



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ LIFI

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΝΟΥΝΟΥ ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ

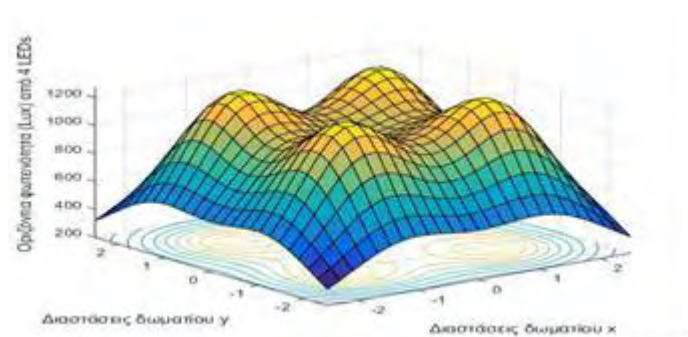
Επιβλέπων : ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΣΑΝΔΑΛΙΔΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ LIFI

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΜΕΝΟΥΝΟΥ ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ

Επιβλέπων :ΣΑΝΔΑΛΙΔΗΣ ΧΑΡΙΛΑΟΣ

Λαμία, Σεπτέμβριος 2016

Αφιερώνεται στους γονείς και τον αδερφό μου.

Δηλώνω υπεύθυνα ότι δεν έχω υποπέσει σε περιπτώσεις λογοκλοπής ή αντιγραφής, όπως αυτές διασαφηνίζονται παρακάτω

Μενούνου Σπυριδούλα

Οδηγίες αποφυγής Λογοκλοπής και Αντιγραφής [απόσπασμα από <http://www.samos.aegean.gr/actuar/dlekkas/reports/OdigiesEPO12.pdf>]

1. Μην παραθέτετε κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί χωρίς να τα περικλείετε σε εισαγωγικά και χωρίς να αναφέρετε το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών σας, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Πρέπει να αναφέρετε πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική σας εργασία. Αυτό τιμωρείται ως αντιγραφή.
3. Υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορείτε να εντάξετε στην εργασία σας εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια. Εσείς μπορείτε να χρησιμοποιείτε τέτοιο υλικό, με μέτρο, γιατί οι εργασίες είναι μικρού μεγέθους και πρέπει πάντα να κυριαρχούν οι δικές σας ιδέες.
4. Αυστηρά τιμωρείται επίσης η παρουσίαση έργου άλλων ως προσωπικής εργασίας.

Περίληψη

Η επικοινωνία μέσω του ορατού φωτός (VLC) είναι ένας αναδυόμενος και υπό εξέλιξη κλάδος των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών. Το ορατό φως εκπέμπεται σε μήκη κύματος από 390 έως 700nm και υπόσχεται πολλές νέες εφαρμογές που θα βελτιώσουν την ποιότητα, την ασφάλεια και τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων στις ασύρματες επικοινωνίες 5^{ης} γενιάς. Με την εφαρμογή της επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός τα δεδομένα θα μεταφέρονται ασφαλέστερα και χωρίς επιβλαβή ακτινοβολία για τον άνθρωπο. Ωστόσο, η συγκεκριμένη τεχνολογία επηρεάζεται από διάφορα είδη θορύβων και τις ακτίνες του ηλιακού φωτός, τα οποία βέβαια με χρήση κατάλληλων τεχνικών μπορούν να περιοριστούν.

Στην εργασία αυτή προσομοιώνεται η λαμβανόμενη ισχύς και η οριζόντια φωτεινότητα, ενός συστήματος επικοινωνίας ορατού φωτός, σε ένα εσωτερικό περιβάλλον χώρου εργασίας και εξετάζεται η απόδοσή του υπό την επίδραση διαφόρων παραμέτρων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται με την μορφή κατάλληλων διαγραμμάτων.

Λέξεις Κλειδιά: Επικοινωνία μέσω Ορατού Φωτός, Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες, LED, Φωτοδίοδος, Οριζόντια Φωτεινότητα, Λαμβανόμενη Ισχύς.

Abstract

Visible Light Communication (VLC) is an emerging field of Optical Wireless Communications. Visible light (390-700nm), promises a lot of new applications that will improve the quality and safety of communications and increase data transmission in 5G communications. This specific technology will be transferred safely and without harmful radiation. However, the performance, of such systems is affected by several types of noise as well as sunlight beams, which can be limited by employing several techniques.

The present study simulates the received power and horizontal illuminance of a VLC system in an indoor working environment. Variations in these quantities are investigated under the effects of some critical parameters. The results occurred are depicted using appropriate diagrams.

Key Words: Visible Light Communication, Optical Wireless Communication, LiFi, Light Emitting Diodes (LED), Photodetector, Horizontal Illuminance, Received Power.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 5 |
| ABSTRACT..... | 6 |
| 1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... | 9 |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 9 |
| 1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 9 |
| 1.3 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | 10 |
| 2 ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ..... | 11 |
| 2.1 ΓΕΝΕΣ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ..... | 11 |
| 2.1.1 Μηδενικής Γενιάς (0G)..... | 11 |
| 2.1.2 1ης Γενιάς (1G)..... | 11 |
| 2.1.3 2ης Γενιάς (2G)..... | 11 |
| 2.1.4 3ης Γενιάς (3G)..... | 12 |
| 2.1.5 4ης Γενιάς (4G)..... | 12 |
| 2.1.6 5ης Γενιάς (5G)..... | 13 |
| 2.2 ΣΤΟΧΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 5ΗΣ ΓΕΝΙΑΣ..... | 13 |
| 2.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ WiFi..... | 14 |
| 3 VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS..... | 15 |
| 3.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ..... | 15 |
| 3.2 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ LEDs..... | 16 |
| 3.2.1 Pc-LEDs..... | 16 |
| 3.2.2 Multi-chip LED..... | 16 |
| 3.2.3 Organic Light Emitting Diodes..... | 16 |
| 3.2.4 Micro LEDs (μ-LED)..... | 16 |
| 3.2.5 Resonant Cavity LEDs..... | 17 |
| 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VLC..... | 18 |
| 4.1 ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ..... | 18 |
| 4.1.1 Φωτεινή Ένταση ή Φωτοβολία..... | 18 |
| 4.1.2 Φωτεινή Ροή..... | 18 |
| 4.1.3 Στερεά Γωνία..... | 18 |
| 4.1.4 Μεταδιδόμενη οπτική ενέργεια φωτός..... | 18 |
| 4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ..... | 19 |
| 4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VLC..... | 19 |
| 4.3.1 Περιγραφή Προγραμματιστικού Περιβάλλοντος MATLAB..... | 19 |
| 4.3.2 Περιγραφή Πειράματος..... | 20 |
| 4.3.3 Περιγραφή Δωματίου..... | 20 |
| 4.3.4 Φωτεινότητα στην επιφάνεια ενός γραφείου..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 5 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑ..... | 24 |
| 5.1 1 LED | 24 |
| 5.1.1 Αλλαγή διαστάσεων δωματίου..... | 25 |
| 5.1.2 Αλλαγή ύψους..... | 25 |
| 5.1.3 Αλλαγή του $\Phi_{1/2}$ | 26 |
| 5.2 4 LEDs..... | 27 |
| 5.2.1 Αλλαγή ύψους..... | 28 |
| 5.2.2 Μείωση του $\Phi_{1/2}$ | 28 |
| 5.3 6 LEDs..... | 29 |
| 5.3.1 Μείωση του $\Phi_{1/2}$ | 30 |
| 5.3.2 Αύξηση διαστάσεων δωματίου..... | 30 |
| 5.3.3 Αύξηση του ύψους του δωματίου..... | 31 |
| 5.4 8 LEDs..... | 31 |
| 5.4.1 Μείωση του $\Phi_{1/2}$ | 33 |
| 5.4.2 Αύξηση του ύψους..... | 33 |
| 5.5 9 LEDs..... | 33 |
| 5.5.1 Αύξηση του ύψους..... | 34 |
| 5.5.2 Μείωση του $\Phi_{1/2}$ | 34 |
| 6 ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ..... | 36 |
| 6.1 ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ DB..... | 36 |
| 6.2 ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ..... | 36 |
| 6.3 1 LED..... | 37 |
| 6.3.1 Αλλαγή του $\Phi_{1/2}$ | 38 |
| 6.3.2 Αλλαγή της επιφάνειας της φωτοδιόδου..... | 38 |
| 6.3.3 Αλλαγή του FOV της φωτοδιόδου..... | 39 |
| 6.4 4 LEDs..... | 41 |
| 6.5 6 LEDs..... | 44 |
| 6.6 8 LEDs..... | 45 |
| 6.7 9 LEDs..... | 46 |
| 7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ..... | 48 |
| 7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 48 |
| 7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ..... | 48 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 49 |

1. Πρόλογος

1.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη απόδοσης του συστήματος επικοινωνιών μέσω του ορατού φωτός (LiFi). Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ένας αναδυόμενος κλάδος των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών και αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα 5ης γενιάς, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ασφάλεια στη μεταφορά δεδομένων και γρηγορότεροι ρυθμοί μετάδοσης. Οι επικοινωνίες μέσω του ορατού φωτός θα χρησιμοποιούν ως μέσο μετάδοσης της πληροφορίας το φως που θα εκπέμπεται από λάμπες LEDs. Οι ταχύτητες μετάδοσης που επιτυγχάνει το LiFi φτάνουν τα 224Gbit/sec σε μετάδοση ελεύθερου χώρου (Line-of-Sight), ενώ μέσω ανακλάσεων ο ρυθμός μετάδοσης φτάνει τα 70Mbit/sec.

Το ορατό φως εκπέμπεται σε μήκη κύματος από 390nm έως 700nm, ενώ το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει είναι από 400THz έως 800THz. Το συγκεκριμένο εύρος ζώνης δεν έχει αξιοποιηθεί για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές μέχρι σήμερα.

Στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός και προσομοιώνονται οι κατανομές της οριζόντιας φωτεινότητας και της λαμβανόμενης ισχύος στο εσωτερικό ενός δωματίου. Αυτό γίνεται προκειμένου να μελετηθεί το κατά πόσο επιτυγχάνεται επαρκής φωτισμός και ισχύς σε ένα δωμάτιο με κατάλληλη τροποποίηση διαφόρων παραμέτρων.

1.2 Δομή Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελείται από δύο μέρη:

1. Το θεωρητικό κομμάτι στο οποίο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών ενώ στη συνέχεια περιγράφεται η νέα τεχνολογία με την οποία ασχολείται η συγκεκριμένη εργασία.
2. Το πρακτικό κομμάτι το οποίο περιέχει τη μοντελοποίηση του συστήματος και την εξαγωγή αποτελεσμάτων

Πιο συγκεκριμένα :

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται αναλυτικά οι γενιές των κινητών επικοινωνιών με τα χαρακτηριστικά και τους ρυθμούς μετάδοσης τους οποίους επιτυγχάνει κάθε μια από αυτές. Εκτενέστερα αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της 5ης γενιάς καθώς και οι στόχοι που αναμένεται να επιτύχει. Τέλος γίνεται αναφορά στην ανάπτυξη του WiFi ως εναλλακτική μέθοδος επικοινωνίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική παρουσίαση της επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός. Αναφέρονται οι λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη αυτής της νέας τεχνολογίας, τα

χαρακτηριστικά της, καθώς και οι εφαρμογές που μπορούν να αναπτυχθούν με βάση αυτήν. Επιπλέον, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση των LEDs για τη μετάδοση της πληροφορίας και περιγράφονται οι διάφοροι τύποι των LEDs.

Στο τέταρτο κεφάλαιο ορίζεται η φωτομετρία, περιγράφονται και ορίζονται με μαθηματικούς τύπους τα διάφορα μεγέθη του φωτός, όπως επίσης και οι βασικές φωτομετρικές μονάδες μέτρησης. Γίνεται μια σύντομη αναφορά στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση του VLC συστήματος ενώ στη συνέχεια περιγράφεται το πείραμα που μελετήθηκε για τη δημιουργία της συγκεκριμένης εργασίας. Επίσης, ορίζεται η οριζόντια φωτεινότητα στην επιφάνεια ενός γραφείου και η φωτεινή ένταση με την οποία εκπέμπει η φωτεινή πηγή υπό συγκεκριμένη γωνία. Τέλος παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα που περιγράφουν την Lambertian εκπομπή της φωτεινής πηγής και την φωτεινή της ένταση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο προσομοιώνεται η οριζόντια φωτεινότητα υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις σε έναν χώρο εργασίας. Τέλος παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα διάφορα διαγράμματα που προκύπτουν, όταν τροποποιηθούν οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την οριζόντια φωτεινότητα.

Στο έκτο κεφάλαιο προσομοιώνεται η λαμβανόμενη ισχύς υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις σε έναν εργασιακό χώρο και απεικονίζονται και εξηγούνται τα διαγράμματα που προκύπτουν αν τροποποιηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν το μέγεθος αυτό.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και αναφέρονται τυχόν μελλοντικές επεκτάσεις.

1.3 Ευχαριστίες

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χαρίλαο Σανδαλίδη, αρχικά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αλέξανδρο Βάβουλα για την άμεση ανταπόκρισή του στην απάντηση τυχόν αποριών που προέκυπταν. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου, που μου στάθηκαν όλον αυτό τον καιρό. Κυρίως όμως θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξή τους, όχι μόνο κατά την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας, αλλά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

2. Ασύρματες Κινητές Επικοινωνίες

2.1 Γενιές Κινητών Επικοινωνιών

Οι ασύρματες κινητές επικοινωνίες αναφέρονται στη μεταφορά επικοινωνίας σε κινούμενους χρήστες χωρίς τη χρήση ηλεκτρικών αγωγών ή καλωδίων. Στα συνήθη συστήματα η μεταφορά της πληροφορίας βασίζεται στις ραδιοσυχνότητες που κυμαίνονται από τα 3 Hz έως τα 3000 GHz. Για να αξιοποιηθεί πιο αποτελεσματικά το συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων έπρεπε να αναπτυχθούν συγκεκριμένα πρότυπα και πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Η ανάπτυξη των ασύρματων κινητών επικοινωνιών ξεκίνησε να εξελίσσεται κυρίως από το 1970, στη συνέχεια κατηγοριοποιήθηκε σε γενιές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και την ταχύτητα μετάδοσης των πληροφοριών [10].

2.1.1 Μηδενικής Γενιάς (0G)

Η 0G αναφέρεται στη γενιά των ασύρματων κινητών τηλεφώνων πριν την ανάπτυξη κυψελών το 1970. Τα συγκεκριμένα κινητά τηλέφωνα τοποθετούνταν κυρίως σε οχήματα. Η συγκεκριμένη γενιά είναι γνωστή και ως Mobile Radio Telephone, και στα συστήματα αυτά τα ασύρματα τηλέφωνα ήταν στο σχήμα και το μέγεθος ενός μικρού χαρτοφύλακα [10].

Η 0.5G διέθετε πιο βελτιωμένες μεθόδους επικοινωνίας από τη 0G, στις οποίες οι τηλεφωνικές υπηρεσίες ήταν ανοιχτές στο κοινό και όχι μόνο για στρατιωτικές υπηρεσίες ή για την αστυνομία. Το κάθε τηλέφωνο είχε το δικό του ξεχωριστό αριθμό [10].

2.1.2 1^ης Γενιάς (1G)

Τη δεκαετία του 80 αναπτύχθηκε η κυψελοειδής αρχιτεκτονική στις επικοινωνίες, η οποία επέτρεπε την κάλυψη πολύ μεγάλων γεωγραφικά περιοχών. Το 1979 το πρώτο κυψελοειδές σύστημα στον κόσμο το πρωτοεισήγαγε η Nippon Telephone and Telegraph από την Ιαπωνία. Το 1981 η κυψελοειδής επικοινωνία εισήχθη στην Ευρώπη. Όλα αυτά τα συστήματα έκαναν χρήση αναλογικής τεχνολογίας, και υποστήριζαν τη δυνατότητα περιαγωγής, από κυψέλη σε κυψέλη, αλλά είχαν πολύ χαμηλή ασφάλεια στη μεταφορά των πληροφοριών [10].

2.1.3 2^ης Γενιάς (2G)

Στα συστήματα δεύτερης Γενιάς (2G), οι αναλογικοί πομποδέκτες αντικαταστάθηκαν από ψηφιακούς. Η ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας έφτασε τα 10kbits/sec, και εισήχθησαν και οι πρώτες υπηρεσίες αποστολής μηνυμάτων [1][10].

Ως 2.5G θεωρείται η γενιά στην οποία πρωτοεμφανίστηκε το GPRS (General Packet Radio Service) το οποίο υποστήριζε τη μεταφορά πακέτων. Η ταχύτητα μετάδοσης πακέτων ξεκινούσε από 56kbits/sec και έφτανε έως τα 115kbits/sec, αυτός ο αριθμός ήταν μεταβλητός και άλλαζε σύμφωνα με τον αριθμό των χρηστών που χρησιμοποιούσαν ταυτόχρονα την υπηρεσία. Οι συγκεκριμένες ταχύτητες μπορούσαν να υποστηρίξουν WAP (Wireless Application Protocol),

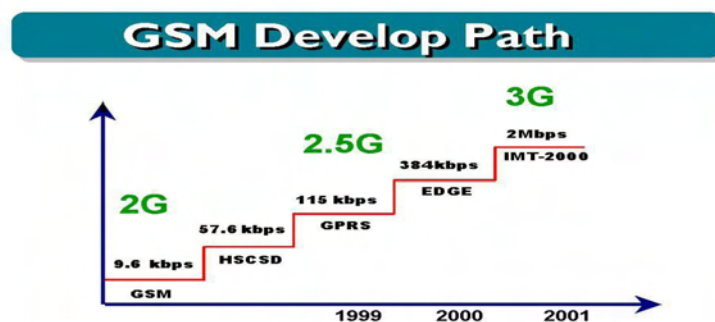
MMS (Multimedia Messaging Service) και διαδικτυακές υπηρεσίες όπως το email και το World Wide Web (WWW) [1][10].

Στη γενιά 2.75 εισήχθει μια νέα τεχνολογία η EDGE (EGPRS) η οποία ουσιαστικά είναι μια βελτίωση του GPRS, και επέτρεπε τη σαφή και γρηγορότερη μεταφορά δεδομένων [1][10].

2.1.4 3^η Γενιά (3G)

Οι προηγούμενες γενιές ουσιαστικά επικεντρώθηκαν κυρίως στη μετάδοση της φωνής. Με την έλευση της τρίτης γενιάς παραχωρήθηκε η ικανότητα μετάδοσης φωνητικών και μη δεδομένων στο ίδιο δίκτυο ταυτοχρόνως. Σε αυτές τις υπηρεσίες συμπεριλαμβάνονται ευρύτερη ικανότητα ασύρματης μετάδοσης της φωνής, κλήσεις βίντεο και ευρυζωνική ασύρματη μετάδοση δεδομένων (internet). Επίσης άλλες υπηρεσίες όπως το fax και το email ήταν διαθέσιμες για εκμετάλλευση από τους χρήστες. Στα επιπλέον χαρακτηριστικά της τρίτης γενιάς είναι και η μεταφορά HSPA δεδομένων που ήταν ικανά να φτάσουν τα 14.4 Mbit/s στο downlink και 5.8Mbit/s στο uplink [1][10].

Στην 3.5 γενιά προστέθηκε το πρωτόκολλο High-Speed Download Packet Access (HSDPA) που μετέφερε με μεγαλύτερη ταχύτητα τα πακέτα πληροφοριών. Στη 3.75 γενιά προστέθηκε το HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) η οποία ενισχύει τη διαπροσωπική επικοινωνία δίνοντας υψηλούς και συμμετρικούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων [1][10].



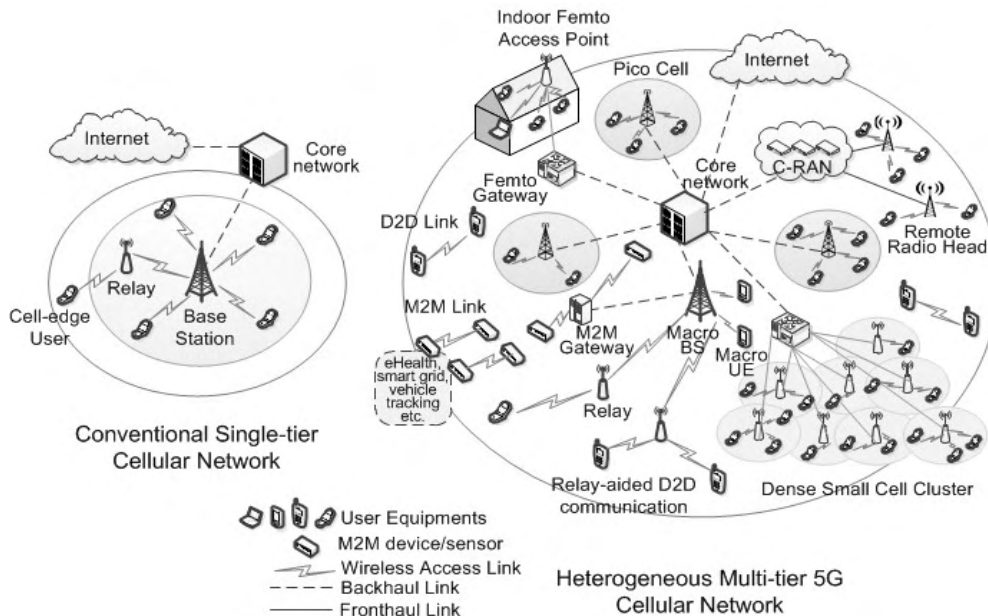
Εικόνα 2.1: Ανάπτυξη του GSM [2]

2.1.5 4^η Γενιά (4G)

Η τέταρτη γενιά είχε ως σκοπό να βελτιώσει τις τεχνολογίες της τρίτης γενιάς και να αυξήσει τη μετάδοση πληροφοριών από 100Mbit/sec στο 1Gbit/sec. Αυτός ο ρυθμός μετάδοσης πληροφοριών είναι από 10 έως 100 φορές γρηγορότερος από την τρίτη γενιά. Τα δύο μεγαλύτερα και πιο χαρακτηριστικά πρωτόκολλα της 4ης γενιάς είναι το WiMAX (802.16) (Worldwide Interoperability for Microwave Access) και το LTE (Long Term Evolution) [1][10][11].

2.1.6 5^η Γενιά (5G)

Η πέμπτη γενιά είναι το επόμενο μεγάλο βήμα της κυψελοειδούς ασύρματης επικοινωνίας. Η



Εικόνα 2.2: Ετερογενές Πολυμορφικό Κυψελοειδές 5G Δίκτυο [6]

πέμπτη γενιά βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και εκτιμάται πως θα αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως το 2020. Σκοπός φυσικά είναι η αύξηση ακόμα περισσότερο του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων από το 1Gbit/sec έως 10Gbit/sec δηλαδή περίπου 10 με 100 φορές μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης από το 4G. Επίσης, σκοπός της πέμπτης γενιάς είναι η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών να είναι προσβάσιμη από κάθε σημείο του πλανήτη [6][10].

2.2 Στόχοι συστημάτων 5^η Γενιάς

Πιο συγκεκριμένα υπάρχει ένα ολοκληρωμένο ερευνητικό πρόγραμμα γύρω από την ανάπτυξη της 5G τεχνολογίας με το ακρονύμιο MENTIS που έχει ως στόχο [7]:

- Το Evolved Mobile Broadband (EMM), το οποίο θα παρέχει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων βελτιώνοντας έτσι το QoE (Quality of Experience) των χρηστών.
- Massive Machine Communication οι οποίες θα δίνουν τις απαραίτητες λύσεις συνδεσιμότητας σε δεκάδες δισεκατομμύρια συσκευές για τα μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας.
- Vehicle to Vehicle, Device and Infrastructure (V2X) and driver assistance services που θα επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και μεταξύ του οδηγού του οχήματος και του δρόμου, προκειμένου να αυξηθεί η οδική ασφάλεια και να βελτιωθεί η κυκλοφορία στους δρόμους.
- Ultra-Reliable Communication για παροχή αξιόπιστων και οικονομικών λύσεων υψηλού βαθμού διαθεσιμότητας του δικτύου.

2.3 Ανάπτυξη του WiFi

Το Wi-Fi ή 802.11 είναι η πλέον δημοφιλέστερη ασύρματη δικτύωση που χρησιμοποιείται για πρόσβαση στο διαδίκτυο. Το Wi-Fi επιτρέπει στις ηλεκτρονικές συσκευές να συνδέονται σε ασύρματα δίκτυα (wireless LAN (Local Area Network) ή WLAN (Wireless Local Area Network)) και εκπέμπει ραδιοκύματα σε συχνότητες UHF (2.4GHz) ή SHF (5GHz). Τα WLANs συνήθως προστατεύονται από κωδικούς αλλά πολλά είναι ανοιχτά επιτρέποντας σε κάθε συσκευή που βρίσκεται εντός της εμβέλειας του δικτύου να συνδεθεί σε αυτό. Το 802.11 είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για τα Wi-Fi δίκτυα, το οποίο δημιουργήθηκε από την IEEE (Institute for Electrical and Electronics Engineers) [3][4].

3. Visible Light Communications

3.1 Πλεονεκτήματα της επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός

Οι ανάγκες του 21ου αιώνα για μεγαλύτερη μεταφορά δεδομένων έχει φέρει στο προσκήνιο μια νέα τεχνολογία που επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων με το ορατό φως (visible light communication). Η ιδέα είναι παράλληλα με το φωτισμό να είναι δυνατή και η μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων μέσω αυτού. Το εύρος ζώνης συχνοτήτων που καταλαμβάνει το ορατό φως είναι από 400 THz έως 800 THz. Έτσι ξεπερνιέται το πρόβλημα της υπερφόρτωσης του εύρους ζώνης των ραδιοσυχνοτήτων που είναι από τα 3kHz έως τα 300MHz. Η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων προσεγγίζεται περίπου στα 224 Gbps και μπορούν να αναπτυχθούν πολλές νέες εφαρμογές αξιοποιώντας το ορατό φως όπως [13]:

- Οικιακή δικτύωση.
- Υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων μέσω της υποδομής φωτισμού.
- Επικοινωνία από αυτοκίνητο σε αυτοκίνητο (car-to-car communication)
- Υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων σε καμπίνες τρενών, αεροπλάνων, πλοίων, σε υπόγειες σήραγγες, σε θαλάμους νοσοκομείων, ακόμη και κάτω από το νερό. Σε μέρη δηλαδή που μέχρι τώρα η πρόσβαση στο διαδίκτυο ήταν είτε αδύνατη είτε απαγορευμένη.
- Πρόσβαση στο διαδίκτυο από τα φώτα των δρόμων

Η χρησιμοποίηση των LEDs για την επίτευξη αυτού του σκοπού παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως [15]:

- Παράγουν πολύ λιγότερη θερμότητα από τους παραδοσιακούς λαμπτήρες φωτισμού, έτσι μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας κάπου στο 80 %.
- Έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής και μπορούν να λειτουργούν για 25.000 έως 50.000 ώρες, όταν οι κλασικοί λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν χρόνο ζωής από 6.000 έως 15.000 ώρες μόνο.
- Έχουν υψηλότερη φωτεινή απόδοση από τις παραδοσιακές πηγές φωτισμού. Τα WLEDs μέσα σε δύο δεκαετίες έχουν ξεπεράσει, κατά πολύ, σε φωτεινή απόδοση τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, που η φωτεινή τους απόδοση, είναι στα 14lm/W και τους λαμπτήρες φθορισμού, που η φωτεινή τους απόδοση είναι στα 75lm/W, έχοντας φωτεινή απόδοση στα 254lm/W.
- Δεν περιέχουν επικίνδυνες ουσίες όπως ο υδράργυρος.
- Το υψηλό εύρος ζώνης στο οποίο λειτουργούν τα LEDs από κατασκευής, πάνω από

100MHz, τους δίνουν τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν και σε φωτισμό και σε μεταφορά δεδομένων.

- Τα LEDs έχουν ευελιξία στην διαχείριση του φάσματος έτσι μπορούν να παράγουν ποικιλομορφία στα χρώματα και την ένταση.

3.2 Τύποι των LEDs

3.2.1 PC-LEDs

Το λευκό φως από τα LEDs παράγεται με δύο μεθόδους. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιεί Phosphor Converted LED (pc-LED). Ένα μπλε φως παράγεται από ένα InGan (Indium Gallium Nitride) LED chip και οδηγείται σε μια επίστρωση Yttrium Aluminium Garnet (YAG) φωσφόρου. Ο φώσφορος μετατρέπει ένα μέρος του μπλε φωτός σε πράσινο, κίτρινο και κόκκινο ενώ το υπόλοιπο μπλε φως διαχέεται. Η ένωση αυτών των τριών χρωμάτων μας κάνουν το λευκό φως [15].

3.2.2 Multi-chip LED

Το multi-chip αποτελείται από 3 ή παραπάνω LEDs που το καθένα παράγει διαφορετικό χρώμα δέσμης φωτός, δηλαδή κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB), ώστε να παραχθεί το λευκό φως. Αναλόγως την φωτεινή ένταση που παράγει κάθε LED επιτυγχάνεται και το αντίστοιχο χρώμα. Τα multi-chip WLEDs έχουν χαμηλότερο Color Rendering Index (μέτρο ακρίβειας απόδοσης των χρωμάτων από μια πηγή φωτός, συγκριτικά με το φυσικό φως που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι.) από τα pc-LEDs. Τα pc-LEDs είναι φθηνότερα και λιγότερο πολύπλοκα στην κατασκευή τους από τα multi-chip LEDs, αλλά έχουν περιορισμένο bandwidth, εξαιτίας της χαμηλής τους απόδοσης, λόγω δημιουργίας λευκού φωτός με χρήση επίστρωσης φωσφόρου [15].

3.2.3 Organic Light Emitting Diodes (OLED)

Τα OLEDs αποτελούνται από στρώματα οργανικών ενώσεων θετικών και αρνητικών φορτίων τα οποία χωρίζονται παράγοντας φως μόλις διαπεραστούν από ηλεκτρικό ρεύμα. Τα OLEDs συνήθως χρησιμοποιούνται σε επίπεδες οθόνες. Η τυπική απόκριση συχνότητας των OLEDs είναι συνήθως της τάξεως των 100 kHz, αρκετά μικρότερη από αυτή των μη οργανικών LEDs καθιστώντας τα έτσι ακατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες δεδομένων. Επίσης η διάρκεια ζωής των OLEDs είναι περίπου στις 50.000 ώρες, λιγότερη από αυτή των μη οργανικών LEDs. Από την άλλη τα OLEDs είναι πολύ πιο ευέλικτη πηγή φωτισμού και οι ερευνητές προσπαθούν να αυξήσουν την απόκριση της συχνότητάς τους [15].

3.2.4 Micro LEDs (μ-LED)

Τα μ-LEDs τοποθετούνται πολλά μαζί σε σειρές, εξυπηρετώντας έτσι την παράλληλη επικοινωνία. Δημιουργήθηκαν για εφαρμογές όπως το VLC και POF (Polymer Optical Fiber = Πλαστικές Οπτικές Ίνες). Τα μ-LEDs έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν μεγάλο όγκο παράλληλων δεδομένων για

την επικοινωνία. Το εύρος ζώνης τους είναι στα 450 MHz, υποστηρίζοντας ταχύτητες πάνω από 1.5 Gb/s και το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπουν είναι στα 370-520 nm [15].

3.2.5 Resonant Cavity LEDs

Η φωτεινή απόδοση των συμβατικών LEDs είναι χαμηλή λόγω της μεγάλης διάθλασης που δημιουργείται από τον αέρα. Για να βελτιωθεί λοιπόν η φωτεινή απόδοση και να φτάσει το μήκος κύματος των υπερύθρων (IR), δημιουργήθηκαν τα rc-LEDs. Το μήκος κύματος των rc-LEDs είναι περίπου 650 nm (IR 700nm-1nm) και η συχνότητα των κυμάτων αυτών υπερβαίνουν τα 100MHz [15].

4. Προσομοίωση συστήματος VLC

4.1 Φωτομετρία

Η φωτομετρία ως κλάδος της οπτικής ασχολείται με μετρήσεις σε σχέση με το φως. Περιορίζεται στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με μήκη κύματος από 360 έως 830 nm. Τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιεί είναι τα ακόλουθα [12].

4.1.1 Φωτεινή Ένταση ή Φωτοβολία

Η φωτεινή ένταση ή φωτοβολία μίας σημειακής πηγής προς μια δεδομένη κατεύθυνση, ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής ανά μονάδα στερεάς γωνίας η οποία έχει άξονα αυτή τη διεύθυνση και δίνεται από τον τύπο [12] :

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega} \quad (1)$$

4.1.2 Φωτεινή Ροή

Σύμφωνα με το σύστημα SI ως μονάδα μέτρησης της φωτεινής ροής ορίζεται το Lumen. Το Lumen εκφράζει την ολική ποσότητα ορατού φωτός που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή [12].

Αν η πηγή εκπέμπει μονοχρωματικό φως ισχύος Φ_e σε watts η φωτεινή ροή Φ_v σε Lumen υπολογίζεται από τη σχέση [12]:

$$\Phi_v = K_m \cdot \Phi_e \cdot V_\lambda \quad (2)$$

Όταν η πηγή εκπέμπει περισσότερα από ένα μήκη κύματος, δηλαδή το φως που εκπέμπεται από τη φωτεινή πηγή δεν είναι μονοχρωματικό, η παραπάνω σχέση δεν ισχύει. Στην περίπτωση αυτή η φωτεινή ροή υπολογίζεται ως εξής [12]:

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e \cdot V_\lambda d\lambda \quad (3)$$

όπου

K_m συντελεστής αναλογίας ο οποίος είναι: 683 lm/W για 555nm μήκος κύματος. Η παράμετρος V_λ λαμβάνεται από σχετικούς πίνακες [12].

4.1.3 Στερεά γωνία

Ως στερεά γωνία Ω ορίζεται το πηλίκο τμήματος επιφάνειας μιας σφαίρας, που αποκόπτεται από κώνο με κορυφή το κέντρο της σφαίρας, προς το τετράγωνο της ακτίνας της σφαίρας [12]

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (4)$$

4.1.4 Μεταδιδόμενη οπτική ενέργεια φωτός

Η μεταδιδόμενη οπτική ενέργεια του φωτός υπολογίζεται ως εξής [12]:

$$P_t = K_m \int_{\Lambda_{\min}}^{\Lambda_{\max}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\theta d\lambda \quad (5)$$

όπου τα Λ_{\min} και Λ_{\max} καθορίζονται από την καμπύλη ευαισθησίας της φωτοδιόδου.

4.2 Βασικές φωτομετρικές μονάδες

Οι πιο σημαντικές φωτομετρικές μονάδες είναι η candela, το lumen και το lux. Η Candela (cd) προσδιορίζεται ως η φωτοβολία ισότροπης πηγής, η οποία εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία με μήκος κύματος 555nm και με φωτοβόλο ροή ίση με 1/683 watt/στερεακτίσιο. Το Lumen (Lm) ορίζεται ως η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από ισότροπη πηγή φωτοβολίας 1 Cd, μέσα σε στερεά γωνία 1 Sterad [12].

$Lumen = 1 \text{ Cd} \times 1 \text{ Sterad}$

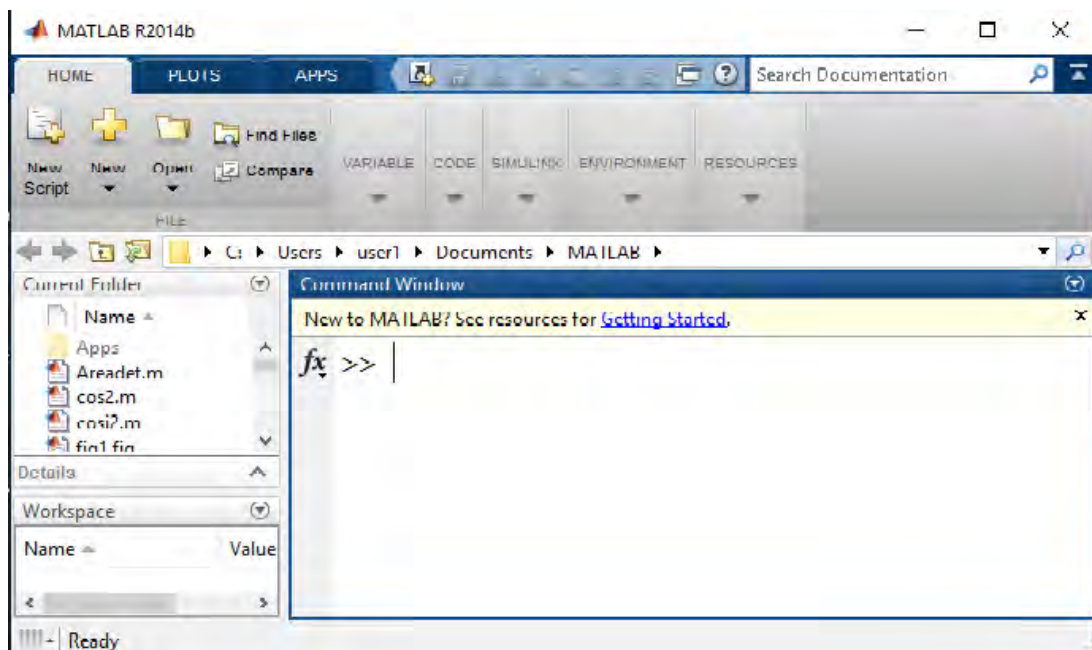
Το Lux (Lx) ορίζεται ως ο ομοιόμορφος φωτισμός σε επιφάνεια 1 τ.μ. από φωτεινή ροή 1 Lumen. Ισχύει [12]:

$$1 \text{ Lux} = 1 \text{ Lumen} / m^2$$

4.3 Μοντελοποίηση συστήματος VLC

4.3.1 Προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab

Η μελέτη και προσομοίωση του πειράματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Matlab. Το Matlab (Matrix Laboratory) είναι ένα ισχυρό μαθηματικό πρόγραμμα με πολυ-πρότυπο αριθμητικό περιβάλλον. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται είναι τέταρτης γενιάς και αναπτύχθηκε από τη MathWorks. Το Matlab επιτρέπει τη δημιουργία και το χειρισμό πινάκων, το σχεδιασμό γραφικών παραστάσεων συναρτήσεων και δεδομένων, τη δημιουργία διεπαφών με το χρήστη, ενώ παράλληλα μπορεί να διασυνδεθεί με προγράμματα τα οποία είναι γραμμένα σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού συμπεριλαμβανομένων της C/C++, Java, Fortran και Python. Το περιβάλλον εργασίας του Matlab φαίνεται στη συνέχεια [16]:



Εικόνα 4.1 : Παρουσίαση περιβάλλοντος εργασίας του Matlab.

Παρότι το Matlab αναπτύχθηκε κυρίως για μαθηματικούς και αριθμητικούς υπολογισμούς, συμπεριλαμβάνει πακέτα όπως το Simulink που επιτρέπουν τη δημιουργία ηλεκτρονικών και άλλων κυκλωμάτων και τον προγραμματισμό ενσωματωμένων συστημάτων [16].

Τέλος το Matlab χρησιμοποιείται από διάφορους επιστημονικούς κλάδους όπως της μηχανικής, της πληροφορικής και της οικονομίας [16].

4.3.2 Περιγραφή Συστήματος

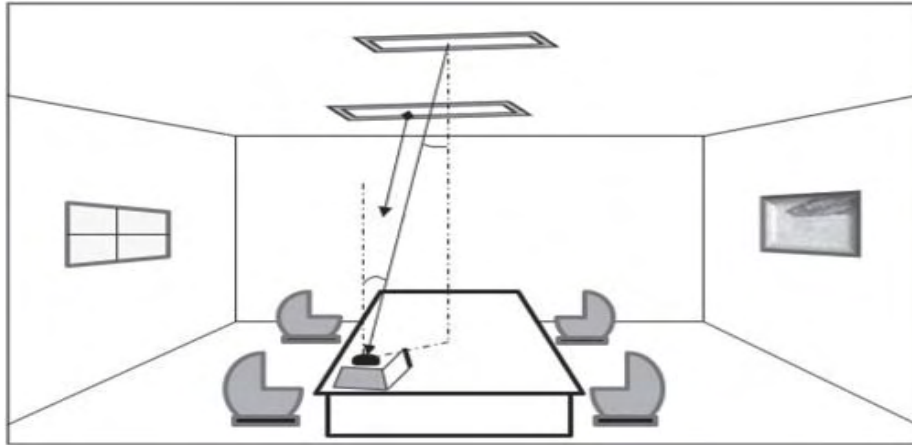
Το πείραμα που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται σε ένα δωμάτιο εργασιακού χώρου διαστάσεων 5m μήκους 5m πλάτους και 3m ύψους. Στην οροφή είναι τοποθετημένα τέσσερα LEDs τα οποία στέλνουν φως στην επιφάνεια ενός γραφείου ύψους 0.85m στο οποίο είναι τοποθετημένη μια φωτοδίοδος εμβαδού 1cm^2 . Στο πείραμα τα τέσσερα LEDs είναι τοποθετημένα συμμετρικά ως προς τους νοητούς άξονες x,y θεωρώντας πως το σημείο (0,0) βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της οροφής. Ο κάθε πομπός του πειράματος θεωρείται ως μια σημειακή πηγή εκπομπής φωτός ίδια προς κάθε κατεύθυνση και διαθέτει μια συστοιχία από 60 μικρότερα LEDs ισχύος 20mW. Η εκπομπή των LEDs ακολουθεί την Lambertian κατανομή με γωνία ημισυχός τις 70° . Μέσω κατάλληλων εντολών του Matlab το διάστημα -2.5 έως 2.5 κατά μήκος και πλάτος του δωματίου, χωρίζεται σε 25 σημεία, από τα οποία υπολογίζεται η απόσταση του κάθε LED που βρίσκεται στην οροφή σε ύψος 2.15m. Στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνία ακτινοβολίας του κάθε LED και με τη χρήση του τύπου της λαμβανόμενης ισχύος [1.9] υπολογίζεται η κατανομή που θα έχει, από την οροφή έως την επιφάνεια του γραφείου, οπουδήποτε κι αν τοποθετηθεί στο δωμάτιο [8].

Στη συνέχεια της εργασίας αναπτύχθηκε πρόγραμμα μέσω του Matlab στο οποίο μελετάται η οριζόντια φωτεινότητα, ενός, τεσσάρων, έξι, οκτώ και εννέα LEDs τοποθετημένα στην οροφή του δωματίου. Η ίδια μελέτη έγινε και για την κατανομή της λαμβανόμενης ισχύος για τον ίδιο αριθμό LEDs. Και στις δύο περιπτώσεις διάφοροι παράμετροι τροποποιήθηκαν για να μελετηθεί η συμπεριφορά τόσο της οριζόντιας φωτεινότητας όσο και της λαμβανόμενης ισχύος στις τροποποιήσεις αυτές. Όλη η εργασία αφορά την εκπομπή φωτός στο LOS (Line of Sight), απουσία θορύβου, σκιάσεων και εμποδίων ανάμεσα στους πομπούς και το δέκτη.

4.3.3 Περιγραφή δωματίου

Θεωρούμε τυπικό δωμάτιο γραφείου διαστάσεων, μήκους 5m, πλάτους 5m και ύψους 3m. Στο συγκεκριμένο δωμάτιο είναι τοποθετημένα στην οροφή 4 LEDs και ένα γραφείο ύψους 0.85m. στο οποίο είναι τοποθετημένη μια φωτοδίοδος 1cm^2 .

Οι πομποί (τέσσερα LEDs) εκπέμπουν φωτεινή ένταση προς κάθε κατεύθυνση του δωματίου, ο δέκτης (φωτοδίοδος), συλλέγει τη φωτεινή ένταση.



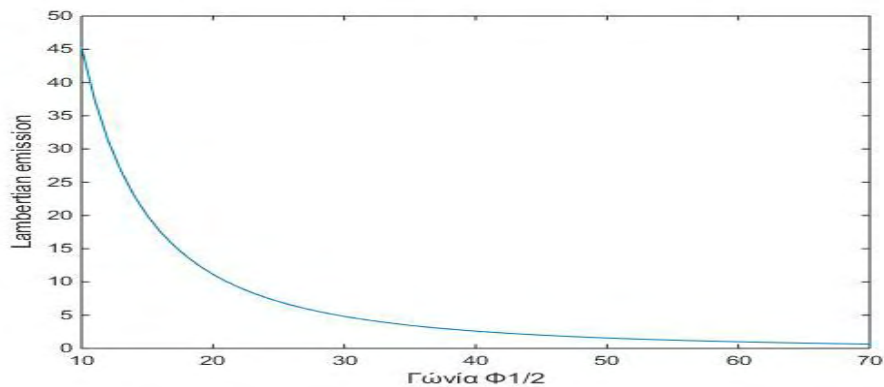
Σχημα 4.1: Παρουσίαση δομής ενός τυπικού γραφείου [8].

Τα LEDs τα οποία χρησιμοποιούνται εκπέμπουν φως κατά τη Lambertian εκπομπή. Η Lambertian εκπομπή είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό των LEDs, σχετίζεται με τη γωνία ημισχύος του πομπού (LED) και εκφράζει το μοτίβο με το οποίο ο πομπός εκπέμπει το φως. Ο τύπος που περιγράφει τη Lambertian εκπομπή είναι:

$$m = - \frac{\ln 2}{\ln(\cos(\phi_s))} \quad (6)$$

όπου ϕ_s είναι η γωνία ημισχύος του LED.

Από τον τύπο καταλαβαίνουμε ότι όταν η γωνία ημισχύος του LED αυξάνεται, η Lambertian εκπομπή μειώνεται. Χρησιμοποιώντας μια απλή εντολή plot στο Matlab σχηματίζουμε την ακόλουθη γραφική παράσταση ανάμεσα στο Lambertian emission (m) και τη γωνία ημισχύος του LED:



Σχήμα 4.2: Lambertian εκπομπή όσο η γωνία ημισχύος $\Phi_{1/2}$ μειώνεται

για γωνία $\Phi_{1/2}=60^\circ$, το $m=1$ ενώ για γωνία $\Phi_{1/2}=90^\circ$ το $m=0$.

4.3.4 Φωτεινότητα στην επιφάνεια ενός γραφείου

Η κατανομή της φωτεινότητας στην επιφάνεια του γραφείου προσδιορίζει το ποσό της φωτεινής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει σε αυτή την επιφάνεια και δείχνει το πόσο αποτελεσματικά φωτίζεται τελικά από τη φωτεινή πηγή. Η κατανομή της οριζόντιας φωτεινότητας υπολογίζεται από τον τύπο:

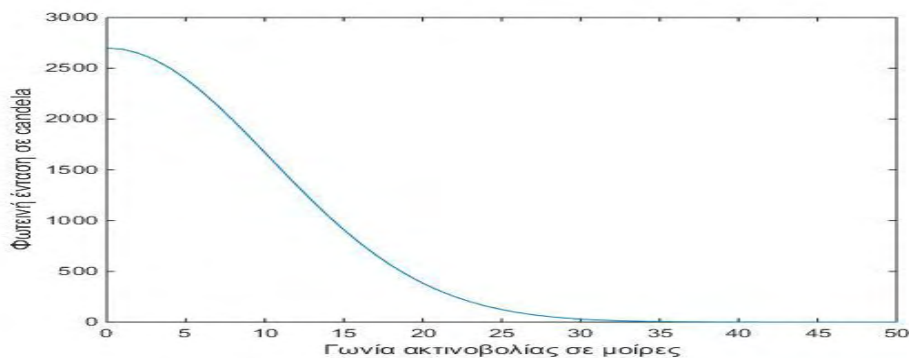
$$E_{hor} = \frac{I_0}{D^2} \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\psi) \quad (7)$$

Ο αριθμητής του κλάσματος προσδιορίζει τη φωτεινή ένταση (I_0) του LED υπό γωνία ϕ , όπου ϕ είναι η γωνία ακτινοβολίας η οποία σχηματίζεται από την κάθετη στην επιφάνεια του LED και τη νοητή γραμμή που ενώνει το LED με το σημείο στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε τη φωτεινή ένταση. Το I_0 είναι η κεντρική φωτεινή ένταση του LED που προσδιορίζεται από τη φωτεινή ροή ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Επομένως ο τύπος που εκφράζει τη φωτεινή ένταση υπό γωνία ϕ υπολογίζεται ως εξής:

$$I(\phi) = I_0 \cdot \cos^m(\phi) \quad (8)$$

Το m εκφράζει τη Lambertian εκπομπή του LED.

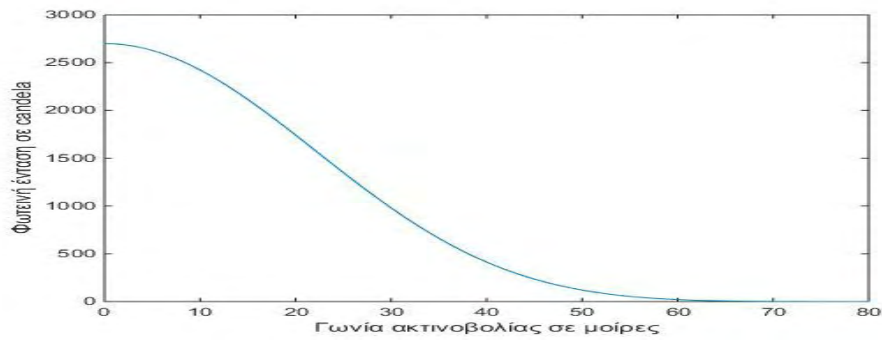
Αν δεχτούμε ότι η κεντρική φωτεινή ένταση (I_0) είναι 2700cd και η Lambertian εκπομπή εκπέμπει για γωνία ημισχύος 12° , τότε το διάγραμμα της φωτεινής έντασης $I(\phi)$ παίρνει τη μορφή:



Σχήμα 4.3: Φωτεινή ένταση για γωνία ημισχύος $\Phi_{1/2}=12^\circ$ (1ο τεταρτημόριο)

Από το Σχήμα (4.3) της φωτεινής έντασης προς τη γωνία ακτινοβολίας ϕ διαπιστώνεται ότι καθώς η γωνία αυξάνεται η φωτεινή ένταση μειώνεται. Για γωνία 0° η φωτεινή ένταση παίρνει τη μέγιστη τιμή της 2700cd, ενώ για γωνίες μεγαλύτερες των 24° η φωτεινή ένταση τείνει προς το μηδέν επειδή η γωνία ημισχύος είναι 12 μοίρες επομένως η συνολική γωνία ισχύος του LED είναι οι 24° . Μόλις η γωνία αυτή ξεπεραστεί τότε η φωτεινή ένταση μηδενίζεται.

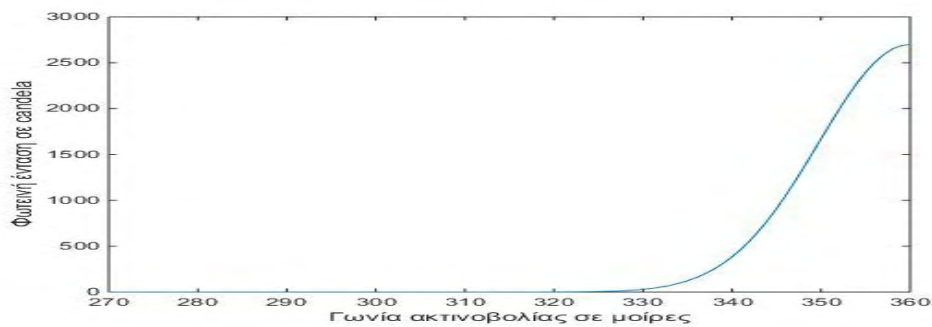
Αν λοιπόν αυξήσουμε τη γωνία ημισχύος στις 25° τότε το διάγραμμα της φωτεινής έντασης παίρνει τη μορφή:



Σχήμα 4.4: Φωτεινή ένταση για γωνία ημισχύος $\Phi_{1/2}=25^\circ$ (1ο τεταρτημόριο)

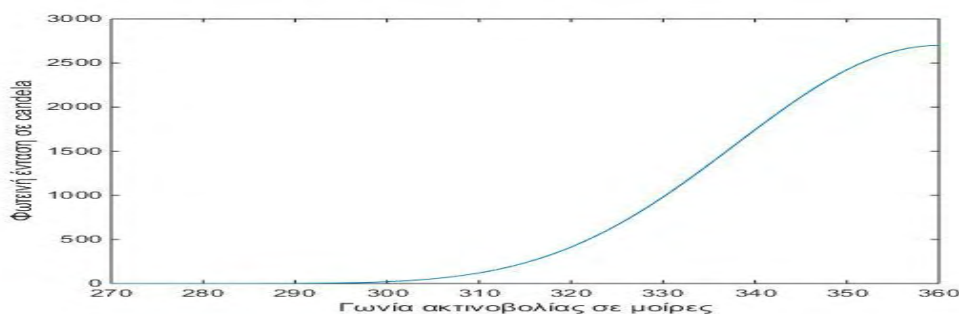
Από το Σχήμα (4.4) λοιπόν είναι φανερό ότι πάλι η φωτεινή ένταση μειώνεται καθώς η γωνία ημισχύος αυξάνεται, παίρνοντας τη μέγιστη τιμή της 2700cd στις 0° , ενώ από τις 50° , η οποία είναι η συνολική γωνία ακτινοβολίας του LED, και έπειτα η φωτεινή ένταση σχεδόν μηδενίζεται.

Μελετώντας τη συμπεριφορά της φωτεινής έντασης στο 4ο τεταρτημόριο ($270-360^\circ$) για γωνία ημισχύος ($\Phi_{1/2}$) 12° τότε το διάγραμμα φωτεινή ένταση/γωνία ακτινοβολίας είναι:



Σχήμα 4.5: Φωτεινή ένταση για γωνία ημισχύος $\Phi_{1/2}=12^\circ$ (4ο τεταρτημόριο)

Στο Σχήμα (4.5) η φωτεινή ένταση αυξάνεται όσο αυξάνεται και η γωνία ημισχύος. Η ανοδική πορεία της φωτεινής έντασης ξεκινάει περίπου από τις 336° με τη φωτεινή ένταση να λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της 2700cd στις 360° . Αυτό συμβαίνει γιατί η συνολική γωνία ημισχύος του LED είναι 24° . Αν αυξήσουμε τη γωνία ημισχύος του LED στις 25° τότε η φωτεινή ένταση ξεκινάει να αυξάνει από τις 310° και πάλι λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της 2700cd στις 360° . Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα (4.6) :



Σχήμα 4.6: Φωτεινή ένταση για γωνία ημισχύος $\Phi_{1/2}=25^\circ$ (4ο τεταρτημόριο)

5. Οριζόντια Φωτεινότητα

Πίνακας Γενικών Παραμέτρων Οριζόντιας Φωτεινότητας

| | |
|----------------------------------|--------------|
| Κεντρική φωτεινή ένταση ενός LED | 0.75 cd |
| Συνολική φωτεινή ένταση | 2700 cd |
| Γωνία μισής ακτινοβολίας | 70° |
| Αριθμός των LEDs | 60x60 (3600) |

Πίνακας 5.1 : Πίνακας παραμέτρων συστήματος VLC για την οριζόντια φωτεινότητα

5.1 1 LED

Η οριζόντια φωτεινότητα υπολογίζεται από τη φωτεινή ένταση προς το τετράγωνο του ύψους επί το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης. Επομένως ισχύει ο τύπος (7):

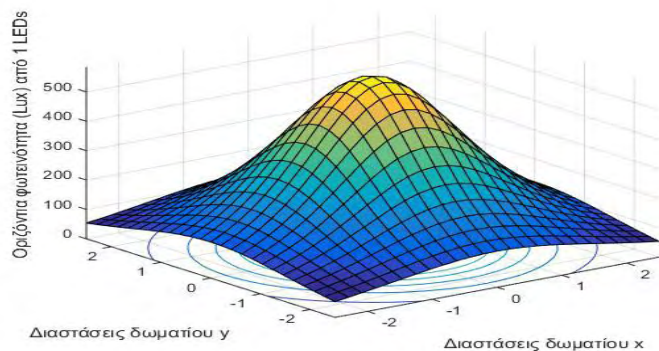
$$E_{hor} = \frac{I_0}{D^2} \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\psi)$$

Θα μοντελοποιηθεί η οριζόντια φωτεινότητα σε ένα δωμάτιο διαστάσεων 5m μήκους, 5m πλάτους και 3m ύψους, όταν στην οροφή του δωματίου υπάρχουν τοποθετημένα 1LED, 4LEDS, 6LEDS, 8LEDS και 9LEDS και μέσα στο δωμάτιο υπάρχει γραφείο ύψους 0.85. Στη συνέχεια θα αλλαχτούν κάποιες παράμετροι, ώστε να δούμε πως αντιδρά η οριζόντια φωτεινότητα στις αλλαγές αυτές.

Η οριζόντια φωτεινότητα εκφράζει το πόσο αποτελεσματικά η φωτεινή πηγή φωτίζει έναν χώρο. Μονάδα μέτρησης της οριζόντιας φωτεινότητας είναι το Lux (lx). Με βάση το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO: International Organization for Standardization), ένα δωμάτιο έχει επαρκή φωτισμό για τιμές μεταξύ 300-1500lx [13].

Κάθε LED που είναι τοποθετημένο στο δωμάτιο αποτελείται από μια συστοιχία των 60 LEDs. Επόμενος 1 LED αποτελείται από 3600 μικρότερα LED, που το καθένα εκπέμπει φωτεινή ένταση 0.75cd. Η συνολική φωτεινή ένταση λοιπόν ενός τέτοιου LED είναι 2700cd.

Για ένα LED τοποθετημένο στην οροφή στη θέση (0,0), με τις παραπάνω διαστάσεις που αναφέρθηκαν και κεντρική φωτεινή ένταση του LED 2700cd, το διάγραμμα της οριζόντιας φωτεινότητας είναι:

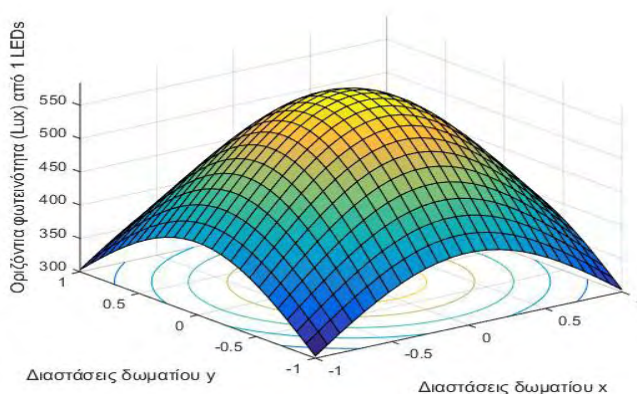


Σχήμα 5.1: Οριζόντια φωτεινότητα για $I_0=2700\text{cd}$ και ύψος $D=2.15\text{m}$ (1 LED)

Βάσει του Σχήματος (5.1) η ελάχιστη φωτεινότητα που θα ληφθεί στην επιφάνεια του γραφείου ύψους 0.85m είναι 53.67lx , αν το γραφείο τοποθετηθεί σε μία από τις τέσσερις γωνίες του δωματίου. Αν το γραφείο τοποθετηθεί στη μέση του δωματίου, ακριβώς κάτω από τη φωτεινή πηγή LED, δηλαδή στη θέση $(0,0)$, τότε η φωτεινότητα στην επιφάνεια του γραφείου θα λάβει τη μέγιστη τιμή της που είναι 584.09lx . Βάσει λοιπόν αυτών των αποτελεσμάτων ένα LED με κεντρική φωτεινή ένταση 2700cd δεν φωτίζει επαρκώς όλο το χώρο ενός δωματίου με τις συγκεκριμένες διαστάσεις σύμφωνα με τις τιμές που έχει καθορίσει το ISO.

5.1.1 Αλλαγή διαστάσεων δωματίου

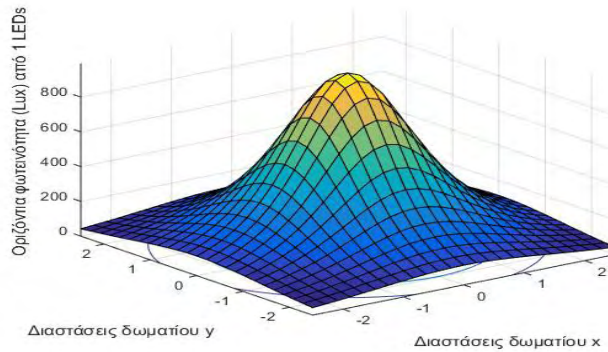
Οι ελάχιστες διαστάσεις ενός δωματίου που απαιτούνται για να φωτιστεί επαρκώς, από μια φωτεινή πηγή με κεντρική φωτεινή ένταση 2700cd και Lambertian εκπομπή στις 70° , η οποία βρίσκεται στο κέντρο της οροφής και απέχει από ένα γραφείο 2.15m είναι 2m μήκος, 2m πλάτος και 3m ύψος. Σε μια τέτοια περίπτωση, η ελάχιστη τιμή φωτεινότητας είναι 303.27lx και η μέγιστη 583.26lx , όπως φαίνεται στο Σχήμα (5.2).



Σχήμα 5.2: Οριζόντια φωτεινότητα με $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=2.15\text{m}$ και διαστάσεων δωματίου $2\text{m} \times 2\text{m} \times 3\text{m}$ (1 LED)

5.1.2 Αλλαγή ύψους

Σπουδαία σημασία παίζει το ύψος της πηγής από την επιφάνεια του γραφείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα (5.3). Αν μειώσουμε το ύψος της οροφής του δωματίου στα 2.5m (αντι για 3m), αφήνοντας όλες τις υπόλοιπες διαστάσεις στις αρχικές του τιμές, η οριζόντια φωτεινότητα από το ίδιο LED θα είναι:

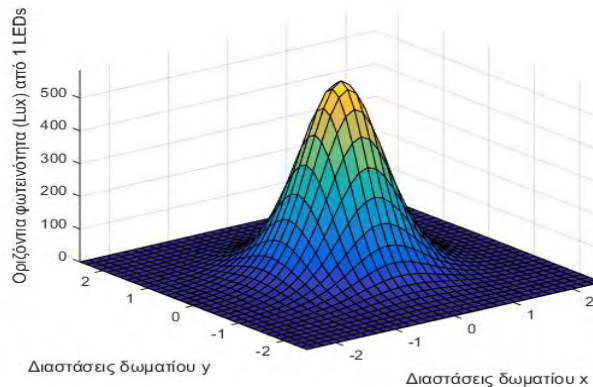


Σχήμα 5.3 : Οριζόντια φωτεινότητα με $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=1.65\text{m}$ (1 LED)

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητα είναι τα 991.73lx και η ελάχιστη 43.017lx .

5.1.3 Αλλαγή του $\Phi_{1/2}$

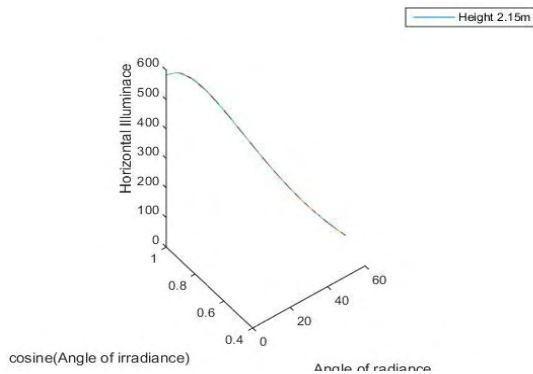
Η Lambertian εκπομπή προσδιορίζει το πόσο ανοιχτά η εστιασμένα εκπέμπει το φως η φωτεινή πηγή που χρησιμοποιούμε. Για αυτό το λόγο όσο πιο μικρή είναι η γωνία ημισχύος ($\Phi_{1/2}$) τόσο πιο εστιασμένη είναι η οριζόντια φωτεινότητα. Για ένα δωμάτιο λοιπόν με τις αρχικές διαστάσεις ($5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$) η οριζόντια φωτεινότητα για γωνία $\Phi_{1/2} = 20^\circ$ είναι:



Σχήμα 5.4 : Οριζόντια φωτεινότητα με $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=2.15\text{m}$ και $\Phi_{1/2}=20^\circ$ (1 LED)

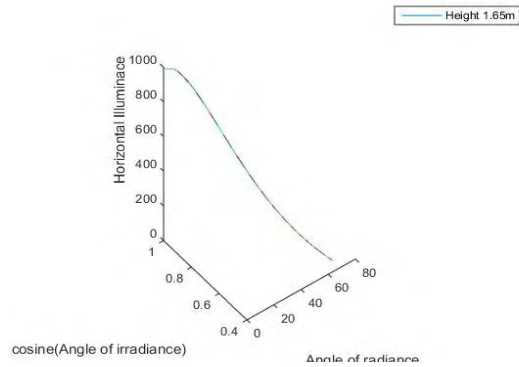
Στο Σχήμα (5.4) βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της οριζόντιας είναι 584.09lx και λαμβάνεται ακριβώς στο κέντρο του δωματίου. Η ελάχιστη τιμή μειώθηκε επειδή μειώθηκε η γωνία ημισχύος του LED στις 20° επομένως φτάνει λιγότερο φως στις άκρες του δωματίου. Η τιμή της ελάχιστης οριζόντιας φωτεινότητας είναι 0.0556lx .

Το διάγραμμα της οριζόντιας φωτεινότητας μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία ακτινοβολίας. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν:



Σχήμα 5.5: Οριζόντια φωτεινότητα σε σχέση

με τη γωνία ακτινοβολίας και τα συνημίτονα των γωνιών αυτών και ύψος 2.15m



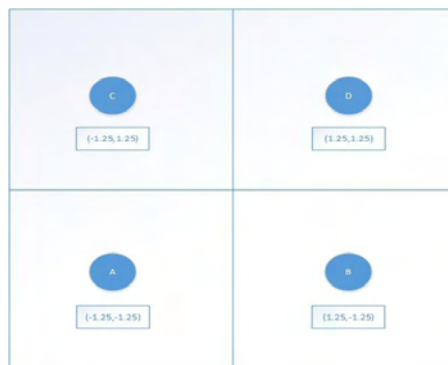
Σχήμα 5.6: Οριζόντια φωτεινότητα σε σχέση με τη γωνία

ακτινοβολίας και τα συνημίτονα των γωνιών αυτών και ύψους 1.65m

Όταν το ύψος λοιπόν του LED από την επιφάνεια του γραφείου είναι 2.15m Σχήμα (5.5), η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας υπό γωνία ακτινοβολίας 0° με συνημίτονο αυτής της γωνίας 1, είναι 584.09lx, ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 53.67lx. Αντίστοιχα για ύψος 1.65m του LED από την επιφάνεια του γραφείου και υπό γωνία ακτινοβολίας 0° (Σχήμα (5.6)), η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας είναι 991.71lx ενώ η ελάχιστη είναι 43.017lx.

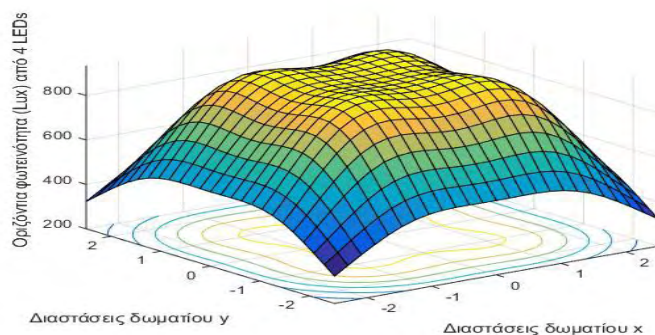
5.2 4 LEDs

Τα 4 LEDs με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι αρκετά ώστε να φωτίσουν ένα δωμάτιο με τις συγκεκριμένες διαστάσεις. Τα LEDs εκπέμπουν με Lambertian εκπομπή στις 70° είναι τοποθετημένα στην οροφή στις θέσεις: LED A (-1.25,-1.25), LED B (1.25,-1.25), LED C (-1.25,1.25), LED D (1.25,1.25). Οι θέσεις των LEDs στο δωμάτιο φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.1 : Κατανομή τεσσάρων LEDs στην οροφή δωματίου διαστάσεων 5m x 5m x 3m

Οπουδήποτε κι αν τοποθετηθεί το γραφείο ύψους 0.85m θα λαμβάνει ικανοποιητικό ποσό οριζόντιας ακτινοβολίας.

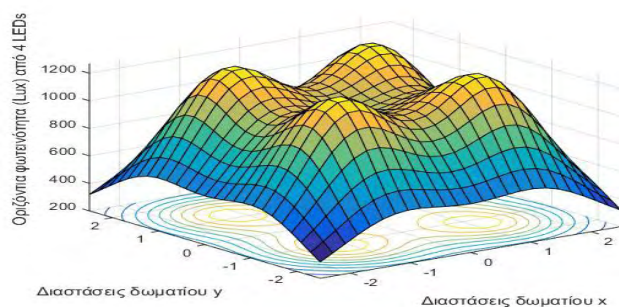


Σχήμα 5.7 : Οριζόντια φωτεινότητα με $I_0=2700\text{cd}$ και ύψος $D=2.15\text{m}$ (4 LEDs)

Στο Σχήμα (5.7) η ελάχιστη τιμή οριζόντιας ακτινοβολίας στο δωμάτιο είναι 323.36lx , ενώ η μέγιστη 934.23lx .

5.2.1 Αλλαγή ύψους

Μειώνοντας το ύψος του δωματίου κατά 0.50m , ο φωτισμός στο δωμάτιο γίνεται πιο επαρκής για έναν χώρο εργασίας. Το ύψος από την οροφή ως το γραφείο μειώνεται στο 1.65m . Έτσι η οριζόντια φωτεινότητα παίρνει τη μορφή του Σχήματος (5.8):

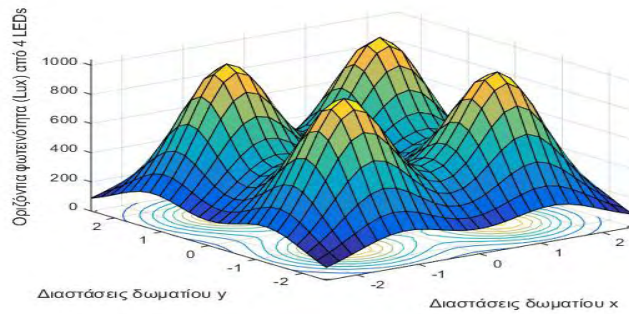


Σχήμα 5.8 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$ και ύψος $D=1.65\text{m}$ (4 LEDs)

Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας σε μια τέτοια περίπτωση είναι 1269lx , ενώ η ελάχιστη 319.2lx . Επομένως σε οποιοδήποτε σημείο του δωματίου κι αν τοποθετηθεί το γραφείο η οριζόντια φωτεινότητα πάνω στην επιφάνεια του, θα βρίσκεται μέσα στο όριο τιμών που έχει καθορίσει το ISO.

5.2.2 Μείωση του $\Phi_{1/2}$

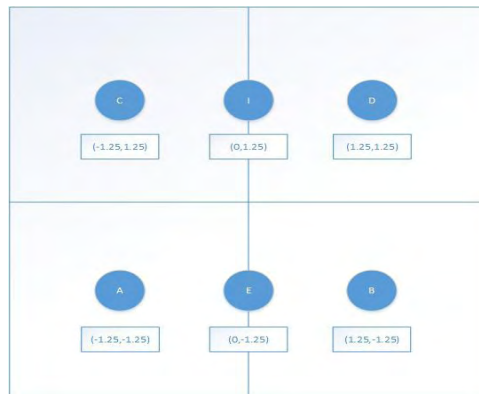
Αν μειωθεί στο μισό η γωνία $\Phi_{1/2}$, δηλαδή στις 35° τότε η Lambertian εκπομπή των LEDs θα στενέψει επόμενως το διάγραμμα της οριζόντιας φωτεινότητας θα γίνει, όπως απεικονίζει και το Σχήμα (5.9):



Σχήμα 5.9 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=1.65\text{m}$, $\Phi_{1/2}=35^\circ$ (4 LEDs)

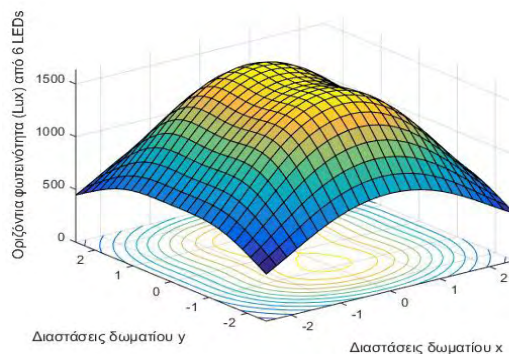
5.3 6 LEDs

Τοποθετούμε 2 επιπλέον LEDs στις θέσεις (0,1.25) και (0,-1.25) επομένως το σχήμα του δωματίου γίνεται:



Εικόνα 5.2 : Κατανομή έξι LEDs στην οροφή ενός δωματίου διαστάσεων 5m x 5m x 3m

Το διάγραμμα της οριζόντιας φωτεινότητας σε αυτή την περίπτωση είναι:



Σχήμα 5.10 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$ και ύψους $D=2.15\text{m}$ (6 LEDs)

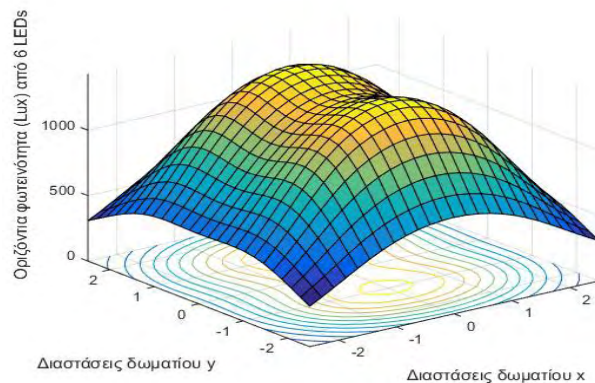
Στο Σχήμα (5.10) η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας, η οποία είναι 1634.7lx ξεπερνά το όριο που έχει θέσει το ISO για τη μέγιστη φωτεινότητα που πρέπει να έχει ένα δωμάτιο, ενώ η ελάχιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας μέσα στο δωμάτιο είναι 446.57lx.

Για να διορθωθεί αυτό το πρόβλημα υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές που μπορούμε να ακολουθήσουμε, αλλάζοντας διάφορες παραμέτρους.

5.3.1 Μείωση του $\Phi_{1/2}$.

Μειώνοντας το $\Phi_{1/2}$, τα LEDs εκπέμπουν πιο εστιασμένα το φως. Γι αυτό το λόγο υπάρχει μικρότερη επικάλυψη στις δέσμες φωτός των LEDs, επομένως η φωτεινότητα κάτω από τα LEDs μειώνεται.

$$\Phi_{1/2} = 51^\circ.$$

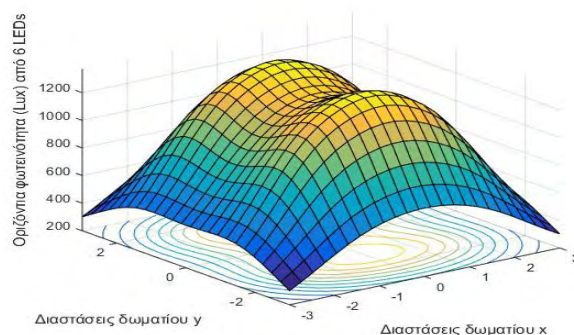


Σχήμα 5.11 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψους $D=2.15\text{m}$ και $\Phi_{1/2}=51^\circ$ (6 LEDs)

Στο Σχήμα (5.11) η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας είναι 1427.9lx και η ελάχιστη 308.58lx .

5.3.2 Αύξηση διαστάσεων δωματίου

Αυξάνοντας το μήκος και το πλάτος του δωματίου κατά ένα μέτρο και αφήνοντας το ύψος σταθερό (6m, 6m, 3m), η οριζόντια φωτεινότητα παίρνει τιμές μέσα στα όρια του ISO:

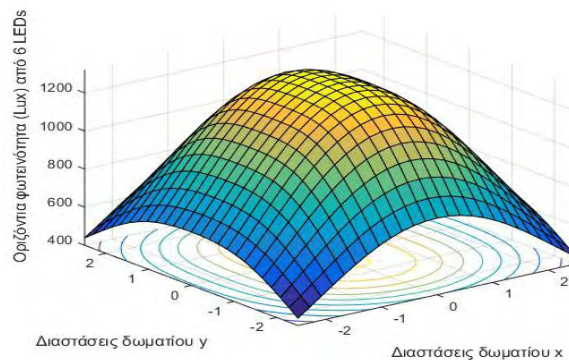


Σχήμα 5.12 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψους $D=2.15\text{m}$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ και διαστάσεων δωματίου 6m x 6m x 3m (6 LEDs)

Στο Σχήμα (5.12) μέγιστη οριζόντια φωτεινότητα: 1370.4lx , ελάχιστη οριζόντια φωτεινότητα: 301.83lx

5.3.3 Αύξηση του ύψους του δωματίου

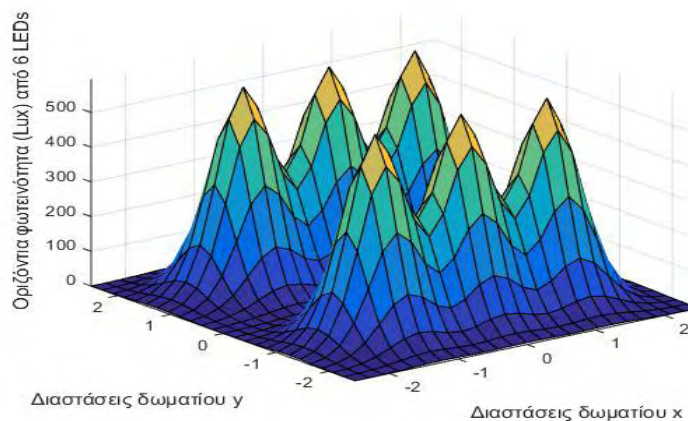
Αυξάνοντας κατά μισό μέτρο το ύψος του δωματίου (3.50m), η απόσταση των LEDs από το γραφείο είναι 2.65m το διάγραμμα γίνεται:



Σχήμα 5.13 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=2.65\text{m}$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ (6 LEDs)

Στο Σχήμα (5.13) η μέγιστη οριζόντια τιμή είναι 1319.31lx , ενώ η ελάχιστη είναι 438.51lx .

Λόγω αύξησης του ύψους υπάρχει μεγαλύτερη διάχυση του φωτός. Όσο μειώνεται η γωνία $\Phi_{1/2}$ η διάχυση δεν είναι τόσο έντονη. Για ύψος 2.15m και γωνία $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, το ποσό της οριζόντιας φωτεινότητας είναι ίδια ακριβώς κάτω από κάθε LED.

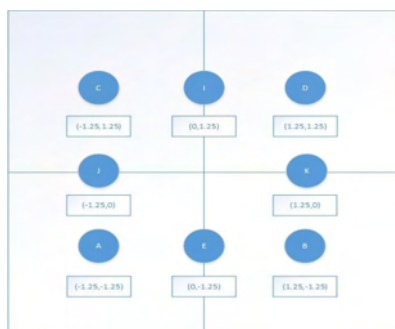


Σχήμα 5.14 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=2.15\text{m}$, $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$ (6 LEDs)

Στο Σχήμα (5.14) η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας είναι 595.34lx , η οποία λαμβάνεται κάτω από κάθε LED, ενώ η ελάχιστη είναι 0.1549lx , η οποία λαμβάνεται στις γωνίες του δωματίου.

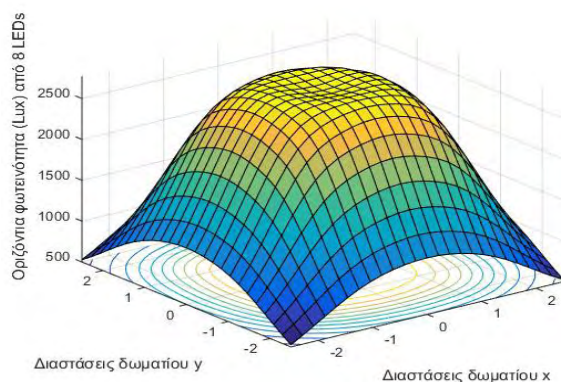
5.4 8 LEDs

Στην περίπτωση των 8 LEDs τοποθετούνται άλλα 2 στις θέσεις $(1.25,0)$ και $(-1.25,0)$ δηλαδή το σχήμα του δωματίου γίνεται:



Εικόνα 5.3 : Κατανομή οκτώ LEDs στην οροφή ενός δωματίου διαστάσεων 5m x 5m x 3m

Το διάγραμμα της οριζόντιας φωτεινότητας, 8 LEDs, ύψους 1.65m και $\Phi_{1/2}=70^\circ$ είναι:

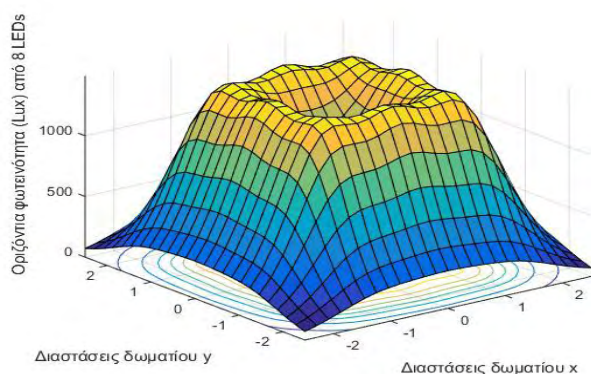


Σχήμα 5.15 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=1.65\text{m}$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ (8 LEDs)

Στο Σχήμα (5.15) ο φωτισμός είναι πάρα πολύ υψηλός για ένα δωμάτιο 5m,5m,3m με μέγιστη τιμή 2769.6lx και ελάχιστη 527.93lx.

5.4.1 Μείωση του $\Phi_{1/2}$

Μειώνοντας το $\Phi_{1/2}$ στις 31° η ελάχιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας γίνεται χαμηλότερη από το όριο του ISO.

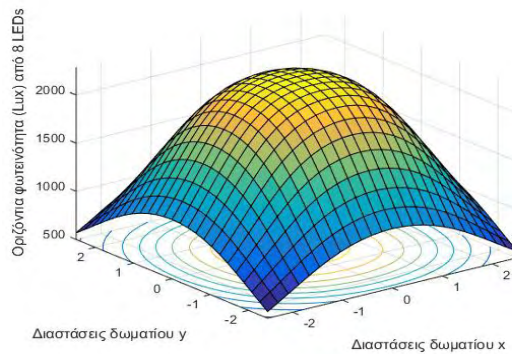


Σχήμα 5.16 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=1.65\text{m}$, $\Phi_{1/2}=31^\circ$ (8 LEDs)

Στο Σχήμα (5.16) η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας είναι 1490.7lx και η ελάχιστη είναι 71.22lx. Επομένως δεν είναι σε όλο το δωμάτιο επαρκής ο φωτισμός.

5.4.2 Αύξηση του ύψους

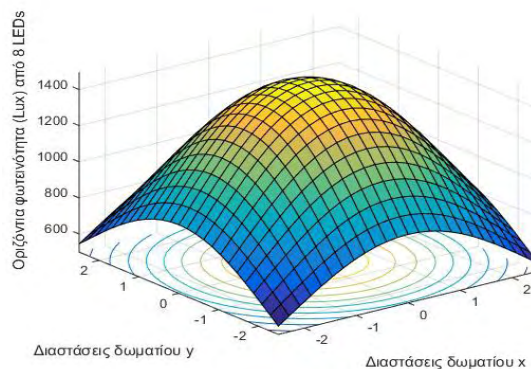
Αν το ύψος αυξηθεί στα 2.15m διατηρώντας τη γωνία $\Phi_{1/2}$ στις 70° το διάγραμμα είναι:



Σχήμα 5.17 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=2.15\text{m}$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ (8 LEDs)

Στο Σχήμα (5.17) ο φωτισμός είναι πολύ υψηλός στο κέντρο του δωματίου αφού η μέγιστη τιμή της οριζόντιας φωτεινότητας είναι 2285.4lx , ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 569.78lx .

Για να είναι στα όρια του ISO ο φωτισμός σε ένα δωμάτιο 5m μήκους και 5m πλάτους πρέπει το ύψος να αυξηθεί κατά 1m, δηλαδή να γίνει 4m.

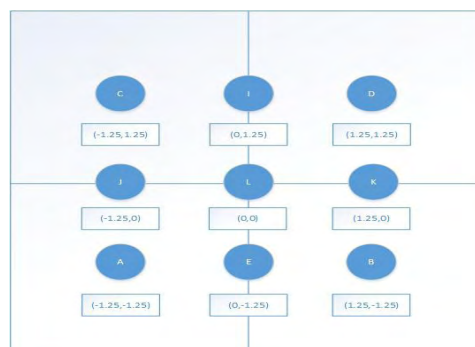


Σχήμα 5.18 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=3.15\text{m}$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ (8 LEDs)

Στο Σχήμα (5.18) η ελάχιστη οριζόντια φωτεινότητα είναι 545.9lx ενώ η μέγιστη είναι 1494.5lx .

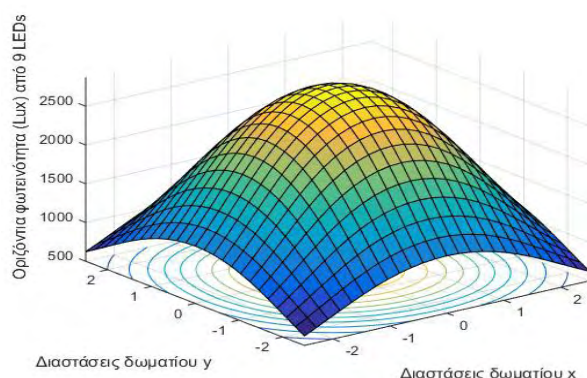
5.5 9 LEDs

Στην περίπτωση των 9 LEDs τοποθετούμε ένα επιπλέον LED στη θέση (0,0)



Εικόνα 5.4 : Κατανομή εννέα LEDs στην οροφή ενός δωματίου διαστάσεων 5m x 5m x 3m

Έτσι η γραφική παράσταση της οριζόντιας φωτεινότητας γίνεται:

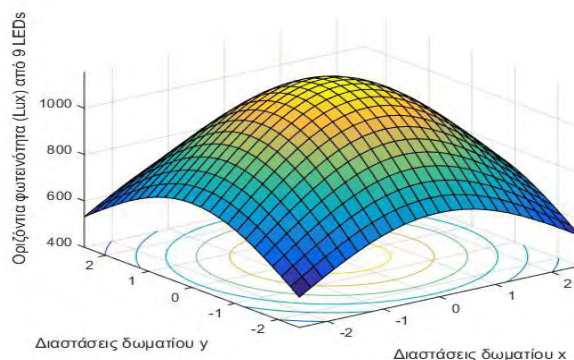


Σχήμα 5.19 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=2.15\text{m}$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ (9 LEDs)

Στο Σχήμα (5.19) η οριζόντια φωτεινότητα είναι πολύ υψηλή σε ένα δωμάτιο με αυτές τις διαστάσεις. Η τιμή της μέγιστης φωτεινότητας είναι 2869.5lx , ενώ η ελάχιστη 623.45lx .

5.5.1 Αύξηση του ύψους

Αυξάνοντας το ύψος του δωματίου στα 5m η οριζόντια φωτεινότητα από την οροφή μέχρι το γραφείο είναι ιδανική για το περιβάλλον του εργασιακού χώρου. Το ύψος είναι στα 4.15m από την οροφή μέχρι το γραφείο.

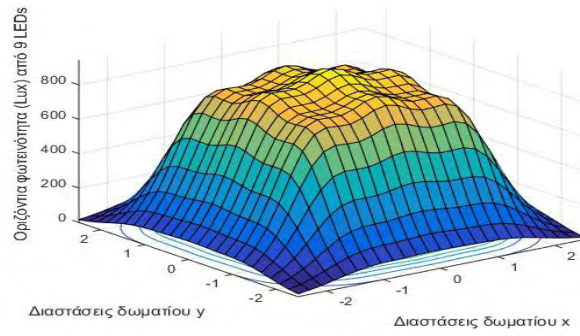


Σχήμα 5.20 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=4.15\text{m}$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ (9 LEDs)

Στο Σχήμα (5.20) η μέγιστη φωτεινότητα είναι στα 1154.8lx , ενώ η ελάχιστη στα 531.43lx .

5.5.2 Μείωση του $\Phi_{1/2}$

Όσο μειώνεται η μισή γωνία ακτινοβολίας των LEDs μειώνεται και η διάχυση, όπως επίσης μειώνεται και η οριζόντια φωτεινότητα στο δωμάτιο. Για $\Phi_{1/2}=20^\circ$:



Σχήμα 5.21 : Οριζόντια φωτεινότητα $I_0=2700\text{cd}$, ύψος $D=2.15\text{m}$, $\Phi_{1/2}=20^\circ$ (9 LEDs)

Στο Σχήμα (5.21) η ελάχιστη οριζόντια φωτεινότητα είναι 16.31lx , ενώ η μέγιστη είναι 942.71lx .

6. Λαμβανόμενη ισχύς

6.1 Μονάδα μέτρησης dB

Τα dB (decibel) είναι μια λογαριθμική μονάδα που χρησιμοποιείται για να εκφράσει την αναλογία δύο τιμών ενός φυσικού μεγέθους, συχνά την ισχύ ή την ένταση. Αρκετά συχνά η μια από τις δύο τιμές του κλάσματος είναι μια τυπική τιμή αναφοράς και τα dBs χρησιμοποιούνται για να εκφραστεί το επίπεδο της μεταβαλλόμενης τιμής ως προς τη σταθερή τιμή αναφοράς. Τα decibel ισούνται με δέκα φορές το λογάριθμο με βάση το δέκα ενός κλάσματος δύο ίδιων τιμών, ας πούμε ισχύος, άρα $\text{dB} = 10 \log(P_{\text{out}}/P_{\text{in}})$. Αν η μονάδα μέτρησης της ισχύος είναι τα mW, τότε η λογαριθμική μονάδα μετατρέπεται σε dBm. Ένας αρνητικός αριθμός σε dBm δηλώνει μια ισχύ σε mW η οποία είναι μικρότερη της μονάδας. Ένα decibel ισούται με το 1/10 του bell, η ονομασία είναι προς τιμή του Alexander Graham Bell [17].

6.2 Λαμβανόμενη Ισχύς

Η λαμβανόμενη ισχύς σε dBm του δέκτη υπολογίζεται από την οροφή μέχρι το γραφείο, πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένος ο δέκτης. Η λαμβανόμενη ισχύς στο LOS που φτάνει στο δέκτη περιγράφεται από τον τύπο:

$$P_r = P_t \cdot \frac{m+1}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) \cdot T_s(\psi) \cdot g(\psi) \cdot \cos(\psi) \quad (9)$$

για $0 \leq \psi \leq \Psi_{\text{con}}$ και 0 για $\psi > \Psi_{\text{con}}$.

όπου P_t είναι ισχύς του πομπού (LED) m είναι το Lambertian emission, $T_s(\psi)$ είναι το κέρδος οπτικού φίλτρου, $g(\psi)$ είναι το κέρδος οπτικού συγκεντρωτή, ϕ γωνία ακτινοβολίας και ψ γωνία πρόσπτωσης.

Το DC κέρδος του καναλιού σε μια κατευθυνόμενη ζεύξη δίνεται από τον τύπο:

$$H_0 = \frac{m+1}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) \cdot T_s(\psi) \cdot g(\psi) \cdot \cos(\psi) \quad (10)$$

για $0 \leq \psi \leq \psi_{\text{con}}$ και 0 για $\psi > \psi_{\text{con}}$.

Το $g(\psi)$ περιγράφεται από τον τύπο:

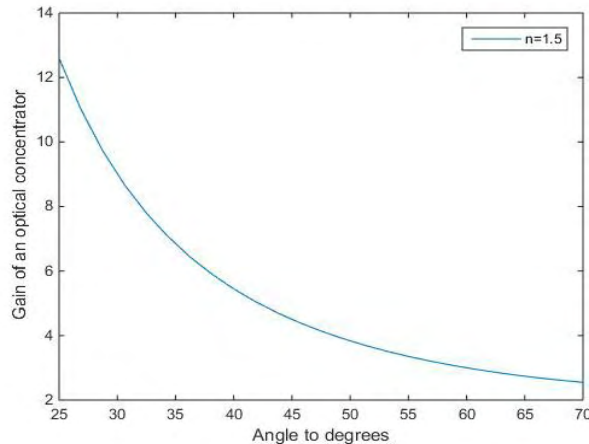
$$g(\psi) = \frac{n^2}{\sin^2(\psi)} \quad \text{για } 0 \leq \psi \leq \psi_{\text{con}} \text{ και } 0 \text{ για } \psi > \psi_{\text{con}}. \quad (11)$$

όπου n είναι ο δείκτης ανάκλασης του φακού της φωτοδιόδου.

Ο δείκτης ανάκλασης n ενός υλικού ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στον αέρα ως προς την ταχύτητα του φωτός στο συγκεκριμένο υλικό όταν το διαπερνά, $n = V_{\text{air}}/V_{\text{material}}$. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι 300.000km/s. Αυτή η ταχύτητα όμως αλλάζει αναλόγως το υλικό που διαπερνά το φώς. Ο δείκτης ανάκλασης n στο κενό και στον αέρα είναι 1, σε όλα τα

άλλα υλικά είναι συνήθως μεγαλύτερο του 1 ($n > 1$). Η ταχύτητα του φωτός μέσω του συγκεκριμένου υλικού του φακού είναι 200.000km/s, δια την θεωρητική ταχύτητα του φωτός στον αέρα που είναι 300.000km/s, τότε ο δείκτης ανάκλασης n του υλικού της φωτοδιόδου είναι 1.5 [18].

Από τον τύπο διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλώνει η γωνία του οπτικού πεδίου του οπτικού συγκεντρωτή το κέρδος του μειώνεται.



Σχήμα 6.1 : Το κέρδος του οπτικού συγκεντρωτή (φωτοδιόδου) καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης (ψ)

Πίνακας Γενικών Παραμέτρων Λαμβανόμενης Ισχύος

| | |
|--|------------------|
| Μεταδιδόμενη ισχύς ενός LED | 20mW |
| Συνολική μεταδιδόμενη ισχύς LEDs | 72000mW |
| Αριθμός των LEDs | 60x60 (3600) |
| Οπτικό πεδίο φωτοδιόδου | 70° |
| Εμβαδόν επιφάνειας φωτοδιόδου | 1cm ² |
| Κέρδος οπτικού φίλτρου | 1 |
| Δείκτης ανάκλασης του φακού της φωτοδιόδου | 1,5 |

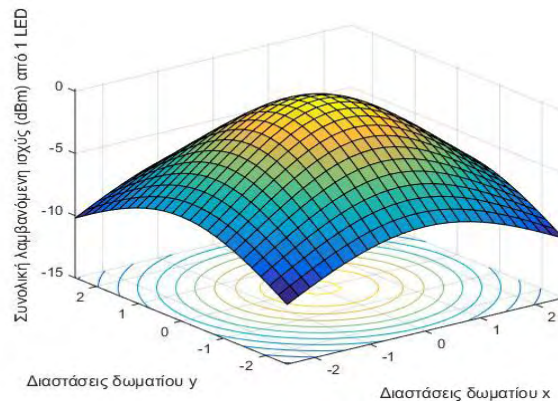
Πίνακας 6.1 : Τιμές παραμέτρων του VLC συστήματος για την λαβανόμενη ισχύ

6.3 1 LED

Κάθε ένα LED που τοποθετείται στο δωμάτιο αποτελείται από μια σειρά από 60 LEDs και μια στήλη 60 LEDs. Καθένα από αυτά τα μικρότερα LEDs έχει μεταδιδόμενη ισχύ $P_t=20mW$. Το οπτικό πεδίο της φωτοδιόδου είναι 70 μοίρες και η επιφάνεια της είναι 1τ.εκ. (0.0001cm²).

6.3.1 Αλλαγή του $\Phi_{1/2}$

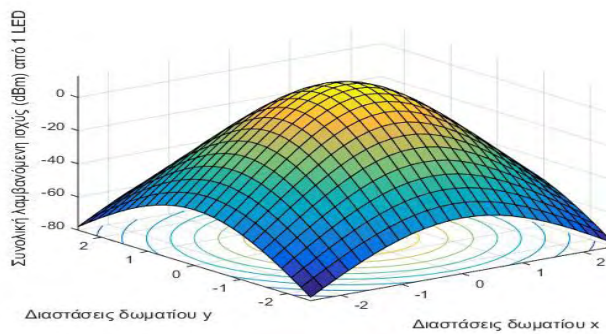
Για $\Phi_{1/2}=70^\circ$ και $FOV=70^\circ$



Σχήμα 6.2 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$, $FOV=70^\circ$ (1 LED)

Η μέγιστη τιμή της λαμβανόμενης ισχύος είναι 0.1693dBm, ενώ η ελάχιστη είναι -10.1981dBm.

Για $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$ και $FOV=70^\circ$

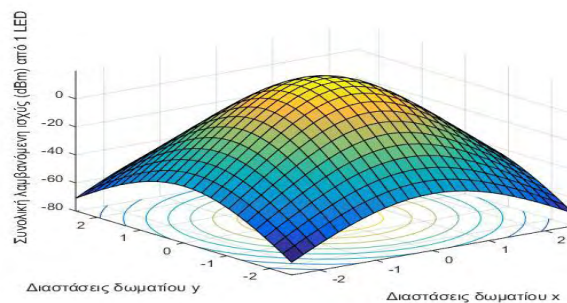


Σχήμα 6.3 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, $FOV=70^\circ$ (1 LED)

Η μέγιστη τιμή της λαμβανόμενης ισχύος είναι 12.7607dBm, ενώ η ελάχιστη είναι -77.9279dBm.

6.3.2 Αλλαγή της επιφάνειας της φωτοδιόδου

Αν αυξήσουμε την επιφάνεια της φωτοδιόδου από 1cm^2 στα 5cm^2 , η λαμβανόμενη ισχύς στο δωμάτιο θα αυξηθεί γιατί θα αυξηθεί το κέρδος του δέκτη (φωτοδίοδος). Επομένως, η λαμβανόμενη ισχύς θα είναι :



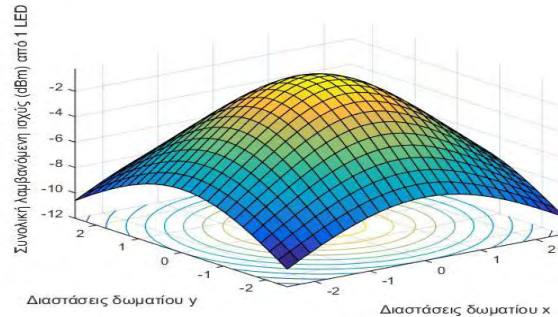
Σχήμα 6.4 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, $FOV=70^\circ$, A=5cm² (1 LED)

Έτσι στο Σχήμα (6.4), η ελάχιστη ισχύς είναι -70.93dBm ενώ η μέγιστη 19.75dBm.

6.3.3 Αλλαγή του FOV της φωτοδιόδου

Το FOV της φωτοδιόδου θεωρούμε πως είναι 70° . Οι τιμές της ισχύος, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες ή ίσες του FOV, μηδενίζονται.

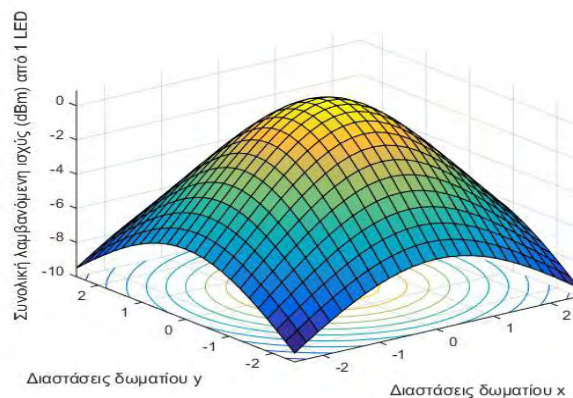
Επομένως αν έχουμε $FOV=80^\circ$ για $\Phi_{1/2}=70^\circ$ μισή γωνία ακτινοβολίας του LED τότε



Σχήμα 6.5 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=80°, A=1cm². (1 LED)

Στο Σχήμα (6.5) η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι -0.238dBm και ελάχιστη -10.6054dBm. Δεν διαπιστώνονται μεγάλες αλλαγές.

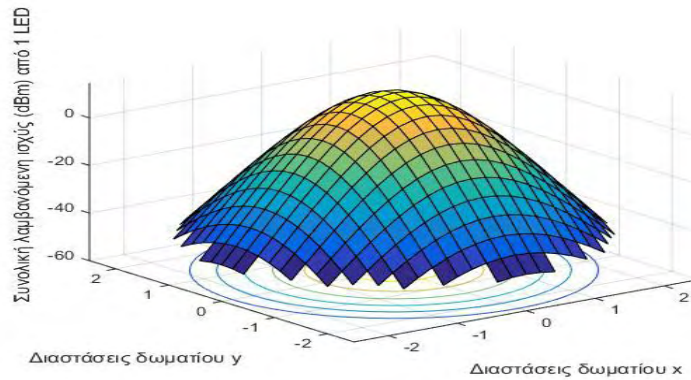
Αν FOV=60° και $\Phi_{1/2}=70^\circ$



Σχήμα 6.6 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=60°, A=1cm². (1 LED)

Στο Σχήμα (6.6) η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι 0.8784dBm και ελάχιστη -9.489dBm. Σε αυτή την περίπτωση οι αλλαγές είναι πιο εμφανείς.

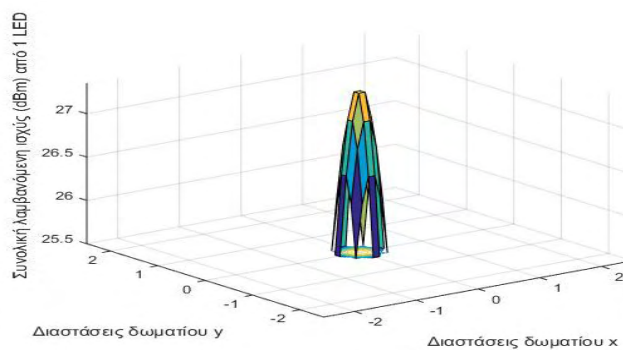
Αν FOV=50 μοίρες και $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$. Τότε το FOV= $\Phi_{1/2}$.



Σχήμα 6.7 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}$ =12.5°, FOV=50°, A=1cm². (1 LED)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα (6.7), κάποιες τιμές της λαμβανόμενης ισχύος αποκόπτονται έτσι έχουμε μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς στα 14.5353dBm, ενώ η ελάχιστη τείνει στο $-\infty$.

Αν FOV=10° και $\Phi_{1/2}$ =12.5°.

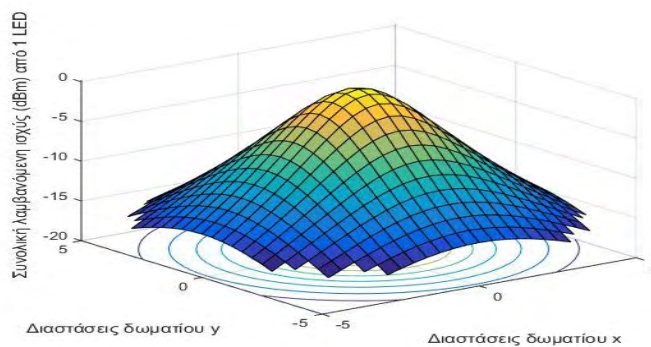


Σχήμα 6.8 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}$ =12.5°, FOV=10°, A=1cm². (1 LED)

Στο Σχήμα (6.8) μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι 27.43dBm, ενώ η ελάχιστη τείνει στο $-\infty$.

Αν διπλασιαστεί το πλάτος και το μήκος και το πλάτος του δωματίου στα 10m και επαναφέρουμε τη $\Phi_{1/2}$ και το FOV στις 70°:

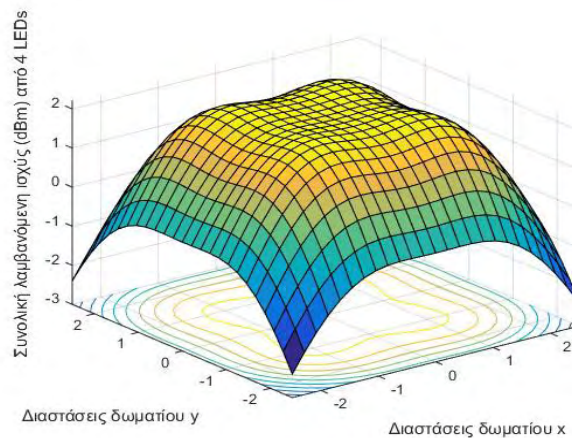
Η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι 0.1693dBm, ενώ η ελάχιστη είναι τείνει $-\infty$ όπως φαίνεται στο Σχήμα (6.9).



Σχήμα 6.9 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}$ =70°, FOV=70°, A=1cm², διαστάσεις δωματίου 10m x 10m x 3m (1 LED)

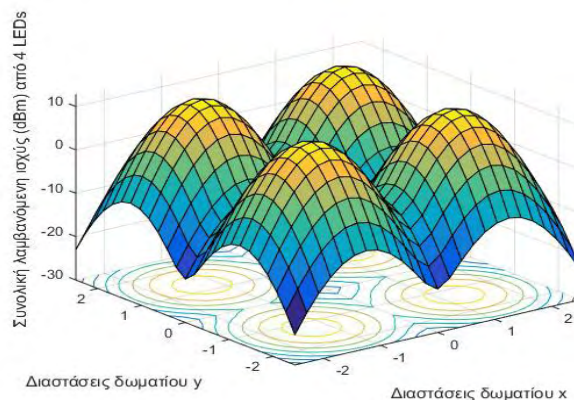
6.4 4 LEDs

Τοποθετούνται 4 LEDs στην οροφή στις θέσεις A (-1.25,-1.25), B(1.25,-1.25),C (-1.25,1.25), D(1.25,1.25), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1.



Σχήμα 6.10 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=70°, A=1cm², διαστάσεις δωματίου 5m x 5m x 3m (4 LED)

Στην περίπτωση των τεσσάρων LEDs σε ένα δωμάτιο διαστάσεων 5m, 5m, 3m, στο οποίο τα LEDs βρίσκονται σε απόσταση από το γραφείο 2.15m, με $\Phi_{1/2}=70^\circ$ και το οπτικό πεδίο του δέκτη είναι 70° , η λαμβανόμενη ισχύς είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο χώρο του δωματίου. Η μέγιστη τιμή της λαμβανόμενης ισχύος είναι 2.3dBm, ενώ η ελάχιστη -2.3dBm, όπως δείχνει και το διάγραμμα του Σχήματος (6.10). Αυτή η κατανομή βέβαια αλλάζει σε μεγάλο βαθμό αν η γωνία ημισχύος των LEDs μειωθεί. Η διάχυση του φωτός θα μειωθεί, η ισχύς κάτω από τα LEDs θα αυξηθεί, ενώ η ισχύς στις γωνίες του δωματίου θα μειωθεί. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα (6.11)

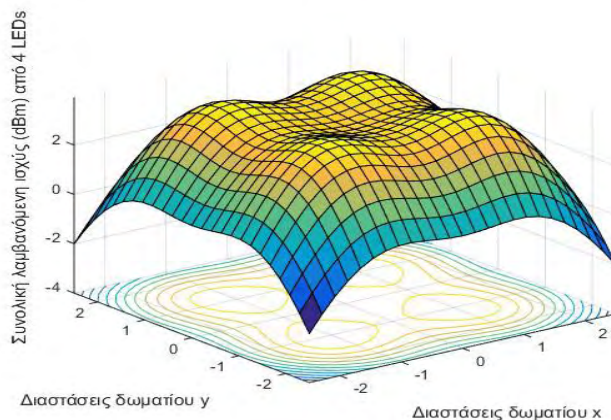


Σχήμα 6.11 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, FOV=70°, A=1cm², διαστάσεις δωματίου 5m x 5m x 3m (4 LED)

Στην περίπτωση του Σχήματος (6.11) η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι -23 dBm, ενώ η μέγιστη 12.76dBm. Φαίνεται λοιπόν ότι ενώ στην περίπτωση της $\Phi_{1/2}=70^\circ$ η διαφορά στη λαμβανόμενη ισχύ στο δωμάτιο ήταν λιγότερη από 5dBm, στην περίπτωση της $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$ η λαμβανόμενη ισχύς στο δωμάτιο διαφέρει πάνω από 35dBm.

Η διαφορά στη λαμβανόμενη ισχύς του δωματίου αρχίζει να ξεπερνά αρκετά τα 5dBm από τη στιγμή που το $\Phi_{1/2}$ γίνεται 45° . Όσο το $\Phi_{1/2}$ μειώνεται η διάφορα σε dBm της λαμβανόμενης ισχύος αυξάνεται ακόμη περισσότερο.

Για $\Phi_{1/2}=45^\circ$ η διαφορά της ισχύος στις γωνίες του δωματίου με την ισχύς που λαμβάνεται κάτω από τα LEDs, τετραπλασιάζεται.



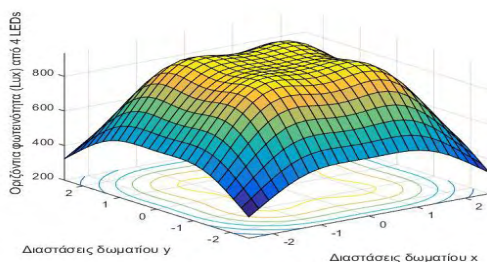
Σχήμα 6.12 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm), ισχύς LED=20mW, D=2.15m, $\Phi_{1/2}=45^\circ$, FOV=70°, A=1cm², διαστάσεις δωματίου 5m x 5m x 3m (4 LED)

Στο Σχήμα (6.12) η μέγιστη ισχύς που λαμβάνεται από το δέκτη είναι 3.92dBm, ενώ η ελάχιστη είναι -2dBm. Αυτή η διαφορά σε mW μεταφράζεται σε 2.47mW μέγιστη ισχύς και 0.62mW ελάχιστη και είναι σχεδόν τετραπλάσια.

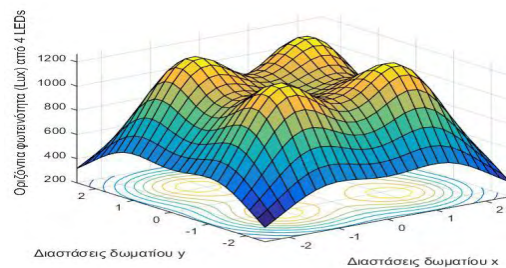
Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι η λαμβανόμενη ισχύς δεν επηρεάζεται όσο η οριζόντια φωτεινότητα από την αλλαγή του ύψους του δωματίου.

Αν το ύψος των LEDs από την οροφή ως το γραφείο από τα 2.15m γίνει 1.65m, τότε η μέγιστη οριζόντια φωτεινότητα από 934.23lx γίνεται 1269lx, δηλαδή έχουμε μια διαφορά 334.77lx. Αντίθετα η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς από τα 2.3dBm γίνεται 3.5dBm, αυτές οι αλλαγές αντιστοιχούν σε 1.66mW και 2.25mW, μια διαφορά της τάξης των 0.6mW δηλαδή.

Οριζόντια φωτεινότητα $\Phi_{1/2}=70^\circ$.



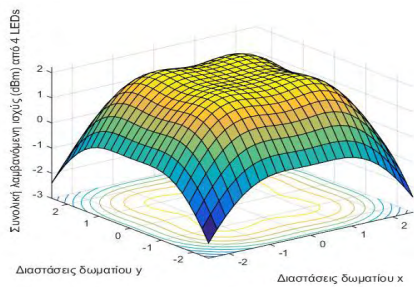
Σχήμα 6.13 : Οριζόντια φωτεινότητα για $\Phi_{1/2}=70^\circ$, D=2.15m



Σχήμα 6.14 : Οριζόντια φωτεινότητα για $\Phi_{1/2}=70^\circ$, D=1.65m

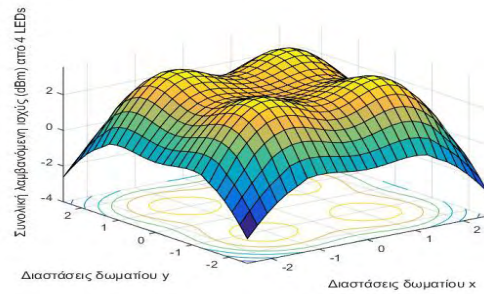
Στο Σχήμα (6.13) το ύψος είναι 2.15m και η μέγιστη οριζόντια φωτεινότητα είναι 934.23lx. Στο Σχήμα (6.14) το ύψος είναι 1.65m και η μέγιστη οριζόντια φωτεινότητα 1269lx.

Λαμβανόμενη ισχύς $\Phi_{1/2}=70^\circ$.



Σχήμα 6.15 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm),

$\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=70°, D=2.15m

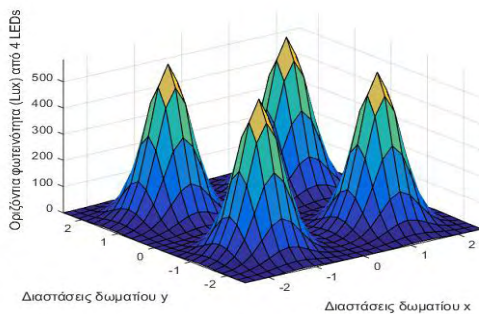


Σχήμα 6.16 : Συνολική λαμβανόμενη ισχύς (dBm),

$\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=70°, D=1.65m

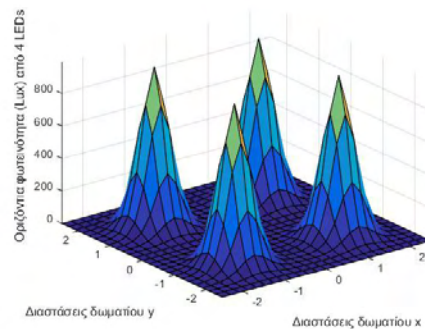
Στο Σχήμα (6.15) το ύψος είναι 2.15m και η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς 2.3dBm. Στο Σχήμα (6.16) το ύψος είναι 1.65m ενώ η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς 3.5dBm.

Οριζόντια φωτεινότητα



Σχήμα 6.17 : Οριζόντια φωτεινότητα για

$\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, D=2.15m

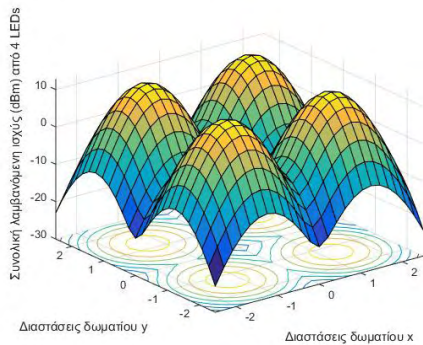


Σχήμα 6.18 : Οριζόντια φωτεινότητα για

$\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, D=1.65m

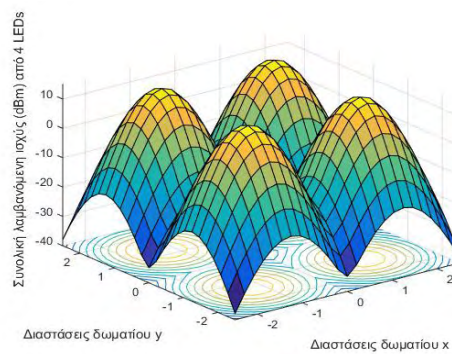
Στο Σχήμα (6.17) το δωμάτιο έχει ύψος 2.15m με μέγιστη οριζόντια φωτεινότητα 584lx. Στο Σχήμα (6.18) το ύψος είναι 1.65m μέγιστη οριζόντια φωτεινότητα 991.7lx. Η διαφορά είναι 407.7lx.

Λαμβανόμενη ισχύς



Σχήμα 6.19 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm),

$$\Phi_{1/2}=12.5^\circ, \text{FOV}=70^\circ, D=2.15\text{m}$$



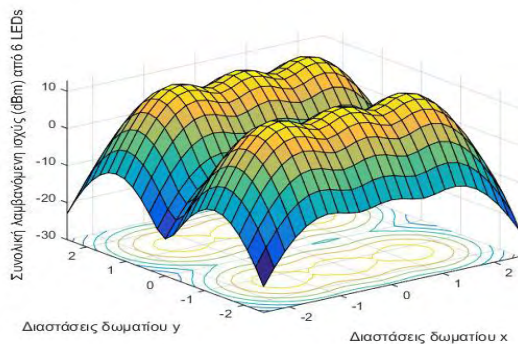
Σχήμα 6.20 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm),

$$\Phi_{1/2}=12.5^\circ, \text{FOV}=70^\circ, D=1.65\text{m}$$

Στο Σχήμα (6.19) το ύψος είναι 2.15m με μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς 12.76dBm. Στο Σχήμα (6.20) το ύψος είναι 1.65m με μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς 15dBm. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν περίπου σε 18.88mW και 32mW. Η διαφορά είναι 13.12mW.

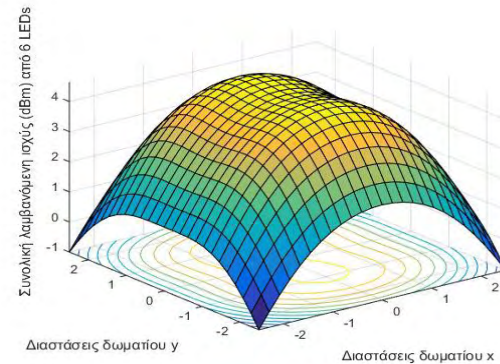
6.5 6 LEDs

Τοποθετούνται 2 επιπλέον θέσεις στις θέσεις (0,1.25) και (0,-1.25) όπως στο Εικόνα 5.2.



Σχήμα 6.21 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm),

$$\Phi_{1/2}=12.5^\circ, \text{FOV}=70^\circ, D=2.15\text{m}$$

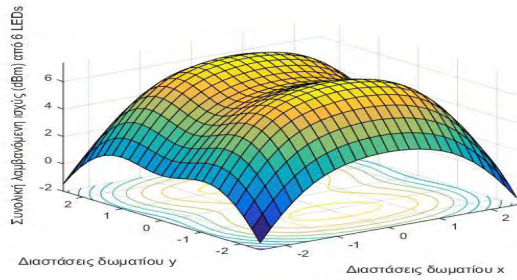


Σχήμα 6.22 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm),

$$\Phi_{1/2}=70^\circ, \text{FOV}=70^\circ, D=2.15\text{m}$$

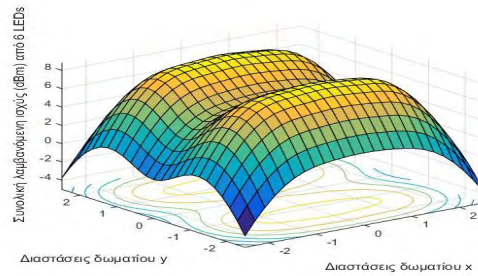
Το Σχήμα (6.21) απεικονίζει τη λαμβανόμενη ισχύ για $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$ και ύψους 2.15m. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη τιμή της λαμβανόμενης ισχύς προσεγγίζει τα 12.54dbm, ενώ η ελάχιστη τα -23dbm. Στην περίπτωση του Σχήματος (6.22) η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς για $\Phi_{1/2}=70^\circ$ και ύψους 2.15m είναι 4.64dBm, ενώ η ελάχιστη είναι περίπου -1dBm

Για $\Phi_{1/2}$ από 25° έως 35° και ύψος 2.15m η λαμβανόμενη ισχύς στις περιοχές που τα LEDs είναι τοποθετημένα είναι σχεδόν η ίδια.



Σχήμα 6.23 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm)

$\Phi_{1/2}=35$ μοίρες, FOV=70 μοίρες, D=2.15m



Σχήμα 6.24 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm)

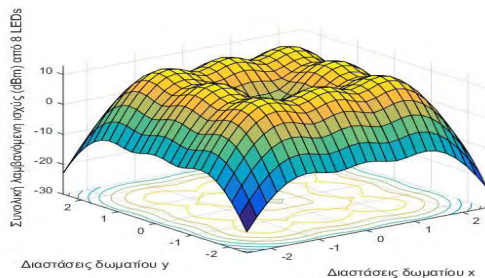
$\Phi_{1/2}=25$ μοίρες, FOV=70 μοίρες, D=2.15m,

Στην περίπτωση του Σχήματος (6.23) για $\Phi_{1/2}=35^\circ$, η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι 7.35dBm, ενώ η ελάχιστη είναι -1.5dBm. Στο Σχήμα (6.24) για $\Phi_{1/2}=25^\circ$ η μέγιστη τιμή της λαμβανόμενης ισχύος είναι 8.7dBm και η ελάχιστη -3.7dBm.

6.6 8 LEDs

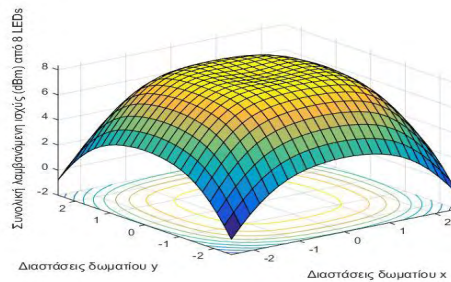
Στην περίπτωση των 8 LEDs τοποθετούνται άλλα δύο LEDs στις θέσεις (1.25,0) και (-1.25,0) όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.

Λαμβανόμενη ισχύς για $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, $\Phi_{1/2}=35^\circ$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=70° και ύψος 2.15m.



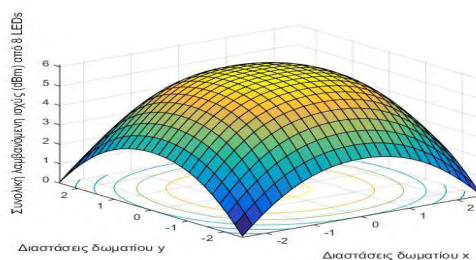
Σχήμα 6.25 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm)

$\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, FOV=70°, D=2.15m (8 LEDs)



Σχήμα 6.26 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm)

$\Phi_{1/2}=35^\circ$, FOV=70°, D=2.15m (8 LEDs)



Σχήμα 6.27 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm), $\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=70°, D=2.15m (8 LEDs)

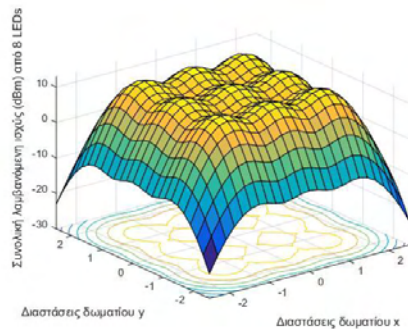
Στα Σχήματα (6.25 - 6.2) απεικονίζεται η λαμβανόμενη ισχύς σε ένα δωμάτιο διαστάσεων 5m x 5m x 3m για γωνίες ημισφύου $\Phi_{1/2}=12.5^\circ, 35^\circ$ και 70° , όταν το οπτικό πεδίο της φωτοδιόδου είναι 70° . Συγκεκριμένα στο Σχήμα (6.25) όπου η $\Phi_{1/2}$ είναι 12.5° η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς αντιστοιχεί σε τιμή 12.8 dBm, ενώ η ελάχιστη αντιστοιχεί σε τιμή -23dBm. Στο Σχήμα (6.26) η $\Phi_{1/2}$ ισούται με 35° έτσι η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι 8.33dBm και η ελάχιστη -0.8dBm. Τέλος στο Σχήμα (6.27) η $\Phi_{1/2}$ γίνεται 70° επόμενως η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς αντιστοιχεί σε τιμή

6dBm ενώ η ελάχιστη σε 0.06dBm. Παρατηρείται λοιπόν ότι όσο η γωνία ημισχύος $\Phi_{1/2}$ αυξάνεται η μέγιστη τιμή της λαμβανόμενης ισχύος μικραίνει, αλλά αυξάνεται στις άκρες του δωματίου. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο η $\Phi_{1/2}$ αυξάνεται το φως διαχέεται καλύτερα μέσα στο δωμάτιο και οι αποκλίσεις της ισχύος κάτω από τα LED με τις γωνίες του δωματίου δεν είναι τόσο υψηλές.

6.7 9 LEDs

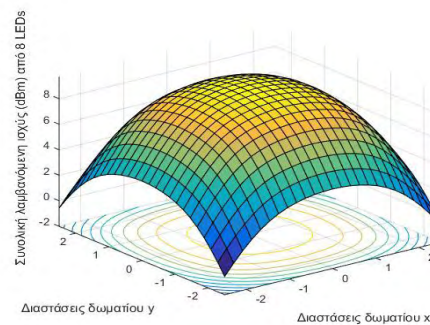
Τοποθετείται ένα ακόμα LED στη θέση (0,0), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4.

Λαμβανόμενη ισχύς για $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, $\Phi_{1/2}=35^\circ$, $\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=70° και ύψος 2.15m.



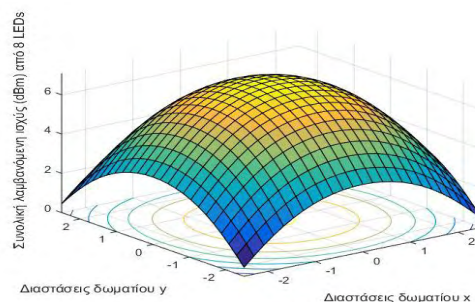
Σχήμα 6.28 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm)

$\Phi_{1/2}=12.5^\circ$, FOV=70°, D=2.15m (9 LEDs)



Σχήμα 6.29 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm)

$\Phi_{1/2}=35^\circ$, FOV=70°, D=2.15m (9 LEDs)



Σχήμα 6.30 : Συνολική λαμβάνομενη ισχύς (dBm), $\Phi_{1/2}=70^\circ$, FOV=70°, D=2.15m (9 LEDs)

Στα Σχήματα (6.28 – 6.30) απεικονίζεται πάλι η λαμβανόμενη ισχύς για ένα δωμάτιο διαστάσεων 5m x 5m x 3m για γωνίες ημισχύος $\Phi_{1/2}=12.5^\circ, 35^\circ$ και 70° , όταν το οπτικό πεδίο της φωτοδιόδου να είναι πάλι 70° αλλά αυτή τη φορά με 9 LEDs τοποθετημένα στην οροφή. Στο Σχήμα (6.28) η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι 12.9dBm και η ελάχιστη -23dBm για $\Phi_{1/2}=12.5^\circ$. Στο Σχήμα (6.29) η γωνία $\Phi_{1/2}$ γίνεται 35° επομένως η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς φτάνει τα 9.7dBm με την ελάχιστη να φτάνει τα -0.6dBm. Στο Σχήμα (6.30) και για γωνία $\Phi_{1/2}=70^\circ$ η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς αντιστοιχεί σε 7.1dBm ενώ η ελάχιστη αντιστοιχεί σε 0.45dBm. Πάλι στην περίπτωση των εννέα LEDs παρατηρείται ότι καθώς το $\Phi_{1/2}$ αυξάνεται, η λαμβανόμενη ισχύς κατανέμεται καλύτερα στο δωμάτιο. Εδώ όμως το ενδιαφέρον είναι ότι η διαφορά της μέγιστης λαμβανόμενης ισχύς για γωνία $\Phi_{1/2}$ ίση με 12.5° στα 8 LEDs και στα 9 LEDs δεν είναι έντονη. Στα 8 LEDs η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς είναι 12.8dBm και στα 9 LEDs είναι 12.9dBm. Καθώς όμως η $\Phi_{1/2}$ αυξάνεται η συνεισφορά του ενός επιπλέον LED είναι πιο έντονη στην κατανομή της ισχύος στο δωμάτιο.

Βάσει των διαγραμμάτων της λαμβανόμενης ισχύος αυξάνοντας τη γωνία ημισχύος των LEDs η μέγιστη τιμή της ισχύος που λαμβάνεται στο κέντρο του δωματίου δεν αλλάζει τόσο σημαντικά

όσο η λαμβανόμενη ισχύς στις άκρες του δωματίου. Αυτό συμβαίνει γιατί αυξάνοντας τη γωνία ημισχύος των LEDs η διάχυση του φωτός στο δωμάτιο είναι μεγαλύτερη επομένως φτάνει περισσότερο φως στις γωνίες του δωματίου.

7. Επίλογος

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Το αντικείμενο της πτυχιακής ήταν η προσομοίωση της οριζόντιας φωτεινότητας και της λαμβανόμενης ισχύος ενός εργασιακού χώρου και οι μεταβολές αυτών με την τροποποίηση διάφορων παραμέτρων οι οποίες τις επηρεάζουν. Γενικά συμπεραίνεται πως η οριζόντια φωτεινότητα επηρεάζεται πολύ από τον αριθμό των LEDs που είναι τοποθετημένες στην οροφή του δωματίου και από τη γωνία διάχυσης του φωτός από αυτές. Όταν η γωνία ημισχύος είναι υψηλή, οι τιμές φωτισμού στο δωμάτιο είναι πολύ μεγαλύτερες. Επίσης ο φωτισμός στην επιφάνεια ενός αντικειμένου αυξάνεται πολύ όταν αυτή η επιφάνεια πλησιάζει τη φωτεινή πηγή. Από την άλλη πλευρά, η λαμβανόμενη ισχύς δε μεταβάλεται ιδιαίτερα με την αλλαγή του ύψους της φωτεινής πηγής. Επίσης η γωνία ημισχύος των πομπών σε αυτή την περίπτωση επηρεάζει κυρίως τις μικρές τιμές της λαμβανόμενης ισχύος στο δωμάτιο. Με την μείωση της γωνίας ημισχύος αλλάζει επίσης κατά πολύ η διαφορά ανάμεσα στις υψηλές και χαμηλές τιμές της κατανομής της ισχύος στο δωμάτιο. Ο αριθμός των LEDs δεν επηρεάζει τόσο έντονα την λαμβανόμενη ισχύ όσο την οριζόντια φωτεινότητα. Γενικά διαπιστώνεται ότι πολύ μεγάλο ρόλο, στη φωτεινότητα και την ισχύ, παίζει ο τρόπος εκπομπής του φωτός από τη φωτεινή πηγή και κατά πόσο η δέσμη φωτός είναι εστιασμένη ή όχι.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία μπορεί να επεκταθεί στη μελέτη της λαμβανόμενης ισχύος και οριζόντιας φωτεινότητας για γωνίες ακτινοβολίας και γωνίες πρόσπτωσης που ανήκουν στο δεύτερο και τρίτο τεταρτημόριο. Επιπλέον μπορεί να γίνει μελέτη του θορύβου στη μεταφορά του φωτός και να υπολογιστεί το Bit Error Rate (BER). Τέλος μπορεί να πραγματοποιηθεί μελέτη στη μεταφορά του φωτός και εκτός του LOS, όπως για παράδειγμα για μία ή περισσότερες ανακλάσεις. Επιπρόσθετα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια μελέτη στην οποία η πηγή φωτός και η φωτοδίοδος δεν θα είναι τοποθετημένες σε παράλληλα επίπεδα και έτσι η γωνία ακτινοβολίας και η γωνία πρόσπτωσης δε θα είναι ίσες. Ενδιαφέρουσα επίσης είναι η μελέτη του συστήματος αν ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη υπάρχουν σκιάσεις ή εμπόδια, όπως επίσης αν μελετηθεί η απόδοση του συστήματος με LEDs που δεν ακολουθούν τη Lambertian εκπομπή.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Abraham, "Generation of Mobile Communication Systems", September 2012, <http://www.slideshare.net/jincy-a/generation-of-mobile-communication-systems>.
- [2] GSM Fundamental, "Oma000001 gsm fundamentals issue 3.3", 2012, <http://www.slideshare.net/yangvanny/oma000001-gsm-fundamentals-issue33>.
- [3] M.B. Shoemake, Wi-Fi (IEEE 802.11b) and Bluetooth Coexistence Issues and Solutions for 2.4 GHz ISM band, February 2001.
- [4] F. Adib, D. Katabi, See Throught Walls with Wi-Fi, 2013.
- [5] V. Talla, B. Kellog, B. Ransford, S. Naderiparizi, S. Gollakota, J. R. Smith, Powering the Next Billions Devices with Wi-Fi, 2015.
- [6] E. Hossain, M. Hasan, 5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges, 2015.
- [7] J. F. Monserrat, G. Mange, V. Braun, H. Tullberg, G. Zimmermann, Ö. Bulakci, METIS Research Advances towards the 5G Mobile and Wireless System Definition, IEEE Communications Magazine, 2015.
- [8] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari, Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB, August 2012.
- [9] T. Komine, M. Nakagawa, Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights, February 2004.
- [10] A. Sharma, Generations of Wireless Communication. (From 0G to 5G), http://www.academia.edu/3099956/Generations_of_Wireless_Communication._From_0G_to_5G_Abhi.
- [11] V. Pereira, T. Sousa, Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G, 2004.
- [12] Γ. Μήτσου, "Φωτομετρικά μεγέθη – πολική κατανομή φωτοβολίας", <http://physics.teiath.gr/physics/pdf/O8.pdf>
- [13] T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, A Study of Shadowing on Indoor Visible Light Wireless Communication Utilizing White LED Lightings, 2005
- [14] M. Brain, T. V. Wilson, B. Johnson, "How WiFi Works", <http://computer.howstuffworks.com/wireless-network.htm>.
- [15] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, R. Parthiban, LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art, March 2015.
- [16] MATLAB, <https://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [17] Decibel, Wikipedia Free Online Eyclopedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Decibel>
- [18] Refractive Index, Wikipedia Free Online Eyclopedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Refractive_index