



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

**«Ενεργειακή αναβάθμιση συστήματος τεχνητού φωτισμού
κτιρίου γραφείων»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος-Σπυρίδων Κουτσογιάννης

Καθηγητής : Χρήστος Α. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπων : Ευάγγελος-Νικόλαος Δ. Μαδιάς
Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2025



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

«Ενεργειακή αναβάθμιση συστήματος τεχνητού φωτισμού κτιρίου γραφείων»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος-Σπυρίδων Κουτσογιάννης

Καθηγητής : Χρήστος Α. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπων : Ευάγγελος-Νικόλαος Δ.Μαδιάς
Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18 Ιουλίου 2025.

.....
Χρήστος Α. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κονταργύρη Θ. Βασιλική
Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....
Γεώργιος-Σπυρίδων Κουτσογιάννης

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

Copyright © Γεώργιος-Σπυρίδων Κουτσογιάννης, 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 τον συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και τον επανασχεδιασμό του συστήματος φωτισμού ενός εμπορικού κτιρίου, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη δημιουργία συνθηκών οπτικής και ψυχολογικής άνεσης για τους χρήστες. Μέσα από επιτόπιες μετρήσεις, αποτύπωση των υπαρχόντων εγκαταστάσεων και χρήση του λογισμικού ReluxPro, προσομοιώθηκαν τόσο η υφιστάμενη όσο και η προτεινόμενη κατάσταση του συστήματος φωτισμού. Η νέα πρόταση βασίζεται στη χρήση ενεργειακά αποδοτικών φωτιστικών σωμάτων, σύγχρονων λαμπτήρων LED και ηλεκτρονικών ballast υψηλής συχνότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση των επιπέδων φωτισμού, ενώ παράλληλα τηρούνται οι απαιτήσεις των ευρωπαϊκών και εθνικών προτύπων. Η εργασία καταλήγει σε προτάσεις για περαιτέρω τεχνικές, λειτουργικές και οικονομικές βελτιώσεις, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη μακροχρόνια αποδοτικότητα των φωτιστικών εγκαταστάσεων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ενεργειακή αναβάθμιση, Φωτισμός LED, ReluxPro, Τεχνητός φωτισμός, Οπτική άνεση, Βιώσιμη σχεδίαση

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the study and redesign of the lighting system of a commercial building, aiming to improve its energy efficiency while ensuring optimal visual and psychological comfort for users. Through on-site measurements, documentation of the existing lighting infrastructure, and the use of ReluxPro lighting simulation software, both the current and proposed lighting configurations were modeled and analyzed. The proposed solution is based on the implementation of energy-efficient lighting fixtures, modern LED lamps, and high-frequency electronic ballasts. The results demonstrate significant energy savings and improved lighting performance, while fully complying with national and European standards. The study concludes with a set of technical, operational, and economic recommendations for future improvements, contributing to sustainable development and long-term efficiency of lighting installations.

KEY WORDS

Energy upgrade, LED lighting, Relux Pro, Artificial lighting, Visual comfort, Sustainable design

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Χρήστο Χριστοδούλου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ολοκληρώσω αυτόν τον κύκλο σπουδών με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δε δίστασε να με εμπιστευτεί για την υλοποίηση μιας σύνθετης φωτοτεχνικής μελέτης και να με καθοδηγήσει κατάλληλα.

Ωστόσο χωρίς την άμεση και έγκυρη καθοδήγηση του Υπ. Διδάκτωρα ΕΜΠ κ. Ευάγγελου-Νικόλαου Μανδιά δεν θα ήμουν σε θέση να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Γι' αυτόν το λόγο τον ευχαριστώ θερμά και του εύχομαι τα καλύτερα στη ζωή του και στην ακαδημαϊκή του πορεία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που όλα αυτά τα χρόνια στέκεται δίπλα μου στο μονοπάτι των σπουδών μου σε κάθε βαθμίδα με κάθε τρόπο.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	5
ABSTRACT.....	6
KEY WORDS	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
1. Εισαγωγή.....	15
1.1. Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής.....	15
1.2. Σημασία της αναβάθμισης φωτισμού σε σύγχρονα κτίρια-Ιστορική Εξέλιξη του Τεχνητού Φωτισμού	16
1.3. Δομή της εργασίας	19
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	21
2.1 Λαμπτήρες φθορισμού	21
2.1.1 Δομή και Λειτουργία	22
2.1.2 Εκκινητής και ballast	22
2.1.3 Βασικότερα είδη λαμπτήρων φθορισμού	23
2.1.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	24
2.2. Τεχνολογία LED: Ιδιότητες και πλεονεκτήματα.....	24
2.2.1 Βασική Αρχή Λειτουργίας LED.....	24
2.2.2 Οδηγοί Φωτιστικών LED	25
2.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	25
2.3. Σύγκριση LED με παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού	27
2.3.1 Ενεργειακή Απόδοση.....	28
2.3.2 Διάρκεια Ζωής.....	28
2.3.3 Χρωματική Απόδοση και Προσαρμοστικότητα	28
2.3.4 Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα.....	29
2.3.5 Κόστος και Οικονομική Αποδοτικότητα.....	29
2.3.6 Αξιοπιστία και Αντοχή	29

2.3.7 Συμπέρασμα.....	30
2.4. Ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	30
2.5 Ευρωπαϊκά Πρότυπα και Κ.Εν.Α.Κ.	32
2.5.1 Εισαγωγή	32
2.5.2 Κ.Εν.Α.Κ	33
2.5.3 Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.....	33
3. Ανασκόπηση Λογισμικού Relux.....	35
3.1. Περιγραφή του προγράμματος Relux	35
3.2. Δυνατότητες και χαρακτηριστικά του λογισμικού.....	35
3.3. Εφαρμογές του Relux σε μελέτες φωτισμού.....	36
4. Μελέτη Περίπτωσης: Αναβάθμιση Κτιριακού Φωτισμού.....	38
4.1. Περιγραφή κτιρίου και απαιτήσεων φωτισμού	39
4.2. Υφιστάμενη Κατάσταση Φωτισμού.....	42
4.2.1 Γραφεία.....	42
4.2.2 Διάδρομοι	45
4.2.3 Συνεδριακοί Χώροι.....	46
4.2.4 Τουαλέτες και Κλιμακοστάσιο	48
4.2.5 Προσομοίωση της παρούσας κατάστασης με το ReluxPro.....	49
4.3. Προτεινόμενη Κατάσταση Φωτισμού	55
4.4. Προσομοίωση φωτισμού στο Relux.....	57
4.4.1 Δεδομένα Χώρου	57
4.4.2 Στοιχεία Χώρων.....	58
4.4.3 Στοιχεία υπολογισμού για την προσομοίωση του τεχνητού φωτισμού.....	59
4.4.4 Σχεδιασμός του νέου συστήματος φωτισμού	60
4.4.5 Προδιαγραφές φωτιστικών σωμάτων για την προσομοίωση της πρότασης ενεργειακής αναβάθμισης	61
4.5. Αποτελέσματα και αξιολόγηση.....	75
4.6 Οδηγίες για Συντήρηση και Αναβάθμιση του Συστήματος Φωτισμού.....	78

4.6.1 Τακτική και Προληπτική Συντήρηση	78
4.6.2 Τήρηση Ημερολογίου Συντήρησης	78
4.6.3 Στρατηγική Σταδιακής Αναβάθμισης	79
4.6.4 Αντιμετώπιση Συχνών Προβλημάτων	79
4.6.5 Προτάσεις για Εκπαίδευση Χρηστών και Τεχνικού Προσωπικού	79
4.6.6 Συμπεράσματα	80
5. Συμπεράσματα και Προτάσεις	81
5.1 Κύρια ευρήματα της μελέτης	81
5.2 Προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις	84
5.2.1 Τεχνικές Βελτιώσεις	84
5.2.2 Λειτουργικές Βελτιώσεις	84
5.2.3 Ενεργειακές Βελτιώσεις	85
5.2.4 Οικονομικές Βελτιώσεις	85
5.2.5 Συνολική Στρατηγική Βελτιστοποίησης	86
5.3 Εναλλακτικά Σενάρια και Προτάσεις Φωτισμού	86
5.3.1 Σενάριο Α: Χρήση αισθητήρων παρουσίας και φυσικού φωτισμού (daylight & occupancy sensors)	86
5.3.2 Σενάριο Β: Ζωνικός έλεγχος φωτισμού (zonal control)	87
5.3.3 Σενάριο Γ: Dimmable LED φωτιστικά με έξυπνη διαχείριση	87
5.3.4 Σενάριο Δ: Circadian lighting – βιορυθμικά σενάρια φωτισμού	88
5.3.5 Σενάριο Ε: Συνδυασμός φυσικού και τεχνητού φωτισμού – daylight harvesting	88
5.3.6 Σενάριο ΣΤ: Υλοποίηση μέσω BMS (Building Management System)	88
5.3.7 Συνολική Αξιολόγηση και Επιλογή Σεναρίων	89
Παράρτημα Α: Αποτελέσματα Relux Pro για την πρόταση ενεργειακής αναβάθμισης	91
Παράρτημα Β: Τεχνικές Προδιαγραφές Φωτιστικών Σωμάτων LED που χρησιμοποιήθηκαν από τα site των κατασκευαστών	100
Παράρτημα Γ: Υπολογισμοί στο Relux	105
Βιβλιογραφία	132

ΠΙΝΑΚΕΣ:

Πίνακας 1: Οι ονομασίες που δόθηκαν στους επιμέρους χώρους-δωμάτια του ορόφου που μελετήσαμε	42
Πίνακας 2: Καταγραφή δεδομένων φωτισμού στα γραφεία των ορόφων	43
Πίνακας 3: Ένταση Φωτισμού στις μελετούμενες επιφάνειες.....	44
Πίνακας 4: Δεδομένα Φωτισμού για τους Ορόφους.....	45
Πίνακας 5: Ένταση Φωτισμού στους Διαδρόμους	46
Πίνακας 6: Δεδομένα Φωτισμού για τους Συνεδριακούς Χώρους	47
Πίνακας 7: Ένταση Φωτισμού στους Συνεδριακούς Χώρους	47
Πίνακας 8: Δεδομένα Φωτισμού στις Τουαλέτες	48
Πίνακας 9: Ένταση Φωτισμού στην Τουαλέτα και στο Κλιμακοστάσιο	49
Πίνακας 10: Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς Παρούσας Κατάστασης.....	53
Πίνακας 11: Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοίωσης και πραγματικών μετρήσεων χωρίς φυσικό φωτισμό.....	53
Πίνακας 12: Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοίωσης και πραγματικών μετρήσεων με φυσικό φωτισμό.....	54
Πίνακας 13: Ελάχιστη στάθμη γενικού φωτισμού E_m , βαθμός συνδυασμένης θάμβωσης UGR_L και ομοιομορφία της έντασης φωτισμού U_o ανά χρήση χώρου, με βάση το πρότυπο EN 12464.1. Πηγές: ReluxEnergy	56
Πίνακας 14: Δεδομένα εισαγωγής στο ReluxPro για τις διαφανείς επιφάνειες των χώρων του ορόφου	59
Πίνακας 15: Δεδομένα εισαγωγής στο Relux Pro για τον υπολογισμό της μελέτης τεχνητού φωτισμού.....	60
Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός Πίνακας με τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιήθηκαν	61
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Φωτοτεχνικής Μελέτης στο Relux	66
Πίνακας 18: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα της Πρότασής μας ανά κατηγορία χώρου.....	67
Πίνακας 19: Συγκριτική απεικόνιση όλων των βασικών δεικτών μεταξύ της παρούσας και της προτεινόμενης κατάστασης του συστήματος φωτισμού.....	76
Πίνακας 20: Αθροιστικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος φωτισμού [€] και αθροιστική εξοικονόμηση [€] μετά την επίτευξη της απόσβεσης.	77
Πίνακας 21: Συνοπτική παρουσίαση των βασικών μεγεθών της πρότασής μας	81
Πίνακας 22: Βασικά Χαρακτηριστικά των Σεναρίων που προτάθηκαν μαζί με μία ενδεικτική καταλληλότητα ανά χώρο	89
Πίνακας 23: Συγκεντρωτικός πίνακας προδιαγραφών φωτιστικών σωμάτων από τα τεχνικά φυλλάδια του κατασκευαστή	100

ΕΙΚΟΝΕΣ:

Εικόνα 1: Ψηφιακός Μετρητής Αποστάσεων με λέιζερ Bosch PLR50	39
Εικόνα 2: Κάτοψη ορόφου στην οποία θα γίνει η μελέτη φωτισμού	40
Εικόνα 3: Ψηφιακό λουξόμετρο PCE 174	41
Εικόνα 4: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Τεχνητού Φωτισμού-Διάδρομος Δ4-1	50
Εικόνα 5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης τεχνητού και Φυσικού Φωτισμού-Διάδρομος Δ4-1	51
Εικόνα 6: Αποτελέσματα Προσομοίωσης τεχνητού και φυσικού φωτισμού-Γραφείο Ε4-6.....	52
Εικόνα 7: Η νέα διάταξη των φωτιστικών βασισμένη στην προσομοίωσή μας στο Relux.....	57
Εικόνα 8: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων χώρου για το γραφείο Ε4-9	58
Εικόνα 9: Τρισδιάστατη απεικόνιση του γραφείου Ε4-10, στην οποία φαίνονται τα στοιχεία που έχουν τοποθετηθεί στο χώρο (πόρτα, γραφεία και παράθυρα).....	59
Εικόνα 10: Τα φωτιστικά LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19 και LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19 από το site της εταιρείας OPPLE.....	62
Εικόνα 11: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19 / LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19.....	63
Εικόνα 12: Το φωτιστικό LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3 από το site της εταιρείας OPPLE	63
Εικόνα 13: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3	64
Εικόνα 14: Το φωτιστικό LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840 από το site της εταιρείας OPPLE.....	64
Εικόνα 15: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840.....	65
Εικόνα 16: Τρισδιάστατη κατανομή της λαμπρότητας στο γραφείο Ε4-7	71
Εικόνα 17: Τρισδιάστατη κατανομή λαμπρότητας στο χώρο Η4-7	73
Εικόνα 18: Τρισδιάστατη κατανομή λαμπρότητας στο χώρο Η4-8 Α-Β	74
Εικόνα 19: Τρισδιάστατη κατανομή λαμπρότητας στην τουαλέτα Τ4-1	75
Εικόνα 20: Ραβδόγραμμα που δείχνει την αισθητή βελτίωση στην κατανάλωση ενέργειας που θα επιφέρει η πρότασή μας για ενεργειακή αναβάθμιση με LED λαμπτήρες	82
Εικόνα 21: Συγκριτικό ραβδόγραμμα Πρωτογενούς ενέργειας-Εκπομπών CO ₂ και ετήσιου κόστους	83
Εικόνα 22: Συγκριτικό ραβδόγραμμα Κατανάλωσης ενέργειας ανά χώρο	83
Εικόνα 23: Επισκόπηση Ορόφου.....	91
Εικόνα 24: Κατάλογος Εξαρτημάτων.....	92
Εικόνα 25: Ασανσέρ 1	92
Εικόνα 26: Ασανσέρ 2	92

Εικόνα 27: Δωμάτιο 1	93
Εικόνα 28: Δωμάτιο 2	93
Εικόνα 29: Δωμάτιο Δ4-1	93
Εικόνα 30: Δωμάτιο Δ4-2,4	93
Εικόνα 31: Δωμάτιο Δ4-3, Κ4-1	94
Εικόνα 32: Δωμάτιο Ε4-1	94
Εικόνα 33: Δωμάτιο Ε4-10	94
Εικόνα 34: Δωμάτιο Ε4-11	94
Εικόνα 35: Δωμάτιο Ε4-2	95
Εικόνα 36: Δωμάτιο Ε4-3	95
Εικόνα 37: Δωμάτιο Ε4-4	95
Εικόνα 38: Δωμάτιο Ε4-5	95
Εικόνα 39: Δωμάτιο Ε4-6	96
Εικόνα 40: Δωμάτιο Ε4-7	96
Εικόνα 41: Δωμάτιο Ε4-8	96
Εικόνα 42: Δωμάτιο Ε4-9	96
Εικόνα 43: Δωμάτιο Η4-1	97
Εικόνα 44: Δωμάτιο Η4-2	97
Εικόνα 45: Δωμάτιο Η4-3	97
Εικόνα 46: Δωμάτιο Η4-4	97
Εικόνα 47: Δωμάτιο Η4-5	98
Εικόνα 48: Δωμάτιο Η4-6	98
Εικόνα 49: Δωμάτιο Η4-7	98
Εικόνα 50: Δωμάτιο Η4-8Α	98
Εικόνα 51: Δωμάτιο Η4-8Β	99
Εικόνα 52: Δωμάτιο Τ4-1	99
Εικόνα 53: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19	101
Εικόνα 54: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19	102
Εικόνα 55: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LED Wall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3	103
Εικόνα 56: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840	104
Εικόνα 57: Αποτελέσματα Relux Ασανσέρ 1	105
Εικόνα 58: Αποτελέσματα Relux Ασανσέρ 2	106
Εικόνα 59: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο 1	107

Εικόνα 60: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο 2	108
Εικόνα 61: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Δ4-1.....	109
Εικόνα 62: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Δ4-2, 4.....	109
Εικόνα 63: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Δ4-3, Κ4-1	110
Εικόνα 64: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-1.....	111
Εικόνα 65: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-10.....	112
Εικόνα 66: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-11.....	113
Εικόνα 67: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-2.....	114
Εικόνα 68: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-3.....	115
Εικόνα 69: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-4.....	116
Εικόνα 70: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-5.....	117
Εικόνα 71: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-6.....	118
Εικόνα 72: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-7.....	119
Εικόνα 73: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-8.....	120
Εικόνα 74: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-9.....	121
Εικόνα 75: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-1	122
Εικόνα 76: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-2	123
Εικόνα 77: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-3	124
Εικόνα 78: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-4	125
Εικόνα 79: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-5	126
Εικόνα 80: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-6	127
Εικόνα 81: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-7	128
Εικόνα 82: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-8 Α	129
Εικόνα 83: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-8 Β.....	130
Εικόνα 84: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Τ4-1.....	131

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως βασικό σκοπό τη μελέτη, αξιολόγηση και προσομοίωση της ενεργειακής αναβάθμισης του συστήματος τεχνητού φωτισμού σε υφιστάμενο εμπορικό κτίριο, με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού ReluxPro. Η εργασία αποσκοπεί στην πρόταση μιας αποδοτικής και τεχνικά τεκμηριωμένης λύσης, η οποία θα επιτυγχάνει υψηλά επίπεδα φωτισμού και οπτικής άνεσης για τους χρήστες, με ταυτόχρονη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του λειτουργικού κόστους.

Η μελέτη επικεντρώνεται στην πλήρη καταγραφή και αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης φωτισμού στο κτίριο. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες μετρήσεις της φωτιστικής έντασης στους επιμέρους χώρους, ενώ αποτυπώθηκαν γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως η θέση και ο αριθμός των φωτιστικών, οι τύποι των λαμπτήρων, η εγκατεστημένη ισχύς και η διάταξη των κυκλωμάτων. Παράλληλα, εξετάστηκε η συμμόρφωση της υπάρχουσας εγκατάστασης με τα ισχύοντα πρότυπα φωτισμού και ενεργειακής απόδοσης. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό ReluxPro, όπου δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο των χώρων και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της απόδοσης της τρέχουσας κατάστασης.

Με βάση τα αποτελέσματα των αρχικών προσομοιώσεων, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια πρόταση αναβάθμισης του φωτιστικού συστήματος, με τη χρήση φωτιστικών σωμάτων υψηλής ενεργειακής απόδοσης, λαμπτήρων T5 ή LED, και ηλεκτρονικών ballast υψηλής συχνότητας. Η νέα πρόταση αναπτύχθηκε με στόχο τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του KENAK και του προτύπου EN 12464-1, διασφαλίζοντας κατάλληλα επίπεδα φωτισμού και ομοιομορφίας, περιορισμό της θάμβωσης και βελτίωση της ποιότητας του φωτιστικού περιβάλλοντος. Η νέα εγκατάσταση προσομοιώθηκε εκ νέου στο ReluxPro, και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά της υφιστάμενης κατάστασης, ως προς την ένταση και την κατανομή του φωτισμού, την ενεργειακή κατανάλωση και την εγκατεστημένη ισχύ [1].

Τελικός στόχος της εργασίας είναι η εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης λύσης, τόσο από τεχνική όσο και από λειτουργική και ενεργειακή σκοπιά, καθώς και η διατύπωση προτάσεων για μελλοντικές βελτιώσεις. Μέσα από αυτή τη μελέτη, επιδιώκεται να αναδειχθεί η σημασία του ορθολογικού σχεδιασμού φωτιστικών εγκαταστάσεων, όταν αυτός βασίζεται σε επιστημονική μεθοδολογία και σύγχρονα εργαλεία προσομοίωσης. Η εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει μια πλήρη και αξιόπιστη εφαρμογή του

ενεργειακού σχεδιασμού φωτισμού, προσανατολισμένου στη βιωσιμότητα και την ποιοτική αναβάθμιση του δομημένου περιβάλλοντος.

1.2. Σημασία της αναβάθμισης φωτισμού σε σύγχρονα κτίρια-Ιστορική Εξέλιξη του Τεχνητού Φωτισμού

Ο φωτισμός αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της ανθρώπινης δραστηριότητας, με την ανάγκη για τεχνητό φωτισμό να εμφανίζεται από τα πρώτα στάδια του πολιτισμού. Η εξέλιξη των μέσων φωτισμού ακολουθεί παράλληλα την τεχνολογική πρόοδο της ανθρωπότητας, αντανakλώντας την εξέλιξη της κοινωνίας, της βιομηχανίας και της επιστήμης.

Η πρώτη μορφή τεχνητού φωτισμού ήταν η απλή χρήση της φωτιάς, με δάδες και φλόγες από ξύλο ή ζωικά λίπη, ήδη από την προϊστορική εποχή. Οι αρχαίοι πολιτισμοί χρησιμοποίησαν λυχνάρια που λειτουργούσαν με λάδι ή λίπος, όπως αποδεικνύεται από τα ευρήματα στην Αίγυπτο, την Ελλάδα και τη Ρώμη [3]. Τα λυχνάρια λαδιού, τα οποία διατηρήθηκαν για αιώνες, αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα πρώιμης τεχνητής φωτεινής πηγής, που παρείχε φως για βασικές ανάγκες οικιακού και θρησκευτικού χαρακτήρα.

Κατά τον Μεσαίωνα, ο τεχνητός φωτισμός βασιζόταν κυρίως σε κεριά, φτιαγμένα από κεριά μέλισσας ή ζωικό λίπος. Παρόλο που ήταν ακριβά και περιορισμένης απόδοσης, τα κεριά χρησιμοποιούνταν εκτενώς σε κατοικίες, εκκλησίες και δημόσια κτίρια. Ο 17ος και 18ος αιώνας έφεραν την ευρεία χρήση των λυχνιών με λάδι και αργότερα των λάμπας αερίου, με το φωταέριο να αποτελεί την πρώτη μορφή αστικού φωτισμού σε μεγάλες πόλεις [19]. Το Λονδίνο και το Παρίσι ήταν από τις πρώτες πόλεις που εγκατέστησαν δίκτυα φωταερίου για φωτισμό δρόμων και δημοσίων κτιρίων.

Η βιομηχανική επανάσταση σηματοδότησε μια ριζική αλλαγή στο πεδίο του τεχνητού φωτισμού, με την εφεύρεση και την εξέλιξη του ηλεκτρικού φωτός. Το 1879, ο Thomas Edison και σχεδόν ταυτόχρονα ο Joseph Swan, ανέπτυξαν τον πρώτο εμπορικά βιώσιμο λαμπτήρα πυρακτώσεως [15]. Η χρήση του ηλεκτρισμού στον φωτισμό αποτέλεσε σημείο καμπής στην παγκόσμια ιστορία, οδηγώντας σε νέα πρότυπα διαβίωσης, βιομηχανικής παραγωγής και αστικού σχεδιασμού.

Κατά τον 20ό αιώνα, ο φωτισμός εξελίχθηκε ταχύτατα. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως αντικαταστάθηκαν από πιο αποδοτικές τεχνολογίες, όπως οι λαμπτήρες φθορισμού (εμφανίζονται από τη δεκαετία του 1930) και αργότερα οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου και νατρίου, που προσέφεραν αυξημένη απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής [5]. Αυτές οι τεχνολογίες κυριάρχησαν για πολλές δεκαετίες στον φωτισμό δημοσίων και βιομηχανικών χώρων.

Η πραγματική επανάσταση στον φωτισμό ήρθε τις τελευταίες δεκαετίες με την έλευση της τεχνολογίας LED (Light Emitting Diode). Οι πρώτοι LED αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1960, αλλά η απόδοσή τους ήταν αρχικά περιορισμένη και κατάλληλη μόνο για ενδεικτικές ενδείξεις. Η δεκαετία του 1990 και ιδιαίτερα του 2000 έφερε ραγδαίες εξελίξεις, καθιστώντας τους LED μια τεχνολογικά ώριμη και ενεργειακά αποδοτική λύση για τον γενικό φωτισμό. Οι λαμπτήρες LED προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά την ενεργειακή απόδοση, τη διάρκεια ζωής, την προσαρμοστικότητα και την ποιότητα φωτός, συγκριτικά με τις παλαιότερες τεχνολογίες [17].

Σήμερα, η πρόοδος συνεχίζεται με την ενσωμάτωση ευφών συστημάτων φωτισμού, βασισμένων σε αισθητήρες, αυτοματισμούς και τεχνητή νοημοσύνη. Ο τεχνητός φωτισμός πλέον δεν περιορίζεται στην παροχή φωτός, αλλά διαδραματίζει ρόλο στον σχεδιασμό βιώσιμων κτιρίων, στην ευεξία των χρηστών, στην παραγωγικότητα και στην αισθητική του δομημένου περιβάλλοντος [1]. Η μελλοντική κατεύθυνση εστιάζει σε τεχνολογίες όπως tunable white lighting, biologically adaptive lighting, και integrated daylight harvesting, που προσαρμόζονται δυναμικά στις ανθρώπινες ανάγκες και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η ιστορική πορεία του τεχνητού φωτισμού, από τις φλόγες της αρχαιότητας μέχρι τα έξυπνα LED του 21ου αιώνα, αντικατοπτρίζει όχι μόνο την τεχνολογική πρόοδο, αλλά και τη διαρκή ανθρώπινη αναζήτηση για βελτιωμένες συνθήκες διαβίωσης και εργασίας.

Η σημασία της αναβάθμισης φωτισμού σε σύγχρονα κτίρια είναι πολυδιάστατη, επηρεάζοντας την ενεργειακή απόδοση, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την ευεξία των χρηστών και τη λειτουργικότητα των χώρων. Η ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας φωτισμού, κυρίως με την ανάπτυξη των φωτιστικών LED (Light Emitting Diodes), έχει αναδείξει την ανάγκη αναβάθμισης των παλαιών συστημάτων φωτισμού, τόσο σε κατοικίες όσο και σε επαγγελματικούς χώρους. Η συγκεκριμένη ενότητα εξετάζει τα βασικά πλεονεκτήματα της αναβάθμισης φωτισμού και τη σημασία της σε σύγχρονα κτίρια.

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη της αναβάθμισης φωτισμού είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τα παραδοσιακά συστήματα φωτισμού, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και οι φθορισμού, καταναλώνουν σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με τις σύγχρονες τεχνολογίες LED (Rea & Bullough, 2001). Τα φωτιστικά LED είναι γνωστά για την υψηλή τους απόδοση, μετατρέποντας την ενέργεια σχεδόν εξ ολοκλήρου σε φως, με ελάχιστη απώλεια ως θερμότητα [2]. Η αναβάθμιση από συμβατικά συστήματα φωτισμού σε LED μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας έως και 75%, ενώ η διάρκεια ζωής των LED είναι πολλαπλάσια, γεγονός που μειώνει το κόστος συντήρησης [6].

Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της Οδηγίας 2012/27/EU για την Ενεργειακή Απόδοση, προωθεί τη χρήση αποδοτικών τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων LED, σε όλα τα νέα και υφιστάμενα κτίρια [12]. Αυτό αναδεικνύει τη σημασία της αναβάθμισης φωτισμού για τη συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα ενεργειακής απόδοσης.

Η αναβάθμιση φωτισμού σε σύγχρονα κτίρια έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα όσον αφορά τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα. Τα φωτιστικά LED καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια και, κατ' επέκταση, στη μείωση των εκπομπών CO₂ από σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Muneer & Kambezidis, 2004). Επιπλέον, τα φωτιστικά LED δεν περιέχουν επιβλαβείς ουσίες, όπως ο υδράργυρος που βρίσκεται στους λαμπτήρες φθορισμού, μειώνοντας τους κινδύνους για το περιβάλλον κατά τη διάρκεια της απόρριψής τους [9].

Η μείωση της φωτορύπανσης είναι επίσης ένα σημαντικό όφελος που σχετίζεται με την αναβάθμιση του φωτισμού. Τα φωτιστικά LED επιτρέπουν τον ακριβέστερο έλεγχο της κατεύθυνσης του φωτός, περιορίζοντας την περιττή διασπορά του φωτός και μειώνοντας τις αρνητικές επιπτώσεις της φωτορύπανσης στη βιοποικιλότητα και την ανθρώπινη υγεία [10].

Ο φωτισμός σε κτίρια επηρεάζει άμεσα τη φυσιολογία και την ψυχολογία των ανθρώπων. Η ποιότητα και η θερμοκρασία χρώματος του φωτός μπορούν να επηρεάσουν τη συγκέντρωση, την παραγωγικότητα και τη γενική ευεξία [1]. Η αναβάθμιση σε LED προσφέρει τη δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας χρώματος και της έντασης φωτός, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει πιο ευχάριστο περιβάλλον και να υποστηρίξει τον κirkάδιο ρυθμό των χρηστών.

Έρευνες δείχνουν ότι οι κατάλληλα σχεδιασμένοι φωτισμοί, όπως αυτοί που παρέχονται από τεχνολογίες LED, μπορούν να μειώσουν την κόπωση και να βελτιώσουν την αίσθηση άνεσης στους χώρους εργασίας και κατοικίας [3]. Επιπλέον, η δυνατότητα δημιουργίας δυναμικών σκηνών φωτισμού μπορεί να ενισχύσει την αισθητική των χώρων, καθιστώντας τους πιο φιλόξενους και λειτουργικούς.

Η χρήση σύγχρονων συστημάτων φωτισμού LED επιτρέπει την ενσωμάτωση έξυπνων λύσεων, όπως οι αυτόματοι έλεγχοι και η δυνατότητα συνδεσιμότητας με συστήματα κτιριακού αυτοματισμού. Τα συστήματα αυτά, που συχνά συνδυάζονται με λογισμικό προσομοίωσης όπως το Relux, επιτρέπουν την αποδοτικότερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων και τη βελτιστοποίηση του φωτισμού με βάση τις ανάγκες του χρήστη [8].

Η τεχνολογία IoT (Internet of Things) υποστηρίζει την ενσωμάτωση αισθητήρων και συστημάτων παρακολούθησης, που επιτρέπουν τη συνεχή ανάλυση και βελτίωση των συνθηκών

φωτισμού. Με αυτόν τον τρόπο, η αναβάθμιση του φωτισμού προσφέρει μακροπρόθεσμο όφελος τόσο οικονομικά όσο και λειτουργικά [7].

Η επένδυση στην αναβάθμιση του φωτισμού συχνά έχει σημαντική απόδοση μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης του κόστους συντήρησης. Παρόλο που το αρχικό κόστος εγκατάστασης των LED μπορεί να είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τις παραδοσιακές λύσεις, η αυξημένη διάρκεια ζωής και η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας εξισορροπούν αυτό το κόστος μέσα σε λίγα χρόνια [15]. Επιπλέον, η ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων ελέγχου μπορεί να μειώσει περαιτέρω τη χρήση ενέργειας, επιφέροντας μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση [6].

Η αναβάθμιση του φωτισμού σε σύγχρονα κτίρια είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας, περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και βελτίωσης της ποιότητας ζωής. Η μετάβαση σε τεχνολογίες LED, σε συνδυασμό με έξυπνες λύσεις και λογισμικά προσομοίωσης, προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα τόσο για τους χρήστες όσο και για το περιβάλλον. Με την υποστήριξη διεθνών προτύπων και νομοθεσιών, η αναβάθμιση φωτισμού καθίσταται απαραίτητη για τη δημιουργία πιο βιώσιμων και λειτουργικών κτιρίων.

1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε βασικά κεφάλαια και ένα παράρτημα, τα οποία έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να παρουσιάσουν ολοκληρωμένα τη θεωρητική τεκμηρίωση, τη μεθοδολογική προσέγγιση και τα αποτελέσματα της ενεργειακής αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού σε υφιστάμενο κτίριο, με χρήση του λογισμικού ReluxPro. Η δομή της εργασίας αναπτύσσεται ως εξής:

- **Στο Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή)** παρουσιάζονται ο σκοπός και οι στόχοι της εργασίας, η σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης του φωτισμού σε σύγχρονα κτίρια, καθώς και η γενική δομή της μελέτης.
- **Το Κεφάλαιο 2 (Θεωρητικό Υπόβαθρο)** εστιάζει στις βασικές αρχές του φωτισμού και της τεχνολογίας LED. Παρουσιάζονται τα κύρια φωτομετρικά μεγέθη, τα πλεονεκτήματα των LED σε σχέση με παραδοσιακές τεχνολογίες, καθώς και η επίδραση του φωτισμού στην ενεργειακή κατανάλωση και το περιβάλλον.
- **Το Κεφάλαιο 3 (Το Λογισμικό ReluxPro και η Μεθοδολογία της Μελέτης)** περιγράφει το λογισμικό ReluxPro, τις δυνατότητές του και τη χρήση του για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση φωτιστικών εγκαταστάσεων. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύεται και η μεθοδολογική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη συλλογή δεδομένων, την αποτύπωση

της υφιστάμενης κατάστασης, τις μετρήσεις, τις παραδοχές και τις παραμέτρους των προσομοιώσεων.

- **Στο Κεφάλαιο 4 (Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα)** παρουσιάζεται αναλυτικά η υφιστάμενη κατάσταση του συστήματος φωτισμού στο κτίριο Δ, η οποία προσομοιώνεται στο λογισμικό ReluxPro. Ακολουθεί η περιγραφή της προτεινόμενης λύσης ενεργειακής αναβάθμισης, καθώς και τα αποτελέσματα της αντίστοιχης προσομοίωσης. Περιλαμβάνεται σύγκριση μεταξύ παρούσας και προτεινόμενης κατάστασης, με αξιολόγηση των επιπέδων φωτισμού, της ομοιομορφίας και της εγκατεστημένης ισχύος.
- **Το Κεφάλαιο 5 (Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντικές Βελτιώσεις)** περιλαμβάνει τη συνοπτική αποτίμηση της μελέτης, την ανάδειξη των ενεργειακών και λειτουργικών οφελών της προτεινόμενης λύσης, καθώς και τεκμηριωμένες προτάσεις για περαιτέρω τεχνικές, λειτουργικές και οικονομικές βελτιώσεις του συστήματος φωτισμού στο μέλλον.
- **Στο Παράρτημα** παρατίθενται αναλυτικά δεδομένα των προσομοιώσεων, τεχνικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων φωτιστικών και λαμπτήρων, εικόνες από το περιβάλλον του λογισμικού ReluxPro καθώς και συμπληρωματικοί υπολογισμοί που υποστηρίζουν τα συμπεράσματα της εργασίας.

Η παραπάνω διάρθρωση επιτρέπει τη σφαιρική κατανόηση του αντικειμένου μελέτης, συνδυάζοντας την επιστημονική θεωρία με την πρακτική εφαρμογή, και καταλήγει σε προτάσεις που μπορούν να συμβάλουν στη συνεχή αναβάθμιση των συστημάτων φωτισμού σε κτιριακές εγκαταστάσεις.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το φως είναι ορατή ακτινοβολία που γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι και αποτελεί μόνο ένα μικρό τμήμα του συνολικού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία περιλαμβάνει, εκτός από το ορατό φως, τις ακτίνες γ, τις ακτίνες Χ, τις υπέρυθρες, τις υπεριώδεις και τα ραδιοκύματα [48].

Η φασματική περιοχή του φωτός εκτείνεται μεταξύ 380-780nm(=10⁻¹⁰ m). Μέσα α' αυτήν την περιοχή των μηκών κύματος μπορούν να διακριθούν τα χρώματα του φάσματος. Το φως είναι μια μορφή ενέργειας. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει δυαδική φύση, κυματική και σωματιδιακή. Δηλαδή, το φως διαδίδεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αλλά και με τη μορφή ποσότητας ενέργειας, η οποία είναι ισοδύναμη με πολλαπλάσια σωματιδίου και διαδίδεται με την ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και καλείται φωτόνιο. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό και με προσέγγιση στον αέρα είναι $C \approx 300.000$ km/s. Το χρώμα του φωτός που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή σ' ένα χώρο έχει επίδραση στη γενικότερη εντύπωση που μας δίνει ο χώρος αυτός. Για παράδειγμα, ένας λαμπτήρας πυράκτωσης δημιουργεί συνήθως μια «θερμή» εντύπωση, λόγω του πλούσιου σε ερυθρές ακτινοβολίες φωτός του λαμπτήρα. Αντίθετα, ένας λαμπτήρας ατμών υδραργύρου μη διορθωμένου φάσματος δίνει μια «ψυχρή εντύπωση», λόγω του μεγάλου ποσοστού κυανής και κίτρινης ακτινοβολίας που περιέχει [1].

Τα τελευταία χρόνια, στα κτήρια του τριτογενούς τομέα – και ειδικότερα στα κτήρια γραφείων – παρατηρείται η επικράτηση δύο βασικών τύπων φωτιστικών σωμάτων στα συστήματα τεχνητού φωτισμού. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει φωτιστικά που χρησιμοποιούν λαμπτήρες φθορισμού, ενώ η δεύτερη αφορά φωτιστικά που βασίζονται σε φωτοεκπέμπουσες διόδους (LED) [35].

2.1 Λαμπτήρες φθορισμού

Οι λαμπτήρες φθορισμού ανήκουν στην κατηγορία των λαμπτήρων χαμηλής πίεσης, όπου ο φωτισμός προκύπτει κυρίως από φθορίζουσες επιστρώσεις που διεγείρονται μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία παράγεται από ηλεκτρικό τόξο υδραργύρου. Οι λαμπτήρες αυτοί περιέχουν υδρατμούς σε χαμηλή πίεση, καθώς και μικρή ποσότητα αδρανούς αερίου για τη διευκόλυνση της έναυσης. Με την εφαρμογή κατάλληλης ηλεκτρικής τάσης δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, μέσω του οποίου παράγεται περιορισμένη ποσότητα ορατής ακτινοβολίας και κυρίως υπεριώδους ακτινοβολία. Αυτή η υπεριώδης ακτινοβολία διεγείρει τις φθορίζουσες επιστρώσεις, επιτρέποντάς τους να εκπέμπουν ορατό φως [24].

2.1.1 Δομή και Λειτουργία

Ο λαμπτήρας φθορισμού αποτελείται από μια σειρά επιμέρους στοιχείων τα οποία συνεργάζονται ώστε να παραχθεί φως, μέσω ενός μηχανισμού που βασίζεται στον συνδυασμό εκπομπής αερίου και φθορίζουσας επικάλυψης. Τα βασικά μέρη του παρουσιάζονται ως εξής [36]:

1. **Σωλήνας:** Αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο του λαμπτήρα και κατασκευάζεται συνήθως από γυαλί ή πλαστικό. Έχει μακρόστενο και λεπτό σχήμα, ενώ η εσωτερική του επιφάνεια καλύπτεται με φθορίζον υλικό.
2. **Ηλεκτρόδια:** Τοποθετημένα στα δύο άκρα του σωλήνα, τα ηλεκτρόδια είναι φτιαγμένα από βολφράμιο και μπορεί να προορίζονται είτε για λειτουργία θερμής είτε ψυχρής καθόδου. Ο ρόλος τους είναι να διοχετεύουν το ηλεκτρικό ρεύμα εντός του σωλήνα, προκαλώντας ιονισμό του αερίου.
3. **Αέριο πλήρωσης:** Ο σωλήνας περιέχει αέριο χαμηλής πίεσης, συχνά αργόν, καθώς και μια μικρή ποσότητα υδρατμών υδραργύρου. Η διέλευση του ρεύματος προκαλεί ιονισμό του αερίου, δημιουργώντας ηλεκτρικό τόξο.
4. **Φθορίζουσες επιστρώσεις:** Στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα εφαρμόζονται υλικά που φθορίζουν. Αυτές οι επιστρώσεις απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη διαδικασία ιονισμού και την μετατρέπουν σε ορατό φως. Το χρώμα του φωτός καθορίζεται από το φασματικό περιεχόμενο των φθορίζουσών ουσιών.
5. **Άκρα ή βάσεις:** Πρόκειται για τα εξαρτήματα που σταθεροποιούν τον σωλήνα και εξασφαλίζουν τις ηλεκτρικές συνδέσεις με τα ηλεκτρόδια. Ορισμένοι τύποι βάσεων περιλαμβάνουν τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά κυκλώματα για την έναυση του λαμπτήρα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις αυτά τα κυκλώματα πρέπει να τοποθετηθούν εξωτερικά.

Με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στα ηλεκτρόδια, το αέριο στο εσωτερικό του λαμπτήρα ιονίζεται, γεγονός που οδηγεί στην εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας. Αυτή η υπεριώδης ακτινοβολία προσπίπτει στην φθορίζουσα επιστρώση του σωλήνα, η οποία απορροφά την ενέργεια και την επανεκπέμπει υπό τη μορφή ορατού φωτός. Έτσι, παράγεται ο φωτισμός που αντιλαμβανόμαστε από τη λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού [23].

2.1.2 Εκκινητής και ballast

Πέρα από τα κύρια δομικά μέρη που συνθέτουν έναν λαμπτήρα φθορισμού, για την ορθή και αποδοτική λειτουργία του απαιτείται η παρουσία δύο επιπλέον μικροσυσκευών. Αυτές είναι το ballast και, σε μικρότερο βαθμό, ο εκκινητής, τα οποία συνεργάζονται για τη ρύθμιση του

ηλεκτρικού ρεύματος, εξασφαλίζοντας έτσι σταθερότητα και ενεργειακή απόδοση στον φωτισμό. Ο εκκινητής, σε παλαιότερα φωτιστικά συστήματα, χρησιμοποιούνταν για την εκκίνηση της ροής του ρεύματος στα ηλεκτρόδια του λαμπτήρα. Σήμερα, στις σύγχρονες ηλεκτρονικές διατάξεις ballast, ο εκκινητής έχει συχνά ενσωματωθεί στο ίδιο το ballast.

Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ballast επιτελούν πολλαπλές λειτουργίες [37]:

Εκκίνηση του λαμπτήρα: Ένας από τους βασικούς ρόλους του ballast είναι να προκαλέσει την έναυση του λαμπτήρα. Κατά την ενεργοποίηση, τα ηλεκτρόδια εκπέμπουν ηλεκτρόνια, ωστόσο το αέριο εντός του σωλήνα δεν είναι αρχικά αγωγίμο. Το ballast αυξάνει προσωρινά την τάση ώστε να δημιουργήσει τις συνθήκες ανάφλεξης και να ξεκινήσει ο ιονισμός του αερίου, καθιστώντας το αγωγίμο.

Σταθεροποίηση του ρεύματος: Μετά την έναυση, το ballast φροντίζει ώστε η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος να διατηρείται εντός ασφαλών ορίων. Δεδομένου ότι η ηλεκτρική αντίσταση του λαμπτήρα φθορισμού μειώνεται κατά τη λειτουργία του, η απουσία ballast θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη αύξηση του ρεύματος, προκαλώντας υπερθέρμανση ή και καταστροφή της διάταξης. Το ballast περιορίζει και σταθεροποιεί το ρεύμα, αποτρέποντας τέτοια φαινόμενα.

Μείωση του φαινομένου πάλμωσης (flicker): Οι διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου τροφοδοσίας ενδέχεται να προκαλέσουν ορατές αυξομειώσεις στην ένταση του φωτός του λαμπτήρα (flickering), κάτι που μπορεί να είναι ενοχλητικό για το ανθρώπινο μάτι. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ballast περιορίζουν αποτελεσματικά αυτό το φαινόμενο, βελτιώνοντας την ποιότητα του φωτισμού.

Παρόλα αυτά, η χρήση ballast μπορεί να οδηγήσει και σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στους λαμπτήρες φθορισμού, εξαιτίας των θερμικών απωλειών και των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία τους. Ωστόσο, η ενεργειακή επιβάρυνση αυτή έχει μειωθεί σημαντικά με την εισαγωγή των σύγχρονων ηλεκτρονικών ballast, τα οποία είναι σαφώς αποδοτικότερα σε σύγκριση με τα παλαιότερα μαγνητικά.

2.1.3 Βασικότερα είδη λαμπτήρων φθορισμού

Αναφέρουμε τα πέντε σημαντικότερα είδη λαμπτήρων φθορισμού [38]:

- Λαμπτήρες φθορισμού T-12
- Λαμπτήρες φθορισμού εξοικονόμησης ενέργειας
- Λαμπτήρες φθορισμού T-8
- Λαμπτήρες φθορισμού T-5

- Συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (Compact Fluorescent Lamps-CFL)

2.1.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Οι λαμπτήρες φθορισμού διακρίνονται για την υψηλή ενεργειακή τους απόδοση, η οποία κυμαίνεται στο 85% ή μεταξύ 40 και 80 lumen/W. Παράλληλα, λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζουν υψηλό δείκτη απόδοσης χρωμάτων και απαιτούν περιορισμένη συντήρηση. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται από 7.000 έως και 20.000 ώρες [4].

Ωστόσο, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι το μέγεθος και το βάρος τους σε σχέση με την παραγόμενη φωτεινή ένταση, καθώς συχνά απαιτούνται πολλαπλοί λαμπτήρες ανά φωτιστικό σώμα λόγω της συγκριτικά χαμηλότερης φωτεινής απόδοσης. Το σοβαρότερο όμως μειονέκτημα αφορά την περιεκτικότητά τους σε τοξικό υδράργυρο, ο οποίος δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές δυσκολίες κατά τη διαχείριση των λαμπτήρων στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους.

2.2. Τεχνολογία LED: Ιδιότητες και πλεονεκτήματα

Οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι, γνωστές και ως πηγές φωτός LED, βασίζονται σε μια ένωση ημιαγωγών τύπου p-n. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στους δύο αυτούς ημιαγωγούς, παράγεται ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μπορεί να είναι είτε υπέρυθη είτε εντός του ορατού φάσματος. Τα μήκη κύματος του φωτός που προκύπτει από τη λειτουργία των ημιαγωγών καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, ξεκινώντας από τις χαμηλότερες περιοχές της ορατής ακτινοβολίας έως και τα μεγάλα μήκη κύματος του υπέρυθρου. Ο τελικός χρωματικός τόνος του παραγόμενου φωτός καθορίζεται από τον κατάλληλο συνδυασμό των ημιαγωγικών υλικών [6].

Η τεχνολογία LED (Light Emitting Diode) αποτελεί μία από τις πλέον καινοτόμες και επαναστατικές εξελίξεις στον τομέα του φωτισμού, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές φωτισμού, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, φθορισμού και αλογόνου. Τα LED βασίζονται σε ημιαγωγούς που παράγουν φως όταν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα, μετατρέποντας άμεσα την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή ακτινοβολία με υψηλή απόδοση και ελάχιστες απώλειες θερμότητας. Η ανάπτυξή τους συνδέεται στενά με τη συνεχή πρόοδο των υλικών ημιαγωγών και της μικροηλεκτρονικής, καθιστώντας τα LED απαραίτητα για τον σύγχρονο φωτισμό σε πλήθος εφαρμογών [33].

2.2.1 Βασική Αρχή Λειτουργίας LED

Η βασική αρχή λειτουργίας των LED είναι η εκπομπή φωτός μέσω της ηλεκτροφωταύγειας. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες, όπου το φως παράγεται από θέρμανση ενός

νήματος (όπως στους λαμπτήρες πυρακτώσεως) ή από την αλληλεπίδραση ενός αερίου με ηλεκτρικό ρεύμα (όπως στους λαμπτήρες φθορισμού), τα LED αξιοποιούν την κίνηση ηλεκτρονίων σε ένα υλικό ημιαγωγού. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στο LED, τα ηλεκτρόνια και οι οπές συναντώνται στο ενεργό στρώμα του ημιαγωγού, απελευθερώνοντας ενέργεια με τη μορφή φωτονίων. Αυτή η διαδικασία είναι εξαιρετικά αποδοτική, καθώς η πλειονότητα της ενέργειας μετατρέπεται σε φως αντί για θερμότητα [41].

2.2.2 Οδηγοί Φωτιστικών LED

Όπως οι λαμπτήρες φθορισμού απαιτούν τη χρήση ballast για την ομαλή και αποδοτική λειτουργία τους, έτσι και τα φωτιστικά LED βασίζονται στους οδηγούς LED (LED drivers). Οι οδηγοί αυτοί παρέχουν την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ, εξασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία και τη βέλτιστη απόδοση των LED φωτιστικών σωμάτων [7].

Οι βασικοί λόγοι χρήσης των οδηγών είναι οι εξής [42]:

Τα LED φωτιστικά σχεδιάζονται για να λειτουργούν με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης (συνήθως 12–24V). Αντιθέτως, στις περισσότερες περιοχές το ηλεκτρικό δίκτυο παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλότερης τάσης (120–277V). Ο οδηγός LED αναλαμβάνει να μετατρέψει αυτό το εναλλασσόμενο ρεύμα σε κατάλληλο συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης, συμβατό με τις απαιτήσεις των LED.

Επιπλέον, οι οδηγοί διασφαλίζουν την προστασία των φωτιστικών LED από διακυμάνσεις της τάσης ή του ρεύματος. Οποιαδήποτε μεταβολή στην τάση μπορεί να οδηγήσει σε αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος που τροφοδοτεί τα LED, κάτι που ενδέχεται να επηρεάσει δυσμενώς τη λειτουργία τους [8].

Η ποσότητα φωτός που εκπέμπεται από τα LED είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παροχή ρεύματος. Τα φωτιστικά αυτά έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν εντός συγκεκριμένων ορίων έντασης ρεύματος, επομένως η παροχή υπερβολικού ή ανεπαρκούς ρεύματος μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στη φωτεινή απόδοση, υπερθέρμανση, και θερμικές απώλειες, επηρεάζοντας αρνητικά τη διάρκεια ζωής και την απόδοσή τους.

2.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των LED είναι η υψηλή ενεργειακή τους απόδοση. Τα φωτιστικά LED καταναλώνουν έως και 80% λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως [2]. Επιπλέον, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των LED

συμβάλλει στη μείωση του κόστους λειτουργίας, καθιστώντας τα οικονομικά βιώσιμα για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, όπως ο φωτισμός δημόσιων χώρων και κτιρίων.

Ένα άλλο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των LED είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Οι φωτεινές πηγές LED έχουν μέση διάρκεια ζωής που κυμαίνεται από 25.000 έως 50.000 ώρες, γεγονός που τους καθιστά 25 φορές πιο ανθεκτικούς από τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως και έως 10 φορές από τους λαμπτήρες φθορισμού [5]. Αυτή η μακροβιότητα μειώνει την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις και συντήρηση, ιδίως σε εφαρμογές όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη ή κοστοβόρα, όπως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή σε αρχιτεκτονικό φωτισμό υψηλών κτιρίων.

Επιπλέον, τα LED προσφέρουν ευελιξία στον σχεδιασμό και την εφαρμογή τους. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε διάφορες μορφές και σχήματα, προσφέροντας ευκαιρίες για δημιουργικό και καινοτόμο σχεδιασμό φωτιστικών σωμάτων. Τα LED μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις, γεγονός που τα καθιστά ασφαλή και κατάλληλα για φορητές συσκευές ή εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, η δυνατότητα ρύθμισης της έντασης και της θερμοκρασίας χρώματος τους καθιστά ιδανικά για εφαρμογές όπου απαιτείται προσαρμοστικότητα, όπως σε συστήματα φωτισμού γραφείων, κατοικιών και δημόσιων χώρων.

Ένας ακόμη τομέας όπου τα LED υπερέχουν είναι η χρωματική τους απόδοση και η προσαρμοστικότητα του φάσματος φωτός που εκπέμπουν. Με την προσθήκη κατάλληλων υλικών στον ημιαγωγό ή με τη χρήση φωσφόρων, τα LED μπορούν να εκπέμπουν φως σε διαφορετικά χρώματα ή ακόμη και σε πλήρες φάσμα, προσομοιάζοντας το φυσικό φως [1]. Ο δείκτης απόδοσης χρωμάτων (CRI) των LED υψηλής ποιότητας μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει το 90, καθιστώντας τα ιδανικά για περιβάλλοντα όπου η ακρίβεια της χρωματικής απόδοσης είναι κρίσιμη, όπως σε καταστήματα, μουσεία και χώρους υγειονομικής περίθαλψης [14].

Η φιλικότητα προς το περιβάλλον είναι ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας LED. Σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού, που περιέχουν υδράργυρο και άλλες επικίνδυνες ουσίες, τα LED δεν περιέχουν τοξικά υλικά, καθιστώντας τα ασφαλέστερα για το περιβάλλον και την ανακύκλωση. Επιπλέον, η υψηλή ενεργειακή τους αποδοτικότητα συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), μειώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα των εφαρμογών φωτισμού [6]. Η μετάβαση από τις παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού στα LED αποτελεί συνεπώς έναν κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη των παγκόσμιων στόχων βιωσιμότητας και εξοικονόμησης ενέργειας.

Η χρήση της τεχνολογίας LED έχει επεκταθεί και στις έξυπνες λύσεις φωτισμού, υποστηρίζοντας τη συνδεσιμότητα και την αυτοματοποίηση μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Τα φωτιστικά LED μπορούν να συνδυαστούν με αισθητήρες φωτός, κίνησης και θερμοκρασίας, επιτρέποντας τη δυναμική ρύθμιση του φωτισμού ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τις ανάγκες του χρήστη. Παράλληλα, το λογισμικό προσομοίωσης φωτισμού, όπως το Relux, αξιοποιεί τις ιδιότητες των LED για τη δημιουργία ακριβών προσομοιώσεων και τη βελτιστοποίηση του φωτιστικού σχεδιασμού [7]. Αυτές οι δυνατότητες αυξάνουν την ενεργειακή απόδοση και βελτιώνουν την εμπειρία του χρήστη, ενώ παράλληλα μειώνουν το συνολικό κόστος λειτουργίας.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί που συνδέονται με την τεχνολογία LED. Ένας από αυτούς είναι το αρχικό κόστος εγκατάστασης, το οποίο παραμένει υψηλότερο σε σύγκριση με τις παραδοσιακές λύσεις φωτισμού. Ωστόσο, η σταδιακή μείωση του κόστους παραγωγής και οι σημαντικές μακροπρόθεσμες οικονομικές αποδόσεις αντισταθμίζουν αυτό το εμπόδιο. Επίσης, η απόδοση των LED μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η ποιότητα της τροφοδοσίας, απαιτώντας τη χρήση κατάλληλων εξαρτημάτων και συστημάτων ψύξης για τη διατήρηση της απόδοσής τους.

Συνολικά, η τεχνολογία LED έχει φέρει μια επανάσταση στον τομέα του φωτισμού, συνδυάζοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα, τη μεγάλη διάρκεια ζωής, την ευελιξία και τη φιλικότητα προς το περιβάλλον. Η ευρεία εφαρμογή της, από κατοικίες και γραφεία μέχρι βιομηχανίες και δημόσιους χώρους, αναδεικνύει τον σημαντικό ρόλο της στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου μέλλοντος. Με την ενσωμάτωση των LED σε έξυπνα συστήματα φωτισμού και την περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας, αναμένονται ακόμη μεγαλύτερες βελτιώσεις στην απόδοση, την προσαρμοστικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα του φωτισμού.

2.3. Σύγκριση LED με παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού

Η εξέλιξη της τεχνολογίας φωτισμού τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στις επιλογές φωτιστικών λύσεων. Η τεχνολογία LED (Light Emitting Diode) αναδεικνύεται ως μία από τις πιο προηγμένες και αποδοτικές λύσεις, προσφέροντας πλεονεκτήματα που ξεπερνούν κατά πολύ εκείνα των παραδοσιακών τεχνολογιών φωτισμού, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, φθορισμού, αλογόνου και οι λαμπτήρες εκκένωσης. Η σύγκριση μεταξύ LED και παραδοσιακών τεχνολογιών φωτισμού αποκαλύπτει τις διαφορές τους σε όρους ενεργειακής απόδοσης, διάρκειας ζωής, περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, χρωματικής απόδοσης και συνολικού κόστους λειτουργίας.

2.3.1 Ενεργειακή Απόδοση

Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που διαφοροποιεί την τεχνολογία LED από τις παραδοσιακές λύσεις είναι η φωτεινή απόδοση. Οι φωτεινές πηγές LED μετατρέπουν έως και το 90% της καταναλισκόμενης ενέργειας σε φως, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, οι οποίοι σπαταλούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ως θερμότητα.

Ακόμη και οι λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι θεωρούνται πιο αποδοτικοί από τους πυρακτώσεως, δεν πλησιάζουν τις επιδόσεις των LED. Η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 50-100 lm/W. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση των LED μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, κάτι που είναι κρίσιμο για μεγάλες εγκαταστάσεις, όπως εργοστάσια, εμπορικά κέντρα και δημόσιοι χώροι.

2.3.2 Διάρκεια Ζωής

Η διάρκεια ζωής αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα υπεροχής των LED. Οι παραδοσιακοί λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν μέση διάρκεια ζωής περίπου 1.000 ώρες, ενώ οι λαμπτήρες αλογόνου φτάνουν τις 2.000-3.000 ώρες. Οι λαμπτήρες φθορισμού και οι λαμπτήρες εκκένωσης έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, που κυμαίνεται από 10.000 έως 20.000 ώρες, ωστόσο υπολείπονται σημαντικά σε σχέση με τα φωτιστικά LED, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν για 25.000 έως 50.000 ώρες ή και περισσότερο (Rea & Bullough, 2001).

Η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των LED μειώνει την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου η συντήρηση είναι δαπανηρή ή δύσκολη. Για παράδειγμα, οι LED είναι ιδανικοί για χρήση σε αρχιτεκτονικό φωτισμό, δημόσιους δρόμους και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου το κόστος αντικατάστασης και εργασίας μπορεί να είναι υψηλό.

2.3.3 Χρωματική Απόδοση και Προσαρμοστικότητα

Ο δείκτης απόδοσης χρωμάτων (CRI) είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ποιότητα του φωτισμού. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν CRI 100, που είναι το μέγιστο δυνατό, καθώς προσεγγίζουν το φως του ήλιου. Ωστόσο, οι λαμπτήρες φθορισμού και οι λαμπτήρες εκκένωσης συνήθως έχουν χαμηλότερο CRI, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 50 και 85, ανάλογα με τον τύπο και την ποιότητά τους. Αντίθετα, τα φωτιστικά LED υψηλής ποιότητας μπορούν να φτάσουν CRI άνω του 90, προσφέροντας εξαιρετική απόδοση χρωμάτων, κατάλληλη για εφαρμογές όπου η ακρίβεια χρωμάτων είναι ζωτικής σημασίας, όπως καταστήματα, μουσεία και ιατρικά περιβάλλοντα [16].

Επιπλέον, τα LED προσφέρουν τη δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας χρώματος και της έντασης φωτισμού, κάτι που δεν είναι εύκολα εφικτό με παραδοσιακές τεχνολογίες. Τα

φωτιστικά LED μπορούν να εκπέμπουν φως σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών χρώματος, από ζεστό κιτρινωπό φως (2.700 Kelvin) έως ψυχρό μπλε-λευκό φως (6.500 Kelvin), προσφέροντας ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

2.3.4 Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα

Τα φωτιστικά LED είναι σημαντικά πιο φιλικά προς το περιβάλλον σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού. Πρώτον, καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, μειώνοντας τη ζήτηση για ηλεκτρισμό και, κατά συνέπεια, τις εκπομπές CO₂ από σταθμούς παραγωγής ενέργειας [6]. Δεύτερον, τα φωτιστικά LED δεν περιέχουν τοξικά υλικά, όπως ο υδράργυρος που βρίσκεται στους λαμπτήρες φθορισμού και εκκένωσης. Αυτό τους καθιστά ασφαλέστερους για απόρριψη και ανακύκλωση.

Αντίθετα, η απόρριψη των λαμπτήρων φθορισμού και εκκένωσης απαιτεί ειδικούς χειρισμούς λόγω της παρουσίας υδραργύρου, ο οποίος είναι εξαιρετικά τοξικός και μπορεί να μολύνει το περιβάλλον. Επιπλέον, η μακροχρόνια διάρκεια ζωής των LED μειώνει την ποσότητα των απορριμμάτων από καμένες λάμπες, ενισχύοντας περαιτέρω τη βιωσιμότητά τους.

2.3.5 Κόστος και Οικονομική Αποδοτικότητα

Το αρχικό κόστος αγοράς των LED είναι υψηλότερο από αυτό των παραδοσιακών λαμπτήρων, γεγονός που μπορεί να αποτρέψει κάποιους καταναλωτές από την υιοθέτησή τους. Ωστόσο, το υψηλότερο αρχικό κόστος αντισταθμίζεται από τη μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση ενέργειας και τη μειωμένη ανάγκη συντήρησης. Τα φωτιστικά LED μπορούν να αποσβέσουν το κόστος τους σε λίγα χρόνια λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της μεγάλης διάρκειας ζωής τους [2].

Επιπλέον, οι παραδοσιακοί λαμπτήρες, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, παράγουν σημαντική ποσότητα θερμότητας, κάτι που μπορεί να αυξήσει το κόστος ψύξης σε εσωτερικούς χώρους. Τα φωτιστικά LED εκπέμπουν ελάχιστη θερμότητα, μειώνοντας έτσι τις ανάγκες για κλιματισμό, ειδικά σε μεγάλα εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια.

2.3.6 Αξιοπιστία και Αντοχή

Τα φωτιστικά LED είναι εξαιρετικά ανθεκτικά και αξιόπιστα, ειδικά σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες. Μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά σε συνθήκες με χαμηλή θερμοκρασία ή υψηλή υγρασία, καθιστώντας τους ιδανικούς για εξωτερικές εφαρμογές. Επιπλέον, τα φωτιστικά LED δεν περιέχουν εύθραυστα μέρη, όπως γυάλινα νήματα ή σωλήνες, και είναι λιγότερο επιρρεπείς σε θραύση ή ζημιά.

Αντίθετα, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και φθορισμού είναι πιο ευάλωτοι σε φυσικές καταπονήσεις, καθιστώντας τους λιγότερο αξιόπιστους σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή εξωτερικοί χώροι με ακραίες καιρικές συνθήκες.

2.3.7 Συμπέρασμα

Η σύγκριση μεταξύ LED και παραδοσιακών τεχνολογιών φωτισμού δείχνει ξεκάθαρα ότι τα LED υπερτερούν σε όλους σχεδόν τους τομείς. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση, η μακροχρόνια διάρκεια ζωής, η εξαιρετική χρωματική απόδοση, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα και η μειωμένη ανάγκη συντήρησης καθιστούν τα LED την ιδανική επιλογή για σύγχρονα συστήματα φωτισμού. Παρόλο που το αρχικό κόστος των LED παραμένει υψηλότερο, η συνολική οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση τους καθιστά μία από τις πιο βιώσιμες λύσεις για το μέλλον του φωτισμού.

Στις σύγχρονες μελέτες φωτισμού για εμπορικά κτήρια επιλέγονται πλέον αποκλειστικά φωτιστικά τεχνολογίας LED. Όπως προκύπτει και από τα πλεονεκτήματα που έχουν ήδη αναλυθεί, τα LED φωτιστικά υπερέχουν σημαντικά σε σχέση με εκείνα που βασίζονται σε λαμπτήρες φθορισμού.

Ειδικότερα, προσφέρουν ουσιαστική εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους, καθώς παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερη φωτομετρική απόδοση – της τάξης των 130 lm/W, σε σύγκριση με τα 80 lm/W των φωτιστικών φθορισμού. Παράλληλα, καταργείται η ανάγκη για χρήση ballast, τα οποία συνεπάγονται επιπλέον ενεργειακές και οικονομικές επιβαρύνσεις.

Ένας επιπλέον, καθοριστικός παράγοντας για την ευρεία υιοθέτηση των LED είναι η πλήρης συμμόρφωσή τους με τα σύγχρονα ευρωπαϊκά πρότυπα φωτισμού για εμπορικούς χώρους [44] [45], γεγονός που καθιστά τη χρήση τους προτιμητέα τόσο από λειτουργική όσο και από κανονιστική άποψη.

2.4. Ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η ενεργειακή απόδοση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στον σχεδιασμό και την εφαρμογή σύγχρονων συστημάτων φωτισμού. Η μετάβαση από τις παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού σε πιο αποδοτικές λύσεις, όπως οι λυχνίες LED, έχει μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και έχει βελτιώσει τη βιωσιμότητα του φωτισμού σε αστικά, εμπορικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα [2]. Παράλληλα, η περιβαλλοντική διάσταση της ενεργειακής απόδοσης παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής

ενέργειας συμβάλλει άμεσα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη γενικότερη αειφορία των κτιριακών εγκαταστάσεων.

Η παρούσα ενότητα εξετάζει την ενεργειακή απόδοση των σύγχρονων τεχνολογιών φωτισμού και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους, εστιάζοντας στη σύγκριση μεταξύ των φωτιστικών LED και των παραδοσιακών τεχνολογιών, καθώς και στις στρατηγικές που προωθούν την αειφόρο ανάπτυξη στον τομέα του φωτισμού.

Οι παραδοσιακοί λαμπτήρες πυρακτώσεως είναι οι λιγότερο αποδοτικοί, με φωτεινή απόδοση μόλις 10-15 lm/W, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα αντί για φως [34]. Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι πιο αποδοτικοί, με αποδόσεις που κυμαίνονται μεταξύ 50 και 100 lm/W, ωστόσο η τεχνολογία τους παρουσιάζει περιορισμούς, όπως η σταδιακή μείωση της φωτεινής απόδοσης με την πάροδο του χρόνου και η ανάγκη για σταθεροποιητές (ballasts) που καταναλώνουν πρόσθετη ενέργεια. Αντίθετα, τα φωτιστικά LED έχουν αποδοτικότητα που ξεπερνά τα 150 lm/W, καθιστώντας τους την πιο ενεργειακά αποδοτική επιλογή για φωτισμό εσωτερικών και εξωτερικών χώρων [2].

Η μετάβαση σε ενεργειακά αποδοτικά συστήματα φωτισμού συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, τα οποία εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άλλους ρύπους στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τους Chraïbi και Ain (2019), η αντικατάσταση παλαιών φωτιστικών συστημάτων με LED μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ έως και 50% σε μεγάλες κτιριακές εγκαταστάσεις.

Επιπλέον, τα φωτιστικά LED δεν περιέχουν τοξικά υλικά, όπως ο υδράργυρος που βρίσκεται στους λαμπτήρες φθορισμού και εκκένωσης, καθιστώντας τη διάθεση και ανακύκλωσή τους ευκολότερη και ασφαλέστερη για το περιβάλλον (CIE, 2017). Η χρήση λαμπτήρων φθορισμού απαιτεί ιδιαίτερες διαδικασίες απόρριψης και ανακύκλωσης λόγω της παρουσίας υδραργύρου, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ρύπανση σε περιβάλλοντα υδάτινα οικοσυστήματα εάν δεν διαχειριστεί σωστά.

Ένα ακόμη σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος της τεχνολογίας LED είναι η μείωση της φωτορύπανσης. Τα φωτιστικά LED επιτρέπουν ακριβή έλεγχο της κατεύθυνσης του φωτός, μειώνοντας τη διασπορά του σε μη επιθυμητές περιοχές και συμβάλλοντας στη διατήρηση του φυσικού νυχτερινού περιβάλλοντος. Η υιοθέτηση έξυπνων συστημάτων φωτισμού αποτελεί μία ακόμη εξέλιξη που ενισχύει την ενεργειακή αποδοτικότητα και μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κτιριακών εγκαταστάσεων. Τα φωτιστικά LED μπορούν να συνδυαστούν με

αισθητήρες κίνησης και φωτεινότητας, καθώς και με συστήματα διαχείρισης μέσω Internet of Things (IoT), προσαρμόζοντας τη λειτουργία τους ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τις ανάγκες των χρηστών [13].

Η χρήση τέτοιων συστημάτων έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε γραφεία, εμπορικούς χώρους και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου ο φωτισμός μπορεί να προσαρμόζεται αυτόματα για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά τις ώρες μη χρήσης [8]. Τα έξυπνα συστήματα φωτισμού συμβάλλουν επίσης στη βελτίωση της ποιότητας φωτισμού, δημιουργώντας πιο άνετα και λειτουργικά περιβάλλοντα εργασίας.

Η ενεργειακή απόδοση και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των σύγχρονων συστημάτων φωτισμού είναι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Η μετάβαση από τις παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού στις λυχνίες LED έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών CO₂ και της φωτορύπανσης, ενώ παράλληλα έχει βελτιώσει τη βιωσιμότητα των κτιριακών εγκαταστάσεων. Η υιοθέτηση έξυπνων συστημάτων διαχείρισης φωτισμού αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω αυτά τα οφέλη, προσφέροντας ευφυείς λύσεις που προσαρμόζονται στις ανάγκες του σύγχρονου περιβάλλοντος.

2.5 Ευρωπαϊκά Πρότυπα και Κ.Εν.Α.Κ.

2.5.1 Εισαγωγή

Η σύνταξη μιας ενεργειακής μελέτης φωτισμού αποσκοπεί τόσο στη διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας των εξεταζόμενων χώρων ή κτηρίων όσο και στη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσής τους. Επομένως, καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη αναγνωρισμένων προτύπων, τα οποία να καθορίζουν τόσο τον τρόπο εκπόνησης της μελέτης από τον αρμόδιο μελετητή ή μηχανικό όσο και τις τεχνικές προδιαγραφές που οφείλει αυτή να καλύπτει.

Η ανάγκη αυτή καλύφθηκε σε ευρωπαϊκό επίπεδο με την έκδοση της Κοινοτικής Οδηγίας 2002/91/ΕΚ, η οποία αφορά την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. Η Ελλάδα, ως κράτος-μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενσωμάτωσε την οδηγία αυτή στο εθνικό της δίκαιο με τον Νόμο 3661/2008, καθιστώντας την εφαρμογή των σχετικών προτύπων υποχρεωτική.

Η αρμόδια ελληνική αρχή για την προώθηση και την εφαρμογή αυτών των κανονισμών είναι το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (Τ.Ε.Ε.). Βασιζόμενο στην εν λόγω κοινοτική οδηγία και στο ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13790, το Τ.Ε.Ε. προχώρησε στη σύνταξη και έκδοση του

Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) καθώς και των αντίστοιχων Τεχνικών Οδηγιών του Τ.Ε.Ε. (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.) που αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του [21].

2.5.2 Κ.Εν.Α.Κ

Ο **Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.)** συνιστά ένα θεμελιώδες νομοθετικό εργαλείο που ρυθμίζει ζητήματα ενεργειακής απόδοσης στον δομημένο περιβάλλον. Ο κανονισμός αυτός προσδιορίζει τη μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής επίδοσης των κτηρίων και καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται από τα ίδια τα κτήρια και τα επί μέρους δομικά τους συστήματα. Μεταξύ των βασικών του στοιχείων περιλαμβάνονται τα εξής [12]:

1. **Υπολογισμός ενεργειακής απόδοσης:** Ο Κ.Εν.Α.Κ. περιλαμβάνει αναλυτική μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτηρίου, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας, όπως το κέλυφος, τα Η/Μ συστήματα και οι συνθήκες λειτουργίας.
2. **Ελάχιστες απαιτήσεις:** Ορίζει κατώτατα όρια ενεργειακής απόδοσης για τα νέα και τα υφιστάμενα κτήρια, προκειμένου να εξασφαλιστεί μια ισορροπία μεταξύ του κόστους κατασκευής και της ενεργειακής αποδοτικότητας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του ακινήτου.
3. **Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ):** Το ΠΕΑ αποτυπώνει την ενεργειακή επίδοση του κτηρίου και περιλαμβάνει προτάσεις για τη βελτίωσή της. Αποτελεί προαπαιτούμενο έγγραφο για κάθε διαδικασία πώλησης ή ενοικίασης κτηρίου και εκδίδεται αποκλειστικά από πιστοποιημένο ενεργειακό επιθεωρητή.
4. **Υποχρεωτική αναφορά ενεργειακής απόδοσης:** Κατά την προώθηση πώλησης ή εκμίσθωσης ενός ακινήτου, είναι απαραίτητη η αναγραφή του ενεργειακού του δείκτη σε κάθε σχετική διαφήμιση ή αγγελία. Επιπλέον, στην ηλεκτρονική δήλωση μίσθωσης καταχωρείται και ο αριθμός πρωτοκόλλου του αντίστοιχου ΠΕΑ.
5. **Πιστοποιητικό Ελέγχου Κατασκευής (ΠΕΚ):** Το ΠΕΚ εκδίδεται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής νέου κτηρίου, προσθήκης ή ριζικής ανακαίνισης και επιβεβαιώνει τη συμμόρφωση του κτηρίου με τις προβλεπόμενες ενεργειακές απαιτήσεις του Κ.Εν.Α.Κ.

2.5.3 Τ.Ο.Τ.Ε.Ε

Οι Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.) καταρτίστηκαν με σκοπό να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για όλους τους εμπλεκόμενους στη μελέτη, κατασκευή και διαχείριση τεχνικών έργων. Στόχος τους είναι να καλύψουν ενδεχόμενα κενά στις υφιστάμενες

τεχνικές προδιαγραφές που διέπουν τον κατασκευαστικό και παραγωγικό τομέα στην Ελλάδα, επιβεβαιώνοντας παράλληλα τη δέσμευση του Τ.Ε.Ε. στην υποστήριξη και ενίσχυση της τεχνολογικής υποδομής της χώρας.

Οι οδηγίες αυτές παρέχουν τεκμηριωμένες κατευθύνσεις σχετικά με τον σχεδιασμό τεχνικών έργων, την επιλογή υλικών και εξαρτημάτων, την κατασκευή και εγκατάσταση, καθώς και τη συντήρηση και χρήση των έργων. Υποστηρίζουν τον στρατηγικό σκοπό του Τ.Ε.Ε., που είναι η διάδοση τεχνικής ακρίβειας και η θεμελίωση κοινών κανόνων επιστημονικής και τεχνικής πρακτικής σε όλα τα στάδια της ζωής ενός έργου – από τον αρχικό σχεδιασμό έως την τελική του χρήση.

Τα κείμενα των Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. εναρμονίζονται με τα πρότυπα του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) και, όπου αυτά δεν επαρκούν ή δεν υφίστανται, αναφέρονται σε διεθνώς αποδεκτά πρότυπα, όπως τα ISO και τα Ευρωπαϊκά πρότυπα, καθώς και σε εθνικά πρότυπα άλλων χωρών (π.χ. DIN, BS, AFNOR).

Κατόπιν δημόσιας διαβούλευσης και έγκρισης από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), οι Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. δημοσιεύονται στην Εφημερίδα της Κυβερνήσεως και αποκτούν επίσημο χαρακτήρα. Οι κυριότερες Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. που απαρτίζουν τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) είναι [35]:

- **Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017:** Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές και παράμετροι για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης.
- **Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017:** Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων.
- **Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010:** Κλιματικά δεδομένα που αφορούν γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας.
- **Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-4/2017:** Οδηγίες και τυποποιημένα έντυπα για τη διενέργεια ενεργειακών επιθεωρήσεων σε κτήρια, συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού.
- **Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-5/2017:** Κατευθύνσεις για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης σε εγκαταστάσεις εντός κτηρίων.

3. Ανασκόπηση Λογισμικού Relux

3.1. Περιγραφή του προγράμματος Relux

Το Relux είναι ένα προηγμένο λογισμικό προσομοίωσης φωτισμού που χρησιμοποιείται ευρέως στον σχεδιασμό φωτιστικών εγκαταστάσεων. Αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή εργαλεία για μηχανικούς, αρχιτέκτονες και ειδικούς στον φωτισμό, επιτρέποντας ακριβείς υπολογισμούς φωτιστικής απόδοσης, ανάλυση ενεργειακής κατανάλωσης και δημιουργία τρισδιάστατων προσομοιώσεων φωτισμού σε πραγματικές συνθήκες (Relux Informatik AG, 2023). Το πρόγραμμα ενσωματώνει σύγχρονες τεχνικές υπολογισμού φωτισμού και προσφέρει τη δυνατότητα αξιολόγησης διαφορετικών τύπων λαμπτήρων και συστημάτων φωτισμού, με στόχο τη βελτιστοποίηση των ενεργειακών επιδόσεων και της οπτικής άνεσης.

Το Relux αναπτύσσεται από την ελβετική εταιρεία Relux Informatik AG και χρησιμοποιείται διεθνώς σε πλήθος εφαρμογών, από τον φωτισμό εσωτερικών και εξωτερικών χώρων έως τον φωτισμό δρόμων και αστικών περιοχών. Διατίθεται τόσο σε δωρεάν όσο και σε επαγγελματικές εκδόσεις, προσφέροντας εξειδικευμένες λειτουργίες για διαφορετικές κατηγορίες χρηστών. Το λογισμικό επιτρέπει στους χρήστες να πραγματοποιούν αναλύσεις φωτισμού σύμφωνα με τα πρότυπα της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού (CIE) και τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για ενεργειακή απόδοση στον φωτισμό (CIE, 2017).

3.2. Δυνατότητες και χαρακτηριστικά του λογισμικού

Το Relux διαθέτει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων που επιτρέπουν τη λεπτομερή προσομοίωση και ανάλυση φωτιστικών συνθηκών. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν:

1. Προσομοίωση Φωτισμού σε Τρισδιάστατα Μοντέλα

Το λογισμικό επιτρέπει τη δημιουργία 3D μοντέλων των χώρων που πρόκειται να φωτιστούν. Οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν δωμάτια, κτίρια, εξωτερικούς χώρους και οδικά δίκτυα, εφαρμόζοντας διαφορετικά σενάρια φωτισμού για να αξιολογήσουν την απόδοσή τους σε πραγματικές συνθήκες (Mingozzi & Bellia, 2017).

2. Ανάλυση Φωτιστικής Έντασης και Φωτεινότητας

Το Relux μπορεί να υπολογίσει τη λαμπρότητα (*illuminance*) και την ένταση φωτισμού (*luminance*) για κάθε σημείο μιας προσομοίωσης. Οι χρήστες μπορούν να δουν πώς κατανέμεται το

φως σε έναν χώρο και να εντοπίσουν περιοχές υπερβολικού ή ανεπαρκούς φωτισμού, προκειμένου να βελτιώσουν την ποιότητα του φωτισμού (Rea & Bullough, 2001).

3. Υποστήριξη Δεδομένων από Κατασκευαστές Φωτιστικών

Το Relux συνεργάζεται με πολλούς κατασκευαστές φωτιστικών προϊόντων, επιτρέποντας την εισαγωγή δεδομένων φωτιστικών σωμάτων απευθείας από τις βάσεις δεδομένων των εταιρειών. Οι χρήστες μπορούν να ενσωματώσουν πραγματικά προϊόντα στην προσομοίωση, λαμβάνοντας υπόψη τις ακριβείς φωτιστικές ιδιότητες κάθε λαμπτήρα ή φωτιστικού σώματος (Relux Informatik AG, 2023).

4. Ενεργειακή Ανάλυση και Αξιολόγηση Απόδοσης

Το λογισμικό παρέχει εργαλεία για την ανάλυση της ενεργειακής κατανάλωσης των συστημάτων φωτισμού και την αξιολόγηση της απόδοσής τους σύμφωνα με διεθνή πρότυπα. Με αυτόν τον τρόπο, οι χρήστες μπορούν να υπολογίσουν τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση και να προτείνουν βελτιώσεις για τη μείωση του κόστους λειτουργίας (DiLouie, 2010).

5. Προσομοίωση Ημέρας και Νύχτας

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του Relux είναι η δυνατότητα προσομοίωσης φωτιστικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Οι χρήστες μπορούν να αναλύσουν την αλληλεπίδραση φυσικού και τεχνητού φωτός, επιτρέποντας τη βέλτιστη χρήση φυσικού φωτισμού σε κτίρια [16].

3.3. Εφαρμογές του Relux σε μελέτες φωτισμού

Το Relux χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς και σχεδιαστές φωτισμού για την ανάπτυξη αποδοτικών και αισθητικά ευχάριστων συστημάτων φωτισμού. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν:

1. **Φωτισμός Εσωτερικών Χώρων:** Χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό φωτισμού γραφείων, κατοικιών, εμπορικών κέντρων και βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του φωτισμού για την επίτευξη άνεσης και παραγωγικότητας στον χώρο.
2. **Φωτισμός Εξωτερικών Χώρων:** Εφαρμόζεται στη σχεδίαση φωτισμού δρόμων, πλατειών και αθλητικών εγκαταστάσεων, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού και περιορισμό της φωτορύπανσης.
3. **Αρχιτεκτονικός Φωτισμός:** Το λογισμικό χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αισθητικά εντυπωσιακών φωτιστικών σχεδίων σε μουσεία, γκαλερί και ιστορικά κτίρια.

4. **Φωτισμός Οδικών Δικτύων:** Το Relux περιλαμβάνει πρότυπα φωτισμού οδών και επιτρέπει την προσομοίωση διαφόρων τύπων φωτιστικών λύσεων, βελτιώνοντας την ορατότητα και την ασφάλεια των οδηγών.

4. Μελέτη Περίπτωσης: Αναβάθμιση Κτιριακού Φωτισμού

Η μεθοδολογία μας εφαρμόζεται σε κτήριο επί της Λεωφόρου Κηφισού όπου αρχικά θα αναλύσουμε την υφιστάμενη κατάσταση φωτισμού με σκοπό να γίνουν μία σειρά από προτάσεις-βελτιώσεις που θα οδηγήσουν σε μία οικονομικότερη λειτουργία φωτισμού των χώρων του κτηρίου. Έχουμε επιλέξει να μελετήσουμε έναν όροφο του κτηρίου ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί και σαν αποθήκη παλιότερα, αλλά με μία ανακαίνιση που έγινε αποτελεί χώρο έκθεσης προϊόντων. Ο λόγος που επιλέξαμε το συγκεκριμένο όροφο είναι η εύκολη πρόσβαση σε όλους τους χώρους για τη σωστή καταγραφή του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού και των διαστάσεων των χώρων, με δεδομένη την έλλειψη επικαιροποιημένων αρχιτεκτονικών σχεδίων.

Σε αυτό το στάδιο, θεωρείται απαραίτητο να παρουσιαστούν ορισμένες λεπτομέρειες σχετικά με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Τη μέτρηση των χώρων και την αποτύπωση της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού του κτηρίου.
- Τις μετρήσεις της έντασης του φωτισμού.

Τα διαθέσιμα αρχιτεκτονικά σχέδια του χώρου ήταν αρκετά παλαιά και δεν ανταποκρίνονταν στην πραγματική κατάσταση του κτηρίου. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν νέες μετρήσεις σε όλους τους χώρους από την αρχή, ώστε να διασφαλιστεί η ακριβής προσομοίωση του συστήματος φωτισμού και η ορθή εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα προσομοίωσης εγκαταστάσεων φωτισμού, ReluxPro. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, έγινε επίσης καταγραφή του υπάρχοντος συστήματος φωτισμού, περιλαμβάνοντας φωτιστικά σώματα, λαμπτήρες και κυκλώματα φωτισμού, καθώς και των ανοιγμάτων και των προβλημάτων που σχετίζονταν με την υπάρχουσα εγκατάσταση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός ψηφιακού μετρητή αποστάσεων με λέιζερ (Bosch PLR50), ο οποίος παρέχει τυπική ακρίβεια μέτρησης 2,0 mm.



Εικόνα 1: Ψηφιακός Μετρητής Αποστάσεων με Λέιζερ Bosch PLR50

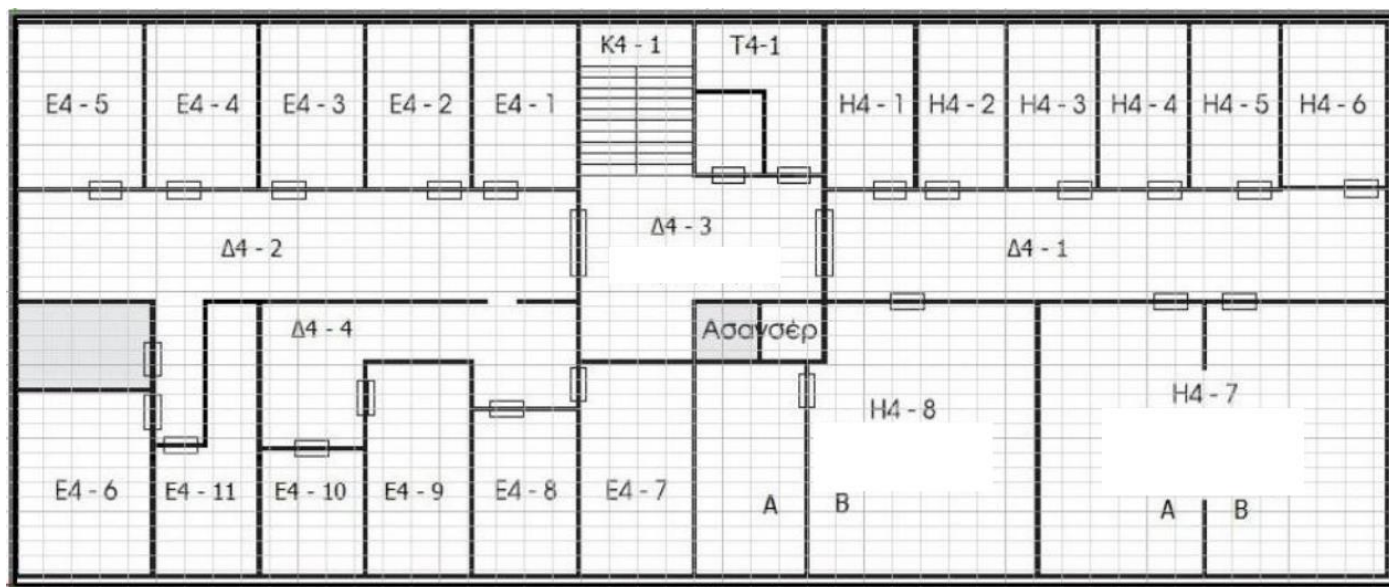
4.1. Περιγραφή κτιρίου και απαιτήσεων φωτισμού

Κατά τις επισκέψεις σε όλους τους χώρους τον Ιανουάριο του 2025, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας όπου αυτό ήταν εφικτό, με το ύψος μέτρησης να ορίζεται στα 0,8 μέτρα. Σε περιπτώσεις όπου δεν υπήρχαν πραγματικές επιφάνειες εργασίας, όπως σε διαδρόμους, προθαλάμους ή κλιμακοστάσια, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον κεντρικό άξονα των χώρων αυτών, καθώς και σε διάφορα άλλα σημεία, σε ύψος 0,5 μέτρων, σύμφωνα με τα προβλεπόμενα πρότυπα.

Ο βασικός σκοπός των μετρήσεων ήταν να εξακριβωθεί αν πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις φωτισμού. Επιπλέον, έγινε προσπάθεια να μετρηθεί η ένταση φωτισμού που παρέχεται αποκλειστικά από το φυσικό φως, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτό επαρκεί για την κάλυψη των φωτιστικών αναγκών και αν η αξιοποίησή του είναι αποτελεσματική.

Στη συνέχεια απεικονίζεται η κάτοψη του προς μελέτη ορόφου, όπως είναι στις μέρες μας. Είναι φανερό οι τροποποιήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε κάποιους χώρους για τη βελτίωση

της λειτουργικότητάς τους. Οι αλλαγές αυτές έχουν ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό των νέων εγκαταστάσεων φωτισμού που θα προταθούν στη συνέχεια.



Εικόνα 2: Κάτοψη ορόφου στην οποία θα γίνει η μελέτη φωτισμού

Ο απεικονιζόμενος όροφος αποτελείται από διάφορους χώρους που έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικές λειτουργίες και χρήσεις. Στην αριστερή πλευρά της κάτοψης, παρατηρείται μια σειρά από δωμάτια με τις ονομασίες E4-1 έως E4-6, τα οποία λειτουργούν ως γραφεία ή αποθηκευτικοί χώροι.

Στο κεντρικό τμήμα της κάτοψης υπάρχει ένας ευρύς διάδρομος, ο οποίος χωρίζεται σε δύο βασικές περιοχές, Δ4-1 και Δ4-2, οι οποίες χρησιμεύουν ως κοινόχρηστοι διάδρομοι ή χώροι πρόσβασης προς τα γραφεία και τις αίθουσες. Στο κέντρο του ορόφου βρίσκεται η περιοχή Δ4-3, όπου εντοπίζεται το ασανσέρ, προσφέροντας κατακόρυφη μετακίνηση μεταξύ των ορόφων. Κοντά στο ασανσέρ υπάρχει επίσης η σκάλα (σημειωμένη ως K4-1), παρέχοντας επιπλέον πρόσβαση σε άλλους ορόφους μέσω των σκαλοπατιών.

Στη δεξιά πλευρά του ορόφου, παρατηρείται μια σειρά δωματίων με την ονομασία H4-1 έως H4-6, τα οποία ενδέχεται να λειτουργούν ως γραφεία ή χώροι έκθεσης εμπορευμάτων.

Στο κάτω μέρος της κάτοψης υπάρχουν μεγαλύτεροι χώροι, όπως το H4-7 και το H4-8, που είναι σχεδιασμένοι για εργαστηριακή χρήση ή συνεδριακές αίθουσες. Οι χώροι αυτοί χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα (Α και Β), υποδηλώνοντας υποδιαιρέσεις για διαφορετικές λειτουργίες ή ομάδες εργασίας.

Το γενικό σχέδιο του ορόφου φαίνεται να είναι καλά οργανωμένο, με σαφείς διαχωρισμούς μεταξύ χώρων εργασίας, κοινόχρηστων χώρων και βοηθητικών εγκαταστάσεων, όπως το ασανσέρ

και η σκάλα. Η διαρρύθμιση αυτή εξυπηρετεί τη λειτουργικότητα του κτιρίου, επιτρέποντας την εύκολη πρόσβαση σε όλους τους χώρους, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζει την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου χώρου.

Η μέτρηση της έντασης του φωτισμού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση λουξόμετρου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PCE 174 της εταιρείας PCE Instruments, το οποίο διαθέτει τυπική ακρίβεια 5% για μετρήσεις έντασης φωτισμού που είναι χαμηλότερες από 10.000 lx.



Εικόνα 3: Ψηφιακό λουξόμετρο PCE 174

4.2. Υφιστάμενη Κατάσταση Φωτισμού

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο ταξινομήθηκαν οι διάφοροι χώροι, λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις τους, τις θέσεις των ανοιγμάτων και τα συστήματα φωτισμού που διαθέτουν.

Πίνακας 1: Οι ονομασίες που δόθηκαν στους επιμέρους χώρους-δωμάτια του ορόφου που μελετήσαμε

Α/Α Ομάδας	Γραφεία	Διάδρομοι	Συνεδριακοί Χώροι	Τουαλέτες και Κλιμακοστάσιο
1	H4-1 έως και H4-6	Δ4-1	H4-7A	T4-1
2	E4-1 έως και E4-5	Δ4-2	H4-7B	K4-1
3	E4-6	Δ4-3	H4-8A	
4	E4-7, E4-8	Δ4-4	H4-8B	
5	E4-9			
6	E4-10			
7	E4-11			

4.2.1 Γραφεία

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει αναλυτικά στοιχεία για κάθε γραφείο, καλύπτοντας τις παρακάτω παραμέτρους:

- Αριθμός, ύψος ανάρτησης και τύπος φωτιστικών σωμάτων, καταγράφοντας τις τεχνικές λεπτομέρειες του υπάρχοντος φωτισμού.
- Αριθμός, ισχύς και τύπος λαμπτήρων, δίνοντας πληροφορίες για την ενεργειακή κατανάλωση και τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων λαμπτήρων.
- Αριθμός κυκλωμάτων φωτισμού και συνολική εγκατεστημένη ισχύς, η οποία έχει υπολογιστεί προσθέτοντας 25% στη συνολική ισχύ των λαμπτήρων, ώστε να συμπεριληφθεί η επιπλέον κατανάλωση από τα ηλεκτρομαγνητικά ballast.

Για τη διεξαγωγή πιο αναλυτικής ανάλυσης, επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά γραφεία από κάθε ομάδα:

- Από την ομάδα γραφείων E4-1 έως E4-5, εξετάστηκε το γραφείο E4-4.

- Από την ομάδα γραφείων H4-1 έως H4-6, ελέγχθηκε το γραφείο H4-5.
- Από την ομάδα γραφείων E4-7 και E4-8, αναλύθηκε το γραφείο E4-8.

Πίνακας 2: Καταγραφή δεδομένων φωτισμού στα γραφεία των ορόφων

Γραφείο ή ομάδα γραφείων	Ύψος [m]	Πλήθος Φωτιστικών	Αριθμός Λαμπτήρων ανά Φωτιστικό	Ισχύς Λαμπτήρα [W]	Τύπος Λαμπτήρα	Εγκατεστημένη Ισχύς [W]
E4-1 έως E4-5	3,1	6	2	36	T8	432
H4-1 έως H4-6	3,1	4	2	36	T8	288
E4-6	3,1	4	2	36	T8	288
E4-7 έως E4-8	3,1	6	2	36	T8	432
E4-9	3,1	6	2	36	T8	432
E4-10	3,1	6	2	36	T8	432
E4-11	3,1	7	2	36	T8	504
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς						2808

Για τις ανάγκες της μελέτης, η επιφάνεια εργασίας ορίστηκε ως η επιφάνεια του γραφείου, με τυπικό ύψος περίπου 0,8 m. Σε ορισμένους χώρους, όπου στεγάζονται πολλαπλά γραφεία, παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις στην ένταση φωτισμού ανάλογα με τη θέση της κάθε επιφάνειας εργασίας. Όλα τα φωτιστικά βρίσκονται στην οροφή σε ύψος 3,1m.

Όταν η μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε χώρους με δύο ανεξάρτητα κυκλώματα φωτισμού, επιλέχθηκε να γίνει η καταγραφή με ενεργοποιημένο το κύκλωμα που περιλάμβανε τα φωτιστικά τοποθετημένα απευθείας πάνω από τις επιφάνειες εργασίας. Αυτή η επιλογή βασίστηκε στο γεγονός ότι, σε περίπτωση που οι χρήστες επέλεγαν να λειτουργούν μόνο ένα από τα δύο κυκλώματα, θα προτιμούσαν εκείνο που παρέχει τον απαραίτητο φωτισμό για την εκτέλεση των εργασιών τους. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις επιφάνειες εργασίας των χώρων.

Πίνακας 3: Ένταση Φωτισμού στις μελετούμενες επιφάνειες

Γραφείο ή ομάδα γραφείων	Ένταση φωτισμού (lx) στην επιφάνεια εργασίας				
	Χωρίς φυσικό φωτισμό		Με ανοιχτά σκίαστρα (φυσικός φωτισμός)		
	Με 1 κύκλωμα ανοιχτό	Με 2 κυκλώματα ανοιχτά	Μόνο φυσικός φωτισμός	Με φ.φ. & 1 κύκλωμα	Με φ.φ. & 2 κυκλώματα
E4-1 - E4-5	500	1000	1750	2000	2300
H4-1 - H4-6	380	<i>Δεν υπάρχει</i>	600	900	<i>Δεν υπάρχει</i>
E4-6	350	520	350	580	750
E4-7 - E4-8	500	<i>Δεν υπάρχει</i>	800	1200	<i>Δεν υπάρχει</i>
E4-9	<i>Μη λειτουργικές περσίδες</i>		200 - 850 (*)	500 - 1300 (*)	<i>Δεν υπάρχει</i>
E4-10	350	<i>Δεν υπάρχει</i>	250 - 800 (*)	450 - 1000 (*)	<i>Δεν υπάρχει</i>
E4-11	450	780	1300	1600	1900

Ο φυσικός φωτισμός στα περισσότερα γραφεία είναι επαρκής για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας κατά τις περισσότερες ώρες της ημέρας. Ως εκ τούτου, η χρήση τεχνητού φωτισμού συχνά δεν είναι απαραίτητη. Ωστόσο, παραμένει αναγκαία, καθώς τα εσωτερικά τμήματα των γραφείων, που βρίσκονται μακριά από τα ανοίγματα, παρουσιάζουν χαμηλά επίπεδα φωτισμού. Αυτό, σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή σχεδιασμό των κυκλωμάτων φωτισμού και την έλλειψη συστημάτων ελέγχου του τεχνητού φωτισμού, οδηγεί σε άσκοπη

κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, πολλά φωτιστικά σώματα είναι παλαιάς τεχνολογίας, λειτουργούν με ηλεκτρομαγνητικά ballast και χρησιμοποιούν λαμπτήρες T8. Σε αρκετές περιπτώσεις, ορισμένα φωτιστικά έχουν αφαιρεθεί από τη θέση τους, ενώ άλλα βρίσκονται σε κακή κατάσταση, είτε λόγω απώλειας ανακλαστήρων και περσίδων είτε λόγω φθοράς των οπίσθιων ανακλαστήρων. Ταυτόχρονα, πολλοί λαμπτήρες δεν λειτουργούν, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις έχουν αφαιρεθεί μόνιμα από τα φωτιστικά. Αυτό δημιουργεί έντονη ανομοιομορφία στην κατανομή του φωτισμού, ενώ παράλληλα προκαλεί περιττή κατανάλωση ενέργειας από τα ηλεκτρομαγνητικά ballast. Τέλος, η ανάλυση της εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος φωτισμού δείχνει ότι στα περισσότερα γραφεία υπάρχει υπερδιαστασιολόγηση του φωτιστικού συστήματος, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση.

4.2.2 Διάδρομοι

Όπως εργαστήκαμε στα γραφεία, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο συνεχίσαμε τη μελέτη μας στους χώρους των διαδρόμων με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ο πίνακας που ακολουθεί:

Πίνακας 4: Δεδομένα Φωτισμού για τους Ορόφους

Διάδρομος	Ύψος [m]	Πλήθος Φωτιστικών	Αριθμός Λαμπτήρων ανά Φωτιστικό	Ισχύς Λαμπτήρα [W]	Τύπος Λαμπτήρα	Εγκατεστημένη Ισχύς [W]
Δ4-1	2,4	4	2	18	T8	144
Δ4-2	2,4	4	4	18	T8	288
		1	2	36	T8	72
Δ4-3	3,1	2	2	36	T8	144
Δ4-4	3,1	5	2	36	T8	360
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς						1008

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά μήκος του κεντρικού άξονα κάθε διαδρόμου, με το ύψος καταγραφής να ορίζεται στα 0 m. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον μετρήσεις σε διάφορα σημεία των διαδρόμων, καταγράφοντας τις διακυμάνσεις στην ένταση φωτισμού που παρατηρήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις. Με βάση τις μετρήσεις μας κατασκευάστηκε ο πίνακας που ακολουθεί:

Πίνακας 5: Ένταση Φωτισμού στους Διαδρόμους

Διάδρομος	Ένταση φωτισμού (lx)			
	Με κλειστά σκίαστρα (Δίχως φυσικό φωτισμό)		Με ανοιχτά σκίαστρα (Με φυσικό φωτισμό)	
	Κατά μήκος του κεντρικού άξονα	Άλλες θέσεις	Κατά μήκος του κεντρικού άξονα	Άλλες θέσεις
Δ4-1	100 - 450	80 - 300	100 - 1400	80 -1600
Δ4-2	50 - 350	20 - 300	50 - 500	20 - 550
Δ4-3	50 - 150	40 - 140	50 - 250	30 - 250
Δ4-4	100 - 200	50 - 300	Δεν υπάρχουν ανοίγματα	

Οι διάδρομοι Δ4-1 και Δ4-2 διαθέτουν ανοίγματα στις άκρες τους, ενώ ο διάδρομος Δ4-3 επωφελείται από τον φυσικό φωτισμό που εισέρχεται μέσω των ανοιγμάτων του παρακείμενου κλιμακοστασίου. Ωστόσο, οι μετρήσεις δείχνουν ότι ο φυσικός φωτισμός δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες φωτισμού σε όλο το μήκος των διαδρόμων. Η συμβολή του περιορίζεται σε ορισμένα σημεία και είναι αποτελεσματική μόνο για συγκεκριμένες ώρες της ημέρας. Ωστόσο, όπως και συμβαίνει και με τα γραφεία τα φωτιστικά σώματα είναι παλαιάς τεχνολογίας, δεν έχουν συντηρηθεί σωστά και λειτουργούν με ηλεκτρομαγνητικά ballast και λαμπτήρες T8. Επιπλέον, αρκετοί λαμπτήρες δεν λειτουργούν, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις κάποια φωτιστικά έχουν αφαιρεθεί πλήρως. Επίσης, η ανάλυση της εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος φωτισμού δείχνει ότι οι περισσότεροι διάδρομοι, εκτός από τον Δ4-3, παρουσιάζουν υπερδιαστασιολόγηση, κάτι που οδηγεί σε περιττή ενεργειακή κατανάλωση.

4.2.3 Συνεδριακοί Χώροι

Στον πίνακα που ακολουθεί έχουμε συμπεριλάβει τα δεδομένα του συστήματος φωτισμού για τους συνεδριακούς χώρους του ορόφου. Αν δούμε την κάτοψη, οι συνεδριακοί χώροι έχουν χωριστεί σε δύο επιμέρους χώρους όπου είναι αναγκαία η ύπαρξη δύο χωριστών συστημάτων φωτισμού.

Πίνακας 6: Δεδομένα Φωτισμού για τους Συνεδριακούς Χώρους

Συνεδριακός Χώρος	Ύψος [m]	Πλήθος Φωτιστικών ν	Αριθμός Λαμπτήρων ανά Φωτιστικό	Ισχύς Λαμπτήρα [W]	Τύπος Λαμπτήρα	Εγκατεστημένη Ισχύς [W]
H4-7A	3	11	2	36	T8	792
H4-7B	3	11	2	36	T8	792
H4-8A	3	15	2	36	T8	1080
H4-8B	3	6	2	36	T8	432
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς						3096

Στη συνέχεια παραθέτουμε στον πίνακα που ακολουθεί τις τιμές της έντασης φωτισμού στους συνεδριακούς χώρους (έχουμε θεωρήσει πάλι 0.8m ύψους επιφάνειας εργασίας).

Πίνακας 7: Ένταση Φωτισμού στους Συνεδριακούς Χώρους

Συνεδριακός Χώρος	Ένταση φωτισμού (lx)	
	Με ανοιχτά τα περισσότερα σκίαστρα (Με φυσικό φωτισμό)	
	Στις επιφάνειες εργασίας	Σε άλλες θέσεις
H4-7 A	350 - 800	250 - 1200
H4-7 B	450 - 800	350 - 1200
H4-8 A	Δίχως πρόσβαση	
H4-8 B	350 - 850	250 - 1000

Στους συνεδριακούς χώρους του ορόφου υπάρχουν πολλά γραφεία τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις μέσα στον χώρο. Για όσα βρίσκονται κοντά στα ανοίγματα, ο φυσικός φωτισμός είναι συνήθως αρκετός για να καλύψει τις ανάγκες φωτισμού κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Ωστόσο, η χρήση τεχνητού φωτισμού εξακολουθεί να είναι απαραίτητη, καθώς οι εσωτερικές περιοχές των συνεδριακών χώρων, που βρίσκονται μακριά από τα ανοίγματα,

παραμένουν αρκετά σκοτεινές. Η κατάσταση αυτή, σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή σχεδιασμό των κυκλωμάτων φωτισμού και την απουσία συστημάτων ελέγχου, οδηγεί σε περιττή ενεργειακή κατανάλωση.

Επιπλέον, πολλές από τις περσίδες είναι δυσλειτουργικές. Όταν παραμένουν ανοιχτές, δεν επιτρέπουν τη ρύθμιση της θάμβωσης, ενώ όταν είναι μόνιμα κλειστές, περιορίζουν τη δυνατότητα αξιοποίησης του φυσικού φωτισμού. Η τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων δεν είναι η ιδανική, τόσο λόγω εσφαλμένου αρχικού σχεδιασμού όσο και εξαιτίας μεταγενέστερων παρεμβάσεων. Σε πολλές περιπτώσεις, τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα κοντά στους εσωτερικούς τοίχους, προκαλώντας θάμβωση στους χρήστες. Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα φωτιστικά έχουν μετακινηθεί από την αρχική τους θέση, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των φωτιστικών πραγματοποιήθηκαν μετά την αρχική εγκατάσταση του συστήματος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν εκτεθειμένα καλώδια που κρέμονται από την οροφή.

4.2.4 Τουαλέτες και Κλιμακοστάσιο

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για τις τουαλέτες και για το κλιμακοστάσιο του ορόφου όπου συγκεντρώνουμε όλα τα δεδομένα φωτισμού στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 8: Δεδομένα Φωτισμού στις Τουαλέτες

Χώρος	Ύψος [m]	Πλήθος Φωτιστικών ν	Αριθμός Λαμπτήρων ανά Φωτιστικό	Ισχύς Λαμπτήρα [W]	Τύπος Λαμπτήρα	Εγκατεστη μένη Ισχύς [W]
T4-1	2,7	6	4	36	T8	432
K4-1	3,1	1	2	36	T8	72
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς						504

Μαζί με τα δεδομένα φωτισμού μετρήθηκε και η ένταση στις τουαλέτες και στο κλιμακοστάσιο και οι μετρήσεις παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 9: Ένταση Φωτισμού στην Τουαλέτα και στο Κλιμακοστάσιο

Χώρος	Ένταση φωτισμού (lx)		
	Με κλειστά σκίαστρα (Δίχως φυσικό φωτισμό)	Με ανοιχτά σκίαστρα (Με φυσικό φωτισμό)	
	Επίπεδο Άλλες θέσεις αναφοράς	Επίπεδο αναφοράς	Άλλες θέσεις
Τουαλέτα T4-1	<i>Δεν υπάρχουν σκίαστρα</i>	800	500 - 900
Κλιμακοστάσιο K4-1		400 - 1200	200 - 1300

Στο κλιμακοστάσιο, ο φυσικός φωτισμός είναι επαρκής για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, καθιστώντας τη χρήση τεχνητού φωτισμού συχνά περιττή. Από την άλλη, στις τουαλέτες, το σύστημα φωτισμού είναι υπερδιαστασιολογημένο, με αποτέλεσμα την περιττή κατανάλωση ενέργειας. Τα μικρά ανοίγματα που υπάρχουν επιτρέπουν την είσοδο φυσικού φωτισμού, ωστόσο δεν επαρκούν από μόνα τους για να καλύψουν τις ανάγκες φωτισμού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση τεχνητού φωτισμού.

4.2.5 Προσομοίωση της παρούσας κατάστασης με το ReluxPro

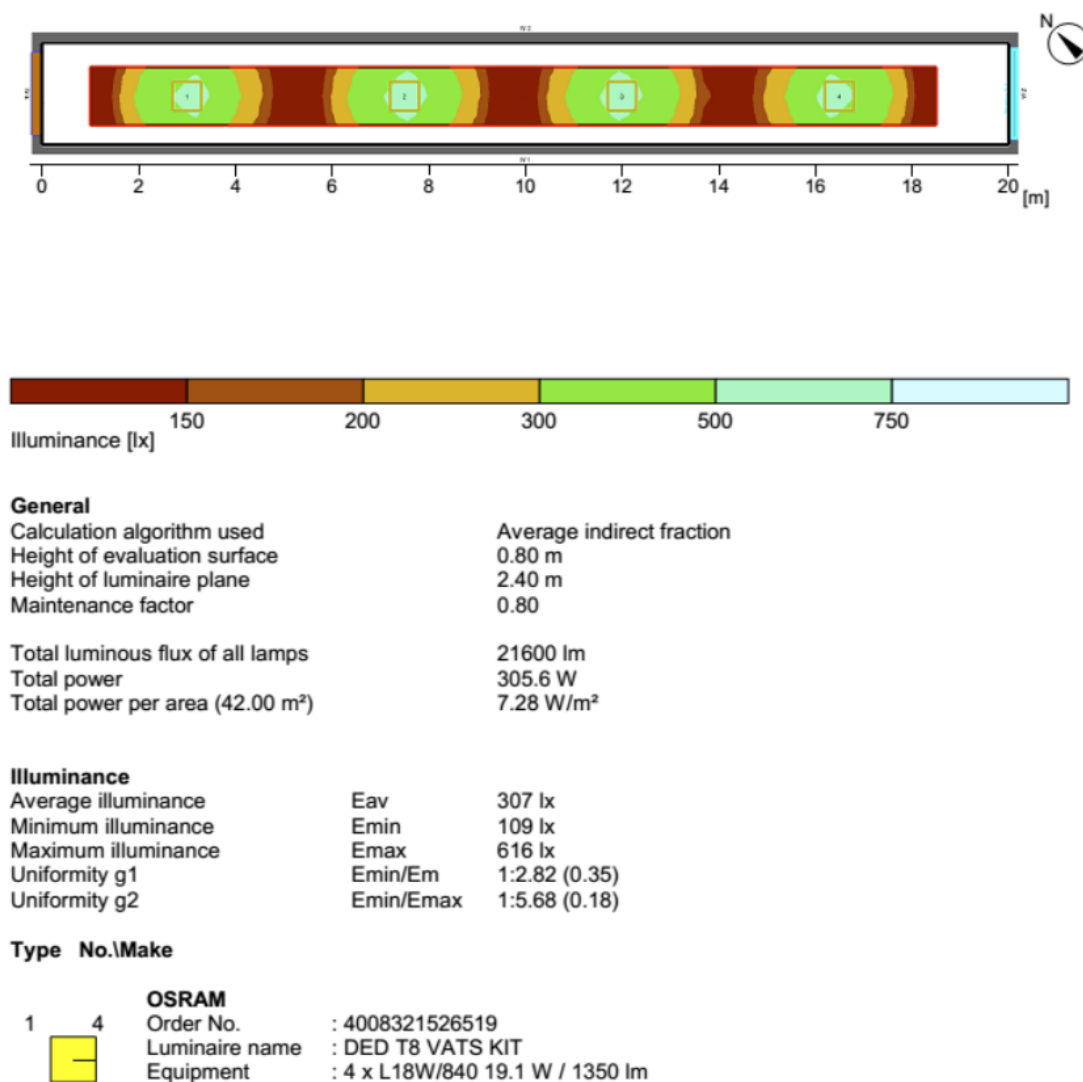
Για την επαλήθευση της ακρίβειας των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού σε επιλεγμένους χώρους του ορόφου που μελετήσαμε. Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού ReluxPro, το οποίο χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση φωτιστικών εγκαταστάσεων.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η συνέπεια των αποτελεσμάτων, στο πρόγραμμα προσομοίωσης εισήχθησαν οι ίδιες συνθήκες ημερομηνίας και ώρας που ίσχυαν κατά τη διάρκεια των πραγματικών μετρήσεων. Όσον αφορά τα παράθυρα, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί συντελεστές, ανάλογα με την κατάσταση τους:

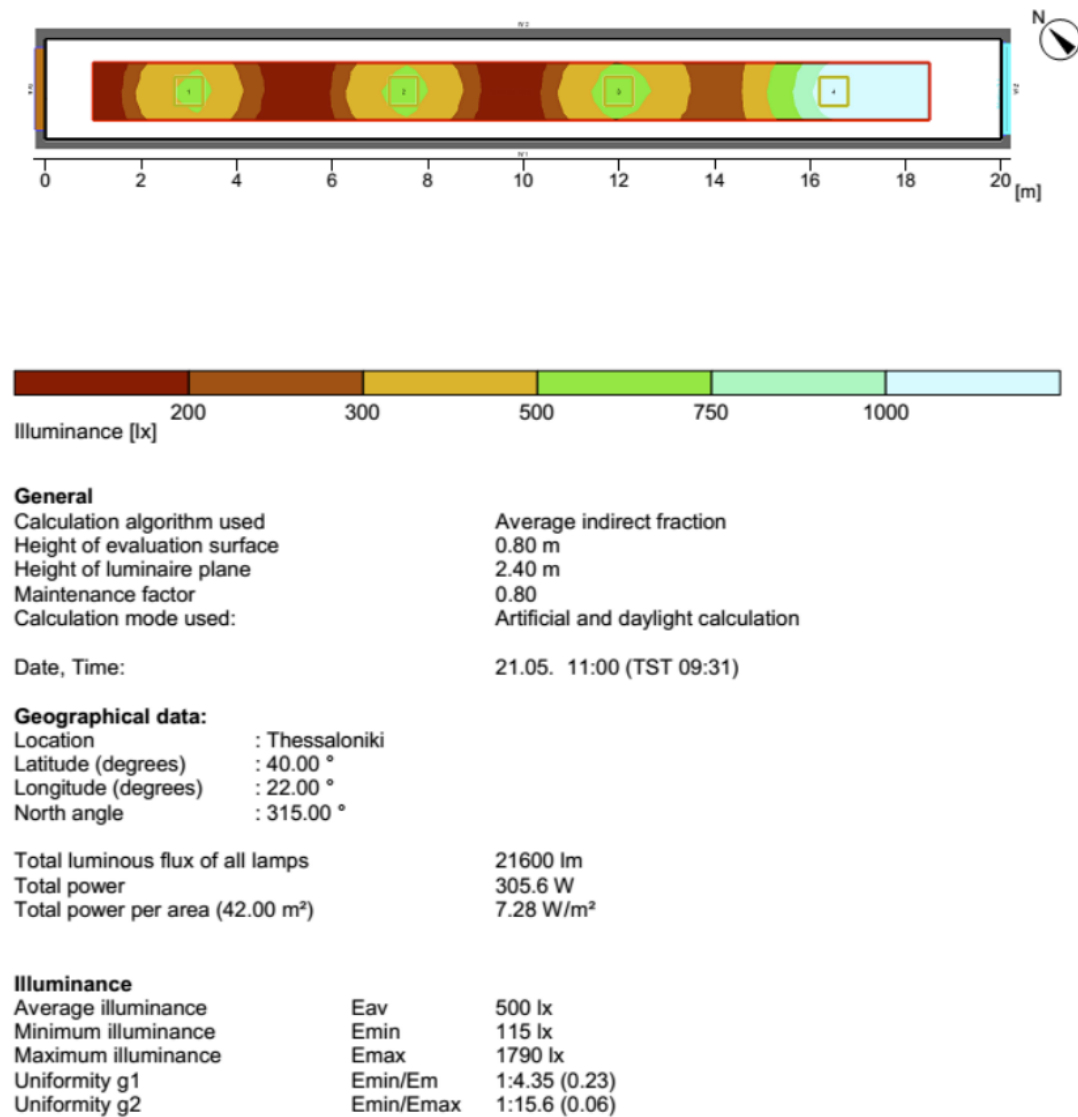
- Ο συντελεστής ρύπανσης (pollution factor) ορίστηκε σε 0,7 ή 0,8, ανάλογα με την πραγματική κατάστασή τους.

- Ο συντελεστής διαπερατότητας (transmission) τέθηκε στο 0,8 για διπλά τζάμια και στο 0,9 για μονά τζάμια.

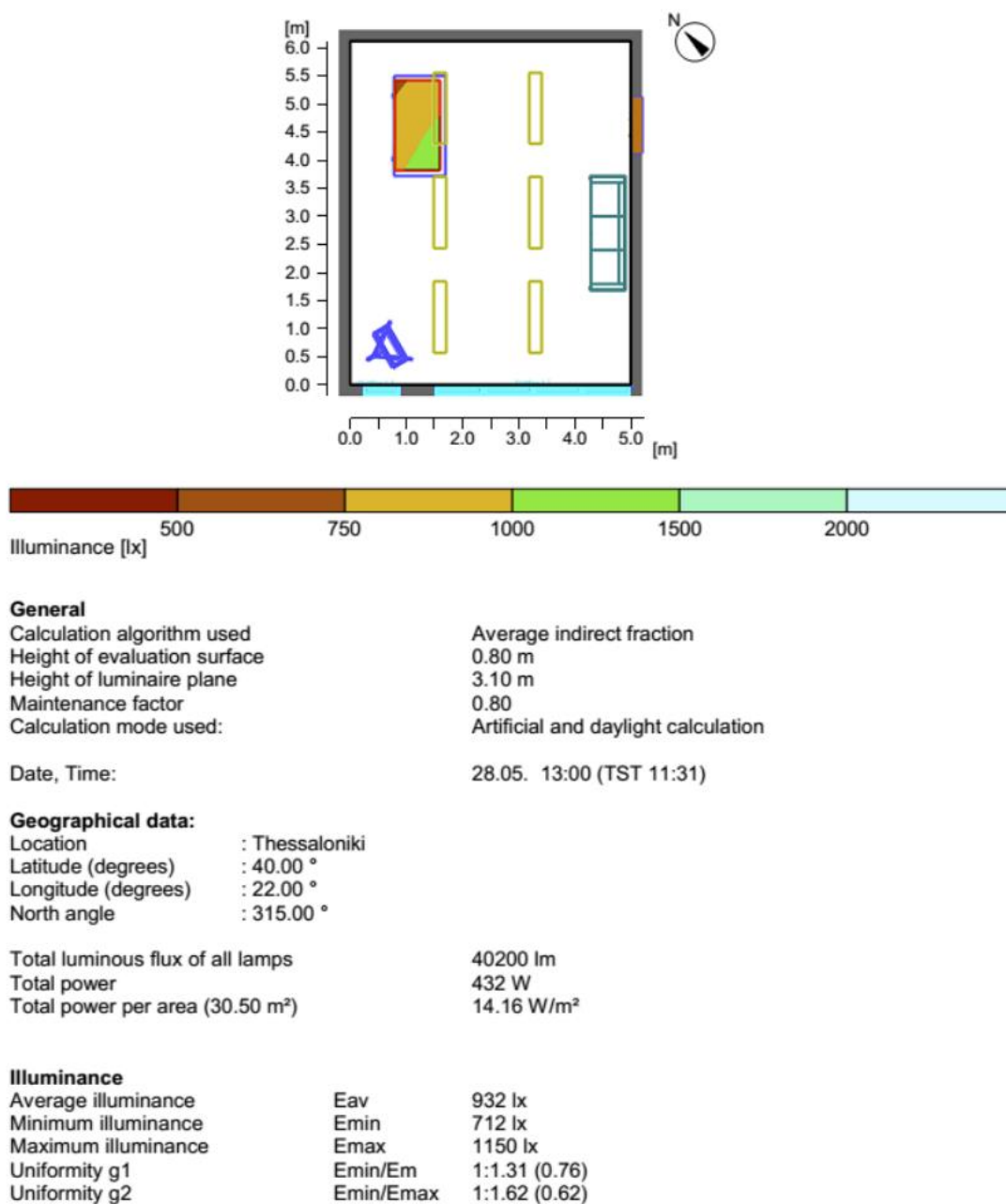
Επιπλέον, η προσομοίωση βασίστηκε σε προδιαγραφές του CIE, θεωρώντας ότι ο ουρανός αντιστοιχεί σε clear sky. Ακολουθούν μία σειρά από screenshots που απεικονίζουν την προσομοίωσή μας όπως αυτή έλαβε χώρα στο ReluxPro. Έχουμε επιλέξει το διάδρομο Δ4-1 όπου συνδυάζονται φυσικός και τεχνητός φωτισμός. Επιπλέον, έχει γίνει επιλογή για παρουσίαση και το γραφείο E4-6 που βρίσκεται στη γωνία του ορόφου που μελετήσαμε



Εικόνα 4: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Τεχνητού Φωτισμού-Διάδρομος Δ4-1



Εικόνα 5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης τεχνητού και Φυσικού Φωτισμού-Διάδρομος Δ4-1



Εικόνα 6: Αποτελέσματα Προσομοίωσης τεχνητού και φυσικού φωτισμού-Γραφείο Ε4-6

Στον πίνακα που ακολουθεί έχουμε συγκεντρώσει όλη την εγκατεστημένη ισχύ του ορόφου ταξινομημένη ανά χώρο. Ο συγκεκριμένος πίνακας θα μας βοηθήσει να συγκρίνουμε την παρούσα κατάσταση με την πρότασή μας και να δούμε την ενεργειακή αναβάθμιση του ορόφου.

Πίνακας 10: Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς Παρούσας Κατάστασης

Κατηγορία Χώρου	Εγκατεστημένη Ισχύς [W]
Γραφεία	2808
Διάδρομοι	1008
Συνεδριακοί Χώροι	3096
Τουαλέτες	432
Κλιμακοστάσια	72
ΣΥΝΟΛΟ	<u>7416</u>

Στον πίνακα που ακολουθεί αντιπαραβάλλουμε τα αποτελέσματα των πραγματικών μετρήσεων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Relux δίχως φυσικό φωτισμό σε κάποιους χώρους του ορόφου που μελετήσαμε.

Πίνακας 11: Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοίωσης και πραγματικών μετρήσεων χωρίς φυσικό φωτισμό

Χώρος	Ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (lx) (Δίχως φυσικό φωτισμό)		
	Πραγματική μέτρηση (1)	Προσομοίωση στο ReluxPro (2)	Διαφορά (%) [(1)-(2)] / (2)
Διάδρομος Δ4-1	100 - 450, στον κεντρικό άξονα 80 - 300, αλλού	$E_{av}= 307$ $E_{min}= 109$ $E_{max}= 616$	-26,6%, για την ελάχιστη τιμή -26,9%, για τη μέγιστη τιμή

Γραφείο E4-6	350, με 1 κύκλωμα ανοιχτό 520, με 2 κυκλώματα ανοιχτά	$E_{av}=497$, με 1 κύκλωμα ανοιχτό $E_{av}= 660$, με 2 κυκλώματα ανοιχτά	-29,6%, με 1 κύκλωμα ανοιχτό -21,2%, με 2 κυκλώματα ανοιχτά
-------------------------	--	--	--

Ακολουθεί ένα αντίστοιχος πίνακας όπου για τα ίδια δωμάτια έχουμε τα αποτελέσματα με φυσικό φωτισμό.

Πίνακας 12: Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοίωσης και πραγματικών μετρήσεων με φυσικό φωτισμό

Χώρος	Ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (lx) (Με φυσικό φωτισμό, clear sky)		
	Πραγματική μέτρηση (1)	Προσομοίωση στο ReluxPro (2)	Διαφορά (%) [(1)-(2)] / (2)
Διάδρομος Δ4-1	100 - 1400, στον κεντρικό άξονα 80 - 1600, αλλού	$E_{av}= 500$ $E_{min}= 115$ $E_{max}= 1790$	-30,4%, για την ελάχιστη τιμή -10,6%, για τη μέγιστη τιμή
Γραφείο E4-6	580, με 1 κύκλωμα ανοιχτό 750, με 2 κυκλώματα ανοιχτά	$E_{av}=787$, με 1 κύκλωμα ανοιχτό $E_{av}= 932$, με 2 κυκλώματα ανοιχτά	-26,3%, με 1 κύκλωμα ανοιχτό -19,5%, με 2 κυκλώματα ανοιχτά

Τα αποτελέσματα των πραγματικών μετρήσεων εμφανίζονται μειωμένα κατά 10% έως 30% σε σύγκριση με αυτά της προσομοίωσης. Αυτή η απόκλιση θεωρείται αναμενόμενη και μπορεί να ερμηνευθεί λαμβάνοντας υπόψη τους ακόλουθους παράγοντες:

- Διαφορές στα φωτιστικά σώματα: Τα φωτιστικά που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση διαθέτουν ηλεκτρονικά ballast και παρουσιάζουν μικρές διαφορές στο οπτικό σύστημα, τον συντελεστή απόδοσης (LOR) και τον συντελεστή συντήρησης, σε σχέση με τα πραγματικά φωτιστικά του κτιρίου.

- Κατάσταση λαμπτήρων: Πολλοί από τους λαμπτήρες στα φωτιστικά του κτιρίου δεν λειτουργούν. Επιπλέον, η φωτεινή ροή των λαμπτήρων φθορισμού έχει μειωθεί εξαιτίας της γήρανσης, της ρύπανσης και της έλλειψης συντήρησης τόσο των ίδιων όσο και των φωτιστικών σωμάτων.
- Συνθήκες ουρανού: Στην προσομοίωση θεωρήθηκε ότι ο ουρανός ήταν καθαρός (clear sky), σύμφωνα με το πρότυπο CIE. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των πραγματικών μετρήσεων, παρατηρήθηκε παρουσία νεφών, τα οποία επηρέασαν την ένταση του φυσικού φωτισμού. Αν ο ουρανός ήταν εντελώς καθαρός, οι μετρήσεις θα είχαν υψηλότερες τιμές.
- Προσεγγιστική τοποθέτηση φωτιστικών και επιφανειών εργασίας: Η προσομοίωση βασίστηκε σε προσεγγιστική χωροθέτηση των φωτιστικών και των γραφείων, καθώς η ακριβής τοποθέτηση ήταν ανέφικτη. Μικρές αποκλίσεις στη θέση τους (μερικών εκατοστών) μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.
- Εκτιμώμενες ανακλαστικότητες και συντελεστές διαπερατότητας: Στο λογισμικό προσομοίωσης, οι χρωματισμοί και οι υφές των εσωτερικών επιφανειών (όπως τοίχοι, δάπεδα και οροφές) εισήχθησαν κατά προσέγγιση. Κατά συνέπεια, οι ανακλαστικότητες των εσωτερικών επιφανειών και οι συντελεστές διαπερατότητας των υαλοπινάκων ενδέχεται να διαφέρουν από τις πραγματικές τιμές, επηρεάζοντας έτσι την προσομοίωση.
- Παρουσία εμποδίων στις πραγματικές μετρήσεις: Κατά τη διάρκεια των πραγματικών μετρήσεων, προκλήθηκαν σκιάσεις στο όργανο μέτρησης από διάφορα αντικείμενα, όπως στοίβες βιβλίων, έγγραφα, ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς και από την παρουσία ατόμων στον χώρο. Αυτά τα εμπόδια μείωσαν τις τιμές της έντασης φωτισμού. Αν δεν υπήρχαν, οι μετρήσεις θα ήταν υψηλότερες.
- Ακρίβεια του οργάνου μέτρησης: Το όργανο μέτρησης έχει τυπική ακρίβεια 5% για φωτεινές εντάσεις κάτω των 10.000 lx, γεγονός που εισάγει ένα μικρό περιθώριο σφάλματος στις μετρήσεις.

4.3. Προτεινόμενη Κατάσταση Φωτισμού

Ο σχεδιασμός του φωτιστικού συστήματος σε ένα κτίριο που προορίζεται για πολυκατάστημα θα πρέπει να δημιουργεί ένα περιβάλλον που ενισχύει την ψυχολογική άνεση και τη θετική διάθεση των χρηστών. Παράλληλα, είναι απαραίτητο να εξασφαλίζει τα κατάλληλα επίπεδα φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας, επιτρέποντας στο προσωπικό να εκτελεί τις

καθημερινές του δραστηριότητες με αποτελεσματικότητα. Επιπλέον, η σωστή διαμόρφωση του φωτισμού συνδέεται άμεσα με την αξιοποίηση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών, συμβάλλοντας στη μείωση του λειτουργικού κόστους του κτιρίου.

Στους χώρους που μελετήσαμε, η συνιστώμενη θερμοκρασία χρώματος των λαμπτήρων κυμαίνεται μεταξύ 3.000 K και 5.000 K. Παράλληλα, προτείνεται οι λαμπτήρες να διαθέτουν δείκτη χρωματικής απόδοσης (CRI) τουλάχιστον 80, ώστε να διασφαλίζεται η ποιοτική και φυσική αναπαραγωγή των χρωμάτων στον χώρο. Παράλληλα, η ένταση φωτισμού, η ομοιομορφία της και ο βαθμός συνδυασμένης θάμβωσης οφείλουν να ικανοποιούν τις τιμές του πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 13: Ελάχιστη στάθμη γενικού φωτισμού E_m , βαθμός συνδυασμένης θάμβωσης UGR_L και ομοιομορφία της έντασης φωτισμού U_o ανά χρήση χώρου, με βάση το πρότυπο EN 12464.1. Πηγές: ReluxEnergy

Χρήση χώρου	E_m [lx]	UGR_L	U_o
Διάδρομοι	100	25	0,4
Κλιμακοστάσια	150	25	0,4
Τουαλέτες	100	22	0,4
Δωμάτια προθηκών προϊόντων	500	19	0,6

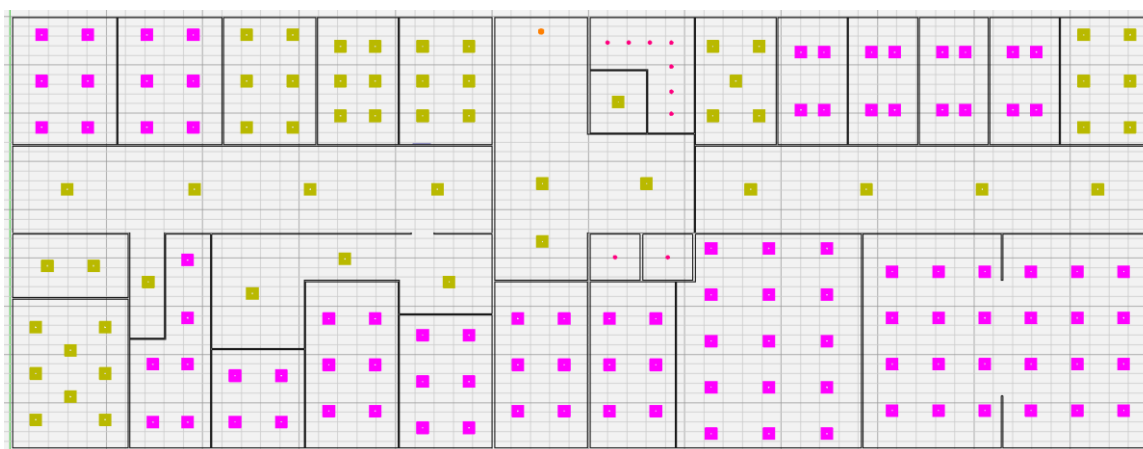
Η χρήση άμεσου φωτισμού συνιστάται όταν ο στόχος είναι η επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής φωτισμού σε όλο τον χώρο, εξασφαλίζοντας παράλληλα μέγιστη ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, προτείνεται η επιλογή φωτιστικών σωμάτων με οπτικά συστήματα που περιορίζουν τη θάμβωση εντός των επιτρεπτών ορίων, διασφαλίζοντας έτσι την οπτική άνεση των χρηστών. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του KENAK, η ελάχιστη φωτιστική απόδοση των συστημάτων γενικού φωτισμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 55 lm/W. Ειδικά για τα εμπορικά κτήρια, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή εγκατεστημένης ισχύος των φωτιστικών ανά τετραγωνικό μέτρο δομημένης επιφάνειας καθορίζεται ως εξής:

- 16 W/m² για τους χώρους καταστημάτων
- 6,4 W/m² για διαδρόμους και άλλους κοινόχρηστους βοηθητικούς χώρους.

4.4. Προσομοίωση φωτισμού στο Relux

Για την προσομοίωση του συστήματος φωτισμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ReluxPro, το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για τη μελέτη φωτιστικών εγκαταστάσεων. Το ReluxPro αξιοποιεί τον παγκόσμιο αλγόριθμο φωτισμού Radiosity, ο οποίος επιτρέπει τη ρεαλιστική προσομοίωση τόσο του φυσικού όσο και του τεχνητού φωτισμού.

Η μέθοδος Radiosity βασίζεται στη διαίρεση κάθε επιφάνειας σε μικρότερα στοιχεία, τα οποία ανακατευθύνουν το φως ομοιόμορφα μέσα στον χώρο. Στο πρόγραμμα προσομοίωσης εισήχθησαν μία σειρά από δεδομένα που διαμορφώθηκαν ανάλογα με το χώρο που μελετήθηκε. Στην εικόνα που ακολουθεί έχουμε τη νέα διαμόρφωση των φωτιστικών στην κάτοψη του χώρου:



Εικόνα 7: Η νέα διάταξη των φωτιστικών βασισμένη στην προσομοίωσή μας στο Relux

4.4.1 Δεδομένα Χώρου

Κάθε δωμάτιο-χώρος του ορόφου του πολυκαταστήματος μελετήθηκε με σκοπό τις δυνατότητες αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού του. Έτσι, για κάθε χώρο εισάγαμε τα δεδομένα που ακολουθούν:

1. **Γεωμετρία, διαστάσεις και ύψος των χώρων:** Καταγράφηκαν τα ακριβή χαρακτηριστικά κάθε χώρου, ωστόσο ο **προσανατολισμός** δεν ήταν απαραίτητος, καθώς στην παρούσα πρόταση δεν λαμβάνεται υπόψη ο φυσικός φωτισμός.
2. **Ύψος επιφάνειας αναφοράς και απόσταση από τους εσωτερικούς τοίχους:**
 - Η **επιφάνεια αναφοράς** για τις μετρήσεις ορίστηκε στα **0,8 m** για γραφεία, αίθουσες, χώρους εργασίας, ενώ για διαδρόμους και κλιμακοστάσια το ύψος της καθορίστηκε στα **0 m**.
 - Η **απόσταση της επιφάνειας αναφοράς από τους εσωτερικούς τοίχους** καθορίστηκε στα **0,5 m**.

3. Ανακλαστικότητα επιφανειών και υλικά κατασκευής:

- Οι ανακλαστικότητες των εσωτερικών επιφανειών καθορίστηκαν **προσεγγιστικά**, σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση των αδιαφανών επιφανειών του ορόφου.
- Συγκεκριμένα:
 - ✚ **Δάπεδο:** 30% – 40%
 - ✚ **Εσωτερικοί τοίχοι:** 70% – 85%
 - ✚ **Οροφή:** 80% – 90%

Στην εικόνα που ακολουθεί έχουμε ένα παράδειγμα από το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων στο Relux που αφορά το γραφείο E4-9.

	Material	rho
Floor	23 diffus	40....
Ceiling	24 diffus	80....
Wall		
W1	25 diffus	80....
W2	25 diffus	80....
W3	25 diffus	80....
W4	25 diffus	80....

Εικόνα 8: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων χώρου για το γραφείο E4-9

4.4.2 Στοιχεία Χώρων

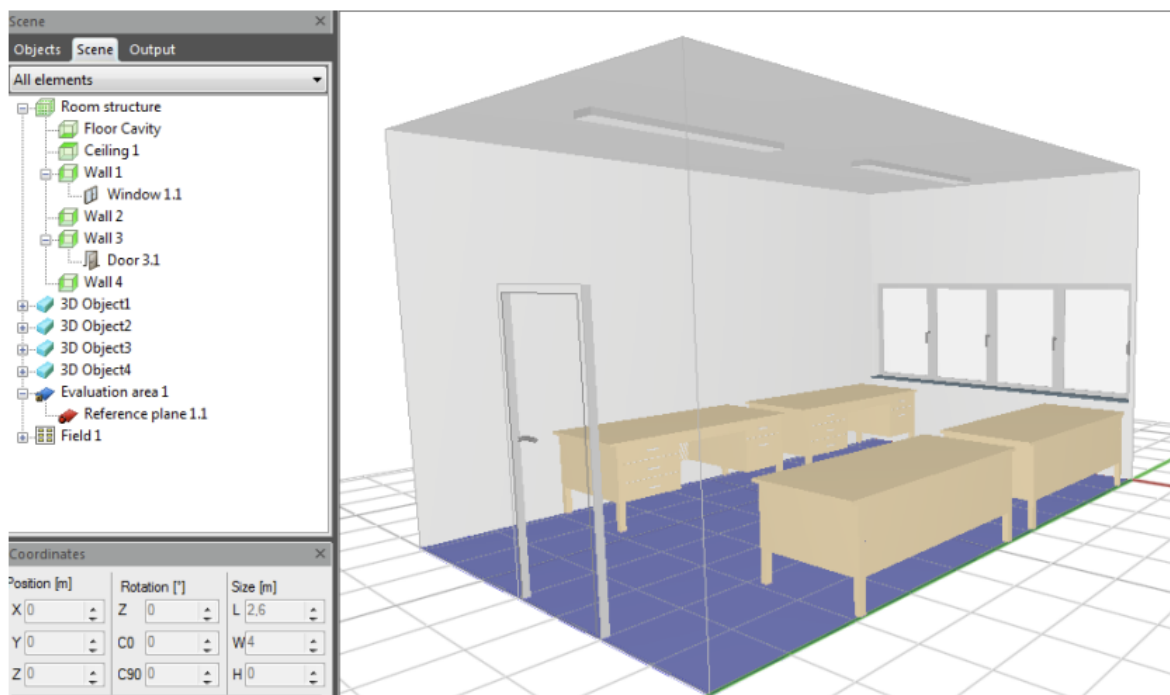
Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτουμε τα δεδομένα εισαγωγής στο Relux Pro για τις διαφανείς επιφάνειες των χώρων του ορόφου που μελετήθηκε. Επειδή είχαμε ως στόχο το ρεαλιστικό σχεδιασμό για τη μελέτη μας, εισάγαμε όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα για τα

παράθυρα, τις πόρτες και τα τρισδιάστατα αντικείμενα (γραφεία, καρέκλες, προθήκες προϊόντων) που υπάρχουν σε κάθε χώρο του ορόφου.

Πίνακας 14: Δεδομένα εισαγωγής στο ReluxPro για τις διαφανείς επιφάνειες των χώρων του ορόφου

Δεδομένα εισαγωγής για τα παράθυρα του ορόφου	
Υλικό	Γυαλί
Διαπερατότητα	0,8 για διπλά τζάμια (double glazing) 0,9 για μονά τζάμια (single glazing)

Στην εικόνα που ακολουθεί μπορούμε να δούμε και μία τρισδιάστατη απεικόνιση του γραφείου E4-10, στην οποία φαίνονται τα στοιχεία που έχουν τοποθετηθεί στο χώρο (πόρτα, γραφεία, παράθυρα).



Εικόνα 9: Τρισδιάστατη απεικόνιση του γραφείου E4-10, στην οποία φαίνονται τα στοιχεία που έχουν τοποθετηθεί στο χώρο (πόρτα, γραφεία και παράθυρα)

4.4.3 Στοιχεία υπολογισμού για την προσομοίωση του τεχνητού φωτισμού

Οι ρυθμίσεις που εισήχθησαν στην καρτέλα Calculation Manager επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια της προσομοίωσης του τεχνητού φωτισμού και, κατά συνέπεια, την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Για να διασφαλιστεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας στις προσομοιώσεις, επιλέχθηκε η μέθοδος average indirect fraction. Αυτή η επιλογή προσφέρει τον βέλτιστο συνδυασμό μεταξύ ακρίβειας αποτελεσμάτων και ταχύτητας προσομοίωσης, επιτρέποντας έτσι την αποδοτική και αξιόπιστη ανάλυση του συστήματος φωτισμού. Στον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε τις βασικές παραμέτρους που εισήχθησαν στο Calculation Manager για τη μελέτη τεχνητού φωτισμού:

Πίνακας 15: Δεδομένα εισαγωγής στο Relux Pro για τον υπολογισμό της μελέτης τεχνητού φωτισμού

Παράμετροι υπολογισμού για τον τεχνητό φωτισμό	
Ακρίβεια προσομοίωσης	average indirect fraction (προτείνεται)
Συντελεστής συντήρησης	0,8

4.4.4 Σχεδιασμός του νέου συστήματος φωτισμού

Για τον σχεδιασμό του νέου συστήματος φωτισμού στο κτίριο, στόχος ήταν η μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας σε συνδυασμό με τη δημιουργία συνθηκών οπτικής άνεσης για τους χρήστες. Ο σχεδιασμός συμμορφώθηκε πλήρως με τις απαιτήσεις των σχετικών προτύπων, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη στάθμη φωτισμού, την ομοιομορφία της έντασης φωτισμού και τον έλεγχο της θάμβωσης, προσαρμοσμένο στις ανάγκες κάθε χώρου. Προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, πραγματοποιήθηκε ολικός ανασχεδιασμός της θέσης των φωτιστικών, με στόχο τη χρήση όσο το δυνατόν μικρότερου αριθμού φωτιστικών ανά χώρο.

Οι κύριες αρχές σχεδιασμού που υιοθετήθηκαν περιλαμβάνουν:

- **Αναβάθμιση όλων των φωτιστικών σωμάτων** με νέας τεχνολογίας LED φωτιστικά. Η χρήση LED επιτρέπει μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, αυξημένη διάρκεια ζωής και ελάχιστη συντήρηση.
- **Κατάλληλη επιλογή θερμοκρασίας χρώματος (4000 K) και δείκτη χρωματικής απόδοσης ($CRI \geq 80$)**, ώστε να εξασφαλίζεται φυσικό και ευχάριστο φως στους εργασιακούς χώρους.
- **Χρήση φωτιστικών υψηλής φωτοτεχνικής απόδοσης (LOR μεταξύ 0,75 και 0,95)**, με οπτικά συστήματα που περιορίζουν τη θάμβωση και επιτρέπουν την ομοιόμορφη κατανομή της φωτεινής ροής.
- **Στρατηγική τοποθέτηση των φωτιστικών** ώστε να αποφεύγονται σκιές ή υπερφωτισμένα σημεία. Στα γραφεία, όπου ήταν εφικτό, τα φωτιστικά τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν της επιφάνειας εργασίας.

- **Ανασχεδιασμός των κυκλωμάτων φωτισμού** με στόχο τη λειτουργική ευελιξία και τη δυνατότητα επιμέρους ελέγχου (π.χ. ξεχωριστό κύκλωμα για τα φωτιστικά κοντά στα ανοίγματα), προκειμένου να αξιοποιείται στο μέγιστο ο φυσικός φωτισμός.
- **Περιορισμός της εγκατεστημένης ισχύος** κάτω από τα όρια που θέτει ο ΚΕΝΑΚ, με τιμές πολύ χαμηλότερες των 16 W/m² για γραφεία και 6,4 W/m² για διαδρόμους, διατηρώντας παράλληλα την απαραίτητη στάθμη φωτισμού.

Το αποτέλεσμα του ανασχεδιασμού ήταν ένα φωτιστικό σύστημα υψηλής απόδοσης, το οποίο όχι μόνο καλύπτει τις ανάγκες φωτισμού του κτιρίου, αλλά και συνεισφέρει καθοριστικά στη μείωση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους λειτουργίας. Το σύστημα είναι συμβατό με μελλοντικές επεκτάσεις ή προσθήκες αυτοματισμών, γεγονός που ενισχύει την βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα της επένδυσης σε βάθος χρόνου.

4.4.5 Προδιαγραφές φωτιστικών σωμάτων για την προσομοίωση της πρότασης ενεργειακής αναβάθμισης

Στους πίνακες που ακολουθούν παραθέτουμε τα φωτιστικά σώματα που προτείνονται με σκοπό την ενεργειακή αναβάθμιση του φωτισμού του χώρου. Όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί προτείνονται 4 φωτιστικά που έχουν ως σκοπό να αναβαθμίσουν και σε επίπεδο φωτισμού αλλά και σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας τον όροφο. Στο παράρτημα Β παρουσιάζεται αναλυτικός πίνακας με τις προδιαγραφές των φωτιστικών σωμάτων όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή (OPPLE). Σε κάθε φωτιστικό δίνουμε έναν κωδικό (Φ1, Φ2, Φ3, Φ4) στα πλαίσια αυτής της εργασίας για να τα αναφέρουμε στους επόμενους πίνακες. Αν κάνουμε τους υπολογισμούς για να βρούμε τη συνολική ισχύ των φωτιστικών σωμάτων της πρότασής μας έχουμε:

$$P_{total} = 55 \cdot 30 + 101 \cdot 34 + 1 \cdot 22 + 9 \cdot 10 = 5196 \text{ W}$$

Από αυτό και μόνο το αποτέλεσμα μπορούμε να δούμε ήδη την ενεργειακή αναβάθμιση του φωτισμού του ορόφου αφού σε σχέση με τον πίνακα 11 που έχουμε τη συνολική παρούσα εγκατεστημένη ισχύ των φωτιστικών (7416W) τώρα έχουμε μία ποσοστιαία μείωσης της τάξης:

$$\text{Ποσοστιαία Μείωση Εγκατεστημένης Ισχύος} = \frac{5196 - 7416}{7416} \cdot 100 = -29.93\%$$

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός Πίνακας με τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιήθηκαν

Πλήθος	Εταιρεία	Ονομασία	Κωδικός	Κατανάλωση [W]	Είδος φωτεινής πηγής
--------	----------	----------	---------	-------------------	----------------------

55	OPPLE	LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19	Φ1	30	1xLED 30 W
101	OPPLE	LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19	Φ2	34	1xLED 34 W
1	OPPLE	LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3	Φ3	22	1xLED 22 W
9	OPPLE	LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840	Φ4	10	1xLED 10 W

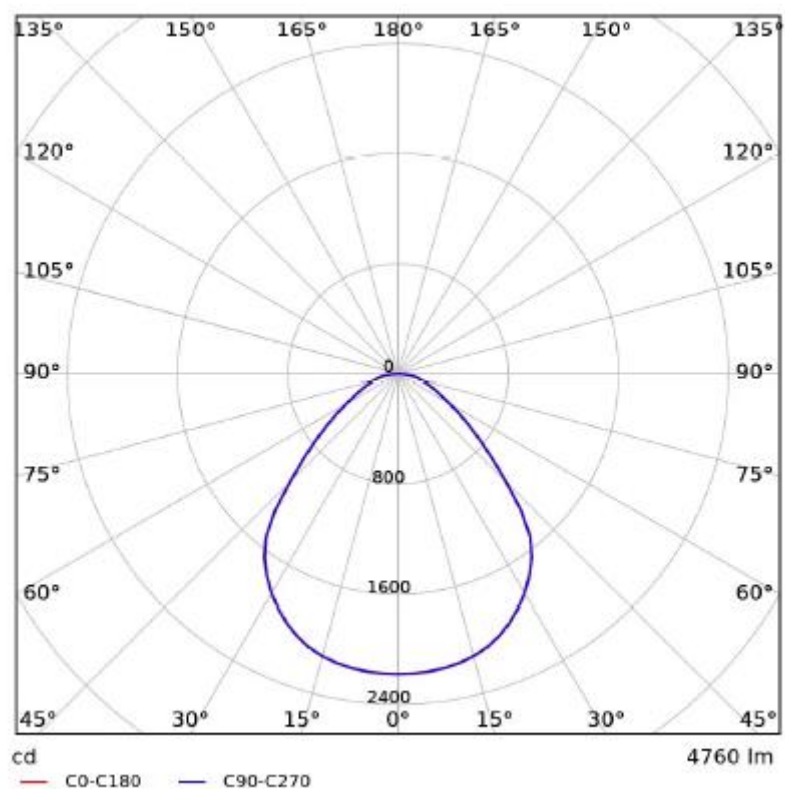
Σύνολο: 166 Φωτιστικά σώματα

Ενδεικτικές φωτογραφίες από τα φωτιστικά που χρησιμοποιήθηκαν έχουν παρθεί από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή και φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν (www.opple.com). Παράλληλα παρουσιάζονται και τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων:



Slim Panel Performer UGR19 G6

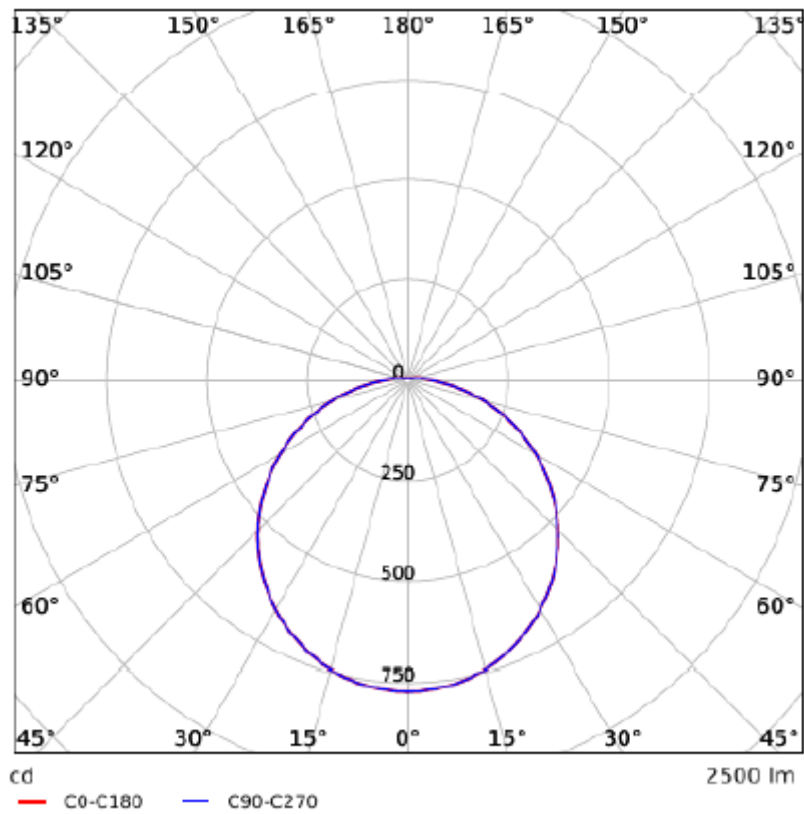
Εικόνα 10: Τα φωτιστικά LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19 και LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19 από το site της εταιρείας OPPL



Εικόνα 11: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19 / LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19



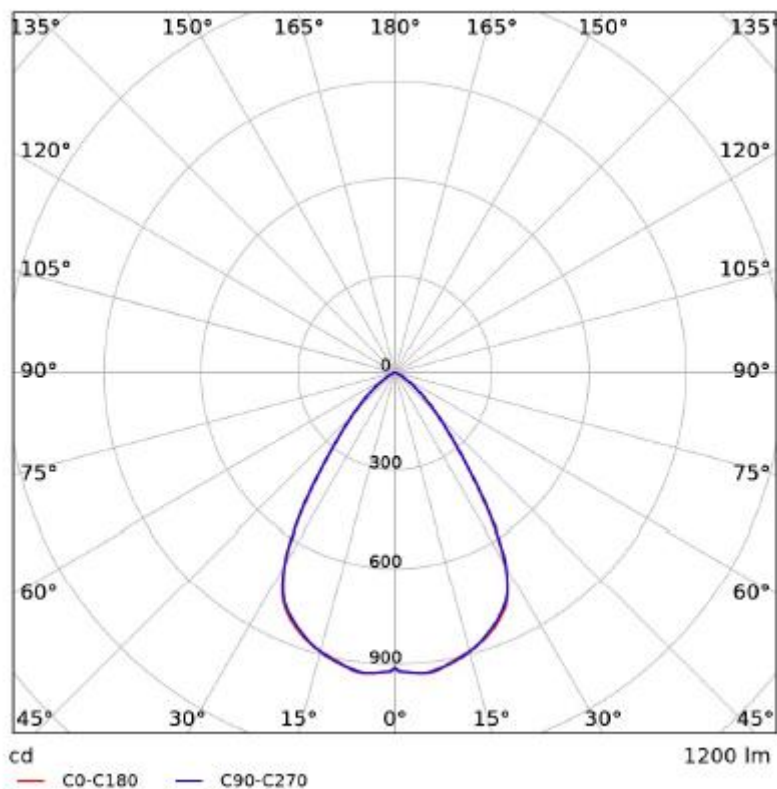
Εικόνα 12: Το φωτιστικό LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3 από το site της εταιρείας OPPL



Εικόνα 13: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3



Εικόνα 14: Το φωτιστικό LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840 από το site της εταιρείας OPPL



Εικόνα 15: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840

Αναλυτικές πληροφορίες για κάθε φωτιστικό σώμα που χρησιμοποιήθηκε υπάρχουν στο παράρτημα Β. Στη συνέχεια της εργασίας αναλύουμε την πρόταση ενεργειακής αναβάθμισης μέσω του Relux για κάθε χώρο ξεχωριστά. Για κάθε περίπτωση θα παρουσιάζουμε έναν πίνακα που συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας (είδος φωτιστικού, εμβαδόν χώρου, συνολική ισχύς, ισχύς ανά επιφάνεια).

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Φωτοτεχνικής Μελέτης στο Relux

Χώρος	Εμβαδόν [m ²]	Φωτιστικό	Πλήθος Φωτιστικών	Εγκατεστημένη Ισχύς [W]	Ισχύς/Επιφάνεια [W/m ²]
Ασανσέρ 1	6,19	Φ4	1	10	1,62
Ασανσέρ 2	6,19	Φ4	1	10	1,62
Δωμάτιο 1	19,74	Φ1	2	60	3,04
Δωμάτιο 2	9,43	Φ1	1	30	3,18
Δωμάτιο Δ4-1	106,62	Φ1	4	120	1,13
Δωμάτιο Δ4-2	181,56	Φ1	8	240	1,32
Δωμάτιο Δ4-3	63,19	Φ1	3	90	1,2
Δωμάτιο Κ4-1	32,34	Φ3	1	22	1,2
Δωμάτιο Ε4-1	31,59	Φ1	6	180	5,7
Δωμάτιο Ε4-10	24,41	Φ2	4	136	5,57
Δωμάτιο Ε4-11	36,27	Φ2	6	204	5,62
Δωμάτιο Ε4-2	27,64	Φ1	6	180	6,51
Δωμάτιο Ε4-3	31,59	Φ1	6	180	5,7
Δωμάτιο Ε4-4	35,54	Φ2	6	204	5,74
Δωμάτιο Ε4-5	35,54	Φ2	6	204	5,74
Δωμάτιο Ε4-6	46,24	Φ1	8	240	5,19
Δωμάτιο Ε4-7	41,30	Φ2	6	204	4,94
Δωμάτιο Ε4-8	33,03	Φ2	6	204	6,18
Δωμάτιο Ε4-9	41,30	Φ2	6	204	4,94
Δωμάτιο Η4-1	27,64	Φ1	5	150	5,43
Δωμάτιο Η4-2	23,69	Φ2	4	136	5,74
Δωμάτιο Η4-3	23,69	Φ2	4	136	5,74
Δωμάτιο Η4-4	23,69	Φ2	4	136	5,74
Δωμάτιο Η4-5	23,69	Φ2	4	136	5,74
Δωμάτιο Η4-6	31,59	Φ1	6	180	5,7
Δωμάτιο Η4-7	166,46	Φ2	24	816	4,9
Δωμάτιο Η4-8 Α	37,99	Φ2	6	204	5,37
Δωμάτιο Η4-8 Β	103,84	Φ2	15	510	4,91
Δωμάτιο Τ4-1	22,44	Φ4	7	70	3,12
ΣΥΝΟΛΑ	1220,01		166	5196	139,65
				Μέση Ισχύς/Επιφάνεια	4,26

Επιπλέον, αν διαιρέσουμε τη συνολική ισχύ με τη συνολική επιφάνεια των χώρων έχουμε την πυκνότητα ισχύος με μονάδες W/m² και μπορούμε να δούμε ότι έχει βελτιωθεί σε σχέση με την παρούσα κατάσταση. Έτσι έχουμε:

$$\text{Πυκνότητα Ισχύος(Παρούσα Κατάσταση)} = \frac{7416W}{1220,01m^2} = 6,08W/m^2$$

$$\text{Πυκνότητα Ισχύος (Πρόταση Ενεργειακής Αναβάθμισης με LED)} = \frac{5196W}{1220,01m^2}$$

$$= 4,25W/m^2$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω βελτίωση έχει προκύψει διατηρώντας τη φωτεινότητα του χώρου στα ίδια και καλύτερα επίπεδα όπως θα δούμε στα υποκεφάλαια που ακολουθούν. Επιπρόσθετα στον πίνακα που ακολουθεί έχουμε κατηγοριοποιήσει τους χώρους με βάση τη λειτουργία τους για να δούμε αν όντως και ανά κατηγορία χώρου έχουμε βελτίωση στην πυκνότητα ισχύος:

Πίνακας 18: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα της Πρότασής μας ανά κατηγορία χώρου

Κατηγορίες Χώρων	Εμβαδόν [m ²]	Φωτιστικά	Πλήθος Φωτιστικών	Εγκατεστημένη Ισχύς [W]	Μέση Ισχύς/Επιφάνεια [W/m ²]
Ασανσέρ	12,38	Φ4	2	20	1,62
Δωμάτια 1 και 2	29,17	Φ1	3	90	3,09
Δωμάτια Δ4-1 έως και Δ4-3	351,37	Φ1	15	450	1,28
Δωμάτια Ε4	384,45	Φ1 και Φ2	66	2140	5,57
Δωμάτια Η4-1 έως και Η4-6	153,99	Φ1 και Φ2	27	874	5,68
Δωμάτιο Η4-7	166,46	Φ2	24	816	4,9
Δωμάτια Η4-8 Α και Β	141,83	Φ2	21	714	5,03
Τ4-1 και Κ4-1	54,78	Φ4 και Φ3	8	92	1,68
ΣΥΝΟΛΑ	1220,01	Φ1, Φ2, Φ3, Φ4	166	5196	4,26

Ο Πίνακας 19 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα της πρότασης αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού ανά κατηγορία χώρου στο υπό μελέτη κτίριο. Συγκεντρώνει κρίσιμα δεδομένα, όπως η συνολική επιφάνεια ανά κατηγορία, ο τύπος και ο αριθμός των φωτιστικών σωμάτων που εγκαταστάθηκαν, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού (σε Watt), καθώς και η μέση τιμή της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας (σε W/m²).

Η συγκεντρωτική αυτή αποτύπωση επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της κατανομής της ισχύος στους διάφορους χώρους του κτιρίου. Για παράδειγμα, διαπιστώνεται ότι οι χώροι όπως τα δωμάτια Ε4 και τα Η4-1 έως Η4-6 παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές ισχύος

ανά επιφάνεια (άνω των 5 W/m^2), κάτι που συνδέεται με τις αυξημένες απαιτήσεις οπτικής άνεσης και έντασης φωτισμού στους συγκεκριμένους χώρους. Αντίθετα, χώροι όπως τα δωμάτια Δ4-1 έως Δ4-3 παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές ($1,28 \text{ W/m}^2$), γεγονός που υποδηλώνει επιτυχή ενεργειακή εξοικονόμηση χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα του φωτισμού.

Επιπλέον, διακρίνεται ότι ο συνολικός αριθμός φωτιστικών σωμάτων ανέρχεται σε 166, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 5196 W , γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθολογική κατανομή των φωτιστικών στο σύνολο των $1220,01 \text{ m}^2$ επιφάνειας. Η μέση ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο ($4,26 \text{ W/m}^2$) τεκμηριώνει τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του KENAK και των αντίστοιχων ευρωπαϊκών προτύπων. Συνολικά, ο πίνακας αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του επανασχεδιασμένου φωτισμού ως προς τη σχέση απόδοσης–ενέργειας, προσφέροντας ένα ισορροπημένο σύστημα με σαφή λειτουργικά, τεχνικά και ενεργειακά πλεονεκτήματα.

4.4.5.1 Ασανσέρ

Οι χώροι των δύο ανελκυστήρων του κτιρίου (Ασανσέρ 1 και Ασασέρ 2) αποτελούν μικρές και κλειστές περιοχές, με εμβαδόν $6,19 \text{ m}^2$ έκαστος. Ο φωτιστικός σχεδιασμός των εν λόγω χώρων βασίστηκε στην ανάγκη για ασφαλή, αξιόπιστο και ομοιόμορφο φωτισμό, δεδομένου ότι πρόκειται για μεταβατικούς χώρους, όπου η σωστή ορατότητα είναι κρίσιμη για τη μετακίνηση των χρηστών.

Και στους δύο ανελκυστήρες τοποθετήθηκε ένα φωτιστικό σώμα τύπου Φ4, με ονομαστική ισχύ 10 W . Η αντίστοιχη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος προς εμβαδόν διαμορφώνεται στα $1,62 \text{ W/m}^2$, τιμή η οποία χαρακτηρίζεται ως άκρως αποδοτική ενεργειακά, καθώς βρίσκεται πολύ κάτω από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια που ορίζει ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK). Παράλληλα, το επίπεδο φωτισμού που επιτυγχάνεται από το συγκεκριμένο τύπο φωτιστικού θεωρείται επαρκές για την κάλυψη των αναγκών σε φωτισμό τέτοιου τύπου χώρων.

Το φωτιστικό Φ4, σύμφωνα με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, αντιστοιχεί σε χωνευτό LED downlight, με ουδέτερη ή θερμή θερμοκρασία χρώματος ($3000\text{--}4000 \text{ K}$), υψηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης ($\text{CRI} \geq 80$) και ευρεία κατανομή φωτεινής ροής, ιδανική για ομοιόμορφο φωτισμό κάθετης επιφάνειας.

Προτείνεται η ενσωμάτωση αισθητήρων παρουσίας για την περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης, καθώς οι χώροι των ανελκυστήρων χρησιμοποιούνται κατά διαστήματα και δεν απαιτούν μόνιμο φωτισμό πλήρους έντασης. Επιπλέον, η χαμηλή θερμική εκπομπή και η μεγάλη διάρκεια ζωής των LED φωτιστικών ενισχύουν τη βιωσιμότητα και την αξία της επένδυσης στον συγκεκριμένο τομέα.

Συνολικά, ο φωτιστικός σχεδιασμός για τους ανελκυστήρες του κτιρίου συνδυάζει ενεργειακή αποδοτικότητα, λειτουργική επάρκεια και μειωμένο κόστος λειτουργίας, ενισχύοντας τη συνολική ποιότητα των ηλεκτρομηχανολογικών υποδομών του κτιρίου.

4.4.5.2 Δωμάτια 1 και 2

Τα Δωμάτια 1 και 2, με εμβαδά $19,74 \text{ m}^2$ και $9,43 \text{ m}^2$ αντίστοιχα, αποτελούν μικρούς και βοηθητικούς ή ειδικής χρήσης χώρους του κτιρίου. Για τον φωτισμό αυτών των χώρων επιλέχθηκε η τοποθέτηση ενός φωτιστικού τύπου Φ1 ανά δωμάτιο, ισχύος 60 W για το Δωμάτιο 1 και 30 W για το Δωμάτιο 2. Η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο ανέρχεται σε $3,04 \text{ W/m}^2$ για το Δωμάτιο 1 και $3,18 \text{ W/m}^2$ για το Δωμάτιο 2, τιμές που κρίνονται συμμορφούμενες με τις απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, ενώ διασφαλίζουν ικανοποιητικό φωτιστικό αποτέλεσμα.

Ο τύπος φωτιστικού Φ1 υποδεικνύει χωνευτό ή εμφανές LED panel ή downlight, κατάλληλο για γενικό φωτισμό. Η επιλογή ενός μόνο φωτιστικού ανά χώρο είναι επαρκής, καθώς οι συγκεκριμένοι χώροι διαθέτουν μικρή επιφάνεια και δεν απαιτούν υψηλή ένταση φωτισμού σε όλο το εύρος τους. Τα φωτιστικά αυτά διαθέτουν ουδέτερο λευκό φως (4000 K) και υψηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης ($\text{CRI} \geq 80$), προσφέροντας καθαρό και ξεκούραστο φωτισμό, χωρίς να προκαλείται θάμβωση.

Η εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικής τεχνολογίας LED στις περιπτώσεις αυτές κρίνεται επιτυχημένη, καθώς επιτυγχάνεται ο συνδυασμός χαμηλής κατανάλωσης και επαρκούς φωτιστικής κάλυψης. Οι τιμές της ισχύος ανά m^2 είναι χαμηλότερες από τον μέσο όρο της εγκατάστασης του κτιρίου, στοιχείο που υποδηλώνει τη στοχευμένη χρήση φωτισμού, προσαρμοσμένη στις ανάγκες του κάθε χώρου.

Επιπλέον, για χώρους μικρής και διακοπτόμενης χρήσης, όπως υποδηλώνουν οι συγκεκριμένες περιπτώσεις, η ενσωμάτωση συστημάτων αυτοματισμού (π.χ. αισθητήρων παρουσίας ή φωτεινότητας) θα μπορούσε να ενισχύσει την ενεργειακή εξοικονόμηση και τη λειτουργική βιωσιμότητα του φωτισμού.

4.4.5.3 Δωμάτια Δ4-1, Δ4-2, Δ4-3

Οι χώροι Δ4-1, Δ4-2 και Δ4-3 αντιπροσωπεύουν σχετικά μεγάλους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου, με εμβαδά $106,62 \text{ m}^2$, $181,56 \text{ m}^2$ και $63,19 \text{ m}^2$ αντίστοιχα. Οι χώροι αυτοί αντιστοιχούν σε διαδρόμους, αμφιθεατρικές αίθουσες ή περιοχές διέλευσης με αυξημένες απαιτήσεις σε κατανεμημένο, ασφαλή και ομοιογενή φωτισμό.

Στο Δ4-1 τοποθετήθηκαν 4 φωτιστικά τύπου Φ1, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 120 W , που αντιστοιχεί σε $1,13 \text{ W/m}^2$. Αντίστοιχα, στο Δ4-2 χρησιμοποιήθηκαν 8 φωτιστικά Φ1,

συνολικής ισχύος 240 W, αποδίδοντας εξαιρετικά χαμηλή αναλογία 1,32 W/m². Στο Δ4-3 επιλέχθηκαν 3 φωτιστικά Φ1, ισχύος 90 W, με αναλογία 1,42 W/m². Και στις τρεις περιπτώσεις, η εγκατεστημένη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο είναι πολύ κάτω από το όριο των 6,4 W/m² που θέτει ο ΚΕΝΑΚ για κοινόχρηστους χώρους (όπως διάδρομοι και κυκλοφοριακοί χώροι).

Η αποδοτικότητα του σχεδιασμού ενισχύεται και από το γεγονός ότι η ισχύς είναι κατανεμημένη επαρκώς για να επιτευχθεί λειτουργικός φωτισμός, χωρίς υπερδιαστασιολόγηση. Ωστόσο, προτείνεται η ενσωμάτωση συστημάτων ελέγχου φωτισμού, όπως χρονοδιακόπτες ή αισθητήρες παρουσίας, ώστε να ενισχυθεί περαιτέρω η εξοικονόμηση ενέργειας στους διαδρόμους ή χώρους διαλείπουσας χρήσης.

Συνολικά, ο φωτιστικός σχεδιασμός για τους χώρους Δ4-1, Δ4-2 και Δ4-3 χαρακτηρίζεται από ενεργειακή αποδοτικότητα, οπτική άνεση και λειτουργικότητα, εναρμονισμένος με τις σύγχρονες απαιτήσεις βιωσιμότητας και ασφάλειας σε κτιριακές εγκαταστάσεις.

4.4.5.4 Δωμάτια E4-1 έως και E4-11

Οι χώροι με την ονομασία E4-1 έως και E4-11 αποτελούν ατομικά ή μικρά γραφεία και υποστηρικτικούς χώρους εργασίας, με επιφάνειες που κυμαίνονται από 27,64 m² έως και 46,24 m². Ο σχεδιασμός του φωτισμού σε αυτούς τους χώρους βασίστηκε στην ανάγκη για επάρκεια φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, ενεργειακή αποδοτικότητα και ομοιόμορφη κατανομή της φωτεινότητας, ώστε να διασφαλιστεί η οπτική άνεση των εργαζομένων.

Τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν είναι κυρίως τύπου Φ1 και Φ2, με ισχύ 30–34 W, LED panels με χαμηλό δείκτη θάμβωσης (UGR<19). Ο αριθμός των φωτιστικών ανά χώρο κυμαίνεται μεταξύ 4 και 8, ανάλογα με την κάτοψη και τη χρήση του γραφείου. Η εγκατεστημένη ισχύς κυμαίνεται από 136 W έως και 240 W ανά χώρο, ενώ η αναλογία ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας παραμένει σταθερά μεταξύ 5,19 και 6,51 W/m², με μέσο όρο περίπου 5,7 W/m². Οι τιμές αυτές κινούνται κάτω από το όριο των 16 W/m² για χώρους γραφείων, όπως ορίζεται από τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ).

Η χρήση LED φωτιστικών με υψηλή φωτεινή απόδοση, σε συνδυασμό με την καλή γεωμετρική κατανομή τους στην κάτοψη των χώρων, προσφέρει συνεχές και σταθερό επίπεδο φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (ύψος 0,8 m), αποτρέποντας την παρουσία σκιάσεων και ενισχύοντας τη λειτουργικότητα των γραφείων. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (CRI ≥ 80) των φωτιστικών διασφαλίζει ακριβή απόδοση των χρωμάτων, κάτι που είναι σημαντικό σε επαγγελματικά περιβάλλοντα.

Ωστόσο, παρατηρείται σε ορισμένους χώρους μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος χωρίς διαφοροποίηση ανάλογα με την εγγύτητα σε φυσικό φως (π.χ. παράθυρα). Προτείνεται, όπου είναι δυνατόν, η μελλοντική ενσωμάτωση ανεξάρτητων κυκλωμάτων ή συστημάτων ρύθμισης έντασης φωτισμού (dimming) σε γραμμές φωτιστικών κοντά στα ανοίγματα, ώστε να αξιοποιείται αποτελεσματικά ο φυσικός φωτισμός κατά τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες. Επίσης, η προσθήκη αισθητήρων παρουσίας ή φωτεινότητας μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω την ενεργειακή εξοικονόμηση, χωρίς να μειώνεται η ποιότητα φωτισμού.

Συνοψίζοντας, ο φωτιστικός σχεδιασμός για τα γραφεία E4-1 έως και E4-11 χαρακτηρίζεται από συνοχή, λειτουργικότητα και ενεργειακή αποδοτικότητα, ικανοποιώντας τις βασικές απαιτήσεις εργονομίας, άνεσης και βιωσιμότητας που τίθενται σε σύγχρονα κτίρια γραφείων.



Εικόνα 16: Τρισδιάστατη κατανομή της λαμπρότητας στο γραφείο E4-7

4.4.5.5 Δωμάτια H4-1 έως και H4-6

Οι χώροι H4-1 έως και H4-6 αποτελούν ομάδες μικρών δωματίων, βοηθητικούς χώρους ή αποθήκες, με επιφάνειες μεταξύ 23,69 m² και 31,59 m². Παρά τις ομοιότητες στις διαστάσεις, ο φωτιστικός εξοπλισμός παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ως προς τον τύπο και την εγκατεστημένη ισχύ.

Συγκεκριμένα:

- Το H4-1 (27,64 m²) εξοπλίζεται με 5 φωτιστικά τύπου Φ1, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 150 W, που αντιστοιχεί σε 5,43 W/m².
- Οι χώροι H4-2, H4-3, H4-4 και H4-5, με ίδια εμβαδά 23,69 m², διαθέτουν από 4 φωτιστικά τύπου Φ2 έκαστος, με ισχύ 136 W και λόγο 5,74 W/m².
- Το H4-6 (31,59 m²) περιλαμβάνει 6 φωτιστικά τύπου Φ1, συνολικής ισχύος 180 W, με λόγο 5,7 W/m².

Η συνοχή στις τιμές ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας αποδεικνύει έναν σχεδιασμό βασισμένο σε συγκεκριμένες μελέτες φωτιστικής έντασης, ο οποίος διασφαλίζει την επαρκή κάλυψη των επιφανειών εργασίας χωρίς ενεργειακή υπερβολή. Οι τιμές αυτές βρίσκονται πολύ κάτω από το όριο των 16 W/m² που θέτει ο KENAK για αντίστοιχους χώρους, γεγονός που υποδηλώνει ορθολογική επιλογή φωτιστικών σωμάτων.

Η διάταξη των φωτιστικών εξασφαλίζει ομοιομορφία στον φωτισμό χωρίς σκιάσεις, ενώ παράλληλα η χρήση τεχνολογίας LED περιορίζει τη θερμική καταπόνηση των χώρων και μειώνει σημαντικά τις απαιτήσεις συντήρησης. Προτείνεται η προσθήκη αισθητήρων παρουσίας ή dimming σε αυτούς τους χώρους, καθώς είναι μικροί και ενδέχεται να μη χρησιμοποιούνται συνεχώς, με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντικό περιθώριο εξοικονόμησης ενέργειας χωρίς απώλεια λειτουργικότητας.

4.4.5.6 Ο χώρος H4-7

Ο χώρος H4-7 αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους χώρους του κτιρίου, με επιφάνεια 166,46 m², γεγονός που υποδηλώνει τη χρήση του ως μία αίθουσα πολλαπλών χρήσεων. Για την κάλυψη των φωτιστικών αναγκών του, τοποθετήθηκαν 24 φωτιστικά σώματα τύπου Φ2, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 816 W. Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας διαμορφώνεται στα 4,9 W/m², τιμή που βρίσκεται αισθητά κάτω από το θεσμικό όριο των 16 W/m² για χώρους εκπαιδευτικής χρήσης, όπως προβλέπεται από τον KENAK.

Η επιλογή του φωτιστικού τύπου Φ2 υποδηλώνει τη χρήση επιφανειακών ή γραμμικών φωτιστικών LED υψηλής φωτεινής απόδοσης, με θερμοκρασία χρώματος 4000 K και δείκτη χρωματικής απόδοσης (CRI) ≥ 80 . Η ποσότητα των φωτιστικών, σε συνδυασμό με τη γεωμετρική διανομή στον χώρο, εξασφαλίζει υψηλή ομοιομορφία φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας (ύψος 0,8 m), που είναι ζωτικής σημασίας για τη διεξαγωγή οπτικά απαιτητικών δραστηριοτήτων.

Η ισχύς των 4,9 W/m² δείχνει βέλτιστη σχέση μεταξύ ενεργειακής κατανάλωσης και φωτιστικής επάρκειας, ιδιαίτερα για έναν τόσο μεγάλο και λειτουργικά κρίσιμο χώρο. Σε αντίθεση με μικρότερους χώρους, εδώ η διάσπαση των φωτιστικών σε διακριτά κυκλώματα θα μπορούσε να επιτρέψει ευέλικτη χρήση του φωτισμού, ανάλογα με τη ζώνη ή το είδος της δραστηριότητας που εκτελείται (π.χ. σεμινάρια, εργασίες, δοκιμές).

Συνολικά, ο σχεδιασμός φωτισμού του χώρου H4-7 αποτελεί ένα επιτυχημένο παράδειγμα κλιμακούμενης εφαρμογής LED φωτισμού μεγάλης κλίμακας, που συνδυάζει χαμηλή ειδική κατανάλωση, λειτουργικότητα και καλύπτει με πληρότητα τις απαιτήσεις ενός σύγχρονου χώρου πολυκαταστήματος.



Εικόνα 17: Τρισδιάστατη κατανομή λαμπρότητας στο χώρο H4-7

4.4.5.7 Χώροι H4-8 A και B

Οι χώροι H4-8A και H4-8B αποτελούν επιμέρους τμήματα ενός μεγαλύτερου χώρου εκθέσεων πολυκαταστήματος. Με επιφάνειες $37,99 \text{ m}^2$ για τον H4-8A και $103,84 \text{ m}^2$ για τον H4-8B, εξυπηρετούν εξειδικευμένες δραστηριότητες με διαφορετικές απαιτήσεις φωτισμού, διατηρώντας όμως κοινή σχεδιαστική φιλοσοφία.

- H4-8A

Ο χώρος H4-8A διαθέτει 6 φωτιστικά τύπου Φ2, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 204 W . Η αναλογία ισχύος ανά τετραγωνικό μέτρο ανέρχεται σε $5,37 \text{ W/m}^2$, τιμή η οποία διασφαλίζει επαρκή φωτισμό για εργασίες ακριβείας και παράλληλα συμμορφώνεται με το ανώτατο επιτρεπτό όριο των 16 W/m^2 του KENAK για εσωτερικούς εκπαιδευτικούς χώρους.

Η διάταξη 6 φωτιστικών σε επιφάνεια περίπου 38 m^2 υποδεικνύει πυκνό, καλά κατανομημένο δίκτυο φωτισμού, που ενισχύει την ομοιομορφία και την κατακόρυφη κατανομή φωτιστικής έντασης στις επιφάνειες εργασίας. Ο τύπος Φ2 αντιστοιχεί σε φωτιστικό LED panel ή γραμμικό armature με $\text{UGR} < 19$ και $\text{CRI} \geq 80$, ιδανικό για χρήση σε αίθουσες πολλαπλών λειτουργιών.

- H4-8B

Ο μεγαλύτερος από τους δύο, ο χώρος H4-8B, καλύπτει $103,84 \text{ m}^2$ και εξοπλίζεται με 15 φωτιστικά τύπου Φ2, συνολικής ισχύος 510 W . Η ειδική ισχύς ανέρχεται σε $4,91 \text{ W/m}^2$, μια από τις χαμηλότερες του συνόλου της μελέτης, που μαρτυρά εξαιρετική ενεργειακή απόδοση χωρίς να γίνονται παραχωρήσεις στην ποιότητα φωτισμού.

Η χρήση 15 φωτιστικών προσφέρει ακριβή έλεγχο κατανομής φωτός, ιδιαίτερα σημαντικό για την αποφυγή σκιάσεων και την επίτευξη φωτιστικής ομοιομορφίας σε χώρους όπου ενδέχεται να

συνυπάρχουν διαφορετικά προϊόντα που απαιτούν διαφορετικές στάθμες φωτισμού, σταθμοί εργασίας ή επιφάνειες διαφορετικής λειτουργικής διάταξης. Η ισχύς των 510 W είναι ισοδύναμη με παλαιότερα συστήματα πολλαπλάσιας κατανάλωσης, προσφέροντας ουσιαστική εξοικονόμηση ενέργειας και μειωμένο λειτουργικό κόστος.



Εικόνα 18: Τρισδιάστατη κατανομή λαμπρότητας στο χώρο H4-8 A-B

4.4.5.8 Χώροι T4-1 και K4-1 (Τουαλέττα και Κλιμακοστάσιο)

Οι χώροι T4-1 και K4-1 αντιστοιχούν σε βοηθητικές χρήσεις του κτιρίου, τουαλέτες και κλιμακοστάσια αντίστοιχα, όπως υποδηλώνεται από τη συντομογραφία της ονομασίας τους. Παρότι εξυπηρετούν δευτερεύουσες λειτουργίες, ο φωτισμός τους είναι ουσιώδους σημασίας για την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και τη συνεχή πρόσβαση.

- T4-1 – Τουαλέτα

Ο χώρος T4-1 έχει επιφάνεια 22,44 m² και διαθέτει 7 φωτιστικά σώματα τύπου Φ4, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 70 W. Η πυκνότητα ισχύος είναι 3,12 W/m², μια εξαιρετικά χαμηλή τιμή, ενδεικτική της χρήσης μικρών σε ισχύ αλλά αποδοτικών φωτιστικών σωμάτων, επιτοιχίων ή χωνευτών LED downlights.

Η ισχύς των 10 W ανά φωτιστικό, μαζί με τον συνολικό αριθμό τους, εξασφαλίζει επαρκή και ομοιόμορφη κάλυψη σε χώρους με διαμερίσματα, καθρέφτες, νιπτήρες και επιφάνειες με αυξημένη ανάγκη ορατότητας. Η επιλογή φωτιστικού τύπου Φ4 υποδηλώνει ειδικό φωτιστικό για χώρους υγιεινής, με υψηλό δείκτη στεγανότητας (IP), ώστε να αντέχει σε συνθήκες υγρασίας και ατμού.

- K4-1 – Κλιμακοστάσιο

Ο χώρος K4-1, επιφάνειας 32,34 m², φωτίζεται με 2 φωτιστικά σώματα τύπου Φ1, συνολικής ισχύος 60 W, με αναλογία 1,86 W/m² — μία από τις χαμηλότερες στο σύνολο της εγκατάστασης. Αυτό είναι εφικτό λόγω του ότι τα κλιμακοστάσια, αν και απαιτούν επαρκή φωτισμό για λόγους ασφάλειας, δεν απαιτούν υψηλά επίπεδα έντασης φωτισμού σε όλη την επιφάνεια.

Οι χώροι T4-1 και K4-1, παρά τον βοηθητικό τους χαρακτήρα, παρουσιάζουν υποδειγματικό σχεδιασμό φωτισμού: εξαιρετικά χαμηλές καταναλώσεις, σωστή επιλογή φωτιστικών για τις συνθήκες λειτουργίας, και ισορροπημένη ισχύς ανά m². Η περαιτέρω ενεργειακή βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί με αισθητήρες παρουσίας, αφού αυτοί οι χώροι δεν χρησιμοποιούνται συνεχώς.



Εικόνα 19: Τρισδιάστατη κατανομή λαμπρότητας στην τουαλέτα T4-1

4.5. Αποτελέσματα και αξιολόγηση

Με σκοπό την αξιόπιστη αξιολόγηση της πρότασής μας συγκρίνεται η ενεργειακή κατανάλωση [kWh/yr] του υπάρχοντος με το προτεινόμενο σύστημα φωτισμού του προς μελέτη ορόφου. Παράλληλα στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται όλοι οι βασικοί δείκτες του συστήματος φωτισμού της πρότασης Α με τους αντίστοιχους του υπάρχοντος συστήματος φωτισμού του κτιρίου Δ. Για τους υπολογισμούς λήφθηκαν υπόψη τα εξής (θεωρώντας μέση τιμή KWh 0,094€/KWh με βάση τα τιμολόγια ηλεκτρικής ενέργειας για εμπορικούς καταναλωτές του Ιουνίου του 2025) :

$$\Lambda. K. = E_{\text{κατ}} * 0,09412, E_{\text{πρωτ}} = E_{\text{κατ}} * 2,9, P = E_{\text{κατ}} * 0,989$$

Οι συντομογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν στα εξής μεγέθη:

$S \Lambda.K.$: Ετήσιο λειτουργικό κόστος [€/yr],

$S E_{\text{κατ}}$: Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση [kWh/yr],

$S E_{\text{πρωτ}}$: Ετήσια πρωτογενής ενέργεια [kWh/yr],

$S P$: Ετήσια εκπομπή ρύπων CO₂ [kgCO₂/yr].

Πίνακας 19: Συγκριτική απεικόνιση όλων των βασικών δεικτών μεταξύ της παρούσας και της προτεινόμενης κατάστασης του συστήματος φωτισμού

	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση [kWh/yr]	Ετήσια πρωτογενής ενέργεια [kWh/yr]	Ετήσια εκπομπή ρύπων CO ₂ [kgCO ₂ /yr]	Ετήσιο λειτουργικό κόστος [€/yr]
Παρούσα κατάσταση	347.795,15	1.008.605,94	343.969,40	32.734,50
Πρόταση	118.596,76	343.930,60	117.292,20	11.162,30
Διαφορά	229.198,39	664.675,34	226.677,20	21.572,20
Ποσοστιαία Μείωση (%)	65,90%			

Η εφαρμογή της πρότασής μας οδήγησε επίσης σε μείωση της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος φωτισμού κατά 65,9%, δηλαδή κατά 229.198,39 kWh/έτος. Παράλληλα, σημειώθηκε ανάλογη μείωση στην ισοδύναμη ετήσια πρωτογενή ενέργεια κατά 664.675,34 kWh/έτος, στις ετήσιες εκπομπές ρύπων CO₂ κατά 226.677,2 kgCO₂/έτος και στο ετήσιο λειτουργικό κόστος κατά 21.572,2 €.

Ακολουθούν πίνακες και διαγράμματα με οικονομικά στοιχεία που σχετίζονται με την προτεινόμενη εγκατάσταση φωτισμού του ορόφου:

Είδος δαπάνης	Ενδεικτικό κόστος [€]
Αγορά φωτιστικών και λαμπτήρων	98.808
Εγκατάσταση εξοπλισμού	8.000
Σύνολο	106.808

Μελετώντας την επένδυση για ένα διάστημα 10 χρόνων (όσος είναι και ο χρόνος ζωής για μία μέση εγκατάσταση φωτισμού), προκύπτουν τα δεδομένα του πίνακα που ακολουθεί. Στο τέλος του 10^{ου} έτους, η αθροιστική εξοικονόμηση από την αναβάθμιση του συστήματος φωτισμού ανέρχεται σε 108914 €.

Πίνακας 20: Αθροιστικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος φωτισμού [€] και αθροιστική εξοικονόμηση [€] μετά την επίτευξη της απόσβεσης.

Έτος	Αθροιστικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας [€]		Αθροιστική εξοικονόμηση [€]
	Παρούσα	Πρόταση	
Αρχικά	0	106.808	-106.808
1 έτος	32.734,5	117.970	-85.235,8
2 έτος	65.469	129.133	-63.663,6
3 έτος	98.203,5	140.295	-42.091,4
4^ο έτος	130.938	151.457	-20.519,2
5^ο έτος	163.672,5	162.620	<u>1.053</u>
6^ο έτος	196.407	173.782	22.625,2
7^ο έτος	229.141,5	184.944	44.197,4
8^ο έτος	261.876	196.106	65.769,6
9^ο έτος	294.610,5	207.269	87.341,8
10^ο έτος	327.345	218.431	108.914

Στο 5^ο έτος μπορούμε να δούμε ότι έχουμε αθροιστική εξοικονόμηση θετική, άρα πρακτικά έχουμε καλύψει το ποσό που διαθέσαμε για επένδυση στο νέο σύστημα φωτισμού με LED.

4.6 Οδηγίες για Συντήρηση και Αναβάθμιση του Συστήματος Φωτισμού

Η επιτυχής υλοποίηση της προτεινόμενης λύσης φωτισμού στο κτίριο που μελετήσαμε προσφέρει σημαντικά ενεργειακά και λειτουργικά οφέλη. Ωστόσο, για τη μακροχρόνια διατήρηση των αποδόσεων και τη συνεχή προσαρμογή του συστήματος στις μεταβαλλόμενες ανάγκες χρήσης, απαιτείται η καθιέρωση ενός ολοκληρωμένου πλάνου συντήρησης και αναβάθμισης. Η παρούσα ενότητα περιλαμβάνει πρακτικές κατευθύνσεις και τεχνικές οδηγίες, απόλυτα προσαρμοσμένες στις τεχνολογίες και την εγκατάσταση που περιγράφονται στη μελέτη.

4.6.1 Τακτική και Προληπτική Συντήρηση

Η συντήρηση του συστήματος φωτισμού δεν περιορίζεται στην αντικατάσταση καμένων λαμπτήρων. Αντίθετα, περιλαμβάνει ένα σύνολο ενεργειών επιθεώρησης, καθαρισμού και διατήρησης της λειτουργικότητας και της φωτεινής απόδοσης των φωτιστικών και των εξαρτημάτων τους.

Ο περιοδικός καθαρισμός (ανά 6 μήνες) των φωτιστικών, κυρίως στις περσίδες, τους ανακλαστήρες και τα διαφανή καλύμματα, συμβάλλει:

- στη διατήρηση της φωτεινής ροής, καθώς η σκόνη και οι ρύποι μειώνουν τη διαπερατότητα,
- στην πρόληψη υπερθέρμανσης του φωτιστικού ή του οδηγού (driver),
- στην αισθητική ενίσχυση του χώρου.

4.6.2 Τήρηση Ημερολογίου Συντήρησης

Για τη συστηματική παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος φωτισμού, προτείνεται η δημιουργία ψηφιακού ημερολογίου συντήρησης, στο οποίο θα καταγράφονται:

- ημερομηνίες επιθεωρήσεων και παρεμβάσεων,
- παρατηρήσεις για μη λειτουργικά φωτιστικά,
- διαφορές στην απόδοση των κυκλωμάτων (π.χ. παρατεταμένη θάμβωση),
- μετρήσεις έντασης φωτισμού ανά χώρο σε δείγμα (1 φορά ετησίως).

Η πρακτική αυτή βοηθά στον προληπτικό εντοπισμό προβλημάτων, χωρίς να χρειάζεται η παρέμβαση αφού εμφανιστεί πλήρης βλάβη.

4.6.3 Στρατηγική Σταδιακής Αναβάθμισης

Αν και η υπάρχουσα πρόταση καλύπτει τις απαιτήσεις του KENAK και του EN 12464-1, η τεχνολογική εξέλιξη επιτρέπει την υιοθέτηση περαιτέρω λύσεων στο μέλλον. Συνιστάται η διαμόρφωση πλάνου αναβάθμισης ανά 5ετία, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει:

4.6.3.1 Ενσωμάτωση αισθητήρων παρουσίας/φωτεινότητας

Χώροι όπως οι διάδρομοι, οι τουαλέτες και τα βοηθητικά γραφεία είναι κατάλληλοι για την εγκατάσταση αισθητήρων κίνησης ή φωτεινότητας, με σκοπό τη μείωση της άσκοπης ενεργοποίησης των φωτιστικών.

4.6.3.2 Μετάβαση σε DALI ή KNX δίκτυα φωτισμού

Για καλύτερη διαχείριση φωτισμού ανά χώρο, μπορεί να εφαρμοστεί αναβάθμιση κυκλωμάτων σε ευφυή δίκτυα DALI, επιτρέποντας:

- ρύθμιση έντασης,
- παρακολούθηση βλαβών σε πραγματικό χρόνο,
- προγραμματισμό σεναρίων φωτισμού ανάλογα με τη χρήση.

4.6.4 Αντιμετώπιση Συχνών Προβλημάτων

Βάσει της μελέτης του κτιρίου, τα συνηθέστερα προβλήματα που καταγράφηκαν πριν την αναβάθμιση περιλάμβαναν:

- ανομοιομορφία φωτισμού λόγω αποσυρμένων λαμπτήρων ή σπασμένων ανακλαστήρων,
- λειτουργία όλων των φωτιστικών με έναν μόνο διακόπτη,
- φωτιστικά σε κακή κατάσταση συντήρησης.

Ως εκ τούτου, στην προτεινόμενη εγκατάσταση, η προληπτική αντιμετώπιση παρόμοιων φαινομένων επιτυγχάνεται με:

- περιοδικό έλεγχο των ανακλαστικών επιφανειών,
- καθαρισμό γρίλιας/περσίδων για αποφυγή θάμβωσης,
- χρήση modular φωτιστικών που επιτρέπουν γρήγορη αντικατάσταση εξαρτημάτων.

4.6.5 Προτάσεις για Εκπαίδευση Χρηστών και Τεχνικού Προσωπικού

Η αποτελεσματική χρήση και η μακροχρόνια βιωσιμότητα του συστήματος απαιτούν και την ενημέρωση των τελικών χρηστών και των τεχνικών υπευθύνων.

Προτείνονται:

- σύντομες εκπαιδεύσεις (1–2 ώρες) για το προσωπικό, σχετικά με την ορθή χρήση των φωτιστικών και των διακοπών,
- οδηγίες χρήσης ανά χώρο τοποθετημένες εμφανώς,
- τεχνικά εγχειρίδια συντήρησης (με οδηγίες από τους κατασκευαστές) να βρίσκονται στη διάθεση των υπευθύνων κτιρίου.

4.6.6 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή ενός συστηματικού πλάνου συντήρησης και σταδιακής αναβάθμισης στο κτίριο Δ είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ενεργειακής και λειτουργικής αποδοτικότητας του φωτιστικού συστήματος. Η τεχνική απλότητα των προτεινόμενων ενεργειών σε συνδυασμό με τη χαμηλή απαίτηση για επιπλέον πόρους τις καθιστούν εφαρμόσιμες ακόμα και με περιορισμένο προϋπολογισμό. Η συνέπεια στη συντήρηση και η σταδιακή ενσωμάτωση ευφών τεχνολογιών θα μετασχηματίσουν το σύστημα φωτισμού από μία στατική υποδομή σε έναν ζωντανό, δυναμικό μηχανισμό προσαρμοσμένο στις σύγχρονες απαιτήσεις χρήσης και βιωσιμότητας.

5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1 Κύρια ευρήματα της μελέτης

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει μια συνοπτική σύγκριση των βασικών μεγεθών που αφορούν την υλοποίηση της πρότασής μας για την ενεργειακή αναβάθμιση του συστήματος φωτισμού, σε αντιπαραβολή με τα αντίστοιχα στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης του φωτιστικού εξοπλισμού στο κτίριο που μελετήσαμε.

Στον πίνακα περιλαμβάνονται κρίσιμες παράμετροι όπως:

- η καταναλισκόμενη ενέργεια,
- και η εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους.

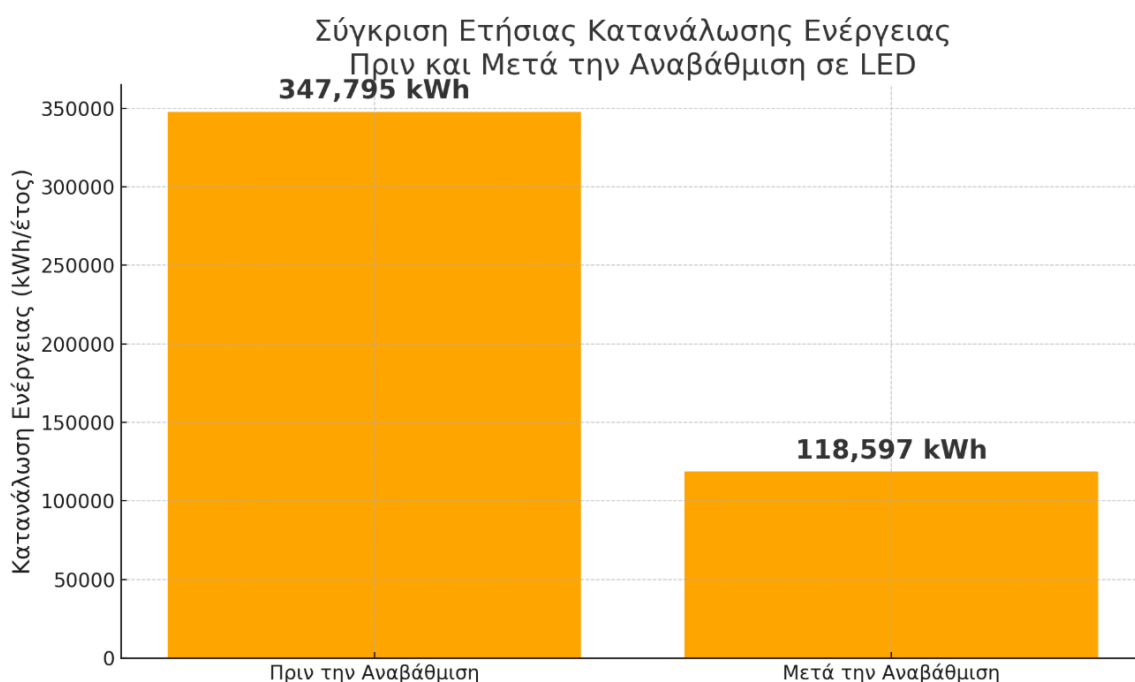
Αυτός ο συγκριτικός πίνακας επιτρέπει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της πρότασής μας και αναδεικνύει τα οφέλη της αναβάθμισης, τόσο σε επίπεδο απόδοσης όσο και σε επίπεδο λειτουργικών δαπανών.

Πίνακας 21: Συνοπτική παρουσίαση των βασικών μεγεθών της πρότασής μας

	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση [kWh/yr]	Πρωτογενής ενέργεια [kWh/yr]	Ετήσια εκπομπή ρύπων CO ₂ [kgCO ₂ /yr]	Κόστος	
				Εγκατάστασης [€]	Λειτουργίας [€/yr]
Παρούσα Κατάσταση	347.795	1.008.606	343.969,40	-	32.735,50
Πρόταση Ενεργειακή Αναβάθμισης	118.597	343.931	117.292,20	106.808	11.162,30
Απόλυτη	229.198	664.675	226.677,20	-106.808	21.572,20
Ποσοστιαία Μείωση	65,90%	65,90%	65,90%	65,90%	65,90%

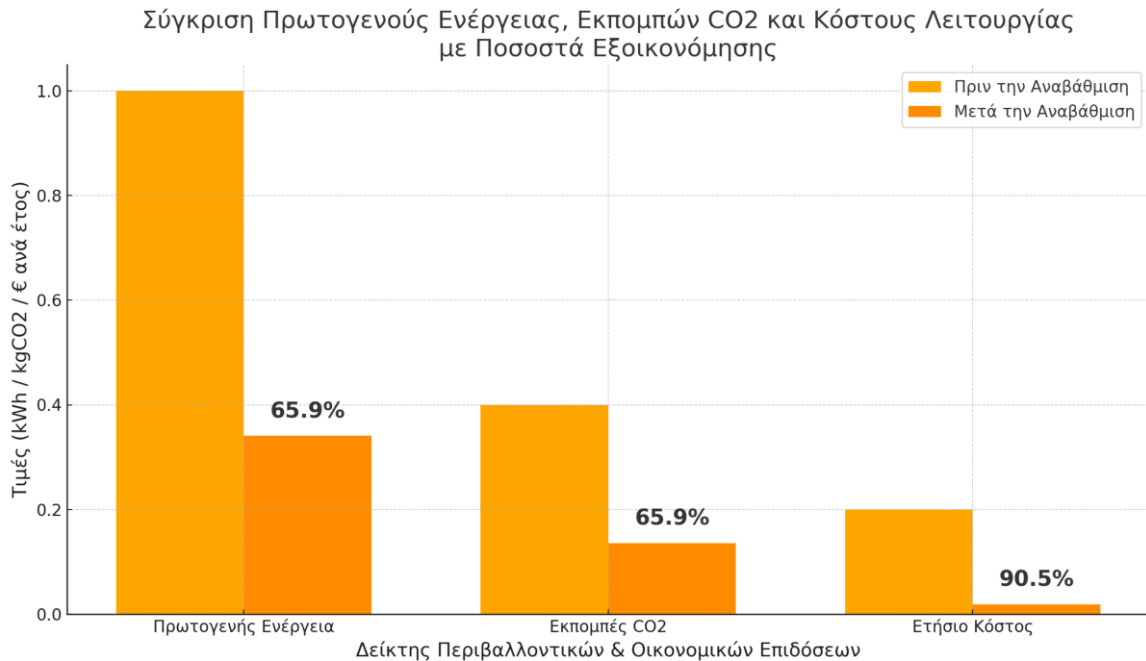
Όπως μπορούμε να δούμε στον παραπάνω πίνακα με την εφαρμογή της πρότασής μας επιτεύχθηκε μείωση της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης κατά 229,20 MWh/yr (65,9%). Αυτό συνεπάγεται τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων κατά 226,68 tnCO₂/yr και τη μείωση της πρωτογενούς ενέργειας κατά 664,68 MWh/yr. Λαμβάνοντας υπόψη πως το κόστος υλοποίησης της πρότασης Α ανέρχεται σε 106.808 € και το λειτουργικό κόστος μειώνεται κατά 21.572,2 €/yr, η απόσβεση επιτυγχάνεται σε μόλις 4,95 έτη. Στην πρότασή μας τηρήθηκαν με συνέπεια όλα τα ευρωπαϊκά και εθνικά πρότυπα που αφορούν τον φωτισμό σε εσωτερικούς χώρους εργασίας, καθώς και οι διεθνείς συστάσεις — ακόμα και αυτές που δεν είναι υποχρεωτικού χαρακτήρα αλλά προτείνονται από τη βιβλιογραφία ως καλές πρακτικές. Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί φαίνεται με παραστατικό τρόπο η βελτίωση στην κατανάλωση ενέργειας με την πρότασή μας.

Εικόνα 20: Ραβδόγραμμα που δείχνει την αισθητή βελτίωση στην κατανάλωση ενέργειας που θα επιφέρει η πρότασή μας για ενεργειακή αναβάθμιση με LED λαμπτήρες

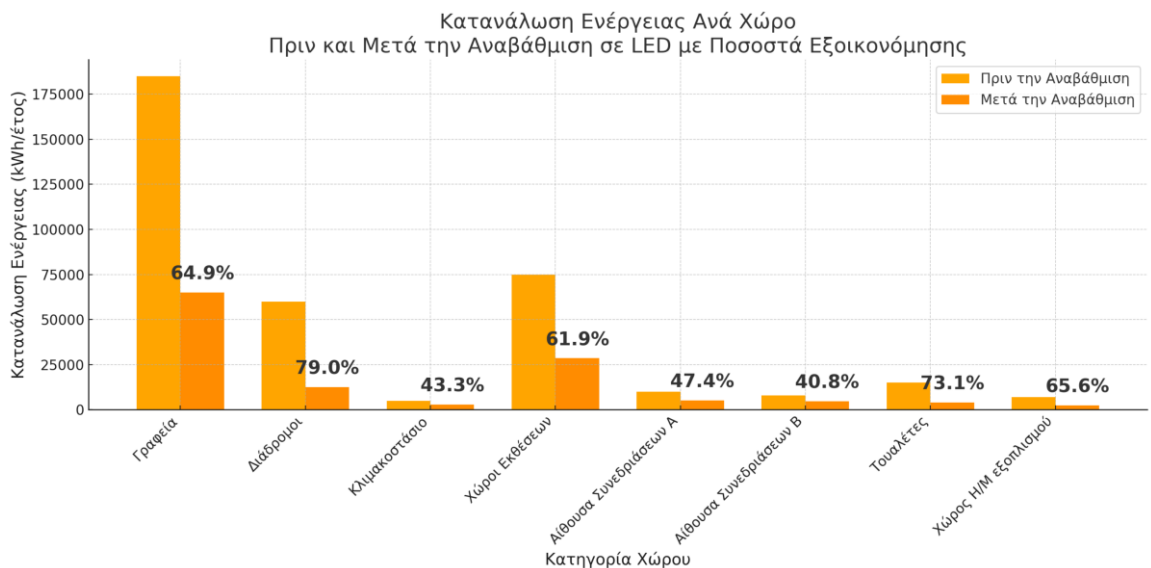


Όπως μπορούμε να δούμε εξοικονόμηση φτάνει περίπου το **66%** άρα η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται στο 1/3. Παραθέτουμε και το αντίστοιχο ραβδόγραμμα με την εξοικονόμηση σε εκπομπές CO₂ και την αντίστοιχη εξοικονόμηση σε Ευρώ.

Εικόνα 21: Συγκριτικό ραβδόγραμμα Πρωτογενούς ενέργειας-Εκπομπών CO₂ και ετήσιου κόστους



Εικόνα 22: Συγκριτικό ραβδόγραμμα Κατανάλωσης ενέργειας ανά χώρο



Η συμμόρφωση με αυτά τα πρότυπα δεν προσφέρει μόνο ενεργειακά οφέλη, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, αλλά επιφέρει και σημαντικά ψυχολογικά οφέλη για τους εργαζόμενους και γενικότερα τους χρήστες του κτιρίου. Η μείωση της θάμβωσης, ιδιαίτερα σε χώρους με Η/Υ και γραφεία, η παροχή επαρκών επιπέδων φωτισμού και η υψηλή ομοιομορφία έντασης φωτισμού συμβάλλουν ουσιαστικά στη δημιουργία ενός οπτικά άνετου και ευχάριστου περιβάλλοντος εργασίας. Επιπλέον, η επιλογή κατάλληλης θερμοκρασίας χρώματος ενισχύει τη συγκέντρωση και

τη γενικότερη ψυχολογική ευεξία. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής στον χώρο εργασίας, στην πρόληψη προβλημάτων υγείας όπως πονοκέφαλοι και κόπωση, και στη μείωση της πιθανότητας ατυχημάτων που συνδέονται με ανεπαρκή ή ακατάλληλο φωτισμό.

5.2 Προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε σημαντικά οφέλη που προέκυψαν από την αναβάθμιση του συστήματος φωτισμού στο κτίριο, τόσο σε επίπεδο ενεργειακής αποδοτικότητας όσο και στην ποιότητα των συνθηκών εργασίας. Ωστόσο, η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών φωτισμού και οι αυξανόμενες απαιτήσεις για βιώσιμα, έξυπνα και ευέλικτα κτίρια καθιστούν απαραίτητο τον σχεδιασμό και την εφαρμογή επιπρόσθετων στρατηγικών βελτίωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται προτάσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στα επόμενα στάδια αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού.

5.2.1 Τεχνικές Βελτιώσεις

- Αναβάθμιση σε φωτιστικά νέας γενιάς με LED υψηλής απόδοσης ($>150 \text{ lm/W}$), ενσωματώνοντας έξυπνα κυκλώματα dimming και αισθητήρες παρουσίας/φωτεινότητας. Τα φωτιστικά αυτά θα μπορούν να λειτουργούν με μεγαλύτερη ευελιξία, προσαρμόζοντας τη φωτεινότητά τους στις πραγματικές συνθήκες χρήσης.
- Υιοθέτηση τεχνολογιών smart lighting, με δυνατότητες απομακρυσμένου ελέγχου, αυτοματισμών και δυναμικής αλλαγής θερμοκρασίας χρώματος (tunable white), προκειμένου να υποστηρίζονται οι βιορυθμοί των εργαζομένων και να ενισχύεται η παραγωγικότητα.
- Ενσωμάτωση αισθητήρων ποιότητας αέρα ή CO_2 στα φωτιστικά σώματα, που θα επιτρέψουν τη χρήση των φωτιστικών ως κόμβων για την παρακολούθηση των συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος (IEQ).

5.2.2 Λειτουργικές Βελτιώσεις

- Επανασχεδιασμός της κατανομής των φωτιστικών και των κυκλωμάτων βάσει των πραγματικών σεναρίων χρήσης, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση των επιφανειών εργασίας και την κατανομή του φυσικού φωτός, με στόχο τη βέλτιστη οπτική άνεση χωρίς υπερφωτισμό ή σκοτεινά σημεία.

- Εγκατάσταση προηγμένων αυτοματισμών φωτισμού με δυνατότητα ζωνικής λειτουργίας, έτσι ώστε οι χώροι να φωτίζονται επιλεκτικά, ανάλογα με τη χρήση τους ανά στιγμή.
- Σύστημα ελέγχου φωτισμού μέσω κινητού ή υπολογιστή, ώστε ο κάθε χρήστης να έχει τη δυνατότητα ρύθμισης του φωτισμού στον προσωπικό του χώρο. Αυτό ενισχύει την ψυχολογική άνεση και μειώνει τη σπατάλη ενέργειας.

5.2.3 Ενεργειακές Βελτιώσεις

- Διασύνδεση του συστήματος φωτισμού με BMS (Building Management System) για την παρακολούθηση και την αυτοματοποιημένη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης. Μέσω ιστορικών δεδομένων και real-time analytics, θα εντοπίζονται αποκλίσεις και δυσλειτουργίες.
- Χρήση αλγορίθμων πρόβλεψης (predictive algorithms) για τη ρύθμιση του φωτισμού με βάση την πρόβλεψη της παρουσίας και των καιρικών συνθηκών (π.χ. μειωμένος φωτισμός σε ηλιόλουστες μέρες).
- Αξιοποίηση συστημάτων daylight harvesting, όπου ο τεχνητός φωτισμός προσαρμόζεται δυναμικά στην ένταση του φυσικού φωτισμού που εισέρχεται στον χώρο, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

5.2.4 Οικονομικές Βελτιώσεις

- Εφαρμογή μοντέλου σταδιακής αναβάθμισης βάσει προτεραιοποίησης ενεργειακών αποδόσεων και λειτουργικών αναγκών, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη διαχείριση πόρων και επένδυσης.
- Αξιοποίηση χρηματοδοτικών εργαλείων και πράσινων δανείων, όπως προγράμματα ΕΣΠΑ, «Εξοικονομώ για Δημόσια Κτίρια», ή συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (ΣΔΙΤ), για την υποστήριξη έργων με περιβαλλοντικό και κοινωνικό αντίκτυπο.
- Σύνταξη μελέτης κόστους κύκλου ζωής (LCC analysis) για τη συνολική αποτίμηση της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση, τη διάρκεια ζωής και το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού.

5.2.5 Συνολική Στρατηγική Βελτιστοποίησης

Για τη διασφάλιση της διαρκούς προσαρμοστικότητας του συστήματος φωτισμού στις τεχνολογικές εξελίξεις και τις απαιτήσεις των χρηστών, κρίνεται απαραίτητο να εφαρμοστεί μια πολυετής στρατηγική παρακολούθησης και επανασχεδιασμού, η οποία να περιλαμβάνει:

- Ετήσιες ενεργειακές επιθεωρήσεις και αναθεώρηση των ρυθμίσεων φωτισμού με βάση την πραγματική χρήση.
- Δημιουργία dashboard για διαχείριση του φωτισμού από τη διαχείριση εγκαταστάσεων του κτιρίου, με δυνατότητα ανάλυσης τάσεων και λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων.
- Ανά τακτά διαστήματα ενημέρωση του προσωπικού, τόσο τεχνικού όσο και των τελικών χρηστών, για τις βέλτιστες πρακτικές χρήσης φωτισμού και για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των σύγχρονων συστημάτων.

Ακολουθώντας τις παραπάνω κατευθύνσεις, το κτίριο που μελετήσαμε μπορεί να εξελιχθεί σε ένα πρότυπο παράδειγμα ενεργειακά αποδοτικού, λειτουργικά ευέλικτου και τεχνολογικά προηγμένου περιβάλλοντος, συμβάλλοντας όχι μόνο στη μείωση του λειτουργικού κόστους, αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και της αποδοτικότητας των χρηστών του.

5.3 Εναλλακτικά Σενάρια και Προτάσεις Φωτισμού

Η βασική πρόταση φωτισμού που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία βασίζεται στη χρήση σύγχρονων φωτιστικών σωμάτων με λαμπτήρες LED ή T5, σε συνδυασμό με σταθερές παραμέτρους λειτουργίας. Ωστόσο, η εξέλιξη της τεχνολογίας και οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ενεργειακή αποδοτικότητα, εργονομία και ευφυή λειτουργία επιτρέπουν τη διαμόρφωση εναλλακτικών σεναρίων φωτιστικού σχεδιασμού. Στην παρούσα ενότητα, αναλύονται προτάσεις και εναλλακτικές λύσεις που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν με στόχο την περαιτέρω ενεργειακή εξοικονόμηση, τη βελτίωση της οπτικής άνεσης και τη συνολική αναβάθμιση του περιβάλλοντος εργασίας.

5.3.1 Σενάριο Α: Χρήση αισθητήρων παρουσίας και φυσικού φωτισμού (daylight & occupancy sensors)

Η εγκατάσταση αισθητήρων παρουσίας (PIR ή υπερηχητικών) και αισθητήρων φωτεινότητας κοντά στα ανοίγματα (daylight sensors) αποτελεί μία από τις πλέον αποδοτικές λύσεις για την αυτόματη προσαρμογή του τεχνητού φωτισμού. Με αυτόν τον τρόπο, τα φωτιστικά ενεργοποιούνται μόνο όταν εντοπίζεται παρουσία στον χώρο και όταν ο φυσικός φωτισμός δεν επαρκεί.

Οφέλη:

- Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης έως και 40% σε χώρους χαμηλής πληρότητας.
- Επέκταση διάρκειας ζωής των λαμπτήρων.
- Ενίσχυση βιωσιμότητας και άνεσης χρήσης.

Πεδίο εφαρμογής: Γραφεία, διάδρομοι, τουαλέτες, βοηθητικοί χώροι.

5.3.2 Σενάριο Β: Ζωνικός έλεγχος φωτισμού (zonal control)

Η εγκατάσταση ξεχωριστών κυκλωμάτων φωτισμού ανάλογα με τη θέση των φωτιστικών (π.χ. δίπλα στα παράθυρα, κεντρικά, κοντά στους διαδρόμους) επιτρέπει ευέλικτο έλεγχο της έντασης ή της λειτουργίας του φωτισμού. Οι χρήστες μπορούν να ενεργοποιούν επιλεκτικά τα φωτιστικά που πραγματικά χρειάζονται, ανάλογα με τη χρήση του χώρου ή τη χρονική στιγμή.

Οφέλη:

- Ενεργειακή εξοικονόμηση.
- Ενίσχυση της ατομικής προσαρμογής φωτισμού.
- Καλύτερη κατανομή φωτεινότητας και μείωση της θάμβωσης.

Προτεινόμενη υλοποίηση: Αντικατάσταση γενικών διακοπών με διακόπτες πολλαπλών ζωνών ή ενσωμάτωση μέσω DALI.

5.3.3 Σενάριο Γ: Dimmable LED φωτιστικά με έξυπνη διαχείριση

Η χρήση dimmable LED φωτιστικών, τα οποία μπορούν να λειτουργούν με μεταβαλλόμενη ένταση φωτισμού, επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της φωτεινότητας ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη, την ώρα της ημέρας ή τον τύπο της δραστηριότητας. Σε συνδυασμό με συστήματα ελέγχου (π.χ. KNX, DALI), παρέχεται η δυνατότητα προγραμματισμένων σεναρίων φωτισμού.

Οφέλη:

- Βελτιστοποίηση της φωτεινότητας ανά εργασία.
- Ψυχολογική άνεση μέσω προσαρμογής (π.χ. πιο χαμηλός φωτισμός για απογευματινές ώρες).
- Υψηλό επίπεδο ελέγχου από χρήστες ή διαχειριστές κτιρίου.

5.3.4 Σενάριο Δ: Circadian lighting – βιορυθμικά σενάρια φωτισμού

Ο φωτισμός που ακολουθεί τον κιρκάδιο ρυθμό του ανθρώπινου οργανισμού (circadian lighting) χρησιμοποιεί μεταβαλλόμενη θερμοκρασία χρώματος και ένταση φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να ευνοεί τη συγκέντρωση, την ενεργητικότητα ή τη χαλάρωση, ανάλογα με την ώρα.

Τεχνική υλοποίηση: Tunable white LED (2700K – 6500K) με αυτοματισμούς βάσει προγράμματος.

Οφέλη:

- Ενίσχυση παραγωγικότητας και γνωστικών λειτουργιών.
- Μείωση άγχους, κόπωσης και πονοκεφάλων.
- Συμβατότητα με πρότυπα WELL και σύγχρονη εργονομία.

Ενδείκνυται για: αίθουσες διδασκαλίας, γραφεία, συνεδριακούς χώρους.

5.3.5 Σενάριο Ε: Συνδυασμός φυσικού και τεχνητού φωτισμού – daylight harvesting

Η στρατηγική daylight harvesting βασίζεται στη χρήση του φυσικού φωτός, όπου είναι διαθέσιμο, και στην αυτόματη ρύθμιση της τεχνητής φωτεινότητας με βάση την ένταση του φυσικού φωτισμού που εισέρχεται στον χώρο. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί φωτόμετρα και συστήματα dimming.

Οφέλη:

- Έως και 60% μείωση της χρήσης τεχνητού φωτός κατά τις ώρες ημέρας.
- Μείωση κόστους λειτουργίας και εκπομπών CO₂.
- Βελτίωση του οπτικού περιβάλλοντος και της σύνδεσης με το εξωτερικό.

Προϋποθέσεις: Ανοίγματα με φυσικό φως, εγκατάσταση κατάλληλων αισθητήρων και αλγόριθμοι ελέγχου.

5.3.6 Σενάριο ΣΤ: Υλοποίηση μέσω BMS (Building Management System)

Η συνολική διαχείριση του φωτισμού μέσω συστήματος διαχείρισης κτιρίου (BMS) επιτρέπει την ολοκληρωμένη εποπτεία, ρύθμιση και παρακολούθηση της κατανάλωσης ανά χώρο, χρονική περίοδο και χρήση. Το σύστημα μπορεί να συνδυάσει όλες τις παραπάνω τεχνολογίες σε ένα ενιαίο περιβάλλον ελέγχου.

Οφέλη:

- Κεντρικοποιημένος έλεγχος όλων των παραμέτρων φωτισμού.
- Άμεση προσαρμογή σε πραγματικές συνθήκες χρήσης.
- Παραγωγή αναφορών, προληπτική συντήρηση και τεχνική διαχείριση.

5.3.7 Συνολική Αξιολόγηση και Επιλογή Σεναρίων

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά και την ενδεικτική καταλληλότητα ανά χώρο:

Πίνακας 22: Βασικά Χαρακτηριστικά των Σεναρίων που προτάθηκαν μαζί με μία ενδεικτική καταλληλότητα ανά χώρο

Σενάριο	Εξοικονόμηση	Άνεση	Κόστος Εγκατάστασης	Καταλληλότητα για χώρους
A. Αισθητήρες παρουσίας/φωτός	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλό–Μέτριο	Γραφεία, βοηθητικοί χώροι
B. Ζωνικός έλεγχος	Μέτρια	Υψηλή	Μέτριο	Γραφεία, εργαστήρια
Γ. Dimmable LED με ελέγχους	Υψηλή	Υψηλή	Μέτριο–Υψηλό	Γραφεία, διδασκαλία, open plan
Δ. Circadian lighting	Μέτρια	Πολύ Υψηλή	Υψηλό	Εκπαίδευση, διοίκηση
E. Daylight harvesting	Πολύ Υψηλή	Υψηλή	Υψηλό	Χώροι με μεγάλα ανοίγματα
ΣΤ. BMS κεντρικός έλεγχος	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλό	Μεγάλα ή σύνθετα κτίρια

Η υιοθέτηση εναλλακτικών λύσεων φωτισμού, είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά, προσφέρει πολλαπλά οφέλη σε επίπεδο εξοικονόμησης, λειτουργικότητας και βιωσιμότητας. Οι παραπάνω προτάσεις είναι τεχνικά εφικτές και, με κατάλληλο σχεδιασμό και χρηματοδότηση, μπορούν να ενταχθούν στα πλαίσια μελλοντικών επεμβάσεων ή επεκτάσεων του συστήματος φωτισμού του

κτιρίου. Η συνεχής αξιολόγηση των αναγκών και των δυνατοτήτων της τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει σε ένα ευφυές και πλήρως αποδοτικό φωτιστικό περιβάλλον.

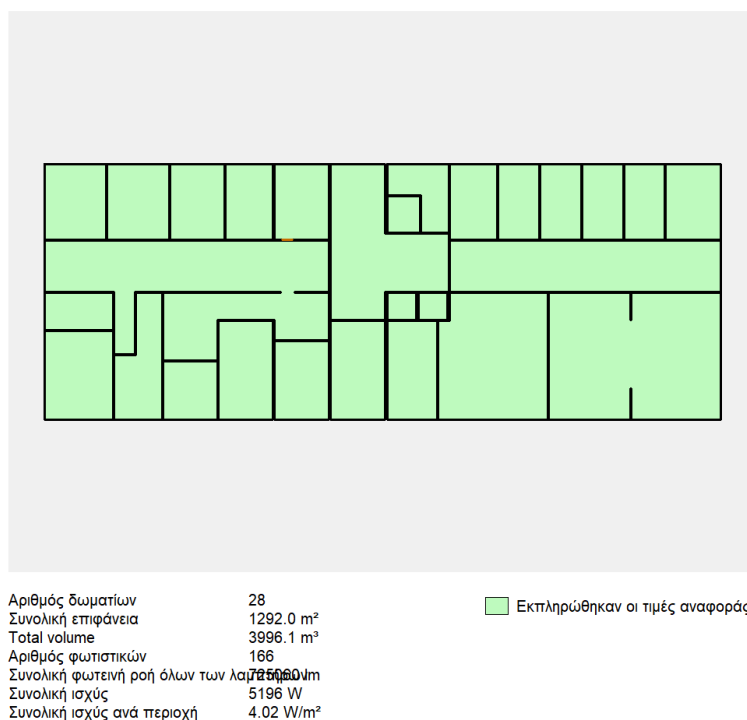
Παράρτημα Α: Αποτελέσματα Relux Pro για την πρόταση ενεργειακής αναβάθμισης

Το παρόν παράρτημα περιλαμβάνει αναλυτικά τα αποτελέσματα της επικαιροποιημένης φωτοτεχνικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Relux Pro για την πρόταση ενεργειακής αναβάθμισης του τεχνητού φωτισμού στο κτίριο Δ. Η μελέτη αυτή βασίστηκε στην αναλυτική αποτύπωση των χώρων του τέταρτου ορόφου και περιλαμβάνει πλήρη δεδομένα για κάθε εξεταζόμενο δωμάτιο.

Για κάθε χώρο παρουσιάζονται:

- η διαμόρφωση και η γεωμετρία,
- η τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων,
- η ανάλυση των επιπέδων φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας,
- και οι τεχνικές λεπτομέρειες των χρησιμοποιούμενων φωτιστικών.

Η ανάλυση έγινε με στόχο να εξασφαλιστεί ότι οι τιμές έντασης φωτισμού πληρούν τα ελάχιστα πρότυπα για κάθε χρήση χώρου, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Το Relux αξιοποιήθηκε για να αποδοθούν ρεαλιστικές σκιάσεις, φωτεινές ροές και κατανομές φωτισμού, σύμφωνα με τις πραγματικές ιδιότητες των λαμπτήρων LED που επιλέχθηκαν. Το παράρτημα περιλαμβάνει πλήθος εικόνων (Εικόνες 18 έως 47) που τεκμηριώνουν αναλυτικά την απόδοση της νέας πρότασης.



Εικόνα 23: Επισκόπηση Ορόφου

Κατάλογος εξαρτημάτων

Τύπος Αριθ. \Κατασκ.

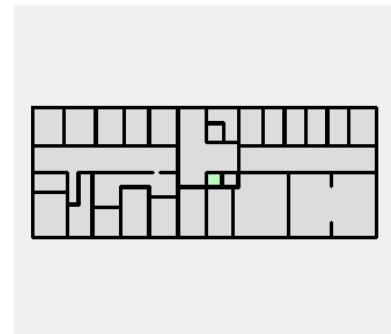
OPPLE

1	55 x	Αρ. Παραγγελίας : 542003108600 Όνομα φωτιστικού : LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19 Εξοπλισμός : 1 x LED 30 W / 4200 lm
2	101 x	Αρ. Παραγγελίας : 542003111400 Όνομα φωτιστικού : LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19 Εξοπλισμός : 1 x LED 34 W / 4760 lm
3	1 x	Αρ. Παραγγελίας : 522020001100 Όνομα φωτιστικού : LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3 Εξοπλισμός : 1 x LED 22 W / 2500 lm
4	9 x	Αρ. Παραγγελίας : 540001409600 Όνομα φωτιστικού : LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840 Εξοπλισμός : 1 x LED 10 W / 1200 lm

Εικόνα 24: Κατάλογος Εξαρτημάτων

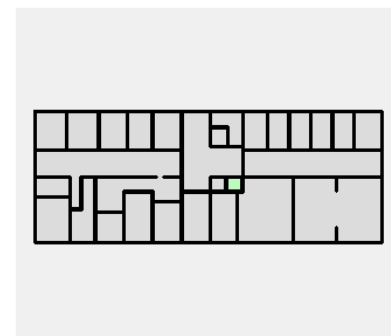
Δωμάτια

Ασανσέρ 1	1 x Φωτιστικά
Floor area	6.2 m ²
Wall area (without windows)	22.4 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	13.9 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	1200 lm
Συνολική ισχύς	10 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (6 m ²)	0.62 W/m ²
$\bar{E}_m$	135 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	110 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.81 (≥ 0.40)
R_{UG}	≤ 16.4 (< 25.00)



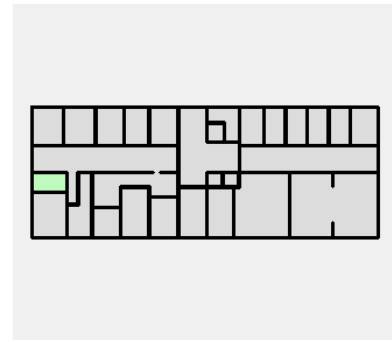
Εικόνα 25: Ασανσέρ 1

Ασανσέρ 2	1 x Φωτιστικά
Floor area	6.2 m ²
Wall area (without windows)	22.4 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	13.9 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	1200 lm
Συνολική ισχύς	10 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (6 m ²)	0.62 W/m ²
$\bar{E}_m$	135 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	110 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.81 (≥ 0.40)
R_{UG}	≤ 16.4 (< 25.00)



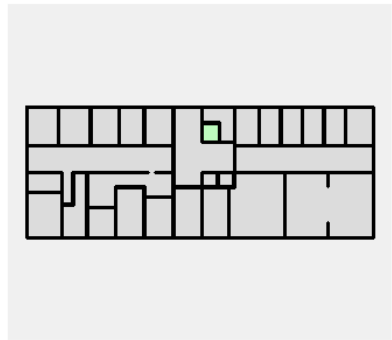
Εικόνα 26: Ασανσέρ 2

Δωμάτιο 1	2 x Φωτιστικά
Floor area	19.7 m ²
Wall area (without windows)	57.6 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	61.2 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2100 lm
Συνολική ισχύς	60 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (20 m ²)	3.04 W/m ²
$\bar{E}_m$	305 lx (≥ 200 lx)
E_{min}	189 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.62 (≥ 0.40)
RUG	≤ 16.2 (< 25.00)



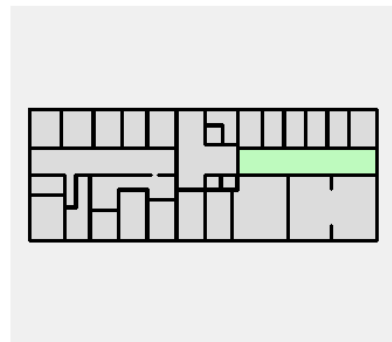
Εικόνα 27: Δωμάτιο 1

Δωμάτιο 2	1 x Φωτιστικά
Floor area	9.4 m ²
Wall area (without windows)	38.1 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	29.2 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	4200 lm
Συνολική ισχύς	30 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (9 m ²)	3.18 W/m ²
$\bar{E}_m$	260 lx (≥ 200 lx)
E_{min}	204 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.78 (≥ 0.40)
RUG	10.0 (< 25.00)



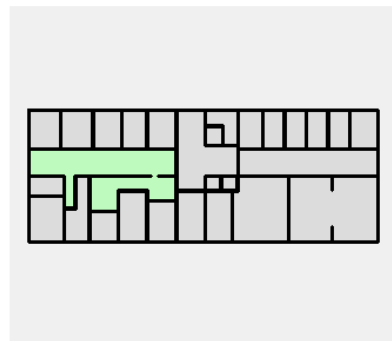
Εικόνα 28: Δωμάτιο 2

Δωμάτιο Δ4-1	4 x Φωτιστικά
Floor area	106.6 m ²
Wall area (without windows)	175.0 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	330.5 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	16800 lm
Συνολική ισχύς	120 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (107 m ²)	1.13 W/m ²
$\bar{E}_m$	116 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	62 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.54 (≥ 0.40)
RUG	≤ 17.5 (< 22.00)



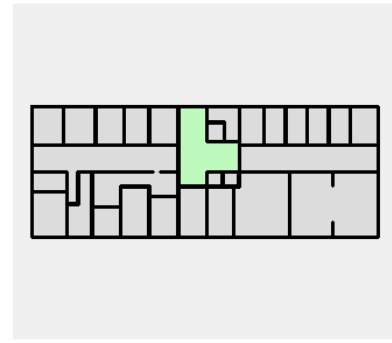
Εικόνα 29: Δωμάτιο Δ4-1

Δωμάτιο Δ4-2, 4	8 x Φωτιστικά
Floor area	181.6 m ²
Wall area (without windows)	346.3 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	562.8 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	33600 lm
Συνολική ισχύς	240 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (182 m ²)	1.32 W/m ²
$\bar{E}_m$	115 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	50 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.43 (≥ 0.40)
RUG	--- (< 22.00)



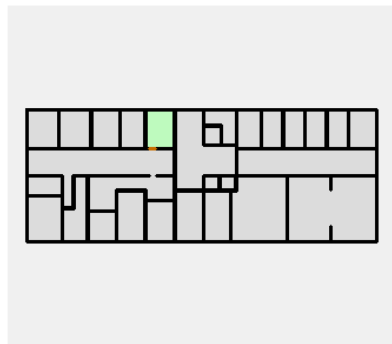
Εικόνα 30: Δωμάτιο Δ4-2,4

Δωμάτιο Δ4-3, Κ4-1	4 x Φωτιστικά
Floor area	93.5 m ²
Wall area (without windows)	148.6 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	290.0 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	15100 lm
Συνολική ισχύς	112 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (94 m ²)	20 W/m ²
$\bar{E}_m$	146 lx (≥ 100 lx)
E_{min}	78 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.53 (≥ 0.40)
RUG	--- (< 22.00)



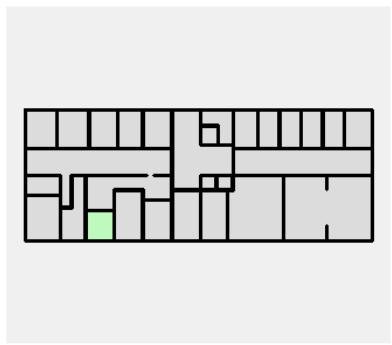
Εικόνα 31: Δωμάτιο Δ4-3, Κ4-1

Δωμάτιο Ε4-1	6 x Φωτιστικά
Floor area	31.6 m ²
Wall area (without windows)	70.6 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	97.9 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	25200 lm
Συνολική ισχύς	180 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (32 m ²)	5.70 W/m ²
$\bar{E}_m$	572 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	402 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.70 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.3 (< 19.00)



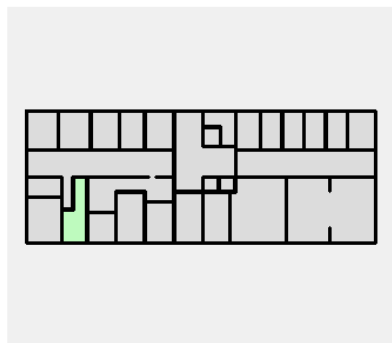
Εικόνα 32: Δωμάτιο Ε4-1

Δωμάτιο Ε4-10	4 x Φωτιστικά
Floor area	24.4 m ²
Wall area (without windows)	61.3 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	75.7 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	19040 lm
Συνολική ισχύς	136 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (24 m ²)	5.67 W/m ²
$\bar{E}_m$	520 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	417 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.80 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.3 (< 19.00)



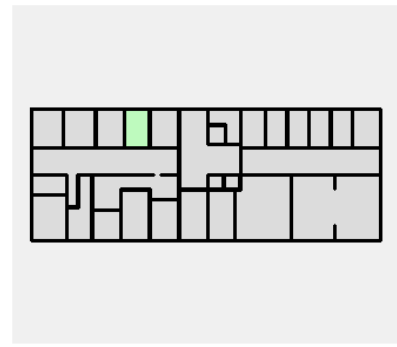
Εικόνα 33: Δωμάτιο Ε4-10

Δωμάτιο Ε4-11	6 x Φωτιστικά
Floor area	36.3 m ²
Wall area (without windows)	94.7 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	112.5 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	28560 lm
Συνολική ισχύς	204 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (36 m ²)	5.62 W/m ²
$\bar{E}_m$	510 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	352 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.69 (≥ 0.60)
RUG	≤ 17.5 (< 19.00)



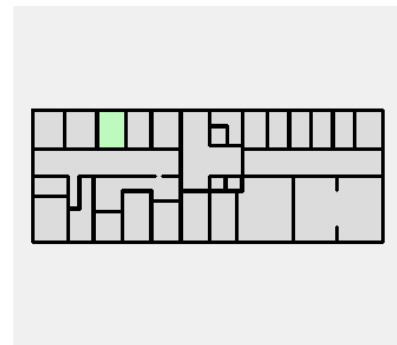
Εικόνα 34: Δωμάτιο Ε4-11

Δωμάτιο E4-2	6 x Φωτιστικά
Floor area	27.6 m ²
Wall area (without windows)	66.9 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	85.7 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	25200 lm
Συνολική ισχύς	180 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (28 m ²)	6.51 W/m ²
$\bar{E}_m$	654 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	452 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.69 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.3 (< 19.00)



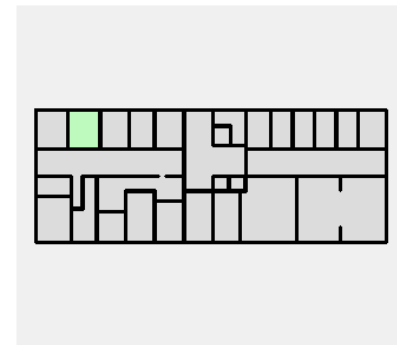
Εικόνα 35: Δωμάτιο E4-2

Δωμάτιο E4-3	6 x Φωτιστικά
Floor area	31.6 m ²
Wall area (without windows)	70.6 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	97.9 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	25200 lm
Συνολική ισχύς	180 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (32 m ²)	5.70 W/m ²
$\bar{E}_m$	520 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	453 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.87 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.3 (< 19.00)



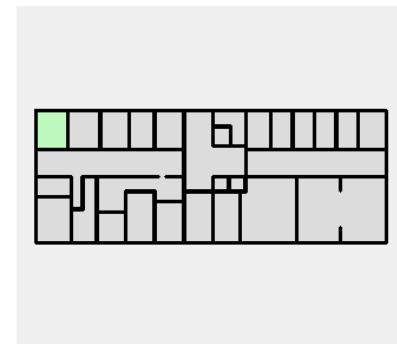
Εικόνα 36: Δωμάτιο E4-3

Δωμάτιο E4-4	6 x Φωτιστικά
Floor area	35.5 m ²
Wall area (without windows)	74.3 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	110.2 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	25560 lm
Συνολική ισχύς	204 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (36 m ²)	5.74 W/m ²
$\bar{E}_m$	556 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	449 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.81 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.9 (< 19.00)



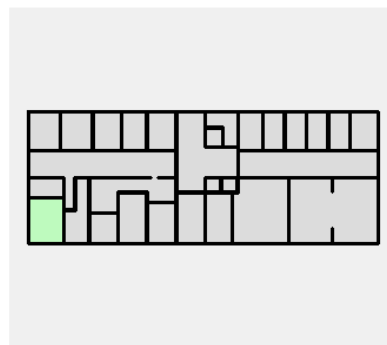
Εικόνα 37: Δωμάτιο E4-4

Δωμάτιο E4-5	6 x Φωτιστικά
Floor area	35.5 m ²
Wall area (without windows)	74.3 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	110.2 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	25560 lm
Συνολική ισχύς	204 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (36 m ²)	5.74 W/m ²
$\bar{E}_m$	556 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	449 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.81 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.9 (< 19.00)



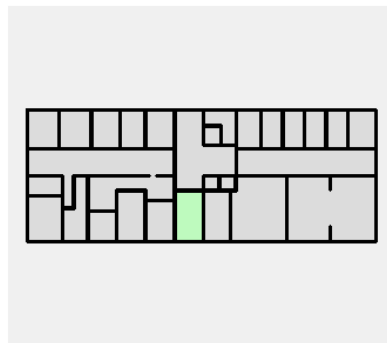
Εικόνα 38: Δωμάτιο E4-5

Δωμάτιο E4-6	8 x Φωτιστικά
Floor area	46.2 m ²
Wall area (without windows)	85.0 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	143.3 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2560 lm
Συνολική ισχύς	240 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (46 m ²)	5.19 W/m ²
$\bar{E}_m$	555 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	391 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.70 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.9 (< 19.00)



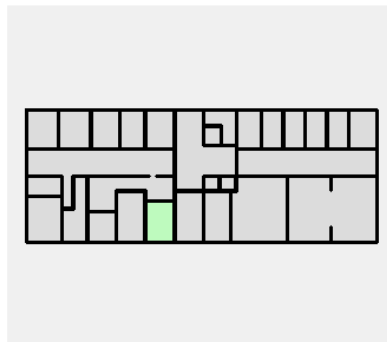
Εικόνα 39: Δωμάτιο E4-6

Δωμάτιο E4-7	6 x Φωτιστικά
Floor area	41.3 m ²
Wall area (without windows)	83.1 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	128.0 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2560 lm
Συνολική ισχύς	204 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (41 m ²)	4.94 W/m ²
$\bar{E}_m$	520 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	360 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.69 (≥ 0.60)
RUG	≤ 17.1 (< 19.00)



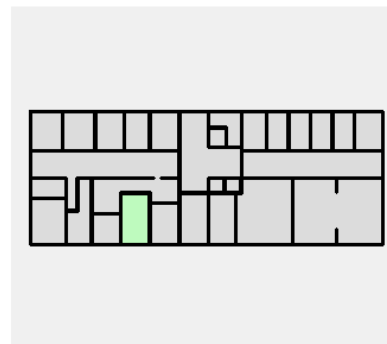
Εικόνα 40: Δωμάτιο E4-7

Δωμάτιο E4-8	6 x Φωτιστικά
Floor area	33.0 m ²
Wall area (without windows)	72.4 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	102.4 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2560 lm
Συνολική ισχύς	204 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (33 m ²)	6.18 W/m ²
$\bar{E}_m$	579 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	496 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.86 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.8 (< 19.00)



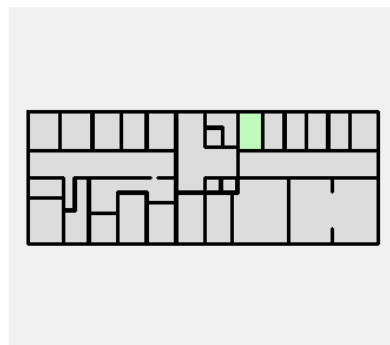
Εικόνα 41: Δωμάτιο E4-8

Δωμάτιο E4-9	6 x Φωτιστικά
Floor area	41.3 m ²
Wall area (without windows)	83.1 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	128.0 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2560 lm
Συνολική ισχύς	204 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (41 m ²)	4.94 W/m ²
$\bar{E}_m$	520 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	360 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.69 (≥ 0.60)
RUG	≤ 17.1 (< 19.00)



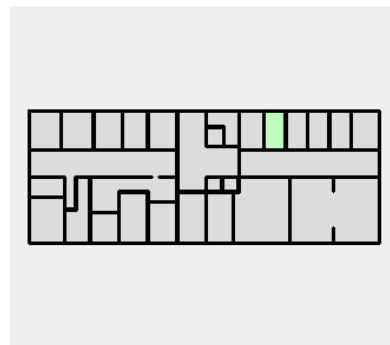
Εικόνα 42: Δωμάτιο E4-9

Δωμάτιο H4-1	5 x Φωτιστικά
Floor area	27.6 m ²
Wall area (without windows)	66.9 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	85.7 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2100 lm
Συνολική ισχύς	150 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (28 m ²)	5.43 W/m ²
$\bar{E}_m$	515 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	407 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.79 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.3 (< 19.00)



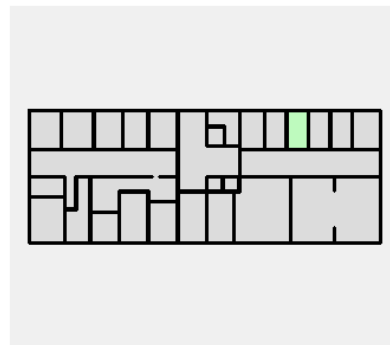
Εικόνα 43: Δωμάτιο H4-1

Δωμάτιο H4-2	4 x Φωτιστικά
Floor area	23.7 m ²
Wall area (without windows)	63.2 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	73.4 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	1600 lm
Συνολική ισχύς	136 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (24 m ²)	5.74 W/m ²
$\bar{E}_m$	565 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	378 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.67 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.8 (< 19.00)



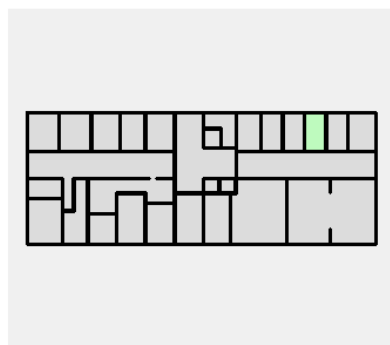
Εικόνα 44: Δωμάτιο H4-2

Δωμάτιο H4-3	4 x Φωτιστικά
Floor area	23.7 m ²
Wall area (without windows)	63.2 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	73.4 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	1600 lm
Συνολική ισχύς	136 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (24 m ²)	5.74 W/m ²
$\bar{E}_m$	565 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	378 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.67 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.8 (< 19.00)



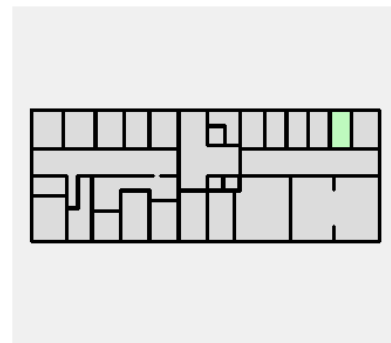
Εικόνα 45: Δωμάτιο H4-3

Δωμάτιο H4-4	4 x Φωτιστικά
Floor area	23.7 m ²
Wall area (without windows)	63.2 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	73.4 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	1600 lm
Συνολική ισχύς	136 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (24 m ²)	5.74 W/m ²
$\bar{E}_m$	565 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	378 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.67 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.8 (< 19.00)



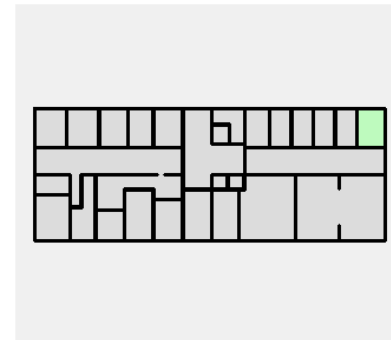
Εικόνα 46: Δωμάτιο H4-4

Δωμάτιο H4-5	4 x Φωτιστικά
Floor area	23.7 m ²
Wall area (without windows)	63.2 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	73.4 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	1904 lm
Συνολική ισχύς	136 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (24 m ²)	5.74 W/m ²
$\bar{E}_m$	565 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	377 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.67 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.8 (< 19.00)



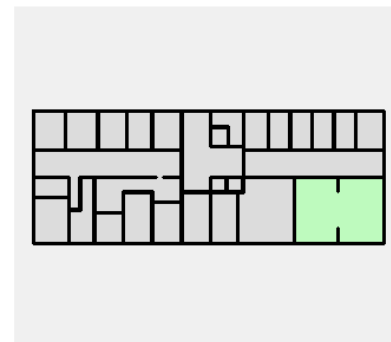
Εικόνα 47: Δωμάτιο H4-5

Δωμάτιο H4-6	6 x Φωτιστικά
Floor area	31.6 m ²
Wall area (without windows)	70.6 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	97.9 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2520 lm
Συνολική ισχύς	180 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (32 m ²)	5.70 W/m ²
$\bar{E}_m$	520 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	453 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.87 (≥ 0.60)
RUG	≤ 16.3 (< 19.00)



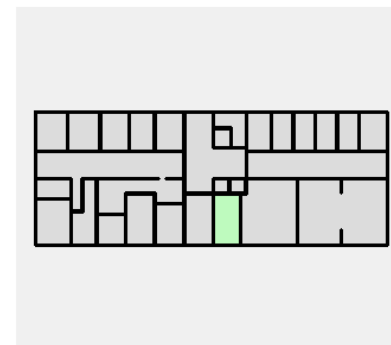
Εικόνα 48: Δωμάτιο H4-6

Δωμάτιο H4-7	24 x Φωτιστικά
Floor area	166.5 m ²
Wall area (without windows)	193.6 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	516.0 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	11424 lm
Συνολική ισχύς	816 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (166.5 m ²)	4.90 W/m ²
$\bar{E}_m$	589 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	377 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.64 (≥ 0.60)
RUG	≤ 18.8 (< 19.00)



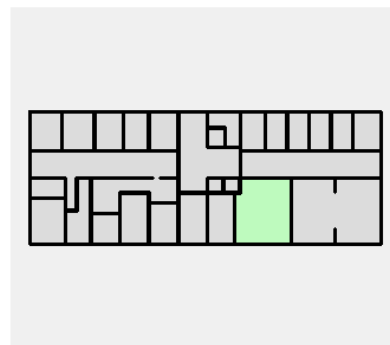
Εικόνα 49: Δωμάτιο H4-7

Δωμάτιο H4-8 A	6 x Φωτιστικά
Floor area	38.0 m ²
Wall area (without windows)	80.8 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	117.8 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	2656 lm
Συνολική ισχύς	204 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (38 m ²)	5.37 W/m ²
$\bar{E}_m$	530 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	319 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.60 (≥ 0.60)
RUG	≤ 17.1 (< 19.00)



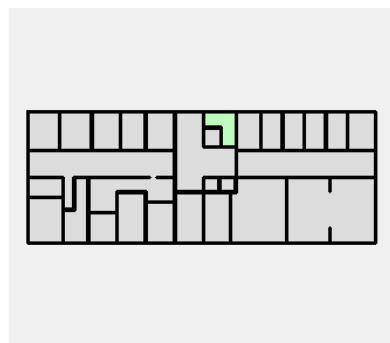
Εικόνα 50: Δωμάτιο H4-8A

Δωμάτιο H4-8 B	15 x Φωτιστικά
Floor area	103.8 m ²
Wall area (without windows)	128.2 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	321.9 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	7140 lm
Συνολική ισχύς	510 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (104.4 m ²)	4.91 W/m ²
$\bar{E}_m$	528 lx (≥ 500 lx)
E_{min}	423 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.80 (≥ 0.60)
RUG	≤ 18.2 (< 19.00)



Εικόνα 51: Δωμάτιο H4-8B

Δωμάτιο T4-1	7 x Φωτιστικά
Floor area	22.4 m ²
Wall area (without windows)	70.6 m ²
Window area	0.0 m ²
Volume	69.6 m ³
Συνολική φωτεινή ροή όλων των λαμπτήρων	840 lm
Συνολική ισχύς	70 W
Συνολική ισχύς ανά επιφάνεια (22.4 m ²)	3.12 W/m ²
$\bar{E}_m$	286 lx (≥ 200 lx)
E_{min}	167 lx
$E_{min}/\bar{E}_m (U_0)$	0.58 (≥ 0.40)
RUG	--- (< 25.00)



Εικόνα 52: Δωμάτιο T4-1

Παράρτημα Β: Τεχνικές Προδιαγραφές Φωτιστικών Σωμάτων LED που χρησιμοποιήθηκαν από τα site των κατασκευαστών

Αρχικά παραθέτουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα με τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιήθηκαν στην πρόταση ενεργειακής αναβάθμισής μας.

Κωδικός Φωτιστικού	Τύπος Φωτιστικού	Ισχύς (W)	Φωτεινή Ροή (lm)	Απόδοση (lm/W)	Θερμοκρασία Χρώματος (K)	Δείκτης CRI	UGR	IP	Διάρκεια Ζωής (L70)	Παράγοντας Ισχύος (PF)	Τύπος Δέσμης
LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19	LED panel (εμφανές/επιτοίχιο/χωνευτό)	34	4760	140	4000	>80	≤19	IP54 (πρόσοψη) / IP20 (εντοιχισμ.)	100.000 ώρες	≥0.9	90°
LEDPanelS-P6 Sq595-30W-DALI-840-U19	LED panel με DALI dimming	30	-	-	4000	>80	≤19	IP54 (πρόσοψη)	-	≥0.9	-
LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM	Downlight LED χωνευτό	10	-	-	3000/4000	>80	-	IP44	50.000 ώρες	≥0.9	-
LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3	Επιτοίχιο φωτιστικό με αισθητήρες	22	2500	115	3000/4000	>80	-	IP54	50.000 ώρες	≥0.9	-

Πίνακας 23: Συγκεντρωτικός πίνακας προδιαγραφών φωτιστικών σωμάτων από τα τεχνικά φυλλάδια του κατασκευαστή

1. LEDPanelS-P6 Sq595-30W-DALI-840-U19

Item Code	Item Description	Equivalent to (W)	Power (W)	Lumen	Efficacy (lm/W)	CCT (K)	Colour rendering index (CRI)	Net Weight (pc/kg)
DALI2								
542003109300	LEDPanelS-P6 Sq595-30W-DALI-840-U19	TL 4x18W	30	4200	140	4000	> 80	2

Item			Box			
Item Code	Item Description	EU HS Code	Dimensions (mm) (LxWxH)	Gross Weight (pc/kg)	EAN	pc/box
542003109300	LEDPanelS-P6 Sq595-30W-DALI-840-U19	94051190	631x41x673	2.56	6941497774361	1
140055484	LEDPanelRc-SI Sq600-Surface-Module-WH-CT	94059900	690x690x118	4.26	6956321879808	1
140057770	LEDPanelRc-SI-Mounting-Springs-595	73209090	80x80x53	0.50	6956321888121	1
140060852	LEDFixture-Ceiling-Cable-Kit-0.5m	73121020	510x100x10	0.40	6956321895266	1
542003021800	LEDPanelRc-S-B2 Mounting-Springs	73209090	280x200x170	0.10	6941408821672	1
542098000800	LEDPanelRc-SI U19 EM-kit 1h	85044083	490x390x150	0.98	6941497702340	1
542098000900	LEDPanelRc-SI U19 EM-kit 3h	85044083	490x390x150	1.08	6941497702333	1
542098001000	LEDTrunking DALI Power Supply	85044083	198x54x39	0.24	6945730496614	1
542098009600	LEDPanelRc Sq600-Frame-WH	94059900	688x88x694	1.79	6941497704061	1
542098017600	LEDPanelRc2 Sq600-Surface-Kit-WH	94059900	685x77x68	1.53	6941497720696	1
542098030700	Junction-Box-WH	85369010	43x103x36	0.06	6941408868684	1
542098045500	LEDPanelS-P Suspension-Kit-G6	73121020	130x130x30	0.22	6941497784773	1

Technical Specifications

Lifetime (L70)	100,000 h
Lifetime (L80)	70,000 h
Lifetime (L90)	50,000 h
On-/Off-cycles	100,000
Colour consistency (SDCM)	3
Dimmability	DALI2
Beam angle	90 °
Finishing	White RAL9003
RAL-Number	9003
UGR	19
Ingress protection front side (IP)	IP54
Ingress protection recessed part (IP)	IP20
Impact strength (IK)	IK03
Protection class	II
Risk group (EN 62471)	RG0
With control gear	True
Glow wire test	650 °C
Driver failure rate (at 5,000 hrs)	≤ 1 %
Power factor	≥ 0.9

Electrical Supply

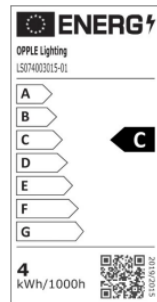
Frequency	50 - 60 Hz
Nominal voltage	220 - 240 V
DC input voltage	See catalogue appendix
Connection Specifications	
230V Cable length	1 m

Mechanical Properties

Housing material	Aluminium
Optical material	PMMA
Cover material	Polycarbonate

Ambient Conditions

Operating temperature	-10 - 45 °C
Application temperature	25 °C
Storage environment	-20 - 50 °C



Εικόνα 53: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LEDPanelS-P6 Sq595-30W-840-U19

2. LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19

Item Code	Item Description	Equivalent to (W)	Power (W)	Lumen	Efficacy (lm/W)	CCT (K)	Colour rendering index (CRI)	Net Weight (pc/kg)
On-Off								
542003111400	LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19	TL 4x18W	34	4760	140	4000	> 80	1.9

Item			Box			
Item Code	Item Description	EU HS Code	Dimensions (mm) (LxWxH)	Gross Weight (pc/kg)	EAN	pc/box
542003111400	LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19	94051190	631x41x673	2.48	6941497774576	1
140055484	LEDPanelRc-SI Sq600-Surface-Module-WH-CT	94059900	690x690x118	4.26	6956321879808	1
140057770	LEDPanelRc-SI-Mounting-Springs-595	73209090	80x80x53	0.50	6956321888121	1
140060852	LEDFixture-Ceiling-Cable-Kit-0.5m	73121020	510x100x10	0.40	6956321895266	1
542003021800	LEDPanelRc-S-B2 Mounting-Springs	73209090	280x200x170	0.10	6941408821672	1
542098000800	LEDPanelRC-SI U19 EM-kit 1h	85044083	490x390x150	0.98	6941497702340	1
542098000900	LEDPanelRC-SI U19 EM-kit 3h	85044083	490x390x150	1.08	6941497702333	1
542098009600	LEDPanelRc Sq600-Frame-WH	94059900	688x88x694	1.79	6941497704061	1
542098017600	LEDPanelRc2 Sq600-Surface-Kit-WH	94059900	685x77x68	1.53	6941497720696	1
542098030700	Junction-Box-WH	85369010	43x103x36	0.06	6941408868684	1
542098045500	LEDPanelS-P Suspension-Kit-G6	73121020	130x130x30	0.22	6941497784773	1

Technical Specifications

Lifetime (L70)	100,000 h
Lifetime (L80)	70,000 h
Lifetime (L90)	50,000 h
On-/Off-cycles	100,000
Colour consistency (SDCM)	3
Dimmability	On-Off
Beam angle	90 °
Finishing	White RAL9003
RAL-Number	9003
UGR	19
Ingress protection front side (IP)	IP54
Ingress protection recessed part (IP)	IP20
Impact strength (IK)	IK03
Protection class	II
Risk group (EN 62471)	RG0
With control gear	True
Glow wire test	650 °C
Driver failure rate (at 5,000 hrs)	≤ 1 %
Power factor	≥ 0.9

Electrical Supply

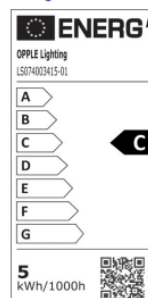
Frequency	50 - 60 Hz
Nominal voltage	220 - 240 V
DC input voltage	See catalogue appendix
Connection Specifications	
230V Cable length	1 m

Mechanical Properties

Housing material	Aluminium
Optical material	PMMA
Cover material	Polycarbonate

Ambient Conditions

Operating temperature	-10 - 45 °C
Application temperature	25 °C
Storage environment	-20 - 50 °C



Εικόνα 54: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19

3. LEDWall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3

Item Code	Item Description	Equivalent to (W)	Power (W)	Lumen Efficacy (lm/W)	CCT (K)	Colour rendering index (CRI)	Net Weight (pc/kg)
DALI2							
542003109300	LEDPanelS-P6 Sq595-30W-DALI-840-U19	TL 4x18W	30	4200 140	4000	> 80	2

Item			Box			
Item Code	Item Description	EU HS Code	Dimensions (mm) (LxWxH)	Gross Weight (pc/kg)	EAN	pc/box
542003109300	LEDPanelS-P6 Sq595-30W-DALI-840-U19	94051190	631x41x673	2.56	6941497774361	1
140055484	LEDPanelRc-SI Sq600-Surface-Module-WH-CT	94059900	690x690x118	4.26	6956321879808	1
140057770	LEDPanelRc-SI-Mounting-Springs-595	73209090	80x80x53	0.50	6956321888121	1
140060852	LEDFixture-Ceiling-Cable-Kit-0.5m	73121020	510x100x10	0.40	6956321895266	1
542003021800	LEDPanelRc-S-B2 Mounting-Springs	73209090	280x200x170	0.10	6941408821672	1
542098000800	LEDPanelRC-SI U19 EM-kit 1h	85044083	490x390x150	0.98	6941497702340	1
542098000900	LEDPanelRC-SI U19 EM-kit 3h	85044083	490x390x150	1.08	6941497702333	1
542098001000	LEDTrunking DALI Power Supply	85044083	198x54x39	0.24	6945730496614	1
542098009600	LEDPanelRc Sq600-Frame-WH	94059900	688x88x694	1.79	6941497704061	1
542098017600	LEDPanelRc2 Sq600-Surface-Kit-WH	94059900	685x77x68	1.53	6941497720696	1
542098030700	Junction-Box-WH	85369010	43x103x36	0.06	6941408868684	1
542098045500	LEDPanelS-P Suspension-Kit-G6	73121020	130x130x30	0.22	6941497784773	1

Technical Specifications

Lifetime (L70)	100,000 h
Lifetime (L80)	70,000 h
Lifetime (L90)	50,000 h
On-/Off-cycles	100,000
Colour consistency (SDCM)	3
Dimmability	DALI2
Beam angle	90 °
Finishing	White RAL9003
RAL-Number	9003
UGR	19
Ingress protection front side (IP)	IP54
Ingress protection recessed part (IP)	IP20
Impact strength (IK)	IK03
Protection class	II
Risk group (EN 62471)	RG0
With control gear	True
Glow wire test	650 °C
Driver failure rate (at 5,000 hrs)	≤ 1 %
Power factor	≥ 0.9

Electrical Supply

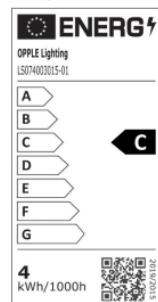
Frequency	50 - 60 Hz
Nominal voltage	220 - 240 V
DC input voltage	See catalogue appendix
Connection Specifications	
230V Cable length	1 m

Mechanical Properties

Housing material	Aluminium
Optical material	PMMA
Cover material	Polycarbonate

Ambient Conditions

Operating temperature	-10 - 45 °C
Application temperature	25 °C
Storage environment	-20 - 50 °C



Εικόνα 55: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LED Wall-Mounted-E2 Rd275-22W-MD-EM3

4. LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840

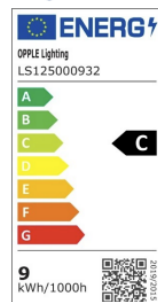
Item Code	Item Description	Equivalent to (W)	Power (W)	Lumen Efficacy (lm/W)	UGR CCT (K)	Net Weight (kg/pc)
Dimmable (Triac)						
540001409600	LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840	10	1200	120	19 3K/4K	0.4

Technical Specifications	
Lifetime (L70)	70,000 h
Lifetime (L80)	50,000 h
On-/Off-cycles	100,000
Colour consistency (SDCM)	4
Dimmability	Triac
Beam angle	70 °
Finishing	White RAL9003
RAL-Number	9003
Colour rendering index (CRI)	> 80
Ingress protection front side (IP)	IP54
Ingress protection recessed part (IP)	IP20
Impact strength (IK)	IK03
Protection class	II
Risk group (EN 62471)	RG1
With control gear	True
Glow wire test	650 °C
Driver failure rate (at 5,000 hrs)	≤ 1 %
Power factor	≥ 0.9

Electrical Supply	
Frequency	50 - 60 Hz
Nominal voltage	220 - 240 V
DC input voltage	No
230V Cable length	0.3 m

Mechanical Properties	
Housing material	Aluminium
Optical material	Polycarbonate

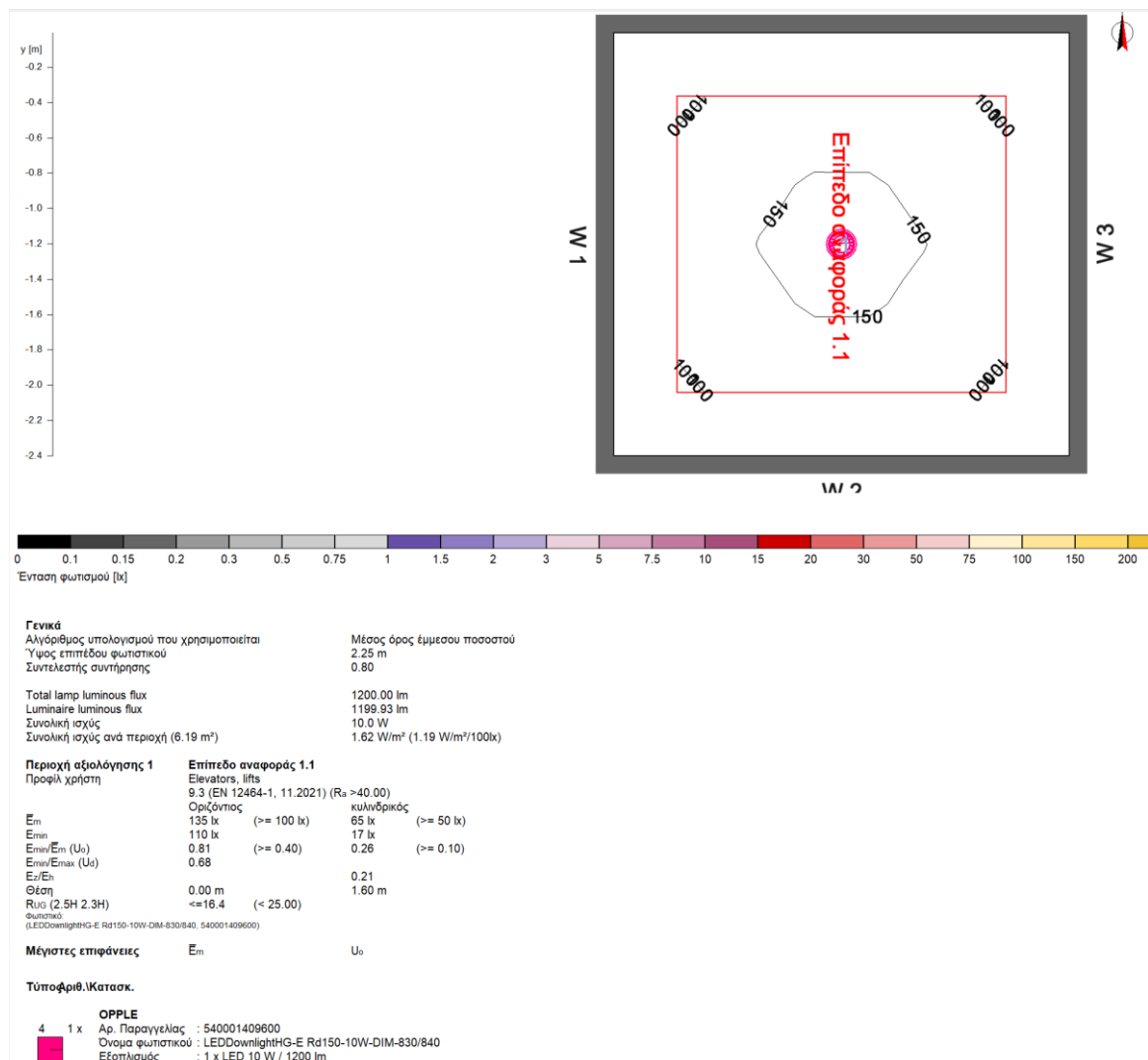
Ambient Conditions	
Operating temperature	-10 - 45 °C
Application temperature	25 °C
Storage environment	-25 - 50 °C



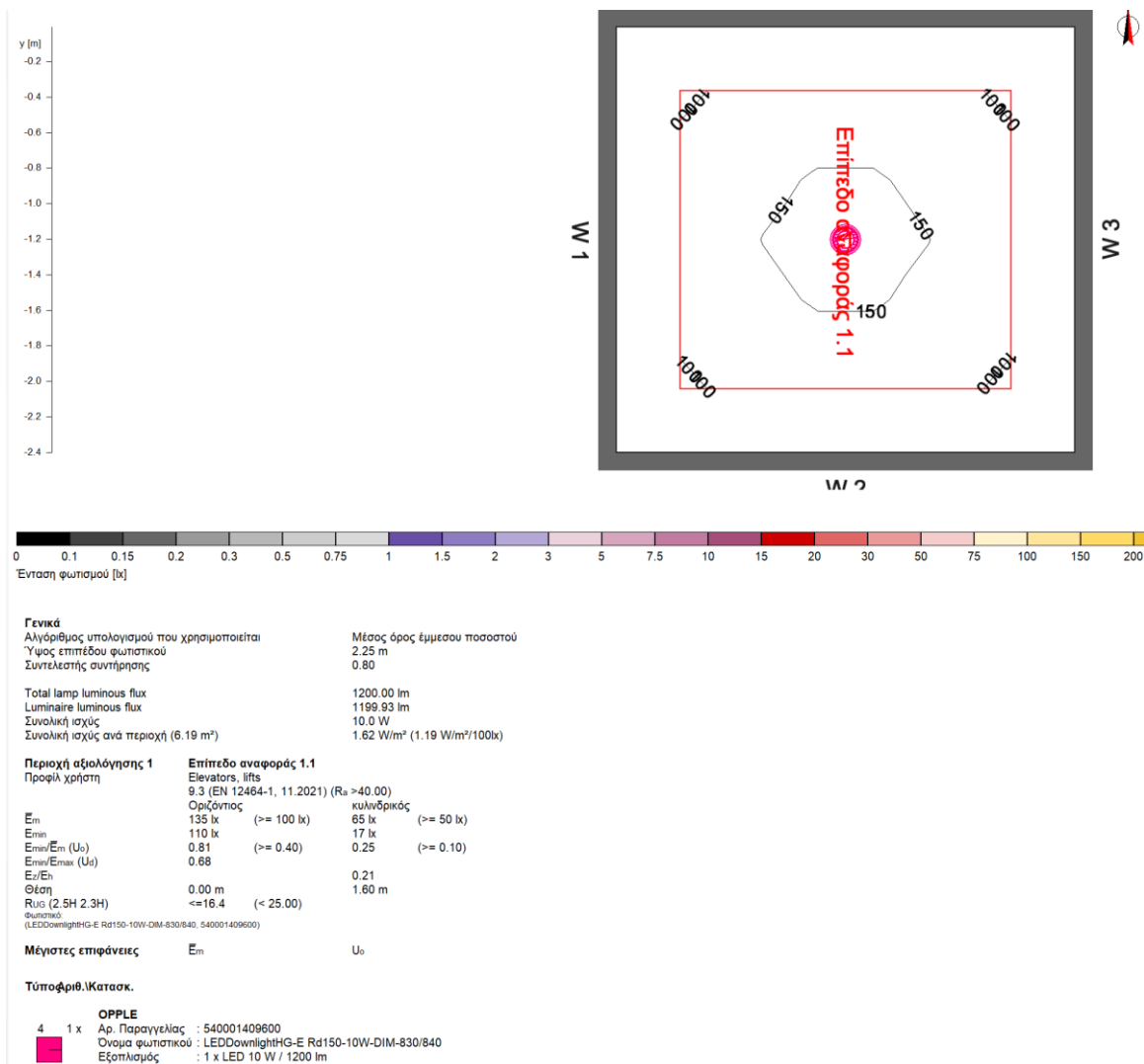
Εικόνα 56: Τεχνικές Προδιαγραφές για το φωτιστικό LEDDownlightHG-E Rd150-10W-DIM-830/840

Παράρτημα Γ: Υπολογισμοί στο Relux

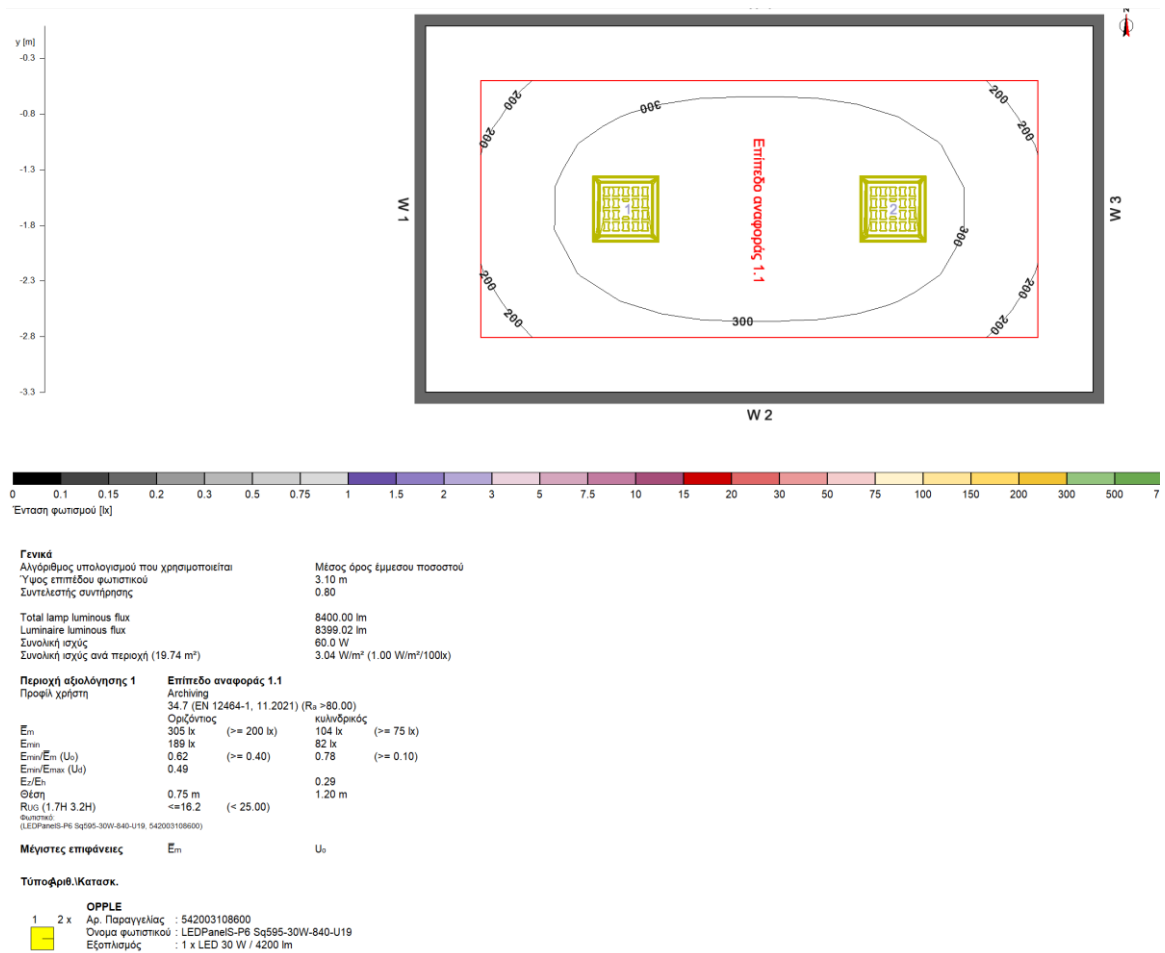
Στο παρόν παράρτημα παραθέτω τους υπολογισμούς που προκύπτουν για κάθε δωμάτιο από την προσομοίωση στο Relux:



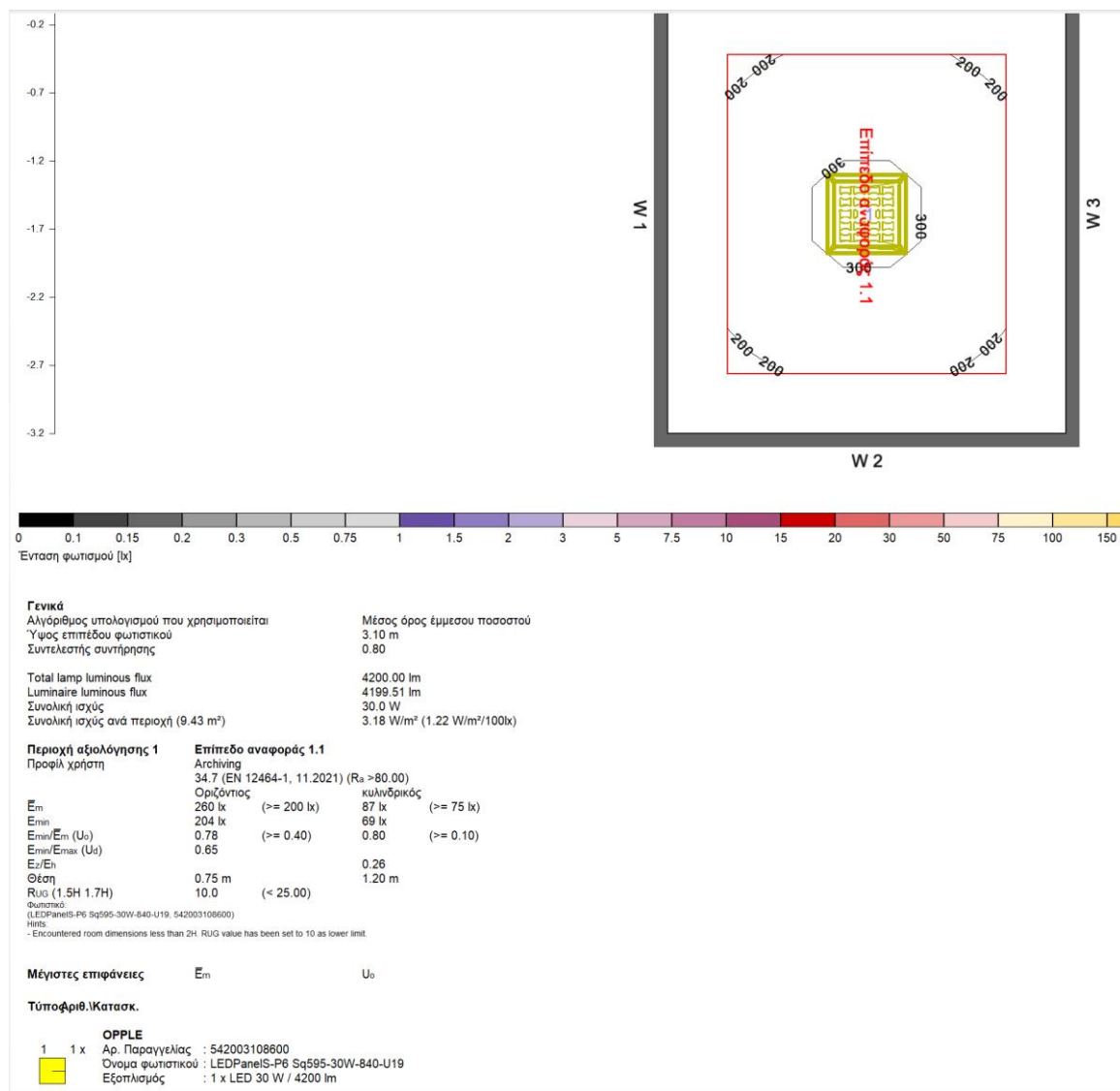
Εικόνα 57: Αποτελέσματα Relux Ασανσέρ 1



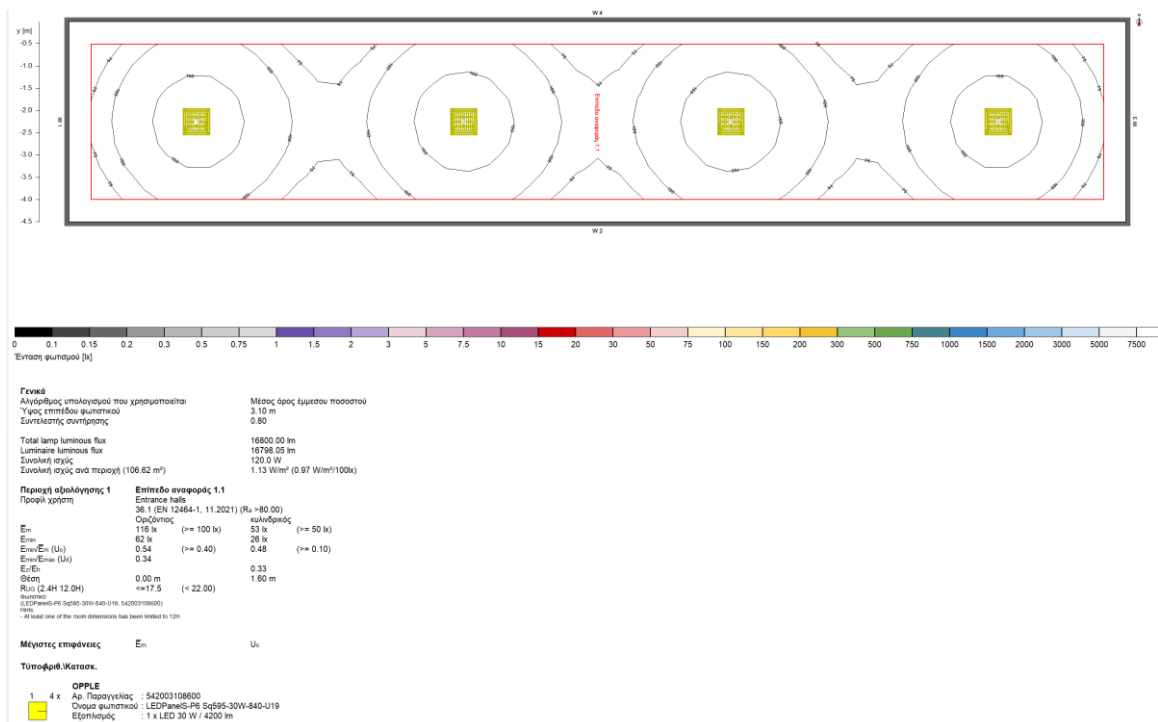
Εικόνα 58: Αποτελέσματα Relux Ασανσέρ 2



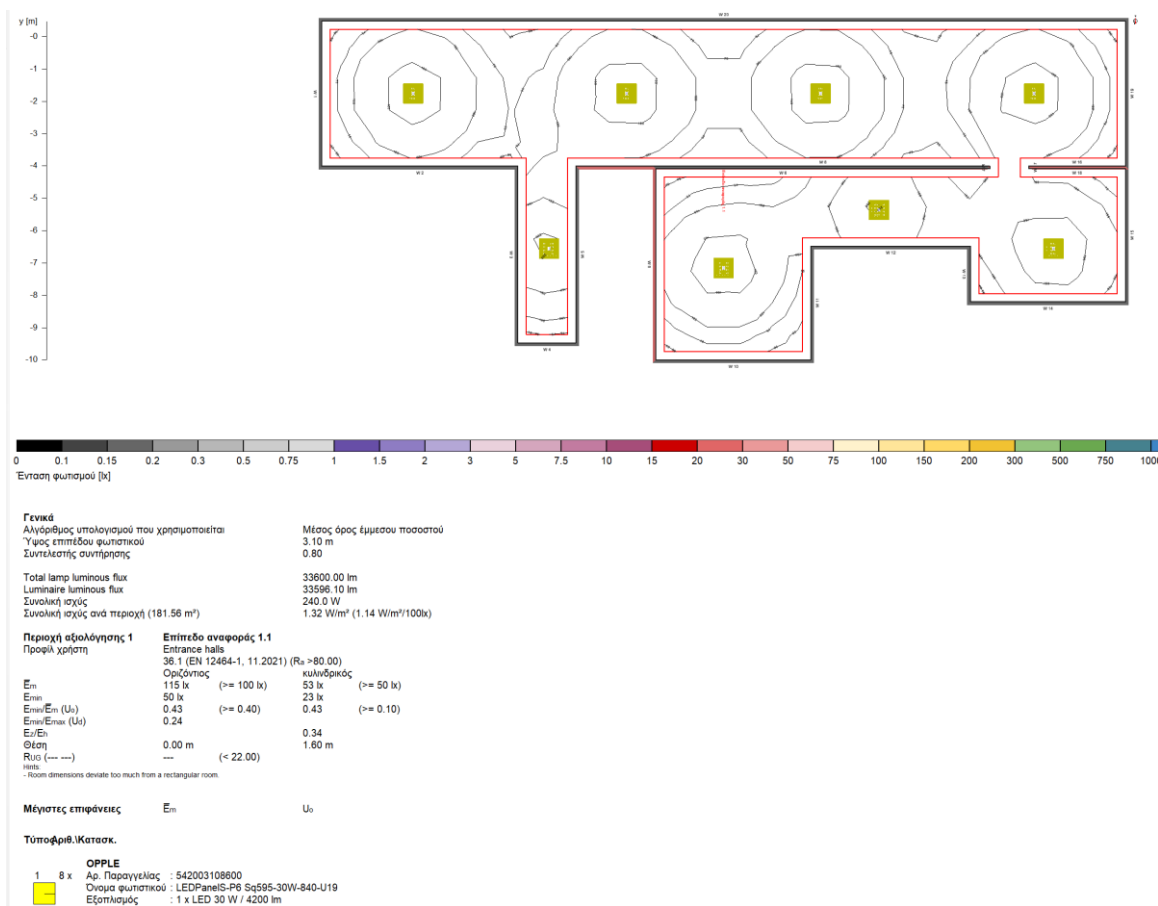
Εικόνα 59: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο 1



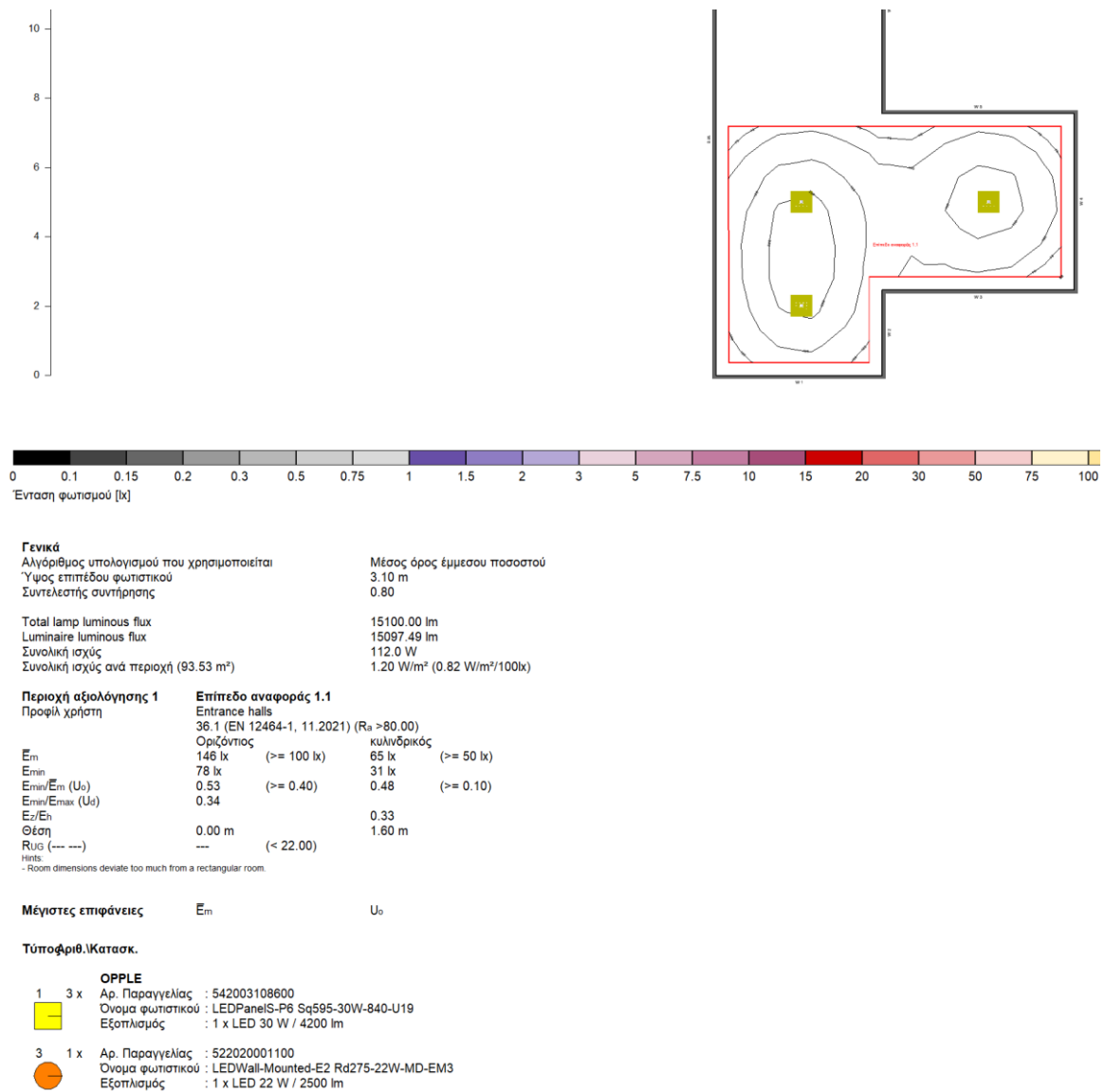
Εικόνα 60: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο 2



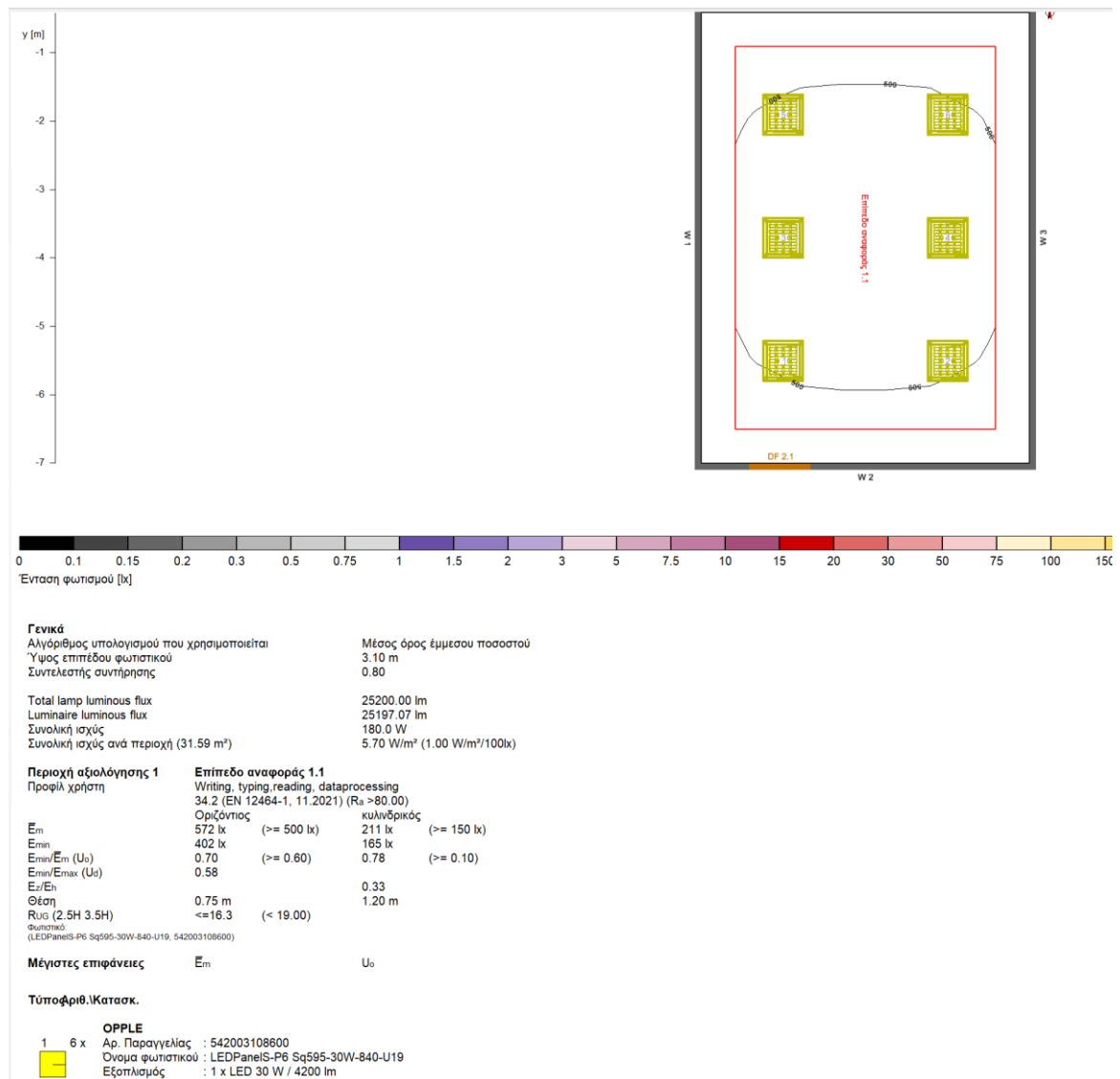
Εικόνα 61: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Δ4-1



Εικόνα 62: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Δ4-2, 4



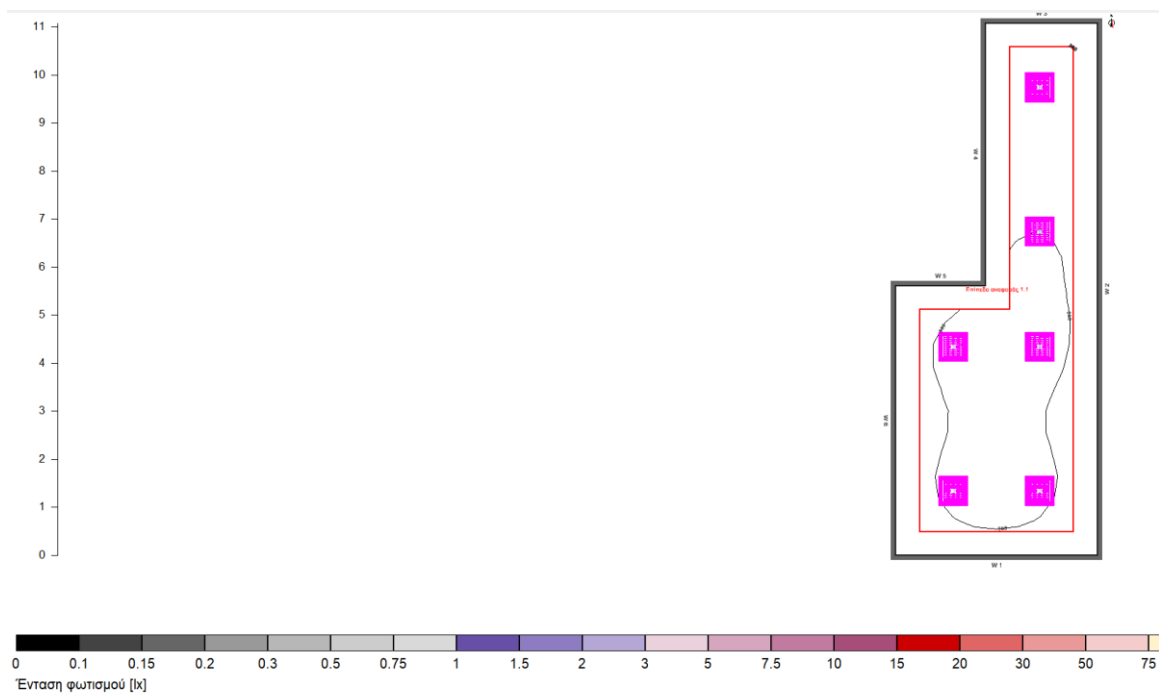
Εικόνα 63: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Δ4-3, Κ4-1



Εικόνα 64: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο E4-1



Εικόνα 65: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο E4-10



Γενικά
 Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται: Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού
 Ύψος επιπέδου φωτιστικού: 3.10 m
 Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Total lamp luminous flux: 28560.00 lm
 Luminaire luminous flux: 28556.68 lm
 Συνολική ισχύς: 204.0 W
 Συνολική ισχύς ανά περιοχή (36.27 m²): 5.62 W/m² (1.10 W/m²/100lx)

Περιοχή αξιολόγησης 1
 Προφίλ χρήση: **Επίπεδο αναφοράς 1.1**
 Writing, typing, reading, dataprocessing
 34.2 (EN 12464-1, 11.2021) (Ra >80.00)

Οριζόντιος	κυλινδρικός
E_m : 510 lx (≥ 500 lx)	188 lx (≥ 150 lx)
E_{min} : 352 lx	114 lx
$E_{min}/E_m (U_0)$: 0.69 (≥ 0.60)	0.61 (≥ 0.10)
$E_{min}/E_{max} (U_d)$: 0.54	
E_z/E_h : 0.32	
Θέση: 0.75 m	1.20 m
RUG (2.2H 5.9H): ≤ 17.5 (< 19.00)	

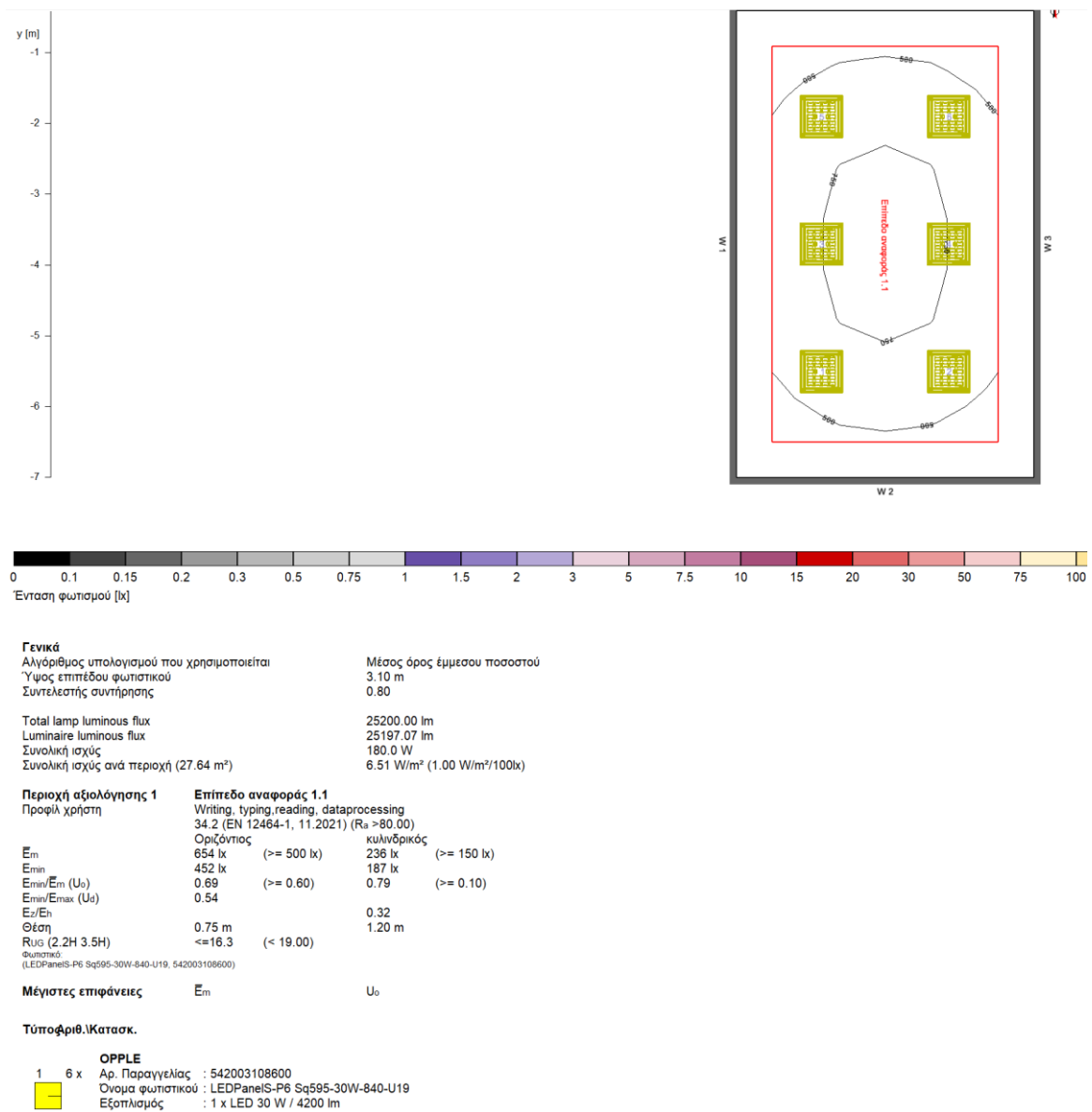
Φωτιστικό:
 (LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19, 542003111400)

Μέγιστες επιφάνειες
 E_m U_0

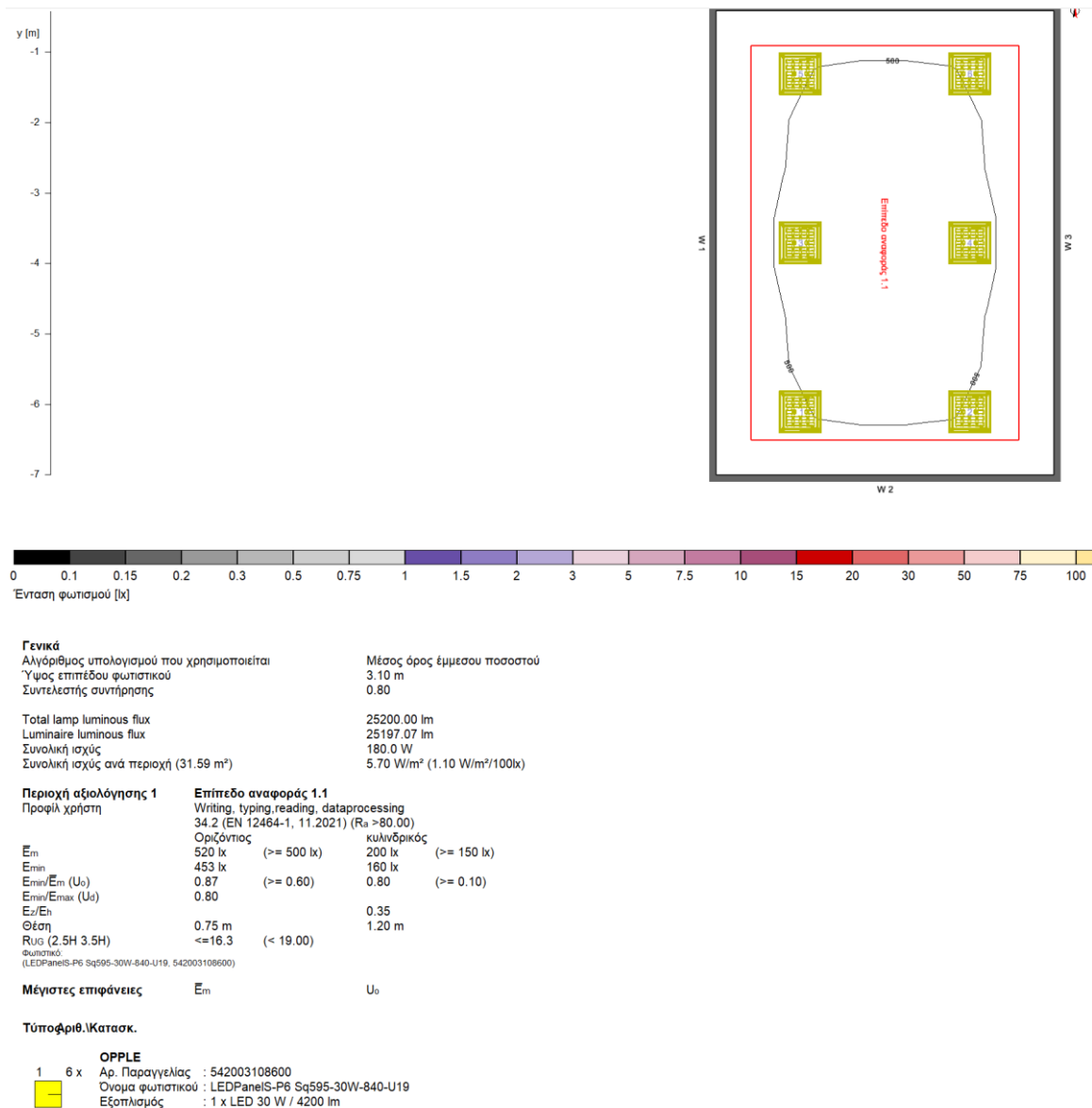
Τύποφριθ.Κατασκ.

OPPLE
 2 x 6 x
 Αρ. Παραγγελίας : 542003111400
 Όνομα φωτιστικού : LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19
 Εξοπλισμός : 1 x LED 34 W / 4760 lm

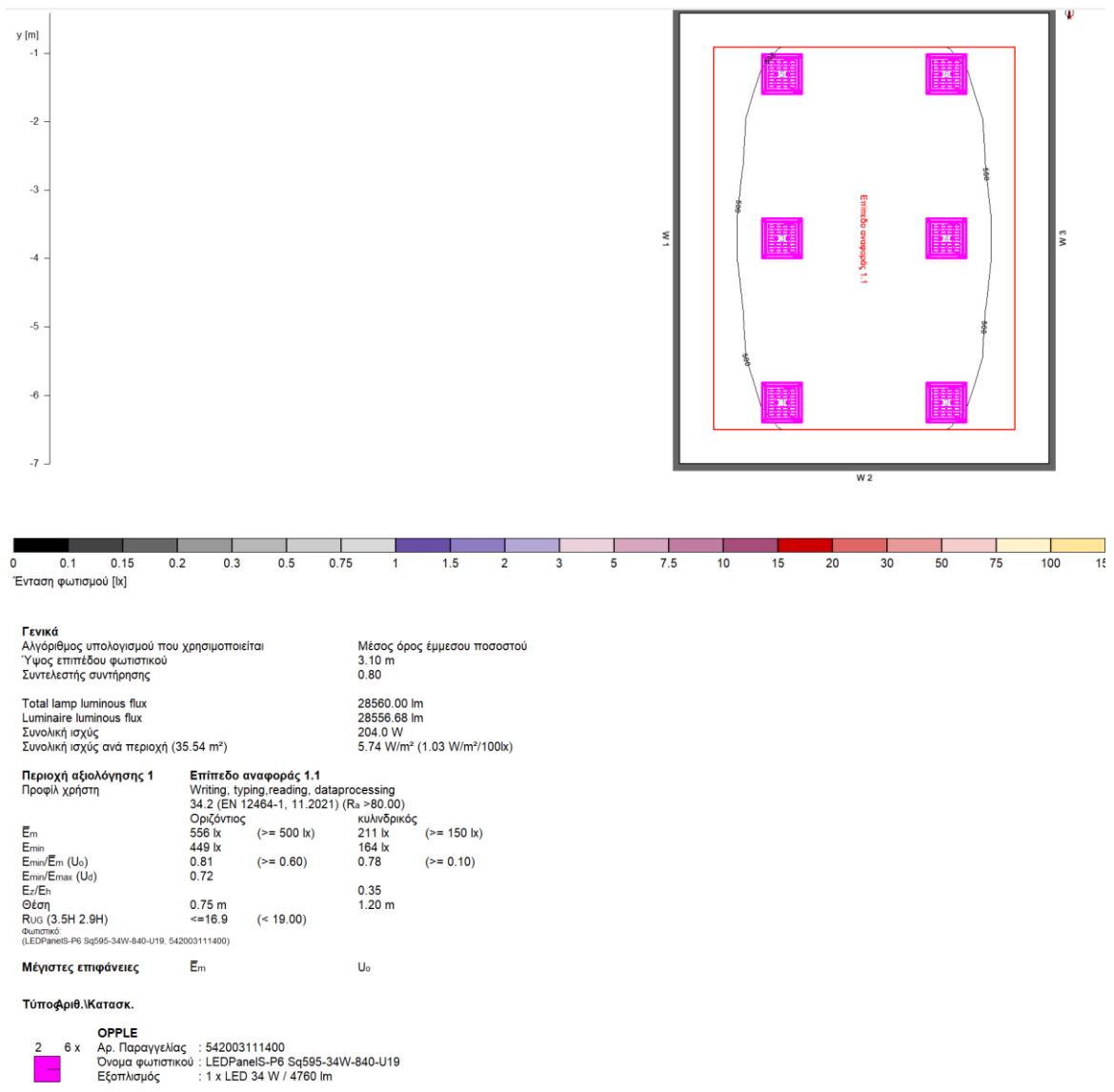
Εικόνα 66: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο E4-11



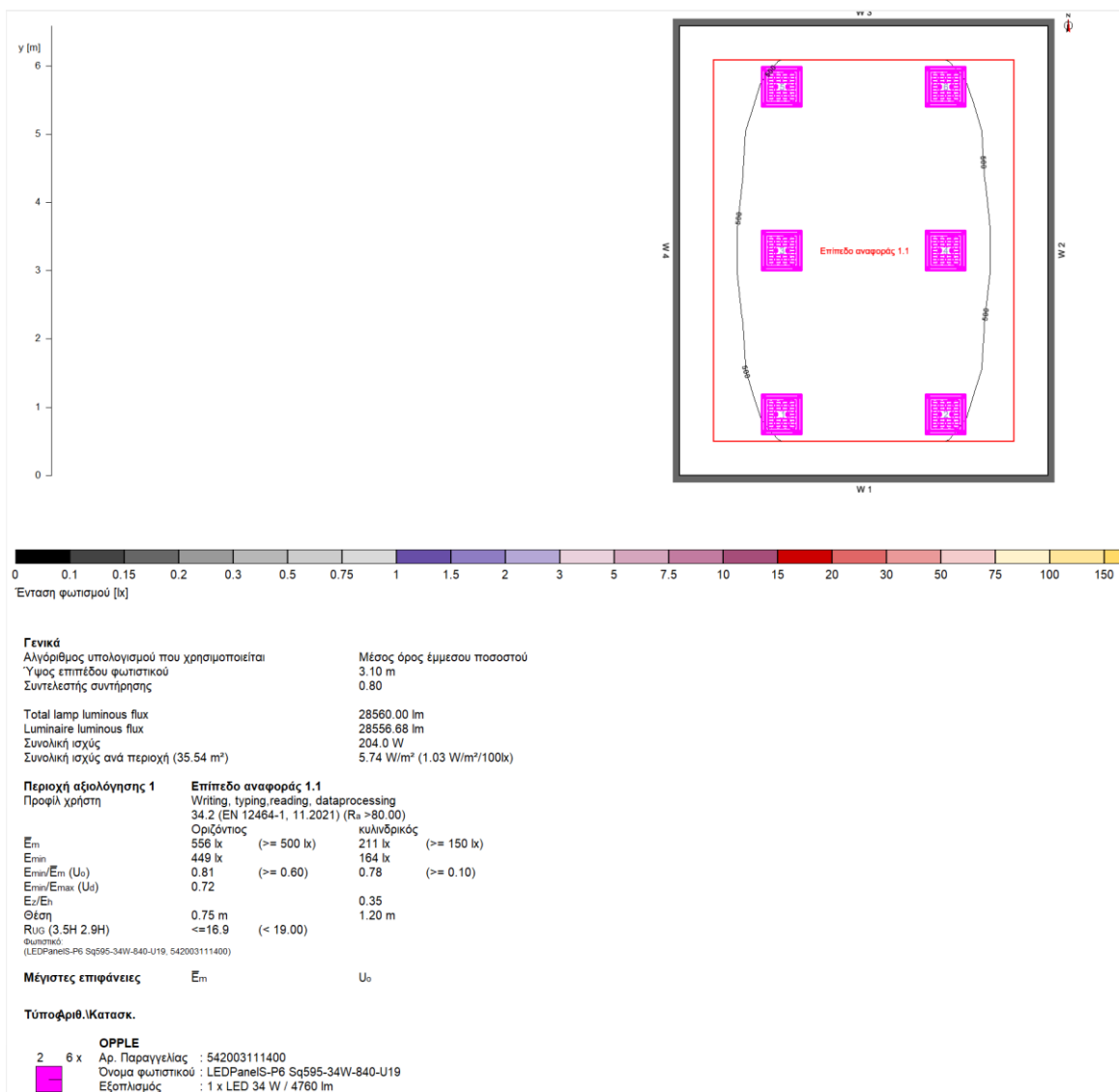
Εικόνα 67: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο E4-2



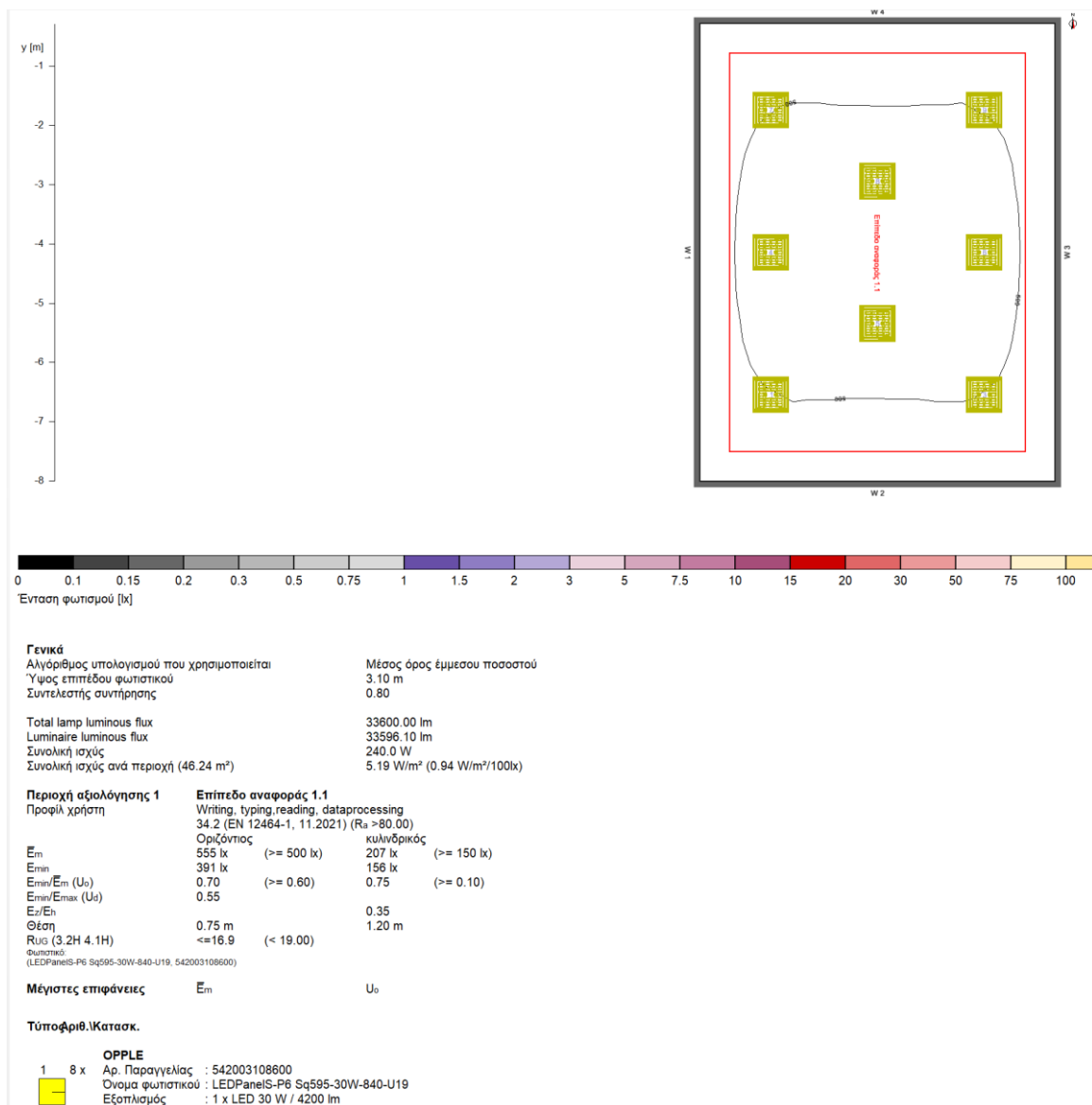
Εικόνα 68: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-3



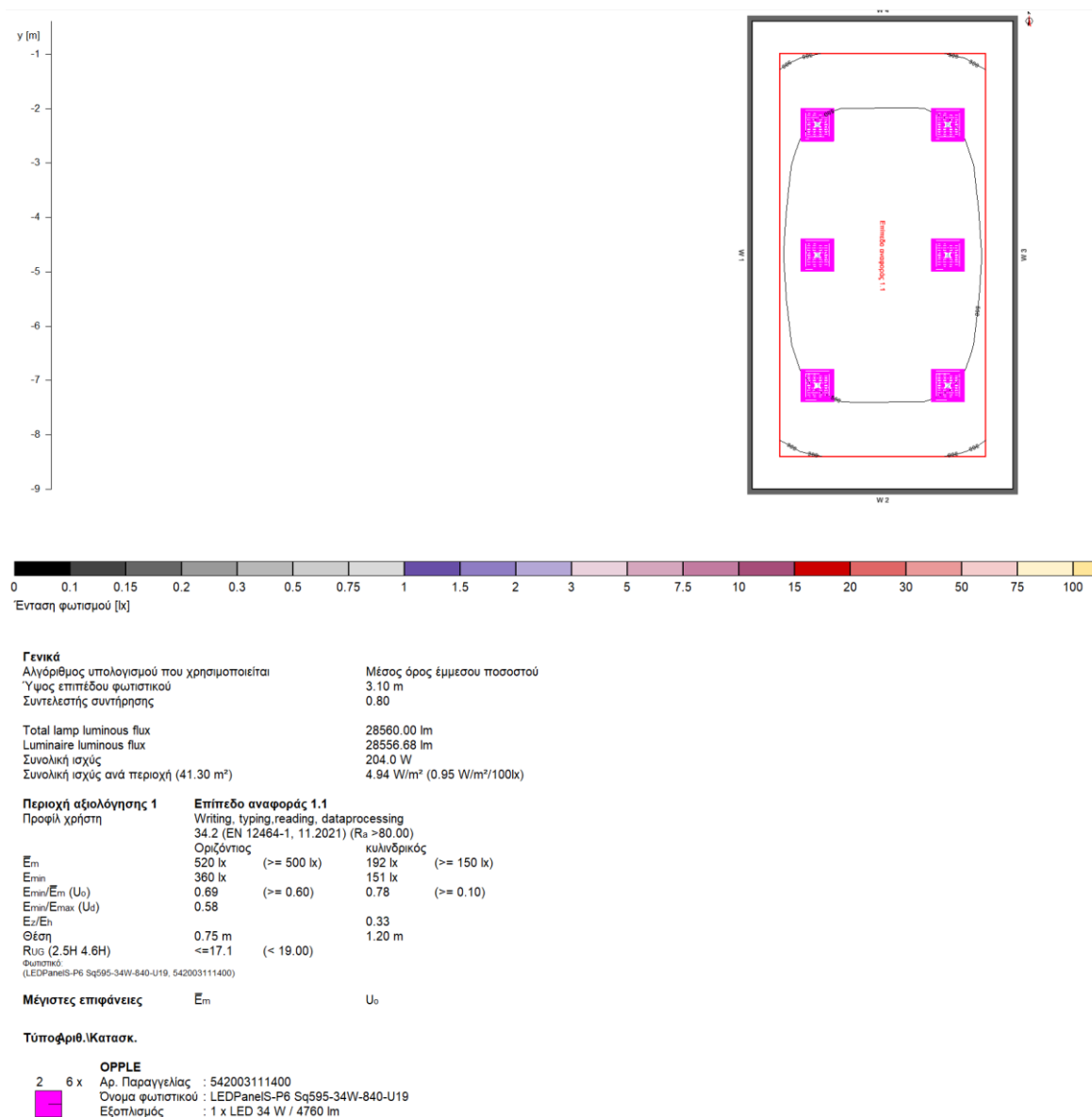
Εικόνα 69: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-4



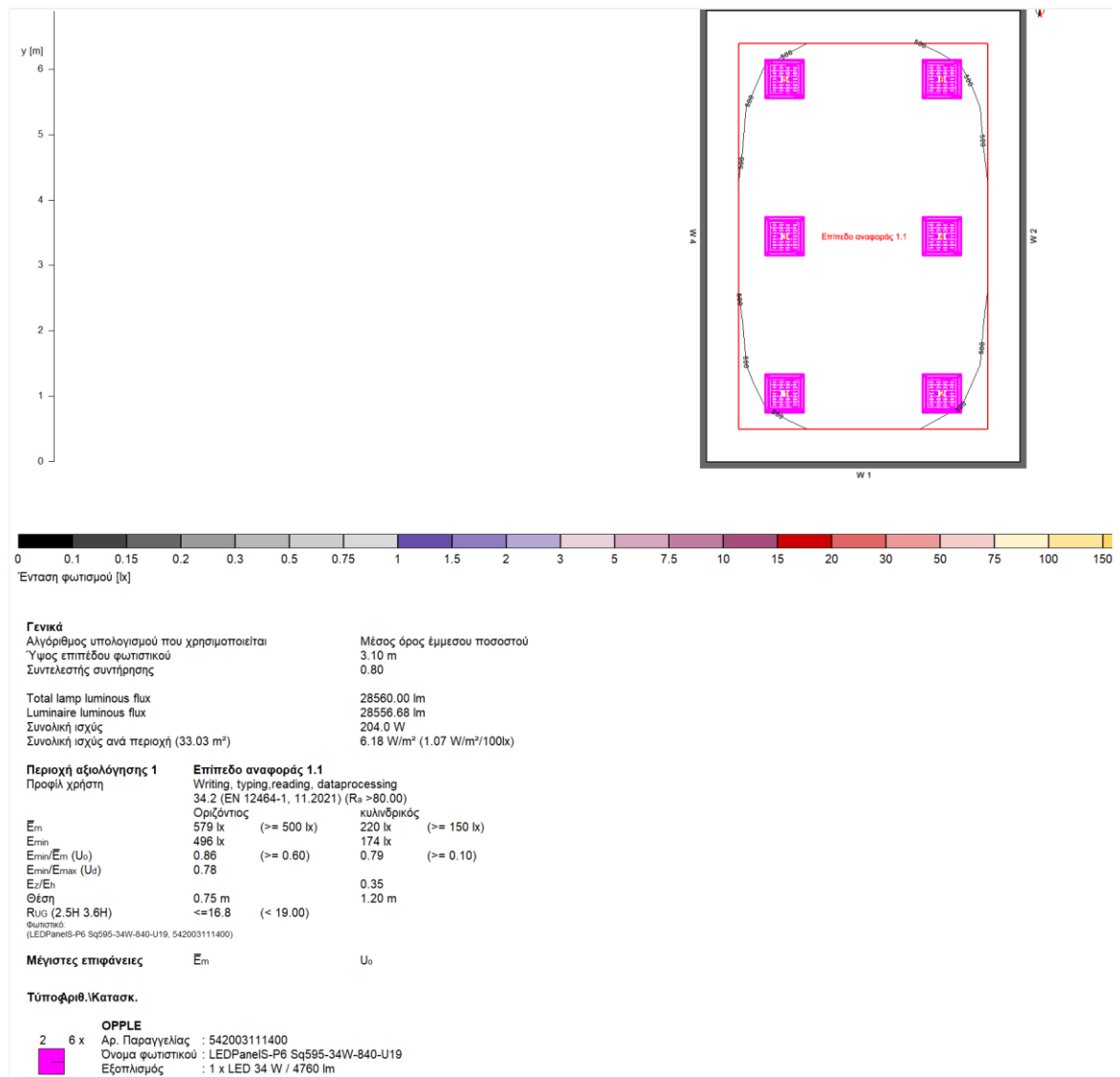
Εικόνα 70: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-5



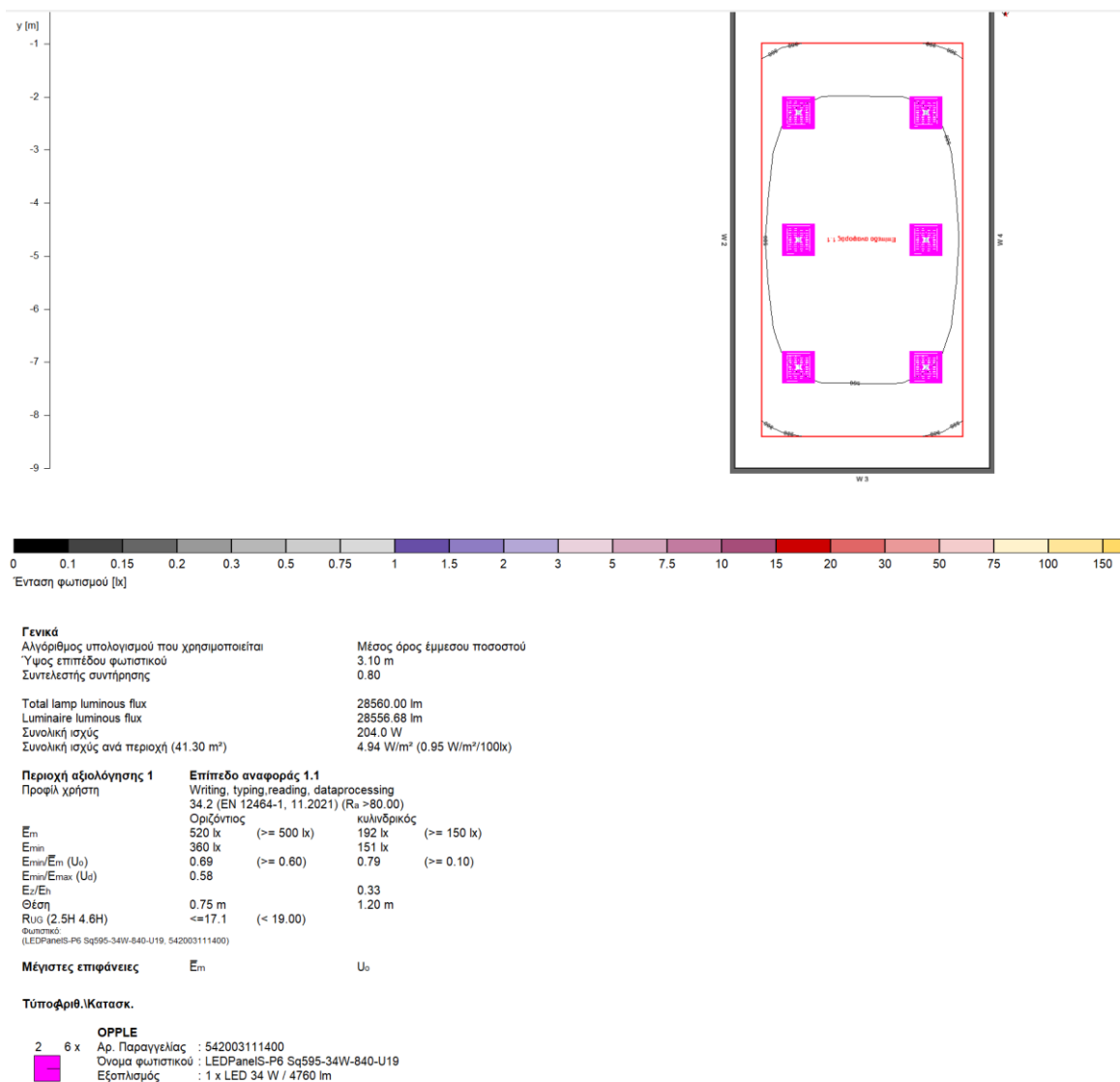
Εικόνα 71: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο E4-6



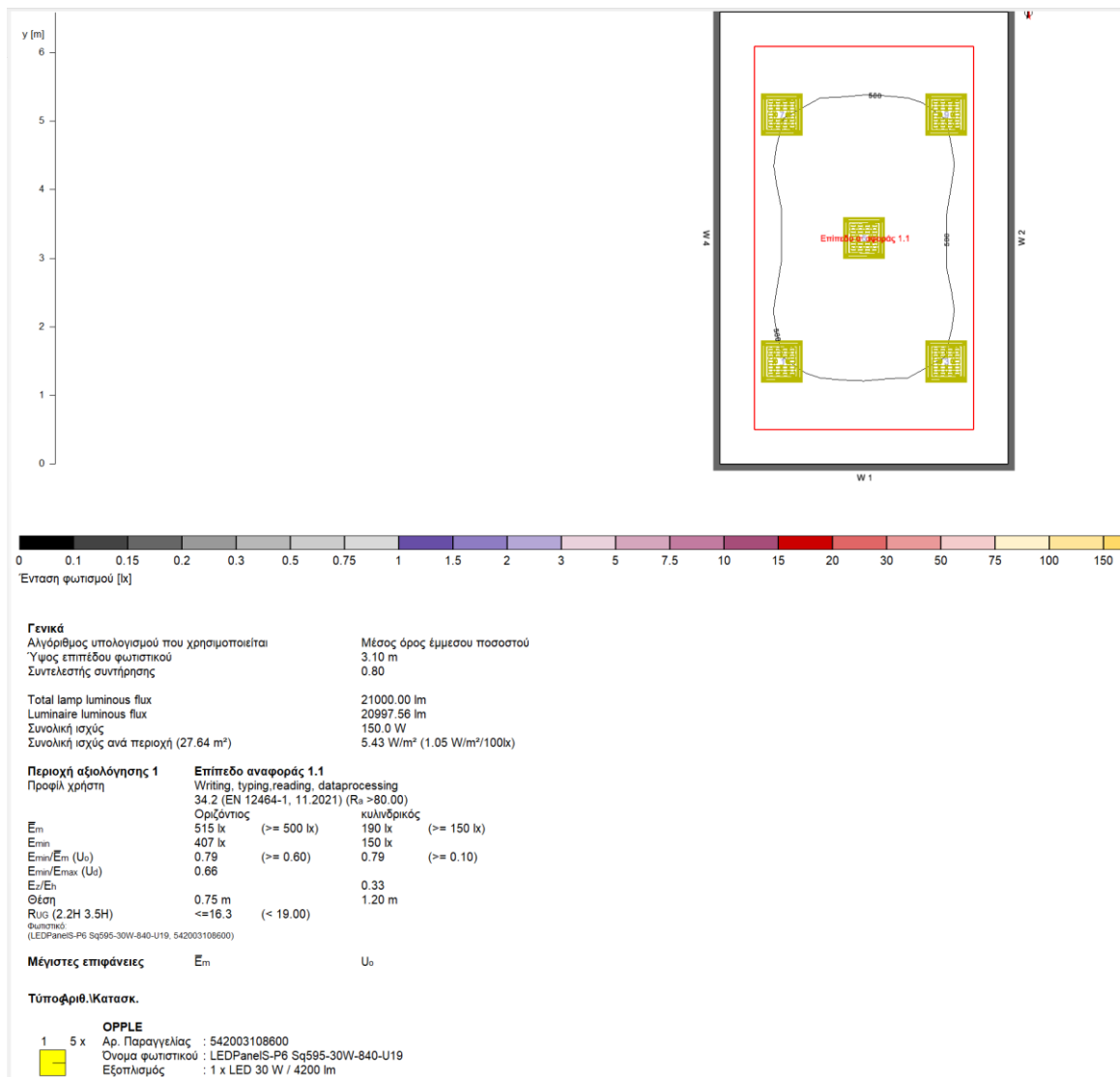
Εικόνα 72: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Ε4-7



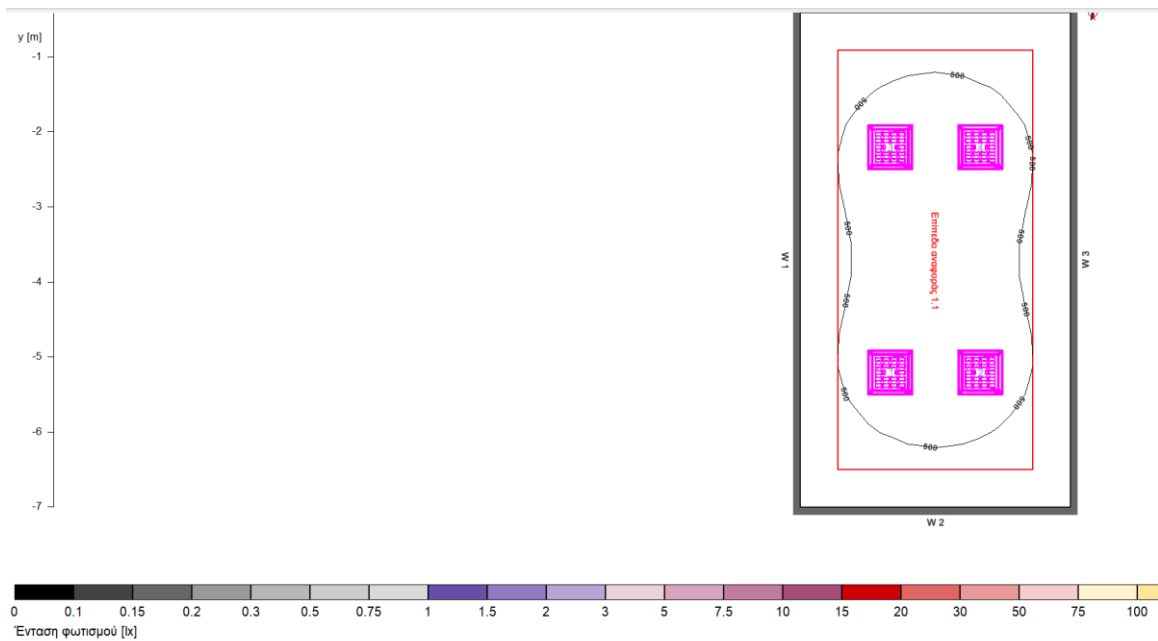
Εικόνα 73: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο E4-8



Εικόνα 74: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο E4-9



Εικόνα 75: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-1



Γενικά
 Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται: Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού
 Ύψος επιπέδου φωτιστικού: 3.10 m
 Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Total lamp luminous flux: 19040.00 lm
 Luminaire luminous flux: 19037.79 lm
 Συνολική ισχύς: 136.0 W
 Συνολική ισχύς ανά περιοχή (23.69 m²): 5.74 W/m² (1.02 W/m²/100lx)

Περιοχή αξιολόγησης 1
 Προφίλ χρήστη: Writing, typing, reading, dataprocessing
 34.2 (EN 12464-1, 11.2021) (Ra >80.00)

Επίπεδο αναφοράς 1.1	Οριζόντιος	κυλινδρικός
E_m	565 lx (≥ 500 lx)	200 lx (≥ 150 lx)
E_{min}	378 lx	168 lx
$E_{min}/E_m (U_0)$	0.67 (≥ 0.60)	0.84 (≥ 0.10)
$E_{min}/E_{max} (U_0)$	0.55	
E_z/E_h		0.31
Θέση	0.75 m	1.20 m
$R_{UG} (1.9H \text{ } 3.5H)$	≤ 16.8 (< 19.00)	

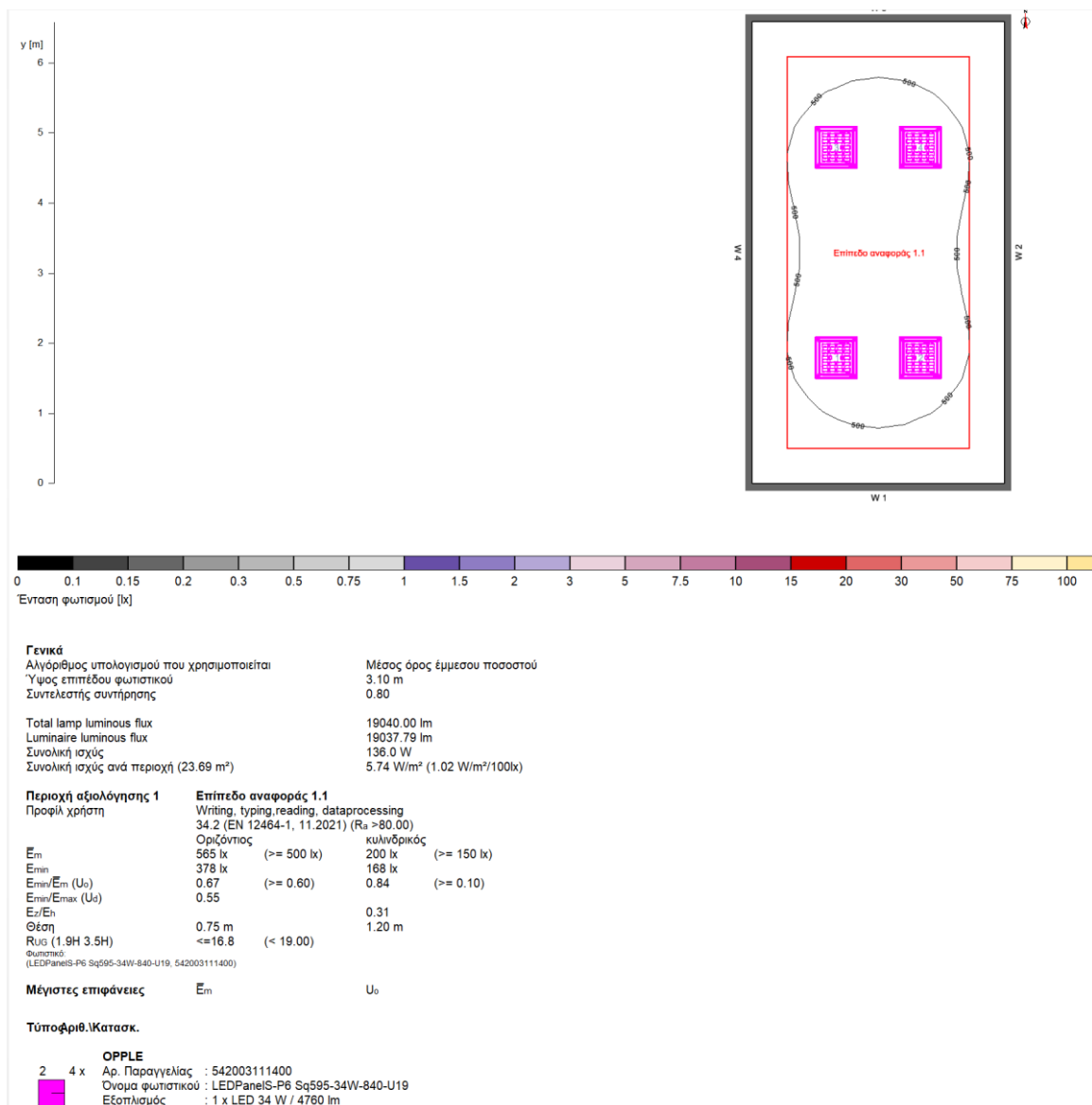
Φωτιστικό: (LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19, 542003111400)

Μέγιστες επιφάνειες
 E_m U_0

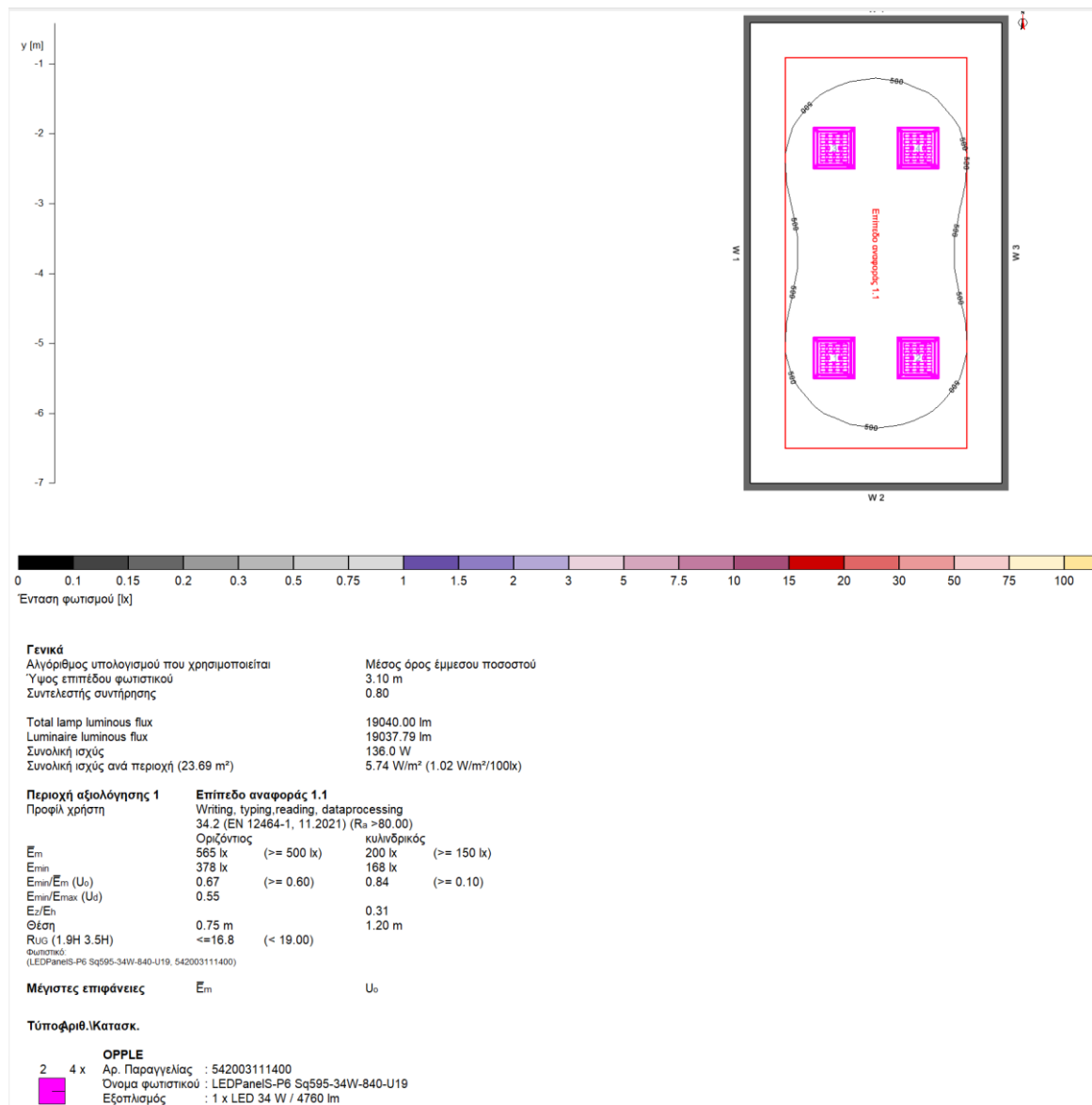
Τύποφριθ.Κατασκ.

OPPLE
 Αρ. Παραγγελίας : 542003111400
 Όνομα φωτιστικού : LEDPanelS-P6 Sq595-34W-840-U19
 Εξοπλισμός : 1 x LED 34 W / 4760 lm

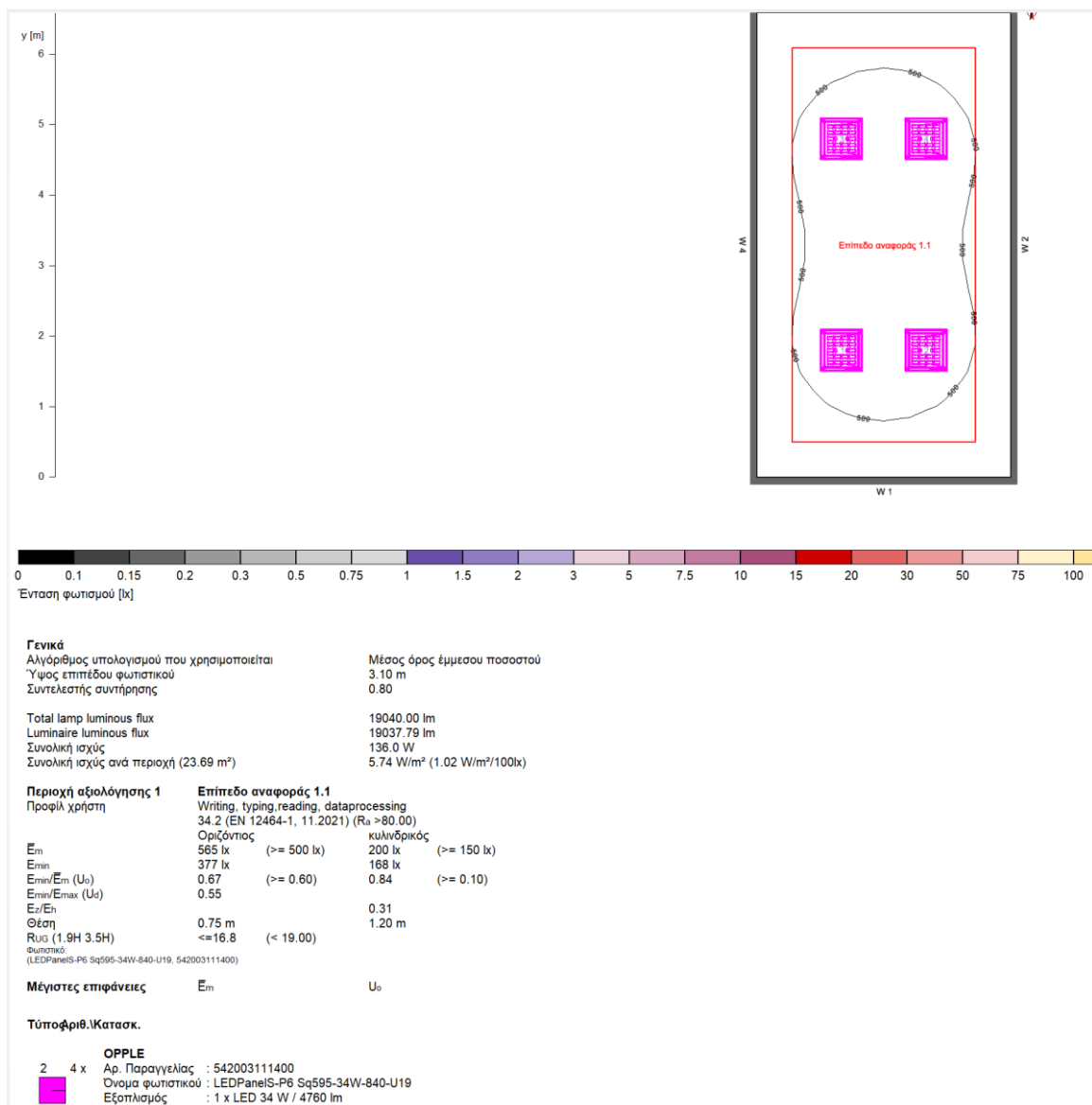
Εικόνα 76: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-2



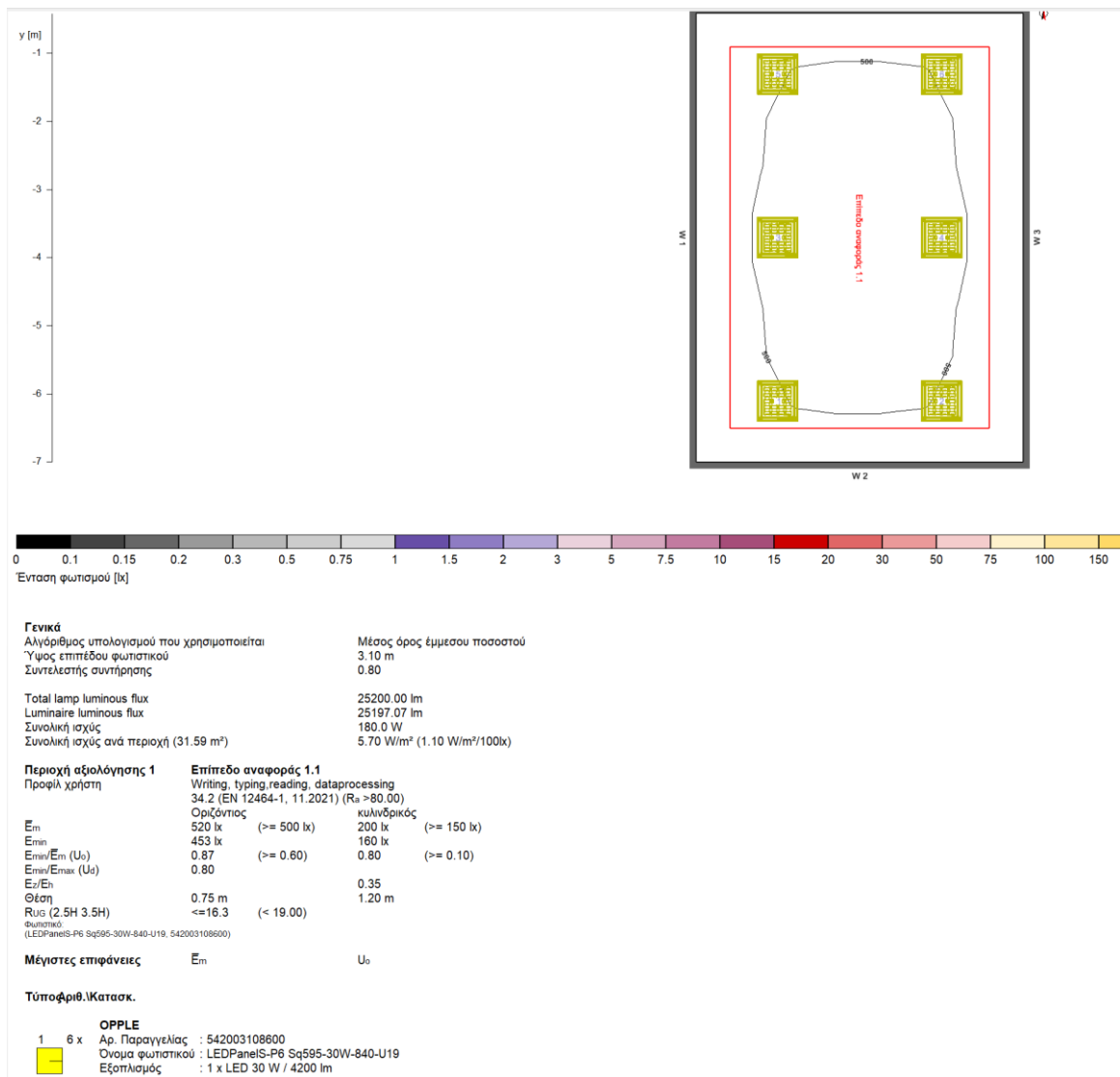
Εικόνα 77: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο H4-3



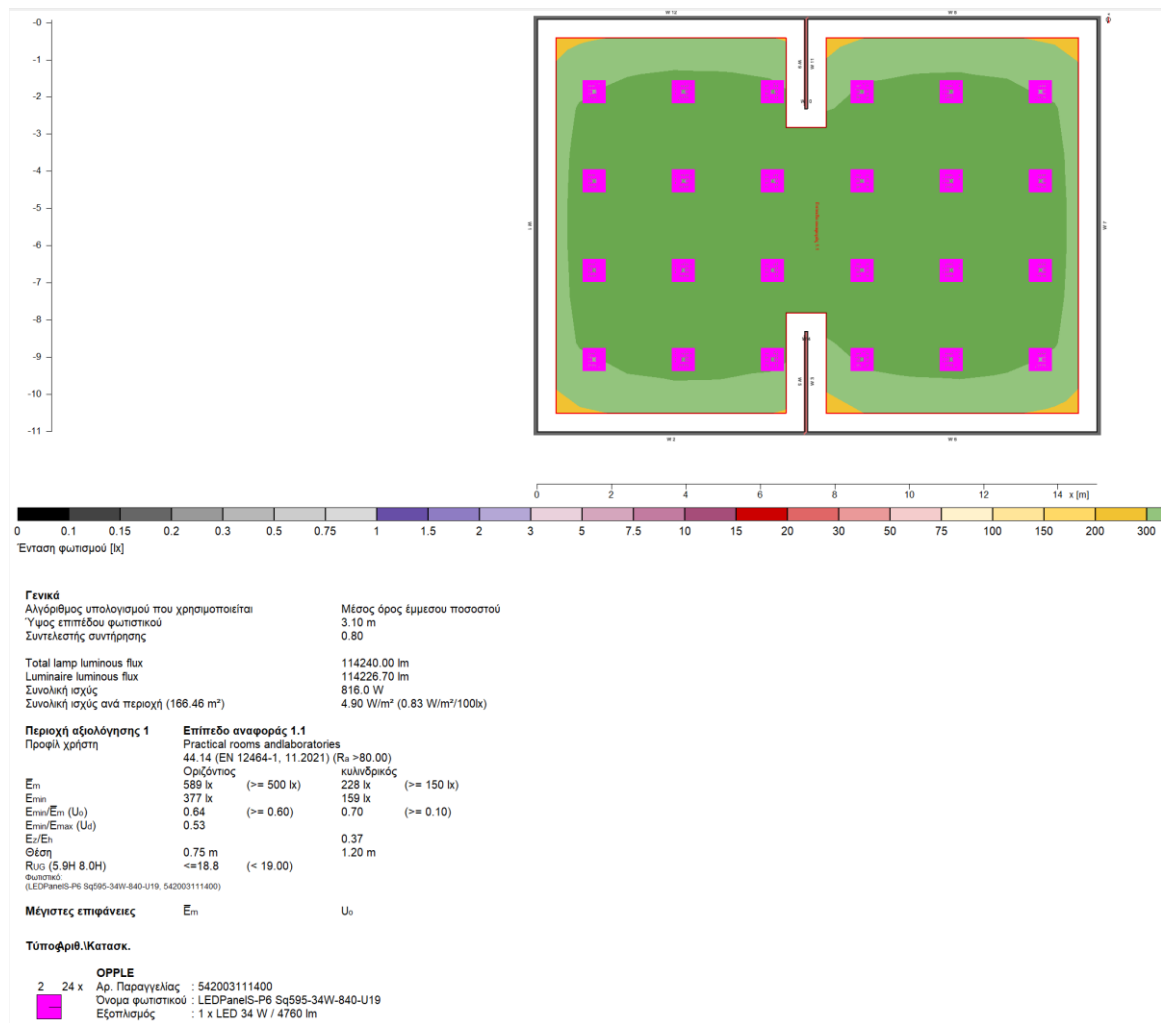
Εικόνα 78: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-4



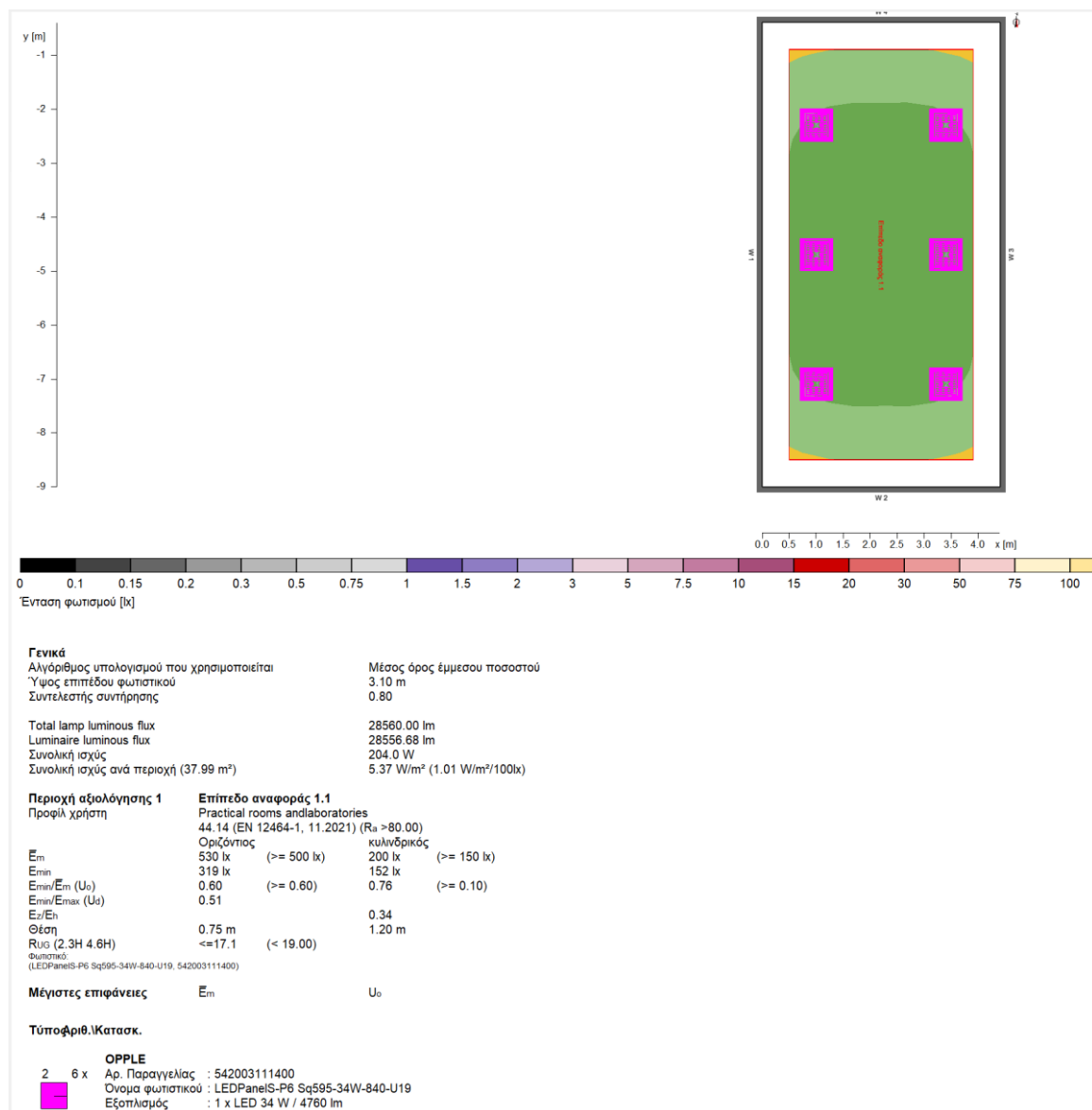
Εικόνα 79: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο H4-5



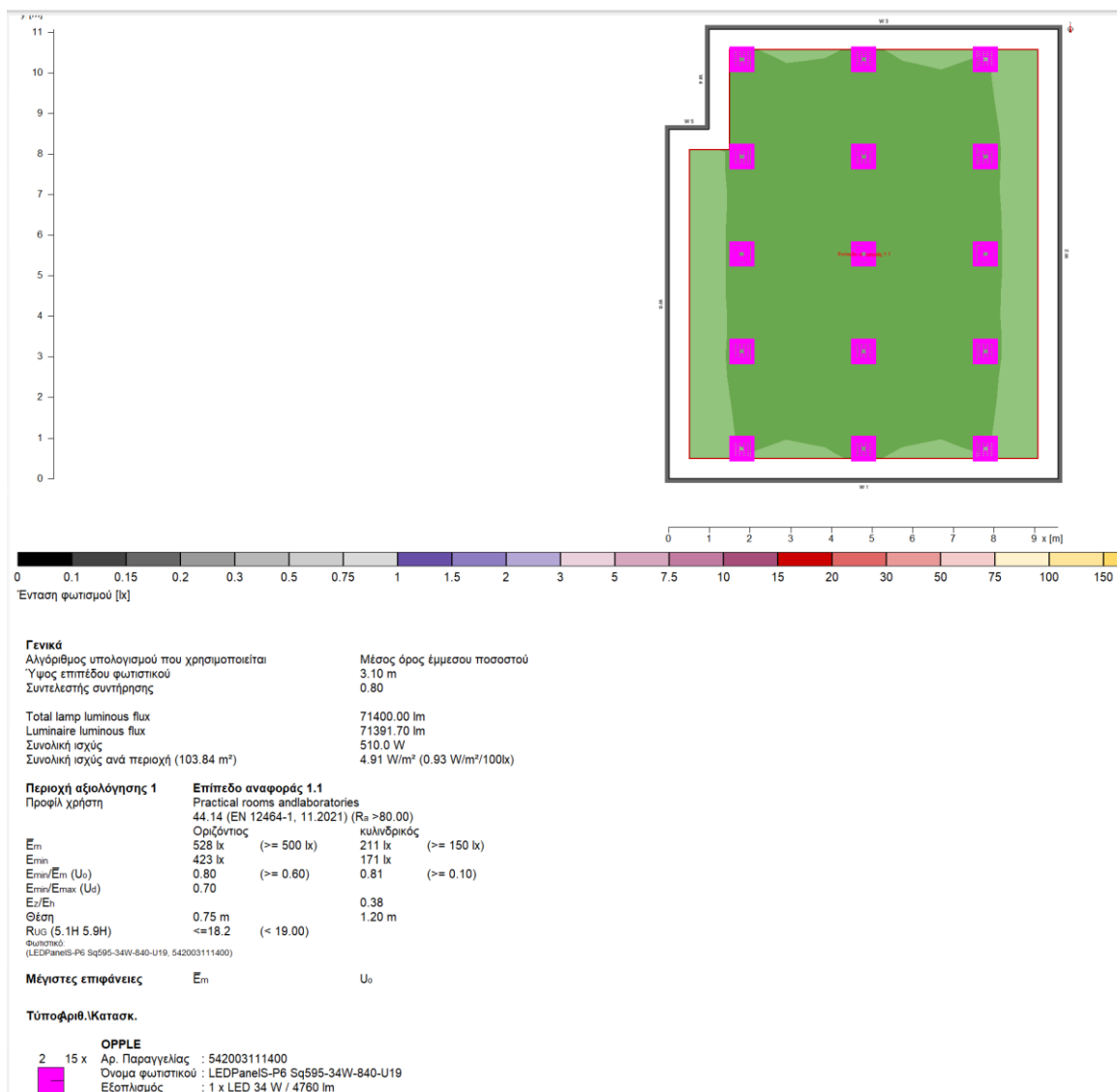
Εικόνα 80: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο H4-6



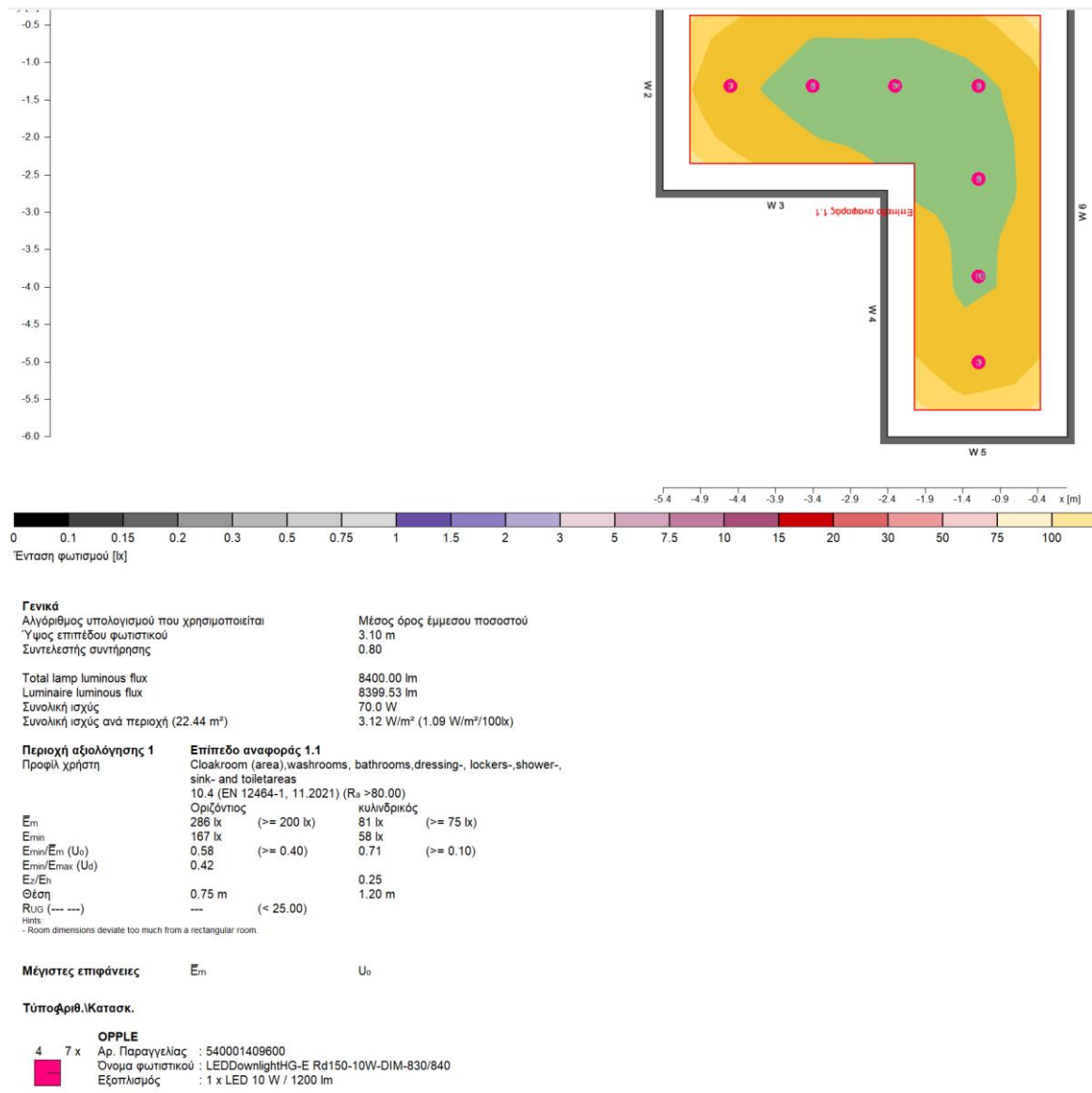
Εικόνα 81: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-7



Εικόνα 82: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο Η4-8 Α



Εικόνα 83: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο H4-8 B



Εικόνα 84: Αποτελέσματα Relux Δωμάτιο T4-1

Βιβλιογραφία

- [1] Boyce, P.R., 2014. Human Factors in Lighting. CRC Press.
- [2] DiLouie, C., 2010. Advanced Lighting Controls: Energy Savings, Productivity, Technology, and Applications. The Fairmont Press.
- [3] Steffy, G., 2002. Architectural Lighting Design. John Wiley & Sons.
- [4] Muneer, T. & Kambezidis, H.D., 2004. Lighting design and energy performance analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8(5), pp.495-518.
- [5] Rea, M.S. & Bullough, J.D., 2001. Application of light-emitting diodes in buildings. Lighting Research & Technology, 33(1), pp.33-42.
- [6] Li, D.H. & Tsang, E.K., 2008. An analysis of energy-efficient light fittings and daylighting in buildings. Energy and Buildings, 40(10), pp.1811-1818.
- [7] Relux Informatik AG, 2023. Relux Desktop User Manual. [Online] Available at: <https://www.relux.com> [Accessed 27 December 2024].
- [8] Mingozi, A. & Bellia, L., 2017. Lighting simulation software for architectural projects: A review. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 18(1), pp.23-31.
- [9] Chraibi, N. & Ain, S.A., 2019. Integration of LED lighting and simulation tools in energy-efficient buildings. Energy Efficiency, 12(4), pp.789-800.
- [10] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), 2017. CIE 150: Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light.
- [11] European Union, 2012. Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency.
- [12] Relux Official Website, n.d. Relux. [Online] Available at: <https://www.relux.com> [Accessed 27 December 2024].
- [13] LED Professional, n.d. LED Professional. [Online] Available at: <https://www.led-professional.com> [Accessed 27 December 2024].
- [14] International Dark-Sky Association, n.d. International Dark-Sky Association. [Online] Available at: <https://www.darksky.org> [Accessed 27 December 2024].
- [15] Friedel, R. and Israel, P. (1987). *Edison's Electric Light: Biography of an Invention*. New Brunswick: Rutgers University Press.
- [16] Hecht, J. (2001). *City of Light: The Story of Fiber Optics*. Oxford: Oxford University Press.
- [17] Narukawa, Y., Ichikawa, M., Sanga, D., Sano, M. and Mukai, T. (2010). White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(35), p.354002.

- [18] Rea, M.S. (ed.) (2000). *The IESNA Lighting Handbook*. 9th ed. New York: Illuminating Engineering Society of North America.
- [19] Schivelbusch, W. (1995). *Disenchanted Night: The Industrialization of Light in the Nineteenth Century*. Berkeley: University of California Press.
- [20] European Union (2009). *Directive 2009/125/EC establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products*. Brussels: Official Journal of the EU.
- [21] ΕΛΟΤ (2011). *ΕΛΟΤ EN 12464-1: Φωτισμός χώρων εργασίας – Μέρος 1: Εσωτερικοί χώροι*. Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης.
- [22] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2017). *Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK)*. ΦΕΚ Β' 2367/12.07.2017.
- [23] ΕΛΟΤ (2006). *ΕΛΟΤ HD 384: Ηλεκτρολογικές Εγκαταστάσεις Κτιρίων*.
- [24] US Green Building Council (2019). *LEED v4.1 Building Design and Construction Guide*. Washington DC: USGBC.
- [25] BRE Group (2022). *BREEAM New Construction Manual*. Watford: Building Research Establishment.
- [26] DIAL GmbH (2023). *DIALux evo – Professional Lighting Design Software*. [online] Available at: <https://www.dialux.com> [Accessed 5 May 2025].
- [27] Lighting Analysts (2020). *AGi32 Overview*. [online] Available at: <https://www.agi32.com> [Accessed 5 May 2025].
- [28] Relux Informatik AG (2023). *Relux Suite Documentation and Features*. [online] Available at: <https://www.relux.com> [Accessed 5 May 2025].
- [29] Illuminating Engineering Society (IES) (2021). *Lighting Design Software Comparison*. New York: IES Technical Report.
- [30] Visual Lighting Software (2022). *Product Features*. [online] Available at: <https://www.visual-3d.com> [Accessed 5 May 2025].
- [31] Mills, E. (2002) 'Why we need better lighting policies in buildings', *Building and Environment*, 37(12), pp. 1129–1137.
- [32] U.S. Department of Energy (DOE) (2017) *Solid-State Lighting R&D Plan*. Available at: <https://www.energy.gov/eere/ssl/technology-roadmaps> (Accessed: 20 May 2025).
- [33] Chraibi, H. and Ain, M. (2019) 'Environmental impact of fluorescent and LED lighting: A comparative review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, pp. 494–504.
- [34] Muneer, T. and Kambezidis, H. (2004) *Solar Radiation and Daylight Models*. Oxford: Elsevier.

- [35] Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Λάμπρος Οικονόμου και Σταυρούλα Κουρτέση. *Φωτοτεχνία*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (2018).
- [36] NATIONAL LIGHTING PRODUCT INFORMATION PROGRAM. "Electronic Ballasts Non-dimming electronic ballasts for 4-foot and 8-foot fluorescent lamps". In: *The objective source of lighting product information*, Vol. 8.1 (2000).
- [37] IES Lighting Handbook. *Illuminating Engineering Society of North America*. In: *Lighting Measurements and Testing* (2020).
- [38] Robert Wolsey. "Lighting Answers". In: *T8 Fluorescent Lamps* (1993).
- [39] Quanyin Tan and Jinhui Li. "A study of waste fluorescent lamp generation in mainland China". In: *Journal of Cleaner Production*, 81 (2014).
- [40] E. Fred Schubert. *Light-Emitting Diodes* (2018). In: (2018).
- [41] Yijie Wang, J. Marcos Alonso, and Xinbo Ruan. "A Review of LED Drivers and Related Technologies". In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64.7 (2017), pp. 5754–5765. DOI: 10.1109/TIE.2017.2677335.
- [42] Ignacio Castro et al. "A Review on Flicker-Free AC–DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids". In: *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34.10 (2019), pp. 10035–10057. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2890716.
- [43] F.K. Yam and Z. Hassan. "Innovative advances in LED technology". In: *Microelectronics Journal*, 36.2 (2005), pp. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2004.11.008>.
- [44] Daniel F. Espejel-Blanco et al. "Comparison of Energy Consumption of Fluorescent Vs LED Lighting System of an Academic Building". In: *2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SusTech.2018.8671348.
- [45] Enedir Ghisi et al. "Electricity savings due to the replacement of fluorescent lamps with LEDs in classrooms". In: *European Journal of Sustainable Development*, 8.4 (2019).
- [46] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. *Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων*. Διαθέσιμο σε: <https://ypen.gr/energeia/energeiaki-exoikonomisi/ktiria/kenak/> (επίσκεψη 20/08/2023).

- [47] Richard Caple FSLL. “Lifetime metrics for LED luminaires”. In: *The Society of Light and Lighting Part of the Chartered Institution of Building Services Engineers*, 2022.
- [48] A.E. Emanuel and L. Peretto. “The response of fluorescent lamp with magnetic ballast to voltage distortion”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12.1 (1997), pp. 289–295. DOI: 10.1109/61.568252.
- [49] www.opple.eu: Ιστότοπος κατασκευαστή φωτιστικών σωμάτων LED που χρησιμοποιήθηκαν