



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καινοτόμα συστήματα φυσικού φωτισμού:
Πειραματική και θεωρητική αξιολόγηση της
απόδοσης των φωτοσωλήνων

ΧΑΤΖΗΓΕΩΡΓΙΟΥ ANNA

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Επίκουρη Καθηγήτρια, κ. Κολοκοτσά Διονυσία (Επιβλέπων)

Καθηγητής, κ. Τσούτσος Θεοχάρης

Καθηγητής, κ. Καλαϊτζάκης Κώστας

Χανιά, Οκτώβρης 2015

*Γιατί όλη μας η ζωή διέπεται και ρυθμίζεται από την ημέρα
και την νύκτα, από το φώς και το σκοτάδι, από την
λαμπρότητα και τις σκιές, σε μια συνεχή αλληλουχία
που πάντοτε μοιάζει, μα ποτέ δεν είναι η ίδια...*

I. ΕΥΧΑΡΗΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας επισημαίνει την ολοκλήρωση του προπτυχιακού κύκλου σπουδών μου στο τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με την ευκαιρία αυτή οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους πίστεψαν σε εμένα και με στήριξαν.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επίκουρη καθηγήτρια της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Διονυσία Κολοκοτσά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και καινοτόμο θέμα.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Θεοχάρη Τσούστο και κ. Κώστα Καλαϊτζάκη για το χρόνο που διέθεσαν για την εξέταση της εργασίας αυτής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω και στη διδακτορικό κ. Κωνσταντίνα Βασιλακοπούλου για την πολύτιμη βοήθειά της και την άριστη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια περάτωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η άριστη καθοδήγησή της, οι συνεχείς διορθώσεις και παρατηρήσεις της, το ενδιαφέρον, αλλά και η υπομονή της σε όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας ήταν καταλυτικοί παράγοντες στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής για αυτό και την ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που είναι πάντα δίπλα μου και υποστηρίζει τις επιλογές μου αυτά τα πέντε χρόνια, καθώς και όλους τους φίλους μου που με στήριξαν με κάθε τρόπο.

II. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ευρέως γνωστό και κοινώς αποδεχτό είναι το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας σε Ευρωπαϊκό επίπεδο οφείλεται στον κτιριακό τομέα ο οποίος έχει ολοένα και πιο αυξητικές τάσεις. Η παραγωγή αυτής της ενέργειας γίνεται με καύση ορυκτών καυσίμων. Η αυξημένη χρήση των ορυκτών αυτών πόρων, όπως είναι ο άνθρακας και ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, είναι η μεγαλύτερη αιτία απελευθέρωσης τεράστιων ποσοτήτων CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Όσο αφορά τα κτίρια, η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί πλέον ειδικό αντικείμενο των Ευρωπαϊκών Οδηγιών, στα πλαίσια του περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της Κλιματικής Αλλαγής. Στόχος της ενεργειακής αποδοτικότητας στον κτιριακό τομέα είναι να μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις δημιουργώντας συνθήκες απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, κάτι το οποίο μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Παρόλο που η εξοικονόμηση ενέργειας δεν αποτελεί λύση στο πρόβλημα, σημαντικό βήμα στην μείωση χρήσης ενέργειας είναι η ανεύρεση νέων τεχνολογιών απαλλαγμένων από τα ορυκτά καύσιμα. Η δε χρήση φυσικών πηγών φωτισμού, εκτός του ότι είναι απαλλαγμένη από χρήση ορυκτών καυσίμων βελτιώνει ταυτόχρονα τις συνθήκες άνεσης στους χώρους κατοικίας και εργασίας και παράλληλα αυξάνει την παραγωγικότητα.

Με γνώμονα την αρχή της βιώσιμης και αειφόρου ανάπτυξης και γενικότερα την ανάγκη για απεξάρτηση από την ενέργεια η οποία προέρχεται από καύση ορυκτών, στη παρούσα διπλωματική γίνεται αναφορά σε καινοτόμα συστήματα φυσικού φωτισμού. Τα συστήματα φυσικού φωτισμού τα οποία διακρίνονται στα ράφια φωτισμού και στους φωτοσωλήνες, χρησιμοποιούνται για την είσοδο ή τη βελτίωση των επιπέδων φυσικού φωτισμού σε ένα χώρο. Συγκεκριμένα, στη διπλωματική αυτή αναλύεται και παρουσιάζεται η πειραματική και θεωρητική προσέγγιση της απόδοσης των φωτοσωλήνων.

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος HERB αναπτύχθηκε από την Ομάδα Ερευνών Κτιριακού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αθηνών σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο Κρήτης ένα καινοτόμο σύστημα φωτισμού. Πρόκειται για μια ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία, η οποία αποτελείται από ένα ελαφρύ σωλήνα και σύστημα τεχνητού φωτισμού LED όπου σε συνδυασμό του φυσικού και τεχνητού φωτισμού καθιστά το επίπεδο φωτισμού στο δωμάτιο δοκιμών σταθερό. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε και δοκιμάζεται από τον Φεβρουάριο του 2014 στους χώρους του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Αφού έγινε επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων και σύγκριση τους με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό προσομοίωσης Energy Plus, εξήχθησαν εξισώσεις οι οποίες μπορούν να προβλέψουν τα επίπεδα φωτεινότητας σε ένα δωμάτιο με φωτοσωλήνα. Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα απαιτούμενα επίπεδα

φωτισμού, τα οποία ορίζει το Ελληνικό Πρότυπό του ΕΛΟΤ, για εσωτερικούς χώρους εργασίας.

Από την όλη μελέτη του πειράματος, την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και την προσομοίωση που έγινε, αποδείχθηκε ότι ο φωτοσωλήνας έχει μεγαλύτερη απόδοση όταν η θέση του ήλιου είναι υψηλά στον ουρανό, δηλαδή τις μεσημεριανές ώρες και του θερινούς κυρίως μήνες. Επίσης το μοντέλο που χρησιμοποιεί το Energy Plus για την προσομοίωση τέτοιων συστημάτων έχει αποδειχθεί ότι είναι αξιόπιστο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της εσωτερικής φωτεινότητας προσεγγίζοντας την πραγματική κατάσταση σε μεγάλο βαθμό.

III. ABSTRACT

It is widely known and commonly accepted that the higher percentage of the energy consumption across Europe arises from the construction sector which is increasingly developed. This energy production is achieved through the burning of fossil fuels. The increased use of these mineral resources, such as carbon, lignite, petroleum, and natural gas, is the main reason for the release of huge quantities of CO₂ in the atmosphere.

As far as the buildings are concerned, in the context of restraining CO₂ emissions and climate change, the energy efficiency is now a special part of the European Guidelines. The aim of the energy efficiency in the construction sector is to reduce the energy demands, by creating detox conditions from the fossil fuels. This is something that reduces the CO₂ emissions. Even though the energy saving is not the solution to the problem, finding new technological methods free from fossil fuels is a major step in reducing energy use. Using natural sources of lighting, on the other hand, is free from burning fossil fuels, and at the same time, it creates better and more comfortable conditions for people in their houses and in their workplace, and it increases productivity.

Guided by the principle of sustainable development, and in general, the need for detox from the energy that stems from the burning of fossil fuels, in this thesis I will present innovative systems of natural lighting. The natural lighting systems, which can be found in the lighting shelves and the lighting pipes, are used for the access or the improvement of the natural lighting levels in a place. Specifically, in this thesis, the experimental and theoretical approach of the efficiency of the lighting pipes are analyzed and presented.

In the context of the European program HERB, the Building Atmosphere Research Group of the University of Athens in cooperation with the Technical University of Crete developed an innovative lighting system. This lighting system is an energy-efficient technology that consists of a lightweight pipe and an artificial lighting system (LED). These, in combination with the natural and artificial lighting, make the lighting level in the test room stable. This system was developed and is tested in the University of Athens since February 2014.

After processing the results of the experiment and comparing them to the results of the simulation software Energy Plus, some equations were derived which can predict the brightness level in a room where there is a lighting pipe. Finally, these results were compared to the required illumination levels, which are determined by the standards of the Greek Standardization Organization for indoor workplaces.

Throughout the whole study of this experiment, the processing of the results, and the simulation that took place, it has been proved that the lighting pipe has a greater efficiency when the position of the sun is in the highest level of the sky, i.e. in the middle of the day and mostly during summertime. Moreover, the model that Energy Plus uses for

simulating these kind of systems was proved reliable and it can be used for the prediction of the brightness indoors approaching the real situation to a large extent.

IV. ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I. ΕΥΧΑΡΗΣΤΙΕΣ	3
II. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
III. ABSTRACT	6
IV. ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	8
V. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
VI. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
VII. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	22
1.1. Φως.....	24
1.2. Βασικά Φωτομετρικά Μεγέθη.....	26
1.3. Υπολογισμός επιπέδων φωτισμού σε ένα χώρο	30
1.3.1 Μέθοδος Lumen	30
1.3.2 Μέθοδος Σημειακής Πηγής.....	33
1.4. Τεχνητός Φωτισμός και Είδη Λαμπτήρων	35
1.4.1. Λαμπτήρες Πυράκτωσης.....	36
1.4.2. Λαμπτήρες Εκκένωσης.....	38
1.5. Φυσικός φωτισμός και ήλιος.....	42
1.5.1. Η Κίνηση του Ήλιου	42
1.5.2. Τύποι ουρανού για τους υπολογισμούς φυσικού φωτισμού.....	46
1.5.3. Διαθεσιμότητα φυσικού φωτός στα κτίρια	47
1.5.4. Είσοδος φυσικού φωτός στα κτίρια	48
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	53
2.1. Αρχή λειτουργίας φωτοσωλήνων	53
2.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φωτοσωλήνων	55
2.2.1. Πλεονεκτήματα	55
2.2.2. Μειονεκτήματα	55
2.3. Είδη σωλήνων φωτισμού.....	56
2.4. Μεθοδολογίες και αλγόριθμοι υπολογισμού απόδοσης φωτοσωλήνων.....	59
2.4.1. Μέθοδος Luxplot package.....	59
2.4.2. Μέθοδος Zhang and Munner	61
2.4.3. Μέθοδος Carter	62
2.4.4. Μέθοδος Τσαγκρασούλη	63
2.4.5. Μέθοδος Mingozzi.....	64

2.4.6. Μέθοδος TTE	64
2.4.7. Λογισμικό SkyVision	65
2.4.8. Λογισμικό Radiance	66
2.4.9. Λογισμικό Energy Plus.....	66
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	68
3.1. Ανάλυση Πειραματικής Διάταξης	68
3.2. Αποτελέσματα Πειραματικών Μετρήσεων	75
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	94
4.1. Ανάλυση Διαδικασίας Προσομοίωσης	94
4.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	99
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	117
5.1. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοίωση.....	117
5.2. Σύγκριση απόδοσης φωτοσωλήνα με προβλεπόμενα επίπεδα φωτισμού από το πρότυπο ΕΛΟΤ.....	123
5.3. Αξιολόγηση της οικονομικότητας του συστήματος φωτισμού	125
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	127
VIII. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	129

V. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά αισθητήρων.	70
Πίνακας 2: Ποσοστά απόκλισης φωτεινότητας κάθε ομάδας αισθητήρων (που απέχουν την ίδια απόσταση από τον αισθητήρα 7) από όλες τις υπόλοιπες ομάδες. Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29400 lux.	76
Πίνακας 3: Ποσοστά απόκλισης φωτεινής έντασης κάθε αισθητήρα από κάθε αισθητήρα της ίδιας ομάδας (απόσταση από κεντρικό αισθητήρα 1,68m). Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29400 lux.	79
Πίνακας 4: Ποσοστά απόκλισης φωτεινής έντασης κάθε αισθητήρα από κάθε αισθητήρα της ίδιας ομάδας (απόσταση από κεντρικό αισθητήρα 1,06 m). Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29400 lux.	79
Πίνακας 5: Εξισώσεις γραμμικής συσχέτισης εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.	92
Πίνακας 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εξισώσεις πολυωνυμικής συσχέτισης δευτέρου βαθμού εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.	93
Πίνακας 7: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστά απόκλισης φωτεινότητας κάθε ομάδας σημείων μέτρησης (που απέχουν την ίδια απόσταση από τον αισθητήρα 7) από όλες τις υπόλοιπες ομάδες. Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 33200 lux.	99
Πίνακας 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εξισώσεις γραμμικής συσχέτισης εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.	115
Πίνακας 9: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εξισώσεις πολυωνυμικής συσχέτισης δευτέρου βαθμού εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.	116
Πίνακας 10: Απόσπασμα από πρότυπο ΕΛΟΤ σύμφωνα με τις απαιτήσεις φωτισμού σε εσωτερικούς χώρους, ανάλογα με τα καθήκοντα και τις δραστηριότητες που εκτελούνται σε αυτά.	124

VI. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το οπαίον στο Πάνθεον της Ρώμης.....	23
Εικόνα 2: Ολική ανάκλαση φωτεινής ακτίνας.	24
Εικόνα 3: Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.	25
Εικόνα 4: Το φάσμα της ορατής ακτινοβολίας.	26
Εικόνα 5: Φωτοβολία σημειακής πηγής.....	27
Εικόνα 6: (α) Σφαιρική συμμετρική κατανομή ένταση φωτός, (β) Συμμετρική κατανομή φωτός κατά μία κατακόρυφη επιφάνεια, (γ) Ασύμμετρη κατανομή	34
Εικόνα 7: Νόμος αντιστρόφου τετραγώνου.	34
Εικόνα 8: Προσανατολισμός επιφάνειας σε σχέση με τη πηγή φωτισμού.....	35
Εικόνα 9: Τυπικός λαμπτήρας πυράκτωσης	36
Εικόνα 10: Φωτεινότητα λαμπτήρων σε lumens και διάρκεια ζωής	37
Εικόνα 11: LED σε διάφορα μεγέθη και χρώματα	41
Εικόνα 12: Κλίση άξονα περιστροφής της γης και εποχιακές εναλλαγές.	43
Εικόνα 13: Ημερομηνίες που αποτελούν ορόσημα στη σχέση μεταξύ της γης και του ήλιου.....	44
Εικόνα 14: Γεωγραφικό πλάτος (λ), ωριαία γωνία (τ), ηλιακή απόκλιση (δ)	45
Εικόνα 15: Υπολογισμός παράγοντα φυσικού φωτός σχέση (1.15).	48
Εικόνα 16: Ανακλαστικά ράφια (α) εξωτερικά ή (β) εκατέρωθεν του ανοίγματος	50
Εικόνα 17: Υπερυψωμένη τομή της στέγης με κατακόρυφα ανοίγματα	52
Εικόνα 18: Πιθανές λύσεις τοποθέτησης φωτοσωλήνα, κάθετα και υπό κλίση, σε επίπεδη ή κεκλιμένη οροφή.	54
Εικόνα 19: Σωλήνας φωτισμού στη Washington dc.....	56
Εικόνα 20: Φωτοσωλήνες τύπου φεγγίτη (skylight).	57
Εικόνα 21: Ρομπότ αντλίας φυσικού φωτός.....	57
Εικόνα 22: Φωτοσωλήνες τύπου Velux.	58
Εικόνα 23: Φωτοσωλήνας τύπου Apollon.	58
Εικόνα 24: Ηλιοσωλήνας (Sun pipes).	59
Εικόνα 25: Δωμάτιο δοκιμών.	68
Εικόνα 26: Εσωτερικό χώρου όπου φιλοξενείται το πείραμα.	69
Εικόνα 27: Αισθητήρας φωτισμού.	71
Εικόνα 28: Εξωτερικός αισθητήρας.	71
Εικόνα 29: Καταγραφέας δεδομένων.....	71
Εικόνα 30: Μετρητής ενέργειας.....	71
Εικόνα 31: Μετρητής φωτεινότητας.	71
Εικόνα 32: Τομή δωματίου δοκιμών.	72
Εικόνα 33: Κάτοψη δωματίου δοκιμών.....	73
Εικόνα 34: Εσωτερικό τμήμα φωτοσωλήνα (διαχύτης) και λωρίδα LED.	73
Εικόνα 35: Τμήμα φωτοσωλήνα εκτός του δωματίου δοκιμών.	74
Εικόνα 36: Φωτοσωλήνας.....	94
Εικόνα 37: Επιφάνειες θόλου και διαχύτη.	95
Εικόνα 38: Διακριτές ακτίνες σε ένα σωλήνα.	96

VII. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 29400 lux τη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ).....	77
Διάγραμμα 2: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 55000 lux τη χρονική στιγμή (6/12/2014 11:23:00πμ).....	77
Διάγραμμα 3: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 80000 lux τη χρονική στιγμή (10/3/2015 9:35:00πμ).....	78
Διάγραμμα 4: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 100000 lux τη χρονική στιγμή (10/3/2015 9:35:00πμ).	78
Διάγραμμα 5: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (25/12/2014 8:41:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 5000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,116% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	80
Διάγραμμα 6: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική (28/11/2014 11:41:00πμ) στιγμή με εξωτερική φωτεινότητα 20000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,190% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	80
Διάγραμμα 7: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (23/12/2014 12:32:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 50000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,100% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	81
Διάγραμμα 8: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (19/5/2015 10:18:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 75000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,144% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	81
Διάγραμμα 9: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/5/2015 1:43:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 100000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,152% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	82
Διάγραμμα 10: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/6/2015 13:27:00μμ) με	

εξωτερική φωτεινότητα 108000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,229% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	82
Διάγραμμα 11: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 5000lux.	84
Διάγραμμα 12: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.	84
Διάγραμμα 13: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 90000lux.	85
Διάγραμμα 14: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για δεδομένες τιμές εξωτερικής ακτινοβολίας (10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000, 80000, 90000, 100000, 110000 lux).	86
Διάγραμμα 15: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 20000 lux.	88
Διάγραμμα 16: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 35000 lux.	88
Διάγραμμα 17: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 50000 lux.	89
Διάγραμμα 18: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 75000 lux.	89
Διάγραμμα 19: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 100000 lux.	90
Διάγραμμα 20: Συσχετισμός Εξωτερικής Φωτεινότητας με το μέσο όρο Εσωτερικής Φωτεινότητας όλων των αισθητήρων.	91
Διάγραμμα 21: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 33200 lux τη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ).	100
Διάγραμμα 22: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 50000 lux τη χρονική στιγμή (23/04 12:00:00μμ).	101
Διάγραμμα 23: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 80000 lux τη χρονική στιγμή (03/04 13:00:00μμ).	101
Διάγραμμα 24: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 100000 lux τη χρονική στιγμή (27/05 14:00:00μμ).	102
Διάγραμμα 25: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την	

αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (19/12 5:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 5000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,143% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	103
Διάγραμμα 26: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/12 11:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 20000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,215% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	103
Διάγραμμα 27: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (01/12 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 50000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,155% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	104
Διάγραμμα 28: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (01/06 10:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 75000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,241% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	104
Διάγραμμα 29: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (27/05 02:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 100000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,296% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	105
Διάγραμμα 30: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/06 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 108000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,325% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	105
Διάγραμμα 31: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 5000lux.	107
Διάγραμμα 32: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την	

αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.....	107
Διάγραμμα 33: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 90000lux.....	108
Διάγραμμα 34: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε σημείου μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για δεδομένες τιμές εξωτερικής φωτεινότητας (10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000, 80000, 90000, 100000, 110000 lux).	109
Διάγραμμα 35: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 20000 lux....	110
Διάγραμμα 36: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 35000 lux....	111
Διάγραμμα 37: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 50000 lux....	111
Διάγραμμα 38: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 75000 lux....	112
Διάγραμμα 39: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 100000 lux..	112
Διάγραμμα 40: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Συσχετισμός Εξωτερικής Φωτεινότητας με το μέσο όρο Εσωτερικής Φωτεινότητας όλων των αισθητήρων.	114
Διάγραμμα 41: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.	118
Διάγραμμα 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.....	118
Διάγραμμα 43: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών και τιμών προσομοίωσης εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (9/12 12:00:00μμ).Με 29355,47lux μετρημένη εξωτερική φωτεινότητα και 33200 lux εξωτερική φωτεινότητα για την προσομοίωση.	119
Διάγραμμα 44: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 26/12/2014 1:25:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 9/3 06:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 10000 lux.....	120
Διάγραμμα 45: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 23/12/2014 12:32:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 01/12 12:00:00μμ)εσωτερικής φωτεινότητας κάθε	

αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 50000 lux.....	120
Διάγραμμα 46: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 11/5/2015 11:26:00πμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 04/05/2015 11:00:00πμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 85000 lux.....	121
Διάγραμμα 47: Διαγράμματα 49 και 50. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 13/5/2015 1:43:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 27/05/2015 02:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 100000 lux.....	121
Διάγραμμα 48: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29355,47lux (Νεφосκεπής Ουρανός). Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,186% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	129
Διάγραμμα 49: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική (26/12/2014 1:25:00μμ) στιγμή με εξωτερική φωτεινότητα 10000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,170% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	129
Διάγραμμα 50: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική (7/12/2014 8:51:00πμ) στιγμή με εξωτερική φωτεινότητα 15000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,123% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	130
Διάγραμμα 51: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική (7/12/2014 11:25:00πμ) στιγμή με εξωτερική φωτεινότητα 25000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,154% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	130
Διάγραμμα 52: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (27/12/2014 12:21:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 35000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,139% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	131
Διάγραμμα 53: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (3/12/2014 1:29:00μμ) με εξωτερική	

φωτεινότητα 40000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,123% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	131
Διάγραμμα 54: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (23/12/2014 1:10:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 45000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,103% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	132
Διάγραμμα 55: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (6/12/2014 11:23:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 55000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,098% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	132
Διάγραμμα 56: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (29/11/2014 11:19:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 60000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,102% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	133
Διάγραμμα 57: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (07/06/2015 11:29:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 65000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,127% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	133
Διάγραμμα 58: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (28/3/2015 3:07:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 70000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,222% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	134
Διάγραμμα 59: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (10/3/2015 9:35:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 80000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,095% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	134
Διάγραμμα 60: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (11/5/2015 11:26:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 85000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,203% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	135
Διάγραμμα 61: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (2/4/2015 1:21:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα	

90000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,171% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	135
Διάγραμμα 62: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (12/6/2015 1:40:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 95000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,213% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	136
Διάγραμμα 63: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (30/3/2015 11:23:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 105000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,158% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	136
Διάγραμμα 64: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (9/12 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 33200 lux (Νεφοσκεπής Ουρανός). Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,193% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	137
Διάγραμμα 65: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (09/03 06:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 10000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,162% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	137
Διάγραμμα 66: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (14/12 02:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 15000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,229% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	138
Διάγραμμα 67: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/02 10:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 25000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,195% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	138
Διάγραμμα 68: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (30/11 2:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 35000 lux. Με το	

μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,181% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	139
Διάγραμμα 69: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (10/12 1:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 40000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,176% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	139
Διάγραμμα 70: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (24/04 5:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 45000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,164% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	140
Διάγραμμα 71: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (02/05 09:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 55000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,188% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	140
Διάγραμμα 72: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (23/02 03:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 60000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,191% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	141
Διάγραμμα 73: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (21/02 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 65000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,201% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	141
Διάγραμμα 74: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (16/03 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 70000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,237% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	142
Διάγραμμα 75: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη	

χρονική στιγμή (03/04 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 80000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,264% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	142
Διάγραμμα 76: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (04/05 11:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 85000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,255% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	143
Διάγραμμα 77: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (08/06 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 90000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,294% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	143
Διάγραμμα 78: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (06/06 11:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 95000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,278% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	144
Διάγραμμα 79: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (28/05 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 105000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,335% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.	144
Διάγραμμα 80: Διαγράμματα 17 και 18. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 27/12/2014 12:21:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 30/11/2014 2:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 35000 lux.	145
Διάγραμμα 81: Διαγράμματα 20 και 21. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 3/12/2014 1:29:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 10/12/2014 1:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 40000 lux.	145
Διάγραμμα 82: Διαγράμματα 32 και 33. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 07/06/2015 11:29:00πμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 21/02/2015 12:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την	

αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 65000 lux.	146
Διάγραμμα 83: Διαγράμματα 46 και 47. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 12/6/2015 1:40:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 06/06/2015 11:00:00πμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 95000 lux.	146
Διάγραμμα 84: Διαγράμματα 54 και 55. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 13/6/2015 01:27:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 13/06/2015 01:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 108000 lux.	147

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φυσικό φως είναι θεμελιώδες στοιχείο της καθημερινής μας ζωής. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να «υπάρχουμε», να «φαινόμαστε», να «αναγνωρίζουμε» να «συσχετιζόμαστε» με το περιβάλλον γύρω μας.

Πρωταρχική πηγή φωτός είναι ο ήλιος. Από τους πρώτους κιόλας αιώνες της ύπαρξης του ανθρώπου πάνω στη γη, το φως αποτελούσε μία από τις βασικότερές του ανάγκες για επιβίωση. Η θερμότητα και το φως που παρείχε στον προϊστορικό άνθρωπο ο ήλιος ήταν ικανά να τον καταστήσουν σύμβολο θεότητας και λατρείας.

Τοιχογραφίες βαθιά στο εσωτερικό των σπηλαίων αποδεικνύουν ότι ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε το φως από την εποχή των παγετώνων (28000 π.Χ.). Τα σπουδαία σχέδια στο σπήλαιο της Altamira, πριν 15.000 χρόνια, μόνο κάτω από τεχνικό φωτισμό θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν. Το φως της φωτιάς, η δάδα, ο δαυλός, ο πυρσός, το κερί, το λυχνάρι άλλαξαν την ζωή των προγόνων μας ριζικά τόσο σε κλειστούς χώρους όσο και έξω. Από πολύ νωρίς ο άνθρωπος δημιούργησε αντικείμενα τα οποία να είναι ικανά να φέρουν την φωτεινή φλόγα στο εσωτερικό του σπιτιού. Επομένως, η λάμψη της φλόγας βοήθησε τον προϊστορικό άνθρωπο να ζήσει σε σπηλιές όπου οι ακτίνες του ήλιου δεν μπορούσαν να φτάσουν.

Με την πρόοδο του πολιτισμού, ο άνθρωπος θέλησε να προστατευτεί από τα καιρικά φαινόμενα, καλύπτοντας τα ανοίγματα των οικιών του. Τα πρώτα δείγματα υάλωσης στα ανοίγματα των σπιτιών παρατηρήθηκαν κατά την ρωμαϊκή εποχή, όπου ο σχεδιασμός των σπιτιών βασιζόταν κατά κύριο λόγο στην εξασφάλιση ικανοποιητικών θερμικών συνθηκών παρά στην εξασφάλιση ικανοποιητικών επίπεδων φωτισμού. Οι αρχαίοι Έλληνες πολύ συχνά χρησιμοποιούσαν τεχνικές για την εκμετάλλευση του ήλιου στην θέρμανση των κατοικιών τους. Τα ανοίγματα όμως που συναντούμε στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρά λόγω χαμηλών θερμοκρασιών το χειμώνα. Παρόλα αυτά όμως, η διαρρύθμιση των οικιών των Ελλήνων και των Ρωμαίων βασιζόταν τόσο στη χρήση του δωματίου όσο και στην αναγκαιότητα για φως. Συγκεκριμένα ο Βιτρούβιος στο σύγγραμμά του «Περί αρχιτεκτονικής» αναφέρει ότι οι βιβλιοθήκες και τα υπνοδωμάτια πρέπει να έχουν ανατολικό προσανατολισμό, καθώς η λειτουργία τους απαιτεί το πρωινό φως, ενώ οι χειμερινές αίθουσες φαγητού και τα λουτρά πρέπει να έχουν προσανατολισμό προς τη χειμερινή δύση, επειδή χρειάζονται στο απογευματινό φως [3].

Συχνά, σε θρησκευτικά και δημόσια κτίρια, ο φυσικός φωτισμός ενισχυόταν από μικρά ανοίγματα στη στέγη, τα «οπαία» (βλ. Εικόνα 1), καθώς και από τη χρήση ενός ειδικού, ημιδιάφανου μαρμάρου στα πλαίσια της οροφής αντικαθιστώντας το κεραμίδι.



Εικόνα 1: Το οπαίον στο Πάνθεον της Ρώμης.

Πηγή:http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Internal_Pantheon_Light.JPG

Κατά τον 19^ο αιώνα, η χρήση χυτοσιδήρου ως δομικό υλικό, οδήγησε στο να κατασκευαστούν στέγες από σίδηρο και γυαλί, οι οποίες εξασφάλιζαν υψηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού. Η οικονομικά ασύμφορη λύση του τεχνητού φωτισμού, την συγκεκριμένη εποχή, ήταν η αιτία τα βιομηχανικά κτίρια να σχεδιαστούν με γνώμονα την κάλυψη των αναγκών σε φωτισμό. Αργότερα, η ανακάλυψη του ηλεκτρικού λαμπτήρα και η παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος σήμανε το τέλος της εποχής κατά την οποία ο φυσικός φωτισμός ήταν από τους κύριους παράγοντες σχεδιασμού. Η δημιουργία τεχνικού εσωκλίματος είχε σαν αποτέλεσμα την κατασκευή κτιρίων υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Η αυξημένη λοιπόν σπατάλη των συμβατικών ενεργειακών αποθεμάτων, οι κλιματικές αλλαγές καθώς και η ρύπανση του περιβάλλοντος αποτελούν τις προϋποθέσεις για την κατασκευή κτιρίων φιλικότερων προς το περιβάλλον [3].

Αν και αρχικά η βιοκλιματική αρχιτεκτονική άφησε το φυσικό φωτισμό σε δεύτερη μοίρα, αρκετοί είναι οι αρχιτέκτονες που χρησιμοποιούν το φυσικό φως ως δομικό στοιχείο. Στις μέρες μας ο σχεδιασμός με γνώμονα το φυσικό φως ανθίζει όλο και περισσότερο. Η αναγνώριση της σημασίας του φυσικού φωτός στην υγεία και την παραγωγικότητα του ανθρώπου είχαν σαν αποτέλεσμα τη θέσπιση νομοθεσιών για τα ελάχιστα επίπεδα φωτισμού σε εσωτερικούς χώρους σύμφωνα με τη χρήση τους.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η αποδοτικότητα της χρήσης φωτοσωλήνα για το διοχέτευση φυσικού φωτός σε δωμάτια τα οποία είναι δύσκολο να προσεγγιστούν από το φυσικό φως. Εν συντομία, το πιο συνηθισμένο είδος φωτοσωλήνων χρησιμοποιεί

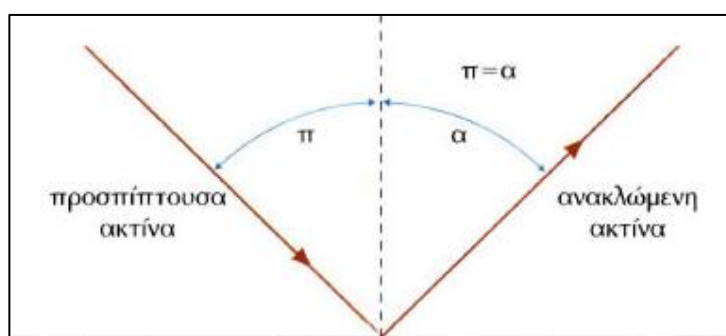
ένα άνοιγμα στην οροφή ενός κτιρίου, καλυπτόμενο από ένα διάφανο θόλο. Καθώς το φως διαπερνά τον εξωτερικό θόλο, εισέρχεται σε ένα πολύ ανακλαστικό σωλήνα και μέσω πολλαπλών εσωτερικών ανακλάσεων καταλήγει στο εσωτερικό του δωματίου μέσω ενός διαχύτη, ρόλος του οποίου είναι η ομογενοποίηση του εισερχόμενου φωτός. Εκτενέστερα ανάλυση των χαρακτηριστικών των φωτοσωλήνων συμπεριλαμβάνεται σε ακόλουθες παραγράφους.

1.1. Φως

Η φύση του φωτός αποτελούσε από αρχαιοτάτων χρόνων ένα από τα πιο ενδιαφέροντα αντικείμενα έρευνας και μελέτης της φυσικής. Στη πορεία της μελέτης γύρω από το θέμα αυτό, έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς διάφορες θεωρίες οι οποίες μάλιστα πολλές φορές διαφέρουν μεταξύ τους.

Οι αρχαίοι έλληνες υποστήριζαν ότι το φως έχει «σωματιδιακή φύση». Πίστευαν ότι το φως που εκπέμπεται από τον ήλιο και τις διάφορες φωτεινές πηγές, αποτελείται από μικρά σωματίδια που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή διεγείρουν το αισθητήριο της όρασης.

Το 1669, ο Νεύτωνας, στηριζόμενος στη αρχή διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, και δεχόμενος τη σωματιδιακή φύση του φωτός, έκανε μια πρώτη προσπάθεια ερμηνείας τους φαινομένου, διατυπώνοντας έτσι το νόμο της ανάκλασης του φωτός. Σύμφωνα με τον νόμο αυτό, όταν μια φωτεινή ακτίνα πέφτει σε επίπεδη κατοπτρική επιφάνεια ανακλάται. Η γωνία πρόσπτωσης (π) ισούται με τη γωνία ανάκλασης (α) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Ολική ανάκλαση φωτεινής ακτίνας.

Πηγή: <http://ebooks.edu.gr/>

Μερικά χρόνια αργότερα οι Huygens (1670) και Young (1803) απέδειξαν ότι το φως έχει «κυματική φύση». Το 1865 ο Maxwell με τη σειρά του, απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ενώ μόλις τον 20ο αιώνα, στηριζόμενοι στη σωματιδιακή φύση του φωτός, ο Max Planck ερμήνευσε την ακτινοβολία των θερμών σωμάτων, εισάγοντας την θεωρία των κβάντα και ο Einstein το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κατά το οποίο τα φωτόνια (κβάντα φωτός) κινούνται με την ταχύτητα του φωτός c . Η ενέργεια κάθε

φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας του αντίστοιχου ηλεκτρομαγνητικού κύματος και ισούται με [3]:

$$e = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

όπου: e η ενέργεια του φωτονίου, [J]

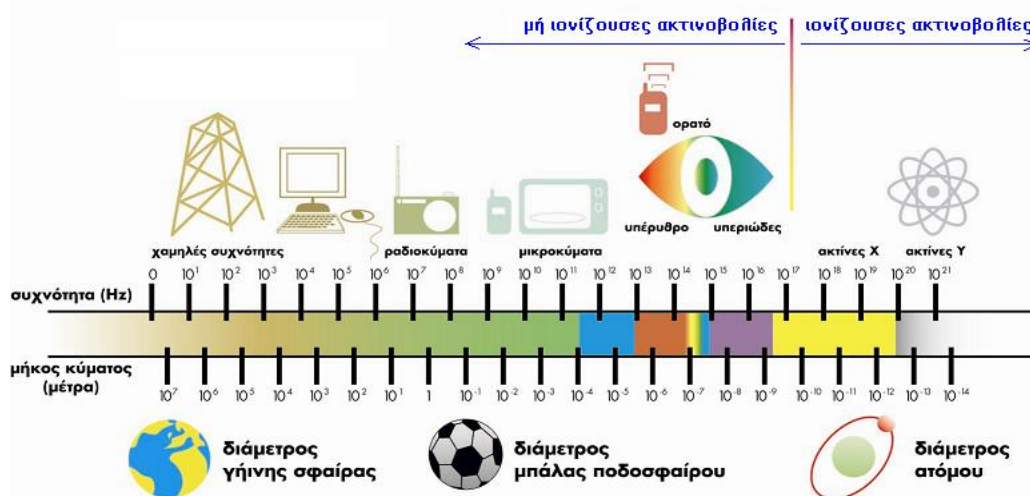
h η σταθερά του Planck, [$6,652 \cdot 10^{-34}$ J · s]

ν η συχνότητα του κύματος, [Hz]

Σήμερα πιστεύουμε στη δυαδική φύση του φωτός αποδίδοντας σε αυτό εκτός από κυματικές ιδιότητες και σωματιδιακές. Η διπλή φύση του φωτός μας δίνει την δυνατότητα να εξηγήσουμε ακριβέστερα τόσο τα φαινόμενα της διάδοσής του, με τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όσο και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη σύμφωνα με την σωματιδιακή θεωρία.

Με τον όρο «**φως**» ορίζουμε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία ανιχνεύονται από το ανθρώπινο μάτι. Η ορατή ακτινοβολία. Για να είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ανιχνεύσιμο από το ανθρώπινο μάτι θα πρέπει όταν διαδίδεται στο κενό, το μήκος κύματός του να κυμαίνεται από 380 ως 770 νανόμετρα (nm, το 1 nm είναι ίσο με 10^{-9} m). Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο είναι ορατό, ανέρχεται στο 45% της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Το 9% είναι το υπεριώδες τμήμα του φάσματος (UV) και το υπόλοιπο 46% το υπέρυθρο τμήμα [8].

Τα φωτόνια ταξιδεύουν στο κενό με την ίδια ταχύτητα, γνωστή ως η Ταχύτητα του Φωτός. Η ταχύτητα αυτή ισούται περίπου με 3×10^8 m/s. Αν το φως θεωρηθεί ως κύμα ακτινοβολίας, παρά ως ροή σωματιδίων τότε κάποιες από τις πιο βασικές ιδιότητες του φωτός μπορούν να περιγραφούν βέλτιστα. Επομένως, είναι σύνηθες το φως να περιγράφεται από το μήκος κύματος και την ισχύ του.



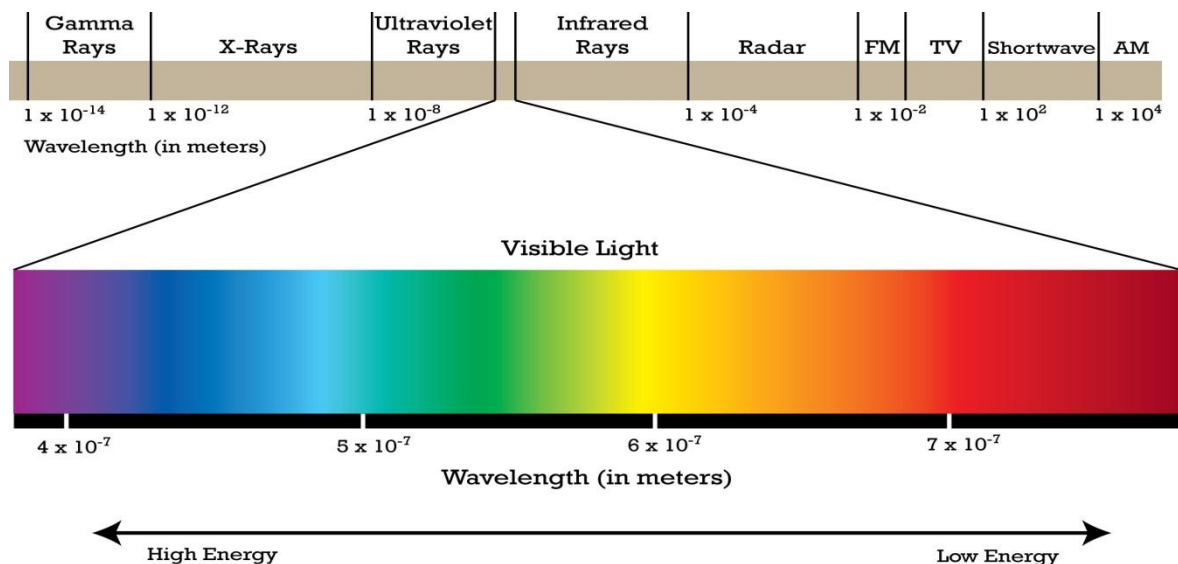
Εικόνα 3: Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Πηγή: http://physiclessons.blogspot.gr/2013/11/blog-post_927.html

Ως «**φυσικό φως**» ορίζεται το τμήμα του ενεργειακού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπεται από τον ήλιο και λαμβάνεται στην επιφάνεια της γης μετά την απορρόφηση και τη σκέδασή της, με μήκος κύματος εντός του ορατού φάσματος. Η αίσθηση φωτός με διαφορετικό χρωματισμό είναι αποτέλεσμα του διαφορετικού μήκους που έχει τα κύματα του ορατού φάσματος, όπως παρουσιάζονται και στη ακόλουθη Εικόνα 4 [8], [30], [9].

Το φάσμα αυτό μπορεί αν διαιρεθεί στις εξής περιοχές:

- * την ιώδη ($380nm - 450nm$)
- * τη βαθυγάλανη ($450nm - 480nm$)
- * την πράσινη ($510nm - 575nm$)
- * την πορτοκαλί ($585nm - 620nm$)
- * την κόκκινη ($620nm - 770nm$)



Εικόνα 4: Το φάσμα της ορατής ακτινοβολίας.

Πηγή: <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CE%AC%CF%83%CE%BC%CE%B1>

1.2. Βασικά Φωτομετρικά Μεγέθη

Φωτεινή ροή (Luminous flux, Φ), είναι η συνολική ακτινοβολος φωτεινή ενέργεια που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή στη μονάδα του χρόνου. Μονάδα μέτρησής της το lumen (lm). Στα 555 nm το lumen ισούται με 1,464 mWatt [12], [5].

Παραδείγματα:

Λαμπτήρας πυράκτωσης 100 W: 1280 lm

Λαμπτήρας φθορισμού 39 W: 3500 lm

Λαμπτήρας ιωδίου 300 W: 5000 lm

Λαμπτήρας αλογονιδίων μετάλλου 2000 W: 200000 lm

Η σχέση μεταξύ του φωτός που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή και της ηλεκτρικής ισχύος της πηγής, εκφράζει την **φωτεινή απόδοση** (Luminous efficacy, n) της πηγής. Η φωτεινή απόδοση έχει μονάδα μέτρησης lumen ανά Watt.

$$n = \frac{\Phi}{Watt} \left[\frac{lm}{W} \right] \quad (1.2)$$

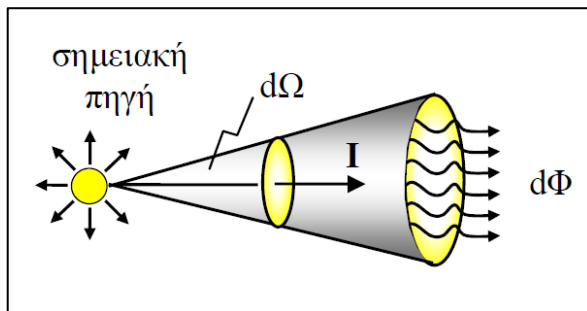
Παραδείγματα:

Λαμπτήρας πυράκτωσης 100 W: 13,6 lm/Watt

Λαμπτήρας φθορισμού 58 W: 90 lm/Watt

Ένταση της φωτεινής ροής ή φωτεινή ένταση (Luminous intensity I), καλείται η φωτεινή ροή ($d\Phi$) η οποία εκπέμπεται από τη φωτεινή πηγή σε συγκεκριμένη διεύθυνση και υπολογίζεται από τον αριθμό των lumens ανά στερεακτίνιο ($d\Omega$) (steradian, sr). Εκφράζει ουσιαστικά την πυκνότητα της ροής προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση (Εικόνα 5). Μονάδα μέτρησης της έντασης της φωτεινής ροής είναι η candela (cd) [12], [5].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} [cd] \quad (1.3)$$



Εικόνα 5: Φωτοβολία σημειακής πηγής.
Πηγή: Μήτσου Γ. «Φωτομετρικά μεγέθη –
πολική κατανομή φωτοβολίας»

Η ποσότητα της φωτεινής ροής που δέχεται ένα σώμα, το οποίο δεν εκπέμπει από μόνο του φως, ανά μονάδα επιφάνειας, χαρακτηρίζει το φωτισμό του αντικειμένου. **Φωτισμός ή ένταση φωτισμού** (Illuminance E), είναι η ποσότητα φωτεινής ροής $d\Phi$ που καταλήγει σε επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού dA [12], [11].

$$E = \frac{d\Phi}{dA} [lx] \quad (1.4)$$

Μονάδα της έντασης φωτισμού είναι το lux (lx) το οποίο αντιστοιχεί στην ένταση φωτισμού μιας επιφάνειας εμβαδού $1 m^2$ η οποία δέχεται φωτεινή ροή ίση με 1 lm (lumen/ m^2).

Εάν μια σημειακή πηγή Π φωτίζει στοιχειώδη επιφάνεια εμβαδού A , κάθετη προς τον άξονα του αντίστοιχου κώνου, στερεάς γωνίας Ω και με κορυφή την πηγή Π , η ένταση φωτισμού της επιφάνειας (E) είναι ίση με:

$$E = \frac{\Phi}{A} [lx] \quad (1.5)$$

όπου: E η ένταση φωτισμού στη στοιχειώδη επιφάνεια [lx]

Φ η φωτεινή ροή [lm], ίση με $\Phi = I \cdot \Omega$

A το εμβαδό της στοιχειώδους επιφάνειας [m^2]

Ω η στερεά γωνία (στερεακτίσιο) [sr]

I η φωτεινή ένταση [cd]

$lux [lx] = lumen [lm]/m^2$

Η φωτεινότητα αποτελεί το μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον, τόσο από σχετικά πρότυπα, όσο και από τους επαγγελματίες του χώρου, προκειμένου να τεθούν οι στόχοι του φωτισμού ενός χώρου [12], [5].

Παραδείγματα:

από κερί σε απόσταση $1m$: $1lx$

στην επιφάνεια ενός γραφείου: $500lx$

στο έδαφος από συνεφιασμένο ουρανό: $10.000lx$

στο έδαφος από καθαρό ουρανό κατά της διάρκεια του καλοκαιριού: $100.000lx$

στο έδαφος, νύχτες με πλήρες φεγγάρι και καθαρό ουρανό: $0,25lx$

Μεταξύ δύο φωτεινών πηγών, οι οποίες εκπέμπουν προς μια κατεύθυνση με την ίδια φωτεινή ένταση, εκείνη που έχει τη μικρότερη επιφάνεια φαίνεται λαμπρότερη. Το φαινόμενο αυτό εκφράζεται από το μέγεθος της φωτεινότητας.

Όταν μια επιφάνεια εμβαδού A (m^2) λαμβάνει μια ποσότητα φωτός p , από όλες τις φωτεινές πηγές που βρίσκονται στο χώρο και η φωτεινή ροή από όλες τις πηγές είναι F (lumens), η μέση φωτεινότητα σε lux πάνω στην επιφάνεια αυτή είναι [12]:

$$E = \frac{p \cdot F}{A} [lux] \quad (1.6)$$

Για τον προσδιορισμό του παράγοντα p απαιτούνται συνήθως δύο στοιχεία. Πρώτο, ο παράγοντα χρήσης (Utilization factor) ο οποίος συμπεριλαμβάνει την κατεύθυνση και την ανάκλαση του φωτός στο χώρο και δεύτερο, ο παράγοντας συντήρησης (Maintenance

factor) ο οποίος σχετίζεται με τη μείωση του φωτισμού κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Αν η ένταση του φωτός σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση είναι I (cd) και το φως διανύει μια απόσταση d προκειμένου να φτάσει σε μια επιφάνεια υπό γωνία θ , τότε η φωτεινότητα που φτάνει στην επιφάνεια αυτή από τη συγκεκριμένη πηγή δίνεται από τη σχέση [12]:

$$E = \frac{I \cdot \cos \theta}{d^2} \quad (lux) \quad (1.7)$$

Η γωνία θ (στη περίπτωση της σημειακής πηγής φωτός) είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του φωτός και της κάθετης προς την επιφάνεια διεύθυνσης. Παρόλο που καμία πηγή δεν είναι σημειακή, η εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί με μικρό ποσοστικό σφάλμα όταν οι διαστάσεις της πηγής είναι μικρές σε σχέση με την απόσταση d ($\leq d/5$) και όταν οι ακτίνες του φωτός δεν εστιάζουν σε κάποιο οπτικό σύστημα.

Ως **φωτεινότητα** (Luminance L), ονομάζεται ο λόγος της ολικής έντασης της φωτεινής ροής η οποία εκπέμπεται από τη μονάδα επιφάνειας σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση.

Μονάδα μέτρησης της φωτεινότητας είναι η candela ανά m^2 (cd/m^2) [12], [5].

Παραδείγματα:

συννεφιασμένος ουρανός: 130 cd/m^2

πυρακτωμένο σύρμα λαμπτήρα πυράκτωσης: $7.000.000 \text{ cd/m}^2$

λαμπτήρας φθορισμού: $5.000 - 15.000 \text{ cd/m}^2$

λευκό χαρτί στην επιφάνεια ενός γραφείου: 130 cd/m^2

Η **διαπερατότητα** τ ενός υλικού στο φως αναφέρεται στο ποσοστό του φωτός που διαπερνά το υλικό αυτό. Μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1. Τιμή μηδέν έχουν τα υλικά τα οποία δεν επιτρέπουν στο φως να τα διαπεράσει. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαπερατότητα των υλικών στο φως διαφέρει από αυτή στην ηλιακή ακτινοβολία καθώς επηρεάζεται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [12].

Το ποσοστό του φωτός που προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια και δεν την διαπερνά, αλλά ανακλάται, ονομάζεται **ανακλαστικότητα** ρ . Η ανακλαστικότητα μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1. Τιμή μηδέν έχουν τα μαύρα σώματα τα οποία δεν ανακλούν κανένα μήκος κύματος από το φως που προσπίπτει σε αυτά. Αντίθετα, τιμή ένα έχουν τα υλικά που ανακλούν όλο το φως. Η διεύθυνση της δέσμης που ανακλάται εξαρτάται από την επιφάνεια του σώματος στο οποίο προσπίπτει το φως [12]. Ανάλογα με τη διεύθυνση της ανακλώμενης δέσμης έχουμε δύο είδη ανακλαστήρων τα οποία είναι:

i. Κατοπτρικός ανακλαστήρας:

Είναι αυτό από τον οποίο μια δέσμη φωτός ανακλάται στο ίδιο επίπεδο με την προσπίπτουσα δέσμη υπό την ίδια γωνία θ .

ii. Διάχυτος ανακλαστήρας:

Είναι αυτός ο οποίος διαχέει την προσπίπτουσα δέσμη φωτός σε όλες τις κατευθύνσεις.

Στους διάφορους υπολογισμούς συνήθως υποθέτουμε ότι οι ανακλαστήρες είναι απολύτως διαχυτικοί και ότι η τιμή ανακλαστικότητας ενός υλικού είναι ενιαία σε κάθε σημείο του.

1.3. Υπολογισμός επιπέδων φωτισμού σε ένα χώρο

Η μελέτη φωτισμού ενός δεδομένου χώρου έχει ως πρωταρχικό στόχο τον υπολογισμό του αριθμού των φωτιστικών σωμάτων που απαιτούνται ώστε να επιτευχθούν τα απαραίτητα επίπεδα φωτισμού στο χώρο αυτό. Τα επίπεδα φωτισμού, δηλαδή η μέση τιμή Φωτεινότητας (lux), που χρειάζεται προκειμένου να εκτελείται με ασφάλεια και επιτυχία η δραστηριότητα που προβλέπεται για ένα χώρο, ορίζεται από Πρότυπα και Κανονισμούς. Ακολούθως παρουσιάζονται μέθοδοι για τον υπολογισμό των απαιτητών επιπέδων φωτισμού που πρέπει να παρέχονται σε ένα χώρο.

1.3.1 Μέθοδος Lumen

Η μέθοδος Lumen αποτελεί μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι υπολογισμού του αριθμού φωτιστικών σωμάτων ή των επιπέδων φωτισμού ενός χώρου προκειμένου να είναι σε θέση ο σχεδιαστής, σε συνδυασμό με τις διάφορες στρατηγικές φωτισμού, να αποφασίσει για το σύστημα φωτισμού που επιθυμεί και ενδείκνυται για ένα χώρο [15].

Το πρωταρχικό, μετρήσιμο και συγκρίσιμο φωτομετρικό μέγεθος στο οποίο αναφέρονται τα πρότυπα - κανονισμοί για το σχεδιασμό του φωτισμού χώρων συγκεκριμένης χρήσης, είναι η Φωτεινότητα [15].

Η μέθοδος υπολογισμού “Lumen” χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί ο αριθμός των λαμπτήρων – φωτιστικών σωμάτων που θα πρέπει να εγκατασταθούν σε ένα συγκεκριμένο χώρο, ώστε να επιτευχθεί μια δεδομένη μέση τιμή Φωτεινότητας, η οποία δίδεται ως στόχος από τα αντίστοιχα Πρότυπα [15].

Αποτελεί τη βασική εξίσωση από την οποία προκύπτει η μέση τιμή Φωτεινότητας σε ένα επίπεδο εργασίας ($E_{av} = F/A$), συνυπολογίζοντας τις ιδιότητες της πηγής από την οποία προέρχεται η φωτεινή ροή και τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη Φωτεινότητα με την πάροδο του χρόνου [15].

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για φωτιστικά σώματα που τοποθετούνται πάνω από την επιφάνεια εργασίας και εκπέμπουν φως με κατεύθυνση κυρίως προς τα κάτω και τοποθετούνται σε «κανονική» (γεωμετρικά) διάταξη [15].

Η βασική μορφή της φόρμουλας της μεθόδου “Lumen” είναι:

$$E_{av} = \frac{F_L \cdot n \cdot N \cdot UF \cdot MF}{A_{wp}} \quad (1.8)$$

όπου:	E_{av}	η μέση φωτεινότητα στο οριζόντιο επίπεδο
	n	ο αριθμός των λαμπτήρων σε κάθε φωτιστικό
	N	ο αριθμός των φωτιστικών σωμάτων
	F_L	η τιμή φωτεινής ροής που εκπέμπεται από κάθε λαμπτήρα [lm]
	UF	ο συντελεστής χρήσης για το οριζόντιο επίπεδο
	MF	ο συντελεστής συντήρησης
	A_{wp}	η επιφάνεια του οριζόντιου επιπέδου εργασίας

Συνήθως, η τιμή της Φωτεινότητας είναι δεδομένη και προσδιορίζεται από τα σχετικά Πρότυπα, ανάλογα με τη χρήση του χώρου. Σε αυτή την περίπτωση, η φόρμουλα τροποποιείται ώστε να υπολογίζεται ο αριθμός των φωτιστικών σωμάτων (και κατ' επέκταση των λαμπτήρων) που απαιτούνται [15].

Η μέση τιμή Φωτεινής ροής (F) κάθε λαμπτήρα, παρέχεται από τον κατασκευαστή της και θα πρέπει να είναι γνωστή, όπως και οι ιδιότητες των φωτιστικών σωμάτων και των επιφανειών του χώρου [15].

Συντελεστής Συντήρησης MF

Ο συντελεστής συντήρησης (Maintenance factor -MF) ενσωματώνει στους υπολογισμούς την απώλεια φωτός λόγω της παλαιότητας των λαμπτήρων και των ρυπαντικών στοιχείων που επικαθόνται στο φωτιστικό και μειώνουν την ανακλαστικότητα των επιφανειών των χώρων. Η εφαρμογή του εξασφαλίζει ότι η αρχική μέση τιμή Φωτεινότητας την οποία θα αποδίδει το σύστημα φωτισμού είναι τόσο μεγαλύτερη από την απαραίτητη, ώστε κατά τη χρονική στιγμή που θα πραγματοποιηθεί η συντήρηση του συστήματος η μέση τιμή Φωτεινότητας που θα αποδίδεται θα είναι η προβλεπόμενη από τα σχετικά Πρότυπα [15]. Η τιμή του συντελεστή αυτού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot RSMF \cdot LSF \quad (1.9)$$

όπου:	$LLMF$	(lamp lumen maintenance factor), ο συντελεστής συντήρησης απόδοσης του λαμπτήρα
	LMF	(luminaire maintenance factor), ο συντελεστής συντήρησης απόδοσης του φωτιστικού

RSMF (room surface maintenance factor), ο συντελεστής συντήρησης των εσωτερικών επιφανειών

LSF (lamp survivor factor), ο συντελεστής ζωής του λαμπτήρα

Ο συντελεστής **LLMF** εκφράζει τη μείωση του εκπεμπόμενου φωτός λόγω της ηλικίας του λαμπτήρα και αποτελεί το λόγο του εκπεμπόμενου φωτός ενός λαμπτήρα που παράγεται μετά την πάροδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, προς το φως που εκπεμπόταν όταν ο λαμπτήρας ήταν νέος. Συνήθως, η τιμή του συντελεστή αυτού παρέχεται από τον κατασκευαστή του λαμπτήρα [15].

Ο συντελεστής **LMF** εκφράζει τη μείωση του εκπεμπόμενου φωτός λόγω της ρύπανσης (π.χ. εναπόθεση σκόνης) και λόγω του είδους του φωτιστικού. Αποτελεί το λόγο του εκπεμπόμενου φωτός από ένα φωτιστικό σε συγκεκριμένο χρόνο προς το εκπεμπόμενο φως από ένα λαμπτήρα μετά την πάροδο του ίδιου χρονικού διαστήματος. Ο συντελεστής διαμορφώνεται ανάλογα με το τύπος του φωτιστικού σώματος, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες αλλά και το πρόγραμμα συντήρησης του συστήματος φωτισμού και του χώρου. Ο συντελεστής αυτός θα πρέπει να παρέχεται από τον κατασκευαστή του φωτιστικού σώματος. Παράλληλα, δεδομένα για το συντελεστή παρέχονται και από τον SLL Code for Lighting [15].

Ο συντελεστής **RSMF** αποτελεί λόγο της Φωτεινότητας που παράγει ένα σύστημα φωτισμού ενός χώρου μετά την πάροδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, προς τη Φωτεινότητα που παραγόταν όταν το δωμάτιο ήταν καθαρό. Δεδομένα για τον υπολογισμό του συντελεστή παρέχονται από τον SLL Code for Lighting για διάφορα μεγέθη χώρων, ανάλογα με το Δείκτη Χώρου (*K*) [15].

Ο συντελεστής *LSF* εκφράζει το ποσοστό των λαμπτήρων των οποίων η ζωή λήγει μετά από συγκεκριμένες ώρες χρήσης. Δεδομένα για το συντελεστή παρέχονται και από τους κατασκευαστές λαμπτήρων αλλά και από τον SLL Code for Lighting [15].

Ο **Δείκτης χώρου *K*** (Room Index, *RI*) αποτελεί μέτρο των αναλογιών του χώρου [15]. Για παραλληλόγραμμους χώρους ο Δείκτης προκύπτει από τη ακόλουθη σχέση 1.10:

$$K = \frac{l \cdot w}{h \cdot (l + w)} \quad (1.10)$$

όπου: *l* το μήκος του χώρου, [m^2]

w το πλάτος του χώρου, [m^2]

h η απόσταση ανάμεσα στο φωτιστικό σώμα και το επίπεδο αναφοράς, [m^2]

Συντελεστής Χρήσης UF

Ο συντελεστής χρήσης (Utilisation factor - UF) είναι ο λόγος της φωτεινής ροής που εκπέμπεται από τους λαμπτήρες, η οποία φτάνει την επιφάνεια αναφοράς [15]. Αποτελεί μέτρο της αποδοτικότητας κάθε φωτιστικού σώματος και επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- αναλογία εκπομπής φωτός (light output ratio – LOR) του φωτιστικού
- κατανομή φωτεινής ροής του φωτιστικού
- αναλογίες χώρου
- ανακλαστικότητες επιφανειών χώρου
- αναλογία απόστασης μεταξύ των φωτιστικών/ύψος τοποθέτησης των φωτιστικών.

Ο συντελεστής UF δίνεται συνήθως από τους κατασκευαστές των φωτιστικών σωμάτων σαν συνάρτηση των αναλογιών του χώρου (Room Index - RI) και των τιμών ανακλαστικότητας των εσωτερικών επιφανειών αυτού [15].

Η **αναλογία εκπομπής φωτός** (LOR) λαμβάνει υπόψη τις απώλειες φωτός τόσο στο εσωτερικό του φωτιστικού όσο και στο διάμεσο του φωτιστικού στο χώρο [15].

Τέλος, όσον αφορά τον παράγοντα **αναλογίας απόστασης προς ύψος** (Spacing to Height Ratio), ο λόγος της μέγιστης απόστασης ανάμεσα στα κέντρα των φωτιστικών σωμάτων προς την απόσταση μεταξύ του φωτιστικού σώματος και του επιπέδου αναφοράς δε θα πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη αναλογία απόστασης προς ύψος που συστήνεται από τον κατασκευαστή των φωτιστικών σωμάτων. Αυτός ο κανόνας θα πρέπει να τηρείται προκειμένου να επιτυγχάνεται επαρκής ομοιογένεια φωτισμού [15].

1.3.2 Μέθοδος Σημειακής Πηγής

Η πρώτη μέθοδος που αναπτύχθηκε πιο πάνω για τον σχεδιασμό φωτισμού (Μέθοδος Lumen) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέσου φωτισμού για τις θέσεις που έχουν ομοιόμορφο διανομή φωτισμού. Η μέθοδος αυτή όμως, δεν μπορεί να μας δώσει απαντήσεις στο ποια είναι η ένταση φωτισμού από σημειακή σε μια επιφάνεια (πχ τοίχο). Η μεθοδολογία αυτή ουσιαστικά στηρίζεται στη θεωρία της ύπαρξης μίας σημειακής πηγής και αποτελεί τον πρώτο νόμο της φωτομετρίας ή νόμο του αντίστροφου τετραγώνου. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες 3 παράμετροι [18].

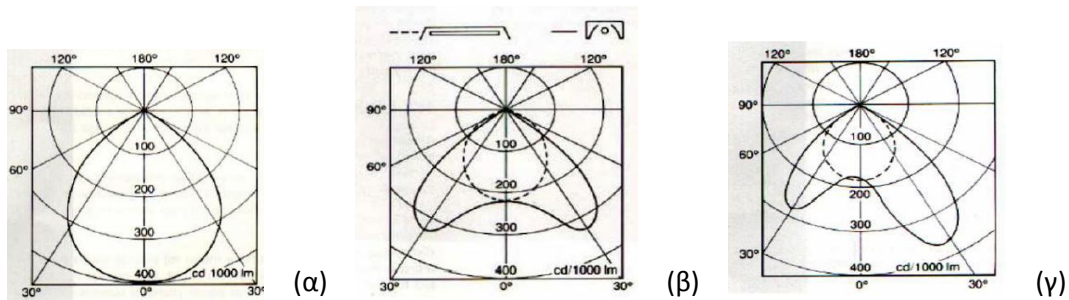
ι. Φωτεινή ένταση, I [cd]

Η φωτεινή ένταση κάθε πηγής φωτός αναπαρίσταται γραφικά σε διαγράμματα γνωστά ως καμπύλες διανομής ενέργειας candela (candlepower distribution curves). Οι πληροφορίες αυτές είναι επίσης διαθέσιμες σε αριθμητική μορφή πίνακα [18].

Κάθε καμπύλη του διαγράμματος, αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της φωτεινής έντασης του λαμπτήρα ή του φωτιστικού, σε ένα επίπεδο γύρω από την κεντρική πηγή φωτός. Η φωτεινή ένταση, προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τα φωτομετρικά δεδομένα για το συγκεκριμένο φωτιστικό που χρησιμοποιείται και την γωνιακή σχέση μεταξύ του φωτιστικού και την κατεύθυνση από το φωτιστικό στο σημείο υπολογισμού [18].

Ακολουθώς παρουσιάζονται τρεις τύποι διαγραμμάτων οι οποίοι περιγράφουν το σύνολο των φωτιστικών πηγών [18].

1. Περιστροφική συμμετρική κατανομή (Rotational symmetrical): το φως κατανέμεται το ίδιο σε όλα τα επίπεδα (βλ. εικόνα 6(α)).
2. Συμμετρική κατανομή κατά μια κατακόρυφη επιφάνεια (Planar symmetrical): η κατανομή φωτός περιορίζεται σε δυο κατακόρυφα επίπεδα (βλ. εικόνα 6(β)).
3. Ασύμμετρη κατανομή (Asymmetrical): σε ένα από τα επίπεδα μέτρησης η κατανομή φωτός είναι ασύμμετρη (βλ. εικόνα 6(γ)).

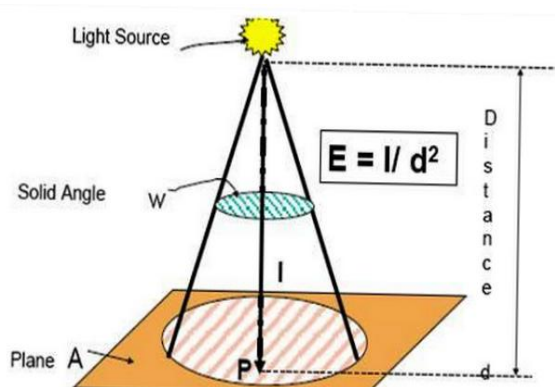


Εικόνα 6: (α) Σφαιρική συμμετρική κατανομή έντασης φωτός, (β) Συμμετρική κατανομή φωτός κατά μία κατακόρυφη επιφάνεια, (γ) Ασύμμετρη κατανομή

Πηγή: <http://www.electrical-knowhow.com/2012/12/point-by-point-method-for-lighting.html>

ii. Απόσταση, d [m]

Η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας και της πηγής επηρεάζει τη φωτεινότητα (φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας) της επιφάνειας αυτής. Η επιφάνεια που βρίσκεται πιο κοντά στην σημειακή πηγή λαμβάνει μεγαλύτερο τμήμα του κώνου της φωτεινής ροής σε σχέση με μία επιφάνεια που βρίσκεται πιο μακριά από αυτή (βλ εικόνα 7). Λαμβάνοντας υπόψη την φωτεινή ένταση, καθώς η φωτεινή ροή (lumens) αφήνεται από την πηγή σε μορφή κώνου και ταξιδεύουν σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, καθώς η περιοχή αυξάνεται παρατηρούνται μειώσεις φωτισμού, ενώ η φωτεινή ροή παραμένει η ίδια [18].



Εικόνα 7: Νόμος αντιστρόφου τετραγώνου.

Πηγή: <http://www.electrical-knowhow.com/2012/12/point-by-point-method-for-lighting.html>

Σύμφωνα με τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου, η επιφάνεια διατομής του κώνου (που σχηματίζεται από μία σημειακή πηγή προς μια οριζόντια επιφάνεια) αυξάνει με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Κατά συνέπεια, η ένταση φωτισμού σε αυτή την

επιφάνεια είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της κάθετης απόστασης από την πηγή [18]. Η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια δίνεται από τη ακόλουθη σχέση (1.11).

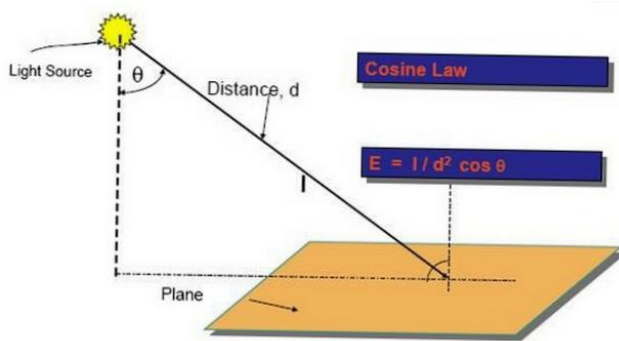
$$E = \frac{I}{d^2} \text{ (lux)} \quad (1.11)$$

όπου: I η φωτεινή ένταση της πηγής προς την επιφάνεια, [cd]

d η απόσταση από την πηγή προς την επιφάνεια, [m]

iii. Προσανατολισμός επιφάνειας

Η παράμετρος αυτή έχει να κάνει με την θέση της επιφάνειας η οποία φωτίζεται από τη σημειακή πηγή. Ουσιαστικά πρόκειται για την νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου που παρουσιάστηκε πιο πάνω, με μόνη διαφορά το γεγονός ότι στη προκειμένη περίπτωση η επιφάνεια δεν βρίσκεται σε κάθετη απόσταση από τη πηγή, αλλά υπό κάποια γωνία θ (βλ. εικόνα 8) [18].



Εικόνα 8: Προσανατολισμός επιφάνειας σε σχέση με τη πηγή φωτισμού.

Πηγή: <http://www.electrical-knowhow.com/2012/12/point-by-point-method-for-lighting.html>

Στη προκειμένη περίπτωση, η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια δίνεται από τη ακόλουθη σχέση (1.12) [18].

$$E = \frac{I}{d^2 \cdot \cos \theta} \text{ (lux)} \quad (1.12)$$

όπου: θ η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη κάθετη ακτίνα από τη πηγή και την απόσταση προς την εξεταζόμενη επιφάνεια (βλ. εικόνα 8)

1.4. Τεχνητός Φωτισμός και Είδη Λαμπτήρων

Προκειμένου να επιτυγχάνονται συνθήκες οπτικής άνεσης στους χρήστες, κατά το σχεδιασμό του συστήματος φωτισμού ενός χώρου, εκτός από το «σχεδιασμό» του φυσικού φωτισμού, θα πρέπει να πραγματοποιείται και προσεκτικός σχεδιασμός του τεχνητού φωτός. Ο σχεδιασμός και η πολυπλοκότητά του εξαρτάται από τη χρήση του χώρου, καθώς και από τις επιλογές της στρατηγικής φωτισμού, του είδους των

λαμπτήρων, του είδους και του σχεδιασμού των φωτιστικών σωμάτων, του είδους και σχεδιασμού των φωτιστικών σωμάτων, τις επιλογές αναφορικά με τον έλεγχο του τεχνητού φωτός, καθώς και αυτές αναφορικά με τη σχέση του φυσικού με το τεχνητό φως.

Στη συνέχεια αναλύονται οι ιδιότητες των ευρέως διαθέσιμων ειδών λαμπτήρων και των βασικών εξαρτημάτων των φωτιστικών σωμάτων.

1.4.1. Λαμπτήρες Πυράκτωσης

Οι λαμπτήρες πυράκτωσης, αποτελούν τη δεύτερη πηγή φωτός που εφευρέθηκε και χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο, μετά τη φωτιά. Η πρώτη ανακάλυψη έγινε από τον Αμερικανό Τόμας Έντισον και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στις 31 Δεκεμβρίου του 1879. Τη δεκαετία του 1930 οι λαμπτήρες πυράκτωσης βολφραμίου εφευρέθηκαν και εξελίχθηκαν στη μορφή που τους προμηθευόμαστε ακόμη και σήμερα. Οι πιο κοινοί τύποι λαμπτήρων πυράκτωσης αποτελούνται από ένα νήμα βολφραμίου μέσα σε γυάλινη λάμπα, η οποία είναι γεμάτη με μίγμα αργού και αζώτου (βλ. εικόνα 9) [29], [14].



Εικόνα 9: Τυπικός λαμπτήρας πυράκτωσης

Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki>

Καθώς το ρεύμα περνά από το νήμα βολφραμίου, αυτό πυρακτώνεται εκπέμποντας ακτινοβολία. Η ισχύς του λαμπτήρα καθορίζεται κυρίως από την τάση τροφοδοσίας και την αναλογία μήκος/ διάμετρος του νήματος βολφραμίου. Το σημείο τήξης του βολφραμίου, το οποίο είναι στους 3.680K, περιορίζει τη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να θερμανθεί το νήμα. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία του νήματος, τόσο περισσότερη ακτινοβολία εκπέμπει στα μικρά μήκη κύματος. Ακόμη όμως και σε θερμοκρασίες μικρότερες από το σημείο τήξης, το βολφράμιο ξεκινά να εξατμίζεται, μαυρίζοντας τη λάμπα και καθιστώντας το νήμα εξαιρετικά αδύνατο. Το φαινόμενο αυτό είναι ο βασικός λόγος της λήξης της ζωής του λαμπτήρα. Τα σχετικά ποσά υπέρυθρης, υπεριώδους και ορατής ακτινοβολίας που εκπέμπει ένας λαμπτήρας πυράκτωσης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το νήμα. Γενικά, οι λαμπτήρες αυτού του τύπου λειτουργούν στους 2.600 ως 3.400 K, θερμοκρασία στην οποία το ποσοστό της ορατής ακτινοβολίας που εκπέμπεται είναι από 7 ως 18% της συνολικής. Η ζωή ενός λαμπτήρα γενικής χρήσεως αναμένεται περίπου στις 1.000 ώρες

και η φωτεινή απόδοσή του ίση με 15 lm/Watt. Εξαιτίας της χρήσης περισσότερης ενέργειας σε σύγκριση με τους λαμπτήρες φθορισμού και άλλους λαμπτήρες, η ΕΕ αποφάσισε τη σταδιακή απόσυρση των λαμπτήρων πυράκτωσης από την 1η Σεπτεμβρίου του 2009.

Οι λαμπτήρες πυράκτωσης βρίσκονται σε πολλά είδη και υποκατηγορίες. Ο κλασικός τύπος λαμπτήρα διαθέτει διαυγές γλόμπο σε σχήμα σφαιρικό που λεπταίνει στο σημείο της ένωσης με τον κάλυκα (σχήμα αχλαδιού). Εναλλακτικά, οι λαμπτήρες αυτοί μπορούν να κατασκευαστούν σε σχήμα φλόγας κεριού, σφαιρικό ή σωληνωτό, με διαυγές ή γαλακτερό χρώμα γυαλιού, σε διαφορετικές διαστάσεις και κατηγορίες ισχύος. Οι βασικοί αυτοί τύποι χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αναγκών γενικού ή διακοσμητικού φωτισμού, κυρίως σε κατοικίες.

Οι λαμπτήρες πυράκτωσης έχουν πολλές υποκατηγορίες που χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές. Οι λαμπτήρες καθρέπτου είναι λαμπτήρες που διαθέτουν μια εσωτερική στρώση αλουμινίου (ανακλαστήρας) σε κάποιο τμήμα του γυαλιού, μπρος ή πίσω από το νήμα. Οι δε λαμπτήρες αλογόνων λειτουργούν ακριβώς όπως οι κοινοί λαμπτήρες πυράκτωσης, μόνο που η προσθήκη αλογόνων στο γλόμπο επιτρέπει στο νήμα να λειτουργήσει αποτελεσματικότερα κάτω από υψηλότερες θερμοκρασίες, γεγονός που αυξάνει τη φωτιστική απόδοση του λαμπτήρα, η οποία φτάνει τα 20lm/W περίπου. Η απόδοση μπορεί να αυξηθεί σε 35 lm/W με την προσθήκη φιλμ ανάκλασης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι χαμηλής τάσης λαμπτήρες αλογόνων έχουν μικρότερο μέγεθος, απόδοση περίπου 25 lm/W και χρησιμοποιούνται συνήθως όπου απαιτείται συγκεντρωμένος φωτισμός [14], [30].

				
Πυρακτώσεως <i>Incandescent</i>	Αλογόνου <i>Halogen</i>	Φθορισμού <i>Fluorescent</i>	Εξοικονόμησης <i>CFL</i>	LED
~12 lm/W	~20 lm/W	~50 lm/W	~55 lm/W	~80 lm/W
<u>Διάρκεια ζωής σε ώρες</u>				
750-1.000	750-1.000	20.000-30.000*	6.000-15.000	30.000-50.000

Εικόνα 10: Φωτεινότητα λαμπτήρων σε lumens και διάρκεια ζωής

Πηγή: <http://www.oleng.eu/lighting-led/>

1.4.2. Λαμπτήρες Εκκένωσης

ι. Επιμήκεις λαμπτήρες φθορισμού (Λαμπτήρες ατμών Υδραργύρου χαμηλής πίεσης)

Οι λαμπτήρες φθορισμού αποτελούν ουσιαστικά λαμπτήρες εκκένωσης χαμηλής πίεσης, θερμής καθόδου. Αποτελούνται από ένα σωλήνα που περιέχει ατμούς υδραργύρου και αδρανή αέρια σε πίεση τέτοια που επιτρέπει τη μέγιστη εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας, για θερμοκρασία λαμπτήρα ίση με περίπου 40°C και για θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 25°C . Στα δύο άκρα τους διαθέτουν από ένα ηλεκτρόδιο (μεταλλικό αγωγό). Το ρεύμα περνά από τα ηλεκτρόδια και δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση, από την οποία παράγεται κυρίως υπεριώδους (UV) ακτινοβολία, ενώ μόνο το 3% της παραγόμενης ακτινοβολίας ανήκει στο ορατό φάσμα. Η UV ακτινοβολία απορροφάται από μια στρώση φθορίζουσων ενώσεων, που βρίσκεται εσωτερικά του σωλήνα και 40-50% αυτής μετατρέπεται με αυτό τον τρόπο και εκπέμπεται ως ορατή ακτινοβολία. Έτσι, περίπου 28% της ενέργειας που δίνεται στον λαμπτήρα γίνεται φως. Οι περισσότεροι λαμπτήρες φθορισμού χρειάζονται έναν μηχανισμό έναυσης της εκκένωσης, ενώ όλοι χρειάζονται μια συσκευή ελέγχου του ρεύματος, η οποία αποκαλείται μετασχηματιστής. Οι ηλεκτρονικοί μετασχηματιστές παρέχουν μεγαλύτερη ζωή και φωτιστική απόδοση του λαμπτήρα. Ο παράγοντας ο οποίος καθορίζει τη θερμοκρασία χρώματος, τη χρωματική απόδοση αλλά και τη φωτιστική απόδοση των λαμπτήρων φθορισμού είναι το μίγμα φωσφόρου που χρησιμοποιείται. Ανάλογα λοιπόν με τη σύσταση του μίγματος αυτού, η φωτιστική απόδοση των λαμπτήρων μπορεί να κυμαίνεται από 60 ως 100 lm/W, η θερμοκρασία χρώματος από 2.700 ως 6.500 K και η χρωματική απόδοση από 60 ως 95 R_a . Συνήθως, τα καλύτερα χρωματικά χαρακτηριστικά αποβαίνουν σε βάρος της φωτιστικής απόδοσης και αντίστροφα. Η ζωή των λαμπτήρων φθορισμού κυμαίνεται από 20.000 ως 30.000 ώρες (Εικόνα 10). Η ζωή επηρεάζεται σημαντικά από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η συχνότητα ενεργοποίησης / απενεργοποίησης των λαμπτήρων, τον τύπο μετασχηματιστή και συστήματος έναυσης, κτλ. Λόγω του υδραργύρου που περιέχουν, οι λαμπτήρες φθορισμού θα πρέπει να συλλέγονται και να απορρίπτονται σε ειδικές εγκαταστάσεις/ χώρους. Οι σύγχρονοι λαμπτήρες εκτός του ότι είναι πολύ πιο αποδοτικοί από τους παλαιούς λαμπτήρες, έχουν και πολύ μικρά ποσά υδραργύρου (~2mg). Εκτός από τους γραμμικούς λαμπτήρες υπάρχουν και οι κυκλικοί, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τους πρώτους στο ότι ο σωλήνας είναι καμπυλωμένος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κυκλικών λαμπτήρων ελάχιστα διαφέρουν από αυτά των γραμμικών. Οι λαμπτήρες φθορισμού αποτελούν εδώ και πολλά έτη τη βασική πηγή τεχνητού φωτισμού για εργασιακούς χώρους. Επίσης, το είδος αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα σε εκθεσιακούς, εμπορικούς και νοσοκομειακούς χώρους [14].

Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (συνήθως αποκαλούνται λαμπτήρες εξοικονόμησης ενέργειας) είναι μια ακόμη κατηγορία λαμπτήρων φθορισμού. Η αρχή λειτουργίας αυτών των λαμπτήρων είναι όμοια με αυτή των γραμμικών λαμπτήρων φθορισμού, μόνο που ο σωλήνας είναι καμπυλωμένος ώστε να γίνει όλη η κατασκευή πιο συμπαγής. Είναι αρκετά

πιο φωτεινοί από τους γραμμικούς, λόγω της μικρότερης διαμέτρου του σωλήνα και όχι επειδή είναι πιο αποδοτικοί. Αντίθετα, τόσο ο χρόνος ζωής τους όσο και η φωτιστική τους απόδοση είναι λίγο μικρότερα από αυτά των γραμμικών λαμπτήρων [14].

ii. Λαμπτήρες Εκκένωσης Υψηλής Πίεσης

Οι λαμπτήρες εκκένωσης αποτελούν λαμπτήρες στους οποίους η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε ακτινοβολία μέσω μιας εκκένωσης η οποία συμβαίνει σε ατμούς κάποιου αερίου / μετάλλου. Η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας εξαρτάται από τα στοιχεία που βρίσκονται μέσα στο λαμπτήρα αλλά και την πίεση και τη θερμοκρασία της εκκένωσης. Η συγκεκριμένη κατηγορία λαμπτήρων χρειάζεται σύστημα έναυσης της εκκένωσης και σταθεροποίησης του ρεύματος που περνά μέσα από το λαμπτήρα [14].

Τα βασικά είδη λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής έντασης είναι:

α. Λαμπτήρες ατμών Νατρίου χαμηλής πίεσης

Οι λαμπτήρες αυτοί έχουν μορφή και αρχή λειτουργίας παρόμοια με αυτή των γραμμικών λαμπτήρων φθορισμού. Ωστόσο, προκειμένου να μην έχουν την ίδια διαμήκη κατασκευή, ο σωλήνας εκκένωσης «διπλώνεται» (σχήμα U), αν και κατασκευάζονται και γραμμικές εκδοχές του λαμπτήρα. Η ακτινοβολία που παράγεται στους λαμπτήρες ατμών Νατρίου χαμηλής πίεσης έχει μήκος κύματος κοντινό με την περιοχή στην οποία το μάτι έχει τη μέγιστη ευαισθησία. Έτσι, θεωρούνται από τους πιο αποδοτικούς λαμπτήρες καθώς αποδίδουν ως και 200 lm/W. Σε ένα λαμπτήρα ισχύος 90W το φως που παράγεται αντιπροσωπεύει το 30% της ενέργειας μετατρέπεται σε φως, 5% γίνεται υπέρυθρη ακτινοβολία, 22% αποτελεί απώλειες στα ηλεκτρόδια και οι υπόλοιπες απώλειες φτάνουν στα 43%. Η μέση ζωή ενός λαμπτήρα ατμών Νατρίου χαμηλής πίεσης είναι 16.000 ώρες. Το μονοχρωματικό φως που παράγουν, λόγω του Νατρίου, κάνει τη διάκριση των χρωμάτων των αντικειμένων που φωτίζουν σχεδόν αδύνατη, γεγονός που περιορίζει τις εφαρμογές τους (κακή χρωματική απόδοση) [14].

β. Λαμπτήρες ατμών Νατρίου υψηλής πίεσης

Οι λαμπτήρες ατμών Νατρίου υψηλής πίεσης είναι πολύ πιο συμπαγείς από τους λαμπτήρες ατμών Νατρίου χαμηλής πίεσης. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό σωλήνα που περιέχει ατμούς Νατρίου, υδράργυρο και συνήθως ξένο, ο οποίος σφραγίζεται στις άκρες του με αγωγίμα καλύμματα, τα οποία υποστηρίζουν και τα ηλεκτρόδια. Ο σωλήνας περιέχεται σε ένα δεύτερο εξωτερικό κάλυμμα, το οποίο περιέχει κενό προκειμένου να προστατεύει τον εσωτερικό σωλήνα από την οξείδωση και να προσφέρει θερμική μόνωση. Η κατανομή της ακτινοβολίας που εκπέμπουν οι λαμπτήρες ατμών Νατρίου υψηλής πίεσης είναι περιορισμένη με αποτέλεσμα το φως να έχει λευκή – κίτρινη απόχρωση και σχετικά κακή χρωματική απόδοση. Όταν η πίεση στην οποία βρίσκονται οι ατμοί Νατρίου είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη, το φως θα έχει πιο λευκή εμφάνιση αλλά η φωτιστική απόδοση περιορίζεται. Ο χρόνος ζωής των λαμπτήρων αυτών κυμαίνεται από 25.000 ως 30.000 ώρες. Η απόδοση των λαμπτήρων είναι περίπου 140 lm/W [14].

γ. Λαμπτήρες ατμών Υδραργύρου υψηλής πίεσης

Στους λαμπτήρες αυτούς, ο καυστήρας περιέχει υδράργυρο και αργό. Υπάρχει ένας δεύτερο περίβλημα, το οποίο συνήθως έχει μια στρώση φωσφόρου. Η στρώση αυτή προσφέρει περισσότερο «κόκκινο φως», χρησιμοποιώντας την υπεριώδη ακτινοβολία από την εκκένωση, προκειμένου να διορθώσει το μεγάλο ποσοστό μπλε/πράσινου φωτός που εκπέμπεται από τον υδράργυρο σε μεγάλη πίεση. Το τελικό χρωματικό αποτέλεσμα είναι αποδεκτής ποιότητας για χρήση σε δρόμους / αυτοκινητόδρομους και σε κάποιες εμπορικές χρήσεις. Από την ισχύ που καταναλώνεται σε ένα λαμπτήρα ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης, περίπου τα μισά Watts μετατρέπονται σε ακτινοβολία. Η υπόλοιπη ενέργεια χάνεται είτε στα ηλεκτρόδια ή στη θέρμανση του εξωτερικού περιβλήματος. Σε ένα διάφανο λαμπτήρα, η υπέρυθρη, η υπεριώδης και η ορατή ακτινοβολία μοιράζονται περίπου εξίσου την εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Στην περίπτωση που υπάρχει στρώση φωσφόρου, ένα επιπλέον μικρό μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ορατή [14].

Η φωτιστική απόδοση των διάφορων παραλλαγών του λαμπτήρα ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης κυμαίνεται από 40 ως 60lm/W [14]. Τη μικρότερη απόδοση διαθέτουν οι λαμπτήρες με μετασχηματιστή βολφραμίου (tungsten ballasted), οι οποίοι διαθέτουν απόδοση 20lm/W περίπου. Ωστόσο, οι λαμπτήρες αυτοί έχουν την καλύτερη χρωματική απόδοση.

δ. Λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων.

Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων, υψηλής πίεσης αποτελούν την εξέλιξη των λαμπτήρων ατμών υδραργύρου. Στο σωλήνα εκκένωσής του προστέθηκαν μεταλλικά αλογονίδια, προκειμένου να βελτιωθεί η χρωματική απόδοση. Καθώς η επιλογή από μεταλλικά αλογονίδια είναι ευρεία, μπορούν να παραχθούν λαμπτήρες με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά, τόσο ως προς το χρώμα του φωτός, όσο και ως προς τον τρόπο με τον οποίο αποδίδονται τα χρώματα των φωτιζόμενων αντικειμένων. Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων που λειτουργούν σε συχνότητες 50 – 60 Hz μπορεί να παρουσιάζουν ορατό τρεμόπαιγμα, γεγονός που συνήθως οφείλεται στην κατακόρυφη θέση του λαμπτήρα κάτι το οποίο εξαλείφεται σε συχνότητες μεγαλύτερες από 85 Hz, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μετασχηματιστών (ballast) [14].

Το βασικό μειονέκτημα των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων είναι ότι δύο (θεωρητικά) όμοιοι μεταξύ τους λαμπτήρες παράγουν διαφορετικού χρώματος φως. Αυτό οφείλεται τόσο σε εγγενείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των λαμπτήρων όσο και σε αλλαγές στο χρώμα κατά τη διάρκεια της ζωής του λαμπτήρα [14].

Τα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων διαφέρουν σημαντικά, ανάλογα με την ισχύ του λαμπτήρα (250-2.000 W) και τη χρήση του. Έτσι, η φωτιστική απόδοση μπορεί να κυμαίνεται από 70 ως 170 lm/W, ανάλογα με την ισχύ του λαμπτήρα. Έχουν γενικά καλή χρωματική απόδοση ($65 < Ra < 90$) και οι θερμοκρασίες χρώματος που μπορούν να επιτευχθούν κυμαίνονται από ενδιάμεσες ως ψυχρές αποχρώσεις.

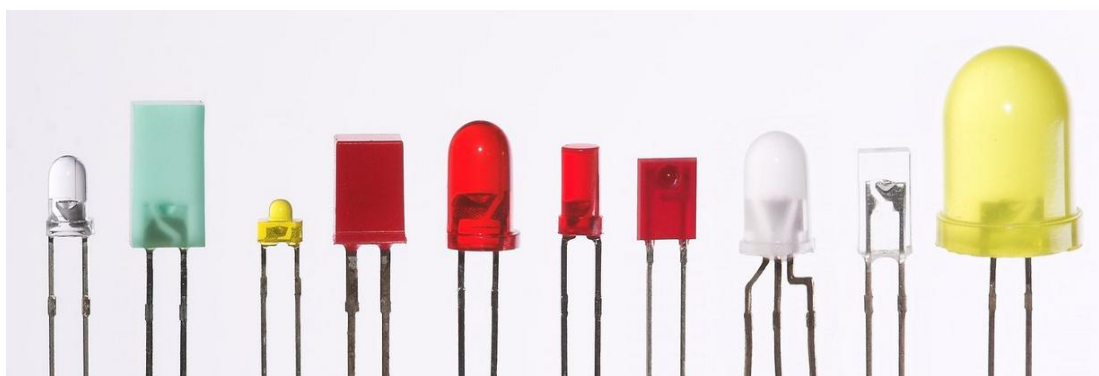
Μικρότεροι λαμπτήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους αντί των λαμπτήρων φθορισμού, με μια ή δύο άκρες διατίθενται από 35 W. Η ζωή των μικρότερων λαμπτήρων ανάδειξης είναι περίπου 6.000 ώρες, ενώ η ζωή των μεγαλύτερων λαμπτήρων βιομηχανικών εφαρμογών μπορεί να φτάσει τις 20.000 ώρες [14].

iii. Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (LEDs)

Οι λαμπτήρες LED βασίζονται στην ηλεκτρική «φωταύγεια» και είναι παρόμοιοι με τους συμβατικούς ημιαγωγούς. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία εξαρτάται από τη σύνθεση του υλικού του ημιαγωγού. Τα LEDs παράγονται σε μεγάλη ποικιλία χρωμάτων και μεγεθών (βλ. εικόνα 11), από 2 ως 13mm. Επιπλέον, κατασκευάζονται σε σφαιρικά αλλά και κυβικά σχήματα. Τα LEDs έχουν εξελιχθεί και βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Τα μεγάλα πλεονεκτήματά τους είναι:

- το μικρό και συμπαγές σχήμα τους, το οποίο αντέχει σε κραδασμούς και μπορεί να έχει πολλές εφαρμογές,
- η μεγάλη φωτιστική απόδοση σε σχέση με άλλους λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους,
- φτάνουν σε πολύ μικρό χρόνο τη μέγιστη φωτιστική απόδοσή τους,
- εκπέμπουν πολύ μικρά ποσά θερμότητας κατά τη λειτουργία τους,
- η ζωή τους κυμαίνεται από 35.000 έως 50.000 ώρες
- εκπέμπουν φως συγκεκριμένου χρώματος χωρίς την χρήση φίλτρων που απαιτούν οι παραδοσιακοί μέθοδοι φωτισμού.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα των LEDs είναι ότι παράγουν φως φάσματος που διαφέρει σημαντικά από αυτό του μελανού σώματος, συνεπώς έχουν χειρότερη χρωματική απόδοση από τους λαμπτήρες με συνεχές φάσμα. Επιπλέον, το κόστος τους, παραμένει ακόμη και σήμερα αρκετά υψηλό [14], [29].



Εικόνα 11: LED σε διάφορα μεγέθη και χρώματα

Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/>

Οι χρήσεις των LEDs κυμαίνονται από απλές εφαρμογές σε οθόνες και όργανα λειτουργίας έως και φωτιστικές πηγές για κτίρια. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια και μετά τις σχετικές οδηγίες για σταδιακή αντικατάσταση των λαμπτήρων πυράκτωσης και των μη αποδοτικών

λαμπτήρων φθορισμού, οι κατασκευαστές LEDs έχουν προσαρμόσει τους λαμπτήρες ώστε να μπορούν να αντικαταστήσουν τους προαναφερθέντες λαμπτήρες σε όλα τα υπάρχοντα φωτιστικά [14].

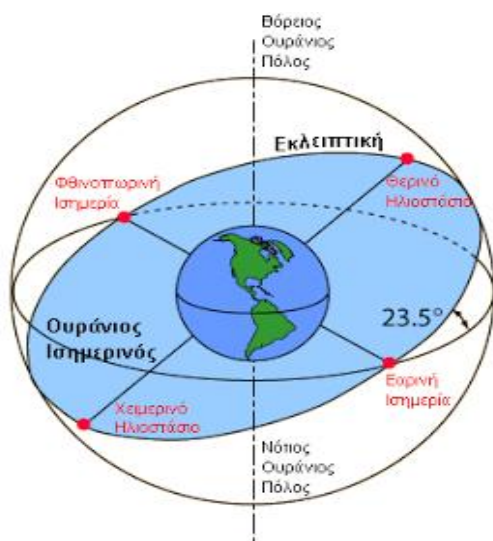
1.5. Φυσικός φωτισμός και ήλιος

Το φυσικό φως, το φως δηλαδή που προέρχεται από τον ήλιο, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη ζωή των έμβιων όντων καθώς επηρεάζει την υγεία τους, τόσο σε σωματικό όσο και ψυχικό επίπεδο. Αρχικά, το φως επιτρέπει στον άνθρωπο να βλέπει τον κόσμο γύρω του για μεγάλο χρονικό διάστημα καθημερινά. Παρόλο όμως που η διαθεσιμότητά του επηρεάζεται από τη τοποθεσία και τις καιρικές συνθήκες, αποτελεί τη πηγή με την υψηλότερη «χρωματική απόδοση», αποδίδει δηλαδή τα χρώματα των αντικειμένων που φωτίζει βέλτιστα. Το φως δεν είναι απλά το μέσο μεταφοράς εικόνων στον εγκέφαλο, αλλά αποτελεί ενεργό βιολογικό στοιχείο με άμεσες επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την διατήρηση της ανθρώπινης ζωής είναι απαραίτητη η ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος 300nm – 1000nm, τμήμα το οποίο καλύπτει το ορατό φάσμα, και τμήματα από το υπέρυθρο και το υπεριώδες. Η «Εποχιακή κατάθλιψη» αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες παθήσεις ή οποία σχετίζεται με την έλλειψη φυσικού φωτισμού, η οποία παρουσιάζεται στους ασθενείς κατά τους χειμερινούς κυρίως μήνες, όπου η παραγωγή μελατονίνης κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι αρκετά αυξημένη. Άλλες παθήσεις οι οποίες σχετίζονται με την έλλειψη αυτή είναι η κατάθλιψη, ορμονικές διαταραχές, διαταραχές ύπνου, πονοκέφαλοι, ανεπάρκεια βιταμίνης D κτλ. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι το φυσικό φως επηρεάζει το καρδιακό σύστημα το οποίο ρυθμίζει τις περιόδους δραστηριότητας και ηρεμίας ενός οργανισμού καθώς και τους κύκλους των φυσιολογικών και βιολογικών διεργασιών του σε ένα 24ωρο [1], [3], [13].

1.5.1. Η Κίνηση του Ήλιου

Ο ήλιος αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή φωτός για τη γη. Η θέση του στον ουρανό διαφέρει κάθε στιγμή, ενώ η σχετική του θέση για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή επηρεάζεται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής στη οποία βρίσκεται ο παρατηρητής. Η Γη περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της και συγχρόνως γύρω από το βαρύκεντρο του συστήματος Γη – Σελήνη σε περίπου 24 ώρες (μια ημέρα), ενώ σε διάστημα ενός έτους (365 ημέρες, 5 ώρες, 48 λεπτά και 46 δευτερόλεπτα) καλύπτει μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον ήλιο. Σε μεγαλύτερη απόσταση από τον ήλιο η Γη βρίσκεται την 1^η Ιουλίου ενώ σε ελάχιστη απόσταση την 1^η Ιανουαρίου. Η ημερήσια κίνηση της Γης γύρω από τον άξονά της αφήνει στον παρατηρητή, ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνειά της, την εντύπωση ότι ο ήλιος διασχίζει τον ουρανό από την ανατολή μέχρι τη

δύση. Η μεσημβρία συμβαίνει όταν το σημείο της γης στο οποίο βρίσκεται ο παρατηρητής είναι ακριβώς απέναντι από τον ήλιο [6], [13], [10].



Εικόνα 12: Κλίση άξονα περιστροφής της γης και εποχιακές εναλλαγές.

Πηγή:

<http://blogs.sch.gr/isiglavvas/archives/907>

Η εναλλαγή των εποχών είναι αποτέλεσμα του ότι μεταξύ του ισημερινού και του επιπέδου περιστροφής της γης, γύρω από τον ήλιο, δημιουργείται γωνία $23^{\circ}27'$ ($\sim 23^{\circ}5'$) όπως φαίνεται και στην πιο πάνω εικόνα 12. Ο προσανατολισμός του άξονα της γης παραμένει σταθερός, όπως η γη γυρνά γύρω από τον ήλιο [6]. Οι ημερομηνίες που αποτελούν ορόσημα στη σχέση μεταξύ της γης και του ήλιου είναι:

- i. το **θερινό ηλιοστάσιο** (21 Ιουνίου), κατά το οποίο ο βόρειος πόλος έχει κλίση $23\frac{1}{2}^{\circ}$ προς τον ήλιο (κατά τη μεσημβρία, οι ηλιακές ακτίνες είναι παράλληλες στο γεωγραφικό πλάτος $23\frac{1}{2}^{\circ}\text{N}$, το οποίο αντιστοιχεί στον Τροπικό του Καρκίνου). Όλα τα σημεία της επιφάνειας της γης τα οποία βρίσκονται νότια από το γεωγραφικό πλάτος $66\frac{1}{2}^{\circ}\text{S}$ βρίσκονται σε απόλυτο σκοτάδι για 24 ώρες, ενώ αυτά βόρεια το γεωγραφικό πλάτος $66\frac{1}{2}^{\circ}\text{N}$ έχουν φως για 24 ώρες [6].
- ii. η **φθινοπωρινή ισημερία** (22 - 23 Σεπτεμβρίου), κατά την οποία οι δυο πόλοι συναπέχουν από τον ήλιο και όλα τα σημεία της γης έχουν 12 ώρες ημέρα και 12 ώρες νύχτα. Η γη φτάνει σε θέση φθινοπωρινής ισημερίας έξι περίπου μήνες μετά από το θερινό ηλιοστάσιο [6].
- iii. το **χειμερινό ηλιοστάσιο** (21 Δεκεμβρίου), κατά το οποίο η κατάσταση είναι η αντίστροφη από αυτή του θερινού ηλιοστασίου (κατά τη μεσημβρία, οι ηλιακές ακτίνες είναι παράλληλες στο γεωγραφικό πλάτος $23\frac{1}{2}^{\circ}\text{N}$, το οποίο αντιστοιχεί στον Τροπικό του Καρκίνου). Σε αυτή τη κατάσταση επέρχεται η γη τρεις περίπου μήνες μετά την φθινοπωρινή ισημερία. Τα σημεία της επιφάνειας της γης τα οποία βρίσκονται νότια από το γεωγραφικό πλάτος $66\frac{1}{2}^{\circ}\text{S}$ βρίσκονται σε απόλυτο φως για 24 ώρες, ενώ τα σημεία βόρεια του γεωγραφικού πλάτους $66\frac{1}{2}^{\circ}\text{N}$ έχουν σκοτάδι για 24 ώρες[6].

- iv. η **εαρινή ισημερία** (20 - 21 Μαρτίου), κατά την οποία η κατάσταση είναι όμοια με αυτή της φθινοπωρινής ισημερίας και στην οποία επέρχεται η γη τρεις περίπου μήνες μετά το χειμερινό ηλιοστάσιο. Οι δυο πόλοι δηλαδή συναπέχουν από τον ήλιο και όλα τα σημεία της γης έχουν 12 ώρες ημέρα και 12 ώρες νύχτα [6].

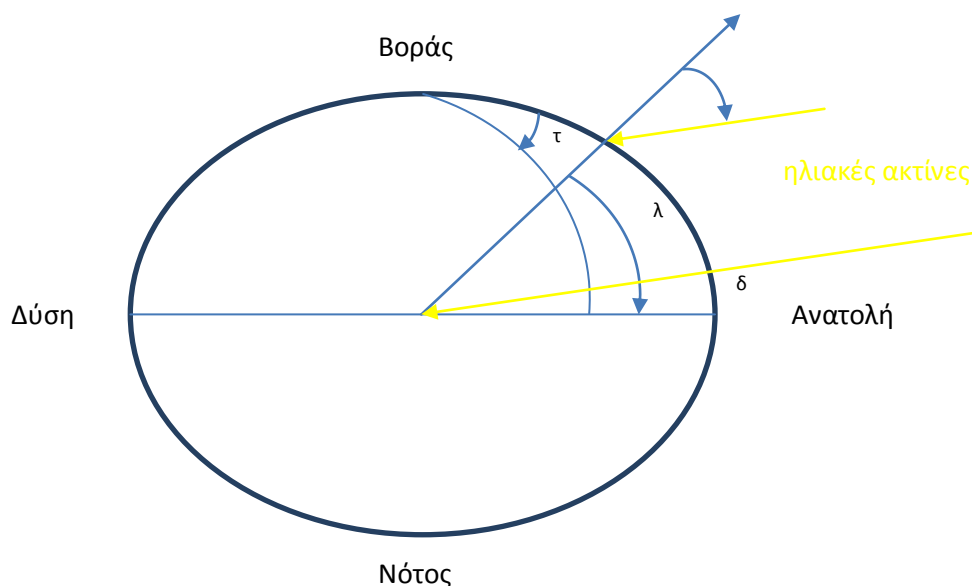
Αξίζει να σημειωθεί, ότι η πιο πάνω αναφορά (όπως φαίνεται και στην πιο κάτω εικόνα 13 αφορά το βόρειο ημισφαίριο. Τα ονόματα αυτά δεν ορίζουν μονοσήμαντα τα ηλιοστάσια, αφού, όπως και οι εποχές του έτους, το θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο είναι το χειμερινό για το νότιο και αντιστρόφως.



Εικόνα 13: Ημερομηνίες που αποτελούν ορόσημα στη σχέση μεταξύ της γης και του ήλιου.

Πηγή: <http://blogs.sch.gr/isiglavas/archives>

Η σχέση ενός σημείου στην επιφάνεια της γης (P) με τις ηλιακές ακτίνες μπορεί να προσδιοριστεί με το γεωγραφικό πλάτος (λ), την ωριαία γωνία (τ) και την ηλιακή απόκλιση (δ) όπως παρουσιάζονται στην πιο κάτω εικόνα 14.



Εικόνα 14: Γεωγραφικό πλάτος (λ), ωριαία γωνία (τ), ηλιακή απόκλιση (δ)

Πηγή: τροποποίηση από: <http://www.physics.uoi.gr/seci/clim2.pdf>

Το γεωγραφικό πλάτος (λ) ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος του τόπου με το επίπεδο του ισημερινού. Τα γεωγραφικά πλάτη βόρεια του ισημερινού παίρνουν θετικές τιμές, ενώ αυτά κάτω από τον ισημερινό λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα πλάτη σε αντίθεση με σημεία διαφορετικού ημισφαιρίου που έχουν ετερόνυμα πλάτη.

Η ωριαία γωνία (τ) είναι η γωνιακή απόσταση του ήλιου από την ηλιακή μεσημβρία λόγω περιστροφής της γης στον άξονά της. Κατά την μεσημβρία η γωνία αυτή είναι μηδέν ($\tau=0$). Κατά τις πρωινές ώρες η ωριαία γωνία παίρνει τιμές αρνητικές, ενώ κατά τις απογευματινές παίρνει τιμές θετικές.

Η ηλιακή απόκλιση (δ) είναι η γωνιακή απόσταση των ακτινών του ήλιου βόρεια του ισημερινού. Η ηλιακή απόκλιση κυμαίνεται ανάμεσα σε $+23 \frac{1}{2}^\circ$ (22 Ιουνίου) ως 0° κατά τις ισημερίες (23 Σεπτεμβρίου και 21 Μαρτίου) και ως $-23 \frac{1}{2}^\circ$ (23 Δεκεμβρίου) [8].

Η κατανόηση των εναλλαγών του φυσικού φωτός καθώς και η δυνατότητα κατασκευής ηλιακών διαγραμμάτων, τα οποία μας επιτρέπουν την πρόβλεψη του ήλιου σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό μέρος μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, καθιστά τη γνώση της ηλιακής γεωμετρίας απαραίτητη.

1.5.2. Τύποι ουρανού για τους υπολογισμούς φυσικού φωτισμού

Προκειμένου να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί που σχετίζονται με το φυσικό φως, δημιουργήθηκαν ορισμένες τυποποιημένες κατανομές λαμπρότητας του ουράνιου θόλου. Οι βασικές «κατηγορίες ουρανών» που δημιουργήθηκαν είναι:

- i. **Καθαρός ουρανός κατά CIE:** Ο τύπος αυτός ουρανού χαρακτηρίζεται από ανομοιογενή κατανομή λαμπρότητας ενώ παράλληλα δεν έχει κανένα σύννεφο. Είναι λαμπρότερος γύρω από τον ήλιο, ενώ το πιο σκοτεινό σημείο του είναι αντιδιαμετρικά αυτού (στο ίδιο αζιμουθιακό επίπεδο με τον ήλιο αλλά σε υψομετρική γωνία ίση με 90° περίπου). Η φωτεινότητα του ορίζοντα βρίσκεται ενδιάμεσα στις φωτεινότητες των δύο αυτών στοιχείων, ωστόσο είναι υψηλότερη από αυτή του ζενίθ [3].
- ii. **Πλήρως νεφοσκεπής ουρανός κατά CIE:** Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στα λογισμικά που υπολογίζουν συνθήκες φωτισμού και σε Πρότυπα για το φωτισμό. Ωστόσο, στις χώρες τις νότιας Ευρώπης, επειδή ο νεφοσκεπής ουρανός δεν αποτελεί τον κανόνα αλλά μάλλον την εξαίρεση, θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί με την ερμηνεία των αποτελεσμάτων υπολογισμών με τη χρήση αυτού του είδους ουρανού. Αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου, ο ουρανός καλύπτεται από πυκνά, ομοιογενή σύννεφα και ο ήλιος δεν είναι εμφανής [3]. Η λαμπρότητα διαφοροποιείται με το ύψος του ήλιου (γ), σύμφωνα με τη σχέση 1.13:

$$L_y = L_z \cdot \frac{(I+2 \cdot \sin \gamma)}{3} \quad (1.13)$$

όπου: L_z η λαμπρότητα στο ζενίθ

I η φωτεινή ένταση

Εκτός από αυτούς τους δύο ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους, υπάρχουν και άλλοι τύποι ουρανών, οι οποίοι συνήθως χρησιμοποιούνται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. ουρανός ομοιογενούς λαμπρότητας, μερικώς νεφοσκεπής ουρανός, κτλ).

Στην πραγματικότητα, η κατανομή της λαμπρότητας του ουρανού, κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, είναι πολύ ανομοιόμορφη. Γενικά, για συνθήκες μη νεφοσκεπούς ουρανού, ο ορίζοντας θα είναι πιο φωτεινός από τον πλήρως νεφοσκεπή ουρανό κατά CIE και το τμήμα του ουρανού κοντά στον ήλιο θα είναι φωτεινότερο από τον υπόλοιπο ουρανό.

1.5.3. Διαθεσιμότητα φυσικού φωτός στα κτίρια

Τα επίπεδα φυσικού φωτός στο εσωτερικό ενός κτιρίου εξαρτώνται από έναν αριθμό παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί είναι οι καιρικές συνθήκες και η κατάσταση του ουρανού, το μέγεθος, το είδος και το υλικό που καλύπτει τα ανοίγματα του κτηρίου, τα εμπόδια που υπάρχουν εξωτερικά των ανοιγμάτων, οι τιμές ανακλαστικότητας των επιφανειών εσωτερικά και εξωτερικά των ανοιγμάτων, κτλ.

Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης για τη διαθεσιμότητα φυσικού φωτός σε ένα εσωτερικό χώρο είναι ο **Παράγοντας Φυσικού Φωτός** (Daylight Factor, DF). Η μέση τιμή του Παράγοντα Φυσικού Φωτός υπολογίζεται από τη ακόλουθη σχέση 1.14 [22]:

$$DF = \frac{T \cdot A_w \cdot \theta}{A \cdot (1 - R^2)} \quad (1.14)$$

όπου:	T	ο συντελεστής διάχυτης διαπερατότητας του υαλοπίνακα, συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση της βρωμιάς, των σκιάστρων και άλλων εμποδίων
	A_w	η επιφάνεια του υαλοπίνακα [m^2]
	θ	η γωνία θέασης του ουρανού
	A	το συνολικό εμβαδό όλων των εσωτερικών επιφανειών του χώρου (τοιχοί, ταβάνι, δάπεδο, παράθυρα) [m^2]
	R	ο μέσος συντελεστής ανάκλασης των εσωτερικών επιφανειών του χώρου

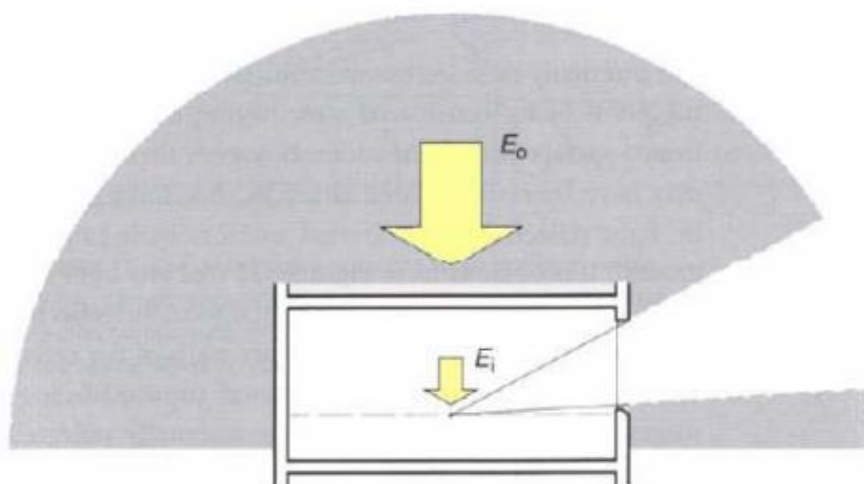
Ο δείκτης αυτός εξαρτάται από το φως που προσπίπτει στο σημείο αναφοράς απευθείας από τον ουρανό, το φως το οποίο προσπίπτει στο σημείο αναφοράς μετά από ανάκλαση από κάποιο εξωτερικό στοιχείο (έδαφος, δομικά στοιχεία, κτλ.), καθώς και το φως το οποίο προσπίπτει στο σημείο αναφοράς μετά από ανάκλαση σε κάποιο εσωτερικό στοιχείο (τοιχος, δάπεδο, κτλ.) [22].

Παρόλα αυτά, ο δείκτης αυτός δε μπορεί να λάβει υπόψη την είσοδο άμεσου ηλιακού φωτός σε ένα χώρο. Το γεγονός αυτό τον καθιστά ανεπαρκή ή ακατάλληλο για κλίματα με μεγάλη ηλιοφάνεια. Έχει καθιερωθεί ωστόσο ως το μέτρο της διαθεσιμότητας του φυσικού φωτός και χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύγκριση διαφορετικών χώρων, ή παραλλαγών του ίδιου χώρου μεταξύ τους (ιδιαίτερα κατά τη φάση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού ενός κτιρίου) [22].

Η φωτεινότητα σε ένα σημείο ενός εσωτερικού χώρου μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της Φωτεινότητας που συμβαίνουν την ίδια χρονική στιγμή, σε ένα ανεμπόδιστο σημείο του εξωτερικού χώρου, ανεξάρτητα από το γεγονός αν ο ουρανός είναι φωτεινός ή μουντός. Ο Παράγοντας Φυσικού Φωτός είναι αυτή η σταθερά της

Φωτεινότητας σε ένα σημείο του εσωτερικού ενός χώρου (E_i), προς την Φωτεινότητα σε ένα ανεμπόδιο σημείο οριζόντιου επίπεδο του εξωτερικού χώρου (E_o), την ίδια ακριβώς στιγμή, εκφρασμένη ως ποσοστό [22].

$$\text{Π. Φ. Φ} = \frac{E_i}{E_o} \cdot 100\% \quad (1.15)$$



Εικόνα 15: Υπολογισμός παράγοντα φυσικού φωτός σχέση (1.15).

Πηγή: Δρ. Μερέση Κατερίνα, «Ενεργειακά κελύφη – Φυσικός φωτισμός»

1.5.4. Είσοδος φυσικού φωτός στα κτίρια

Όπως προαναφέρθηκε τα επαρκή επίπεδα φωτισμού αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τη διαμόρφωση άνετων συνθηκών και την εξασφάλιση της ποιότητας ζωής. Επομένως, η εξασφάλιση φυσικού φωτισμού στα κτίρια συμβάλλει αποφασιστικά στη μείωση της ενεργειακής τους κατανάλωσης, ενώ ταυτόχρονα συνεισφέρει τα μέγιστα στην εξασφάλιση οπτικής άνεσης στους εσωτερικούς χώρους.

Χρήση του φυσικού φωτισμού συνεπάγεται μείωση της χρήσης του αντίστοιχου τεχνητού φωτισμού και κατ' επέκταση, μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Ταυτόχρονα, η μείωση του τεχνητού φωτισμού συνεπάγεται, κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, σημαντική μείωση του ψυκτικού φορτίου των κτιρίων. Ιδιαίτερα δε σε κτίρια γραφείων καθώς και σε εμπορικά κτίρια όπου η μείωση του ψυκτικού φορτίου λόγω της χρήσης συστημάτων φυσικού φωτισμού μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Η εξασφάλιση επαρκούς φυσικού φωτισμού σε ένα κτίριο, εκτός από το κλίμα και τη γεωγραφική περιοχή στην οποία αυτό βρίσκεται, εξαρτάται από τον αστικό και πολεοδομικό σχεδιασμό της περιοχής στην οποία εντάσσεται το κτίριο, της γεωμετρίας του κελύφους, του τρόπου ενσωμάτωσης των διαφανών στοιχείων, κτλ.

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν τα κτίρια για φωτισμό είναι σημαντική και εξαρτάται από τη χρήση του κτίσματος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής και τη συμπεριφορά των χρηστών.

Η αστική γεωμετρία αποτελεί επίσης έναν καθοριστικό παράγοντα για τη διαθεσιμότητα φυσικού φωτός σε ένα κτίριο. Το ύψος και το πλάτος των γειτονικών κτιρίων καθώς και η ανακλαστικότητα των όψεών τους, οι φυτεύσεις, οι ανακλαστικότητες των υλικών του περιβάλλοντος, το πλάτος των οδών είναι παράγοντες που προσδιορίζουν τον ηλιασμό ενός οικοπέδου.

Στοιχεία που επιτρέπουν την είσοδο φυσικού φωτός στα κτίρια

i. Αρχιτεκτονικές διατάξεις που επιτρέπουν ή/και ελέγχουν την είσοδο φυσικού φωτός στο κτίριο

Τα στοιχεία αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Εσωτερική αυλή κτιρίου ή συγκροτήματος. Η αυλή αυτή περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα κτίρια και μόνο η κορυφή της είναι ανοικτή στο εξωτερικό περιβάλλον. Η εσωτερική αυλή επιτρέπει την είσοδο φυσικού φωτός σε περισσότερους χώρους ενός κτιρίου οι οποίοι κάτω από άλλες συνθήκες θα ήταν εσωτερικοί.
- Αίθριο. Το αίθριο είναι ένας χώρος που περιβάλλεται από κτίριο/κτίρια, αλλά καλύπτεται από διαφανές ή διαχυτικό υλικό. Είναι ένας εσωτερικός και προστατευμένος χώρος ενός κτιρίου που επιτρέπει την είσοδο φυσικού φωτός σε περισσότερους χώρους. Συνήθως, το δάπεδό του είναι το κατώτερο επίπεδο του κτιρίου, δηλαδή καταλαμβάνει ολόκληρο το ύψος του κτιρίου. Μπορεί να καλύπτεται από γυαλί ή άλλα σκληρά υλικά, μπορεί όμως να καλύπτεται και από μεμβράνη.

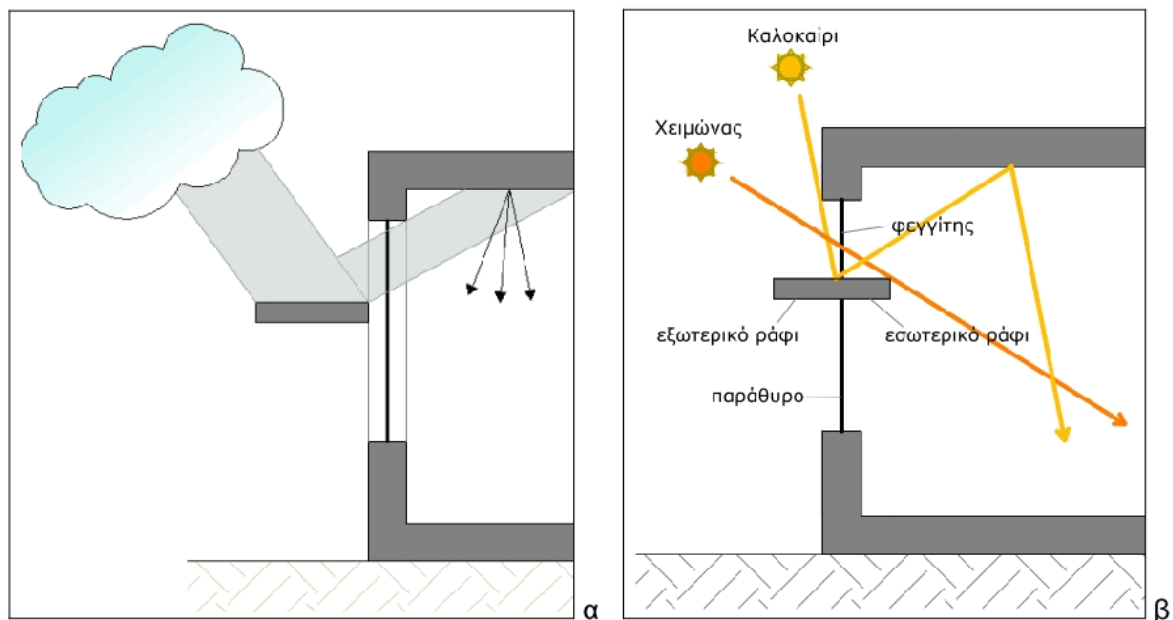
ii. Είσοδος φυσικού φωτός από ανοίγματα στην όψη του κτιρίου

Στη περίπτωση αυτή, ο σχεδιασμός περιλαμβάνει την ύπαρξη κατακόρυφων ανοιγμάτων σε μια ή περισσότερες πλευρές ενός χώρου.

Στην περίπτωση μονόπλευρης εισόδου του φωτός και αν ο βασικός ρόλος του παραθύρου είναι ο φωτισμός του χώρου, η βέλτιστη θέση είναι η τοποθέτησή του σε υψηλό σημείο. Προκειμένου η κατανομή του φυσικού φωτισμού στον χώρο να είναι σχετικά ομοιογενής, συστήνεται το βάθος του δωματίου να μην είναι μεγαλύτερο από 2 έως 2,5 φορές το ύψος του παραθύρου [31]. Αντίθετα στην περίπτωση αμφίπλευρης εισόδου φυσικού φωτός από ανοίγματα σε όψεις του κτιρίου είναι δυνατή η σημαντική αύξηση του βάθους του δωματίου. Γενικά, οι υψηλές τιμές ανακλαστικότητας των οροφών συμβάλλουν στην πιο ομοιογενή κατανομή του φυσικού φωτισμού στον χώρο. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει την ποσότητα του εισερχόμενου φυσικού φωτός, αλλά και της θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία είναι ο προσανατολισμός του παραθύρου.

Τα νότια προσανατολισμένα ανοίγματα αποδίδουν υψηλά επίπεδα φυσικού φωτός και υψηλά ενεργειακά κέρδη ενώ τα οποία είναι σχετικά εύκολο να ελεγχθούν με μέσα σκίασης. Τα ανατολικά και δυτικά προσανατολισμένα ανοίγματα προσφέρουν μικρότερη διαθεσιμότητα φυσικού φωτός και μικρότερα ενεργειακά κέρδη ενώ τα επίπεδα φωτός διαφέρουν σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα δε βόρεια προσανατολισμένα ανοίγματα προσφέρουν μικρή διαθεσιμότητα φυσικού φωτός, με μικρές ωστόσο διακυμάνσεις, αλλά και μικρά ενεργειακά κέρδη.

Μια διάταξη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του εισερχόμενου φυσικού φωτός σε ένα δωμάτιο είναι το **Ράφι Φωτισμού**. Τα ράφια φωτισμού είναι οριζόντιες ή κεκλιμένες επιφάνειες των οποίων ο ρόλος είναι διπλός. Αφενός, ανακατευθύνουν την ηλιακή ακτινοβολία και το διάχυτο φυσικό φως προς το βάθος ενός χώρου, βελτιώνοντας έτσι την ομοιομορφία του φωτισμού και αφετέρου σκιάζουν το άνοιγμα. Τα ράφια φωτισμού μπορούν να είναι μόνο εξωτερικά, μόνο εσωτερικά, ή συνδυασμός (όπως φαίνεται και στην εικόνα 16). Συνήθως, τοποθετούνται πάνω από το ύψος του ανθρώπινου ματιού, ώστε να μην αποτελούν πηγή θάμβωσης λόγω της μεγάλης ανακλαστικότητας της επιφάνειάς τους. Η σκίαση του χώρου και ο έλεγχος της θάμβωσης μέσω ενός σταθερού ραφίου φωτισμού δεν είναι αρκετά αποτελεσματική όταν ο ήλιος βρίσκεται σε χαμηλό ύψος. Γενικά, η μεγαλύτερη επίδραση των διατάξεων αυτών στο φυσικό φωτισμό ενός χώρου είναι η αύξηση της ομοιομορφίας της κατανομής του φωτισμού. Το γεγονός αυτό κάνει το χώρο να φαίνεται περισσότερο φωτισμένος κι έτσι μειώνεται η πιθανότητα χρήσης του τεχνητού φωτισμού.



Εικόνα 16: Ανακλαστικά ράφια (α) εξωτερικά ή (β) εκατέρωθεν του ανοίγματος

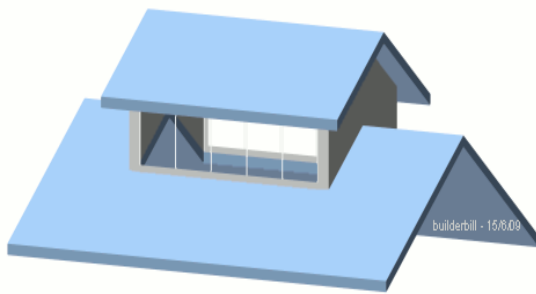
Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε., WILDWATERWALL, Περιβάλλον χώρος, Μικροκλίμα, Φωτισμός

Τα **κινητά στόρια** και οι **περσίδες σκίασης** αποτελούν ένα από τους κλασσικούς τρόπους αποφυγής της διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο δωμάτιο και της θάμβωσης. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα, οι διατάξεις αυτές ανακατευθύνουν το φως προς το βάθος του χώρου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ομοιομορφίας του φωτισμού μέσα στο δωμάτιο. Οι περσίδες σκίασης τοποθετούνται κατά κανόνα εξωτερικά των ανοιγμάτων. Αντίθετα, τα κινητά στόρια μπαίνουν κυρίως εσωτερικά ή και ανάμεσα στα υαλοπετάσματα. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να είναι οριζόντιες, κάθετες ή καμπύλες, ανάλογα με τον προσανατολισμό του ανοίγματος και τη λειτουργία των σκιαδίων.

iii. Είσοδος φυσικού φωτός από την οροφή του κτιρίου

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη ανοιγμάτων στην οροφή ενός χώρου, για αυτό και σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως στους ανώτερους ορόφους. Κατά κανόνα τα ανοίγματα στην οροφή επιτρέπουν την εισχώρηση περισσότερου φυσικού φωτός σε σχέση με τα πλευρικά. Επίσης, ο άνωθεν φωτισμός κατανέμεται ομοιόμορφα στο χώρο παρέχοντας καλύτερες οπτικές συνθήκες, ενώ η θέση του ελαχιστοποιεί την πιθανότητα σκίασής του από εσωτερικά εμπόδια και εσωτερικές διατάξεις με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται η εκμετάλλευση του φυσικού φωτός. Παρόλα αυτά, τα ανοίγματα οροφής επηρεάζουν σημαντικά το θερμικό ισοζύγιο του χώρου κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη. Στη κατηγορία αυτή, των ανοιγμάτων οροφής, περιλαμβάνονται οι ακόλουθες διατάξεις:

- Ανοίγματα σε οριζόντια ή κεκλιμένη οροφή (skylight). Τα ανοίγματα αυτά επιτρέπουν την είσοδο φυσικού φωτός από την κορυφή του ουράνιου θόλου (ζενίθ) και συνήθως καλύπτονται από διαφανή ή διαχυτικά υλικά (γυαλί, PVC). Προκειμένου να παρέχει και αερισμό στο χώρο, το άνοιγμα ενδέχεται και να ανοίγει.
- Κατακόρυφα ή κεκλιμένα παράθυρα σε οροφή (clerestory windows).
- Θόλοι. Είναι ημισφαιρικές ή παρόμοιου σχήματος κατασκευές οι οποίες μπορεί να διαθέτουν ανοίγματα ή να είναι εξολοκλήρου κατασκευασμένες από διαπερατό υλικό. Ο θόλος επιτρέπει την είσοδο του φυσικού φωτός από την κορυφή του ουράνιου θόλου (ζενίθ) και μπορεί να κατασκευαστεί από γυαλί, ακρυλικό, πολυκαρβονικό, fiberglass, κτλ.
- Κατακόρυφα ανοίγματα σε υπερυψωμένο τμήμα της οροφής (lantern). Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη αυτή αποτελεί υπερυψωμένο τμήμα οροφής στο υψηλότερο σημείο της. Συνήθως, έχει κυλινδρικό σχήμα το οποίο καλύπτεται από θόλο ενώ οι κατακόρυφες πλευρές του διαθέτουν ανοίγματα. Τυπικές διαστάσεις είναι 0,5 - 1,5m σε ύψος και 0,5 - 2m σε διάμετρο [31].
- Υπερυψωμένη τομή της στέγης, συμπεριλαμβανόμενης και της κορυφής της, με κατακόρυφα ανοίγματα (monitor roof) όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα 17. Τα υαλοστάσια ενδέχεται να είναι ανοιγόμενα προκειμένου να παρέχουν και αερισμό στο χώρο. Η υπερύψωση πάνω από τη στέγη συνήθως κυμαίνεται από 1 ως 2,5μ, ενώ το μήκος είναι συνήθως ίδιο με αυτό του χώρου [1].



Εικόνα 17: Υπερυψωμένη τομή της στέγης με κατακόρυφα ανοίγματα

Πηγή: <http://www.builderbill-diy-help.com/>

- Βορεινά πριονωτά ανοίγματα οροφής. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μια σειρά διαδοχικών, παράλληλων κεκλιμένων οροφών, νότια προσανατολισμένων, κάτω από τις οποίες υπάρχουν βόρεια προσανατολισμένα, κατακόρυφα ή κεκλιμένα υαλοστάσια. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την είσοδο του διάχυτου βόρειου φυσικού φωτός. Η πριονωτή αυτή κατασκευή έχει ύψος από 1 ως 2,5m [31].
- Διαχυτική οροφή. Αποτελείται από ένα οριζόντιο άνοιγμα που καλύπτεται από διαχυτικό υλικό και βρίσκεται στην οροφή ενός χώρου (ή στην πλάκα μεταξύ δύο ορόφων). Η διάχυτη οροφή έχει την ιδιότητα να παρέχει διάχυτο φως που προέρχεται από τον ουρανό και συνήθως περιλαμβάνει γυάλινα διαχυτικά στοιχεία.
- Ηλιακοί σωλήνες / ηλιακές καμινάδες – φωτοσωλήνες (light pipes, light ducts / sun ducts). Είναι απλή σχετικά κατασκευή, η οποία εισάγει φως από την οροφή σε σκοτεινά σημεία των κτιρίων ακόμα και σε χαμηλότερους ορόφους. Αναλυτική περιγραφή των συστημάτων αυτών περιλαμβάνεται στην παράγραφο 2.1.
- Φωτοσωλήνες με ενσωματωμένο σύστημα LED. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, οι κατασκευαστές φωτοσωλήνων έχουν προσπαθήσει να ενσωματώσουν τον φυσικό φωτισμό σε παραδοσιακούς σωλήνες φωτός, έτσι ώστε το παραγόμενο σύστημα να παρέχει τα επιθυμητά επίπεδα φωτισμού στο χώρο που είναι τοποθετημένος, κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες ουρανού. Στις πιο κοινές εκδόσεις, ο τεχνητός φωτισμός παρέχεται από λάμπες αλογόνου ή LED, που βρίσκεται πάνω σε ένα βραχίονα σχετικά κοντά στο διαχύτη (περίπου 0,20-0,5m πάνω από το διαχύτη, στο εσωτερικό του σωλήνα). Οι πιο εξελιγμένες εκδόσεις ενσωματώνουν λαμπτήρες LED, με ειδικά σχεδιασμένα οπτικά συστήματα για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, συνδυάζοντας τα επίπεδα φυσικού φως, προκειμένου να επιτευχθεί μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

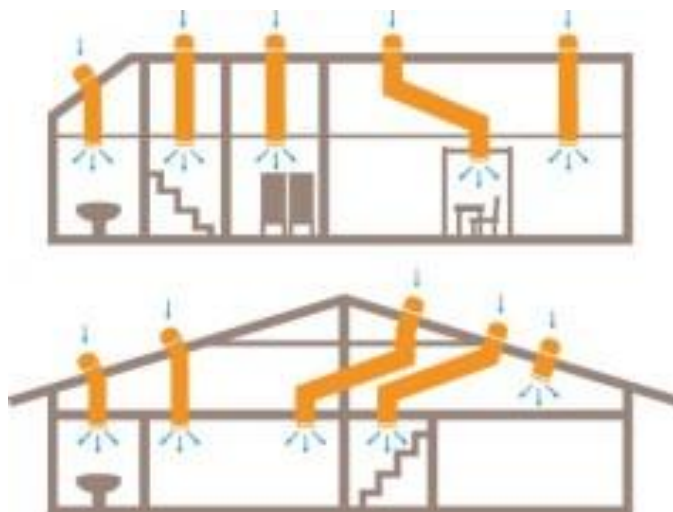
2.1. Αρχή λειτουργίας φωτοσωλήνων

Αν και οι φωτοσωλήνες αποτελούν τη σημαντικότερη τεχνολογία στην κατηγορία συστημάτων καθοδήγησης φυσικού φωτός στο εμπόριο, ωστόσο η χρήση τους δεν αποτελεί κύρια πηγή φωτισμού παρόλο που μπορούν να αντικαταστήσουν επάξια τον τεχνητό φωτισμό και είναι πολύ φιλικότεροι προς το περιβάλλον.

Σύμφωνα με το Τεχνικό Εγχειρίδιο του οργανισμού CIE, για να φωτιστεί ένα γραφείο των 1000 m² με 500 lux, απαιτείται μια εγκατάσταση φωτοσωλήνων με παθητική επιφάνεια συλλεκτών (έκταση καταλαμβανόμενη από θόλους), 50 m², αν υποθεθεί τυπική αποδοτικότητα του συστήματος, καθώς και 20000 lux εξωτερική φωτεινότητα [2].

Οι φωτοσωλήνες, αποτελούν ουσιαστικά από ένα κατακόρυφο σύστημα μεταφοράς φυσικού φωτός από το εξωτερικό περιβάλλον σε ένα δωμάτιο. Στο πάνω μέρος, σε επαφή με το φυσικό περιβάλλον και τοποθετημένος στη στέγη είναι ο συλλέκτης (θόλος), ο οποίος στεγανοποιείται έτσι ώστε να αποτρέπεται η είσοδος της βροχής και του ανέμου στο εσωτερικό. Ο συλλέκτης είναι συνδεδεμένος με τον αγωγό και καταλήγει στο διαχύτη που είναι τοποθετημένος στο ταβάνι (σαν φωτιστικό) και διαχέει το εισερχόμενο από τον συλλέκτη φως σε όλο το δωμάτιο [2].

Το άνω άκρο του φωτοσωλήνα μπορεί να είναι οριζόντιο ή κεκλιμένο, δηλ. σε κάποια γωνία ως προς τον άξονα του σωλήνα, και αποτελείται από ένα διαφανές πολυκαρβονικό θόλο που μπορεί να περιλαμβάνει στην κατασκευή του μια διαθλαστική διάταξη η οποία αποσκοπεί στο να ανακατευθύνει το φως σε ένα συγκεκριμένο άξονα. Ο φωτοσωλήνας μπορεί να είναι είτε ενιαίος και κατακόρυφος είτε να αποτελείται από τμήματα υπό κλίση (βλ. εικόνα 18). Η απόδοσή του εξαρτάται από την ένταση φωτισμού στο επίπεδο του θόλου εξωτερικά, το ύψος του ήλιου, την ανακλαστικότητα του υλικού στο εσωτερικό του σωλήνα, την ύπαρξη ή όχι γωνιών στο φωτοσωλήνα και από το λόγο του μήκους του προς τη διάμετρό του. Για αυξημένη απόδοση το μήκος του δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 10m, δεδομένου ότι όσο αυξάνει το μήκος, μειώνεται σημαντικά η ένταση του φωτισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αγωγοί αυτοί, με κατάλληλο σχεδιασμό, μπορούν επίσης να συνεισφέρουν στον φυσικό αερισμό των χώρων [2].



Εικόνα 18: Πιθανές λύσης τοποθέτησης φωτοσωλήνα, κάθετα και υπό κλίση, σε επίπεδη ή κεκλιμένη οροφή.

Πηγή: <http://miralite.co.uk/>

Αξίζει να σημειωθεί ότι με ορισμένες τροποποιήσεις, όπως η τοποθέτηση ανακλαστικών επιφανειών εκτός ή εντός του θόλου, το φως μπορεί να ανακατευθυνθεί σε αξονική κατεύθυνση παρεμποδίζοντας το άμεσο ηλιακό φως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ως και το διπλασιασμό της φωτεινής ροής κάτω από καθαρό ουρανό με ηλιοφάνεια, αλλά έχει αρνητική επίδραση υπό συνθήκες συννεφιάς.

Ο σωλήνας, ο οποίος συνδέει το συλλέκτη με τον διαχύτη, χρησιμοποιεί κατοπτρική ανάκλαση στην εσωτερική επιφάνειά των τοιχωμάτων του για τη μετάδοση του φωτός. Η συνολική μετάδοση του φωτός εξαρτάται από την επιφάνεια ανάκλασης, τη φωτεινή κατανομή της έντασης του φωτός που εισέρχεται στο σύστημα και τις αναλογίες του σωλήνα (αναλογία μήκους προς διάμετρο). Αν το μήκος του σωλήνα είναι μεγάλο σε σύγκριση με το πλάτος του, τότε ο αριθμός των ανακλάσεων είναι μεγάλος και ως εκ τούτου οι απώλειες που προκύπτουν αυξάνονται. Για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των ανακλάσεων, το φως πρέπει να εισάγεται στον σωλήνα με όσο το δυνατόν πιο παραλληλισμένη αξονική δέσμη. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από την περιοχή και την γεωμετρική μορφή του σωλήνα, η απόδοσή του μπορεί επίσης να επηρεαστεί και από τις ανακλαστικές ιδιότητες του εσωτερικού υλικού του σωλήνα. Μικρές μεταβολές στην ανακλαστικότητα της τάξεως του 0,1% μπορούν να προκαλέσουν αξιοσημείωτες αλλαγές στην απόδοση.

Εμπορικά υπάρχουν διάφοροι τύποι διαθέσιμων διακριτών στοιχείων εξόδου (διαχύτες) οι οποίοι διανέμουν το φως που αναδύεται από τα άκρα ενός φωτοσωλήνα. Είναι γενικά κυκλικοί διαχύτες από διαχυτικό (ματ) ή πρισματικό υλικό με διάμετρο η οποία αντιστοιχεί σε αυτή του σωλήνα.

2.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φωτοσωλήνων

2.2.1. Πλεονεκτήματα

- Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς, μέχρι και τις πρώτες απογευματινές ώρες οι φωτοσωλήνες παραμένουν αποδοτικοί ανεξαρτήτως της ηλιοφάνειας.
- Ο φυσικός φωτισμός που παρέχεται μέσω των φωτοσωλήνων δημιουργεί ένα υγιεινό περιβάλλον. Το φυσικό ηλιακό φως δημιουργεί ευχάριστο αίσθημα άνεσης και ευεξίας. Δεν προκαλεί κόπωση όπως ο τεχνητός φωτισμός, δεν αλλοιώνει και αντιθέτως αναδεικνύει τα πραγματικά φυσικά χρώματα των αντικειμένων προσφέροντας οικείο, φιλικό και υγιεινό περιβάλλον, με αποτέλεσμα να προσφέρει ευεξία και ψυχική υγεία.
- Ο φωτισμός από φωτοσωλήνες μπορεί να είναι απόλυτα ελεγχόμενος.
- Οι φωτοσωλήνες σε αντίθεση με άλλες μεθόδους φυσικού φωτισμού ελαχιστοποιούν τη μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό.
- Εξοικονόμηση ενέργειας ακόμα και τη νύκτα. Κάποιοι φωτοσωλήνες διαθέτουν ειδικό σύστημα χρήσης ηλεκτρικού λαμπτήρα χαμηλής κατανάλωσης ή τύπου LED, το οποίο εγκαθίσταται εσωτερικά του συστήματος για λειτουργία κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών.
- Ευκολία και ταχύτητα εγκατάστασης. Η μεγάλη γκάμα ειδικών πρακτικών εξαρτημάτων έχει σαν αποτέλεσμα την διευκόλυνση της εγκατάστασης των σωλήνων είτε σε Οικία είτε σε Βιομηχανία.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Η υψηλή ποιότητα των υλικών αλλά και η ποιότητα εγκατάστασης εγγυώνται μακρόχρονη και απροβλημάτιστη λειτουργία των φωτοσωλήνων.
- Οι φωτοσωλήνες έχουν μηδενικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Οι φωτοσωλήνες είναι συστήματα φιλικά προς το περιβάλλον σε σχέση με διάφορους λαμπτήρες.
- Το σύστημα του φυσικού φωτισμού με φωτοσωλήνες εκμεταλλεύεται το φως που προέρχεται μόνο από το ορατό μέρος του φάσματος. Αυτό σημαίνει, ότι παράλληλα με το φως δεν μεταφέρονται στο εσωτερικό η υπεριώδης και η υπέρυθη ακτινοβολία [24], [23].

2.2.2. Μειονεκτήματα

- Σχετικά μεγάλο κόστος αγοράς εξοπλισμού και εγκατάστασης. Μεγάλος χρόνος απόσβεσης σε περίπτωση οικιακής χρήσης.
- Δύσκολη εγκατάσταση των φωτοσωλήνων σε υφιστάμενα κτίρια κατά την ανακαίνισή τους, καθώς μπορεί να προκληθούν προβλήματα στατικότητας στο κτίριο.
- Τα απλά συστήματα (χωρίς πρόσθετους λαμπτήρες) δεν παρέχουν φωτισμό κατά τις νυκτερινές ώρες / πρόσθετος τεχνητό φως απαιτείται. [23]

2.3. Είδη σωλήνων φωτισμού

Οι σωλήνες ηλιακού φωτός (φωτοσωλήνες) είναι ο πιο πράσινος τρόπος για τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς αποτελούν μια πολύ αποτελεσματική λύση, η οποία μπορεί να καλύψει σε μεγάλο βαθμό όλες τις ανάγκες σε φωτισμό ενός χώρου χωρίς άλλα ανοίγματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι φωτοσωλήνες μπορεί να είναι και ρυθμιζόμενοι ούτως ώστε να μπορεί κανείς να ελέγξει τη διαρροή φωτός σε κάθε δωμάτιο ανάλογα με τις ανάγκες του. Ορισμένοι τύποι φωτοσωλήνων που κυκλοφορούν στην αγορά θα παρουσιαστούν ακολούθως.

Σωλήνας φωτισμού στη Washington dc

Ο σωλήνας αυτός (βλ. εικόνα 19) έχει εγκατασταθεί στο διεθνές δικηγορικό γραφείο της Morgan Lewis. Το κτίριο ήταν αυξημένο κατά δύο επιπλέον ορόφους για να κάνει την κατανομή του φωτός ίση και στους 12 ορόφους του κτιρίου. Ο σωλήνας που έχει εγκατασταθεί στο δικηγορικό αυτό γραφείο έχει δημιουργηθεί από τους σχεδιαστές φωτισμού James Carpenter και Davidson Norris. Αυτός ο σωλήνας, ο οποίος έχει εγκατασταθεί για τη συλλογή του φωτός πάνω στην οροφή έχει σχεδόν 36m μήκος και υψώνεται πάνω από την οροφή περίπου 4,5m ενώ έχει διάμετρο 1,75m. Ο φωτοσωλήνας αυτός περιέχει γυάλινα πρίσματα τα οποία κρατιούνται σε πλαίσια από χάλυβα. Η εξωτερική πλευρά αυτού του σωλήνα είναι κατασκευασμένη από τεντωμένες συνθετικές ίνες. Τέλος, ο σωλήνας αυτός κρατείται από ακτινικές ράβδους και μπορεί να προβάλλει το φως τόσο με φυσικό όσο και με τεχνητό τρόπο [26], [23].



Εικόνα 19: Σωλήνας φωτισμού στη Washington dc

Πηγή: <http://www.greendiary.com/6-solar-light-pipes-designed-convert-energy.html>

Φωτοσωλήνες τύπου φεγγίτη (skylight)

Οι ηλιακοί φεγγίτες (βλ. εικόνα 20) είναι μια από τις ωραιότερες εκδόσεις φωτοσωλήνα. Αυτός ο τύπος σωλήνα περιέχει τη συσκευή «μεταφοράς και ανάσχεσης του φωτός» ανά πάσα στιγμή. Αυτός ο σωλήνας αποθηκεύει το αχρησιμοποίητο φως και στη συνέχεια το αντανακλά στο χρόνο που απαιτείται. Ο τύπος αυτός φεγγίτη υπάρχει σε τρία διαφορετικά μεγέθη και μπορεί κανείς να επιλέξει ανάλογα με τις απαιτήσεις και το μέγεθος του χώρου που πρέπει να φωτίζεται [25].



Εικόνα 20: Φωτοσωλήνες τύπου φεγγίτη (skylight).

Πηγή: <http://www.greendiary.com/6-solar-light-pipes-designed-consume-energy.html>

Ρομπότ αντλίας φυσικού φωτός

Όπως προτείνεται από το όνομα, πρόκειται για ένα ηλιακό ρομπότ πάνω στη στέγη του σπιτιού το οποίο αντλεί το φως του ήλιου φυσικά και το διοχετεύει στο χώρο που θέλουμε να φωτίσουμε χωρίς κανένα πρόβλημα (βλ. εικόνα 21). Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, τα ηλιακά αυτά ρομπότ μπορούν να φωτίσουν έως 2.500 τετραγωνικά πόδια εμβαδό [25].



Εικόνα 21: Ρομπότ αντλίας φυσικού φωτός.

Πηγή: <http://www.greendiary.com/6-solar-light-pipes-designed-consume-energy.html>

Φωτοσωλήνες τύπου Velux

Οι φωτοσωλήνες τύπου Velux (βλ. εικόνα 22) έχουν σχεδιαστεί για ανασφαλείς στέγες. Η εγκατάστασή τους είναι γρήγορη και εύκολη. Οι φωτοσωλήνες αυτοί είναι κατασκευασμένοι από ατσάλι και περιέχουν καθρέφτες που κρατιούνται από δαχτυλίδια με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός καθαρού ανακλαστήρα ηλιακού φωτός [25], [27].



Εικόνα 22: Φωτοσωλήνες τύπου Velux.

Πηγή: <http://www.greendiary.com/6-solar-light-pipes-designed-consume-energy.html>

Φωτοσωλήνες τύπου Apollon

Ο όμορφος αυτός φωτοσωλήνας (βλ. εικόνα 23) είναι ένας από τους καλύτερους σωλήνες ηλιακού φωτός και είναι κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από την Orion. Σε αυτό το φωτοσωλήνα, η ηλιακή ενέργεια εστιάζεται πάνω σε ένα φράγμα από το οποίο ανακλάται το φως μέσα στο σωλήνα ο οποίος είναι σφραγισμένος με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν απώλειες φωτός. Το φως μέσω αυτού του σωλήνα κατανέμεται εξίσου σε όλες τις περιοχές που πρέπει να φωτίζονται. Επίσης, το φως αυτό υποστηρίζεται από πολλές εφαρμογές με αποτέλεσμα να καταστούν εφικτή τη συμβατότητά του με την παροχή φωτός οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας. Επιπλέον, μπορεί να ελέγξει το φως σε διαφορετικά δωμάτια και χώρους. Ο φωτοσωλήνας τύπου Apollon κατέχει την πρώτη θέση στην κατηγορία του, καθώς περιέχει δύο διπλώματα ευρεσιτεχνίας, ενώ παράλληλα περιλαμβάνει μια από τις καλύτερες τεχνολογίες συλλογής ηλιακού φωτός [25].

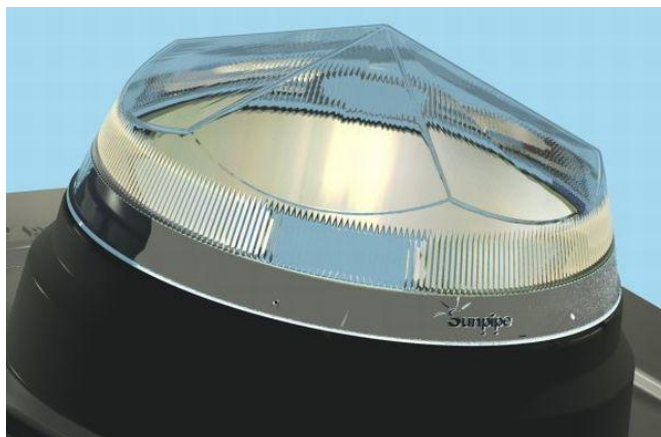


Εικόνα 23: Φωτοσωλήνας τύπου Apollon.

Πηγή: <http://www.greendiary.com/6-solar-light-pipes-designed-consume-energy.html>

Ηλιοσωλήνες (Sun pipes)

Οι ηλιοσωλήνες (βλ. εικόνα 24) είναι μία από τις απλούστερες μορφές φωτοσωλήνων οι οποίοι μπορούν να παρέχουν – διοχετεύσουν το φως της ημέρας σε οποιαδήποτε θέση του σπιτιού. Οι φωτοσωλήνες αυτοί έχουν την δυνατότητα να παρέχουν φως στα χαμηλότερα μέρη του σπιτιού ακόμα και σε συνθήκες νεφοκάλυψης [25].



Εικόνα 24: Ηλιοσωλήνας (Sun pipes).

Πηγή: <http://www.greendiary.com/6-solar-light-pipes-designed-convert-energy.html>

2.4. Μεθοδολογίες και αλγόριθμοι υπολογισμού απόδοσης φωτοσωλήνων

2.4.1. Μέθοδος Luxplot package

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους Jenkins και Muneer και είναι μέρος μιας ημιεμπειρικής μεθόδου πρόβλεψης που υπολογίζει τη φωτεινή ροή από κάθε σωλήνα ο οποίος καταλήγει σε ένα διαχύτη (ο οποίος αποτελείται από ένα καμπύλο, διάστικτο διαφανές πλαστικό). Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε διάμετρο σωλήνα, καθώς και για κάθε τυχόν μεταβολή της κλίσης του. Τέλος, το μοντέλο υπολογίζει την κατανομή του φωτός σε οποιαδήποτε απόσταση κάτω από το ταβάνι – διαχύτη. Το μοντέλο αυτό προτείνεται ως ένα εργαλείο σχεδιασμού απλό και εύκολο στη χρήση [19].

Οι απαιτούμενες είσοδοι για την λειτουργία του μοντέλου αυτού είναι η εξωτερική ένταση φωτισμού, οι διαστάσεις του σωλήνα, η πιθανή διαμόρφωση αγκώνων, η θέση κάτω από τον διαχύτη, το εμβαδό του δαπέδου καθώς και η θέση του σωλήνα, η οποία δίνεται με τη μορφή (x y) συντεταγμένων. Στην έξοδο οι εσωτερικοί φωτισμοί μπορούν να εμφανιστούν ως διαβαθμισμένα σημεία (colourluxplot), που αντιπροσωπεύουν την διάδοση του φωτός σε ένα δισδιάστατο οριζόντιο επίπεδο, για την ταυτόχρονη υπολογισμό οποιουδήποτε αριθμού σωλήνων σε οποιοδήποτε μέγεθος δωματίου [19].

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση και την επικύρωση του μοντέλου προέρχεται από μια ποικιλία χώρων από όλη τη Βρετανία σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του έτους. Οι σωλήνες είχαν διαμέτρους από 0,3 έως 0,53m και μήκη από 0,6 έως 6m. Το γεγονός αυτό, κάλυψε ένα ευρύ φάσμα αναλογίας διαστάσεων (πηλίκου μήκους προς τη διάμετρο του σωλήνα). Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν επίσης και σε μια σειρά από σωλήνα με κάμψη υπό γωνίες από 5° έως 75° [19].

Η μέθοδος αυτή, δεν συμπεριλαμβάνει άμεσα τον προσανατολισμό του σωλήνα (την απόσταση δηλαδή από την ήλιο) αλλά και παραμέτρους οι οποίες αναφέρονται στη καθαρότητα του ουρανού. Οι παραλήψεις αυτές, έχουν σαν αποτέλεσμα η μέθοδος αυτή να μην αντιπροσωπεύει πραγματικές καταστάσεις.

Ο συλλογισμός πίσω από αυτό είναι ότι κάθε φωτοσωλήνας που σχετίζεται με προβλέψεις φωτισμού, ακόμη και για ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο, θα έχει ένα αριθμό διαφορετικών παραγόντων που είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και έτσι είτε αγνοούνται είτε γενικεύονται. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε πρόβλεψη φωτισμού θα είναι μόνο ένας οδηγός σχεδιασμού, όχι μια ακριβής αντιστοιχία για μια πραγματική κατάσταση.

Ωστόσο, με την επικύρωση από ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων (όπως έχει γίνει για τη μέθοδο αυτή), η χρήση οποιουδήποτε υποδείγματος ως οδηγό σχεδιασμού μπορεί να δικαιολογηθεί. Εν τούτοις, ενώ 30000 lux το χειμώνα (για ένα καθαρό ουρανό), δεν θα μπορούσαν να παράγουν ακριβώς τον ίδιο εσωτερικό φωτισμό όπως 30000 lux το καλοκαίρι (για νεφελώδεις συνθήκες), οι διαφορές δεν κρίνονται τόσο μεγάλες που να απαιτούν διαφορετικά μοντέλα. Με απλά λόγια, η μέθοδος αυτή απαιτεί μόνο το εξωτερικό επίπεδο φωτισμού να είναι σε θέση να προβλέψει το φως που αναμένουμε να λαμβάνεται σε εσωτερικούς χώρους [19].

Η μεταφορά του φωτός, ϕ διαμέσου του σωλήνα βασίζεται στο λόγο των αναλογιών του και δίνεται από τη ακόλουθη σχέση (2.1) [23]:

$$\phi = E_{\text{ex}} \cdot \tau \cdot \pi \cdot r^2 \quad (2.1)$$

όπου: E_{ex} η εξωτερική ένταση φωτισμού, [lux]

τ η συνολική μετάδοση του σωλήνα (συμπεριλαμβανομένου του διαχύτη και του συλλέκτη)

r η ακτίνα του σωλήνα, [m]

Η εσωτερική ένταση φωτισμού E_{in} δίδεται από τη ακόλουθη σχέση (2.2) [23]:

$$E_{\text{in}} = 0,494 \cdot \phi \cdot \frac{\cos^4 \theta}{V^2} \quad (2.2)$$

όπου: V η κάθετη απόσταση από το διαχύτη προς το σημείο του ενδιαφέροντος, [m]

θ η γωνία μεταξύ της κατακόρυφης γραμμής από το διαχύτη και η γραμμή που ενώνει το κέντρο του διαχύτη με το σημείο ενδιαφέροντος

Η τιμή του συντελεστή 0,494 προέκυψε εμπειρικά [19].

2.4.2. Μέθοδος Zhang and Munner

Η έξυπνη τεχνική των Zhang και Munneer είναι για χρήση με ένα ελαφρύ σωλήνα με ένα θόλο - διαχύτη. Οι προβλέψεις της τεχνικής αυτής βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη φωτεινότητα / παράγοντα φωτός που μετρήθηκε για πάνω από τέσσερις μήνες σωλήνες φωτισμού διαμέτρου 0,21, 0,33, 0,45 και 0,53 m και μήκους που κυμαίνεται μεταξύ 0,6 και 1,2 m. Η παρέκταση αυτή στη συνέχεια χρησιμοποιείται για σωλήνες με άλλες διαστάσεις, αν και οι πιο αξιόπιστες προβλέψεις είναι αυτές εντός των διαστάσεων των σωλήνων που χρησιμοποιούνται στη μελέτη. Επίσης, με μετρήσεις που έγιναν μετά την προσθήκη αγκώνων υπό γωνία 30°, παρήχθησαν δύο ξεχωριστά μοντέλα για την πρόβλεψη της φωτεινότητας (δηλαδή, ένα για ευθείες και ένα για φωτοσωλήνες με κλίση) [19].

Η μέθοδος αυτή είναι πιο λεπτομερείς από το προηγούμενο μοντέλο (Jenkins και Munneer) σε ότι αφορά τον προσανατολισμό του σωλήνα σε σχέση με τον ήλιο καθώς και ότι αφορά τις παραμέτρους καθαρότητας του ουρανού παράμετρος καθαρότητα. Το σκεπτικό είναι ότι η γωνία πρόσπτωσης κατά την οποία το φως εισέρχεται στον σωλήνα θα επηρεάσει τη διαπερατότητά του. Ως εκ τούτου, αυτή η μεγαλύτερη λεπτομέρεια μπορούν να διακριθεί μεταξύ, όχι μόνο του μεγέθους του διαθέσιμου φωτός, αλλά επίσης και της κατεύθυνσης (α) του εισερχόμενου φωτός στο σωλήνα. Επιπλέον, αντί να παράγει μια γενική ή μέση απόδοση για όλο το έτος, οι προβλέψεις μπορούν να αναφέρονται σε μία σαιζόν ή ακόμα και μια συγκεκριμένη ώρα της [19].

Το απλουστευμένο μοντέλο του Zhang-Munneer για τον παράγοντα διείσδυσης φωτός (DPF) σε ευθείς σωλήνες, δίνεται για από την ακόλουθη σχέση (2.3) [19]:

$$DPF = (62,5 - 17,2k_t + 2,6a) \cdot \rho^{(136,0+4,3A_p+1,1 \cot a)} \cdot R^2 \cdot \frac{(V/D)^{1,3}}{D^2} \quad (2.3)$$

ενώ, για σωλήνα με αγκώνες, από τη σχέση (2.4) [19]:

$$DPF = (192,5 - 108,8k_t + 0,3a) \cdot \rho^{(132,4+4,4A_{pe}+8,6 \cot a-2,6A_{pe} \cot a)} \cdot R^2 \cdot (1 - f_{loss})^N \cdot \frac{(V/D)^{1,3}}{D^2} \quad (2.4)$$

όπου:	k_t	η παράμετρος καθαρότητας του ουρανού
	α	το ηλιακό υψόμετρο, [m]
	ρ	η ανάκλαση του σωλήνα
	A_p	η αναλογία του ευθύγραμμου σωλήνα
	A_{pe}	η αναλογία διαστάσεων του σωλήνα με αγκώνες
	R	η διάμετρος του σωλήνα, [m]
	f_{loss}	ο παράγοντας ενεργειακών απωλειών
	N	ο αριθμός των γωνιών με κλίση 30°
	V	η κάθετη απόσταση από το διαχύτη προς το σημείο ενδιαφέροντος, [m]
	D	η άμεση απόσταση από το διαχύτη φωτός σωλήνα στο σημείο ενδιαφέροντος, [m]

2.4.3. Μέθοδος Carter

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον Ντέιβιντ Κάρτερ του Πανεπιστημίου της Λίβερπουλ και περιλαμβάνει εκτίμηση ή μέτρηση της συνολικής ποσότητας του φωτός που εκπέμπεται από το σωλήνα (δηλαδή, φωτεινή ροή) και στη συνέχεια εξετάζει την κατανομή του φωτός αυτού (η κατανομή της έντασης).

Οι μετρήσεις για να κατασκευάσει αυτό το εργαλείο σχεδιασμού, ελήφθησαν και πάλι για σωλήνες με διάμετρο 0,33, 0,45 και 0,53 m και για μήκη 0,6 και 1,2 m. Οι σωλήνες που εμπλέκονται είχαν παρόμοιο διαχύτη με αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά την έρευνα από τους Zhang και Muneer, αλλά διαφορετικό από εκείνο των Jenkins και Muneer. Μόλις εξακριβωθεί η φωτεινή ροή για ένα σωλήνα, υπάρχουν αρκετές προτεινόμενες μέθοδοι που να συσχετίζουν τη φωτεινή αυτή ροή με την ένταση φωτισμού σε μια συγκεκριμένη αίθουσα [19].

Μια άλλη μέθοδος που προτείνει ο Κάρτερ για τη πρόβλεψη του φωτισμού από τη μετρούμενη φωτεινή ροή είναι να χρησιμοποιηθεί μια προσομοίωση σε υπολογιστή και ειδικότερα το Lumen Micro 2000. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι ο διαχύτης του σωλήνα θα εξομοιωθεί με ένα συμβατικό φωτιστικό χρησιμοποιώντας τη μετρούμενη κατανομή φωτεινής έντασης [19].

Τα αποτελέσματα τυχών κάμψεων στο σωλήνα εξετάζονται, και βρίσκονται σε συμφωνία, κατά προσέγγιση, με τις μελέτες των Jenkins και Muneer για το ίδιο φως σωλήνα έως μία καμπή γωνίας περίπου 60°. Ωστόσο, το μοντέλο του Κάρτερ προτείνει μικρότερες απώλειες για γωνίες της τάξης των 90° [19].

2.4.4. Μέθοδος Τσαγκρασούλη

Η μέθοδος αυτή είναι μια πιο θεωρητική προσέγγιση η οποία προτάθηκε από τον Άρη Τσαγκρασούλη του Πανεπιστημίου της Αθήνας, αλλά χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα δεδομένα για την μετάδοση του φωτός κατά μήκος του σωλήνα, συλλέκτη σωλήνα και σωλήνα διαχύτη. Μία τέτοια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια γκάμα σωλήνων φωτός με διαφορετικές ιδιότητες διαπερατότητας, τις οποίες παρέχει ο χρήστης ο οποίος γνωρίζει την πληροφορία αυτή.

Όπως τα περισσότερα μοντέλα, θεωρείται ότι ο διαχύτης κατανέμει τέλεια τη φωτεινότητα. Για να εκτιμηθεί η φωτεινότητα του πομπού, L , χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (2.5) [19]:

$$L = \frac{E_e \cdot \tau_e}{\pi} \quad (2.5)$$

όπου: E_e ο φωτισμός που επιτυγχάνει ο πομπός, [lux]

τ_e η διαπερατότητα του πομπού

Ακολούθως για να υπολογιστεί η φωτεινότητα E_0 σε οποιοδήποτε σημείο ακριβώς κάτω από το διαχύτη χρησιμοποιείται η εξής σχέση (2.6):

$$E_0 = \frac{\pi \cdot L \cdot r^2}{V^2 + r^2} \quad (2.6)$$

όπου: V η κάθετη απόσταση από το διαχύτη στο σημείο ενδιαφέροντος, [m]

r η ακτίνα του σωλήνα, [m]

Εάν το σημείο ενδιαφέροντος δεν είναι ακριβώς κάτω από το διαχύτη, αλλά σε κάποια οριζόντια απόσταση x , τότε η ακόλουθη σχέση (2.7) προτείνεται για την πρόβλεψη του εσωτερικού φωτισμού [19].

$$E_x = 0,5 \cdot \pi \cdot I_L \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right) \quad (2.7)$$

όπου: $F_1 = 1 + \frac{V^2}{x^2} - \frac{r^2}{x^2}$ (2.8)

$$F_2 = \sqrt{Z^2 - 4 \cdot \left(\frac{r^2}{x^2} \right)^2} \quad (2.9)$$

και (2.10)

$$Z = 1 + \frac{V^2 + r^2}{x^2} \quad (2.11)$$

Ένας πρώτος τρόπος προσέγγισης είναι η αντίστροφη χρήση της μεθόδου θέτοντας αρχικά μια τιμή εσωτερικής φωτεινότητας. Αντικαθιστώντας μια δεδομένη ένταση φωτισμού στην σχέση (2.6) ή στην (2.7) υπολογίζεται η φωτεινότητα που απαιτείται για την επίτευξη αυτού του επιπέδου φωτισμού. Ο φωτισμός E_e που προσπίπτει στο εσωτερικό του διαχύτη μπορεί να βρεθεί από την (2.5) από τη στιγμή που έχει υπολογιστεί η απαιτούμενη φωτεινότητα.

Ακολουθώντας τη διαδικασία αυτή με τα δεδομένα για την κατά μήκος μετάδοση σε συγκεκριμένο μέγεθος αγωγό, υπολογίζεται η ένταση φωτισμού που απαιτείται στη κορυφή του σωλήνα, στο συλλέκτη. Τέλος, με χρήση δεδομένων για τη διαπερατότητα του συλλέκτη, η κανονική εξωτερική ένταση φωτισμού που εισέρχεται στο σωλήνα μπορεί να εκτιμηθεί, από την εσωτερική φωτεινότητα που παράγει. Μετά από αυτό, μπορούν να ληφθούν κατάλληλες τιμές της κανονικής εξωτερικής έντασης φωτισμού από τα δεδομένα (για μια δεδομένη τοποθεσία) για να εκτιμηθεί η περίοδος στη διάρκεια ενός έτους κατά την οποία ο σχεδιασμός της φωτεινότητας θα υπερβαίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα [19].

2.4.5. Μέθοδος Mingozi

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Angelo Mingozi χρησιμοποιεί σύνολα πινάκων ως οδηγό απόδοσης, έτσι ώστε να επιτρέπει σε ένα σχεδιαστή να επιλέξει μια κατάλληλη διαμόρφωση για τους σωλήνες. Ένα σύστημα φωτισμού σωλήνων έχει ελεγχθεί με δοκιμές, ενώ πραγματοποιήθηκαν και μαθηματικές προσομοιώσεις για την απομόνωση των διαφόρων παραμέτρων που εμπλέκονται στη μεταφορά του φωτός μέσα από το φωτοσωλήνα (δηλαδή, μετάδοση του υλικού επένδυσης, διαχύτη και μεταδόσεις συλλέκτη, κτλ). Σε αυτή τη μέθοδο, τονίζεται η βελτίωση της ολικής εσωτερικής ανάκλασης ταινίας TIR σε σχέση με την τυπική ταινία αλουμινίου. Η ταινία TIR προτείνεται ως ιδιαίτερα αποτελεσματική για κυλινδρικούς σωλήνες και λιγότερο επιτυχείς για πρισματικές συσκευές [19].

Τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν από την έρευνα αυτή επιτρέπουν να γίνονται εκτιμήσεις σχετικά με το βέλτιστο μέγεθος του συστήματος, το σχήμα του συλλέκτη και του αγωγού μήκους.

2.4.6. Μέθοδος TTE

Η μέθοδος αυτή, αποτελεί βασικό εργαλείο υπολογισμού της φωτεινής ροής, που εκπέμπεται από τον διαχύτη σωλήνων φωτισμού στο εσωτερικό ενός χώρου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε από το Πανεπιστήμιο Αθηνών στα πλαίσια της ευρύτερης μελέτης για φυσικό φωτισμό από φωτοσωλήνες, η οποία φιλοξενεί και την παρούσα διπλωματική εργασία.

Ο όρος TTE (Transmission Tube Efficiencies) εκφράζει την αποδοτικότητα του σωλήνα, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες στην έξοδο του φωτοσωλήνα λόγω του φωτός που απορροφάται από το υλικό του σωλήνα, τις πολλαπλές αντανάκλασεις του φωτός που συμβαίνουν μέσα στο σωλήνα, το μήκος του σωλήνα, την παρουσία αγκώνων κλπ, υπό συνθήκες νεφελώδους ουρανού. Η σχέση για τον υπολογισμό TTE ενσωματώνει το μήκος, τη διάμετρο και την ανακλαστικότητα του σωλήνα. Η μέθοδος παρέχει τιμές TTE για διαφορετικές διαμέτρους σωλήνων, μήκη και ανακλαστικότητες, καθώς και για διάφορες γωνίες και αριθμό αγκώνων, σε μορφή πίνακα για μια πιο απλή εφαρμογή [20].

Η μεθοδολογία υπολογίζει κατ' αρχάς τη ροή Φ_i από τον διαχύτη ενός φωτοσωλήνα, για συγκεκριμένες παγκόσμιες εξωτερικές φωτεινότητες, την TTE καθώς και τις μεταδόσεις από τρούλο και διαχύτη.

Αφού υπολογιστεί η ροή Φ_i που αναδύεται από τη συσκευή εξόδου του σωλήνα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε λογισμικό για φωτισμό, ώστε να προσομοιώσει τα επίπεδα φωτισμού στο επίπεδο αναφοράς. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εύρεση (ή κατασκευή) ενός φωτιστικού με κυκλικό πολικό διάγραμμα, θέτοντας τη διάμετρο του φωτιστικού ίδια με τη διάμετρο του φωτοσωλήνα, αντικαθιστώντας την έξοδο του αρχικού φωτιστικού με τη ροή που προέρχεται από τη μέθοδο TTE και αντικαθιστώντας τη χρήση φωτιστικού παράγοντα με το συντελεστή χρησιμοποίησης φωτοσωλήνα (UF). Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή, μπορεί επίσης να συμπεριλάβει τυχόν γωνίες που πιθανόν να έχουν οι σωλήνες [20].

2.4.7. Λογισμικό SkyVision

Το λογισμικό SkyVision διατυπώθηκε από το Εθνικό Ερευνητικό Συμβούλιο του Καναδά, ως εργαλείο πρόβλεψης για την περιγραφή της απόδοσης του ηλιακού φωτός. Στο λογισμικό αυτό περιλαμβάνονται τα φρεάτια ουρανού, οι συμβατικοί φεγγίτες, καθώς και οι ελαφριοί σωλήνες. Είναι ένα αρκετά λεπτομερές λογισμικό πακέτο, στο ότι απαιτεί ένα μεγάλο ποσό των δεδομένων για μια συγκεκριμένη περίπτωση, ούτως ώστε αυτό να είναι σε θέση να διατυπώσει μια πρόβλεψη του παράγοντα φωτισμού προς το φως της ημέρας. Παρέχει επίσης, την δυνατότητα εκτίμησης του πρόσθετου ηλεκτρικού φωτισμού που απαιτούνται για ένα δωμάτιο όπου έχουν τοποθετηθεί φεγγίτες [19].

Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός του είδους των φεγγιτών που πρόκειται να εξεταστεί. Για αυτή τη μελέτη, μας ενδιαφέρουν μόνο οι σωλήνες φωτισμού.

Οι αγωγοί φωτός μπορεί στη συνέχεια να τοποθετηθούν μέσα σε ένα σύνολο δωματίου (οι διαστάσεις των οποίων καθορίζονται από τον χρήστη). Λεπτομέρειες του δωματίου, περιλαμβανομένων των ανακλάσεων των οροφών και των τοίχων, πρέπει να συμπληρωθούν μαζί με τον προσανατολισμό του δωματίου. Το μοντέλο απαιτεί επίσης λεπτομέρειες για τους ιδίους τους σωλήνες. Οι διαστάσεις του σωλήνα (μήκος και διάμετρος, καθώς και το μέγεθος διαχύτη και συλλέκτης), ο σωλήνας ανάκλασης και διάχυσης - μετάδοσης είναι επίσης αναγκαία. Για το λόγο αυτό η επαρκής γνώση του

προϊόντος θα πρέπει να απαιτείται πριν από τη διεξαγωγή ενός υπολογισμού. Το τζάμι του θόλου κορυφής (συλλέκτη) μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας μια ενσωματωμένη βάση δεδομένων. Μόλις οριστούν οι σωλήνες και το δωμάτιο, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η γεωγραφική θέση. Γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος μπορούν να εισαχθούν ρητά.

Οι συνθήκες του ουρανού επιλέγονται από τα διαθέσιμα μοντέλα, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα το CIE μοντέλο συννεφιά ουρανό. Διάφορα μοντέλα ζενίθ της φωτεινότητας είναι επίσης διαθέσιμα, για να περιγραφούν οι συνθήκες νεφοκάλυψης. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι μέσοι συντελεστές της ημέρας δίνονται ως έξοδοι, ο εσωτερικός φωτισμός μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί. Οι έξοδοι μπορούν επίσης, να παρουσιάζονται ως γραφήματα και πίνακες. Η τελική πρόβλεψη δεν δίνει τον εσωτερικό φωτισμό προς το φως της ημέρας για συγκεκριμένες θέσεις στην αίθουσα, αλλά τον μέσο φωτισμό ορόφου προς το φως της ημέρας σε μια καθορισμένη περιοχή [19].

2.4.8. Λογισμικό Radiance

Το λογισμικό Radiance βασίζεται σε ένα αλγόριθμο ανίχνευσης ακτινών. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ανιχνεύει της ακτίνες φωτός σε κατεύθυνση αντίθετη από αυτή που ακολουθούν φυσικά. Ουσιαστικά, ξεκινώντας από το μάτι, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες ανακλάσεις και διαθλάσεις που λαμβάνουν χώρα στις διάφορες επιφάνειες μέσα στο δωμάτιο φάνει, στη φωτεινή πηγή από την οποία προέρχεται η ακτίνα.

Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί γεωγραφική περιγραφή, η οποία βασίζεται στα όρια των διαφόρων αντικειμένων που βρίσκονται σε αυτόν. Τα διάφορα αυτά αντικείμενα περιγράφονται με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x , y , z) με τον άξονα x να έχει κατεύθυνση την ανατολή, τον άξονα y το βορρά και τον άξονα z προς το ζενίθ. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το λογισμικό αυτό μπορεί να λειτουργήσει με οποιαδήποτε μονάδα μήκους αρκεί όλα τα στοιχεία του χώρου να περιγράφονται από την ίδια μονάδα και να είναι περισσότερα από ένα [32].

2.4.9. Λογισμικό Energy Plus

Το λογισμικό Energy Plus είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κατανάλωσης ενέργειας για την μοντελοποίηση θέρμανσης - ψύξης κτιρίων, φωτισμού, αερισμού και άλλων ροών ενέργειας. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και περιλαμβάνει πολλές καινοτόμες δυνατότητες προσομοίωσης.

Το ενεργειακής ανάλυσης και προσομοίωσης λογισμικό αυτό, αποτελεί ένα ευέλικτο και προσαρμοστικό λογισμικό ανοικτού κώδικα το οποίο παρέχεται δωρεάν. Η λειτουργία του, απαιτεί την περιγραφή του υπό μελέτη κτιρίου μέσω σχεδιαστικού λογισμικού CAD [21].

Για την προσομοίωση και τον υπολογισμό της εσωτερικής φωτεινότητας που παράγουν οι φωτοσωλήνες, χρειάζονται πακέτα μετεωρολογικών δεδομένων τα οποία θα εισαχθούν στο λογισμικό, ώστε να γίνει η κατάλληλη προσομοίωση. Στην ιστοσελίδα του Energy Plus μπορεί να βρει κάποιος καιρικά στοιχεία για περισσότερες από 2100 τοποθεσίες παγκόσμια εκ των οποίων και η Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα η Αθήνα, που είναι και η πόλη που μας ενδιαφέρει στη παρούσα διπλωματική.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1. Ανάλυση Πειραματικής Διάταξης

Στα πλαίσια του προγράμματος HERB, αναπτύχθηκε από την Ομάδα Ερευνών Κτιριακού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αθηνών σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο Κρήτης ένα καινοτόμο σύστημα φωτισμού, το οποίο μελετάται και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πρόκειται για μια ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία, η οποία αποτελείται από ένα ελαφρύ σωλήνα και σύστημα τεχνητού φωτισμού LED όπου σε συνδυασμό του φυσικού και τεχνητού φωτισμού καθιστά το επίπεδο φωτισμού στο δωμάτιο δοκιμών σταθερό.

Το σύστημα φωτισμού που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Αθηνών, έχει κατασκευαστεί και δοκιμάζεται από τον Φεβρουάριο του 2014 [16].

Χώρος πειραματικής διάταξης

Ο χώρος στον οποίο εδράζεται η πειραματική διάταξη είναι ένα προκατασκευασμένο ελαφριάς κατασκευής δωμάτιο, το οποίο βρίσκεται στην πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου Αθηνών (Γ.Π., ΓΜ: 37°97', 23°79') [17]. Το περιβάλλον της περιοχής γύρω από το δωμάτιο είναι αγροτικό ενώ αυτό περιβάλλεται από υψηλή βλάστηση, η οποία όμως δεν το σκιάζει και κατά συνέπεια δεν αλλοιώνει τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. εικόνα 25).



Εικόνα 25: Δωμάτιο δοκιμών.

Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.

Το δωμάτιο αυτό έχει διαστάσεις 5,76m μήκος και 2,75m πλάτος, με ύψος 2,35m. Μέρος αυτού του δωματίου χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή του πειράματος. Το κομμάτι στο οποίο λαμβάνει χώρα το πείραμα έχει διαστάσεις 3,81m επί 1,86m και όλες του οι επιφάνειες είναι καλυμμένες με μαύρο ματ ύφασμα, προκειμένου να αποφευχθούν οι

ανακλάσεις [17]. Η οροφή του δωματίου είναι επίσης βαμμένη με μαύρο ματ χρώμα, για τον ίδιο λόγο.

Στο κέντρο του χώρου που φιλοξενεί το πείραμα (3,81m x 1,86m), είναι τοποθετημένος στην οροφή ο φωτοσωλήνας. Κάτω από τον φωτοσωλήνα είναι τοποθετημένο ένα γραφείο με ύψος 0,74m το οποίο είναι καλυμμένο με το ίδιο μαύρο ύφασμα, όπως εκείνο που καλύπτονται οι υπόλοιπες επιφάνειες [17].

Λόγω του υλικού κατασκευής του δωματίου δοκιμών, οι θερμοκρασίες μπορεί να είναι σχετικά υψηλές, ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Για το λόγο αυτό, μια μονάδα κλιματισμού είναι εγκατεστημένη και ενεργοποιείται όταν οι θερμοκρασίες ανέρχονται πάνω από 40°C, ή όταν κάποιος είναι μέσα στο δωμάτιο [17]. Η μονάδα AC είναι το μόνο στοιχείο μέσα στο δωμάτιο το οποίο δεν είναι καλυμμένο με το μαύρο ύφασμα αλλά έχει λευκό χρώμα (βλ. εικόνα 26).



Εικόνα 26: Εσωτερικό χώρου όπου φιλοξενείται το πείραμα.

Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions (www.euroretrofit.com).

Όργανα Μέτρησης

Αισθητήρες φωτισμού: Μέσα στο θάλαμο δοκιμής, πάνω στο γραφείο το οποίο βρίσκεται κάτω από το φωτοσωλήνα, έχουν τοποθετηθεί δεκατρείς αισθητήρες μέτρησης του φωτισμού (βλ. εικόνα 27), και ένας αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στην οροφή του δωματίου (βλ. εικόνα 28). Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων αυτών δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 1.

Διάμετρος	Height: 38mm, Diameter: 34mm	Linearity error - to above level	<0.2%
Βάρος	130gr (with 3m cable)	Σφάλμα βαθμονόμησης Absolute calibration error	Typ. <3% 5% max
Κατασκευή	Dupont "Derlin" fully sealed to IP68	Cosine error	3%
Καλώδιο	2 core screened DEF std 61-12/4.5	Azimuth error	<1%
Αισθητήρας	Cosine corrected head	Συντελεστής θερμοκρασίας Temperature coefficient	±0.1%/°C
Ανιχνευτής	Silicon photocell. Low fatigue characteristics	Μακροχρόνια σταθερότητα (Longterm stability)	±2%
Filters	Optical Glass	Χρόνος απόκρισης - τάση εξόδου (Response time – voltage output)	10ns
Ευαισθησία ρεύματος (Sensitivity - current)	1.4μΑ/ 10 kLux	Εσωτερική αντίσταση - τάση εξόδου (Internal resistance – voltage output)	c. 650 ohms
Ευαισθησία τάσης (Sensitivity - voltage)	1mV/ 10 kLux	Εύρος λειτουργίας (Operating range)	-35 to +75 °C
Εύρος λειτουργίας (Working range)	0-500 kLux	Εύρος υγρασίας (Humidity range)	0-100% RH

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά αισθητήρων.

Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.

Όλοι οι αισθητήρες συνδέονται με ένα καταγραφέα δεδομένων (βλ. εικόνα 29), το οποίο λαμβάνει μετρήσεις κάθε 15 δευτερόλεπτα και καταγράφει κάθε λεπτό τον μέσο όρο, τις μέγιστες αλλά και τις ελάχιστες τιμές για κάθε αισθητήρα. Ταυτόχρονα κάθε λεπτό καταγράφεται και η θερμοκρασία του δωματίου δοκιμών [17].

Η απόσταση των περιφερειακών αισθητήρων είναι περίπου 50 εκατοστά από τις κουρτίνες που καλύπτουν τους τοίχους του δωματίου. Η μεγαλύτερη οριζόντια απόσταση αισθητήρα από το κέντρο του διαχύτη είναι περίπου 1,74 m [17].

Ο αισθητήρας που μετρά την εξωτερική φωτεινότητα είναι τοποθετημένος οριζόντια στην οροφή του δωματίου και καθαρίζεται τακτικά, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν απώλειες στην απόδοσή του λόγω βρωμιάς.

Μετρητής Ενέργειας: Στον ηλεκτρικό πίνακα του δωματίου είναι τοποθετημένος ένας μετρητής ενέργειας (βλ. εικόνα 30). Ο μετρητής αυτός μετρά κάθε λεπτό την ενέργεια που καταναλώνεται και την ισχύ των διατάξεων που δουλεύουν για την διεκπεραίωση του πειράματος και καταγράφει τις μέσες τιμές της ενέργειας και της ισχύς κάθε 15 λεπτά. Η μόνη πηγή κατανάλωσης ενέργειας στο δωμάτιο αυτό, είναι ο ηλεκτρικός εξοπλισμός του συστήματος φωτισμού (LED) και το κλιματιστικό. Ο μετρητής μετρά επίσης και τη θερμοκρασία του δωματίου [17].

Μετρητής φωτεινότητας: Η φωτεινότητα μετρείται με ένα μετρητή χειρός τύπου Minolta LS-100 (βλ. εικόνα 31).



Εικόνα 27: Αισθητήρας φωτισμού.

Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.



Εικόνα 28: Εξωτερικός αισθητήρας.

Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.



Εικόνα 29: Καταγραφέας δεδομένων.

Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.



Εικόνα 30: Μετρητής ενέργειας.

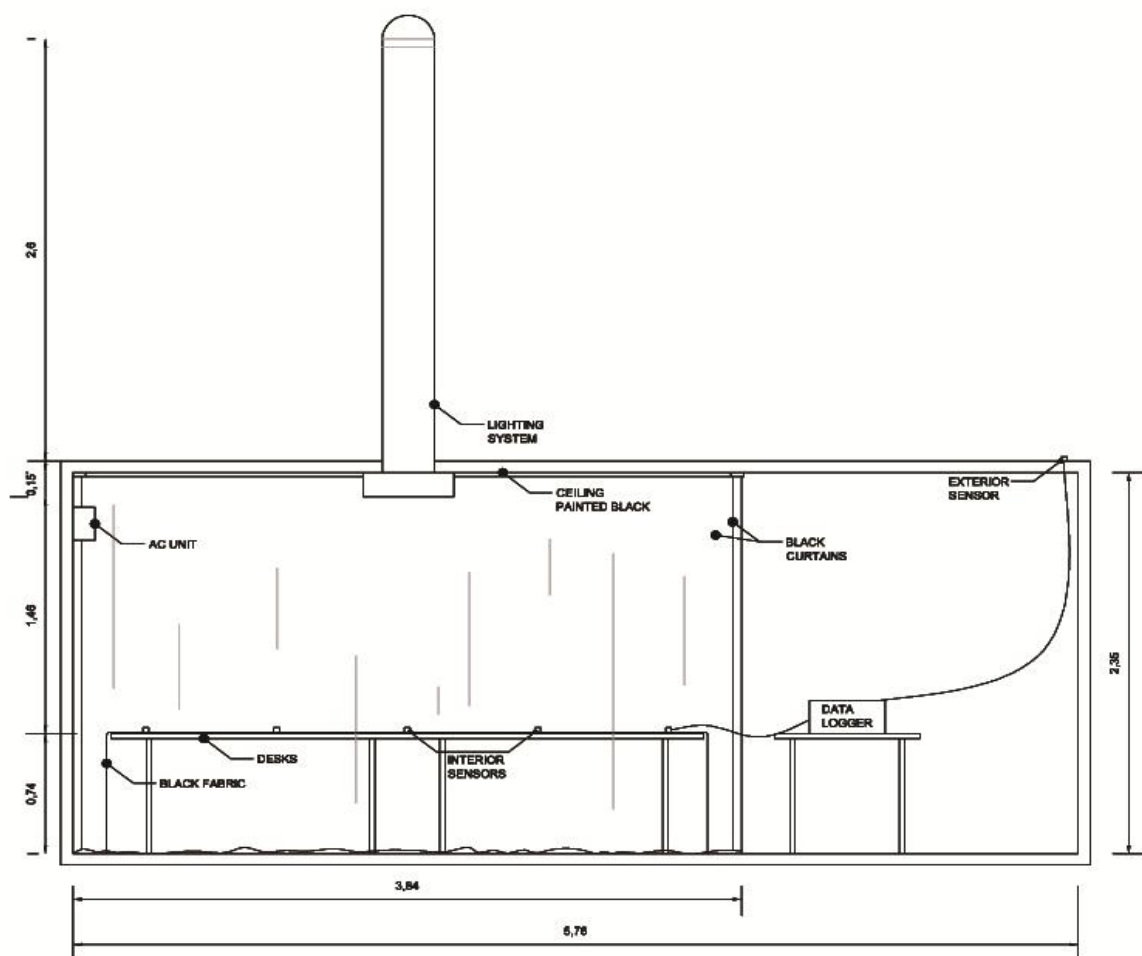
Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.



Εικόνα 31: Μετρητής φωτεινότητας.

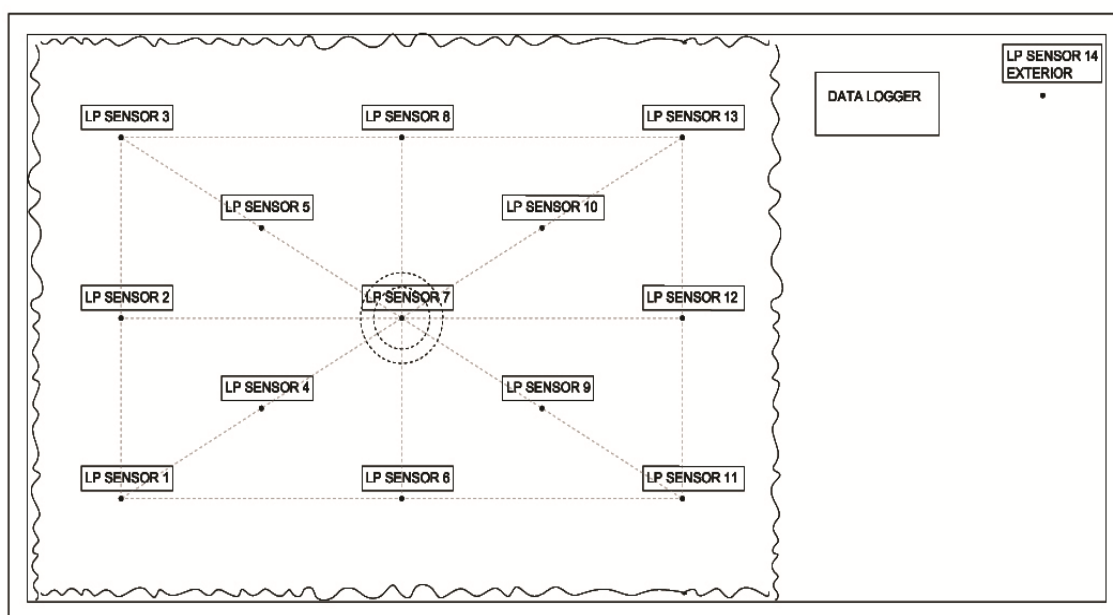
Πηγή: UOA, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.

Στη ακόλουθη εικόνα 32, παρουσιάζονται η χωροθέτηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και η διαμόρφωση του δωματίου δοκιμών. Στην εικόνα 33, διατυπώνονται η κάτοψη του χώρου αναφοράς και οι αισθητήρες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε αυτόν. Όπως παρατηρείται και στην κάτοψη, οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα και αντιδιαμετρικά στο δωμάτιο δοκιμών. Με κεντρικό τον αισθητήρα 7 να βρίσκεται τοποθετημένος ακριβώς κάτω από τον φωτιστήρα οι αισθητήρες 1, 3, 11 και 13 απέχουν από αυτόν 1,68m, οι αισθητήρες 2 και 12 απέχουν 1,41m, οι αισθητήρες 4, 5, 9 και 10 απέχουν 1,06m και οι αισθητήρες 6 και 8 απέχουν από τον αισθητήρα 7 απόσταση 0,93m [17].



Εικόνα 32: Τομή δωματίου δοκιμών.

Πηγή: University Of Athens, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.



Εικόνα 33: Κάτοψη δωματίου δοκιμών.

Πηγή: University Of Athens, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.

Σύστημα Φωτισμού

Το σύστημα φωτισμού αποτελείται από ένα φωτοσωλήνα διαμέτρου 0,30m, 8 λαμπτήρες LED και έναν αισθητήρα φωτός. Επιπλέον, είχε εγκατασταθεί στην εσωτερική περίμετρο του σωλήνα μία LED λωρίδα, προκειμένου τα επίπεδα φωτισμού να διατηρούνται σταθερά κατά τις νυχτερινές ώρες (βλ. εικόνα 34) [17]. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων που αφορούν την παρούσα διπλωματική το σύστημα LED δεν ήταν σε λειτουργία. Ο φωτοσωλήνας λειτουργούσε σαν ένα παθητικό σύστημα φωτισμού.



Εικόνα 34: Εσωτερικό τμήμα φωτοσωλήνα (διαχύτης) και λωρίδα LED.

Πηγή: University Of Athens, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.

Λόγω του ότι το δωμάτιο δοκιμών είναι μονώροφο, προκειμένου να επιτευχθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, ο σωλήνας που έχει χρησιμοποιηθεί έχει ύψος 2,60m πάνω από την οροφή του δωματίου (βλ. εικόνα 32 και εικόνα 35). Το ύψος αυτό επιλέχθηκε, καθώς αντιστοιχεί στο ύψος ενός ορόφου το οποίο διαπερνά συνήθως ένας φωτοσωλήνας προκειμένου να φωτίσει ένα δωμάτιο που δεν έχει άμεση επαφή με φυσικό φως. Εξωτερικά ο φωτοσωλήνας υποστηρίχθηκε από μεταλλικούς δοκούς, όπως φαίνεται στην εικόνα 35.



Εικόνα 35: Τμήμα φωτοσωλήνα εκτός του δωματίου δοκιμών.

Πηγή: University Of Athens, HERB, Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings, Results of laboratory testing of technologies and solutions.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις του φωτοσωλήνα (διάμετρος και μήκος) και ο αριθμός των LEDs που έχουν χρησιμοποιηθεί επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται σε πραγματικές εγκαταστάσεις.

Τέλος, οι παράμετροι που καταγράφονται στο χώρο δοκιμών, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα, είναι:

- Ένταση φωτισμού [lux]
- Φωτεινότητα [cd / m^2]
- Κατανάλωση ενέργειας [kWh]
- Ισχύς [kW]
- Θερμοκρασία [$^{\circ}\text{C}$]

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται μελέτη της απόδοσης του συστήματος αυτού, αναφορικά με την απόδοσή του σε φυσικό φωτισμό εντός του πειραματικού χώρου. Επομένως ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων που πάρθηκαν από το δωμάτιο δοκιμών για χρονική περίοδο από 28 Νοεμβρίου έως 18 Ιουνίου.

Κατόπιν παρατίθεται ανάλυση της μεθόδου προσομοίωσης των συνθηκών του πειράματος στο πρόγραμμα Energy Plus και σύγκριση των δεδομένων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με αυτά του πειράματος. Η μελέτη αποσκοπεί τόσο στην αξιολόγηση αυτού καθαυτού του συστήματος των φωτοσωλήνων στις συνθήκες (φωτισμού/ουρανού) της Ελλάδας, όσο και στην αξιολόγηση της ακρίβειας του προγράμματος Energy Plus στο να προσομοιώνει την απόδοση του συστήματος.

3.2. Αποτελέσματα Πειραματικών Μετρήσεων

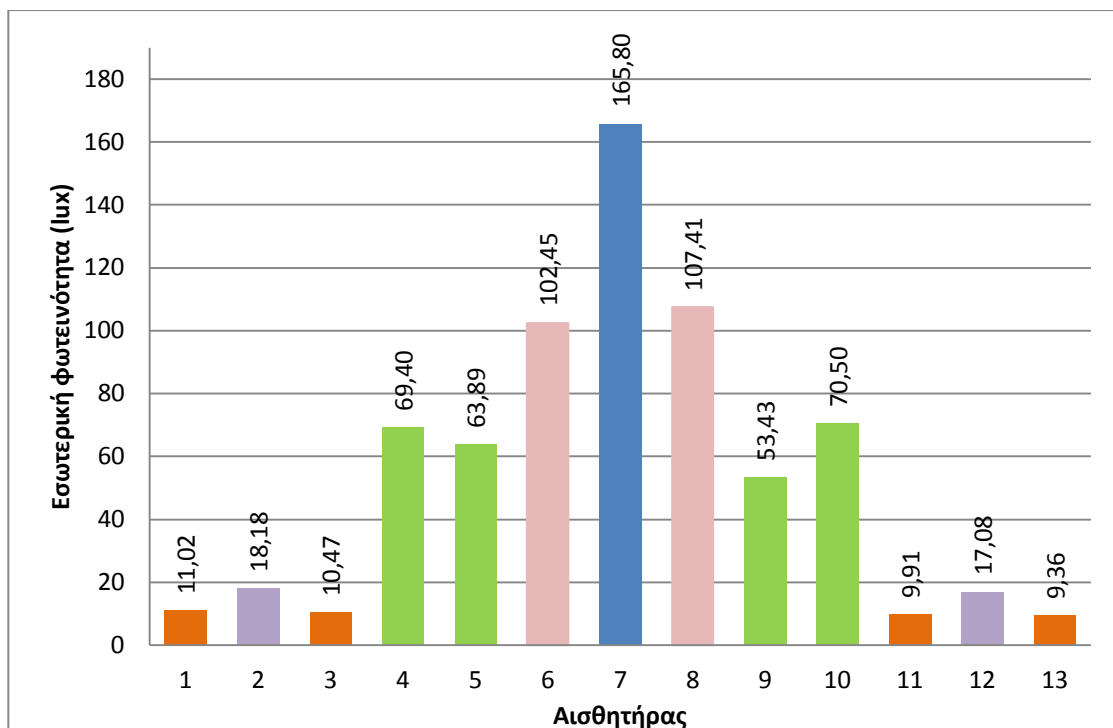
Όπως παρατηρείται από τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν, οι τιμές της εσωτερικής φωτεινότητας είναι μικρότερες από αυτές που μετρήθηκαν εξωτερικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται αρχικά στην αδυναμία ενός φωτοσωλήνα να συλλέξει μεγάλες ποσότητες φωτός καθώς και στο πλήθος των ανακλάσεων που μεσολαβούν μέσα στο σωλήνα μεταφοράς. Η απορρόφηση του φωτός από τις διάφορες επιφάνειες στις οποίες προσπίπτει είναι μία ακόμα αιτία, καθώς καμία επιφάνεια δεν έχει 100% ανακλαστικότητα. Επίσης, ένα μέρος του φωτός αυτού επανεκπέμπεται προς τα έξω με αποτέλεσμα να μην συμβάλει στο φωτισμό του δωματίου, ενώ παράλληλα διάφορες απώλειες του όλου συστήματος μπορούν να επηρεάσουν το ποσοστό του φωτός που συμβάλει στο φωτισμό του δωματίου.

Εν συνεχεία, αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανομή του φωτός που εισέρχεται μέσα στο δωμάτιο από τον φωτοσωλήνα είναι κατά κύριο λόγο ομοιόμορφη. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ο αισθητήρας 7, ο οποίος βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον φωτοσωλήνα καταγράφει για κάθε χρονική στιγμή τις μεγαλύτερες τιμές εσωτερικής φωτεινότητας. Τις αμέσως μεγαλύτερες τιμές καταγράφουν οι αισθητήρες 6 και 8 οι οποίοι απέχουν την μικρότερη απόσταση από τον κεντρικό αισθητήρα (0,93m) ενώ ακολουθούν οι αισθητήρες 4, 5, 9 και 10 οι οποίοι απέχουν από τον αισθητήρα 7 απόσταση 1,06m και οι αισθητήρες 2 και 12 που απέχουν από τον 7 απόσταση 1,41 m. Τέλος, τη μικρότερη εσωτερική φωτεινότητα καταγράφουν οι αισθητήρες 1, 3, 11 και 13 οι οποίοι βρίσκονται στα πιο μακρινά σημεία (στις τέσσερις γωνίες του δωματίου) στους οποίους τα επίπεδα φωτισμού είναι κατά συνέπεια πιο χαμηλά. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 2.

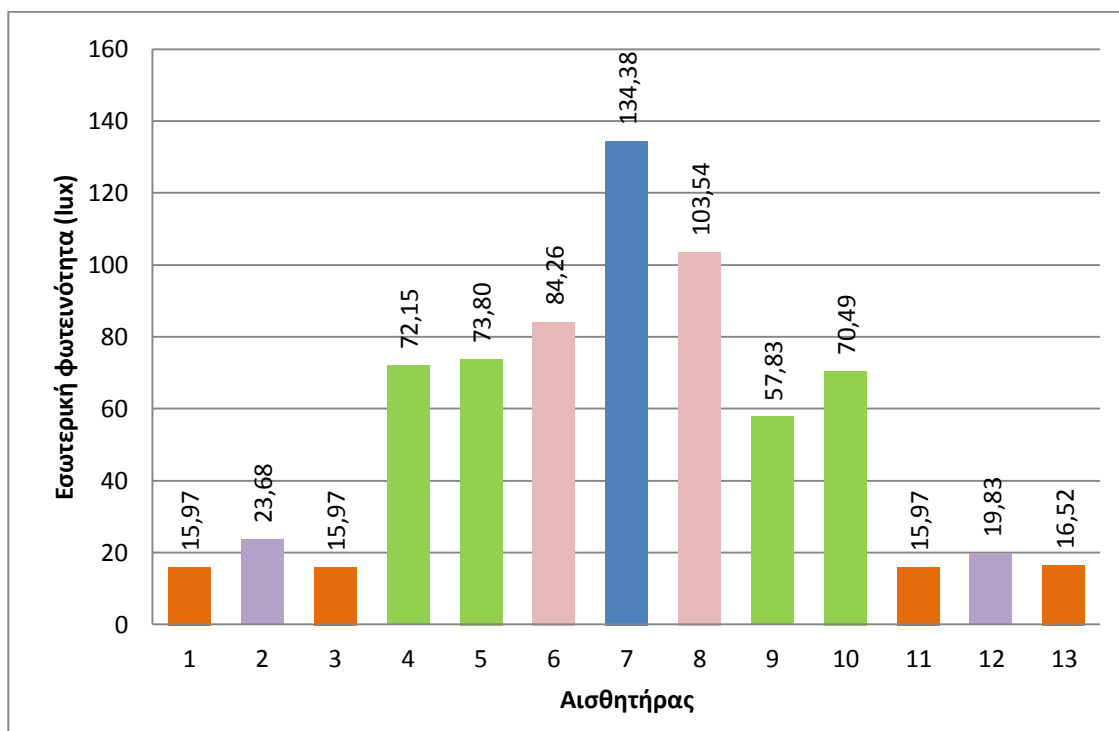
Αισθητήρας Αισθητήρας	7	1, 3, 11, 13 (1,68m από τον 7)	2, 12 (1,41m από τον 7)	4, 5, 9, 10 (1,06m από τον 7)	6, 8 (0,93m από τον 7)
7	0				
1, 3, 11, 13	93,85%	0			
2, 12	89,37%	42,19%	0		
4, 5, 9, 10	61,21%	84,15%	72,59%	0	
6, 8	36,71%	90,29%	83,20%	38,71%	0

Πίνακας 2: Ποσοστά απόκλισης φωτεινότητας κάθε ομάδας αισθητήρων (που απέχουν την ίδια απόσταση από τον αισθητήρα 7) από όλες τις υπόλοιπες ομάδες. Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29400 lux.

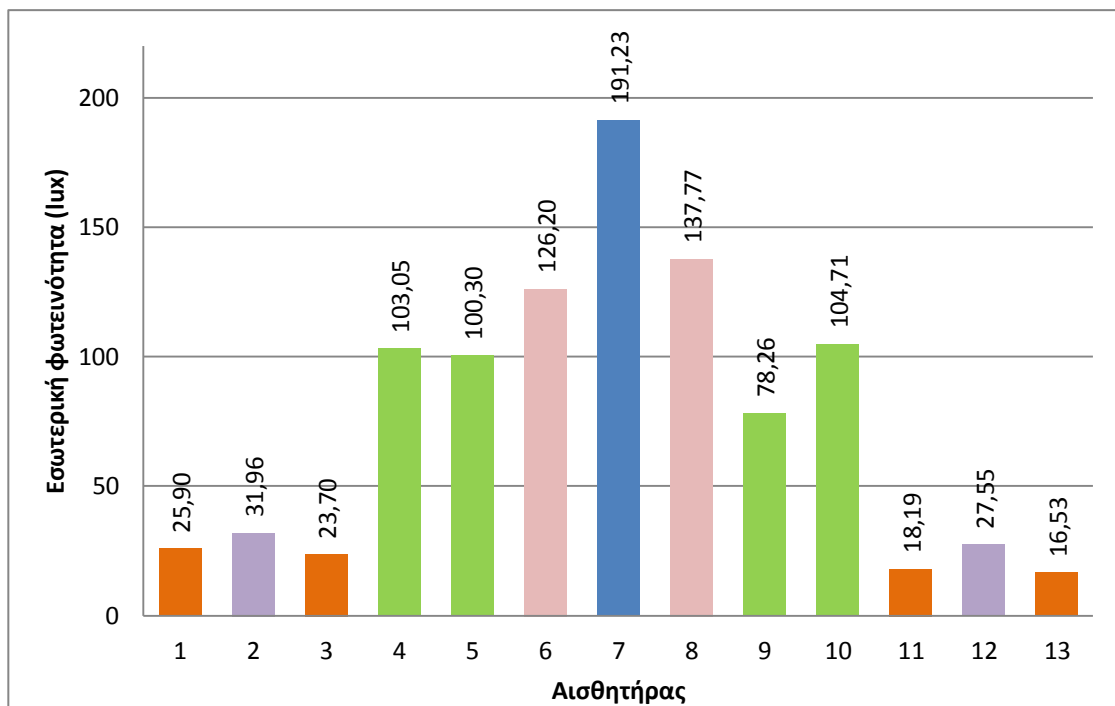
Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι οι αισθητήρες τις ίδιας ομάδας (που απέχουν δηλαδή την ίδια απόσταση από τον αισθητήρα 7) παρουσιάζουν μεταξύ τους μικρές αποκλίσεις κάτι το οποίο φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα 1 στο οποίο παρουσιάζεται κάθε ομάδα με διαφορετικό χρώμα. Στους πίνακες 3, και 4 παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα ποσοστά απόκλισης μεταξύ των αισθητήρων για κάθε ομάδα αντίστοιχα. Η διαφορά στις ενδείξεις των αισθητήρων 2 και 12 ανέρχεται στο 6,06%, ενώ για τους αισθητήρες 6 και 8 είναι 4,62%. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στη χρονική στιγμή 9/12/2014 12:00:00μμ με εξωτερική φωτεινότητα 29400 lux. Μεταβολές των συνθηκών αυτών (δηλαδή ώρας και ημερομηνίας) μπορεί να μεταβάλουν τα ποσοστά απόκλισης συνολικά, χωρίς όμως να επηρεαστεί το ποιος αισθητήρας καταγράφει μεγαλύτερη ή μικρότερη εσωτερική φωτεινότητα αντίστοιχα, κάτι το οποίο απεικονίζεται και στα πιο κάτω διαγράμματα 1 έως 4.



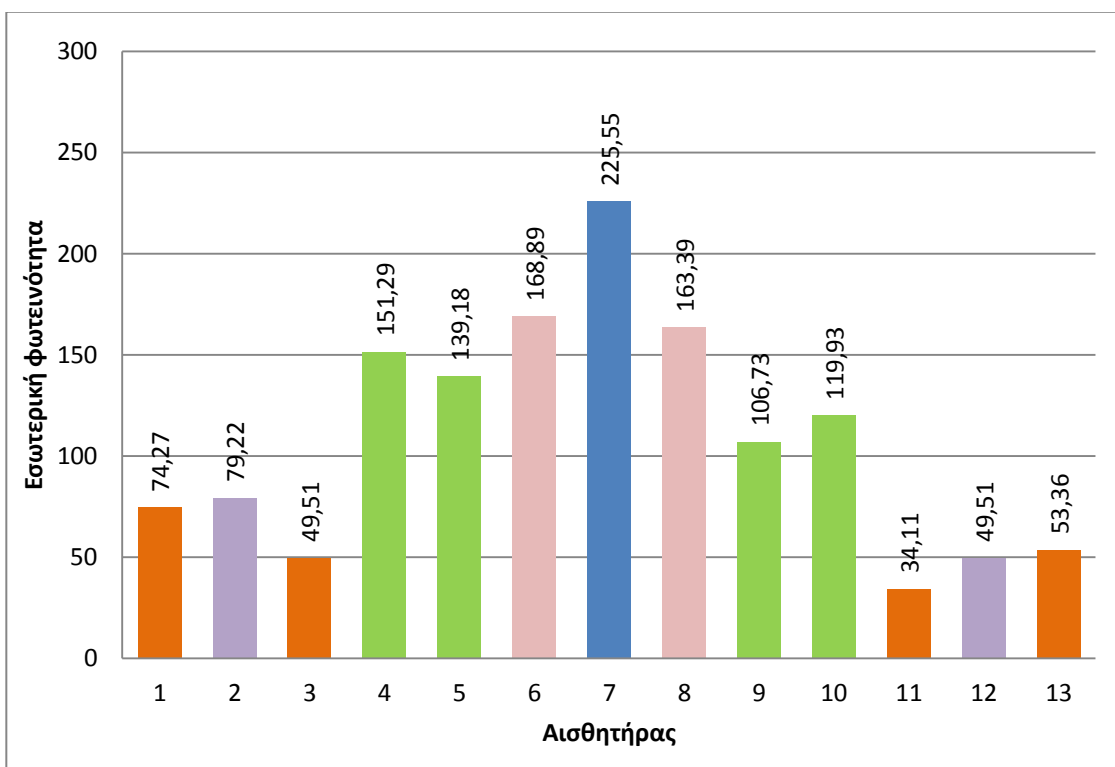
Διάγραμμα 1: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 29400 lux τη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ).



Διάγραμμα 2: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 55000 lux τη χρονική στιγμή (6/12/2014 11:23:00πμ).



Διάγραμμα 3: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 80000 lux τη χρονική στιγμή (10/3/2015 9:35:00πμ).



Διάγραμμα 4: Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία καταγράφεται από κάθε αισθητήρα με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 100000 lux τη χρονική στιγμή (10/3/2015 9:35:00πμ).

Αισθητήρας	1	3	11	13
1	0			
3	5,00%	0		
11	10,00%	5,26%	0	
13	15,00%	10,53%	5,56%	0

Πίνακας 3: Ποσοστά απόκλισης φωτεινής έντασης κάθε αισθητήρα από κάθε αισθητήρα της ίδιας ομάδας (απόσταση από κεντρικό αισθητήρα 1,68m). Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29400 lux.

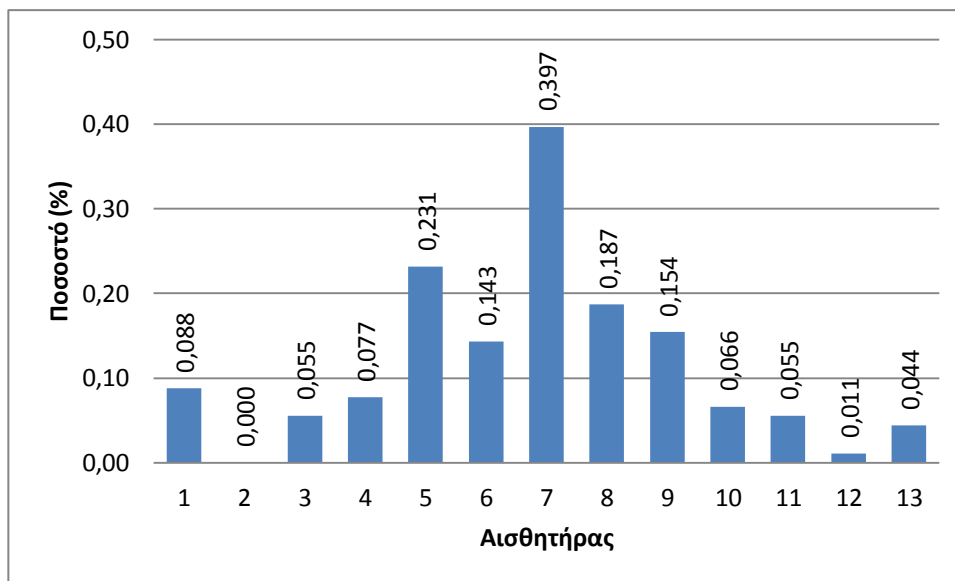
Αισθητήρας	4	5	9	10
4	0			
5	7,94%	0		
9	23,02%	16,38%	0	
10	1,56%	9,38%	24,22%	0

Πίνακας 4: Ποσοστά απόκλισης φωτεινής έντασης κάθε αισθητήρα από κάθε αισθητήρα της ίδιας ομάδας (απόσταση από κεντρικό αισθητήρα 1,06 m). Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29400 lux.

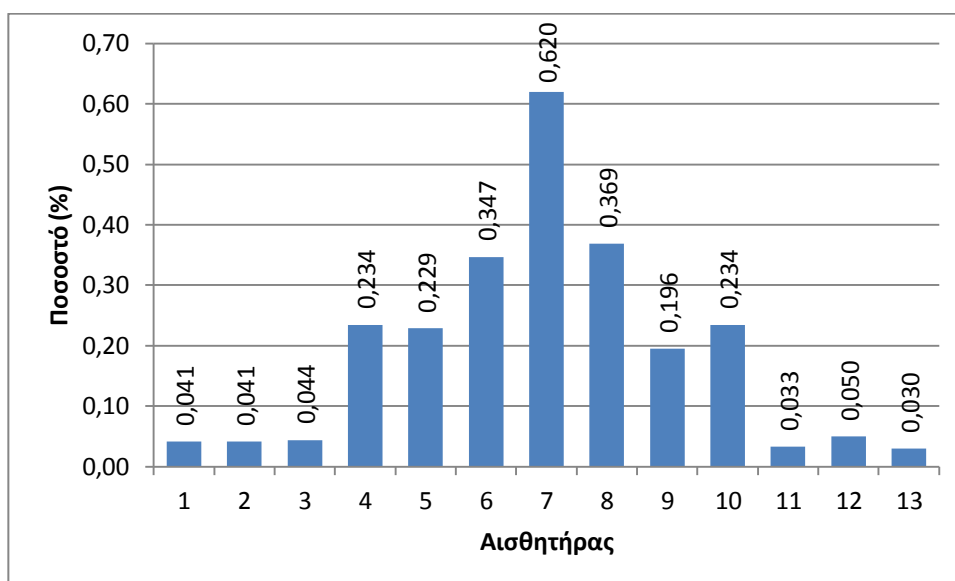
Στη συνέχεια της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, κρίθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός του ποσοστού της μέσης τιμής όλων των εσωτερικά τοποθετημένων αισθητήρων σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα. Με τον υπολογισμό αυτό παρέχεται μια πρώτη εικόνα της απόδοσης του φωτοσωλήνα. Εν συνεχεία, για διάφορες χρονικές στιγμές οι οποίες επιλέχτηκαν τυχαία, έγινε υπολογισμός της απόδοσης των καταγεγραμμένων τιμών κάθε εσωτερικά τοποθετημένου αισθητήρα με την αντίστοιχη καταγεγραμμένη τιμή από τον εξωτερικό αισθητήρα. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται μια καλύτερη αίσθηση της κατανομής του φωτός από τον σωλήνα μέσα στο δωμάτιο.

Το πλήθος των αποτελεσμάτων (μετρήσεων και προσομοίωσης) που έτυχαν επεξεργασίας αφορούσε χρονική περίοδο από 28 Νοεμβρίου έως 18 Ιουνίου. Επομένως, υπήρξε η δυνατότητα σύγκρισης αποτελεσμάτων τόσο για χαμηλές τιμές εξωτερικής φωτεινότητας (≈ 5000 lux) όσο και για υψηλές (≈ 108000 lux) και για όλων των τύπων τις καιρικές συνθήκες.

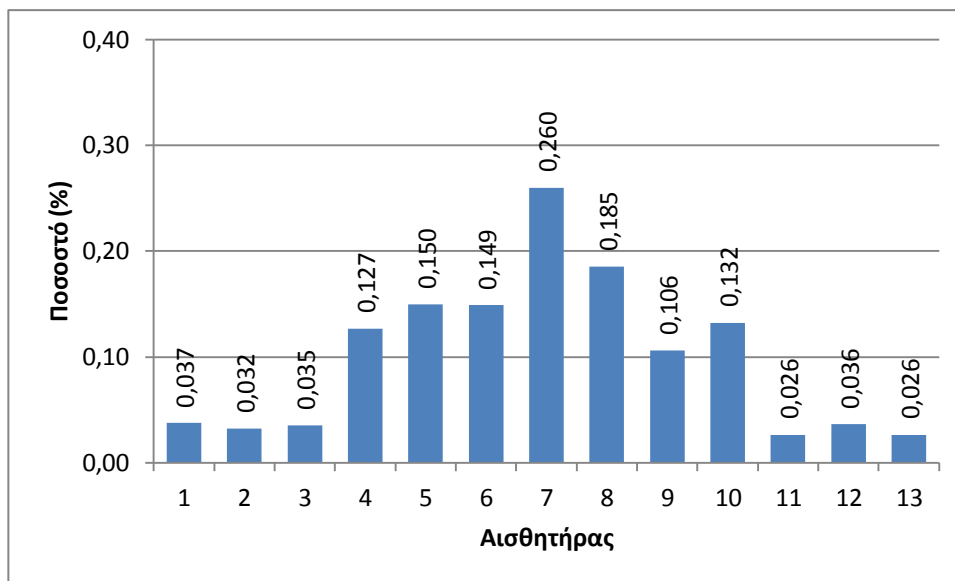
Λόγω του μεγάλου πλήθους των δεδομένων κρίθηκε πιο αποτελεσματικό να παρουσιάζονται και να αναλυθούν αποτελέσματα ανά 5000 lux. Ακολουθως παρατίθενται μερικά από τα διαγράμματα αυτά που προέκυψαν από την πρώτη ανάλυση (διαγράμματα 5 έως 10). Περισσότερα διαγράμματα παρατίθενται στο Παράρτημα.



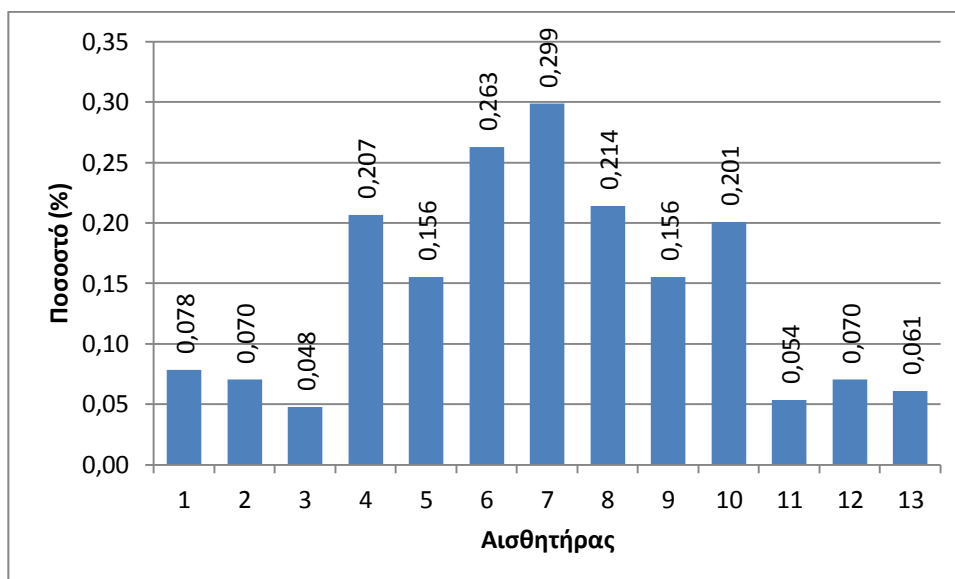
Διάγραμμα 5: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (25/12/2014 8:41:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 5000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,116% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



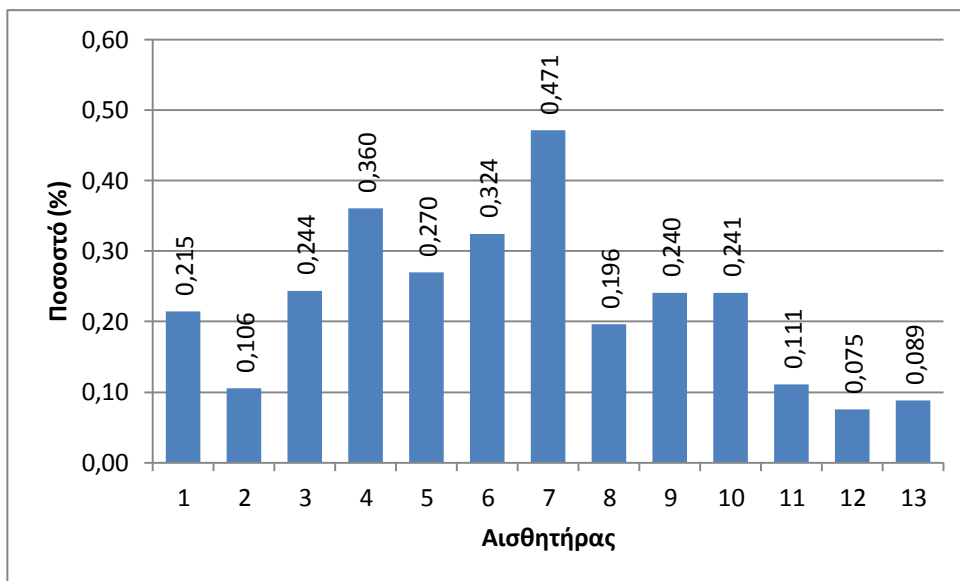
Διάγραμμα 6: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (28/11/2014 11:41:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 20000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,190% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



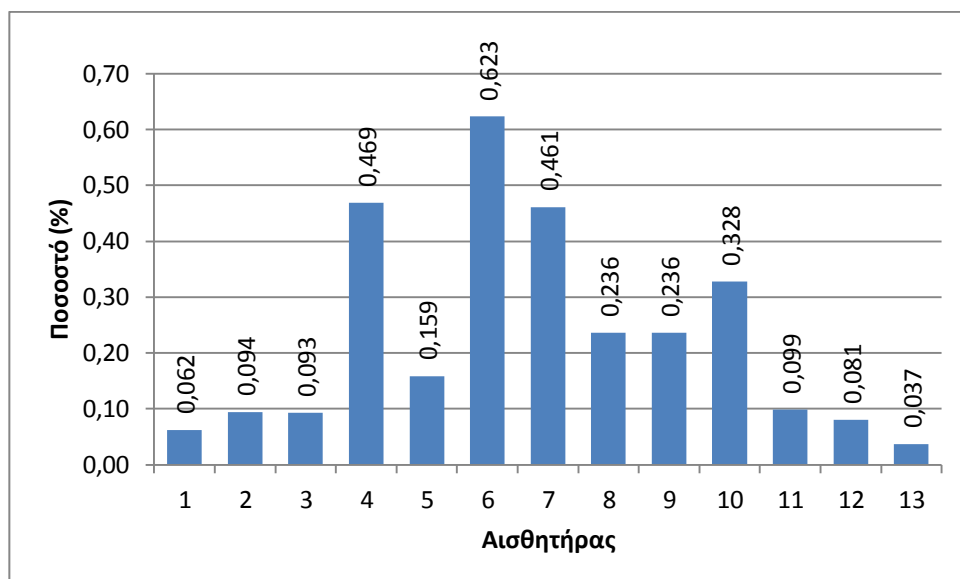
Διάγραμμα 7: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (23/12/2014 12:32:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 50000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,100% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



Διάγραμμα 8: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (19/5/2015 10:18:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 75000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,144% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



Διάγραμμα 9: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/5/2015 1:43:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 100000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,152% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



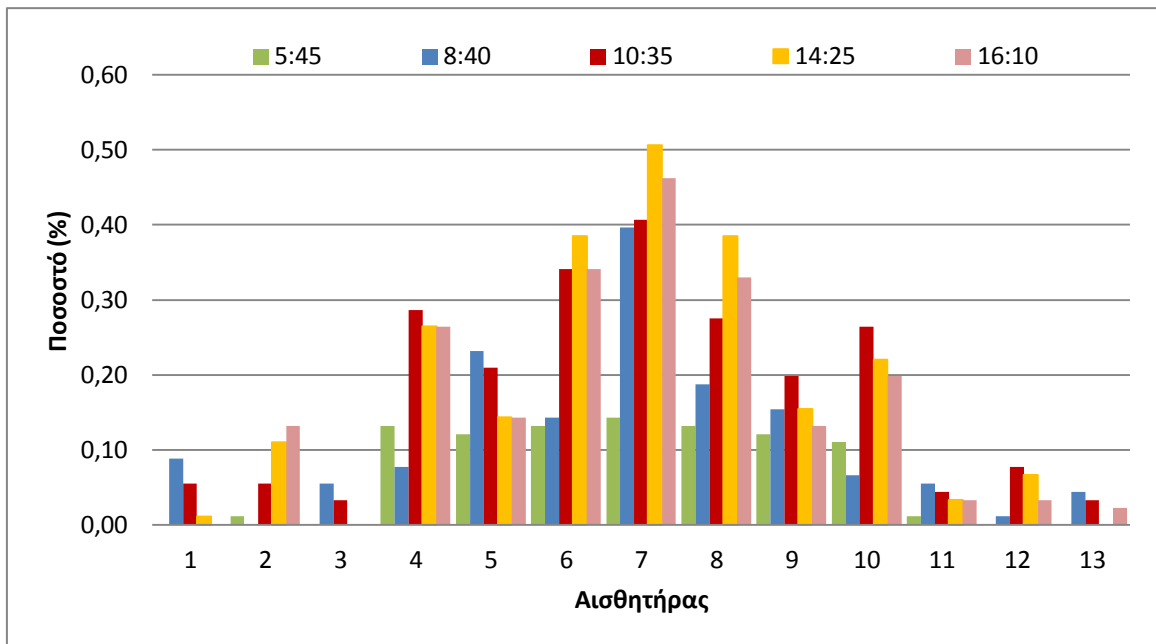
Διάγραμμα 10: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/6/2015 13:27:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 108000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,229% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

Μελετώντας τα διαγράμματα αυτά, παρατηρείται ότι το ποσοστό απόδοσης του φωτοσωλήνα και κατά συνέπεια η ικανότητά του να φωτίσει το δωμάτιο, εξαρτάται αρχικά από την εποχή. Η εξάρτηση αυτή, αποδεικνύεται από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων ότι οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους. Πρωτίστως, ανάλογα με την εποχή εξαρτάται και η θέση του ήλιου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο θόλο του φωτοσωλήνα με συνέπεια να αυξάνεται ή να μειώνεται ανάλογα ο αριθμός των ανακλάσεων μέσα στο σωλήνα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι όσο περισσότερες ανακλάσεις γίνονται μέσα στο σωλήνα τόσο περισσότερες είναι και οι απώλειες, άρα και μικρότερη η απόδοση. Κατά τους χειμερινούς επομένως μήνες, όπου ο ήλιος είναι «πιο χαμηλά» η γωνία πρόσπτωσης των ακτινών σε σχέση με την κάθετο στο θόλο άξονα του είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες ανακλάσεις μέχρι να φτάσει το φως στο δωμάτιο. Αντίθετα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου ο ήλιος είναι «πιο ψηλά» η γωνία με τον κατακόρυφο άξονα είναι μικρότερη με συνέπεια λιγότερες ανακλάσεις και μεγαλύτερη απόδοση.

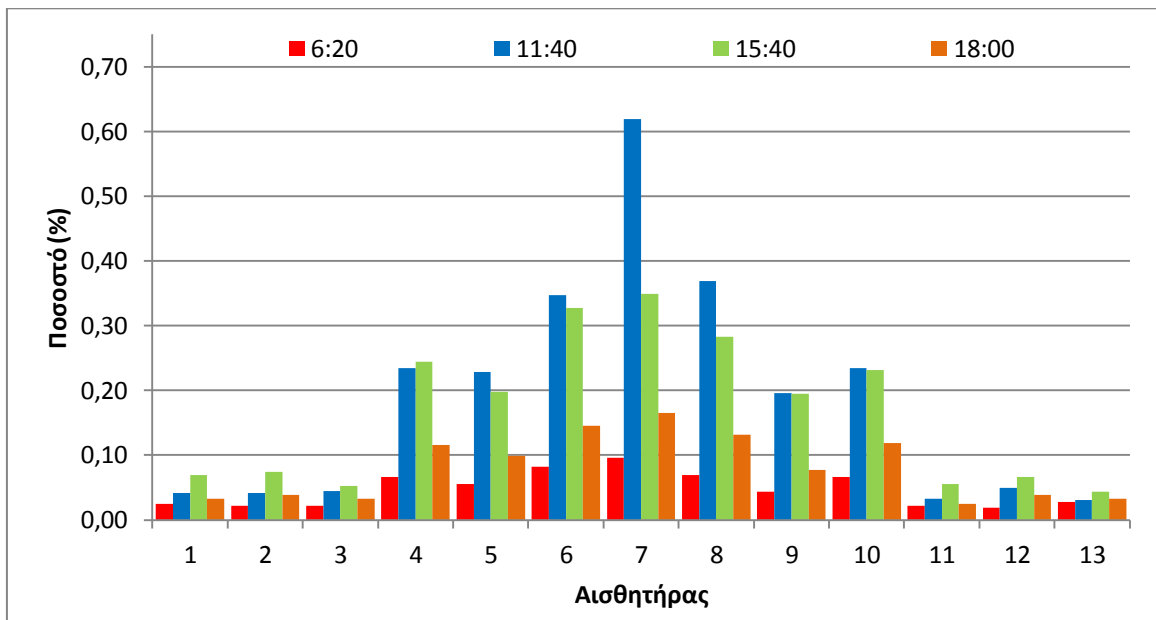
Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από την εποχή, είναι η ένταση ακτινοβολίας. Ενώ μπορεί να προκύψει εξωτερική φωτεινότητα σε χειμερινούς και θερινούς μήνες, αυτό που διαφοροποιεί την απόδοση του φωτοσωλήνα στη προκειμένη περίπτωση είναι η ακτινοβολία. Κατά τους θερινούς μήνες η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη. Επομένως για τις ίδιες τιμές φωτεινότητας, η απόδοση τους θερινούς μήνες είναι μεγαλύτερη λόγω της υψηλότερης έντασης της ακτινοβολίας.

Η θέση του ήλιου ανάλογα με την εποχή, δεν είναι η μόνη εξάρτηση που έχει το σύστημα με την γωνία πρόσπτωσης των ακτινών στο θόλο. Η γωνία αυτή εξαρτάται και από την ώρα της ημέρας. Κατά τις μεσημεριανές ώρες που ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ οι ακτίνες προσπίπτουν στο θόλο με την μικρότερη δυνατή γωνία σε σχέση με την υπόλοιπες ώρες της ημέρας με αποτέλεσμα η απόδοση να είναι μεγαλύτερη, όπως φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα 11 και 12.

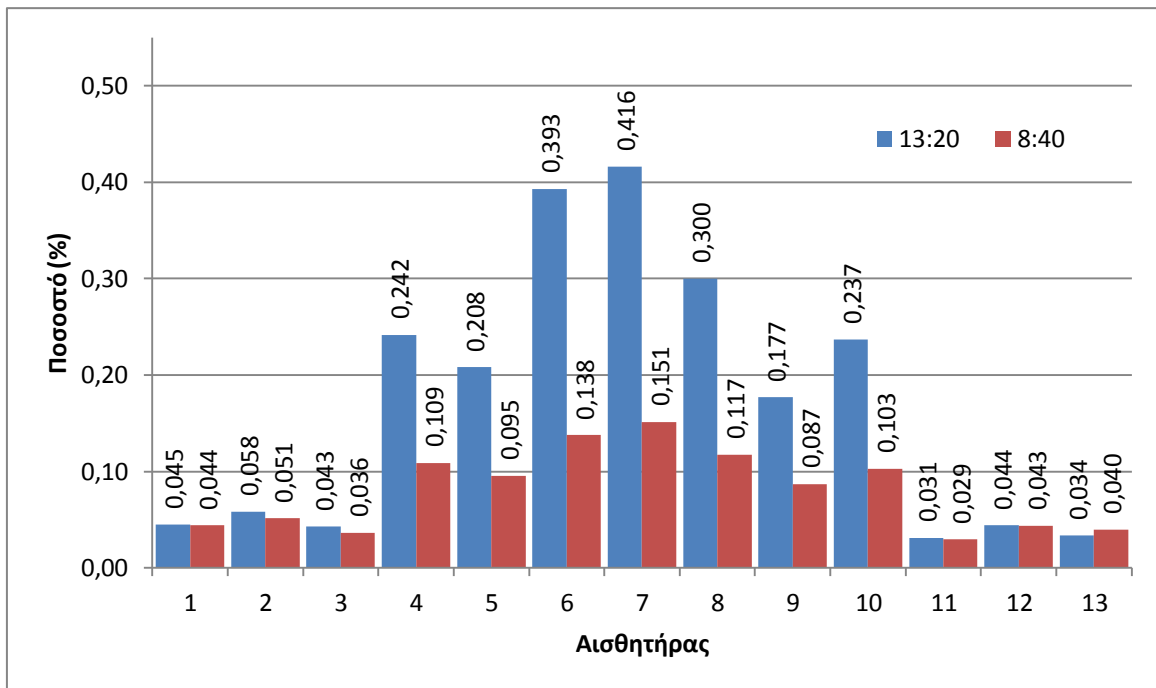
Άξιο σχολιασμού, είναι το γεγονός ότι οι αισθητήρες που απέχουν την μεγαλύτερη απόσταση από τον κεντρικό αισθητήρα (1, 3, 11, 13) δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη μεταβολή ως προς το ποσοστό της φωτεινότητας που καταγράφουν σε σχέση με την εξωτερική κατά την διάρκεια λειτουργίας του φωτοσωλήνα. Όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα 13 και τις πρώτες πρωινές ώρες που ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά, αλλά και τις μεσημεριανές ώρες οι διαφορές στα ποσοστά φωτεινότητας που καταγράφονται από τους αισθητήρες αυτούς είναι αμελητέα (σχεδόν μηδενική). Το ίδιο παρατηρείται και στα σημεία 2 και 12.



Διάγραμμα 11: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 5000lux.

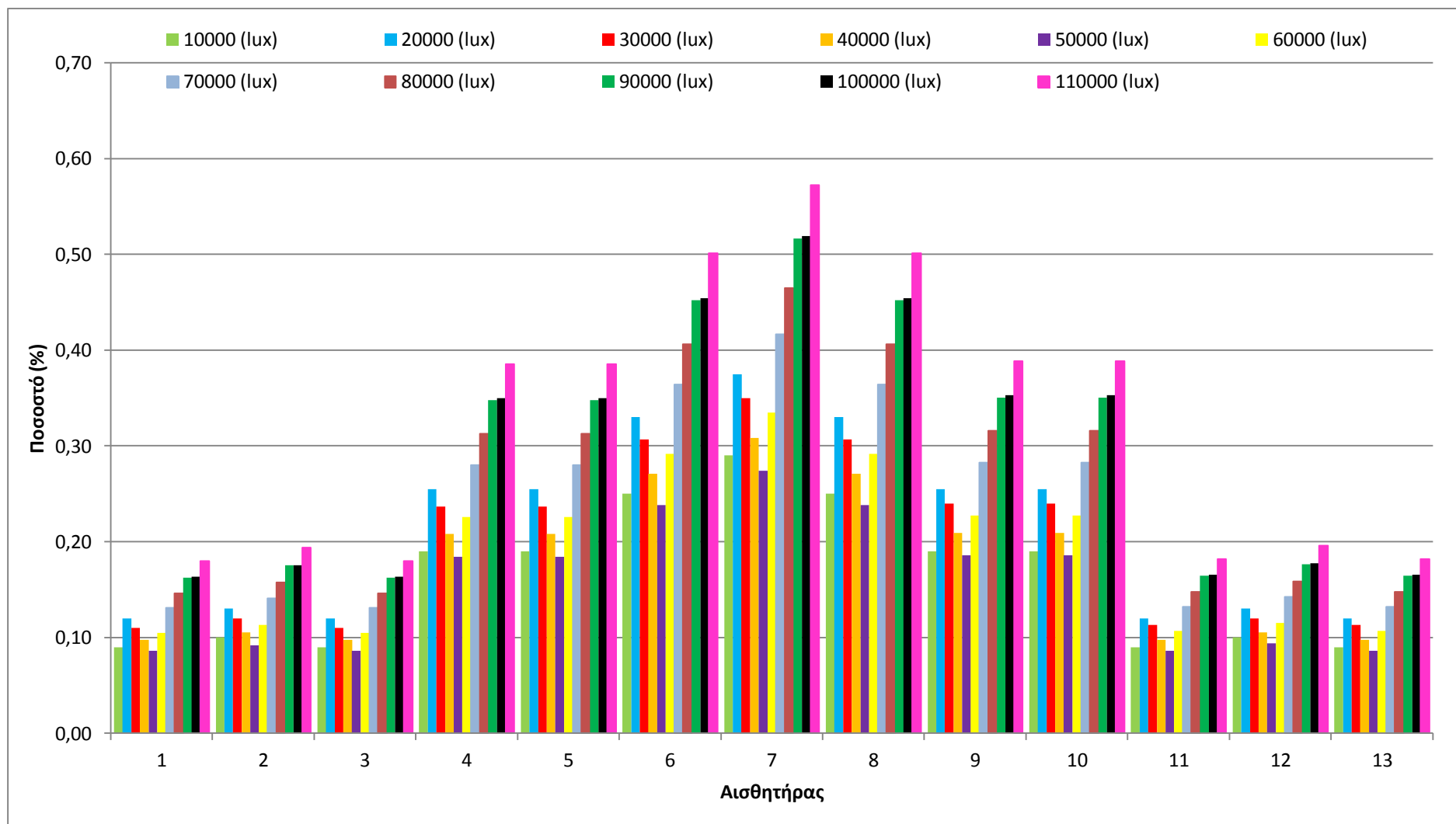


Διάγραμμα 12: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.



Διάγραμμα 13: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 90000lux.

Το πιο κάτω διάγραμμα 14, παρουσιάζει τα ποσοστά εσωτερικής φωτεινότητας σε σχέση με την εξωτερική για όλα τα σημεία στα οποία είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες. Από αυτό παρατηρείται ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της εξωτερικής φωτεινότητας, τόσο υψηλότερα είναι τα ποσοστά εσωτερικής φωτεινότητας που καταγράφουν οι αισθητήρες μέσα στο δωμάτιο δοκιμών. Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο υψηλότερη είναι η εξωτερική φωτεινότητα τόσο πιο αποδοτικό είναι ένα σύστημα φωτισμού με φωτοσωλήνα.



Διάγραμμα 14: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για δεδομένες τιμές εξωτερικής ακτινοβολίας (10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000, 80000, 90000, 100000, 110000 lux).

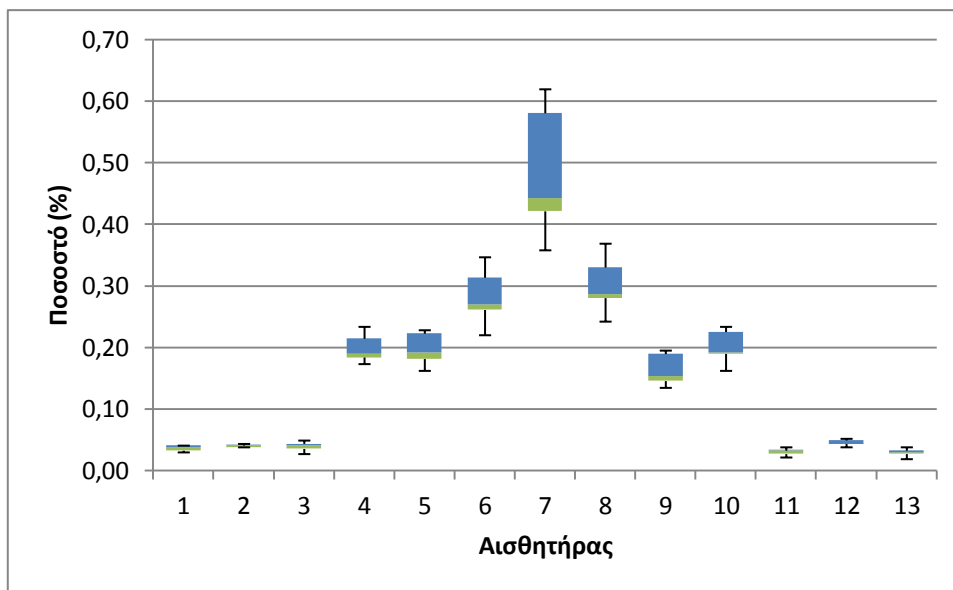
Προσέγγιση πειραματικών αποτελεσμάτων με Θηκογράμματα

Εν συνεχεία της επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων έγινε προσέγγιση του δείγματος με θηκογράμματα (boxplot). Τα θηκογράμματα είναι μία τεχνική η οποία απεικονίζει σε ένα διάγραμμα πέντε δείκτες οι οποίοι είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, και τα 1^ο, 2^ο, 3^ο τεταρτημόριο. Η χρήση της τεχνικής αυτής μας δίνει την δυνατότητα αναγνώρισης τυχών ακραίων τιμών (πολύ μεγαλύτερες ή πολύ μικρότερες από τον κύριο όγκο των δεδομένων) στο δείγμα. Επίσης, με τα θηκογράμματα μπορεί να γίνει προσδιορισμός της θέσης των δεδομένων σε σχέση με την μέση τιμή [34].

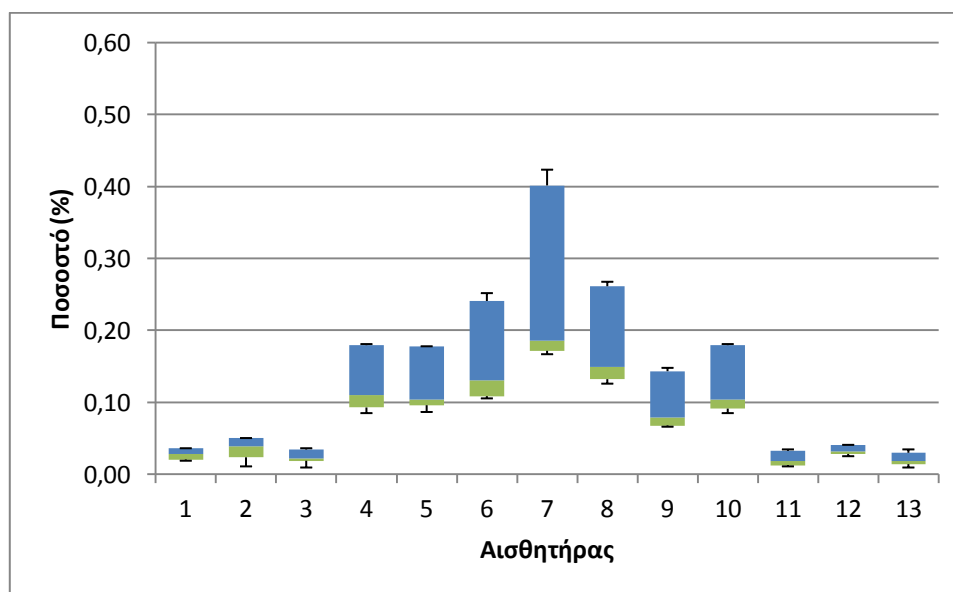
Όπως προέκυψε από την πιο πάνω διαδικασία και παρουσιάζεται στα πιο κάτω διαγράμματα 15 έως 19, για εξωτερική φωτεινότητα από 20000 έως 35000 lux τα ποσοστά απόδοσης για τους αισθητήρες 1, 2 και 3 (που απέχουν περίπου την ίδια απόσταση από τον κεντρικό αισθητήρα 7) είναι από 0 έως 0,04%. Το ίδιο ισχύει και για τους αισθητήρες 11, 12 και 13 οι οποίοι βρίσκονται αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι με τους πρώτους. Τα δε ποσοστά για αισθητήρες 4, 5 και 9, 10 για τιμές εξωτερικής φωτεινότητας από 20000 έως 35000 lux κυμαίνονται από 0,06 έως 0,19 %. Υψηλότερα ποσοστά παρουσιάζουν οι αισθητήρες 6 και 8 με αυτά να κυμαίνονται από 0,11 έως 0,37, ενώ τα μεγαλύτερα ποσοστά έχει ο αισθητήρας 7 από 0,16 έως 0,62%.

Για μεγαλύτερες τιμές εξωτερικής φωτεινότητας, από 50000 έως 100000 lux τα ποσοστά απόδοσης για τους αισθητήρες 1, 2 και 3 κυμαίνονται από 0,02 έως 0,24%. Για τους αισθητήρες 11, 12 και 13 τα ποσοστά απόδοσης κυμαίνονται από 0,02 έως 0,11%. Τα δε ποσοστά απόδοσης για αισθητήρες 4, 5 και 9, 10 για τιμές εξωτερικής φωτεινότητας από 50000 έως 100000 lux κυμαίνονται από 0,06 έως 0,36%. Τα ποσοστά για τους αισθητήρες 6 και 8 κυμαίνονται από 0,11 έως 0,33%, ενώ τα μεγαλύτερα ποσοστά παρουσιάζει ο αισθητήρας 7 από 0,14 έως 0,47%. Το εύρος αυτό είναι αρκετά μεγάλο κάτι το οποίο οφείλεται στο πλήθος διαφορετικών ωρών που συναντάμε τέτοιες εξωτερικές φωτεινότητες.

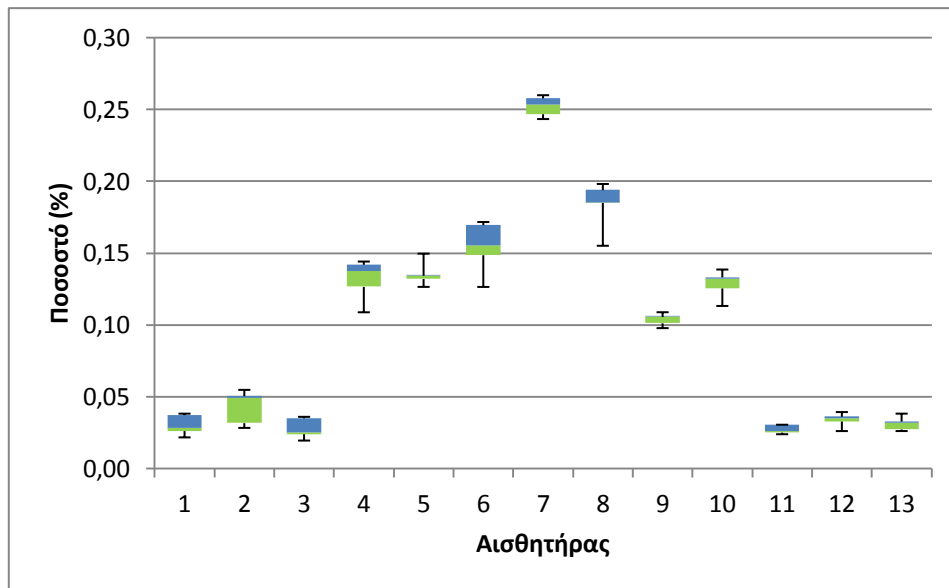
Τα πιο κάτω διαστήματα προέκυψαν από τυχαία επιλογή δεδομένων για συγκεκριμένες τιμές εξωτερικής φωτεινότητας ανεξάρτητα από την ώρα της ημέρας που παρατηρήθηκαν αυτές. Από την μελέτη που έγινε, κατά πλειοψηφία τα χαμηλά ποσοστά απευθύνονται σε πολύ πρωινές ή πολύ απογευματινές ώρες ή σε χειμερινή περίοδο όπου η γωνίας πρόσπτωσης των ακτινών στον συλλέκτη είναι μεγάλη. Αντίθετα, τα μέγιστα ποσοστά απόδοσης παρατηρούνται κατά τους θερινούς κυρίως μήνες και τις μεσημεριανές ώρες, όπου οι ακτίνες φτάνουν στο θόλο σχεδόν κάθετα, με μικρή γωνία απόκλισης.



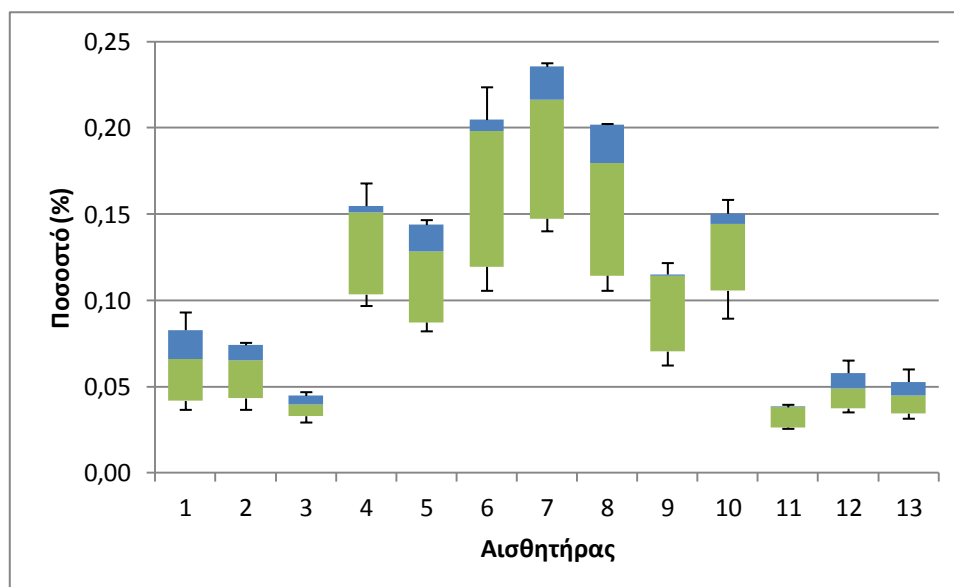
Διάγραμμα 15: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 20000 lux.



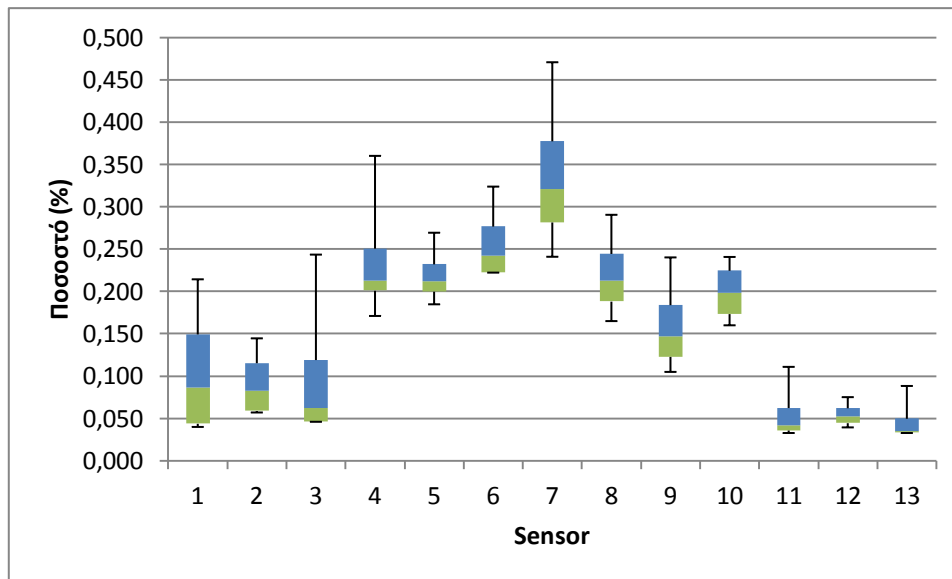
Διάγραμμα 16: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 35000 lux.



Διάγραμμα 17: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 50000 lux.



Διάγραμμα 18: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 75000 lux.



Διάγραμμα 19: Κατανομή μετρήσεων εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 100000 lux.

Συσχετισμός εσωτερικής με εξωτερική φωτεινότητα πειραματικών μετρήσεων

Ακολουθώντας για την περαιτέρω επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε χρήση του λογισμικού XLSTAT. Το XLSTAT είναι ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο το οποίο έχει αναπτυχθεί από το 1993 για να ενισχύσει τις αναλυτικές ικανότητες του Excel. Βασίζεται σε Excel για την εισαγωγή των δεδομένων και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων, αλλά οι υπολογισμοί γίνονται με αυτόνομα τμήματα λογισμικού [27], [28].

Βάση των πειραματικών μετρήσεων, αρχικά έγινε προσέγγιση της μέσης εσωτερικής φωτεινότητας που καταγράφηκαν και από τους δεκατρείς αισθητήρες σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα. Η κατανομή του εύρους της μέσης φωτεινότητας που παρατηρήθηκε σε συνάρτηση με τη εξωτερική φωτεινότητα παρουσιάζεται στο διάγραμμα 20.

Η περιγραφή της κατανομής αυτής με μαθηματικές εξισώσεις έγινε με χρήση του στατιστικού λογισμικού XLSTAT με δύο προσεγγίσεις (γραμμική και πολυώνυμη) έχοντας ως στόχο την εξαγωγή εξισώσεων οι οποίες θα δίνουν την Μέση Εσωτερική Φωτεινότητα (Μ.Ε.Φ.) για δεδομένες τιμές Εξωτερικής Φωτεινότητας (Εξ.Φ.).

Εξίσωση βέλτιστης ευθείας (γραμμική προσέγγιση):

$$(Μ.Φ.) = -3,69 + 1,89 \cdot 10^{-3} \cdot (Εξ.Φ.) \quad (4.1)$$

με συντελεστή προσδιορισμού:

$$R_{Μ.Φ.}^2 = 0,812$$

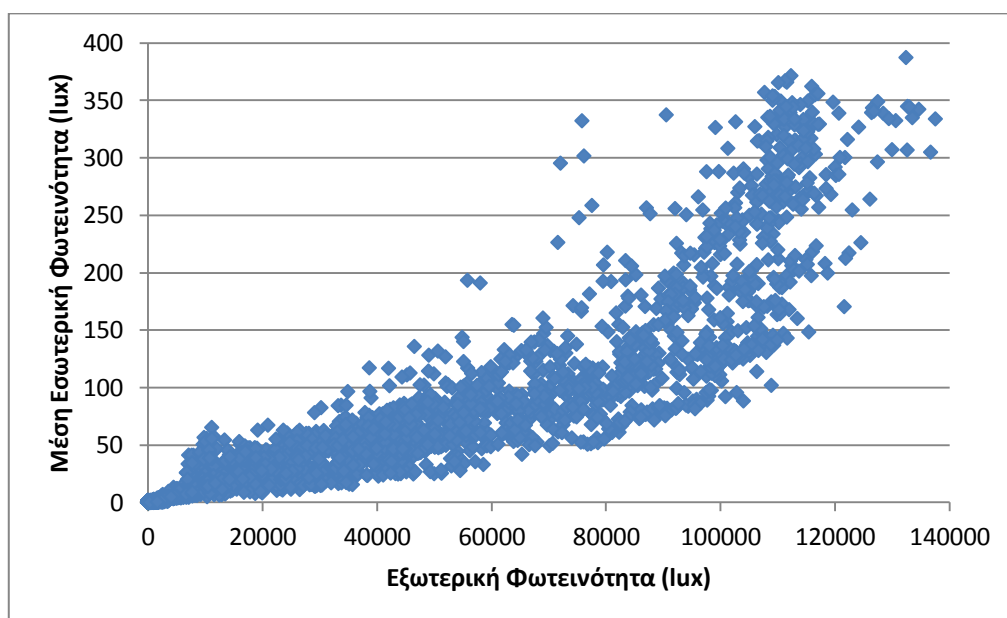
Εξίσωση Πολυωνυμικής Συνάρτησης (πολυωνυμική προσέγγιση 2^{ου} βαθμού):

$$(Μ.Φ.) = 2,78 + 5,43 \cdot 10^{-4} \cdot (Εξ.Φ.) + 1,41 \cdot 10^{-8} \cdot (Εξ.Φ.)^2 \quad (4.2)$$

με συντελεστή προσδιορισμού:

$$R_{Μ.Φ.}^2 = 0,852$$

Όπως φαίνεται από τους πιο πάνω συντελεστές προσδιορισμού, που προκύπτουν από τις δύο προσεγγίσεις που έγιναν, η πολυωνυμική συνάρτηση 2^{ου} βαθμού προσομοιάζει καλύτερα τα αποτελέσματα. Η διαφορά ανάμεσα στους δύο συντελεστές προσδιορισμού ανέρχεται στο 4,7%. Αρκετά μικρή για να καταστήσει το γραμμικό μοντέλο ανίκανο να προσομοιάσει τη υπάρχουσα κατάσταση σε σχέση με το πολυωνυμικό μοντέλο.



Διάγραμμα 20: Συσχετισμός Εξωτερικής Φωτεινότητας με το μέσο όρο Εσωτερικής Φωτεινότητας όλων των αισθητήρων.

Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή εξισώσεων για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Για την εξαγωγή των εξισώσεων αυτών λήφθηκαν υπόψη τιμές φωτεινότητας για την χρονική περίοδο από 28 Νοεμβρίου 2014 έως 18 Ιουνίου 2015. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση στο παρόν θέμα έγινε προσέγγιση με δύο από τα μοντέλα που προσφέρονται από το λογισμικό XLSTAT τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και για τις εξισώσεις μέσης φωτεινότητας. Αρχικά, έγινε γραμμική συσχέτιση κάθε εσωτερικού αισθητήρα με τον εξωτερικό για όλο το εύρος τιμών. Οι εξισώσεις και οι συντελεστές προσδιορισμού παρουσιάζονται αναλυτικά για κάθε αισθητήρα στον ακόλουθο πίνακα 5.

Συντελεστής Προσδιορισμού	Εξίσωση Βέλτιστης Ευθείας
$R_1^2 = 0,700$	$S_1 = -2,00 + 7,41 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_2^2 = 0,675$	$S_2 = -3,35 + 9,62 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_3^2 = 0,717$	$S_3 = -1,84 + 6,19 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_4^2 = 0,596$	$S_4 = -10,30 + 2,98 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_5^2 = 0,560$	$S_5 = -1,74 + 1,86 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_6^2 = 0,717$	$S_6 = -9,80 + 3,46 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_7^2 = 0,854$	$S_7 = -0,24 + 3,35 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_8^2 = 0,754$	$S_8 = -0,55 + 2,38 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_9^2 = 0,609$	$S_9 = -3,38 + 1,74 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_{10}^2 = 0,685$	$S_{10} = -7,44 + 2,59 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_{11}^2 = 0,610$	$S_{11} = -2,08 + 5,99 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_{12}^2 = 0,757$	$S_{12} = -1,90 + 6,84 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.)$
$R_{13}^2 = 0,716$	$S_{13} = -1,27 + 5,14 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.)$

Πίνακας 5: Εξισώσεις γραμμικής συσχέτισης εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.

Ακολούθως, έγινε πολυωνυμική συσχέτιση δευτέρου βαθμού κάθε καταγεγραμμένης τιμής από κάθε εσωτερικά τοποθετημένο αισθητήρα με τον εξωτερικό για όλο το εύρος τιμών. Οι εξισώσεις και οι συντελεστές προσδιορισμού παρουσιάζονται αναλυτικά για κάθε αισθητήρα στον ακόλουθο πίνακα 6. Όπως φαίνεται σε αυτόν τον πίνακα, το μοντέλο πολυωνυμικής συνάρτησης έχει μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού από το προηγούμενο γραμμικό μοντέλο για όλα τα σημεία. Το γεγονός αυτό καθιστά τις εξισώσεις αυτές καταλληλότερες για τον προσδιορισμό της εσωτερικής φωτεινότητας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι έγινε δοκιμή προσέγγισης με πολυωνυμική συνάρτηση μεγαλύτερου βαθμού καθώς και άλλης μορφής. Παρόλα αυτά όμως, η πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού προσομοιάζει, για τα αποτελέσματα των περισσότερων αισθητήρων, με μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού.

Συντελεστής Προσδιορισμού	Εξίσωση Πολυωνυμικής Συνάρτησης
$R_1^2 = 0,722$	$S_1 = 3,74 \cdot 10^{-3} + 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 4,37 \cdot 10^{-9} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_2^2 = 0,754$	$S_2 = 1,73 - 9,37 \cdot 10^{-5} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,11 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_3^2 = 0,764$	$S_3 = 0,68 + 1,07 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 5,37 \cdot 10^{-9} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_4^2 = 0,667$	$S_4 = 5,51 - 3,11 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 3,45 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_5^2 = 0,568$	$S_5 = 1,56 + 1,17 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.) + 7,20 \cdot 10^{-9} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_6^2 = 0,787$	$S_6 = 6,91 + 1,69 \cdot 10^{-5} \cdot (E\xi.\Phi.) + 3,65 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_7^2 = 0,862$	$S_7 = 4,79 + 2,31 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,10 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_8^2 = 0,761$	$S_8 = 2,86 + 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot (E\xi.\Phi.) + 7,43 \cdot 10^{-9} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_9^2 = 0,639$	$S_9 = 2,59 + 5,02 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,30 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{10}^2 = 0,741$	$S_{10} = 3,97 + 2,12 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,49 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{11}^2 = 0,670$	$S_{11} = 0,83 - 8,19 \cdot 10^{-6} \cdot (E\xi.\Phi.) + 6,36 \cdot 10^{-9} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{12}^2 = 0,814$	$S_{12} = 0,99 + 8,16 \cdot 10^{-5} \cdot (E\xi.\Phi.) + 6,31 \cdot 10^{-9} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{13}^2 = 0,734$	$S_{13} = -3,64 \cdot 10^{-2} + 2,57 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,70 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$

Πίνακας 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εξισώσεις πολυωνυμικής συσχέτισης δευτέρου βαθμού εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.

Όπως έχει παρατηρηθεί ο αισθητήρας 5 παρουσιάζει μικρό συντελεστή προσδιορισμού τόσο κατά την γραμμική, όσο και κατά την πολυωνυμική προσέγγιση. Αυτό ίσως να οφείλεται σε κακή ρύθμιση της ευαισθησίας (καλιμπράρισμα) του συγκεκριμένου αισθητήρα από το εργοστάσιο κατασκευής, καθώς είναι δύσκολο ένας αισθητήρας να προσεγγίσει ακριβώς την κατάσταση, όπως την αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Επίσης, μπορεί ο συγκεκριμένος αισθητήρας να μην βρισκόταν σε κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας για μεγάλο χρονικό διάστημα κάτι το οποίο επηρέασε τα συνολικά αποτελέσματα τα οποία μετρήθηκαν από αυτόν.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Ανάλυση Διαδικασίας Προσομοίωσης

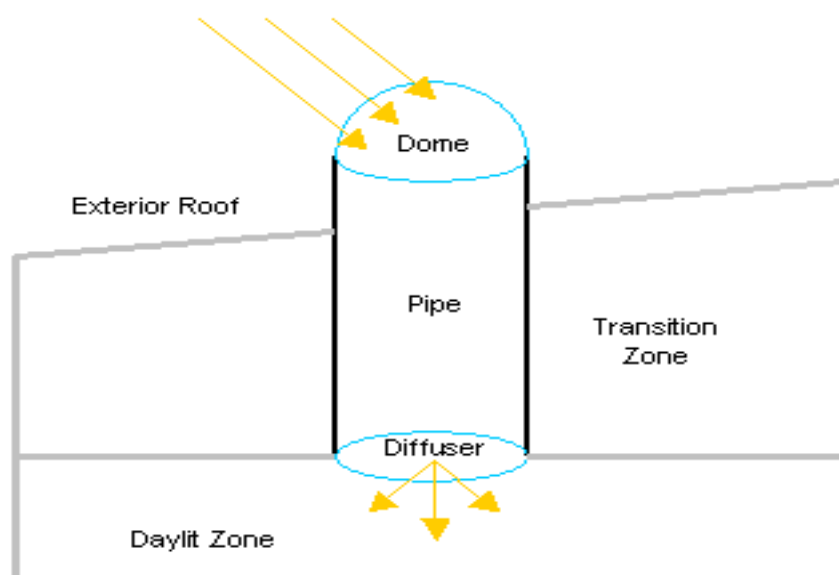
Τα συστήματα φυσικού φωτισμού χρησιμοποιούνται για την είσοδο ή τη βελτίωση των επιπέδων φυσικού φωτισμού σε ένα χώρο. Εκτός από τη συμβολή τους στη φωτεινότητα, τα συστήματα φυσικού φωτισμού έχουν επίδραση στο ισοζύγιο θερμότητας. Δύο τύποι συστημάτων φυσικού φωτισμού χρησιμοποιούνται στο Energy Plus:

- φωτοσωλήνες
- ράφια φυσικού φωτισμού

Προσομοίωση φωτοσωλήνων

Στο Energy Plus, το στοιχείο το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των φωτοσωλήνων παρέχει μια ειδική μέθοδο εισαγωγής παραθύρων. Έτσι, οι φωτοσωλήνες, όπως φαίνεται και στην πιο κάτω εικόνα 36, απαρτίζονται από τρεις συνιστώσες:

- ένα θόλο (dome)
- ένα σωλήνα (pipe)
- ένα διαχύτη (diffuser)



Εικόνα 36: Φωτοσωλήνας

Πηγή: Energy Plus Engineering Reference, The Reference to Energy Plus Calculations, September 25, 2014

Ο θόλος είναι συνήθως ένα ημισφαιρικό κατασκευασμένο από διαφανές πλαστικό. Το στοιχείο αυτό επιτρέπει μόνο την είσοδο φυσικού φωτός στον εσωτερικό χώρο, αποκλείοντας την είσοδο άλλων στοιχείων του εξωτερικού περιβάλλοντος (π.χ. νερό, σκόνη) [7].

Ο σωλήνας αποτελείται από έναν λείο κύλινδρο, ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια ιδιαίτερα ανακλαστική εσωτερική επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή, είναι συνήθως ένα στιλβωμένο μέταλλο ή ένα ειδικό ανακλαστικό φύλλο το οποίο προσκολλάται στο εσωτερικό του σωλήνα, ο οποίος οδηγεί το φως της ημέρας από το θόλο στο διαχύτη με πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις [4].

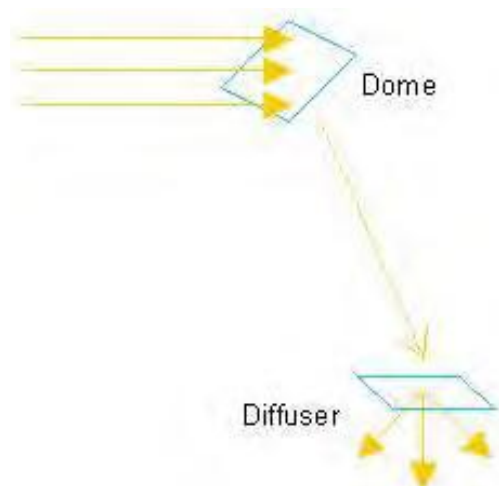
Ο διαχύτης είναι συνήθως ένα επίπεδο ματ (πλήρως διαχυτικό) ή πρισματικό πλαστικό κάλυμμα το οποίο κατανέμει ομοιόμορφα το φως της ημέρας στο εσωτερικό του δωματίου στο οποίο είναι τοποθετημένο το σύστημα φωτισμού [4].

Για την εκτέλεση της προσομοίωσης με επιτυχία το εμβαδό του θόλου/διαχύτη και το εμβαδό (εγκάρσιο αποτύπωμα) του σωλήνα πρέπει να είναι ίσα (με περιθώριο απόκλισης 2%).

Το μοντέλο προσομοίωσης του φωτισωλήνα στο Energy Plus περιλαμβάνει τρία διαφορετικά, αλλά συναφή φαινόμενα:

- Φυσικό φωτισμό
- Ηλιακά κέρδη
- Κέρδη μέσω αγωγής / συναγωγής

Τα ηλιακά κέρδη και τα κέρδη μέσω αγωγής/συναγωγής προσομοιώνονται από το ισοζύγιο θερμότητας, ενώ ο φυσικός φωτισμός προσομοιώνεται ανεξάρτητα. Και για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης, ο θόλος και ο διαχύτης αντιμετωπίζονται ως ειδικές επιφάνειες παραθύρου. Ο θόλος και ο διαχύτης γίνονται «δέκτης» και «πομπός» αντίστοιχα. Δηλαδή η ακτινοβολία που εισέρχονται στο θόλο καταλήγει στην έξοδο από το διαχύτη [7].



Εικόνα 37: Επιφάνειες θόλου και διαχύτη.

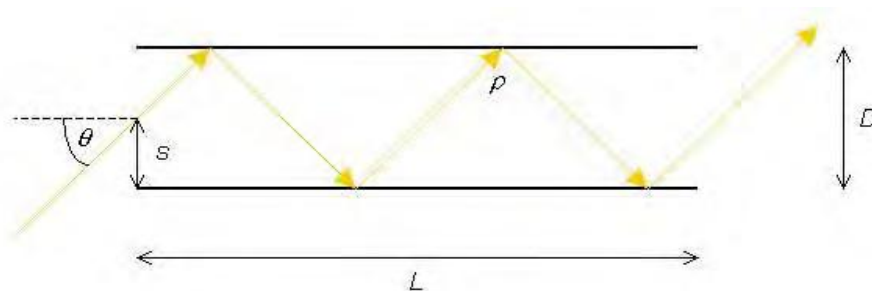
Πηγή: Energy Plus Engineering Reference, The Reference to Energy Plus Calculations, September 25, 2014

Στη προσημείωση με Energy Plus, ο σωλήνας προσομοιώνεται από ένα ξεχωριστό στοιχείο κώδικα. Ενώ γίνεται χρήση πολλών διαφορετικών μέτρων για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης των φωτισωλήνων (Zhang 2002, Harrison 1998), η έννοια της συνολικής

διαπερατότητας του σωλήνα φωτισμού είναι η πιο συμβατή με τη λειτουργία του Energy Plus. Ο υπολογισμός της διαπερατότητας του σωλήνα και του φωτοσωλήνα για διαφορετικούς τύπους ακτινοβολίας είναι θεμελιώδους σημασίας για όλα τα φαινόμενα που καλύπτει το μοντέλο.

Ακτινική διαπερατότητα του σωλήνα

Η συνολική διαπερατότητα στην «ακτινική ακτινοβολία» συμπεραίνεται από το συνδυασμό της μετάδοσης πολλών διακριτών ακτίνων. Η μεταφορά διακριτών ακτίνων μέσω ενός σωλήνα εξαρτάται από την ανακλαστικότητα της εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα, την αναλογία των διαστάσεων του σωλήνα, τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας, και το σημείο εισόδου μέσα στο σωλήνα [7].



Εικόνα 38: Διακριτές ακτίνες σε ένα σωλήνα.

Πηγή: Energy Plus Engineering Reference, The Reference to Energy Plus Calculations, September 25, 2014

Για μια αδιαφανή επιφάνεια, η ανακλαστικότητα ρ είναι:

$$\rho = 1 - \alpha \quad (4.3)$$

όπου: α η απορροφητικότητα της επιφάνειας

Η γνώση της απορροφητικότητας του ορατού φωτός (φυσικός φωτισμός) και της απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας δίνουν την ορατή και ηλιακή ανακλαστικότητα του συστήματος, αντίστοιχα. Μετρημένες ανακλαστικότητες εμπορικών σωλήνων φυσικού φωτισμού (TDDs) κυμαίνονται από 0,90 έως 0,99. Αν και η πραγματική ανακλαστικότητα της επιφάνειας είναι ελαφρώς εξαρτώμενη από την προσπίπτουσα γωνία της ακτίνας του φωτός, το μοντέλο υποθέτει μια σταθερή τιμή ανακλαστικότητας για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης [4].

Η πλήρης αναλυτική έκφραση για τη μετάδοση μιας ακτίνας φωτός μέσα σε ένα εξαιρετικά ανακλαστικό σωλήνα, έχει αναπτυχθεί από τους Swift και Smith και επαληθεύτηκε πειραματικά το 1994. Ουσιαστικά, με την ενσωμάτωση ακτίνων οι οποίες

προσπίπτουν στην είσοδο του σωλήνα, υπολογίζεται η διαπερατότητα τ σε μια δέσμη παραλληλισμένης ακτινοβολίας να είναι [7]:

$$\tau = \frac{\pi}{4} \int_{s=0}^1 \frac{s^2}{\sqrt{1-s^2}} \rho^{INT[a \tan \theta / s]} (1 - (1 - \rho)(a \tan \theta / s - INT[a \tan \theta / s])) ds \quad (4.4)$$

όπου: a η αναλογία μήκους L προς διάμετρο D του φωτοσωλήνα L/D
 ρ η ανακλαστικότητα της επιφάνειας
 θ η γωνία πρόσπτωσης
 s το σημείο εισόδου

Το ολοκλήρωμα αυτό δεν έχει αναλυτική λύση επομένως πρέπει να υπολογίζεται αριθμητικά. Για να επιτευχθεί αποδεκτή ακρίβεια, έχει διαπιστωθεί ότι ένας μεγάλος αριθμός σημείων (100.000) είναι αναγκαίος. Δεδομένου ότι η ενσωμάτωση είναι χρονοβόρα και η μετάδοση του σωλήνα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές σε κάθε χρονικό βήμα, οι τιμές υπολογίζονται σε ένα εύρος γωνιών πρόσπτωσης και αποθηκεύονται σε έναν πίνακα. Οι τιμές του πίνακα υποβάλλονται σε παρεμβολή ώστε να δοθεί γρήγορα η μετάδοση για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης [7].

Το μοντέλο δεν παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της διαπερατότητας του συστήματος όταν αυτό περιλαμβάνει σωλήνα με γωνίες. Πρόσφατες έρευνες (Zhang 2002) δείχνουν ότι μια γωνία 30 μοιρών προκαλεί απώλειες της τάξης του 20% στο μεταδιδόμενο φως. Εάν το αποτέλεσμα της κάμψης πρέπει να προσομοιωθεί, μπορεί να προσεγγιστεί από το χρήστη, μειώνοντας την διαπερατότητα του υλικού του διαχύτη [7].

Η συνολική διαπερατότητα του φωτοσωλήνα τ_{TDD} λαμβάνει υπόψη τη διαπερατότητα του διαχύτη και του θόλου και τη διαπερατότητα του σωλήνα [7].

$$\tau_{TDD}(\theta) = \tau_{dome}(\theta) \cdot \tau_{pipe}(\theta) \cdot \tau_{diffuser}(\theta) \quad (4.5)$$

όπου: $\tau_{dome}(\theta)$ η διαπερατότητα του θόλου για γωνία πρόσπτωσης θ
 $\tau_{pipe}(\theta)$ η διαπερατότητα του σωλήνα για γωνία πρόσπτωσης θ
 $\tau_{diffuser}(\theta)$ η διαπερατότητα του διαχύτη για γωνία πρόσπτωσης θ

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η διαπερατότητα του θόλου υπολογίζεται για ένα επίπεδο παράθυρο. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη τη διάθλαση λόγω της καμπυλότητας του θόλου.

Ο διαχύτης θεωρείται ότι έχει πάντα διάχυτη διαπερατότητα λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων στο εσωτερικό του σωλήνα, οι οποίες οδηγούν σε ομοιόμορφο αποτέλεσμα. Αν και το φως που εξέρχεται από το σωλήνα δεν είναι ισοτροπικό, μπορεί να προσεγγιστεί ως διάχυτο. Ωστόσο, η χρήση ενός ματ διαχύτη στο φωτισωτήριο, εξασφαλίζει ότι το φως που εξέρχεται προς το χώρο είναι πολύ κοντά στην ισοτροπική διάχυση [4].

Ο υπολογισμός της διάχυτης διαπερατότητας του φωτισωτή είναι πολύ πιο σύνθετος και αντιμετωπίζεται διαφορετικά στην προσομοίωση του φωτός και την θερμική προσομοίωση.

Προσομοίωση Φυσικού Φωτισμού

Η προσομοίωση του φυσικού φωτισμού του φωτισωτή αντιμετωπίζει την επιφάνεια του διαχύτη ως ένα κανονικό παράθυρο το οποίο φωτίζεται εξωτερικά από τον ήλιο, τον ουρανό και το έδαφος. Ωστόσο, το μοντέλο του φωτισωτή αντικαθιστά τη διαπερατότητα των υαλοπινάκων με την κατάλληλη διαπερατότητα του φωτισωτή και μετατρέπει το μεταδιδόμενο φως ως διάχυτο.

Η φωτεινότητα, χάρη στην άμεση ακτινοβολία του ήλιου βρίσκεται χρησιμοποιώντας την ακτινική διαπερατότητα τ_{TD} όπως περιγράφεται παραπάνω, ενώ η δε προσπίπτουσα γωνία θ είναι σχετική με την επιφάνεια του θόλου.

Ο φωτισμός λόγω της ακτινοβολίας του ουρανού και η ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος υπολογίζονται με το κοινό μοντέλο υπολογισμού του φυσικού φωτός, συνυπολογίζοντας τη συνεισφορά του ουρανού και του εδάφους μέσα στο ορατό ημισφαίριο του ουράνιου θόλου. Η μετάδοση κάθε στοιχείου του ουρανού ή του εδάφους υπολογίζεται επίσης, χρησιμοποιώντας την ακτινική διαπερατότητα του φωτισωτή στη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας από τον ουρανό ή από το έδαφος σε σχέση με το θόλο [4].

Σχετικά με την προσομοίωση που υλοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη εργασία, απαραίτητη προϋπόθεση για την διεξαγωγή της με το λογισμικό Energy Plus είναι η αναπαραγωγή του υπό μελέτη χώρου σε κάποιο γραφιστικό περιβάλλον (π.χ. Sketch up) ή στο ίδιο το Energy Plus, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα σχετικών ή απόλυτων συντεταγμένων, οι οποίες χαρακτηρίζουν κάθε ακμή του χώρου. Το δωμάτιο στο οποίο είναι εγκατεστημένη η πειραματική διάταξη του φωτισωτή, αναπαράχθηκε με τις ακριβείς διαστάσεις του, ενώ στις εσωτερικές επιφάνειες δόθηκαν τιμές ανακλαστικότητας αντίστοιχες με τις πραγματικές. Τοποθετήθηκαν 13 σημεία μετρήσεων, τα οποία αντιστοιχούν στους 13 εσωτερικούς αισθητήρες του πειράματος. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε έκανε χρήση ενός αρχείου καιρού για την περιοχή της Αθήνας, ώστε να δώσει το ζητούμενο αποτέλεσμα, το οποίο ήταν η φωτεινότητα (lux) σε κάθε ένα από τα 13 σημεία μέτρησης

πάνω στο επίπεδο εργασίας, για χρονικό διάστημα ίσο με ένα έτος. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αρχείο καιρού που χρησιμοποιεί το Energy Plus (το οποίο αντιπροσωπεύει την Αθήνα) προέρχεται από μέσους όρους καταγεγραμμένων τιμών παλαιότερων ετών. Οι τιμές του αρχείου αυτού είναι ενδεικτικές και κατά προσέγγιση σύμφωνα με παλαιότερα αρχεία. Από τα αποτελέσματα που έδωσε το λογισμικό, αφαιρέθηκαν τα δεδομένα εκείνα που δεν αντιστοιχούσαν στις ημερομηνίες κατά τις οποίες δε διεξαγόταν το πείραμα και άρα δεν υπήρχαν καταγεγραμμένες τιμές.

4.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

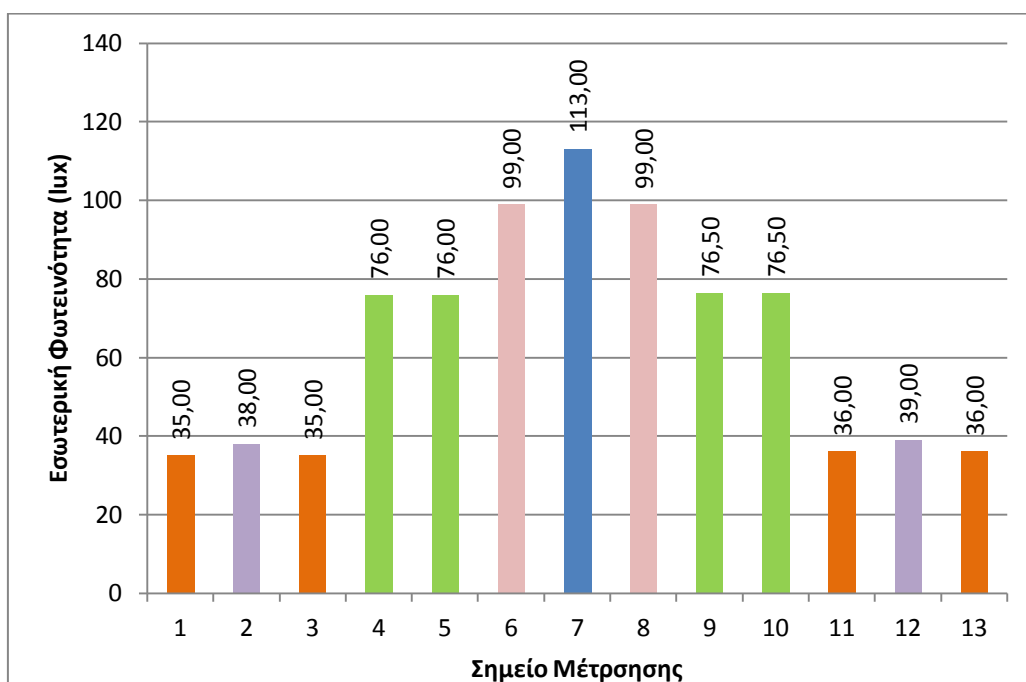
Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε στο Energy Plus, προέκυψαν όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο τιμές εσωτερικής φωτεινότητας κατά πολύ μικρότερες από τις τιμές εξωτερικής φωτεινότητας, ενώ η κατανομή του φωτός που εισέρχεται μέσα στο δωμάτιο από τον φωτοσωλήνα είναι ομοιογενής. Αυτό σημαίνει ότι, οι τιμές φωτεινότητας που καταγράφονται σε ένα σημείο μέτρησης είναι ίσες με τις τιμές που καταγράφονται στα σημεία που απέχουν την ίδια απόσταση από το φωτοσωλήνα με τον εν λόγω αισθητήρα/σημείο μέτρησης.

Το σημείο μέτρησης 7, ο οποίος βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον φωτοσωλήνα, καταγράφει για κάθε χρονική στιγμή τις μεγαλύτερες τιμές εσωτερικής φωτεινότητας ενώ οι αισθητήρες 6 και 8, οι οποίοι απέχουν την μικρότερη απόσταση από τον κεντρικό αισθητήρα (0,93m), καταγράφουν τις αμέσως μεγαλύτερες τιμές. Τα σημεία μέτρησης 4, 5, 9 και 10 τα οποία απέχουν από το σημείο 7 απόσταση 1,06m καταγράφουν τις αμέσως πιο μεγάλες τιμές. Τέλος, τα σημεία μέτρησης 2 και 12 που απέχουν από τον 7 απόσταση 1,41m καθώς και τα σημεία 1, 3, 11 και 13 τα οποία βρίσκονται στις τέσσερις γωνίες του δωματίου δίνουν τα μικρότερα ποσοστά εσωτερικής φωτεινότητας. Τα αποτελέσματα αυτά μεταβάλλονται ελάχιστα με οποιαδήποτε μεταβολή, τόσο στην χρονική στιγμή όσο και στην εξωτερική φωτεινότητα και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 7.

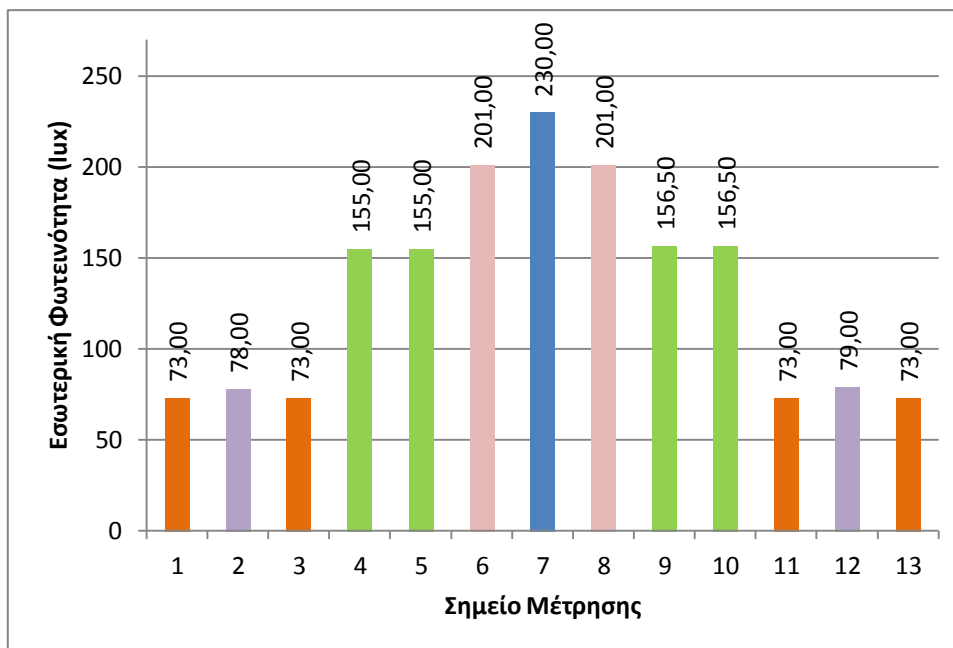
Αισθητήρας Αισθητήρας	7	1, 3, 11, 13 (1,68m από τον 7)	2, 12 (1,41m από τον 7)	4, 5, 9, 10 (1,06m από τον 7)	6, 8 (0,93m από τον 7)
7	0				
1, 3, 11, 13	68,58%	0			
2, 12	65,93%	7,79%	0		
4, 5, 9, 10	32,52%	53,44%	49,51%	0	
6, 8	12,39%	64,14%	61,11%	22,98%	0

Πίνακας 7: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστά απόκλισης φωτεινότητας κάθε ομάδας σημείων μέτρησης (που απέχουν την ίδια απόσταση από τον αισθητήρα 7) από όλες τις υπόλοιπες ομάδες. Για δεδομένη χρονική στιγμή (9/12 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 33200 lux.

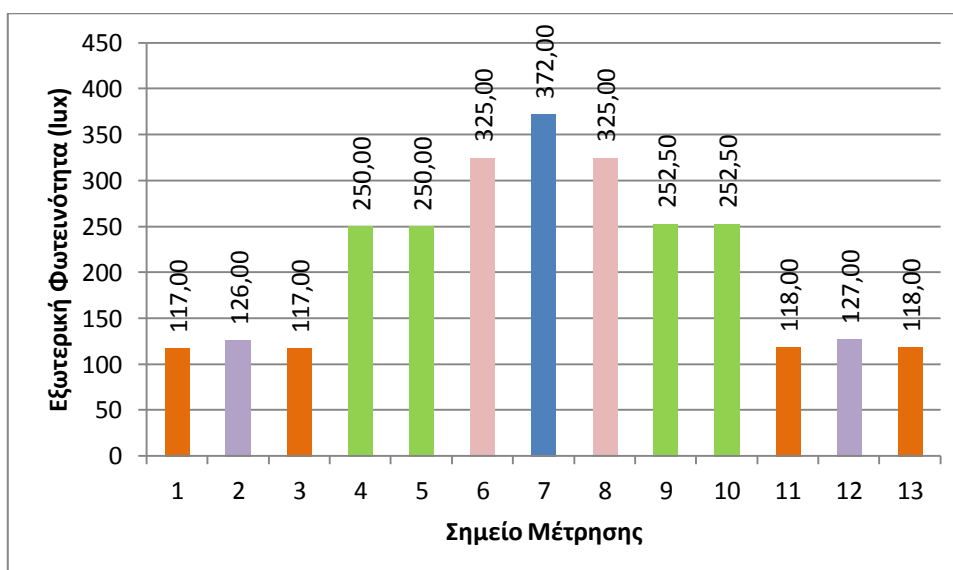
Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι οι αισθητήρες τις ίδιας ομάδας (που απέχουν δηλαδή την ίδια απόσταση από το κέντρο του επιπέδου αναφοράς) δεν παρουσιάζουν μεταξύ τους αποκλίσεις κάτι το οποίο φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα 15 στο οποίο παρουσιάζεται κάθε ομάδα με διαφορετικό χρώμα. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στη χρονική στιγμή 9/12 12:00:00μμ με εξωτερική φωτεινότητα 33200 lux. Από τα ακόλουθα διαγράμματα 11 έως 24 μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι πάντα ο αισθητήρας 7 παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή εσωτερικής φωτεινότητας, οι αισθητήρες 1, 3, 11 και 13 τις μικρότερες τιμές ενώ ενδιάμεσες τιμές αναμένονται από τους υπόλοιπους αισθητήρες.



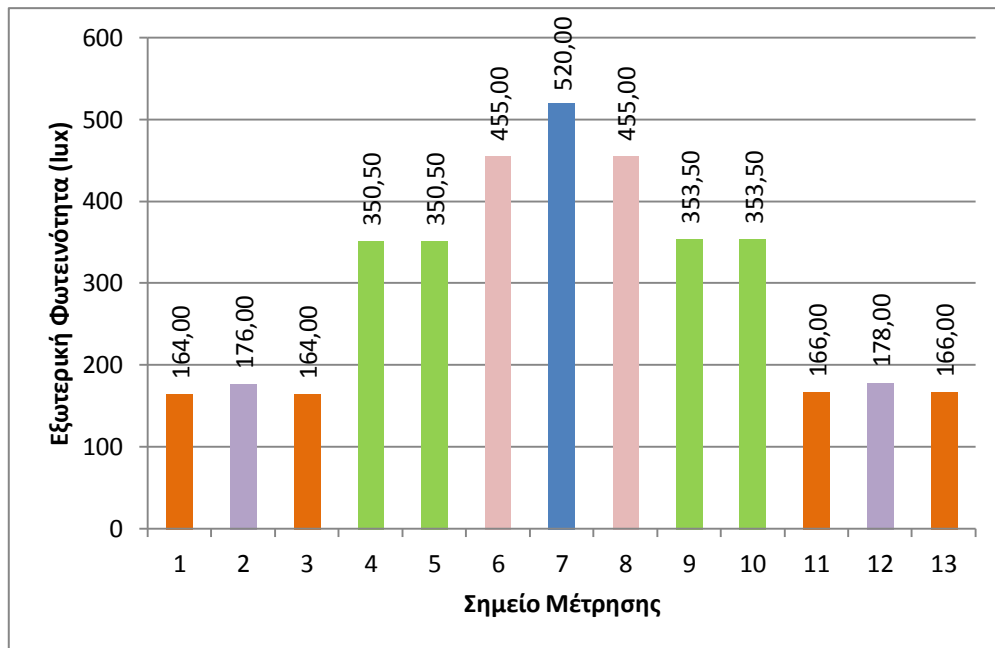
Διάγραμμα 21: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 33200 lux τη χρονική στιγμή (9/12 12:00:00μμ).



Διάγραμμα 22: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 50000 lux τη χρονική στιγμή (23/04 12:00:00μμ).



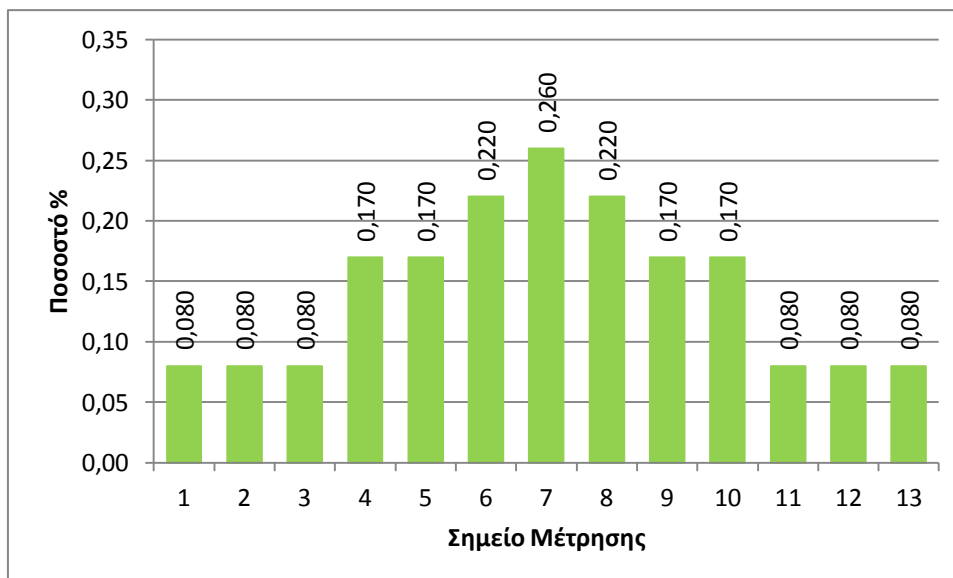
Διάγραμμα 23: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 80000 lux τη χρονική στιγμή (03/04 13:00:00μμ).



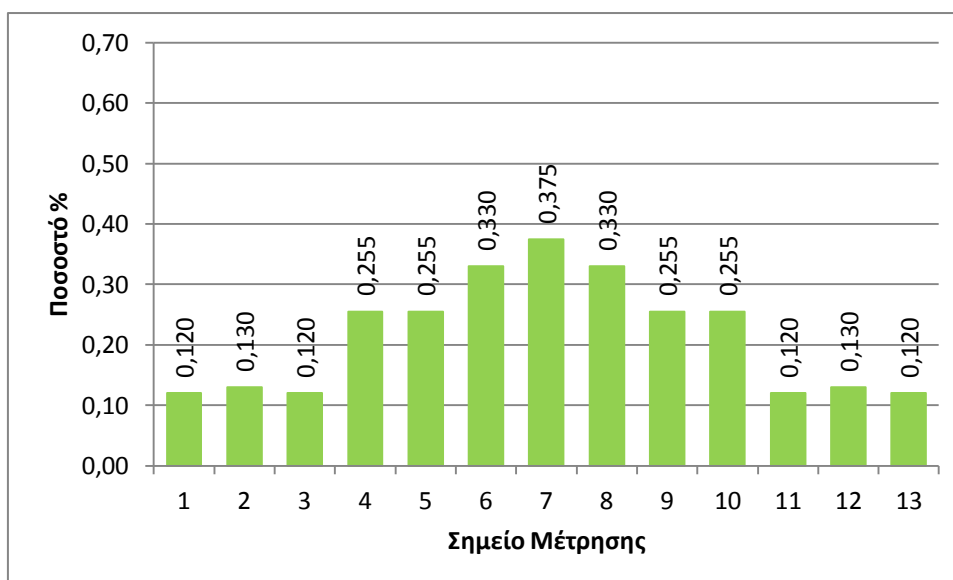
Διάγραμμα 24: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εσωτερική φωτεινότητα (lux) η οποία αναμένεται σε κάθε σημείο μέτρησης με την εξωτερική τιμή φωτεινότητας να ανέρχεται στα 100000 lux τη χρονική στιγμή (27/05 14:00:00μμ).

Εν συνεχεία, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο κατανέμει η προσομοίωση του Energy Plus το φως του φωτοσωλήνα εσωτερικά στο δωμάτιο, έγινε ένας πρώτος υπολογισμός του ποσοστού της μέσης τιμής όλων των σημείων μέτρησης εντός του δωματίου σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται μια πρώτη εικόνα της απόδοσης του φωτοσωλήνα και του ποσοστού φωτεινότητας σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα που αναμένεται σε κάθε σημείο. Για διάφορες χρονικές στιγμές, οι οποίες επιλέχτηκαν τυχαία, έγινε υπολογισμός της απόδοσης κάθε σημείου μέτρησης σύμφωνα με τις τιμές που έδωσαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την αντίστοιχη τιμή για την εξωτερική φωτεινότητα.

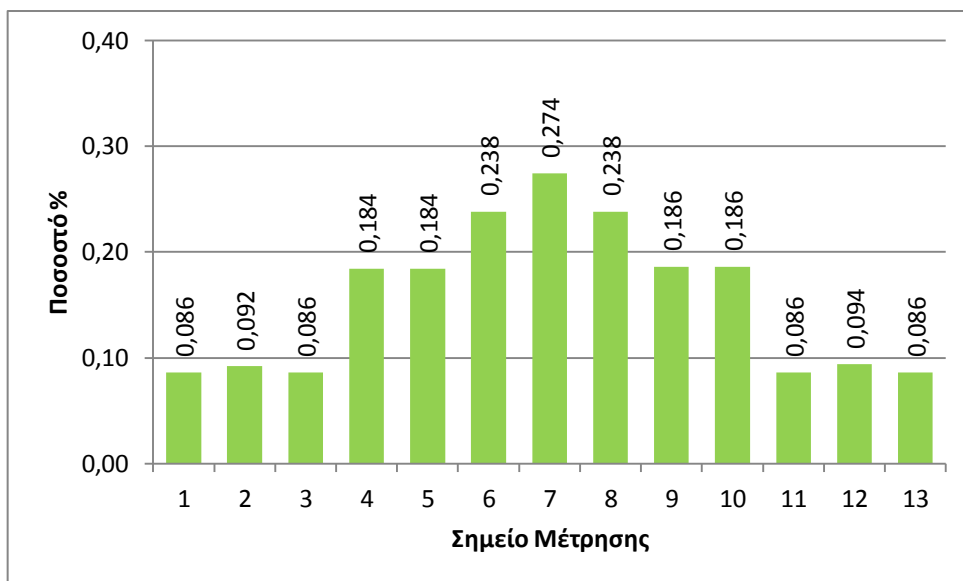
Μερικά από τα διαγράμματα, στα οποία παρουσιάζεται το ποσοστό απόδοσης σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα για κάθε σημείο στο οποίο γίνονται μετρήσεις φωτεινότητα εσωτερικά παρατίθενται παρακάτω (βλ. διαγράμματα 25 έως 30). Λόγω του μεγάλου πλήθους των δεδομένων κρίθηκε πιο αποτελεσματικό να παρουσιαστούν και να αναλυθούν αποτελέσματα ανά 5000 lux. Περισσότερα διαγράμματα παρατίθενται στο Παράρτημα.



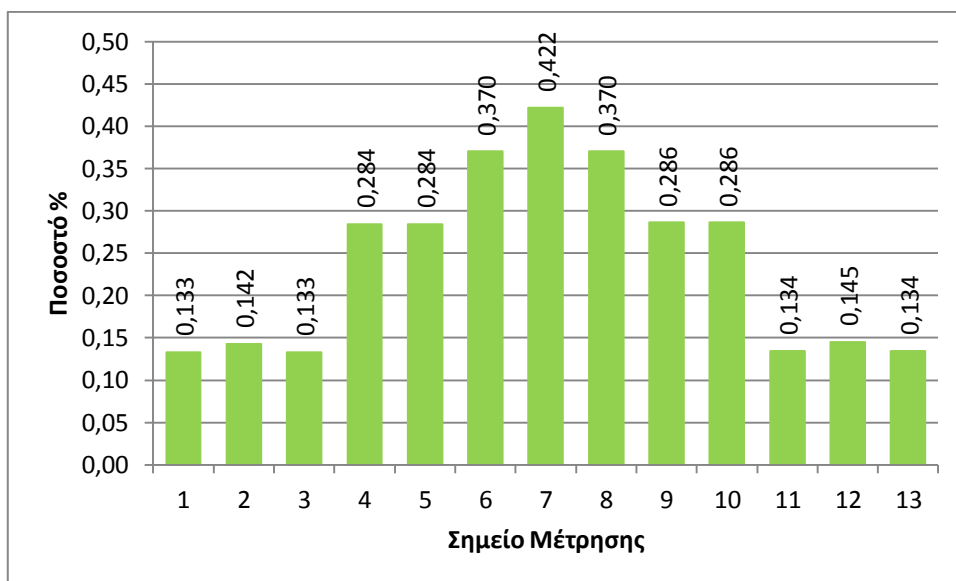
Διάγραμμα 25: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (19/12 5:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 5000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,143% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



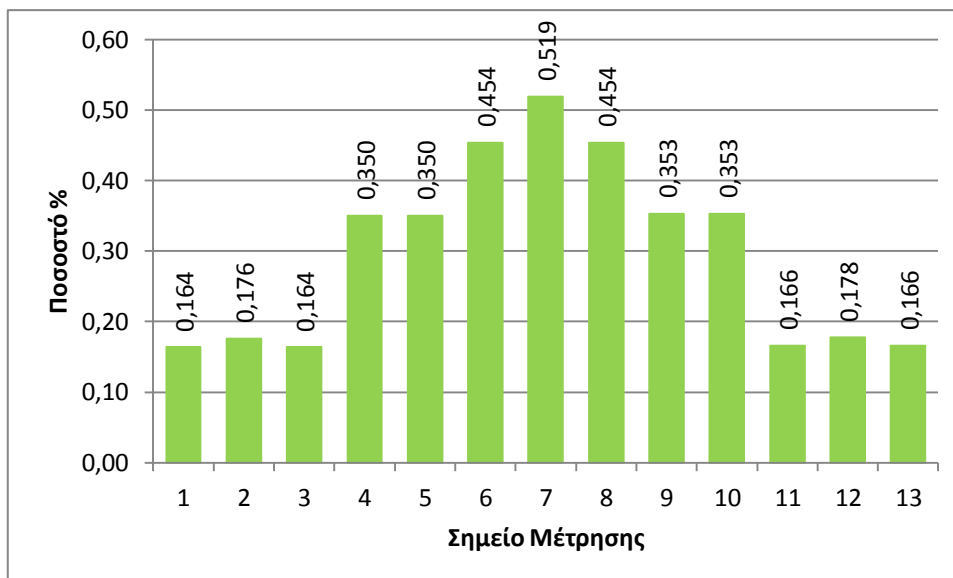
Διάγραμμα 26: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/12 11:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 20000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,215% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



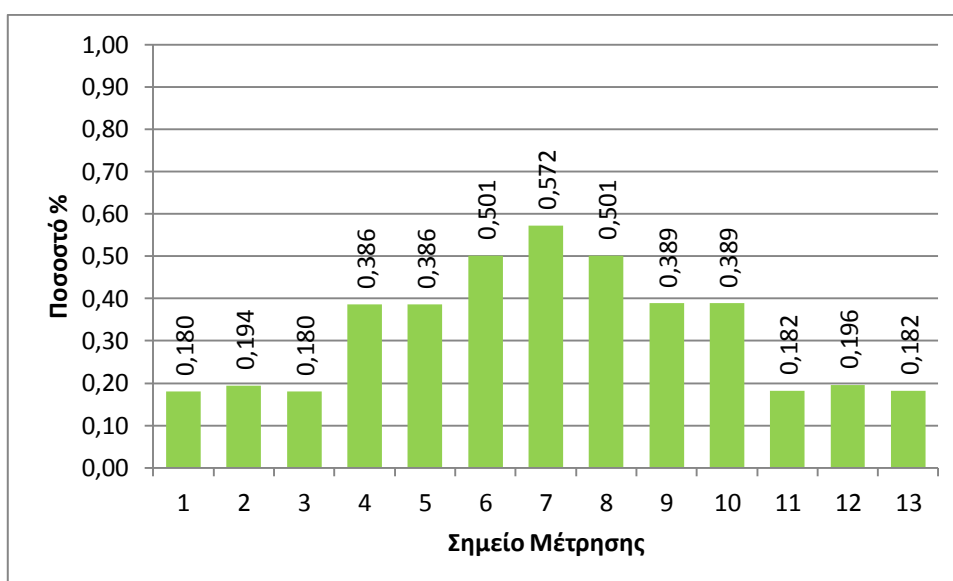
Διάγραμμα 27: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (01/12 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 50000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,155% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



Διάγραμμα 28: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (01/06 10:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 75000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,241% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



Διάγραμμα 29: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (27/05 02:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 100000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,296% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



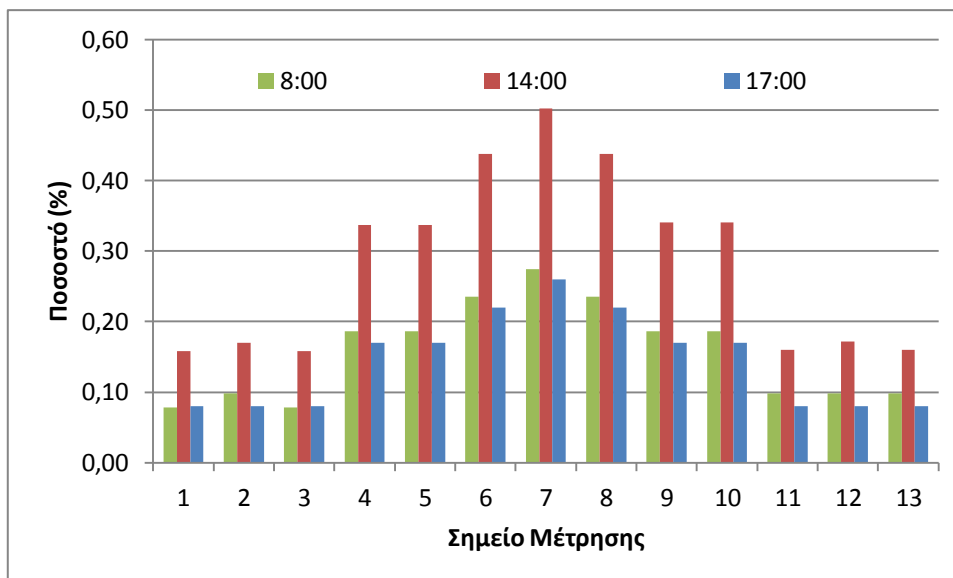
Διάγραμμα 30: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/06 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 108000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,325% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

Από τα πιο πάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι το ποσοστό απόδοσης του φωτοσωλήνα και κατά συνέπεια η ικανότητα του να φωτίσει το δωμάτιο, εξαρτάται από τη θέση του ήλιου στον ουρανό. Αρχικά, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο θόλο του φωτοσωλήνα μεταβάλλεται ανάλογα (αυξάνεται ή μειώνεται) ο αριθμός των ανακλάσεων μέσα στο σωλήνα μεταφοράς. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία τόσο περισσότερες είναι οι ανακλάσεις, άρα και οι απώλειες με συνέπεια να παρατηρείται μικρότερη εσωτερική ακτινοβολία. Ως εκ τούτου, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, τους χειμερινούς μήνες τα ποσοστά απόδοσης της εσωτερικής φωτεινότητας σε σχέση με την εξωτερική είναι μικρότερα από ότι τους θερινούς.

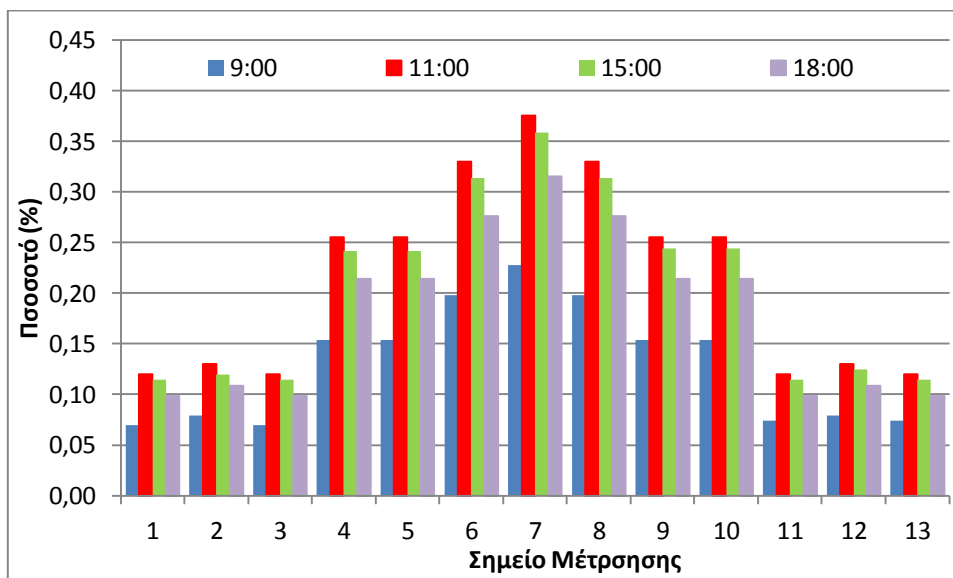
Από τα διαγράμματα αυτά, φαίνεται επίσης και η εξάρτηση της απόδοσης του φωτοσωλήνα από την ένταση ακτινοβολίας. Είναι ξεκάθαρο το γεγονός ότι ίδια τιμή εξωτερικής φωτεινότητας η οποία προέκυψε σε δυο διαφορετικές χρονικές στιγμές δεν θα αποδώσει κάθε φορά τα ίδια ποσοστά εσωτερικής φωτεινότητας. Το μοντέλο λοιπόν είναι σε θέση να προσομοιώσει και τους θερινούς μήνες, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη, αλλά και τους χειμερινούς όπου η ένταση είναι μικρότερη. Για ίδιες τιμές φωτεινότητας, η απόδοση τους θερινούς μήνες είναι μεγαλύτερη λόγω της υψηλότερης έντασης της ακτινοβολίας, κάτι το οποίο συνυπολογίζει το μοντέλο και είναι κατανοητό και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Η επεξεργασία που έγινε καθώς και τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζουν επίσης την εξάρτηση που το μοντέλο συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς του, σε σχέση με τη ώρα της ημέρας. Όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και οι ακτίνες του προσπίπτουν κάθετα στο θόλο του φωτοσωλήνα η απόδοση να είναι μεγαλύτερη, όπως φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα 31 έως 33.

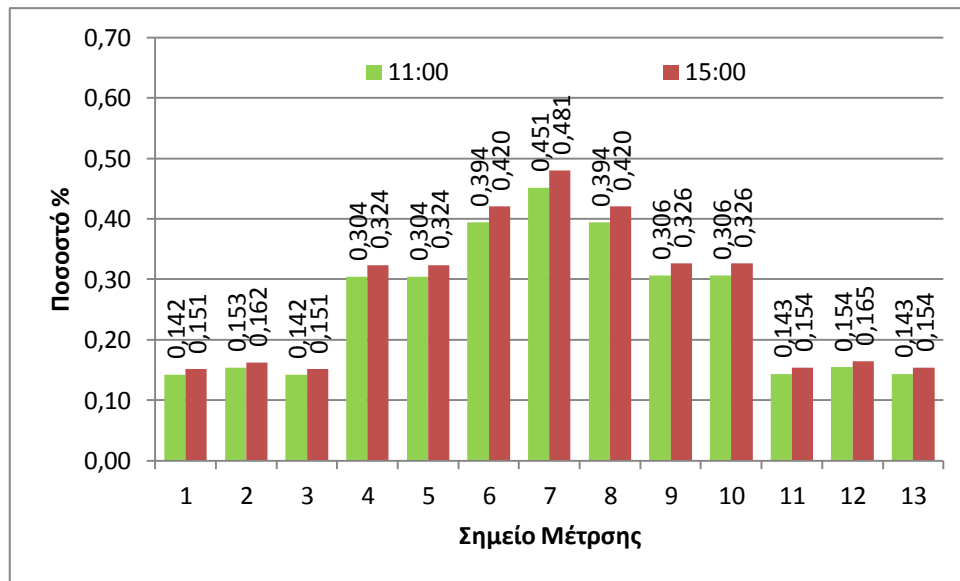
Αναφορικά λοιπόν με τα πιο πάνω, είναι κατανοητό ότι το μοντέλο προσομοίωσης του λογισμικού Energy Plus συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς του τόσο την θέση του ήλιου ανάλογα με την εποχή του χρόνου, αλλά και την θέση του ανάλογα με την ώρα της ημέρας.



Διάγραμμα 31: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 5000lux.

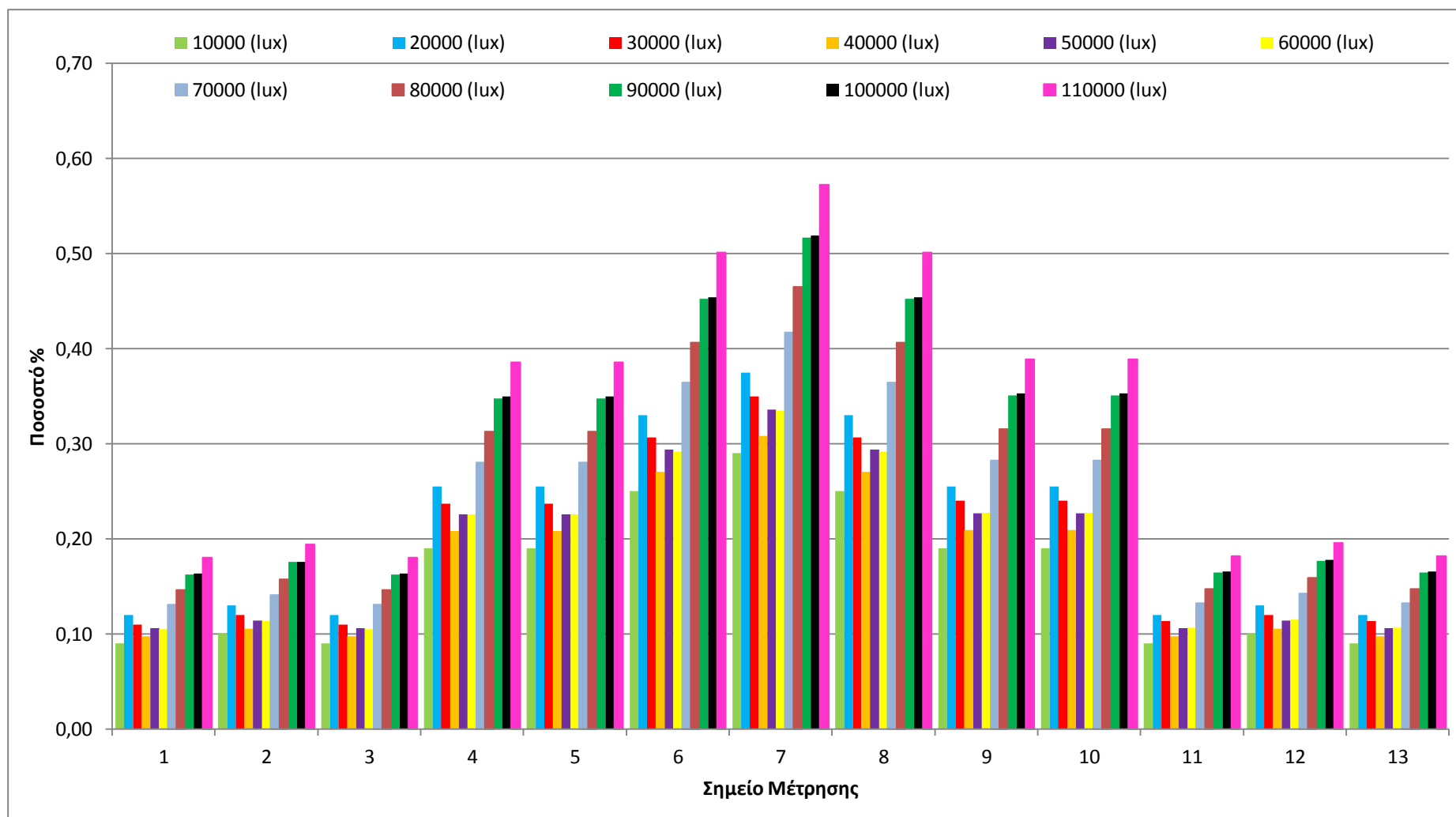


Διάγραμμα 32: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.



Διάγραμμα 33: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 90000lux.

Το πιο κάτω διάγραμμα 24 παρουσιάζει τα ποσοστά εσωτερικής φωτεινότητας σε σχέση με την εξωτερική για όλα τα σημεία μέτρησης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το διάγραμμα αυτό μας δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της εξωτερικής φωτεινότητας, τόσο υψηλότερα είναι τα ποσοστά εσωτερικής φωτεινότητας που αναμένεται να καταγραφούν από τους αισθητήρες μέσα στο δωμάτιο. Επομένως, επιβεβαιώνεται ότι όσο υψηλότερη είναι η εξωτερική φωτεινότητα, τόσο πιο αποδοτικό είναι ένα σύστημα φωτισμού με φωτοσωλήνα.

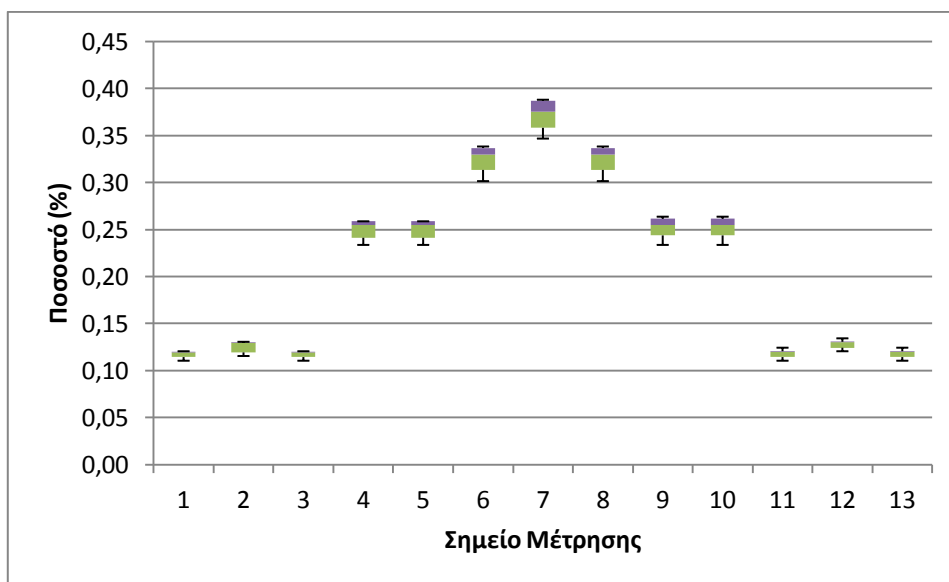


Διάγραμμα 34: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε σημείου μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για δεδομένες τιμές εξωτερικής φωτεινότητας (10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000, 80000, 90000, 100000, 110000 lux).

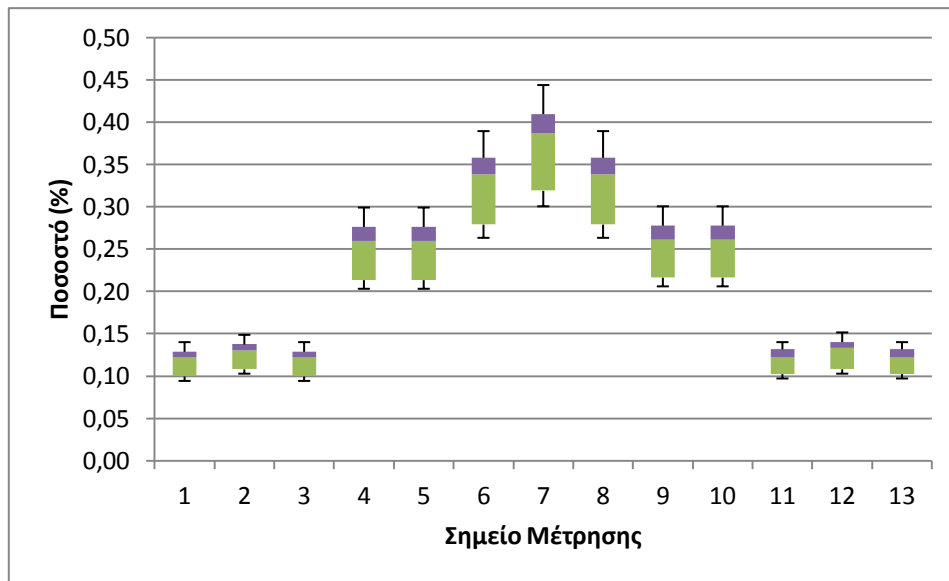
Προσέγγιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με Θηκογράμματα

Στη συνέχεια της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης έγινε προσέγγιση του δείγματος με θηκογράμματα (boxplot). Όπως προέκυψε από τη διαδικασία αυτή και παρουσιάζεται στα πιο κάτω διαγράμματα 35 έως 39, για εξωτερική φωτεινότητα από 20000 έως 35000 lux τα ποσοστά απόδοσης για τα σημεία μέτρησης 1, 2 και 3 (που απέχουν περίπου την ίδια απόσταση από τον κεντρικό σημείο 7) κυμαίνονται από 0,09 έως 0,15%. Το ίδιο ισχύει και για τα σημεία 11, 12 και 13 τα οποία βρίσκονται αντιδιαμετρικά από τα πρώτα. Τα δε ποσοστά για τα σημεία μέτρησης 4, 5 και 9, 10 για τιμές εξωτερικής φωτεινότητας από 20000 έως 35000 lux κυμαίνονται από 0,20 έως 0,30%. Υψηλότερα ποσοστά παρουσιάζονται στα σημεία 6 και 8 με αυτά να κυμαίνονται από 0,26 έως 0,39, ενώ τα μεγαλύτερα ποσοστά αναμένονται στο σημείο 7, κάτω από των φωτοσωλήνα, με αυτά να κυμαίνονται από 0,30 έως 0,44%.

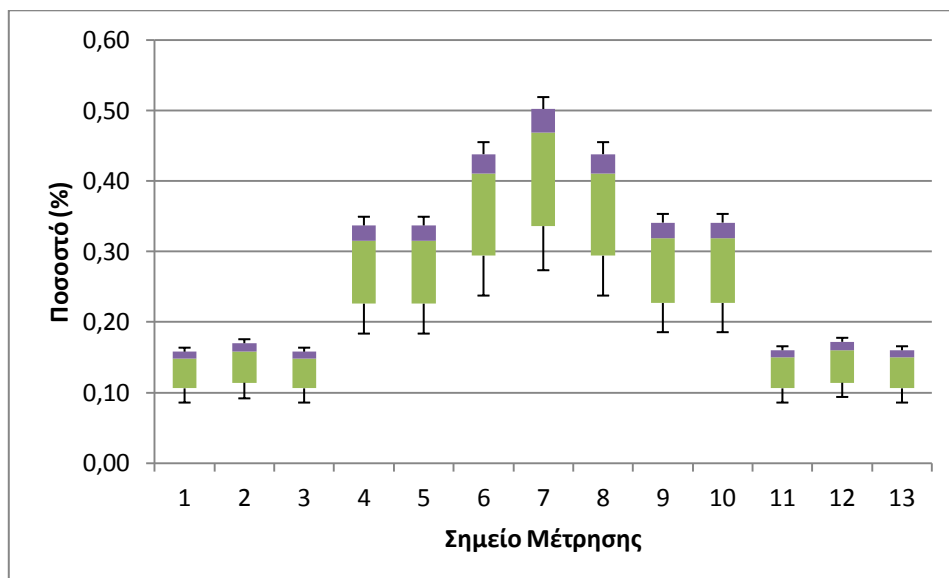
Για μεγαλύτερες τιμές εξωτερικής φωτεινότητας, από 50000 έως 100000 lux τα ποσοστά απόδοσης για τους αισθητήρες 1, 2 και 3 κυμαίνονται από 0,08 έως 0,18%. Τα ίδια ποσοστά παρατηρούνται και από τους αισθητήρες 11, 12 και 13. Τα δε ποσοστά απόδοσης για τα σημεία μέτρησης 4, 5 και 9, 10 για τιμές εξωτερικής φωτεινότητας από 50000 έως 100000 lux κυμαίνονται από 0,18 έως 0,36%. Τα ποσοστά για σημεία 6 και 8 κυμαίνονται από 0,23 έως 0,47%, ενώ τα μεγαλύτερα ποσοστά παρουσιάζονται στο σημείο μέτρησης 7 από 0,27 ως 0,54%.



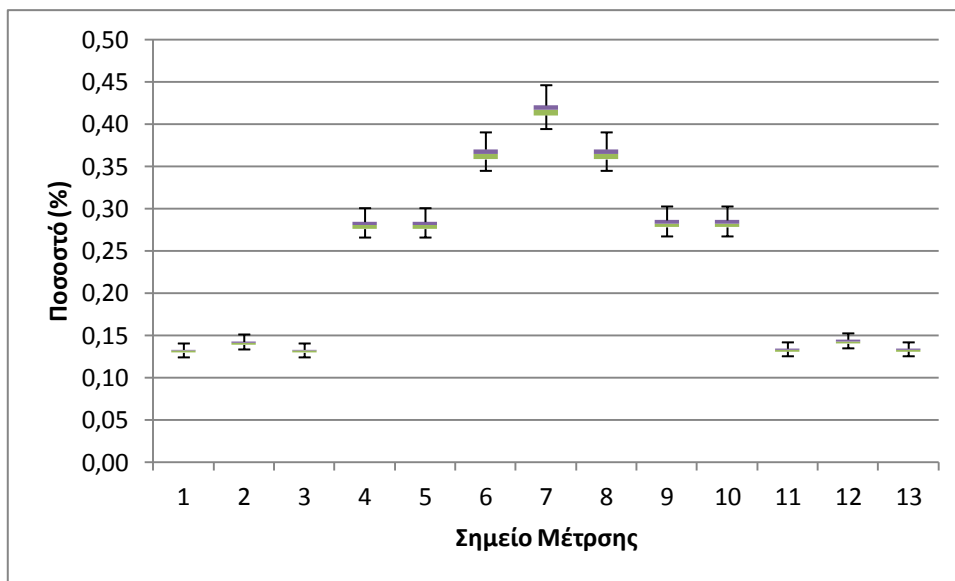
Διάγραμμα 35: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 20000 lux.



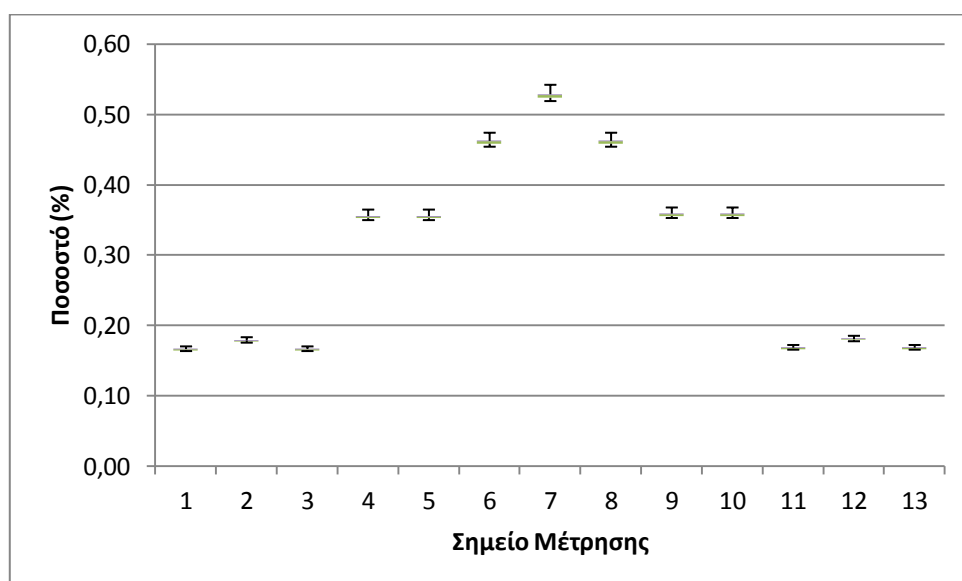
Διάγραμμα 36: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 35000 lux.



Διάγραμμα 37: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 50000 lux.



Διάγραμμα 38: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 75000 lux.



Διάγραμμα 39: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Κατανομή αναμενόμενων τιμών εσωτερικής φωτεινότητας για δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα ίση με 100000 lux.

Τα πιο πάνω διαστήματα προέκυψαν από τυχαία επιλογή δεδομένων για συγκεκριμένες τιμές εξωτερικής φωτεινότητας ανεξάρτητα από την εποχή και την ώρα της ημέρας που παρατηρήθηκαν αυτές.

Συσχετισμός εσωτερικής με εξωτερική φωτεινότητα αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό XLSTAT, έγινε προσπάθεια βάση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από το Energy Plus να εξαχθεί μία εξίσωση για κάθε αισθητήρα, η χρήση της οποίας θα δίνει την τιμή της φωτεινότητας στο συγκεκριμένο σημείο, σύμφωνα με την εξωτερική φωτεινότητα. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης της φωτεινότητας ενός σημείου ή χώρου στον οποίο επιθυμείτε η τοποθέτηση φωτοσωλήνα θεωρητικά, έχοντας μόνο δεδομένο την τιμή της εξωτερικής φωτεινότητας.

Αρχικά έγινε προσέγγιση της μέσης εσωτερικής φωτεινότητας και των δεκατριών σημείων μέτρησης σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα. Η κατανομή του εύρους της μέσης φωτεινότητας που παρατηρήθηκε σε συνάρτηση με τη εξωτερική παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα 40.

Σύμφωνα με την κατανομή αυτή και με χρήση του στατιστικού λογισμικού XLSTAT έγιναν δύο προσεγγίσεις (γραμμική και πολυώνυμη) με στόχο την εξαγωγή εξισώσεων οι οποίες θα «προβλέπουν» την Μέση Εσωτερική Φωτεινότητα (Μ.Ε.Φ.) για δεδομένες τιμές Εξωτερικής Φωτεινότητας (Εξ.Φ.).

Εξίσωση βέλτιστης ευθείας (γραμμική προσέγγιση):

$$(Μ.Φ.) = -14,59 + 0,003 \cdot (Εξ.Φ.) \quad (4.6)$$

με συντελεστή προσδιορισμού:

$$R_{Μ.Φ.}^2 = 0,9428$$

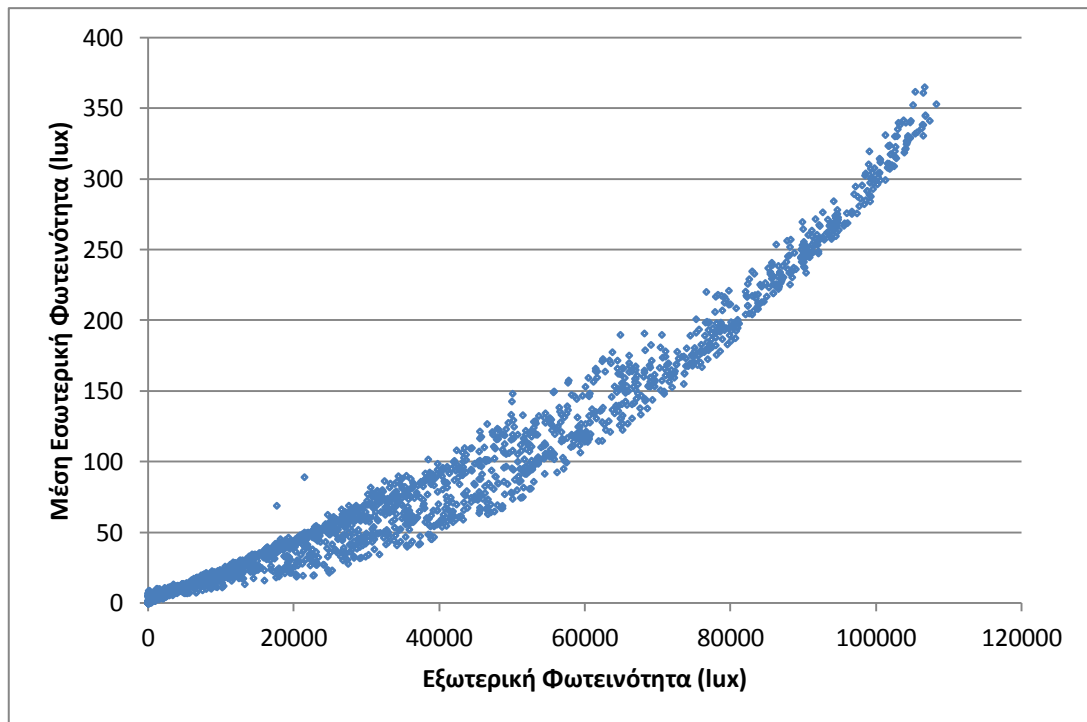
Εξίσωση Πολυωνυμικής Συνάρτησης (πολυωνυμική προσέγγιση 2^{ου} βαθμού):

$$(Μ.Φ.) = 6,60 + 9,44 \cdot 10^{-4} \cdot (Εξ.Φ.) + 1,95 \cdot 10^{-4} \cdot (Εξ.Φ.)^2 \quad (4.7)$$

με συντελεστή προσδιορισμού:

$$R_{Μ.Φ.}^2 = 0,9820$$

Όπως φαίνεται από τους πιο πάνω συντελεστές προσδιορισμού, που προκύπτουν από τις δύο προσεγγίσεις που έγιναν, η πολυωνυμική συνάρτηση 2^{ου} βαθμού προσομοιάζει καλύτερα τα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 40: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Συσχετισμός Εξωτερικής Φωτεινότητας με το μέσο όρο Εσωτερικής Φωτεινότητας όλων των αισθητήρων.

Ακολούθως, έγινε εξαγωγή εξισώσεων για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Για την εξαγωγή των εξισώσεων αυτών λήφθηκαν υπόψη τιμές φωτεινότητας για την χρονική περίοδο από 28 Νοεμβρίου 2014 έως 18 Ιουνίου 2015. Προκειμένου να βρεθεί βέλτιστη λύση στο παρόν θέμα έγινε προσέγγιση με δύο από τα μοντέλα που προσφέρονται από το λογισμικό XLSTAT τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και για τις εξισώσεις μέσης φωτεινότητας. Αρχικά έγινε γραμμική συσχέτιση κάθε εσωτερικού αισθητήρα με τον εξωτερικό για όλο το εύρος τιμών. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και στις δεκατρείς περιπτώσεις ήταν σχεδόν ίσος, με τιμή 0,94. Η τιμή αυτή του συντελεστή προσδιορισμού είναι αρκετά υψηλή, κάτι το οποίο καθιστά το απλό αυτό μοντέλο της γραμμικής εξίσωσης ικανό να προσεγγίσει και να προβλέψει τιμές φωτεινότητας σε κάθε σημείο εσωτερικά. Οι εξισώσεις και οι συντελεστές προσδιορισμού παρουσιάζονται αναλυτικά για κάθε αισθητήρα στον ακόλουθο πίνακα 8.

Συντελεστής Προσδιορισμού	Εξίσωση Βέλτιστης Ευθείας
$R_1^2 = 0,9429$	$S_1 = -8,16 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_2^2 = 0,9411$	$S_2 = -8,64 + 1,63 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_3^2 = 0,9431$	$S_3 = -8,11 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_4^2 = 0,9430$	$S_4 = -17,34 + 3,24 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_5^2 = 0,9431$	$S_5 = -1732 + 3,24 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_6^2 = 0,9431$	$S_6 = -22,53 + 4,21 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_7^2 = 0,9431$	$S_7 = -25,76 + 4,81 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_8^2 = 0,9339$	$S_8 = -22,06 + 4,20 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_9^2 = 0,9430$	$S_9 = -17,48 + 3,27 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_{10}^2 = 0,9350$	$S_{10} = -17,12 + 3,26 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_{11}^2 = 0,9430$	$S_{11} = -8,20 + 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_{12}^2 = 0,9430$	$S_{12} = -8,80 + 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$
$R_{13}^2 = 0,9431$	$S_{13} = -8,20 + 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot (Eξ.Φ.)$

Πίνακας 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εξισώσεις γραμμικής συσχέτισης εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.

Εν συνεχεία, έγινε πολυωνυμική συσχέτιση δευτέρου βαθμού κάθε σημείου μέτρησης εσωτερικά με την εξωτερική φωτεινότητα για όλο το εύρος τιμών. Οι εξισώσεις και οι συντελεστές προσδιορισμού παρουσιάζονται αναλυτικά για κάθε σημείο στον ακόλουθο πίνακα 9. Όπως φαίνεται στον πίνακα αυτό το μοντέλο πολυωνυμική συνάρτηση έχει μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού από το προηγούμενο μοντέλο. Το γεγονός αυτό καθιστά τις εξισώσεις αυτές καταλληλότερες για τον προσδιορισμό της εσωτερικής φωτεινότητας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι έγινε δοκιμή προσέγγισης με πολυωνυμική συνάρτηση μεγαλύτερου βαθμού αλλά η διαφορά στο συντελεστή προσδιορισμού ήταν ελάχιστη ($\leq 0,03\%$). Για το λόγο αυτό προτιμήθηκαν οι συναρτήσεις δευτέρου βαθμού, οι οποίες είναι πιο εύχρηστες, αφού οι αποκλίσεις από συναρτήσεις μεγαλύτερου βαθμού είναι αμελητέες και μας επιτρέπουν την παράληψη αυτή.

Συντελεστής Προσδιορισμού	Εξίσωση Πολυωνυμικής Συνάρτησης
$R_1^2 = 0,9820$	$S_1 = 3,74 + 5,23 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,08 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_2^2 = 0,9805$	$S_2 = 4,21 + 5,55 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,16 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_3^2 = 0,9822$	$S_3 = 3,78 + 5,23 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,08 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_4^2 = 0,9822$	$S_4 = 8,10 + 1,11 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,30 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_5^2 = 0,9823$	$S_5 = 8,12 + 1,11 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,30 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_6^2 = 0,9823$	$S_6 = 10,52 + 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,99 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_7^2 = 0,9823$	$S_7 = 12,01 + 1,66 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 3,42 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_8^2 = 0,9824$	$S_8 = 10,81 + 1,46 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,98 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_9^2 = 0,9823$	$S_9 = 8,17 + 1,12 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,32 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{10}^2 = 0,9738$	$S_{10} = 8,47 + 1,13 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 2,32 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{11}^2 = 0,9823$	$S_{11} = 3,83 + 5,27 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,09 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{12}^2 = 0,9823$	$S_{12} = 4,16 + 5,67 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,17 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$
$R_{13}^2 = 0,9823$	$S_{13} = 3,82 + 5,28 \cdot 10^{-4} \cdot (E\xi.\Phi.) + 1,09 \cdot 10^{-8} \cdot (E\xi.\Phi.)^2$

Πίνακας 9: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Εξισώσεις πολυωνυμικής συσχέτισης δευτέρου βαθμού εσωτερικής φωτεινότητας με την εξωτερική.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την επεξεργασία των μετρήσεων και των διάφορων δοκιμών βρέθηκε μη γραμμικό μοντέλο στο XLSTAT το οποίο παρουσίαζε υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού ($R_1^2 \approx 0,985$). Παρόλα αυτά όμως δεν προτείνεται γιατί το μοντέλο αυτό είναι πολύ πιο πολύπλοκο και δύσχρηστο καθώς συμπεριλαμβάνει πέντε παραμέτρους σε αντίθεση με το πολυωνυμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού το οποίο συμπεριλαμβάνει μόλις τρεις.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοίωση

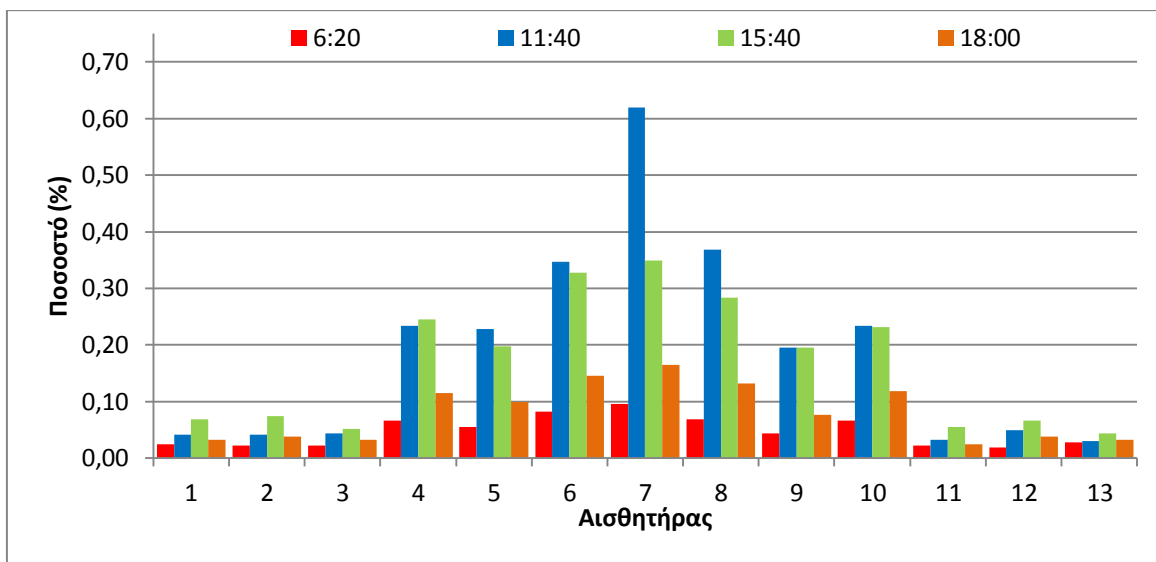
Η όλη επεξεργασία έγινε ξεχωριστά τόσο στις πειραματικές μετρήσεις όσο και στα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την προσομοίωση με το λογισμικό Energy Plus. Σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία αυτή οδηγεί στην εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Καταρχήν, άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός ότι το λογισμικό Energy Plus κατά την προσομοίωση διατηρεί σχεδόν σταθερές τις αποκλίσεις ανάμεσα στις ομάδες των σημείων μέτρησης (ισαπέχοντα από το κέντρο του επιπέδου αναφοράς σημεία) για όλες τις τιμές εξωτερικής φωτεινότητας. Στην πραγματικότητα, οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι οι αποκλίσεις δεν είναι σταθερές, αλλά μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή, την ώρα της ημέρας, αλλά και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Γενικά, η κατανομή φωτός στο χώρο, όπως προκύπτει από την προσομοίωση είναι πιο «ομοιόμορφη» από ότι είναι στην πραγματικότητα. Αυτό το γεγονός, πιθανώς οφείλεται στο ότι το Πρόγραμμα αντιλαμβάνεται το διαχύτη ως ένα τέλειο διαχυτικό σώμα, που εκπέμπει δηλαδή ομοιόμορφα το φως σε όλες τις διευθύνσεις. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, τέλειος διαχύτης δεν υπάρχει, οπότε δε μπορεί να βεβαιωθεί ότι η επιφάνεια που έχει χρησιμοποιηθεί στο πείραμα εκπέμπει ομοιόμορφα το φως. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι, παρά το γεγονός ότι το πείραμα έλαβε χώρα σε όσο το δυνατό πιο ελεγχόμενες συνθήκες ώστε να μην υπάρχουν άλλες πηγές φωτός εκτός από το φωτοσωλήνα, κάποιες αποκλίσεις από τα αναμενόμενα μπορεί να οφείλονται σε λάθη που προέκυψαν από επισκέψεις των μελών της ομάδας στο χώρο του πειράματος και τον επηρεασμό των μετρήσεων (άνοιγμα κουρτινών, σκίαση κάποιων αισθητήρων από τα σώματα των χρηστών, κτλ).

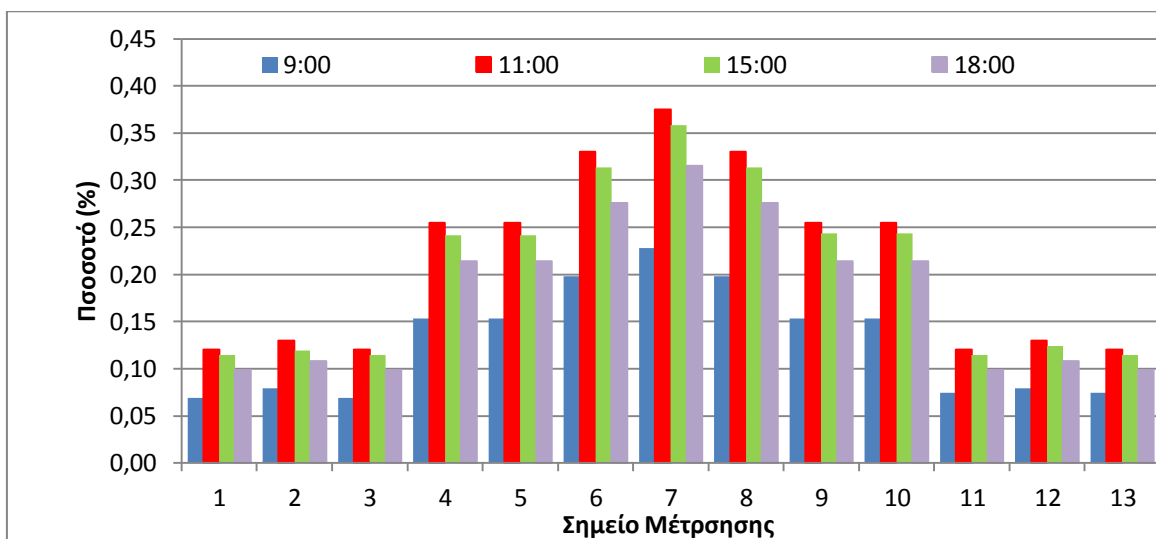
Παρόλα αυτά, τόσο οι πειραματικές μετρήσεις, όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι ακριβώς κάτω από τον φωτοσωλήνα (σημείο μέτρησης 7) παρατηρούνται τα μεγαλύτερα ποσοστά απόδοσης σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα. Αντίθετα, στα άκρα (στα σημεία δηλαδή που απέχουν περισσότερο από το κέντρο) η απόδοση είναι η μικρότερη κάτι το οποίο αποδεικνύεται και στις δύο περιπτώσεις.

Εν συνεχεία λοιπόν, από την πιο πάνω ανάλυση προκύπτει ότι η θέση του ήλιου, ανάλογα με την εποχή και την ώρα της ημέρας, αλλά και η ένταση της ακτινοβολίας του επηρεάζουν αισθητά την απόδοση του φωτοσωλήνα. Από τη επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι φανερό ότι το λογισμικό κατά την προσομοίωση λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες αυτούς που προέκυψαν και από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Για παράδειγμα, για εξωτερική Φωτεινότητα ίση με 20000 lux, το πείραμα έδειξε ότι η μεγαλύτερη τιμή εσωτερικής Φωτεινότητας

καταγράφεται στις 11:40 πμ, σε σχέση με τις 6:20, 15:40 και 18:00. Αντιστοίχως, η προσομοίωση του Energy Plus έδειξε πως οι υψηλότερες τιμές Φωτεινότητας καταγράφονται στις 11:00πμ, σε σχέση με τις 9:00, 15:00 και 18:00 (βλ. διαγράμματα 41 και 42). Η παρατήρηση αυτή, ισχύει για κάθε τυχαία τιμή εξωτερικής φωτεινότητας που εξετάστηκε, άσχετα από τις συνθήκες του ουρανού.

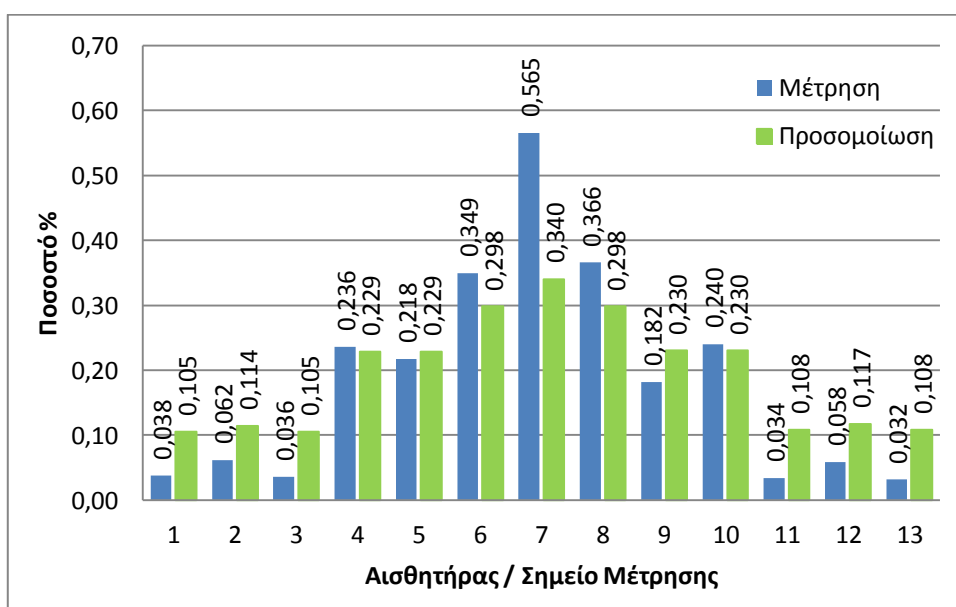


Διάγραμμα 41: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.

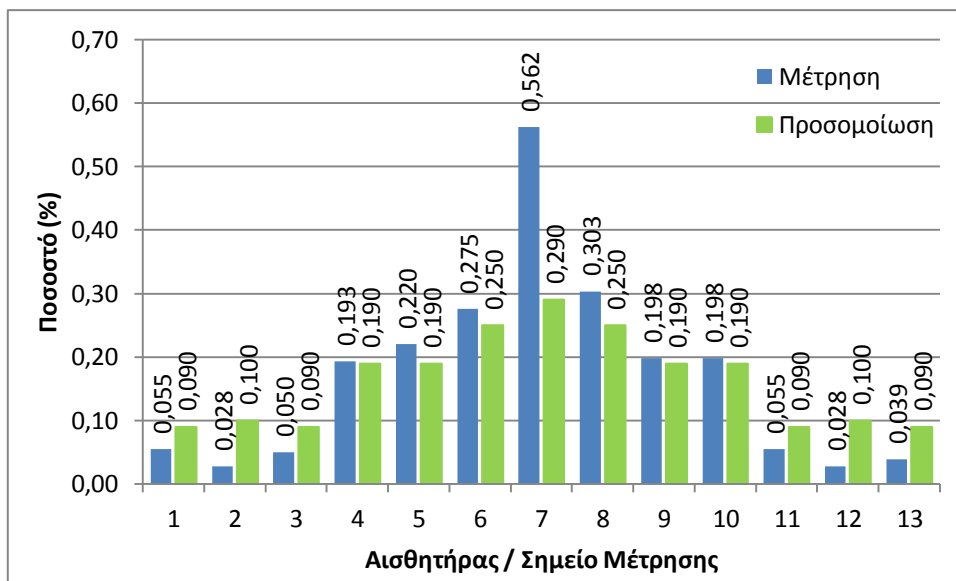


Διάγραμμα 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, με δεδομένη εξωτερική φωτεινότητα 20000lux.

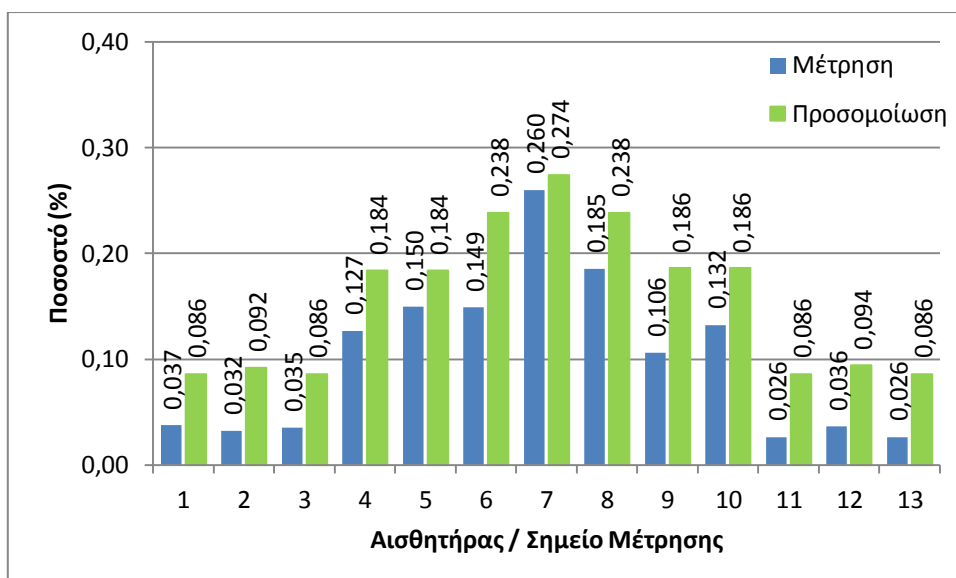
Έχει επίσης παρατηρηθεί, ότι για μια δεδομένη τιμή εξωτερικής φωτεινότητας προκύπτει πολύ καλή συσχέτιση με τις τιμές που καταγράφονται πειραματικά και μέσω προσομοίωσης, εάν η ίδια τιμή εξωτερική φωτεινότητα καταγράφεται την ίδια περίπου περίοδο και στις δύο μεθόδους (περίπου ίδιο μήνα και ώρα). Ως εκ τούτου συμπεραίνεται ότι η προσομοίωση μπορεί να δώσει ένα αποτέλεσμα πολύ κοντά στο πραγματικό. Το γεγονός αυτό καθιστά την προσομοίωση με Energy Plus ικανή να προβλέψει τα επίπεδα φωτισμού σε ένα δωμάτιο το οποίο φωτίζεται με φωτοσωλήνα. Για την επιβεβαίωση του συμπεράσματος αυτού, έγινε σύγκριση του ποσοστού εσωτερικής φωτεινότητας σε σχέση με την εξωτερική για διάφορες τιμές εξωτερικής φωτεινότητας ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση. Η σύγκριση αυτή αναπαρίσταται στα ακόλουθα διαγράμματα 43 έως 47. Περισσότερα διαγράμματα παρατίθενται στο παράρτημα.



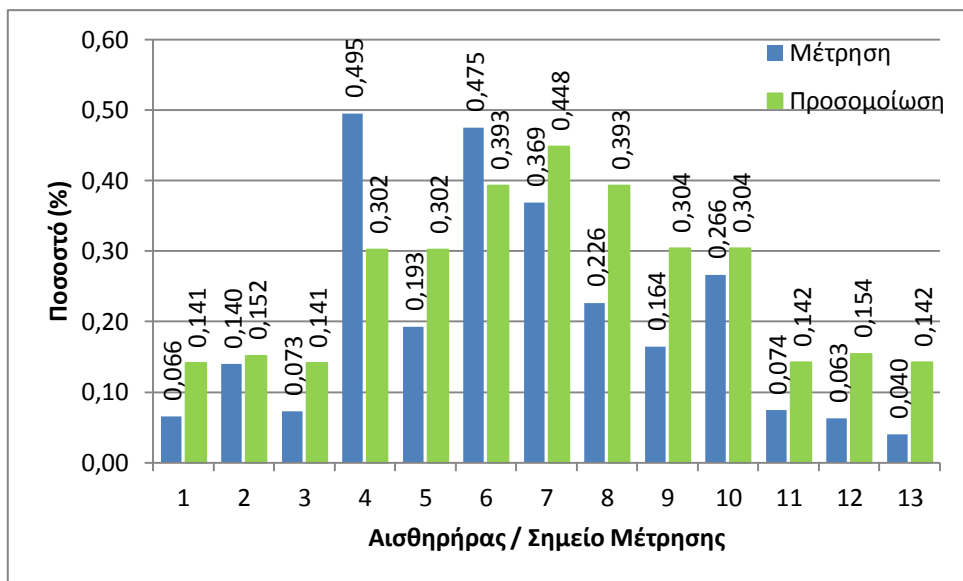
Διάγραμμα 43: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών και τιμών προσομοίωσης εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (9/12 12:00:00μμ). Με 29355,47lux μετρημένη εξωτερική φωτεινότητα και 33200 lux εξωτερική φωτεινότητα για την προσομοίωση.



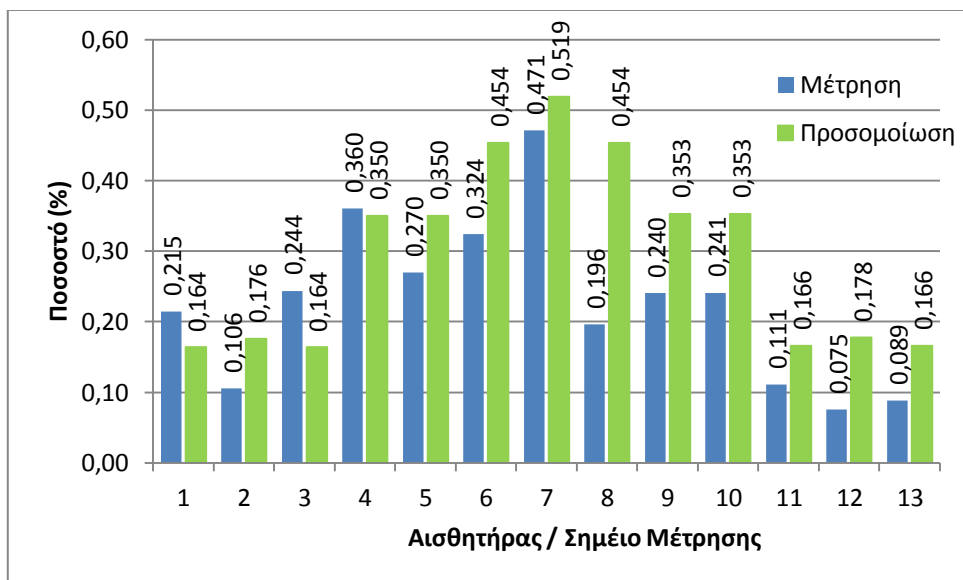
Διάγραμμα 44: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 26/12/2014 1:25:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 9/3 06:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 10000 lux.



Διάγραμμα 45: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 23/12/2014 12:32:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 01/12 12:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 50000 lux.



Διάγραμμα 46: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 11/5/2015 11:26:00πμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 04/05/2015 11:00:00πμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 85000 lux.



Διάγραμμα 47: Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 13/5/2015 1:43:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 27/05/2015 02:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 100000 lux.

Προσεγγίζοντας τα δεδομένα με θηκογράμματα, υπολογίστηκε το εύρος τιμών απόδοσης που καταγράφεται από κάθε αισθητήρα καθώς και το εύρος για κάθε σημείο μέτρησης που προέκυψε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αρχικά, έχει παρατηρηθεί ότι το εύρος τιμών το οποίο παρουσιάζεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πιο μικρό από αυτό των πραγματικών μετρήσεων. Για τιμές εξωτερικής φωτεινότητας από 20000 έως 35000 lux τα επίπεδα απόδοσης για τους αισθητήρες 1, 2, 3, 11, 12 και 13 κυμαίνονται από 0 έως 0,04%, ενώ οι τιμές στα σημεία αυτά όπως έδειξε το λογισμικό Energy Plus κυμαίνονται από 0,09 έως 0,15%. Η διαφορά αυτή αν και μεγάλη, σαν ποσοστό, δεν επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα της εσωτερικής φωτεινότητας καθώς οι τιμές εξωτερικής φωτεινότητας στην οποία παρουσιάζονται τα ποσοστά αυτά είναι μικρές. Σε αυτές τις συνθήκες εξωτερικής φωτεινότητας στα σημεία μέτρησης 4, 5, 9 και 10 αναμένεται απόδοση από 0,20 έως 0,30%, ενώ το καταγεγραμμένο ποσοστό είναι 0,06 έως 0,19%. Για τα σημεία 6 και 8 το αναμενόμενο εύρος απόδοσης είναι 0,11 έως 0,37% ενώ αυτό καταγράφεται σε επίπεδα από 0,26 έως 0,39%. Στις δύο αυτές ομάδες παρατηρούνται διαφορές και αποκλίσεις στο αναμενόμενο εύρος το οποίο δίνει η προσομοίωση και στο καταγεγραμμένο με τα ποσοστά της προσομοίωσης να είναι πιο υψηλά. Το σημείο μέτρησης 7 παρουσιάζει σύμφωνα με την προσομοίωση το μικρότερο εύρος με τα μεγαλύτερα ποσοστά, από 0,30 έως 0,40%. Στη πραγματικότητα όμως, οι τιμές που καταγράφηκαν έδωσαν εύρος απόδοσης για τον αισθητήρα 7 από 0,16 έως 0,62%. Το μεγάλο αυτό εύρος τιμών απόδοσης που έδωσε ο αισθητήρας 7 οφείλεται στο πλήθος των διάφορων παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν την απόδοση του φωτοσωλήνα αλλά και σε αυτούς που μπορεί να επηρεάσουν την μέτρηση της φωτεινότητας από τον αισθητήρα.

Για τιμές εξωτερικής φωτεινότητας από 50000 έως 100000 lux τα επίπεδα απόδοσης για τους αισθητήρες 1, 2, 3, 11, 12 και 13 κυμαίνονται από 0,02 έως 0,24%, ενώ τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κυμαίνονται σε εύρος από 0,08 έως 0,18%. Στη περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι το μοντέλο «υποτιμά» τα επίπεδα φωτισμού. Στις συγκεκριμένες συνθήκες εξωτερικής φωτεινότητας στα σημεία μέτρησης 4, 5, 9 και 10 αναμένεται απόδοση από 0,18 έως 0,36% ενώ το καταγεγραμμένο ποσοστό είναι 0,06 έως 0,36%. Για τα σημεία 6 και 8 το αναμενόμενο εύρος απόδοσης είναι 0,23 έως 0,47%, ενώ αυτό καταγράφεται σε επίπεδα από 0,11 έως 0,33%. Στις δύο αυτές ομάδες παρατηρούνται διαφορές και αποκλίσεις στο αναμενόμενο εύρος το οποίο δίνει η προσομοίωση και στο καταγεγραμμένο με τα ποσοστά της προσομοίωσης να είναι πιο υψηλά. Στο σημείο κάτω από τον διαχύτη ο αισθητήρας 7 καταγράφει τιμές με απόδοση από 0,14 έως 0,47. Η προσομοίωση του όμως δίνει εύρος από 0,27 έως 0,54.

Άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός ότι, όταν αυξήθηκαν οι τιμές της εξωτερικής φωτεινότητας αυξήθηκε και το εύρος τιμών για όλους του αισθητήρες. Η αύξηση αυτή παρατηρείται και στα πειραματικά αποτελέσματα άλλα και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς τέτοιες πιο υψηλές τιμές

εξωτερικής φωτεινότητας, καταγράφονται σε διάφορες χρονικές στιγμές με διαφορετικές συνθήκες καιρού/ουρανού.

Στην προσπάθεια προσέγγισης των επιπέδων φωτισμού σε κάθε σημείο μέτρησης εξήχθησαν γραμμικές και πολυωνυμικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τα επίπεδα φωτισμού στα σημεία αυτά σύμφωνα με την εξωτερική φωτεινότητα. Από τα αποτελέσματα αποδείχτηκε ότι οι πολυωνυμικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού μπορούν να προσομοιάσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα επίπεδα φωτισμού και στα δεκατρία σημεία στα οποία είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα υψηλότερα ποσοστά στους συντελεστές προσδιορισμού που προέκυψαν από τις εξισώσεις αυτές.

Γενικά, αν κάποιος ζητούσε την απόδοση του φωτοσωλήνα, σε συνθήκες καιρού/ουρανού της Ελλάδας - Αθήνας και για τη διάταξη του χώρου του πειράματος (μέγεθος χώρου και ύψος μεταξύ επιπέδου αναφοράς και οροφής) θα ήμασταν με θέση να απαντήσουμε ότι σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα η απόδοση του φωτοσωλήνα είναι κατά μέσο όρο 100 lux ή 0,16% της εξωτερικής φωτεινότητας. Οι αντίστοιχες τιμές που θα ανέμενε κάποιος από το εργαλείο Energy Plus θα ήταν κατά μέσο όρο 123 lux ή 0,23% της εξωτερικής Φωτεινότητας.

5.2. Σύγκριση απόδοσης φωτοσωλήνα με προβλεπόμενα επίπεδα φωτισμού από το πρότυπο ΕΛΟΤ

Σε κάθε χώρο (δωμάτιο) ανάλογα με την χρήση για την οποία αυτός προορίζεται οφείλουν να πληρούνται κάποια ελάχιστα επίπεδα φωτισμού. Για τους χώρους εργασίας, τα επίπεδα αυτά έχουν οριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση και τυποποιήθηκαν από τον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης στο Πρότυπο: Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places (EN 12464 - 1:2002 E).

Σύμφωνα με το Πρότυπο τα επίπεδα φωτεινότητας σε ένα γραφείο κυμαίνονται από 200 έως 750 lux ανάλογα με την εργασία ή δραστηριότητα η οποία εκτελείται στο συγκεκριμένο δωμάτιο (βλ. πίνακας 10). Για ένα δωμάτιο στο οποίο για παράδειγμα εκτελείται απλή γραφειακή δουλειά (γραφή, δακτυλογράφηση, ανάγνωση, επεξεργασία δεδομένων) τα επίπεδα φωτισμού πρέπει να ανέρχονται στα 500 lux.

Θέτοντας τα 20000 lux ως ελάχιστη τιμή εξωτερικής φωτεινότητας, με την οποία μπορούν να καλυφθούν κάποιες υποτυπώδεις ανάγκες ενός δωματίου χωρίς τεχνητό φωτισμό, υπολογίστηκε η μέση φωτεινότητα που δίνει ο φωτοσωλήνας του πειράματος σε ένα χώρο με τις ίδιες διαστάσεις όπως αυτός του πειράματος. Η μέση φωτεινότητα

εντός του δωματίου, όπως αυτή προέκυψε από τις καταγραφές και των δεκατριών αισθητήρων (για φωτεινότητα μεγαλύτερη των 20000 lux) ανέρχεται στα 100 lux. Επομένως, για ένα χώρο με τα ίδια τετραγωνικά όσα και αυτά που καλύπτουν οι αισθητήρες 1 έως 13 και στο οποίο εκτελείται απλή γραφειακή δουλειά (γραφή, δακτυλογράφηση, ανάγνωση, επεξεργασία δεδομένων) τα επίπεδα φωτισμού καλύπτονται κατά 20% .

Οι δε κεντρικοί αισθητήρες (4 έως 10) καταγράφουν μόνοι τους μέση εσωτερική φωτεινότητα 150 lux με τα επίπεδα κάλυψης φωτισμού να ανέρχονται στο 30%.

Η κάλυψη των επιπλέον αναγκών του δωματίου, θα μπορούσε να καλυφθεί είτε με τεχνητό φωτισμό είτε με την τοποθέτηση μεγαλύτερου αριθμού φωτοσωλήνων. Αν θεωρήσουμε ότι σε κάποια σημεία (1, 2,3, 11, 12 και 13) η φωτεινότητα θα προέρχεται από 2 φωτοσωλήνες και υπάρχει αλληλοκάλυψη φωτισμού, η φωτεινότητα θα ενισχύεται. Άρα το εμβαδό ενδιαφέροντος είναι αυτό που καλύπτεται από τους κεντρικούς αισθητήρες (4 έως 10) οι οποίοι καταγράφουν ποσοστό απόδοσης 30%. Συνεπώς, με 4 φωτοσωλήνες το δωμάτιο θα μπορούσε να καλύψει εξολοκλήρου τις ανάγκες του σε φωτισμό εξοικονομώντας ενέργεια ενώ ταυτόχρονα το φυσικό φως θα προσφέρει καλύτερες συνθήκες εργασίας στους εργαζομένους.

ΓΡΑΦΕΙΑ		
	Τύπος εσωτερικής εργασίας ή δραστηριότητας	Επίπεδα φωτισμού (lux)
1	Αρχειοθέτηση, φωτοτύπηση	300
2	Γραφή, δακτυλογράφηση, ανάγνωση, επεξεργασία δεδομένων	500
3	Τεχνικός σχεδιασμός	750
4	Εργασία τύπου CAD	500
5	Αίθουσες συνεδρίων και συσκέψεων	500
6	Ρεσεψιόν	300
7	Αίθουσα αρχείων	200

Πίνακας 10: Απόσπασμα από πρότυπο ΕΛΟΤ σύμφωνα με τις απαιτήσεις φωτισμού σε εσωτερικούς χώρους, ανάλογα με τα καθήκοντα και τις δραστηριότητες που εκτελούνται σε αυτούς.

5.3. Αξιολόγηση της οικονομικότητας του συστήματος φωτισμού

Η αξία ενός φωτοσωλήνα, σύμφωνα με πρόσφατες οικονομικές προσφορές είναι γύρω στα 350 με 710 ευρώ, πλέον ΦΠΑ. Η πρώτη τιμή αναφέρεται σε ένα φωτοσωλήνα με σωλήνα μήκους 0,60m. Για κάθε 60εκ. Μήκους σωλήνα θα πρέπει να προστίθενται 50 ευρώ. Η τιμή των 710 ευρώ αντιστοιχεί στο ίδιο σύστημα με προσθήκη του κόστους του μηχανισμού συσκότισης, που είναι πολύ χρήσιμος σε περιπτώσεις εγκατάστασης του φωτοσωλήνα σε υπνοδωμάτια.

Άρα, για μια εφαρμογή σε ένα πραγματικό κτίριο, στο οποίο ο σωλήνας θα έπρεπε να διασχίσει έναν όροφο ύψους 3,00m, χωρίς την προσθήκη μηχανισμού συσκότισης, το κόστος αναλύεται ως ακολούθως:

Αξία φωτοσωλήνα με σωλήνα μήκους 0,60m = 350 ευρώ

Αξία τμημάτων σωλήνα μήκους 0,60m = 4 x 50 ευρώ=200 ευρώ

Αξία εργασίας τοποθέτησης (εκτιμώμενη για τοποθέτηση σε νέα κατασκευή) = 200 ευρώ

Σύνολο κόστους με ΦΠΑ (23%) = **922,50 ευρώ.**

Προκειμένου να υπολογιστεί ενδεικτικά μια περίοδο αποπληρωμής του συστήματος, θα υπολογιστεί τι ποσοστό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό θα εξοικονομούνταν, αν υπήρχε ένας φωτοσωλήνας σε ένα χώρο γραφείου εμβαδού 5,2m² (ίσο με το χώρο που καταλαμβάνουν οι αισθητήρες στο πείραμα), για εξωτερικές συνθήκες φωτεινότητας περίπου 65000 lux. Η τιμή αυτή προέκυψε σαν μέσο όρο των τιμών εξωτερικής φωτεινότητας που καταγράφηκε στο πείραμα, για τιμές μεγαλύτερες των 20000 lux, τιμή που θεωρείται η κατώτατη τιμή κάτω από την οποία ο χρήστης θα ανάψει οπωσδήποτε τον τεχνητό φωτισμό.

Αν το γραφείο δε διέθετε καμία πηγή φυσικού φωτισμού, οι χρήστες θα απαιτούνταν να ανάβουν τα φώτα για όλη τη διάρκεια της εργασίας τους. Οι υποθέσεις που κάνουμε είναι οι ακόλουθες:

Απαιτούμενα επίπεδα φωτός: 500 lux

Εργάσιμες ώρες ανά ημέρα: 8 h

Εργάσιμες ημέρες ανά έτος: 260 ημέρες

Εγκατεστημένη ισχύς για φωτισμό: 16W/m² (σύμφωνα με τις απαιτήσεις του KENAK)

Κόστος kWh: 0,14 €/ kWh (Τιμολόγιο Γ21 Γενική Χρήση 2015)

Άρα, το γραφείο απαιτεί 174,72 kWh/y για το τεχνητό φωτισμό, χωρίς την ύπαρξη πηγών φυσικού φωτός. Αυτές οι kWh χρεώνονται 24,46 €/y. Αυτή η τιμή είναι πολύ χαμηλή

καθώς το σύστημα φωτισμού που έχει εγκατασταθεί είναι αρκετά οικονομικό και ο χώρος μικρός.

Για τη μέση τιμή εξωτερικής Φωτεινότητας 65000 lux, η μέση τιμή εσωτερικής Φωτεινότητας ανέρχεται στα 93 ως 100 lux. Αυτό δείχνει ότι το ένα πέμπτο της καταναλισκόμενης ενέργειας μπορεί να εξασφαλίζεται από τη χρήση του φωτοσωλήνα, αν υπάρχει κατάλληλο σύστημα ρύθμισης των φωτιστικών σύμφωνα με το διαθέσιμο φυσικό φως. Αυτό εξοικονομεί περίπου 5 ευρώ ανά έτος, ποσό που κάνει το σύστημα φαινομενικά ασύμφορο και πιθανώς μη αποσβέσιμο μέσα στη διάρκεια ζωής του κτιρίου (απόσβεση σε 184 έτη). Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δε λαμβάνει υπόψη τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του φωτοσωλήνα και την θετική ανταπόκριση των χρηστών, όπως έχει αποδειχθεί από διάφορες μελέτες.

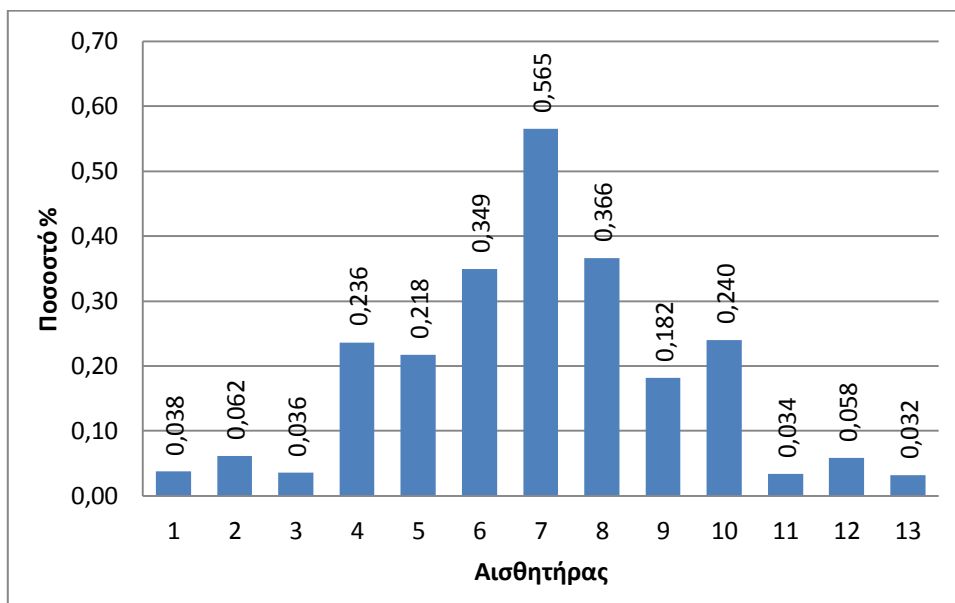
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: Robert Bean, Lighting: interior and exterior, by Architectural Press, 2004
- [2]: CIE Technical Report 173:2006, Tubular Daylight Guidance Systems
- [3]: Αικατερίνη Τσικαλουδάκη, Διδακτορική διατριβή: Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την εκτίμηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού στο εξωτερικό περιβάλλον και στο εσωτερικό των κτιρίων και μελέτη των κύριων παραμέτρων επιρροής του φωτισμού, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη 2003.
- [4]: Peter G. Ellis, Richard K. Strand and Kurt T. Baumgartner, Simulation of Tubular daylighting devices and daylighting shelves in Energy Plus, SimBuild 2004, IBPSA-USA National Conference, Boulder, CO.
- [5]: Κώστας Μαθιός, Φώς & Τεχνητός Φωτισμός: Η 4η διάσταση του χώρου, περιοδικό ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ, 1997
- [6]: Ιστοσελίδα Meteo: www.meteo.gr : Οι κινήσεις της γης
- [7]: Energy Plus Engineering Reference, The Reference to Energy Plus Calculations, September 25, 2014
- [8]: Σημειώσεις Μαθήματος: Εργαστήριο αρχιτεκτονικού σχεδιασμού & Ερευνών III, Ηλιασμός, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Δ.Π.Θ
- [9]: Αρχιτέκτων Νικόλαος Μοσκοφίδης, Τα Ποιοτικά Χαρακτηριστικά του Φυσικού φωτός, Νοέμβριος 2008
- [10]: Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Διαλέξεις Μαθήματος: Ηλιακή Ενέργεια - Ηλιακή Γεωμετρία, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης
- [11]: Σημειώσεις μαθήματος Φυσικής: Φωτομετρικά μεγέθη – πολική κατανομή φωτοβολίας, Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Τμήμα Φυσικής Χημείας
- [12]: Βασιλακοπούλου Κωνσταντίνα, Φωτισμός: Διδακτική Ενότητα 1. Εισαγωγή, Πρόγραμμα Συμπληρωματικής Εκπαίδευσης, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- [13]: Βασιλακοπούλου Κωνσταντίνα, Φωτισμός: Διδακτική Ενότητα 2. Φυσικός Φωτισμός, Πρόγραμμα Συμπληρωματικής Εκπαίδευσης, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- [14]: Βασιλακοπούλου Κωνσταντίνα, Φωτισμός: Διδακτική Ενότητα 3. Τεχνητός Φωτισμός, Πρόγραμμα Συμπληρωματικής Εκπαίδευσης, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- [15]: Βασιλακοπούλου Κωνσταντίνα, Φωτισμός: Διδακτική Ενότητα 4. Στρατηγικές Φωτισμού, Πρόγραμμα Συμπληρωματικής Εκπαίδευσης, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- [16]: Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings: Technologies and solutions development of retrofitting, University of Athens, Julie 2014
- [17]: Holistic energy-efficient retrofitting of residential buildings: Results of laboratory testing of technologies and solutions, University of Athens, Julie 2014

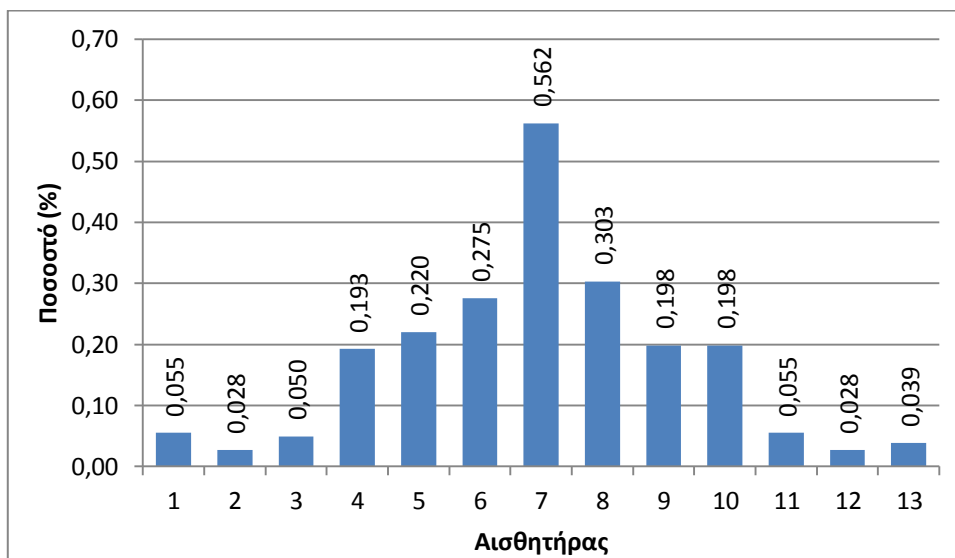
- [18]: Ιστοσελίδα Electrical Known: <http://www.electrical-knowhow.com/> :Point by Point Method for Lighting Design
- [19]: David Jenkins, Tariq Muneer, Light-pipe prediction methods, Applied Energy, 28 January 2004
- [20]: Konstantina Vasilakopoulou, Afroditi Synnefa, Dionisia Kolokotsa, Theoni Karlessi, Mattheos Santamouris, Development of an Algorithm for Predicting the Performance and Optimizing the Design of an Energy Efficient Lighting System.
- [21]: Στάθης Κ. Ζαπίτης, Προσομοίωση Υβριδικών Φωτοβολταϊκών Θερμικών συστημάτων νερού με χρήση λογισμικού Energy Plus, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα 2010
- [22]: Δρ. Μερέση Κατερίνα, Διάλεξη: Φυσικός Φωτισμός - Φυσικό φως και Αρχιτεκτονική, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [23]: Χριστοφοράκη Μαρία, Εξοικονόμηση ενέργειας και οπτική άνεση κτιρίων με χρήση φωτοσωλήνων, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης: Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά 2014
- [24]: Ιστοσελίδα Solarlight: <http://www.solarlight.gr/>
- [25]: Ιστοσελίδα Green Diary: <http://www.greendiary.com/>
- [26]: Ιστοσελίδα Macon: <http://macon100.rssing.com/>
- [27]: Ιστοσελίδα: <https://www.xlstat.com/>
- [28]: Ιστοσελίδα: <http://el.softwaresea.com/>
- [29]: Ιστοσελίδα Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/wiki>
- [30]: Ιστοσελίδα Olympic engineering & consulting: <http://www.oleng.eu/>: Οικιακός φωτισμός LED
- [31]: Ιστοσελίδα Wild Water Wall: <https://sites.google.com/site/wildwaterwall/archike>
- [32]: Νικόλαος Ευθ. Πάνος, Προσομοίωση Συνθηκών Φωτισμού σε Σήραγγες με το Λογισμικό Radiance, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Αθήνα 2007
- [33]: Ιστοσελίδα: <http://statistics.scientist.gr/>

VIII. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

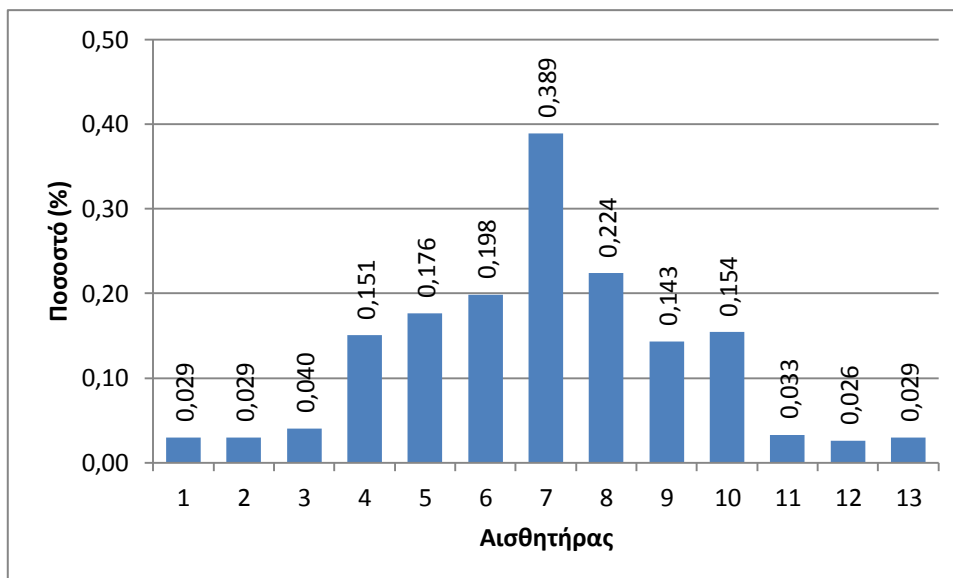
α. Διαγράμματα πειραματικών αποτελεσμάτων



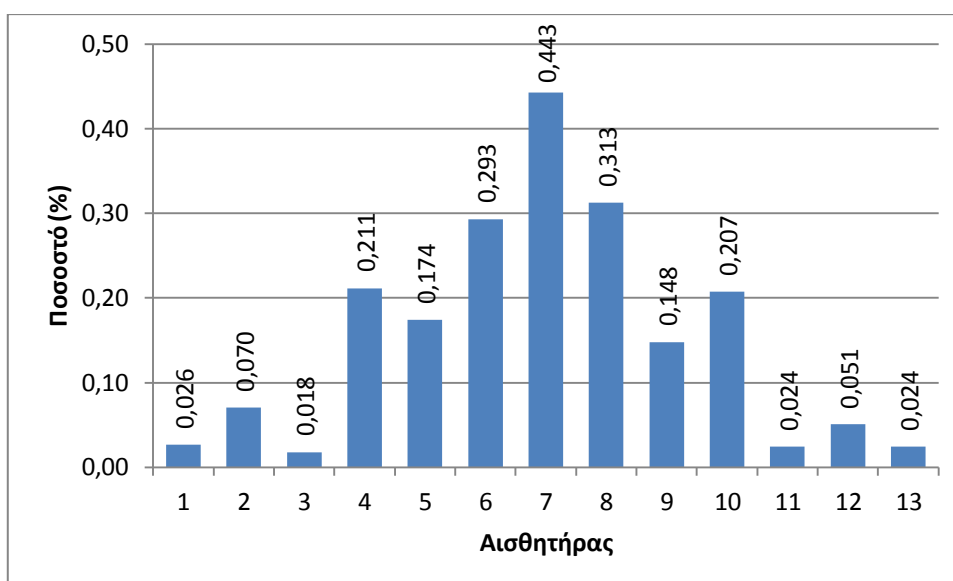
Διάγραμμα 48: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (9/12/2014 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 29355,47lux (Νεφοσκεπής Ουρανός). Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,186% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



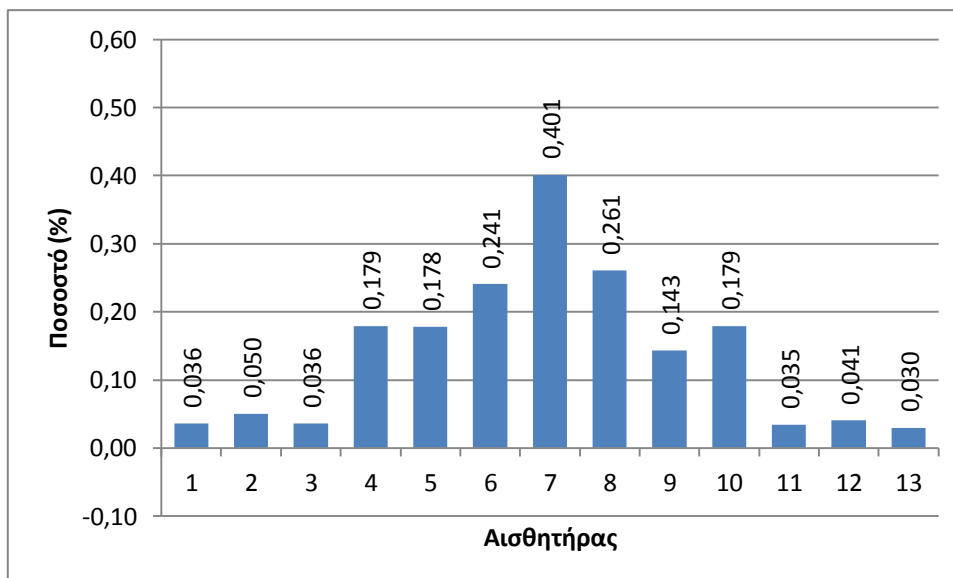
Διάγραμμα 49: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (26/12/2014 1:25:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 10000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,170% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



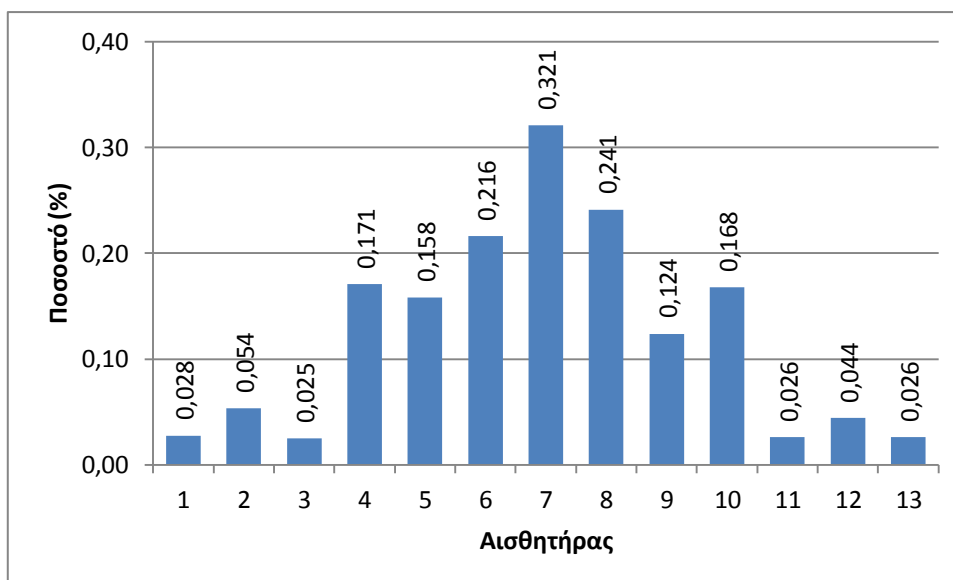
Διάγραμμα 50: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική (7/12/2014 8:51:00πμ) στιγμή με εξωτερική φωτεινότητα 15000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,123% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



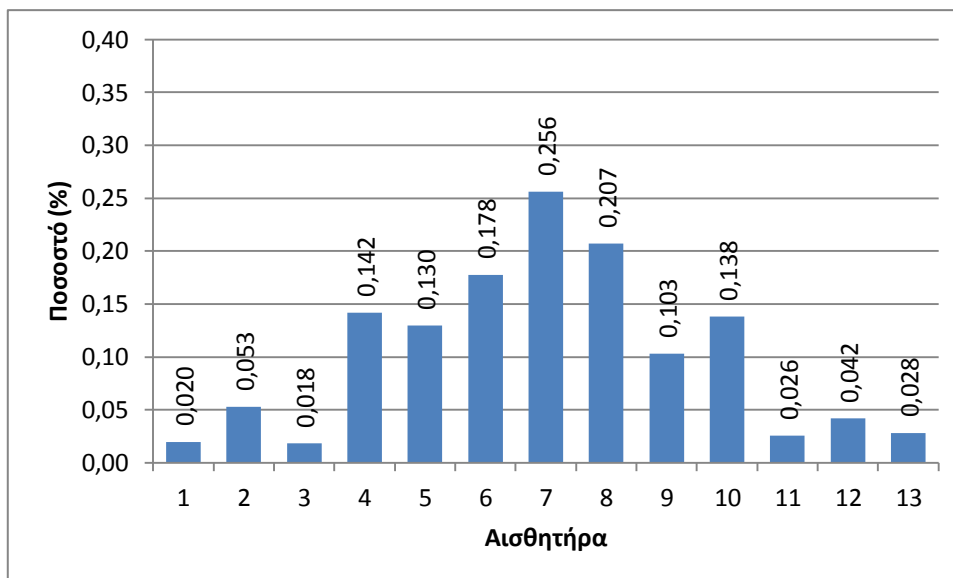
Διάγραμμα 51: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική (7/12/2014 11:25:00πμ) στιγμή με εξωτερική φωτεινότητα 25000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,154% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



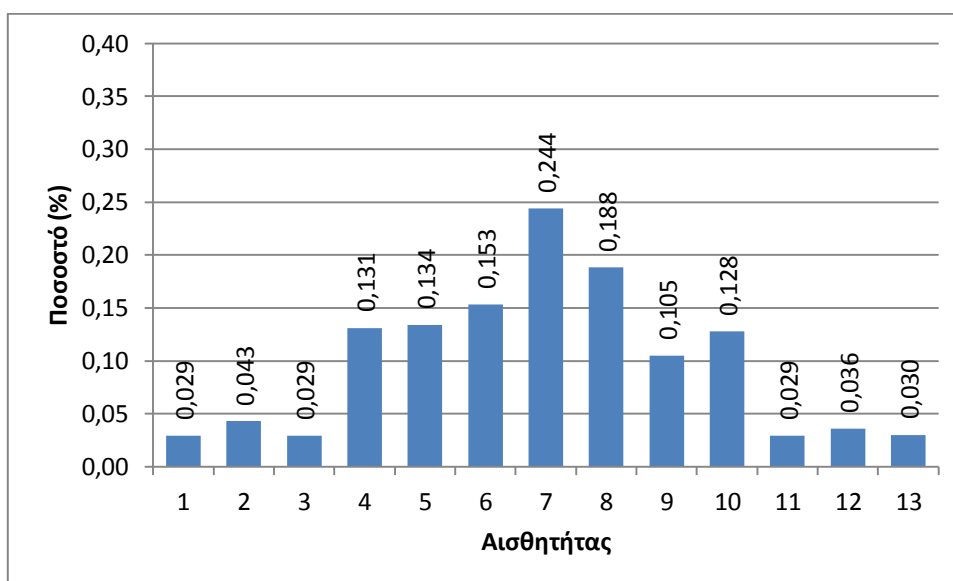
Διάγραμμα 52: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (27/12/2014 12:21:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 35000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,139% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



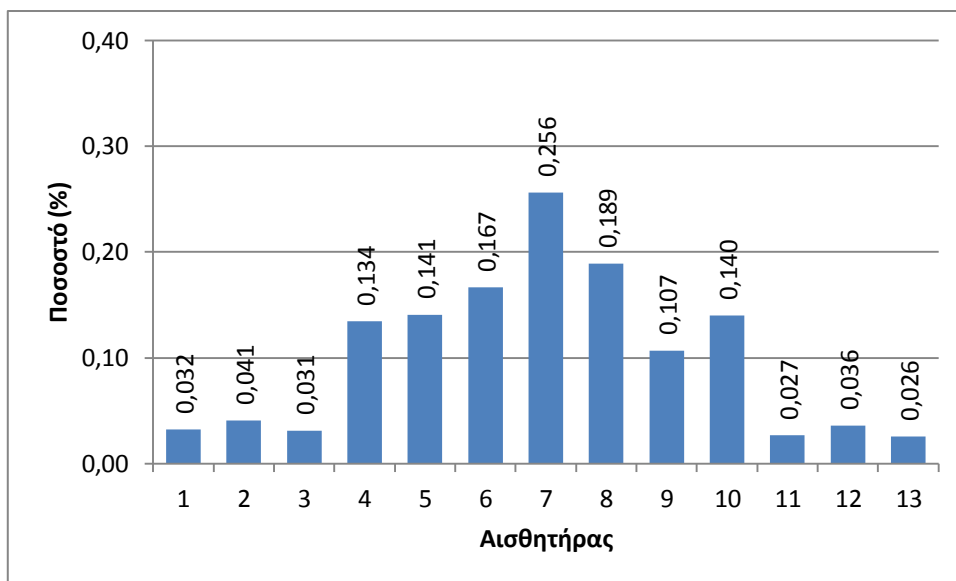
Διάγραμμα 53: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (3/12/2014 1:29:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 40000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,123% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



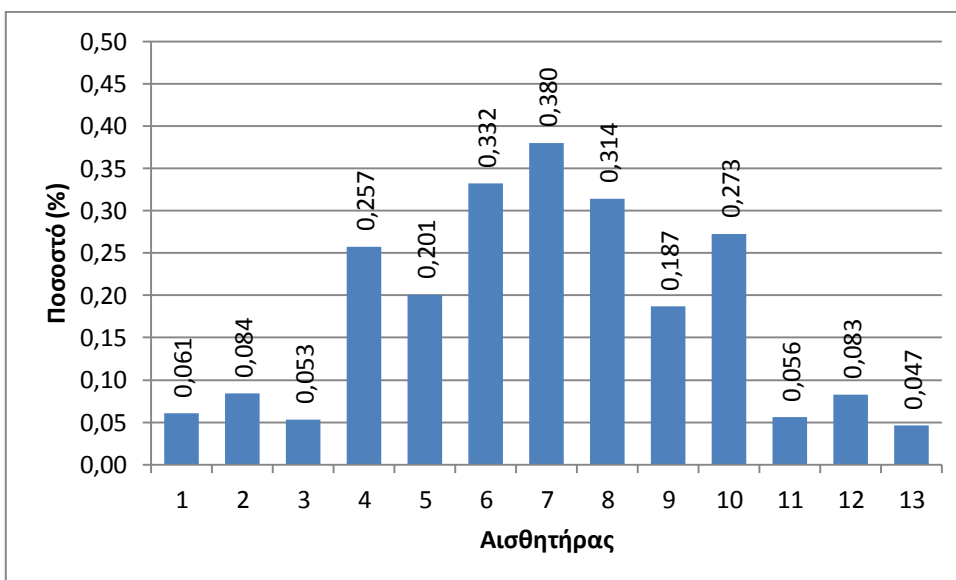
Διάγραμμα 54: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (23/12/2014 1:10:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 45000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,103% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



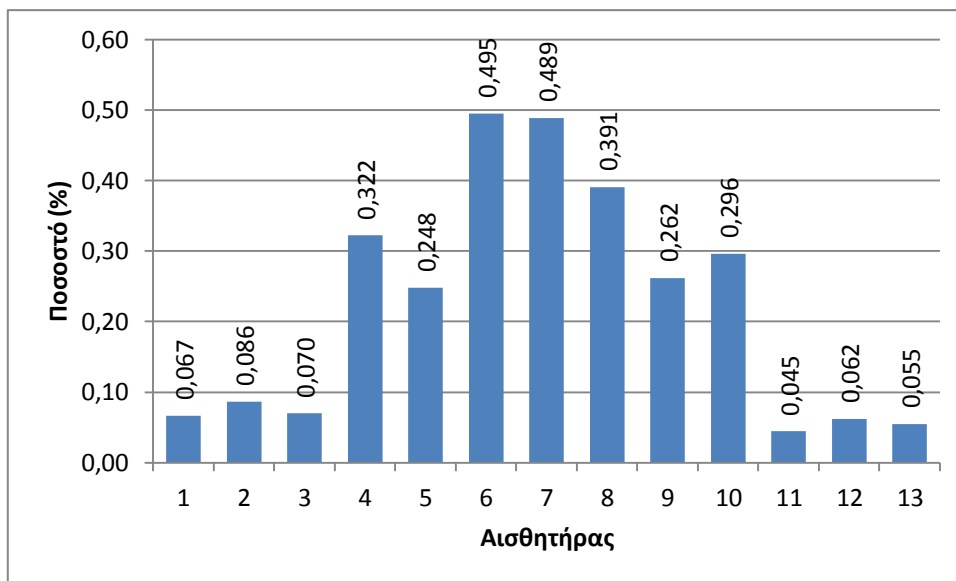
Διάγραμμα 55: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (6/12/2014 11:23:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 55000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,098% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



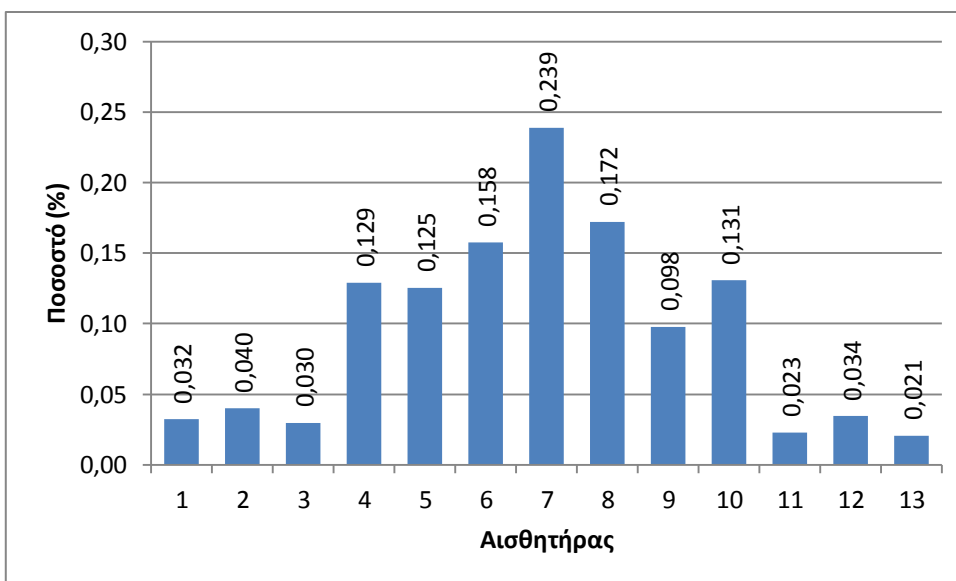
Διάγραμμα 56: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (29/11/2014 11:19:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 60000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,102% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



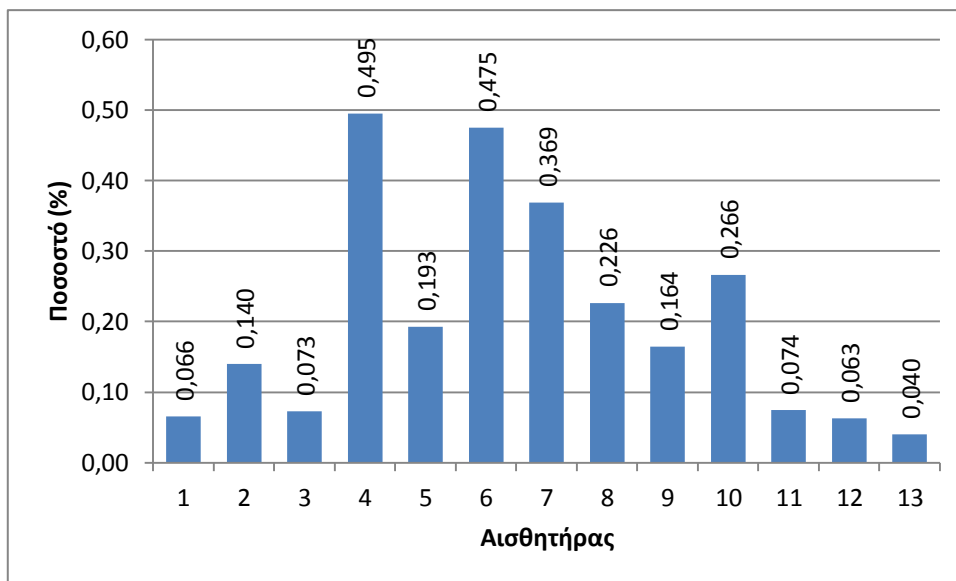
Διάγραμμα 57: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (07/06/2015 11:29:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 65000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,127% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



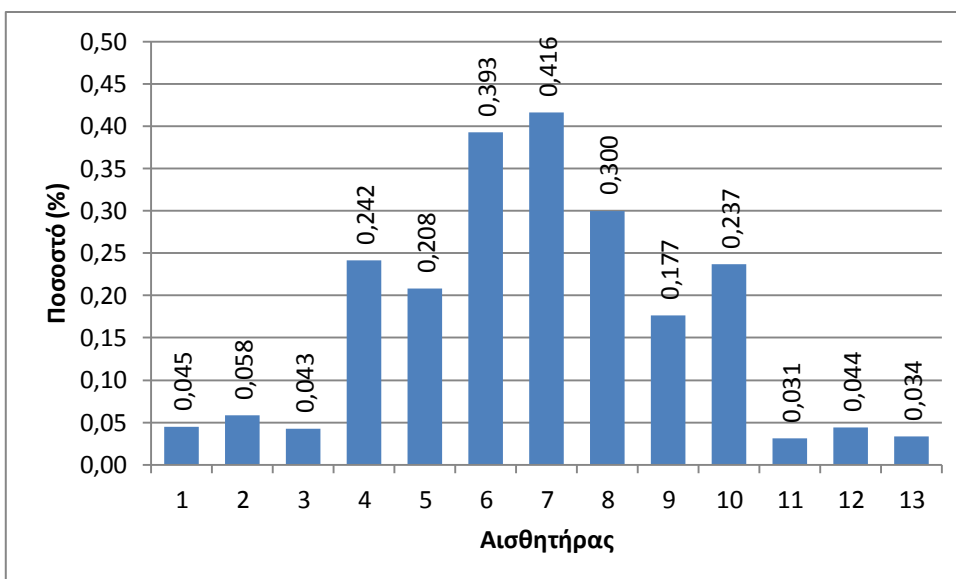
Διάγραμμα 58: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (28/3/2015 3:07:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 70000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,222% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



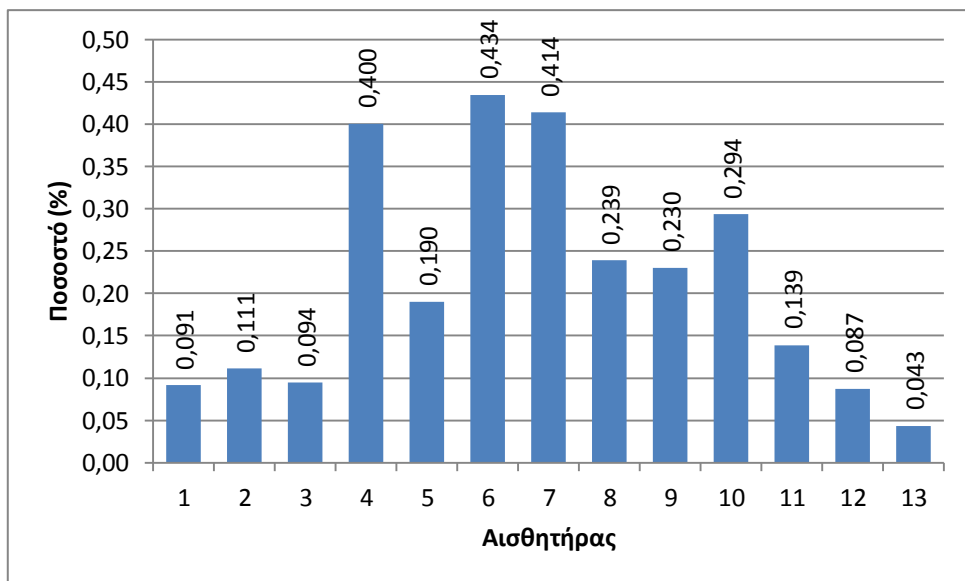
Διάγραμμα 59: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (10/3/2015 9:35:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 80000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,095% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



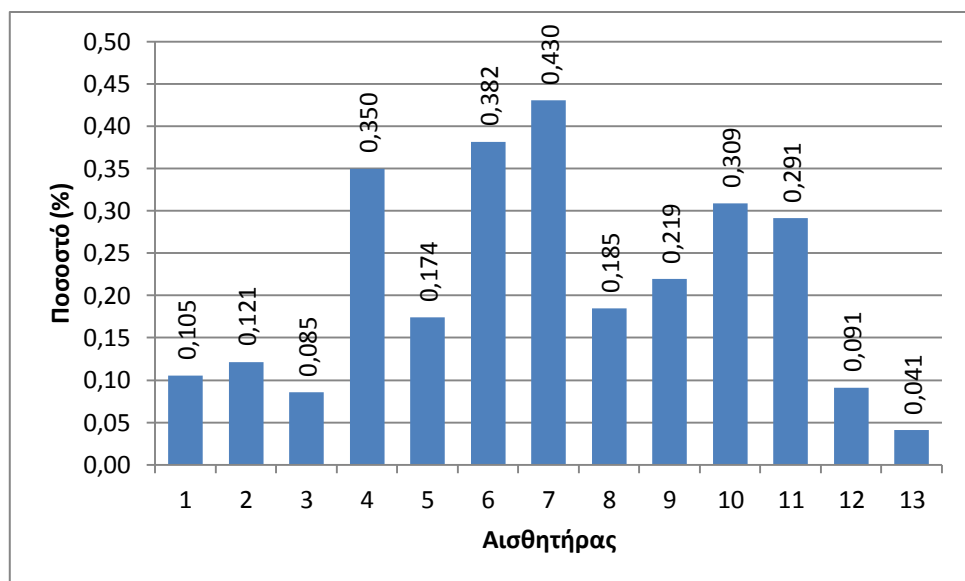
Διάγραμμα 60: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (11/5/2015 11:26:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 85000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,203% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



Διάγραμμα 61: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (2/4/2015 1:21:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 90000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,171% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

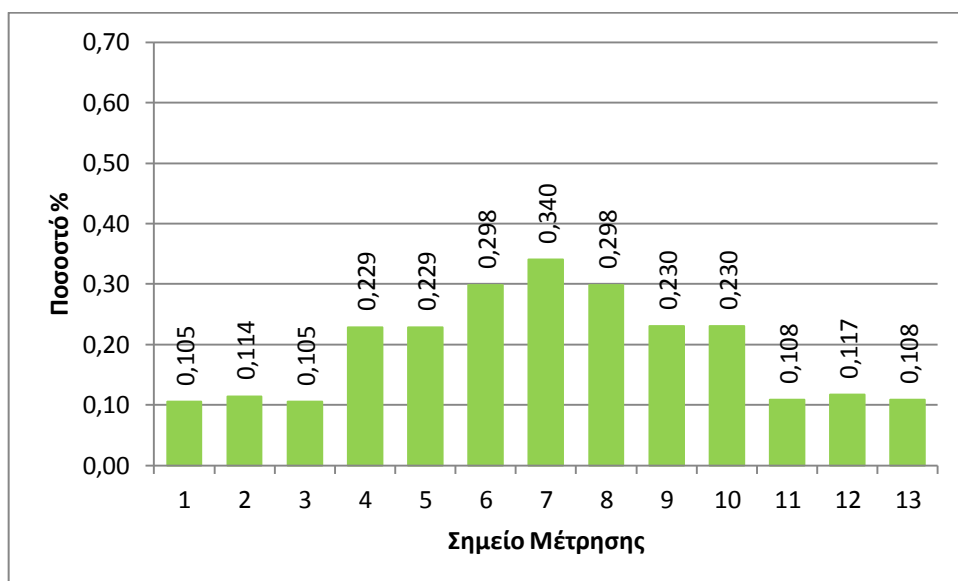


Διάγραμμα 62: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (12/6/2015 1:40:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 95000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,213% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

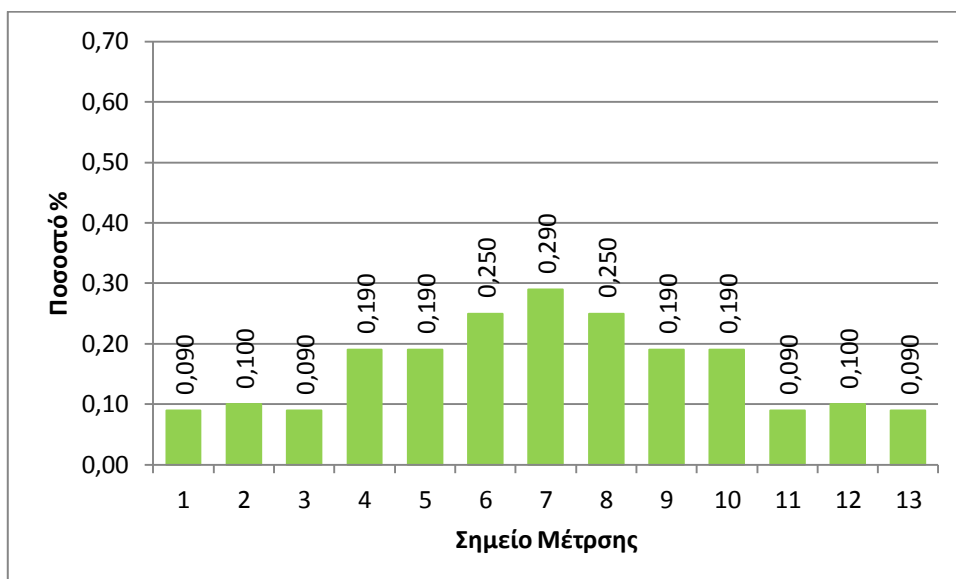


Διάγραμμα 63: Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (30/3/2015 11:23:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 105000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,158% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

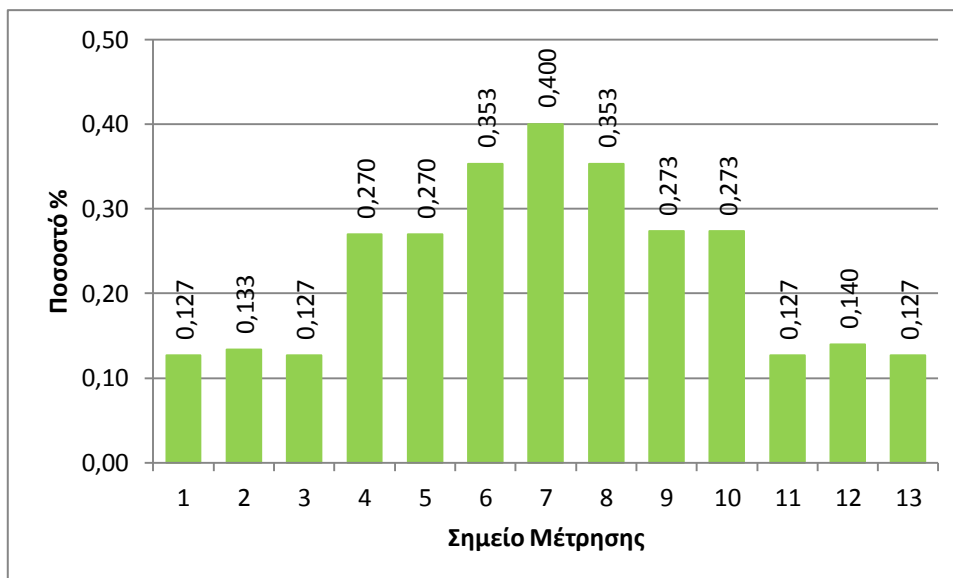
β. Διαγράμματα αποτελεσμάτων προσομοίωσης



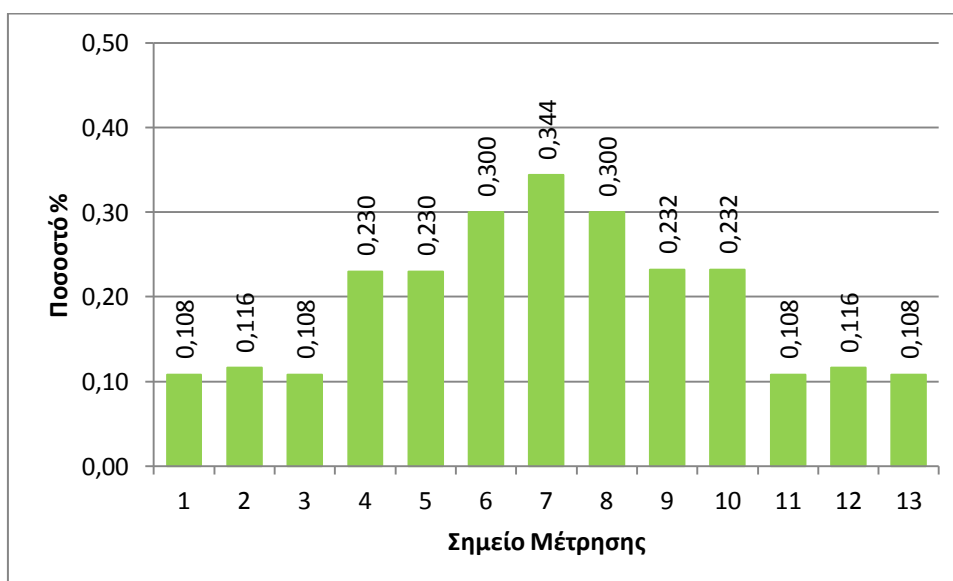
Διάγραμμα 64: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (9/12 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 33200 lux (Νεφосκεπής Ουρανός). Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,193% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



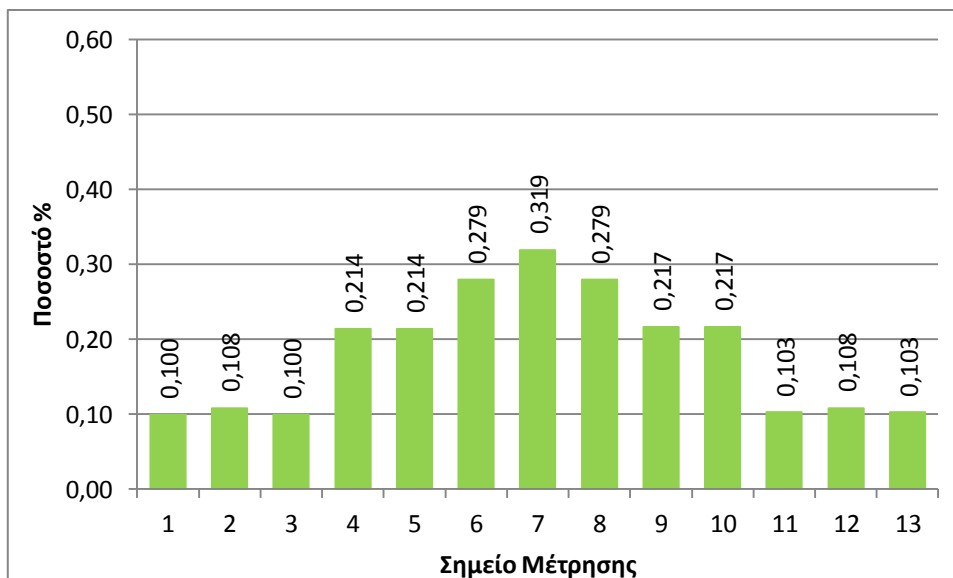
Διάγραμμα 65: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (09/03 06:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 10000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,162% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



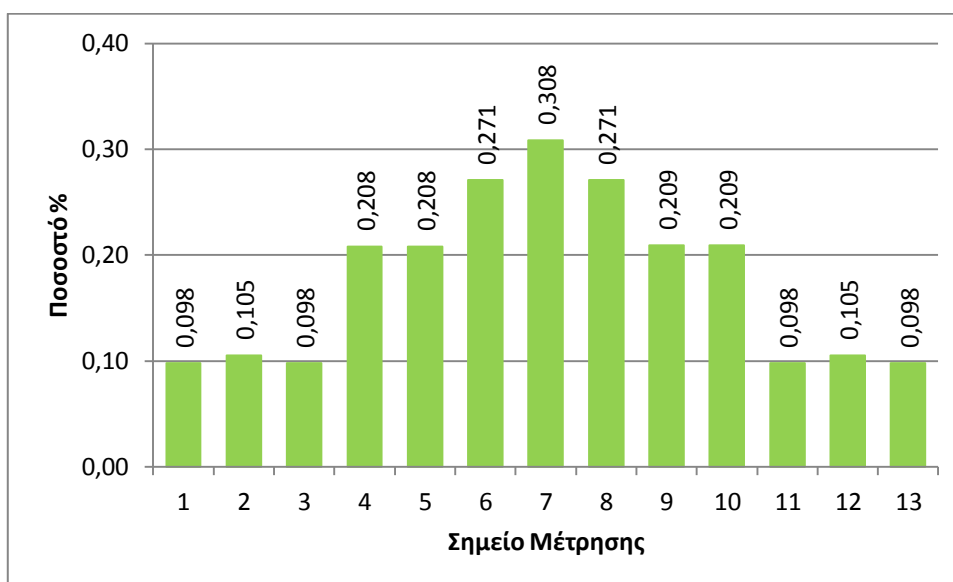
Διάγραμμα 66: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (14/12 02:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 15000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,229% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



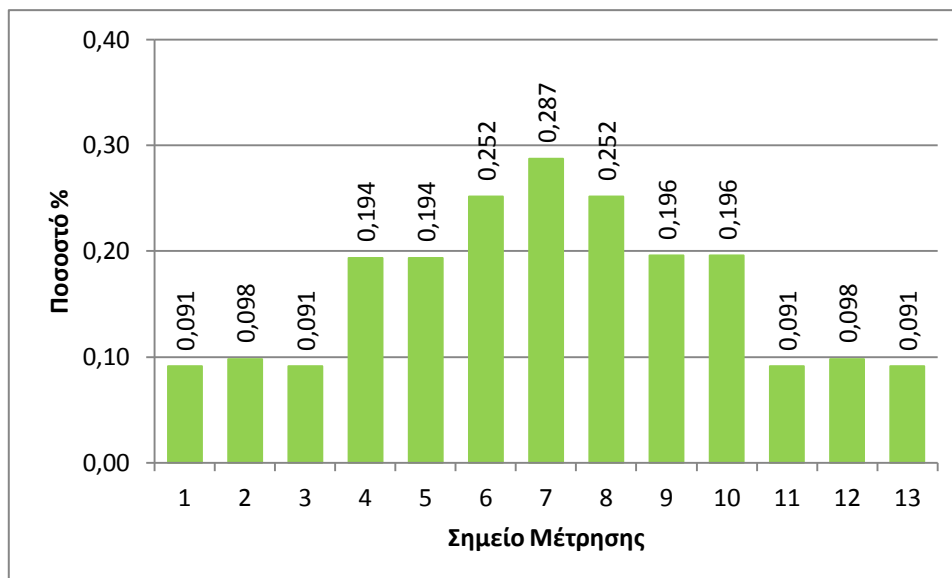
Διάγραμμα 67: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (13/02 10:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 25000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,195% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



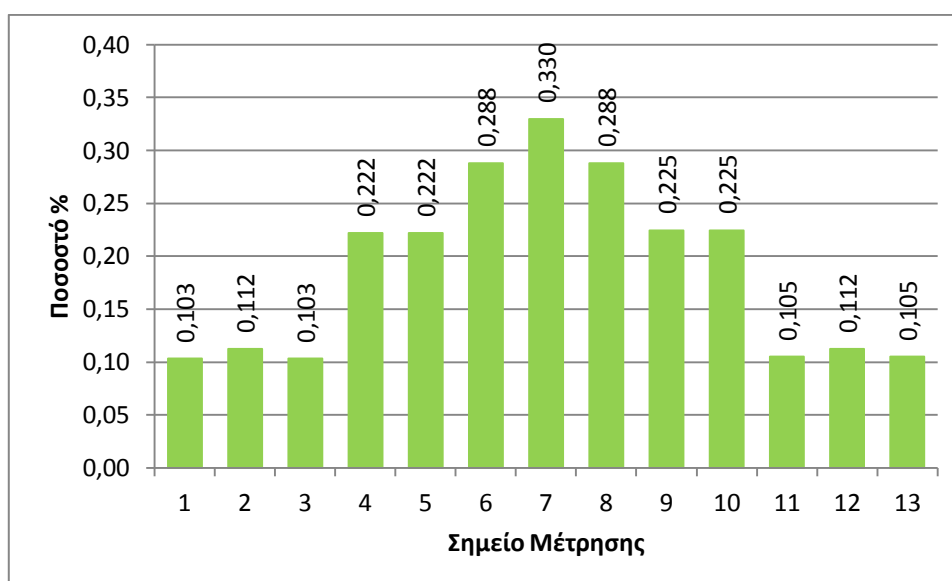
Διάγραμμα 68: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (30/11 2:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 35000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,181% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



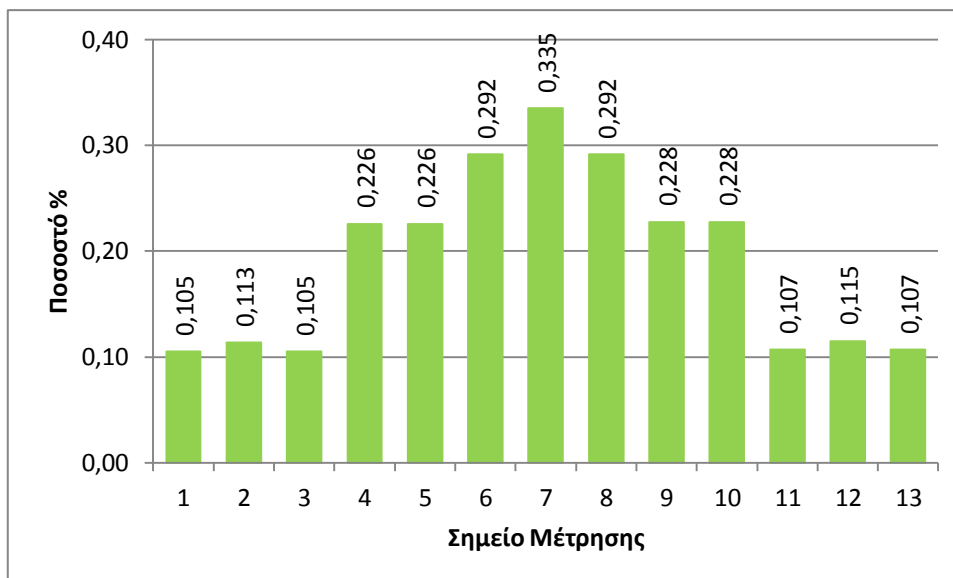
Διάγραμμα 69: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (10/12 1:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 40000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,176% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



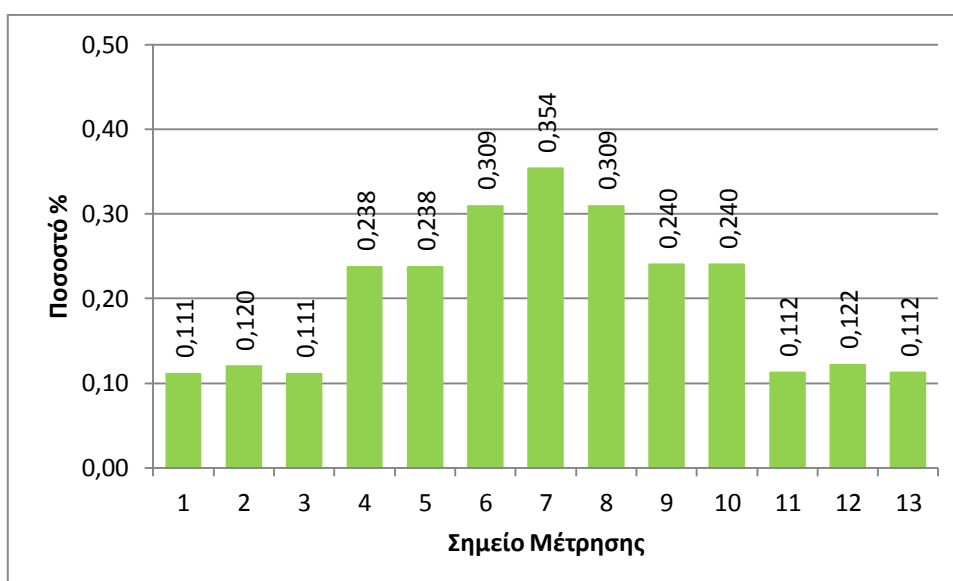
Διάγραμμα 70: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (24/04 5:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 45000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,164% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



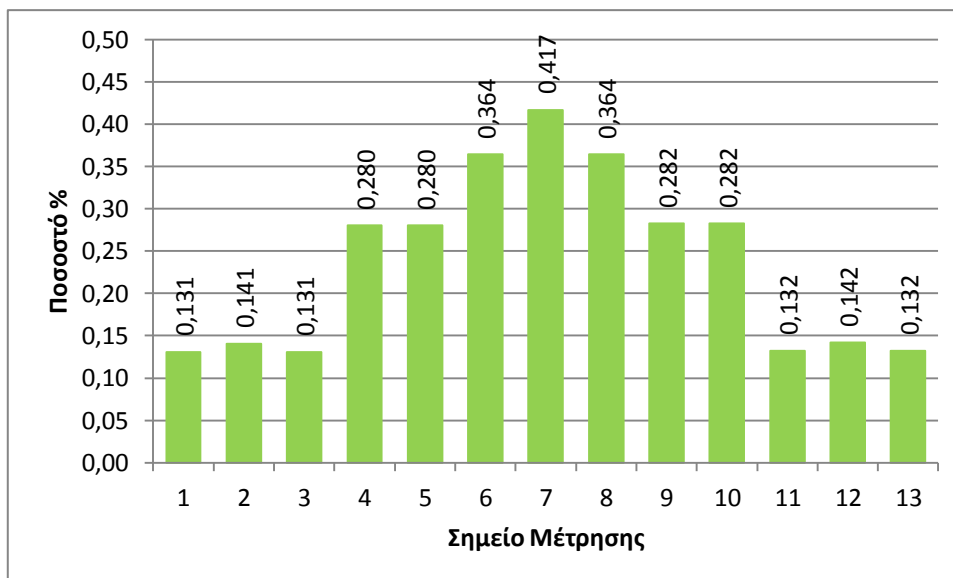
Διάγραμμα 71: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (02/05 09:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 55000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,188% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



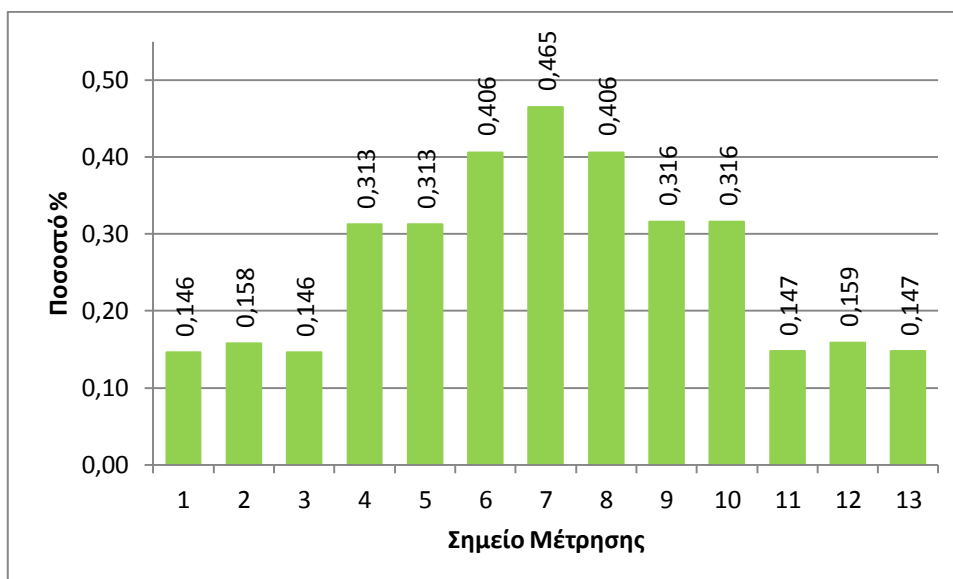
Διάγραμμα 72: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (23/02 03:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 60000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,191% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



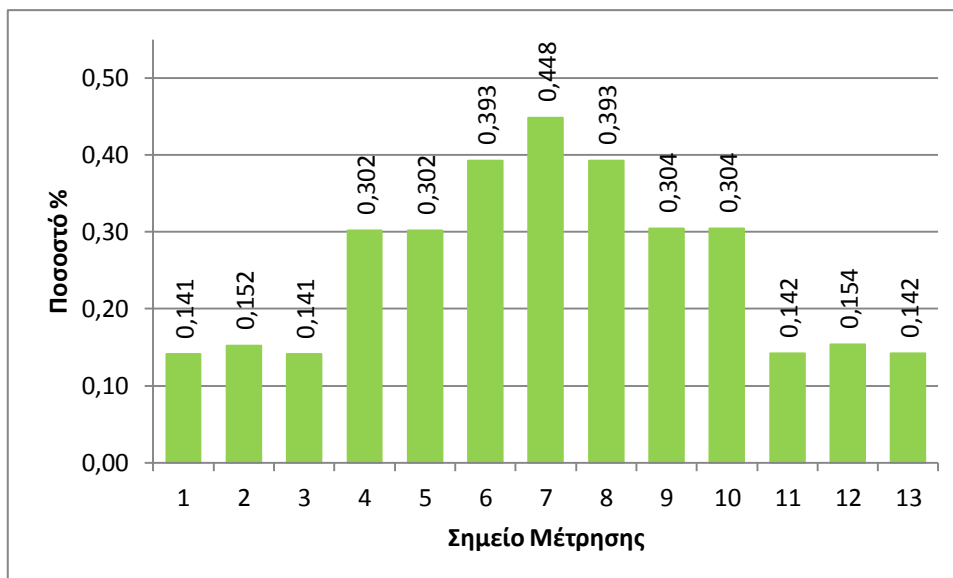
Διάγραμμα 73: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (21/02 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 65000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,201% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



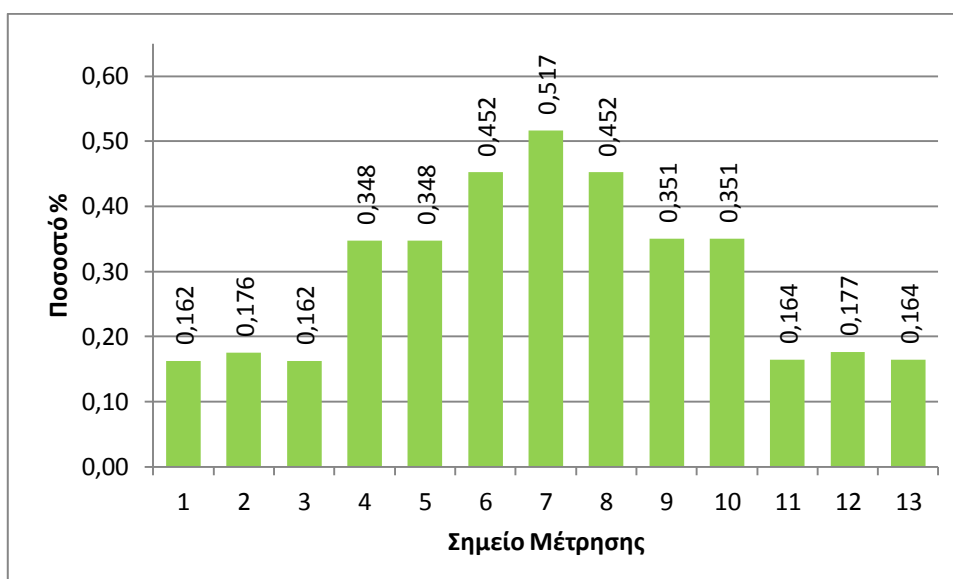
Διάγραμμα 74: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (16/03 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 70000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,237% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



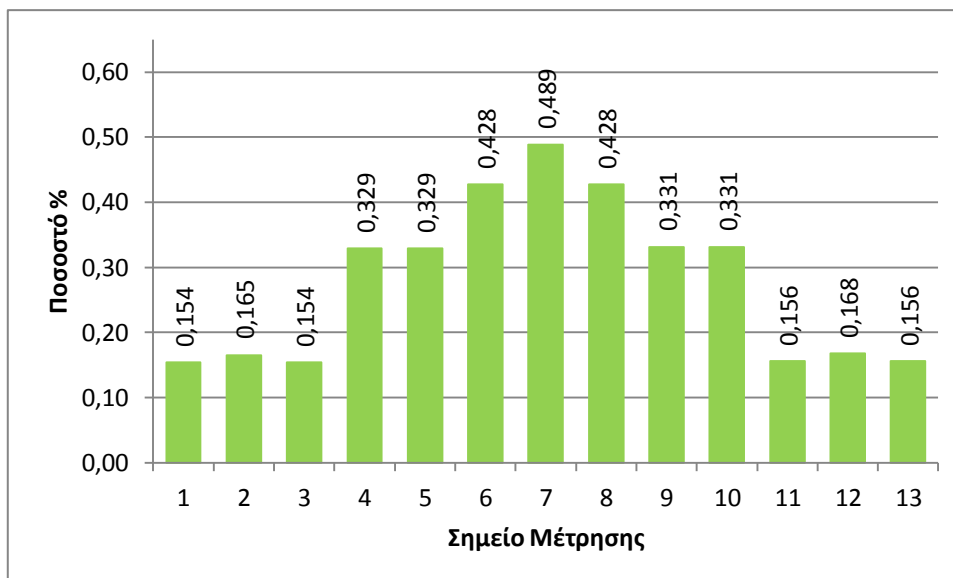
Διάγραμμα 75: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (03/04 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 80000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,264% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



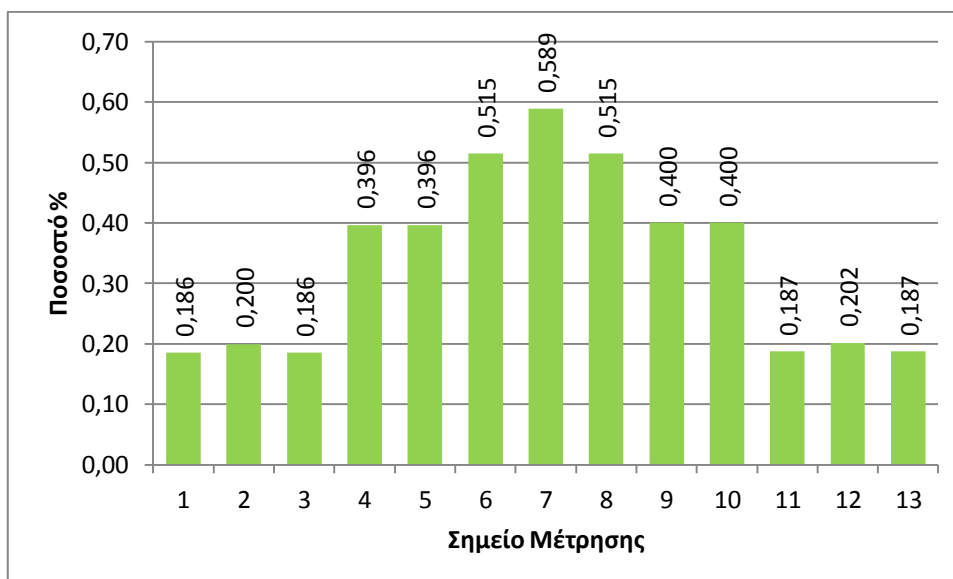
Διάγραμμα 76: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (04/05 11:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 85000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,255% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.



Διάγραμμα 77: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (08/06 12:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 90000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,294% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

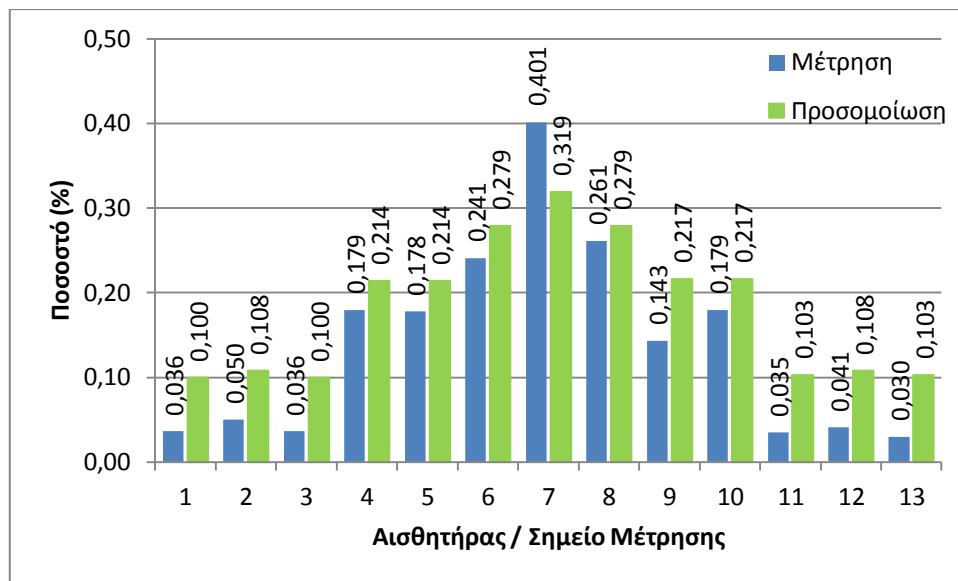


Διάγραμμα 78: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (06/06 11:00:00πμ) με εξωτερική φωτεινότητα 95000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,278% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

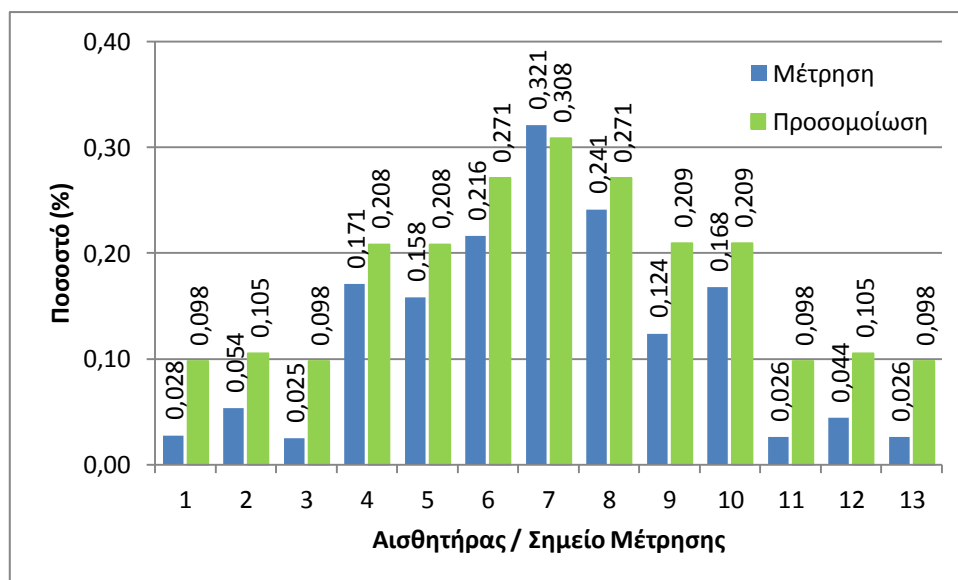


Διάγραμμα 79: Αποτελέσματα προσομοίωσης. Ποσοστό (%) ενδείξεων εσωτερικής φωτεινότητας σε κάθε σημείο μέτρησης που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για μια δεδομένη χρονική στιγμή (28/05 01:00:00μμ) με εξωτερική φωτεινότητα 105000 lux. Με το μέσο ποσοστό εσωτερικής φωτεινότητας να ανέρχεται στο 0,335% σε σχέση με την εξωτερική φωτεινότητα.

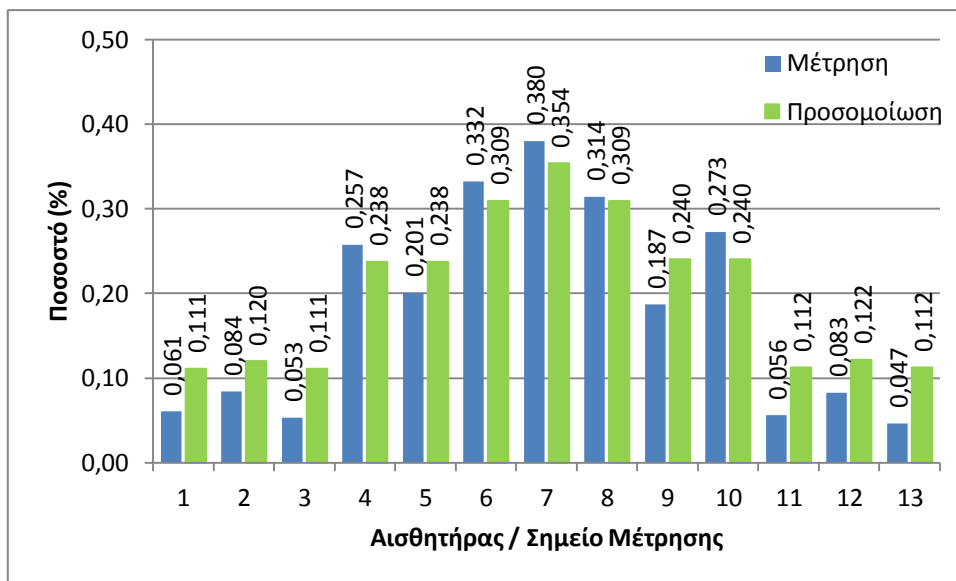
γ. Διαγράμματα σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης



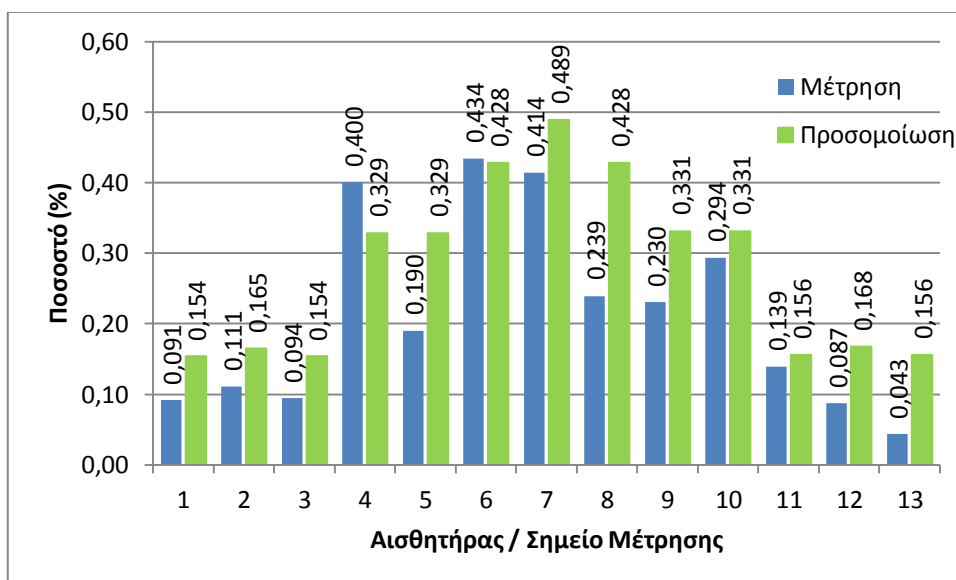
Διάγραμμα 80: Διαγράμματα 17 και 18. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 27/12/2014 12:21:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 30/11/2014 2:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 35000 lux.



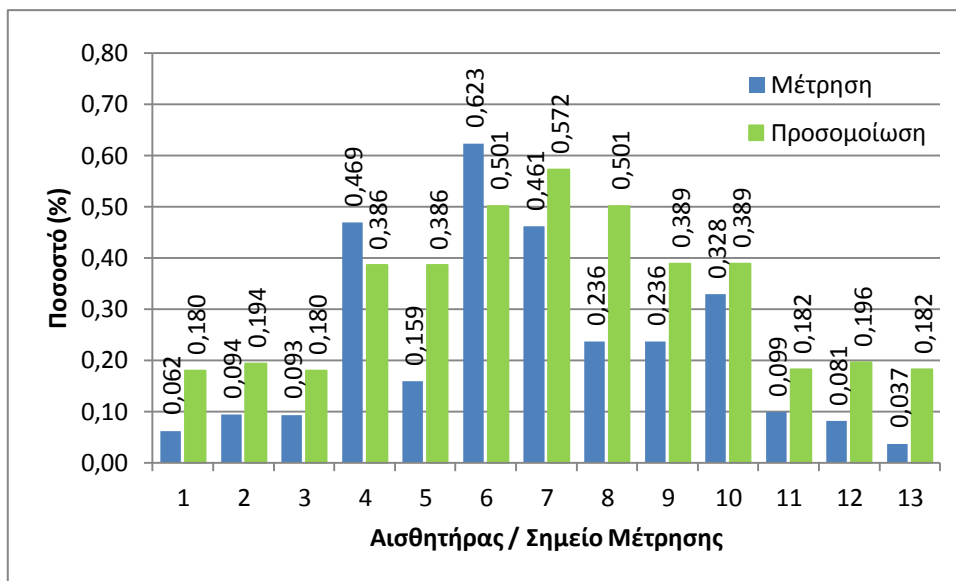
Διάγραμμα 81: Διαγράμματα 20 και 21. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 3/12/2014 1:29:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 10/12/2014 1:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 40000 lux.



Διάγραμμα 82: Διαγράμματα 32 και 33. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 07/06/2015 11:29:00πμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 21/02/2015 12:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 65000 lux.



Διάγραμμα 83: Διαγράμματα 46 και 47. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 12/6/2015 1:40:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 06/06/2015 11:00:00πμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 95000 lux.



Διάγραμμα 84: Διαγράμματα 54 και 55. Σύγκριση ποσοστών μετρούμενων τιμών (στις 13/6/2015 01:27:00μμ) και τιμών προσομοίωσης (στις 13/06/2015 01:00:00μμ) εσωτερικής φωτεινότητας κάθε αισθητήρα που βρίσκεται εντός του χώρου, με την αντίστοιχη ένδειξη φωτεινότητας του εξωτερικού αισθητήρα, για εξωτερική φωτεινότητα 108000 lux.

