETRIDIS. Είναι φωτιστικό τύπου Tunable White LED Panel, χωνευτό στην οροφή. Έχει τετράγωνο σχήμα και οι διαστάσεις του είναι, μήκος 598 mm, πλάτος 598 mm και ύψος 98 mm. Η φωτεινή απόδοσή του έχει σε όλες τις θερμοκρασίες χρώματος ίδια τιμή 100 lm/W. Στην Εικόνα 35 φαίνεται το φωτιστικό σώμα στο χώρο του εργαστηρίου, όπου έγιναν οι μετρήσεις. Στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται σε πολικό διάγραμμα, η κατανομή της φωτεινής έντασης του φωτιστικού σώματος, η οποία είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία χρώματος.



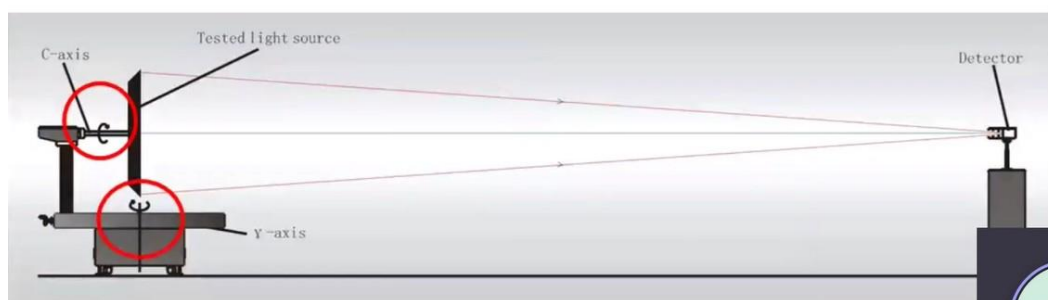
Εικόνα 34 Διάγραμμα κατανομής φωτεινής έντασης και γωνία ακτινοβολίας της φωτεινής πηγής.



Εικόνα 35 Φωτιστικό Tunable White LED Panel

Το φάσμα του φωτιστικού μετρήθηκε υπό τυποποιημένες συνθήκες στο Εργαστήριο Φωτομετρίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ο χώρος δοκιμής είναι ένα σκοτεινό δωμάτιο (20 m x 7 m x 4 m) με επιφάνειες βαμμένες με μαύρο ματ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος διατηρήθηκε σταθερή στους 25°C και η τάση εισόδου στα 230 V AC, 50 Hz μέσω του σταθεροποιητή τάσης για όλες τις δοκιμαζόμενες συνθήκες. [73]

Για να πραγματοποιηθεί η γωνιοφωτομέτρηση, το φωτιστικό τοποθετήθηκε στο γωνιοφωτόμετρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 37, με τον αισθητήρα να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, συγκεκριμένα στα 9.9 m. Αυτή η απόσταση επιλέχθηκε για να μπορεί να θεωρηθεί σημειακή η πηγή (και να ισχύουν οι νόμοι της φωτομετρίας), αλλά και για να μπορεί να αντιλαμβάνεται ο αισθητήρας ολόκληρη την φωτεινή επιφάνεια. Γενικά ισχύει ο κανόνας του 1 προς 5, δηλαδή η απόσταση του αισθητήρα από το φωτιστικό πρέπει να είναι 5 φορές μεγαλύτερη από τη μεγάλη διάσταση της φωτεινής επιφάνειας. Για ένα πάνελ 60 cm x 60 cm όπως του φωτιστικού που εξετάζουμε, ισχύει ο πρακτικός κανόνας πως η ελάχιστη απόσταση πρέπει να είναι τουλάχιστον $0.5 * 0.6 = 3$ m.



Εικόνα 36 Γωνιοφωτομέτρηση

Γύρω του έχει ένα περίβλημα, για να επικεντρώνεται το οπτικό του πεδίο μόνο στη φωτεινή πηγή και να μην συλλέγει παράσιτο φωτισμό από ανακλάσεις. Για την ελαχιστοποίηση αυτών, οι τοίχοι και οι περιβάλλουσες επιφάνειες έχουν ή καλύπτονται με μαύρο χρώμα. Τα υπόλοιπα φώτα του εργαστηρίου είναι σβηστά όταν γίνονται οι μετρήσεις.



Εικόνα 37 Αισθητήρας

Οι μετρήσεις έγιναν με το φωτιστικό να βρίσκεται στην ονομαστική τιμή της θερμοκρασίας χρώματος (CCT), δηλαδή στους 4000 K. Δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί γωνιοφωτομέτρηση σε κάθε θερμοκρασία χρώματος καθώς δεν αλλάζει η κατανομή της φωτεινής έντασης, ούτε το πολικό του διάγραμμα.

Το φωτιστικό τοποθετήθηκε στο γωνιοφωτόμετρο. Το γωνιοφωτόμετρο περιστρέφει το προς μέτρηση φωτιστικό, ως προς τον άξονά του με βήμα 15°, σε 7 επίπεδα (C0, C15, C30, C45, C60, C75, C90). Σε κάθε επίπεδο C, καταγράφονται με βήμα $\gamma = 2.5^\circ$ οι γωνίες γ , που φτάνουν μέχρι 90°, γιατί το φωτιστικό που εξετάζεται είναι φωτιστικό οροφής (downlight). Σε κάθε ζεύγος συντεταγμένων (C, γ) καταγράφεται η ένταση φωτισμού του αισθητήρα.

Πιο αναλυτικά, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 39, η βάση του γωνιοφωτόμετρου στρέφεται κατά κάποια γωνία ως προς το λουξόμετρο που είναι σταθερό απέναντί του, ώστε το φωτιστικό στο συγκεκριμένο επίπεδο C να είναι και αυτό ως προς κάποια γωνία γ αντίστοιχα, ως προς τον αισθητήρα του λουξομέτρου. Με αυτές τις δύο περιστροφές είναι σαν να σχηματίζεται μια «σφαίρα» γύρω από το φωτιστικό ώστε να υπολογίζεται σε όλα τα επίπεδα C, αλλά και σε όλες τις γωνίες γ κάθε επιπέδου C, τι στέλνει το φωτιστικό στον αισθητήρα. Για να επιβεβαιωθεί η συμμετρία ενός φωτιστικού πρέπει να μετρηθούν όλα τα επίπεδα. Δεν μπορεί να θεωρηθεί πως ισχύει αυθαίρετα. Πριν από την έναρξη της μέτρησης, το φωτιστικό σώμα σταθεροποιείται ως προς τις φωτομετρικές και ηλεκτρικές παραμέτρους του.



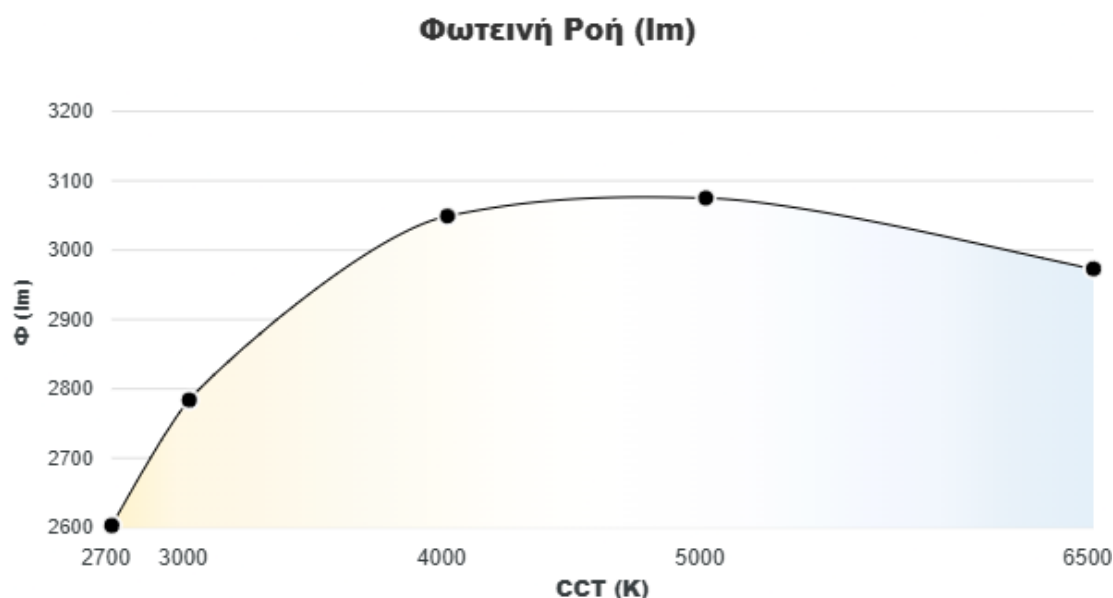
Εικόνα 38 Γωνιοφωτόμετρο

Στον Πίνακα 10 παρακάτω παρουσιάζονται η ονομαστική CCT, η μετρούμενη CCT, η απόκλιση που παρουσιάζουν, η φωτεινή ροή, η ισχύς, καθώς και η χρωματική και φωτεινή απόδοση του φωτιστικού σώματος. Παρατηρώντας τον πίνακα, η φωτεινή ροή αυξάνεται καθώς αυξάνεται η CCT, μέχρι τους 5000 K, όπου φτάνει στη μέγιστη τιμή της (3075 lm). Η ενεργός ισχύς παραμένει σχετικά σταθερή, με την ελάχιστη τιμή της στα 54.7 W (για ονομαστικές τιμές CCT 4000 K) και τη μέγιστη στα 57.9 W (για CCT 2700 K και 6500 K). Η φωτεινή απόδοση φτάνει τη μέγιστη τιμή της (δηλαδή τα 55.78 lm/W) στους 4000 K, με επόμενη και πολύ κοντινή στους 5000 K (55.73 lm/W), ενώ έχει την ελάχιστη τιμή της στους 2700 K (44.92 lm/W). Η τιμή πέφτει αρκετά χαμηλά, λόγω του υψηλού δείκτη χρωματικής απόδοσης ($CRI > 90$). Η φωτεινή ροή αυξάνεται καθώς η CCT αυξάνεται από τους 2700 K έως τους 4000 K και παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι τους 5000 K ενώ στη συνέχεια χαρακτηρίζεται από πτωτική τάση. Η τυπική απόκλιση είναι 4.56 lm/W. Ο CRI έχει μέγιστη τιμή 96 και ελάχιστη 93. Παρουσιάζει ποσοστιαία διακύμανση 3.23% μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής και τυπική απόκλιση 1.17. Η απόκλιση της ονομαστικής CCT έναντι της μετρούμενης CCT κυμαίνεται από 1.12% (6500 K έναντι 5573 K) έως 3.43% (3000 K έναντι 3103 K). Μια τέτοια μικρή απόκλιση είναι αναμενόμενη.

Πίνακας 10 Φωτομετρικά, ηλεκτρικά και χρωματικά αποτελέσματα μετρήσεων για τα βασικά μεγέθη του φωτιστικού.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος [K]	Μετρηθείσα θερμοκρασία χρώματος [K]	Απόκλιση CCT [%]	Φωτεινή Ροή [lm]	P [W]	Χρωματική απόδοση [CRI]	Φωτεινή απόδοση [lm/W]
2700	2742	1.56	2603	57.9	93	44.92
3000	3103	3.43	2784	56.2	93	49.56
4000	4127	3.18	3049	54.6	95	55.78
5000	5073	1.46	3075	55.2	96	55.73
6500	6573	1.12	2973	57.8	94	51.43

Παρακάτω, το γράφημα 1 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της φωτεινής ροής (lm) και της θερμοκρασίας χρώματος (CCT), για τις πέντε τιμές CCT που μελετήθηκαν στον πίνακα 10. Παρατηρείται ότι η φωτεινή ροή αυξάνεται έντονα καθώς μεταβαίνουμε από τις χαμηλότερες θερμοκρασίες (2700 K) προς τις ενδιάμεσες τιμές (4000 K και 5000 K), φτάνοντας το μέγιστό της περίπου στους 5000 K. Μετά από αυτή την κορύφωση, παρατηρείται σταδιακή μείωση της φωτεινής ροής όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μέχρι τους 6500 K. Συμπερασματικά, οι θερμοκρασίες χρώματος των 4000 έως 5000 K παρέχουν τη μεγαλύτερη φωτεινή απόδοση, γεγονός που τις καθιστά ιδανική επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν αυξημένο και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικό φωτισμό.

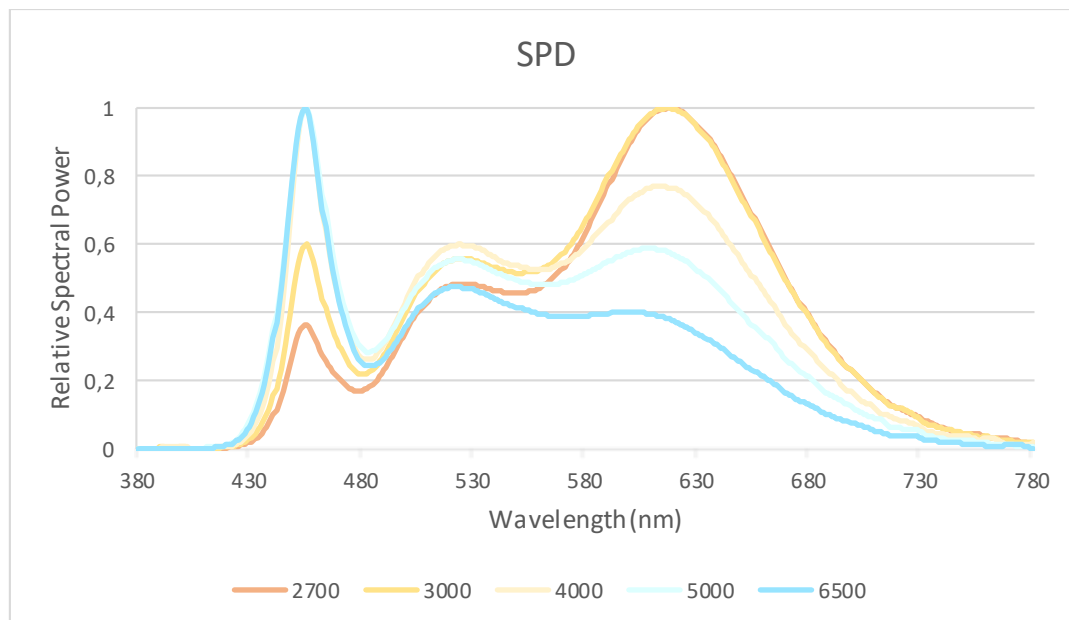


Γράφημα 2 Διάγραμμα φωτεινής ροής για τις θερμοκρασίες χρώματος 2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6500 K.

Η γενική αρχή στη βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι, σε πολλές περιπτώσεις, η αύξηση της θερμοκρασίας χρώματος (CCT) σχετίζεται με αύξηση της φωτεινής ροής (luminous flux). Ωστόσο, αυτή η σχέση δεν είναι απόλυτη και μπορεί να επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η τεχνολογία του φωτιστικού, τα χαρακτηριστικά των LED και οι συνθήκες λειτουργίας. Στο συγκεκριμένο φωτιστικό παρατηρείται κορύφωση της φωτεινής ροής στους 5000 K και ελαφρά μείωση προς τους 6500 K. Αυτό το γεγονός δεν υποδηλώνει κάποιο πρόβλημα του φωτιστικού, αλλά αποτελεί μια συγκεκριμένη ιδιαιτερότητα του σχεδιασμού και της τεχνολογίας που χρησιμοποιεί η εταιρεία.

6.2 Μετρήσεις φωτιστικού

Μετρήθηκε μέσω της εφαρμογής TRIDONIC το φάσμα εκπομπής στην ορατή περιοχή, μεταξύ 360 nm και 780 nm, σε διαφορετικές τιμές συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος (CCT). Το φωτιστικό σώμα ρυθμίστηκε στη μέγιστη φωτεινή του ένταση και καταγράφηκαν οι τιμές του φάσματος για τα παραπάνω μήκη κύματος, σε πέντε ονομαστικές τιμές CCT, 2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K. Στο γράφημα 3 παρουσιάζεται το SPD των πέντε αυτών CCT.



Γράφημα 3 Διάγραμμα SPD για τις πέντε τιμές CCT που εξετάστηκαν.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 42 διαφορετικές μετρήσεις, εντός του εύρους των ονομαστικών τιμών 2700 K έως 6500 K. Οι πρώτες 10 έγιναν με το φωτιστικό να είναι ρυθμισμένο στους 4000 K και με την φωτεινή του ένταση να μεταβάλλεται από 100% μέχρι το 0, με βήμα 10%. Το επόμενο πακέτο μετρήσεων, από την μέτρηση 11 έως την 26, πραγματοποιήθηκε με το φωτιστικό να βρίσκεται στο 100% της φωτεινής του ρύθμισης και μεταβολή της ονομαστικής τιμής της CCT από τους 6500 K, μέχρι τους 2700 K, με το βήμα να εναλλάσσεται από 200 K σε 300 K. Οι υπόλοιπες μετρήσεις μέχρι την 42, αφορούσαν τόσο διαφορετικές τιμές CCT, αλλά και μεταβολή της φωτεινής στάθμης του φωτιστικού. Εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές ονομαστικές τιμές CCT (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6500 K) με τη φωτεινή στάθμη να ρυθμίζεται από 100% μέχρι 0, με βήμα 20%.

Πιο αναλυτικά, καταγράφηκαν τα αποτελέσματα των διάφορων τιμών που δίνει το φωτιστικό όταν βρίσκεται στην ονομαστική τιμή θερμοκρασίας χρώματος, δηλαδή στους 4000 K, με τη ρύθμιση της φωτεινής στάθμης να ξεκινά από το 100% και με βήμα 10% να μειώνεται μέχρι το 0.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις αυτές, καθώς και η απόκλιση της CCT που μετρήθηκε σε σχέση με την ονομαστική τιμή των 4000 K και η φωτεινή ροή. Επίσης παρουσιάζεται η τάση, το ρεύμα, η ενεργός και άεργος ισχύς καθώς και ο συντελεστής ισχύος. Η απόκλιση της ονομαστικής CCT έναντι της μετρούμενης κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, από 2% μέχρι 3.18%. Είναι σε τέτοια επίπεδα, ώστε να παρέχεται αξιόπιστα το κατάλληλο φάσμα και κατά συνέπεια, η ονομαστική CCT. Ο συντελεστής ισχύος ελαττώνεται αρκετά με τη μείωση της φωτεινής ροής, ενώ από το 40% και κάτω πέφτει πιο χαμηλά από 0.9, που είναι η απαίτηση για να είναι ένα φωτιστικό αποδοτικό.

Πίνακας 11 Μετρήσεις μεταβάλλοντας τη φωτεινή στάθμη με βήμα 10% και κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία χρώματος στους 4000 K.

A/A	Light Output	P [W]	Ένταση φωτισμού [lx]	Μετρηθείσα CCT [K]	Απόκλιση CCT [%]	Φωτεινή Ροή [lm]	U rms [V]	I rms [A]	S [VA]	Q [VAr]	Power Factor
1	100%	54.48	8.05	4127	3.18	3049	230.01	0.2433	55.95	-12.78	0.97
2	90%	48.81	7.3	4121	3.03	2731.93	230.05	219	50.38	-12.49	0.97
3	80%	43.80	6.64	4127	3.18	2451.64	230.06	197.47	45.43	-12.04	0.96
4	70%	38.36	5.85	4126	3.15	2146.71	230.8	174.69	40.19	-12.02	0.95
5	60%	32.70	5.03	4118	2.95	1830.26	230.11	150.97	34.74	-11.72	0.94
6	50%	27.98	4.32	4115	2.88	1565.75	230.15	131.6	30.29	-11.61	0.92
7	40%	22.71	3.42	4115	2.88	1271.01	230.18	110.7	25.48	-11.56	0.89
8	30%	17.79	2.63	4102	2.55	995.64	230.01	92.71	21.32	-11.76	0.83
9	20%	12.88	1.76	4092	2.30	720.66	230.03	76.83	17.67	-12.11	0.73
10	10%	8.04	0.892	4080	2.00	449.77	230.05	52.94	12.18	-9.15	0.66
	0%	0.47	0	-	-	26.36	230.09	25.99	5.981	-5.962	0.08

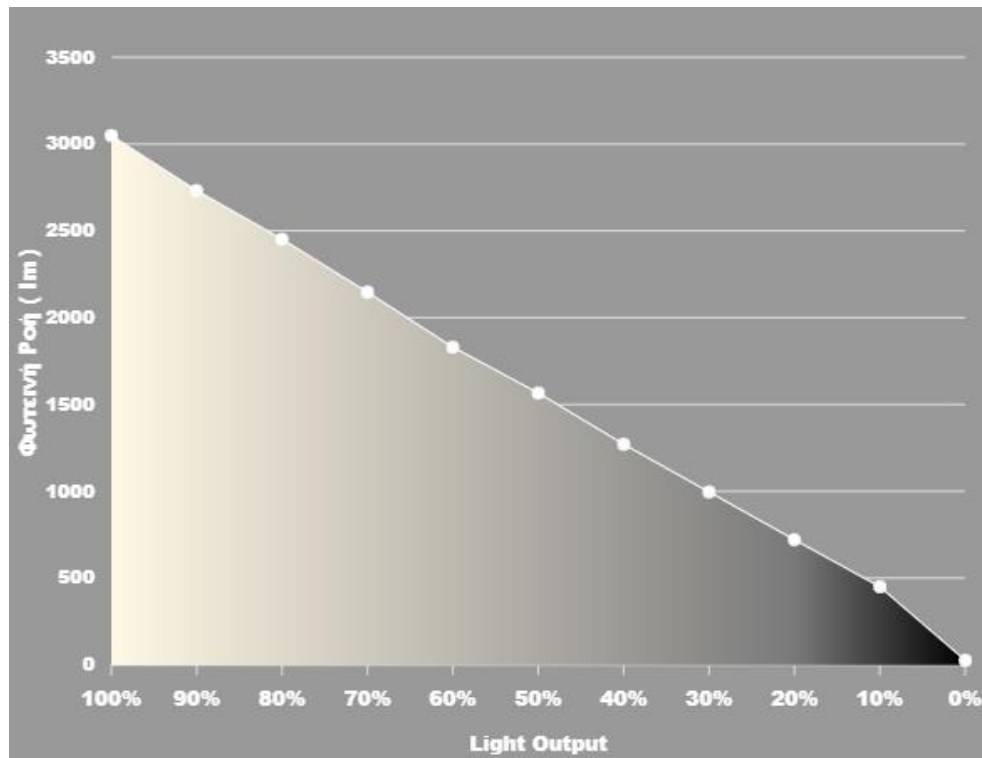
Δίνεται από τον κατασκευαστή η ονομαστική φωτεινή ροή του φωτιστικού $\Phi_{nominal} = 3049 \text{ lm}$. Με βάση αυτή υπολογίζεται και καταγράφεται σε μια στήλη του παραπάνω πίνακα, η τιμή της φωτεινής ροής που έχει αυτό το φωτιστικό, για κάθε φωτεινή στάθμη ξεκινώντας από το μέγιστο και μειώνοντας με βήμα 10%. Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\Phi_{dimmed} = \Phi_{nominal} \times \frac{P_{dimmed}}{P_{nominal}} \quad (18)$$

Η φωτεινή απόδοση υποδηλώνει πόσο αποτελεσματικά μετατρέπει μια πηγή φωτός την ηλεκτρική ισχύ σε ορατό φως. Η αποδοτικότητα του συγκεκριμένου φωτιστικού υπολογίζεται όταν βρίσκεται στο 100% της φωτεινής ροής, στους 4000 K, από τον παρακάτω τύπο:

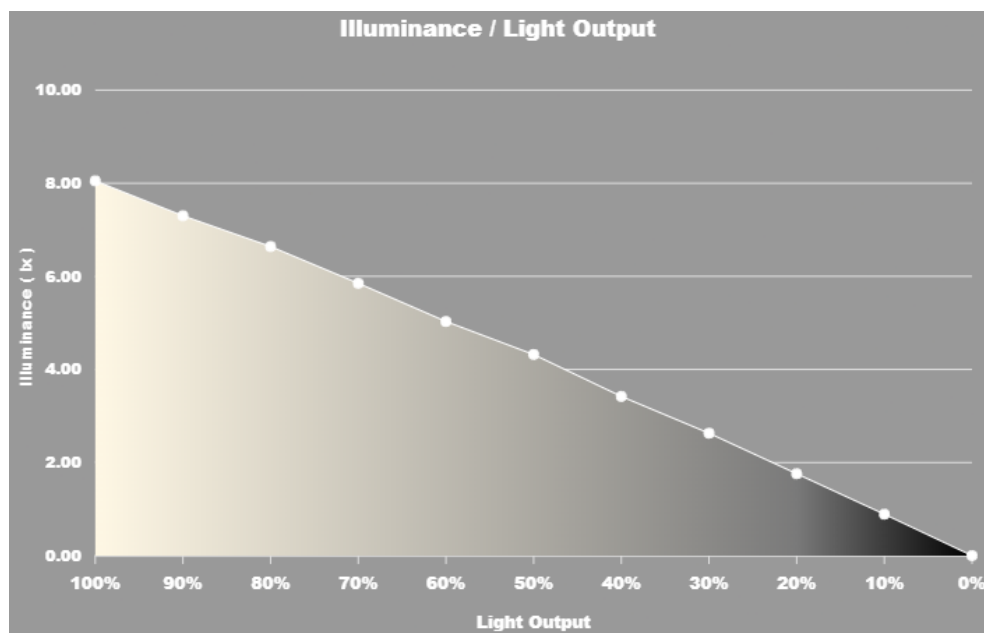
$$\eta = \frac{\Phi}{P} = \frac{3049 \text{ lm}}{54.567 \text{ W}} = 55.88 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \quad (19)$$

Το γράφημα 4 απεικονίζει τη φωτεινή ροή (lm) ως προς το ποσοστό της φωτεινής στάθμης (Light Output). Παρατηρείται μια ξεκάθαρη γραμμική μείωση της φωτεινής ροής καθώς μειώνεται η φωτεινή στάθμη. Στο μέγιστο επίπεδο (100%), η φωτεινή ροή προσεγγίζει τα 3000 lm, ενώ σε χαμηλά επίπεδα (κάτω του 20%), μειώνεται σημαντικά κάτω από τα 500 lm. Η σχέση αυτή δείχνει την αποτελεσματικότητα του dimming στη ρύθμιση της φωτεινότητας του χώρου, προσφέροντας ακριβή έλεγχο της επιθυμητής στάθμης φωτισμού. Στο 0% σημειώνεται μια πολύ μικρή τιμή, η οποία είναι πιθανώς από την κατανάλωση που υπάρχει στην κατάσταση αναμονής.



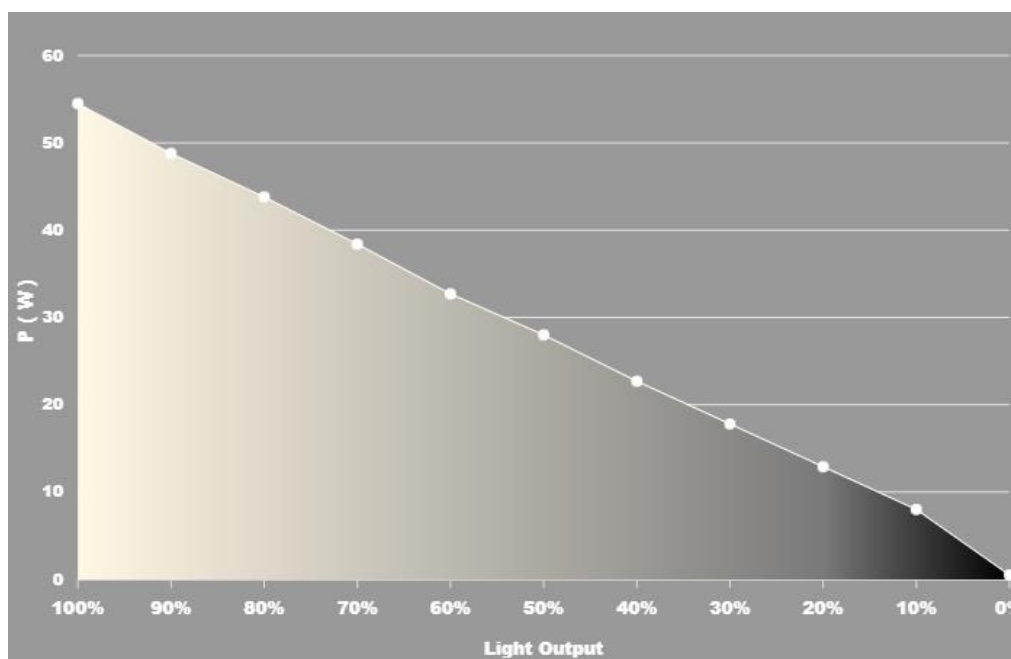
Γράφημα 4 Σχέση της φωτεινής ροής με τη ρύθμιση φωτεινής έντασης του φωτιστικού.

Στο γράφημα 5 παρακάτω, παρουσιάζεται η ένταση του φωτισμού (lx) σε σχέση με το ποσοστό της φωτεινής στάθμης (Light Output). Η σχέση και εδώ είναι γραμμική, με το φωτισμό να μειώνεται αναλογικά όσο το ποσοστό φωτεινότητας ελαττώνεται. Συγκεκριμένα, στο 100% της απόδοσης ο φωτισμός είναι περίπου 8 lx, ενώ στο 50% μειώνεται σχεδόν στο μισό, περίπου 4 lx. Η δυνατότητα ρύθμισης της στάθμης φωτισμού παρέχει ευελιξία ώστε να επιτυγχάνεται ο κατάλληλος φωτισμός ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε χώρου και των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται σε αυτόν.



Γράφημα 5 Γραφική αναπαράσταση φωτεινότητας.

Το γράφημα 6 δείχνει τη σχέση της ισχύος (W) με το ποσοστό της φωτεινής στάθμης (Light Output). Παρατηρείται μια γραμμική και ιδιαίτερα έντονη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος καθώς ελαττώνεται η φωτεινή στάθμη. Στο 100% της, η ισχύς είναι περίπου 55 W, ενώ στο 50% η ισχύς μειώνεται στο μισό, περίπου 25 W. Αυτό επιβεβαιώνει τη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της λειτουργίας dimming, τονίζοντας τη σημασία της εφαρμογής της σε συστήματα φωτισμού με στόχο την ενεργειακή αποδοτικότητα και την εξοικονόμηση κόστους.



Γράφημα 6 Γραφική αναπαράσταση ισχύος.

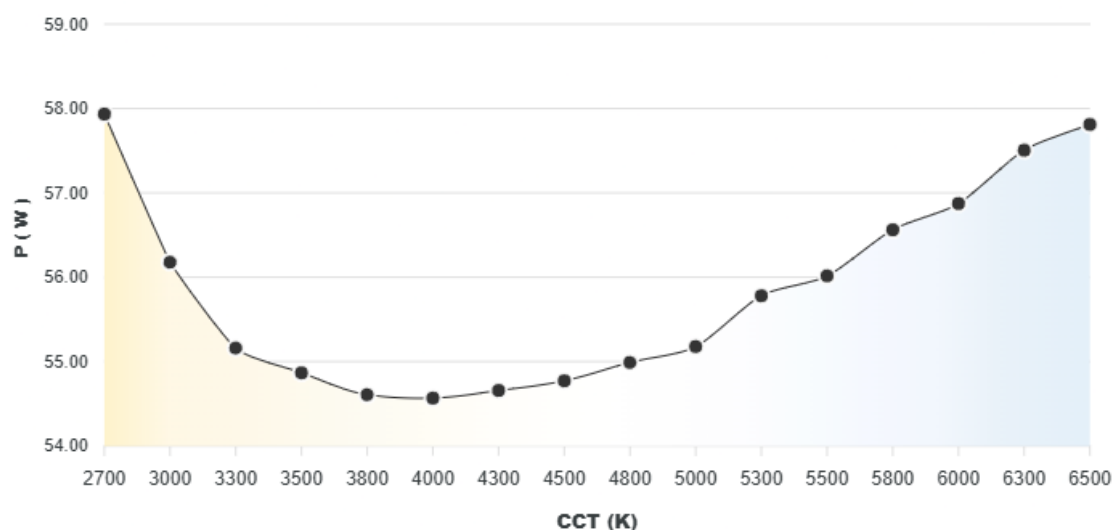
Η επόμενη σειρά μετρήσεων παρουσιάζεται στον Πίνακα 12 και πραγματοποιήθηκε διατηρώντας σταθερή τη φωτεινή στάθμη στο 100%, εξετάζοντας την μεταβολή των άλλων μεγεθών σε διάφορες τιμές της θερμοκρασίας χρώματος των φωτιστικών.

Υπολογίζεται η απόκλιση της CCT και παρατηρείται πως κυμαίνεται από 0.78% στους 5500 K έως 4%, για CCT 3500 K. Είναι αρκετά μικρή, οπότε τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Η ενεργός ισχύς παραμένει σχετικά σταθερή, με την ελάχιστη τιμή της να είναι στα 54.567 W (για ονομαστικές τιμές CCT 4000 K) και τη μέγιστη τιμή της στα 57.934 W (για CCT 2700 K). Ο συντελεστής ισχύος παραμένει σταθερός, ανάμεσα στο 0.97 και στο 0.98 σε όλες σχεδόν τις μετρήσεις. Είναι επίσης αρκετά υψηλός, όπως είναι το αναμενόμενο για να είναι το φωτιστικό αποδοτικό και με ελάχιστες απώλειες.

Πίνακας 12 Μετρήσεις διατηρώντας σταθερή τη φωτεινή στάθμη στο 100%, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία χρώματος.

A/A	Ονομαστική CCT [K]	Μετρηθείσα CCT [K]	Απόκλιση CCT [%]	P [W]	U rms [V]	I rms [A]	S [VA]	Q [VAr]	Power Factor
11	6500	6573	1.12	57.81	229.97	0.2574	59.2	-12.74	0.98
12	6300	6363	1.00	57.51	230	0.2561	58.9	-12.73	0.98
13	6000	6063	1.05	56.87	230	0.2534	58.28	-12.72	0.98
14	5800	5849	0.84	56.56	230	0.2521	57.98	-12.76	0.98
15	5500	5543	0.78	56.02	230	0.2499	57.48	-12.89	0.98
16	5300	5378	1.47	55.78	230	0.2489	57.24	-12.85	0.97
17	5000	5073	1.46	55.18	230	0.2463	56.64	-12.8	0.97
18	4800	4891	1.90	54.99	230	0.2454	56.45	-12.76	0.97
19	4500	4618	2.62	54.77	230.01	0.2445	56.24	-12.78	0.97
20	4300	4433	3.09	54.66	230	0.2441	56.13	-12.79	0.97
21	4000	4139	3.48	54.57	230	0.2437	56.04	-12.78	0.97
22	3800	3933	3.50	54.61	230.01	0.2438	56.08	-12.76	0.97
23	3500	3640	4.00	54.87	230	0.2449	56.34	-12.8	0.97
24	3300	3426	3.82	55.16	230.01	0.2462	56.63	-12.8	0.97
25	3000	3103	3.43	56.18	230	0.2505	57.62	-12.82	0.98
26	2700	2742	1.56	57.93	230	0.2579	59.32	-12.76	0.98

Το γράφημα 7 παρουσιάζει την ισχύ (P) του φωτιστικού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία χρώματος (CCT), σε εύρος από 2700 K έως 6500 K, όταν το φωτιστικό είναι ρυθμισμένο στο 100 % της φωτεινής στάθμης. Παρατηρείται ότι οι ακραίες θερμοκρασίες (2700 K και 6500 K) οδηγούν σε αυξημένη κατανάλωση ισχύος, με τιμές κοντά στα 58 W, ενώ η κατανάλωση μειώνεται σημαντικά στην ενδιάμεση περιοχή θερμοκρασιών (3500 K έως 5000 K), φτάνοντας σε τιμές περίπου 54.5 W. Η θερμοκρασία των 4000 K είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτη, καθώς παρουσιάζει τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, αποτελώντας έτσι την πλέον ενεργειακά αποδοτική επιλογή. Από ενεργειακή άποψη, η επιλογή θερμοκρασιών χρώματος στην περιοχή των 4000 - 5000 K είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα, συνδυάζοντας άνετο φωτισμό με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.



Γράφημα 7 Διακύμανση ισχύος για τις διάφορες τιμές θερμοκρασίας χρώματος στου φωτιστικού.

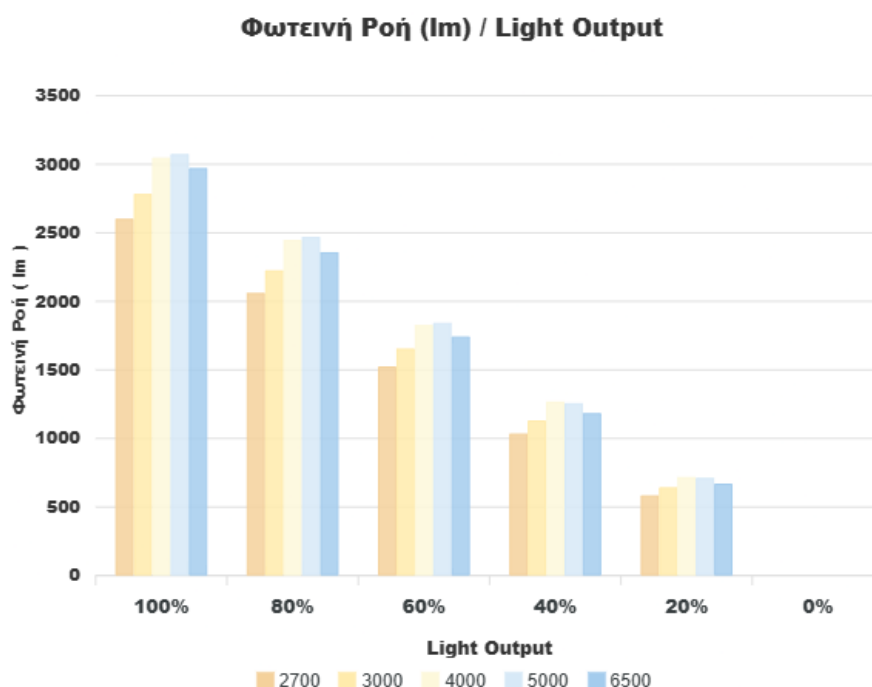
Στον Πίνακα 13, πραγματοποιούνται μετρήσεις σε πέντε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας χρώματος (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6500 K), με μείωση της φωτεινής στάθμης, ξεκινώντας από το 100%, με βήμα 20%. Η ισχύς και η φωτεινή ροή μειώνονται αναλογικά με την φωτεινή στάθμη του φωτιστικού, σε όλες τις τιμές CCT. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις αυτές, καθώς και η απόκλιση της CCT που μετρήθηκε σε σχέση με την ονομαστική και υπολογίζεται η φωτεινή ροή. Επίσης παρουσιάζεται η τάση, το ρεύμα, η ενεργός ισχύς και η άεργος καθώς και ο συντελεστής ισχύος.

Πίνακας 13 Μετρήσεις για πέντε θερμοκρασίες χρώματος, μεταβάλλοντας σε κάθε μια τη φωτεινή στάθμη, από 100% μέχρι 0.

A/A	Ονομαστική CCT [K]	Light Output	P [W]	Μετρηθείσα CCT [K]	Απόκλιση CCT [%]	Φωτεινή Ροή [lm]	U rms [V]	I rms [A]	S [VA]	Q [VAr]	Power Factor
26	2700	100%	57.93	2742	1.56	2603	230	0.2579	59.32	-12.76	0.98
27		80%	45.89	2730	1.11	2062	229.86	206.71	47.51	-12.3	0.97
28		60%	33.96	2718	0.67	1526	230.01	156.13	35.91	-11.69	0.945
29		40%	23.07	2711	0.41	1036	230.07	112.16	25.81	-11.57	0.89
30		20%	13.03	2700	0	585	230.12	77.58	17.85	-12.2	0.73
		0%	0.47	-	-	-	230.18	25.99	5.983	-5.97	0.08
25	3000	100%	56.18	3103	3.43	2784	230	0.2505	57.62	-12.82	0.97
31		80%	44.94	3081	2.70	2227	229.97	202.48	46.57	-12.2	0.97
32		60%	33.42	3064	2.13	1656	230.02	153.9	35.4	-11.68	0.94
33		40%	22.85	3045	1.50	1132	230.07	111.31	25.61	-11.56	0.89
34		20%	13.01	3020	0.67	644	230.12	77.14	17.75	-12.08	0.73
		0%	0.467	-	-	-	230.18	25.99	5.982	-5.96	0.08
21	4000	100%	54.57	4139	3.48	3049	230.01	0.2433	55.95	-12.78	0.97
3		80%	43.8	4127	3.18	2448	230.06	197.47	45.43	-12.04	0.96
5		60%	32.7	4118	2.95	1827	230.11	150.97	34.74	-11.72	0.94
7		40%	22.71	4115	2.88	1269	230.18	110.7	25.48	-11.56	0.89
9		20%	12.88	4092	2.30	719	230.03	76.83	17.67	-12.11	0.73
		0%	0.47	-	-	-	230.09	25.99	5.981	-5.96	0.08
17	5000	100%	55.18	5073	1.46	3075	230	0.2463	56.64	-12.8	0.97
35		80%	44.32	5081	1.62	2470	229.97	199.83	45.95	-12.13	0.96
36		60%	33.1	5093	1.86	1844	230.02	152.64	35.11	-11.72	0.94
37		40%	22.57	5086	1.72	1258	230.07	110.1	25.33	-11.5	0.89
38		20%	12.79	5086	1.72	713	230.12	76.46	17.6	-12.09	0.73
		0%	0.47	-	-	-	230.18	26	5.985	-5.97	0.08
11	6500	100%	57.81	6573	1.12	2973	229.97	0.2574	59.2	-12.74	0.98
39		80%	45.88	6545	0.69	2359	229.96	206.51	47.49	-12.27	0.97
40		60%	33.92	6542	0.65	1744	230.01	155.89	35.86	-11.63	0.95
41		40%	23.04	6489	-0.17	1185	230.07	112.01	25.77	-11.54	0.89
42		20%	13.05	6465	-0.54	671	230.12	76.40	17.55	-12.10	0.73
		0%	0.47	-	-	-	230.18	26	5.98	-5.96	0.08

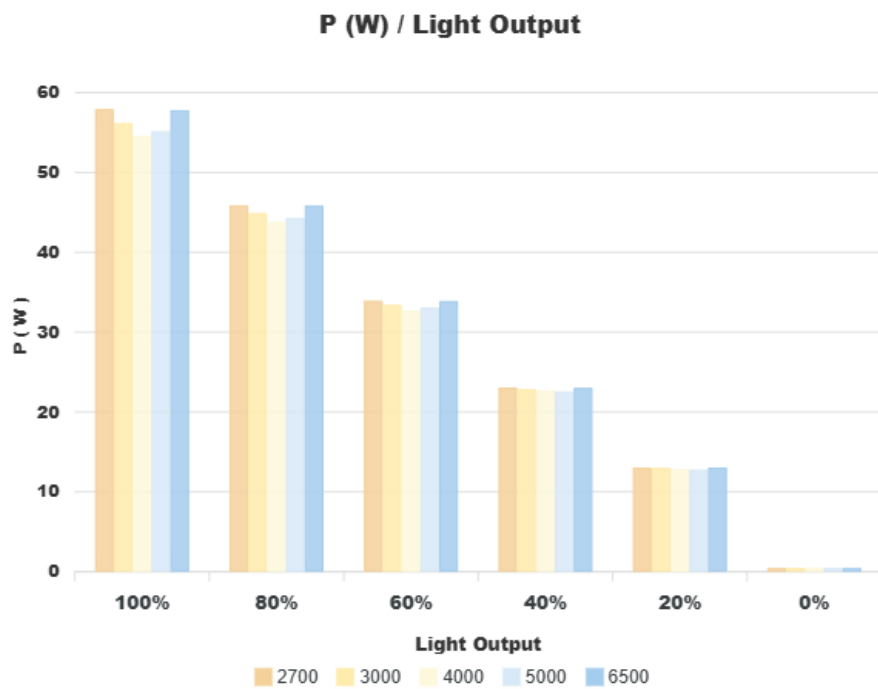
Το γράφημα 8 παρουσιάζει σε ράβδους τη φωτεινή ροή (lm) σε σχέση με το ποσοστό της φωτεινής στάθμης (Light Output) για πέντε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας χρώματος (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K). Παρατηρείται μια σαφής και σχεδόν γραμμική μείωση της φωτεινής ροής καθώς μειώνεται το ποσοστό φωτεινότητας. Επίσης, είναι

εμφανές ότι υψηλότερες θερμοκρασίες χρώματος (6500 K) παρέχουν ελαφρώς υψηλότερη φωτεινή ροή σε σχέση με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες (2700 K), κάτι που υποδεικνύει πως η αύξηση της θερμοκρασίας χρώματος προσφέρει ελαφρώς καλύτερη απόδοση φωτισμού. Η θερμοκρασία των 4000 K παρουσιάζει την υψηλότερη φωτεινή απόδοση, με μικρή μόνο διαφορά συγκριτικά με τους 5000 K. Αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί στην πράξη, ώστε να επιλέγονται μέτριες προς το υψηλές θερμοκρασίες χρώματος όταν απαιτείται μεγαλύτερη φωτεινότητα με την ίδια σχεδόν ενεργειακή κατανάλωση.



Γράφημα 8 Γραφική απεικόνιση με ράβδους της φωτεινής ροής για τις 5 διαφορετικές CCT.

Το γράφημα 9 απεικονίζει την ισχύ (P) σε σχέση με το ποσοστό της φωτεινής ρύθμισης (Light Output) για πέντε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας χρώματος (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K). Παρατηρείται ότι η ισχύς μειώνεται σχεδόν γραμμικά με τη μείωση του ποσοστού φωτεινότητας, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας χρώματος. Η μέγιστη κατανάλωση ισχύος σημειώνεται στις χαμηλότερες και υψηλότερες θερμοκρασίες χρώματος (2700 K και 6500 K), ενώ η χαμηλότερη στις ενδιάμεσες (4000 K και 5000 K), γεγονός που υποδεικνύει πως η ενδιάμεση περιοχή θερμοκρασιών παρέχει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για τον ίδιο βαθμό φωτεινότητας. Το παραπάνω είναι σημαντικό για τον ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό φωτισμού, προτείνοντας την επιλογή θερμοκρασιών χρώματος στην περιοχή των 4000 K - 5000 K για μέγιστη ενεργειακή απόδοση.



Γράφημα 9 Γραφική απεικόνιση με ράβδους της ισχύος για τις 5 διαφορετικές τιμές CCT.

7 Περιγραφή των χώρων προς μελέτη

7.1 Εισαγωγή

Κάθε χώρος έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις φωτισμού ανάλογα με τις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται σε αυτόν. Για παράδειγμα, σε έναν εργασιακό χώρο, οι επιφάνειες εργασίας απαιτούν υψηλότερα επίπεδα φωτεινότητας συγκριτικά με τους διαδρόμους. Το βασικό μέγεθος που εκφράζει τις απαιτήσεις φωτισμού σε συγκεκριμένες περιοχές δραστηριότητας είναι η ένταση φωτισμού, με μονάδα μέτρησης το lux (lx). Οι απαιτούμενες τιμές της έντασης φωτισμού καθορίζονται ως διατηρητέες μέσες τιμές (E_m) και αποτελούν το ελάχιστο επιτρεπτό όριο έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, που πρέπει να διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Σε περίπτωση που η μέση ένταση φωτισμού πέσει κάτω από το προκαθορισμένο όριο, απαιτούνται δράσεις συντήρησης, αντικατάστασης ή αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού.

Η ομοιομορφία φωτισμού (U_o) είναι ένα επιπλέον σημαντικό χαρακτηριστικό που αναφέρεται στη διακύμανση της έντασης φωτός εντός ενός χώρου. Ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης έντασης φωτισμού (E_{min}) προς τη μέση ένταση φωτισμού (E_m) μιας συγκεκριμένης επιφάνειας:

$$U_o = \frac{E_{min}}{E_m} \quad (20)$$

Όπου:

- E_{min} [lx]: ελάχιστη ένταση φωτισμού εντός της επιλεγμένης περιοχής
- E_m [lx]: μέση ένταση φωτισμού εντός της επιλεγμένης περιοχής

Δύο ακόμη χαρακτηριστικά είναι ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (Color Rendering Index – CRI, Ra) και ο δείκτης ομοιόμορφης θάμβωσης (Unified Glare Rating - UGR).

Ο πρώτος αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ικανότητας μιας πηγής φωτός να αποδίδει πιστά τα χρώματα των αντικειμένων σε σύγκριση με μια φυσική ή πρότυπη πηγή φωτισμού. Η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 100, όπου υψηλότερες τιμές υποδηλώνουν καλύτερη απόδοση χρωμάτων. Πηγές φωτισμού με $Ra \geq 80$ θεωρούνται κατάλληλες για τους περισσότερους εσωτερικούς χώρους.

Ο δεύτερος δείκτης καθορίζει το επίπεδο ενόχλησης από την παρουσία έντονων πηγών φωτισμού στο οπτικό πεδίο ενός παρατηρητή. Υπολογίζεται με βάση τη σχετική φωτεινότητα των φωτιστικών σωμάτων σε σχέση με το φόντο, τη γεωμετρία του χώρου και τη θέση του παρατηρητή. Η κλίμακα UGR κυμαίνεται από 10 (ανεπαίσθητη θάμβωση) έως 30 (έντονη θάμβωση), ενώ για τους περισσότερους εσωτερικούς χώρους εργασίας συνιστάται τιμή $UGR \leq 19$.

7.2 Χώρος γραφείων

Ο φωτισμός στους χώρους γραφείων οφείλει να εξασφαλίζει συνθήκες που ενισχύουν την οπτική άνεση και την επαγγελματική απόδοση. Ο φωτισμός αποτελεί σημαντικό μέρος του εργασιακού περιβάλλοντος και πρέπει να επιτρέπει στους εργαζόμενους να εκτελούν την εργασία τους με άνεση και συγκέντρωση, καθώς επίσης να διευκολύνει την επικοινωνία και τη συνεργασία μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, η ευελιξία στον σχεδιασμό του χώρου, η εργονομία, η υγιεινή και η προσαρμοστικότητα του φωτισμού στις ημερήσιες και εποχικές μεταβολές, καθώς και στις ιδιαίτερες ανάγκες των χρηστών, είναι απαραίτητες.

Πιο συγκεκριμένα ο φωτισμός των γραφείων επηρεάζει την παραγωγικότητα και την άνεση των εργαζομένων σε πολλαπλά επίπεδα:

- Οπτικά: Σύμφωνα με τα πρότυπα DIN/TS 67600:2021 [51] και EN 12464-1:2021 [52], οι απαιτήσεις για τον φωτισμό περιλαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές έντασης και ομοιομορφίας φωτισμού σε οριζόντιες επιφάνειες εργασίας, τοίχους, οροφές και σε κατακόρυφο επίπεδο (κυλινδρικός φωτισμός).

- Συναισθηματικά: Ο συνδυασμός φυσικού και τεχνητού φωτισμού και η κατάλληλη επιλογή και τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων συμβάλλουν στη δημιουργία μιας ευχάριστης ατμόσφαιρας, ενισχύοντας τη θετική ψυχολογία και διάθεση των εργαζομένων.
- Συναισθηματικά: Ο συνδυασμός φυσικού και τεχνητού φωτισμού και η κατάλληλη επιλογή και τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων συμβάλλουν στη δημιουργία μιας ευχάριστης ατμόσφαιρας, ενισχύοντας τη θετική ψυχολογία και διάθεση των εργαζομένων.
- Βιολογικά: Ο φωτισμός προσαρμόζεται για την υποστήριξη του κιρκάδιου ρυθμού, βοηθώντας τους εργαζόμενους να διατηρούν τη δραστηριότητα και την παραγωγικότητά τους καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Η εφαρμογή του ανθρωποκεντρικού φωτισμού (HCL) στους χώρους γραφείων λοιπόν αποσκοπεί όχι μόνο στην εξασφάλιση επαρκούς οπτικής άνεσης αλλά και στη βελτίωση της συνολικής ευεξίας των εργαζομένων, υποστηρίζοντας τη φυσιολογική και ψυχολογική τους κατάσταση μέσω κατάλληλης διαχείρισης του φωτός. Σύμφωνα με τη μελέτη των Figueiro και Rea (2017), στην οποία συμμετείχαν 109 εργαζόμενοι από πέντε διαφορετικά κτίρια γραφείων στις ΗΠΑ, η έκθεση των εργαζομένων σε φωτισμό ειδικά σχεδιασμένο για να ενισχύει την κιρκάδια διέγερση (circadian effective lighting), όπως ποσοτικοποιήθηκε με τη χρήση ειδικών συσκευών μέτρησης προσωπικής έκθεσης στο φως, συσχετίστηκε με ταχύτερη έναρξη και σημαντικά βελτιωμένη ποιότητα ύπνου. Επιπρόσθετα, η έρευνα έδειξε ότι οι εργαζόμενοι με υψηλότερη έκθεση σε τέτοιο φωτισμό, ιδιαίτερα κατά τις πρωινές ώρες, παρουσίασαν μειωμένα επίπεδα άγχους και κατάθλιψης. Αυτά τα ευρήματα τονίζουν τη σημασία του ανθρωποκεντρικού φωτισμού ως ενός καθοριστικού παράγοντα για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής και της παραγωγικότητας σε εργασιακά περιβάλλοντα, αναδεικνύοντας έτσι την ανάγκη σχεδιασμού φωτιστικών συστημάτων που δεν περιορίζονται μόνο στις οπτικές ανάγκες αλλά αξιοποιούν πλήρως τη βιολογική και συναισθηματική διάσταση του φωτός [74].

Συνεπώς, ένας προσεκτικά σχεδιασμένος φωτισμός αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση ενός ευχάριστου, υγιούς και παραγωγικού εργασιακού περιβάλλοντος [41, p. 26].

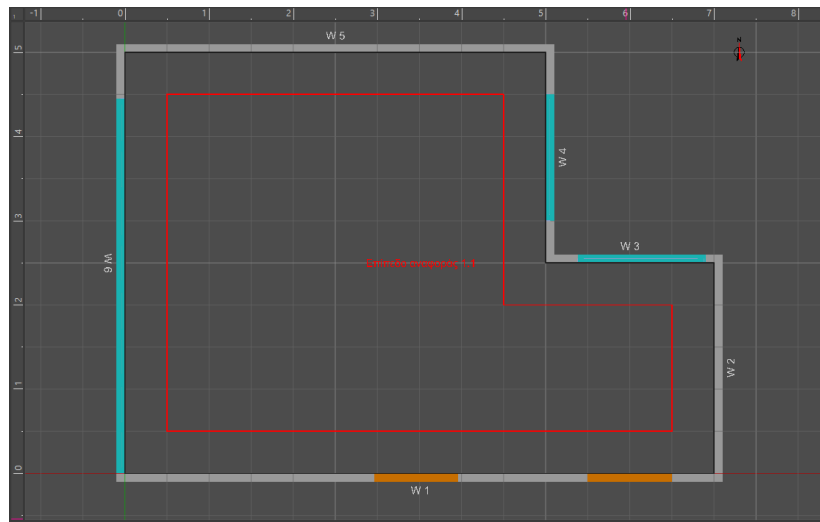
Οι απαιτήσεις φωτισμού που πρέπει να πληρούνται σε εργασιακούς χώρους είναι η μέση ένταση φωτισμού (E_m), η ομοιομορφία φωτισμού (U_o), ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (Ra), που πρέπει να υπερβαίνουν κάποια ελάχιστα όρια, και ο δείκτης θάμβωσης (UGR), ο οποίος πρέπει να βρίσκεται κάτω από ένα μέγιστο όριο. Οι τιμές αυτών των δεικτών για διαφορετικούς τύπους χώρων εργασίας καθορίζονται από το πρότυπο EN 12464-1 [39] και παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 14.

Πίνακας 14 Απαιτήσεις φωτισμού για χώρο γραφείου, ανάλογα με τη χρήση του.

5.26	Γραφεία	E_m (lx)	U_o	UGRL	Ra
5.26.1	Αρχειοθέτηση, φωτοαντίγραφα κλπ	300	0.40	19	80
5.26.2	Συγγραφή, δακτυλογράφηση, ανάγνωση, επεξεργασία δεδομένων	500	0.60	19	80
5.26.3	Τεχνικό σχέδιο	750	0.70	16	80
5.26.4	CAD work stations	500	0.60	19	80
5.26.5	Αίθουσες συνεδρίων και συσκέψεων	500	0.60	19	80
5.26.6	Χώρος υποδοχής	300	0.60	22	80
5.26.7	Αρχείο	200	0.40	25	80

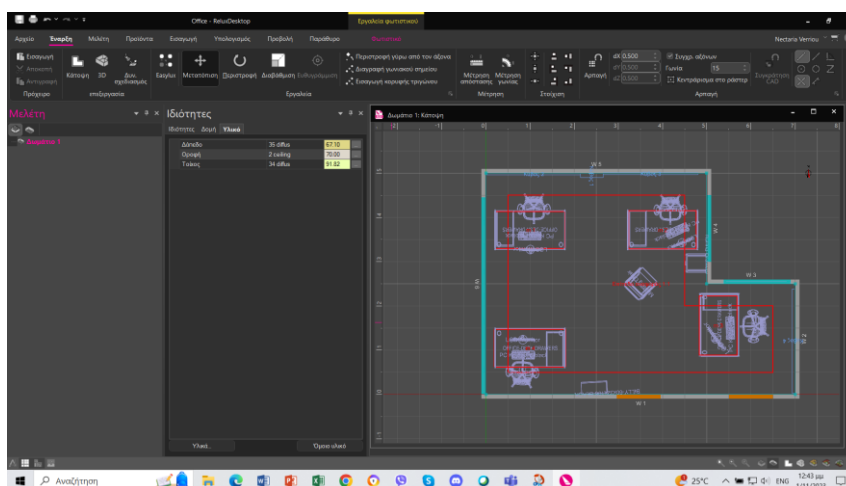
7.2.1 Περιγραφή του χώρου γραφείου προς μελέτη

Για την παρούσα εργασία, επιλέχθηκε ένας χώρος γραφείου σε ισόγειο κτιρίου, στο κέντρο της Αθήνας, στην περιοχή των Εξαρχείων, Μαυρομιχάλη 32. Είναι ένας τυπικός χώρος γραφείου, και η χρήση του είναι για συγγραφή, δακτυλογράφηση, ανάγνωση και επεξεργασία δεδομένων. Έχει σχήμα Γ, με μήκος 7 m, πλάτος 5 m και ύψος 2.8 m και περιέχει τέσσερα ατομικά γραφεία. Συνολικά το εμβαδόν του υπολογίζεται στα 30 m². Η κάτοψη του χώρου παρουσιάζεται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 39 Κάτοψη του χώρου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κάτοψη του χώρου εμπλουτισμένη με τα διάφορα αντικείμενα και η τρισδιάστατη απεικόνιση αυτού, όπως σχεδιάστηκαν στο RELUX. Για καλύτερη παρουσίαση του χώρου, τοποθετήθηκαν τα βασικά αντικείμενα (γραφεία, βιβλιοθήκες κλπ.), εκτός των φωτιστικών σωμάτων. Επίσης επιλέχθηκε κατάλληλο χρώμα για τους τοίχους, όσο πιο κοντινό σε αυτό που έχει στην πραγματικότητα.



Εικόνα 40 Κάτοψη του χώρου με τα βασικά αντικείμενα.



Εικόνα 41 Τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου στο RELUX.

Στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται μια φωτογραφία από τον χώρο όπως είναι μια εργάσιμη ημέρα. Το δωμάτιο αυτό έχει παράθυρα και αρκετό φυσικό φωτισμό, αλλά δεν θα εξεταστεί η επίδρασή του στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 42 Φωτογραφία του χώρου στην πραγματικότητα.

7.2.2 Περιγραφή υφιστάμενου τεχνητού φωτισμού και συνολικής ισχύος

Η υφιστάμενη εγκατάσταση τεχνητού φωτισμού του χώρου αποτελείται από 5 φωτιστικά σώματα. Τα φωτιστικά αυτά διαθέτουν δύο σωληνωτούς λαμπτήρες φθορισμού της PHILIPS τύπου T8 (26 cm διάμετρος, G13 βάση) ισχύος 36 W, με κωδικό 54, θερμοκρασία χρώματος 6500 K και φωτεινή ροή 2950 lm. Είναι τοποθετημένα στην οροφή, μέσα σε περίβλημα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, με μήκος 1.2 m.



Εικόνα 43 Γραμμικό φωτιστικό οροφής, φθορισμού T8 με 36W.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στον χώρο αυτό εκτιμάται από τον τύπο των φωτιστικών σωμάτων που είναι εγκατεστημένα και τον αριθμό τους. Με βάση την ισχύ των εγκατεστημένων φωτιστικών λοιπόν και υπολογίζοντας πως κάθε ένα, από τα πέντε που βρίσκονται στον χώρο, έχει από δύο σωληνωτούς λαμπτήρες, ισχύος 36 W, καταλήγουμε στον παρακάτω υπολογισμό:

$$P_{\gamma\rho} = P_{lum} * N_{lum} = (2 * 36) * 5 = 360 W \quad (21)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η κατανάλωση ισχύος όλων των φωτιστικών της αίθουσας, λαμβάνεται υπόψη η παλαιότητα της υπάρχουσας εγκατάστασης, καθώς και τα ballast που χρησιμοποιούνται τα οποία οδηγούν σε αύξηση της τελικής ισχύος που καταναλώνουν τα φωτιστικά. Στην συγκεκριμένη εγκατάσταση εκτιμάται ότι η αύξηση στην κατανάλωση ισχύος εξαιτίας των ballast ανέρχεται στο 30% της αρχικής κατανάλωσης των φωτιστικών.

Η αύξηση αυτή προκύπτει κυρίως εξαιτίας της γήρανσης των ηλεκτρικών επαφών και καλωδίων του παλαιού δικτύου, των συχνών διακυμάνσεων της τάσης τροφοδοσίας που οδηγούν τα ηλεκτρομαγνητικά ballast να καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια, καθώς και της φυσιολογικής φθοράς των λαμπτήρων φθορισμού, οι οποίοι απαιτούν αυξημένη κατανάλωση προκειμένου να διατηρηθούν οι προβλεπόμενες στάθμες φωτισμού. Η επιλογή οικονομικότερων και συνήθως χαμηλότερης ποιότητας ballast κατά την αντικατάσταση συμβάλλει περαιτέρω σε αυτή την αύξηση. Με την προσαύξηση λόγω των ballast, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς διαμορφώνεται:

$$P_{\tau\epsilon\lambda} = 360 * 1.3 = 468 W \quad (22)$$

Το εμβαδόν του φωτιζόμενου χώρου είναι 30 m². Η εγκαταστημένη ισχύς ανά τ.μ. του υπάρχοντος φωτισμού του γραφείου υπολογίζεται:

$$P_{/\tau.\mu.} = \frac{468 W}{30 m^2} = 15.6 W/m^2 \quad (23)$$

Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. για τη θερμική ζώνη απαίτησης 500 lx, το ανώτερο όριο εγκατεστημένης ισχύος για τον χώρο είναι 16 W/m² [75, p. 39].

Το γραφείο παραμένει φωτισμένο για δέκα ώρες, από τις 8:00 μέχρι τις 18:00. Η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την συνολική ισχύς με τις ώρες

λειτουργίας, που είναι 10 και διαιρώντας με το 1000, ώστε να είναι σε kWh. Για το φωτιστικό αυτό:

$$P_{\text{ημέρα}} = 468 * 10/1000 = 4.68 \text{ kWh} \quad (24)$$

Συνολικά, μέσα σε έναν χρόνο ο χώρος θα παραμείνει φωτισμένος για 252 ημέρες. Συνεπώς, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά έτος διαμορφώνεται:

$$P_{\text{έτος}} = 4.68 * 252 = 1179.36 \text{ kWh} \quad (25)$$

Το συνολικό ετήσιο κόστος της ενέργειας που καταναλώνει ο χώρος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με την τιμή 0.15 €/kWh:

$$K_{\text{έτος}} = 1179.36 * 0.15 = 176.9 \text{ €} \quad (26)$$

7.3 Αίθουσα διδασκαλίας

Σε ένα εκπαιδευτικό ίδρυμα είναι απαραίτητο να εξασφαλίζονται συνθήκες που διευκολύνουν τη διαδικασία της μάθησης. Ο φωτισμός αποτελεί σημαντικό παράγοντα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, καθώς επηρεάζει άμεσα την αφομοίωση και την επεξεργασία πληροφοριών, αυξάνει την οπτική άνεση, ενισχύει τη συγκέντρωση και συμβάλλει στη δημιουργία ενός θετικού κλίματος εντός του χώρου μάθησης. Συνεπώς, οι εγκαταστάσεις φωτισμού στα εκπαιδευτικά ιδρύματα θα πρέπει να εξασφαλίζουν ένα ευχάριστο και λειτουργικό περιβάλλον, τηρώντας παράλληλα συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές. Σε περίπτωση που ο φωτισμός είναι ανεπαρκής, προκαλείται δυσφορία και κόπωση, με αποτέλεσμα οι μαθητές να παρουσιάζουν δυσκολία στη συγκέντρωση.

Κατά τις πρωινές ώρες οι μαθητές συχνά διακατέχονται από δυσκολία συγκέντρωσης. Συνεπώς, απαιτείται κατάλληλος φωτισμός ο οποίος να μπορεί να κινητοποιήσει τον οργανισμό και να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες ώστε να αμβλύνει το αίσθημα υπνηλίας και να ενισχύσει την ικανότητα συγκέντρωσης των μαθητών. Ο ανθρώπινος οργανισμός ανταποκρίνεται καλύτερα σε τεχνητό φωτισμό που μεταβάλλεται δυναμικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, ακολουθώντας τον φυσικό φωτισμό ως προς την ένταση και τη θερμοκρασία χρώματος. Το ψυχρό φως προκαλεί εγρήγορση και αυξάνει τη δημιουργικότητα, ενώ το θερμό προκαλεί χαλάρωση. Επομένως, για να μπορεί να είναι κανείς αποδοτικός και να αφομοιώνει ευκολότερα νέες γνώσεις, ενδείκνυται η χρήση ψυχρού φωτισμού.

Οι κύριες παράμετροι για έναν βιολογικά αποτελεσματικό φωτισμό είναι:

- Η υψηλή ένταση φωτός.
- Η κατάλληλη κατεύθυνση φωτισμού, ώστε να εισέρχεται από ψηλά και μπροστά στο μάτι.
- Η θερμοκρασία χρώματος αντίστοιχη του φυσικού φωτός, που περιλαμβάνει το μπλε φάσμα.
- Η δυναμική μεταβολή της θερμοκρασίας χρώματος και της έντασης φωτισμού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ακολουθώντας την εξέλιξη του φυσικού φωτός.

Για τη δημιουργία ενός ιδανικού εκπαιδευτικού περιβάλλοντος, απαιτείται φωτισμός με κατάλληλη φωτεινότητα και ομοιόμορφη κατανομή του φωτός, ιδανικές δηλαδή συνθήκες για μελέτη, ανάγνωση και ακρόαση. Επιπλέον, ο φωτισμός πρέπει να παρέχει ποιοτικό περιβάλλον μάθησης καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, επιτρέποντας έτσι την πραγματοποίηση τόσο ατομικών όσο και ομαδικών εργασιών [41].

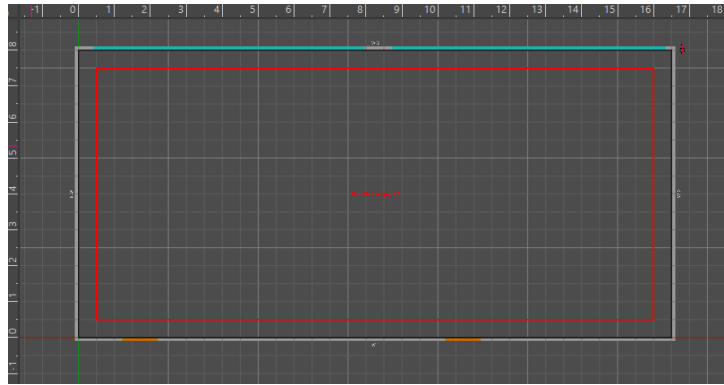
Οι βασικές προδιαγραφές φωτισμού που πρέπει να πληρούνται σε εκπαιδευτικούς χώρους είναι η μέση ένταση φωτισμού (E_m), η ομοιομορφία φωτισμού (U_o), ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (R_a), και ο δείκτης θάμβωσης (UGR). Τα πρώτα τρία μεγέθη πρέπει να υπερβαίνουν καθορισμένα ελάχιστα όρια, ενώ ο δείκτης UGR πρέπει να βρίσκεται κάτω από συγκεκριμένο μέγιστο όριο. Οι τιμές αυτών των δεικτών για διαφορετικούς τύπους αιθουσών ή χώρων διδασκαλίας καθορίζονται από το πρότυπο EN 12464-1 [39] και παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα 15.

Πίνακας 15 Απαιτούμενα όρια φωτισμού σε χώρους διδασκαλίας, ανάλογα με τη χρήση τους.

Τύπος αίθουσας, δραστηριότητας ή επιφάνειας		Em (lux)	Uo	UGR	Ra
5.35	ΝΗΠΙΑΓΩΓΕΙΟ, ΠΑΙΔΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ				
5.35.1	Χώρος παιχνιδιού	300	0.40	22	80
5.35.2	Βρεφικός σταθμός	300	0.40	22	80
5.35.3	Δωμάτιο χειροτεχνίας	300	0.60	19	80
5.36	ΚΤΙΡΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ				
5.36.1	Αίθουσες διδασκαλίας, αίθουσες φροντιστηρίου	300	0.60	19	80
5.36.2	Αίθουσες διδασκαλίας για απογευματινά μαθήματα και για ενήλικες	500	0.60	19	80
5.36.3	Αμφιθέατρα, αίθουσες διαλέξεων	500	0.60	19	80
5.36.4	Μαύροι, πράσινοι και λευκοί πίνακες	500	0.70	19	80
5.36.5	Πάγκος επίδειξης	500	0.70	19	80
5.36.6	Αίθουσα καλλιτεχνικών	500	0.60	19	80
5.36.7	Αίθουσα καλλιτεχνικών σε σχολές καλών τεχνών	750	0.70	19	80
5.36.8	Αίθουσες τεχνικού σχεδίου	750	0.70	16	80
5.36.9	Εργαστήρια φυσικής και χημείας	500	0.60	19	80
5.36.10	Δωμάτιο χειροτεχνίας	500	0.60	19	80
5.36.11	Εργαστήριο διδασκαλίας	500	0.60	19	80
5.36.12	Στούντιο μουσικής	300	0.60	19	80
5.36.13	Αίθουσες ηλεκτρονικών υπολογιστών	300	0.60	19	80
5.36.14	Εργαστήριο ξένων γλωσσών	300	0.60	19	80
5.36.15	Αίθουσες προετοιμασίας	500	0.60	22	80
5.36.16	Χώρος εισόδου	200	0.40	22	80
5.36.17	Χώροι κυκλοφορίας	100	0.40	25	80
5.36.18	Κλίμακες	150	0.40	25	80
5.36.19	Χώροι συνάθροισης μαθητών και αίθουσα συνελεύσεων	200	0.40	22	80
5.36.20	Γραφεία καθηγητών	300	0.60	19	80
5.36.21	Βιβλιοθήκη: Χώρος βιβλίων	200	0.60	19	80
5.36.22	Βιβλιοθήκη: Αναγνωστήριο	500	0.60	19	80
5.36.23	Αποθήκη αντικειμένων διδασκαλίας	100	0.40	25	80
5.36.24	Γυμναστήρια, πισίνες	300	0.60	22	80
5.36.25	Κυλικείο	200	0.40	22	80
5.36.26	Κουζίνα	500	0.60	22	80

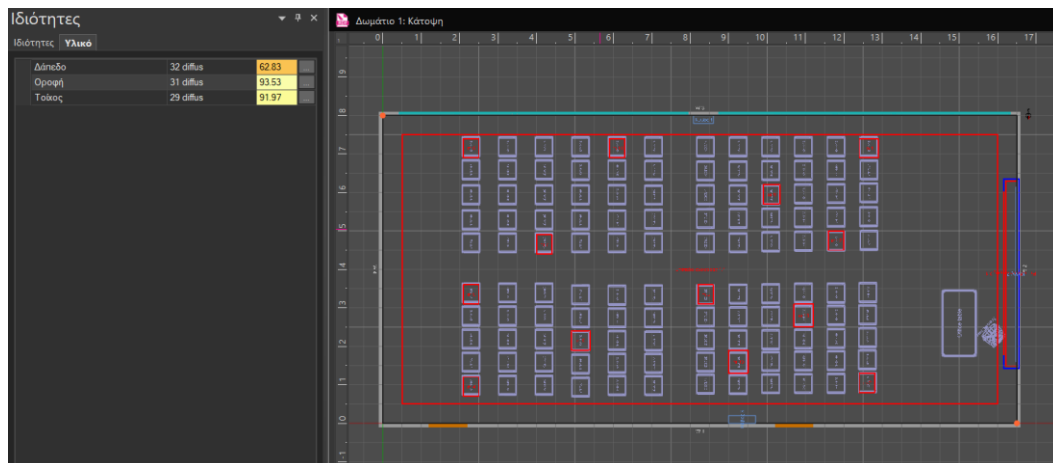
7.3.1 Περιγραφή της αίθουσας προς μελέτη

Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε μια αίθουσα διδασκαλίας από τα νέα κτίρια της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, στην περιοχή Ζωγράφου. Πιο συγκεκριμένα η αίθουσα με αριθμό 6, βρίσκεται στο ισόγειο του κτιρίου. Έχει διαστάσεις, μήκος 16.5 m, πλάτος 8 m, ύψος 2.8 m. Το εμβαδόν του χώρου που καταλαμβάνει είναι 132 m². Η θέση της είναι στο βόρειο τμήμα του κτιρίου.



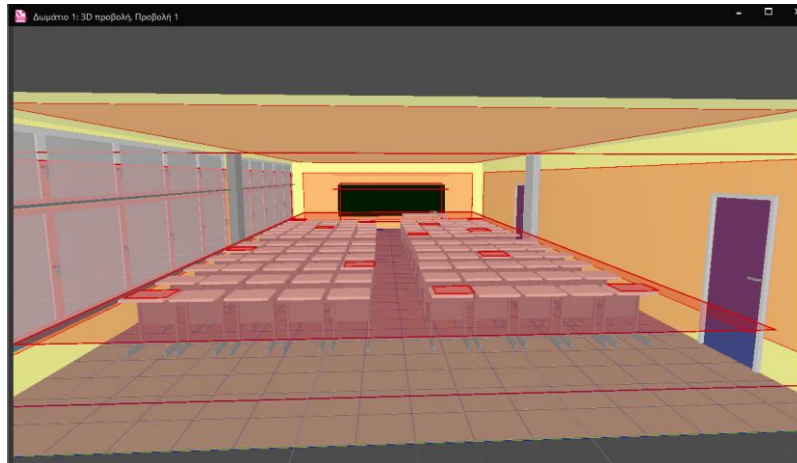
Εικόνα 44 Κάτοψη του χώρου, χωρίς αντικείμενα, στο RELUX.

Η αίθουσα περιέχει συνολικά 120 στατικά έδρανα. Αυτά χωρίζονται στα τέσσερα με δύο διαδρόμους που σχηματίζουν σταυρό στο κέντρο της αίθουσας και κάθε τέταρτο έχει 6 σειρές των 5 καθισμάτων. Ο πίνακας βρίσκεται στη μέση του βόρειου τοίχου. Είναι τοποθετημένος σε ύψος 0.8 m από το έδαφος και έχει διαστάσεις 4 m επί 1.27 m. Η αίθουσα έχει δύο πόρτες στον ανατολικό της τοίχο. Ο δυτικός τοίχος, στο μεγαλύτερο μέρος του, καταλαμβάνεται από υαλοπίνακες, μέσω των οποίων επιτρέπεται η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού. Τα έδρανα έχουν διαστάσεις επιφάνειας γραφής 0.5 m x 0.35 m και ύψος 0.7 m. Στην εικόνα 46 αποτυπώνεται αντίστοιχα η κάτοψη του χώρου, όπως σχεδιάστηκε στο RELUX με τα βασικά αντικείμενα (π.χ. θρανία, πίνακας), εκτός των φωτιστικών. Επίσης επιλέχθηκε κατάλληλο χρώμα για τους τοίχους, όσο πιο κοντινό σε αυτό που έχει η αίθουσα στην πραγματικότητα.



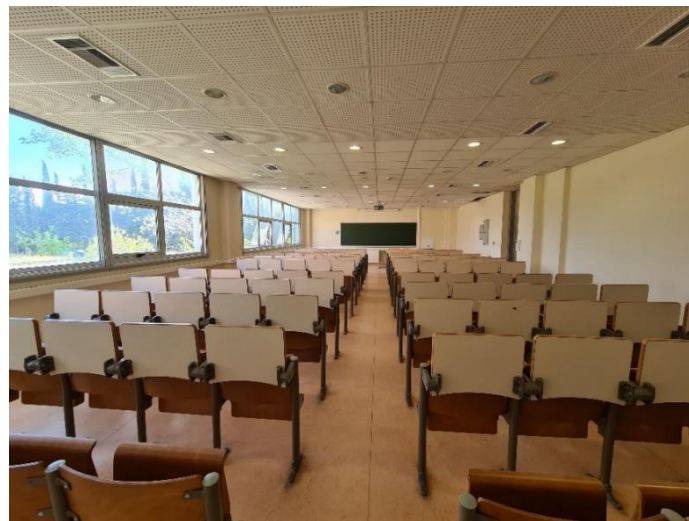
Εικόνα 45 Κάτοψη του χώρου στο RELUX.

Στην εικόνα 47 φαίνεται ο χώρος όπως έχει διαμορφωθεί στο πρόγραμμα RELUX και δίνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση αυτού, όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά.



Εικόνα 46 Τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου στο RELUX.

Στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται μια φωτογραφία από την αίθουσα 6. Το δωμάτιο αυτό έχει παράθυρα που καλύπτουν όλο σχεδόν τον μήκος της βορινής πλευράς της αίθουσας και συνεπώς δέχεται αρκετό φυσικό φωτισμό, ειδικά τις πρωινές ώρες. Στην παρούσα εργασία όμως δεν θα εξεταστεί η επίδρασή του.



Εικόνα 47 Φωτογραφία του χώρου στην πραγματικότητα.

7.3.2 Περιγραφή υφιστάμενου τεχνητού φωτισμού και συνολικής ισχύος

Η αίθουσα 6 φωτίζεται από 40 (5 x 8) φωτιστικά σώματα. Πρόκειται για χωνευτά φωτιστικά οροφής με κυκλικό διαχύτη. Η οροφή αποτελείται από τετράγωνες πλάκες ορυκτής ίνας διαστάσεων 0.625 m x 0.625 m και τα φωτιστικά βρίσκονται στο κέντρο κάθε πλάκας. Το ύψος της αίθουσας είναι 2.9m. Έχει γίνει χρήση ψευδοροφής για την εύκολη εγκατάσταση των χωνευτών φωτιστικών. Ανάμεσα σε δύο τετράγωνα τμήματα με φωτιστικά παρεμβάλλεται ένα τετράγωνο τμήμα χωρίς φωτιστικό.

Αναλυτικότερα, οι φωτεινές πηγές έχουν δύο είδη στρογγυλών φωτιστικών σωμάτων ψευδοροφής, με δύο συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού των 26 W ανά φωτιστικό. Η συνολική ισχύς του φωτιστικού είναι 52 W.



Εικόνα 48 Φωτιστικό αίθουσας διδασκαλίας 6.

Με βάση την ισχύ των εγκατεστημένων φωτιστικών και το πλήθος τους, καταλήγουμε στον παρακάτω υπολογισμό:

$$P_{αιθ} = P_{lum} * N_{lum} = 52 * 40 = 2080 \text{ W} \quad (27)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η κατανάλωση ισχύος όλων των φωτιστικών της αίθουσας, λαμβάνεται υπόψη η παλαιότητα της υπάρχουσας εγκατάστασης, καθώς και τα ballast που χρησιμοποιούνται, οδηγώντας στην αύξηση της τελικής ισχύος που καταναλώνουν τα φωτιστικά. Στην συγκεκριμένη εγκατάσταση εκτιμάται ότι η αύξηση στην κατανάλωση ισχύος εξαιτίας των ballast ανέρχεται στο 20% της αρχικής κατανάλωσης. Με την προσαύξηση λόγω των ballast, η ισχύς διαμορφώνεται:

$$P_{τελ} = 1280 * 1.2 = 2496 \text{ W} \quad (28)$$

Εξετάζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά τ.μ. για το φωτισμό της αίθουσας 6:

$$P_{/τ.μ.} = \frac{2496 \text{ W}}{132 \text{ m}^2} = 18.9 \text{ W/m}^2 \quad (29)$$

Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. για τη θερμική ζώνη απαίτησης 500 lx, το ανώτερο όριο εγκατεστημένης ισχύος για την αίθουσα είναι 16 W/m² [75, p. 39]. Το όριο αυτό υπερβαίνεται. Μια αίθουσα του Πολυτεχνείου φωτίζεται από τις 8:00 μέχρι τις 20:00, δηλαδή για δώδεκα ώρες. Η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντάς τη συνολική ισχύ με τις ώρες λειτουργίας, και διαιρώντας με το 1000, ώστε να είναι σε kWh. Με το συγκεκριμένο φωτισμό, στο αμφιθέατρο 6, η κατανάλωση ανά ημέρα υπολογίζεται:

$$P_{/μέρα} = 2496 * 12/1000 = 29.952 \text{ kWh} \quad (30)$$

Συνολικά, μέσα σε έναν χρόνο η αίθουσα θα παραμείνει φωτισμένη για 190 ημέρες. Συνεπώς, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά έτος διαμορφώνεται:

$$P_{/έτος} = 29.952 * 190 = 5690.88 \text{ kWh} \quad (31)$$

Το συνολικό ετήσιο κόστος της ενέργειας που καταναλώνει ο χώρος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με την τιμή 0.15 €/kWh:

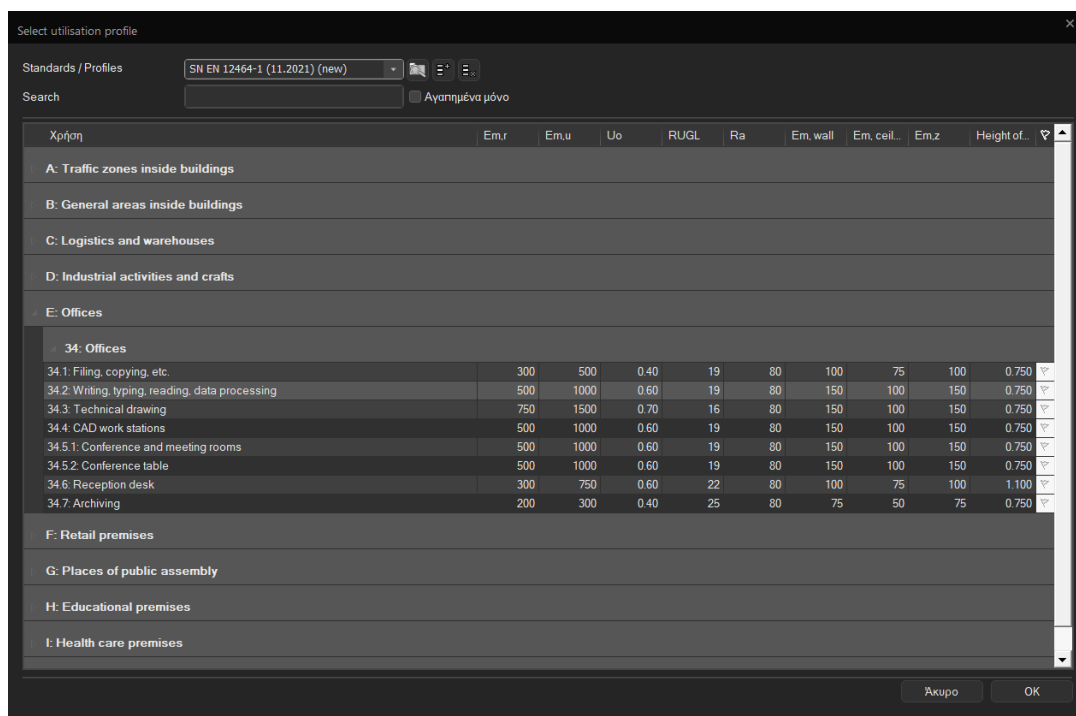
$$K_{/έτος} = 5690.88 * 0.15 = 853.63 \text{ €} \quad (32)$$

8 Προσομοίωση φωτισμού με τα φωτιστικά «ΠΕΤΡΙΔΗ»

8.1 Προσομοίωση φωτισμού στον χώρο γραφείου

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1 [52], οι περιοχές αξιολόγησης φωτισμού καθορίζονται με βάση τη χρήση, τη διάταξη και το μέγεθος του εκάστοτε χώρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ως περιοχή εργασίας ορίζεται ολόκληρος ο χώρος του γραφείου, και συνεπώς ισχύουν οι οπτικές απαιτήσεις που αφορούν τον τεχνητό φωτισμό χώρων γραφείου. Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν μέση ένταση φωτισμού $E_m \geq 500 \text{ lx}$, συνολική ομοιομορφία φωτισμού $U_o \geq 0.6$, δείκτη χρωματικής απόδοσης $R_a \geq 80$ και δείκτη θάμβωσης $UGR \leq 19$.

Η παρούσα μελέτη αφορά τη λειτουργία του χώρου αποκλειστικά με τεχνητό φωτισμό. Συγκεκριμένα, επιλέγεται η «Περιοχή αξιολόγησης 1», ενώ από τις διαθέσιμες ονομαστικές τιμές επιλέγονται οι κατευθυντήριες οδηγίες που αντιστοιχούν στους χώρους γραφείων. Επισημαίνεται πως τόσο ο ανεπαρκής όσο και ο υπερβολικός φωτισμός μπορούν να καταστήσουν τον χώρο μη παραγωγικό και να επιφέρουν δυσκολίες στην αποτελεσματική χρήση του.

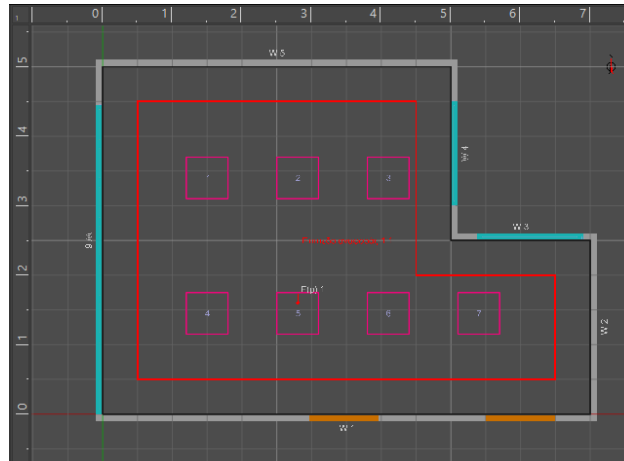


Χρήση	$E_{m,r}$	$E_{m,u}$	U_o	RUGL	R_a	$E_{m, wall}$	$E_{m, ceil...}$	$E_{m, z}$	Height of...
A: Traffic zones inside buildings									
B: General areas inside buildings									
C: Logistics and warehouses									
D: Industrial activities and crafts									
E: Offices									
34: Offices									
34.1 Filing, copying, etc.	300	500	0.40	19	80	100	75	100	0.750
34.2 Writing, typing, reading, data processing	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.3 Technical drawing	750	1500	0.70	16	80	150	100	150	0.750
34.4 CAD work stations	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.5.1: Conference and meeting rooms	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.5.2: Conference table	500	1000	0.60	19	80	150	100	150	0.750
34.6 Reception desk	300	750	0.60	22	80	100	75	100	1.100
34.7 Archiving	200	300	0.40	25	80	75	50	75	0.750
F: Retail premises									
G: Places of public assembly									
H: Educational premises									
I: Health care premises									

Εικόνα 49 Απαιτήσεις για χώρο γραφείων, όπως αυτές επιλέγονται στο πρόγραμμα RELUX.

Η επιλογή των κατάλληλων οδηγιών καθορίζει τα απαραίτητα όρια έντασης και ομοιομορφίας, ώστε να εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα του χώρου. Επειδή η αγορά και η εγκατάσταση των φωτιστικών αποτελεί διαδικασία που δεν είναι εύκολα επαναλήψιμη, κρίθηκε σκόπιμο να επιλεγεί εξ αρχής ο αριθμός φωτιστικών που καλύπτει τις απαιτήσεις φωτισμού για όλο το εύρος θερμοκρασιών χρώματος (θερμή, ουδέτερη, ψυχρή). Συνεπώς, ο υπολογισμός του απαραίτητου αριθμού φωτιστικών για τον εξεταζόμενο χώρο βασίζεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία χρώματος (2700 K), ώστε να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα πρότυπα ακόμη και στην πιο απαιτητική περίπτωση.

Μετά από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού RELUX, προέκυψε ότι οι απαιτήσεις έντασης και ομοιομορφίας φωτισμού ικανοποιούνται επαρκώς με την εγκατάσταση επτά φωτιστικών, η διάταξη των οποίων παρουσιάζεται αναλυτικά στην αντίστοιχη κάτοψη του χώρου στην εικόνα 51.



Εικόνα 50 Κάτοψη του χώρου με τα φωτιστικά.

Για κάθε μια από τις πέντε επιλεγμένες θερμοκρασίες χρώματος (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K), πραγματοποιείται προσομοίωση στο πρόγραμμα RELUX, για τον χώρο αυτόν, με χρήση των tunable white LED φωτιστικών “PETRID1”. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Για κάθε CCT ο χώρος παρουσιάζεται με γραφικές απεικονίσεις σε ψευδοχρώματα, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός και η καταγραφή των αριθμητικών τιμών. Τέλος προβάλλεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου με προσομοίωση του αντίστοιχου φωτισμού.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η οριζόντια ένταση φωτισμού στο επίπεδο αναφοράς και η αντίστοιχη ομοιομορφία, ώστε να είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων, όπως και το Ra και ο UGR επίσης, διασφαλίζοντας έτσι την ομαλή εκτέλεση των εργασιών. Η ένταση φωτισμού, στο οριζόντιο επίπεδο, είναι πάντα υψηλότερη από 500 lx. Ο δείκτης ομοιομορφίας παραμένει ο ίδιος και είναι $U_0 = 0.72$ σε κάθε CCT, μεγαλύτερος δηλαδή από 0.6 που ζητάνε οι απαιτήσεις.

8.1.1 Ρύθμιση της φωτεινής στάθμης των φωτιστικών

Ο αριθμός των απαραίτητων φωτιστικών για τον χώρο υπολογίστηκε σε επτά και ορίστηκε σύμφωνα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία χρώματος, τους 2700 K. Όπως είναι αναμενόμενο, στις μελέτες που έγιναν στο RELUX, η θερμοκρασία χρώματος για τιμές μεγαλύτερες από 2700 K συνεπάγεται και αύξηση στην ένταση φωτισμού και στην ισχύ. Όμως οι απαιτήσεις για τον φωτισμό ενός χώρου γραφείου είναι συγκεκριμένες με όριο τα 500 lx, και η μη αναγκαία αύξησή τους συνεπάγεται αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Για να αποφευχθεί αυτό υπολογίζεται η κατάλληλη ρύθμιση της φωτεινής στάθμης των φωτιστικών για κάθε μια από τις τέσσερις θερμοκρασίες χρώματος (3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K). Με αυτόν τον τρόπο πληρείται η απαίτηση που έχει ο χώρος ως προς την ένταση φωτισμού, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας.

Στον συγκεκριμένο χώρο γραφείου με τα επτά φωτιστικά, εξετάζεται ποιο είναι το ζητούμενο ποσοστό μείωσης της φωτεινής στάθμης.

- Στους 3000 K υπολογίζονται 535 lx, $\frac{535}{500} = 1.07$, άρα 7%, $535 * 0.94 = 503 \text{ lx}$.
Συνεπώς μειώνεται από το 100% στο 94%.
- Στους 4000 K υπολογίζονται 583 lx, $\frac{583}{500} = 1.17$, άρα 17%, $583 * 0.86 = 501 \text{ lx}$.
Συνεπώς, μειώνεται στο 86%.
- Στους 5000 K υπολογίζονται 584 lx, $\frac{584}{500} = 1.17$, άρα 17%, $584 * 0.86 = 502 \text{ lx}$.
Συνεπώς, μειώνεται στο 86%.
- Στους 6500 K υπολογίζονται 560 lx, $\frac{560}{500} = 1.12$, άρα 12%, $560 * 0.9 = 504 \text{ lx}$.
Συνεπώς, μειώνεται στο 90%.

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές της μέσης έντασης σε οριζόντιο επίπεδο καθώς και οι τελικές τιμές μετά από τη ρύθμιση της φωτεινής στάθμης του φωτιστικού. Η μεγαλύτερη μείωση θα χρειαστεί για CCT 4000 K και 5000 K με προσαρμογή στο 86%.

Πίνακας 16 Μεταβολή της οριζόντιας έντασης φωτισμού, μετά από μείωση της φωτεινής στάθμης του φωτιστικού.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx]	Light Output	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx] με ρύθμιση της φωτεινής στάθμης
2700	501	100%	501
3000	535	94%	503
4000	583	86%	501
5000	584	86%	502
6500	560	90%	504

8.2 Προσομοίωση φωτισμού στην αίθουσα διδασκαλίας

Μετά τη δημιουργία του αμφιθεάτρου στο πρόγραμμα RELUX, τοποθετούνται τα παράθυρα και οι πόρτες στις αντίστοιχες θέσεις τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η προσομοίωση με αποκλειστική χρήση τεχνητού φωτισμού. Από τις ιδιότητες του προγράμματος επιλέγεται η «Περιοχή αξιολόγησης 1», στην οποία καθορίζονται οι απαιτήσεις φωτισμού για αίθουσα διδασκαλίας. Δεδομένου ότι ο συγκεκριμένος χώρος τριτοβάθμιας εκπαίδευσης διαθέτει σκούρο πράσινο πίνακα, σύμφωνα με τις συστάσεις του T.E.E. απαιτείται ένταση φωτισμού $E_m \geq 500$ lx, ομοιομορφία $U_o \geq 0.6$, δείκτη χρωματικής απόδοσης $R_a \geq 80$ και δείκτη θάμβωσης $UGR \leq 19$, ώστε να διασφαλίζεται ένα αποτελεσματικό, ευχάριστο και δημιουργικό μαθησιακό περιβάλλον [31]. Τα όρια αυτά καθορίζονται και επιλέγονται στο πρόγραμμα RELUX όπως φαίνεται στην εικόνα 52.

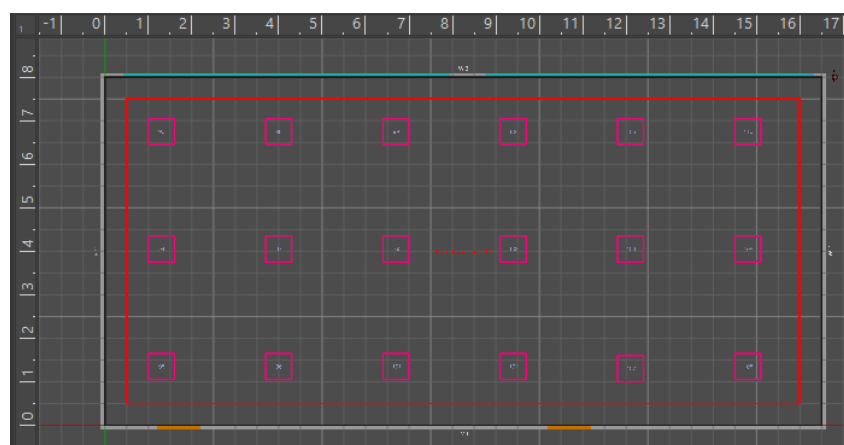
The screenshot displays the RELUX software interface. On the left, a sidebar lists various standards and profiles, with '44.1 Classroom - General activities' selected. The main area shows a table of illuminance values (Em, Emz, Em.wall, Em.ceiling) and other parameters (Uo, RUGL, Ra, hT) for different lighting scenarios. The right panel shows the 'Step of illuminance' settings, including nominal values (500.0 lx, 750.0 lx, 1000.0 lx) and a table of illuminance values (Em, Emz, Em.wall, Em.ceiling) and other parameters (Uo, RUGL, Ra, hT).

Εικόνα 51 Απαιτήσεις για αίθουσα διδασκαλίας, όπως αυτές επιλέγονται στο πρόγραμμα RELUX.

Βασική απαίτηση είναι η τήρηση της προβλεπόμενης οριζόντιας έντασης φωτισμού στο επίπεδο αναφοράς. Όπως φαίνεται στην εικόνα 53, το επίπεδο αυτό είναι ένα νοητό ορθογώνιο παράλληλο προς το δάπεδο (κόκκινο ορθογώνιο), που καθορίζει την επιφάνεια στην οποία εστιάζει η μελέτη φωτισμού εντός του χώρου. Οι διαστάσεις της επιφάνειας αυτής προσδιορίζονται από τις αποστάσεις των πλευρών από τους τοίχους και από το ύψος

της από το έδαφος, στοιχεία που μεταβάλλονται ανάλογα με τη χρήση του χώρου. Στην παρούσα περίπτωση δεν γίνεται επιπρόσθετος έλεγχος σε κάποια άλλη συγκεκριμένη επιφάνεια.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η επιλογή και εγκατάσταση των φωτιστικών είναι μια διαδικασία που δεν επαναλαμβάνεται εύκολα. Συνεπώς, επιλέγεται εξ αρχής ο αριθμός των φωτιστικών που ικανοποιεί τις απαιτήσεις έντασης φωτισμού $\geq 500 \text{ lx}$, στο οριζόντιο επίπεδο, ρυθμίζοντας τα φωτιστικά στην πιο χαμηλή θερμοκρασία χρώματος, δηλαδή στους 2700 K. Μετά από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα RELUX, διαπιστώθηκε ότι ο συγκεκριμένος χώρος διδασκαλίας του Πολυτεχνείου πληροί τις απαιτήσεις έντασης και ομοιομορφίας φωτισμού με την τοποθέτηση δεκαοκτώ φωτιστικών, τα οποία είναι διατεταγμένα όπως φαίνεται στην Εικόνα 53.



Εικόνα 52 Κάτοψη του αμφιθεάτρου με τοποθετημένα τα φωτιστικά.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες χρώματος (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K) των tunable white LED φωτιστικών PETRIDΙ στον χώρο αυτό, παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Οι τιμές έντασης φωτισμού και ομοιομορφίας υπολογίζονται και συγκρίνονται από το ίδιο το πρόγραμμα με τις καθορισμένες απαιτήσεις.

Για κάθε CCT, παρουσιάζεται αρχικά ο χώρος με χρήση ψευδοχρωμάτων, στη συνέχεια παρατίθενται οι αντίστοιχες τιμές έντασης και ομοιομορφίας, ενώ τέλος προβάλλεται μια τρισδιάστατη εικονική απεικόνιση του χώρου με τον αντίστοιχο φωτισμό.

Προκύπτει πως πληρούνται όλες οι απαιτήσεις έντασης φωτισμού, με μόνη εξαίρεση την ομοιομορφία, η οποία είναι λίγο κάτω από το καθορισμένο όριο, δηλαδή $U_0 = 0.53$. Τα γραφήματα με ψευδοχρώματα δείχνουν ότι η ομοιομορφία μειώνεται στις γωνίες της αίθουσας, οι οποίες εμφανίζονται με πορτοκαλί χρώμα. Ωστόσο, στις συγκεκριμένες περιοχές δεν υπάρχουν θέσεις μάθησης (θρανία), ενώ στους υπόλοιπους χώρους η κατάσταση του φωτισμού είναι ικανοποιητική, όπως υποδηλώνει το ομοιόμορφο πράσινο χρώμα. Θεωρητικά θα ήταν δυνατό να αυξηθεί ο αριθμός των φωτιστικών ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ομοιομορφία (0.6), κάτι τέτοιο όμως θα οδηγούσε σε αύξηση της έντασης φωτισμού σε όλες τις θερμοκρασίες χρώματος, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλότερης (2700 K). Έτσι, μια τέτοια λύση δεν κρίθηκε σκόπιμη.

8.2.1 Ρύθμιση της φωτεινής στάθμης των φωτιστικών

Ο αριθμός των απαραίτητων φωτιστικών για τον χώρο υπολογίστηκε σε δεκαοκτώ, σύμφωνα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία χρώματος, τους 2700 K. Όπως είναι αναμενόμενο και αναφέρθηκε παραπάνω, στις μετρήσεις που έγιναν στο λογισμικό RELUX, για τιμές μεγαλύτερες από 2700 K, η μέση ένταση φωτισμού είναι μεγαλύτερη. Οι απαιτήσεις για τον φωτισμό μιας αίθουσας διδασκαλίας όμως είναι συγκεκριμένες, οπότε η αύξηση αυτή οδηγεί

σε αχρείαστη κατανάλωση ενέργειας. Ο στόχος λοιπόν είναι να περιοριστεί η ένταση των φωτιστικών με κατάλληλη ρύθμιση της φωτεινής στάθμης τους (dimming). Επομένως, όταν επιτυγχάνεται το όριο των 500 lx που έχει απαίτηση ο χώρος, ταυτόχρονα γίνεται και εξοικονόμηση ενέργειας.

Συγκεκριμένα, σε αυτή την αίθουσα διδασκαλίας, θα εξεταστεί ποια είναι η απαραίτητη ρύθμιση φωτεινής στάθμης.

- Στους 3000 K υπολογίζονται 527 lx, $\frac{527}{500} = 1.05$, άρα 5 %.
Προκύπτει $527 * 0.95 = 501$ lx. Συνεπώς, μειώνεται από το 100 % στο 95 %.
- Στους 4000 K υπολογίζονται 552 lx, $\frac{552}{500} = 1.1$, άρα 10 %.
Προκύπτει $552 * 0.91 = 502$ lx. Συνεπώς, μειώνεται στο 91 %.
- Στους 5000 K υπολογίζονται 542 lx, $\frac{542}{500} = 1.08$, άρα 8 %.
Προκύπτει $542 * 0.93 = 504$ lx. Συνεπώς, μειώνεται στο 93 %.
- Στους 6500 K υπολογίζονται 510 lx, $\frac{510}{500} = 1.02$, άρα 2 %.
Προκύπτει $510 * 0.98 = 500$ lx. Συνεπώς, μειώνεται στο 98 %.

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές της μέσης έντασης σε οριζόντιο επίπεδο καθώς και οι τελικές τιμές μετά από τη ρύθμιση της φωτεινής στάθμης του φωτιστικού. Η μεγαλύτερη μείωση θα χρειαστεί για CCT 4000 K με προσαρμογή στο 91%.

Πίνακας 17 Μεταβολή της οριζόντιας έντασης φωτισμού, μετά από μείωση της φωτεινής στάθμης του φωτιστικού.

Συχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx]	Light Output	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx] με ρύθμιση της φωτεινής στάθμης
2700	502	100%	502
3000	527	95%	501
4000	552	91%	502
5000	542	93%	504
6500	510	98%	500

8.3 Υπολογισμός μετρικών συστημάτων

8.3.1 Εισαγωγή

Δύο κορυφαίες μετρικές έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως μέχρι σήμερα στον σχεδιασμό φωτισμού: η μία είναι η ισοδύναμη μελανοπική ένταση (EML) και η άλλη το κίρκαδικό ερέθισμα (CS). Και οι δύο χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικοποιηθούν και να συγκριθούν οι κίρκαδικές μετρικές του ανθρωποκεντρικού φωτισμού και η αποτελεσματικότητα των διάφορων πηγών φωτός στην αναστολή της έκκρισης μελατονίνης.

Και τα δύο μοντέλα, EML και CS βασίζονται στη φασματική κατανομή ισχύος και όχι απλώς στην οπτική ένταση. Επίσης και οι δύο αυτές μετρικές εξετάζουν το φως που εισέρχεται στο μάτι σε κατακόρυφο επίπεδο, αντίθετα από τον γενικό φωτισμό που εστιάζει απλά στην ορατότητα του χώρου, λαμβάνοντας έτσι υπόψη την επιφάνεια στην οποία εκτελείται μια εργασία ή τον στόχος που πρέπει να επιτευχθεί.

Οι δύο χώροι που χρησιμοποιήθηκαν για να πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις των μετρικών EML και CS, προσομοιώθηκαν με χρήση μόνο τεχνητού φωτισμού.

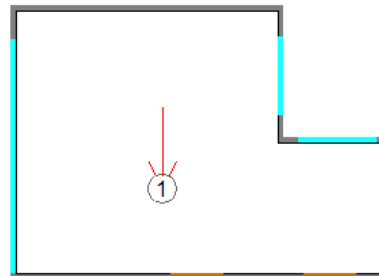
8.3.2 Υπολογισμός ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού

8.3.2.1 Εισαγωγή

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού (EML) ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται στο πρότυπο WELL Building Standard v2 (2019). Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, οι ελάχιστες απαιτούμενες τιμές EML ορίζονται στα 200 EML με χρήση φυσικού και τεχνητού φωτισμού ή στα 150 EML για χρήση αποκλειστικά τεχνητού φωτισμού, με μέτρηση στο κατακόρυφο επίπεδο, στο ύψος των ματιών (1.20 m). Η εφαρμογή αυτών των κατευθυντήριων γραμμών επιτρέπει την αξιολόγηση της επάρκειας του ανθρωποκεντρικού φωτισμού στους υπό εξέταση χώρους, εξασφαλίζοντας όχι μόνο την οπτική άνεση αλλά και την κirkάδια ευεξία των χρηστών [46].

8.3.2.2 Προσομοίωση στον χώρο γραφείων

Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης έντασης φωτισμού στο χώρο γραφείων επιλέχθηκε η θέση ενός παρατηρητή σε κεντρικό σημείο του χώρου, με ύψος ματιών στα 1.20 m, ώστε να προσομοιωθεί ρεαλιστικά η οπτική εμπειρία ενός εργαζόμενου. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό RELUX, μετρήθηκε η ένταση του κατακόρυφου φωτισμού (E_V) που προσπίπτει στα μάτια του παρατηρητή αυτού, η οποία εκφράζεται σε φωτοπικά lx για κάθε μια από τις εξεταζόμενες CCT (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K).



Ένταση κατακόρυφου φωτισμού

Περιοχή μέτρησης	X	Y	Z	E	από κατεύθυνση
E(p) 1	2.8 m	1.6 m	1.2 m	357 lx	Βόρεια (0°)

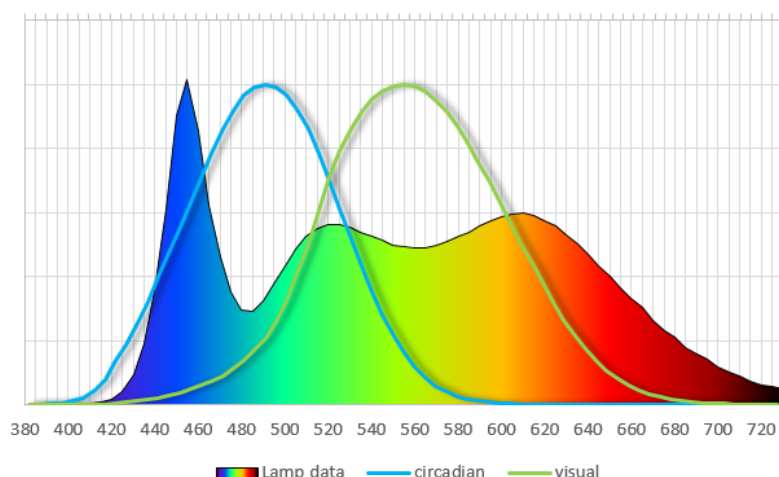
Εικόνα 53 Η θέση του παρατηρητή φαίνεται στην κάτοψη του χώρου γραφείου. Αυτή είναι η ένταση κατακόρυφου φωτισμού για θερμοκρασία χρώματος στους 2700 K, όπως παρουσιάζεται στο RELUX.

Υπολογίζεται η ένταση κατακόρυφου φωτισμού αντίστοιχα και για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες χρώματος με οι τιμές φωτοπικών lx που προκύπτουν, να παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 18.

Πίνακας 18 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στον χώρο γραφείου, για τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx]	Ένταση κατακόρυφου φωτισμού E_V [lx]	Light Output	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx] με dimming	Ένταση κάθετου φωτισμού E_V [lx] με dimming
2700	501	357	100%	501	357
3000	535	381	94%	503	358
4000	583	413	86%	501	355
5000	584	411	86%	502	354
6500	560	392	90%	504	353

Στη συνέχεια, η τιμή του R υπολογίζεται με το “Melanopic ratio data sheet” που παρέχεται από το WELL Building Standard και διατίθεται δωρεάν [WELL calculator 2019]. Πρόκειται για ένα φύλλο δεδομένων Excel στο οποίο καταγράφονται τα δεδομένα της φασματικής κατανομής ισχύος της συγκεκριμένης φωτεινής πηγής, με βήμα 5 nm.



Εικόνα 54 Γράφημα στο WELL calculator για προσδιορισμό του ratio R – SPD των 5000 K για το φωτιστικό tunable white LED «PETRIDΙ» (υπολογίστηκε R = 0.930).

Για να υπολογιστεί η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού (EML), πολλαπλασιάζονται τα φωτοπικά lx (L) που έχουν μετρηθεί στον χώρο γραφείου, με τον λόγο R, για την κάθε θερμοκρασία χρώματος αντίστοιχα. Δηλαδή εφαρμόζεται ο τύπος: $EML = L \times R$.

- Για 2700 K, $357 \times 0.529 = 189$ EML
- Για 3000 K, $381 \times 0.616 = 235$ EML
- Για 4000 K, $413 \times 1.049 = 433$ EML
- Για 5000 K, $411 \times 0.930 = 382$ EML
- Για 6500 K, $392 \times 1.052 = 412$ EML

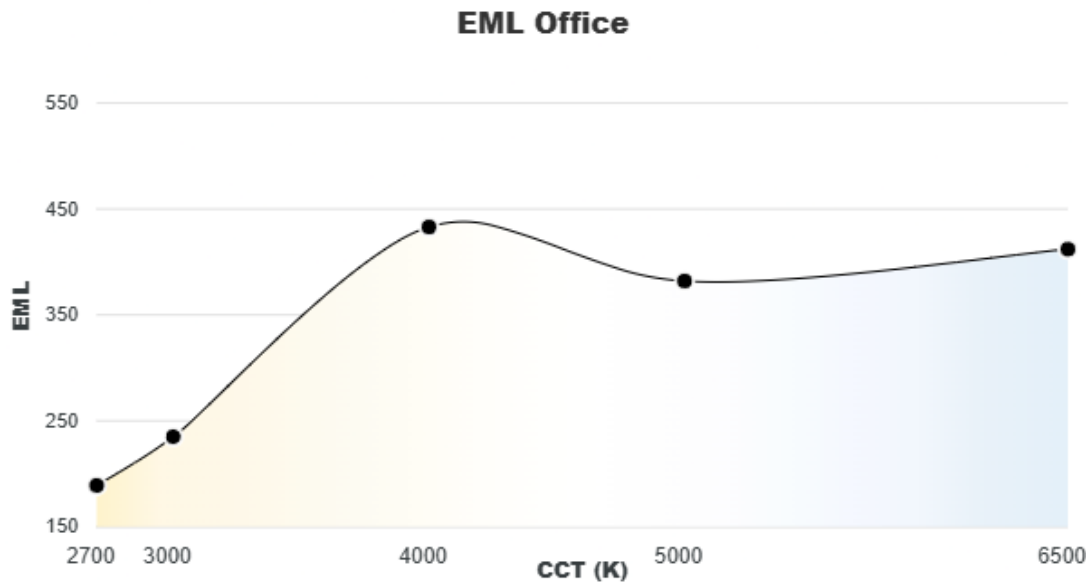
Τα αποτελέσματα σημειώνονται στον πίνακα 19. Στον θερμότερο φωτισμό σημειώνεται η χαμηλότερη τιμή EML, όπως είναι αναμενόμενο. Η υψηλότερη σημειώνεται στους 4000 K.

Πίνακας 19 Μετρήσεις R και υπολογισμός EML για κάθε μια από τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος που εξετάζονται στον χώρο γραφείου προς μελέτη.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση κατακόρυφου φωτισμού E_v [lx]	Μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, MEER ή R	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού [EML]
2700	357	0.529	189
3000	381	0.616	235
4000	413	1.049	433
5000	411	0.93	382
6500	392	1.052	412

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο μέρος, το στάνταρ WELL θέτει όρια με βάση τον κάθετο φωτισμό στο ύψος των ματιών. Ως ελάχιστες τιμές λοιπόν, με χρήση μόνο τεχνητού φωτισμού, έχουν οριστεί τα 150 EML. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται ότι όλες οι

τιμές είναι μεγαλύτερες από τόσο. Συνεπώς, τα επίπεδα τεχνητού φωτισμού καλύπτουν τις καθορισμένες απαιτήσεις και πληρούν τις ανάγκες των χρηστών.



Γράφημα 10 Διακύμανση τιμών EML για τον χώρο γραφείου, από 2700 K έως 6500 K.

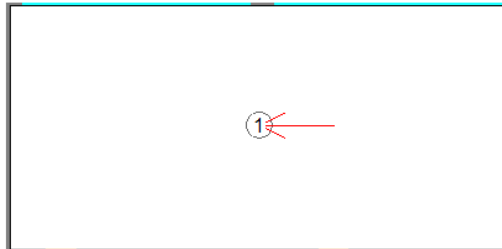
Σε αυτό το σημείο, μπορεί να αξιοποιηθεί η ρύθμιση φωτεινής στάθμης, για να επιτυγχάνεται χαμηλότερη τιμή EML, σε όλες τις θερμοκρασίες χρώματος, ώστε να εξασφαλίζεται και κάποια εξοικονόμηση ενέργειας. Στον παρακάτω πίνακα 20 υπολογίζονται οι νέες τιμές της έντασης του οριζόντιου φωτισμού, καθώς και οι νέες τιμές έντασης του κάθετου. Το ζητούμενο είναι στον οριζόντιο φωτισμό να επιτυγχάνονται τιμές άνω των 500 lx. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να σημειώνεται μικρή διακύμανση και στις νέες τιμές του κάθετου φωτισμού, με εύρος 353 - 358 lx. Πολλαπλασιάζοντας με την τιμή του R, προκύπτουν οι νέες τιμές EML όπως αναγράφονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 20. Η τιμή του R δεν αλλάζει και προσδίδει διακύμανση στο αποτέλεσμα της μελανοπικής έντασης φωτισμού, με εύρος, από το χαμηλότερο, 189 EML στους 2700 K, μέχρι το υψηλότερο 372 EML στους 4000 K. Όλες οι τιμές είναι μεγαλύτερες από το απαιτούμενο όριο, για τη σωστή λειτουργία του χώρου με τεχνητό φωτισμό, δηλαδή άνω των 150 EML.

Πίνακας 20 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στον χώρο γραφείου, μετά από κατάλληλη ρύθμιση της έντασης φωτισμού για τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx]	Light Output	Νέα ένταση οριζόντιου φωτισμού $E_{H,d}$ [lx] με dimming	Νέα ένταση κάθετου φωτισμού $E_{V,d}$ [lx]	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση με dimming [EML]
2700	501	100%	501	357	189
3000	535	94%	503	358	221
4000	583	86%	501	355	372
5000	584	86%	502	354	329
6500	560	90%	504	353	371

8.3.2.3 Προσομοίωση στην αίθουσα διδασκαλίας

Για να εξεταστεί η κατακόρυφη ένταση φωτισμού, επιλέγεται ένας παρατηρητής σε μια τυχαία θέση, στο κέντρο του υπό εξέταση χώρου. Η μέτρηση πραγματοποιείται σε ύψος 1.2 m, που αντιστοιχεί στο επίπεδο ενός καθιστού χρήστη, με κατεύθυνση προς τα ανατολικά. Με αυτή την επιλογή προσομοιώνεται η οπτική που θα έχει ένας φοιτητής προς τον πίνακα. Στην παρακάτω εικόνα 56 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από το λογισμικό RELUX, στο οποίο απεικονίζεται η μέτρηση της έντασης κατακόρυφου φωτισμού σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου, με το φωτιστικό να έχει οριστεί σε θερμοκρασία χρώματος 2700 K. Το αποτέλεσμα δίνει τα φωτοπικά lx.



Ένταση κατακόρυφου φωτισμού

Περιοχή μέτρησης	X	Y	Z	E	από κατεύθυνση
E(p) 1	8.25 m	4.05 m	1.2 m	453 lx	Ανατολικά (90°)

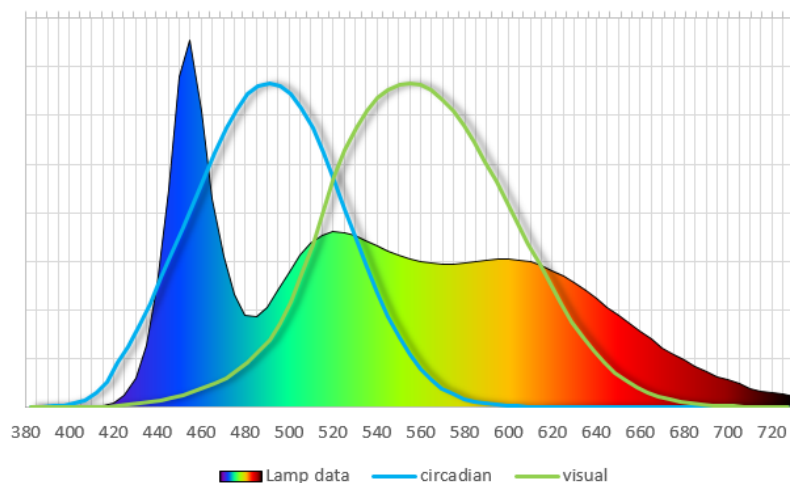
Εικόνα 55 Η θέση του παρατηρητή φαίνεται στην παραπάνω κάτοψη της αίθουσας διδασκαλίας. Υπολογίζεται η τιμή της έντασης κατακόρυφου φωτισμού για θερμοκρασία χρώματος στους 2700 K.

Επαναλαμβάνεται η διαδικασία και υπολογίζεται η ένταση κατακόρυφου φωτισμού και για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες χρώματος. Οι τιμές φωτοπικών lx που προκύπτουν, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 21.

Πίνακας 21 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στην αίθουσα διδασκαλίας, για τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx]	Ένταση κατακόρυφου φωτισμού E_V [lx]
2700	502	453
3000	527	474
4000	552	493
5000	542	481
6500	510	451

Αντίστοιχα με τον χώρο γραφείου, η τιμή του R μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση του υπολογισμού του μελανοπικού λόγου στο “Melanopic ratio data sheet” που αναπτύχθηκε από το WELL Building Institute [WELL calculator 2019]. Σε αυτό το φύλλο δεδομένων Excel παρουσιάζονται οι μετρήσεις της φασματικής κατανομής ισχύος της συγκεκριμένης φωτεινής πηγής, με βήμα 5 nm.



Εικόνα 56 Γράφημα στο WELL calculator για προσδιορισμό του ratio R – SPD των 6000 K για το φωτιστικό tunable white LED “PETRID” (υπολογίστηκε $R = 1.052$).

Για να υπολογιστεί η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού (EML), πολλαπλασιάζονται τα φωτοπικά lx (L) που έχουν μετρηθεί στην αίθουσα διδασκαλίας, για την κάθε θερμοκρασία χρώματος αντίστοιχα. Δηλαδή εφαρμόζεται ο τύπος: $EML = L \times R$.

- Για 2700 K, $453 \times 0.529 = 240$ EML
- Για 3000 K, $474 \times 0.616 = 292$ EML
- Για 4000 K, $493 \times 1.049 = 517$ EML
- Για 5000 K, $481 \times 0.930 = 447$ EML
- Για 6500 K, $451 \times 1.052 = 474$ EML

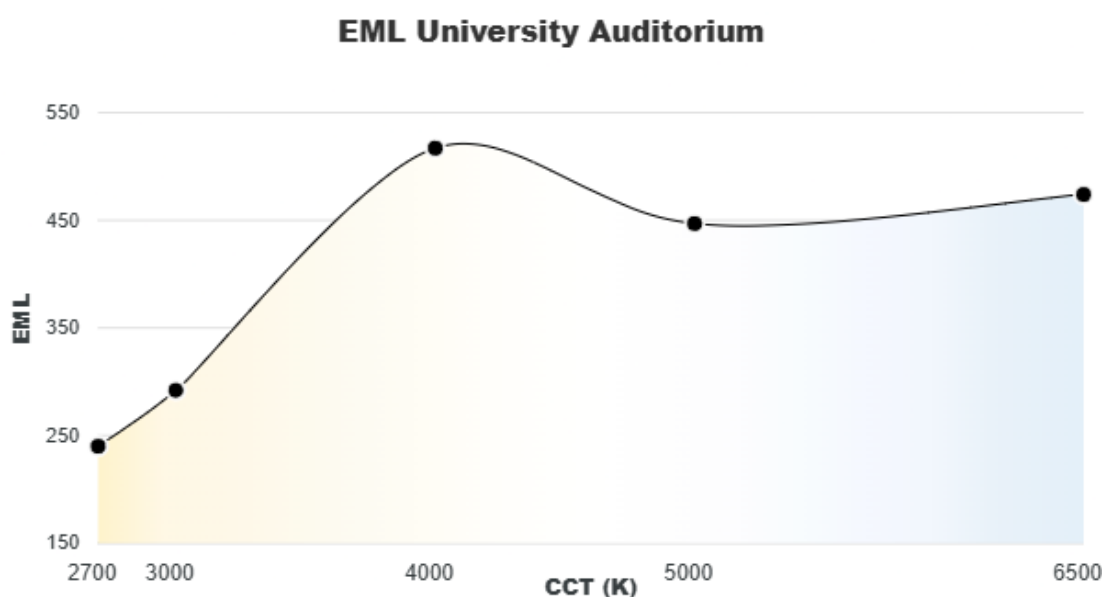
Αντίστοιχα με τον χώρο γραφείου και στην αίθουσα διδασκαλίας οι απαιτήσεις του στάνταρ WELL θέτουν ως ελάχιστη τιμή τα 150 EML, καθώς εξετάζεται με χρήση μόνο τεχνητού φωτισμού. Όλες οι τιμές που προκύπτουν για τις διάφορες θερμοκρασίες χρώματος παραπάνω έχουν $EML > 150$, άρα πληρούν αυτή την προϋπόθεση.

Ο Πίνακας 22 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος, δηλαδή την ένταση του κατακόρυφου φωτισμού, τη μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης και το αποτέλεσμα της ισοδύναμης μελανοπικής έντασης φωτισμού. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της CCT οι τιμές των EML αυξάνονται, φτάνοντας το μέγιστο στους 4000 K και μετά παρουσιάζουν μια μείωση στους 5000 K και μετά ξανά μια άνοδο στους 6500 K, χωρίς όμως να φτάσουν την μέγιστή τους τιμή στους 4000 K. Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι αυτό που θα αναμενόταν αρχικά, αφού η φασματική ευαισθησία της μελατονίνης, παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στα χαμηλά μήκη κύματος (στην περιοχή του μπλε φωτός), αλλά εδώ εξετάζεται ένα φωτιστικό με συγκεκριμένο SPD. Είναι λοιπόν λογικό να υπάρχει αυτή η εικόνα στις τιμές.

Πίνακας 22 Μετρήσεις R και υπολογισμός EML για κάθε μια από τις πέντε θερμοκρασίες χρώματος που εξετάζονται στην προς μελέτη αίθουσα διδασκαλίας.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση κατακόρυφου φωτισμού E_v [lx]	Μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, MEER ή R	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού [EML]
2700	453	0.529	240
3000	474	0.616	292
4000	493	1.049	517
5000	481	0.93	447
6500	451	1.052	474

Οι τιμές EML παρουσιάζονται γραφικά παρακάτω, όπως διαμορφώνονται ανάλογα με τις τιμές του CCT.



Γράφημα 11 Διακύμανση τιμών EML για την αίθουσα διδασκαλίας, από 2700 K έως 6500 K.

Σε αυτό το σημείο, μπορεί να αξιοποιηθεί η ρύθμιση φωτεινής στάθμης, για να επιτυγχάνεται χαμηλότερη τιμή EML , σε όλες τις θερμοκρασίες χρώματος, ώστε να επιτυγχάνεται τελικά και κάποια εξοικονόμηση ενέργειας. Στον πίνακα 23 υπολογίζονται οι νέες τιμές της έντασης οριζόντιου φωτισμού, καθώς και οι νέες τιμές έντασης του κάθετου φωτισμού. Το ζητούμενο είναι στον οριζόντιο φωτισμό να επιτυγχάνονται τιμές ≥ 500 lx. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή διακύμανση και στις νέες τιμές του κάθετου φωτισμού, με εύρος 442 - 453 lx. Πολλαπλασιάζοντας με την τιμή του R , προκύπτουν οι τιμές EML στην τελευταία στήλη. Η τιμή του R είναι η ίδια με παραπάνω και προσδίδει διακύμανση στο αποτέλεσμα της μελανοπικής έντασης φωτισμού, με εύρος από 240 EML στους 2700 K, μέχρι 470 EML στους 4000 K. Όλες οι τιμές είναι μεγαλύτερες από το απαιτούμενο όριο, για τη σωστή λειτουργία του χώρου με τεχνητό φωτισμό, δηλαδή από 150 EML .

Πίνακας 23 Μετρήσεις έντασης κατακόρυφου φωτισμού στην αίθουσα διδασκαλίας, μετά από κατάλληλη ρύθμιση της έντασης φωτισμού για τις 5 θερμοκρασίες χρώματος προς μελέτη.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση οριζόντιου φωτισμού E_H [lx]	Light Output	Ένταση οριζόντιου φωτισμού $E_{H,d}$ [lx] με dimming	Ένταση κάθετου φωτισμού με dimming $E_{V,d}$ [lx]	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού με dimming [EML]
2700	502	100%	502	453	240
3000	527	95%	501	450	277
4000	552	91%	502	448	470
5000	542	93%	504	447	416
6500	510	98%	500	442	465

8.3.3 Μέτρηση κιρκάδιου ερεθίσματος

8.3.3.1 Εισαγωγή

Το κιρκάδιο φως (Circadian Light – CLA) αναφέρεται στην ακτινοβολία που προσπίπτει στον κερατοειδή χιτώνα του οφθαλμού, σταθμισμένη κατά τρόπο ώστε να αντικατοπτρίζει τη φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου κιρκάδιου συστήματος. Η τιμή του CLA προκύπτει από τη μέτρηση της οξείας καταστολής της μελατονίνης μετά από έκθεση διάρκειας μίας ώρας. Από το CLA προκύπτει το κιρκάδιο ερέθισμα (Circadian Stimulus - CS), που εκφράζει την αποτελεσματικότητα της φασματικά σταθμισμένης ακτινοβολίας στον κερατοειδή, σε ένα εύρος τιμών από το κατώφλι ($CS = 0.1$) μέχρι τον κορεσμό ($CS = 0.7$). Η τιμή του CS, η οποία συσχετίζεται άμεσα με την καταστολή της μελατονίνης, θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά σε σχέση με την ώρα της ημέρας, ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες μετατοπίσεις στη φάση του κιρκάδιου ρυθμού και παράλληλα να ενισχύεται η εγρήγορση και η αποδοτικότητα [43].

Η σημασία του κιρκάδιου ερεθίσματος ως μέτρηση της βιολογικής αποτελεσματικότητας του φωτισμού υποστηρίζεται επίσης από τους Rea και Figueiro (2018), οι οποίοι προτείνουν τη χρήση του CS ως αξιόπιστης και πρακτικά εφαρμόσιμης μετρικής για την αξιολόγηση και τον σχεδιασμό αρχιτεκτονικού φωτισμού. Η μετρική αυτή, συγκριτικά με άλλες, όπως το ισοδύναμο μελανοπικό lux (EML), ενσωματώνει πληρέστερα τις παραμέτρους έντασης και φασματικής κατανομής του φωτός, αξιολογώντας με μεγαλύτερη ακρίβεια την επίδρασή του στο κιρκάδιο σύστημα. Η χρήση του CS ενισχύει την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού φωτισμού [76].

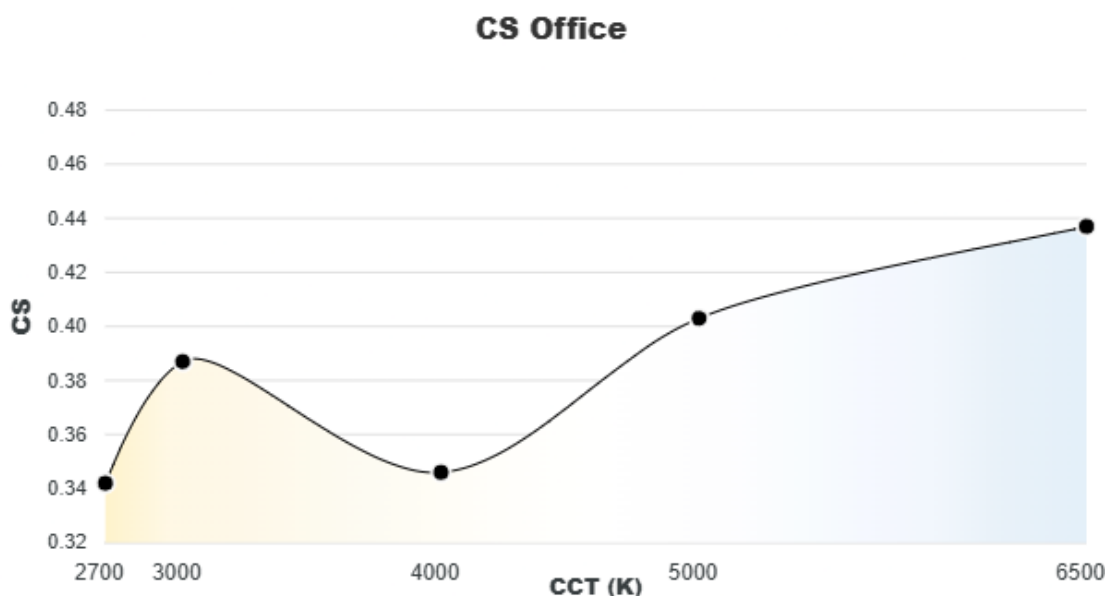
8.3.3.2 Υπολογισμός στο γραφείο

Καταρχάς υπολογίζονται μέσω του “Circadian Stimulus Calculator” οι τιμές CS και CLA για τα φωτιστικά με κάθετο φωτισμό αυτόν που υπολογίσαμε παραπάνω, μετά από ρύθμιση της φωτεινότητας. Δεν παρουσιάζει μεγάλο εύρος το CS, κυμαίνεται περίπου από το 0.34 μέχρι 0.44 και το CLA από 342 μέχρι 564. Η μικρότερη τιμή παρατηρείται στη μικρότερη CCT, δηλαδή στους 2700 K, ενώ η μέγιστη σημειώνεται στους 6500 K. Όπως αναμένεται, η μέγιστη τιμή να σημειώνεται στη μέγιστη CCT. Στην 4000 K παρατηρείται μείωση της τιμής.

Πίνακας 24 Υπολογισμός CS και CLA στον χώρο γραφείου.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση κατακόρυφου φωτισμού [lx]	CLA	CS
2700	357	342	0.342
3000	381	431	0.387
4000	413	348	0.346
5000	411	469	0.403
6500	392	564	0.437

Το γράφημα 12 παρουσιάζει και εποπτικά πως διαμορφώνεται η τιμή του CS, για τις διάφορες τιμές της συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος που εξετάζονται. Όπως αναμένεται, η έκθεση σε «γαλαζωπό» φως, δηλαδή υψηλές τιμές CCT, προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της έκκρισης μελατονίνης από ότι η έκθεση σε «κιτρινωπό» φως χαμηλότερων τιμών CCT.



Γράφημα 12 Διακύμανση τιμών CS για τον χώρο γραφείου, από 2700 K έως 6500 K.

Για εργασιακούς χώρους, συνιστάται έκθεση σε φωτισμό με τιμή $CS \geq 0.3$ για διάρκεια τουλάχιστον μίας ώρα, κατά τις πρωινές ώρες. Η τιμή CS που σημειώνεται στο γράφημα 9 είναι ιδανική για τη βελτίωση της εγρήγορσης και της παραγωγικότητας. Το έντονο κιρκάδιο ερέθισμα ($CS \geq 0.4$) μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τον κιρκάδιο ρυθμό εάν χρησιμοποιηθεί αργότερα την ημέρα (μετά τις 15:00 - 16:00), οπότε επιλέγονται χαμηλότερες τιμές CCT κάτω από 5000 K τότε. Ιδανικά μετά τις 14:00 - 15:00 θα πρέπει να χρησιμοποιείται φωτισμός με χαμηλότερη τιμή ($CS < 0.3$), καθώς έτσι βελτιώνεται η εγρήγορση, η διάθεση και η ποιότητα ύπνου των εργαζομένων.

8.3.3.3 Υπολογισμός στην αίθουσα διδασκαλίας

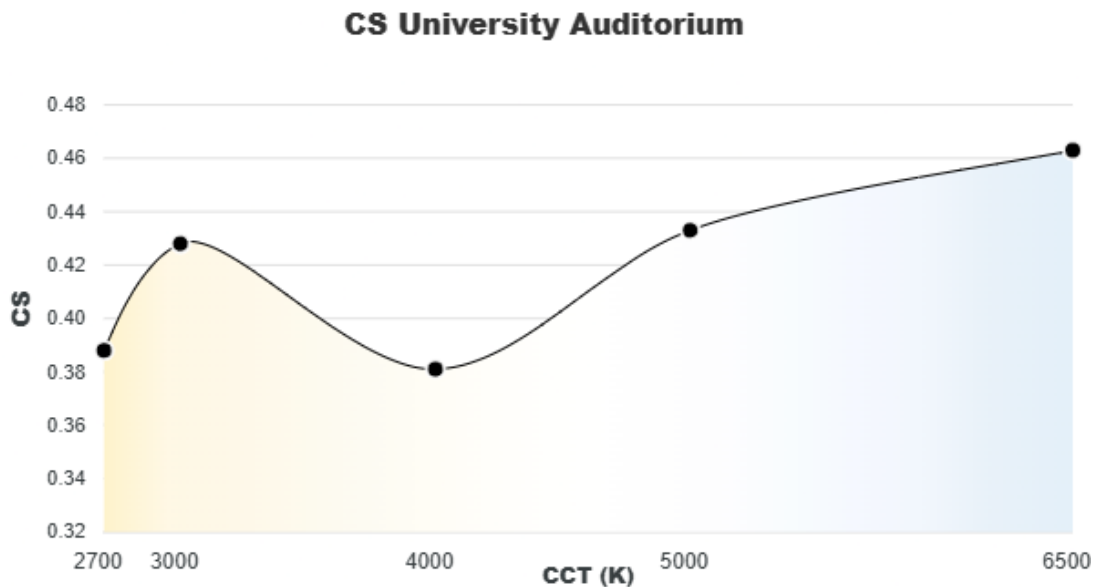
Υπολογίζονται και εδώ οι τιμές CS και CLA για τη συγκεκριμένη αίθουσα του Πολυτεχνείου. Παρατηρείται πολύ μικρή διακύμανση, με τις τιμές του CS να βρίσκονται περίπου ανάμεσα στο 0.38 και 0.46 και του CLA μεταξύ 419 και 652. Σύμφωνα με το ερευνητικό κέντρο LRC (Lighting Research Center), προτείνεται η παροχή φωτισμού με τιμή $CS \geq 0.3$ καθ' όλη τη

διάρκεια της ημέρας στη σχολή. Αυτό συμβάλλει στην ενίσχυση της εγρήγορσης, της διάθεσης και έχει θετική επίπτωση στην συγκέντρωση των φοιτητών.

Πίνακας 25 Υπολογισμός CS και CLA στην αίθουσα διδασκαλίας.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος CCT [K]	Ένταση κατακόρυφου φωτισμού [lx]	CLA	CS
2700	453	434	0.388
3000	474	536	0.428
4000	493	419	0.381
5000	481	552	0.433
6500	451	652	0.463

Το γράφημα 13 παρουσιάζει και εποπτικά πως διαμορφώνεται η τιμή του CS που υπολογίστηκε παραπάνω, ανάλογα με την τιμή της συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος που εξετάζεται. Μεγαλύτερη μείωση της έκκρισης μελατονίνης παρατηρείται στην υψηλότερη CCT και μικρότερη για τις πιο χαμηλές τιμές CCT.



Γράφημα 13 Διακύμανση τιμών CS για την αίθουσα διδασκαλίας, από 2700 K έως 6500 K.

Η τιμή CS στο εύρος που παρουσιάζεται στο συγκεκριμένο φωτιστικό σε αυτόν τον χώρο, είναι ιδανική για τη βελτίωση της συγκέντρωσης και της εγρήγορσης των σπουδαστών, ειδικά για πρωινές και μεσημεριανές διαλέξεις, μέχρι και το μεσημεριανό διάλειμμα στις 14:30. Αργότερα, μετά τις 15:00, που ξεκινάν τα απογευματινά μαθήματα ιδανικά πρέπει να χρησιμοποιείται φωτισμός με χαμηλότερη τιμή CS ή τουλάχιστον πιο κοντά στο 0.3.

9 Σενάρια φωτισμού των χώρων με χρήση Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού

9.1 Εισαγωγή

Ο στόχος του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού είναι η μίμηση του εκάστοτε φυσικού φωτισμού. Στους δύο χώρους προς μελέτη, επιλέγεται τις πρώτες πρωινές ώρες ουδέτερος λευκός φωτισμός, στη συνέχεια μέχρι το μεσημέρι μεταβάλλεται σε ψυχρό, ο οποίος προκαλεί διέγερση και βελτιώνει τη συγκέντρωση. Τις απογευματινές ώρες επιλέγεται θερμός φωτισμός, που ασκεί καταπραϋντική επίδραση στους χρήστες. Δεδομένου ότι η μελέτη αφορά αποκλειστικά στον τεχνητό φωτισμό, στα παρακάτω σενάρια δεν θα εξεταστεί η επιλογή του συστήματος φωτισμού εποχιακά. Τα σενάρια θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και σε άλλους χώρους, αντίστοιχης λειτουργίας, μεγαλύτερου ή μικρότερου μεγέθους.

9.2 Προτάσεις χρονοδιαγράμματος Φωτισμού με βάση τις Αρχές του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού (HCL) σε περιβάλλον γραφείου.

Ο πρώτος χώρος μελέτης της παρούσας εργασίας είναι ένα γραφείο με τέσσερις εργαζόμενους. Οι εργαζόμενοι έχουν ευέλικτο ωράριο και ο χρόνος απασχόλησής τους είναι ένα οκτάωρο μεταξύ 08:00 και 18:00, με ένα διάλειμμα έως μία ώρα στο διάστημα 12:00 με 14:00. Συνεπώς, ο χώρος πρέπει να παραμένει φωτισμένος και λειτουργικός για αυτό το διάστημα των δέκα ωρών.

Η τιμή της CCT μεταβάλλεται μέσα στην ημέρα σύμφωνα με τα παρακάτω:

- Πρώτες πρωινές ώρες: μέτρια CCT 4000 K (ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή αρχή της ημέρας)
- Πρωινές και μεσημεριανές ώρες: υψηλή CCT, από 5000 K μέχρι 6500 K και επιστροφή ξανά σε 5000 K (τιμές που προσομοιάζουν το πρωινό φυσικό φως, υποστηρίζουν τον κιρκάδιο ρυθμό και παρέχουν εγρήγορση)
- Νωρίς το απόγευμα: ουδέτερος λευκός φωτισμός, με CCT 4000 K (τιμή που παρέχει ισορροπία και ευοδώνει τη συγκέντρωση των εργαζόμενων, χωρίς κόπωση κατά την αρχή του απογεύματος)
- Αργότερα το απόγευμα: βαθμιαία μείωση CCT ως 2700 K (τιμές που μειώνουν το στρες και προετοιμάζουν για χαλάρωση/ξεκούραση)

Στον χώρο μπορεί να υπάρχει και συμπληρωματικός φωτισμός για εξατομικευμένη χρήση, σε περίπτωση που αυτό κριθεί αναγκαίο από κάποιον εργαζόμενο. Τα σενάρια αφορούν τον γενικό φωτισμό. Παράλληλα με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας χρώματος ρυθμίζεται κατάλληλα και φωτεινή στάθμη. Η μέση ένταση οριζόντιου φωτισμού επιλέγεται κοντά στο απαιτούμενο όριο των 500 lx. Στόχος είναι η επίτευξη ανθρωποκεντρικού φωτισμού που να πληροί όλες τις απαιτήσεις και ταυτόχρονα να είναι ενεργειακά αποδοτικός.

Μέσα σε μια χρονιά ο χώρος γραφείου αναμένεται να λειτουργεί 252 ημέρες. Το νούμερο αυτό προκύπτει αν από τις 365 ημέρες αφαιρέσουμε τις 104 που είναι τα Σαββατοκύριακα και 9 ημέρες αργίας.

9.2.1 Σενάριο πρώτο

Σε αυτό το σενάριο, εξετάζεται λύση φωτισμού που αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τον ημερήσιο ρυθμό του φυσικού φωτισμού, αξιοποιώντας όλο το εύρος που παρέχει το συγκεκριμένο φωτιστικό, από 2700 K έως 6500 K, με δύο ενδιάμεσες τιμές 3000 K και 5000 K, καθώς και αυτή των 4000 K.

Στην αρχή της ημέρας ο φωτισμός ξεκινάει με την ουδέτερη τιμή CCT 4000 K. Στη συνέχεια, αυξάνεται στους 5000 K και μεγιστοποιείται στους 6500 K κατά τις μεσημεριανές ώρες, ώστε να διασφαλίζονται συνθήκες που ευνοούν την εγρήγορση και την έντονη παραγωγικότητα

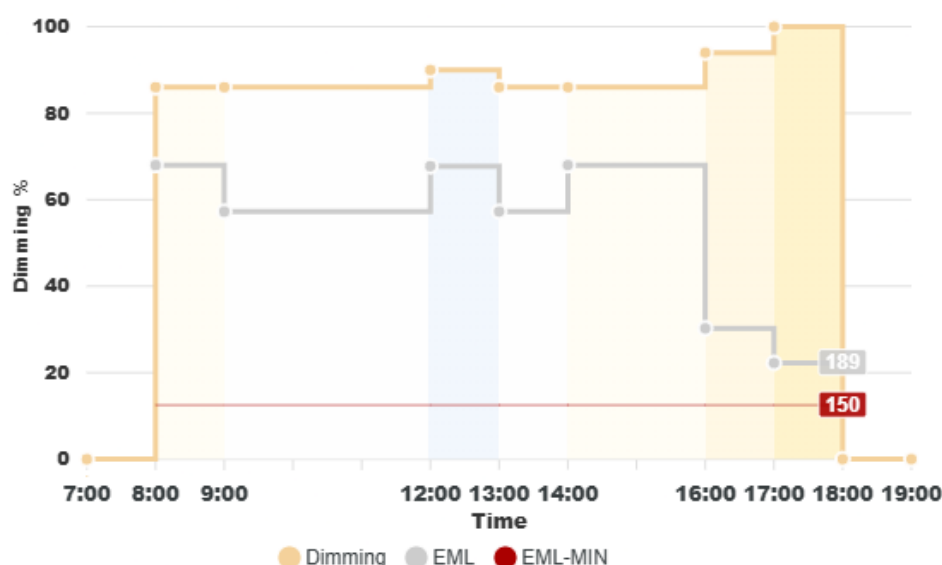
των εργαζόμενων μέχρι το μεσημέρι. Μετά τις 14:00 η τιμή του φωτισμού μειώνεται στους 4000 K, με σκοπό να αποφευχθεί η κόπωση των ματιών. Αργότερα επιτελείται σταδιακή μετάβαση προς πιο θερμό φωτισμό, αρχικά στους 3000 K και τέλος, μέχρι να σβήσουν τα φώτα πραγματοποιείται μείωση στους 2700 K. Η επιλογή των τελευταίων τιμών φωτισμού νωρίς το απόγευμα συνδέεται με μείωση του στρες και προετοιμασία για χαλάρωση. Πιο αναλυτικά, μέσα στην ημέρα διαμορφώνεται το εξής σενάριο:

Πίνακας 26 Πρώτο σενάριο φωτισμού για τον χώρο γραφείου.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	E_m [lx]	E_v [lx]	EML	CS	Αιτιολόγηση και Οφέλη
08:00 - 09:00	4000	86%	501	355	372	0.32	Ουδέτερος φωτισμός για την αρχή της ημέρας.
09:00 - 12:00	5000	86%	502	354	329	0.37	Ψυχρός λευκός φωτισμός, διατηρεί τη συγκέντρωση.
12:00 - 13:00	6500	90%	501	353	371	0.42	Ψυχρός φωτισμός, ενισχύει την εγρήγορση.
13:00 - 14:00	5000	86%	502	354	329	0.37	Ψυχρός λευκός φωτισμός, αντιμετωπίζει τη μεσημβρινή κόπωση.
14:00 - 16:00	4000	86%	501	355	372	0.32	Ουδέτερος φωτισμός, οδηγεί προς τη χαλάρωση.
16:00 - 17:00	3000	94%	503	358	221	0.38	Σταδιακή μετάβαση προς πιο θερμό φωτισμό μειώνει το στρες.
17:00 - 18:00	2700	100%	501	357	189	0.34	Θερμός φωτισμός, προετοιμάζει για χαλάρωση.

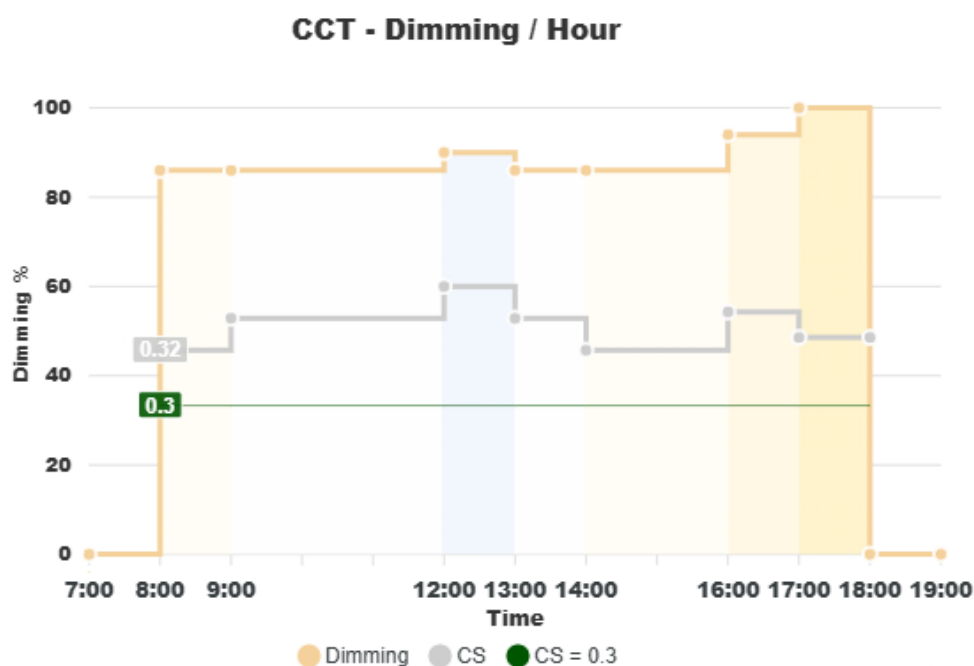
Η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού εξελίσσεται όπως απεικονίζεται στο γράφημα 12, στο οποίο έχει προστεθεί το ελάχιστο όριο για τον τεχνητό φωτισμό του χώρου, 150 EML. Οι τιμές του EML παραμένουν αρκετά αυξημένες τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες, με εύρος 329 με 372 και μειώνεται προς το τέλος της ημέρας, χωρίς ωστόσο να σημειώνεται πτώση κάτω από το απαιτούμενο όριο. Η διακύμανση του EML παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα.

CCT - Dimming / Hour



Γράφημα 14 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στον χώρο γραφείου.

Στο γράφημα 15 φαίνεται η εξέλιξη του CS μέσα σε μια εργάσιμη ημέρα. Η ευθεία CS = 0.3 δηλώνει τη μεσαία τιμή του. Τιμές πάνω από αυτή επιφέρουν εγρήγορση και συμβάλουν στην παραγωγικότητα των εργαζομένων.



Γράφημα 15 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στον χώρο γραφείου.

Υπολογίζεται η ισχύς των φωτιστικών ανά CCT με την αντίστοιχη ρύθμιση φωτεινής ροής. Υπολογίζονται και οι ώρες λειτουργίας ανά CCT και προκύπτει με χρήση του παρακάτω τύπου η ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση σε kWh, πολλαπλασιάζοντας την συνολική ισχύ με τις ώρες λειτουργίας και διαιρώντας με 1000.

$$E = \frac{P [W] * t [h]}{1000} \quad (33)$$

Στη συνέχεια, στον πίνακα 27, για κάθε CCT, πολλαπλασιάζοντας το αποτέλεσμα με 252, που είναι οι συνολικές ημέρες λειτουργίας του χώρου μέσα στη χρονιά, προκύπτει και η ετήσια κατανάλωση.

Πίνακας 27 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το πρώτο σενάριο φωτισμού του χώρου γραφείων.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	Συνολική Ισχύς [W]	Ώρες λειτουργίας [h]	Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Ετήσια κατανάλωση [kWh]/έτος
08:00 - 09:00	4000	86%	382.7	1	0.38	96.44
09:00 - 12:00	5000	86%	386.2	3	1.16	291.97
12:00 - 13:00	6500	90%	404.7	1	0.40	101.98
13:00 - 14:00	5000	86%	386.2	1	0.39	97.32
14:00 - 16:00	4000	86%	382.7	2	0.77	192.88
16:00 - 17:00	3000	94%	393.2	1	0.39	99.09
17:00 - 18:00	2700	100%	405.6	1	0.41	102.21
Σύνολο				10	3.89	981.89

Αν και η μελέτη στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ανθρωποκεντρικού συστήματος φωτισμού, είναι απαραίτητο να συνυπολογιστεί η οικονομική αποδοτικότητα αυτής της λύσης, προσδιορίζοντας το κόστος, τον χρόνο απόσβεσης και την εξοικονόμηση που θα επιτευχθεί σε σύγκριση με το υφιστάμενο σύστημα φωτισμού.

Αρχικά υπολογίζεται το κόστος της αγοράς και της εγκατάστασης των tunable white LED φωτιστικών “PETRIDIS”. Σε αυτό αθροίζονται οι ώρες εργασίας επί το ωρομίσθιο των εργαζομένων που θα την πραγματοποιήσουν.

Τα συγκεκριμένα φωτιστικά δεν είναι ευρέως διαθέσιμα στην αγορά. Για λόγους αξιοπιστίας και αντιπροσωπευτικότητας των αποτελεσμάτων, επιλέγεται μια ενδεικτική μέση τιμή για φωτιστικά σώματα τύπου Tunable White LED Panel, στα 200 € ανά φωτιστικό σώμα. Για τα επτά φωτιστικά λοιπόν του χώρου γραφείου προκύπτει συνολικό κόστος αγοράς 1400 €.

Το κόστος εργασίας εγκατάστασης περιλαμβάνει την αφαίρεση των πέντε υφιστάμενων φωτιστικών, την εγκατάσταση επτά νέων, τις δοκιμές λειτουργίας και τον γενικότερο έλεγχο. Κατά προσέγγιση θα χρειαστούν έξι ώρες εργασίας από έναν τεχνίτη, με μέσο ωρομίσθιο τα 7 €/ώρα, όπως ορίζει η παροχή συμβολαίου με συνεργαζόμενη εταιρεία, εξειδικευμένη σε τεχνική υποστήριξη. Συνεπώς, το κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται στα 42 €.

Με βάση τα παραπάνω, το συνολικό εκτιμώμενο κόστος για την αντικατάσταση του φωτισμού με Tunable White LED Panels της εταιρείας Petridis προκύπτει ως άθροισμα του κόστους αγοράς των φωτιστικών και του κόστους εγκατάστασης:

$$K_{αντικατάστασης} = K_{φωτιστικών} + K_{εγκατάστασης} \quad (34)$$

Το συνολικό κόστος ανέρχεται, σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές (1400 + 42), στα 1442 €.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ετήσιο κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας (€/έτος), πολλαπλασιάζοντας τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος φωτισμού επί το άθροισμα των ωρών λειτουργίας ανά έτος. Η τιμή της κιλοβατώρας καθορίζεται από τον ΔΕΔΗΕ ανά κατηγορία πελατών. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται η μέση τιμή της το 2024, δηλαδή 0.15 €/kWh. Το ετήσιο κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$K_{ενέργειας/έτος} = E[kWh] * \left(0.15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right) \quad (35)$$

Για το συγκεκριμένο σενάριο υπολογίζεται στα 147.28 €.

Το κόστος συντήρησης προκύπτει μετά την παρέλευση κάποιων ετών λειτουργίας και δεν θα προσμετρηθεί, καθώς τα LED φωτιστικά έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (άνω των δέκα ετών) και δεν χρησιμοποιούν αναλώσιμα μέρη (όπως starters και ballasts).

Το αρχικό κόστος της αγοράς και της αντικατάστασης προστίθεται μόνο μια φορά στο συνολικό κόστος και προκύπτει από την άθροιση των δύο αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις εξισώσεις 34 και 35.

$$K\Sigma = K_{αντικατάστασης} + (K_{ενέργειας/έτος} * \acute{\epsilon}\tau\eta) \quad (36)$$

Συγκεκριμένα, το κόστος στο πρώτο σενάριο διαμορφώνεται:

$$K\Sigma_1 = 1442 + (147.28 * \acute{\epsilon}\tau\eta) \quad (37)$$

Προκειμένου να μπορέσει να συγκριθεί το κόστος αυτού του σεναρίου με το κόστος της υφιστάμενης εγκατάστασης, πραγματοποιείται ένας κατ’ εκτίμηση υπολογισμός του κόστους συντήρησης της δεύτερης. Μια προσέγγιση του κόστους αγοράς ανταλλακτικών σημειώνεται παρακάτω:

- Λαμπτήρας PHILIPS TLD 36W/865: 10 € ανά τεμάχιο στην ελληνική αγορά

- Ηλεκτρονικό σπραγγαλιστικό πηνίο (ballast): 22 € ανά τεμάχιο
- Εργατικό κόστος αντικατάστασης: 15 € ανά επίσκεψη τεχνικού

Οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του χώρου είναι 2520 ώρες/έτος (10×252). Ο συγκεκριμένος λαμπτήρας έχει διάρκεια ζωής 13000 ώρες. Λόγω παλαιότητας της εγκατάστασης οι λαμπτήρες φωτισμού παρουσιάζουν τακτικά απώλειες στη φωτεινή τους απόδοση και απαιτείται συχνότερη αντικατάσταση των λαμπτήρων προκειμένου να διατηρηθεί η απαραίτητη στάθμη φωτισμού (500 lx). Η διάρκεια ζωής τους υπολογίζεται μικρότερη κατά 30% από την θεωρητική τιμή, δηλαδή 9100 ώρες. Επομένως, οι λαμπτήρες χρειάζονται νωρίτερα αντικατάσταση, κατά προσέγγιση ανά 3 έτη ($9100 / 2520$). Η αντικατάσταση των ballast συνιστάται κάθε 10 έτη.

Ο υπολογισμός του κόστους συντήρησης γίνεται σε ορίζοντα 10 ετών, ώστε να μπορεί να προσμετρηθεί. Η αντικατάσταση των λαμπτήρων πραγματοποιείται τρεις φορές στη διάρκεια αυτή. Συνεπώς προκύπτει:

- Αριθμός λαμπτήρων: 5 φωτιστικά $\times$ 2 λαμπτήρες = 10 λαμπτήρες
 - Κόστος ανά αντικατάσταση: 10 λαμπτήρες $\times$ 10 € = 100 €
 - Συνολικό κόστος για 3 αντικαταστάσεις: 100 € $\times$ 3 = 300 €
- Η αντικατάσταση ballast γίνεται μια φορά σε 10 έτη με κόστος:

- Ballast: $10 \times 22 \text{ €} = 220 \text{ €}$

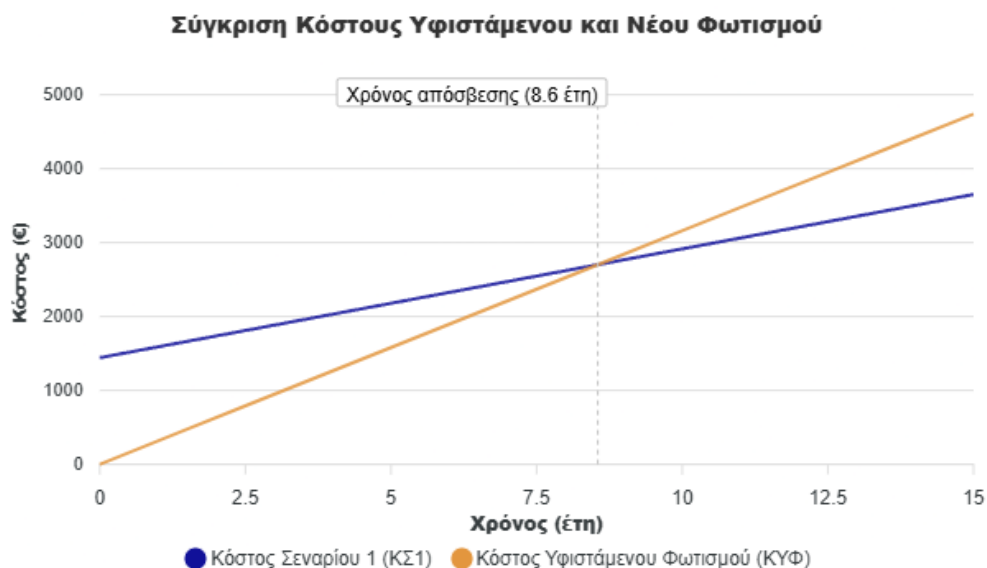
Το κόστος εργασίας υπολογίζεται στα 45 €, καθώς θα χρειαστούν τρεις επισκέψεις στο διάστημα των 10 ετών.

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω ($300 + 220 + 45$), το συνολικό κόστος συντήρησης ανέρχεται στα 565 € για 10 έτη, δηλαδή περίπου 56.5 € ανά έτος.

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας του υφιστάμενου φωτισμού ισούται με το άθροισμα του ετήσιου κόστους της καταναλισκόμενης ενέργειας (259.46 €) και του ετήσιου κόστους συντήρησης (56.5 €). Ανέρχεται στα 315.96 € / έτος και διαμορφώνει την ευθεία:

$$Κυφ = 315.96 * \text{έτη} \quad (38)$$

Στο γράφημα 16, αξιοποιώντας τους τύπους 37 και 38, φαίνεται πως η απόσβεση της επένδυσης επιτυγχάνεται περίπου σε 8.6 έτη. Αυτό την καθιστά ως μια αποδεκτή επένδυση, αν εξεταστεί καθαρά με οικονομικά κριτήρια.



Γράφημα 16 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το πρώτο σενάριο στο γραφείο.

9.2.2 Σενάριο δεύτερο

Η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικός παράγοντας στη διαμόρφωση των σεναρίων φωτισμού, αλλά στην περίπτωση του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού (HCL), δίνεται προτεραιότητα στην υγεία, την ευεξία και την παραγωγικότητα των χρηστών. Ωστόσο, δεδομένων των χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου φωτιστικού, μπορεί να επιτευχθεί μια ιδανική ισορροπία συνδυασμός μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και HCL.

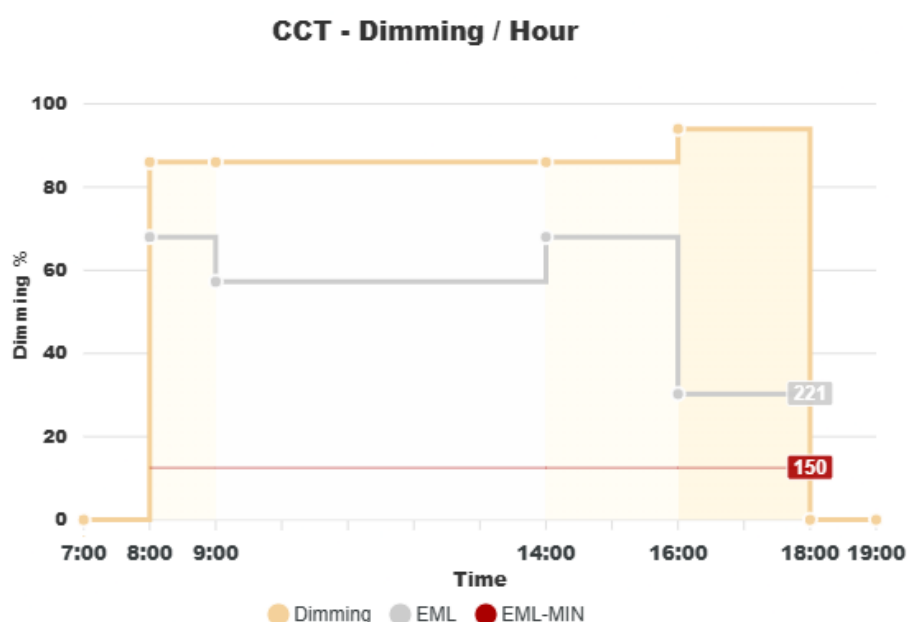
Το συγκεκριμένο φωτιστικό παρουσιάζει χαμηλότερη κατανάλωση στους 4000 K και 5000 K, ενώ υψηλότερη στις δύο ακραίες τιμές CCT, 2700 K και 6500 K. Επιλέγεται λοιπόν σενάριο με χρήση των θερμοκρασιών 4000 K και 5000 K τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες, όπου απαιτούνται υψηλές εντάσεις φωτισμού και 3000 K το απόγευμα, μετά τις 16:00. Με επιλογή μόνο των τριών αυτών CCT, μπορεί να υπάρξει ένα αποτέλεσμα πιο ομοιόμορφο οπτικά και με μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Πίνακας 28 Δεύτερο σενάριο φωτισμού για τον χώρο γραφείου.

Ωρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	E_m [lx]	E_v [lx]	EML	CS	Αιτιολόγηση και Οφέλη
08:00 - 09:00	4000	86%	501	355	372	0.32	Μέτριος, λευκός φωτισμός για ομαλή αρχή της ημέρας.
09:00 - 14:00	5000	86%	502	354	329	0.37	Αύξηση CCT, προάγει την εγρήγορση και αυξάνει την παραγωγικότητα.
14:00 - 16:00	4000	86%	501	355	372	0.32	Ουδέτερος, λευκός φωτισμός, μειώνει την κόπωση νωρίς το απόγευμα.
16:00 - 18:00	3000	94%	503	358	221	0.38	Θερμός φωτισμός, επιφέρει χαλάρωση στο τέλος της ημέρας.

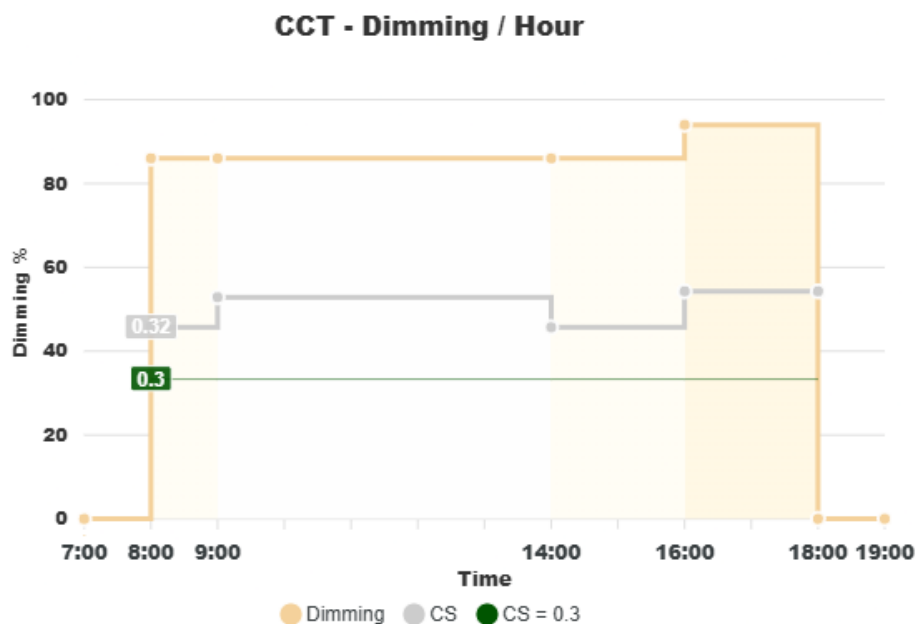
Οι θερμοκρασίες 4000 K και 5000 K είναι οι βέλτιστες επιλογές, καθώς συνδυάζουν πολύ καλά την ενεργειακή απόδοση με τα οφέλη του HCL (εγρήγορση και άνεση). Η χρήση 3000 K ενδείκνυται ως κατάλληλος συνδυασμός μεταξύ άνεσης και χαλάρωσης για τις απογευματινές και βραδινές ώρες.

Στα γραφήματα 17 απεικονίζεται η εξέλιξη της τιμής των EML, για την αντίστοιχη φωτεινή στάθμη και θερμοκρασία χρώματος, ανάλογα με την ώρα της ημέρας.



Γράφημα 17 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στον χώρο γραφείων.

Στο γράφημα 18 παρουσιάζεται η εξέλιξη των τιμών του CS στη διάρκεια μιας εργάσιμης ημέρας. Δεν παρατηρείται μεγάλη διακύμανση, καθώς η τιμή κυμαίνεται μεταξύ 0.32 - 0.38.



Γράφημα 18 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στον χώρο γραφείων.

Αντίστοιχα, όπως υπολογίστηκε στο πρώτο σενάριο, με χρήση του τύπου 33 και πολλαπλασιάζοντας με τις συνολικές ημέρες λειτουργίας του χώρου μέσα σε ένα έτος (252 ημέρες), στον πίνακα 29 υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 29 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το δεύτερο σενάριο φωτισμού του χώρου γραφείων.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	Συνολική Ισχύς [W]	Ώρες λειτουργίας [h]	Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Ετήσια κατανάλωση [kWh]/έτος
08:00 - 09:00	4000	86%	382.7	1	0.38	96.44
09:00 - 14:00	5000	86%	386.2	5	1.93	486.61
14:00 - 16:00	4000	86%	382.7	2	0.77	192.88
16:00 - 18:00	3000	94%	393.2	2	0.79	198.17
Σύνολο				10	3.87	974.1

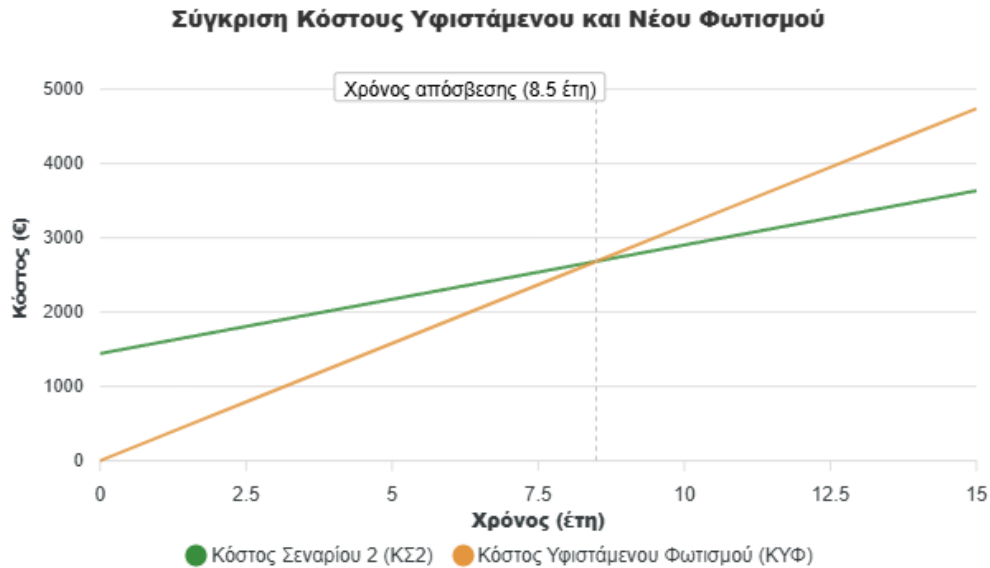
Είναι αναγκαίο να εξεταστεί η οικονομική απόδοση πραγματοποίησης αυτού του σεναρίου. Το κόστος αντικατάστασης και εφαρμογής σε λειτουργία του νέου σεναρίου παραμένει το ίδιο, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση 324 παραπάνω, και ανέρχεται στα 1442 €. Χρησιμοποιώντας τον τύπο 33, προκύπτει το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας:

$$K_{\text{ενέργειας/έτος}} = 974.1 [kWh] * \left(0.15 \frac{\text{€}}{kWh}\right) = 146.12 \text{ €} \quad (39)$$

Το συνολικό κόστος στο δεύτερο σενάριο προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου 36 με τη νέα τιμή καταναλισκόμενης ενέργειας ανά έτος.

$$K\Sigma_2 = 1442 + (146.12 * \text{έτη}) \quad (40)$$

Το κόστος της υφιστάμενης εγκατάστασης παραμένει ίδιο, όπως υπολογίστηκε παραπάνω στην εξίσωση 38. Στο γράφημα 19, επιλύοντας το σύστημα των δύο αυτών ευθειών (38 και 40) προκύπτει η γραφική αναπαράσταση με τον χρόνο απόσβεσης για αυτό το σενάριο, που αντιστοιχεί περίπου σε 8.5 έτη. Και αυτή η επένδυση θεωρείται βιώσιμη αν εξεταστεί μόνο από οικονομική σκοπιά.



Γράφημα 19 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το δεύτερο σενάριο.

9.2.3 Σενάριο τρίτο

Εξετάζεται το σενάριο φωτισμού με τις δύο τιμές θερμοκρασίας χρώματος που είναι οι πιο αποδοτικές (4000 K και 5000 K). Χωρίς τις πιο θερμές τιμές CCT (2700 K και 3000 K) περιορίζεται η ικανότητα των χρηστών για χαλάρωση τις απογευματινές ώρες, όταν πλησιάζει το βράδυ.

Πίνακας 30 Τρίτο σενάριο φωτισμού για τον χώρο γραφείου.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	E_m [lx]	E_v [lx]	EML	CS	Αιτιολόγηση και Οφέλη
08:00 - 09:00	4000	86%	501	355	372	0.32	Ουδέτερος φωτισμός για ήπια αρχή της ημέρας.
09:00 - 14:00	5000	86%	502	354	329	0.37	Ψυχρό, λευκό φως που προάγει την εγρήγορση.
14:00 - 18:00	4000	86%	501	355	372	0.32	Μέτριος, λευκός φωτισμός, που μειώνει την οπτική κόπωση.

Η επιλογή ρύθμισης του φωτισμού αποκλειστικά σε θερμοκρασίες χρώματος 4000 K και 5000 K μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά τη λειτουργικότητα του σεναρίου, ιδίως όταν ο βασικός στόχος είναι η ενίσχυση της απόδοσης, της παραγωγικότητας και της εγρήγορσης. Επιπλέον, ένα τέτοιο σύστημα είναι απλούστερο ως προς τον σχεδιασμό, τη ρύθμιση και τον έλεγχο. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή έχει περιορισμένες δυνατότητες για μίμηση του φυσικού φωτός και σταδιακή προσαρμογή του φωτισμού σε πιο ήπιες, χαλαρωτικές συνθήκες, ιδίως κατά τις απογευματινές ώρες, όταν η ανάγκη αποφόρτισης από την ένταση προς την ηρεμία καθίσταται επιθυμητή.

Η αποκλειστική χρήση των 4000 K και 5000 K, ίσως αποτελεί περιορισμένη αξιοποίηση του Tunable White LED, αλλά εξετάζεται ως μια λειτουργική και αποδοτική επιλογή σε χώρους

που δίνουν προτεραιότητα στην ενεργητική εργασία και η ευχέρεια για χαλάρωση είναι περιορισμένη ή καλύπτεται σε άλλους χώρους, όπως κάποιος χώρος διαλείμματος με πιο θερμό φωτισμό, χαμηλότερης έντασης.

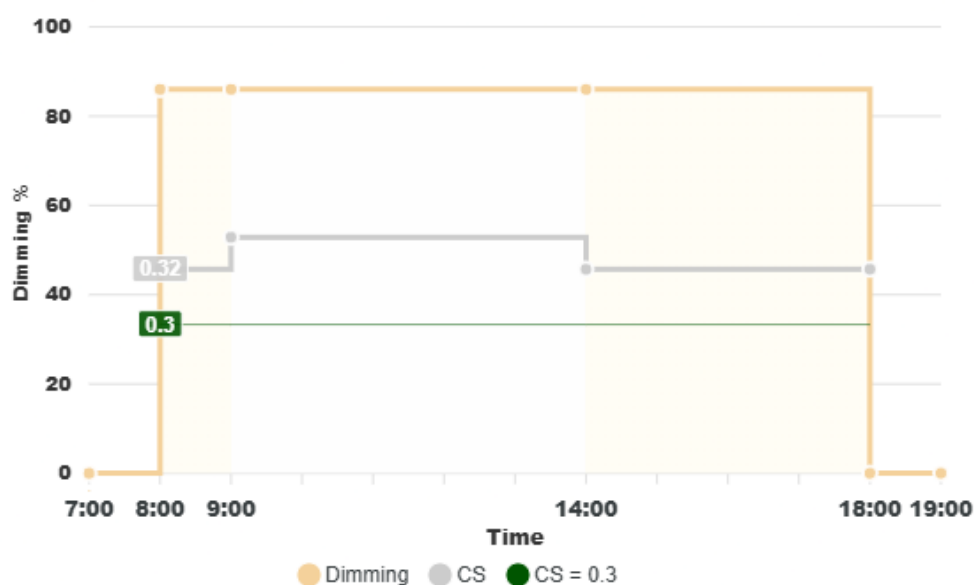
Στα γραφήματα 20 και 21 αναπαρίσταται χρωματικά η αλλαγή της CCT και γραφικά η φωτεινή στάθμη και η εξέλιξη των τιμών των EML και CS. Η φωτεινή στάθμη δεν μεταβάλλεται καθώς και οι δύο θερμοκρασίες χρώματος, 4000 K και 5000 K, σημειώνουν τιμή οριζόντιας έντασης φωτισμού στο όριο των 500 lx, όταν ρυθμίζονται στο 86%. Στα γραφήματα επίσης επισημαίνεται η ελάχιστη τιμή του EML στο πρώτο και η μεσαία τιμή CS = 0.3 στο δεύτερο.

CCT - Dimming / Hour



Γράφημα 20 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στον χώρο γραφείων.

CCT - Dimming / Hour



Γράφημα 21 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στον χώρο γραφείων.

Όπως υπολογίστηκε αντίστοιχα στο πρώτο σενάριο, με χρήση του τύπου 33 και πολλαπλασιάζοντας με τις συνολικές ημέρες λειτουργίας του γραφείου μέσα σε ένα έτος (252 ημέρες), στον πίνακα 31 υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 31 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το τρίτο σενάριο φωτισμού του χώρου γραφείων.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	Συνολική Ισχύς [W]	Ώρες λειτουργίας [h]	Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Ετήσια κατανάλωση [kWh]/έτος
08:00 - 09:00	4000	86%	382.7	1	0.38	96.44
09:00 - 14:00	5000	86%	386.2	5	1.93	486.61
14:00 - 18:00	4000	86%	382.7	4	1.53	385.76
			Σύνολο	10	3.84	968.81

Είναι αναγκαίο να εξεταστεί το τρίτο σενάριο φωτισμού ως προς την οικονομική του απόδοση. Το κόστος αντικατάστασης και εφαρμογής σε λειτουργία του νέου σεναρίου παραμένει ίδιο, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση 34 στο πρώτο σενάριο και ανέρχεται στα 1442 €.

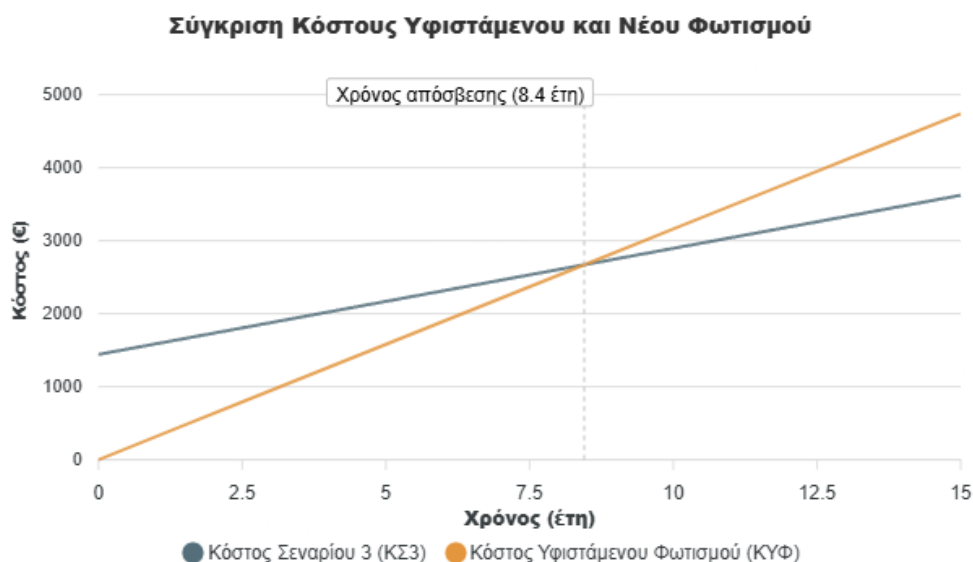
Με εφαρμογή του τύπου 35 υπολογίζεται το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας:

$$K_{\text{ενέργειας/έτος}} = 968.81 \text{ [kWh]} * \left(0.15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right) = 145.32 \text{ €} \quad (41)$$

Το συνολικό κόστος λοιπόν, στο τρίτο σενάριο, προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου 36 με τη νέα τιμή καταναλισκόμενης ενέργειας ανά έτος.

$$K\Sigma_3 = 1442 + (145.32 * \text{έτη}) \quad (42)$$

Το κόστος της υφιστάμενης εγκατάστασης παραμένει ίδιο, όπως υπολογίστηκε παραπάνω στην εξίσωση 38. Στο γράφημα 22, επιλύοντας το σύστημα των δύο αυτών ευθειών (38 και 42) προκύπτει η γραφική αναπαράσταση με τον χρόνο απόσβεσης για αυτό το σενάριο, που υπολογίζεται μετά από το πέρασμα περίπου 8.4 ετών. Αυτή η επένδυση θεωρείται βιώσιμη και σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά οφέλη.



Γράφημα 22 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το τρίτο σενάριο.

9.3 Προτάσεις χρονοδιαγράμματος φωτισμού με βάση τις αρχές του Ανθρωποκεντρικού Φωτισμού (HCL) σε αίθουσα διδασκαλίας του Πολυτεχνείου.

Οι αίθουσες απαιτούν μεγαλύτερη δυναμική στην προσαρμογή του φωτισμού. Όσο καλύτερα προσαρμόζεται ο φωτισμός στις συνθήκες μάθησης, τόσο πιο αποδοτική καθίσταται η εκπαιδευτική διαδικασία. Το πρόγραμμα των μαθημάτων είναι ποικίλο, απαιτεί εύελικο σχεδιασμό φωτισμού και πρέπει να ακολουθεί το φυσικό φως. Ο ορθά μελετημένος Ανθρωποκεντρικός φωτισμός (HCL) κινητοποιεί τους φοιτητές και τους βοηθά να παραμένουν συγκεντρωμένοι για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Στην αίθουσα διδασκαλίας του Πολυτεχνείου που μελετάται, διεξάγονται πανεπιστημιακά μαθήματα τόσο τις πρωινές, όσο και τις απογευματινές ώρες. Το χρονικό διάστημα που εξετάζεται είναι δώδεκα ώρες, από 08:00 μέχρι 20:00.

- Πρώτες πρωινές ώρες: ουδέτερος φωτισμός, CCT 4000 K (για άνεση και ήπια εκκίνηση των μαθημάτων)
- Πρωινές και μεσημεριανές ώρες: υψηλές θερμοκρασίες χρώματος, 5000 K έως 6500 K, ανάλογα το σενάριο (τιμές που προσομοιάζουν τον έντονο πρωινό φυσικό φως για να επιτευχθεί εγρήγορση)
- Μεσημέρι: ουδέτερος, λευκός φωτισμός, 4000 K, την ώρα του μεσημεριανού διαλείμματος, 14:30 μέχρι 15:15 (μειώνει την κόπωση μετά τα πρωινά μαθήματα)
Μέσα σε αυτό το μισάωρο, δεν διεξάγονται διαλέξεις στην αίθουσα.
- Νωρίς το απόγευμα: ψυχρό, λευκό φως, CCT 5000 K (που ενισχύει την εγρήγορση μετά το γεύμα και βοηθάει στη συγκέντρωση στα απογευματινά μαθήματα)
- Αργότερα το απόγευμα: σταδιακά μειούμενη θερμοκρασία φωτός, από 4000 K έως 2700 K, ανάλογα το σενάριο (τιμές που προετοιμάζουν για χαλάρωση και ξεκούραση το βράδυ)

Μια αίθουσα διδασκαλίας της σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ αναμένεται να χρησιμοποιηθεί περίπου 190 ημέρες τον χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις διδακτικές περιόδους και τις εξεταστικές. Πιο συγκεκριμένα, συμπληρώνονται 13 εβδομάδες μαθημάτων για κάθε εξάμηνο, επί 5 ημέρες η κάθε μία, προκύπτουν 65 ημέρες διδασκαλίας, οπότε για δύο εξάμηνα συγκεντρώνονται 130 ημέρες. Η κάθε εξεταστική διαρκεί 4 εβδομάδες, επί 5 ημέρες, άρα 20 συνολικά. Μέσα στη χρονιά υπάρχουν επίσης οι δύο εξεταστικές των εξαμήνων και η επαναληπτική, που διαρκούν συνολικά 60 ημέρες.

9.3.1 Σενάριο πρώτο

Σε αυτό το σενάριο, εξετάζεται λύση φωτισμού που ακολουθεί όσο το δυνατόν περισσότερο τον ημερήσιο κύκλο του φυσικού φωτός, αξιοποιώντας όλο το εύρος που παρέχει το συγκεκριμένο φωτιστικό (2700 K, 3000 K, 4000 K, 5000 K και 6500 K). Όλες οι θερμοκρασίες χρώματος επιλέγονται στην αντίστοιχη ρύθμιση της φωτεινής τους στάθμης, ώστε να σημειώνεται φωτισμός με ένταση στο οριζόντιο επίπεδο, λίγο πάνω από το επιθυμητό όριο των 500 lx.

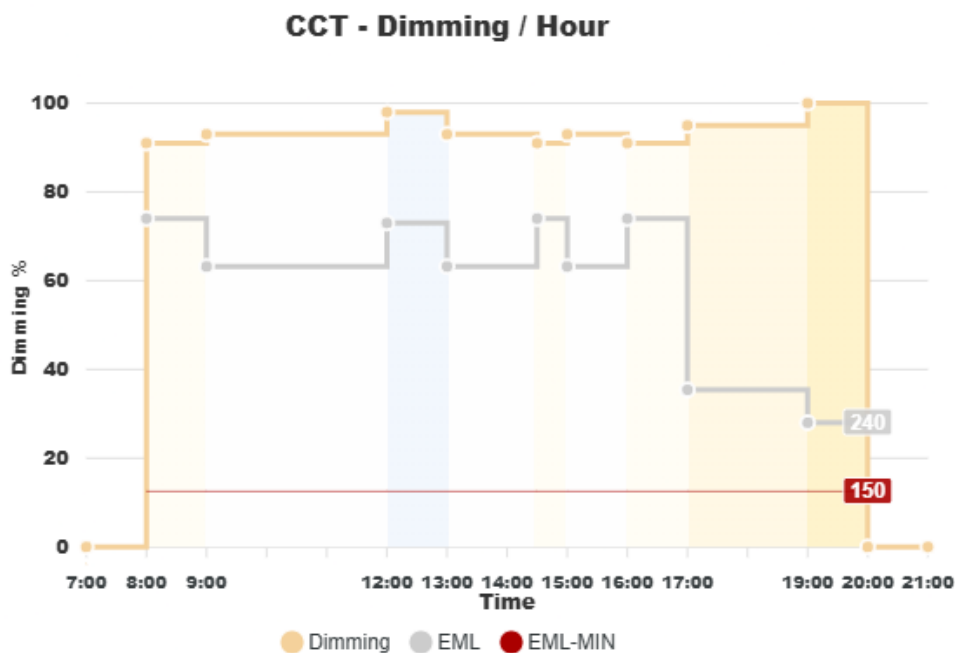
Η θερμοκρασία χρώματος του φωτισμού ορίζεται σε 4000 K το πρωί, για την πρώτη ώρα, έπειτα αυξάνεται σε 5000 K για το επόμενο τρίωρο, μεγιστοποιείται 12:00 με 13:00 το μεσημέρι, με τιμή 6500 K. Στη συνέχεια μειώνεται στους 5000 K για μιάμιση ώρα, έπειτα πέφτει στους 4000 K το μισάωρο του μεσημεριανού διαλείμματος, ρυθμίζεται ξανά στους 5000 K για μια ώρα και έπειτα ακολουθεί μείωση της τιμής στους 4000 K για μια ώρα, στους 3000 K για τις επόμενες δύο και καταλήγει στους 2700 K την τελευταία ώρα της ημέρας.

Πιο αναλυτικά, μέσα στην ημέρα διαμορφώνεται το εξής σενάριο:

Πίνακας 32 Πρώτο σενάριο φωτισμού για την αίθουσα 6 της σχολής ΗΜΜΥ.

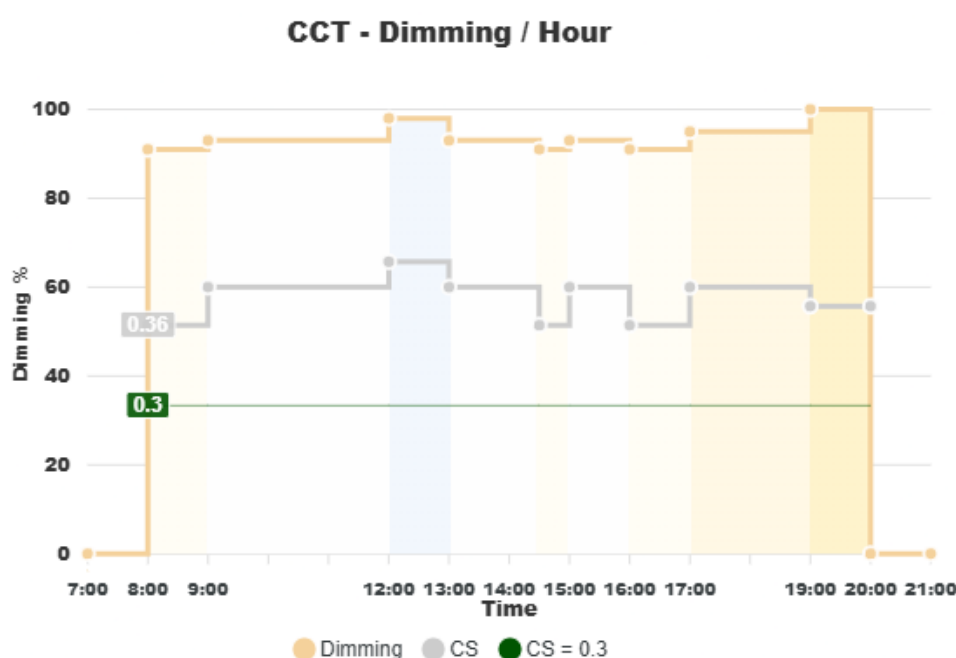
Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	E _m [lx]	E _v [lx]	EML	CS	Αιτιολόγηση και Οφέλη
08:00 - 09:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Λευκός φωτισμός, ήπια έναρξη της ημέρας.
09:00 - 12:00	5000	93%	504	447	416	0.42	Ψυχρός φωτισμός, συμβάλλει στην εγρήγορση στις πρωινές διαλέξεις.
12:00 - 13:00	6500	98%	500	442	465	0.46	Ψυχρότερος φωτισμός, συμβαδίζει με το φυσικό φως.
13:00 - 14:30	5000	93%	504	447	416	0.42	Μείωση σε ψυχρό λευκό, διατηρεί τη συγκέντρωση και την ενεργητική συμμετοχή.
14:30 - 15:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Ουδέτερος λευκός φωτισμός την ώρα του διαλείμματος.
15:00 - 16:00	5000	93%	504	447	416	0.42	Ψυχρός λευκός φωτισμός, αντιμετωπίζει την κόπωση μετά το γεύμα.
16:00 - 17:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Ουδέτερος λευκός, μειώνει τη διέγερση, διατηρεί τη συγκέντρωση.
17:00 - 19:00	3000	95%	501	450	277	0.42	Θερμός φωτισμός, δημιουργεί χαλαρό περιβάλλον για τα απογευματινά μαθήματα.
19:00 - 20:00	2700	100%	502	453	240	0.39	Θερμότερο φως, προετοιμάζει για το τέλος της διδακτικής ημέρας.

Οι τιμές του EML παραμένουν αρκετά αυξημένες τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες, στο εύρος 416 με 470. Το ίδιο ισχύει και το απόγευμα μέχρι τις 17:00 όποτε και μειώνονται στο 277 και αργότερα φτάνουν στα 240. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας παραμένουν άνω του ορίου των 150 EML, που επιδιώκεται για αποκλειστικά τεχνητό φωτισμό σε έναν χώρο εργασίας όπως αυτός. Στο γράφημα 23 φαίνεται η εξέλιξη της τιμής EML μέσα στην ημέρα.



Γράφημα 23 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

Η τιμή του CS αυξάνεται μέχρι τις 12:00 που φτάνει στη μέγιστη, δηλαδή 0.46 και παραμένει σε αυτήν μέχρι τις 13:00. Στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τις πρώτες ώρες του απογεύματος, 15:00 με 16:00, όπου παρουσιάζει μια σύντομη αύξηση. Στις 17:00 αυξάνεται ξανά στην τιμή 0.42 και αργότερα, με την αλλαγή της θερμοκρασίας μειώνεται πάλι. Όπως είναι γνωστό από την βιβλιογραφία, η τιμή πάνω από 0.3 είναι επιθυμητή για το πρωί και το μεσημέρι. Το απόγευμα καλό είναι να επιτυγχάνονται τιμές κάτω από 0.3. Για το συγκεκριμένο φωτιστικό και με επιθυμητό όριο της οριζόντιας έντασης φωτισμού τα 500 lx, αυτό δεν είναι εφικτό. Οι τιμές CS που σημειώνονται είναι μεγαλύτερες από τόσο, για όλες τις CCT. Ωστόσο επειδή η τιμή που υπολογίζεται το απόγευμα είναι στο εύρος του 0.4 και καθώς ο χώρος είναι αίθουσα διδασκαλίας και όχι οικία, η τιμή αυτή κρίνεται κατάλληλη. Στο γράφημα 24 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής του CS μέσα στην ημέρα, καθώς και το όριο 0.3.



Γράφημα 24 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το πρώτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

Υπολογίζεται η ισχύς των φωτιστικών ανά CCT και με την αντίστοιχη ρύθμιση φωτεινής ροής. Υπολογίζονται και οι ώρες λειτουργίας ανά CCT. Με χρήση του τύπου 33 προκύπτει η ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση σε kWh, πολλαπλασιάζοντας την συνολική ισχύ με τις ώρες λειτουργίας και διαιρώντας με 1000.

Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζοντας το αποτέλεσμα με 190, που είναι οι συνολικές ημέρες λειτουργίας του χώρου μέσα στη χρονιά, προκύπτει η ετήσια κατανάλωση. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 33.

Πίνακας 33 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το πρώτο σενάριο φωτισμού της αίθουσας πανεπιστημιακών διαλέξεων.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	Συνολική Ισχύς [W]	Ώρες λειτουργίας [h]	Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Ετήσια κατανάλωση [kWh]/έτος
08:00 - 09:00	4000	91%	984	1	0.98	186.96
09:00 - 12:00	5000	93%	993.2	3	2.98	566.12
12:00 - 13:00	6500	98%	1040.6	1	1.04	197.71
13:00 - 14:30	5000	93%	993.2	1.5	1.49	283.06
14:30 - 15:00	4000	91%	984	1.5	1.48	280.44
15:00 - 16:00	5000	93%	993.2	1	0.99	188.71
16:00 - 17:00	4000	91%	984	1	0.98	186.96
17:00 - 19:00	3000	95%	1011.2	2	2.02	384.26
19:00 - 20:00	2700	100%	1043	1	1.04	198.17
			Σύνολο	12	13	2472.39

Στη συνέχεια, εξετάζεται η οικονομική αποδοτικότητα αυτού του σεναρίου, καθώς για να υλοποιηθεί ένα νέο σύστημα φωτισμού, είναι σημαντικός ο προσδιορισμός του κόστους, η μελέτη της εξοικονόμησης, σε σύγκριση με τον ήδη υπάρχοντα φωτισμό και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης.

Αρχικά, υπολογίζεται το κόστος της αγοράς και της εγκατάστασης των tunable white LED φωτιστικών “PETRID1”. Σε αυτό προστίθενται οι ώρες εγκατάστασης επί το ωρομίσθιο των εργαζομένων που θα την πραγματοποιήσουν.

Στην αίθουσα θα εγκατασταθούν δεκαοκτώ φωτιστικά σώματα τύπου Tunable White LED Panel, αξίας 200 € το καθένα. Για δεκαοκτώ φωτιστικά λοιπόν το κόστος αγοράς ανέρχεται στα 3600 €.

Το κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνει την αφαίρεση των υφιστάμενων φωτιστικών (40), την εγκατάσταση νέων (18), την προετοιμασία καλωδίωσης, τις δοκιμές λειτουργίας και τον γενικότερο έλεγχο. Κατά προσέγγιση θα χρειαστούν συνολικά 16 ώρες από έναν τεχνίτη, υπάλληλο του Πολυτεχνείου, για να επιτελέσει τις παραπάνω εργασίες, με μέσο ωρομίσθιο τα 7 €/ώρα. Συνεπώς το κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται ως εξής: 16 ώρες x 7 €/ώρα = 112 €.

Η συνολική εκτίμηση κόστους για τη συγκεκριμένη αίθουσα διαλέξεων της σχολής ΗΜΜΥ υπολογίζεται από την εξίσωση 34 ως το άθροισμα του κόστους αγοράς των φωτιστικών και του κόστους εγκατάστασης. Για τη συγκεκριμένη αίθουσα λοιπόν, αθροίζοντας τις παραπάνω ενδεικτικές τιμές (3600 + 112), ανέρχεται λοιπόν στα 3712 €.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ετήσιο κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας (€/έτος), πολλαπλασιάζοντας τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος φωτισμού επί το άθροισμα των ωρών λειτουργίας ανά έτος. Η τιμή της κιλοβατώρας (€/kWh) καθορίζεται από τον ΔΕΔΗΕ, ανά κατηγορία πελατών. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται η μέση τιμή της για το 2024, δηλαδή 0.15 €/kWh.

Χρησιμοποιώντας τον τύπο 35, προκύπτει το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας:

$$K_{\text{ενέργειας/έτος}} = 2472.39 [kWh] * \left(0.15 \frac{\text{€}}{kWh}\right) = 370,86 \text{ €} \quad (43)$$

Το αρχικό κόστος της αγοράς και της αντικατάστασης δεν είναι ετήσιο, οπότε προστίθεται μόνο μια φορά στο συνολικό κόστος. Το συνολικό κόστος στο πρώτο αυτό σενάριο προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου 36.

$$K\Sigma_1 = 3712 + (370.86 * \text{έτη}) \quad (44)$$

Το κόστος συντήρησης προκύπτει μετά από παρέλευση κάποιων ετών λειτουργίας και δεν θα προσμετρηθεί, καθώς τα LED φωτιστικά έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και δεν χρησιμοποιούν αναλώσιμα μέρη (όπως starters και ballasts).

Προκειμένου να μπορέσει να συγκριθεί το κόστος αυτού του σεναρίου με το κόστος της υφιστάμενης εγκατάστασης, πραγματοποιείται ένας κατ' εκτίμηση υπολογισμός του κόστους συντήρησης. Μια προσέγγιση του κόστους αγοράς ανταλλακτικών σημειώνεται παρακάτω:

- Λαμπτήρας PL-C 26 W: 10 € ανά τεμάχιο στην ελληνική αγορά
- Ηλεκτρονικό ballast: 30 € ανά τεμάχιο που αντιστοιχεί ένα σε κάθε φωτιστικό
- Εργατικό κόστος αντικατάστασης: 30 € ανά επίσκεψη τεχνικού

Οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του χώρου είναι 2280 ώρες/έτος (12 × 190). Για τον συγκεκριμένο λαμπτήρα με διάρκεια ζωής περίπου 12000 ώρες, χρειάζεται αντικατάσταση κατά προσέγγιση κάθε 5.2 έτη (12000 / 2280). Η αντικατάσταση των ballast και starters συνιστάται κάθε 10 έτη.

Ο υπολογισμός του κόστους συντήρησης γίνεται σε ορίζοντα 10 ετών, για να μπορεί να συνυπολογιστεί στο κόστος. Η αντικατάσταση των λαμπτήρων γίνεται περίπου δύο φορές κατά τη διάρκεια 10 ετών.

- Αριθμός λαμπτήρων: 40 φωτιστικά × 2 λαμπτήρες = 80 λαμπτήρες
- Κόστος ανά αντικατάσταση: 80 λαμπτήρες × 10 € = 800 €
- Συνολικό κόστος για 2 αντικαταστάσεις: 800 € × 2 = 1600 €

Η αντικατάσταση ballast γίνεται μια φορά σε 10 έτη με το παρακάτω κόστος:

- Ballast: 40 × 30 € = 1200 €

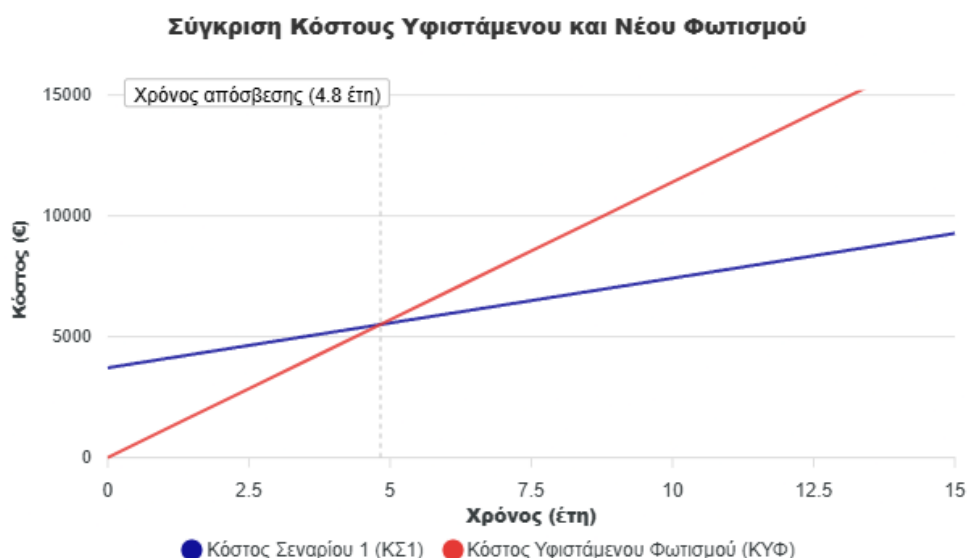
Το κόστος εργασίας υπολογίζεται στα 60 € καθώς θα χρειαστούν δύο επισκέψεις στο διάστημα των 10 ετών με λίγες παραπάνω από 4 ώρες εργασίας στην κάθε μία, με 7 €/ώρα.

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω (1600 + 1200 + 60), το συνολικό κόστος συντήρησης ανέρχεται στα 2860 € για 10 έτη, δηλαδή γύρω στα 286 € ανά έτος.

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας του υφιστάμενου φωτισμού ισούται με το άθροισμα του ετήσιου κόστους της καταναλισκόμενης ενέργειας, όπως αυτό υπολογίστηκε από την εξίσωση 32 (853.63 €) και του ετήσιου κόστους συντήρησης (286 €). Συνεπώς, ανέρχεται στα 1139.63 €/έτος και σχηματίζει την ευθεία:

$$Kυφ = 1139.63 * \text{έτη} \quad (45)$$

Ο χρόνος επένδυσης μπορεί να παραστεί γραφικά, όπως φαίνεται στο γράφημα 25. Επιλύεται το σύστημα με τις δύο ευθείες, 46 και 47. Οι δύο ευθείες αναπαριστούν τα αθροιστικά κόστη για τον υφιστάμενο φωτισμό και το πρώτο σενάριο φωτισμού με tunable white LED φωτιστικό. Το σημείο τομής των δύο ευθειών αντιπροσωπεύει το χρόνο απόσβεσης της επένδυσης, δηλαδή το χρονικό σημείο όπου το υψηλότερο κόστος επένδυσης αντισταθμίζεται από την εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται. Η απόσβεση της επένδυσης επιτυγχάνεται περίπου σε 4.8 έτη. Αυτό την καθιστά μια άριστη και αποδοτική επένδυση.



Γράφημα 25 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το πρώτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

9.3.2 Σενάριο δεύτερο

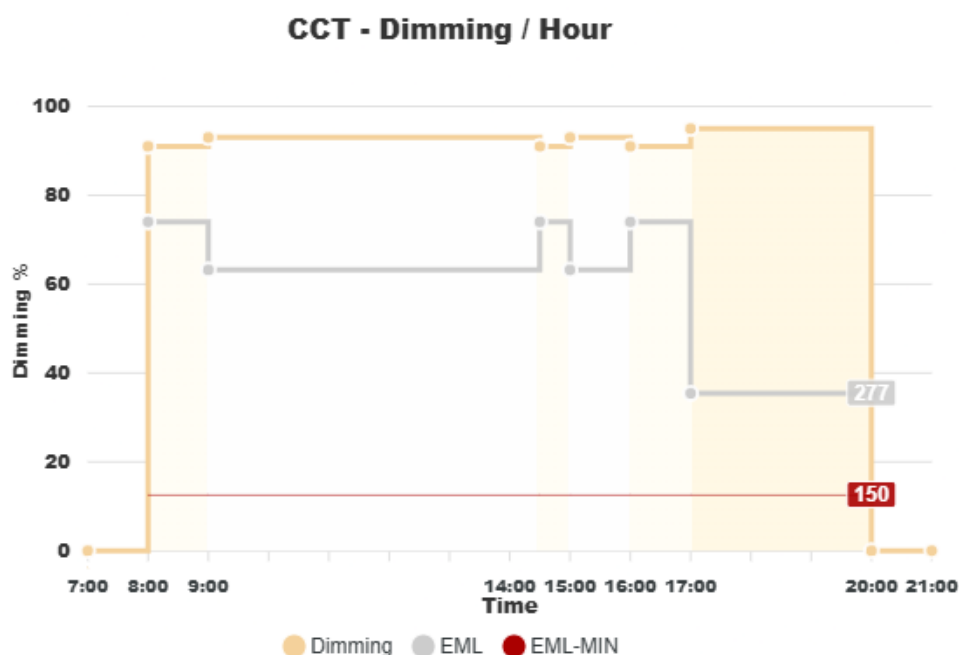
Αντίστοιχα με τον χώρο γραφείου, στην αίθουσα διδασκαλίας 6, επιλέγονται τρεις CCT και οι ακραίες τιμές, 2700 K και 6500 K αντικαθίστανται από τις πιο κοντινές τους, 3000 K και 5000 K αντίστοιχα. Οι θερμοκρασίες χρώματος των 4000 K και 5000 K αναδεικνύονται ως οι πλέον ενδεδειγμένες επιλογές, καθώς επιτυγχάνουν έναν άριστο συνδυασμό μεταξύ ενεργειακής αποδοτικότητας και θετικών επιδράσεων του ανθρωποκεντρικού φωτισμού, όπως την ενίσχυση της εγρήγορσης και την αίσθηση άνεσης. Αντιστοίχως, η επιλογή των 3000 K προτείνεται ως μια ισορροπημένη λύση που ανταποκρίνεται στις ανάγκες για οπτική άνεση και χαλάρωση, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητικά επίπεδα ενεργειακής κατανάλωσης, ιδίως κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες. Αυτή η αλλαγή λοιπόν οδηγεί σε ένα σενάριο με λιγότερες και λιγότερο έντονες μεταβολές CCT και καλύτερη απόδοση.

Πιο αναλυτικά, ανά ώρα:

Πίνακας 34 Δεύτερο σενάριο φωτισμού για την αίθουσα 6 της σχολής ΗΜΜΥ.

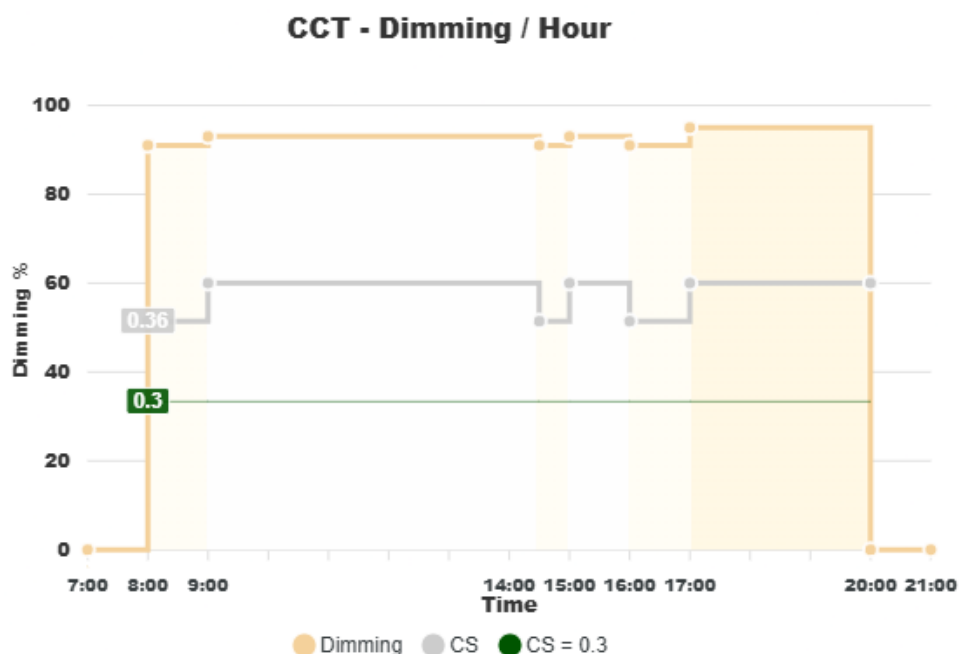
Ώρα της ημέρας	CCT (K)	Light Output	E_m [lx]	E_v [lx]	EML	CS	Αιτιολόγηση και Οφέλη
08:00 - 09:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Βοηθάει στη συγκέντρωση των φοιτητών την αρχή της ημέρας.
09:00 - 14:30	5000	93%	504	447	416	0.42	Υποστηρίζει την εγρήγορση και την προσοχή κατά τη διάρκεια των πρωινών διαλέξεων.
14:30 - 15:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Ώρα μεσημεριανού διαλείμματος.
15:00 - 16:00	5000	93%	504	447	416	0.42	Επαναφέρει τους μαθητές μετά το γεύμα.
16:00 - 17:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Συμβάλλει στην άνετη παρακολούθηση κατά τη διάρκεια των απογευματινών μαθημάτων.
17:00 - 20:00	3000	95%	501	450	277	0.42	Δημιουργεί χαλαρό περιβάλλον, κατάλληλο για βραδινές διαλέξεις.

Το EML παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση. Μέχρι τις 17:00 έχει υψηλή τιμή, πάνω από 400 και στη συνέχεια πέφτει στο 277 μέχρι το τέλος της εργάσιμης ημέρας. Οι τιμές είναι μεγαλύτερες από 150.



Γράφημα 26 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

Το CS εναλλάσσεται μεταξύ του 0.36 και 0.42, όπως φαίνεται στο γράφημα 27.



Γράφημα 27 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

Όπως αντίστοιχα υπολογίστηκε στο πρώτο σενάριο, με χρήση του τύπου 33 και πολλαπλασιάζοντας με τις συνολικές ημέρες λειτουργίας της αίθουσα αυτής, μέσα σε ένα έτος (190), στον πίνακα 35 υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 35 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το δεύτερο σενάριο φωτισμού της αίθουσας πανεπιστημιακών διαλέξεων.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	Συνολική Ισχύς [W]	Ώρες λειτουργίας [h]	Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh)	Ετήσια κατανάλωση [kWh]/έτος
08:00 - 09:00	4000	91%	984	1	0.98	186.96
09:00 - 14:30	5000	93%	993.2	5.5	5.46	1037.89
14:30 - 15:00	4000	91%	984	0.5	0.49	93.48
15:00 - 16:00	5000	93%	993.2	1	0.99	188.71
16:00 - 17:00	4000	91%	984	1	0.98	186.96
17:00 - 20:00	3000	95%	1011.2	3	3.03	576.38
			Σύνολο	12	11.93	2270.38

Είναι αναγκαίο να εξεταστεί και σε αυτό το σενάριο η οικονομική απόδοση. Το κόστος αντικατάστασης και εφαρμογής σε λειτουργία του νέου σεναρίου παραμένει ίδιο, όπως υπολογίστηκε παραπάνω και ανέρχεται στα 3712 €.

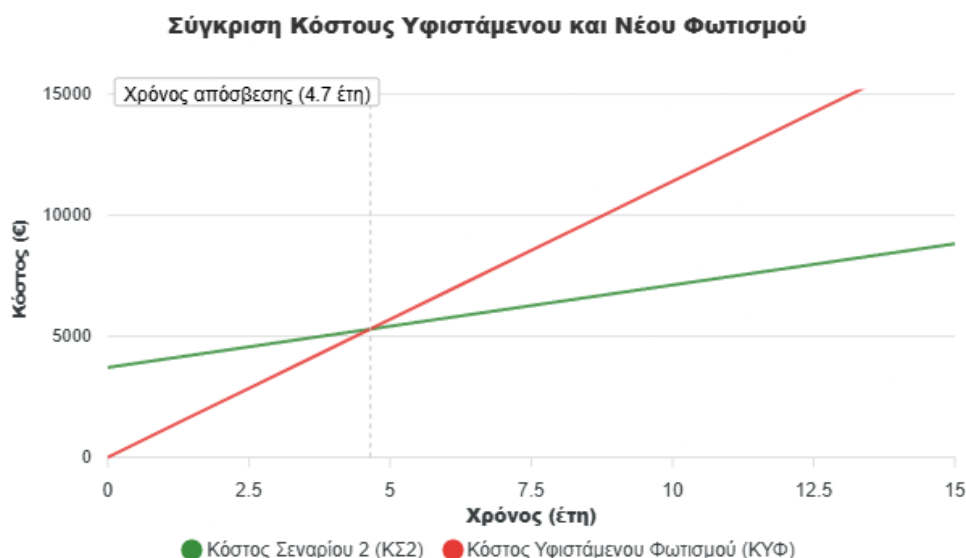
Χρησιμοποιώντας τον τύπου 35, προκύπτει το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας:

$$K_{\text{ενέργειας/έτος}} = 2270.38 [kWh] * \left(0.15 \frac{\text{€}}{kWh}\right) = 340.56 \text{ €} \quad (46)$$

Το συνολικό κόστος στο δεύτερο σενάριο προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου 36 με τη νέα τιμή καταναλισκόμενης ενέργειας ανά έτος:

$$K\Sigma_2 = 3712 + (340.56 * \text{έτη}) \quad (47)$$

Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την απόσβεση της επένδυσης μπορεί να απεικονιστεί γραφικά, όπως φαίνεται στο γράφημα 28. Οι δύο ευθείες που παρουσιάζονται, οι οποίες προκύπτουν από τις εξισώσεις 47 και 49, περιγράφουν τη μεταβολή του κόστους για τον υφιστάμενο και τον προτεινόμενο φωτισμό. Το σημείο που τέμνονται οι δύο ευθείες υποδεικνύει το χρονικό σημείο όπου η αρχική δαπάνη της επένδυσης ισοσταθμίζεται από τη μελλοντική εξοικονόμηση ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος απόσβεσης είναι περίπου 4.7 έτη, καθιστώντας την επένδυση αξιόλογη και αρκετά συμφέρουσα.



Γράφημα 28 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

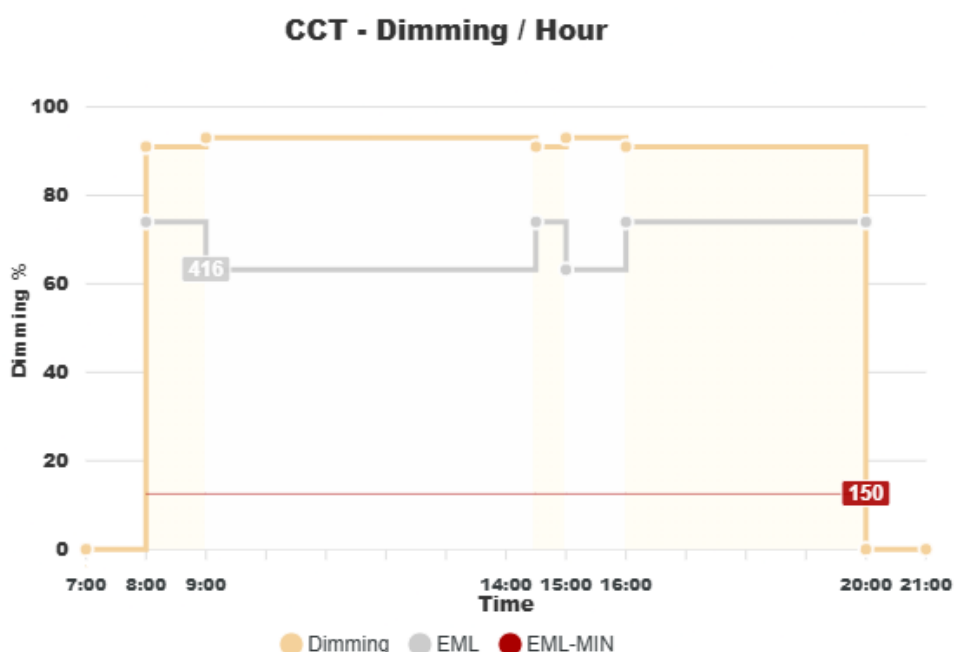
9.3.3 Σενάριο τρίτο

Εξετάζεται και σε αυτόν τον χώρο το σενάριο φωτισμού με αξιοποίηση μόνο των δύο πιο αποδοτικών τιμών θερμοκρασίας χρώματος, 4000 K και 5000 K. Η επιλογή αυτή μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβάλλοντα διδασκαλίας, όπως η συγκεκριμένη αίθουσα του Πολυτεχνείου, όπου προτεραιότητα δίδεται στη γνωστική απόδοση, τη συγκέντρωση, αλλά και στη διατήρηση της εγρήγορσης καθ' όλη τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Η επιλογή των 5000 K επιφέρει εγρήγορση το πρωί και νωρίς το απόγευμα, ενώ η 4000 K παρέχει φωτισμό υψηλής οπτικής άνεσης. Η εν λόγω επιλογή απλοποιεί τη διαχείριση του φωτιστικού συστήματος, τόσο ως προς την εγκατάσταση, όσο και ως προς τη ρύθμιση και συντήρηση και αποτελεί μια εύλογη και λειτουργική λύση.

Πίνακας 36 Τρίτο σενάριο φωτισμού για την αίθουσα 6 της σχολής ΗΜΜΥ.

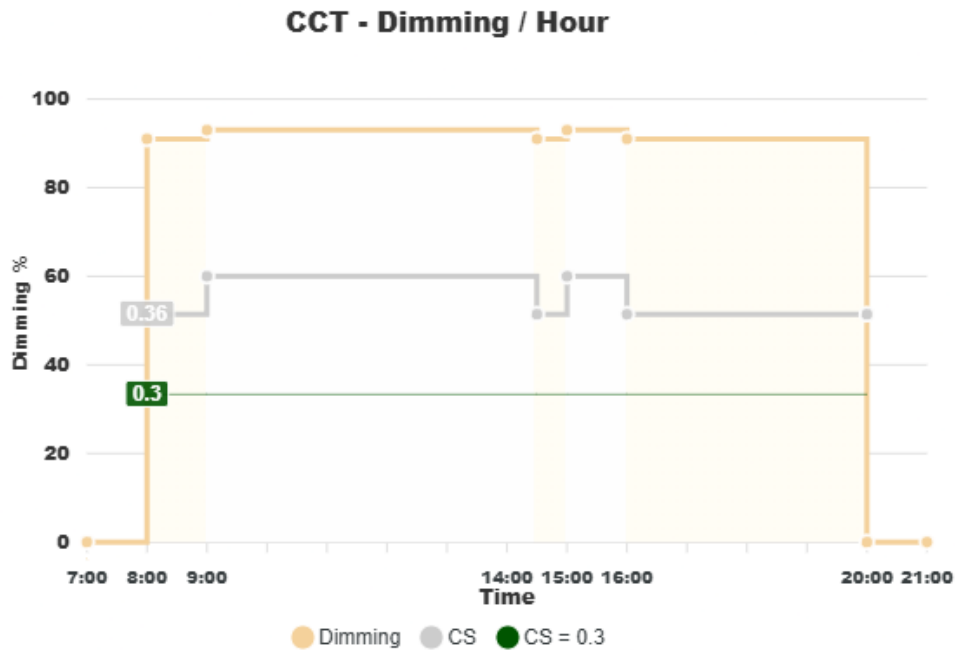
Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	E_m [lx]	E_v [lx]	EML	CS	Αιτιολόγηση και Οφέλη
08:00 - 09:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Υποστηρίζει την εγρήγορση και τη συμμετοχή στις πρωινές διαλέξεις.
09:00 - 14:30	5000	93%	504	447	416	0.42	Συμβάλλει στη διατήρηση της προσοχής κατά τη διάρκεια των μαθημάτων το πρωί και το μεσημέρι.
14:30 - 15:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Δημιουργεί ήπια ατμόσφαιρα την ώρα του μεσημεριανού διαλείμματος.
15:00 - 16:00	5000	93%	504	447	416	0.42	Αναζωογονεί και επαναφέρει την προσοχή των φοιτητών μετά το γεύμα.
16:00 - 20:00	4000	91%	502	448	470	0.36	Ήπια μετάβαση προς τη χαλάρωση, μειώνει την αίσθηση κόπωσης στις απογευματινές διαλέξεις.

Η τιμή του EML παραμένει υψηλή όλη την ημέρα, αρκετά πάνω από το όριο των 150, όπως διαπιστώνεται και στο παρακάτω γράφημα 29.



Γράφημα 29 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και EML, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

Η τιμή του CS εναλλάσσεται ανάμεσα σε 0.36 και 0.42, όπως αναπαρίσταται στο γράφημα 30.



Γράφημα 30 Απεικόνιση φωτεινής στάθμης και CS, ανά CCT και ώρα της ημέρας, για το τρίτο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

Κατ' αντιστοιχία με το πρώτο σενάριο, με χρήση του τύπου 33 και πολλαπλασιάζοντας την ημερήσια κατανάλωση με τις συνολικές ημέρες λειτουργίας του χώρου μέσα σε ένα έτος (190), υπολογίζεται στον πίνακα 37 η ετήσια κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 37 Παρουσίαση κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα και ανά έτος, για το τρίτο σενάριο φωτισμού της αίθουσας πανεπιστημιακών διαλέξεων.

Ώρα της ημέρας	CCT [K]	Light Output	Συνολική Ισχύς [W]	Ώρες λειτουργίας [h]	Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Ετήσια κατανάλωση [kWh]/έτος
08:00 - 09:00	4000	91%	984	1	0.98	186.96
09:00 - 14:30	5000	93%	993.2	5.5	5.46	1037.89
14:30 - 15:00	4000	91%	984	0.5	0.49	93.48
15:00 - 16:00	5000	93%	993.2	1	0.99	188.71
16:00 - 20:00	4000	91%	984	4	3.94	747.84
Σύνολο				12	11.86	2254.88

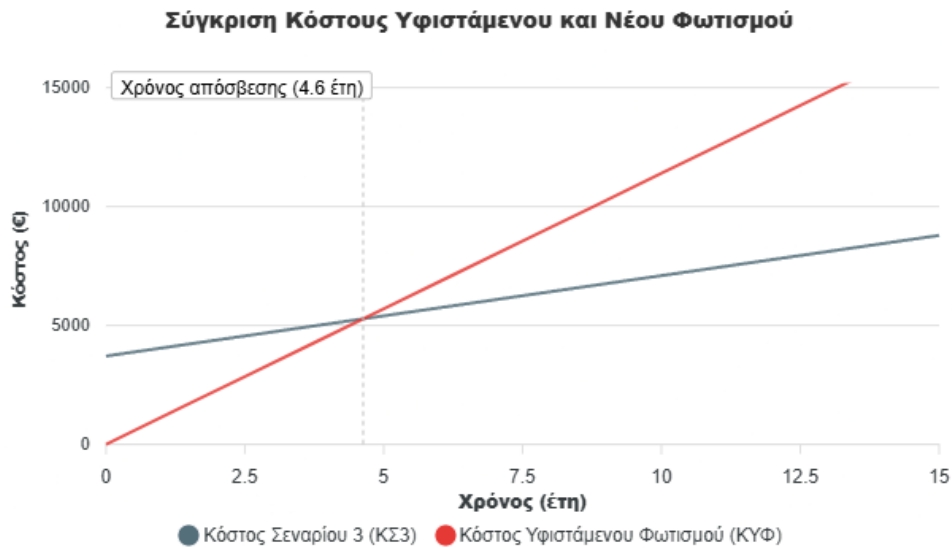
Όπως είναι αναγκαίο, εξετάζεται το τρίτο σενάριο φωτισμού ως προς την οικονομική του απόδοση για να μελετηθεί αν είναι βιώσιμη αυτή η επένδυση. Το κόστος αντικατάστασης και εφαρμογής σε λειτουργία του νέου σεναρίου παραμένει ίδιο, όπως υπολογίστηκε παραπάνω, με βάση την εξίσωση 34 στο πρώτο σενάριο και ανέρχεται στα 3712 €. Χρησιμοποιώντας τον τύπου 33, προκύπτει το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας:

$$K_{\text{ενέργειας/έτος}} = 2254.88 [kWh] * \left(0.15 \frac{\text{€}}{kWh}\right) = 338.23 \text{ €} \quad (48)$$

Το συνολικό κόστος στο δεύτερο σενάριο προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου 36 με τη νέα τιμή καταναλισκόμενης ενέργειας ανά έτος.

$$K\Sigma_3 = 3712 + (338.23 * \text{έτη}) \quad (49)$$

Η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης προκύπτει σαφέστερα με τη γραφική επίλυση του συστήματος των δύο ευθειών που αντιστοιχούν στις εξισώσεις 47 και 51, όπως απεικονίζεται στο γράφημα 31 παρακάτω. Η πρώτη ευθεία αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος του υπάρχοντος συστήματος φωτισμού, ενώ η δεύτερη ευθεία αφορά το κόστος του τρίτου σεναρίου φωτισμού που αξιοποιεί την τεχνολογία tunable white LED. Η τομή των δύο ευθειών προσδιορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία η αυξημένη αρχική επένδυση του νέου συστήματος αποσβένεται από την εξοικονόμηση ενέργειας. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται στα 4.6 έτη περίπου, επιβεβαιώνοντας πως πρόκειται για μια οικονομικά ευνοϊκή και γενικότερα αποδοτική επιλογή.



Γράφημα 31 Γραφικός υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για το δεύτερο σενάριο στην αίθουσα διδασκαλίας.

9.4 Σύγκριση σεναρίων

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργίας των δύο χώρων εστιάζοντας σε λύσεις ανθρωποκεντρικού φωτισμού, μελετώντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση. Κατά τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την αναβάθμιση, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, ιδίως αν το τρέχον σύστημα δεν αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα λειτουργίας. Η ανάλυση βασίστηκε λοιπόν, σε τεχνικά και οικονομικά δεδομένα, τα οποία συγκρίθηκαν με εκείνα της υφιστάμενης εγκατάστασης. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα βασικά συμπεράσματα, τα οποία συνοψίζονται στην παρούσα ενότητα. Τα συμπεράσματα αυτά βοηθούν στην αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων λύσεων. Για να υλοποιηθεί η σύγκριση των παραπάνω σεναρίων υπολογίστηκε η ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, που επιτυγχάνεται με τον νέο φωτισμό. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

$$\text{Μείωση (\%)} = \frac{\text{Συνολική υφιστάμενη } P - \text{Νέα συνολική } P \text{ ανά σενάριο}}{\text{Συνολική υφιστάμενη } P} * 100 \quad (50)$$

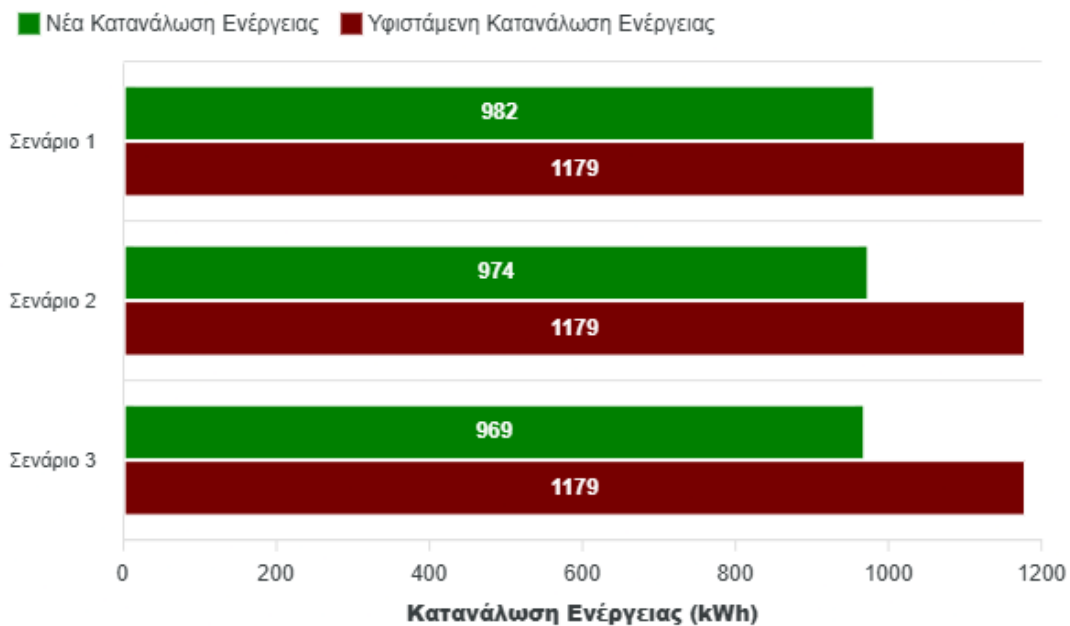
Για τον χώρο γραφείου η μείωση της κατανάλωσης που επιτυγχάνεται και η εξοικονόμηση ενέργειας, παρουσιάζονται στον πίνακα 38.

Πίνακας 38 Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ υφιστάμενης κατάστασης και των τριών σεναρίων, για τον χώρο γραφείου.

Υφιστάμενη κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Σενάρια	Νέα κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Μείωση [%]	Εξοικονόμηση ενέργειας ανά έτος [kWh]	Εξοικονόμηση ανά έτος [€]	Έτη απόσβεσης
1179.36	1	981.89	16.7	197.47	19.62	8.55
	2	974.1	17.4	205.26	30.79	8.49
	3	968.81	17.9	210.55	31.58	8.45

Παρατηρείται μείωση στην περιοχή του 17 % με 18 % σε ότι αφορά την εγκαταστημένη ισχύ του κτιρίου σε kWh. Στο γράφημα 32 προβάλλεται και γραφικά η μείωση αυτή.

Σύγκριση Ενεργειακής Κατανάλωσης Γραφείου



Γράφημα 32 Αναπαράσταση κατανάλωσης ενέργειας στον χώρο γραφείου, με σύγκριση της υφιστάμενης τιμής με την νέα, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια.

Στο γράφημα 33 προβάλλεται γραφικά η σύγκριση του υφιστάμενου με το νέο κόστος, αν εξεταστεί αποκλειστικά με βάση την κατανάλωση ενέργειας. Δεν είναι σημαντικό το κέρδος, αλλά σε βάθος χρόνου προστίθεται.

Σύγκριση Ενεργειακού Κόστους Γραφείου



Γράφημα 33 Αναπαράσταση νέου κόστους κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με το υφιστάμενο, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια που μελετήθηκαν στον χώρο γραφείου.

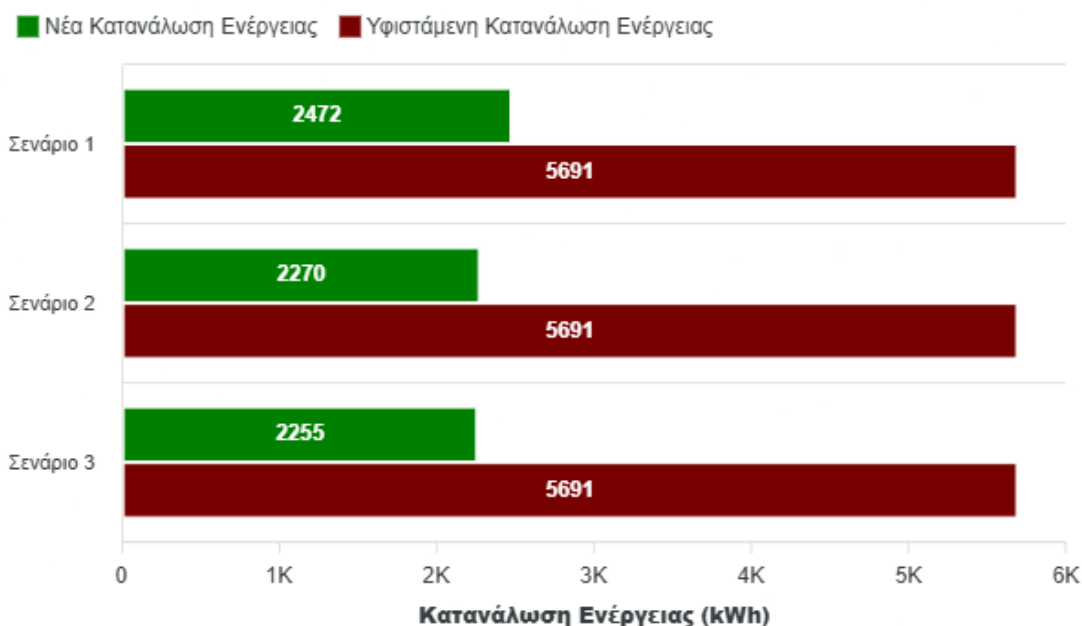
Για την αίθουσα 6 της σχολής ΗΜΜΥ του Πολυτεχνείου υπολογίζεται από την εξίσωση 54 η ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης που επιτυγχάνεται για κάθε ένα από τα τρία σενάρια, καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους που προκύπτει από αυτήν. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 39.

Πίνακας 39 Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ υφιστάμενης κατάστασης και των τριών σεναρίων, για την αίθουσα 6.

Υφιστάμενη κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Σενάρια	Νέα κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Μείωση [%]	Εξοικονόμηση ενέργειας ανά έτος [kWh]	Εξοικονόμηση ανά έτος [€]	Έτη απόσβεσης
5690.88	1	2472.39	56.6	3218.49	482.77	4.83
	2	2270.38	60.1	3420.5	513.08	4.65
	3	2254.88	60.4	3436	515.4	4.63

Παρατηρείται μείωση της τάξης του 57 % με 60 %, σε ότι αφορά την εγκαταστημένη ισχύ του κτιρίου σε kWh. Σε αυτόν τον χώρο το ενεργειακό όφελος, ανεξαρτήτως σεναρίου, καθίσταται σημαντικό καθώς εξοικονομείται περισσότερο από το μισό της κατανάλωσης. Αυτό φανερώνεται αρκετά ξεκάθαρα και από το παρακάτω γράφημα.

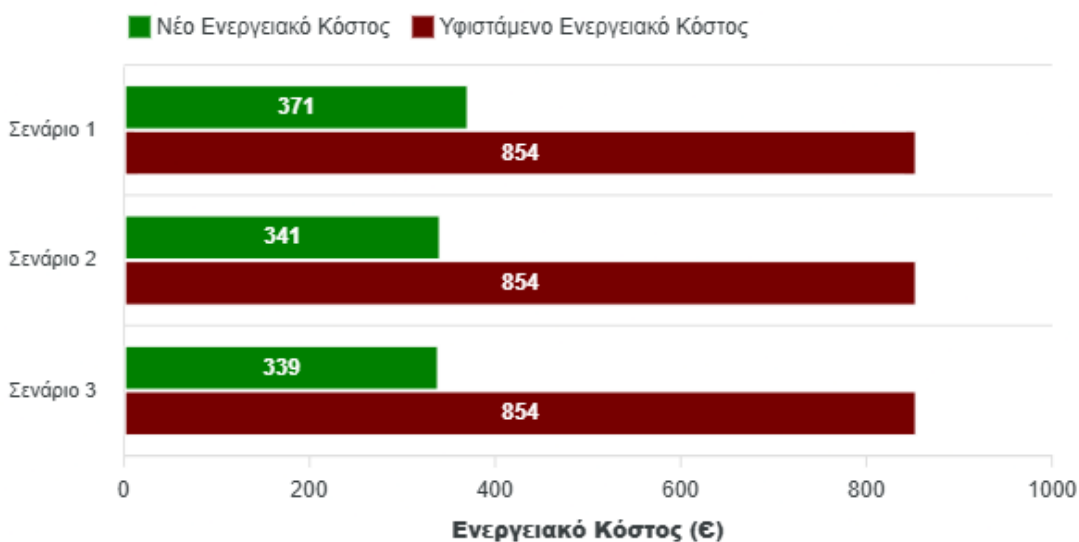
Σύγκριση Ενεργειακής Κατανάλωσης Αίθουσας



Γράφημα 34 Αναπαράσταση κατανάλωσης ενέργειας στην αίθουσα διδασκαλίας, με σύγκριση της υφιστάμενης τιμής με την νέα, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια.

Αντίστοιχα με την εξοικονόμηση ενέργειας, μεγάλη είναι η εξοικονόμηση κόστους που προκύπτει με την εφαρμογή των τριών σεναρίων.

Σύγκριση Ενεργειακού Κόστους Αίθουσας



Γράφημα 35 Αναπαράσταση νέου κόστους κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με το υφιστάμενο, για κάθε ένα από τα τρία σενάρια που μελετήθηκαν στην αίθουσα διδασκαλίας.

Τέλος, στην ανάλυση των τριών σεναρίων στους υπό μελέτη χώρους, δόθηκε προτεραιότητα παροχής της απαραίτητης ποιότητας και ποσότητας φωτισμού για τις εργασίες που επιτελούν οι χρήστες εντός αυτών.

10 Συμπεράσματα

Ο τεχνητός φωτισμός συγκεντρώνει τεράστια προσοχή τα τελευταία χρόνια καθώς αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Στον σύγχρονο τρόπο ζωής οι άνθρωποι σπουδάζουν, εργάζονται και ζουν σε χώρους όπου η χρήση τεχνητού φωτός αποτελεί την βασική πηγή φωτός. Ένας ολοκληρωμένος σχεδιασμός ανθρωποκεντρικού φωτισμού λοιπόν, στοχεύει κυρίως στην κάλυψη των οπτικών, βιολογικών και συναισθηματικών αναγκών των εκάστοτε χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, στις οπτικές ανάγκες εντάσσονται η δυνατότητα επιτέλεσης με ακρίβεια των εργασιών, η αποτροπή θάμβωσης και το αίσθημα ασφάλειας. Οι βιολογικές ανάγκες ταυτίζονται με τον συγχρονισμό με τον φυσιολογικό κιρκάδιο ρυθμό του ανθρώπου και οι συναισθηματικές ανάγκες διασφαλίζουν την ευεργετική επίδραση ενός ορθά φωτισμένου χώρου στην ανθρώπινη ψυχολογία.

Η σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδεικνύει τα δύο μετρικά συστήματα που έχουν επικρατήσει για την ποσοτικοποίηση των μη οπτικών επιδράσεων του τεχνητού φωτισμού (βιολογικών και συναισθηματικών), τα οποία είναι η ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού (EML) και το κιρκάδιο ερέθισμα (CS). Και τα δύο προσδιορίζουν την αποτελεσματικότητα των διαφόρων πηγών φωτός βασισμένα στη νυχτερινή καταστολή της έκκρισης μελατονίνης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι μετρικές αυτές με εφαρμογή τριών σεναρίων σε δύο χώρους, εργασίας και διδασκαλίας αντίστοιχα, και προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Καταρχάς, η δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής της έντασης και της θερμοκρασίας χρώματος, ώστε να προσομοιάζει κατά το δυνατόν τον φυσικό φωτισμό, του φωτιστικού Tunable White LED της εταιρείας «PETRIDIS» που χρησιμοποιήθηκε, έδειξε πως είναι εφικτό να ακολουθείται αποτελεσματικά ο κιρκάδιος ρυθμός και να καλύπτονται οι βιολογικές ανάγκες των χρηστών μέσα στην ημέρα.
- Η ανάλυση των μετρήσεων της Ισοδύναμης Μελανοπικής Έντασης (EML) φανερώνει ότι η εναλλαγή των θερμοκρασιών του φωτός μέσα στην ημέρα κατά τρόπο ώστε ο τεχνητός φωτισμός να μιμείται τον φυσικό, υιοθετώντας τιμές πιο ψυχρού φωτισμού το πρωί και πιο θερμού το απόγευμα, δεν καθιστά το αποτέλεσμα απλά αισθητικά πιο ευχάριστο, αλλά εξασφαλίζει τις καλύτερες συνθήκες για την ανάπτυξη δραστηριοτήτων που απαιτούν υψηλή γνωστική απόδοση, προσοχή και συγκέντρωση το πρωί και συμβάλλει στη μείωση της κόπωσης προς το τέλος της μέρας.
- Η ανάλυση μετρήσεων του Κιρκάδιου Ερεθίσματος (CS) έδειξε ότι το συγκεκριμένο σύστημα φωτισμού υποστηρίζει ενεργά τον κιρκάδιο ρυθμό του σώματος, όπως θα το έκανε το φυσικό φως. Το πρωί βοηθά τον οργανισμό να αφυπνιστεί σωστά και να μπει σε φάση εγρήγορσης. Στη συνέχεια της ημέρας υποστηρίζει την εγκεφαλική απόδοση χωρίς να κουράζει, ενώ παραμένει εντός των ορίων που προάγουν την ψυχική ευεξία. Επομένως, ο φωτισμός που επιτεύχθηκε δεν ήταν απλώς ικανοποιητικός για όραση, αλλά ειδικά σχεδιασμένος να ενισχύει τον κιρκάδιο συγχρονισμό και να προάγει την απόδοση.
- Η επιλογή φωτιστικού με δυνατότητα μεταβολής τόσο της θερμοκρασίας χρώματος όσο και του επιπέδου της έντασης φωτισμού συνιστάται για λύσεις ανθρωποκεντρικού φωτισμού, καθώς η λειτουργία του συνεπάγεται χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και συνεπώς χαμηλότερο κόστος, εξασφαλίζοντας ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη.
- Ως βασικός παράγοντας στην απόφαση της εγκατάστασης ενός νέου συστήματος φωτισμού, οφείλει να συνυπολογιστεί το κόστος της επένδυσης. Στην παρούσα εργασία, τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν σε κάθε χώρο, παρουσιάζουν μείωση στην

κατανάλωση ενέργειας, έτσι ώστε το κόστος της επένδυσης να αποσβένεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, καθιστώντας τις συγκεκριμένες επιλογές οικονομικά βιώσιμες και αποδοτικές.

- Με βάση τα ευρήματα της μελέτης, όσο μεγαλύτερος ο χώρος, τόσο μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους επιτυγχάνεται, στοιχείο που μπορεί να διερευνηθεί στο μέλλον και σε ευρύτερες μελέτες.

Δεδομένου ότι υπάρχει στροφή προς λύσεις κερκადίου φωτισμού και μελετώνται εκτενώς τα θετικά αποτελέσματά του στον άνθρωπο, συνιστάται σε κάθε περίπτωση η διερεύνηση της δυνατότητας χρηματοδότησης μέρους ή όλου του κόστους της αγοράς και εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος φωτισμού μέσω ευρωπαϊκών προγραμμάτων. Μια τέτοια ευκαιρία θα τον καθιστούσε άμεσα εφαρμόσιμο και ακόμη περισσότερο συμφέροντα οικονομικά.

Η παρούσα μελέτη αποτελεί μια μικρή συνεισφορά στον τεράστιο και πολλά υποσχόμενο τομέα του ανθρωποκεντρικού φωτισμού, όπου υπάρχουν πολλά ουσιαστικά ερωτήματα που αξίζει να διερευνηθούν σε βάθος στο προσεχές μέλλον. Για παράδειγμα, η μελέτη τεχνητού φωτισμού σε συνδυασμό με τον ήδη υπάρχοντα φυσικό φωτισμό σε συγκεκριμένο χώρο και το ποσοστό που αυτός επηρεάζει τα αποτελέσματα, αποτελεί ένα ρεαλιστικό σενάριο με πολλές εφαρμογές. Η μελέτη σεναρίων σε μεταβλητό γεωγραφικό πλάτος και σε χώρους με κυλιόμενο ωράριο εργασίας (π.χ. νυχτερινές βάρδιες) μπορεί να προσθέσει επιπλέον προκλήσεις για αξιοποίηση στον σχεδιασμό του ανθρωποκεντρικού φωτισμού. Επίσης, αξίζει να μελετηθεί η επέκταση της εξέτασης ανάλογων σεναρίων και σε άλλους χώρους ανθρώπινης παρουσίας, όπως τα νοσοκομεία, τα κέντρα υγείας, εργοστασιακοί χώροι με εναλλασσόμενες βάρδιες λειτουργίας, αλλά ακόμα και χώροι εμπορικών κέντρων, με στόχο τη βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και την ευεργετική επίδραση στο ευ ζην. Ένα ακόμη πεδίο προς μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει η επίδραση των φασμάτων φωτισμού σε διαφορετικές ομάδες ανθρώπων, όπως στους μαθητές σε σχολικό περιβάλλον ή στους χρήστες με επηρεασμένη οπτική οξύτητα λόγω ηλικίας ή άλλης παθολογικής αιτίας. Τέλος, επεκτείνοντας περαιτέρω τρέχουσες μελέτες φωτισμού, πιθανές εφαρμογές θα μπορούσαν να προσφέρουν και σε τομείς λιγότερο ανθρωποκεντρικούς, όπως τα θερμοκήπια με απότοκο την αύξηση της παραγωγής.

Συμπερασματικά, στο ευρύ πεδίο του ανθρωποκεντρικού φωτισμού είναι ήδη εμφανές ότι η συνέχιση της έρευνας στο μέλλον θα αναδείξει εξαιρετικά υποσχόμενες και αποδοτικές εφαρμογές του σε νέα διαφορετικά περιβάλλοντα, συνεισφέροντας στο θετικό αποτύπωμα του τεχνητού φωτισμού στην ανθρώπινη υγεία, παραγωγικότητα και ευεξία.

Πίνακας Συντομογραφιών

ipRGC	Εγγενώς φωτοευαίσθητο γαγγλιακό κύτταρο του αμφιβληστροειδούς
SCN	Υπερχιασματικός πυρήνας
CCT	Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος
NIF	Μη οπτικές, non-image-forming
T.O.T.E.E.	Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
CIE	Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de l'Eclairage - αγγλ: International Commission on Illumination)
CEN	Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης
Φ.Φ.	Φυσικός Φωτισμός
HCL	Human Centric Lighting
Α.Φ.	Ανθρωποκεντρικός Φωτισμός
SPD	Φασματική κατανομή ισχύος
EML	Ισοδύναμη μελανοπική ένταση φωτισμού - Equivalent Melanopic Lux
CLA	Κιρκάδιο φως
CS	Κιρκάδιο ερέθισμα
MEER ή R	Μελανοπική αναλογία ίσης ενεργειακής απόδοσης, Melanopic Equal-Energy Efficacy Ratio
MDEI	Melanopic Daylight Equivalent Illuminance
MDER	Melanopic Daylight Efficacy Ratio
D65	Standard illuminant – φυσικός φωτισμός
E _H	Επίπεδα οριζόντιας έντασης φωτισμού
E _V	Επίπεδα κατακόρυφης έντασης φωτισμού
IES	Illuminating Engineering Society
a _{rv}	Κιρκαδιανός παράγοντας δράσης
RVP	Σχετική οπτική απόδοση
RSE	Σχετική φασματική αποτελεσματικότητα
AUC	Υπολογισμένη περιοχή κάτω από την καμπύλη
RGB	Κόκκινο, πράσινο, μπλε
RGBW	Κόκκινο, πράσινο, μπλε, άσπρο
COB	Chip on board
Ra	Χρωματική απόδοση
DALI	Πρότυπο διεπαφής ψηφιακού διευθυνσιοδοτούμενου φωτισμού
LES	Light Emitting Surface
OPEX	Λειτουργικές Δαπάνες

Βιβλιογραφία

- [1] M. Rossi, *Circadian Lighting Design in the LED Era*, Milan: Springer, 2019.
- [2] Λ. Ο. κ. Σ. Κ. Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, *Φωτοτεχνία*, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα: Εκδόσεις Τσιόλα, 2020.
- [3] W. Duke_Elder, *Textbook of Ophthalmology*, Vol. 1, St.Louis: Mosby & Co, 1944.
- [4] D. F. Schlie-Roosen, «Impact of Light on Human Beings,» *licht.wissen*, p. 54, 2014.
- [5] P. R. Boyce, *Human Factors in Lighting*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [6] I. Provencio, I. R. Rodriguez, G. Jiang, P. W. Hayes, F. E. Moreira και D. M. Rollag, «A Novel Human Opsin in the Inner Retina,» *Journal of Neuroscience*, τόμ. 20, pp. 600-605, 2000.
- [7] D. M. Berson, «Phototransduction in ganglion-cell photoreceptors,» *European Journal of Physiology*, τόμ. 454, pp. 849-855, September 2007.
- [8] D. M. Berson, F. A. Dunn και M. Takao, «Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock,» *Science*, τόμ. 295, pp. 1070-1073, 2002.
- [9] S. Hattar, M. Takao και D. Berson, «Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity,» *Science*, pp. 1065-1070, March 2002.
- [10] M. T. Do, S. H. Kang, T. Xue, H. Zhong, H. W. Liao, D. E. Bergles και K. W. Yau, «Photon capture and signalling by melanopsin retinal ganglion cells,» *Nature*, τόμ. 457, pp. 281-287, 2009.
- [11] D. M. Berson, «Strange vision: Ganglion cells as circadian photoreceptors,» *Trends in Neurosciences*, τόμ. 26, αρ. 6, pp. 314-320, June 2003.
- [12] E.-N. Madias, E. Patrikios, C. Grigoropoulos και L. Doulos, «DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SUSTAINABLE ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND HUMAN CENTRIC LUMINAIRE,» *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, December 2022.
- [13] Λ. Δούλος, Π. Κονταξής, Κ. Λάσκος, Φ. Τοπαλής και Α. Τσαγκρασούλης, «Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. Τεχνητός και Φυσικός Φωτισμός κτιρίων,» Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2021.
- [14] D. C. Klein, R. Y. Moore και S. M. Reppert, *Suprachiasmatic Nucleus. The Mind's Clock*, 1991.
- [15] M. Menaker, «Commentary: what does melatonin do and how does it do it?,» *J Biol Rhythms*, τόμ. 12, pp. 532-534, 1997.
- [16] B. Wood, M. S. Rea, B. Pitnick και M. G. Figueiro, «Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression,» *Applied Ergonomics*, τόμ. 44, pp. 237-240, 2013.
- [17] F. Halberg, G. Cornélissen, G. Katinas, E. V. Syutkina, R. B. Sothorn, R. Zaslavskaya, F. Halberg, Y. Watanabe, O. Schwartzkopff, K. Otsuka, R. Tarquini, P. Frederico και J. Siggelova, «Transdisciplinary unifying implications of circadian findings in the 1950s,» *Journal of Circadian Rhythms*, τόμ. 1, αρ. 2, 2003.
- [18] J.-J. d. d. Mairan, «Observation botanique,» Royal Academy of Sciences, Paris, 1729.
- [19] A. Kleinhoonte, «Über die durch das Licht regulierten autonomen Bewegungen der Canavalia-Blatter,» *Archives Neerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, τόμ. 5, pp. 1-110, 1929.

- [20] E. Bunning και K. Stern, «Über die tagesperiodischen Bewegungen der Primärblätter von *Phaseolus multiflorus*. II. Die Bewegungen bei Thermokonstanz.,» *Ber Dtsch Botanischen*, τόμ. 48, pp. 227-252, 1930.
- [21] E. Bunning, «Die endogene Tagesrhythmik als Grundlage der photoperiodischen Reaktion,» *Ber Dtsch Botanischen*, τόμ. 54, pp. 590-607, 1936.
- [22] E. Gwinner, «Circadian and circannual rhythms in birds,» σε *Avian Biology*, New York, Academic Press, 1975, pp. 221-285.
- [23] C. S. Pittendrigh, «Circadian Systems: Entrainment,» σε *Handbook of Behavioral Neurobiology (Biological Rhythms)*, New York, Plenum Press., 1981, pp. 95-124.
- [24] G. Sharp, «The effect of light on diurnal leucocyte variations,» *Journal of Endocrinology*, τόμ. 21, pp. 213-223, 1960.
- [25] M. C. Lobban, «The entrainment of circadian rhythms in man,» *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology*, τόμ. 25, pp. 325-332, 1961.
- [26] J. Aschoff, «Desynchronization and resynchronization of human circadian rhythms,» *Aerospace medicine*, τόμ. 40, pp. 844-849, 1969.
- [27] C. A. Czeisler, G. S. Richardson, J. C. Zimmerman, M. C. Moore-Ede και E. D. Weitzman, «Entrainment of human circadian rhythms: A reassessment,» *Photochemistry and photobiology*, τόμ. 34, pp. 239-247, 1981.
- [28] D. J. Dijk, Z. Boulos, C. I. Eastman, A. J. Lewy, S. S. Campbell και M. Terman, «Light Treatment for Sleep Disorders: Consensus Report: II. Basic Properties of Circadian Physiology and Sleep Regulation,» *Journal of Biological Rhythms*, τόμ. 10, pp. 113-125, 1995.
- [29] N. M. Mead, «Benefits of Sunlight: A Bright Spot for Human Health,» *Environmental Health Perspectives*, τόμ. 116, αρ. 4, pp. A160 - A167, 2008.
- [30] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), «The Influence of Daylight and Artificial Light on Diurnal and Seasonal Variations in Humans – A Bibliography,» σε *CIE 139:2001*, Vienna, 2001.
- [31] T. A. Wehr, H. A. Giesen, D. E. Moul, E. H. Turner και P. J. Schwartz, «Suppression of human responses to seasonal changes in day-length by modern artificial lighting,» *American journal of physiology*, τόμ. 269, pp. R173-R178, 1995.
- [32] T. A. Wehr, «Photoperiodism in humans and other primates: Evidence and implications,» *Journal of Biological Rhythms*, τόμ. 16, pp. 348-364, 2001.
- [33] M. F. Figueiro, K. Gonzales και D. Pedler, «Designing with Circadian Stimulus,» *LD+A*, pp. 30-34, 2016.
- [34] A. Cagnacci, R. Soldani και S. Yen, «Contemporaneous melatonin administration modifies the circadian response to nocturnal bright light stimuli,» σε *Am. J. Physiol.*, 1997.
- [35] H. J. Burgess και C. I. Eastman, «A late wake time phase delays the human dim light melatonin rhythm,» *A late wake time phase delays the human dim light melatonin rhythm*, τόμ. 395, αρ. 3, pp. 191-195, 2006.
- [36] S. J. Crowley, C. Lee, C. Y. Tseng, L. F. Fogg και C. I. Eastman, «Combinations of bright light, scheduled dark, sunglasses, and melatonin to facilitate circadian entrainment to night shift work,» *Journal of Biological Rhythms*, τόμ. 18, αρ. 6, pp. 513-523, 2003.
- [37] I. Wilhelm, J. Born, B. M. Kudielka, W. Schlotz και S. Wüst, «Is the cortisol awakening rise a response to awakening?,» *Psychoneuroendocrinology*, τόμ. 32, αρ. 4, pp. 358-366, 2007.

- [38] M. S. Rea, M. G. Figueiro, K. M. Sharkey και M. A. Carskadon, «Relationship of Morning Cortisol to Circadian Phase and Rising Time in Young Adults with Delayed Sleep Times,» *International Journal of Endocrinology*, τόμ. 2012, αρ. 1, 2012.
- [39] European Committee for Standardization, «Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places,» σε *European Committee for Standardization 2021 European Norm (EN) 12464-1:2021*, Brussels, 2021.
- [40] European Committee for Standardization, «Light and lighting - Lighting of work places - Part 2: Outdoor work places,» σε *EN 12464-2:2024*, 2024.
- [41] E. Dolgin, «The myopia boom – Short-sightedness is reaching epidemic proportions. Some scientists think they have found a reason why.,» *Nature*, τόμ. 519, pp. 276-278, 2015.
- [42] A. Schulz, «Guide to Human Centric Lighting (HCL),» *licht.de*, τόμ. licht.wissen 21, p. 37, 2018.
- [43] I. M. McIntyre, T. R. Norman, G. D. Burrows και S. M. Armstrong, «Human Melatonin Suppression by Light is Intensity Dependent,» *Journal of Pineal Research*, τόμ. 6, αρ. 2, pp. 149-156, 1989.
- [44] A. Wolska, D. Sawicki και M. Tafil-Klawe, *Visual and Non-Visual Effects of Light: Working Environment and Well-Being*, Boca Raton: CRC Press, 2020, p. 220.
- [45] Commission Internationale de l'Éclairage (International Commission on Illumination), «CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light,» σε *CIE S 026/E:2018*, 2018.
- [46] R. J. Lucas, S. N. Peirson, D. M. Berson, T. M. Brown, H. M. Cooper, C. A. Czeisler και G. C. Brainard, «Melanopsin Contributions to the Representation of Images in the Early Visual System,» *Trends Neurosci.*, pp. 1-9, November 2014.
- [47] International WELL Building Institute, «The WELL Building Standard v2.,» 2019.
- [48] S. Ezpeleta, E. Orduna-Hospital, T. Solana, J. Aporta, A. Sánchez-Cano και I. Pinilla, «Analysis of Photopic and Melanopic Lighting in Teaching Environments,» *Buildings*, τόμ. 11, p. 439, 2021.
- [49] E.-N. Madias, A. Kotsenos, A. Tsangrassoulis και L. Doulos, «Methodology for the optimization of artificial lighting considering both visual and non-visual effects,» *E3S Web of Conferences*, τόμ. 436, October 2023.
- [50] M. S. Rea, M. G. Bierman και R. Hammer, «Modeling the influence of nighttime light on melatonin suppression in humans.,» *Lighting Research & Technology*, τόμ. 48, αρ. 2, pp. 154-168, 2016.
- [51] D. Gall και K. Bieske, «Definition and Measurement of Circadian Radiometric Quantities.,» σε *CIE Expert Symposium on Light and Health*, Vienna, 2004.
- [52] G. C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner και M. D. Rollag, «Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor.,» *The Journal of Neuroscience*, τόμ. 21, αρ. 16, pp. 6405-6412, 2001.
- [53] K. Thapan, J. Arendt και D. Skene, «An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans.,» *The Journal of Physiology*, τόμ. 535, αρ. 1, pp. 261-267, 2001.
- [54] G. Busatto, «Circadian Lighting Experiences in a Health Residence for Non Self-Sufficient Elderly People.,» σε *Proceedings of BSO*, Cambridge, UK, 2018.
- [55] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), «Relating Photochemical and Photobiological Quantities to Photometric Quantities.,» σε *CIE TN 002:2014*, 2014.

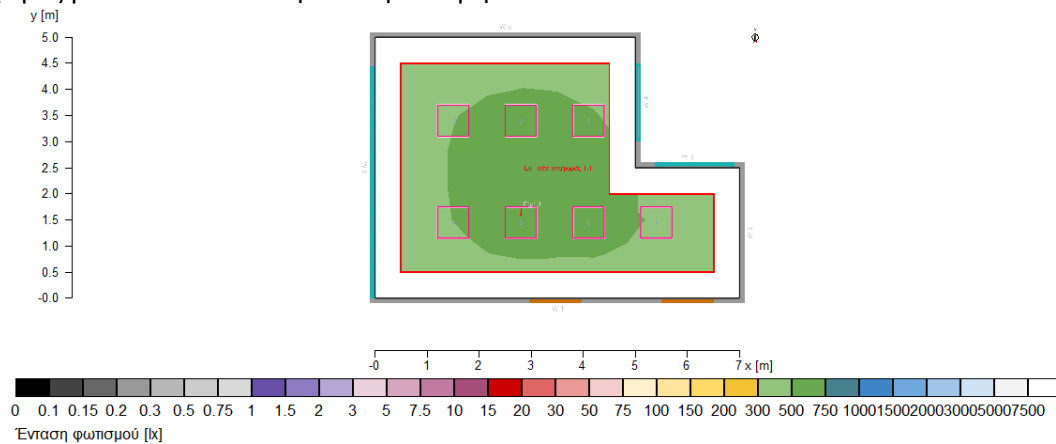
- [56] L. Bellia, F. Bisegna και G. Spada, «Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions,» *Building and Environment*, τόμ. 46, αρ. 10, pp. 1984-1992, 2011.
- [57] G. D. Lowry, «A comparison of metrics proposed for circadian lighting and the criterion adopted in the WELL Building Standard.,» σε *CIBSE Technical Symposium, Stretching the Envelope*, London, 2018.
- [58] M. S. Rea, «The lumen seen in a new light: Making distinctions between light, lighting and neuroscience,» *Lighting Research & Technology*, τόμ. 47, αρ. 3, 2014.
- [59] M. S. Rea, «Lighting simply made better: Providing a full range of benefits without much fuss.,» *Building and Environment*, τόμ. 144, pp. 57-65, 2018.
- [60] S. M. Berman και R. D. Clear, «A metric of retinal image quality and light source performance.,» *Leukos*, τόμ. 15, αρ. (2-3), pp. 181-193, 2019a.
- [61] M. L. Amundadottir, S. W. Lockley και M. Anderson, «Unified framework to evaluate non-visual spectral effectiveness of light for human health.,» *Lighting Research & Technology*, τόμ. 49, αρ. 6, pp. 673-696, 2017.
- [62] CIRCADIAN ZirCLight White Paper, «Circadian Metrics and Lighting Solutions.,» Circadian ZirCLight, 2019.
- [63] M. Moore-Ede, A. Heitmann και R. Guttman, «Circadian Potency Spectrum with Extended Exposure to Polychromatic White LED Light under Workplace Conditions,» *J Biol Rhythms*, τόμ. 35, αρ. 4, pp. 405-415, 2020.
- [64] S. M. Berman και R. D. Clear, «Spectral design metrics for lighting for humans.,» *Leukos*, τόμ. 15, αρ. (2-3), pp. 141-158, 2019b.
- [65] K. W. Houser, P. R. Boyce, J. M. Zeitzer, M. Herf και T. McGowan, «Human-centric lighting: Myth, magic or metaphor?,» *Lighting Research & Technology*, τόμ. 53, αρ. 2, pp. 97-118, 2021.
- [66] D. Overbye, «American and 2 Japanese Physicists Share Nobel for Work on LED Lights,» *The New York Times*, p. A.7, 7 October 2014.
- [67] «Led basic structure & light-emitting principle,» 2016.
- [68] L. Yang, M. Chen, Z. Lv, S. Wang, X. Liu και S. Liu, «Preparation of a YAG:Ce phosphor glass by screen-printing technology and its application in LED packaging,» *Optics Letters*, τόμ. 38, αρ. 13, pp. 2240-2243, 2013.
- [69] F. Viénot, M. Harrar, J.-J. Ezrati, E. Mahler, L. Serreault, P. Pérignon και A. Bricoune, «Discriminating colours under LED illumination,» *AIC Colour 05 - In Proceedings of 10th Congress of the International Colour Association*, pp. 33-36, 2004.
- [70] LUMINUS, «CCT TUNABLE MODULES, Wide CCT range with 2-channel color tunable and 4-channel RGBW,» 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.luminus.com/products/dynamic-cob/cct-tunable>.
- [71] Samsung, «Perfect Ambience Created by Light,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://led.samsung.com/lighting/cob-leds/t-series/>.
- [72] NICHIA, «Tunable White,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://led-ld.nichia.co.jp/en/product/lighting_tunablewhite.html.
- [73] R. I. AG, «REELUX software,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://relux.com/en/>.
- [74] A. Kotsenos, E.-N. Madias, F. V. Topalis και L. Doulos, «Circadian stimulus calculators as environmental building design tools: Early results of critical review.,» *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, τόμ. 1123, αρ. 012035, 2022.

- [75] M. G. Figueiro και M. S. Rea, «Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood.,» *Lighting Research & Technology*, τόμ. 49, αρ. 3, pp. 352-364, 2017.
- [76] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, «ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ Κ.ΕΝ.Α.Κ. (2017),» ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ, Αθήνα, 2017.
- [77] M. S. Rea και M. G. Figueiro, «Light as a circadian stimulus for architectural lighting.,» *Lighting Research & Technology*, τόμ. 50, αρ. 4, pp. 497-510, 2018.
- [78] Halliday. Resnick, Φυσική Μέρος Β, Γ. Α. Πνευματικός, 1976.
- [79] T. Kumbalasiri και I. Provencio, «Melanopsin and other novel mammalian opsins,» *Experimental Eye Research*, τόμ. 81, αρ. 4, pp. 368-375, October 2005.
- [80] A. Cagnacci, R. Soldani και S. S. C. Yen, «Contemporaneous melatonin administration modifies the circadian response to nocturnal bright light stimuli,» *Am. J. Physiol*, τόμ. 272, pp. R482-R486, 1997.
- [81] J. Aschoff, M. Fatranska, H. Giedke, P. Doerr, D. Stamm και H. Wisser, «Human Circadian Rhythms in Continuous Darkness: Entrainment by Social Cues,» *Science*, τόμ. 171, pp. 213-215, 1971.
- [82] O. Van Reeth, J. Sturis, M. M. Byrne, J. D. Blackman, M. L'Hermite-Balériaux, R. Leproult, C. Oliner, S. Refetoff, F. W. Turek και E. Van Cauter, «Nocturnal exercise phase delays circadian rhythms of melatonin and thyrotropin secretion in normal men,» *The American journal of physiology*, τόμ. 266, pp. E964-E974, 1994.
- [83] E. J. Van Someren, C. Lijzenga, M. Mirmiran και D. F. Swaab, «Long-Term Fitness Training Improves the Circadian Rest-Activity Rhythm in Healthy Elderly Males,» *Journal of biological rhythms*, τόμ. 12, pp. 146-156, 1997a.
- [84] L. E. M. Miles, D. M. Raynal και M. A. Wilson, «Blind Man Living in Normal Society Has Circadian Rhythms of 24.9 Hours,» *Science*, τόμ. 198, pp. 421-423, 1977.
- [85] T. Klein, H. Martens, D. J. Dijk, R. Kronauer, E. W. Seely και C. A. Czeisler, «Circadian sleep regulation in the absence of light perception: chronic non-24-hour circadian rhythm sleep disorder in a blind man with a regular 24-hour sleep-wake schedule.,» *Sleep*, τόμ. 16, pp. 333-343, 1993.
- [86] R. E. Mistlberger και D. J. Skene, «Nonphotic entrainment in humans?,» *Journal of biological rhythms*, τόμ. 20, pp. 339-352, 2005.
- [87] E. J. W. Van Someren και R. F. Riemersma-van der Lek, «Live to the rhythm, slave to the rhythm,» *Sleep Medicine Reviews*, τόμ. 11, pp. 465-484, 2007.
- [88] Delos Living LLC, «The WELL Building Standard®,» May 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://standard.wellcertified.com/well>.
- [89] German Institute for Standardisation, «Complementary criteria for lighting design and lighting application with regard to non-visual effects of light.,» σε *German Institute for Standardisation 2021 DIN DIN/TS 67600:2021-10*, Berlin, 2021.
- [90] EURBORN, «Color Temperature And Influence of Lights,» 2022.

Τα διαγράμματα υλοποιήθηκαν με χρήση της Βιβλιοθήκης Ανοιχτού Λογισμικού apexcharts.js.

Παράρτημα Α

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο λογισμικό RELUX μετά την εφαρμογή του φωτιστικού "PETRID1" στον εξαταζόμενο χώρο γραφείου. Αρχικά εξετάζεται ο χώρος με CCT 2700 K και φωτεινή στάθμη στο 100 %.



Γενικά

Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται
Ύψος επιπέδου φωτιστικού
Συντελεστής συντήρησης

Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού
2.80 m
0.80

Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων
Συνολική ισχύς
Συνολική ισχύς ανά περιοχή (30.00 m²)

18221.00 lm
405.6 W
13.52 W/m² (2.70 W/m²/100lx)

Περιοχή αξιολόγησης 1

Προφίλ χρήστη

Επίπεδο αναφοράς 1.1

Writing, typing, reading, dataprocessing
34.2 (EN 12464-1, 11.2021) (R_a >80.00)

E_m
E_{min}
E_{min}/E_m (U₀)
E_{min}/E_{max} (U_d)
E_z/E_h
Θέση
R_{UG} (3.2H 4.5H)
Φωτιστικό:
(Προϊόν, *D41D8*)

Οριζόντιος
501 lx (>= 500 lx)
360 lx
0.72 (>= 0.60)
0.60
0.75 m
<=23.0 (< 19.00)

κυλινδρικός
334 lx (>= 150 lx)
279 lx (>= 0.10)
0.84 (>= 0.10)
0.59
1.20 m

Μέγιστες επιφάνειες

m 1.7 (Οροφή)
m 1.1 (Τοίχος)
m 1.3 (Τοίχος)
m 1.4 (Τοίχος)
m 1.6 (Τοίχος)

E_m
255 lx (>= 100 lx)
371 lx (>= 150 lx)
321 lx (>= 150 lx)
464 lx (>= 150 lx)
424 lx (>= 150 lx)

U₀
0.86 (>= 0.10)
0.70 (>= 0.10)
0.80 (>= 0.10)
0.72 (>= 0.10)
0.72 (>= 0.10)

Τύπος Αριθ. Κατασκ.

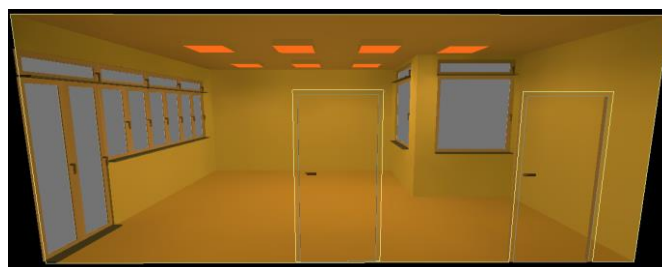
2 7 x



not a Relux Member

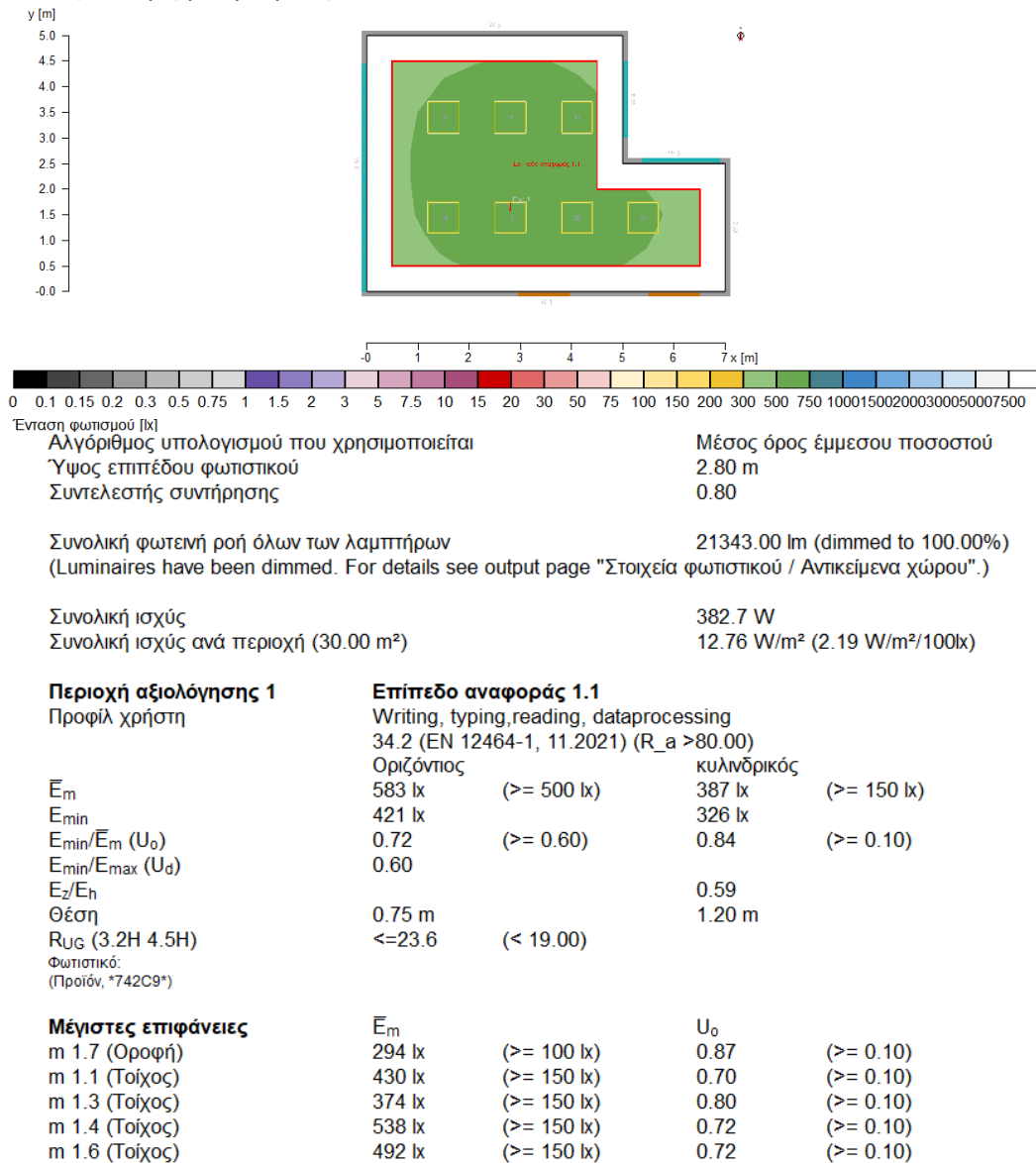
Αρ. Παραγγελίας : *D41D8*
Όνομα φωτιστικού : Προϊόν
Εξοπλισμός : 1 x LED 57.94 W / 2603 lm

Εικόνα 57 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 2700 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 58 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 2700 K.

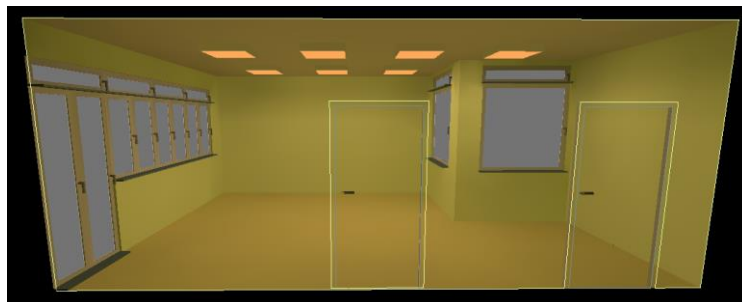
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μια ακόμη θερμοκρασία χρώματος, CCT 4000 K, με την φωτεινή στάθμη ρυθμισμένη στο 100 %.



ΤύποςΑριθ.Κατασκ.

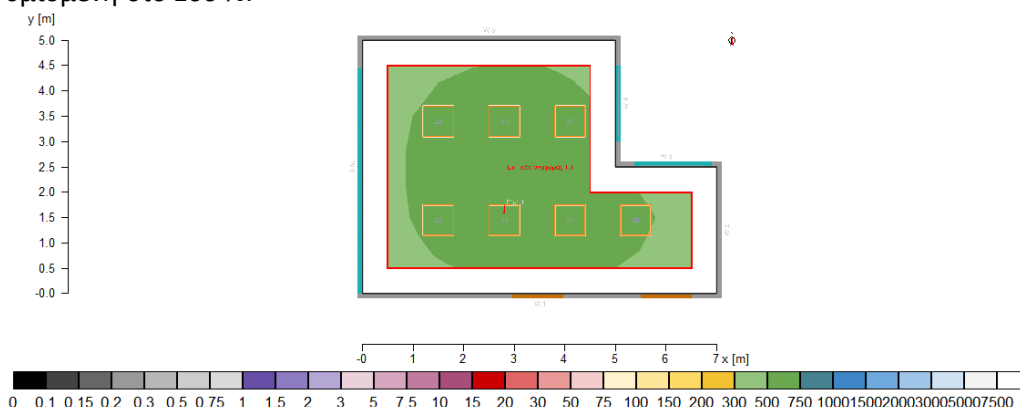
not a Relux Member
 1 7 x
 Αρ. Παραγγελίας : *742C9*
 Όνομα φωτιστικού : Προϊόν
 Εξοπλισμός : 1 x LED 54.67 W / 3049 lm

Εικόνα 61 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 4000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 62 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 4000 K.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για CCT 5000 K, με την φωτεινή στάθμη ρυθμισμένη στο 100 %.



Ένταση φωτισμού [lx]

Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται

Ύψος επιπέδου φωτιστικού

Συντελεστής συντήρησης

Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού

2.80 m

0.80

Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων

21525.00 lm (dimmed to 100.00%)

(Luminaires have been dimmed. For details see output page "Στοιχεία φωτιστικού / Αντικείμενα χώρου".)

Συνολική ισχύς

386.2 W

Συνολική ισχύς ανά περιοχή (30.00 m²)

12.87 W/m² (2.20 W/m²/100lx)

Περιοχή αξιολόγησης 1

Προφίλ χρήστη

Επίπεδο αναφοράς 1.1

Writing, typing, reading, dataprocessing

34.2 (EN 12464-1, 11.2021) (R_a >80.00)

Οριζόντιος

κυλινδρικός

E_m

584 lx

(>= 500 lx)

387 lx

(>= 150 lx)

E_{min}

422 lx

325 lx

E_{min}/E_m (U₀)

0.72

(>= 0.60)

0.84

(>= 0.10)

E_{min}/E_{max} (U_d)

0.60

E_z/E_h

0.59

Θέση

0.75 m

1.20 m

R_{UG} (3.2H 4.5H)

<=23.6

(< 19.00)

Φωτιστικό:

(Προϊόν, *D41D8*)

Μέγιστες επιφάνειες

m 1.7 (Οροφή)

292 lx

(>= 100 lx)

0.87

(>= 0.10)

m 1.1 (Τοίχος)

430 lx

(>= 150 lx)

0.70

(>= 0.10)

m 1.3 (Τοίχος)

374 lx

(>= 150 lx)

0.80

(>= 0.10)

m 1.4 (Τοίχος)

538 lx

(>= 150 lx)

0.72

(>= 0.10)

m 1.6 (Τοίχος)

492 lx

(>= 150 lx)

0.72

(>= 0.10)

ΤύποςΑριθ.Κατασκ.

4 7 x



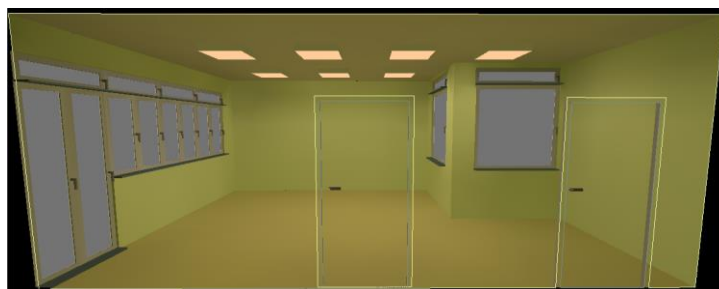
not a Relux Member

Αρ. Παραγγελίας : *D41D8*

Όνομα φωτιστικού : Προϊόν

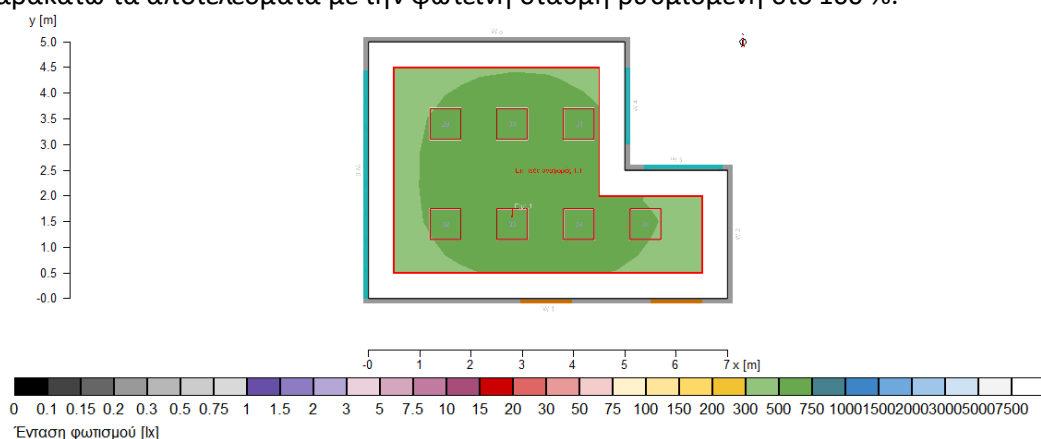
Εξοπλισμός : 1 x LED 55.18 W / 3075 lm

Εικόνα 63 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 5000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 64 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 5000 K.

Τελευταία θερμοκρασία χρώματος που εξετάζεται είναι για CCT 6500 K και παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα με την φωτεινή στάθμη ρυθμισμένη στο 100 %.



Γενικά

Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται
Ύψος επιπέδου φωτιστικού
Συντελεστής συντήρησης

Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού
2.80 m
0.80

Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων
Συνολική ισχύς
Συνολική ισχύς ανά περιοχή (30.00 m²)

20811.00 lm
404.7 W
13.49 W/m² (2.41 W/m²/100lx)

Περιοχή αξιολόγησης 1

Προφίλ χρήστη

Επίπεδο αναφοράς 1.1

Writing, typing, reading, dataprocessing

34.2 (EN 12464-1, 11.2021) (R_a >80.00)

Οριζόντιος

κυλινδρικός

E_m

560 lx

(>= 500 lx)

369 lx

(>= 150 lx)

E_{min}

404 lx

310 lx

E_{min}/E_m (U₀)

0.72

(>= 0.60)

0.84

(>= 0.10)

E_{min}/E_{max} (U_d)

0.60

E_z/E_h

0.58

Θέση

0.75 m

1.20 m

R_{UG} (3.2H 4.5H)

<=23.5

(< 19.00)

Φωτιστικό:

(Προϊόν, *D41D8*)

Μέγιστες επιφάνειες

m 1.7 (Οροφή)

277 lx

(>= 100 lx)

U₀

(>= 0.10)

m 1.1 (Τοίχος)

410 lx

(>= 150 lx)

0.70

(>= 0.10)

m 1.3 (Τοίχος)

357 lx

(>= 150 lx)

0.80

(>= 0.10)

m 1.4 (Τοίχος)

515 lx

(>= 150 lx)

0.72

(>= 0.10)

m 1.6 (Τοίχος)

471 lx

(>= 150 lx)

0.71

(>= 0.10)

ΤύποςΑριθ.Κατασκ.

5

7 x



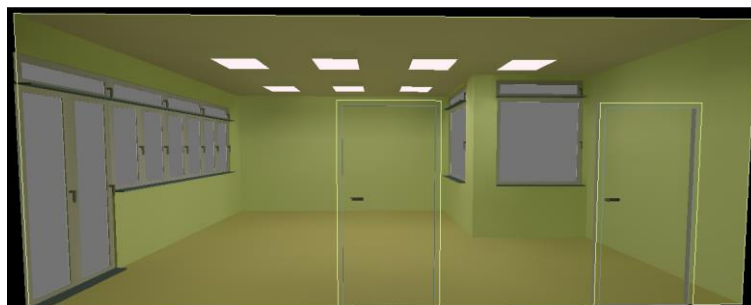
not a Relux Member

Αρ. Παραγγελίας : *D41D8*

Όνομα φωτιστικού : Προϊόν

Εξοπλισμός : 1 x LED 57.81 W / 2973 lm

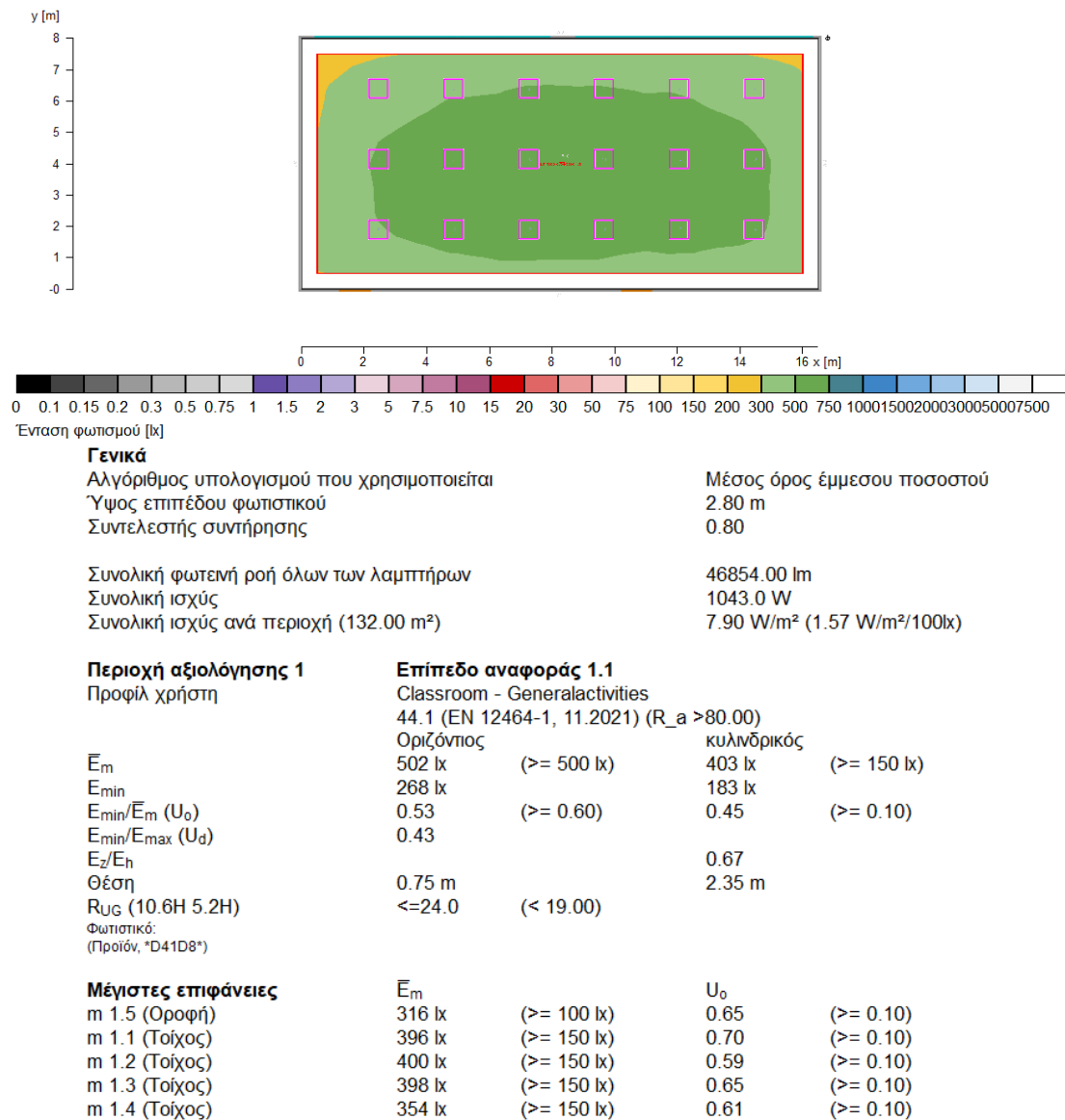
Εικόνα 65 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού του χώρου γραφείου, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 6500 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 66 Προσομοίωση φωτισμού του χώρου γραφείου στο RELUX σε θερμοκρασία χρώματος 6500 K.

Παράρτημα Β

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο λογισμικό RELUX, μετά την εφαρμογή του φωτιστικού "PETRID1" στην εξεταζόμενη αίθουσα 6 των Ηλεκτρολόγων του Πολυτεχνείου. Αρχικά ορίζεται CCT 2700 K και ρυθμίζεται η φωτεινή στάθμη στο 100 %.

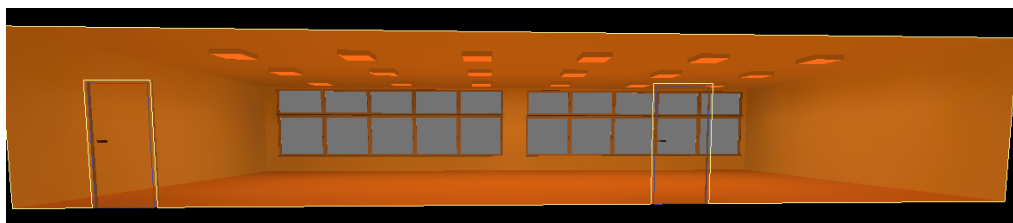


ΤύποςΑριθ.Κατασκ.

not a Relux Member

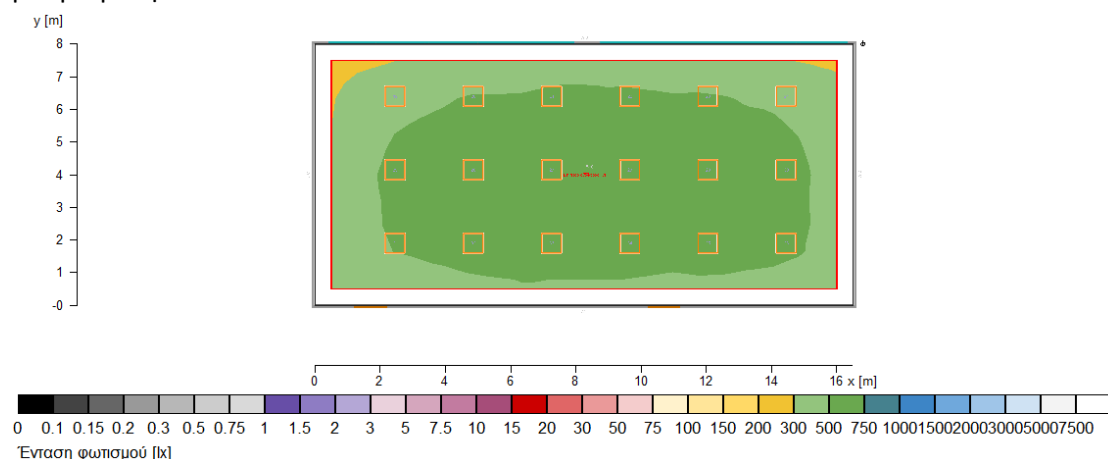
2 18 x	Αρ. Παραγγελίας	: *D41D8*
	Όνομα φωτιστικού	: Προϊόν
	Εξοπλισμός	: 1 x LED 57.94 W / 2603 lm

Εικόνα 67 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, με θερμοκρασία χρώματος ίση με 2700K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 68 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 2700 K.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για CCT 3000 K, με την φωτεινή στάθμη ρυθμισμένη στο 100 %.



Γενικά
 Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται: Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού
 Ύψος επιπέδου φωτιστικού: 2.80 m
 Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων: 50112.00 lm
 Συνολική ισχύς: 1011.2 W
 Συνολική ισχύς ανά περιοχή (132.00 m²): 7.66 W/m² (1.45 W/m²/100lx)

Περιοχή αξιολόγησης 1

Προφίλ χρήστη

E_m	527 lx	(>= 500 lx)	422 lx	(>= 150 lx)
E_{min}	281 lx		190 lx	
$E_{min}/E_m (U_o)$	0.53	(>= 0.60)	0.45	(>= 0.10)
$E_{min}/E_{max} (U_d)$	0.43			
E_z/E_h			0.66	
Θέση	0.75 m		2.35 m	
$R_{UG} (10.6H \ 5.2H)$	<=24.2	(< 19.00)		
Φωτιστικό: (Προϊόν, *D41D8*)				

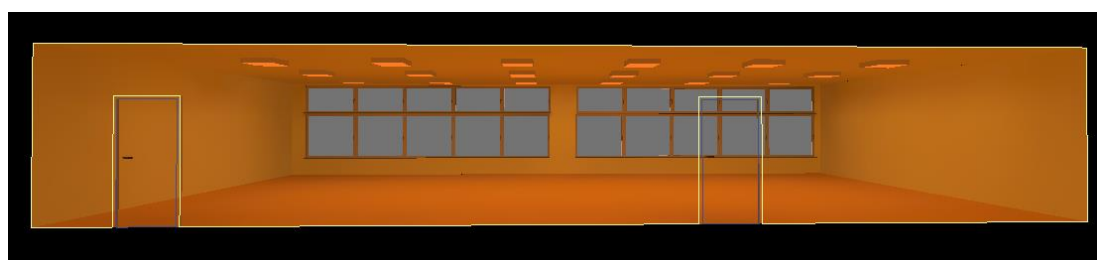
Μέγιστες επιφάνειες

E_m			U_o	
m 1.5 (Οροφή)	325 lx	(>= 100 lx)	0.65	(>= 0.10)
m 1.1 (Τοίχος)	410 lx	(>= 150 lx)	0.69	(>= 0.10)
m 1.2 (Τοίχος)	417 lx	(>= 150 lx)	0.59	(>= 0.10)
m 1.3 (Τοίχος)	415 lx	(>= 150 lx)	0.65	(>= 0.10)
m 1.4 (Τοίχος)	368 lx	(>= 150 lx)	0.61	(>= 0.10)

Τύπος Αριθ. Κατασκ.

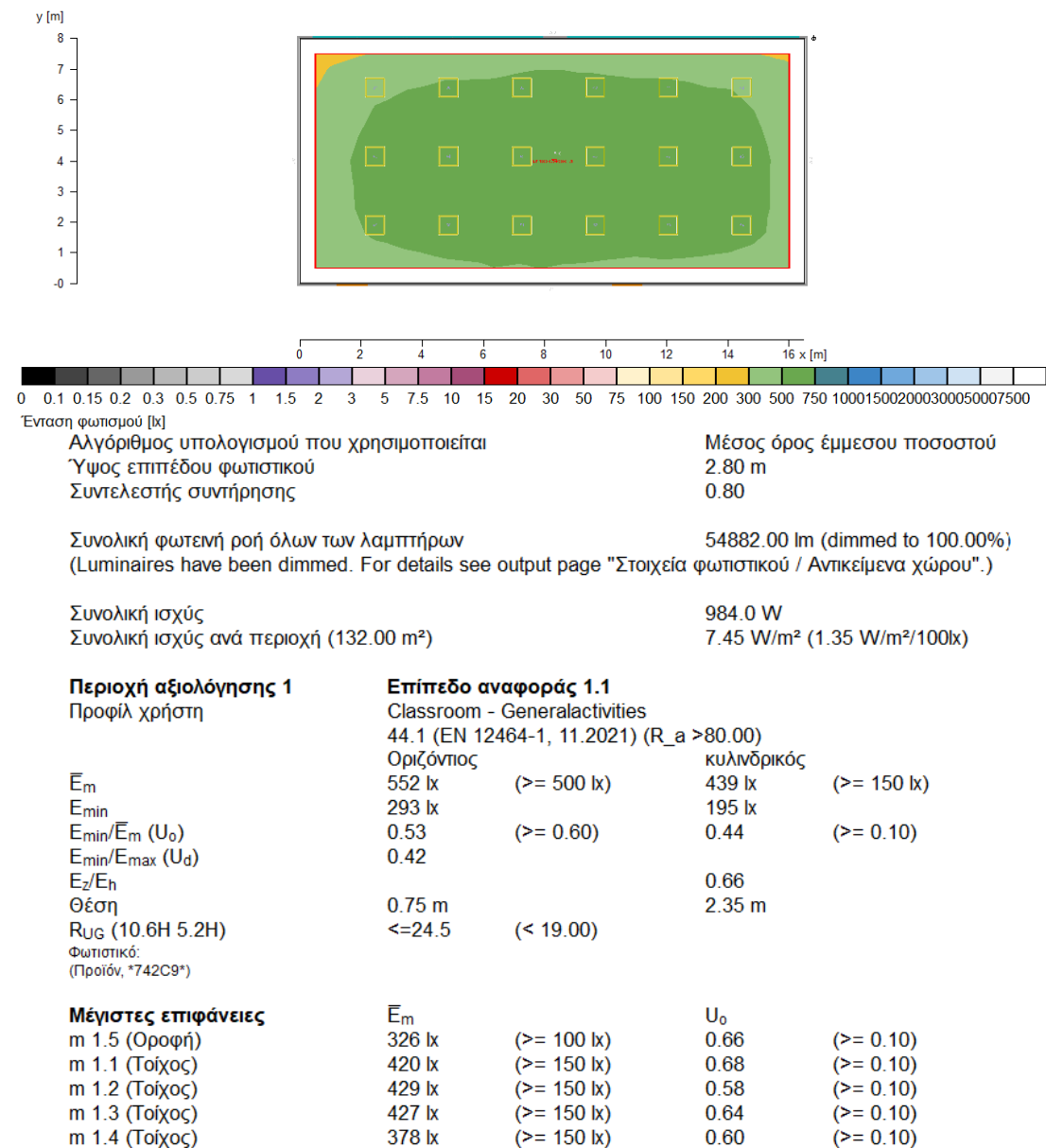
3	18 x	not a Relux Member
		Αρ. Παραγγελίας : *D41D8*
		Όνομα φωτιστικού : Προϊόν
		Εξοπλισμός : 1 x LED 56.18 W / 2784 lm

Εικόνα 69 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 3000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 70 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 3000 K.

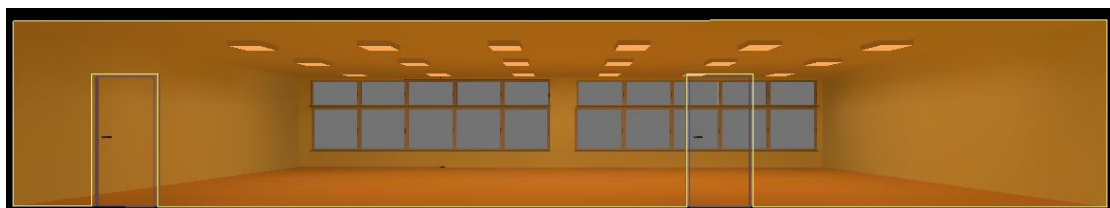
Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για CCT 4000 K, με την φωτεινή στάθμη ρυθμισμένη στο 100 %.



ΤύποςΑριθ.Κατασκ.

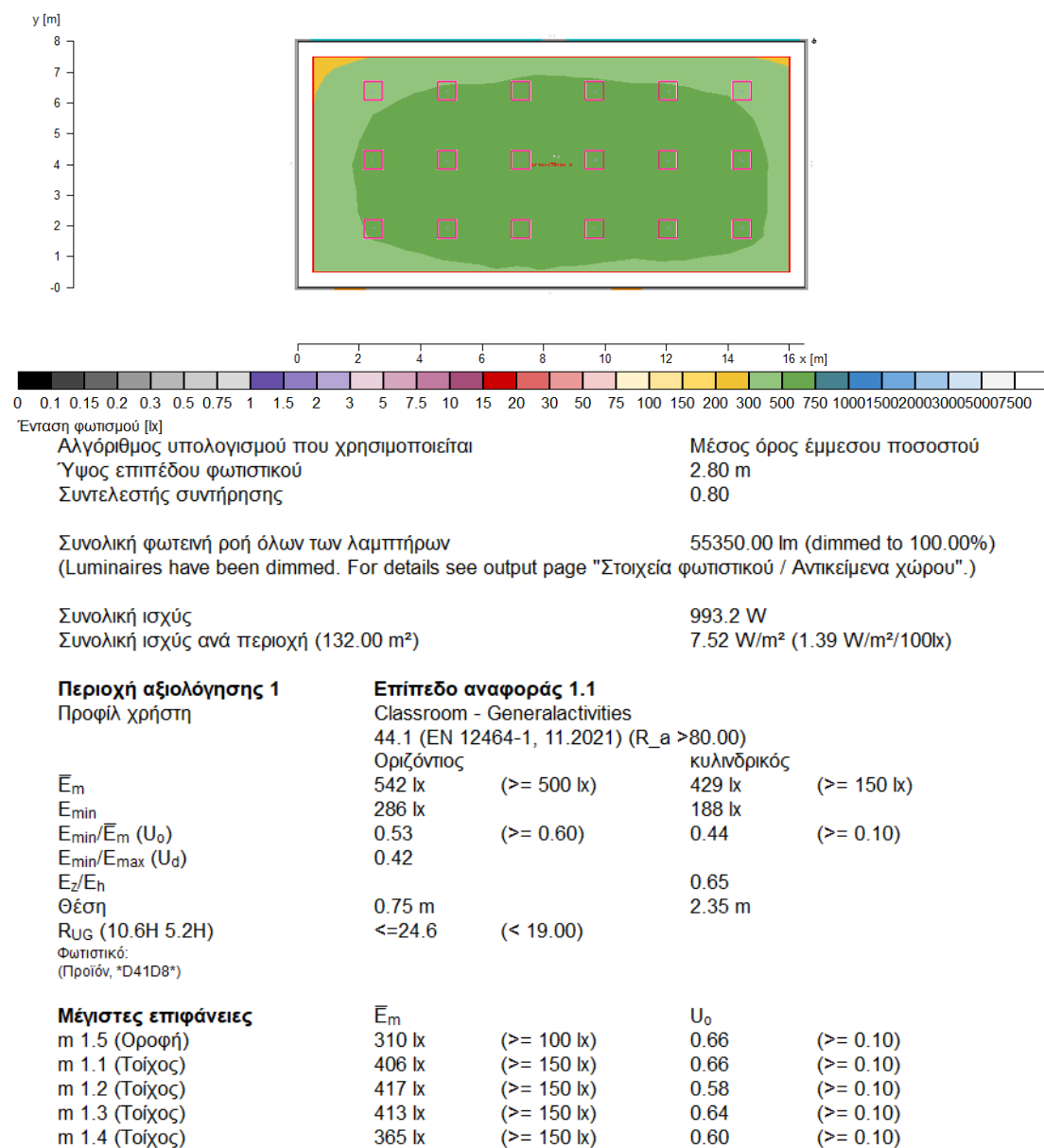
not a Relux Member
1 18 x
Αρ. Παραγγελίας : *742C9*
Όνομα φωτιστικού : Προϊόν
Εξοπλισμός : 1 x LED 54.67 W / 3049 lm

Εικόνα 71 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 4000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 72 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 4000 K.

Τα παρακάτω αποτελέσματα προκύπτουν όταν ορίζεται CCT 5000 K και ρυθμίζεται η φωτεινή στάθμη στο 100 %.



ΤύποςΑριθ.Κατασκ.

not a Relux Member

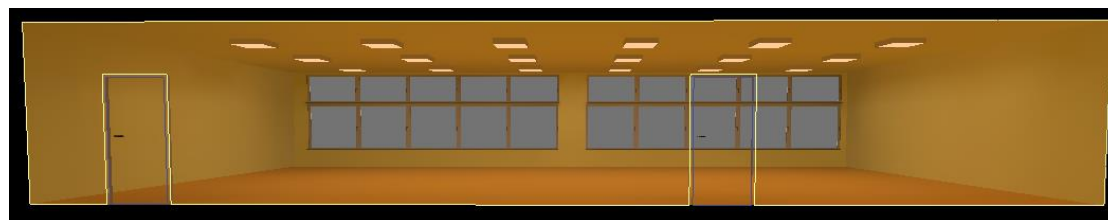
4 18 x

Αρ. Παραγγελίας : *D41D8*

Όνομα φωτιστικού : Προϊόν

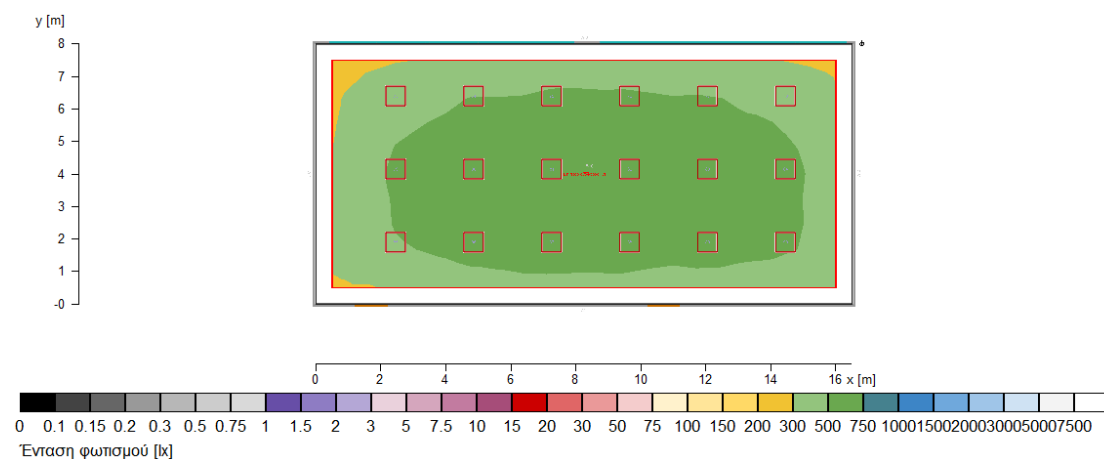
Εξοπλισμός : 1 x LED 55.18 W / 3075 lm

Εικόνα 73 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 5000 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 74 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 5000 K.

Τέλος, παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα που προκύπτουν όταν ορίζεται CCT στα 6500 K και ρυθμίζεται η φωτεινή στάθμη στο 100 %.



Γενικά

Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται
Ύψος επιπέδου φωτιστικού
Συντελεστής συντήρησης

Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού
2.80 m
0.80

Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων
Συνολική ισχύς
Συνολική ισχύς ανά περιοχή (132.00 m²)

53514.00 lm
1040.6 W
7.88 W/m² (1.55 W/m²/100lx)

Περιοχή αξιολόγησης 1

Προφίλ χρήστη

Επίπεδο αναφοράς 1.1

Classroom - Generalactivities

44.1 (EN 12464-1, 11.2021) (R_a >80.00)

Οριζόντιος

κυλινδρικός

E_m

510 lx

(>= 500 lx)

402 lx

(>= 150 lx)

E_{min}

267 lx

174 lx

E_{min}/E_m (U_o)

0.52

(>= 0.60)

0.43

(>= 0.10)

E_{min}/E_{max} (U_d)

0.42

E_z/E_h

0.64

Θέση

0.75 m

2.35 m

R_{UG} (10.6H 5.2H)

<=24.5

(< 19.00)

Φωτιστικό:

(Προϊόν, *D41D8*)

Μέγιστες επιφάνειες

m 1.5 (Οροφή)

282 lx

(>= 100 lx)

0.66

(>= 0.10)

m 1.1 (Τοίχος)

376 lx

(>= 150 lx)

0.66

(>= 0.10)

m 1.2 (Τοίχος)

388 lx

(>= 150 lx)

0.57

(>= 0.10)

m 1.3 (Τοίχος)

384 lx

(>= 150 lx)

0.64

(>= 0.10)

m 1.4 (Τοίχος)

339 lx

(>= 150 lx)

0.60

(>= 0.10)

ΤύποςΑριθ.Κατασκ.

not a Relux Member

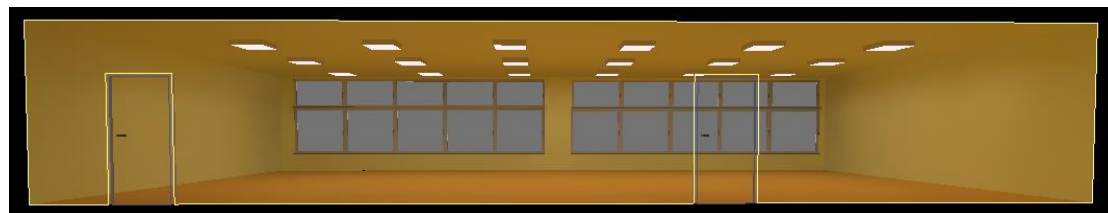
5 18 x

Αρ. Παραγγελίας : *D41D8*

Όνομα φωτιστικού : Προϊόν

Εξοπλισμός : 1 x LED 57.81 W / 2973 lm

Εικόνα 75 Αποτελέσματα έντασης φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας, θερμοκρασίας χρώματος ίσης με 6500 K, σε μορφή ψευδοχρωμάτων από το πρόγραμμα RELUX.



Εικόνα 76 Προσομοίωση φωτισμού της αίθουσας διδασκαλίας στο RELUX για θερμοκρασία χρώματος 6500 K.