



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Ιωάννης, Γ. Λάκκας

Τεχνικές χρήσεις φωτοβολταϊκών εσωτερικών χώρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων : Μαρία Ιωαννίδου

Αθήνα, Ιούνιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Ιωάννης, Γ. Λάκκας

Τεχνικές χρήσεις φωτοβολταϊκών εσωτερικών χώρων

Επιβλέπων : Μαρία Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29 Ιουνίου 2018.

Αθήνα, Ιούνιος 2018

.....

Μαρία Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Νικόλαος Θεοδόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης Λάκκας, 2018

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

Copyright © Ιωάννης Λάκκας, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική διερευνάται μια καινοτόμα εφαρμογή τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων, σε εσωτερικούς χώρους. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει σε διαφορετικά σημεία, αναλόγως και των διατάξεων φυσικού και τεχνητού φωτισμού που χρησιμοποιούνται στον χώρο, ωστόσο εξετάζεται ένα απλό σενάριο τοποθέτησης στο δάπεδο του δωματίου, όπου άνωθεν βρίσκεται ένας φωτοσωλήνας. Αποτελεί μια επέκταση της τεχνικής τοποθέτησης φωτοβολταϊκών ενσωματωμένα σε κτιριακές εφαρμογές, έννοια που θα εξηγηθεί και παρακάτω.

Οι αυξανόμενες ανάγκες για τροφοδότηση ηλεκτρικών φορτίων από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, σε συνδυασμό με την μελλοντική ανάπτυξη και την αλλαγή της μορφής του ηλεκτρικού δικτύου, όπως για παράδειγμα διεσπαρμένη παραγωγή, έξυπνο δίκτυο (smart grids) και Δίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) απαιτούν την εξεύρεση λύσεων για αυξημένη παραγωγή ενέργειας κυρίως από φωτοβολταϊκά, για τυπικά φορτία κατανάλωσης ή για πιο μικρά σε ισχύ όπως οι αισθητήρες. Σκοπός αποτελεί η κατάδειξη της δυνατότητας τοποθέτησης φωτοβολταϊκού σε χώρους που τα προηγούμενα χρόνια ήταν απαγορευτικό λόγω του αυξημένου κόστους, της μειωμένης απόδοσης, και την ελλιπή τεχνογνωσία σε μεθόδους κατασκευής ή μελετών με κατάλληλα προγράμματα μεταξύ άλλων παραγόντων. Σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τα επόμενα χρόνια και της επακόλουθης μείωσης του κόστους και την αύξηση της απόδοσης ο μελετητής οφείλει να είναι ενημερωμένος ώστε να λαμβάνει υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός καινούργιου κτιρίου τις νέες δυνατότητες τοποθέτησης που υπάρχουν ή τις διατάξεις φυσικού φωτισμού, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί και η παραγωγή ενέργειας ή ο φυσικός φωτισμός κατα τη διάρκεια ζωής ενός κτιρίου.

Λέξεις κλειδιά

φωτοσωλήνας, φωτεινός σωλήνας, φωτοβολταϊκό, φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια, εσωτερικά φωτοβολταϊκά, φυσικός φωτισμός, διατάξεις φυσικού φωτισμού, προσομοίωση, μελέτη

Abstract

The purpose of this thesis is to study a novel approach of the area that the photovoltaic panel is to be installed and more specifically derived from building integrated approach is the installation of a photovoltaic panel in indoor space. The appropriate area of installation is to be analyzed depending on the type of daylighting system to be installed for the illumination of the space of natural lighting as well as the type and position of lamps for artificial lighting. Though at the present study and as preliminary study on this subject the panel is installed and illuminated underneath of single light tube.

The increasing need for energy savings and production of electricity from renewable energy sources, combined with the upcoming transformation of the electricity grid, such as the concept of distributed production, smart grids and Internet of Things require solutions for increasing energy production from photovoltaics mainly for typical loads or electronic type of loads such as the big number of sensors to be installed due to IoT. So, the purpose of the study is to highlight that is feasible to install a typical or a suitable optimized panel that will maximize energy production from harvesting indoor light natural and/or artificial. That is also easily achievable due to the increasing efficiency of photovoltaic modules and decreasing costs because of the larger adoption from market as well as the improvement of - fabrication methods. Lastly, to this direction is hoped that this thesis will provide a reminder to the designer or engineer of a building or the installer of a photovoltaic system the available simulations tools and options of installations that is provided to his or her disposal, to take the best available decision so the maximum energy will be harvested at the lifetime of the building.

Keywords

light pipe, solar pipe, light tube, photovoltaic, indoor photovoltaic, building integrated photovoltaic, bipv, ipv, natural light, Daylighting fenestration, simulation, study

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	6
Σύντομη ανάλυση κεφαλαίων	9
Εισαγωγή.....	10
Φάσεις εκπόνησης Διπλωματικής Εργασίας	10
Θεωρία	10
Ηλιακη ακτινοβολία.....	11
Ηλιακή γεωμετρία.....	12
Οπτική-Φως	15
Φωτοτεχνία Φυσικός Φωτισμός.....	17
Εισαγωγή.....	17
Οφθαλμος	19
Μέθοδοι- Διατάξεις για φυσικό φωτισμό	20
Μοντέλα ουρανού Sky models	30
Δείκτες ποσοτικής περιγραφής φυσικού φωτισμού	32
Μεγέθη φωτομετρικά.....	33
Λαμπτήρες για την επίτευξη τεχνητού φωτισμού.....	34
Ημιαγωγοί.....	35
Κατηγοριοποίηση φωτοβολταϊκών	36
Φωτοβολταϊκή μετατροπή	38
Πορεία εξέλιξης	38
Μηχανισμός λειτουργίας.....	40
IPV Φωτοβολταϊκό εσωτερικών χώρων	40
Ωφέλεια	44
Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού	45
Προσομοίωση	46
Προγράμματα Φυσικού Φωτισμού	46
Συνοπτική παρουσίαση προγραμμάτων	48
Τρόπος λειτουργίας προγραμμάτων προσομοίωσης.....	49
Σειρά ενεργειών προσομοίωσης	51
Αποτελέσματα	53
Σχολιασμός αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα και Προοπτικές.....	78

Επιπρόσθετες λύσεις αξιοποίησης Ήλιου	80
Ανασκόπηση μελετών στη βιβλιογραφία.....	81
ΒiPV φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτήρια	82
Ποσοτικοί δείκτες φυσικού φωτισμού	82
Φυσικός Φωτισμός	83
Διατάξεις φυσικού φωτισμού.....	83
Προγράμματα προσομοίωσης.....	84
Προσομοίωση φωτοσωλήνα, φωτοβολταϊκών	85
Βιβλία.....	86

Σύντομη ανάλυση κεφαλαίων

Ο κορμός της συγκεκριμένης διπλωματικής χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο παρέχεται όλη η απαραίτητη θεωρία για την μελέτη του φυσικού φωτισμού καθώς και της θεωρίας των φωτοβολταϊκών. Καθώς και όποια θεματική ενότητα είναι χρήσιμη για την κατανόηση ή την μελέτη των δύο αυτών κλάδων. Στο δεύτερο μέρος παρέχονται οι πληροφορίες η θεωρία και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε που είναι απαραίτητη για την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε.

Συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο υπάρχουν γενικά στοιχεία όπως το ευρετήριο, το χρονικό ανάπτυξης της διπλωματικής και η περιγραφή αυτής.

Στο δεύτερο αναπτύσσεται η θεωρία σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία και γεωμετρία καθώς και η φυσική θεωρία του κλάδου της οπτικής. Αναφέρονται επιγραμματικά και δεν αναπτύσσονται σε μεγάλο βαθμό αφού δεν αποτελεί βιβλίο φυσικής αλλά παρατίθενται τα καίρια σημεία για να είναι δυνατή η παρακολούθηση του τρόπου σκέψης που ακολουθήθηκε, και η κατανόηση της διπλωματικής.

Στο τρίτο, η θεωρία του τεχνητού και φυσικού φωτισμού. Η ανάπτυξη της θεωρίας ακολουθεί τη ροή εργασιών και τον τρόπο σκέψης που ακολουθείται σε διεξαγωγή μελετών και προσομοιώσεων. Μελετάτε πρώτα η πηγή δηλαδή τα μοντέλα ουρανών και τα μετεωρολογικά δεδομένα, στη συνέχεια τα μέσα τόσο για τεχνητό όσο και για φυσικό φωτισμό. Τέλος, η εξαγωγή συμπερασμάτων είναι δυνατή με τα φωτομετρικά μεγέθη και με τους δείκτες φυσικού φωτισμού.

Παρόμοια, στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η θεωρία των ημιαγωγών και μια κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών, η φωτοβολταϊκή μετατροπή, και αναφέρονται τα φωτοβολταϊκά εσωτερικών χώρων, μια ιδιότυπη εφαρμογή των συνηθισμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων που εγκαθίστανται συνήθως σε ταράτσες κτιρίων ή σε αγρούς.

Στο πρώτο μέρος ακολουθείται επίσης η ίδια λογική. Η αστείρευτη πηγή ακτινοβολίας, παρέχει στη Γη αυτήν την ακτινοβολία για φωτισμό, μεταξύ άλλων σημαντικών επιδράσεων, που έχει ως αποτέλεσμα βεβαίως την όραση, μέσω του φυσικού και τεχνητού φωτισμού, και την δυνατότητα παραγωγής ενέργειας που διερευνάται. Η παραπάνω συλλογιστική ακολουθείτε και στο δεύτερο μέρος. Αφού παρουσιάζεται ο τρόπος εργασίας που ακολουθήθηκε στη συνέχεια μια συνοπτική παρουσίαση των διαθέσιμων προγραμμάτων προσομοίωσης καθώς και ο τρόπος λειτουργίας αυτών.

Κλείνοντας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και αναλύονται και παρέχονται ιδέες για μελλοντικές εργασίες ή προσθήκες που μπορούν να υλοποιηθούν και αναφέρονται συνοπτικά επιπρόσθετες αναξιολογήσιμες λύσεις αξιοποίησης του Ήλιου. Στο τέλος παρατίθενται χρήσιμες πληροφορίες στο παράρτημα, οι παραπομπές οργανωμένες κατά μέρος και μια συνοπτική παρουσίαση και ενδεδειγμένη σειρά μελέτης της βιβλιογραφίας.

Εισαγωγή

Φάσεις εκπόνησης Διπλωματικής Εργασίας

Η πρώτη αφορμή δόθηκε με την μελέτη τεχνητού φωτισμού, από το προπτυχιακό μάθημα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, αφού έγινε κατανοητή η θεωρία γύρω από τις μελέτες φωτισμού τόσο για τεχνητό, όσο και φυσικό φωτισμό, κυρίως από αναζητήσεις στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία για την τελευταία μελέτη. Στη συνέχεια, η διενέργεια μελετών με τα απαραίτητα εργαλεία τόσο από τον κλάδο της αστροφυσικής όσο και στον κλάδο των προσομοιώσεων μέσω μαθηματικών μοντέλων με τα κατάλληλα υπολογιστικά προγράμματα.

Αργότερα, με την παρακολούθηση του μαθήματος των φωτοβολταϊκών, η κατανόηση της θεωρίας των ημιαγωγών, που βρίσκει εφαρμογή στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και τη διενέργεια μελέτης στην ταράτσα της πολυκατοικίας, όπου και διέμενα. Η εμπάθυνση στις ειδήσεις και στα νέα γύρω από την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, παραδείγματος χάριν ηλιακός φούρνος, ηλιακός φωτισμός με φθηνά υλικά σε υπανάπτυκτες χώρες, διέγειρε το ενδιαφέρον για την μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας και γεωμετρίας, καθώς και την εμπάθυνση στις μελέτες και τις προσομοιώσεις σχετικά με αυτή, καθώς και για την διάταξη του φωτοσωλήνα και την αναζήτηση ακαδημαϊκών ερευνών, βιβλιογραφίας και τέλος των προγραμμάτων προσομοίωσης αυτών.

Από τις μελέτες αυτές, κατανοήθηκε ότι επιβάλλεται σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, ιδιαίτερα στα νότια ανατολικά τμήματα, με τόσες μέρες ηλιοφάνειας, η περαιτέρω ανάπτυξη των εφαρμογών αξιοποίησής της. Σαν τελευταίο βήμα αφού έγινε πλήρως κατανοητή η απαραίτητη θεωρία, έπρεπε να εφαρμοστεί η γνώση με τις κατάλληλες προσομοιώσεις και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, ακολουθούμενη από τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής. Για τους λόγους αυτούς μελετήθηκε, σαν ένα πρώτο βήμα, μια καινοτόμα ιδέα, η δυνατότητα φωτισμού από φωτοσωλήνα, ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου τοποθετημένο κάτωθι, σε εσωτερικούς χώρους.

Θεωρία

Στα παρακάτω κεφάλαια παρατίθεται η ενδεδειγμένη θεωρία που απαιτείται για την παρούσα μελέτη. Παρουσιάζεται ο σχολιασμός για τις σχεδιαστικές παραμέτρους που πρέπει να ακολουθηθούν για την καλύτερη εκμετάλλευση της φωτεινής ακτινοβολίας εσωτερικών χώρων από ένα τέτοιο βελτιστοποιημένο φωτοβολταϊκό. Κρίνεται σκόπιμο να τονισθεί ότι αυτή η επιχειρηματολογία θα μπορούσε να υποστηριχθεί με την διενέργεια προσομοίωσης σε κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα (Matlab, PSpice) αλλά κάτι τέτοιο θα επέκτεινε σε μεγάλο βαθμό αφενός την έκταση της διπλωματικής και αφετέρου τον απαιτούμενο χρόνο για την υλοποίηση όλων αυτών, επίσης η βιβλιογραφία για προσομοίωση φωτοβολταϊκό εσωτερικών χώρων δεν είναι εκτενής και θα έπρεπε να αναπτυχθεί το μοντέλο από την αρχή ή να γίνουν τροποποιήσεις σε υπάρχοντα μοντέλα. Επίσης, ο σκοπός είναι η προσομοίωση για ένα συμβατικής τεχνολογίας φωτοβολταϊκό πρωτίστως και σε δεύτερο βαθμό η επισήμανση- αναφορά των χαρακτηριστικών ενός βελτιστοποιημένου πλαισίου για αυτήν την εφαρμογή, ώστε να καταστεί κιάλας σαφές ο λόγος για την μειωμένη απόδοση και οι προοπτικές για την αύξηση της. Ακολουθως, σε μια τόσο καινοτόμο εφαρμογή αλλά και την απουσία ενδεδειγμένων οδηγιών για την πραγματοποίηση των μελετών αυτών, ενέχει σοβαρός κίνδυνος εξαγωγής λανθασμένων αποτελεσμάτων, από μια πιο πολύπλοκη μελέτη, γεγονός που καταδεικνύεται και από την πληθώρα διαφορετικών μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί και τις παρατηρούμενες αποκλίσεις.

Ηλιακή ακτινοβολία

Η διατήρηση των συνθηκών ζωής στον πλανήτη οφείλεται σε μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που εκπέμπεται στο διάστημα. Ο Ήλιος είναι ένα φωτεινό άστρο, που βρίσκεται σε μια μέση απόσταση 150 εκατομμυρίων χιλιομέτρων ($1 \text{ AU} = 149,597,870 \text{ km}$) από τον πλανήτη Γη και έχει μάζα περίπου $1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. Έχει διάμετρο 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα, και ακτίνα στον Ισημερινό του ίση με 695.508 km, και η θερμοκρασία στην επιφάνεια του προσεγγίζει τους 6000K. Κύρια καύσιμη ύλη αποτελεί το Υδρογόνο (hydrogen fusion), το οποίο του επιτρέπει να ακτινοβολεί ασταμάτητα ενέργεια για 4,5 δισεκατομμύρια ($4,67 \cdot 10^9$) χρόνια. Η συνολική διάρκεια ζωής υπολογίζεται σε 10^{10} χρόνια, και θα διατηρεί σταθερές συνθήκες στο εσωτερικό του, για άλλα 5 δισεκατομμύρια χρόνια, συνεπώς βρισκόμαστε στο μέσο της διάρκειας ζωής του.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι αποτελεί μια αστείρευτη πηγή ενέργειας αλλά παράλληλα ανεκμετάλλευτη αφού στη διάρκεια μιας ημέρας η Γη δέχεται τόση ακτινοβολία ώστε επαρκεί να καλύψει την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας για όλη τη διάρκεια ενός έτους. Έχουν παρουσιαστεί και άλλες παρόμοιες ιδέες, όπως για παράδειγμα η ηλεκτροδότηση των αναγκών ολόκληρων ηπείρων από την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται έρημοι όπως για παράδειγμα η τροφοδότηση της Ευρώπης από φωτοβολταϊκό τοποθετημένα στην Σαχάρα, λόγω της υψηλής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και του καθαρού ουρανού που επικρατεί, απουσίας σύννεφων.

Αξίζει, να αναφερθεί ότι ο παραπάνω συλλογισμός είναι καθαρά λογιστικός και δύσκολα πραγματοποιήσιμος από τεχνική η/και οικονομική άποψη με τα σημερινά δεδομένα, αλλά εξαίρει μια σημαντική άποψη ότι σε αντίθεση με συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας (ορυκτά καύσιμα, κάποιες μορφές ΑΠΕ), είναι η μόνη ανεξάντλητη μορφή ενέργειας και σχετικά με μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Επίσης, η ακρίβεια της κίνησης του Ήλιου σε όλο τον πλανήτη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους σε συνδυασμό με την αύξηση της ακρίβειας και του χρονικού διαστήματος προβλέψεων των μετεωρολογικών συνθηκών καθιστούν τις μελέτες που πραγματοποιούνται πιο ακριβείς με αποτέλεσμα την καλύτερη διαχείριση και προγραμματισμό παραγωγής του ηλεκτρικού δικτύου σε σχέση με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική.

Το σύνολο του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που δέχεται η Γη, εκπέμπεται από τον Ήλιο, και το ορατό φως που βρίσκεται στο εύρος 380 μέχρι τα 780 nm, χάρις στο οποίο είναι δυνατή η όραση αλλά και η φωτοβολταϊκή μετατροπή που θα μελετηθεί. Αποτελεί την πηγή ενέργειας του πλανήτη Γη, με την εκπομπή του συνόλου της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, διατηρώντας σταθερές αλλά και κατάλληλες ατμοσφαιρικές συνθήκες για την ανάπτυξη, και τη διαβίωση των οργανισμών σε αυτόν. Χωρίς την παρουσία του Ηλίου η παρουσία πρωτίστως ανθρώπινης ζωής στη Γη θα ήταν αδιανόητη λόγω των δυσμενών και ακατάλληλων συνθηκών που θα επικρατήσουν.

Ωστόσο, η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά μήκος της ατμοσφαιρας επιδρά στο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία μέχρι να φτάσει στο επίπεδο της θάλασσας μπορεί να έχει υποστεί αλλοιώσεις, δηλαδή αλλαγή του φασματικού της περιεχομένου και απώλειες λόγω απορρόφησης, ανάκλασης και σκέδασης στα μόρια της ατμόσφαιρας. Η αλλαγή συνεπώς, στο φασματικό περιεχόμενο σε μορφή σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν σε άλλη περιοχή της Γης, ή στο διάστημα. Στο διάστημα έχει οριστεί η πυκνότητα ισχύος ηλιακής σταθεράς $G \text{ solar constant } 1367 \text{ W/m}^2$, ενώ στην επιφάνεια της θάλασσας η ισχύς ενός ηλίου $100 \text{ mW/cm}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$. Λόγω της

διαδρομής των ηλιακών ακτίνων διαμέσου της ατμόσφαιρας, για την επίδραση της άμεσης δέσμης των ηλιακών ακτίνων, χρησιμοποιείται η Αέριος Μάζα. Ορίζεται ως,

$$AM=1/\cos(90-\gamma)$$

όπου γ η γωνία της άμεσης ακτίνας με το οριζόντιο επίπεδο.

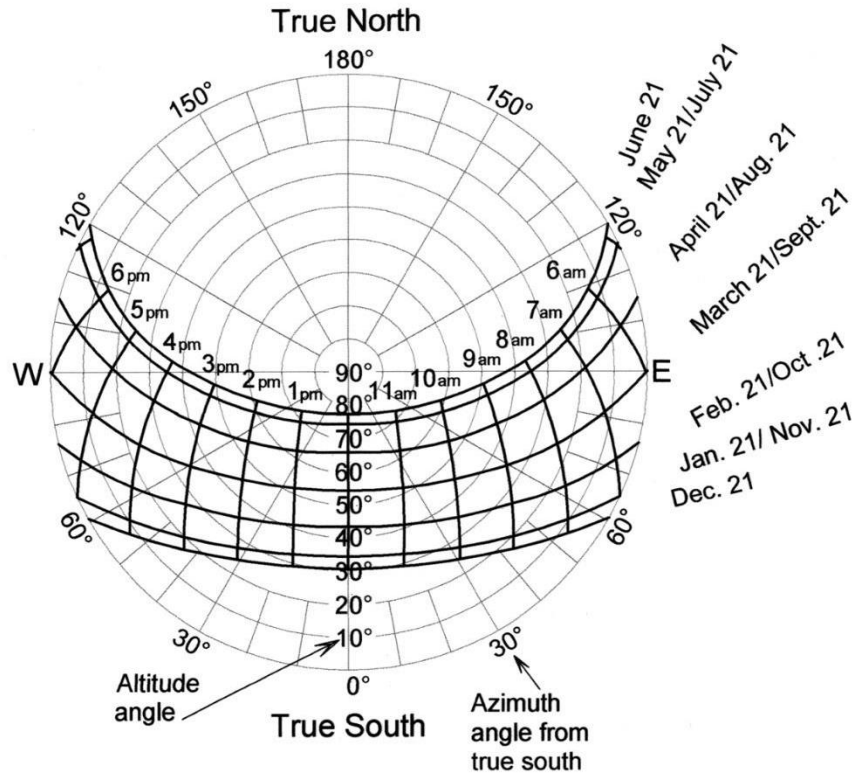
Ηλιακή γεωμετρία

Η Γη, δεν παραμένει σταθερή ως προς τον Ήλιο, αλλά πραγματοποιεί μια ελλειπτική κίνηση γύρω από τον Ήλιο, τοποθετημένο σε μια από τις εστίες της τροχιάς. Συνεπώς δεν δέχεται σταθερή ηλιακή ακτινοβολία τόσο σε χρονική διάρκεια όσο και σε ισχύ, κατά τη διάρκεια ενός έτους. Εξαιτίας της μεταβαλλόμενης απόστασης μεταξύ των δύο ουράνιων σωμάτων, το καλοκαίρι είναι σε μέγιστη (αφήλιο) και τον χειμώνα στην κοντινότερη απόσταση (περιήλιο). Για το λόγο αυτό υπάρχουν τέσσερις εποχές που είναι αντίθετες, για περιοχές που βρίσκονται πάνω και κάτω του ισημερινού, και ως σύμβαση στις μελέτες οι εποχές να αναφέρονται για το Βόρειο ημισφαίριο. Η διαδοχή των εποχών σηματοδοτείται από τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια ευρισκόμενες προς τα τέλη (20^η-22^η μέρα) των μηνών Μαρτίου, Ιουνίου, Σεπτεμβρίου και Δεκεμβρίου.

Μελέτες δηλαδή που γίνονται σε διαφορετικές περιοχές θα έχουν και διαφορετικά δεδομένα (γεωγραφικό πλάτος και μήκος περιοχής) που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως για παράδειγμα ο διαφορετικός προσανατολισμός φωτοβολταϊκού προς τον Νότο ή τον Βορρά για το Νότιο ημισφαίριο. Ακολουθώς, ένας φωτοσωλήνας και η διανομή του φωτός στο προς φώτιση χώρο, δεν θα είναι ίδια κατά τη διάρκεια μιας ημέρας σε κάθε διαφορετική περιοχή αλλά και ημέρα του έτους αλλά θα παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Αναφέρεται ως παράδειγμα η καθετότητα των ηλιακών ακτίνων στον Ισημερινό και κατά συνέπεια η μέγιστη μεταφερόμενη ηλιακή ακτινοβολία στον εσωτερικό χώρο και η μειωμένη απόδοση μεταφοράς φωτός σε περιοχές λόγω χαμηλότερων τιμών ηλιακού ύψους.

Αντίθετα από το φυσικό αυτό φαινόμενο, την περιστροφή δηλαδή και την ελλειπτική κίνηση, στο ηλιακό σύστημα, το σύστημα που εφηύρε ο Lorenzo το 1994 τα θεωρεί τα αντίστροφα, δηλαδή γύρω από τη σταθερή Γη να κινείται σε εκλειπτικό επίπεδο ο Ήλιος. Μια τέτοια προσέγγιση διευκολύνει τόσο την κατανόηση της κίνησης του Ηλίου στις διαφορετικές εποχές αλλά και την μελέτη αυτού, την μοντελοποίηση δηλαδή, για να είναι και πιο εύκολες οι όποιες προσομοιώσεις πραγματοποιούνται.

Το οριζόντιο σύστημα αποτελεί τη γνώση της τοποθεσίας ενός άστρου από κάποιο σημείο στην επιφάνεια της Γης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι γωνίες αζιμούθιο Z και το ύψος του Ηλίου β . Η πρώτη καθορίζεται από την προβολή του Ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο και την κατεύθυνση σε σχέση με τον Νότο, ορίζοντας θετικές τις γωνίες με φορά προς τη Δύση. Ενώ, το ύψος είναι η γωνία από την οποία φαίνεται ο Ήλιος από τον ορίζοντα από έναν παρατηρητή που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης. Όταν το ύψος του Ήλιου γίνεται μέγιστο, εκείνη η ώρα ορίζεται ως ηλιακό μεσημέρι.



Sun Path Diagram, 36° N Latitude

Πηγή harvestingrainwater.com

Στους υπολογισμούς που αφορούν τον Ήλιο, δηλαδή τις γωνίες προσδιορισμού της θέσης του, όπως για παράδειγμα στην μελέτη φωτοβολταϊκών ή σε μελέτες φυσικού φωτισμού, υπόψιν λαμβάνεται η Ηλιακή ώρα που έχει ως αναφορά τον Ήλιο και όχι η τοπική ώρα. Η τοπική ώρα καθιερώθηκε το 1836 για την διευκόλυνση των κοινωνιών, με τις διαφορετικές ζώνες ώρας προκαθορισμένες για κάθε περιοχή, αλλά και παραδοχές που εισήχθησαν προκειμένου να εξαλειφθούν οι διαφορές στην περιστροφή της Γης στη διάρκεια ενός έτους, αλλά και σε διαδοχικές ημέρες.

Αναφέρεται ότι η θέση του παρατηρητή ή του προς μελέτη κτιρίου, σε κάποιο σημείο πάνω στη Γη, ορίζεται από το γεωγραφικό πλάτος ϕ , και το γεωγραφικό μήκος α .

Η Αέριος Μάζα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αποτελεί την απόσταση που θα διανύσει μία ακτίνα μέσα στην ατμόσφαιρα δια το πάχος της ατμόσφαιρας. Η AM καθορίζει την φασματική ισχύ που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης στο ύψος της θάλασσας. Εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης και λαμβάνει τιμές $AM=0$ στο διάστημα, $AM=1$ όταν είναι ο ήλιος στο τοπικό ζενίθ με τυπική τιμή να αποτελεί η $AM=1,5$ για $\gamma_s=41,8$.

Η ηλιακή απόκλιση δ , ορίζεται ως η ευθεία που ενώνει το επίπεδο ουράνιου ισημερινού (αναφορά) που διέρχεται από το κέντρο Γης, με την ευθεία που διέρχεται από το κέντρο του Ήλιου. Κατά τις ισημερίες η ηλιακή απόκλιση είναι μηδενική ενώ για τα ηλιοστάσια λαμβάνει τις μέγιστη τιμή το θερινό $23,45^\circ$, ενώ το χειμερινό την αντίθετη τιμή.

Για τις μελέτες των φωτοβολταϊκών που τοποθετούνται σε εξωτερικούς χώρους έχει οριστεί μια πρότυπη ακτινοβολία βάσει της οποίας σχεδιάζονται, εξάγεται το φύλλο δεδομένων, τα χαρακτηριστικά στοιχεία του φωτοβολταϊκού πλαισίου (τάση ανοιχτοκύκλωσης, ρεύμα βραχυκύκλωσης και άλλα), καθώς και η μελέτη παραγωγής ενέργειας.

Ορίζεται ως φάσμα προσπίπτουσας δέσμης AM1,5 και πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας 100 mW/cm^2 και αναφέρεται ως ισχύς ενός Ηλιου ή Standard Test Condition. Για τη σύγκριση παραγόμενης ενέργειας μεταξύ διαφορετικών πλαισίων για εφαρμογή τοποθέτησης σε εξωτερικούς χώρους, αλλά και για ακριβέστερα πραγματικά μετρηθέντα δεδομένα χρησιμοποιείται οι συνθήκες PTC με την ίδια φωτεινή ισχύ αλλά με σταθερή θερμοκρασία του περιβάλλοντος και όχι του πλαισίου όπως γίνεται με την μέθοδο STC.

Τα παραπάνω ωστόσο ισχύουν για φωτοβολταϊκά σε εξωτερικό χώρο, αφού τόσο μεγάλη ένταση ακτινοβολίας δεν συναντάται σε εσωτερικά κτιρίων. Αλλά για εσωτερικούς χώρους έχουμε τελείως διαφορετικές συνθήκες. Υπάρχουν όλων των ειδών οι ακτινοβολίες, διάχυτη, ανακλώμενη εσωτερικά και εξωτερικά του χώρου και απευθείας ακτινοβολία από τον Ήλιο Επίσης η ισχύς του Ήλιου είναι 100 φορές πιο μικρή της τάξης των 10 mW/cm^2 όπως επίσης και η ύπαρξη τεχνητού φωτός, στενού φασματικού περιεχομένου. Ακόμη δεν υπάρχει κάποια ενδεδειγμένη μεθοδολογία ή η ύπαρξη πρότυπης ακτινοβολίας εσωτερικού φωτός ή φυσικού η/και τεχνητού φωτός για εσωτερικού χώρους. Από την πρότυπη εξωτερική ακτινοβολία και τις συμβάσεις για την καθιέρωση των μελετών σε ότι αφορά τα φωτοβολταϊκά, σχεδίαση και μελέτες, να πραγματοποιείτε λαμβάνοντας υπόψη εξωτερικές συνθήκες, δυσχεραίνει στην παρούσα διπλωματική αλλά και γενικότερα τις έρευνες που πραγματοποιούνται γύρω από τα φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια και ειδικότερα δε στα φωτοβολταϊκά που τοποθετηθούν σε εσωτερικούς χώρους.

Πρέπει να καθοριστεί, συνεπώς μια πρότυπη ακτινοβολία, για να είναι δυνατή η πραγματοποίηση μελετών με κοινές συνθήκες ώστε να μελετώνται τα αποτελέσματα από πλήθος διαφορετικών ερευνητών, με σκοπό την εξακρίβωση της έρευνας που πραγματοποιείται για φωτοβολταϊκά εσωτερικών χώρων και την αποφυγή σφαλμάτων.

Ηλιακή απόκλιση	δ	Επίπεδο Γης-ουάνιας σφαίρας με επίπεδο ήλιου
Ύψος του Ήλιου	β	Οριζόντιο επίπεδο με ήλιο
Γεωγραφικό πλάτος (latitude)	ϕ	Αύξηση προς Βορρά
Γεωγραφικό μήκος (longitude)	α	Αύξηση προς Ανατολάς
Αζιμούθιο	Z	
Ωριαία γωνία	ω	
Ηλιακή ζενιθιακή γωνία	Φ_z	
Απευθείας δέσμη με το φωτοβολταϊκό	γ_s	

Οπτική-Φως

Το φυσικό φως, ειδικότερα το ορατό φως που αποτελεί υποσύνολο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως έχει αναφερθεί προέρχεται από τον Ήλιο. Η ακτινοβολία του, αφού διασχίσει το διάστημα, θα εισχωρήσει στην επιφάνεια της Γης, αφού έχει πρώτα όμως υποστεί κάποιες αλλοιώσεις από τη διαδρομή μέσα από την ατμόσφαιρα της Γης. Η αλλαγή του φασματικού περιεχομένου, σε κάθε περιοχή της ατμόσφαιρας, γίνεται με αρκετούς τρόπους και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τη θερμοκρασία, την υγρασία, τα χημικά στοιχεία που συνθέτουν την ατμόσφαιρα H_2 , αέριοι ρύποι CO_2 , SF_6 και πλήθος άλλων ενώσεων. Είναι δυνατή η απορρόφηση της ακτινοβολίας, η ανάκλαση τόσο προς το διάστημα όσο και προς την Γη, λόγω την ύπαρξης των μορίων των στοιχείων αυτών αλλά και των σύννεφων και τέλος της σκέδασης του φωτός από αυτά ή από άλλους παράγοντες (αντικείμενα, κτίρια, έδαφος, αέριοι ρύποι). Δημιουργούνται έτσι διαφορετικές συνθήκες στη διάρκεια ενός έτους, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας αλλά και σε διαφορετικές τοποθεσίες της Γης. Για τους λόγους αυτούς σε κάθε περιοχή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν κλιματολογικές, ηλιακή γεωμετρία, περιβάλλον χώρος του υπό μελέτη κτιρίου.

Ένας ακόμη μηχανισμός της διαφοροποίησης του φάσματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον προς μελέτη χώρο ή επιφάνεια, εκτός από τους προαναφερθέντες φυσικούς παράγοντες οφείλεται στο περιβάλλοντα χώρο στον οποίο βρίσκεται ο προς μελέτη χώρος. Ωστόσο, σε κάποιες μελέτες μπορεί να μην αποτελεί αντικείμενο μελέτης και έτσι να θεωρείτε ότι βρίσκεται απομονωμένος, κυρίως σε ερευνητικές μελέτες, αλλά συνηθέστερα σε πρακτικές μελέτες (ανέγερση κτιρίου, εκτίμηση επιπτώσεων εγκατάστασης, παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκό) να λαμβάνεται υπόψη, για αποφυγή ανεπιθύμητων επιδράσεων παραδείγματος χάριν θάμβωση από γειτονικά κτίρια ή σκιάσεις και μείωση φυσικού φωτισμού δωματίου.

Ακόμη χρήσιμοι είναι στις μελέτες φωτισμού είναι οι συντελεστές ανακλασης ρ , απορρόφησης α , και διαφάνειας τ , ως το πηλίκο της φωτεινής ροής που ανακλάται, απορροφάται ή μεταδίδεται μεταξύ δύο υλικών, ως προς την συνολική ροή που δέχεται η επιφάνεια.

Αναφέρονται τέλος τα δύο χρωματικά μοντέλα το τρισδιάστατο μοντέλο $L^*a^*b^*$, το οποίο είναι βελτιωμένο σε σχέση με το κλασικό μοντέλο xyz αφού δεν παρατηρούνται ασυνέχειες κατά την αλλαγή των χρωμάτων, δηλαδή είναι πιο ομαλό.

Αναφέρονται συνοπτικά και οι γνωστοί νόμοι της οπτικής που βοηθούν στην μελέτη των παραπάνω φαινομένων.

Η διάθλαση, μπορεί να περιγραφεί με τον νόμο του Snell, γνωρίζοντας τούς συντελεστές διάθλασης των υλικών και την γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

Με την χρήση του νόμου του Lambert-Beer μπορεί να περιγραφεί και το ποσοστό της απορρόφησης των υλικών που είναι διαφανή και επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός (φωτεινή ένταση I), συναρτήσει της πυκνότητας c , της απορρόφησης β , και του πάχους d .

$$I_{out} = I_{in} e^{-c d \beta}$$

Τυπικές τιμές που μπορούν να λάβουν συνηθισμένα υλικά που συναντάμε σε εσωτερικούς χώρους μπορούν να αναζητηθούν στον παρακάτω πίνακα.

	Ανάκλαση	Διάθλαση
Γυαλί	0,8-0,9	1.5-1,6
αέρας	1	1,0003
Ακρυλικά	0,7	1,4
Τοίχος	0,5-0,7	
Λευκό	0,7-0,8	
Κίτρινο	0,5-0,7	
Μαύρο	0,05	

Τυπικές τιμές δεικτών ανακλασης διάθλασης

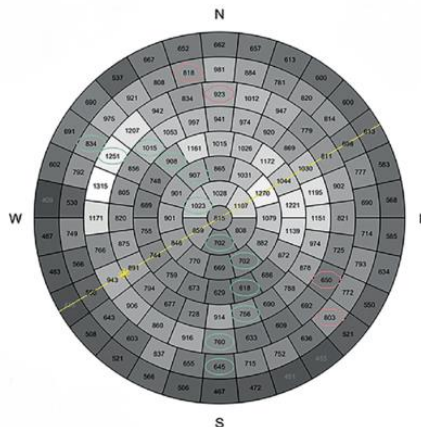
Εκτός από τον Ήλιο που θεωρείται η πρωταρχική πηγή φωτός και θερμότητας, αντίστοιχα και κάθε άλλο σώμα μπορεί να θεωρηθεί ως σώμα που ακτινοβολεί φως δηλαδή γενικότερα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τον μηχανισμό της ανάκλασης και της απορρόφησης, ή θερμότητα μέσω ακτινοβολίας.

Για αυτό ο Ήλιος αλλά όπως και κάθε άλλο σώμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μέλαν σώμα. Δηλαδή, κάθε επιφάνεια (υλικό), αλλοιώνει το φάσμα του φωτός μέσω του μηχανισμού της ανάκλασης, της διάχυσης και της απορρόφησης και θεωρείται ως πηγή φωτός, θερμότητας δηλαδή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η ύπαρξη εμποδίων, δέντρων, κτιρίων και γενικότερα οποιαδήποτε αντικείμενου (μέλαν σώμα), μπορεί να εμποδίσει την διάδοση του φωτός και ακτινοβολίας. Ή να την μειώσει λόγω της ανάκλασης, διάχυσης ή απορρόφησης που θα πραγματοποιηθεί στα υλικά των επιφανειών, σε βαθμό που καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες των διαφορετικών υλικών.

Κατηγοριοποιούνται έτσι, οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας ως άμεση δέσμη φωτός G_{beam} προερχόμενη απευθείας από τον Ήλιο ή τον ουρανό (sky vault), διάχυτη ακτινοβολία G_{diff} , σε περίπτωση νέφωσης, με το μοντέλο overcast sky και ανακλώμενη ακτινοβολία από τα διαφορετικά είδη επιφανειών εσωτερικά G_{irc} ή εξωτερικά του δωματίου, συνθέτοντας το άθροισμα όλων αυτών, την συνολική ακτινοβολία G_{global} .

Η διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να προκύψει από μια λαμπερτιανή επιφάνεια όπως για παράδειγμα ένας τοίχος ή ένα φύλλο χαρτιού, ανακλώντας το φως ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις ή από πυκνή νέφωση (overcast sky) όπως αναφέρθηκε. Ένας στιλπνός καθρέφτης ωστόσο δεν θα συμβάλει στη διάχυση του φωτός αλλά στην ανάκλασή του. Στην μεταφορά των ακτίνων του φωτός με την ίδια γωνία πρόσπτωσης προς την επιφάνεια. Αναλόγως του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί και του δείκτη ανάκλασης, διάθλασης ή απορρόφησης του θα διαδοθεί ομοιόμορφα περισσότερη ποσότητα φως και μεταβολής του φασματικού περιεχομένου. Απορρόφηση συμβαίνει αναλόγως το υλικό σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό. Ενδεικτικό παράδειγμα είναι το γυαλί, διπλό ή τριπλό, που χρησιμοποιείται σε παράθυρα, και περιορίζει αναλόγως την εισχώρηση του φωτός σε έναν χώρο αλλά και τις θερμικές απώλειες του χώρου για θέρμανση ή ψύξη.



https://www.researchgate.net/profile/Karolina_Zielinska-Dabkowska/publication/322256727/figure/fig11/AS:614378541948929@1523490667070/Measured-luminance-distribution-and-CCT-distribution-for-CIE-Standard-Sky-5-Berlin.png

Λόγω της έρευνας που θα πραγματοποιηθεί αναφέρεται επίσης και το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοσωλήνα που είναι το Spectralight Infinity της εταιρίας SOLATUBE, με πολύ υψηλό ποσοστό κανονικής ανάκλασης 99,7%. Εάν και υψηλός ο συγκεκριμένος δείκτης θα φανεί στη συνέχεια ότι το μεγάλο πλήθος ανακλάσεων, σε περιπτώσεις φωτοσωλήνων με μεγάλο μήκος ή πολλές κυρτώσεις μειώνει σε υψηλό βαθμό την απόδοσή στην μεταφορά φωτός στο εσωτερικό του δωματίου.

Φωτοτεχνία Φυσικός Φωτισμός

Εισαγωγή

Η εφεύρεση του λαμπτήρα επέφερε πολλές αλλαγές στη ζωή των ανθρώπων. Μια από αυτές ήταν και η δυνατότητα κατασκευής μεγάλων κτιρίων σε εμβადόν αλλά και σε ύψος, αφού χωρίς τεχνητό φωτισμό δεν θα ήταν εφικτή η χρήση του χώρου, για κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα. Ωστόσο η ευκολία αυτή για παροχή τεχνητού φωτισμού και τεχνητού αερισμού των χώρων, επέφερε και μείωση των μελετών αξιοποίησης του φυσικού φωτισμού, όταν πριν την εφεύρεση και διάδοση των μεθόδων αυτών αξιοποιόταν αποκλειστικά το φως του Ήλιου, με τον κατάλληλο προσανατολισμό του κτιρίου ή την χρήση υλικών ή διατάξεων για μεταφορά φυσικού φωτισμού. Αντικείμενο της φωτοτεχνίας είναι η μελέτη τοποθέτησης φωτιστικών στο εσωτερικό ενός χώρου για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος, δηλαδή μιας απαιτούμενης στάθμης έντασης φωτισμού, η αποφυγή έντονων αντιθέσεων επιφανειών, η καλή χρωματική πιστότητα, αναφέροντας ορισμένες δυνατές μελέτες που μπορούν να πραγματοποιηθούν.

Ο φυσικός φωτισμός, από την άλλη, συνίσταται στην αξιοποίηση του ορατού φωτός του Ήλιου στη διάρκεια της ημέρας με σκοπό την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος σε βαθμό που αυτό είναι δυνατό. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, σε όλους τους χώρους ή σε κατάλληλο βαθμό για αυτό και για τον φωτισμό των χώρων χρησιμοποιούνται, και οι δύο μέθοδοι. Είναι η δύσκολη καθιέρωση ενός ορισμού για τον φυσικό φωτισμό καθώς επιδέχεται διαφορετικές ερμηνείες αναλόγως από ποιιά σκοπιά εξετάζεται το συγκεκριμένο θέμα. Ένας αρχιτέκτονας θα έδινε έναν διαφορετικό ορισμό, επειδή θα εστιάζει στην χρησιμότητα ή στο αισθητικό αποτέλεσμα που θα παρείχε, ενώ έναν ηλεκτρολόγο θα τον ενδιέφερε το ποσοστό κάλυψης του φυσικού φωτισμού για μια μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας από τεχνητό φωτισμό ή το ηλεκτρολογικό σχέδιο για την αναγκαιότητα ή χρησιμότητα εγκατάστασης

συστημάτων αυτοματισμού και ελέγχου των λαμπτήρων. Η κοινή βάση όμως στην οποία θα συμφωνούσαν όλοι εμπλεκόμενοι ακόμα και ο τελικός χρήστης, θα είναι η επαρκής κάλυψη ενός χώρου με φυσικό φωτισμό ώστε να δικαιολογείται και το όποιο αυξημένο κόστος (εγκατάστασης η/και λειτουργίας) ενδέχεται να προκύψει. Ύστερα, η εξάλειψη θάμβωσης καθώς επιδρά αρνητικά στην παραγωγικότητα ή την δυσφορία, που αισθάνονται οι χρήστες του χώρου, ακολούθως είναι μερικές από τις επιπτώσεις ανεπαρκούς ή ακατάλληλης μελέτης φυσικού φωτισμού. Σαν σκοπός της μελέτης φυσικού φωτισμού μπορεί να αναφερθεί ότι αποτελεί η διερεύνηση του βέλτιστου προσανατολισμού του κτιρίου ή η επιλογή των κατάλληλων διατάξεων-συστημάτων φυσικού φωτισμού, προκειμένου να ικανοποιηθούν παράμετροι που έχουν τεθεί με πρωταρχικό το φωτισμό του χώρου με φυσικό φως και σε ποιο βαθμό μπορεί να επιτευχθεί κάτι τέτοιο αποδοτικά.

Όσον αφορά τον τεχνητό φωτισμό, επειδή το αποτέλεσμα του είναι ελεγχόμενο ενδιαφέρει περισσότερο, η ένταση φωτισμού, καθώς υπάρχουν οδηγίες, πρότυπα που ακολουθούνται για κάθε μια διαφορετική χρήση χώρων. Μια πιο ενδελεχής και εμπειριστατωμένη μελέτη θα περιλαμβάνει μελέτη θάμβωσης, λαμπρότητας επιφανειών ή αντικειμένων, φωτεινότητας της επιφάνειας εργασίας και του περιβάλλοντα χώρου στο οπτικό πεδίο του χρήστη και ενδεχομένως σε συνδυασμό με τον φυσικό φωτισμό, το κύκλωμα ελέγχου των φωτεινών πηγών. Κρίνεται σκόπιμη μια τέτοια σειρά μελετών καθώς η μοναδική θεώρηση της έντασης φωτισμού μπορεί να μην παρέχει πάντοτε τα καλύτερα αποτελέσματα και την ικανοποίηση του τελικού χρήστη από τις συνθήκες φωτισμού, για αυτό και προτείνεται μελλοντικά να πραγματοποιηθεί μια σειρά τέτοιων μελετών λόγω της τοποθέτησης φωτοβολταϊκού εσωτερικών χώρων.

Ιδιαίτερα, στην τοποθέτηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου υπάρχουσας τεχνολογίας σε εσωτερικό χώρο, η απουσία μελέτης θάμβωσης λόγω ανάκλασης από την μπροστινή γυάλινη επιφάνεια του πλαισίου θα δημιουργεί δυσμενείς συνθήκες στον χώρο και θα αναιρεί ουσιαστικά την ικανοποίηση των απαιτήσεων για φωτισμό (500 lux) αλλά τόσο και το όφελος από την όποια παραγόμενη ενέργεια προκύπτει.

Μια πρώτη αναφορά και κατανόηση από τα οφέλη της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία των κατοίκων των πόλεων υπάρχει στην αρχαία Ελλάδα στην πόλη της Ολύμπου, που ο σχεδιασμός της πόλης πραγματοποιήθηκε με σκοπό την πρόσβαση όλων των σπιτιών στο φως του Ήλιου. Πιο πρόσφατα στην νομοθεσία UK Prescription Act (1832) όπου θεωρείται δικαίωμα η πρόσβαση σε ηλιακό φως Κατά τη διάρκεια της Ιστορίας αρκετές φορές έμελλε να κατανοηθούν από την αρχή τα οφέλη αξιοποίησης του Ήλιου και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ενεργειακών κρίσεων λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας.

Από τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την αξιοποίηση φυσικού φωτισμού, διαπιστώνεται ότι οι Βοριότερες χώρες όπου οι μέρες ηλιοφάνειας είναι λιγότερες από ότι σε χώρες με μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, η αξιοποίηση του φωτός της ημέρας είναι επιτακτική ανάγκη λόγω και των ποσοστών εμφάνισης του ηλιακού δίσκου. Ωστόσο, τα οφέλη από την αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού αν και είναι γνωστά, πέρα από την προφανή εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και τις ψυχοσωματικές επιδράσεις που έχουν γίνει γνωστές με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί αλλά δεν λαμβάνονται πάντα υπόψιν, δεν έχει υλοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Στις περιπτώσεις που έχει διενεργηθεί μελέτη φυσικού φωτισμού μπορεί να μην έχει πραγματοποιηθεί τόσο αποδοτικά, εξαιτίας της ελλιπούς γνώσης γύρω από το συγκεκριμένο ζήτημα ή της ικανοποίησης άλλων παραμέτρων. Δηλαδή, μπορεί να είναι δυνατή ως ένα σύνθημα παράδειγμα η ύπαρξη θάμβωσης από απευθείας δέσμη φωτός, ή η αύξηση σε καταναλώσεις θέρμανσης ή ψύξης του χώρου, αν δεν έχει

πραγματοποιηθεί σωστή μελέτη ή δεν πραγματοποιήθηκε πριν την κατασκευή του κτιρίου, που είναι το απαιτούμενο για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων

Πρέπει τέλος, να αναφερθούν και οι ευεργετικές ιδιότητες στον οργανισμό όπως η παραγωγή βιταμίνης D, οι ψυχικές και ψυχολογικές επιδράσεις στον οργανισμό μεταξύ άλλων, που μπορούν να αναζητηθούν σε κατάλληλες μελέτες. Παρόλο που διερευνάται η δυνατότητα και η χρησιμότητα για την παραγωγή ενέργειας από εσωτερικά φωτοβολταϊκό και συγκεκριμένα υπό συνθήκες φωτισμού από ένα φωτοσωλήνα. Χωρίς όμως να αμελούνται ή να μην αναφέρονται οι επιπτώσεις ή θετικές επιδράσεις ώστε να αποτελεί μια ολοκληρωμένη μελέτη, από την οποία μπορεί να διενεργηθεί σε μεταγενέστερο βαθμό μια μελέτη, πολυκριτηριακή ενδεχομένως, ωφέλειας κόστους, δηλαδή των επιδράσεων στο άτομο θετικών και αρνητικών, και την εξοικονόμηση ή δαπάνη ενέργειας που τελικά θα προκύψει, εξάγοντας τα κατάλληλα συμπεράσματα από τα ευρήματα μιας ολιστικής ανάλυσης.

Η μελέτη φυσικού φωτισμού, πρέπει να λαμβάνει υπόψιν αρχικά την τοποθεσία του κτιρίου τον προσανατολισμό του και τις διαστάσεις του, έπειτα, τις φωτομετρικές και θερμικές ιδιότητες του κτιρίου καθώς και των γειτονικών και του περιβάλλοντα χώρου. Αφού οι παραπάνω παράγοντες επιδρούν στην διαθεσιμότητα του φυσικού φωτισμού κατά τη διάρκεια ενός έτους λόγω της διαφορετικής ηλιακής γεωμετρίας, πορείας που ακολουθεί ο Ήλιος στον ουράνιο θόλο. Συνεπώς στην εξαγωγή των ποιοτικών δεικτών φυσικού φωτισμού, λόγω της σχετικής θέσης του Ήλιου και του ποσοστού διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια μελετάται το αισθητήριο όργανο μέσω του οποίου είναι δυνατή η αίσθηση του φωτός.

Οφθαλμος

Ο ανθρώπινος οφθαλμός είναι το όργανο με το οποίο είναι δυνατή η όραση, με την αντίληψη της λαμπρότητας των επιφανειών. Πραγματοποιείται με φωτουποδοχείς τοποθετημένους στον αμφιβληστροειδή και συγκεκριμένα με τα κόνια, τα ραβδία και τα γάγγλια, με καθένα είδος κυττάρου από αυτά ένα να είναι υπεύθυνο και για διαφορετική λειτουργία (μέρα νύχτα). Ο οφθαλμός αντιλαμβάνεται μέρος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας και συγκεκριμένα την περιοχή με μήκος κύματος από τα 380nm μέχρι τα 780nm. Αποτελεί μια προσεγγιστική ευαισθησία του οφθαλμού, και δεν είναι ίδιο αυτό το εύρος για όλους τους ανθρώπους αλλά και με την πάροδο των χρόνων για κάθε άτομο. Να επιδρά συνεπώς στην αλλοίωση ή στην διαφορετική αντίληψη του φωτισμού, αλλά και στην ευαισθησία αντίληψης των τόνων των χρωμάτων. Ωστόσο, η αναπόφευκτη γήρανση του αισθητηρίου οργάνου είτε με την πάροδο των χρόνων είτε με επεμβατικές εγχειρήσεις που πραγματοποιούνται ή παθήσεις που εμφανίζονται ή υπάρχουν εκ γενετής, επιδρούν στην μείωση της οπτικής οξύτητας, για αυτό και οι απαιτήσεις φωτισμού έχουν παρατηρηθεί να είναι διαφορετικές για κάθε ηλικιακή ομάδα.

Η λαμπρότητα υποδηλώνει την ποσότητα του φωτός που εισέρχεται μέσω του οφθαλμού και γίνεται αντιληπτή από τον άνθρωπο μέσω του μηχανισμού της όρασης και του οφθαλμού, ενώ η ένταση φωτισμού υποδηλώνει το φως που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και χρησιμοποιείται συνήθως ως δείκτης για μελέτες τεχνητού αλλά και φυσικού φωτισμού.

Επίσης, είναι διαφορετική η αντίληψη του φωτός ή της αντίθεσης των φωτιζόμενων επιφανειών και δεν εξαρτάται μόνο από την ένταση φωτισμού αλλά και σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες. Συνεπώς η μοναδική θεώρηση της έντασης φωτισμού ή της λαμπρότητας μπορεί να επιφέρει μείωση της ποιότητας του φωτιζόμενου χώρου για διαφορετικού ανθρώπους. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να μελετηθεί η αντίθεση, φωτεινότητα και η ένταση φωτισμού του περιβάλλοντος χώρου. Καθοριστικό

ρόλο παίζει επίσης και ο χρωματισμός της επιφάνειας πχ μαύρο τζάμι ή μπρονζέ με την ίδια ένταση φωτισμού, όπου το πιο ανοιχτόχρωμο τζάμι μπορεί να φαίνεται πιο φωτεινό.

Άρα οι διαφορετικές απαιτήσεις φωτός για κάθε ηλικιακή ομάδα, ή μεμονωμένα περίπτωση χρήση δυσχεραίνει πολύ τη διεξαγωγή μελέτης για αυτό και έχουν υιοθετεί στα συγκεκριμένα πρότυπα κάποιες κοινές αποδεκτές τιμές που έχουν εξαχθεί με στατιστική ανάλυση. Όμως για να θεωρηθεί μια μελέτη ολοκληρωμένη θα πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί όπως αναφέρθηκε επίτευξη όχι μόνο ικανοποιητικής στάθμης φωτισμού αλλά και μελέτη θάμβωσης, φαινόμενη φωτεινότητα επιφανειών της φωτιζόμενης και του περιβάλλοντα χώρου και όποια άλλη παράμετρος είναι δυνατή να μελετηθεί. Η συγκεκριμένη εισήγηση αναφέρεται στην περίπτωση που τελικά θα επιλεγεί να τοποθετηθεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε έναν εσωτερικό χώρο, στην οροφή στο δάπεδο ή σε οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια και για την απουσία οπτικής όχλησης των χρηστών του χώρου θα πρέπει να έχουν πραγματοποιηθεί οι μελέτες που αναφέρθηκαν. Ακόμη και για τις διατάξεις φυσικού φωτισμού που θα τοποθετηθούν και οι πιθανές επιπτώσεις αναφέρονται για κάθε διάταξη στο επόμενο κεφάλαιο.

Μέθοδοι- Διατάξεις για φυσικό φωτισμό

Οι μέθοδοι ή οι διατάξεις φυσικού φωτισμού που εξετάζονται στη συνέχεια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάση κάποιων κοινών χαρακτηριστικών ή τρόπων λειτουργίας τους. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι κάποια συστήματα παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα φυσικού φωτισμού για συγκεκριμένους τύπους καθώς μπορεί να αξιοποιούν ή να μπορούν να απορρίψουν/κατευθύνουν διαφορετικά είδη ακτινών του ήλιου ή συνθηκών του ουρανού και θέσης του ήλιου. Ο μηχανισμός λειτουργίας μπορεί να συνοψιστεί στις εξής φάσεις, συλλογή της δέσμης του φωτός απευθείας ή διάχυτης όπως αναφέρθηκε, μεταφορά του φωτός με διάφορα υλικά που θα εξεταστούν στη συνέχεια και τέλος διανομή του φωτός στον χώρο μέσω του μηχανισμού της ανάκλασης και διάχυσης, όπου μπορεί να υπάρξει και συνδυασμός αυτών των μεθόδων. Η μελέτη για τοποθέτηση αυτών των συστημάτων πρέπει να πραγματοποιηθεί κατά την μελέτη σχεδιασμού του κτιρίου, αφού ο προσανατολισμός διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο, αλλά και αργότερα σαν παρεμβατικές λύσεις αλλά με περιορισμένες μεθόδους φυσικού φωτισμού και όχι τόσο μεγάλη ευελιξία στην επιλογή των συστημάτων και λύσεων.

Σημαντική είναι και η μελέτη επιπλέον παραμέτρων, όπως η ρύπανση των ανακλαστικών επιφανειών για συστήματα που τοποθετούνται εξωτερικά του κτιρίου, ιδιαίτερα σε κτίρια με ρυπαρό περιβάλλον, η θάμβωση από λανθασμένη ή ελλιπούς μελέτης ή και λόγω συμβιβασμών (κόστους, και άλλων παραγόντων) που για κάποιες μέρες να μην έχει επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Υπάρχουν κάποιοι γενικοί περιορισμοί που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε κάποια συστήματα λόγω του τρόπου λειτουργίας τους. Διατάξεις παραθύρων με ανακλαστικές ή περσίδες, έχουν σαν αποτέλεσμα τη δυσκολία στην επίτευξη των απαιτούμενων συνθηκών φωτισμού στη διάρκεια του έτους, επιπλέον η ύπαρξη θάμβωσης και μειωμένη ένταση φωτισμού στο εσωτερικό του χώρου μακριά από το σημείο τοποθέτησης.

Οι διατάξεις που μπορούν να τοποθετηθούν στο παράθυρο συνήθως το ύψος τοποθέτησής του βρίσκεται πάνω από το ύψος των ματιών, ώστε να μην είναι ορατή η επιφάνεια ανάκλασης του φωτός. Τις περισσότερες φορές μπορεί να απαιτείται και η τοποθέτηση επιπλέον σκιάστρων, για την αποκοπή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, και την αποφυγή θάμβωσης. Εξέχουσας σημασίας είναι και η αναφορά στην τοποθέτηση φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου (a-Si), που τοποθετούνται σε οροφές

κτιρίων ως φεγγίτες σε ανοίγματα για περιορισμό της διέλευσης της απευθείας δέσμης φωτός και συνεπώς την αποφυγή θάμβωσης και χωρίς την αλλοίωση της χρωματικής δέσμης (χρωματικά ουδέτερο πάνελ άρα διατήρηση του φασματικού περιεχομένου). Έχουν υπάρξει τέτοιες περιπτώσεις τοποθέτησης από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, και επισημαίνεται ότι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για το λόγο αυτό και ως δομικά στοιχεία (building integrated pv, ενσωματωμένα σε κτίρια).

Τα συστήματα φυσικού φωτισμού μπορούν να χωριστούν αναλόγως αν είναι ενεργητικά ή παθητικά. Με τα πρώτα να αποτελούν μια πιο ακριβή λύση για την αγορά αλλά και για τη συντήρηση και λειτουργία τους, λόγω της πολυπλοκότητας κατασκευής και τρόπου λειτουργίας, της μεταφοράς (φωτοσωλήνας, οπτικές ίνες) ή κατεύθυνσης φωτός (φωτεινά ράφια). Μια άλλη παράμετρος αποτελεί η αξιοποίηση της απευθείας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας ή της διάχυτης, δηλαδή από συννεφιασμένο ουρανό καθώς και η διανομή αυτής στο χώρο εάν διαχέεται ή μεταφέρεται αυτούσια για την απευθείας δέσμη και προκαλεί συνεπώς θάμβωση. Επιπλέον, η δυνατότητα της παροχής σκίασης των συστημάτων αυτών ή εάν απαιτούνται πρόσθετες διατάξεις για τη σκίαση των διατάξεων. Κύρια όμως ικανότητα όλων αυτών είναι πιθανώς η συλλογή, η μεταφορά και η διάχυση του φωτός στο εσωτερικό του δωματίου με διαφορετικές μεθόδους αλλά και διαφορετικό τελικό αποτέλεσμα. Συνήθως, διαχέεται η συνολική ακτινοβολία, για την αποφυγή θάμβωσης, στην οροφή του δωματίου και κοντά στη διάταξη με σκοπό τον φωτισμού και των πιο απομακρυσμένων χώρων από το παράθυρο. Αναφέρεται ότι για άλλα συστήματα, εκτός του φωτοσωλήνα που εξετάστηκε, μπορεί να κρίνεται συμφέρουσα και η τοποθέτηση του πλαισίου στο ταβάνι στην περιοχή δηλαδή που μεταφέρεται το φως προς το εσωτερικό του δωματίου.

Γενικά τα συμβατικά ανοίγματα (fenestration) δηλαδή κυρίως τα παράθυρα που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά αδυνατούν να μεταδώσουν φωτεινή ακτινοβολία σε μεγάλη βάθος χώρου, μακριά από αυτό, και τα μεγέθη να μειώνονται απότομα. Για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθούν ανοίγματα και σε δύο ή περισσότερες όψεις του δωματίου, ωστόσο δεν θα ικανοποιούνται άλλες παράμετροι, μείωση κόστους, ομοιομορφία φωτισμού, θάμβωση, διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού, συνθήκες οπτικής άνεσης (visual comfort) καθώς και η ανθρώπινη αντίδραση πέραν των διεργασιών της όρασης συμπεριλαμβανομένων και ψυχολογικών αντιδράσεων λόγω του αποτελέσματος του φωτισμού του χώρου. Επίσης η σύνδεση με τον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο καθώς και η κάλυψη των βιολογικών αναγκών, είναι μερικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την μελέτη.

Οι διατάξεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια μπορεί να παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα σε συγκεκριμένες περιοχές σε υψηλότερα ή χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη εξαιτίας των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούν. Ως ακραίες περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν ο Βόρειος πόλος όπου ο Ήλιος βρίσκεται περίπου στον ορίζοντα, για συγκεκριμένη εποχή, σε όλη τη διάρκεια της μέρας, ενώ στον Ισημερινό στο ζενίθ και για το λόγο αυτό προκειμένου να ικανοποιηθούν όποια κριτήρια τεθούν (θάμβωση, διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού) πρέπει να επιλεγούν και διαφορετικές διατάξεις για τις δύο περιπτώσεις. Σε μικρά γεωγραφικά πλάτη όπως στην Ελλάδα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες λύσεις για την αποκοπή της απευθείας ακτινοβολίας τους καλοκαιρινούς μήνες όπως ακόμη η ανάκλαση ακτίνων από τον περιβάλλοντα χώρο στον εσωτερικό (χαλίκι), ιδιαίτερα στον αστικό ιστό όπου υπάρχουν εμπόδια (γειτονικά κτίρια) και δεν είναι δυνατή η πρόσβαση προς τον ουρανό. Αντίστοιχα, σε χώρες με μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος, επιθυμητή είναι η αξιοποίηση της ακτινοβολίας που προέρχεται από το ζενίθ της ουράνιας σφαίρας, καθώς λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της

για συννεφιασμένο ουρανό, που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση. Συστήματα που κατευθύνουν το φως παρέχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα σε πολλές εξεταζόμενες παραμέτρους, συγκριτικά με τα παράθυρα. Παρακάτω παρατίθενται και κάποιες διατάξεις φυσικού φωτισμού και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος λειτουργίας τους.

Παράθυρο (window, fenestration)

Η πιο συνηθισμένη ίσως λύση στο κτιριακό τομέα στην Ελλάδα, αφού παρέχει φυσικό φωτισμό και σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο ικανοποιώντας με αυτόν τον τρόπο ψυχολογικά κριτήρια. Ωστόσο υστερεί σε άλλα χαρακτηριστικά αφού εύκολα μπορεί να παρατηρηθούν συνθήκες θάμβωσης και για τους καλοκαιρινούς μήνες πρόσθετο θερμικό φορτίο. Μια απλή λύση είναι η τοποθέτηση περσίδων εσωτερικά του παραθύρου για αποκοπή της απευθείας δέσμης φωτός και η διάχυση του φωτός.

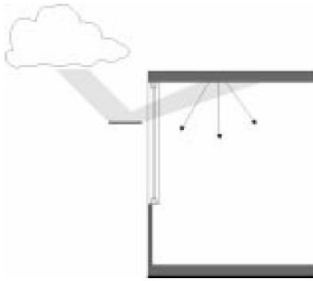
Αποτελεί σχετικά οικονομική αρχιτεκτονική διάταξη, εαν και εξαρτάται και ποιοι παράμετροι εξετάζονται ή το σημείο που βρίσκεται ο χώρος και του προσανατολισμού του. Αναφέρεται το χαμηλό κόστος κτήσης και εγκατάστασης των παραθύρων, και λειτουργίας του χώρου. Δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για φωτισμό θέρμανση και ψύξη. Βέβαια μια τέτοια ανάλυση ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και απαιτείται να γίνει και μια σύγκριση βάση των παραπάνω παραμέτρων και με τις υπόλοιπες διατάξεις που αναλύονται παρακάτω.

Αναφορικά με το φυσικό φωτισμό που είναι και το ζητούμενο για την παραγωγή ενέργειας που εξετάζεται, δεν αποτελούν ικανοποιητική λύση αφού παρέχουν επαρκή φωτισμό σε μικρή απόσταση από αυτά και συνεπώς για περίπτωση πολλών παραθύρων παρέχουν επαρκή φωτισμό στην περίμετρο του κτιρίου και τα μεγέθη να μειώνονται απότομα όσο αυξάνεται η απόσταση από αυτά. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται όχι μόνο σε μια πλευρά του κτιρίου αλλά σε περισσότερες ενδεχομένως. Στις περισσότερες μελέτες φυσικός φωτισμός τοποθετείται ένα παράθυρο προσανατολισμένο προς το Νότο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη ξενόγλωσση βιβλιογραφία με τον όρο fenestration εννοείται κάθε εξωτερικό άνοιγμα σε ένα τοίχο, εάν και δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός, συνεπώς περιγράφεται κάθε διάταξη φυσικός φωτισμός, συνεπώς ο όρος window αποτελεί υποσύνολο αυτού.

Φωτεινά ράφια (light shelves)

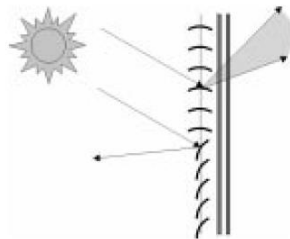
Χρησιμοποιείται για την αποφυγή της θάμβωσης αλλά δεν συμβάλλει στον φυσικός φωτισμός στα σημεία του δωματίου που βρίσκονται μακριά από το παράθυρο και τοποθετείται εξωτερικά αυτού. Η κατασκευή του είναι προσαρμοσμένη για το κάθε παράθυρο του κτιρίου, επειδή μπορεί να έχει διαφορετικές διαστάσεις και συνεπώς αυξάνεται το κόστος σε σχέση με τυποποιημένες κατασκευές.



Όπως σε όλες τις εξωτερικές διατάξεις η ρύπανση των ανακλαστικών επιφανειών μειώνει την απόδοση της διάταξης παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη για ρυπαρούς χώρους ή η τακτικότητα καθαρισμού τους. Επισημαίνεται ότι επειδή η ανάκλαση και διάχυση του φωτός πραγματοποιείται στο ταβάνι του δωματίου και κοντά στο παράθυρο, ενδείκνυται και για τοποθέτηση φωτοβολταϊκό με σκοπό παραγωγή ενέργειας αλλά και ανάκλαση του φωτός.

Περσίδες (louver and venetian blinds)

Ο τρόπος λειτουργίας τους και η μορφή τους παρουσιάζει κοινά στοιχεία με τα φωτεινά ράφια ωστόσο είναι πιο μικρά σε εμβαδόν, λόγω του μειωμένου πλάτους, και πιο πυκνά σε πλήθος. Αφού τα φωτεινά ράφια τοποθετούνται ένα σε κάθε παράθυρο.



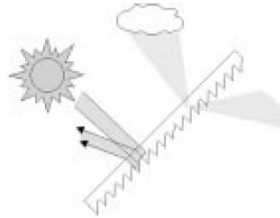
Η συγκεκριμένη λύση, μπορεί να προκληθεί θάμβωση και η τοποθέτησή του μπορεί να γίνει εσωτερικά ή εξωτερικά του δωματίου. Κατασκευάζονται από πλήθος διαφορετικών υλικών και συνεπώς ιδιοτήτων και μπορούν να τοποθετηθούν κάθετα ή οριζόντια. Επίσης, παρουσιάζουν ρύπανση και μειωμένες αποδόσεις σε σχέση με τα φωτεινά ράφια.

Όσον αφορά και την προσομοίωση αυτών αποτελούν σύνθετες διατάξεις, και για το λόγο αυτό, όπως και για την περίπτωση των φωτοσωλήνων η μελέτη τους πρέπει να γίνει από κατάλληλα προγράμματα (radiance) με σύνθετους αλγορίθμους προσομοίωσης της συμπεριφοράς τους φωτός (ανάκλαση διάθλαση).

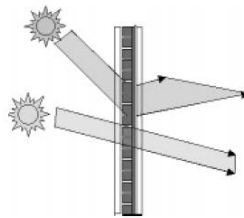
Panels

Αναλόγως της μεθόδου κατασκευής τους διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες.

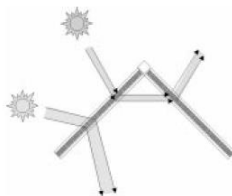
Τα πρισματικά πάνελ αποτελούνται από ακρυλικά υλικά και χρησιμοποιούνται για μείωση της θάμβωσης αφού ανακλούν ή διαχέουν το φως. Εμφανίζουν πριονωτή δομή στην επιφάνεια που βρίσκεται στο εσωτερικό του δωματίου και συνεπώς διαχέουν τις άμεσες ακτίνες του ηλίου. Κάποιες φορές κατά τη διάρκεια ενός έτους μπορεί να διαθλαστούν οι ακτίνες προς το πάτωμα του δωματίου δημιουργώντας συνθήκες θάμβωσης.



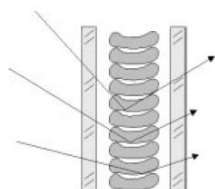
Προκειμένου να μεταδοθεί το φως στον εσωτερικό χώρο, με την κοπή ακρυλικών υλικών με laser, το φως υφίσταται πρώτα διάθλαση έπειτα ολική εσωτερική ανάκλαση και τέλος διάθλαση. Κατασκευάζονται έτσι ορθογώνια στοιχεία κάθε ένα εκ' των οποίων αποτελεί έναν μικρό καθρέφτη. Σε αντίθεση με πρισματικά πάνελ όπου είναι δυνατή μόνο η ανάκλαση και η διάθλαση και μπορεί να υπάρξει θάμβωση εξαιτίας της απευθείας συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να μεταδοθεί.



Με κοπή με laser μπορεί επίσης να δημιουργηθεί ένας φεγγίτης γωνιακής επιλεκτικότητας (angular selective skylight laser cut panel), με πυραμιδωτή διάταξη, που εμφανίζει επιλεκτικότητα στην εισχώρηση των ηλιακών ακτίνων. Σε υψηλές ηλιακές γωνίες, δηλαδή ύψος Ηλίου ανακλάται η ηλιακή ακτινοβολία προς το περιβάλλον, ενώ σε χαμηλές ή σε διάχυτο φως η ηλιακή ακτινοβολία εισχωρεί στο εσωτερικό του κτιρίου. Το σχήμα της διάταξης μπορεί να έχει σχήμα πυραμίδας δηλαδή να προεξέχει από την ταράτσα του κτιρίου ή ανεστραμμένης πυραμίδας, δηλαδή να προεξέχει από το ταβάνι του δωματίου προς το εσωτερικό του δωματίου. Για την πρώτη περίπτωση το φως θα περιορίζεται στην περίμετρο, της προβολής της διάταξης στο πάτωμα, ενώ στην δεύτερη θα διαχέεται σε μεγαλύτερο εμβαδόν. Συνεπώς είναι ιδανικό αυτό το σχήμα για μικρά γεωγραφικά πλάτη και περιοχές όπως η Ελλάδα, αφού απορρίπτεται ο καλοκαιρινός ήλιος όταν βρίσκεται στο ζενίθ και επιτρέπει την εισχώρηση των πρωινών ή απογευματινών ηλιακών ακτίνων.

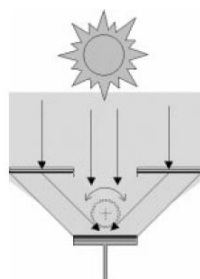


Μια ακόμη διάταξη (sun directing glass) με τις προαναφερθείσες ιδιότητες, εκμετάλλευση του πρωινού ή απογευματινού ήλιου και διάχυση του, αποτελεί η τοποθέτηση κούφιας ακρυλικών στοιχείων τοποθετημένων οριζόντια ανάμεσα από διπλά υαλοπετάσματα.



Directional Selective Shading Systems Using Holographic Optical Elements (HOEs)

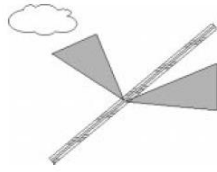
Η κατηγορία αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς είναι δυνατή η τοποθέτηση φωτοβολταϊκό για την αξιοποίηση της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας που σε διαφορετική περίπτωση θα είχε ανακλαστεί προς την εξωτερική μεριά του δωματίου, αφού επιτρέπει τη διείσδυση του φωτός από συγκεκριμένα τμήματα του ουρανού.



Τοποθετείται ένα polymeric φιλμ ανάμεσα από δύο υαλοπετάσματα, μειώνοντας τη συντήρηση που απαιτείται και βελτιώνοντας τη διάρκεια ζωής και είναι ιδανικό για μεγάλες σε έκταση επιφάνειες.

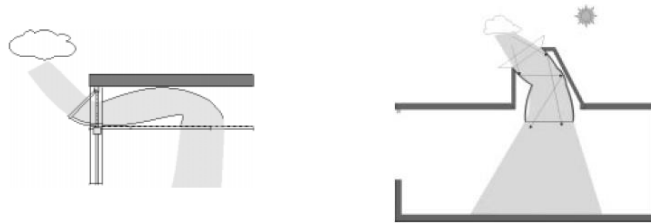
Zenithal Light-Guiding Glass with HOE polymeric film

Χρησιμοποιείται για διείσδυση του ήλιου από το ζενίθ αλλά με την ταυτόχρονη αποκοπή της απευθείας δέσμη φωτός. Ωστόσο, επιφέρει αλλοίωση των χρωμάτων και μπορεί να προκληθεί θάμβωση σε περιπτώσεις εισχώρησης της απευθείας δέσμης φωτός. Ιδιάζουσες εφαρμογές αποτελούν δωμάτια στα οποία δεν υπάρχει πρόσβαση προς του ουρανού λόγω εμποδίων στον περιβάλλοντα χώρο, όπως στην περίπτωση αστικού περιβάλλοντος.



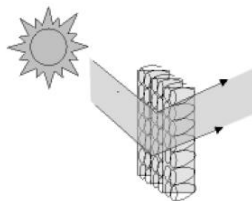
Anidolic Ceilings ή Anidolic Zenithal Openings

Ο τρόπος λειτουργίας παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά με τον φωτοσωλήνα αφού μεταφέρει φως στο εσωτερικό του δωματίου, και χρησιμοποιείται υλικό υψηλής ανακλαστικότητας (ανοδιωμένο αλουμίνιο) προκειμένου να επιτευχθεί. Αποτελούν δηλαδή ηλιακούς συγκεντρωτές και σχεδιάζονται με βάση τον κλάδο της οπτικής non-imaging optics. Δηλαδή, σκοπός είναι η μεταφορά περιεχομένου (φωτός) και όχι της πληροφορίας (image). Χρησιμοποιούνται για συννεφιασμένο ουρανό, με την χρήση κατόπτρων συγκέντρωσης φωτός το φως μεταφέρεται σε έναν φωτεινό αγωγό προκειμένου να μεταδοθεί στο προς φωτιζόμενο χώρο. Για την περίπτωση των ζενιθιακών ανοιγμάτων η διάταξη δέχεται την ακτινοβολία της ουράνιας σφαίρας από συγκεκριμένα τμήματα αναλόγως την τοποθέτησή της, δηλαδή το άνοιγμα να είναι προσανατολισμένο προς τον βορρά την ανατολή ή τη δύση.



Anidolic Solar Blinds

Πετυχαίνει καλά αποτελέσματα φυσικός φωτισμός σε όλους τους τύπους ουρανών εν αντιθέση με άλλα συστήματα που είναι προορισμένα για συννεφιασμένους ή καθαρούς ουραμούς.



Φωταγωγός - Φωτεινό πηγάδι (Light well)

Η πιό απλή διάταξη για τη διείσδυση του φωτός στο εσωτερικό των κτιρίων είναι ο φωταγωγός. Συνίσταται στην μη αξιοποίηση ωφέλιμου χώρου, για τη δημιουργία μιας οπής στο κατακόρυφο μήκος του κτιρίου και την κάλυψη των τοιχωμάτων σπάνια (αφου δεν υπάρχει μεγάλη αύξηση της απόδοσης) με υλικά υψηλής ανακλαστικότητας έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η έλευση του φωτός και στους κατώτερους ορόφους του κτιρίου.

Αποτελεί μια διάταξη φυσικού φωτισμού που σχεδιάζεται πριν την κατασκευή του κτιρίου κατά την φάση μελέτης σχεδιασμού αυτού. Ως μειονέκτημα μπορούμε να αναφέρουμε ότι χρησιμοποιείται αρκετός αξιοποιήσιμος όγκο του κτιρίου για την επίτευξη ικανοποιητικού αποτελέσματος έντασης

φωτισμού και για το λόγο αυτό λόγω μειωμένου όγκου, που συχνά επιλέγεται, δεν παρέχονται ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αναλόγως του όγκου του φωταγωγού διακρίνεται σε αίθριο (atria), όπου μπορεί να υπάρχει και η τοποθέτηση στην οροφή γυάλινης κατασκευής και σε μεγαλύτερες ακόμα διαστάσεις όπου σημαντικός όγκος έχει αφαιρεθεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες χρήσεις (φύτευση).

Η επίτευξη υψηλής στάθμης φωτισμού στο ισόγειο των κτιρίων, πραγματοποιείται συνήθως για κτίρια που παρουσιάζουν αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον όπως χώροι γραφείων, μουσεία, εμπορικά κτίρια, αλλά απαιτείται μεγάλης περιμέτρου φωτοαγωγός.

Σε μεγάλα όμως διαμερισματοποιημένα κτήρια, όπως τις πολυκατοικίες, όπου δεν είναι δυνατή η πρόσβαση σε φως όλων των τμημάτων του κτιρίου επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα στους τελευταίους ορόφους, καθώς συμβάλλει και στον αερισμό των εσωτερικών αυτών τμημάτων του κτιρίου.

Φωτοσωλήνας -Φωτοαγωγός (Light Tube Solar tube,hollow light guiding tube)

Όπως και στην περίπτωση του φωταγωγού αποτελεί και ο φωτοσωλήνας μια διάταξη φυσικού φωτισμού που απαιτείται άνοιγμα οροφής. Αναφέρεται ότι στη βιβλιογραφία και σε αναζήτηση εμπορικών λύσεων, υπάρχει μια σύγχυση στην χρήση και των ελληνικών και των ξενόγλωσσων όρων. Καθώς ο φωτοσωλήνας μπορεί να αποδοθεί ως όρος με πολλές διαφορετικές ονομασίες και ιδιαίτερα για τον ελληνικό όρο μπορεί να υπάρχει παρερμηνεία στην χρήση του όρου φωταγωγού αφού χρησιμοποιείται για τη διάταξη του φωτεινού πηγαδιού. Εάν και ο όρος φωτεινός αγωγός κρίνεται δόκιμος αφού πρόκειται για ένα αγωγό κυλινδρικής διατομής που μεταφέρει, άγει το φως στο εσωτερικό των δωματίων. Θα χρησιμοποιηθεί ο όρος φωτοσωλήνας για την αποφυγή παρερμηνειών και σύγχυσης για αυτόν λόγο, στην παρούσα διπλωματική.

Ο φωτοσωλήνας, πρόκειται ουσιαστικά για μια διάταξη μικρότερου όγκου από τον φωταγωγό που μπορεί να τοποθετηθεί και σε υφιστάμενα κτίρια και μεταφέρει το φως στο εσωτερικό των κτιρίων με μεγαλύτερη απόδοση, λόγω της μεγαλύτερης και σταθερής κατά την διάρκεια ζωής του, ανακλαστικότητας των τοιχωμάτων αφού αποτελεί κλειστή διάταξη σε αντίθεση με τον φωταγωγό. Ιδιαίτερως συμφέρουσα κρίνεται η τοποθέτηση του σε μεγάλο εμβαδού και ύψους μεταλλικές κατασκευές, όπως αποθήκες, λόγω της εξοικονόμησης ηλεκτρικού ρεύματος από την απαλοιφή ή μείωση χρήσης λαμπτήρων HID, χωρίς οι χρήσεις του να περιορίζονται μόνο στο προαναφερθέν παράδειγμα.



Πρόκειται για μία σχετικά καινούργια συσκευή, κυλινδρικής διατομής, όταν το 1987 κατατέθηκε η πατέντα Sutton S. Tubular skylights; 1986. Australian patent no. 586359, και διατέθηκε εμπορικά από την εταιρεία SOLATUBE αφού ανέπτυξε και το υλικό πολύ υψηλής ανακλαστικότητας Spectralight® με δείκτη ανάκλασης 99,7%.

Το ποσοστό 99.7% αντιστοιχεί στην κανονική ανάκλαση, αλλά το 3% χάνεται σε κάθε ανάκλαση των ακτίνων λόγω απωλειών σε κανονική και διαχέουσα ανάκλαση. Συνεπώς, υπάρχουν 2% απώλειες λόγω απορρόφησης και 1% λόγω διάχυσης του φωτός. Σε διάφορες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί συγκρίνονται τα διαφορετικά κατασκευαστικά στοιχεία (μήκος, πλάτος, διάμετρος) που θα προσφέρουν την μέγιστη διάδοση του φωτός, και συνεπώς επιθυμητό δείκτη DF, αλλά και το κατώφλι μήκους όπου λόγω απωλειών η συνδρομή του φυσικός φωτισμός είναι ελάχιστη, προκειμένου να επιλεγεί ο κατάλληλος φωτισωλήνας για κάθε χώρο.

Ο τρόπος επίτευξης της προσαγωγής του φωτός, έγκειται στη χρήση υλικών υψηλής ανακλαστικότητας στο εσωτερικό των τοιχωμάτων του σωλήνα, αλλά και της πολύπλοκης κατασκευαστικής διεργασίας και για το λόγο αυτό παρατηρούνται μικρές απώλειες ειδικά σε περιπτώσεις ευθύγραμμων αγωγών. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλές στροφές του αγωγού οι απώλειες αύξονται σε μεγαλύτερο βαθμό και για τον λόγο αυτό πρέπει να διενεργηθεί μελέτη απόδοσης προσαγωγής της εξωτερικής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου. Μια ακόμη ιδιαιτερότητα για τον λόγο αυτό είναι ότι σε περιπτώσεις πολυόροφων κτιρίων η τοποθέτηση τέτοιων συστημάτων είναι εφικτή μόνο στα τελευταία διαμερίσματα, πιθανόν μπορεί μόνο ακόμη και στο τελευταίο, αφού σε διαφορετική περίπτωση η όδευση του φωτισωλήνα θα πρέπει να γίνει στο εξωτερικό του κτιρίου ή διαμέσου των προηγούμενων ορόφων, ή συλλογή του φωτός αντί της οροφής από τον εξωτερικό τοίχο αν υπάρχει επαρκής θέα στον ουράνιο θόλο και όδευση του εγκάρσια στο μήκος του κτιρίου.

Η συλλογή του φωτός πραγματοποιείται στην οροφή του κτιρίου από ένα διαφανή θόλο, ο οποίος είναι κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να μην απαιτείται ιχνηλάτηση του ηλιακού δίσκου, άρα να αποτελεί ενεργή διάταξη, αλλά για κάθε εποχή του έτους να υπάρχει το αντίστοιχο κομμάτι του θόλου που μεγιστοποιεί τη συλλογή ηλιακών ακτίνων. Μπορεί να τοποθετηθεί και θόλος επίπεδος ή επικλινής προς κάποια κατεύθυνση για συλλογή παραδείγματος χάριν του πρωινού φωτός.

Όμως, στη διάρκεια ενός χρόνου λόγω του διαφορετικού ύψους του Ηλίου θα υπάρχει και διαφορετική απόδοση λόγω της θέσης του, παρά την βελτιστοποίηση αυτή αφού ο μεγαλύτερος αριθμός ανακλάσεων λόγω του ηλιακού ύψους αυξάνει τις απώλειες. Η μέγιστη συλλογή φωτός θα πραγματοποιείται συνεπώς όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και σε υψηλό ηλιακό ύψος, συνεπώς το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας διαδίδεται παράλληλα κατά μήκος του, με ελάχιστες ανακλάσεις. Χωρίς απαραίτητα να είναι και επιθυμητό αφού θα συμβαίνει την καλοκαιρινή περίοδο, που ήδη υπάρχει υψηλή διαθεσιμότητα φωτός ή η εμφάνιση φωτεινών κηλίδων ή η υψηλή στάθμη φωτισμού, θα δημιουργήσει συνθήκες οπτικής όχλησης.

Στη συνέχεια της συλλογής του φωτός από τον θόλο, με αλληπάλληλες ανακλάσεις του φωτός μέσα στο σωλήνα, ο οποίος διασχίζει κάθετα ή διαγώνια, συνεπώς με στροφή του σωλήνα (συνήθως 45° ή 22°), τον κάθε όροφο του κτιρίου με σκοπό να καταλήξει στο διαχύτη. Όπου τοποθετείται στην οροφή του ορόφου, όπως ένα φωτιστικό επιτυγχάνοντας έτσι και όμοιο αισθητικό αποτέλεσμα. Ανάλογα με τα υλικά κατασκευής του διαχύτη το πολικό διάγραμμα κατανομής της φωτεινής έντασης (στο HOLLIGILM αναφέρεται ως luminous intensity σε μονάδες au) διαφέρει αναλόγως και του αποτελέσματος έντασης ή κατανομής του φωτός που προσπαθούμε να πετύχουμε. Συνήθως επιλέγεται ένα υλικό το οποίο

διαθλά το φως προκειμένου να μην υπάρχει ανομοιομορφία στην φωτιζόμενη επιφάνεια και η μορφή του διαγράμματος έντασης φωτισμού αποτελείται από ομόκεντρους κύκλους ή για περιπτώσεις διαφανών υλικών να επιτυγχάνεται μέγιστη ένταση φωτισμού.

Σημαντική είναι και η συμβολή του φωτοσωλήνα στη μείωση της θερμοκρασίας ενός χώρου καθώς η τοποθέτηση φίλτρου UV ή IR στο θόλο του, δεν συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου όπως θα συνέβαινε με ένα συμβατικό παράθυρο ή ακόμα και με τοποθέτηση ενός λαμπτήρα ιδιαίτερα φθορισμού. Ακόμα ωστόσο και για τους λαμπτήρες led υφίσταται έκλυση θερμότητας από το κύκλωμα μετατροπής εναλλασσόμενου συνεχούς ρεύματος. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοσωλήνα λόγω απωλειών (απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας) είναι αρκούντως αμελητέα για να προσδώσει θερμότητα στο χώρο. Οι παραπάνω πληροφορίες αναφέρονται στα φυλλάδια των κατασκευαστών, αλλά θα πρέπει να γίνει και μια ανεξάρτητη μελέτη των χαρακτηριστικών του, από εργαστήρια προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι ισχυρισμοί, αφού οι υπάρχουσες μελέτες επικεντρώνονται στο φωτεινό αποτέλεσμα. Καθώς έχουν αναφερθεί περιπτώσεις παρουσίας υγρασίας στο εσωτερικό του, και απώλειες θερμότητας λόγω διάδοσης του ζεστού αέρα, από την ελλιπή μόνωση του διαχύτη να υπάρχει μεταφορά θερμότητας προς τον θόλο που βρίσκεται σε εξωτερική θερμοκρασία.

Αξίζει να αναφερθεί τέλος και η εφευρετικότητα στις τοποθετήσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων με την καταχώρηση μια πατέντας το 1987, όπου υπήρχαν ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στα τοιχώματα του φωτοσωλήνα προκειμένου να χρησιμεύσουν ως υλικό υψηλής ανακλαστικότητας λόγω του τζαμιού της μπροστινής όψης, αλλά και να παραχθεί ωφέλιμη ενέργεια.

Οπτική ίνα

Η διάδοση του φωτός μέσω οπτικών ινών, με ολική εσωτερική ανάκλαση, παρέχει πολύ καλή απόδοση στις διάδοσης του φωτός αλλά αποτελεί μια ακριβή λύση και για το λόγο αυτό περιορίζεται σε μικρό μήκος διάδοσης ή για περιπτώσεις επίτευξης αισθητικού αποτελέσματος.

Το 1881 καταχωρήθηκε μια πατέντα με τρόπο διάδοσης φωτός όμοιο με τη διάταξη του φωτοσωλήμα, δηλαδή συλλογή και μεταφορά φωτός όπως πραγματοποιείται, σε σύγχρονες μεθόδους, για παράδειγμα με οπτικές ίνες ή με υλικά ημιδιαφανή που επιτυγχάνουν ολική εσωτερική ανάκλαση για την μεταφορά του φωτός. Το 1985 επίσης με διαφορετική υλοποίηση αλλά η συλλογή του φωτός πραγματοποιείται με οπτικούς φακούς συγκέντρωσης του φωτός. Σαφώς με πολύ μικρές αποδόσεις και αμφισβητήσιμη υλοποίησή τους για επίτευξη ικανοποιητικής απόδοσης, αλλά ενδιαφέρον παρουσιάζει ο μηχανισμός διάδοσης του φωτός, ο οποίος είναι ίδιος με τον σημερινό. Ωστόσο η επιλογή σύγχρονων υλικών με καλύτερες οπτικές ιδιότητες αυξάνει την απόδοση, όπως και το κόστος, αλλά με επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Παραβολικοί καθρέπτες και λοιπές διατάξεις

Ακριβές λύσεις για την εγκατάσταση αλλά και την συντήρησή τους αφού αποτελούν πιο σύνθετες ενεργητικές διατάξεις. Αμφισβητήσιμο και το τελικό αποτέλεσμα αφού εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η διάρκεια ζωής των μηχανολογικών κατασκευών και εξαρτημάτων, η μειωμένη απόδοση εξαιτίας ρύπανσης των διατάξεων, και η απόκλιση στη ρύθμιση του προσανατολισμού των καθρεφτών.

Σχολιασμός

Παρατηρείται, δηλαδή από την παραπάνω μελέτη ότι η φιλοσοφία λειτουργίας των διατάξεων, για τη συλλογή, μεταφορά και κατανομή του φωτός είναι σχεδόν ίδια, απλώς οι διαφορές μεταξύ των συσκευών, είναι στα υλικά που χρησιμοποιούνται, στις διαστάσεις, στο κόστος και στο τελικό αποτέλεσμα που προσφέρουν.

Καθίσταται συνεπώς σαφές ότι υπάρχει πληθώρα διατάξεων φυσικός φωτισμός που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα κτίριο, υφιστάμενο ή νεόδμητο. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα πρέπει να έχουν σχεδιαστεί να τοποθετηθούν κατά τη φάση κατασκευής ενός κτιρίου ή απαιτούν πολλές τροποποιήσεις προκειμένου να εγκατασταθούν. Ακόμη μια σημαντική παράμετρος είναι και το κόστος τοποθέτησης ή πιθανόν και λειτουργίας ιδιαίτερα και στην περίπτωση που δεν θα είναι χειροκίνητο και απαιτείται κάποιος έλεγχος.

Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε να επιλεγεί για μελέτη ο φωτοσωλήνας (ηλιακός σωλήνας) καθώς μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα σε υφιστάμενα κτίρια ιδιαίτερα στους τελευταίους ορόφους είναι πολύ εύκολη η τοποθέτηση του και λόγω της απλότητας κατασκευής (λίγα εξαρτήματα) και τρόπου λειτουργίας. Επίσης, η ύπαρξη εξακριβωμένων προγραμμάτων προσομοίωσης ειδικά σχεδιασμένα για φωτοσωλήνες, προκειμένου να μελετηθεί η απόδοσή τους. Για τις άλλες διατάξεις, και ειδικά για πολύπλοκες κατασκευαστικές διατάξεις, όπως επιφάνειες που έχουν υποστεί επεξεργασία με λέιζερ ή πολλαπλά πρισματικά στοιχεία μικρού εμβαδού, απαιτείται η προσομοίωση με την χρήση του πολύπλοκου λογισμικού radiance. Ενδεχομένως κάποια άλλα συστήματα να προσφέρουν καλύτερη απόδοση στην παραγόμενη ενέργεια των εσωτερικών φωτοβολταϊκό κάτι που θα πρέπει να διερευνηθεί.

Μοντέλα ουρανού Sky models

Στην περίπτωση των μελετών τεχνητού φυσικού η πηγή του φωτός και τα χαρακτηριστικά της είναι σαφώς καθορισμένα από τον κατασκευαστή και παραμένουν σταθερά για κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της ζωής των λαμπτήρων. Ωστόσο, δεν αποτελεί περίπτωση για μελέτες φυσικού φωτισμού όπου τα χαρακτηριστικά της φωτεινής πηγής, ο Ήλιος και ουράνια σφαίρα μπορεί να αλλάζουν κατά τη διάρκεια του χρόνου της κάθε ημέρας αλλά και κάθε λεπτό κατά τη διάρκεια της μέρας.

Τα μοντέλα του ουρανού που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή μελετών φυσικού φωτισμού, μπορεί να είναι δύο ειδών. Να στηρίζονται σε πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα ή σε μαθηματικά μοντέλα συνήθων καταστάσεων της ουράνιας σφαίρας.

Στην πρώτη περίπτωση παρέχονται από πιστοποιημένους φορείς ή μετεωρολογικούς σταθμούς με διαφορετικά μετρούμενα μεγέθη αλλά και χρονική ακρίβεια. Δηλαδή, οι πιο εξελιγμένοι σταθμοί είναι σε θέση να καταγράψουν την κάθετη προσπίπτουσα ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας απευθείας και την διάχυτη, θερμοκρασία, σχετική υγρασία καθώς και την ταχύτητα του ανέμου. Επίσης, οι μετρήσεις μπορεί να πραγματοποιούνται κάθε ενός λεπτού αλλά με συνηθέστερο χρονικό διάστημα να αποτελεί το ένα τέταρτο της ώρας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί μια ετήσια χρονοσειρά και να εισαχθεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης προκειμένου να προκύψουν τα κατάλληλα ημερήσια αποτελέσματα. Όμως, προκειμένου να εξαλειφθούν όποιες ιδιαιτερότητες προέκυψαν στο συγκεκριμένο έτος και να μπορούν να αποδοθούν οι μέσες συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, χρησιμοποιείται η τυπική μετεωρολογική χρονιά Typical Meteorological Year. Δηλαδή, λαμβάνονται οι

ετήσιες χρονοσειρές σε βάθος δεκαετίας ή και παραπάνω χρόνων, και με την κατάλληλη στατιστική επεξεργασία εξάγονται οι τυπικές συνθήκες που επικρατούν στη συγκεκριμένη περιοχή για κάθε μέρα ενός έτους, σε διάστημα μιας ώρας ή τετάρτου της ώρας συνηθέστερα.

Ωστόσο λόγω της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη των συνθηκών που τελικά θα επικρατήσουν, της μη ύπαρξης μετεωρολογικών δεδομένων για αρκετές περιοχές αλλά και σημαντικότερα λόγω τους κόστους υπολογισμών που απαιτείται προκειμένου να εξαχθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα από το πρόγραμμα προσομοίωσης και εφόσον υποστηρίζεται και η δυνατότητα εισαγωγής τέτοιων δεδομένων σε αυτό, χρησιμοποιείται σε πιο εμπειριστατωμένες μελέτες ή όπου απαιτείται καλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι μπορεί να παρατηρηθεί απόκλιση έως και 20% στα αποτελέσματα, σε σχέση με τη μελέτη στατικών καιρών, δηλαδή των μαθηματικών μοντέλων. Για αυτό και υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για προσομοιώσεις με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων λόγω των αποκλίσεων με την χρήση μοντέλων.

Η ύπαρξη μετεωρολογικών δεδομένων προϋποθέτει σε κοντινή απόσταση της ύπαρξης μετεωρολογικού του προς μελέτη τοποθεσίας. Για την αποφυγή όμως της εγκατάστασης σταθμού μπορούμε να μην κάνουμε μετρήσεις για κάθε μέρα του έτους, ειδικά όσον αφορά τους τυπικούς ουρανοί (συννεφιασμένος ουρανός ή τελείως καθαρός ουρανός) αφού η ηλιακή γεωμετρία αλλάζει με αργούς ρυθμούς ανα ημέρα, ή και εβδομάδες ο καιρός, αλλά σε μεγάλο βαθμό καθορίζεται και από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και ενέχει μεγάλη αβεβαιότητα. Οι οποίες δεν είναι δεδομένο ότι θα ταυτίζονται κάθε χρόνο αλλά και στη διάρκεια μιας εβδομάδας ή ενός μήνα (ίδιο καιρό τον Φλεβάρη του περασμένου έτους με φέτος). Για αυτό κρίνεται η χρήση πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων εφόσον υπάρχουν διαθέσιμα για μία περιοχή που εκτείνονται σε βάθος χρόνου παραδείγματος χάριν μιας δεκαετίας προκειμένου να αποφευχθούν οι όποιες ασυνήθιστες μέρες που μπορεί να προέκυψαν (π χ έκρηξη ηφαιστείου ενδέχεται να έχει σοβαρό αντίκτυπο στο κλίμα της περιοχής). Ενδεικτικά, αναφέρεται το μοντέλο TMY που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτη παραγόμενης ενέργειας από πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα, ελαττώνοντας έτσι τυχόν αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές.

Για το λόγο αυτό αν δεν είναι επαρκή τα μετεωρολογικά δεδομένα, ή η μελέτη που πραγματοποιείται δεν απαιτεί ακρίβεια, όπως στην παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιούνται κάποια πρότυπα μοντέλα ουρανού και η μελέτη πραγματοποιείται συνήθως για τις τέσσερις ημέρες, που σηματοδοτούν και τις εποχές κατά την διάρκεια του έτους.

Πιο συχνά συνεπώς χρησιμοποιούνται τα μαθηματικά μοντέλα του ουρανού, κυρίως λόγω της ευκολίας και ταχύτητας προσομοίωσης και επειδή είτε δεν είναι δυνατή η εύρεση μετεωρολογικών στοιχείων για τη συγκεκριμένη περιοχή είτε το πρόγραμμα προσομοίωσης ενδέχεται να μην υποστηρίζει την εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων, όπως στη περίπτωση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Δηλαδή, τα μαθηματικά μοντέλα είναι τυπικοί ουρανοί που προκύπτουν τις περισσότερες μέρες στη διάρκεια ενός έτους ή καλύτερα το δυσμενέστερο ή καλύτερο σενάριο, όπως στην περίπτωση μελέτης παραγωγής των φωτοβολταϊκών εξετάζεται η ελάχιστη παραγωγή που θα προκύψει στις 21 Δεκεμβρίου. Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες, ο συννεφιασμένος (overcast) ουρανός ή ο τελείως (clear sky) καθαρός χωρίς την ύπαρξη των παραμικρών νεφελωμάτων, αλλά έχουν προταθεί και παραλλαγές ή βελτιώσεις αυτών από διάφορους ερευνητές. Απαραίτητη σε κάθε περίπτωση είναι η επαλήθευση των μοντέλων αυτών για να εξάγονται και τα επιθυμητά σωστά αποτελέσματα, με τη διεξαγωγή μετρήσεων από τα κατάλληλα εργαστήρια.

Για την πρώτη περίπτωση, υπάρχει το μοντέλο της σταθερής φωτεινότητας (Uniform luminous model)

$$L(\theta)=L_z$$

του ουρανού ωστόσο δεν λαμβάνει υπόψη το φωτεινότερο ζενίθ του ουρανού και για το λόγο αυτό για την παραγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται το μοντέλο CIE standard overcast sky (κανονικοποιημένο ως προς την λαμπρότητα στο ζενίθ του ουράνιου θόλου)

$$L_z=L_z (1 + 2 \cos \zeta)/3$$

$$\text{CIE } L(\theta)=L_z(1+2\sin\theta)/3$$

Αναφέρεται, σε περίπτωση που υπολογίζεται ο δείκτης DF, χρησιμοποιείται το μοντέλο του συννεφιασμένου ουρανού που θα οριστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

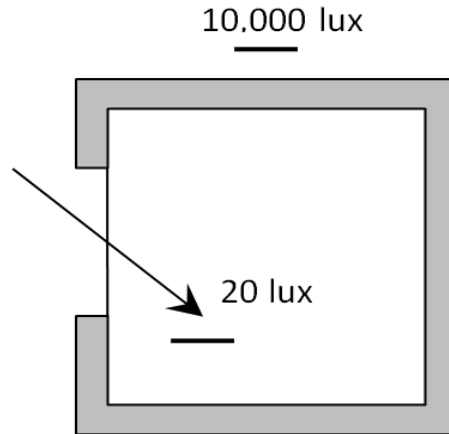
Ο καθαρός ουρανός αποτελεί μια εξιδανίκευση καθώς τελείως καθαρός ο ουρανός δεν είναι τις περισσότερες φορές αλλά μπορεί να υπάρχουν σύννεφα σε ένα μέρος της ουράνιας σφαίρας ή πιο συχνά οι αέριοι ρύποι του αστικού περιβάλλοντος της ατμόσφαιρας αλλοιώνουν τις ιδιότητες που θα προέκυπταν από έναν τελείως καθαρό ουρανό, συνεπώς θα υπάρχει μια υπερεκτίμηση στα παραγόμενα αποτελέσματα.

Με την χρήση των παραπάνω μοντέλων συνήθως η μελέτη φυσικού φωτισμού πραγματοποιείται για συγκεκριμένες μέρες του έτους και συγκεκριμένα τις Ισημερίες ή στα Ηλιοστάσια.

Τυπικές τιμές της έντασης φωτισμού στην περίπτωση του συννεφιασμένου ουρανού είναι στο διάστημα 7-20 klux το καλοκαίρι, και για τον καθαρό 30-100 klux. Διαπιστώνεται δηλαδή το ποσοστό εισχώρησης φωτός που θα πρέπει να επιτευχθεί προκειμένου στην επιφάνεια εργασίας να επιτύχουμε αποτελέσματα 500 lux (DF=2-5%)

Δείκτες ποσοτικής περιγραφής φυσικού φωτισμού

Μια πρώτη προσέγγιση για ποσοτικούς δείκτες φυσικού φωτισμού δόθηκε από τον Tragenza και τον δείκτη Daylight Factor (DF), για χρήση αποκλειστικά σε συννεφιασμένους ουραμούς. Ορίζεται ως το ποσοστό της έντασης φωτισμού που διανέμεται στον εσωτερικό χώρο προς τις εξωτερικές συνθήκες, με τυπικές τιμές να ανήκουν στο εύρος 2-5%. Για αποθήκες ο δείκτης να είναι μικρότερος του 1%, 1-2% το ελάχιστο ποσοστό μεταφοράς φωτισμού για χώρους διελεύσεων όπως οι διάδρομοι, 4-7% για χώρους γραφείων, και τέλος 7-12% για εργασίες υψηλής ακρίβειας.



Για πολλά χρόνια χρησιμοποιήθηκε σε πλήθος μελετών για την ανάλυση αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων, λόγω της ευκολίας εφαρμογής του και κατανόησής του. Ωστόσο, έχουν προταθεί και άλλοι δείκτες φυσικού φωτισμού που παρέχουν καλύτερα συμπεράσματα, αφού λαμβάνεται υπόψη και ο προσανατολισμός του κτιρίου, για την ποσότητα αλλά και ποιότητα του φυσικού φωτισμού (απουσία θάμβωσης), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για καθαρό ουρανό.

Ο δείκτης Daylight Autonomy (DA %), που χρησιμοποιείται για κατοικήσιμους χώρους ή για χώρους γραφείων στο ωράριο εργασίας, και εκφράζει το ποσοστό ωρών όπου ο στόχος της έντασης φωτισμού ικανοποιείται σε ένα σημείο χώρου μόνο από φυσικό φωτισμό. Η εύρεση του δείκτη πραγματοποιείται από αθροιστικά διαγράμματα διαθεσιμότητας εντάσεων φωτισμού της επιφάνειας εργασίας προκειμένου να προκύψει το ζητούμενο ποσοστό. Ωστόσο, για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη και η παρουσία υψηλών εντάσεων φωτισμού από την απευθείας δέση ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται ο δείκτης Useful Daylight Illuminance (UDI). Συνίσταται στην ικανοποίηση των εντάσεων φωτισμού με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων, στο ωράριο εργασίας για χώρους γραφείων, που βρίσκονται σε ένα αποδεκτό εύρος εντάσεων φωτισμού έτσι ώστε πολύ υψηλές έντασης φωτισμού να αποκόπτονται θεωρώντας ως ανεπιθύμητες εξαιτίας θάμβωσης. Ένα τυπικό εύρος αποτελείται από 100 έως 2000 lux. Για μικρότερες τιμές έντασης θεωρείται ανεπαρκής ο φυσικός φωτισμός καθώς θα απαιτείται συμπληρωματική λειτουργία των λαμπτήρων.

Έχει προταθεί και ένας δείκτης φυσικού φωτισμού αποκλειστικά για φωτοσωλήνες, ο δείκτης Daylight Penetration Factor, όπου υπολογίζεται όπως και ο δείκτης DF, ωστόσο λαμβάνονται υπόψη το ύψος του φωτοσωλήνα από την επιφάνεια εργασίας, η καθαρότητα του ουρανού (sky clearness index k_t) και τέλος το ηλιακό ύψος.

Αναφέρεται τέλος ότι παρατίθενται για λόγους πληρότητας καθώς δεν έγινε κάποιος υπολογισμός δείκτη φυσικού φωτισμού. Ενδεχομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης DA σε συνδυασμό με ένα μοντέλο φωτοβολταϊκού προκειμένου να επιλεγεί κατάλληλη τιμή έντασης φωτισμού που θα επιτυγχάνει ικανοποιητική απόδοση και συνεπώς παραγωγή ενέργειας, προκειμένου να μελετηθεί η ετήσια παραγόμενη ενέργεια.

Μεγέθη φωτομετρικά

Όπως αναφέρθηκε το ορατό φως αποτελεί μέρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, το οποίο γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο μέσω του μηχανισμού της όρασης, και με αισθητήριο

όργανο τον οφθαλμό. Το μήκος κύματος ανήκει στο εύρος 380-780, και το φως μπορεί να θεωρηθεί ως σωματίδιο (φωτόνιο) ή με ιδιότητες κύματος (ακτινοβολημένο κύμα από ένα μέλαν σώμα), αναλόγως την προς μελέτη περίπτωση. Καθοριστικές για αυτήν την θεώρηση ήταν οι έρευνες, οι θεωρίες και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και ιδιαίτερα με την απονομή βραβείου Νόμπελ στον Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Συνεπώς, αναπτύχθηκαν και τα κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία για την μελέτη του φαινομένου και του φωτός ή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γενικότερα. Ορισμένα μεγέθη παρατίθενται στη συνέχεια και συγκεντρωτικά με την προσθήκη των ονομασιών από την ξένη βιβλιογραφία μπορούν να αναζητηθούν στο παράρτημα.

Χρήσιμα φωτομετρικά μεγέθη αποτελούν η φωτεινή ροή Φ που μετριέται σε [lumens], δηλαδή η φωτεινή ενέργεια που εκπέμπεται συνολικά από μια πηγή φωτός προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η ένταση φωτισμού I με μονάδα μέτρησης [cd], που αποτελεί την ένταση της φωτεινής πηγής προς μια δεδομένη κατεύθυνση, στερεάς γωνίας. Το αποτέλεσμα της ακτινοβολίας της πηγής ποσοτικοποιείται με την ένταση φωτισμού E , με μονάδα στο σύστημα SI [lux]. Ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής που προσπίπτει σε μια επιφάνεια συγκεκριμένου εμβαδού, υπό κάποια γωνία. Η παρατηρούμενη φαινόμενη φωτεινότητα διαφέρει από τη φωτεινή ένταση το αποτέλεσμα του φωτός που εξετάζεται, δηλαδή, ενώ η πρώτη αποτελεί και το φως που αντιλαμβάνεται ο ανθρώπινος οφθαλμός. Για το λόγο αυτό, χρήσιμο μέγεθος για την ποιότητα της φωτιζόμενης επιφάνειας είναι η λαμπρότητα. Το πηλίκο της φωτεινής έντασης προς την φαινόμενη επιφάνεια που βλέπει ο παρατηρητής, αφού υψηλή φωτεινή ένταση από μια μικρή επιφάνεια προκαλεί θάμβωση δηλαδή δυσφορία προς τον παρατηρητή.

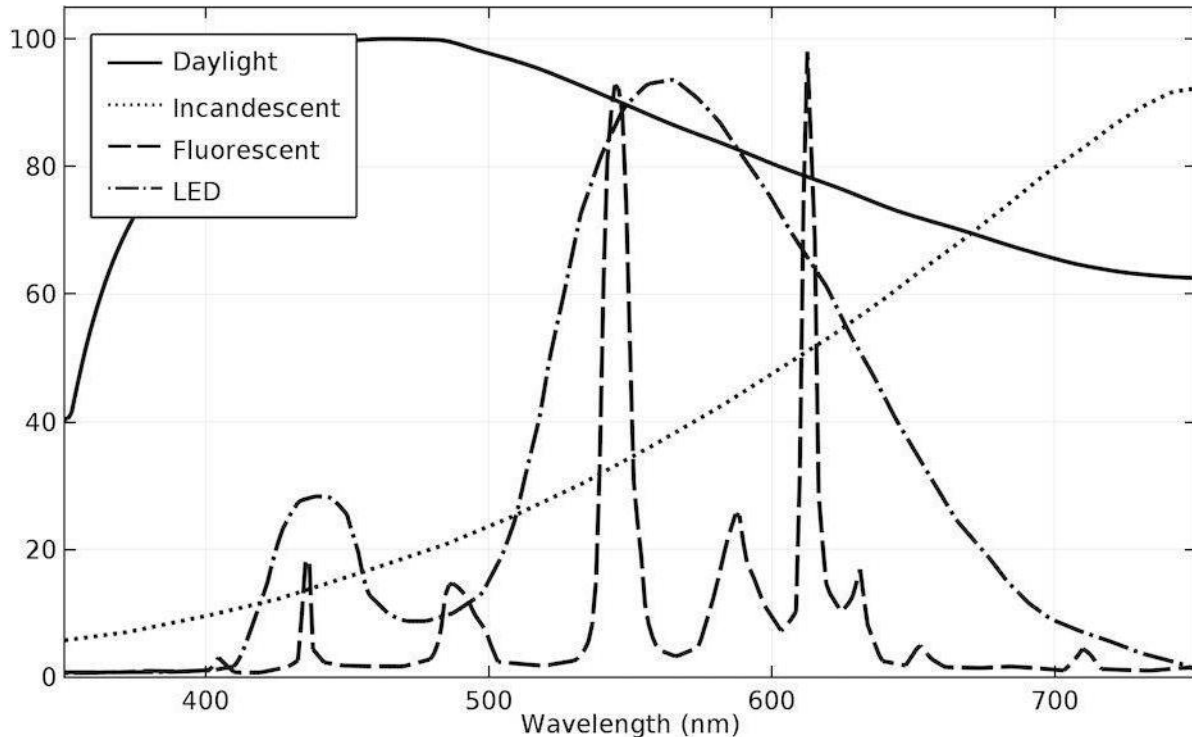
Τυπικές τιμές για φωτισμό εσωτερικών χώρων είναι τα 500 lux για φωτισμό γραφείων, ενώ σε εξωτερικούς χώρους υπό το φως της ημέρας η ένταση φωτισμού μπορεί να φτάσει τα 120 klux. Για την αντίληψη της τάξης μεγέθους αναφέρεται επίσης η ένταση φωτισμού για το φεγγάρι είναι 0.01 lux, και η λαμπρότητα του 2500-3000 cd/m², ενώ για μια τυπική οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή το ανώτερο φωτομετρικό μέγεθος λαμβάνει τιμές στο διάστημα 100-200 cd/m².

Λαμπτήρες για την επίτευξη τεχνητού φωτισμού

Θα μπορούσαν να αναφερθούν το σύνολο των τεχνολογιών των λαμπτήρων, ωστόσο τα τελευταία χρόνια με την εφεύρεση του λαμπτήρα led (δίοδος εκπομπής φωτός) και τη μείωση του κόστους αγοράς, λειτουργίας αλλά και βελτίωση της πιστότητας (δείκτης CRI) του φωτός που παρέχει, συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες θα εξεταστεί κυρίως ο συγκεκριμένος. Χωρίς να αποτελεί μονόδρομο για όλες τις εφαρμογές, αφού χρησιμοποιούνται ακόμη και άλλα είδη λαμπτήρων, λόγω άλλων λόγων. Το αυξημένο κόστος μετατροπής από το ήδη εγκατεστημένο σύστημα φωτισμού με λαμπτήρες φθορισμού, ο φωτισμός χώρων μεγάλου όγκου, όπως οι αποθήκες, που τοποθετούνται λαμπτήρες υψηλής εκκένωσης (high intensity discharge lamps) και πιο εξειδικευμένες εφαρμογές όπως φωτισμός μουσείων, εκθέσεων έργων τέχνης ή ακόμη και ο αρχιτεκτονικός φωτισμός με λαμπτήρες Edison (αξιοποίηση της πρώτης εφεύρεσης λαμπτήρα, για παραγωγή αρχιτεκτονικού φωτισμού από παρωχημένους ενεργοβόρους λαμπτήρες πυράκτωσης).

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των λαμπτήρων led, συνάδει με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών δηλαδή της φυσικής στερεάς κατάστασης. Αφού όπως και τα φωτοβολταϊκά κελιά κατασκευάζονται με την ήδη υπάρχουσα τεχνογνωσία που έχει αποκτηθεί τις τελευταίες δεκαετίες με την ραγδαία αύξηση

του συγκεκριμένου κλάδου της μικροηλεκτρονικής και των αγωγών στερεάς κατάστασης, ειδικότερα του κλάδου κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Οι παραπάνω λαμπτήρες αναφέρονται καθώς και το στενό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που εκπέμπεται με σκοπό τον φωτισμό των εσωτερικών χώρων, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή φωτός από φωτοβολταϊκά τοποθετημένα σε κατάλληλες θέσεις σε εσωτερικούς χώρους οι οποίοι φωτίζονται από λαμπτήρες των παραπάνω τεχνολογιών.

Ημιαγωγοί

Τα υλικά με τα οποία πραγματοποιείται η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρισμό είναι οι ημιαγωγοί. Η διαδικασία αυτή εξηγείται με τη θεωρία της φυσικής στερεάς κατάστασης και με την κβαντομηχανική.

Πιο συγκεκριμένα η επαφή pn, που συναντάται στις περισσότερες εμπορικές εφαρμογές δημιουργείται από προσμίξεις δοτών (πεντασθενή άτομα π χ φώσφορος), οπότε δημιουργείται ένας ημιαγωγός τύπου n. Για ημιαγωγό τύπου p χρησιμοποιούνται αποδέκτες (τρισθενή άτομα π χ βόριο).

Το ενεργειακό διάκενο E_g (που ορίζεται μαθηματικά ως $E_c - E_v$, δηλαδή η διαφορά της ζώνης αγωγιμότητας, με τη ζώνη σθένους) λαμβάνει τιμές για τα ημιαγωγικά υλικά από 0.2 έως 2.5 eV. Για κάποια συνηθισμένα υλικά είναι GaAs 1.4, Si 1.1, Ge 0.7, με βέλτιστη απορόφηση να πραγματοποιείται για τιμή ενεργειακού διακένου ίση με 1.4eV, για παρούσης τεχνολογίας εξωτερικών φωτοβολταϊκών

Τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους (κάτω ζώνη) συμβάλλουν στη δημιουργία χημικών δεσμών στα υλικά. Τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας που είναι ελεύθερα να κινούνται μέσα στο υλικό, συμβάλλουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του και συνεπώς στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Για

την εξήγηση της δημιουργίας του ηλεκτρισμού χρησιμοποιείται και το λογιστικό-θεωρητικό σωματίδιο της θετικά φορτισμένης οπής που συναντάται στη ζώνη σθένους.

Η δημιουργία των δύο αυτών σωματιδίων, ηλεκτρόνιο και οπή, πραγματοποιείται με την απορρόφηση από τον κρύσταλλο ακτινοβολίας κατάλληλης ενέργειας και διαχωρίζεται από το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού. Το μόνιμο ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού που αναπτύσσεται από την επαφή των δύο ημιαγωγών τύπου p και τύπου n, και μετά την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας. Αφού παρέλθει το μεταβατικό φαινόμενο που δημιουργείται κατά την ένωση των δύο ημιαγωγών. Τα ηλεκτρόνια οδηγούνται στη ζώνη αγωγιμότητας συμβάλλοντας στο φωτόρευμα, στην παραγόμενη ενέργεια που εξέρχεται από το κελί, δηλαδή και οι οπές στη ζώνη σθένους.

Υπεύθυνη για αυτή τη διαδικασία είναι η ηλιακή ακτινοβολία, για τα φωτοβολταϊκά τοποθετημένα σε εξωτερικούς χώρους, καθώς για εσωτερικούς συμβάλλουν και οι τεχνητές φωτεινές πηγές στο παραγόμενο φωτόρευμα, συγκεκριμένης όμως ενέργειας το οποίο εξαρτάται από το φάσμα της φωτεινής πηγής. Η μη χρησιμοποιούμενη ωφέλιμη ενέργεια προσδίδει ενέργεια στον κρύσταλλο υπο μορφή θερμότητας λόγω ταλαντώσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα. Αποτελεί την ενέργεια που δεν δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών αλλά και η περίσσεια ενέργειας, σε περίπτωση απορρόφησης αφού το ηλεκτρόνιο θα μεταβεί στην χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας.

Μια διαφορετική ανορθωτική διάταξη είναι η επαφή μετάλλου ημιαγωγού ή δίοδος Schottky. Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της ακτινοβολίας και σε αισθητήρες, λόγω της ταχύτητας λειτουργίας τους, αφού βασίζεται η λειτουργία της διόδου στον μηχανισμό της θερμοϊονικής εκπομπής. Λόγω του δεσμευτικού μικρού εμβαδού της, δεν μπορεί να καταστεί χρήσιμη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για εξωτερικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όπως θα φανεί στη συνέχεια από την μορφή του διαγράμματος της έντασης φωτισμού, ενός φωτοσωλήνα παρουσιάζει κυλινδρική σχεδόν συμμετρία άρα θα μπορούσε να είναι κατάλληλη ως φωτοβολταϊκό πλαίσιο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα φωτόνια ενέργειας $h\nu > E_g$ μπορούν να προκαλέσουν διέγερση των ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους (δημιουργία συνεπώς οπής) στη ζώνη αγωγιμότητας, και συνεπώς έγχυση φορέων στον ημιαγωγό pn, δηλαδή ρεύμα διάχυσης (κλασικό φαινόμενο), από την φωτιζόμενη πλευρά του ημιαγωγού για να καταλήξουν στα ηλεκτρόδια του κελιού. Το ρεύμα ολίσθησης προκύπτει από την επιβολή ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα σύνδεσης του ημιαγωγού. Η ύπαρξη και των δύο ρευμάτων προϋποθέτει την κλίση της στάθμης Quasi-Fermi. Στάθμη η οποία υπάρχει σε συνθήκες φωτισμού, σε αντιστοιχία με τη στάθμη Fermi, όπου υφίσταται σε συνθήκες ισορροπίας δηλαδή σκότους.

Ενδεικτικά αναφέρεται ως σύγκριση των δύο τύπων ημιαγωγών της διόδου pn και της διόδου Schottky, ότι οι πρώτες λόγω απορρόφησης της ακτινοβολίας από την ενεργό περιοχή έχουν πολλές απώλειες, αλλά παρόλο την καλύτερη απόδοση των διόδων Schottky περιορίζονται σε σχετικά μικρό εμβαδόν. Η επαφή pn στηρίζεται σε κλασικό φαινόμενο ενώ η δίοδος Schottky σε κβαντομηχανικό.

Κατηγοριοποίηση φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως με το υλικό κατασκευής του ημιαγωγού. Τα εμπορικά πλαίσια κατασκευάζονται από πυρίτιο, και αποτελούν την πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών και διαχωρίζονται σε μονοκρυσταλλικά που επιτυγχάνουν υψηλότερες αποδόσεις αλλά με αυξημένο κόστος, λόγω της πολυπλοκότητας αλλά και των παραπάνω σταδίων κατασκευής

τους. Με μειωμένη απόδοση σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά είναι τα πολυκρυσταλλικά κελιά, ονομασία που οφείλεται στην κρυσταλλική δομή που διαθέτουν.

Στη δεύτερη γενιά, ή λεπτών υμενίων ανήκουν τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου, CdTe and CIGS. Τα φωτοβολταϊκά CdTe αποτελούν μια ανταγωνιστική λύση σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πυριτίου, καθώς χρησιμοποιούν πολύ λιγότερο υλικό από τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, καθώς το υπόστρωμα μπορεί να είναι κάποιο φθινό υλικό άρα έχουν και μειωμένο κόστος. Αλλά παρουσιάζουν μειωμένες αποδόσεις, καθώς και μια μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης τους στη διάρκεια της ζωής τους. Επίσης, το κάδμιο που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά CdTe είναι ένα τοξικό υλικό, αυξάνοντας το περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συγκεκριμένου τύπου κελιού και περιορίζοντας τις εφαρμογές του σε φωτοβολταϊκά συγκεντρωτικά πολλών ηλίων και ακατάλληλα για εσωτερικούς οικιακούς τουλάχιστον χώρους. Τα φωτοβολταϊκά τεχνολογίας CIGS, τα οποία είναι άμεσου διακένου επιτυγχάνουν πολύ υψηλές αποδόσεις, τις υψηλότερες για τη δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών, αλλά η διαδικασία παραγωγής τους αυξάνει το κόστος. Συναντώνται σε διαστημικές εφαρμογές, σε μικρής ισχύος ηλεκτρονικές συσκευές (αριθμομηχανές τσέπης) καθώς και σε συγκεντρωτικά συστήματα πολλών ηλίων (tandem cells εν σειρά συνδεδεμένων πολλαπλών διαφορετικών υλικών). Η δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών παρουσιάζει ελάχιστα ποσοστά της αγοράς των φωτοβολταϊκών ωστόσο τα επόμενα χρόνια με την ενδεχόμενη εξέλιξή τους ενδέχεται να αυξηθεί το ποσοστό αυτό. Καθώς και τις καινοτόμες λύσεις τοποθέτησής αυτών αφού η δυνατότητα παραγωγής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθιστά ικανή την τοποθέτησή τους σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές αλλά και σε πλήθος άλλων αντικειμένων.

Τέλος, η τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών αποτελείται από τα οργανικά κύτταρα, που ακόμα βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Κατασκευάζονται από μη τοξικά υλικά που υπάρχουν σε αφθονία στη φύση και η διαδικασία παραγωγής τους επιτρέπει την εύκολη επίτευξη οικονομικών κλίμακας και μεγάλου όγκου παραγωγής. Η δυνατότητα εκτύπωσής τους με συμβατικές μεθόδους εκτύπωσης και το μειωμένο βάρος καθιστούν ιδανική λύση για πληθώρα εφαρμογών (κινητές ηλεκτρονικές συσκευές, φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια και άλλα). Τα φωτοηλεκτροχημικά φωτοβολταϊκά (dye sensitized solar cells DSCs), όπου η διαδικασία χωρισμού των φορέων πραγματοποιείται από τηνμπογιά σε αντιστοιχία με το ηλεκτροστατικό πεδίο των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκό με την ένωση δύο ημιαγωγών ή μετάλλου-ημιαγωγού. Σαν μειονεκτήματα μεταξύ άλλων αποτελούν η μείωση της απόδοσής τους λόγω της UV ακτινοβολίας και η χρήση του υγρού ηλεκτρολύτη ενέχει τον κίνδυνο της στερεοποίησης του λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Αυτό ωστόσο το μειονέκτημα εξετάζεται για την περίπτωση που θα τοποθετηθούν σε εξωτερικό χώρο και για αυτό κρίνονται ακατάλληλα, λόγω του εύρους μεταβλητότητας των θερμοκρασιών στη διάρκεια του έτους.. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μοιάζει με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης των φυτών. Ωστόσο μπορούν να αξιοποιήσουν φως που έχει υποστεί διάχυση, προκειμένου να παράγουν ενέργεια και έχει αναφερθεί ότι η παραγωγή ενέργειας ξεπερνά την αντίστοιχη από συμβατικής τεχνολογίας κρυσταλλικού φωτοβολταϊκού με τα ίδια χαρακτηριστικά, για τις πρωινές ή τις απογευματινές ώρες.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση που μπορεί να υιοθετεί για χάρη της παρούσας διπλωματικής, πέραν της γνωστής ταξινόμησης τους σε γενιές φωτοβολταϊκό αναλόγως την εξέλιξη τους, είναι αναλόγως του χώρου τοποθέτησης. Δηλαδή εσωτερικά ή εξωτερικά ενός κτιρίου (στην Γη), ή για λόγους πληρότητας αξίζει να αναφερθεί και η τοποθέτηση εκτός Γης στο διάστημα. Όπου και σε αυτήν την κατηγορία φωτοβολταϊκό του διαστήματος όπως και για τα εσωτερικά φωτοβολταϊκό, ακολουθούνται διαφορετικές σχεδιαστικές επιλογές αλλά και κριτήρια (ελαχιστοποίηση βάρους αντιθέτως του

κόστους). Μπορεί να καταστεί συνεπώς αντιληπτό ότι όπως και στην περίπτωση του κλάδου του διαστήματος έτσι και στον υπό εξέταση κλάδο, στους εσωτερικούς χώρους δηλαδή, θα πρέπει να ακολουθηθούν διαφορετικές σχεδιαστικές επιλογές κατασκευής ή επιλογής των φωτοβολταϊκών, προκειμένου να υπάρξει ικανοποίηση των όποιων κριτηρίων θεσπιστούν (μεγιστοποίηση παραγόμενης ενέργειας, ελαχιστοποίηση κόστους και κάλυψη του μέγιστης δυνατής επιφάνειας τοποθέτησης, βελτιστοποίηση ευαισθησίας φωτοβολταϊκού βάση φάσματος εσωτερικής ακτινοβολίας). Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι ο όρος φωτοβολταϊκό ενσωματωμένων σε κτίρια (building integrated pv) συμπεριλαμβάνει και φωτοβολταϊκά που μπορούν να τοποθετηθούν στην πρόσοψη ή στην οροφή ενός κτιρίου με σκοπό την σκίαση του ή τον περιορισμό της διέλευσης του φωτός με φωτοβολταϊκά τεχνολογίας άμορφου πυριτίου που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί σε τέτοιες εφαρμογές. Σε άλλες περιπτώσεις εφαρμογών με τον όρο αυτό έχουν περιγραφεί τοποθετήσεις φωτοβολταϊκών στις ταράτσες ή στις σκεπές των σπιτιών, μια συνηθισμένη δηλαδή εφαρμογή τοποθέτησής τους. Για το λόγο αυτό ο όρος φωτοβολταϊκό εσωτερικών χώρων (in indoor photovoltaic) που έχει υιοθετηθεί στην παρούσα διπλωματική, κρίνεται πιο δόκιμος να χρησιμοποιηθεί αφού δεν μπορεί να γίνει η οποία παρανόηση αν είχε χρησιμοποιηθεί ο όρος φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια.

Καθίσταται σαφές ότι τα φωτοβολταϊκά ειδικά της τρίτης γενιάς και αναλόγως της εξέλιξης της οποίας θα τύχουν, θα ενσωματωθούν απρόσκοπτα στο κτήριο τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά. Οφείλουν άρα να αναπτυχθούν και τα κατάλληλα εργαλεία προγράμματα δηλαδή, μαθηματικά μοντέλα ακτινοβολίας και φωτοβολταϊκών και πρότυπα. Η ο τρόπος διεξαγωγής μελετών με την ήδη υπάρχουσα αποκτηθείσα γνώση, για την μελέτη σε φωτοβολταϊκό εσωτερικών χώρων. Σκοπός αυτής της διπλωματικής όπως αναφέρθηκε είναι η μελέτη τοποθέτησης συμβατικής τεχνολογίας εμπορικών φωτοβολταϊκό, σε εσωτερικούς χώρους με ήδη υπάρχοντα προγράμματα προσομοίωσης, αλλά σε συνδυασμό με μη συμβατικά αρχιτεκτονικά στοιχεία, αφού σπανίως εγκαθίσταται σε σχέση με ένα παράθυρο, δηλαδή τον φωτισμό του χώρου με την εγκατάσταση ενός φωτοσώληνα.

Φωτοβολταϊκή μετατροπή

Πορεία εξέλιξης

Μια πρώτη παρατήρηση ότι το φως μπορεί να δημιουργήσει ηλεκτρισμό αφού απορροφηθεί από κάποιο υλικό δόθηκε από τον Edmond Becquerel το 1839. Η απαρχή του πρώτου φωτοβολταϊκού κελιού πραγματοποιήθηκε από τον Charles Fritts το 1883, που οραματίστηκε τον ανταγωνισμό, της παραγωγής ηλεκτρισμού από το φως του Ήλιου, με την παραγωγή από τις λιγνιτικές μονάδες παραγωγής του Thomas Edison. Ανασταλτικός παράγοντας μεταξύ άλλων λόγων ήταν η χαμηλή απόδοση της τάξης του 1%, ωστόσο ήταν μια εξέλιξη για την εποχή εκείνη, αφού άλλες φωτοβολταϊκές διατάξεις που είχαν εφευρεθεί επιτύγχαναν ακόμη χαμηλότερες αποδόσεις. Η περαιτέρω εξέλιξη των φωτοβολταϊκών πραγματοποιήθηκε όπως συντελείται και σήμερα με την ταυτόχρονη εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής και την εφεύρεση του τρανζίστορ και των κοινών μεθόδων παραγωγής κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται στους δύο κλάδους.

Πολλοί επιστήμονες προσπάθησαν να εξηγήσουν τη σχέση μεταξύ της ύλης του φωτός και του ηλεκτρισμού. Καθοριστική ήταν και η συμβολή του Albert Einstein στην ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου το 1905, δηλαδή ότι η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρονίων.

Το 1941 ο Russell Ohl, που εργαζόταν στο εργαστήριο της Bell κατέθεσε πατέντα για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο όμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται σήμερα, δηλαδή μία δίοδο pn.

Η φωτοβολταϊκή μετατροπή λάμβανε ολοένα και μεγαλύτερες διαστάσεις από το 1960 και έπειτα με την χρήση της σε αυτόνομους σταθμούς παραγωγής, για χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένα ερευνητικά κέντρα, στο διάστημα όπως επίσης και σε οικίες. Το 1963 καταγράφηκε και η πρώτη εφαρμογή τους για την ηλεκτροδότηση ενός φάρου, με χρήση των πρώτων εμπορικών φωτοβολταϊκών.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε μια αύξηση της τοποθέτησης φωτοβολταϊκών σε πάρκα αλλά και διανεμημένα σε οικίες, κοντά δηλαδή στα φορτία, λόγω των επιδοτήσεων που δόθηκαν από πολλές χώρες ανά τον κόσμο ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες χώρες της Δύσης. Λόγω των δεσμεύσεων που έχουν δοθεί από τις χώρες αυτές που έχουν υπογράψει τις διάφορες δεσμεύσεις, όπως το πρωτόκολλο του Κιότο, για μείωση των εκπομπών των αερίων ρύπων και αύξηση της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ωστόσο, ενθαρρυντική προς αυτήν την κατεύθυνση υπήρξε και η μείωση των τιμών των φωτοβολταϊκών λόγω του μεγάλου όγκου παραγωγής φωτοβολταϊκών κυττάρων που σε μεγάλο ποσοστό πραγματοποιείται μαζικά με χαμηλό κόστος στην Κίνα. Επισημαίνεται ακόμη ότι τα επόμενα χρόνια η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών που πραγματοποιήθηκε ιδιαίτερα κοντά ή μέσα στον αστικό ιστό ενδέχεται να μεταμορφώσει το υπάρχον δίκτυο και μοντέλο κεντρικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να είναι δυνατή η αποκεντρωμένη παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας με τη συνδρομή και του κλάδου των τηλεπικοινωνιών για την ανάπτυξη των λεγόμενων έξυπνων δικτύων. Φαίνεται συνεπώς και ο εκδημοκρατισμός στην παραγωγή ενέργειας που μπορεί να πραγματοποιηθεί, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Αφρική, αφού δεν απαιτούνται υπέρογκα κεφάλαια και η ακριβή εγκατάσταση και λειτουργία δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας για απομακρυσμένη παραγωγή ενέργειας κεντρικά σε κάποιον σταθμό παραγωγής ηλεκτρισμού.

Αναμφισβήτητα το κόστος των φωτοβολταϊκών έχει μειωθεί αισθητά, ιδιαίτερα για το κρυσταλλικό φωτοβολταϊκό που αποτελεί και τον πιο διαδεδομένο τύπο κυττάρου. Αξίζει κανείς να μελετήσει τις μειώσεις στις τιμές που έχουν γίνει την τελευταία δεκαετία που μπορεί να αγγίζουν ακόμα και το 70%. Ωστόσο, στην ανάγνωση αυτών των ερευνών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων, δηλαδή η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Πρέπει να είναι σε θέση να καταλάβει κανείς για ποια γενιά φωτοβολταϊκών εξετάζεται (λεπτών υμενίων φθηνότερα των κρυσταλλικών), καθώς και το μέγεθος του έργου (οικιακά φωτοβολταϊκά σε στέγες, φωτοβολταϊκό πάρκο μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους >1MW). Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η χώρα στην οποία θα γίνει η εγκατάσταση ακόμα και η πόλη. Καθώς, ορισμένες χώρες παράγουν ή συναρμολογούν τα πλαίσια μειώνοντας έτσι το κόστος, ή της τεχνογνωσίας που έχουν αποκτήσει κατά το παρελθόν από παλαιότερα έργα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών και συνεπώς μείωση των υλικών χρήσης όπως τα στηρίγματα. Ακόμη, τυχόν επιχορηγήσεις από το κράτος, κρατίδιο (Ηνωμένες Πολιτείες ή Γερμανία) ή την περιφέρεια μειώνουν περαιτέρω το κόστος, ή το αυξημένο κόστος δανεισμού από την τράπεζα λόγω της καλύτερης οικονομίας ενός κράτους, μπορεί να αυξήσει και τον προϋπολογισμό του έργου. Τέλος, ποιος δεικτης χρησιμοποιείται για να περιγράψει το κόστος, το ανηγμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized Cost Of Electricity), οι τιμές στις οποίες πωλούνται τα φωτοβολταϊκά από τα εργοστάσια (gate or fob price), ή οι τιμές που πωλούνται στην αγορά και όποιες άλλες τεχνικές υιοθετούνται (κόστος μόνο των πλαισίων ή όλης της εγκατάστασης μαζί με αντιστροφέα, καλωδιώσεις, κατασκευών στήριξης). Καθίσταται σαφές ότι βάση των παραπάνω παραμέτρων το κόστος, ενδέχεται να διαφοροποιείται σημαντικά, όμως αναμφισβήτητα η εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής των φωτοβολταϊκών κελιών έχει μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής τους, τα τελευταία χρόνια, ενώ

και σε άλλους τομείς όπως η τυποποίηση ή αυτοματοποιημένη παραγωγή των πλαισίων στήριξης έχει μειώσει το συνολικό κόστος εγκατάστασης.

Η σύγχρονη κατάσταση της αγοράς των φωτοβολταϊκό, αποτελείται κυρίως από κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικά και σε μικρότερο ποσοστό μονοκρυσταλλικά κελιά και με ρυθμούς αύξησης τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου αλλά σε πολύ μικρό συνολικό βαθμό διεύδυσης στην αγορά περίπου στο 1%.

Ασφαλώς και μια πρόβλεψη της εξέλιξης της πορείας εξέλιξης των φωτοβολταϊκό, αρμόζει να πραγματοποιηθεί από κάποιον με υψηλή εξειδίκευση και γνώση του συγκεκριμένου τομέα, αλλά η απόκλιση από την πραγματικότητα ενδέχεται να είναι σημαντική ακόμη για κάποιον γνώστη, αφού οι όποιες προβλέψεις έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορα συστήματα ή επιστήμες (οικονομική) δεν είχαν την αναμενόμενη προβλεπόμενη έκβαση. Συνεπώς, εν τέλει ποιά γενιά φωτοβολταϊκών θα υιοθετηθεί σε ευρεία κλίμακα και ποιός θα είναι ο τύπος του φωτοβολταϊκού κυττάρου, θα φανεί στο μέλλον, και αυτές οι ιδιότητες, μπορούν να προσομοιωθούν προκειμένου να γίνει μια μελέτη παραγόμενης ενέργειας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που εξετάζεται.

Μηχανισμός λειτουργίας

Άκρως χρήσιμη, επιπλέον της θεωρίας, που εξετάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την κατανόηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιακής γεωμετρίας, είναι η κατανόηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου για την συγκεκριμένη μελέτη εφαρμογής των φωτοβολταϊκών. Το φως είναι γνωστό για τη δυική του φύση, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα και ως κύμα ύλης-φωτόνιο, με με διαφορετικές κβαντισμένες τιμές ενέργειας διατεταγμένες.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης εκτείνεται σε ένα εύρος από 1-5 eV, με διαφορετική ένταση ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος. Από την οποία για να είναι αξιοποιήσιμη απο τα φωτοβολταϊκό, ορίζεται το 1.4eV ως βέλτιστο ενεργειακό διάκενο. Δεδομένου του έμμεσου ενεργειακού διακένου των 1,14eV, των ημιαγωγών που κατασκευάζονται από πυρίτιο, διαπιστώνεται και ένας λόγος για τις μικρές αποδόσεις στην φωτοβολταϊκή μετατροπή των πλαισίων, κοντά στο 20%.

Η φωτοβολταϊκή μετατροπή συνίσταται στην απορρόφηση μέρους του ορατού φάσματος φωτός σε υλικά στερεάς κατάστασης στο ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια δεν είναι αξιοποιήσιμο ολο το φάσμα της, για αυτό και τα συνηθισμένα-εμπορικά φωτοβολταϊκά κελιά έχουν τις χαμηλές αποδόσεις που αναφέρθηκαν.

Παρακάτω θα αναλυθεί και η περίπτωση της απορρόφησης των φωτοβολταϊκών εσωτερικών χώρων.

IPV Φωτοβολταϊκό εσωτερικών χώρων

Η νομοθέτηση σχετικά με δόμηση κτιρίων μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης απαιτεί την μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας με διάφορες μεθόδους, όπως η καλύτερη μόνωση στο κτήριο, ο φυσικός φωτισμός ή η παραγωγή ενέργειας. Οι συνηθέστερες γεννήτριες ενέργειας αποτελούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, οι οικιακές ανεμογεννήτριες με μικρή ισχύ (σε ελάχιστα ποσοστά) για παραγωγή ηλεκτρικής και ο θερμοσίφωνα (υπάρχουν και άλλες διατάξεις όπως οι σωλήνες κενού, αντλίες θερμότητας) για την παραγωγή θερμικής ενέργειας δηλαδή ζεστού νερού χρήσης για θέρμανση και κλιματισμό.

Αναφορικά με την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων που είναι και το ζητούμενο στην παρούσα διπλωματική, η συνηθέστερη τοποθέτηση αποτελούσε την τοποθέτησή τους στην οροφή του κτιρίου ή

στην στέγη (κεραμίδια) με μειωμένη ικανότητα παραγωγής, λόγω ανεπαρκούς αερισμού ή εσφαλμένων μελετών ή συμβιβασμών που έπρεπε να επιτευχθούν. Ωστόσο, υπάρχει και η δυνατότητα τοποθέτησης εμπορικών φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου με ικανοποιητική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρά την μειωμένη απόδοση σε θέσεις και προσανατολισμούς που δεν θεωρούνται δυνατοί. Έχουν υπάρξει οι πρώτες τέτοιες περιπτώσεις στα τέλη της δεκαετίας του ενενήντα, όπου η τοποθέτηση αυτή, επιτυγχάνει αφενός άριστη αρχιτεκτονική ενσωμάτωση με το κτήριο αλλά και συμβολή στη σκίαση (καλοκαίρι) ή την μερική διείδυση φυσικός φωτισμός (χειμώνα), την μείωση της ηχορύπανσης, και στην μόνωση του κτιρίου. Αφετέρου στην αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ιδιαίτερα τις ώρες που τα (κρυσταλλικά) φωτοβολταϊκά της στέγης παρουσιάζουν μειωμένη παραγωγή. Δηλαδή, κατά την ανατολή ή τη δύση του Ήλιου καθώς και τις συννεφιασμένες ημέρες αφού τα φωτοβολταϊκά τεχνολογίας άμορφου πυριτίου εκμεταλλεύονται και τη διάχυτη ακτινοβολία.

Πολλαπλά τα οφέλη της συγκεκριμένης προσέγγισης τοποθέτησής τους, καθώς συμβάλλουν στην επιπλέον παραγωγή ενέργειας και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που κανονικά θα υπάρχει μειωμένη παραγωγή αλλά και στην μείωση φορτίων κλιματισμού ή φωτισμού, μειώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αντίκτυπο του κτιρίου. Αυτή η τεχνική ή ο καινοτόμος τρόπος τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελεί τα ενσωματωμένα σε κτίρια φωτοβολταϊκά.

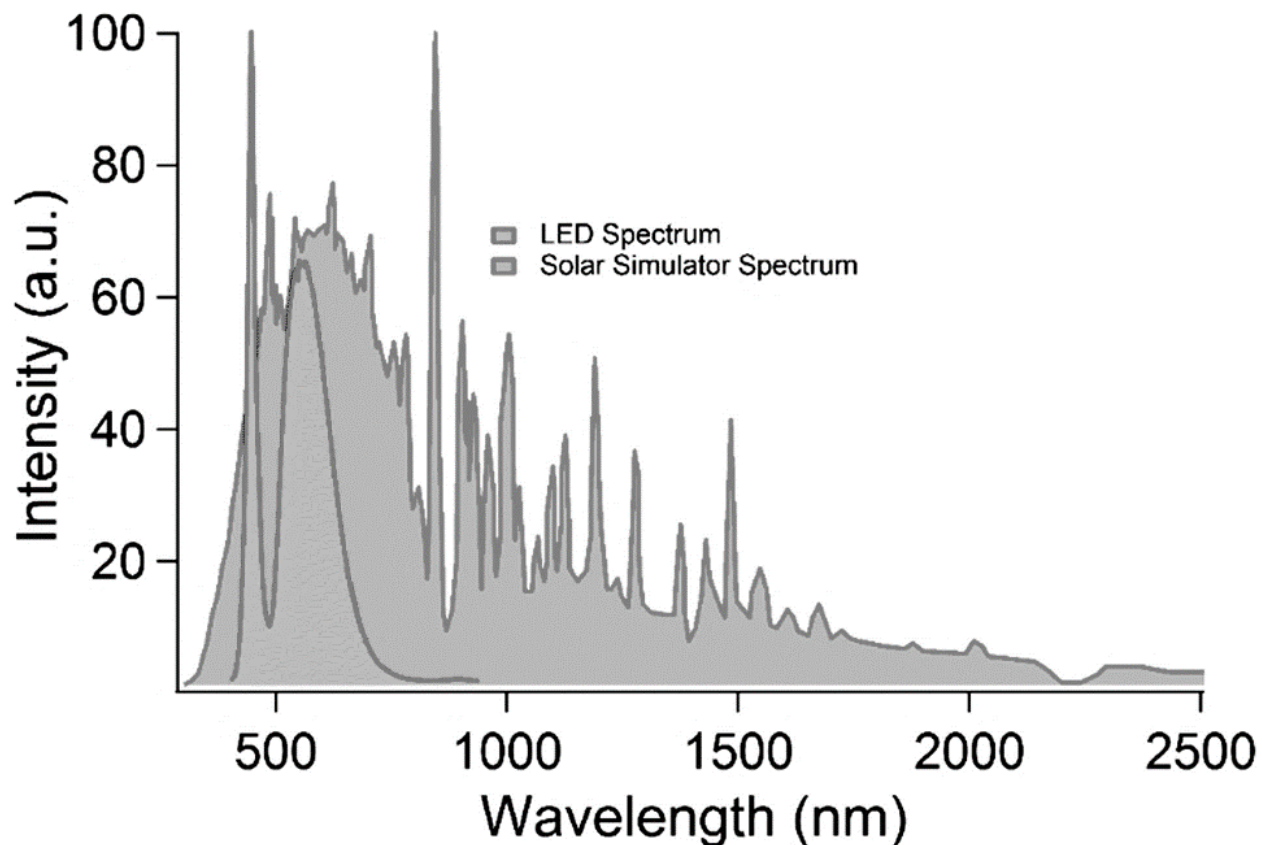
Ο όρος BIPV, δηλαδή φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτήρια, που συναντάται στη βιβλιογραφία, καμιά φορά μπορεί να χρησιμοποιείται εσφαλμένα καθώς μπορεί να αναφέρεται στην γνωστή περίπτωση τοποθέτησης οικιακού φωτοβολταϊκού στην οροφή του κτιρίου. Ωστόσο, αυτή είναι μια περίπτωση του όρου αφού περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε διαφανή παράθυρα σε περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η σκίαση ή περιορισμένη μεταφορά φωτός για φυσικό φωτισμό (αποκοπή υπέρυθρης και υπεριώδους ακτινοβολίας) καθώς και σε μεγάλους χώρους σε προσόψεις κτιρίων ή σε φεγγίτες (skylight, atria), στάσεις μέσω μαζικής μεταφοράς ή χώρων στάθμευσης αυτοκινήτων. Η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών ενσωματωμένων σε κτίρια ιδιαίτερα για προσόψεις και φεγγίτες δεν έχει υλοποιηθεί τόσο στην περίπτωση των κατοικιών όσο σε περιπτώσεις μεγάλων εμπορικών και λοιπών κτιρίων από την δεκαετία του 1990. Χωρίς να σημαίνει ότι δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση τους και σε οικίες υφιστάμενες και καινούργιες, αλλά η υιοθέτηση είναι μικρή λόγω υψηλού κόστους τοποθέτησης, ελλιπούς γνώσης της εφαρμογής αυτής, των εμπλεκόμενων φορέων, χρηστών, εργολάβων, μελετητικών γραφείων και εμπόρων πώλησης.

Ένας ορισμός που έχει δοθεί είναι ότι αποτελεί διπλό ρόλο ως δομικό στοιχείο και ως γεννήτρια ενέργειας. Συνεπώς αν αφαιρεθεί από το κτήριο παύουν και οι δύο λειτουργίες και συνεπώς πρέπει όσον αφορά την πρώτη λειτουργία να αντικατασταθεί από κάποιο υλικό που προσφέρει στο κτήριο τις ανάλογες ιδιότητες (μόνωση, σκίαση, ως υλικό).

Η αναφορά φωτοβολταϊκό εσωτερικών χώρων που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική αποτελεί μια υποκατηγορία των φωτοβολταϊκών ενσωματωμένων σε κτίρια, αφού και αυτά μπορούν να ενσωματωθούν, όπως παραδείγματος χάριν στο πάτωμα ή σε κάποια άλλη επιφάνεια (τραπέζι, τοίχος, οροφή), αλλά λειτουργούν σε εσωτερικούς χώρους και όχι σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Η μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί για τα φωτοβολταϊκά ενσωματωμένων σε κτίρια αφού αφορά εξωτερικούς χώρους, έχει γίνει με την ήδη αποκτηθείσα γνώση της μελέτης των φωτοβολταϊκών. Απλώς, εκτός της παραγωγής ενέργειας που παρουσιάζεται στην μελέτη ενός φωτοβολταϊκού πάρκου όπου εξετάζεται κατά κύριο λόγο η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας, σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να εξετάζεται επιπλέον, το θερμικό φορτίο προς το κτήριο

καθώς και ο αερισμός του φωτοβολταϊκό για την καλύτερη βελτίωση της απόδοσης τους και η αρχιτεκτονική ενσωμάτωση μεταξύ άλλων. Χωρίς ωστόσο να πραγματοποιείται πάντοτε μια τέτοια μελέτη τόσο σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί όσο και σε περιπτώσεις μελέτης έργων οικιακών φωτοβολταϊκών σε ταράτσες. Ενδεικτικά αναφέρεται η ελλιπής αρχιτεκτονική ενσωμάτωση, που είναι εύκολο να μελετηθεί χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένη γνώση από κάποιον αρχιτέκτονα.

Τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται σε περιπτώσεις κατασκευής νέων κτιρίων αφού μπορούν να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες και να μελετηθούν με σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία που δεν ήταν διαθέσιμα στο παρελθόν ή δεν υπήρχε η σημερινή υιοθέτηση από την αγορά αλλά και η γνώση ή τεχνογνωσία. Μπορεί η εγκατάσταση να πραγματοποιηθεί και σε υφιστάμενα κτίρια αλλά με μειωμένες δυνατότητες τοποθέτησης ή περαιτέρω αλλαγών που θα απαιτηθούν. Ωστόσο, όμως των μειωμένων αριθμών για ανέγερση νέων κτιρίων και την τάση για ανακαίνιση των υφιστάμενων θα πρέπει οι μελέτες να πραγματοποιούνται ενδελεχώς με σκοπό την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων.



Πηγή <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/tc/c6tc03344j/unauth#!divAbstract>

Βάση της ανάλυσης των προηγούμενων κεφαλαίων, η υπάρχουσα εμπορική τεχνολογία και δη ο τρόπος κατασκευής και βελτιστοποίησης των φωτοβολταϊκό, που είναι σχεδιασμένα για εξωτερικούς χώρους, δεν ικανοποιεί τις διαφορετικές απαιτήσεις των φωτοβολταϊκών για εσωτερικούς χώρους. Διότι το φάσμα του φωτός που υπάρχει σε εσωτερικούς χώρους είναι έως και 100 φορές κατεσταμένο ($1 \text{ mW/cm}^2 = 0.01 \text{ sun}$) από την ισχύ ενός ηλίου για τα φωτοβολταϊκά που τοποθετούνται στους εξωτερικούς χώρους. Επιπλέον, το φασματικό περιεχόμενο, λόγω της επιπλέον συμβολής των τεχνητών

πηγών φωτός, ή της ολίσθησης του χρώματος του φωτός (χρωματική απόκριση) εξαιτίας των υλικών των χρωμάτων, καθώς και των αντικειμένων, των επίπλων που τοποθετούνται στο δωμάτιο, μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό το φάσμα της ακτινοβολίας που τελικά θα δεχτεί ένα τέτοιο φωτοβολταϊκό. Στην περίπτωση των συμβατικών εφαρμογών τοποθέτησης η οποία μεταβολή συνίσταται στην περιοχή τοποθέτησης γεωγραφικό πλάτος και μήκος, αναλόγως του υψομέτρου, του περιβάλλοντα χώρου (albedo αν και η ανακλώμενη αυτή ακτινοβολία δεν συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο η άμεση δέσμη και για αυτό μοντελοποιείται μόνο με συντελεστή ανάκλασης), καθώς και των καιρικών συνθηκών. Συνεπώς, εκτός αυτών των παραμέτρων πρέπει να συνεκμηθεθούν και οι μεταβλητές που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου.

Αρα για να υπάρξει μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και να επιλεγεί ή να αναπτυχθεί εκ νέου ένας τύπος φωτοβολταϊκό θα πρέπει να μελετηθούν οι παραπάνω μεταβλητές. Σαν παράδειγμα αναφέρεται η ευαισθησία στα διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας του φωτοβολταϊκού, το καταλληλο ενεργειακό διάκενο, που θα μεγιστοποιεί την απορρόφηση ενέργειας από μια τεχνητή πηγή φωτός με στενό εύρος ακτινοβολίας ή και παρουσία φυσικού φωτισμού.

Πολλά υποσχόμενη τεχνολογία φωτοβολταϊκών, αποτελούν οι φωτοηλεκτροχημικές μοιρίες αφού τις καθιστούν κατάλληλες για τοποθέτηση σε εσωτερικούς χώρους και ενσωματωμένες σε κτήρια εξωτερικά δηλαδή, λόγω της μεγάλης παράλληλης αντίστασης που διαθέτουν και δεν απαιτείται τέλεια κατασκευαστική δομή όπως για παράδειγμα στα κρυσταλλικά κελιά καθώς και λόγω της απουσίας επικίνδυνων τοξικών υλικών και των δυνατοτήτων τοποθέτησής τους σε πληθώρα αντικειμένων ακόμα και με καμπυλότητες.

Θα είναι ικανή η τροφοδότηση ηλεκτρονικών διατάξεων και αισθητήρων χαμηλών απαιτήσεων σε ισχύ κλίμακας mW (Internet of Things -microgrid), που η τοποθέτηση κυκλώματος τροφοδοσίας θα ήταν απαγορευτική. Αναπτύσσεται συνεπώς ένας νέος κλάδος με την ονομασία micro energy harvesting, η συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον. Από δονήσεις, ακτινοβολία ασύρματων ηλεκτρονικών συσκευών, θερμική ισχύ με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, Όμως το φως λόγω της προβλεψιμότητας και διαθεσιμότητας που παρέχεται, αλλά και της ανεπτυγμένης εμπορικής τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών, κρίνεται σκόπιμη η ανάπτυξη κατάλληλων φωτοβολταϊκών κελιών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και την επίτευξη μεγαλύτερων αποδόσεων. Ακόμη λόγω του στενού εύρους φάσματος των λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται (led και φθορισμού) είναι δυνατόν με κατάλληλες σχεδιαστικές επιλογές ή επιλογή του κατάλληλου τύπου κελιού να επιτευχθεί και αυξημένη απόδοση μετατροπής της εσωτερικής ακτινοβολίας. Έχει μελετηθεί η παραγωγή από φωτοβολταϊκό δεύτερης γενιάς προορισμένα για χρήση σε διάταξης συγκέντρωσης ακτινοβολίας πολλών ηλίων με πολύ καλά αποτελέσματα (15.8% μετρηθείσα απόδοση για κελί GaInP, και 10.9% για δύο CdTe κελιά, ενώ, θεωρητική απόδοση 64% για πηγή $E_g = 1.9$ eV). Συνήθως οι αποδόσεις που προκύπτουν στη βιβλιογραφία είναι μικρότερες του 10% ωστόσο δεν έχει τοποθετηθεί ή μελετηθεί φωτοβολταϊκό σχεδιασμένο για αυτήν την εφαρμογή, προκειμένου να επιτύχει και υψηλότερες αποδόσεις. Έχει ειπωθεί ότι είναι δυνατή η παραγωγή κελιού με κατάλληλες σχεδιαστικές επιλογές, απόδοσης μεγαλύτερης από 10% για ισχύς εσωτερικής ακτινοβολίας της τάξης του 0,1 mW/cm².

Πρέπει συνεπώς να αναπτυχθεί και το κατάλληλο πλαίσιο, δηλαδή η ύπαρξη προτύπων φασμάτων (εσωτερικής) ηλιακής ακτινοβολίας και εντάσεων (συνήθως 0,1-10 mW/cm²) και μεθοδολογιών. Προκειμένου να μην οδηγείται ο σχεδιαστής τους ή ο ερευνητής σε σχεδιαστικά λάθη και σε αποτυχία του σχεδιασμένου κελιού. Στην παρούσα χρονική στιγμή καθώς είναι δύσκολη η μοντελοποίηση ενός τέτοιου κελιού δεν μελετήθηκε στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής.

Ωφέλεια

Η συγκεκριμένη αγορά των φωτοβολταϊκών ενσωματωμένων σε κτίρια αποτελεί μια καινοτόμο τεχνική αυτών και δεν έχει υιοθετηθεί από την αγορά σε μεγάλη κλίμακα. Με αυξανόμενα όμως ποσοστά εμφάνισής τα τελευταία χρόνια. Στο σύγχρονο πυκνοκατοικημένο αστικό περιβάλλον όπου οι εκτάσεις Γης είναι περιορισμένες και πολύ συχνά και αυξημένο το κόστος αγοράς της, η ωφέλεια από την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε στρατηγικά σημεία ενσωματωμένα στον κτιριακό ιστό είναι εμφανής. Αφού η τοποθέτησή γίνεται κατά αυτόν τον τρόπο ώστε να συντελείται διπλός ρόλος. Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από επιφάνειες καθώς και στην χρησιμότητα ως κατασκευαστικό στοιχείο και συνεπώς μειωμένες απαιτήσεις σε υλικά ή κάλυψη κάποιας λειτουργίας, δηλαδή σκίαση, φυσικός φωτισμός, αερισμός, μείωση της ηχορύπανσης.

Βεβαίως, τα φωτοβολταϊκά όπως και κάθε άλλη τεχνολογία δεν υπάρχει χωρίς κάποιες αρνητικές επιπτώσεις. Μια κριτική ήταν ότι δεσμεύουν μεγάλες εκτάσεις που μένουν αναξιοποίητες, ενώ θα μπορούσαν να καλλιεργηθούν με σκοπό να αντιμετωπίσουν και το μελλοντικό πρόβλημα του επισιτισμού του αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού. Το πρόβλημα θα ήταν ιδιαίτερα οξύμωμο σε περίπτωση που η σημερινή τεχνολογία με 20% απόδοση χρησιμοποιούνταν σε μεγάλη κλίμακα για κάλυψη ενεργειακών αναγκών έναντι ορυκτών καυσίμων. Μια λύση είναι η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε μεγάλους όγκους νερού όπως λίμνες, ή τεχνητά φράγματα συμβάλλοντας έτσι στην μείωση της εξάτμισης του νερού ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες.

Ωστόσο, δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας καταναλίσκεται στον κτιριακό τομέα και το μέλλον εξέλιξης του ηλεκτρικού δικτύου φαίνεται να είναι αποκεντρωμένο και με τοπική παραγωγή και έλεγχο του μικροδικτύου, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τρίτης γενιάς των φωτοβολταϊκών κρίνεται συμφέρουσα η μελέτη τοποθέτησης και σε εσωτερικούς χώρους. Όπου με κατάλληλη μελέτη από το σχεδιασμό ενός κτιρίου θα επιτευχθεί και μεγαλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας τόσο για παραγωγή ενέργειας όσο και για φυσικό φωτισμό αλλά και αρχιτεκτονική απρόσκοπτη ενσωμάτωση χωρίς να αλλοιώνεται η όψη του κτιρίου, του χώρου ή το οπτικό αισθητικό αποτέλεσμα στον χρήστη. Απαραίτητη προϋπόθεση συνεπώς αποτελεί ο σχεδιασμός ενός κτιρίου να πραγματοποιείται με ορίζοντα δεκαετίας ή και περισσότερων ετών προκειμένου να μπορούν να καλυφθούν μελλοντικές απαιτήσεις. Ωστόσο, για την παρούσα τεχνική όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχει ακόμα η κατάλληλη γνώση για να διεξαχθεί μια τέτοια μελέτη.

Η τάση που φαίνεται να ακολουθηθεί από τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε εσωτερικούς χώρους, αποτελεί η τροφοδότηση ηλεκτρονικών κυρίως φορτίων, ή αισθητήρων, με μικρές απαιτήσεις ισχύος, όπως έχει γίνει και στο πρόσφατο παρελθόν με κάποιες συσκευές (υπολογιστές τσέπης). Αφού το φάσμα της εσωτερικής ακτινοβολίας που θα προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά είναι κατά πολλές φορές μειωμένο αλλά και οι μικρές αποδόσεις που επιτυγχάνουν σήμερα, τα υποψήφια φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου ή της τρίτης γενιάς, δεν θα είναι εφικτή η τροφοδότηση φορτίων υψηλής ισχύος, όπως για παράδειγμα η τροφοδότηση οικίας από φωτοβολταϊκό τοποθετημένα στην στέγη του σπιτιού. Ωστόσο με την αύξηση της απόδοσής τους, των χαρακτηριστικών τους και την μείωση του κόστους που ενδέχεται να πραγματοποιηθεί τα επόμενα χρόνια με την εξέλιξη τους ή την δημιουργία φωτοβολταϊκό κατάλληλου για αυτήν την εφαρμογή ενδέχεται η παραγωγή ενέργειας να είναι αυξημένη.

Επισημαίνεται ότι στην παρούσα μελέτη το φωτοβολταϊκό τοποθετήθηκε στο δάπεδο, αλλά μια μείωση του κόστους ή μια μελέτη μεγιστοποίησης παραγόμενης ενέργειας βάση του σημείου τοποθέτησης εισάγει διαφορετικές επιλογές παραμέτρων προσομοίωσης. Μια σημαντική παράμετρος

προσομοίωσης και εξαγωγής αποτελεσμάτων, είναι αυτή του ύψους από το δάπεδο που θα επιλεγεί. Αναφέρεται ως *workplane height* ή το ύψος της επιφάνειας εργασίας. Συνήθως επιλέγεται ίσο με το τυπικό ύψος ενός γραφείου στις περισσότερες μελέτες δηλαδή 0.8 μέτρα ή για φωτισμό δρόμων για παράδειγμα με το ύψος από τον δρόμο που βρίσκονται οι οφθαλμοί ενός τυπικού (ως προς ποσοστό κυκλοφορίας τύπων αυτοκινήτων, ένας οδηγός φορτηγού είναι σε πιο υψηλή θέση) ίσο με 0.4 μέτρα.

Για το λόγο αυτό ο μελετητής θα πρέπει να επιλέξει και την κατάλληλο ύψος για να εξαχθούν και τα ανάλογα αποτελέσματα, της προς μελέτης τοποθέτησης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Επιλέγεται τιμή ίση με μηδέν μέτρα, στην επιφάνεια δηλαδή του δαπέδου (στο πρόγραμμα HOLIDIGIM ωστόσο δεν ήταν δυνατή η επιλογή του ύψους τοποθέτησης για το λόγο αυτό το ύψος του δωματίου θεωρήθηκε τρία μέτρα). Θα μπορούσε να επιλεγεί, αναλόγως την τεχνική τοποθέτησης, και άλλη τιμή ή προσανατολισμός της επιφάνειας των αποτελεσμάτων όπως για παράδειγμα σε έναν τοίχο ή στην επιφάνεια ανάκλασης του φωτός από μια διάταξη φυσικός φωτισμός στην οροφή του κτιρίου (προσανατολισμός επιφάνειας αποτελεσμάτων 180°). Εάν επιλεγούν πολλές επιφάνειες στον ίδιο χώρο θα έχουμε και αύξηση της υπολογιστικής ισχύος αρά και του χρόνου που απαιτείται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, αφού η συγκεκριμένη διάταξη (φωτοσωλήνας) που επιλέχθηκε διανέμει το περισσότερο φως προς το δάπεδο δεν επιλέχθηκε άλλη επιφάνεια. Επίσης, η διάταξη αυτή κατανέμει το φως προς τα κάτω και όχι πλάγια ($\text{average cosine} > 0,6$ άρα οι ανακλάσεις στους τοίχους είναι ελάχιστες). Για άλλο επιλεγόμενο τύπο θα έπρεπε να επιλεγεί η επιφάνεια που δέχεται την περισσότερη ακτινοβολία.

Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού

Η μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου απαιτεί γνώση των μεταβλητών που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας (δηλαδή ισχύς, τάση και ρεύμα έξοδος), οι οποίες είναι η θερμοκρασία και η ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας (*irradiance* πυκνότητα ισχύος προσπίπτουσας δέσμης ακτινοβολίας - είσοδος). Επίσης, κάποιες μεταβλητές θεωρούνται σταθερές αφού δεν μπορούν να μελετηθούν επειδή είναι άγνωστες λόγω μη αποκάλυψης από τους κατασκευαστές ή διαφέρουν λόγω των κατασκευαστικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται ή λόγω της ποιότητας του κάθε παραγόμενου ημιαγωγού και για αυτό συγκεντρώνονται σε μια σταθερά. Η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης είναι μια μη γραμμική εξίσωση δυσχεραίνοντας συνεπώς την μελέτη και την ακρίβεια του παραγόμενου μοντέλου ακόμη περισσότερο.

Καθώς οι κατασκευαστές των φωτοβολταϊκών στοιχείων δεν παρέχουν επαρκή δεδομένα σχετικά με τις κατασκευαστικές ιδιότητες ή τα χαρακτηριστικά αυτών, είναι δύσκολη η δημιουργία ενός ακριβούς μοντέλου, που να προσομοιάζει με πιστότητα την πραγματική παραγωγή. Επίσης, η ύπαρξη πολλών διαφορετικών κατασκευαστών δυσχεραίνει περαιτέρω την ανάπτυξη. Για αυτό το λόγο και υιοθετούνται διάφορες παραδοχές προκειμένου να εξαχθεί ένα απλοποιημένο και όσο το δυνατόν πιο ακριβές μοντέλο. Για παράδειγμα αναφέρεται ότι μπορεί να θεωρηθεί η αντίσταση σειράς αμελητέα και η παράλληλη αντίσταση άπειρη, υποθέσεις που πολύ συχνά εφαρμόζονται και στην θεωρία της ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Μια ακόμη άγνωστη παράμετρος είναι η σκίαση αφού στις τυπικές μελέτες για φωτοβολταϊκά τοποθετημένα σε εξωτερικούς χώρους, η σκίαση επέρχονταν από σταθερά στοιχεία κτίρια, αντικείμενα δέντρα. Με την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε τοίχους ή στο δάπεδο η ενδεχόμενη σκίαση αναλόγως και του χώρου που θα τοποθετηθεί είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί εξαιτίας της στοχαστικής φύσης των σκιάσεων (κίνηση ανθρώπων). Ακόμη όπως έχει αναφερθεί είναι σημαντικός ο αριθμός των διαθέσιμων ακτινοβολιών λόγω της ολίσθησης του φάσματός της εσωτερικής ακτινοβολίας λόγω των

διαθέσιμων υλικών των δωματίων με σκοπό να εξαχθεί μια πρότυπη ακτινοβολία τόσο σε πυκνότητα φάσματος αλλά και σε ισχύ. Αξίζει να σημειωθεί και η δυνατότητα προσομοίωσης της γήρανσης του φωτοβολταϊκού στην παραγωγή ενέργειας στη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του φωτοβολταϊκού αφού ο φωτισμός με χρήση διάταξεων φυσικού φωτισμού και ειδικά του φωτοσωλήνα που είναι και η εξεταζόμενη διάταξη ενδέχεται να αύξησει την παραγωγή λόγω αποκοπής της μη αξιοποιήσιμης ή καταστρεπτικής ακτινοβολίας (υπεριώδης) για το κελί.

Πολλές άρα οι άγνωστοι παράμετροι που πρέπει να μοντελοποιηθούν για να εξαχθεί ένα συνολικό συμπέρασμα, σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές όπως για παράδειγμα να μην εξεταστεί να αμεληθεί το ψυκτικό φορτίο και θεωρηθεί σταθερή θερμοκρασία χώρου ή η ψύξη του φωτοβολταϊκού με άλλες μεθόδους όπως για παράδειγμα η παροχή ζεστού νερού χρήσης αντί ενός θερμοσίφωνα. Για αυτήν την περίπτωση υπάρχει εμπορική εφαρμογή αλλά με απουσία αξιόπιστων δεδομένων μετρήσεων ειδικά για περιορισμένο φάσμα φωτός όπως για εσωτερικούς χώρους.

Τέλος, η επιλογή της γενιάς του φωτοβολταϊκού που θα μοντελοποιηθεί δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αφού κάθε γενία φωτοβολταϊκών αλλά και κάθε διαφορετικός τύπος λόγω διαφορετικών υλικών ημιαγωγού απαιτεί και το κατάλληλο διαφορετικό μοντέλο σε κάθε περίπτωση.

Προσομοίωση

Προγράμματα Φυσικού Φωτισμού

Μια κατηγοριοποίηση που μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί αποτελεί εάν το λογισμικό είναι ανοιχτού κώδικα ή εμπορικό και συνεπώς κλειστού κώδικα, εάν και υπάρχουν και δωρεάν προγράμματα κλειστού κώδικα. Στην τελευταία περίπτωση ο χρήστης περιορίζεται από την διεπαφή που του προσφέρει το πρόγραμμα (εάν δεν παρέχεται γραμμή εντολών ή δυνατότητα συγγραφής κώδικα σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού με διασύνδεση με το πρόγραμμα), χωρίς δυνατότητα επέμβασης ή προσθηκών στον τρόπο λειτουργίας. Συνεπώς μπορεί να δυσχεραίνει τη διεξαγωγή της μελέτης ή και να την καθιστά αδύνατη καθώς οι ενέργειες που θα θέλει να εκτελέσει ο χρήστης ή δεν θα μπορούν να πραγματοποιηθούν ή θα απαιτεί αρκετό χρόνο η ρύθμιση και η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Η απουσία απλών προγραμμάτων στη χρήση, ιδιαίτερα τα παλιότερα χρόνια αλλά και οι εμπειρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν ή ακόμα και απλές λογιστικές μέθοδοι με εξαγωγή αποτελεσμάτων από πίνακες ή άλλες τεχνικές δεν οδήγησαν στην ενσωμάτωση λύσεων για φυσικό φωτισμό των χώρων. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα όπου η ταχύτατη ανοικοδόμηση δεν προσέφερε επαρκή χρόνο για μελέτη αλλά και ανάλυση των κτιρίων που χτίστηκαν προκειμένου να βελτιωθούν οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, και να εξαπλωθεί η χρήση λύσεων φυσικού φωτισμού. Διαπιστώνεται επίσης και από την απουσία συμμετοχής της χώρας, στον οργανισμό International Energy Agency που ασχολείται με τη έρευνα αλλά και την προώθηση της γνώσης γύρω από το συγκεκριμένο κλάδο, και έχει προσφέρει σημαντικά στην παραγωγή και τη διάδοση της γνώσης σχετικά με τον φυσικό φωτισμό, με τα tasks που στοχεύουν σε συγκεκριμένους τομείς του.

Τα εμπορικά προγράμματα, συνεπώς χρησιμοποιούνται κυρίως από επαγγελματίες λόγω της ευκολίας εκμάθησης (σεμινάρια, βιβλία, εκμάθηση από τις σπουδές τριτοβάθμιας εκπαίδευσης), και παραγωγής

συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, σε αντίθεση με έναν ερευνητή που επιθυμεί να μελετήσει ιδιαίτερες λύσεις ή απαιτεί ακρίβεια υπολογισμών. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται πολύ συχνά, το radiance με αυξημένες απαιτήσεις εκμάθησης αλλά και αυξημένες δυνατότητες υπολογισμών και ευελιξίας στον χρήστη. Αναφέρεται ότι έχουν αναπτυχθεί από εθελοντές και έχουν διατεθεί ελεύθερα περισσότερα από πενήντα εργαλεία, βοηθητικά προγράμματα που μπορούν να συνεργαστούν με αυτό. Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα αλληλεπίδρασης ή ενσωμάτωσης σε εμπορικά προγράμματα με το radiance αυξάνοντας έτσι την ευελιξία στην μελέτη του χρήστη που είναι εξοικειωμένος και με τις δύο κατηγορίες προγραμμάτων.

Η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος που επιτυγχάνεται με την χρήση του radiance, μπορεί να είναι καλύτερη από κάποια όμοια προγράμματα, αλλά πρέπει να έχουν ρυθμιστεί σωστά όλες οι παράμετροι λειτουργίας και μοντελοποίησης. Γεγονός που δυσχεραίνει την χρήση του για μελέτη κτιρίων από επαγγελματίες του χώρου αφού απαιτείται εξοικείωση που επιτυγχάνεται με την επισταμένη ενασχόληση με αυτό, καθώς και πολύ καλή επιλογή των παραμέτρων, εμπειρική γνώση αναλόγως τι είδους λύση φυσικού φωτισμού επιλέγεται είτε του προς μελέτη χώρου είτε πειραματική δοκιμή (trial and error). Για αυτό συναντάται κυρίως η χρήση του σε ερευνητικά προγράμματα, χωρίς ωστόσο να είναι δεσμευτικό ή να έχει χρησιμοποιηθεί και απο κάποια μελετητικά γραφεία για μεγάλα κτίρια ή σύνθετες γεωμετρικές συστημάτων φυσικού φωτισμού. Αντίθετα με επαρκή γνώση και εμπειρία του ερευνητή κάποιο άλλο πρόγραμμα μπορεί να επιφέρει εξίσου καλά αποτελέσματα που είναι πιο απλό στην χρήση. Όπως το HOLIGILM που με πολύ απλό τρόπο χρήσης μπορεί ο ερευνητής ή ο μελετητής να έχει άμεσα αποτελέσματα για ένα δεδομένο σενάριο δωματίου φωτιζόμενο με την χρήση ενός φωτοσωλήνα, εις βάρος ωστόσο της ακριβείας των αποτελεσμάτων ή της ευελιξίας που προσφέρει.

Πολλά προγράμματα εμπορικά και μη μπορεί να χρησιμοποιούν ως μηχανή φωτορεαλισμού το radiance ή μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Όμως, οι προσθήκες, αφαιρέσεις-απλοποιήσεις προς χάριν της ταχύτητας υπολογισμών, ή αλλαγές που έχουν γίνει από τους δημιουργούς του προγράμματος, απαιτεί και την εξακρίβωση των αποτελεσμάτων που παράγουν. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν επιλέγεται ένα πρόγραμμα, όσον αφορά την επαλήθευση της καλής λειτουργίας του, δεδομένου ότι αλλοίωση των αποτελεσμάτων θα επιφέρει λανθασμένα συμπεράσματα.

Στον πίνακα παρατίθενται και προγράμματα με τα οποία έχουν γίνει μελέτες σε δημοσιεύσεις κατά το παρελθόν και έχουν σταματήσει να αναπτύσσονται ή δεν ήταν διαθέσιμα για εγκατάσταση προκειμένου να μελετηθούν. Ωστόσο, σαν πρώτη μελέτη ανάλυσης τοποθέτησης εσωτερικών φωτοβολταϊκών, το πρόγραμμα HOLIGILM παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα γρήγορα, και με ακρίβεια. Όστε να μπορέσει να αναλυθεί ο ποιοτικός χαρακτήρας της έντασης φωτισμού και να δοθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα προκειμένου να μελετηθεί ενδελεχώς και με περισσότερη ακρίβεια αυτή η τεχνική σε μελλοντική μελέτη.

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται οτι μοντελοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μοντέλα κλίμακας (μακέτες) σε συνδυασμό με τη δημιουργία φυσικού μοντέλου ουρανού με τεχνητούς λαμπτήρες ή με φυσικά μοντέλα πλήρους κλίμακας δωματίων δηλαδή τοποθετημένα σε εξωτερικούς χώρους. Τα πρώτα να χρησιμοποιούνται από επαγγελματίες αλλά με αυξημένο κόστος και πιθανές μεγάλες αποκλίσεις από μετρούμενες ή τιμές προσομοιώσεις σε διάφορους δείκτες αν δεν γίνει προσεκτική επιλογή των υλικών. Θα παρουσιάζουν συνεπώς πολύ υψηλούς δείκτες ανακλαστικότητας με αποτέλεσμα να υπερεκτιμούν το ποσοστό του φυσικού φωτισμού. Αντίθετα, η άλλη κατηγορία

χρησιμοποιείται κυρίως από εργαστήρια ή γενικά φορείς που διεξάγουν έρευνα σχετικά με φυσικό φωτισμό και στην τοποθέτηση συστημάτων φυσικού φωτισμού που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Απαιτούνται επίσης και τα κατάλληλα όργανα προκειμένου να ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις αυξάνοντας και το κόστος σε σχέση και με ένα απλό μοντέλο κλίμακας σε μεγάλο βαθμό ή με προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Με την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τα ηλεκτρονικά προγράμματα προσομοίωσης και μετρήσεων από τα αντίστοιχα φυσικά μοντέλα επαληθεύεται και η καλή λειτουργία και το σφάλμα υπολογισμών των διαφόρων προγραμμάτων. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται κυρίως υπολογιστικά προγράμματα, αφού επιπλέον παρέχουν ακρίβεια ακόμα και για δύσκολες γεωμετρίες ή υλικά αλλά παρέχουν γρήγορα σχετικά και με μεγάλη ακρίβεια αποτελέσματα με μικρό κόστος.

Συνοπτική παρουσίαση προγραμμάτων

Πρόγραμμα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Προσομοίωση πολύπλοκων διατάξεων φυσικός φωτισμός	Άδεια χρήσης
Radiance	Ποικιλία υλικών και ουρανών, ευελιξία στον χρήστη και ευκολία παραμετρικών υπολογισμών με scripts	Μεγάλη καμπύλη μάθησης, λανθασμένη επιλογή παραμέτρων	Αναλόγως και της μεθόδου προσομοίωσης και παραμέτρων, για φωτοσωλήνα απαιτείται ιδιαίτερος χειρισμός	Ανοιχτού κώδικα
Revit (ECOTECT)	Parametric analysis rhino	Απόκλιση αποτελεσμάτων λόγω αλγορίθμου προσομοίωσης ECOTECT	Δεν είναι δυνατή, μη εξακριβωμένη στο Revit (χρησιμοποιεί ray tracing)	Εμπορικό
HOLIGILM	Ευκολία στην χρήση	Συγκεκριμένα μοντέλα ουρανών στη δωρεάν έκδοση και όχι εισαγωγή πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων	Μόνο για φωτοσωλήνες	Δωρεάν, αλγόριθμος προσομοίωσης δημοσιευμένος
EnergyPlus	Υπολογισμοί θερμικών φορτίων, ευρεία χρήση από	Πεπερασμένα στοιχεία, κοινές ιδιότητες επιφανειών	Δεν είναι δυνατή	Δωρεάν, άλλος τρόπος προσομοίωσης-radiosity

	ερευνητική κοινότητα-εξακρίβωση			
Daysim	Διασύνδεση με άλλα προγράμματα	Απαιτούνται εμπορικά προγράμματα, και γνώση δύο ή και τριών, διάδοση σφαλμάτων	Δεν έχει χρησιμοποιηθεί για φωτισωλήνες	Δωρεάν, αλλά απαιτούνται και εμπορικά προγράμματα
Relux, DIALUX	Κυρίως για μελέτες τεχνητού φωτισμού, γρ ήγορα αποτελέσματα	Επαληθευσίμοτα, ακρίβεια	Μόνο για απλές μελέτες φυσικού φωτισμού	Δωρεάν, κλειστού κώδικα
Hemera, CODYRUN	Δεν αναπτύσσονται πλέον ή δεν διατίθενται			

Το λογισμικό Radiance, αναπτύχθηκε με την αρωγή του Αμερικανικού υπουργείου ενέργειας καθώς και την Ελβετική κυβέρνηση, και το μεγαλύτερο μέρος έχει γραφτεί από τον Greg Ward Larson. Αποτελεί την καλύτερη πιθανώς επιλογή αφού προσφέρει πολλές δυνατότητες και ελευθερίες στον τρόπο εργασίας και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αφού παρέχει γραμμή εντολών και όχι περιβάλλον εργασίας αυξάνοντας ωστόσο τον χρόνο εκμάθησης και εξοικείωσης με αυτό. Η πληθώρα επιλογών παραμέτρων αποτελεί και το καίριο στοιχείο, για ορθή επιλογή των κατάλληλων τιμών τους, για μια επιτυχή προσομοίωση καθώς η λανθασμένη επιλογή τιμών μπορεί να παράγει λανθασμένα αποτελέσματα. Καθώς αποτελεί λογισμικό ανοιχτού κώδικα και χρήσης, ο χρήστης δεν δεσμεύεται από εμπορικά προγράμματα όσον αφορά τη λειτουργικότητα και τον τρόπο λειτουργίας. Ακόμη υπάρχει και η δυνατότητα παροχής αποτελεσμάτων σε άλλα προγράμματα, καθιστώντας έτσι εύκολη την μεταφορά πληροφορίας με τα εμπορικά προγράμματα. Έχουν αναπτυχθεί και τα κατάλληλα εργαλεία, από μέλη της κοινότητάς του, που επιτρέπουν αυτήν την διασύνδεση μεταξύ των προγραμμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μηχανή προσομοίωσης που χρησιμοποιείται, το μαθηματικό μοντέλο δηλαδή, αποτελεί πυρήνα λειτουργίας σε πολλά εμπορικά και μη προγράμματα. Το σημαντικότερο γνώρισμα αποτελεί η επαληθευσιμότητα και η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων προσομοίωσης που εξάγει, ακόμη και για σύνθετες γεωμετρικές φυσικού φωτισμού, καθώς έχει επαληθευτεί από επαγγελματίες στον χώρο του φωτισμού αλλά και από ερευνητές με μελέτες σε φυσικής κλίμακας δωμάτια.

Για απλούς υπολογισμούς DF, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και πιο απλά προγράμματα. Για σύνθετες γεωμετρικές υλικών ή ιδιοτήτων καθώς και αποτελέσματα τα πιο εξειδικευμένα προγράμματα είναι η μόνη επιλογή του μελετητή.

Τρόπος λειτουργίας προγραμμάτων προσομοίωσης

Η πιο απλή μέθοδος προσομοίωσης αποτελεί η split-flux method, που χρησιμοποιήθηκε στο ECOTECT και ενέχει σημαντικά σφάλματα προσομοίωσης Ωστόσο το πρόγραμμα αυτό έχει αντικατασταθεί από

το Revit που χρησιμοποιείται καλύτερες μέθοδοι προσομοίωσης. Τα προγράμματα που εξάγουν τα αποτελέσματα σε μορφή εικόνων (φωτορεαλισμός) βασίζονται τη λειτουργία τους σε δύο μεθόδους.

Με την μέθοδο radiosity μπορεί να μοντελοποιηθεί η επίδραση της θερμικής και ηλιακής ακτινοβολίας στον χώρο. Βασίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία θεωρώντας τα υλικά ως σημειακά μέλαν σώματα (με ομογενείς οπτικές ιδιότητες-ο συντελεστής ανάκλασης μιας τέλειας λαμπερτιανής επιφάνειας, ομογενείς φωτομετρικές ιδιότητες) και τα τελικά αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα της τοποθέτησης του παρατηρητή. Μπορεί να πραγματοποιηθεί και ενεργειακή μελέτη και το ευρέως χρησιμοποιούμενο και επαληθευμένο πρόγραμμα είναι το EnergyPLUS.

Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος από τα περισσότερα προς εξέταση προγράμματα είναι η μέθοδος ray-tracing για μελέτες φυσικού φωτισμού. Είναι δυνατή η μοντελοποίηση όλων των οπτικών φαινομένων, τα οποία έχουν εκφραστεί με μαθηματικές εξισώσεις. Μοντελοποιούνται ακόμη και οι πιο προηγμένες γεωμετρικές υλικών (laser cut panels), και μη ομογενής επιφάνειες υλικών. Οι ακτίνες αναλόγως από που προέρχονται από την πηγή προς τον παρατηρητή ή αντίθετα δημιουργούν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις λειτουργίας των προγραμμάτων. Η ευθεία μέθοδος που ακολουθείται και η φυσική πορεία διάδοσης του φωτός που μοντελοποιούνται ακτίνες από την πηγή προς την επιφάνεια εξέτασης-αποτέλεσμα (forward raytracing). Δεδομένου του μεγάλου αριθμού ακτίνων και του γεγονότος ότι μικρό μέρος αυτών θα προσπέσει τελικά στην φωταγωγημένη επιφάνεια συχνά χρησιμοποιείται η αντίθετη πορεία των ακτίνων δηλαδή ακτίνες εκπέμπονται από τον στόχο τον παρατηρητή (camera sensor) και κατευθύνονται προς την πηγή του φωτός (backward raytracing). Σε υλικά με υψηλό δείκτη διάχυσης αυξάνεται και ο χρόνος προσομοίωσης καθώς μόλις μια ακτίνα συναντήσει μια τέτοια επιφάνεια αναδρομικά υπολογίζεται η συνεισφορά προς κάθε κατεύθυνση για την παραγωγή ενδιάμεσων αποτελεσμάτων (pixel based).

Η μέθοδος ray tracing δεν παράγει καλά αποτελέσματα στα αποτελέσματα των ανακλάσεων ή διαθλάσεις οπτικών μέσων σε άλλες επιφάνειες (παραδείγματος χάριν σε πρίσματα) καθώς και στην χρωματική ολίσθηση του φάσματος από μια χρωματισμένη επιφάνεια σε μία άλλη (global illumination). Αυτά τα προβλήματα επιλύονται με την τεχνική photon mapping.

Ο ντετερμινιστικός (τεχνητές σημειακές πηγές φωτός) ή ο στοχαστικός (monte carlo) χαρακτήρας της προσομοίωσης επίσης επιδρά στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων, και στην μορφή αυτών αλλά και στο είδος του χώρου που εξετάζεται. Κάποια προγράμματα ενδέχεται να χρησιμοποιούν και συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων που αναφέρθηκαν και στην αρχή του κεφαλαίου. Για παράδειγμα το λογισμικό HOLIGILM χρησιμοποιεί τεχνική raytracing σε συνδυασμό με monte carlo.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης μπορούν να χωριστούν στα ενδιάμεσα και τελικά αποτελέσματα που παράγουν τα προγράμματα. Στα μεν πρώτα ανήκουν ποσοτικοί δείκτες φωτομετρικά μεγέθη και ποιοτικά όπως συνθήκες οπτικής άνεσης και στα δε δεύτερα δείκτες φυσικός φωτισμός, γραφήματα και εικόνες φωτορεαλισμού.

Αναφέρεται ότι κάποια προγράμματα ενδέχεται να υποστηρίζουν και την εισαγωγή συνάρτησης συμπεριφοράς φωτός του υπό εξέταση υλικού. Ονομάζεται Bsdf Bi-directional scattering distribution function, και χρησιμοποιείται προκειμένου να παράγει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ωστόσο αν δεν υπάρχει διαθέσιμη η συνάρτηση απαιτείται η διενέργεια μετρήσεων με κατάλληλο εξοπλισμό (γωνιοφωτομέτρηση) προκειμένου να εξαχθεί.

Σειρά ενεργειών προσομοίωσης

Κύρια αφορμή για την παρούσα μελέτη αποτελεί η δημιουργία μιας καινοτόμας τεχνικής τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλασιών και στο βαθμό που αυτό θα είναι αποδοτικό. Καθώς οι πιθανές εφαρμογές δεν περιορίζονται σε κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως σε πολυώροφα κτίρια, σε αποθήκες, σε υπόγεια δωμάτια (χώροι στάθμευσης), μελετήθηκε μια γενική περίπτωση η τοποθέτηση σε ένα δωμάτιο σε απομονωμένο περιβάλλον, και δεν μελετήθηκε η επίδραση του τριγύρω χώρου. Μια επισταμένη κατηγοριοποίηση των τύπων χώρων μπορεί να αναζητηθεί στο εγχειρίδιο handbook του οργανισμού IESNA, προκειμένου να αναζητηθούν και οι απαιτήσεις φωτισμού των χώρων και συνεπώς η δυνατότητα παραγόμενης ενέργειας λόγω της εσωτερικής απαιτούμενης ακτινοβολίας. Προς την κατεύθυνση αυτή, όπως υπάρχουν τα πρότυπα ή μοντέλα μεθοδολογίες που ακολουθούνται για συγκεκριμένους τύπους χώρων (γραφεία, αποθήκες, εργοστάσια, δρόμοι) μπορούν να εξεταστούν ανάλογες περιπτώσεις για τους τύπους αυτών των χώρων. Για παράδειγμα αναφέρεται η συχνότητα διέλευσης ανθρώπων ή αντικειμένων (π χ περονοφόρων σε περίπτωση αποθήκης), με σκοπό να εκτιμηθεί η αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας για διαφορετικές περιπτώσεις τοποθέτησης και η επιλογή της πιο κατάλληλης θέσης τοποθέτησης

Αναφέρονται γενικά τα κριτήρια, οι αποφάσεις που πρέπει να λάβει γενικά ο μελετητής προκειμένου να καταστρώσει τη μελέτη που θα πραγματοποιηθεί για να λάβει τις κατάλληλες αποφάσεις και να κάνει τις κατάλληλες υποθέσεις ή απλοποιήσεις

Αρχικά, επιλέγεται η γεωγραφική περιοχή τοποθέτησης του χώρου ο οποίος θα μελετηθεί. Βάσει της περιοχής μπορεί να επιλεγεί και το κατάλληλο μοντέλο ουρανού που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν στο συγκεκριμένο τόπο, αλλά και την εποχή κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επίσης, η αναζήτηση σε κατάλληλους φορείς, για την ύπαρξη κατάλληλων μετεωρολογικών δεδομένων, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα αντί μοντέλου. Καθώς δεν υπάρχουν ιστορικά κλιματικά δεδομένα για όλες τις περιοχές εισάγεται και σε αυτήν την περίπτωση ένα σφάλμα. Βέβαια η επιλογή χρήσης θα καθορίσει και ποιο πρόγραμμα μπορεί να επιλεγεί καθώς δεν επιτρέπεται η εισαγωγή δεδομένων σε όλα τα προγράμματα.

Αφού επιλεγεί, συνεπώς και το πρόγραμμα θα πρέπει να γίνει η εισαγωγή της σκηνής του δωματίου δηλαδή, από την εισαγωγή από κάποιο άλλο πρόγραμμα εφόσον υποστηρίζεται ή με τη δημιουργία του μοντέλου στο πρόγραμμα. Επισημαίνεται ότι αρχικά εισάγονται οι διαστάσεις και κατόπιν οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών. Δηλαδή, οπτικές ιδιότητες, δείκτες ανάκλασης και διάθλασης το χρώμα και η υφή, το είδος του υλικού.

Στη συνέχεια εισάγονται οι συντεταγμένες του τόπου, η επιλογή του μοντέλου της φωτεινής πηγής (μοντέλο ουρανού ή δεδομένων) και η επιλογή της θέσης του παρατηρητή ή της επιφάνειας εργασίας, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τυπικά σενάρια, ή καλύτερα συστήματα φυσικού φωτισμού που εξετάζονται αποτελούν τα φωτεινά ράφια, και οι περσίδες σε διάφορες έρευνες και τα τελευταία χρόνια και πιο σύνθετες γεωμετρίες ή συστήματα.

Τέλος, η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε κατάλληλη μορφή, csv αρχεία για περαιτέρω επεξεργασία, όπως είναι οι εικόνες φωτορεαλισμού, ή με ψευδοχρώματα για την κατανόηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών, και πίνακες με μετρήσεις των εντάσεων φωτισμού ή άλλα φωτομετρικά μεγέθη.

Σε άλλα προγράμματα θα γίνει η εισαγωγή των προηγούμενων αποτελεσμάτων προκειμένου να προκύψουν άλλα στοιχεία και να επέλθουν τα κατάλληλα συμπεράσματα της μελέτης. Αναφέρεται ότι τα δεδομένα θα μπορούσαν να τροφοδοτηθούν σε κατάλληλο υπολογιστικό λογισμικό, τύπου Matlab/Simulink, προκειμένου και με τη δημιουργία κατάλληλου μοντέλου φωτοβολταϊκό για εσωτερικές εφαρμογές να πραγματοποιηθεί μια μελέτη παραγωγής ενέργειας.

Ιδιαίτερα, για χώρες μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους, λόγω των περιορισμένων ωρών ηλιοφάνειας αλλά και καθαρού ουρανού εξετάζεται συνήθως ο δείκτης DF, υπό συνθήκες συννεφιασμένου ουρανού, σαν πρώτο βήμα. Αφορά συνήθως πιο παλιές έρευνες καθώς τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί πιο αξιόπιστοι δείκτες και χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά ή αποκλειστικά, χωρίς ωστόσο να έχει σταματήσει να χρησιμοποιείται ως ένας χρήσιμος δείκτης της ποσότητας φυσικός φωτισμός, για αρχικά συμπεράσματα.

Στο τελευταίο βήμα πριν την έναρξη της προσομοίωσης πρέπει να ληφθεί υπόψη η πολυπλοκότητα της σκηνής και πιθανώς η τοποθέτηση παρατηρητή και η επιλογή των αποτελεσμάτων. Καθώς η δημιουργία σκηνής με μεγάλους χώρους διαστάσεων, πολλών υλικών με ιδιόζουσες ιδιότητες (caustics), ή σύνθετων διατάξεων φυσικού φωτισμού, θα αυξήσει σε μεγάλο ποσοστό τον χρόνο μελέτης ή δεν παράγει και τα κατάλληλα σωστά αποτελέσματά.

Για τους λόγους αυτούς θα πρέπει να γίνουν και κάποιες παραδοχές στον υπό μελέτη χώρο για την πρώτη προσομοίωση και αφού αναλυθούν τα αποτελέσματα να πραγματοποιηθεί εκ' νέου μια μελέτη με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του Radiance κρίνεται σκόπιμη η διαδικασία μεταβολής των παραμέτρων προσομοίωσης, με έναν κλειστό βρόχο ανάδρασης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα των αποτελεσμάτων.

Η εύρεση της χρυσής τομής είναι εφικτή με την έννοια ότι η περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας και συνεπώς του αριθμού υπολογισμών δεν συνεισφέρει στην αναμενόμενη αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων σε τόσο βαθμό που κρίνεται άσκοπη η αύξηση αυτή.

Αν κάποιος μελετητής επιχειρήσει να εισάγει και πλήθος άλλων παραγόντων γίνεται αντιληπτό ότι η επίτευξη αποδεκτής ακρίβειας δεν θα είναι εφικτή, για τους λόγους αυτούς γίνονται οι όποιοι συμβιβασμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην εξαγωγή των συμπερασμάτων καθώς και στα σφάλματα της προσομοίωσης. Σαν παράδειγμα θα μπορούσε να εξεταστεί, η δημιουργία ενός επαρκούς αριθμού φασμάτων εσωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας η εισαγωγή της για την προσομοίωση του φωτοσώληνα και επακόλουθα η εισαγωγή των αποτελεσμάτων αυτών στο υπολογιστικό πρόγραμμα προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση ή η παραγωγή ενέργειας της όλης εγκατάστασης βάσει του παραγόμενου μοντέλου. Ακόμη, πηγαίνοντας ένα βήμα παρακάτω η εισαγωγή στα μοντέλα των υλικών δεικτών γήρανσης (φωτοβολταϊκό) ή ρυπαρότητας (διατάξεις φυσικού φωτισμού), για την εξαγωγή της παραχθείσας ενέργειας στη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, και σύγκριση με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας ή τρόπων τοποθέτησης (φωτοβολταϊκό εξωτερικών χώρων), βάσει του δείκτη LCOE.

Στη συνέχεια αναλύεται συνοπτικά βάσει της ανωτέρω συλλογιστικής η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση που εξετάζεται.

Επιλέχθηκε ένα δωμάτιο τετραγωνικών διαστάσεων πέντε μέτρων, τοποθετήθηκε σε γεωγραφικές διαστάσεις στην περιοχή της Αθήνας, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι εξωτερικές συνθήκες που

επικρατούν δηλαδή ύπαρξη γειτονικών κτιρίων ή γενικά άλλων εμποδίων που σκιάζουν το θόλο του φωτοσωλήνα και συνεπώς τη συλλογή φωτεινής ακτινοβολίας. Επιλέχθηκαν δύο τύπου ουρανών ο συννεφιασμένος και ο καθαρός μολυσμένος αστικός ουρανός για δύο ημέρες από τις τέσσερις αλλαγές των εποχών στη διάρκεια του έτους. Ιδιαίτερη προσοχή αποτέλεσε η επιλογή του ύψους τοποθέτησης της επιφάνειας εργασίας ώστε να είναι στο ίδιο επίπεδο με το δάπεδο (μέσω αύξησης του ύψους του δωματίου) σε αντίθεση με το τυπικό ύψος επιλογής των 0,7-0,8 μέτρων που αποτελεί την επιφάνεια ενός γραφείου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η επεξήγηση αυτών και κατόπιν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν την ανάλυση.

Η επιλογή των χαρακτηριστικών του φωτοσωλήνα επιλέχθηκε βάσει χαρακτηριστικών μελετών, βελτιστοποίησης της μετάδοσης φωτός. Το μήκος του φωτοσωλήνα καθώς και η διάμετρός του επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στην απόδοσή του, χρήσιμος δείκτης στις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί είναι το aspect ratio. Επισημαίνεται ότι η απόδοση, δεν είναι σταθερή για δεδομένο φωτοσωλήνα, καθώς η αλλαγή του ηλιακού ύψους ενδέχεται να επιφέρει αύξηση των αποδόσεων ή καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά φωτισμού κατά τη διάρκεια ενός έτους και για διαφορετικές εξεταζόμενες περιοχές λόγω των συνθηκών του ουρανού και της πορείας που ακολουθεί ο Ήλιος. Επιλέχθηκε μήκος φωτοσωλήνα μισού μέτρου και διάμετρος πενήντα δύο εκατοστών που αποτελούν και τις προκαθορισμένες τιμές του προγράμματος. Η αύξηση του μήκους του σωλήνα, επιφέρει αύξηση του αριθμού των ανακλάσεων θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη ομοιομορφία αφού διαχέεται καλύτερα το φως ωστόσο με επακόλουθη μείωση της απόδοσης. Ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και πάνω από τον θόλο μεταφέρεται αυτούσια η ακτινοβολία με ελάχιστες ανακλάσεις στο εσωτερικό του δωματίου. Σε μελλοντική μελέτη είναι δυνατό να εξεταστούν διαφορετικές διαστάσεις προκειμένου για το συγκεκριμένο τόπο, να βρεθούν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου φωτοσωλήνα, ωστόσο δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής όπου εξετάζεται η δυνατότητα της χρήσης φωτοβολταϊκών εσωτερικών χώρων.

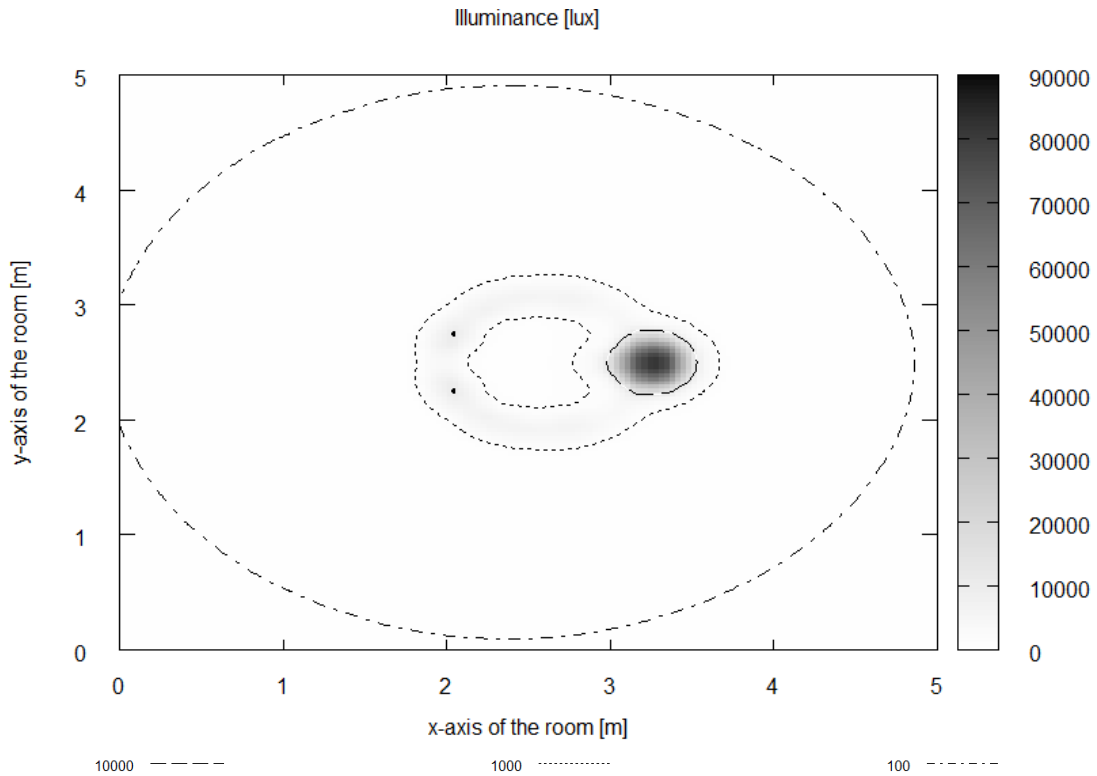
Αναφορικά με τον διαχύτη, επιλέχθηκε λαμπερτιανό υλικό με σκοπό τη διάχυση του φωτός, στην επιλογή του διαχύτη, προκειμένου να μην υπάρχει ανομοιομορφία στο διάγραμμα της έντασης φωτισμού και συνεπώς στην καταπόνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αλλά και διάφανο υλικό με σκοπό την μέγιστη διάδοση του φωτός και συνεπώς παραγωγής ενέργειας.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι για κάθε μια από τις δύο εξεταζόμενες μέρες δύο τύποι ουρανών και για κάθε τύπο ουρανού δύο διαφορετικά υλικά διαχύτη.

Αποτελέσματα

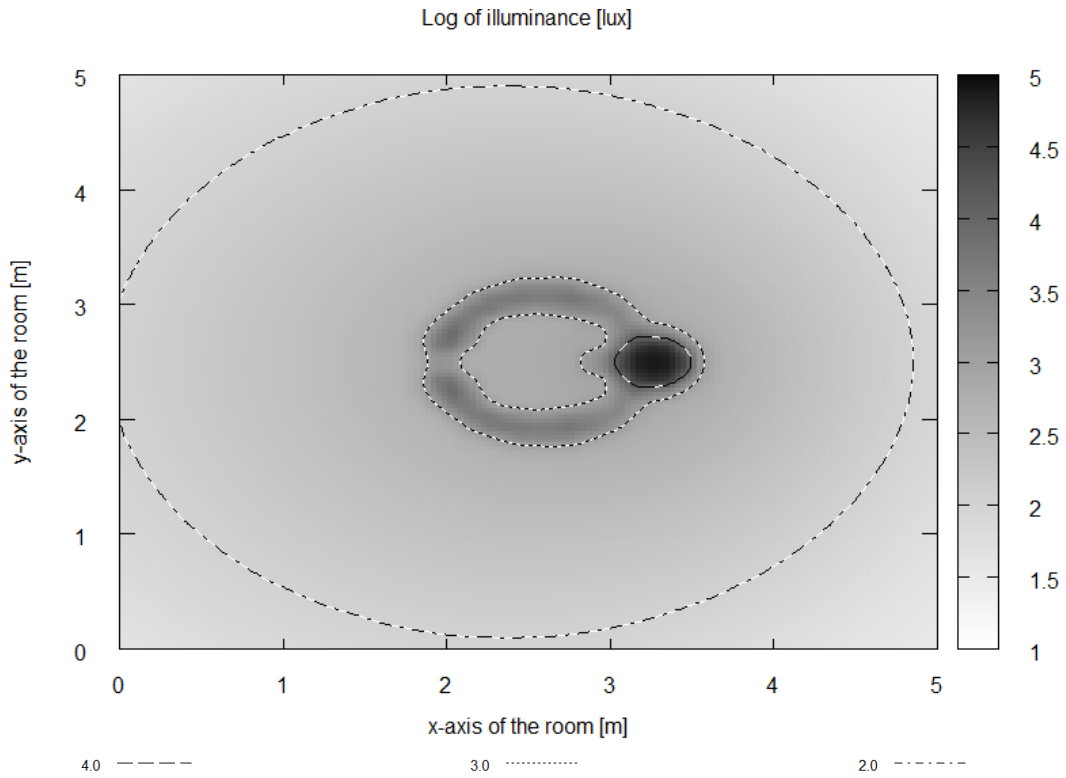
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης με την χρήση του λογισμικού HOLIGILM ver.4.11. Χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα ουρανού 1 CIE Overcast και 13 CIE Clear polluted, urban, για χώρο, τετραγωνικό πλευράς πέντε μέτρων, ευρισκόμενο σε γεωγραφικό πλάτος 37° και για τις ημέρες του έτους 21/6 και 21/12. Οι άλλες δύο περιπτώσεις δεν εξετάστηκαν αφού προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα (ηλιακό ύψος 53°) που αποτελούν ενδιάμεσες περιπτώσεις αφού με τις επιλεγόμενες ημερομηνίες εξετάζονται ακραίες περιπτώσεις φωτισμού. Το ηλιακό ύψος προέκυψε 76,4° και 29,6° αντίστοιχα και επιλέχθηκε δώδεκα το μεσημέρι ως ηλιακή ώρα. Εξετάστηκαν για κάθε μία περίπτωση το υλικό του διαχύτη να είναι διάφανο ή μια τέλεια λαμπερτιανή επιφάνεια. Συνεπώς για κάθε μέρα προσομοιώθηκαν δύο μοντέλα ουρανών που στο κάθε μοντέλο ο διαχύτης είναι δύο ειδών. Τέλος, οι υπόλοιπες ρυθμίσεις παραμέτρων τέθηκαν ίσες με τις προεπιλεγμένες.

Για το θερινό ηλιοστάσιο προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα για διάφανο διαχύτη, που αποτελεί και την περίπτωση με μέγιστη ένταση φωτισμού καθώς η φωτεινή ακτινοβολία μεταφέρεται αυτούσια και ιδιαίτερα στην περίπτωση που ο Ήλιος βρίσκεται στο μέγιστο ηλιακό ύψος, το ηλιακό μεσημέρι.

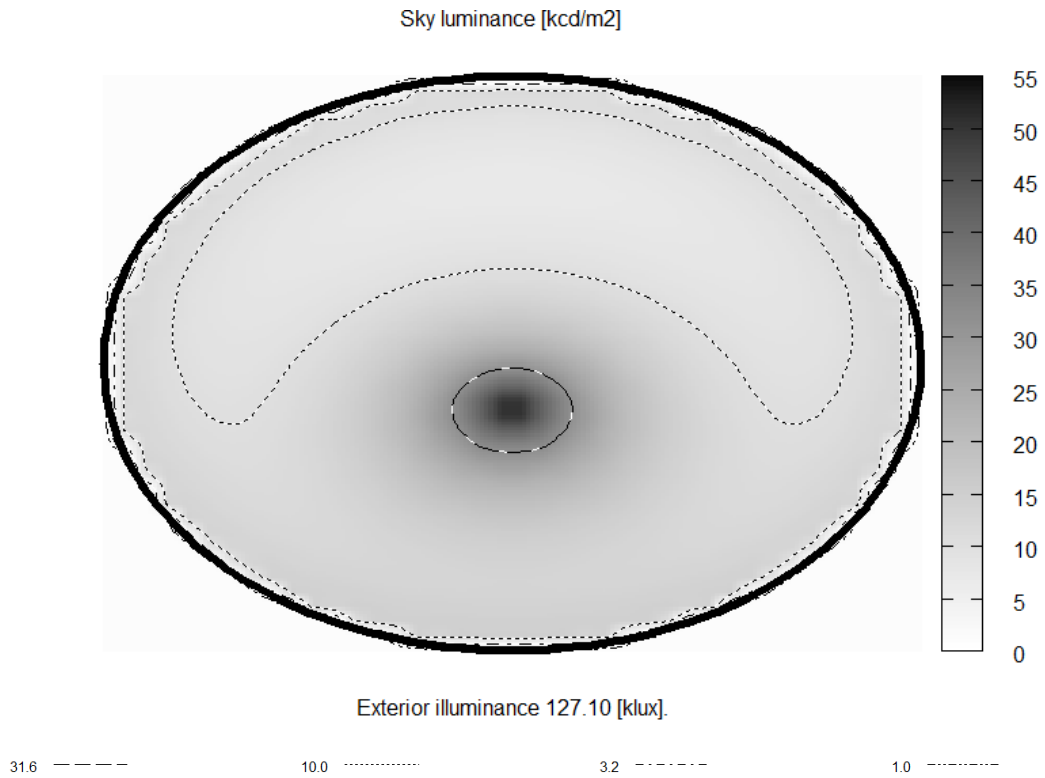


Παρατηρείται η αντακλάση, η μορφή του ουράνιου θόλου να αποτυπώνεται, δηλαδή, μετατοπισμένη στο δάπεδο εξαιτίας του επιλεγμένου μήκους (0,5 m) φωτισωλήνα. Από έρευνες προκύπτει ότι η αύξηση του μήκους το σωλήνα μετατοπίζει αυτό το είδωλο προς το κέντρο διατομής του εξαιτίας των περισσότερων ανακλάσεων που υφίσταται το φως αλλά θα υπάρξει ελαφρά μειούμενη απόδοση μεταφοράς.

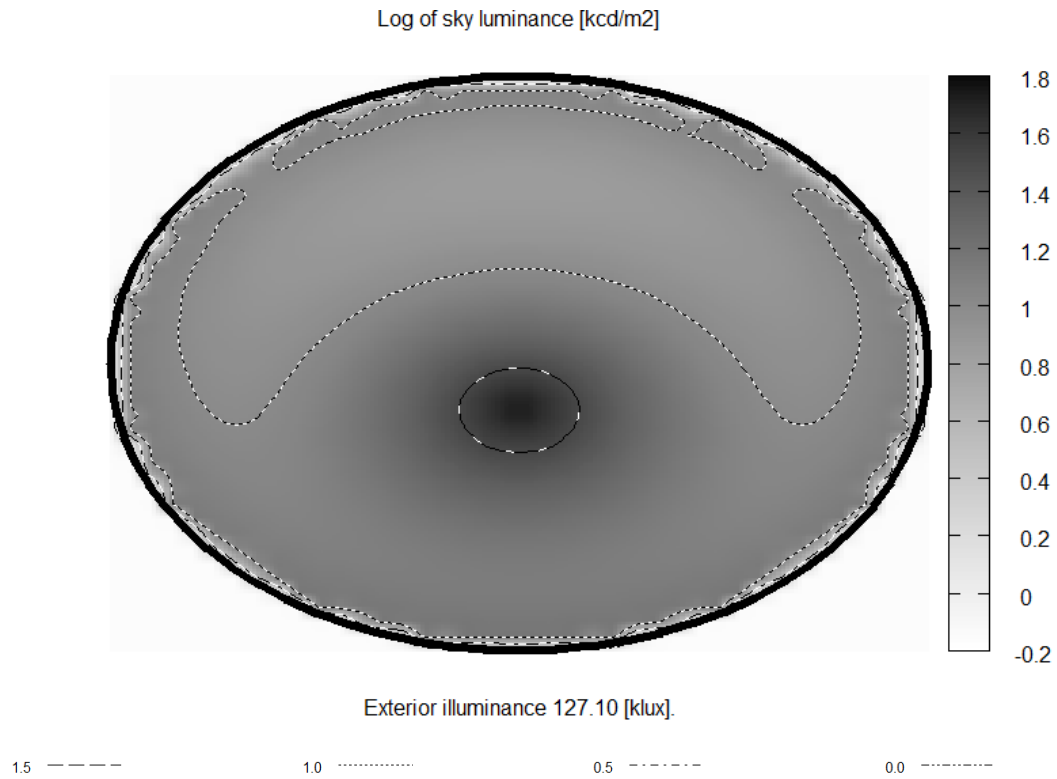
Παρατίθεται και το διάγραμμα σε λογαριθμική κλίμακα έντασης φωτισμού προκειμένου να εξομαλυνθεί το διάγραμμα της επιφάνειας εργασίας.



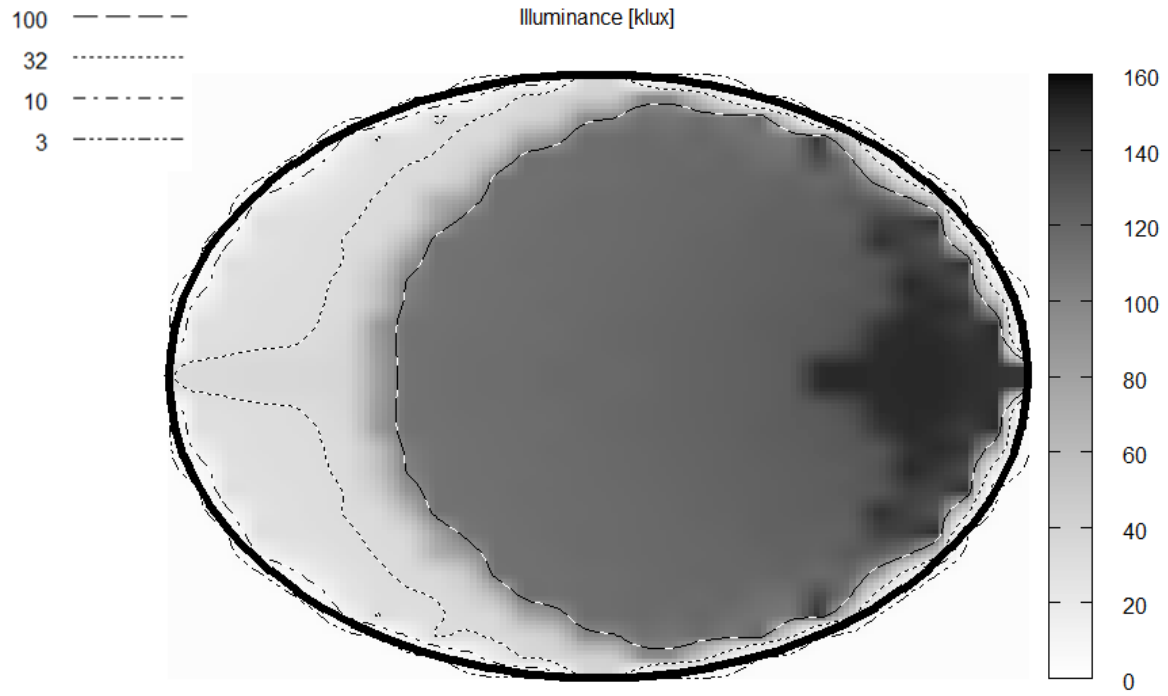
Διαπιστώνεται και η μορφή του ουρανού που όπως αναφέρθηκε αποτυπώνεται στο δάπεδο του δωματίου.



Με την χάραξη σε λογαριθμική κλίμακα φαίνεται ευκρινέστερα και η εικόνα που παρουσιάζει ο ουράνιος θόλος και πιο συγκεκριμένα διακρίνεται ο ηλιακός δίσκος.



Η τιμή 0,9 του συνημιτόνου φανερώνει την σχεδόν κάθετη διάδοση του φωτός, αφού ο Ήλιος βρίσκεται σχεδόν άνωθεν του θόλου συλλογής φωτός (Average cosine Gordon 1989, 1 φωτεινή ακτινοβολία από πάνω, 0.5 ισοτροπικά, 0 πλάγια).



Total luminous flux below the optical interface: 24460 lm

Exterior illuminance: 127.1 klux

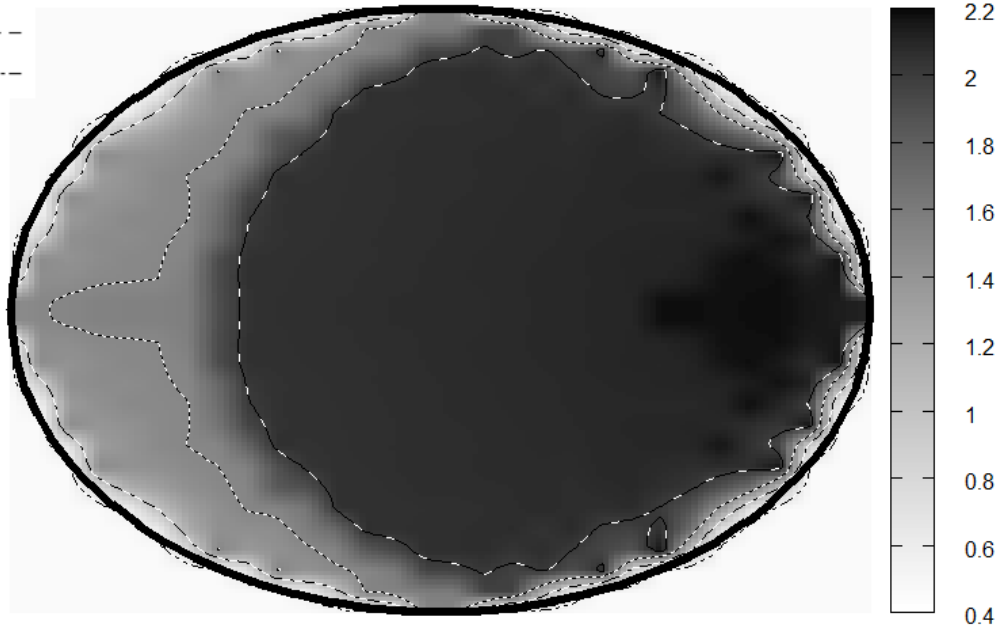
Efficiency: 90.6% Average cosine: 0.898

Με την εξομάλυνση διαπιστώνεται και η μειούμενη διάδοση του φωτός στην αριστερή μεριά του

φωτοσωλήνα.

2.0 — — — —
1.5 ······
1.0 - - - - -
0.5 - - - - -

Log of illuminance [klux]



Total luminous flux below the optical interface: 24460 lm

Exterior illuminance: 127.1 klux

Efficiency: 90.6% Average cosine: 0.898

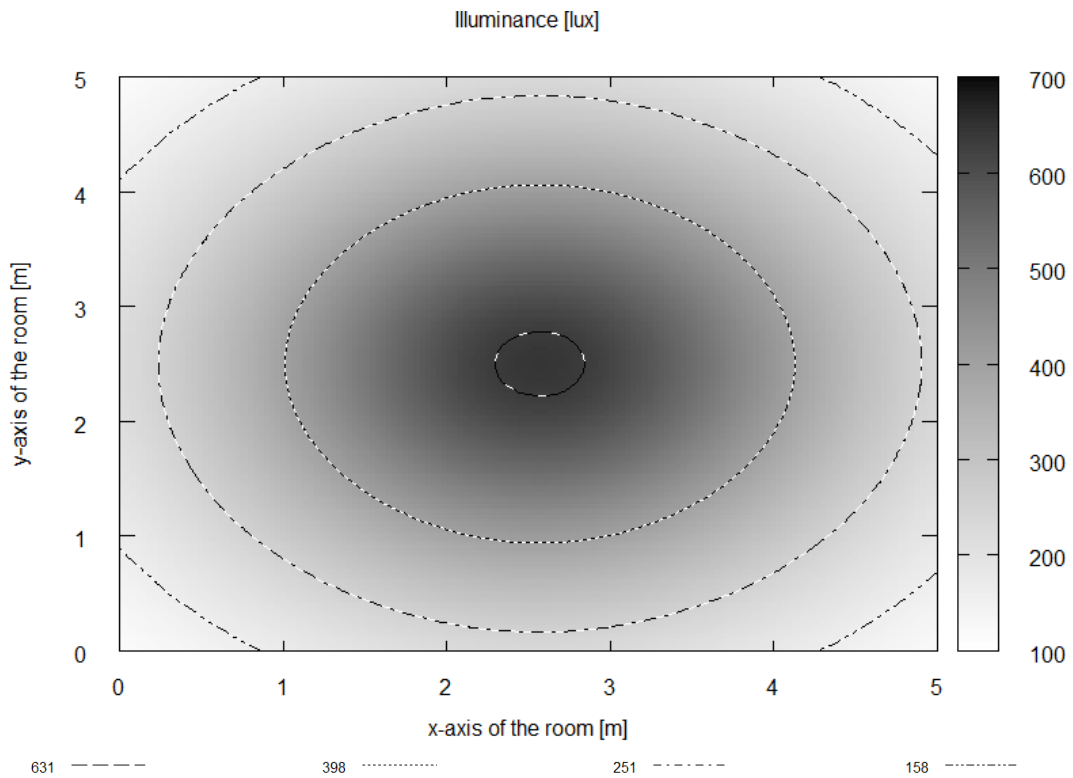
Τέλος, η ίδια πληροφορία σε μορφή τρισδιάστου διαγράμματος.

Log of luminous intensity [a.u.]

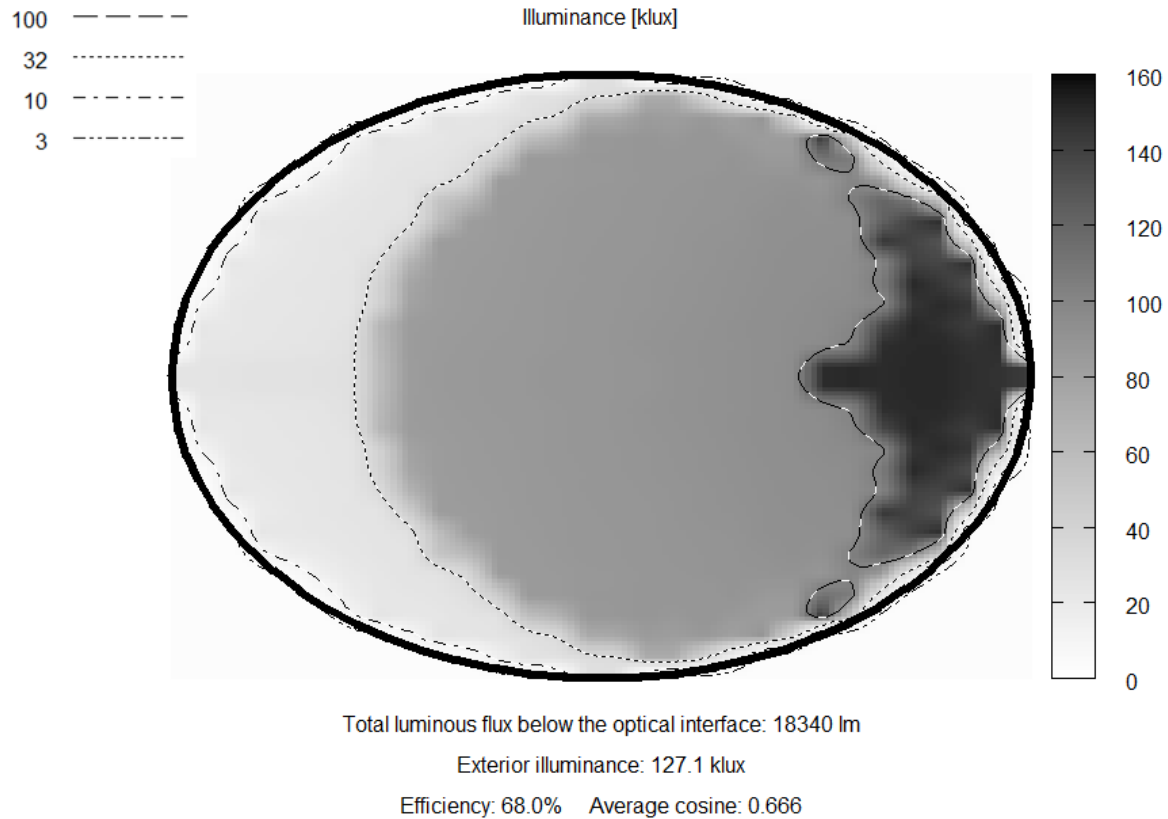


view: 120.000, 0.000000 scale: 1.00000, 1.00000

Για λαμπερτιανή επιφάνεια του διαχύτη τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την ίδια μέρα που προκύπτουν είναι τα παρακάτω.



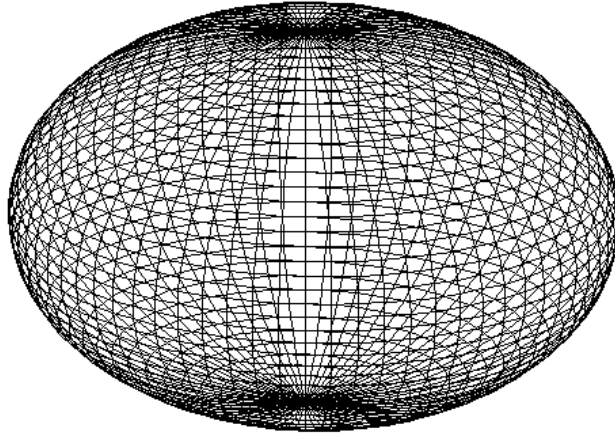
Διαπιστώνεται η ομοιομορφία γύρω από τον άξονα του φωτοσωλήνα, της έντασης φωτισμού εξαιτίας του υλικού που προκαλεί διάχυση των ακτίνων του φωτός. Υφίσταται και μία μείωση 300 lux περίπου σε σχέση με τον διάφανο διαχύτη.



Η φωτεινή ροή ακριβώς κάτω από τον διαχύτη λαμπερτιανής επιφάνειας προκύπτει 18 klumen, και διαδίδεται σχεδόν ισοτροπικά, φανερώνοντας την συμμετρικότητα που παρέχει η επιλογή ενός τέτοιου υλικού.

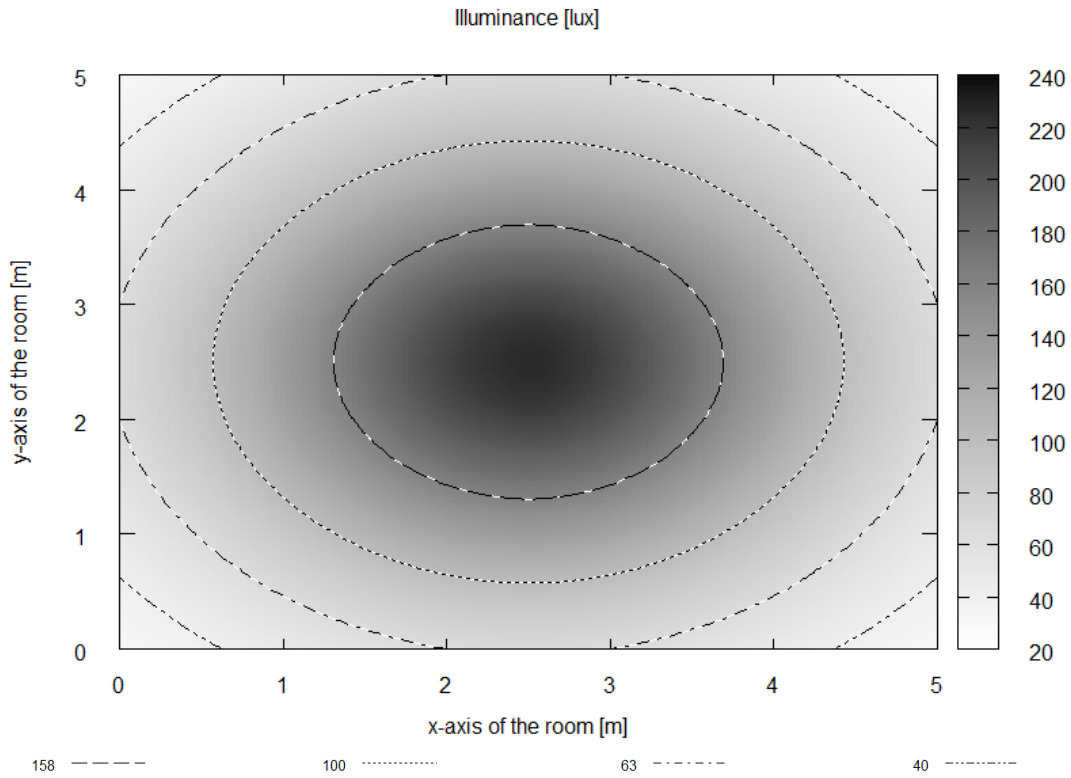
Τέλος, το παρακάτω διάγραμμα επιβεβαιώνει τον τελευταίο ισχυρισμό και μια σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα στην περίπτωση του διάφανου διαχύτη θα εξαίρει τις διαφορές.

Luminous intensity [a.u.]

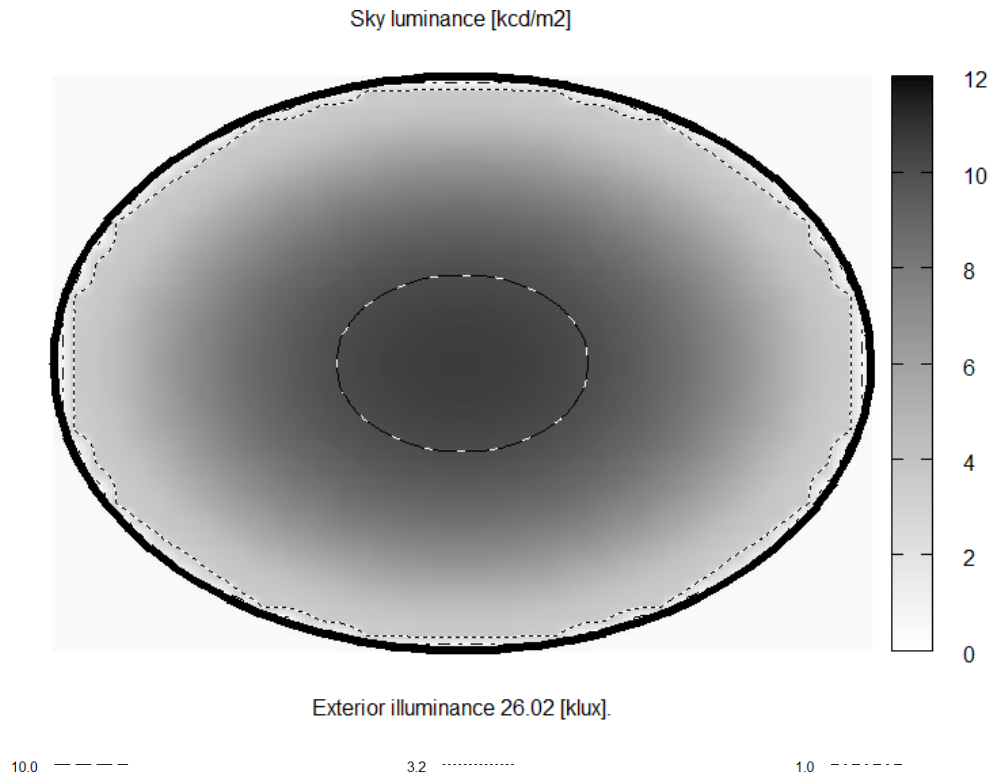


view: 120.000, 0.000000 scale: 1.00000, 1.00000

Αναφέρεται ότι δεν παρουσιάστηκε το διάγραμμα λαμπρότητας του ουρανού αφού είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις επιφανειών. Για την περίπτωση συννεφιασμένου ουρανού με την ίδια σειρά παρουσίασης των διαγραμμάτων, στην περίπτωση αρχικά του διάφανου διαχύτη.

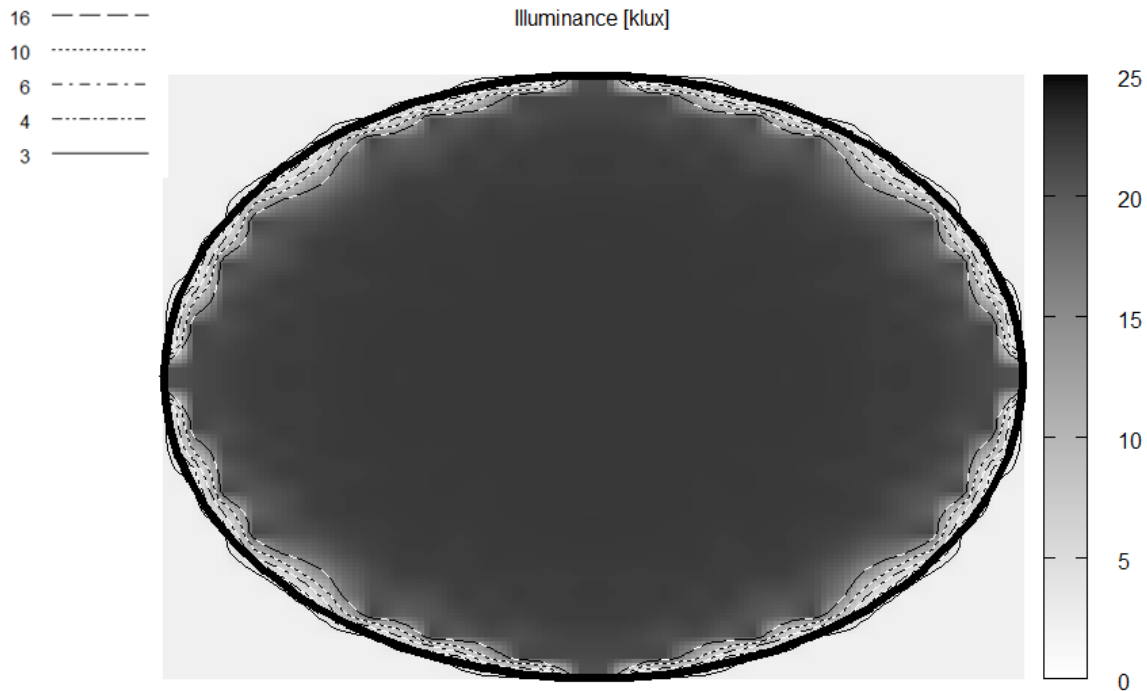


Μια ικανοποιητική ένταση φωτισμού επιτυγχάνεται και συμμετρική εξαιτίας της συμμετρικότητας της λαμπρότητας του ουράνιου θόλου.



Παρατηρείται και η μέγιστη ένταση στο ζενίθ του ουράνιου θόλου όπως έχει ορισθεί και στο αντίστοιχο κεφάλαιο της παρούσης διπλωματικής.

Στην παρακάτω εικόνα διαπιστώνεται ότι μειώνεται η συμμετρικότητα της έντασης φωτισμού και σχεδόν η πολύ καλή απόδοση μεταφερόμενης φωτεινής ροής διαδίδεται στον χώρο σχεδόν από κάτω του διαχύτη (συνημίτονο 0,738). Επίσης, οφείλεται στο στο αυξημένο ηλιακό ύψος του Ήλιου λόγω της επιλεγόμενης ημέρας προσομοίωσης και τοποθετώντας τον σχεδόν άνωθεν του θόλου.



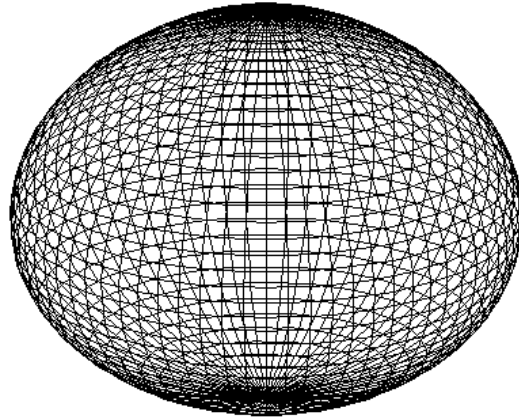
Total luminous flux below the optical interface: 4690 lm

Exterior illuminance: 26.0 klux

Efficiency: 84.9% Average cosine: 0.738

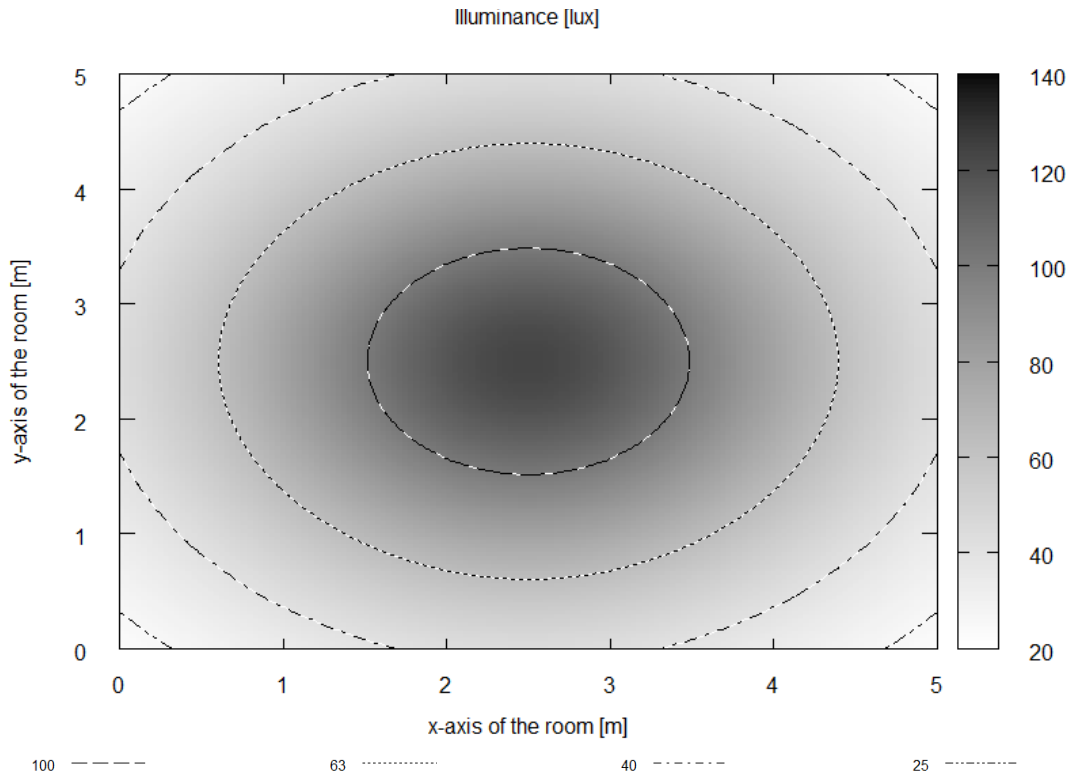
Παρόλο του διάφανου διαχύτη δεν παρουσιάζονται φωτεινές κηλίδες εξαιτίας της απουσίας του ηλιακού δίσκου.

Luminous intensity [a.u.]

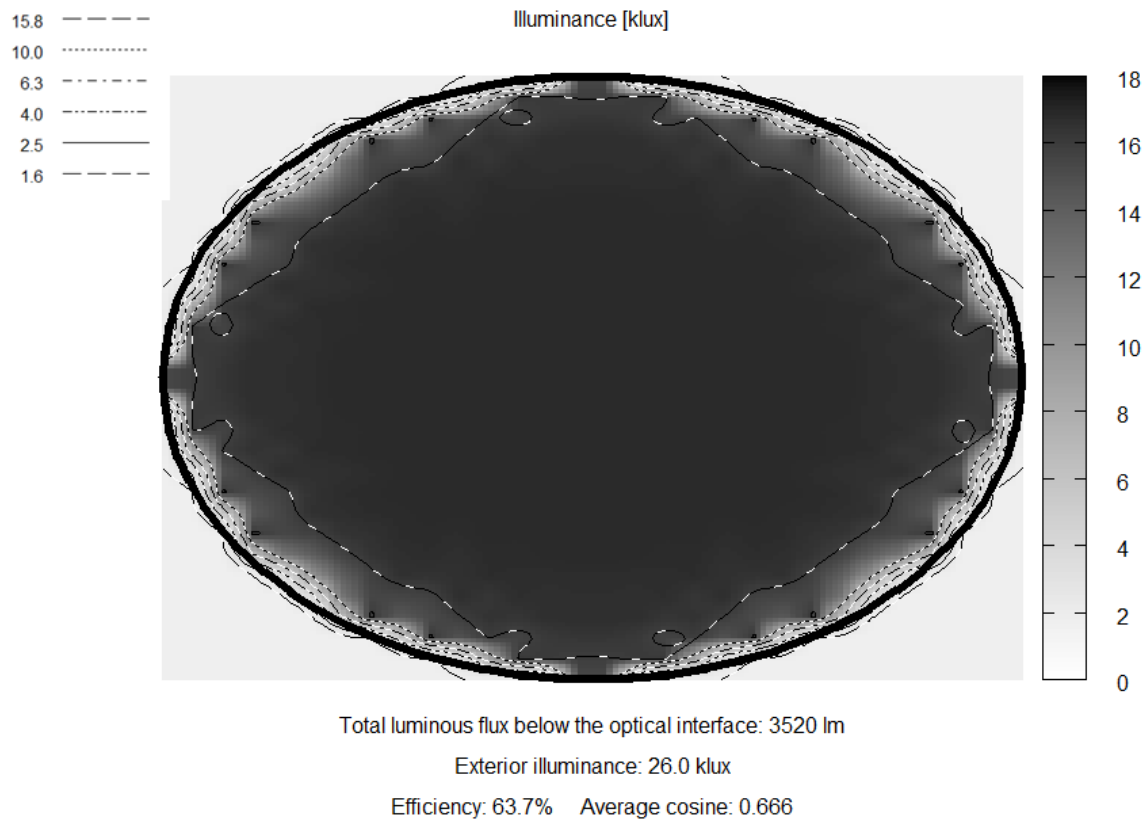


view: 120.000, 0.000000 scale: 1.00000, 1.00000

Στην περίπτωση λαμπερτιανής επιφάνειας η μείωση στην ένταση φωτισμού δεν είναι τόσο ισχυρή (100 lux) όπως συνέβη στην προηγούμενη περίπτωση για καθαρό ουρανό.

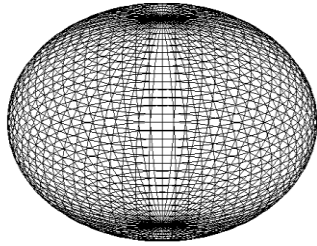


Στην παρακάτω εικόνα παρόμοιας μορφής με την προηγούμενη περίπτωση αλλά μειωμένης σε απόλυτη τιμή όλων των εξεταζόμενων μεγεθών. Η απόδοση μειώθηκε από 85% σε 64%, η φωτεινή ροή από 4700 σε 3500 lumen και η συμμετρικότητα μειώθηκε καθιστώντας την πιο πλάγια (0,666).

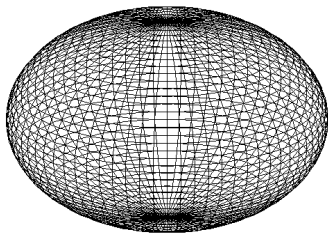


Διαπιστώνεται και με μία εποπτική σύγκριση των δύο τρισδιάστατων σφαιρών στο διάγραμμα της έντασης φωτισμού, όπου στην εξεταζόμενη περίπτωση η σφαίρα φαίνεται να είναι συμπιεσμένη προς το κέντρο της.

Luminous intensity [a.u.]

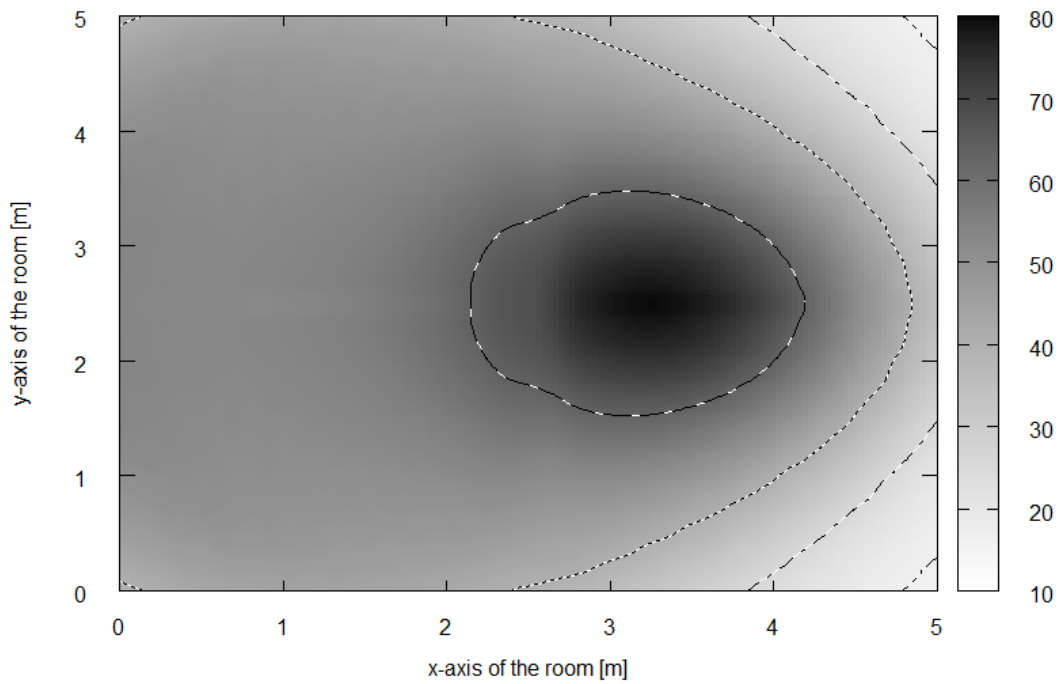


Luminous intensity [a.u.]

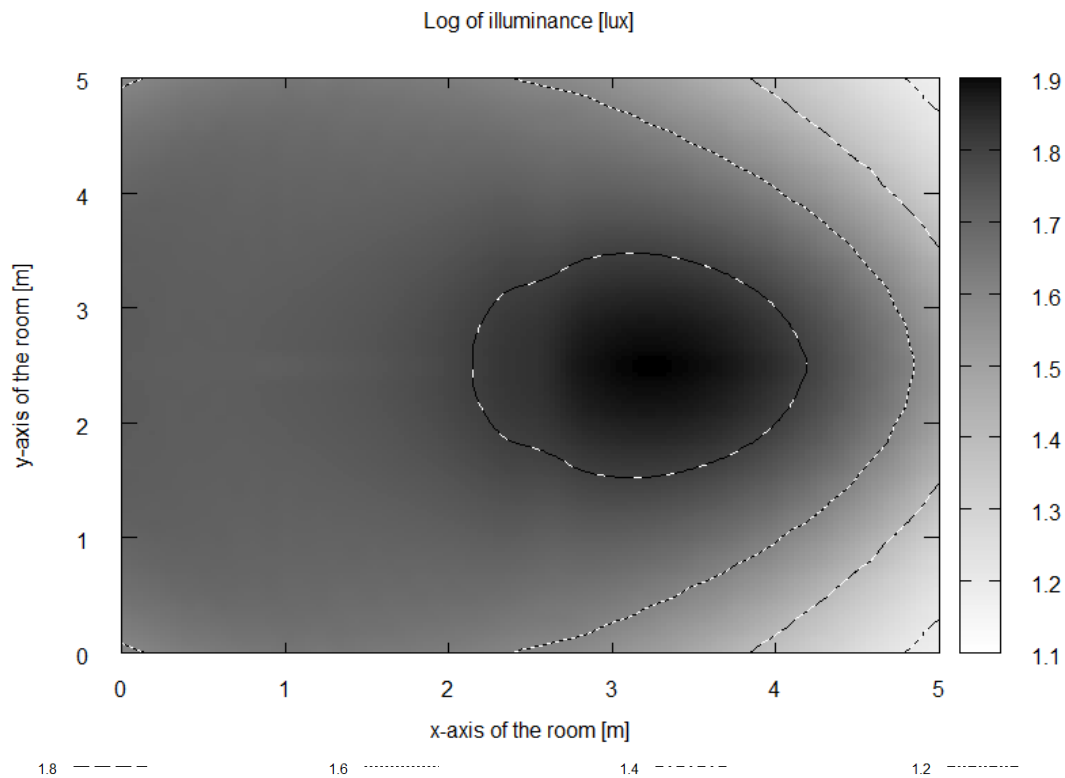


Για περίπτωση χειμερινού ηλιοστάσιου, καθαρού ουρανού και διάφανου διαχύτη, τα αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν.

Illuminance [lux]

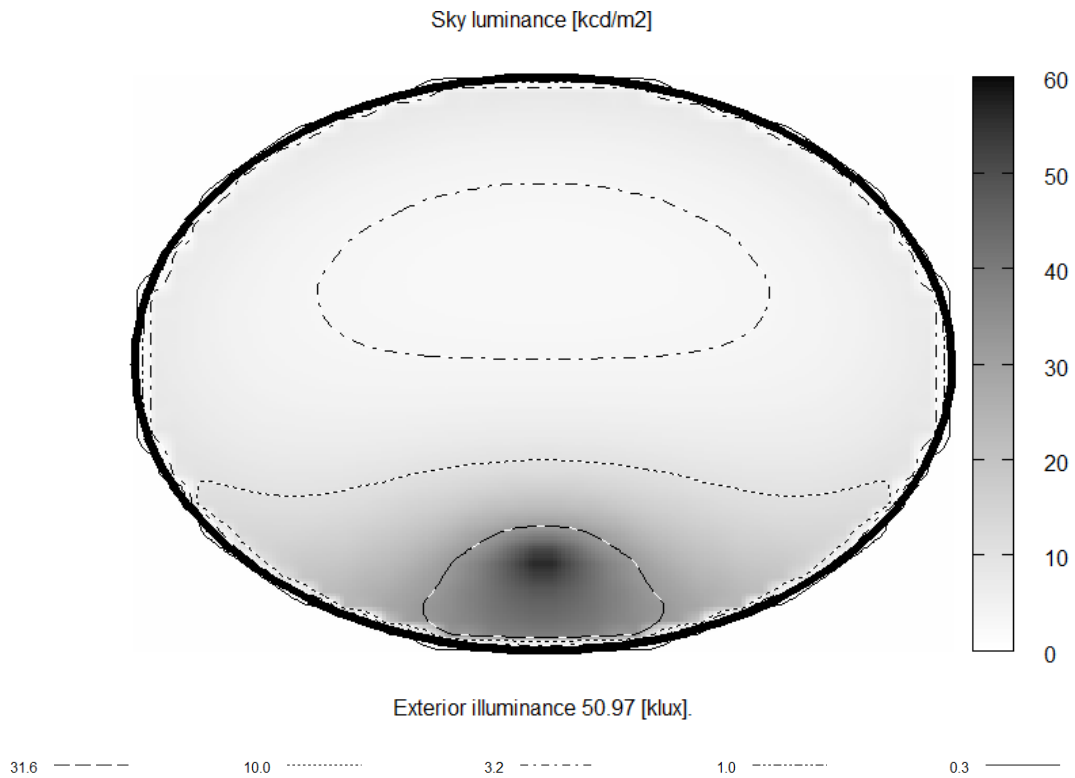


Ενδιαφέρον παρουσιάζει, η όμοια μετατοπισμένη μορφή της εικόνας της έντασης φωτισμού λόγω του μήκους του σωλήνα όπως και στην περίπτωση του θερινού ηλιοστασίου. Ωστόσο, η τιμή της έντασης φωτισμού είναι εκτός αποδεκτών ορίων για φωτισμό του χώρου υπό φυσικό φωτισμό αλλά αποδεκτή, για παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά, της ισχύς που έχει προταθεί σε μελέτες ως εσωτερική ακτινοβολία.

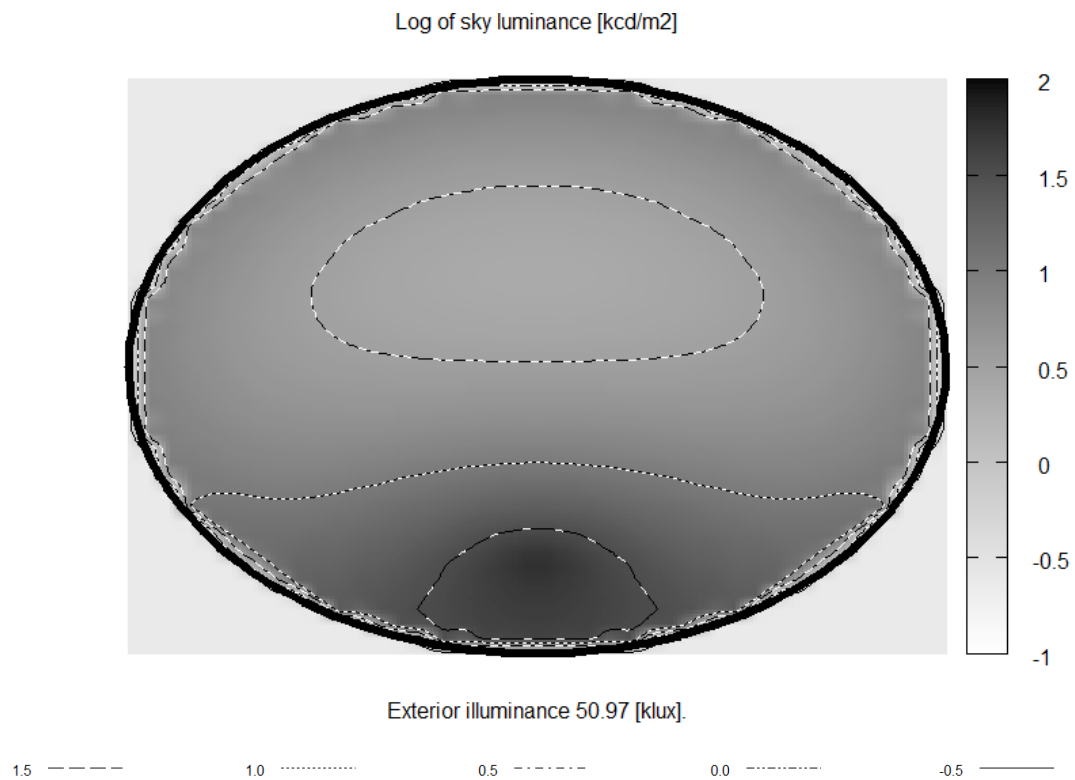


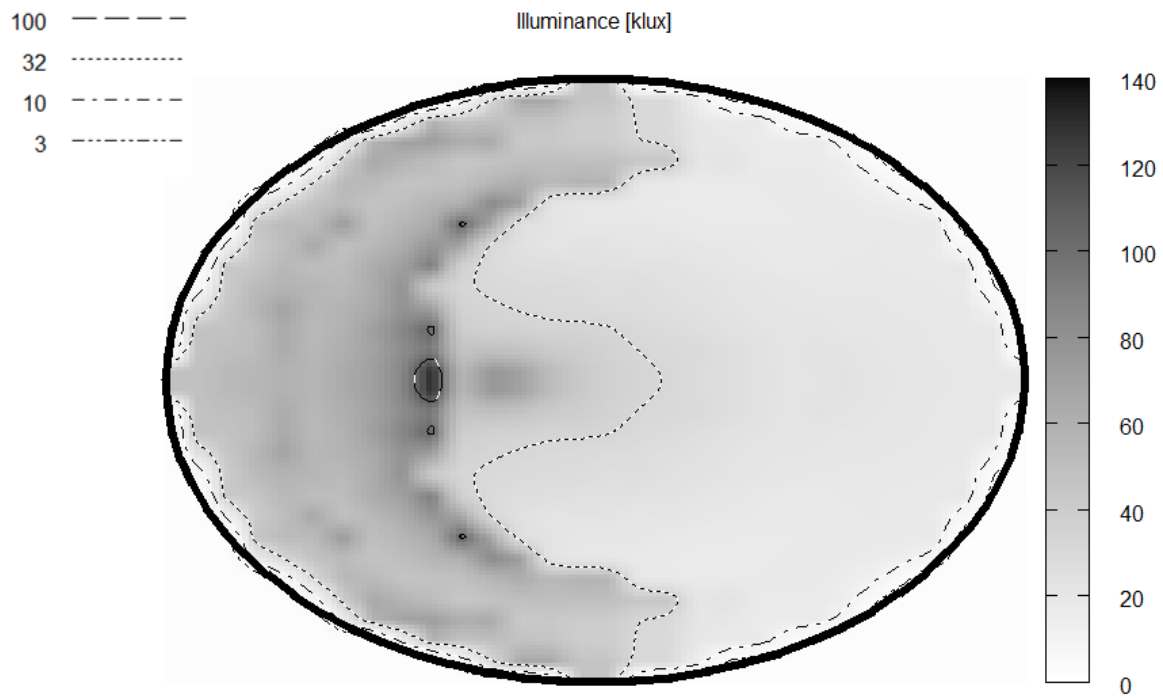
Η εξομάλυνση των τιμών με την χρήση λογαριθμικής κλίμακας, και η επίτευξη της μέγιστης έντασης φωτισμού σε μια επιφάνεια τετραγώνου πλευράς ενός μέτρου, κατάλληλη για τοποθέτηση ενός κελιού παρόμοιων διαστάσεων. Τα αντίστοιχα μεγέθη το καλοκαίρι όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα αποτελέσματα είναι πιο μικρού εμβαδού φωτίζοντας έτσι ένα φωτοβολταϊκό ανομοιόμορφα και μειώνοντας έτσι την απόδοση κάποιων κελιών. Συνεπώς, για αυτή την εποχή ο τρόπος λειτουργίας θα ομοιάζει με την περίπτωση τοποθέτησης κελιών συγκεντρωτικά πολλών Ήλιων, ενώ για τον μήνα Δεκέμβρη με την τοποθέτηση φωτοβολταϊκού άμορφου πυρίτιου αφού μπορούν να λειτουργήσουν σχετικά αποδοτικά με διάχυτο φως και μειωμένο σε ένταση, που όπως αναφέρθηκε νωρίς το πρωί ή το απόγευμα κατά τη δύση του Ήλιου.

Το χαμηλό ύψος του Ήλιου μπορεί να επαληθευτεί στα παρακάτω διαγράμματα



Διαπιστώνεται η ύπαρξη φωτεινών σημείων λόγω των ανακλάσεων των ακτίνων του Ήλιου στον φωτοσωλήνα και η σχεδόν σταθερή απόδοση στη μεταφορά φωτός κατά τη διάρκεια του έτους, δεδομένου των χαμηλότερων εξωτερικών συνθηκών (51 klux έναντι 127 klux τον Ιούνιο).

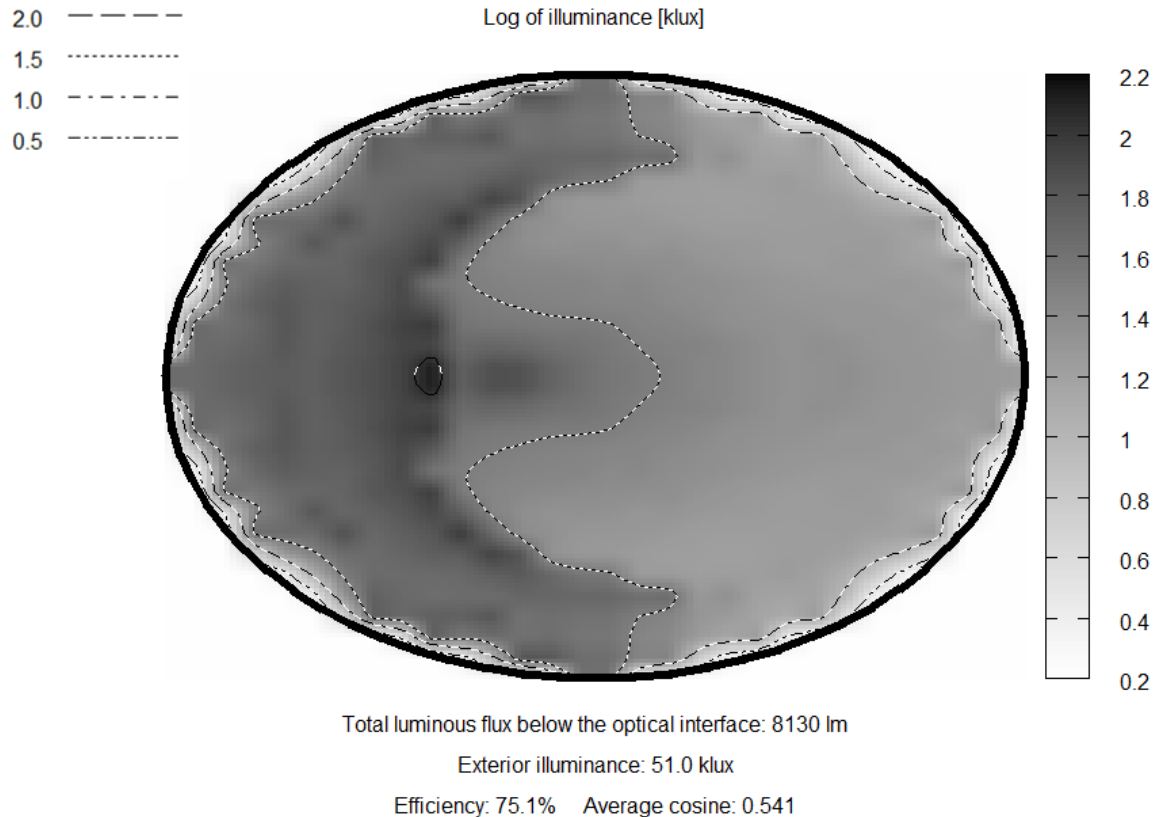




Total luminous flux below the optical interface: 8130 lm

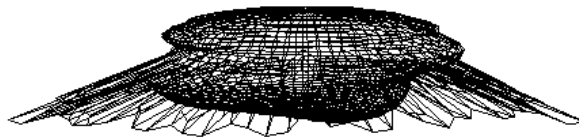
Exterior illuminance: 51.0 klux

Efficiency: 75.1% Average cosine: 0.541



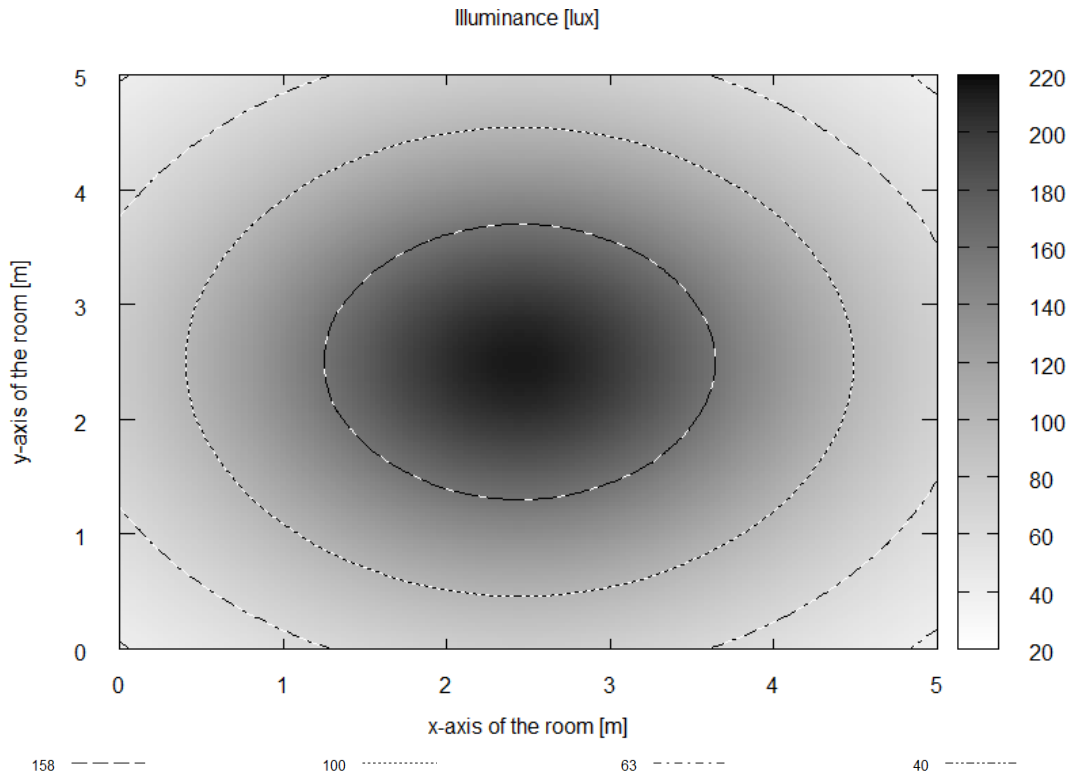
Η μορφή του διαγράμματος της φωτεινής έντασης έχει περιστραφεί ώστε να καταστεί σαφές και η πελάτυνση προς το κέντρο της σφαίρας και μεταφορά του φωτός προς μεγαλύτερες στερεές γωνίες αυξάνοντας την ομοιομορφία της επιφάνειας προσομοίωσης λόγω μικρότερων σε αριθμό αλλά και διασπορά τιμών καμπυλών isolux (0.541 average cosine).

Log of luminous intensity [a.u.]

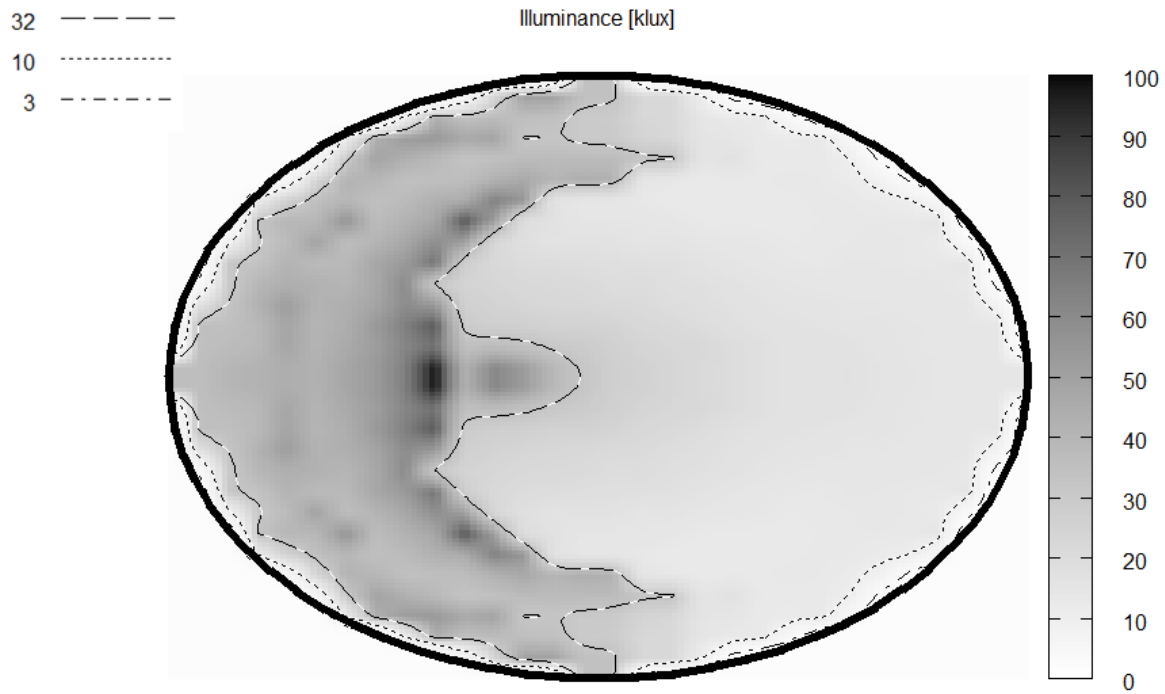


view: 98.0000, 1.00000 scale: 1.00000, 1.00000

Για λαμπερτιανή επιφάνεια, διαπιστώνεται εκ' νέου η ομοιομορφία στην ένταση φωτισμού και η αύξηση της έντασης φωτισμού κυκλικά στον άξονα της σφαίρας. Κρίνεται κατάλληλη η τοποθέτηση φωτοβολταϊκού καθώς σε κυκλική επιφάνεια διαμέτρου περίπου 500 cm υπάρχει σταθερή ένταση φωτισμού ίση με 200 lux. Για διάμετρο ενός μέτρου σε συμφωνία με την προηγούμενη ανάλυση, λαμβάνει τιμές στο εύρος (180,220).



Στην επόμενη εικόνα υπάρχει μια μείωση στα φωτεινά σημεία λόγω ανακλώμενων ακτίνων και αύξηση του συνημιτόνου αλλά μείωση της απόδοσης μεταφερόμενου φωτός.

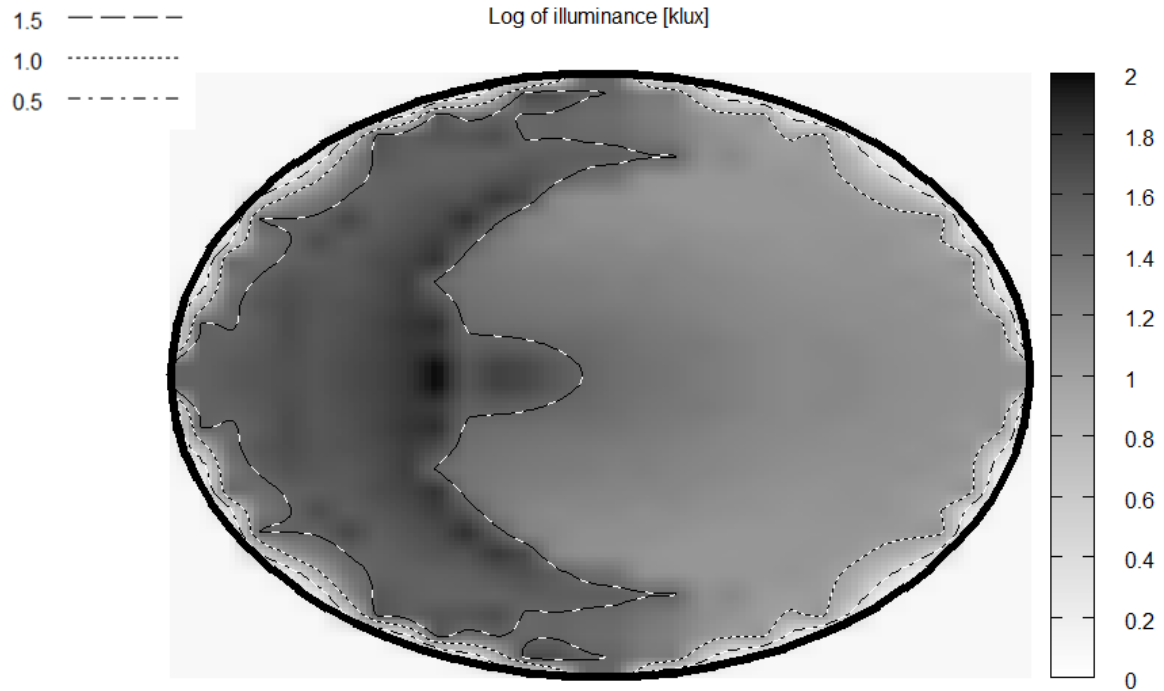


Total luminous flux below the optical interface: 6100 lm

Exterior illuminance: 51.0 klux

Efficiency: 56.3% Average cosine: 0.666

Διαπιστώνεται η βελτίωση της συμμετρικότητας με το παρακάτω διάγραμμα.

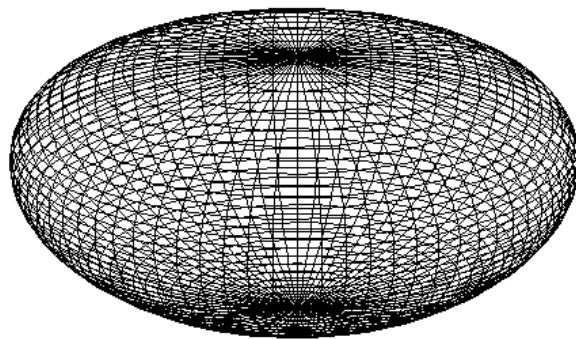


Total luminous flux below the optical interface: 6100 lm

Exterior illuminance: 51.0 klux

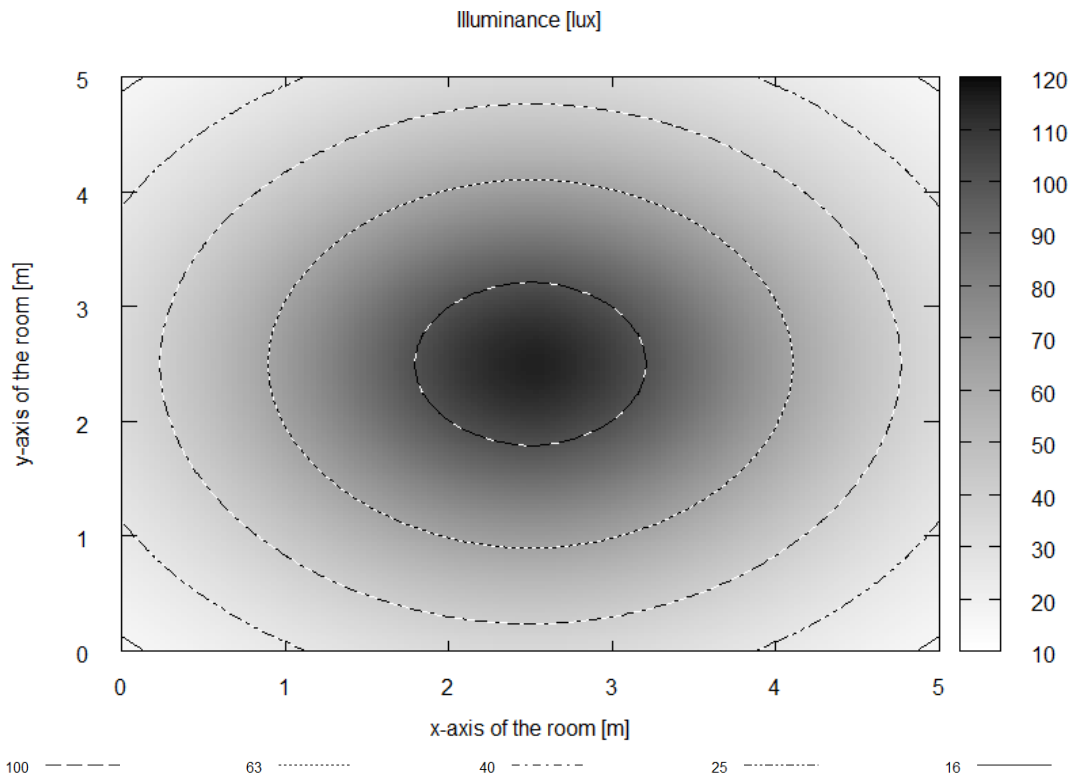
Efficiency: 56.3% Average cosine: 0.666

Log of luminous intensity [a.u.]

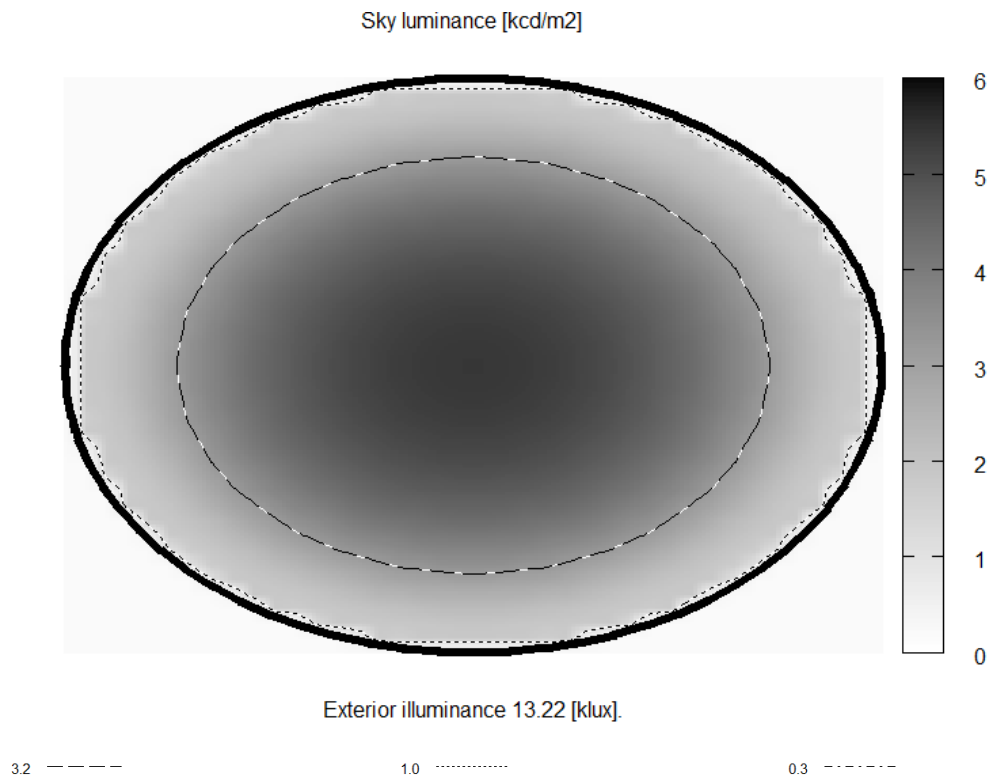


view: 120.000, 0.000000 scale: 1.00000, 1.00000

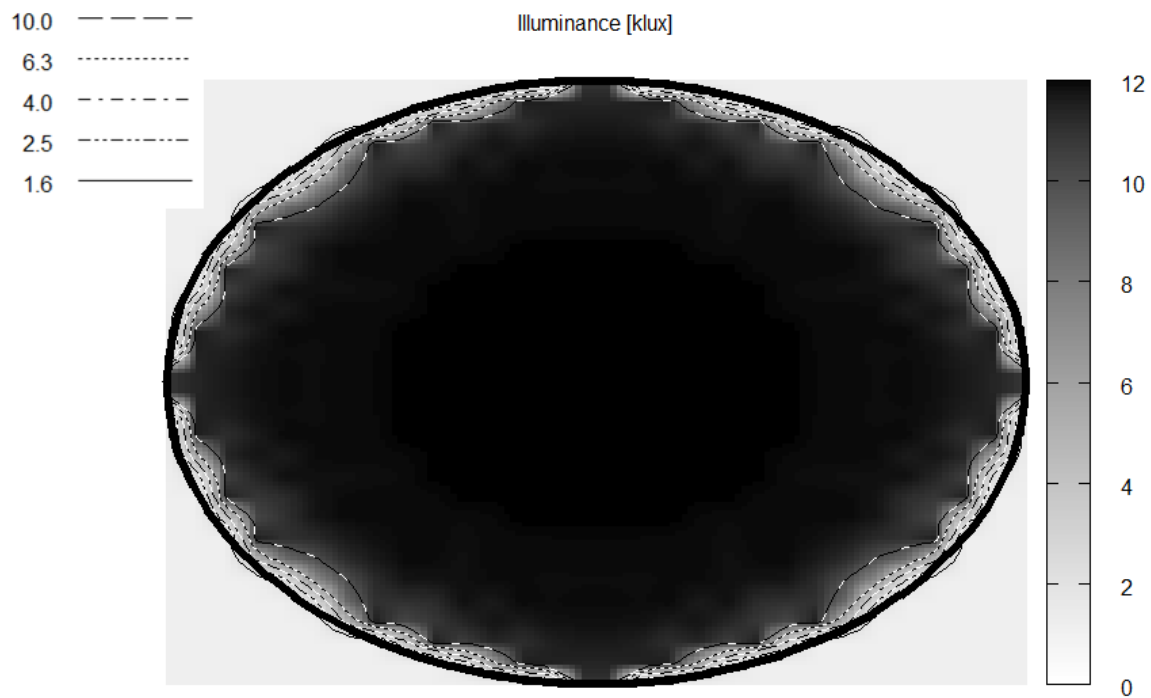
Για συννεφιασμένο ουρανό και διάφανο διαχύτη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απουσία φωτεινών κηλίδων παρά τον διάφανο διαχύτη λόγω απουσίας του ηλιακού δίσκου.



Επίσης, για διάμετρο ενός μέτρου παρατηρείται σχετικά σταθερή ένταση φωτισμού που ανήκει στο διάστημα (100,120).



Λόγω της εποχής και του ουρανού η εξωτερική ένταση φωτισμού είναι 13 klux.



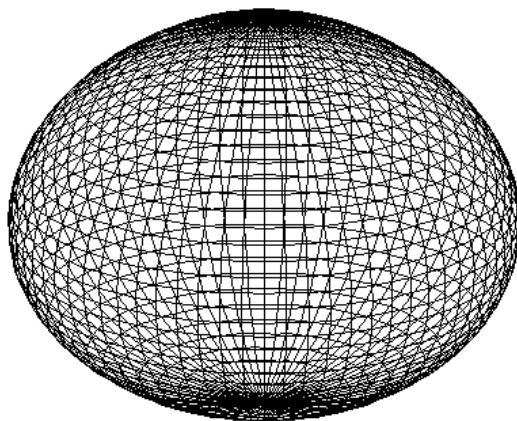
Total luminous flux below the optical interface: 2510 lm

Exterior illuminance: 13.2 klux

Efficiency: 89.3% Average cosine: 0.738

Επιτυγχάνεται καλή απόδοση αλλά η ποσότητα του μεταφερόμενου φωτός είναι μόλις 2500 lumen.

Luminous intensity [a.u.]

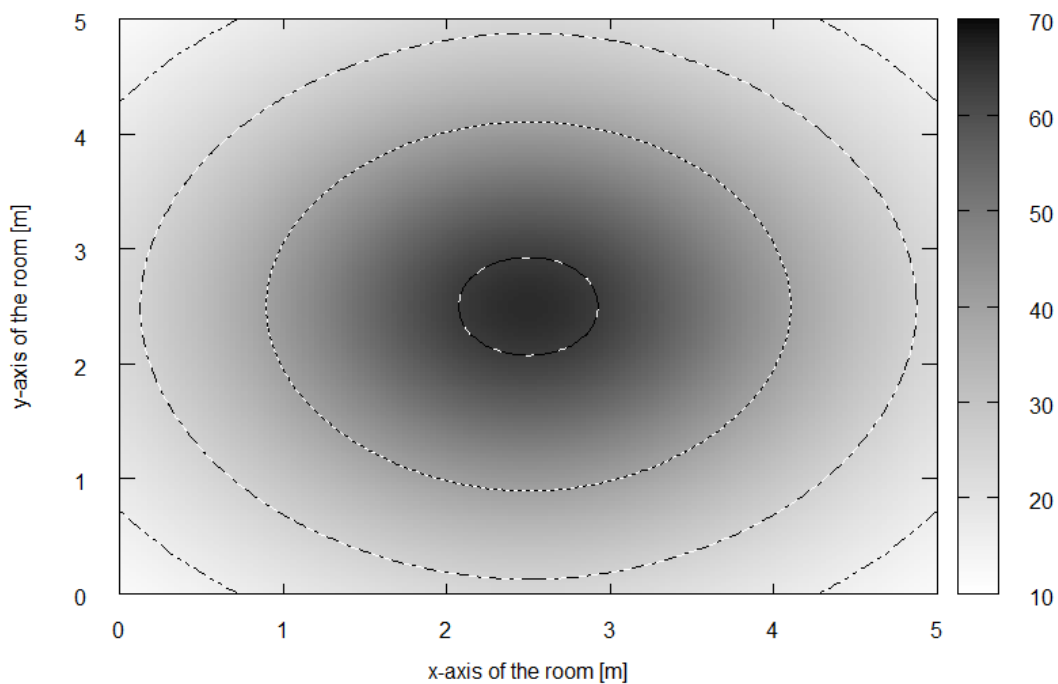


view: 120.000, 0.000000 scale: 1.00000, 1.00000

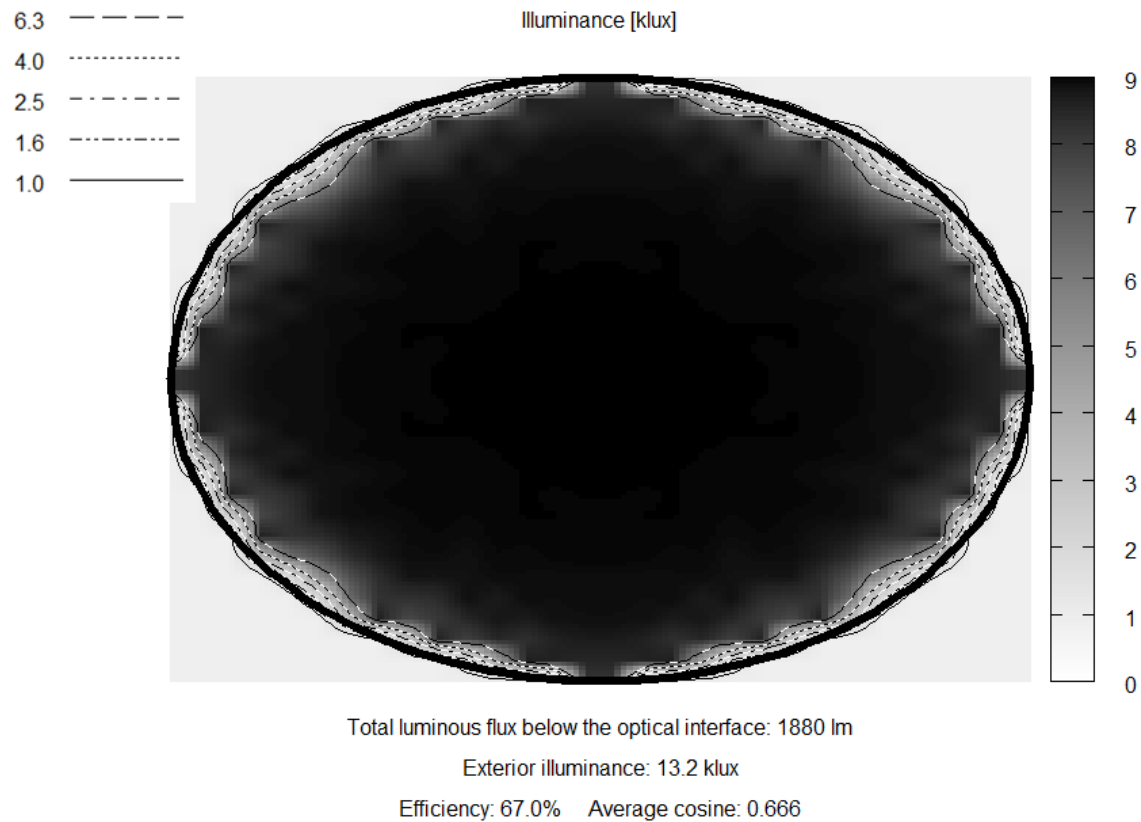
Η σχεδόν σφαιρική φωτεινή ένταση (0,738), διαδίδοντας προς τα κάτω την φωτεινή ροή.

Τέλος, η τελευταία περίπτωση για λαμπερτιανή επιφάνεια.

Illuminance [lux]

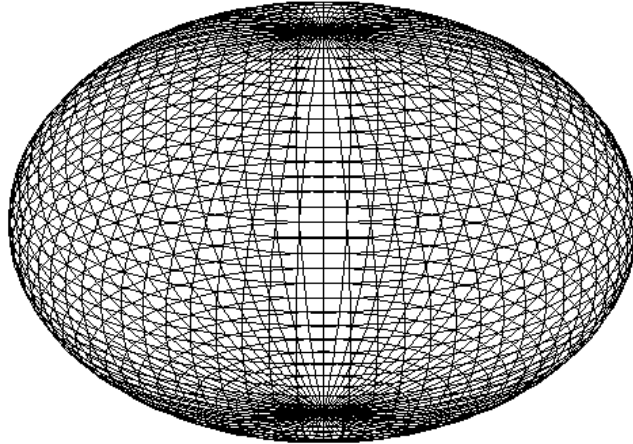


Η ένταση φωτισμού είναι μειωμένη σε σχέση του διάφανου διαχύτη λόγω του υλικού και της διάχυσης των ακτίνων. Συνεπώς, για συννεφιασμένο ουρανό η λαμπερτιανή επιφάνεια δεν επιφέρει κάποια βελτίωση αφού για διάφανο διαχύτη παρατηρείται συμμετρικότητα στην φωτεινή ένταση (ομόκεντρες καμπύλες isolux) και η χρήση του επιφέρει μείωση της έντασης φωτισμού.



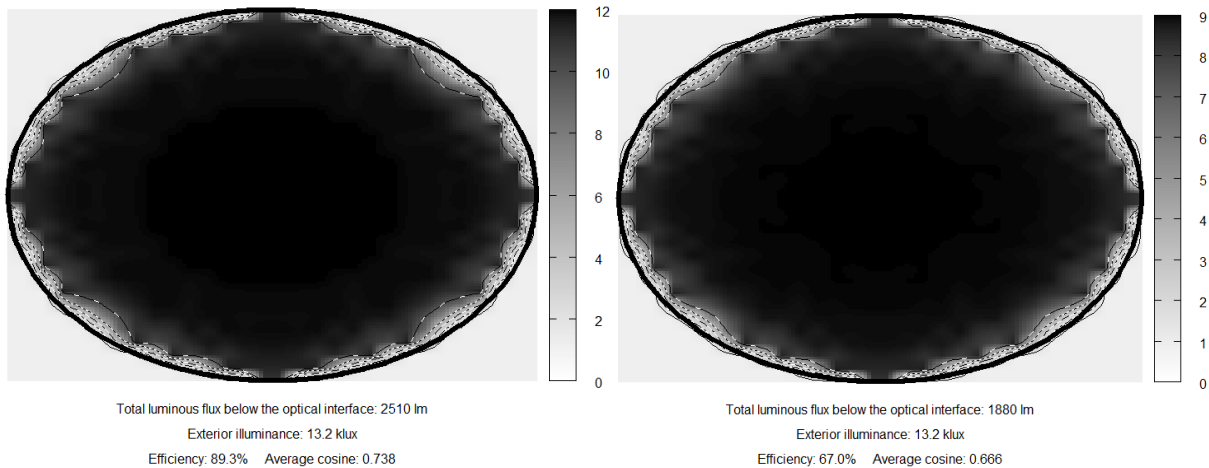
Η μειωμένη απόδοση από 89% σε 67% και μείωση του συνημιτόνου 0,738 σε 0,666, δηλαδή αύξηση της στερεάς γωνίας.

Luminous intensity [a.u.]



view: 120.000, 0.000000 scale: 1.00000, 1.00000

Η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων το επαληθεύει.



Συνεπώς, σε συννεφιασμένους ουρανούς κατά το χειμώνα δεν συνίσταται η χρήση λαμπεριανού διαχύτη αφού μειώνει την απόδοση, ενώ την ίδια περίοδο για μικρά μήκη φωτοσωλήνα κρίνεται αναγκαία η χρήση τέτοιου υλικού για να μην μετατοπίζεται η κυκλική επιφάνεια που επιτυγχάνεται το διάστημα μέγιστων εντάσεων φωτισμού, σε καθαρό ουρανό. Συνεπώς, προτείνεται η αύξηση του μήκους του ώστε η μετατόπιση να εξαλειφθεί αφού η αλλαγή του θόλου βάση επικρατούμενων συνθηκών του ουρανού δεν είναι εφικτή. Ιδιαίτερα για περιοχές στις οποίες παρουσιάζεται έντονη μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών, όπως η Ελλάδα. Για τον λόγο αυτό όπως αναφέρθηκε κρίνεται αναγκαία και η ετήσια μελέτη με κλιματικά δεδομένα για να εξεταστεί και η περίπτωση που θα ήταν εφικτή η εναλλαγή του διαχύτη.

Αντίθετα, το καλοκαίρι για καθαρό ουρανό είναι απαραίτητη η επιλογή διαχύτη με λαμπεριανό υλικό εξαιτίας εμφάνισης φωτεινών κηλίδων και δαχτυλιδιών αλλά και της μετατόπισης της κυκλικής επιφάνειας, αφού δεν θα ήταν δυνατή η τοποθέτηση κελιού παρα μόνο κατάλληλου για συγκέντρωση Ηλίων αλλά ενεργητικού συστήματος αφού η φωτεινή κηλίδα θα μετατοπίζεται βάση της πορείας του Ήλιου, αυξάνοντας όμως την πολυπλοκότητα. Για συννεφιασμένο καλοκαιρινό ουρανό και διάφανο υλικό παρατηρείται μεγαλύτερη ένταση φωτισμού σε μικρότερη όμως επιφάνεια, κατάλληλα όπως αναφέρθηκε με φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς για πολλούς Ήλιους. Τελικά και σε αυτήν την περίπτωση για την μείωση της πολυπλοκότητας κρίνεται η τοποθέτηση συμβατικού κελιού με λαμπεριανό υλικό διαχύτη.

Άρα για την επίτευξη σταθερών συνθηκών στη διάρκεια του χρόνου απαιτείται αύξηση του μήκους του φωτοσωλήνα και εαν είναι δυνατό διάφανος διαχύτης τον χειμώνα και το καλοκαίρι που επικρατούν υψηλές εξωτερικές εντάσεις φωτισμού λαμπεριανή επιφάνεια που προκαλεί διάχυση του φωτός. Έτσι είναι δυνατή η τοποθέτηση φωτοβολταϊκού επιφάνειας ενός τετραγωνικού μέτρου σε σταθερό σημείο ακριβώς κάτω από το κέντρο της κυκλικής διατομής του φωτοσωλήνα.

Τα ανωτέρω εξαγόμενα αποτελέσματα από τα προγράμματα φυσικού φωτισμού ήταν ποσοτικά και τα ποιοτικά αποτελέσματα εξάγονται από τους χρήστες του χώρου αφού έχει υλοποιηθεί η εγκατάσταση φυσικού ή τεχνητού φωτισμού. Η ένταση φωτισμού και η λαμπρότητα ανήκουν στην πρώτη κατηγορία ενώ στη δεύτερη ανήκουν η οπτική άνεση και η αποδοχή του αποτελέσματος, που όπως αναφέρθηκε μπορεί να μελετηθεί μελλοντικά προκειμένου να αποδοθεί και η όχληση της τοποθέτησης φωτοβολταϊκού προς τους χρήστες.

Κύριο ενδιαφέρον στην παρούσα μελέτη δίνεται στα ποσοτικά αποτελέσματα καθώς σκοπός είναι να μελετηθεί η δυνατότητα τοποθέτησης και τα όποια οφέλη μπορούν να προκύψουν στην παραγωγή ενέργειας. Σε επόμενη μελέτη θα μπορούσε να μελετηθεί και οι συνθήκες που δημιουργούνται στον χώρο και συγκεκριμένα η όχληση προς τους χρήστες του χώρου.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ένταση ακτινοβολίας σε ένα εξωτερικό χώρο είναι περίπου 80000 lux, και δεδομένου ότι σε εσωτερικό χώρο φωτιζόμενο υπό φωτοσωλήνα θα είναι περίπου 500 lux (αφού στην περιφέρεια γύρω του άξονα του φωτοσωλήνα το αποτέλεσμα μπορεί να φτάσει έως και 1000 lux), υπάρχει μια μείωση 160 φορές. Μια χονδρική εκτίμηση αποτελεί και ότι θα υπάρχει μείωση 160 φορές στην ισχύ δηλαδή περίπου στο 1 watt, και στην απόδοση του φωτοβολταϊκού δηλαδή από 20% σε 0,125%. Ωστόσο, δεν είναι απόλυτα σαφές αφού το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα στα εξωτερικά φωτοβολταϊκά για αυτό και παρουσιάζονται αποδόσεις της τάξης του ένα πέμπτου της διαθέσιμης ισχύος. Συνεπώς, σε εσωτερικά φωτοβολταϊκά η πυκνότητα ισχύος θα είναι όπως έχει ήδη αναφερθεί τόσο μειωμένη σε ισχύ όσο και σε φασματική απόκριση καθώς μπορεί να έχει απορριφθεί υπέρυθρη και υπεριώδης ακτινοβολία, άρα θα παρουσιάζονται και αυξημένες αποδόσεις μετατροπής ακτινοβολίας. Επίσης, ο κατάλληλος σχεδιασμός του κελιού με τέτοιο ενεργειακό διάκενο ώστε να συμπίπτει κατά το δυνατόν με την στενή ενεργειακή δέσμη της τεχνητής πηγής ή του εσωτερικού φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα και Προοπτικές

Όπως αναφέρθηκε σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν ο σχολιασμός της δυνατότητας τοποθέτησης φωτοβολταϊκών σε εσωτερικούς χώρους. Ως μια πιο ιδιότυπη τεχνική της τοποθέτησης ενσωματωμένων σε κτίρια που έχει ήδη υλοποιηθεί με επιτυχία κατά το παρελθόν αλλά σε μικρή

κλίμακα. Στην τελευταία περίπτωση η παραγόμενη ισχύς μπορεί να είναι στο ήμισυ των τυπικών φωτοβολταϊκών που τοποθετούνται σε ταράτσες. Για την περίπτωση των εσωτερικών φωτοβολταϊκών ωστόσο το συγκεκριμένο μέγεθος ενδέχεται να είναι μειωμένο σε ισχύ αλλά και σε χρονική διάρκεια. Στην περίπτωση που στόχος είναι η τροφοδότηση φορτίων σε ελάχιστες απαιτήσεις σε ισχύ, κυρίως ηλεκτρονικών διατάξεων η ισχύς είναι κάποιες δεκάδες mW έως κάποια Watt. Για την περίπτωση που εξετάστηκε είναι δυνατή η παραγωγή ενέργειας μεγαλύτερης ισχύος αφού η φωταγωγή του πλαισίου πραγματοποιείται από διάταξη φυσικού φωτισμού, τον φωτοσωλήνα που μπορεί να επιτύχει υψηλά ποσοστά φυσικού φωτισμού. Ωστόσο, ο χαρακτήρας του φωτισμού που παρέχεται είναι μεταβαλλόμενος σε ισχύ, και στον φωτιζόμενο χώρο, καθώς η κίνηση του Ήλιου κατά τη διάρκεια της μέρας μεταβάλλει την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας. Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα προσομοίωσης καταδεικνύεται ότι σε ένα στενό χώρο, κυλινδρικής διατομής, από την προβολή της περιμέτρου του φωτοσωλήνα στο δάπεδο η ένταση φωτισμού παραμένει σταθερή όσον αφορά στην μορφή της στο χώρο. Συνεπώς, μπορεί να τοποθετηθεί ένα πλαίσιο στο σημείο αυτό, αφού εκεί κατά τη διάρκεια της μέρας θα δεχθεί την μέγιστη κάθε φορά διαθέσιμη ισχύ που μεταφέρει ο φωτοσωλήνας στον εσωτερικό χώρο. Ωστόσο, η μεταβλητότητα της έντασης φωτισμού δεν μπορεί να αποφευχθεί παρά μόνο στη περίπτωση τοποθέτησης λαμπτήρα κατάλληλου φασματικού περιεχομένου για να μεγιστοποιείται η συλλογή φωτός από το φωτοβολταϊκό αλλά και η ικανοποίηση των συνθηκών φωτισμού που έχουν τεθεί βάση προτύπων. Από μελέτες της βιβλιογραφίας έχει αποδειχθεί ότι είναι εφικτή η επίτευξη απόδοσης 60% στην παραγωγή του κατάλληλου σχεδιασμένου φωτοβολταϊκού για τεχνητό φωτισμό, ενώ για περίπτωση φυσικού φωτισμού η ανωτέρω απόδοση βρίσκεται να είναι 10%. Προς την κατεύθυνση για ανάπτυξη βελτιστοποιημένου φωτοβολταϊκού κελιού κατάλληλου για εσωτερικούς χώρους πρέπει να δημιουργηθεί το κατάλληλο πλαίσιο μελέτης ανάπτυξης και παραγωγής αυτών, όπως έχει συμβεί και με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά εξωτερικών χώρων. Καθώς όποιος τύπος κελιού αναπτύσσεται σχεδιάζεται βάση εξωτερικών συνθηκών παραδείγματος χάριν της πρότυπης ακτινοβολίας ενός Ήλιου. Πρέπει, δηλαδή, να εφαρμοστεί μια πρότυπη εσωτερική ακτινοβολία εφόσον είναι εφικτό λόγω της πολυπλοκότητας του φάσματος της, καθώς οι ανακλάσεις, διαθλάσεις σε συνδυασμό με την πληθώρα υλικών αλλοιώνουν το φάσμα της ακτινοβολίας. Αναφορικά με την παρούσα μελέτη, για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων είναι δυνατή η χρήση του radiance για την προσομοίωση του φωτοσωλήνα και ενός κατάλληλου μοντέλου κελιού σε υπολογιστικό πρόγραμμα προκειμένου και να πραγματοποιηθεί μια ετήσια μελέτη παραγόμενης ενέργειας. Ωστόσο η όποια σύγκριση στην παραγόμενη ενέργεια σε σχέση με ένα εξωτερικό φωτοβολταϊκό δεν είναι ωφέλιμη αφού, σκοπός αποτελεί η καινοτόμα τοποθέτηση σε εσωτερικούς χώρους με σκοπό τροφοδότηση μελλοντικών φορτίων μικρής κλίμακας ηλεκτρικές συσκευές, αισθητήρες και όχι η παραγωγή ενέργειας για ιδιοκαταναλωση ή πώληση ενέργειας. Επίσης δεν υπάρχει ακόμα, εμπορική εφαρμογή για αυξημένες δυνατότητες παραγωγής ενέργειας κατάλληλη για εσωτερικούς χώρους ώστε να επιτρέψει και την όποια σύγκριση των δύο εφαρμογών.

Τέλος, τα αποτελέσματα από αυτήν τη διπλωματική και την μελέτη της βιβλιογραφίας καταδεικνύουν ότι είναι εφικτή και συμφέρουσα μια τέτοια τεχνική τοποθέτησης υπαρχόντων φωτοβολταϊκών σε κατάλληλη φωταγωγούμενη επιφάνεια κάτω ακριβώς του διαχύτη του φωτοσωλήνα ή βελτιστοποιημένων φωτοβολταϊκών σε εσωτερικούς χώρους καθώς και τα επιπλέον πλεονεκτήματα του φυσικού φωτισμού για βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης, μείωση ψυκτικών και φορτίων φωτισμού σε συνδυασμό με την παραγωγή ενέργειας από την τοποθέτηση αυτή των φωτοβολταϊκών

Επιπρόσθετες λυσεις αξιοποίησης Ήλιου

Τα οφέλη από την ενασχόληση με αυτή την διπλωματική ήταν αρχικά η διεξαγωγή μελέτης σύγκρισης των διαφόρων μεθόδων φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων αλλά και ο τρόπος και τα εργαλεία που καθιστούν κάτι τέτοιο εφικτό. Επίσης, η μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας και όλης της θεωρίας γύρω από αυτό (ηλιακή γεωμετρία) μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα εφαρμογών όπως την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε κτίρια, αγροκτήματα και γενικά κάθε είδους κατασκευή ή μέρος όπως ακόμα και αυτοκίνητα. Ο καλύτερος σχεδιασμός κτιρίων, γειτονιάς ακόμα και πόλεων, και γενικά κάθε εφαρμογή που βασίζεται ή μπορεί να βασιστεί στην ηλιακή ακτινοβολία (ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ηλιακός θερμοσίφωνας, ηλιακός κλιματισμός θέρμανση και ψύξη καθώς ακόμα και ηλιακός φούρνος για το μαγείρεμα φαγητού, ζεστού νερού χρήσης, θέρμανση ή ψύξη). Αποτελεί δηλαδή και μια προτροπή για διενέργεια καλύτερων μελετών σχεδιασμού ενός κτηρίου προκειμένου να λαμβάνονται υπόψιν μεταβλητές σε πολλούς τομείς του κτηρίου, προς μια ολιστική μελέτη για την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων που να ικανοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτηρίου. Με τις δυνατότητες που παρέχουν τα σύγχρονα υπολογιστικά προγράμματα είναι δυνατό να μελετηθούν διαφορετικές μεταβλητές από την παραγωγή ενέργειας την αποθήκευση τις απώλειες σε επίπεδο όχι μόνο κτηρίου αλλά και ολόκληρων γειτονιών προσομοιώνοντας έτσι το μικροκλίμα της περιοχής τις καταναλώσεις σχεδιάζοντας έτσι καλύτερα τα κτίρια αλλά και παράλληλα εξοικονομώντας ενέργεια και βελτιώνοντας τις συνθήκες διαβίωσης.

Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν και σε πλήθος άλλων καινοτόμων εφαρμογών τοποθέτησης φωτοβολταϊκών όπως για παράδειγμα σε αυτοκινητόδρομους, ποδηλατόδρομους, σε τεχνητά σκέπαστρα σιδηροδρομικών δικτύων, ή στην οροφή οχημάτων αυτοκίνητα, βάρκες.

Άλλη πιθανή τεχνική θα μπορούσε να είναι σε υπόγεια δωμάτια αποκλειστικά για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε δυσμενείς συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε ερήμους λόγω καλύτερου ελέγχου των συνθηκών. Τα οφέλη είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας του χώρου ή καλύτερη ψύξη με άλλες μεθόδους, η αποφυγή ρύπανσης και γήρανσης λόγω σκόνης και καιρικών συνθηκών καθώς και η προσαρμογή και ο έλεγχος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αναφορικά με τα φωτοβολταϊκά έχει μελετηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό, η εφαρμογή στη οποία θα διατεθεί η ενέργεια π.χ απομονωμένα συστήματα φάρoi, τηλεπικοινωνίες, αφαλάτωση, οικιακά φωτοβολταϊκά ή πάρκα και έγχυση ενέργειας στο δίκτυο, παρά το μέρος όπου θα τοποθετηθούν και υπό ποιες συνθήκες θα παραχθεί η ενέργεια (αυτοκίνητο, και γενικά μέσα μαζικής μεταφοράς, υπόγειο σπίτι). Επίσης μπορεί να έχει μελετηθεί, αν και σπάνια πραγματοποιείται ή εάν πραγματοποιείται δεν έχει πραγματοποιηθεί σωστά, η πιθανή όχληση ή η ελαχιστοποίηση των επιδράσεων λόγω θάμβωσης εξαιτίας της ανάκλασης ή του επιπλέον θερμικού φορτίου λόγω των απωλειών. Αλλά δεν υπάρχει πλαίσιο για την μελέτη παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη άλλες παραμέτρους εκτός από την ηλιακή γεωμετρία, και τις κλιματολογικές συνθήκες και τις σκιάσεις από σταθερά αντικείμενα. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο και με τις επιδοτήσεις που έχουν δοθεί για παραγωγή ενέργειας απο ΑΠΕ έχουν αναπτυχθεί και νέα εργαλεία όπως για παράδειγμα GIS συστήματα, μέσω ηλεκτρονικών χαρτών για την ενδεχόμενη παραγωγή από ταράτσες σπιτιών λόγω της προσφοράς χρηματοδοτήσεων σε πολίτες για τοποθέτηση σε ταράτσα, η οποία μελέτη γίνονταν βάση αλγορίθμου και δεν απαιτείται χρονοβόρα μελέτη από κάποιον μηχανικό. Γίνεται αντιληπτό ότι με την ανάπτυξη και διείσδυση μιας τεχνολογίας στην αγορά αναπτύσσονται τα κατάλληλα εργαλεία αλλά και η γνώση σχετικά με τον κλάδο, ώστε να μην αποκλείεται στο μέλλον και η εφαρμογή που προτάθηκε.

Κλείνοντας οφείλω να τονίσω ότι μια χώρα όπως η Ελλάδα να μην έχει αξιοποιήσει περαιτέρω την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται σχεδόν σε όλο το έτος για πληθώρα εφαρμογών και να εξαρτάται το ενεργειακό μείγμα της χώρας είτε από ορυκτά ρυπογόνα εγχώρια αποθέματα είτε από εισαγόμενα καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) σε βαθμό που ένα σπίτι θα μπορούσε να είχε εξασφαλίσει ενεργειακή επάρκεια για τη διάρκεια του έτους. Η πρώτη άλλωστε αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε στην πόλη της Ολύνθου, έπειτα από μια ενεργειακή κρίση και στην διάρκεια της Ιστορίας έμελλε να επανεφευρεθεί ακόμη τρεις φορές σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Λεξιλόγιο, ελληνικοί-αγγλικοί όροι

Luminous flux	Φ	Φωτεινή Ροή	Lumen	
Luminous Intensity	I	Φωτεινή Ένταση	Lumen/sr = cd	
Illuminance	E	Ένταση Φωτισμού	Lumen /m ² = lux	
Luminance	L	Λαμπρότητα (φωτεινότητα)	Lumen /m ² * sr = cd/sr	
Radiant energy	Q		Joule	
Radiant flux	Φ	Ραδιομετρική Ροή ενέργειας/ακτινοβολίας	Joule/sec=watt	
Radiant Intensity	I	Ραδιομετρική Ένταση ακτινοβολίας	Watt/sr	
Radiance	L	Ραδιομετρική λαμπρότητα	Watt/m ² * sr	
Irradiance	E	Πυκνότητα ισχύος, ένταση ακτινοβολίας ή ηλιακή ακτινοβολία	W/m ²	Παράγωγος, προσπίπτει
Radiosity	J		W/m ²	Ακτινοβολείται
Insolation, irradiation			Wh/m ²	Ολοκλήρωμα, ενέργεια
Light Emitting diode	LED	Δίοδος Εκπομπής Φωτός		
Compact Fluorescent lamp	CFL	Συμπαγής Λαμπτήρας Φθορισμού		
Hollow light guide		Κούφιος(κενός) φωτοσωλήνας-φωτοαγωγός		

Ανασκόπηση μελετών στη βιβλιογραφία

Η προτεινόμενη σειρά μελέτης αποτελεί την ανάγνωση βιβλίων φυσικού φωτισμού προκειμένου να κατανοηθεί ο κλάδος αυτός και του φωτισμού γενικότερα. Το βιβλίο IES Lighting Handbook αποτελεί εάν και το μεγάλο όγκο του απαραίτητο εγχειρίδιο μελέτης αν και δεν ενδείκνυται για κάποιον

αρχάριον εξαιτίας του πλούτου πληροφοριών, για αυτό μπορεί να γίνει σε μεταγενέστερο χρόνο η μελέτη του. Ύστερα, η μελέτη του βιβλίου *Daylight in Buildings- A source book on daylighting systems and components* με την κατηγοριοποίηση λύσεων φυσικού φωτισμού, θα βοηθήσει στην κατανόηση των λύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να πετύχουμε τον φυσικό φωτισμό και τις καινοτόμες εφαρμογές τοποθέτησης φωτοβολταϊκό (στο ταβάνι για φωτεινά ράφια, φωτοβολταϊκό αντί ανοδιωμένο αλουμίνιο για Anidolic Ceilings). Η κατηγοριοποίηση των διατάξεων του φυσικού φωτισμού, έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος άλλων αναφορών, καταδεικνύοντας την χρησιμότητά του. Τέλος, εμβάθυνση μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρονολογική μελέτη των ακαδημαϊκών ερευνών σχετικά με τον φυσικό φωτισμό, δείκτες φυσικού φωτισμού αφού και τα βιβλία αλλά και τα προγράμματα προσομοίωσης βασίζονται σε αυτές τις έρευνες. Ακόμη παραπέμπεται ο μελετητής στις έρευνες προκειμένου να αξιοποιήσει καλύτερα τις δυνατότητες και να τα κατανοήσει τα προγράμματα προσομοίωσης.

BiPV φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτήρια

Στο Memari (2014) υπάρχει και μια συνοπτική ανασκόπηση των μελετών στην βιβλιογραφία για τα φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια και μια συνοπτική παρουσίαση των μελετών. Ωστόσο, η πιο ενδελεχής έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Biyik et. al. (2017). Στο βιβλίο *Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures*, μπορεί να αναζητήσει κανείς πληθώρα παραδείγματα εφαρμογών των φωτοβολταϊκών ενσωματωμένα σε κτίρια που αποτελούν μάλιστα και από τις πρώτες εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν.

L. Maturi, G. Belluardo, D. Moser, and M. Del Buono, "BiPV system performance and efficiency drops: Overview on PV module temperature conditions of different module types," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1311–1319, 2014.

A. Memari, L. Iulo, R. Solnosky, and C. Stultz, "Building Integrated Photovoltaic Systems for Single Family Dwellings: Innovation Concepts," *Open J. Civ. ...*, no. June, pp. 102–119, 2014.

P. Eiffert and G. J. Kiss, *Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures A Sourcebook for Architects*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2000.

E. Biyik et al., "A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 833–858, 2017.

M. Tabakovic et al., "Status and Outlook for Building Integrated Photovoltaics (BIPV) in Relation to Educational needs in the BIPV Sector," *Energy Procedia*, vol. 111, no. September 2016, pp. 993–999, 2017.

Ποσοτικοί δείκτες φυσικού φωτισμού

Χρήσιμη είναι η μελέτη του δωρεάν μαθήματος από το MIT, καθώς αναλύεται εποπτικά ο φυσικός φωτισμός. Η μελέτη του Tregenza, για το δείκτη DF καθώς αποτελεί για πολλά χρόνια το σημείο αναφοράς για τις μελέτες φυσικού φωτισμού. Ωστόσο έχουν προταθεί καλύτεροι δείκτες όπως UDI (Nabil), DA (Association Suisse des Electriciens 1989), cDA (Rogers 2006), DPF (Zhang 2000) μεταξύ άλλων.

Christoph Reinhart 4.430 Daylight ocw MIT

P. R. et. al. Tregenza, "Daylight coefficients," *Light. Res. Technol.*, vol. 15, no. March, pp. 65–71, 1983.

A. Nabil and J. Mardaljevic, "Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors," *Energy Build.*, vol. 38, no. 7, pp. 905–913, 2006.

J. Mardaljevic, "Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients," Loughborough University, 1999.

C. F. Reinhart, J. Mardaljevic, and Z. Rogers, "Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design," *LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. North Am.*, vol. 3, no. 1, pp. 7–31, 2006.

Φυσικός Φωτισμός

a Tzempelikos and a K. Athienitis, "The effect of shading design and control on building cooling demand," *Passiv. Low Energy Cool. Built Environ.*, no. May, pp. 953–958, 2005.

P. Littlefair, "Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment," *Sol. Energy*, vol. 70, no. 3, pp. 177–185, 2001.

R. P. Leslie, "Capturing the daylight dividend in buildings: Why and how?," *Build. Environ.*, vol. 38, no. 2, pp. 381–385, 2003.

O. Boccia, F. Chella, and P. Zazzini, "Natural light from a wall in buildings: Experimental analysis of the ventilated illuminating wall performances," *Sol. Energy*, vol. 108, pp. 178–188, 2014.

L. Bellia, G. Spada, and A. Pedace, "Lit environments quality: A software for the analysis of luminance maps obtained with the HDR imaging technique," *Energy Build.*, vol. 67, pp. 143–152, 2013.

C. Balocco and R. Calzolari, "Natural light design for an ancient building: A case study," *J. Cult. Herit.*, vol. 9, no. 2, pp. 172–178, 2008.

Διατάξεις φυσικού φωτισμού

IEA, *Daylight in Buildings- A source book on daylighting systems and components*, A Report of IEA SHC Task 21, June, 2000.

A. A. Freewan, "Developing daylight devices matrix with special integration with building design process," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 15, pp. 144–152, 2015.

B. Bouchet and M. Fontoynt, "Day-lighting of underground spaces: Design rules," *Energy Build.*, vol. 23, no. 3, pp. 293–298, 1996.

M. G. Nair, K. Ramamurthy, and A. R. Ganesan, "Classification of indoor daylight enhancement systems," *Light. Res. Technol.*, vol. 46, no. 3, pp. 245–267, 2014.

P. J. Littlefair, "Review Paper: Innovative daylighting: Review of systems and evaluation methods," *Light. Res. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–17, 1990.

S. N. F. S. Husin and Z. Y. H. Harith, "The Performance of Daylight through Various Type of Fenestration in Residential Building," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 36, no. June 2011, pp. 196–203, 2012.

X. Zhang, "Daylight performance of tubular solar light pipes," 2002.

X. Zhang and T. Muneer, "Mathematical model for the performance of light pipes," *Light. Res. Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 141–146, 2000.

E. International and I. Conference, "SKYVISION : A SOFTWARE TOOL TO CALCULATE THE OPTICAL CHARACTERISTICS AND DAYLIGHTING PERFORMANCE OF SKYLIGHTS A . Laouadi , A . Galasiu , M . Atif , and A . Haqqani Indoor Environment Research Program Institute for Research in Construction , National Rese," pp. 705–712, 2003.

D. Knera, E. Szczepańska-Rosiak, and D. Heim, "Providing an Interior Daylight Environment Through the Use of Light Pipes," *Tech. Trans. Civ. Eng.*, vol. 3–B, 2014.

B. Malet-Damour, H. Boyer, A. H. Fakra, and M. Bojic, "Light pipes performance prediction: Inter model and experimental confrontation on vertical circular light-guides," *Energy Procedia*, vol. 57, no. 0, pp. 1977–1986, 2014.

A. Schou, "Investigation of light pipe simulation algorithms," DTU, 2012.

S. Darula, R. Kittler, and M. Kocifaj, "Luminous effectiveness of tubular light-guides in tropics," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 11, pp. 3460–3466, 2010.

Daylighting Fact Sheet and FAQ by SOLATUBE

Προγράμματα προσομοίωσης

B. Malet-damour, H. Boyer, A. H. Fakra, M. Bojic, and L. Pipes, "Light Pipes Performance Prediction : inter model and light-guides To cite this version : HAL Id : hal-01101841 2013 ISES Solar World Congress Light pipes performance prediction : inter model and experimental confrontation," 2015. Τελευταία σελίδα

A. Iversen, N. Roy, M. Hvass, J. Christoffersen, O. Werner, and J. Kjeld, *Daylight calculations in practice*. 2013.

R. G. Bhavani and M. A. Khan, "Advanced Lighting Simulation Tools for Daylighting Purpose: Powerful Features and Related Issues," *Trends Appl. Sci. Res.*, pp. 345–363, 2011.

D. Jenkins and T. Muneer, "Modelling light-pipe performances - a natural daylighting solution," *Build. Environ.*, vol. 38, no. 7, pp. 965–972, 2003.

A. Bartzokas, S. Darula, H. D. Kambezidis, and R. Kittler, "Sky luminance distribution in Central Europe and the Mediterranean area during the winter period," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 65, no. 1, pp. 113–119, 2003.

L. M. Fraas, W. R. Pyle, and P. R. Ryason, "Concentrated and piped sunlight for indoor illumination.," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 4, pp. 578–82, 1983.

S. Darula, F. Kundracik, M. Kocifaj, and R. Kittler, "Tubular light guides: Estimation of indoor illuminance levels," *LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. North Am.*, vol. 6, no. 3, pp. 241–252, 2010.

M. Kocifaj, S. Darula, and R. Kittler, "HOLIGILM: Hollow light guide interior illumination method - An analytic calculation approach for cylindrical light-tubes," *Sol. Energy*, vol. 82, no. 3, pp. 247–259, 2008.

M. Kocifaj, F. Kundracik, S. Darula, and R. Kittler, "Theoretical solution for light transmission of a bended hollow light guide," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 8, pp. 1422–1432, 2010.

S. Selkowitz, L. Berkeley, and S. Selkowitz, "Light guide design principles," no. December, 2014.

Προσομοίωση φωτοσλήνα, φωτοβολταϊκών

H. Bellia, R. Youcef, and M. Fatima, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB," *NRIAG J. Astron. Geophys.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–61, 2014.

L. Z. Broderick, B. R. Albert, B. S. Pearson, L. C. Kimerling, and J. Michel, "Design for energy: Modeling of spectrum, temperature and device structure dependences of solar cell energy production," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 136, pp. 48–63, 2015.

C. Cañete, J. Carretero, and M. Sidrach-de-Cardona, "Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions," *Energy*, vol. 65, pp. 295–302, 2014.

K. Ruhle, S. W. Glunz, and M. Kasemann, "Towards new design rules for indoor photovoltaic cells," 2012 38th IEEE Photovolt. Spec. Conf., no. June 2012, pp. 002588–002591, 2012.

M. F. Müller, "Indoor Photovoltaics: Efficiencies, Measurements and Design," *Sol. Cell Nanotechnol.*, pp. 203–222, 2013.

A. Phinikarides, G. Makrides, B. Zinsser, M. Schubert, and G. E. Georghiou, "Analysis of photovoltaic system performance time series: Seasonality and performance loss," *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 51–63, 2015.

Βιβλία

D. C., Prichard, *Lighting*, London : Longman Scientific & Technical, 1995

Tom Markvart and Luis Castaner., *Solar cells : materials, manufacture and operation*, Oxford : Elsevier, 2006, c2005

Jef Poortmans and Vladimir Arkhipov, *Thin film solar cells : fabrication, characterization, and applications*, Chichester : John Wiley & Sons, c2006

Φ. Τόπαλης, Λ. Οικονόμου, Σ. Κουρτέση, *Φωτοτεχνία, Τζίολα*, 2010

Κ. Δέρβος, *Φωτοβολταϊκά από τη Θεωρία στην Πράξη*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2013