



# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ RADIANCE

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΜΟΣΧΟΠΟΥΛΟΣ ΠΕΤΡΟΣ

Επιβλέπων:  
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΠΟΥΛΙΕΖΟΣ  
Καθηγητής, Διευθυντής Εργαστηρίου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:  
Καθ. Αναστάσιος Πουλιέζος (επιβλέπων)  
Επ.Καθ. Σπύρος Παπαευθυμίου  
Επ.Καθ. Φώτης Κανέλλος



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχήν θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου κ. Αναστάσιο Πουλιέζο για την ανιδιοτελή και συνεχή καθοδήγηση του και τη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Άρη Τσαγκρασούλη του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την παροχή όλων των δεδομένων για το Radiance.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου για τη στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος ευχαριστώ τους φίλους μου για τις όμορφες στιγμές στα πέντε χρόνια φοίτησής μας στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Μοσχόπουλος Πέτρος

*Υπάρχουν δυο τρόποι για να λάμπεις:  
είτε να αντανakλάς το φως είτε να το δημιουργείς.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται με τη μελέτη φωτισμού ενός χώρου με χρήση του λογισμικού Radiance και τη σύνδεση αυτού με το πρόγραμμα αριθμητικής υπολογιστικής, το Matlab. Το Radiance αποτελεί ένα πακέτο λογισμικού για ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πρόκειται για ένα ερευνητικό εργαλείο με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό της ορατής ακτινοβολίας στο χώρο. Το Radiance πλεονεκτεί έναντι άλλων προγραμμάτων φωτισμού διότι χρησιμοποιεί τεχνική προσομοίωσης ray-tracing που επιτρέπει τον υπολογισμό των ανακλάσεων σε όλες τις επιφάνειες του χώρου στο τελικό αποτέλεσμα. Το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης περιλαμβάνει την κατασκευή της γεωμετρίας του χώρου, δηλαδή του δωματίου μέσω εντολών μοντελοποίησης του προγράμματος και την εισαγωγή των φωτιστικών σε αυτό. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο υπολογισμός του φυσικού φωτισμού σε ωριαία βάση. Το τρίτο στάδιο της εργασίας περιλαμβάνει τον υπολογισμό της έντασης του φωτισμού σε συγκεκριμένα σημεία. Το τελικό αποτέλεσμα δηλαδή το άθροισμα των τιμών του τεχνητού και του φυσικού φωτισμού πραγματοποιείται και παρουσιάζεται με τη βοήθεια του Matlab.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the lighting study of an area using Radiance software and connecting this software with the numerical computational program, Matlab. The Radiance is a software package for PC. This is a research tool for the accurate calculation and prediction of the visible radiation in a certain space. The main advantage of Radiance is that it uses the simulation technique of image-oriented ray-tracing that allows the calculation of reflections on all the space surfaces in the final result. The first stage of the simulation includes the construction of space geometry, meaning the room through modeling commands and the importation of lights. Then is performed the calculation of natural lighting on an hourly basis. The third stage of this diploma thesis includes the calculation of the intensity of light at specific points. The final result, which is the sum value of the artificial and natural lighting is carried out and is presented with the help of Matlab.

## Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή .....	7
Κεφάλαιο 1 Φως .....	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Θεμελιώδεις μεγέθη και νόμοι της φωτοτεχνίας.....	9
1.2.1 Ορισμοί.....	9
1.2.2 Φωτομετρικοί νόμοι .....	12
Κεφάλαιο 2 Φυσικός φωτισμός .....	15
2.1 Γενικά.....	15
2.2 Συστήματα φυσικού φωτισμού .....	17
Κεφάλαιο 3 Τεχνητός φωτισμός.....	25
3.1 Γενικά.....	25
3.2 Χαρακτηριστικά λαμπτήρων.....	26
3.3 Κατηγορίες λαμπτήρων.....	30
3.4 Κατηγορίες φωτισμού και φωτιστικών .....	37
Κεφάλαιο 4 Συστήματα ελέγχου φωτισμού.....	39
Κεφάλαιο 5 Radiance.....	44
5.1 Γενικά.....	44
5.2 Μεθοδολογία λογισμικού.....	45
5.3 Περιγραφή σκηνικού.....	46
5.4 Image rendering.....	56
Κεφάλαιο 6 Προσομοίωση .....	57
6.1 Γενικά.....	57
6.2 Τεχνητός φωτισμός .....	57
6.3 Φυσικός φωτισμός.....	64
6.4 Προεπισκόπηση προσομοίωσης.....	74
Κεφάλαιο 7 Σύζευξη Radiance - Matlab .....	79
Βιβλιογραφία .....	84

## Εισαγωγή

Το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη φωτισμού ενός γραφείου με χρήση του Radiance το οποίο είναι ένα πακέτο ελεύθερου λογισμικού που υπολογίζει με ακρίβεια την ορατή ακτινοβολία στο χώρο. Ο κύριος στόχος είναι η καταγραφή της συνεισφοράς τόσο του τεχνητού όσο και του φυσικού φωτισμού σε συγκεκριμένα σημεία έτσι ώστε τα δεδομένα αυτά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα διαφόρων αλγορίθμων ελέγχου. Η εργασία χρησιμοποιεί στοιχεία και δεδομένα από το ερευνητικό έργο Θαλής-ΕΜΠ: «Ανάπτυξη ενός καινοτόμου, ευφυούς συστήματος, με ψηφιακό οπτικό αισθητήρα CCD για βέλτιστη διαχείριση του τεχνητού φωτισμού εσωτερικών χώρων και εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της αξιοποίησης του φυσικού φωτισμού» με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθηγητή Φ. Τοπαλή.

Κάθε στιγμή της καθημερινότητας του ο άνθρωπος έχει την ανάγκη να βρίσκεται σε χώρους με συνθήκες καλού και σωστού φωτισμού καθώς έτσι διασφαλίζεται η άνεση και η ευχαρίστηση του και αυξάνεται η παραγωγικότητα και η ασφάλεια του. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο φωτισμός στο χώρο που εργαζόμαστε ή στο χώρο κατοικίας μας παίζει σημαντικό ρόλο στην καθημερινότητά μας καθώς αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας που καταναλώνουμε καθημερινά.

Μέσα από την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας έχουν αναπτυχθεί τεχνικές και συστήματα για τον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού και την αξιοποίηση στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό του φυσικού φωτισμού.

Αξιίζει να σημειωθεί ότι ο τεχνητός φωτισμός, των κτιρίων που στεγάζουν γραφεία, καταναλώνει σημαντικό ποσοστό της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας ολόκληρου του κτιρίου όπως παρουσιάστηκε από τον Δρ. Σανταμούρη(Santamouris et al. 1994) και τον Dr. Lam (Lam et al. 2003). Σύμφωνα με την έρευνα του Δρ. Σανταμούρη τα τεχνητά φώτα καταναλώνουν το 10% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας με βάση τις μετρήσεις σε κτίσματα στην Ελλάδα[1]. Τα σύγχρονα συστήματα φωτισμού βασίζονται στους λαμπτήρες φθορισμού και κάποια άλλα ακόμα πιο προηγμένα στην αυξομείωση της στάθμης του φωτισμού (dimming) με τη χρήση ηλεκτρονικών ballast που αντικατέστησαν τα μαγνητικά. Μέσω του συνδυασμού της αυξομείωσης της στάθμης του τεχνητού φωτισμού και των σύγχρονων συστημάτων αξιοποίησης φυσικού φωτισμού, σύμφωνα με τον Raphael (Raphael 2011) μπορεί να μειωθούν περαιτέρω οι απαιτήσεις τεχνητού φωτισμού[2].

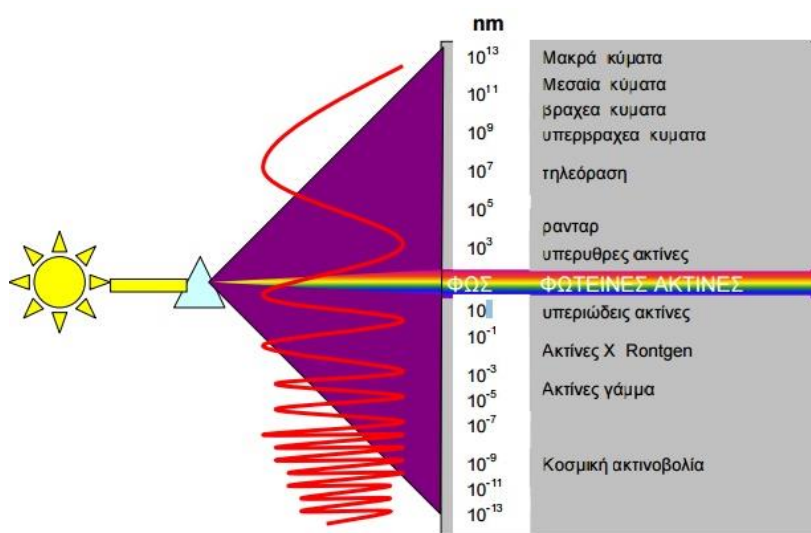
Εν κατακλείδι τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου φωτισμού συμβάλουν τόσο στο προσαρμοσμένο στις ανάγκες μας φωτισμό των χώρων όσο και στην εξοικονόμηση ενέργειας.



## Κεφάλαιο 1 Φως

### 1.1 Γενικά

Φως ονομάζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανιχνεύει και αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος μέσω της όρασης. Το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ορίζουν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα το οποίο εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες ως το άπειρο.[3]



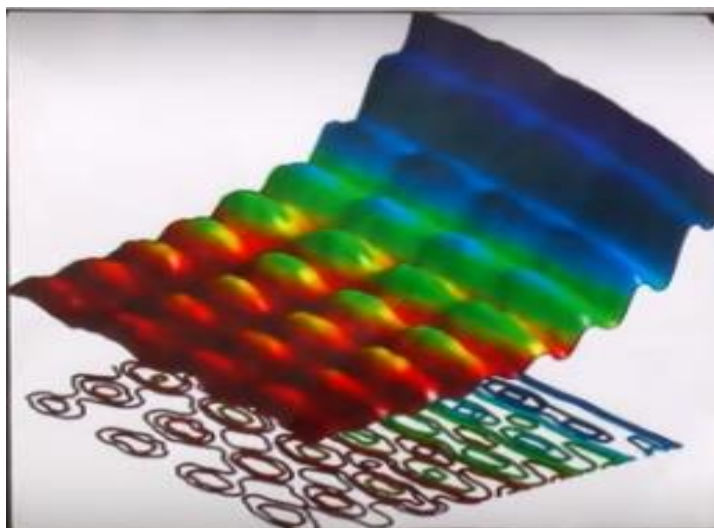
Εικ. 1.1 : Τιμές ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Σχετικά με τη φύση του φωτός υπάρχουν δύο θεωρίες. Η πρώτη ανήκει στο Newton ο οποίος υποστήριξε ότι το φως έχει μοριακή υπόσταση, ενώ η δεύτερη θεωρία που διατυπώθηκε από το Huygens αναφέρεται στο φως ως κύμα. Στη σύγχρονη ιστορία της επιστήμης πειράματα έχουν αποδείξει ότι η κυματική φύση του φωτός μπορεί να εκδηλωθεί παράλληλα με τη σωματιδιακή του συμπεριφορά.

Με επικεφαλής τον φυσικό Φαμπρίτσιο Καρμπόνε από το EPFL, Ελβετοί ερευνητές χρησιμοποίησαν ηλεκτρόνια για να εξασφαλίσουν το στιγμιότυπο. Συγκεκριμένα, «βομβάρδισαν» με παλμούς λέιζερ ένα μεταλλικό σύρμα νανομετρικών διαστάσεων, ώστε να προσδώσουν ενέργεια στα φορτισμένα σωματίδια του σύρματος, τα οποία άρχισαν να ταλαντώνονται. Το φως διαδιδόταν μέσα στο σύρμα σε δύο κατευθύνσεις, όπως τα αυτοκίνητα σε μια λεωφόρο. Όταν συναντήθηκαν τα δύο κύματα αντίθετων κατευθύνσεων, τότε σχημάτισαν ένα νέο στάσιμο κύμα, το οποίο ονομάζεται έτσι επειδή στην πραγματικότητα δεν διαδίδει ενέργεια στον χώρο.

Αυτό το στάσιμο κύμα λειτούργησε ως η πηγή φωτός στο πείραμα, ακτινοβολώντας μέσα στο σύρμα. Επομένως, οι επιστήμονες εξέπεμπαν δέσμες ηλεκτρονίων κοντά στο σύρμα, χρησιμοποιώντας τις για να απεικονίσουν το στάσιμο κύμα φωτός.

Καθώς τα ηλεκτρόνια αλληλοεπιδρούσαν με το στάσιμο κύμα, άλλα επιταχύνονταν και άλλα επιβραδύνονταν. Χρησιμοποιώντας ένα μικροσκόπιο για να αποτυπώσουν τις θέσεις όπου γινόταν αυτή η μεταβολή στην ταχύτητα, οι επιστήμονες μπόρεσαν να οπτικοποιήσουν το στάσιμο κύμα. (L Piazza et al., 2015)



Εικ.1.2 : Οπτικοποίηση στάσιμου κύματος

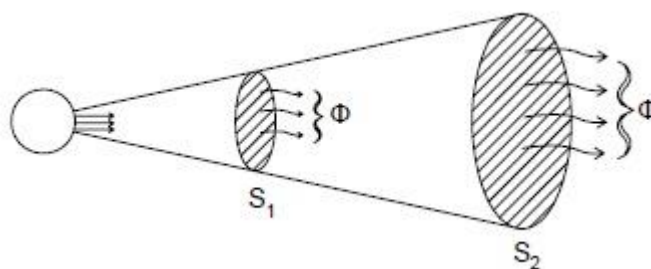
Παρόλο που με αυτό το φαινόμενο εκδηλώνονταν η κυματική φύση του φωτός, ταυτόχρονα αποκάλυπτε και τη σωματιδιακή του συμπεριφορά. Όταν τα ηλεκτρόνια διέρχονταν κοντά από το στάσιμο κύμα, τότε «προσέκρουαν» στα φωτόνια. Όπως αναφέρθηκε πριν, έτσι άλλαζε η ταχύτητά τους, κάνοντάς τα να κινούνται είτε ταχύτερα είτε πιο αργά.

Αυτή η αλλαγή στην ταχύτητα εμφανιζόταν σαν ανταλλαγή ενεργειακών «πακέτων» ανάμεσα στα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, με τα «πακέτα» αυτά να μαρτυρούν πως το φως στο σύρμα συμπεριφερόταν και σαν να αποτελείται από σωματίδια.[4]

## 1.2 Θεμελιώδεις μεγέθη και νόμοι της φωτοτεχνίας

### 1.2.1 Ορισμοί

- Φωτεινή ροή



Σχήμα.1.1 : Ροή ακτινοβολίας  $\Phi$

Η φωτεινή ροή  $\Phi$  ορίζεται η στοιχειώδης φωτεινή ενέργεια  $dQ$  που εκπέμπει μία σημειακή φωτεινή πηγή τοποθετημένη στην κορυφή ενός κώνου σε χρόνο  $dt$  προς το χρόνο αυτό[5] :

$$\Phi = \frac{dQ}{dT}$$

Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει ότι το μέγεθος της φωτεινής ροής  $\Phi$  είναι στην πραγματικότητα η φωτεινή ισχύς, επειδή εκφράζει την ποσότητα της φωτεινής ισχύος που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η μονάδα μέτρησής της είναι το lumen (lm)[5].



Σχήμα. 1.2 : Τρόπος μετάδοσης φωτεινής ροής

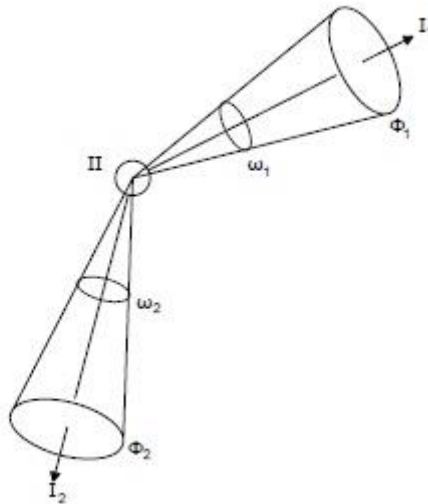
- **Φωτεινή ενέργεια**

Με τον όρο φωτεινή ενέργεια  $Q$  εννοείται η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από μία πηγή, η οποία γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Η φασματική ενέργεια ακτινοβολίας  $W_\lambda$  καθορίζει μία πηγή ακτινοβολίας που εκπέμπει ενέργεια, κατανεμημένη ανομοιόμορφα στο φάσμα εκπομπής της πηγής συναρτήσει του μήκους κύματος  $\lambda$ . Το κλάσμα της Ενέργειας  $W$  που εκπέμπεται στη ζώνη κύματος από 380 έως 780 nm είναι η ενέργεια του ορατού φωτός.

$$Q = \int_{380nm}^{780nm} V_\lambda \cdot W_\lambda \cdot d\lambda$$

,όπου  $V_\lambda$  είναι ο συντελεστής φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού[5].

- Φωτεινή ένταση



Σχήμα. 1.3 :Ένταση φωτεινής πηγής  $I$

Η φωτεινή ένταση ή ένταση φωτεινής πηγής  $I$  ορίζεται σαν ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής  $d\Phi$  που εκπέμπει μία σημειακή φωτεινή πηγή μέσα σε μία στοιχειώδη στερεά γωνία  $d\omega$  προς την γωνία αυτή :

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης  $I$  είναι η cd (candela) :

$$candela = \frac{lumen}{sterad}$$

Από τον ορισμό αυτό προκύπτει ότι η φωτεινή ένταση  $I$  έχει τις ίδιες διαστάσεις με τη φωτεινή ροή  $\Phi$  γιατί το sterad είναι αδιάστατο μέγεθος.

Η συνολική φωτεινή ροή (ισχύς)  $\Phi_{ολ}$  που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις υπολογίζεται αν είναι γνωστή η φωτεινή ένταση από τη σχέση [5] :

$$\Phi_{ολ} = \int_0^{4\pi} I \cdot d\omega$$

- Ένταση φωτισμού επιφάνειας

Ένταση φωτισμού  $E$  ή φωτισμός επιφάνειας ορίζεται ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής  $d\Phi$  που πέφτει κάθετα σε μία στοιχειώδη επιφάνεια  $dS$  προς την επιφάνεια αυτή :

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Η ένταση φωτισμού  $E$  δίνεται με τη μονάδα :

$$lux: lx = \frac{lm}{m^2}$$

- **Λαμπρότητα**

Η λαμπρότητα  $L$  ορίζεται σαν ο λόγος της φωτεινής έντασης  $I$  της πηγής στην κατεύθυνση του παρατηρητή προς το εμβαδόν  $S$  της επιφάνειας της πηγής το οποίο βλέπει ο παρατηρητής:

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha}$$

Από τον ορισμό της λαμπρότητας είναι προφανές ότι είναι διανυσματικό μέγεθος και μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του παρατηρητή της φωτεινής πηγής. Η λαμπρότητα δίνεται με τη μονάδα  $cd/m^2$ , που μερικές φορές ονομάζεται Nit (nt). [5]

- **Φωτεινή σχετική ικανότητα**

Ορίζεται ως η πυκνότητα της φωτεινής ροής που εκπέμπεται από σημείο μίας επιφάνειας. [6]

$$B = \frac{d\Phi}{dA}$$

- **Ολική φωτεινή ροή**

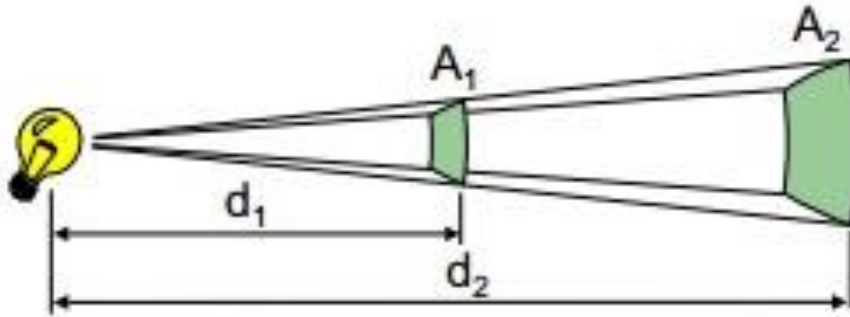
Η ολική φωτεινή ροή είναι η γεωμετρικά συνολική φωτεινή ροή μίας πηγής και ορίζεται ως :[6]

$$\Phi_{o\lambda} = \int_{\Omega} I d\Omega$$

### 1.2.2 Φωτομετρικοί νόμοι

- Ο νόμος των αντίστροφων τετραγώνων

Όταν η φωτεινή ένταση μίας σημειακής πηγής είναι γνωστή. Ο φωτισμός που παράγει σε μία ορισμένη απόσταση μπορεί να υπολογισθεί με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου.



Σχήμα 1.4 : Νόμος των αντίστροφων τετραγώνων

Οι επιφάνειες  $A_1$  και  $A_2$  σχηματίζουν και οι δύο την ίδια στερεά γωνία με τη φωτεινή πηγή. Καθώς το φως ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή, και οι δύο παρακολουθούν την ίδια φωτεινή ροή. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι περιοχές τους διαφέρουν, ο φωτισμός που αυτή η ροή παράγει στις επιφάνειες δεν είναι ο ίδιος και εξαρτάται από την περιοχή πάνω στην οποία πέφτει το φως και είναι αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή :

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Ένας εναλλακτικός τρόπος γραφής του νόμου είναι:

$$I = E_1 * d_1^2 = E_2 * d_2^2$$

Αυτός είναι σωστός μόνο αν ο απαιτούμενος φωτισμός είναι σε ένα επίπεδο κάθετο προς τη φωτεινή πηγή και αν η πηγή είναι σημειακή. Παρόλο αυτά, σε πρακτικές εφαρμογές ο τύπος παράγει στοιχεία με ακρίβεια 1%, σε περίπτωση που η απόσταση από τη πηγή φωτός είναι τουλάχιστον πενταπλάσια της μεγαλύτερης διάστασης της πηγής. Αν η επιφάνεια δεν είναι κάθετη προς τον τρόπο με τον οποίο ταξιδεύει το φως, τότε ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου πρέπει να τροποποιηθεί με διόρθωση του συνημίτονου.[7]

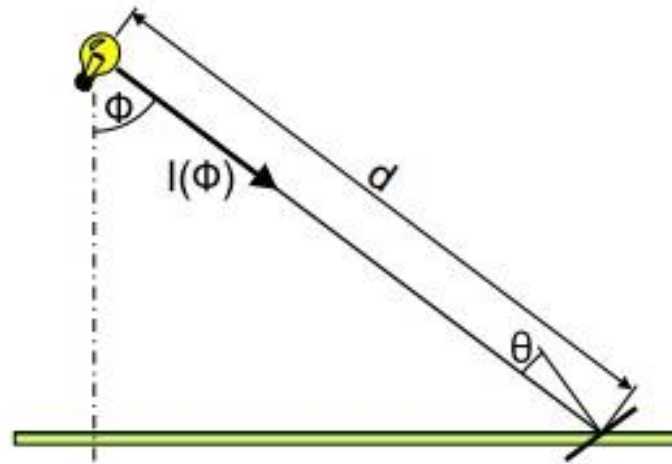
- Ο νόμος του συνημίτονου

Αν οι φωτεινές ακτίνες πέφτουν πλάγια, τότε η ίδια η ροή από την πηγή μπορεί να κατανέμεται σε μία ευρύτερη περιοχή η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του συνημίτονου της γωνίας μεταξύ της επιφάνειας και των ακτινών. Ο νόμος αντιστρόφου τετραγώνου μπορεί τότε να τροποποιηθεί με το νόμο συνημίτονου :

$$E = \frac{I(\Phi)}{d^2} * \cos \theta$$

Τα φωτιστικά σώματα τα οποία χρησιμοποιούνται για τεχνητό φωτισμό κανονικά δεν εκπέμπουν φως ισότιμα προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα χαρακτηριστικά της διανομής

των συσκευών περιγράφονται στα αποκαλούμενα διαγράμματα φωτεινής έντασης, τα οποία μπορούν να ληφθούν από τους περισσότερους κατασκευαστές σε ηλεκτρονική μορφή. Είναι ουσιαστικά ζεύγη τιμών  $(\Phi, I(\Phi))$ , όπου  $\Phi$  είναι η γωνία από την κατακόρυφο και  $I(\Phi)$  είναι η φωτεινή ένταση που παράγεται από το φωτιστικό προς αυτή την κατεύθυνση.[7]

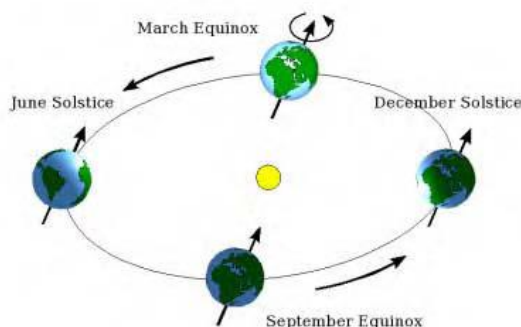


Σχήμα 1.5 : Νόμος συνημίτονου

## Κεφάλαιο 2 Φυσικός φωτισμός

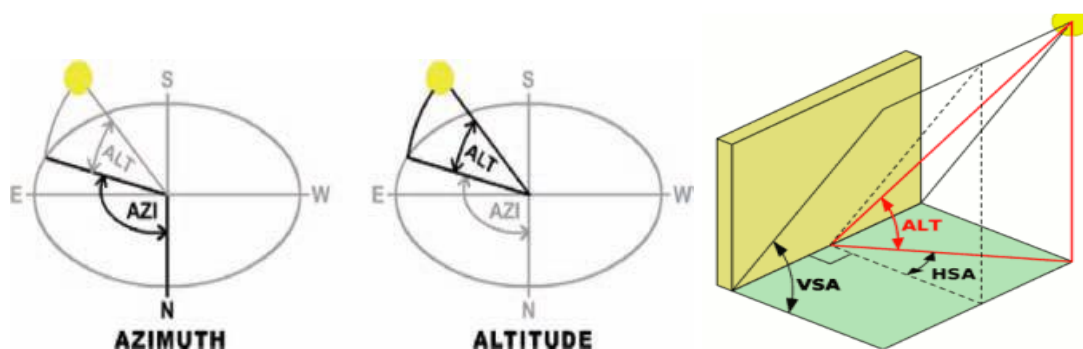
### 2.1 Γενικά

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονα Βορρά – Νότου ο οποίος σχηματίζει γωνία  $23,45^\circ$  με την κατακόρυφο. Σε αυτή την 24ωρη περιστροφή της οφείλεται ο διαχωρισμός της ημέρας και της νύχτας. Επίσης η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο, ακολουθώντας ελλειπτική τροχιά, αποτέλεσμα της οποίας είναι η αλλαγή των εποχών και της διάρκειας της ημέρας καθ' όλο το έτος.



Εικ. 2.1 : Περιστροφικές κινήσεις γης

Τα ηλιακά διαγράμματα μας δίνουν πληροφορίες για τη θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο ανά πάσα στιγμή, με βάση το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της υπό μελέτη περιοχής. Η ακριβής θέση του ήλιου ορίζεται από τις ηλιακές γωνίες, δηλαδή το αζιμούθιο και το ύψος. Προκειμένου όμως να ορίσουμε τη θέση του ήλιου σε σχέση με ένα κτίριο χρειαζόμαστε τις γωνίες σκίασης HSA και VSA.



Εικ. 2.2 : Αζιμούθιο και ύψος

Εικ. 2.3 : Γωνίες σκίασης HAS και VSA

Κατά τη διάρκεια της ισημερίας στις 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου ο ήλιος κατανέμεται ομοιόμορφα στο Βόρειο και στο Νότιο ημισφαίριο, ενώ είναι ίση η διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Τον Ιούνιο η θέση της γης είναι τέτοια που το βόρειο ημισφαίριο δέχεται περισσότερη ακτινοβολία από τον ήλιο, σε σχέση με το νότιο ημισφαίριο. Στο βόρειο ημισφαίριο ο ήλιος βρίσκεται πιο ψηλά και είναι ορατός τις περισσότερες ώρες της ημέρας. Στην υψηλότερη θέση βρίσκεται στις 21 Ιουνίου, οπότε και έχουμε το θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει στις 21 Δεκεμβρίου, οπότε έχουμε το χειμερινό ηλιοστάσιο. Στο νότιο ημισφαίριο προφανώς τα δύο ηλιοστάσια εμφανίζονται ανάποδα απ' ότι στο βόρειο.



Οι πηγές φυσικού φωτός είναι το ηλιακό φως, δηλαδή άμεσα από τον ήλιο, από τον ουρανό (διάχυτο φως) και από ανακλάσεις από το εξωτερικό περιβάλλον. Το ηλιακό φως έχει μεγάλη φωτεινή δραστηριότητα (90-110 lm/w), άριστη χρωματική απόδοση και είναι ανεξάντλητο.[8]

Η κατανομή των λαμπροτήτων στον ουράνιο θόλο και συνεπώς η φωτεινότητα του ουρανού ποικίλει ανάλογα με τα κλιματικά δεδομένα. Για την απλοποίηση των υπολογισμών έχουν αναπτυχθεί τα ακόλουθα πρότυπα:

- Ομοιόμορφη κατανομή λαμπροτήτων (uniform luminance sky distribution) με σταθερή τιμή προς όλες τις διευθύνσεις, ανταποκρίνεται σε μέρα με ομίχλη
- CIE νεφοσκεπής ουρανός (overcast sky distribution) Ουρανός καλυμμένος με σύννεφα όπου δε φαίνεται ο ήλιος. Αν υπάρχει νέφος κιτρινίζει. Το κέντρο είναι 3 φορές πιο λαμπρό από την περιφέρεια (γι' αυτό χρησιμοποιούμε ανοίγματα οροφής). Για τα κλιματικά δεδομένα της Ελλάδας ο νεφοσκεπής ουρανός είναι η χειρότερη περίπτωση και συμβαίνει με τη μικρότερη συχνότητα.
- Καθαρός ουρανός (clear sky luminance distribution) Μη ομοιόμορφη κατανομή λαμπροτήτων. Το πιο σκοτεινό κομμάτι βρίσκεται σε γωνία 90° από τον ήλιο. Η περιφέρεια είναι πιο λαμπρή από το κέντρο.



Εικ. 2.4 : Πρότυπα φωτεινότητας ουρανού

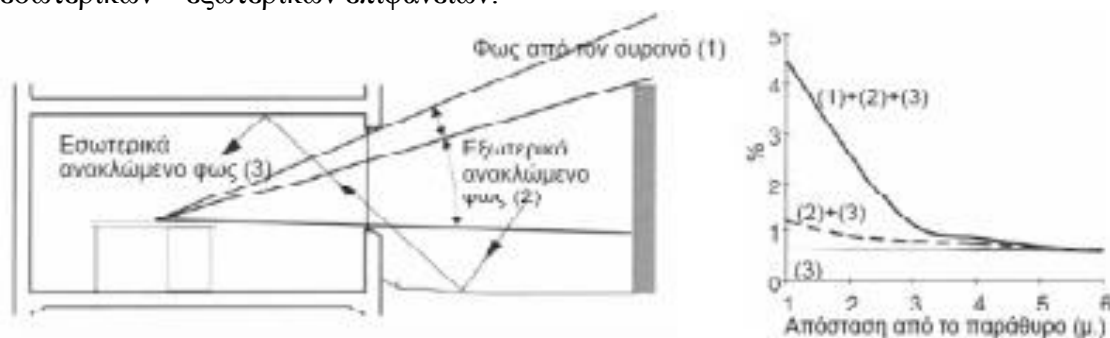
Ο οργανισμός χρησιμοποιεί τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και κυρίως το φωτισμό για να επαναριθμήσει τους κύκλους των περιοδικών του λειτουργιών ώστε αυτοί να έχουν 24ωρη διάρκεια όπως και η ημέρα (κρκαδιανοί ρυθμοί). Η έκθεση σε υψηλές τιμές φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας βελτιώνει τη διάρκεια και ποιότητα του ύπνου καθώς μειώνει και τα συμπτώματα της εποχιακής κατάθλιψης . Οι εργαζόμενοι σε γραφεία με αρκετό φυσικό φως είναι αποδοτικότεροι σε σχέση με συναδέλφους τους σε γραφεία με λίγο φυσικό φως, γεγονός που πιθανώς σχετίζεται με τους κρκαδιανούς ρυθμούς .

Για να ορίσουμε τον τρόπο με τον οποίο το φυσικό φως εισχωρεί μέσα στο κτίριο, πρέπει να εξετάσουμε την κατανομή του φωτισμού στο εσωτερικό του σε σχέση με τις εξωτερικές συνθήκες φωτισμού. Κάτω από νεφοσκεπή ουρανό ο παράγοντας

φυσικού φωτισμού σε ένα ορισμένο εσωτερικό σημείο ορίζεται ως «το ποσοστό του φυσικού φωτισμού σε αυτό το σημείο προς τον ταυτόχρονο εξωτερικό φωτισμό ενός ημισφαιρίου του ουρανού».

$$DF = E_{in} / E_{ext}$$

Ο παράγοντας φυσικού φωτισμού δεν μπορεί να αποτελεί κριτήριο για το σχεδιασμό αν μελετάται σε καθαρό ουρανό, αφού το ποσοστό αυτό αλλάζει σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο παράγοντας φυσικού φωτισμού εξαρτάται από τη συνολική φωτεινή ροή που εισέρχεται από τα ανοίγματα του κτιρίου / δωματίου, την αναλογία των ανοιγμάτων σε σχέση με το εμβαδόν του δαπέδου και την ανακλαστικότητα των εσωτερικών – εξωτερικών επιφανειών.



Εικ. 2.5 : Παράγοντας φυσικού φωτισμού

Οι κύριοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το ποσό του φυσικού φωτός στα κτίρια είναι:

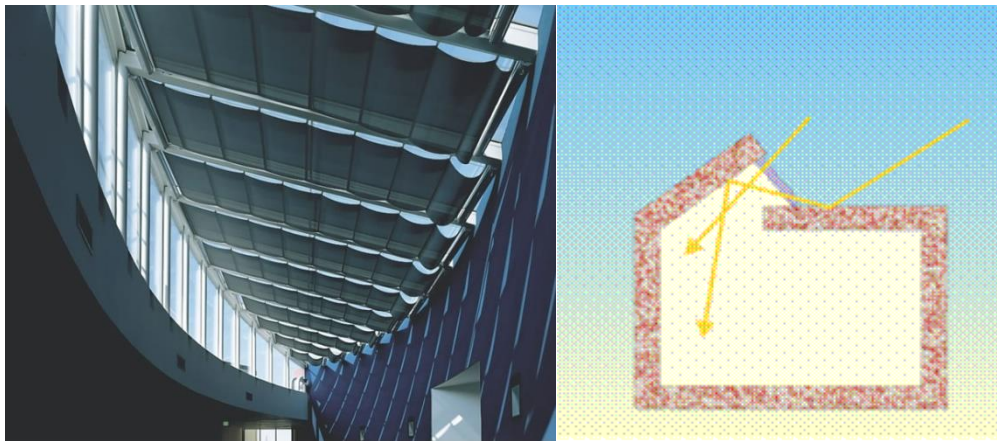
- Ο προσανατολισμός
- Το περίγραμμα του κτιρίου
- η απόσταση μεταξύ των κτιρίων
- το ύψος των απέναντι κτιρίων
- το μέγεθος και η θέση των ανοιγμάτων
- το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του συστήματος σκίασης
- η ανακλαστικότητα των εσωτερικών επιφανειών όπου γίνεται ο υπολογισμός
- ο προσανατολισμός και η ανακλαστικότητα των όψεων των απέναντι κτιρίων
- η ανακλαστικότητα των υλικών του εδάφους [8]

## 2.2 Συστήματα φυσικού φωτισμού

Η επικράτηση της κάθετης δόμησης καθιστά τα ανοίγματα ενός κτιρίου βασική τεχνική παροχής φυσικού φωτισμού. Η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού στοχεύει στην οπτική άνεση στους χώρους εντός των κτιρίων ανάλογα με τη χρήση αυτών αλλά και στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα φυσικού φωτισμού διακρίνονται στις εξής τέσσερις μεγάλες κατηγορίες: ανοίγματα στην κατακόρυφη τοιχοποιία, ανοίγματα οροφής, αίθρια και φωταγωγοί με τις διάφορες τεχνικές εφαρμοζόμενες στο σύστημα ή και στον εσωτερικό χώρο να αυξάνουν την απόδοση του συστήματος και να βελτιώνουν τις συνθήκες οπτικής άνεσης. Οι βασικότερες τεχνικές φυσικού φωτισμού είναι:

- Ανοίγματα οροφής

Τα ανοίγματα οροφής μπορούν να φέρουν διαφανείς ή ημιδιαφανείς υαλοπίνακες. Στα ανοίγματα οροφής τα οποία μπορεί να είναι εσωτερικά ή εξωτερικά, συνιστάται να υπάρχει σύστημα ηλιοπροστασίας, όπως είναι οι ανακλαστήρες και οι περσίδες. Η τελική επιλογή ενός τέτοιου συστήματος γίνεται με κριτήρια που αφορούν τη συνολική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου και την οικονομικότητά τους. Τα οριζόντια ανοίγματα οροφής έχουν το μειονέκτημα ότι δέχονται μεγαλύτερη ηλιακή πρόπτωση το καλοκαίρι από ότι το χειμώνα και για το λόγο αυτό συχνά συνιστώνται κατακόρυφα ή κεκλιμένα ανοίγματα στην οροφή, σε συνδυασμό με διατάξεις σκιασμού.

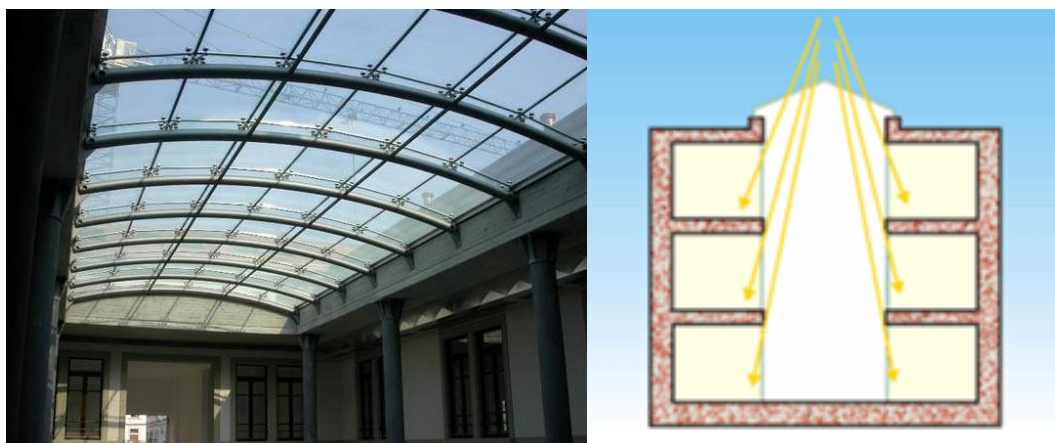


*Εικ. 2.6 : Ανοίγματα οροφής*

- Αίθρια

Τα αίθρια, είτε ανοιχτά, είτε με κάλυψη, συνεισφέρουν στη βελτίωση των συνθηκών φυσικού φωτισμού, ιδιαίτερα σε κτίρια μεγάλης επιφάνειας καθώς επιτρέπουν την είσοδο φωτεινής ακτινοβολίας στις κεντρικές ζώνες του κτιρίου, βοηθούν στην αύξηση της στάθμης του φωτισμού των χώρων και παρέχουν διάχυτο φως, συντελώντας στην ομοιόμορφη κατανομή του.

Ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αίθριου και τα οπτικά χαρακτηριστικά των επιφανειών του, επηρεάζεται και η στάθμη φωτισμού των χώρων. Έτσι, θα πρέπει κατά το σχεδιασμό των αίθριων να συνυπολογίζονται οι επιδράσεις των χαρακτηριστικών αυτών στην οπτική άνεση των εσωτερικών χώρων, πάντα σε συνδυασμό με την επίδρασή τους στη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου.



Εικ. 2.7 : Αίθρια

- Φωταγωγοί

Οι φωταγωγοί εισάγουν το φυσικό φως σε χώρους όπου είναι δύσκολη η διείσδυση φυσικού φωτός με άλλο τρόπο. Υπάρχουν διάφορα είδη φωταγωγών με ποικιλία διαστάσεων, οι οποίοι θα πρέπει να έχουν επιφάνειες ανακλαστικές ώστε να διοχετεύεται το φως στους εσωτερικούς χώρους.

Η απόδοσή των φωταγωγών μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη ανακλαστήρα στην κορυφή τους (είσοδο του φωτός), ο οποίος να εκτρέπει τις ηλιακές ακτίνες προς τα κάτω. Για ακόμα μεγαλύτερη απόδοση μπορεί να συνοδεύονται από ηλιοστάτη (συσκευή η οποία φέρει καθρέπτη και η οποία ακολουθεί την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια τις ημέρας).

Για το φωτισμό ενός ή και περισσότερων ορόφων μπορεί να χρησιμοποιηθούν σωλήνες-φωταγωγοί (φωτο-σωλήνες). Η μέγιστη απόδοσή τους εξασφαλίζεται σε περιορισμένο μήκος φωτο-σωλήνα, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή.



Εικ. 2.8 : Φωταγωγοί

- Ειδικοί υαλοπίνακες

Η χρήση βελτιωμένων ειδικών υαλοπινάκων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην

εξοικονόμηση ενέργειας για τη θέρμανση, ψύξη και φωτισμό των κτιρίων και στη βελτίωση των συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης που διαμορφώνονται στους εσωτερικούς χώρους. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι σταθερές, μεταβαλλόμενες (ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες) ή ρυθμιζόμενες.

Κατηγορίες ειδικών υαλοπινάκων, οι οποίοι διαφοροποιούνται από τους κοινούς ως προς τα θερμικά και τα φωτομετρικά τους χαρακτηριστικά, είναι:

- Ανακλαστικοί υαλοπίνακες : Ανακλούν σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας και συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών, αλλά μπορεί να προκαλέσουν θάμβωση στον περιβάλλοντα χώρο και στα γύρω κτίρια.
- Έγχρωμοι υαλοπίνακες : Με τη βοήθεια χημικής επεξεργασίας παρουσιάζουν χαμηλή θερμοπερατότητα, αλλά και μειωμένη φωτοδιαπερατότητα και συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών ενός χώρου.
- Απορροφητικοί υαλοπίνακες : Απορροφούν σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας (περιορίζουν τη θερμοπερατότητα χωρίς να μειώνουν σημαντικά τη φωτοδιαπερατότητα) και συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών ενός χώρου. Έχουν το πλεονέκτημα, σε σχέση με τους ανακλαστικούς, ότι δεν δημιουργούν θάμβωση στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου.
- Επιλεκτικοί υαλοπίνακες χαμηλού συντελεστή εκπομπής (Low-e) : Εμποδίζουν μεγάλο μέρος της θερμικής ακτινοβολίας είτε να εισέρχεται προς το κτίριο, είτε να εκπέμπεται προς το εξωτερικό περιβάλλον (ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο τοποθετούνται). Συνιστώνται για τη μείωση των θερμικών απωλειών (το χειμώνα) ή κερδών (το καλοκαίρι) των κτιρίων, ανάλογα με τις θερμικές απαιτήσεις του κτιρίου και το κλίμα της περιοχής στην οποία βρίσκεται.
- Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες : Εκτός από τους συνήθεις διπλούς (ή τριπλούς) υαλοπίνακες, αυξημένη θερμομονωτική ικανότητα έχουν υαλοπίνακες που στο διάκενό τους περιέχουν άλλο αέριο (π.χ. αργό) αντί για αέρα. Συνιστώνται σε κτίρια με μεγάλα ανοίγματα, όπου απαιτείται υψηλή θερμομόνωση του κελύφους.
- Ηλεκτροχρωμικοί : Είναι υαλοπίνακες, των οποίων οι ιδιότητες (οπτικά χαρακτηριστικά, διαπερατότητα) μεταβάλλονται με τη διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος.
- Φωτοχρωμικοί : Είναι υαλοπίνακες των οποίων οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται ανάλογα με το ποσό της προσπίπτουσας σε αυτούς ηλιακής ακτινοβολίας. Η φωτοδιαπερατότητά τους μειώνεται με την αύξηση της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας.
- Θερμοχρωμικοί : Είναι υαλοπίνακες των οποίων οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλονται από διαφανείς σε γαλακτόχρωμοι.
- Υαλοπίνακες υγρών κρυστάλλων : Με την εφαρμογή τάσης μετατρέπονται από γαλακτόχρωμοι σε διαφανείς.



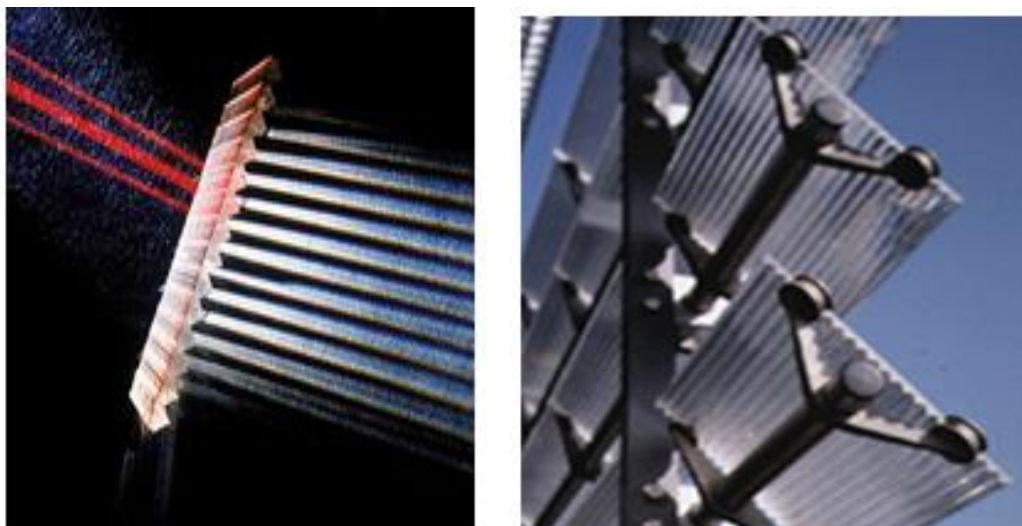
Για την επιλογή του κατάλληλου υαλοπίνακα θα πρέπει να εξετάζεται η χρήση του κτιρίου, η συνεισφορά του υαλοπίνακα στην εξοικονόμηση ενέργειας σε ετήσια βάση και η συνεπαγόμενη οικονομικότητα του συστήματος (κόστος- όφελος, χρόνος απόσβεσης).



Εικ. 2.9: Ειδικό υαλοπίνακες

- Πρισματικά φωτοδιαπερατά υλικά

Είναι στοιχεία που διαθλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία και, αναλόγως της κατασκευαστικής τους δομής, μπορούν να αποκλείσουν πλήρως την είσοδο ή να αλλάξουν την κατεύθυνση της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Εν γένει είναι ημιδιαφανή και άρα δεν συνιστώνται εκεί που είναι επιθυμητή η θέα προς τα έξω. Τα πρισματικά στοιχεία τοποθετούνται στο κέλυφος του κτιρίου είτε σαν αυτόνομα στοιχεία είτε μεταξύ δύο φύλλων υαλοπινάκων.



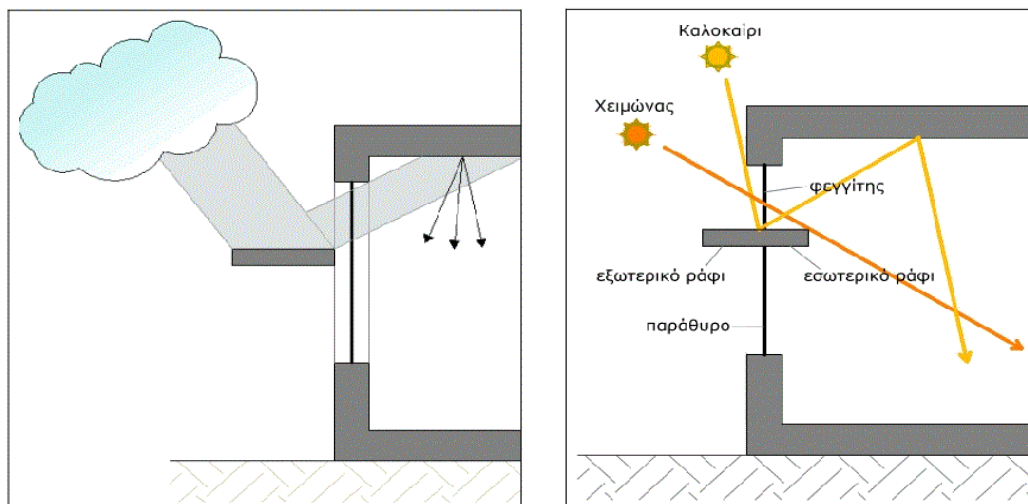
Εικ. 2.10 : Πρισματικά φωτοδιαπερατά υλικά

- Ράφια φωτισμού - ανακλαστήρες, περσίδες

Τα ράφια φωτισμού είναι επίπεδα ή καμπύλα σταθερά στοιχεία, με ανακλαστική επιφάνεια, που στερεώνονται στα πλαίσια των ανοιγμάτων και κατευθύνουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία προς τις εσωτερικές επιφάνειες του κτιρίου.

Εξασφαλίζουν ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού, αυξάνοντας τη στάθμη του φωτισμού σε απομακρυσμένες από τα παράθυρα ζώνες, μειώνοντας παράλληλα τη στάθμη φωτισμού στη ζώνη των παραθύρων.

Για την αποτελεσματική λειτουργία τους απαιτείται υψηλή ανακλαστικότητα της οροφής του χώρου. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε εργασιακούς χώρους, όπου απαιτείται ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού.



Εικ. 2.11 : Ράφια φωτισμού

- Ανακλαστικές περσίδες

Είναι κινητά ανακλαστικά στοιχεία, μικρού μεγέθους, που τοποθετούνται στην εσωτερική ή την εξωτερική επιφάνεια του κουφώματος ή και μεταξύ διπλών κουφωμάτων. Ως σύστημα φυσικού φωτισμού λειτουργούν όπως και τα ράφια φωτισμού, εκτρέποντας της ηλιακές ακτίνες προς την επιθυμητή κατεύθυνση στο χώρο (κατά προτίμηση στην οροφή).

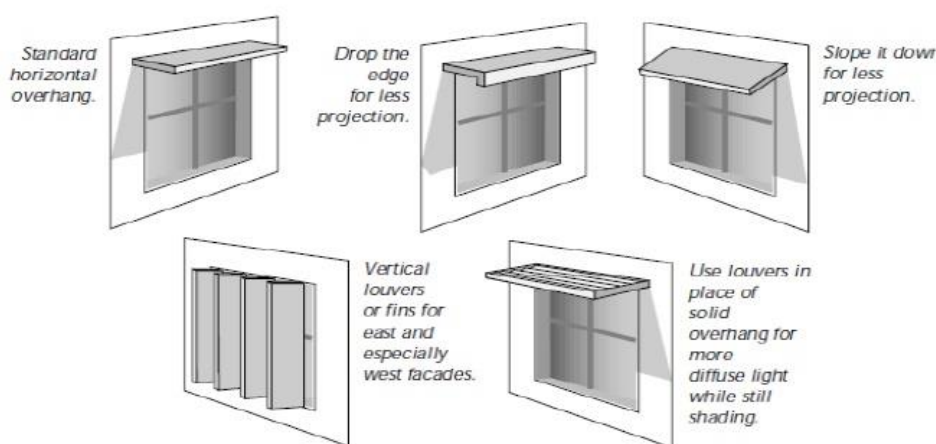
Οι κινητές περσίδες είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές καθώς επιτρέπουν εύκολα τη ρύθμιση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Τόσο τα ράφια φωτισμού, όσο και οι περσίδες μπορούν και πρέπει να εξασφαλίζουν και την απαιτούμενη, για λόγους θερμικής προστασίας, σκίαση των χώρων, αλλά και τον απαιτούμενο χειμερινό ηλιασμό.



*Εικ. 2.12 : Ανακλαστικές περσίδες*

- Συστήματα Σκίασης

Στόχος της εφαρμογής συστημάτων σκίασης σε χώρους γραφείων είναι να μειώσουμε το άμεσο φως που εισέρχεται στον χώρο και προκαλεί θάμβωση και την αύξηση του θερμικού του φορτίου. Υπάρχουν εξωτερικά και εσωτερικά συστήματα σκίασης.



*Εικ. 2.13 : Συστήματα σκίασης*

Τα εξωτερικά συστήματα σκίασης υπερέχουν των εσωτερικών, καθώς η θερμότητα που δημιουργείται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτά, αποβάλλεται στο εξωτερικό του κτηρίου και δεν συμβάλλει στην αύξηση του θερμικού του φορτίου. Μπορεί να αποτελούν μέρος του αρχιτεκτονικού σχεδίου ή να είναι συστήματα που τοποθετήθηκαν αργότερα στην κατασκευή. Πολλές φορές στην σύγχρονη βιοκλιματική αρχιτεκτονική είναι δυνατόν το ίδιο το κτήριο να έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να σκιάζει κάποιες όψεις του. Σχεδιάζοντας τα συστήματα σκίασης, θα πρέπει να λάβουμε κυρίως υπόψη μας τον προσανατολισμό του ανοίγματος που θέλουμε να προστατέψουμε. Έτσι σε ανοίγματα που βλέπουν στον νότο, ενδείκνυται η χρήση οριζόντιων σκιάστρων. Τα σκίαστρα αυτά μπορούν να



τοποθετηθούν και υπό γωνία προκειμένου να προσφέρουν περισσότερη σκίαση, ή να εφαρμόσουμε στο τέλος τους μια κάθετη επιφάνεια. Στα ανατολικά και δυτικά παράθυρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οριζόντια σκίαστρα. Τα σκίαστρα αυτά είναι κατάλληλα και για τα προστατέψουν από τον πρωινό και απογευματινό ήλιο τα βορινά ανοίγματα. Με δεδομένο ότι το πρωί ο ήλιος δεν είναι τόσο έντονος όσο το βράδυ, μέριμνα πρέπει να ληφθεί κυρίως για την σκίαση των νότιων και δυτικών ανοιγμάτων.

Τα εσωτερικά συστήματα σκίασης, για παράδειγμα περσίδες, αν και χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασης και της μεγάλης ευκολίας χειρισμού τους, έχουν πολύ πιο μειωμένη ικανότητα ελέγχου του θερμικού κέρδους καθώς θερμαίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία και αποβάλλουν την θερμότητα στο εσωτερικό του κτηρίου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως για τον έλεγχο της θάμβωσης, αλλά προτιμότερο να συνδυάζονται με κάποιο εξωτερικό σύστημα σκίασης.[9]

## Κεφάλαιο 3 Τεχνητός φωτισμός

### 3.1 Γενικά

Ο φωτισμός αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την εξασφάλιση της βιολογικής άνεσης στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Στόχος του σχεδιασμού των συστημάτων φωτισμού είναι η εξασφάλιση οπτικής άνεσης, μέσω της παροχής της απαιτούμενης ποσότητας φωτισμού και της ποιότητας του φωτισμού η οποία εξασφαλίζεται με καλή κατανομή, αποφυγή φαινομένων θάμβωσης, κατάλληλη χρωματική απόδοση και χρώμα φωτισμού και ανάδειξη των στοιχείων του χώρου.

Η πρώτη λάμπα εφευρέθηκε περίπου το 70.000 π.Χ., χρησιμοποιώντας ένα κοίλο βράχο ή ένα κοχύλι γεμισμένο με ξερά χόρτα που τα εμπότιζαν με ζωικό ή φυτικό λίπος. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται ακόμα και στις μέρες μας σε λυχνάρια ή καντήλια συνήθως στις θρησκευτικές μας τελετές. Οι άνθρωποι άρχισαν να μιμούνται τα φυσικά σχήματα και να την μετατρέπουν σε έργο τέχνης αλλάζοντας τα υλικά που χρησιμοποιούσαν. Τον 18ο αιώνα, εφευρέθηκε ο καυστήρας, μια σημαντική βελτίωση στο σχεδιασμό του λαμπτήρα. Η πηγή καυσίμου ήταν τώρα κλεισμένη σε σφιχτά μεταλλικά δοχεία και ο έλεγχος της έντασης της καύσεως του καυσίμου και της έντασης του φωτός γίνεται πλέον με ένα ρυθμιζόμενο μεταλλικό σωλήνα. Το 1792, έγινε η πρώτη εμπορική χρήση του φυσικού αερίου για φωτισμό από τον Γουίλιαμ Μέρντοχ με φωταέριο για τον φωτισμό στο σπίτι του. Ο Γερμανός εφευρέτης Φρίντριχ Γουίνστον ήταν το πρώτο πρόσωπο με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για φωτισμό με άνθρακα το 1804. Ο πρώτος ηλεκτρικός λαμπτήρας τόξου άνθρακα εφευρέθηκε το 1801 από τον Άγγλο χημικό Χάμφρεϊ Ντέιβι. Ο συγκεκριμένος λαμπτήρας ήταν η έμπνευση για όλους τους λαμπτήρες τόξου που χρησιμοποιούν την τρέχουσα λειτουργία μέσω διαφόρων ειδών πλάσματος αερίου. Την δεκαετία του 1860, ο Βρετανός φυσικός και χημικός Σερ Τζόζεφ Σουάν ξεκίνησε να πειραματίζεται στην κατασκευή λάμπας πυρακτώσεως με νήμα άνθρακα με επιτυχία αλλά το νήμα καταστρεφόταν. Την δεκαετία του 1970 δοκίμασε να το ξαναδοκιμάσει αφαιρώντας τον αέρα με τον οποίο ερχόταν σε επαφή το νήμα άνθρακα και αντικαθιστώντας αυτό με σκληρές ίνες γιαπωνέζικου μπαμπού. Δυστυχώς για αυτόν, ο Τόμας Έντισον είχε υποβάλει ήδη αίτηση ευρεσιτεχνίας για έναν όμοιο λαμπτήρα κενού.

Ο Φρίντριχ Μέιερ, ο Χάνς Σπέινερ και ο Έντμουντ Γκέρμερ κατοχύρωσαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας έναν λαμπτήρα φθορισμού το 1927. Εφαρμόζοντας διαφορά δυναμικού μεταξύ ατμών υδραργύρου και με επικάλυψη βηρυλλίου στο εσωτερικό, πέτυχαν την κατασκευή του λαμπτήρα φθορισμού. Η επικάλυψη βηρυλλίου αντικαταστάθηκε, λόγω της τοξικότητάς του, από άλλες χημικές ουσίες φθορισμού που ήταν ασφαλέστερες.

Ο λαμπτήρας αλογόνου βολφραμίου, ένας βελτιωμένος τύπος του λαμπτήρα πυρακτώσεως, εφευρέθηκε από τους Έλμερ Φρίντριχ και Έμμετ Γουάιλυ. Το 1960, ένας καλύτερος λαμπτήρας αλογόνου εφευρέθηκε από τον Φρίντριχ Μόμπυ, μηχανικό της General Electric. [10]

### 3.2 Χαρακτηριστικά λαμπτήρων

Ο τεχνητός φωτισμός είναι εδώ και αρκετές δεκαετίες άμεσα συνδεδεμένος με την ηλεκτρική ενέργεια. Οι λαμπτήρες είναι οι διατάξεις εκείνες οι οποίες δέχονται σαν είσοδο ηλεκτρική ενέργεια και παρέχουν ως έξοδο φωτεινή αλλά και θερμική ενέργεια. Υπάρχουν πολλά είδη λαμπτήρα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και τεχνολογίες. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που αφορούν τους λαμπτήρες είναι τα εξής :

- Τεχνικά
- Τάση λειτουργίας του δικτύου

Η τάση λειτουργίας προσδιορίζει την περιοχή τάσης του δικτύου, με την οποία τροφοδοτείται ο λαμπτήρας ή τα όργανα έναυσης και λειτουργίας του λαμπτήρα. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους σταθμούς παραγωγής που βρίσκονται σε διάφορα σημεία της χώρας και στη συνέχεια μεταφέρεται στα κέντρα κατανάλωσης μέσω καλωδίων υπερυψηλής (400kV) και υψηλής τάσης (150kV). Στη συνέχεια διανέμεται στους κατά τόπους καταναλωτές μέσω των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης.



*Εικ. 3.1 : Πυλώνας υψηλής τάσης*

Μονάδες μέτρησης της τάσης λειτουργίας είναι το volt (V) και το πολλαπλάσιο αυτού το kilovolt (kV).

- Ονομαστική ισχύς

Ονομαστική ισχύς είναι η καταναλισκόμενη από το λαμπτήρα ηλεκτρική ισχύς σε Watt.

$$1\text{Watt}=1\text{Joule/sec} = (1\text{Volt}) * (1\text{Ampere})$$

Είναι δηλαδή, ο ρυθμός με τον οποίο δαπανάται ενέργεια από έναν λαμπτήρα. Ισούται με το πηλίκο της ενέργειας που δαπανά ο λαμπτήρας προς τον αντίστοιχο χρόνο  $P = E/t$ .

- Θέση λειτουργίας

Προσδιορίζει τη θέση του λαμπτήρα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και μετριέται σε μοίρες (°) από τον οριζόντιο ή τον κατακόρυφο άξονα. Για κάποιες ομάδες λαμπτήρων υπάρχει συγκεκριμένη θέση λειτουργίας και πρέπει να ακολουθείται για να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία και η βέλτιστη απόδοση του λαμπτήρα.

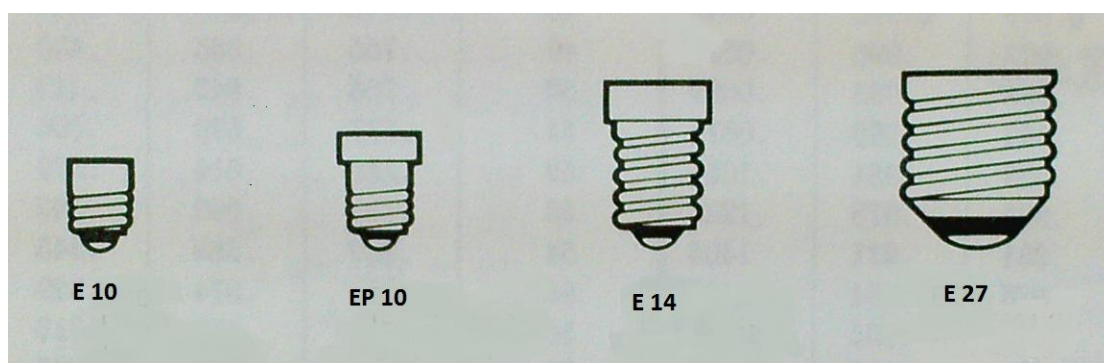
- Συνθήκες λειτουργίας ή θερμοκρασία περιβάλλοντος

Προσδιορίζουν τα όρια της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου του λαμπτήρα, μέσα στα οποία εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη έναυση και λειτουργία του λαμπτήρα. Η μέτρηση γίνεται σε βαθμούς της κλίμακας Κελσίου (°C)

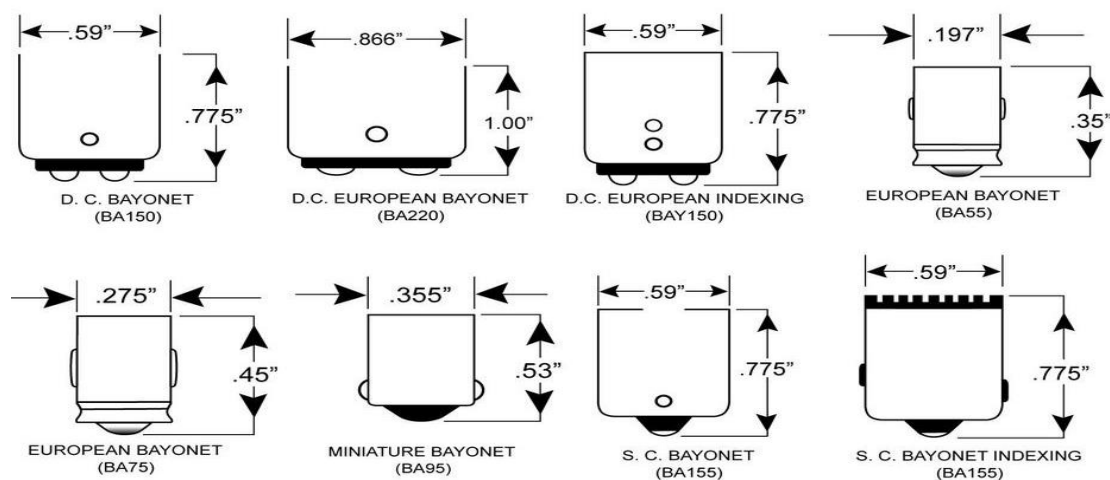
- Τύπος και διαστάσεις χάλυβα και λυχνιολαβής

Κάλυκας είναι η μεταλλική βάση στήριξης των λαμπτήρων πυρακτώσεως, ο οποίος μέσω της αεροστεγούς επαφής του με το γυάλινο κώδωνα του λαμπτήρα εξασφαλίζει την απαραίτητη απομόνωση του νήματος από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Οι κάλυκες κατασκευάζονται σε τυποποιημένες διαστάσεις ύψους και διαμέτρου, τηρώντας διεθνείς προδιαγραφές. Οι συνηθέστεροι δύο τύποι είναι ο βιδωτός, που βιδώνεις τη λυχνιολαβή (ντουί) και χαρακτηρίζεται με το γράμμα *E* (Edison) και ο μπαγιονέτ, που στηρίζεται στη λυχνιολαβή με τη βοήθεια δύο προεξοχών και χαρακτηρίζεται από το γράμμα *B* (Bayonet). Τα γράμματα *E* και *B* ακολουθούνται από τον αριθμό που χαρακτηρίζει τη διάμετρο του κάλυκα σε χιλιοστά.



Εικ. 3.2 : Ντουί



Εικ. 3.3 : Bayonet

- Χρήση

Υπάρχουν αρκετά είδη φωτισμού (εσωτερικός, εξωτερικός, ασφαλείας κ.α.) που καθορίζουν το είδος του λαμπτήρα που θα χρησιμοποιήσουμε.

- **Οικονομοτεχνικά**

- Φωτεινή δραστηριότητα ή απόδοση λαμπτήρα

Η έννοια της απόδοσης μίας φωτεινής πηγής, χρησιμοποιείται για να συσχετίσει το ποσό της αποδιδόμενης φωτεινής ροής μιας φωτεινής πηγής, με την ηλεκτρική ισχύ που αυτή καταναλώνει. Εκφράζεται μέσω του συντελεστή απόδοσης φωτεινής πηγής  $n$ , ο οποίος δίδεται από το πηλίκο της φωτεινής ισχύος προς την ηλεκτρική ισχύ :

$$n = \frac{\Phi}{P_{\eta\lambda}}$$

Μονάδα μέτρησης είναι το lm/W (Lumen/Watt)

- Διάρκεια ζωής λαμπτήρων

Διάρκεια ζωής λαμπτήρων νοείται ο αναμενόμενος αριθμός των ωρών λειτουργίας του λαμπτήρα μέχρι τη στιγμή αντικατάστασής του. Η μέση διάρκεια χρήσης ενός λαμπτήρα είναι 1.000 ώρες ετησίως, με τρεις ώρες λειτουργίας κατά μέσο όρο ημερησίως.

- **Φωτοτεχνικά**

- Θερμοκρασία χρώματος

Η συσχετιζόμενη θερμοκρασία χρώματος CCT (correlated colour temperature) μετράται σε βαθμούς Kelvin και είναι ένα μέτρο για την περιγραφή του χρώματος των φωτεινών πηγών. Δείχνει την ισοδύναμη που ένα μαύρο θερμαντικό σώμα θα πρέπει να έχει προκειμένου να παραχθεί φως του ίδιου χρώματος με τη φωτεινή πηγή.

CCT	Κατηγορία CCT
<3300 K	Θερμά
3300-5300K	Ενδιάμεσα
>5300K	Ψυχρά

Πιν. 3.1:Κατηγορία CCT

- Δείκτης χρωματικής απόδοσης

Ιδιαίτερη σημασία κατά το σχεδιασμό του φωτισμού ενός χώρου θα πρέπει να δίνεται στην απόδοση των χρωμάτων των επιφανειών και των αντικειμένων. Το κριτήριο επιλογής των λαμπτήρων το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ικανότητας απόδοσης των χρωμάτων από το φως το οποίο εκπέμπουν είναι ο δείκτης χρωματικής απόδοσης (CRI-Colour Rendering Index).

Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης κυμαίνεται από 0-100 και όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο πιο πιστά αποδίδονται τα χρώματα των αντικειμένων του χώρου κι αυτό συμβαίνει γιατί η ακτινοβολία της φωτεινής πηγής καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Πρότυπη φωτεινή πηγή με δείκτη χρωματικής απόδοσης 100 θεωρείται ο ήλιος. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης στις τιμές από 90 έως 100 υποδηλώνει εξαιρετική απόδοση χρωμάτων, από 80 έως 90 υποδηλώνει καλή απόδοση χρωμάτων και από 50 έως 80 υποδηλώνει κακή απόδοση χρωμάτων.

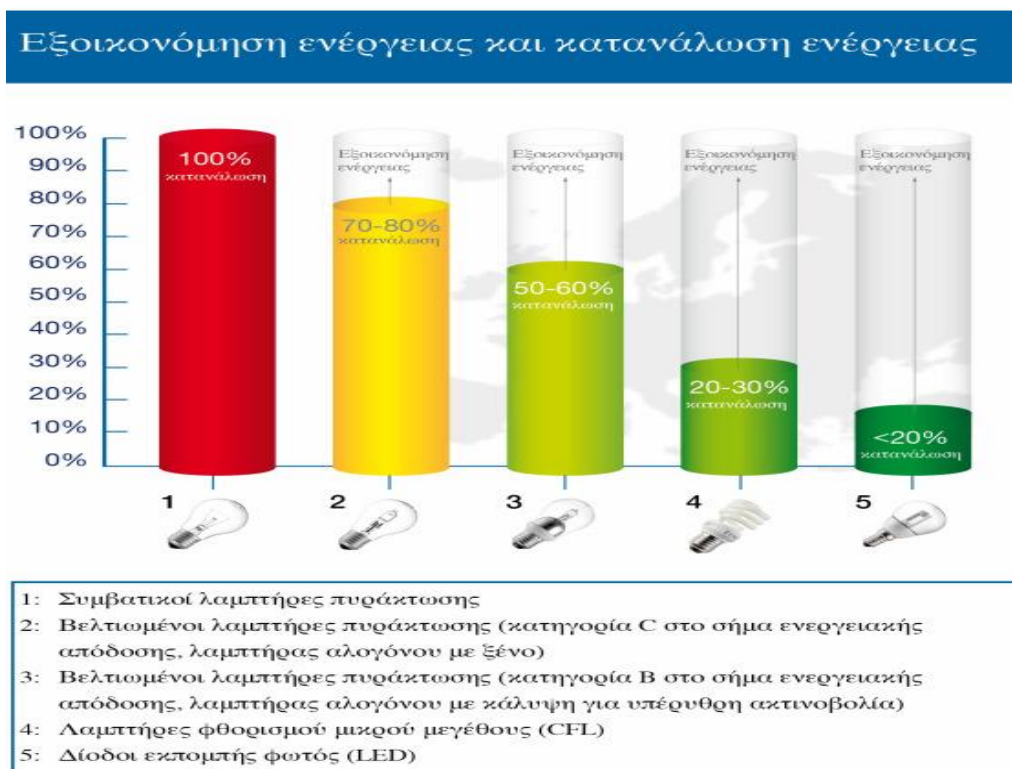
- Φωτεινή ροή και φωτεινή ένταση-ακτινοβολία : Παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 1.2.1
- **Οικολογικά-περιβαλλοντικά**
  - Περιεκτικότητα βλαβερών ουσιών

Η περιεκτικότητα πιθανών ουσιών γι το περιβάλλον αφορά στην περιεκτικότητα ή μη ουσιών που περιέχονται στο λαμπτήρα και οι οποίες αποδεδειγμένα είναι, ή ενδέχεται να είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

- Εξοικονόμηση καταναλισκόμενης ενέργειας

Οι νέοι τύποι λαμπτήρων έχουν γενικά μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση από τους παλαιούς λαμπτήρες πυράκτωσης, ωστόσο εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες διαφοροποιήσεις. Η υποχρεωτική σήμανση της ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση

δηλώνεται σε κλίμακα από το Α μέχρι το G, με το Α να δηλώνει την υψηλότερη απόδοση και το G τη χαμηλότερη.[11]



Εικ. 3.4 : Εξοικονόμηση ενέργειας

### 3.3 Κατηγορίες λαμπτήρων

Σήμερα διατίθεται στην αγορά μεγάλη ποικιλία λαμπτήρων, για διαφορετικές εφαρμογές. Στη συνέχεια περιγράφονται οι πιο κοινές κατηγορίες :

- Λαμπτήρες πυρακτώσεως
- Τυπικός λαμπτήρας βολφραμίου

Ο λαμπτήρας πυράκτωσης περιλαμβάνει ένα λεπτό μεταλλικό νήμα, από βαρύ, δύστηκτο μέταλλο, συνήθως βολφράμιο, τυλιγμένο σε σπείρες. Αυτό φέρεται από τις άκρες του συγκολλημένο σε δύο παχύτερα σύρματα από όπου εφαρμόζεται η ηλεκτρική τάση η οποία θέτει τα ηλεκτρικά φορτία σε κίνηση η οποία εξαναγκάζει το νήμα να φωτοβολεί από τη θέρμανσή του. Όταν το μήκος του νήματος είναι μεγαλύτερο των 2 cm τότε αυτό συγκρατείται και ενδιάμεσα από μη ηλεκτροφόρα σύρματα σε ακτινική διάταξη. Η κατασκευή αυτή περικλείεται σε γυάλινη σφαιρική ή ελλειπτική φύσιγγα χαμηλής πίεσης αερίου.

Η φύσιγγα αυτή σε λαμπτήρες μικρής ισχύος είναι αερόκενη, ή σε λαμπτήρες μεγάλης ισχύος περιέχει αδρανές αέριο, συνήθως άζωτο. Ο λαμπτήρας μπορεί να



διαθέτει βιδωτή επαφή που συνδέεται με τον έναν πόλο και μια επαφή στην βάση που συνδέεται με τον άλλο πόλο. Η όλη διάταξη περιέχεται σε στήριγμα από πορσελάνη. Ένας λαμπτήρας πυράκτωσης έχει διάρκεια ζωής περίπου 750 - 1500 ώρες συνεχούς λειτουργίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του τόσο μικρότερη είναι η ζωή του. Ο λαμπτήρας πυράκτωσης ανάβει μόνο όταν και οι δύο επαφές του ακουμπούν και στους δύο πόλους της μπαταρίας ή της πρίζας. Στις περιπτώσεις που η λάμπα δεν ανάβει, έχει κοπεί (καεί από υπερβολική αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος απότομα) το συρματάκι.

Κύρια αιτία φθοράς και "θανάτου" του λαμπτήρα πυράκτωσης είναι η εξάχνωση του βολφραμίου του νήματος που προοδευτικά το πάχος του μειώνεται μέχρις ότου να αποκοπεί στο σημείο όπου είναι ασθενέστερος. Το βολφράμιο εξαχνούμενο μεταφέρεται και επικάθεται στα ψυχρότερα σημεία της φύσιγγας. Αυτή είναι και η αιτία του μαυρίσματος του λαμπτήρα. Η εξάχνωση αυτή είναι ταυτόχρονα και η αιτία να εμποδίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας με απώτερο και κύριο τελικά σκοπό την επιτυχία λευκότερου φωτός αφενός και αφετέρου υψηλότερο βαθμό απόδοσης. Άλλες σημαντικές αιτίες μείωσης ζωής τους είναι σε:

1. Αυξήσεις της τάσης, σε αύξηση περίπου του 5%, παρατηρείται ελάττωση ζωής 30%.
2. Ανάμματα των λαμπτήρων αυτών, τούτο σημαίνει πως σε 1/10 sec περνάει ρεύμα σχεδόν 12 φορές περισσότερο από το κανονικό. Αυτό συμβαίνει επειδή η αντίσταση που παρουσιάζει το νήμα βολφραμίου είναι περίπου 12 φορές μικρότερη όταν είναι αυτό κρύο σε σχέση με την αντίσταση που παρουσιάζει αυτό όταν είναι ζεστό, δηλαδή σε λειτουργία.

Εξαιτίας της χρήσης περισσότερης ενέργειας σε σύγκριση με τις λάμπες φθορισμού και με άλλες λάμπες, η ΕΕ αποφάσισε τη σταδιακή απόσυρση των λαμπτήρων πυράκτωσης από την 1η Σεπτεμβρίου του 2009.[12]



Εικ. 3.5 : Τυπικός λαμπτήρας βολφραμίου



- Λαμπτήρες αλογόνου βολφραμίου

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους συνήθεις αυτούς λαμπτήρες είναι της τάξεως των  $2.800^{\circ}\text{K}$ , με φωτεινή απόδοση περίπου  $12\text{ lm/W}$ . Υπάρχουν όμως και λαμπτήρες πυράκτωσης με απόδοση  $25\text{ lm/W}$  και θερμοκρασία νήματος στους  $3.100^{\circ}\text{K}$ . Αυτοί οι λαμπτήρες που ονομάζονται και "λαμπτήρες ιωδίου - χαλαζία" (ευρύτερα γνωστοί ως λαμπτήρες αλογόνου) περιέχουν αδρανές αέριο και ατμούς ιωδίου ή βρωμίου. Έχουν σχήμα σωλήνα μικρής διαμέτρου με αξονική διαμήκη διάταξη του νήματος βολφραμίου. Το γυαλί είναι χαλαζιακό και όταν λειτουργεί ο λαμπτήρας, η θερμοκρασία του φθάνει στους  $600^{\circ}\text{C}$ . Οι λαμπτήρες αλογόνου αναπτύχθηκαν για να λύσουν το πρόβλημα της μικρής διάρκειας ζωής των λαμπτήρων πυράκτωσης καθώς ένας τυπικός λαμπτήρας αλογόνου έχει διάρκεια ζωής περίπου 2000 ώρες, σχεδόν διπλάσια από έναν τυπικό λαμπτήρα πυράκτωσης.

Στους λαμπτήρες αλογόνου η ζωή μειώνεται όταν τους πιάνουμε με γυμνό χέρι, πχ κατά την τοποθέτηση. Αν συμβεί κάτι τέτοιο, αναπόφευκτα αφήνουμε λάδι από το σώμα μας πάνω στο γυαλί το οποίο απορροφά (και κατακρατά) πιο πολλή θερμότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες και να μειώνεται η ζωή του λαμπτήρα. Στους κοινούς λαμπτήρες το γυαλί βρίσκεται μακριά από το νήμα πυράκτωσης και δεν προκαλείται σοβαρό πρόβλημα όταν τους τοποθετούμε με γυμνό χέρι.

Με τη χρήση ξένου, οι λάμπες αλογόνου καταναλώνουν 20 έως 25 % λιγότερη ενέργεια παράγοντας το ίδιο φως σε σχέση με τους καλύτερους συμβατικούς λαμπτήρες πυράκτωσης.

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι:

1. Εκτός από τη χρήση ξένου, η υποδοχή και οι διαστάσεις των λαμπτήρων αλογόνου νέας γενιάς είναι ίδιες με αυτές των συμβατικών λαμπτήρων αλογόνου. Μπορούν, συνεπώς, να χρησιμοποιηθούν μόνο σε φωτιστικά που έχουν ειδική υποδοχή για λαμπτήρες αλογόνου. Οι λαμπτήρες αυτοί αλογόνου θα εξακολουθήσουν να διατίθενται στην αγορά και μετά το 2016 για χρήση σε φωτιστικά με τέτοιου είδους υποδοχή.

2. Στους βελτιωμένους λαμπτήρες πυράκτωσης με τεχνολογία αλογόνου, η βελτιωμένη κάψουλα αλογόνου τοποθετείται μέσα σε γυάλινο περίβλημα, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να έχει την όψη ενός κλασικού λαμπτήρα πυράκτωσης με συμβατικό κάλυκα. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να χρησιμοποιούνται αντί των συμβατικών λαμπτήρων πυράκτωσης. Οι βελτιωμένοι λαμπτήρες πυράκτωσης κατηγορίας C θα βελτιωθούν περαιτέρω ώστε να υπαχθούν στην κατηγορία B ή A από το 2016 και μετά.

Και οι δύο τύποι παράγουν φως ισοδύναμης ποιότητας με τους συμβατικούς λαμπτήρες πυράκτωσης, αλλά, με κανονική χρήση, έχουν τη διπλάσια διάρκεια ζωής (2 χρόνια). Οι λαμπτήρες αυτοί είναι πλήρως

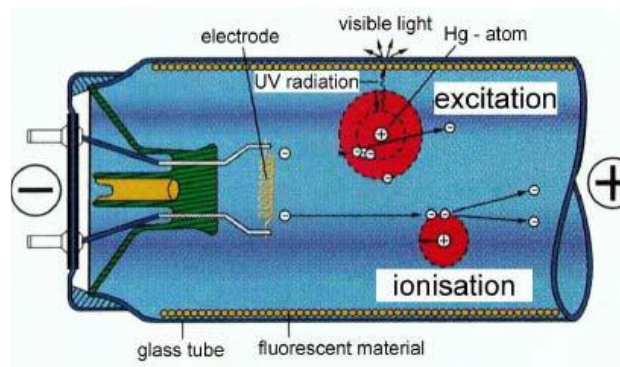
συμβατοί σε μέγεθος με τα υπάρχοντα φωτιστικά και έχουν τη δυνατότητα αυξομειώσης της έντασης εάν χρησιμοποιηθούν με οποιονδήποτε ροοστατικό διακόπτη.[12]



*Εικ. 3.6 : Λαμπτήρες αλογόνου βολφραμίου*

- Λαμπτήρες εκκενώσεως
- Λαμπτήρες φθορισμού

Περιέχουν υδράργυρο σε χαμηλή πίεση. Δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση και εκπέμπεται ακτινοβολία υπεριώδους η οποία μετατρέπεται εν μέρει σε φυσικό φως και θερμότητα. Για να διατηρείται η λειτουργία της λάμπας χρειάζεται ballast. Αν και δουλεύουν με εναλλασσόμενο ρεύμα, λειτουργούν στα 20.000Hz (ηλεκτρονικό ballast) με αποτέλεσμα να μην υπάρχει το flicker της αλλαγής συχνότητας. Ο φώσφορος που περιέχουν, ο οποίος τους δίνει το χαρακτηριστικό τους άσπρο χρώμα, χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την υπεριώδη ακτινοβολία σε φως ενώ για να δώσουν άσπρο χρώμα χρησιμοποιούνται τρία στρώματα «πούδρας» αναλογικά με το σύστημα RGB. Ο υδράργυρος που περιέχουν είναι τοξική ουσία γι' αυτό δεν πρέπει να τις σπάμε. Για να δουλέψει επαρκώς ο φθορισμός πρέπει να φτάσει σε συγκεκριμένη θερμοκρασία (350 C), πράγμα που εξηγεί το ότι αυτές οι λάμπες καθυστερούν να φτάσουν στη μέγιστη απόδοση, περίπου 15 λεπτά από την έναυσή τους. Αυτό σημαίνει επίσης ότι το φωτιστικό που τις συνοδεύει πρέπει να εξασφαλίζει αυτή τη θερμοκρασία. Έχουν διάρκεια ζωής 12.000-20.000 ώρες και πολύ καλή φωτεινή δραστηριότητα της τάξης των 80 lm/W (7 φορές περισσότερο από τις κοινές λάμπες πυράκτωσης). Οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν συγκεκριμένο μήκος (0,60 – 1,00 – 1,50 μ.) και ισχύ. Κάθε μήκος συνδυάζεται με συγκεκριμένη ισχύ, έτσι ώστε βγάζουν την ίδια ένταση φωτισμού. Η φωτεινή τους ροή κυμαίνεται από 300 μέχρι 7.000lm.[12]



Εικ. 3.7 : Λαμπτήρες φθορισμού

- Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού (Compact Fluorescent Lamps – CFL)
- Με ενσωματωμένο ballast

Αποτελούν πολύ καλή ενεργειακή λύση για την αντικατάσταση των λαμπτήρων πυράκτωσης. Τα μειονεκτήματά τους είναι η μικρή φωτεινή δραστηριότητα 12 lm/W και η μικρή διάρκεια ζωής 1.000-2.000 ώρες ενώ το πλεονέκτημά τους είναι το μέγεθος. Είναι γνωστές με την ονομασία «οικονομικές» ή «energy-saving»[9].

- Με ξεχωριστό ballast

Λειτουργούν με βάση την αρχή λειτουργίας των λαμπτήρων φθορισμού. Έχουν μεγάλη φωτεινή δραστηριότητα και διάρκεια ζωής 8.000 ώρες. Τα ballast πρέπει να ενσωματωθούν μέσα στο φωτιστικό. Επίσης έχουν μικρό βάρος και μέγεθος και χρησιμοποιούνται σε σπίτια, εστιατόρια και μέρη όπου απαιτείται εξοικονόμηση ενέργειας[9].



Εικ. 3.8 : Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού

- Λαμπτήρες υψηλής πίεσης HID αλογονιδίων ( Metal Halide Lamps)

Λόγω της μεγάλης πίεσης υπάρχει κίνδυνος έκρηξης γι' αυτό πρέπει να είναι προστατευμένοι. Βγάζουν πολύ έντονο φως (προβολείς) και εκπέμπουν μεγάλη ποσότητα υπεριώδους ακτινοβολίας γι' αυτό πρέπει να υπάρχει από κάτω

οπωσδήποτε φίλτρο για προστασία. Αποκτούν το μέγιστο της ισχύος τους μετά από 3 περίπου λεπτά και φτάνουν σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες. Έχουν συγκεκριμένη θέση τοποθέτησης στην οποία τα ηλεκτρόνια καταστρέφονται πιο αργά, ενώ όσο πλησιάζουν προς το τέλος της ζωής τους παρατηρείται διαφοροποίηση στη χρωματική τους απόδοση. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε γήπεδα και για να φωτίζουν προς τα πάνω (up lighters). Από τη στιγμή που θα τη σβήσω πρέπει να περιμένω 10 λεπτά για την ανάψω ξανά. Δε χρησιμοποιούνται σε σπίτια, ενώ είναι κατάλληλες για γραφεία και βιτρίνες καταστημάτων λόγω της αποδοτικότητάς τους.



*Εικ. 3.9 : Λαμπτήρες υψηλής πίεσης HID αλογονιδίων*

- LED (Light Emitting Diodes)

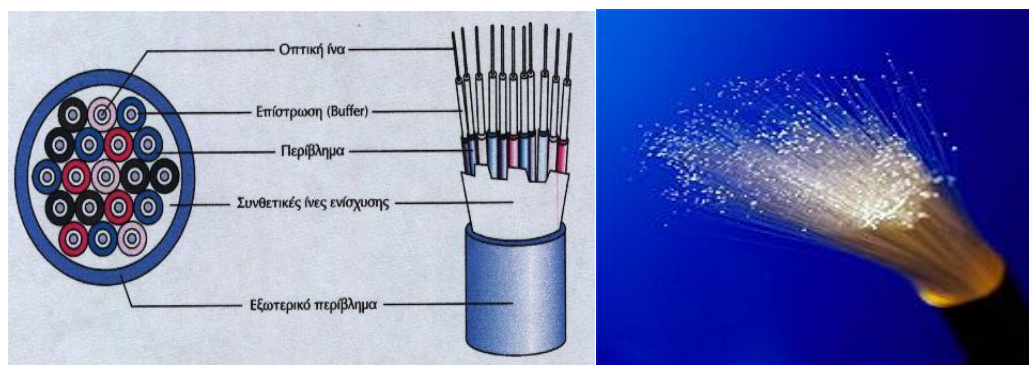
Τα LED έχουν μικρές ηλεκτρονικές διατάξεις ημιαγωγών, που όταν ενεργοποιούνται από ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης (12 - 24 V) παράγουν φως σε ένα περιορισμένο τμήμα του ορατού φάσματος – κόκκινο, πράσινο, κίτρινο και μπλε χρώμα. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος συντήρησης. Λόγω της εξαιρετικά στενής δέσμης τους (σχεδόν σημειακή πηγή, μικρότερη από 5 mm), έχουν πολύ μεγάλη λαμπρότητα και το φως μπορεί να φωτίσει πολύ μακριά χωρίς τη χρήση ανακλαστήρων, κάτι που διευκολύνει τη χρήση τους για φωτισμό ανάδειξης, ενώ δεν παράγουν υπεριώδη ή υπέρυθη ακτινοβολία. Δε χρησιμοποιούνται για λειτουργική χρήση όπως δουλειά γραφείου. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η δυνατότητα μίξης των χρωμάτων για την παραγωγή ενδιάμεσων αποχρώσεων και άλλων εφέ με τη χρήση του χρώματος. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη στην τεχνολογία των LED είναι τεράστια και έχει παραχθεί λευκό χρώμα με θερμοκρασία χρώματος περίπου 7.000 – 8.000K, που χαρακτηρίζεται ψυχρό.



Εικ. 3.10 : LED

- Οπτικές ίνες

Το φως από μια φωτεινή πηγή ταξιδεύει κατά μήκος της οπτικής ίνας μέσω μιας σειράς εσωτερικών ανακλάσεων μέχρι την άκρη της, όπου και εκπέμπεται απευθείας ή μέσω κάποιου φακού. Οι οπτικές ίνες είναι διαφανείς και αποτελούνται από πλαστικό ή γυαλί. Οι γυάλινες θεωρούνται η καλύτερη επιλογή όταν μας ενδιαφέρει η ένταση και χρωματική απόδοση του φωτός. Η ποιότητα του φωτισμού εξαρτάται από το είδος της φωτεινής πηγής, το μήκος, τη διάμετρο και το συντελεστή απόσβεσης της οπτικής ίνας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι η ταυτόχρονη μεταφορά φωτός (απαλλαγμένο από υπεριώδη και υπέρυθη ακτινοβολία) σε πολλά σημεία από μία μόνο φωτεινή πηγή, η οποία βρίσκεται μακριά από το φωτιζόμενο αντικείμενο. Επίσης υπάρχει δυνατότητα αυξομείωσης της έντασης του φωτός, εναλλαγής χρωμάτων και δημιουργίας οπτικών εφέ. Τέλος η απουσία ηλεκτρικού ρεύματος παρέχει στεγανότητα στις οπτικές ίνες, δίνοντάς μας τη δυνατότητα να τις χρησιμοποιήσουμε με ασφάλεια σε εξωτερικούς χώρους, πισίνες κλπ.[9].



Εικ. 3.11 : Οπτικές ίνες

### 3.4 Κατηγορίες φωτισμού και φωτιστικών

Η αίσθηση που αποκομίζουμε από ένα χώρο που επισκεπτόμαστε ή από ένα αντικείμενο που παρατηρούμε εξαρτάται από το είδος του φωτισμού που πέφτει σε αυτό. Έτσι κατατάσσουμε το είδος του φωτισμού σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: [13]

- Γενικός (general)

Χρησιμοποιείται για να δώσει ένα ομοιόμορφο αποτέλεσμα στο οριζόντιο επίπεδο εργασίας, όπου τα ποσοτικά χαρακτηριστικά είναι βασικής σημασίας για τους χρήστες. Περιλαμβάνει άμεσο φωτισμό και φως από διάχυση. Με το γενικό φωτισμό μπορούμε να αναδείξουμε μόνο τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία του χώρου, καθώς οι σκιές που δημιουργούνται είναι απαλές και δεν αναδεικνύουν λεπτομέρειες, ώστε να μπορούμε να προσανατολιστούμε μέσα σε αυτόν.

- Κατευθυντικός (directional)

Χρησιμοποιείται για να δηλώσει την κατεύθυνση στο χώρο, όπου ο γενικός φωτισμός είναι δευτέρης σημασίας. Τα φωτιστικά λειτουργούν ως στοιχεία προσανατολισμού και σήμανσης στο χώρο και διατάσσονται σε γραμμική πορεία.

- Τονισμού (accentuational)

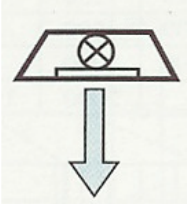



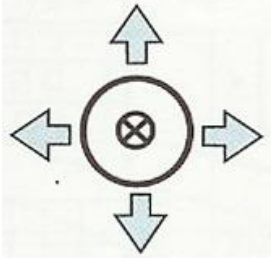

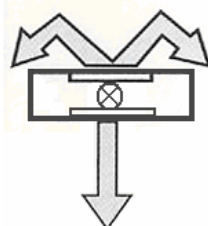

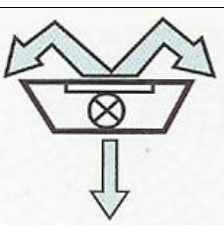
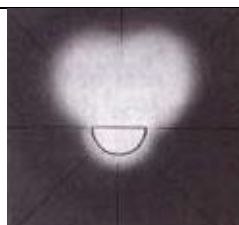

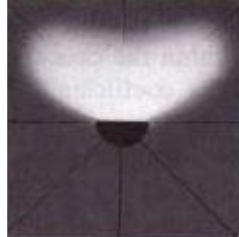
Χρησιμοποιείται για να δώσει έμφαση σε κάποιο στοιχείο του χώρου και να αναδείξει τις χαρακτηριστικές του ποιότητες, όπως δομή, υφή, σχήμα. Το εύρος της δέσμης και η σχέση με το γύρω περιβάλλον είναι αυτά που δίνουν διαφορετική έμφαση στο αντικείμενο που φωτίζεται.

- Χαρακτήρα (washlighting)

Χρησιμοποιείται για να αποδώσει τις αρχιτεκτονικές ποιότητες του χώρου, τα όρια και τις αναλογίες του. Εφαρμόζεται σε μεγάλες επιφάνειες και δημιουργεί ένα ομοιόμορφο αποτέλεσμα με απαλές σκιές, ενώ συχνά αποτελεί το φόντο πάνω στο οποίο τονίζονται με έμφαση κάποια αντικείμενα.

Κατά το πρότυπο CIE, τα φωτιστικά σώματα ανάλογα με τη διανομή της φωτεινής ροής του λαμπτήρα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες :[13]



Χαρακτηρισμός φωτιστικού σώματος ως προς την κατανομή της ροής του λαμπτήρα	Παραστατική μορφή φωτιστικού σώματος	Αντίστοιχες εικόνες	Ποσοστό % φωτεινής ροής με κατεύθυνση επάνω	Ποσοστό % φωτεινής ροής με κατεύθυνση κάτω
Άμεσου φωτισμού			0-10%	90-100%
Ημιάμεσου φωτισμού			10-40%	60-90%
Διάχυτου φωτισμού			40-60%	40-60%
Άμεσου-Έμμεσου φωτισμού			40-60%	40-60%
Ημιέμμεσου φωτισμού			60-90%	10-40%
Έμμεσου φωτισμού			90-100%	0-10%

Πιν.3.2 : Κατηγορίες φωτιστικών σωμάτων

## Κεφάλαιο 4 Συστήματα ελέγχου φωτισμού

Τα συστήματα ελέγχου φωτισμού είναι συσκευές που ρυθμίζουν τη λειτουργία του συστήματος φωτισμού σε συνάρτηση με ένα εξωτερικό σήμα (χειροκίνητη επαφή, ανίχνευση παρουσίας, χρονοδιακόπτης, στάθμη φωτισμού). Ενεργειακά αποδοτικά συστήματα ελέγχου είναι:[14]

- Τοπικοί διακόπτες έναυσης

Οι τοπικοί διακόπτες έναυσης ελέγχουν τη λειτουργία των φωτιστικών κατά ομάδες και ρυθμίζουν το φωτισμό σε συγκεκριμένες ζώνες του χώρου, π.χ. ζώνες στις οποίες εκτελείται κάποια εργασία.

Με τους τοπικούς διακόπτες εξασφαλίζεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και μεγαλύτερη άνεση του χρήστη, σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα στα οποία το σύνολο των φωτιστικών σωμάτων του χώρου ελέγχεται με ένα διακόπτη. Οι τοπικοί διακόπτες παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του φωτισμού στους χώρους εργασίας, σε σχέση με τις σειρές διακοπών που είναι συγκεντρωμένες πλησίον της κύριας εισόδου του χώρου.

Ο τοπικός έλεγχος κατά ομάδες φωτιστικών είναι σημαντικός στις περιπτώσεις κατά τις οποίες μόνο κάποια τμήματα του χώρου απαιτούν τεχνητό φωτισμό, είτε γιατί στα άλλα τμήματα δεν υπάρχουν εργαζόμενοι (π.χ. μετά τη λήξη του εργασιακού ωραρίου) είτε γιατί στα άλλα τμήματα υπάρχει επαρκής φυσικός φωτισμός. Γενικά, οι ζώνες που ο φωτισμός τους ελέγχεται από τοπικούς διακόπτες θα πρέπει να έχουν παρόμοια στάθμη φυσικού φωτισμού σε όλη τους την επιφάνεια. Επίσης, θα πρέπει η ομαδοποίηση των φωτιστικών να σχετίζεται με τον τρόπο χρήσης του χώρου. Ως γενική αρχή, οι τοπικοί διακόπτες δεν θα πρέπει να απέχουν περισσότερο από 8.00 m από το πιο απομακρυσμένο φωτιστικό ή 3 x (ύψος χώρου) m.

- Χρονοπρογραμματισμός

Με αυτό το σύστημα ελέγχου, τα φωτιστικά σώματα σβήνουν από ένα κεντρικό πίνακα, την ίδια ώρα κάθε ημέρα (συνήθως την ώρα των διαλειμμάτων εργασίας και στη λήξη του εργασιακού ωραρίου). Είναι σημαντικό να προβλέπεται στο σύστημα και τοπικός έλεγχος έτσι ώστε να είναι δυνατή η έναυση των φωτιστικών όταν τα χρειάζονται οι χρήστες. Χρονικά σήματα μπορούν να δίνονται από διάφορα συστήματα από απλά ηλεκτρομηχανολογικά έως πολύπλοκους ηλεκτρονικούς διακόπτες. Μπορούν επίσης να δίνονται από το κεντρικό σύστημα ελέγχου του κτιρίου.

Τα σήματα αυτά πρέπει να μεταφερθούν μέχρι τα φωτιστικά. Αυτό γίνεται είτε μέσω του ίδιου του ηλεκτρικού δικτύου, ή μέσω bus χαμηλής τάσης, συνδεδεμένου με κάθε φωτιστικό ή ομάδα φωτιστικών.



- Έλεγχος παρουσίας

Επιτυγχάνεται με αισθητήρες παρουσίας οι οποίοι σβήνουν τα φώτα όταν δεν ανιχνεύσουν κίνηση στο χώρο για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Όταν ανιχνεύσουν κίνηση συνήθως επαναφέρουν τα φώτα σε λειτουργία. Σε μερικές περιπτώσεις τα φώτα παραμένουν σβηστά. Οι αισθητήρες παρουσίας μπορεί να είναι:

- είτε αυτόνομοι είτε συνδεδεμένοι σε σύστημα ελέγχου και μπορούν να τοποθετηθούν σε τοίχο ή σε οροφή. Αυτοί ήταν οι πρώτοι τύποι ανιχνευτών παρουσίας που χρησιμοποιήθηκαν και παραμένουν ιδιαίτερα δημοφιλείς. Η εγκατάστασή τους απαιτεί διάνοιξη της οροφής ή του τοίχου, δεδομένου ότι πρέπει να καλωδιωθούν με το σύστημα ηλεκτρική παροχής. Αυτό συνεπάγεται σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης όταν η εγκατάσταση γίνεται εκ των υστέρων (στις περιπτώσεις ανακαινίσεων)
- είτε να υπάρχουν όλα τα εξαρτήματα στο ίδιο κεντρικό πίνακα – σημείο και να μπορούν εύκολα να καλωδιωθούν σε υπάρχοντα κουτιά στον χώρο. Αυτή είναι πιο πρόσφατη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρούς χώρους γραφείων, σε περιπτώσεις ανακαινίσης, με αντικατάσταση των κοινών διακοπών τοίχου. Έχουν περιορισμένη ευελιξία δεδομένου ότι η θέση του πίνακα είναι σταθερή, συνήθως σε ύψος 110 εκ. από τη στάθμη του δαπέδου. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι διαχωριστικοί τοίχοι και τα έπιπλα μπορεί να περιορίσουν την εμβέλειά του. Ωστόσο, σε κατάλληλους χώρους (μικρά γραφεία και αίθουσες συνεδριάσεων που έχουν επιτοίχιους διακόπτες) οι πίνακες είναι πολύ οικονομικοί δεδομένης της χαμηλής τιμής τους και το κόστος εγκατάστασης είναι σχεδόν αμελητέο.

Η εξοικονόμηση ενέργειας, με την εγκατάσταση ενός αισθητήρα παρουσίας, ποικίλει αναλόγως του μεγέθους του χώρου και του τρόπου χρήσης του χώρου, αλλά συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 35% και 45%. Είναι σημαντικό να έχει προβλεφθεί κάποια χρονική υστέρηση στο σύστημα, καθώς ο χρήστης μπορεί να παραμείνει ακίνητος για μικρά χρονικά διαστήματα ενώ συνεχίζει να βρίσκεται μέσα στο χώρο και δεν επιθυμεί να σβήνουν τα φώτα πριν την έξοδό του από το χώρο. Απαιτείται προσοχή στην επιλογή των ανιχνευτών καθώς ο βαθμός ευαισθησίας τους ποικίλει.

Κριτήριο για την επιλογή ενός συστήματος ελέγχου παρουσίας είναι η χρήση του χώρου. Οι ενδεικνύμενες εφαρμογές για συστήματα ελέγχου παρουσίας είναι οι χώροι στους οποίους η χρήση είναι διακοπτόμενη ή απρόβλεπτη, π.χ. χώροι φωτοτυπικών, αποθήκες, υπηρεσιακοί διάδρομοι.

Στους αισθητήρες παρουσίας δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται λαμπτήρες εκκένωσης μεγάλης έντασης (εκτός ειδικών περιπτώσεων), καθώς λαμπτήρες αυτοί απαιτούν κάποιο χρόνο έως την πλήρη έναυσή τους και επομένως αρκετά λεπτά για να επανέλθουν σε πλήρη λειτουργία.

- Σύζευξη με τον φυσικό φωτισμό

Το σύστημα λειτουργεί με φωτοκύτταρο το οποίο τοποθετείται είτε εξωτερικά είτε σε θέση που να βλέπει έξω από το παράθυρο, ώστε να δέχεται μόνο φυσικό φως.

Μπορεί να τοποθετηθεί και μέσα στο χώρο ώστε να μετρά τον συνολικό φωτισμό (φυσικό και τεχνητό).

Σ' αυτή την περίπτωση ένας φωτοηλεκτρικός αισθητήρας μπορεί να ελέγχει ομάδα φωτιστικών ή να είναι τοποθετημένος σε μεμονωμένο φωτιστικό και να ελέγχει μόνο αυτό. Τα πιο κοινά συστήματα σύζευξης φυσικού και τεχνητού φωτισμού είναι:

- Συστήματα έναυσης / σβέσης

Ένα τέτοιο σύστημα το οποίο προκαλεί ξαφνικές και έντονες αλλαγές της στάθμης φωτισμού μπορεί να προκαλεί δυσαρέσκεια στους χρήστες. Αυτός ο τύπος ενδείκνυται για χώρους που δέχονται άπλετο φυσικό φως και η συχνότητα έναυσης / σβέσης είναι περιορισμένη. Επίσης, είναι σημαντικό να προβλέπεται χρονική υστέρηση στο σύστημα ελέγχου ώστε να αποφεύγεται επαναλαμβανόμενη συχνή έναυση / σβέση, που μπορεί να προκαλείται π.χ. από κινούμενη νέφωση.

- Βηματικά συστήματα

Είναι ίδια με τα προηγούμενα αλλά με μία ή δύο ενδιάμεσες θέσεις μεταξύ των θέσεων έναυσης και σβέσης.

- Συστήματα ρύθμισης φωτεινής ροής

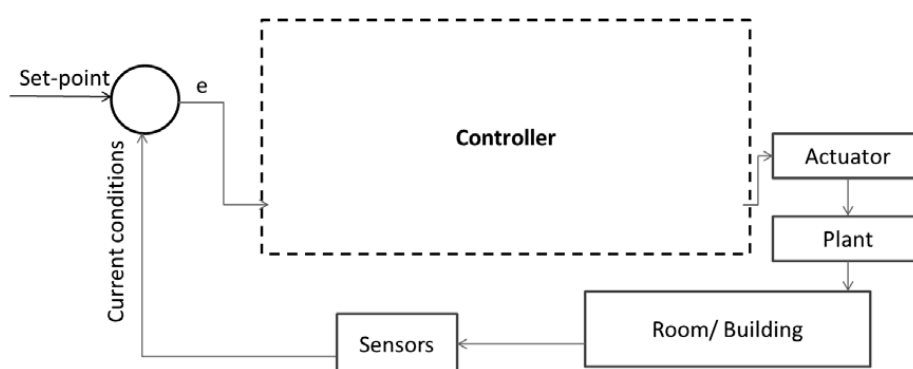
Αυτά εξασφαλίζουν ότι η συνολική ποσότητα φυσικού και τεχνητού φωτισμού φτάνει πάντοτε τη στάθμη στην οποία έχει ρυθμιστεί το σύστημα. Εάν η απαιτούμενη στάθμη εξασφαλίζεται μόνο με φυσικό φως τότε η ροή του τεχνητού συστήματος μηδενίζεται. Σε αντίθεση με το σύστημα έναυσης / σβέσης, το σύστημα ελέγχου φωτεινής ροής δεν ενοχλεί τους χρήστες και η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας είναι μεγαλύτερη. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών στραγγαλιστικών διατάξεων επέτρεψε τη χρήση των συστημάτων αυτών και στο φωτισμό φθορισμού, ιδιαίτερα σε εμπορικούς χώρους.



*Εικ. 4.1 : Σύστημα ρύθμισης φωτεινής ροής*

Γενικά, εάν ο φυσικός φωτισμός είναι επαρκής, ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις φωτισμού για μεγάλο διάστημα της ημέρας, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Έρευνες έχουν δείξει ότι η πιθανότητα έναυσης του τεχνητού συστήματος, από τους εργαζόμενους όταν εισέρχονται στο χώρο εργασίας, έχει άμεση σχέση με την παροχή φυσικού φωτισμού και επίσης όταν οι χρήστες ανάψουν το τεχνητό σύστημα κατά την είσοδό τους στο χώρο, σπανίως το σβήνουν κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Το πείραμα όπου πραγματοποιήθηκε σε δύο νοσοκομεία, το ένα στα Χανιά και το άλλο στην Ανκόνα, φανερώνει τα οφέλη από την εφαρμογή συστημάτων ελέγχου φωτισμού. Ο σκοπός του πειράματος ήταν η παρουσίαση ενός προηγμένου συστήματος ελέγχου φωτισμού. Για την αρχιτεκτονική του ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν ασαφείς (fuzzy) τεχνικές.(Papantoniou et al 2013).



Εικ. 4.2.: Αρχιτεκτονική ελεγκτή

Ο έλεγχος αποτελεσματικότητας του ελεγκτή έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Radiance. Ο είσοδος του ελεγκτή ήταν το σφάλμα μεταξύ του αισθητήρα φωτός και της επιθυμητής τιμής και η έξοδος η μεταβολή της στάθμης φωτισμού. Μέσα από τη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε και από τις μετρήσεις, αναφέρεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μέσω της σύνδεσης του Matlab και του Radiance. Η εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενέργειας για την αίθουσα αναμονής επισκεπτών υπολογίστηκε στο 36%, στο γραφείο των νοσοκόμων στο 54% και στο γραφείο των γιατρών στο 45%. [15]

Η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων ελέγχου του φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνεται. Σε κτίρια γραφείων η κατανάλωση ενέργειας, στατιστικά, μπορεί να μειωθεί κατά 30% έως 50%. Η απόσβεση του κόστους εφαρμογής μπορεί συχνά να επιτευχθεί σε 2-3 έτη.

Τόσο η αυτόματη, όσο και η χειροκίνητη έναυση και σβέση των λαμπτήρων έχει επιπτώσεις στο χρόνο ζωής των λαμπτήρων. Εντούτοις, αυτή η επίδραση είναι ελάχιστη, ενώ το ενεργειακό όφελος από το σβήσιμο των λαμπτήρων καλύπτει το κόστος μείωσης του χρόνου ζωής τους. Υπό την προϋπόθεση ότι οι λαμπτήρες πρόκειται να παραμένουν σβηστοί για χρονικό διάστημα περισσότερο των δύο ή τριών λεπτών, είναι πάντα οικονομικά αποδοτικότερο να σβήνουν.

Στα συστήματα ελέγχου φωτισμού μπορούν να συνδυαστούν διάφορες στρατηγικές. Για παράδειγμα, επιτυχείς εγκαταστάσεις για διαδρόμους γραφείων ή ξενοδοχείων

μπορεί να συνδυάσουν α) κεντρικό χρονικό προγραμματισμό έναυσης/σβέσης των φωτιστικών, β) σβήσιμο των φωτιστικών σωμάτων κατά την διάρκεια του μεσημεριανού γεύματος έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση, γ) σύζευξη με τον φυσικό φωτισμό στα φωτιστικά σώματα κοντά στα παράθυρα και δ) τοποθέτηση τοπικών διακοπών, έτσι ώστε μόνο οι χώροι που χρησιμοποιούνται εκείνη τη χρονική διάρκεια να είναι φωτισμένοι. Οι ανιχνευτές παρουσίας που εγκαθίστανται σε κάθε φωτιστικό μπορούν επίσης να περιλάβουν αισθητήρες φυσικού φωτισμού. Αυτός ο τύπος ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου μπορεί να λύσει το πρόβλημα που δημιουργείται σε χώρους ιδιόμορφου σχήματος ή όπου η σύνδεση με άλλο σύστημα ελέγχου είναι δύσκολη.

Οι μόνιμοι χρήστες ενός χώρου πρέπει να είναι ενήμεροι για την ύπαρξη του συστήματος ελέγχου φωτισμού, τον τρόπο λειτουργίας του και πώς μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με αυτό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις ανακαινίσεις εγκαταστάσεων, όπου μπορεί να παρουσιαστεί αντίδραση στην εγκατάσταση των συστημάτων ελέγχου φωτισμού εάν οι χρήστες του κτιρίου δεν ενημερωθούν πλήρως για το νέο σύστημα.[14]

## Κεφάλαιο 5 Radiance

### 5.1 Γενικά

Το Radiance αποτελεί ένα πακέτο λογισμικού για ηλεκτρονικό υπολογιστή το οποίο αναπτύχθηκε στο Lawrence Berkeley Laboratory από την ερευνητική ομάδα Lighting Systems υπό την καθοδήγηση του Greg Ward. Πρόκειται για ένα ερευνητικό εργαλείο που υπολογίζει και προβλέπει την ορατή ακτινοβολία στον χώρο το οποίο αποτελείται στην πράξη από έναν αριθμό μικρότερων προγραμμάτων τα οποία είτε μόνα τους είτε σε συνδυασμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε είτε να παραχθούν φωτορεαλιστικές εικόνες.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί γεωμετρικά μοντέλα τριών διαστάσεων (3D) σαν δεδομένα εισαγωγής για να παράγει φασματικές τιμές ακτινοβολίας στη μορφή φωτορεαλιστικών εικόνων. Το πακέτο αυτό ωστόσο πραγματοποιεί κάτι παραπάνω από μία φωτορεαλιστική αναπαράσταση.

Χρησιμοποιώντας ακριβή δεδομένα σαν είσοδο στο πρόγραμμα, όπως δημιουργία φωτομετρικών δεδομένων για συγκεκριμένη περιοχή φωτισμού, οι σχεδιαστές έχουν τη δυνατότητα εκτίμησης της μελέτης που σχεδιάζουν χωρίς τον κίνδυνο να παρεκκλίνουν εξαιτίας οπτικά ευπαρουσίαστων αλλά ανακριβών εικόνων. Το πακέτο του Radiance παρουσιάζει ιδιαίτερη χρησιμότητα στην περίπτωση που κάποιος έχει να ανταπεξέλθει σε καινοτόμες και πειραματικές μελέτες. Προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά του φωτός, το Radiance υπολογίζει τιμές ακτινοβολίας και προβλέπει την αναπαράσταση οποιασδήποτε σκηνής που έχει γεωμετρικά περιγραφεί και συγκεκριμένα ενός αρχιτεκτονικού χώρου. Το πρόγραμμα εκπληρώνει τον «παραδοσιακό» ρόλο προγραμμάτων αυτού του είδους, αλλά προσφέρει επιπλέον δυνατότητες προσομοίωσης φωτισμού με ακρίβεια και προχωρημένα μοντέλα σχετικά με αντανάκλαση πάνω σε επιφάνειες και με αυτόν τον τρόπο καλύπτει επιτυχώς θέματα σχετιζόμενα με αλληπάλληλες ανακλάσεις σε περίπλοκους χώρους. Αντίθετα τα εμπορικά προγράμματα φωτισμού δεν έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν χώρους σε πλήρη λεπτομέρεια.[16]

Υπάρχουν τρία βήματα για τη δημιουργία μιας εικόνας όπως αναφέρθηκε παραπάνω:

1. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία ή μετασχηματισμό μιας τρισδιάστατης περιγραφής ενός φυσικού περιβάλλοντος ή μιας σκηνής (π.χ. γραφείο, έπιπλα, φωτιστικά κ.τ.λ.) σε απλά γεωμετρικά στοιχεία τα οποία το Radiance μπορεί να διαχειριστεί. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν πολύγωνα, σφαίρες, κυλίνδρους και κώνους.
2. Στη συνέχεια πρέπει να οριστεί συγκεκριμένο υλικό (μέταλλο, γυαλί, ξύλο, μάρμαρο κ.τ.λ.) ή άλλες ιδιότητες για τα παραπάνω στοιχεία. Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει επίσης την τοποθέτηση συγκεκριμένων φωτιστικών πηγών, τη ρύθμιση της έντασής τους, τον καθορισμό του τύπου τους και την κατανομή τους στο χώρο.
3. Το τελευταίο βήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία της τελικής εικόνας έχοντας έτοιμο το όλο σκηνικό της προσομοίωσης. Αυτή η εικόνα πρέπει στη συνέχεια να

«καθαριστεί», να «φιλτραριστεί» και να «αναλυθεί» με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Υπάρχει βέβαια η δυνατότητα να επαναληφθεί η συγκεκριμένη διαδικασία ώστε ο χρήστης να μπορεί να επιστρέφει σε ένα προηγούμενο σημείο και να αλλάζει τη γεωμετρία ή τα υλικά μέχρι να δημιουργηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

## 5.2 Μεθοδολογία λογισμικού

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί είναι η ανάστροφη ιχνηλασία ακτίνας (ray tracing), μεθοδολογία ικανή να περιγράψει με ακρίβεια την αλληλεπίδραση του φωτός με τις επιφάνειες που απαρτίζουν τον χώρο. Η παραγωγή της εικόνας βασίζεται στην εκπομπή ακτινών από το σημείο παρατήρησης προς κάθε εικονοστοιχείο της οθόνης. Η ακτίνα αυτή παρακολουθείται διά μέσω των αλληλεπιδράσεων (ανάκλαση, διάθλαση κλπ.) που έχει με τις επιφάνειες των αντικειμένων που έρχεται σε επαφή για να καταλήξει ή όχι σε κάποια φωτεινή πηγή. Με αυτό τον τρόπο το εικονοστοιχείο αποκτά μια τιμή λαμπρότητας. Αν η διαδικασία επαναληφθεί για όλα τα εικονοστοιχεία, μια φωτορεαλιστική εικόνα μπορεί να σχηματισθεί και ανάλογα με την ακρίβεια του υπολογισμού να χρησιμοποιηθεί για επιπρόσθετες αναλύσεις (π.χ. θάμβωση).

Συνεπώς είναι εξαιρετικής σπουδαιότητας το γεγονός της παραμετροποίησης της ανάκλασης/διάθλασης. Η συνήθης παραμετροποίηση γίνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης BRDF (Bi-directional Reflection Distribution Function). Η συνάρτηση αυτή περιγράφει την κατανομή της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Η περιγραφή της BRDF είναι η εξής:

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = \int_{2\pi} L_i(\theta_i, \phi_i) \cdot f_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i$$

,όπου  $\theta_r, \theta_i$  είναι οι ζενίθιες γωνίες της ανακλώμενης και προσπίπτουσας ακτινοβολίας,  $\phi_r, \phi_i$  τα αζιμούθια ανακλώμενης και προσπίπτουσας,  $f_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$  η συνάρτηση BRDF και  $\Omega$  η στερεά γωνία.

Η ανακλαστικότητα  $\rho(\theta_i, \phi_i)$  συνεπώς ορίζεται ως εξής:

$$\rho(\theta_i, \phi_i) = \int_{2\pi} f_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r$$

Για επιφάνειες οι οποίες εμφανίζουν πλήρη διάχυση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας η ανακλαστικότητα δεν εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης και η ανακλώμενη λαμπρότητα μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τον τύπο :

$$L_r = \rho * E / \pi$$

,όπου  $E$  είναι ο φωτισμός που προσπίπτει στην επιφάνεια και  $\rho$  η ανακλαστικότητα της.

Η ανακλαστικότητα πλήρως κατοπτρικών επιφανειών δεν εξαρτάται από το αζιμούθιο της προσπίπτουσας. Έτσι η ανακλώμενη λαμπρότητα υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = \rho_s(\theta_i) \cdot L_i(\theta_r, \phi_r - \pi)$$

Η διαπερατότητα των υλικών μπορεί να αντιμετωπισθεί παραμετρικά με μια παρόμοια συνάρτηση της BTDF.

Η συνάρτηση BRTDF εξαρτάται από τις οπτικές ιδιότητες των υλικών καθώς επίσης και την κατάσταση της επιφάνειας τους. Επειδή η πλειονότητα των υλικών δεν παρουσιάζει ούτε πλήρη διάχυση ούτε προφανώς πλήρη κατοπτρική ανάκλαση, η συνάρτηση BRTDF ορίζεται με τη βοήθεια εμπειρικών παραμέτρων όπως :

- Η ισοτροπική ανακλαστικότητα
- Το ανάγλυφο της επιφάνειας
- Ο δείκτης διάθλασης

Η εκτίμηση της λαμπρότητας που ανακλάται από κάποια επιφάνεια του χώρου πραγματοποιείται προφανώς με τη βοήθεια των προαναφερθέντων συναρτήσεων BRTDF οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μια εξίσωση υπολογισμού της λαμπρότητας που εκπέμπεται από κάποιο σημείο μιας επιφάνειας. Αυτή είναι προφανώς το άθροισμα της λαμπρότητας λόγω ανάκλασης αλλά και αυτής που πιθανόν να εκπέμπεται από την ίδια της επιφάνεια. Η επίλυση της εξίσωσης :

$$L_r(\theta_r, \phi_r, \lambda) = L_e(\theta_r, \phi_r, \lambda) + \int_{2\pi} L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cdot f_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, \lambda) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i$$

,όπου  $L_e$  είναι η εκπεμπόμενη λαμπρότητα από την επιφάνεια (αν φυσικά αυτή είναι πηγή φωτισμού) και  $\lambda$  το μήκος κύματος, πραγματοποιείται είτε με την τεχνική πεπερασμένων στοιχείων είτε με ιχνηλασία ακτίνας.

Στην ιχνηλασία ακτίνας η κάθε ακτίνα θεωρείται βασικά φωτεινή ροή ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Η δημιουργία συνθετικής ρεαλιστικής εικόνας στο Radiance βασίζεται στην εκπομπή ενός αριθμού ακτινών από το σημείο παρατήρησης προς τον χώρο. [17]

### 5.3 Περιγραφή σκηνικού

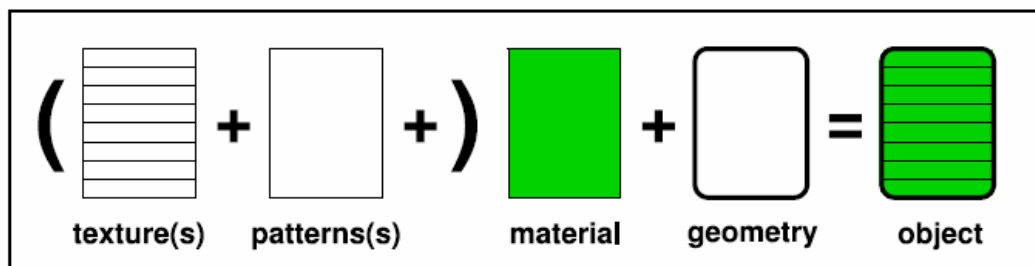
Η περιγραφή του χώρου που θα προσομοιωθεί μεταφέρεται στο Radiance σε μορφή αριθμών σε αρχεία κειμένου. Τα αρχεία αυτά καθορίζουν το μέγεθος, τη θέση, το

σχήμα και τον τύπο του υλικού. Επίσης μπορούν να δημιουργηθούν με το χέρι ή να παραχθούν με προγράμματα τύπου CAD. Στα αρχεία αυτά για την περιγραφή της γεωμετρίας, υλικών και φωτιστικών δίνεται η κατάληξη .rad.

- Γενικός καθορισμός αρχείων

Όλα τα αρχεία που περιγράφουν μια σκηνή έχουν την ίδια δομή, η οποία αποτελείται από

τον συνδυασμό ξεχωριστών δομικών στοιχείων (primitives). Για παράδειγμα ορίζεται αρχικά ένα material primitive (π.χ. ένα κόκκινο υλικό) και στη συνέχεια ένα object primitive (π.χ. ένα πολύγωνο) το οποίο χρησιμοποιεί το προηγούμενο ήδη ορισμένο υλικό. [15]



Εικ. 5.1 : Διαδικασία περιγραφής αντικειμένου

Όλα τα δομικά στοιχεία (primitives) έχουν την ακόλουθη μορφή :

# προαιρετικό σχόλιο

modifier type identifier

n S1 S2 ... Sn

0

n R1 R2 ... Rn

- Ο όρος modifier πρέπει να είναι είτε η λέξη void ή το όνομα ενός primitive στοιχείου που έχει οριστεί προηγουμένως. Η λέξη void χρησιμοποιείται όταν το υπάρχον primitive στοιχείο δεν χρειάζεται να τροποποιηθεί από κάποιο άλλο.
- Ο όρος type πρέπει να είναι ένα από τα δομικά στοιχεία του Radiance. Αυτά μπορεί να είναι είτε υλικά (π.χ. plastic, glass, metal) , είτε αντικείμενα (π.χ. polygons, spheres, cones) ή ένας από τους ειδικούς τύπους (π.χ. pattern, mixture).
- Ο όρος identifier αποτελεί απλά ένα μοναδικό όνομα με το οποίο χαρακτηρίζουμε το δομικό στοιχείο. Αυτό το όνομα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σαν modifier σε μια ακολουθία ορισμών οποιουδήποτε δομικού στοιχείου.

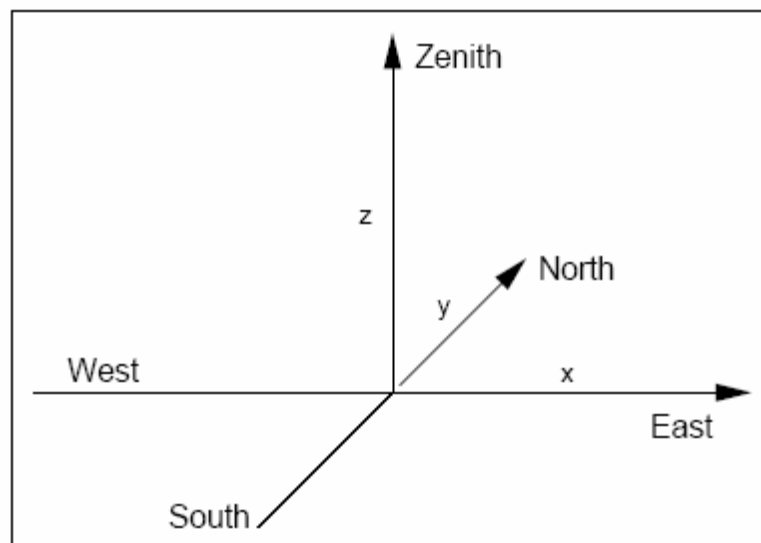


Στον παραπάνω ορισμό στη δεύτερη γραμμή περιέχονται όλες οι ακολουθίες λέξεων που χρειάζονται για την περιγραφή του στοιχείου. Ο χαρακτήρας  $n$  είναι ο αριθμός των λέξεων ακολουθιών που χρησιμοποιούνται. Η τρίτη γραμμή πρέπει πάντα να διαβάζει το χαρακτήρα 0 (μηδέν). Η τελευταία γραμμή περιέχει δεκαδικούς αριθμούς και ο αριθμός  $n$  στην αρχή δείχνει το συνολικό αριθμό των χαρακτήρων που ακολουθούν. Οποιοδήποτε σχόλιο ξεκινάει με το χαρακτήρα #. Κάθε γραμμή η οποία ξεκινάει με το σύμβολο ! αντιμετωπίζεται σαν εντολή. Η εντολή αυτή εκτελείται και επιστρέφεται το αποτέλεσμα της εντολής.

- Γεωμετρία 3D

Ο ευκολότερος τρόπος για τη δημιουργία μίας σκηνής στο Radiance είναι η εισαγωγή της γεωμετρίας μέσω προγράμματος μετατροπέα αφού αρχικά έχει χρησιμοποιήσει 3D CAD λογισμικό. Εναλλακτική λύση αποτελεί η εισαγωγή της επιθυμητής γεωμετρίας απευθείας σε έναν κειμενογράφο.

Το Radiance χρησιμοποιεί ένα σύστημα συντεταγμένων σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Το  $z$  διάνυσμα ή άξονας δείχνει προς τα πάνω, το  $x$  διάνυσμα ή άξονας δείχνει ανατολικά και το  $y$  διάνυσμα ή άξονας δείχνει προς το βορρά. Η επιλογή των μονάδων είναι ελεύθερη για τον χρήστη με μόνο περιορισμό οι τιμές να επιλέγονται σε λογικά διαστήματα τιμών .



*Εικ. 5.2 : Η σύμβαση του συστήματος συντεταγμένων στο Radiance*

Η μόνη απαίτηση του Radiance είναι η πλήρης γνώση από τον χρήστη της κατεύθυνσης των αντικειμένων που χρησιμοποιεί. Παρακάτω ακολουθούν οι τύποι αντικειμένων που χρησιμοποιεί το Radiance για να συνθέσει έναν χώρο με έναν συνδυασμό αυτών. [13]

- Πολύγωνο (polygon)

Τα πολύγωνα προσδιορίζονται από ένα σύνολο κορυφών με τρεις διαστάσεις. Η τελευταία κορυφή ενώνεται αυτόματα με την πρώτη. Ανοίγματα στο εσωτερικό του πολυγώνου παρίστανται ως εσωτερικές κορυφές ενωμένες με την εξωτερική περίμετρο μέσω δύο πλευρών που συμπίπτουν. [16], [18], [19]

modifier polygon identifier

Ø

Ø

n x1 y1 z1 (πρώτη κορυφή)

x2 y2 z2

.....

xn yn zn (n-οστή κορυφή)

Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των κορυφών.

- Σφαίρα (sphere)

Η σφαίρα ορίζεται καθορίζοντας τη θέση του κέντρου και την ακτίνα της.

modifier sphere identifier

0

0

4 x y z (θέση κέντρου)

r (ακτίνα)

- Κώνος (cone)

Ο κώνος είναι ένας κύλινδρος με διαφορετική αρχική και τελική διάμετρο. Ορίζεται με το αρχικό και το τελικό σημείο του κεντρικού του άξονα και την αρχική και τελική ακτίνα.

modifier cone identifier

0

0

8 x0 y0 z0 (αρχικό σημείο)

x1 y1 z1 (τελικό σημείο)

r0 r1 (αρχική και τελική ακτίνα )

- Κύλινδρος (cylinder)

Ο κύλινδρος είναι παρόμοιος με τον κώνο, αλλά η αρχική και τελική ακτίνα είναι ίσες.

modifier cylinder identifier

0  
0  
7 x0 y0 z0 (αρχικό σημείο)  
x1 y1 z1 (τελικό σημείο)  
r ( ακτίνα )

- Δακτύλιος (ring)

Ο δακτύλιος είναι ένας κυκλικός δίσκος και ορίζεται από τη θέση του κέντρου, το διάνυσμα της διεύθυνσης της επιφάνειάς του και την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα. Δεν χρειάζεται καθορισμένη διαδοχή στις δύο ακτίνες και μία από τις δύο μπορεί να είναι μηδενική.

modifier ring identifier  
0  
0  
8 x0 y0 z0 (θέση κέντρου)  
x1 y1 z1 (διάνυσμα επιφάνειας)  
r0 r1 (εσωτερική και εξωτερική ακτίνα)

- Υλικά

Για να προκύπτει μια ρεαλιστική εικόνα σαν αποτέλεσμα της προσομοίωσης στο Radiance πρέπει σε όλα τα αντικείμενα να αντιστοιχιστεί ένα υλικό. Αυτό το υλικό, το οποίο μπορεί να είναι συνδυασμός ενός αριθμού υλικών, καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το φως αλληλοεπιδρά με την κάθε γεωμετρική επιφάνεια. Το Radiance εμπεριέχει τέσσερις κατηγορίες υλικών : normal materials, lights, dielectric materials και BRDF materials.

- Normal materials

Normal materials είναι τα εξής : plastic, metal, trans και mirror. Αυτά τα υλικά ορίζονται να έχουν κάποιο χρώμα, συντελεστή τραχύτητας και συνιστώσα διάχυσης και κατοπτρισμού.

- Plastic

Το υλικό plastic ορίζεται από τρεις τιμές ανακλαστικότητας RGB (κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα), την τιμή της κατοπτρικής ανάκλασης και την τιμή της τραχύτητας.

plastic primitive:

modifier plastic identifier  
0  
0

5 R G B (Colour)

spec rough (specularity & roughness)

Αποδεκτές τιμές :

colour [0:1], [0:1], [0:1]

black - white

specularity [0:1]

matte - satin

roughness [0:1]

polished - low gloss

- Metal

Το υλικό metal είναι παρόμοιο με το υλικό plastic με τη διαφορά ότι ο όρος specularity παίρνει τιμές 0,9 ή μεγαλύτερες. Για το υλικό plastic τιμές της τραχύτητας πάνω από 0,2 δεν είναι συνηθισμένες.

metal primitive:

modifier metal identifier

0

0

5 R G B (Colour)

spec rough (specularity & roughness)

Αποδεκτές τιμές :

colour [0:1], [Ø:1], [Ø:1]

black - white

specularity [0:1]

dirty - clean

roughness [0:1]

polished – roughened

- Trans

Το υλικό trans είναι ένα ημιδιαφανές υλικό παρόμοιο με το plastic. Δέχεται τις ίδιες παραμέτρους με το plastic αλλά και δύο επιπλέον τιμές transmission και transmitted specularity. Οι δύο αυτές παράμετροι καθορίζουν αντίστοιχα την ποσότητα του φωτός που διεισδύει μέσα από το υλικό και αυτήν που διασκορπίζεται λόγω διάχυσης. Αυτό το υλικό είναι απείρως λεπτό και τροποποιεί το χρώμα του φωτός που διαχέεται.

Trans primitive:

modifier trans identifier

0

0

5 R G B

spec rough

trans tspec (transmission & transmitted specularity)

Αποδεκτές τιμές :

colour [0:1], [0:1], [0:1]

black - white

specularity [0:1]

matte - satin

roughness [0:1]

polished - low gloss

transmission [0:1]

opaque - transparent

transmitted specularity [0:1]

diffuse – clear

- Mirror

Το υλικό mirror χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δευτερευόντων πηγών λόγω ανακλάσεων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για επίπεδες επιφάνειες (π.χ. rings, polygons) και ορίζεται από τις τιμές ανακλαστικότητας RGB.

mirror primitive:

modifier mirror identifier

0 + modifier

0

3 R G B (Colour)

Αποδεκτές τιμές :

colour [0:1], [0:1], [0:1]

black – silver

- Lights

Lights ονομάζονται τα υλικά που είναι αυτόφωτα ή οι επιφάνειες που εκπέμπουν φως. Μπορούν να είναι πολύγωνα, σφαίρες, δίσκοι ή κύλινδροι. Οι παραλλαγές

αυτού του υλικού είναι light, spotlight, illum και glow. Όλοι οι τύποι του υλικού light ορίζονται από τις τιμές ανακλαστικότητας RGB.

- Light

Είναι το βασικό υλικό για επιφάνειες που εκπέμπουν φως. Οι κώνοι δεν υποστηρίζονται σαν φωτεινές πηγές.

light primitive:

modifier light identifier

0

0

3 R G B (radiance value)

colour (0:inf), (0:inf), (0:inf)

output brightness

- Spotlight

Χρησιμοποιείται για επιφάνειες που εκπέμπουν φως προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση. Ορίζεται από τις τιμές RGB καθώς και από ένα διάνυσμα προσανατολισμού και τη γωνία κώνου (σε μοίρες).

spotlight primitive:

modifier spotlight identifier

0

0

3 R G B (radiance value)

angle (cone angle)

x y z (direction vector)

Αποδεκτές τιμές :

colour (0:inf), (0:inf), (0:inf)

output brightness

angle [0:360]

no shadows - always shadows

direction (-inf:inf), (-inf:inf), (-inf:inf)

any aimed orientation

- Illum

Χρησιμοποιείται για δευτερεύουσες φωτεινές πηγές που έχουν ευρεία κατανομή. Η

δευτερεύουσα φωτεινή πηγή αντιμετωπίζεται σαν οποιοδήποτε άλλο υλικό τύπου light εκτός από την περίπτωση που υπάρχει άμεση οπτική παρατήρηση της πηγής. Στην περίπτωση αυτή παίρνει τα χαρακτηριστικά κάποιου άλλου υλικού ή γίνεται μη ορατή. Οι δευτερεύουσες πηγές είναι πολύ χρήσιμες για μοντελοποίηση παραθύρων ή φωτεινών επιφανειών.

illum primitive:

modifier illum identifier  
1 modifier (new material)  
0  
3 R G B (radiance value)

Αποδεκτές τιμές :

colour (0:inf), (0:inf), (0:inf)  
output brightness

- Glow

Χρησιμοποιείται για επιφάνειες που είναι αυτόφωτες αλλά με περιορισμένη ισχύ. Το υλικό αυτό ορίζεται από τις τιμές RGB καθώς και από μια μέγιστη ακτίνα για σκίαση στα γύρω αντικείμενα (οποιοδήποτε αντικείμενο βρίσκεται έξω από αυτήν την ακτίνα δε θα έχει σκιά προερχόμενη από αυτή τη φωτεινή πηγή).

glow primitive:

modifier glow identifier  
0  
0  
4 R G B (radiance value)  
maxrad (maximum radius)

Αποδεκτές τιμές :

colour (0:inf), (0:inf), (0:inf)  
output brightness  
maximum radius [0:inf)  
no shadows - always shadows

- Dielectric materials

Ένα διηλεκτρικό υλικό χαρακτηρίζεται ένα διαφανές υλικό που διαθλά και αντανακλά το φως, όπως για παράδειγμα το νερό ή ο κρύσταλλος. Το υλικό αυτό έτσι

έχει ένα δείκτη διάθλασης και συγκεκριμένη φασματική απορρόφηση. Οι τύποι διηλεκτρικών που χρησιμοποιεί το Radiance είναι dielectric, interface και glass.

- Dielectric

Το υλικό αυτό έχει τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ορίζεται από τις τιμές RGB και το δείκτη διάθλασης. Υπάρχει και μία προαιρετική παράμετρος, η σταθερά του Hartmann (η οποία είναι συνήθως μηδενική) και περιγράφει το πώς ο δείκτης διάθλασης αλλάζει σαν συνάρτηση του μήκους κύματος.

dielectric primitive:

modifier dielectric identifier

0

0

5 R G B (transmission value)

n Hc (refraction index & Hartmann constant)

Αποδεκτές τιμές :

transmission [0:1], [0:1], [0:1]

black - transparent

refractive index (1:2>

vacuum - diamond

Hartmann's constant <-20:30>

negative dispersion - positive dispersion

- Interface

Το υλικό αυτό είναι το σύνορο μεταξύ δύο διηλεκτρικών. Τα συνηθισμένα διηλεκτρικά περιβάλλονται από κενό. Το υλικό interface ορίζεται από δύο σύνολα τιμών RGB και δείκτη διάθλασης, από τα οποία το πρώτο ορίζει το εσωτερικό και το δεύτερο το εξωτερικό.

interface primitive:

modifier interface identifier

Ø

Ø

8 R1 G2 B3 (transmission value 1)

n1 (refraction index)

R2 G2 B2 (transmission value 2)

n2 (refraction index)

Αποδεκτές τιμές :



interior transmission [0:1], [0:1], [0:1]  
black - transparent  
interior refractive index (1:2>  
vacuum - diamond  
exterior transmission [0:1], [0:1], [0:1]  
black - transparent  
exterior refractive index (1:2>  
vacuum – diamond

- Glass

Ο τύπος glass είναι παρόμοιος με το dielectric, με τη διαφορά ότι πρόκειται για βελτιστοποιημένο τύπο όσον αφορά λεπτές γυάλινες επιφάνειες. Μία μόνο μεταδιδόμενη και μία ανακλώμενη ακτίνα παράγονται. Κατά αυτόν τον τρόπο εσωτερικές ανακλάσεις αποφεύγονται. Η μόνη λεπτομέρεια που απαιτείται είναι η ποσότητα του φωτός που δεν απορροφάται σε μία διάσχιση του υλικού (transmissivity).

glass primitive:

modifier glass identifier  
0  
0  
3 R1 G1 B1 (transmission value1)

Αποδεκτές τιμές :

transmission [0:1], [0:1], [0:1]  
black – transparent

## 5.4 Image rendering

Μόλις το σκηνικό έχει πλήρως καθοριστεί σε όρους γεωμετρίας και υλικών μπορεί να μετατραπεί σε εικόνα δύο διαστάσεων. Το μόνο που χρειάζεται να επιλεγεί είναι το σημείο παρατήρησης. Το Radiance χρησιμοποιεί την τεχνική προσομοίωσης ανίχνευση ακτινοβολίας (ray-tracing) σε προσανατολισμένη εικόνα. Αυτό συνεπάγεται ανίχνευση φωτεινής ακτινοβολίας πίσω από τη θέση παρατήρησης λαμβάνοντας υπόψη κατοπτρικές ανακλάσεις και όλες τις γεωμετρίες στο χώρο. Ο λόγος που γίνεται η συγκεκριμένη διαδικασία σε αντίθεση με το μοντέλο του πραγματικού κόσμου είναι ότι από όλες τις ακτίνες που ανακλώνται και διαθλώνται από μία φωτεινή πηγή μόνο ένας μικρός αριθμός στην πραγματικότητα φτάνει στο ανθρώπινο μάτι. [16]

## Κεφάλαιο 6 Προσομοίωση

### 6.1 Γενικά

Για τη προσομοίωση φωτισμού συγκεκριμένου χώρου της εργασίας η διαδικασία διαχωρίστηκε σε δύο μέρη, την εξαγωγή αποτελεσμάτων του τεχνητού φωτισμού και την εξαγωγή αποτελεσμάτων του φυσικού φωτισμού. Οι τιμές τεχνητού φωτισμού εξάγονται με βάση τα έξι φωτιστικά που χρησιμοποιήθηκαν. Οι τιμές φυσικού φωτισμού αφορούν συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια του έτους ανά μία ώρα από τις 00.30 μέχρι τις 11.30 με τρόπο που αναλύεται παρακάτω. Το τελικό αποτέλεσμα περιλαμβάνει το άθροισμα των τιμών του τεχνητού και του φυσικού φωτισμού για τριάντα συγκεκριμένα σημεία. Για κάθε μέρος της προσομοίωσης δημιουργήθηκε ένα ομαδικό αρχείο \*.bat (Batch File) δηλαδή, ένα αρχείο κειμένου που περιέχει μια σειρά από εντολές του DOS, οι οποίες εκτελούνται σειριακά. Η εκτέλεση των ομαδικών αρχείων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του Matlab μέσω ενός m-file που περιλαμβάνει κατάλληλες εντολές που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 4.3.a.2 του Radiance.

### 6.2 Τεχνητός φωτισμός

Το electric.bat είναι το αρχείο που δημιουργήθηκε για την εξαγωγή τιμών τεχνητού φωτισμού. Περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση του χώρου μέσω των αρχείων .rad και τον υπολογισμό της φωτεινής έντασης σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου.

Αναλυτικά :

**electric.bat**

```
oconv materials.rad geo_all_lights_rot.rad>geo.oct
```

```
rtrace -faa -ov -h -I -ab 4 -ad 3000 -as 500 -ar 300 -aa 0.1 -ds .1 geo.oct  
<points_rot.pts|rcalc -e "$1=179*($1*0.265+$2*0.670+$3*0.065)">  
electric.dat
```

- ❖ **Oconv:** Για να μειωθεί ο χρόνος δημιουργίας εικόνων το Radiance χρησιμοποιεί αρχεία octrees για την ταξινόμηση της γεωμετρίας μιας σκηνής. Το αρχείο octree περιοδικά υποδιαιρεί το χώρο σε όγδοα του χώρου ή σε κύβους που περιέχουν όχι περισσότερα από έναν αριθμό αντικειμένων. Όταν μία ακτίνα ανιχνεύεται, υπολογισμοί γίνονται μόνο για εκείνα τα αντικείμενα που βρίσκονται στους κύβους που τέμνονται από την ακτίνα και όχι για ολόκληρη τη σκηνή και έτσι μειώνεται ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία της εικόνας. Η εντολή oconv χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του αρχείου octree από τα αρχεία που περιγράφουν τη σκηνή που θα προσομοιωθεί. Το αρχείο octree χρησιμοποιείται στη συνέχεια σαν είσοδος

για τις εντολές που κάνουν τη διαδικασία rendering[17]. Αρχεία εισόδου είναι το materials.rad και το geo\_all\_lights\_rot.rad και αρχείο εξόδου είναι το geo.oct .

- ❖ **materials.rad:** Περιλαμβάνει τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του δωματίου. Η δομή των εντολών περιγράφεται στην ενότητα 5.3.

```
void glass Ee172-6_glass
0
0
3 0.861 0.861 0.861
```

```
void plastic 1k117
0
0
5 0.7044 0.7044 0.7044 0 0
```

```
void plastic 1k124
0
0
5 0.42 0.389 0.36 0 0
```

```
void plastic 2k202
0
0
5 0.636 0.597 0.444 0 0
```

```
void plastic 2k216
0
0
5 0.7044 0.7044 0.7044 0 0
```

```
void plastic 3k313
0
0
5 0.804 0.804 0.804 0 0
```

```
void plastic RAL1013_Oyster_white
0
0
```

5 1 0.960784 0.890196 0 0

void plastic RAL1014\_Ivory

0

0

5 0.8251 0.8251 0.8251 0 0

void plastic RAL1015\_Light\_ivory

0

0

5 0.9363 0.9363 0.9363 0 0

void plastic RAL2003\_Pastel\_orange

0

0

5 0.5224 0.5224 0.5224 0 0

void plastic RAL5023\_Distant\_blue

0

0

5 0.2959 0.2959 0.2959 0 0

void plastic RAL7035\_Light\_grey

0

0

5 0.8038 0.8038 0.8038 0 0

void plastic RAL7043\_Traffic\_grey\_B

0

0

5 0.25098 0.270588 0.270588 0 0

- ❖ **geo\_all\_lights\_rot.rad:** Περιλαμβάνει τη γεωμετρία του δωματίου και των φωτιστικών. Η εντολή xform μετατρέπει κάθε αρχείο περιγραφής σκηνης με βάση τις παραμέτρους που δίνονται. Με την παράμετρο -t γίνεται περιστροφή της σκηνης στους άξονες x, y και z κατά 2.5, 3.93 και 2.886 μοίρες αντίστοιχα. Η εντολή ies2rad παράγει ένα αρχείο το οποίο περιέχει τη γεωμετρία της φωτεινής πηγής και ένα αρχείο δεδομένων. Η γεωμετρία της πηγής τοποθετείται πάντα στην αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιεί το Radiance[16]. Η δομή των εντολών περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.3. Ενδεικτικά η γεωμετρία και ο τύπος τριών από τα έξι φωτιστικά :

```
#1
# xform -t 2.500 3.930 2.886# ies2rad# Dimensions in meters#<IESNA:LM-63-
1995#<[TEST] 22895#<[MANUFAC] RUUD#<[LUMCAT] LR150-2000L-
4000K#<[LUMINAIRE] Downlight 150mm 2000Lumen 4K#<[FLASHAREA]
0.004421#<[LAMPCAT] LR150-2000L-40K#<[LAMP] 2000L-40K# Unknown
lamp type (used default)# 31 watt luminaire, lamp*ballast factor = 1
void brightdata fos_dist
14 flatcorr fos.dat source.cal src_theta -i 1 -t 2.500 3.930 2.886 -i 1 -rz -182
0
1      56.5884
```

```
fos_dist light fos_light
```

```
0
0
3      1      1      1
```

```
fos_light ring fos.d
```

```
0
0
8
-2.63563208959 -3.84035720843      2.8855
      -0      0      -1
      0      0.075
```

```
fos_light ring fos.u
```

```
0
0
8
-2.63563208959 -3.84035720843      2.8865
      0      0      1
      0      0.075
```

```
#3
# xform -t 2.500 2.720 2.886# ies2rad# Dimensions in meters#<IESNA:LM-63-
1995#<[TEST] 22895#<[MANUFAC] RUUD#<[LUMCAT] LR150-2000L-
4000K#<[LUMINAIRE] Downlight 150mm 2000Lumen 4K#<[FLASHAREA]
0.004421#<[LAMPCAT] LR150-2000L-40K#<[LAMP] 2000L-40K# Unknown
lamp type (used default)# 31 watt luminaire, lamp*ballast factor = 1
void brightdata fos_dist
14 flatcorr fos.dat source.cal src_theta -i 1 -t 2.500 2.720 2.886 -i 1 -rz -182
0
1      56.5884
```

fos\_dist light fos\_light

0

0

3            1            1            1

fos\_light ring fos.d

0

0

8

-2.59340369858    -2.63109430774            2.8855

-0            0            -1

0            0.075

fos\_light ring fos.u

0

0

8

-2.59340369858    -2.63109430774            2.8865

0            0            1

0            0.075

#6

# xform -t 1.317 1.510 2.886# ies2rad# Dimensions in meters#<IESNA:LM-63-1995#<[TEST] 22895#<[MANUFAC] RUUD#<[LUMCAT] LR150-2000L-4000K#<[LUMINAIRE] Downlight 150mm 2000Lumen 4K#<[FLASHAREA] 0.004421#<[LAMPCAT] LR150-2000L-40K#<[LAMP] 2000L-40K# Unknown lamp type (used default)# 31 watt luminaire, lamp\*ballast factor = 1

void brightdata fos\_dist

14 flatcorr fos.dat source.cal src\_theta -i 1 -t 1.317 1.510 2.886 -i 1 -rz -182

0

1            56.5884

fos\_dist light fos\_light

0

0

3            1            1            1

fos\_light ring fos.d

0

0

8

-1.3688959592    -1.46311751164            2.8855

-0            0            -1

0            0.075

fos\_light ring fos.u

0

0

8

-1.3688959592 -1.46311751164 2.8865

0 0 1

0 0.075

❖ **geo.oct**: Ολοκληρωμένο το σκηνικό που θα προσομοιωθεί σε μορφή octrees.

❖ **rtrace**: Η εντολή rtrace δέχεται σαν είσοδο ένα αρχείο τύπου octree, τη θέση του παρατηρητή και το διάνυσμα παρατήρησης. Υπολογίζει τιμές λαμπρότητας ή φωτεινής έντασης ανάλογα με τις παραμέτρους που θα δοθούν. Η παράμετρος -faa δηλώνει ότι η είσοδος και η έξοδος της εντολής είναι σε μορφή ASCII, η -on σχετίζεται με τη μορφή εξόδου της εντολής, το -h δηλώνει τη δυαδική μορφή εξόδου, το -I σχετίζεται με το δυαδικό υπολογισμό της ακτινοβολίας, το -ab δηλώνει τις ανακλάσεις στο χώρο, το -ad τον αριθμό των υποδιαίρεσεων του χώρου, το -as τον αριθμό των δειγμάτων του χώρου, το -ar τη μέγιστη πυκνότητα τιμών στο χώρο, το -aa δηλώνει το σφάλμα στην έμμεση παρεμβολή φωτισμού και το -ds τον άμεσο δείκτη δειγματοληψίας σε franc[19].

❖ **points\_rot.pts**: Αρχείο που περιλαμβάνει τα σημεία υπολογισμού στο χώρο. Σε κάθε γραμμή η πρώτη στήλη είναι οι συντεταγμένες και τα 0,0,1 οι κατευθύνσεις που κοιτάζει το κάθετο διάνυσμα στους άξονες x, y, z αντίστοιχα.

-3.095 -1.242 0.8	0 0 1
-3.116 -1.842 0.8	0 0 1
-3.137 -2.442 0.8	0 0 1
-3.158 -3.041 0.8	0 0 1
-3.179 -3.641 0.8	0 0 1
-3.200 -4.240 0.8	0 0 1
-2.502 -1.463 0.8	0 0 1
-2.516 -1.863 0.8	0 0 1
-2.544 -2.662 0.8	0 0 1
-2.558 -3.062 0.8	0 0 1
-2.586 -3.862 0.8	0 0 1
-2.600 -4.261 0.8	0 0 1
-1.896 -1.284 0.8	0 0 1
-1.916 -1.884 0.8	0 0 1
-1.937 -2.483 0.8	0 0 1
-1.958 -3.083 0.8	0 0 1
-1.979 -3.683 0.8	0 0 1
-2.000 -4.282 0.8	0 0 1
-1.303 -1.505 0.8	0 0 1
-1.317 -1.905 0.8	0 0 1



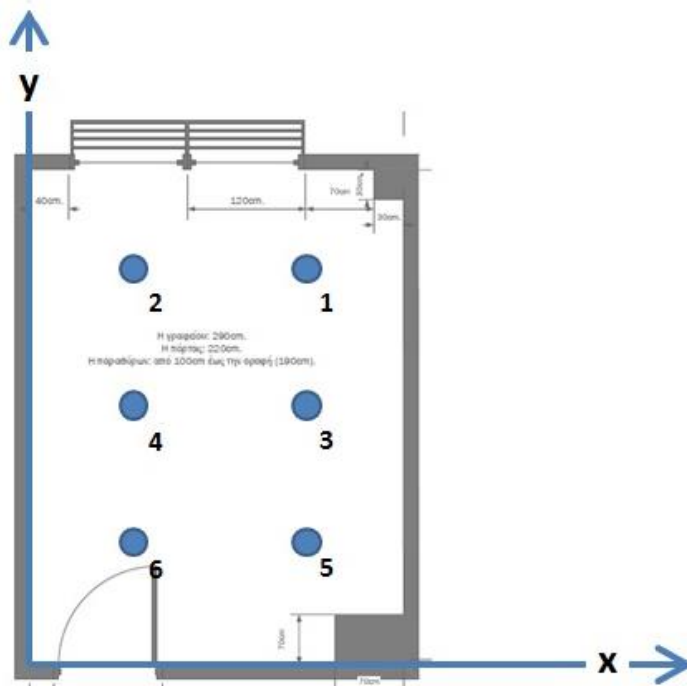
-1.345 -2.704 0.8	0 0 1
-1.359 -3.104 0.8	0 0 1
-1.387 -3.904 0.8	0 0 1
-1.401 -4.303 0.8	0 0 1
-0.696 -1.326 0.8	0 0 1
-0.717 -1.926 0.8	0 0 1
-0.738 -2.525 0.8	0 0 1
-0.759 -3.125 0.8	0 0 1
-0.780 -3.725 0.8	0 0 1
-0.801 -4.324 0.8	0 0 1

*Πιν.6.1: Σημεία υπολογισμού*

- ❖ **rcalc:** Η εντολή rcalc δημιουργεί διαδοχικά σημεία στη θέση που έχει επιλέξει ο χρήστης. Η παράμετρος -e προσδιορίζει τις μεταβλητές στη γραμμή εντολών (command line)[17].
- ❖ **electric.dat:** Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τις τελικές τιμές φωτεινότητας στα σημεία υπολογισμού από τα φωτιστικά. Το electric.dat περιέχει τριάντα τιμές φωτεινότητας που αφορούν τη συνολική συμβολή κάθε φωτιστικού.

744.539412
889.808519
937.856543
920.954097
843.156874
640.894
1048.78987
1253.90276
1244.50368
1298.16422
1010.77265
858.433711
1131.49433
1380.47418
1461.15382
1431.43022
1302.00735
942.616393
995.049339
1189.28737
1183.50554
1232.3577
958.26231
812.711077
662.802536
799.427719
844.172693
827.922402
755.695721
563.663633

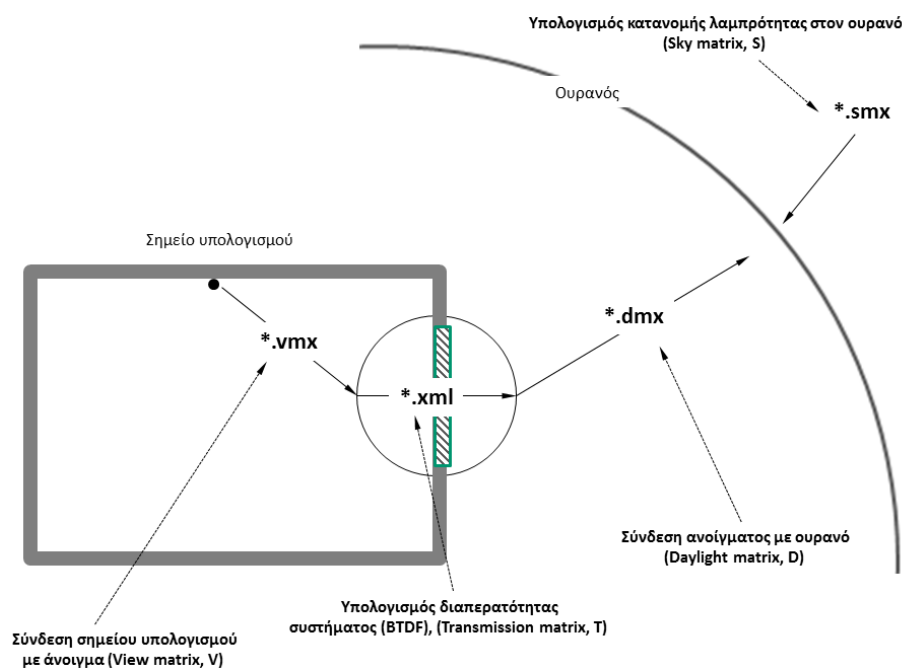
*Πιν.6.2: Τιμές τεχνητού φωτισμού*



Εικ.6.1: Φωτιστικά

### 6.3 Φυσικός φωτισμός

Το run.bat είναι το αρχείο που δημιουργήθηκε για την εξαγωγή τιμών φυσικού φωτισμού. Η μεθοδολογία υπολογισμού του φωτισμού σε ωριαία βάση που χρησιμοποιείται σε αυτή τη φάση περιλαμβάνει πολύπλοκα οπτικά συστήματα σκίασης (3-phase method). Η φιλοσοφία υπολογισμού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα [17]:



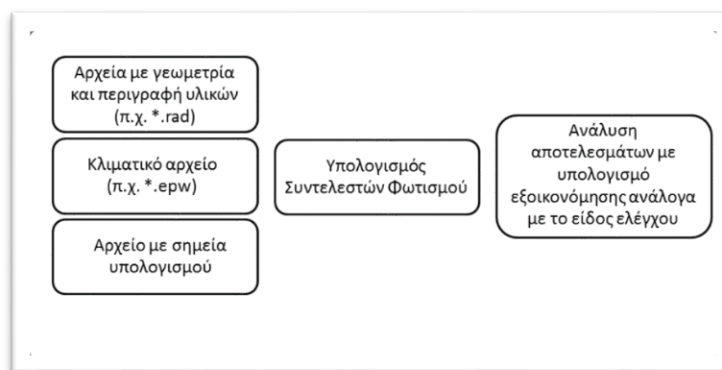
Σχήμα.6.2: Φιλοσοφία υπολογισμού φωτισμού σε ωριαία βάση

- .vmx: προβολή πίνακα στοιχείων καιρού
- .xml: πίνακας μετάδοσης σε μορφή XML
- .dmx: πίνακας ημερήσιου φωτός
- .smx: πίνακας σχετικός με το τμήμα ουρανού

**run.bat**

```
epw2wea athens.epw athens.wea
gendaymtx -h athens_1.wea > athensnor_1.smx
oconv materials.rad geo_rot.rad window.rad>test2.oct
rcontrib -f klems_full.cal -bn Nkbins -b "kbin(0.034,0.999,0, 0,0,1)" -m glazing -I+ -
ab 12 -ad 50000 -ds .15 -lw 1e-5 test2.oct < points_rot.pts>test2.vmx
oconv white.rad materials.rad geo_rot.rad window.rad>white112.oct
perl genklemsamp.pl -c 1000 -vd -0.034 -0.999 0 window.rad|rcontrib -c 1000 -e
MF:1 -f reinhart.cal -b rbin -bn Nrbins -m sky_glow -faa white112.oct >test12.dmx
dctimestep -n 24 test2.vmx double_clear.xml test12.dmx athensnor_1.smx >
day_sensor.dat
```

❖ **epw2wea:** Το epw2wea μετατρέπει ένα αρχείο καιρού σε μορφή Energy Plus σε ένα αρχείο καιρού σε μορφή Daysim ώστε να είναι συμβατό με την εντολή gendaymtx του Radiance. Το Daysim χρησιμοποιεί σαν μηχανή υπολογισμού το RADIANCE ενώ βασίζεται στην εκτίμηση των συντελεστών φυσικού φωτισμού[17]. Η δομή λειτουργίας του παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



*Σχήμα 6.2: Δομή λειτουργίας Daysim*

Το αρχείο athens.epw είναι ένα αρχείο που περιέχει κλιματικά δεδομένα για μία συγκεκριμένη περιοχή. Ένα μέρος του αρχείου παρουσιάζεται παρακάτω :

```
LOCATION,ATHENS,-,GRC,IWEC Data,167160,37.90,23.73,2.0,15.0
DESIGN CONDITIONS,1,Climate Design Data 2009 ASHRAE
Handbook,,Heating,2,1.6,3.1,-6.8,2.1,5.1,-
4.9,2.5,5.7,12.1,9.7,10.8,8.9,3.5,0,Cooling,8,9.1,35.1,21.1,33.8,20.8,32.4,20.9,24.4,31
,23.6,30.1,22.8,29.2,5.6,30,22.2,16.9,28.7,21.2,15.9,28,20.5,15.2,27.5,73.9,31.4,70.5,
30.2,67.5,29.3,1110,Extremes,10,9,8.2,29,-0.4,38,1.7,1.9,-1.7,39.3,-2.7,40.4,-
3.7,41.5,-4.9,42.8
TYPICAL/EXTREME PERIODS,6,Summer - Week Nearest Max Temperature For
Period,Extreme,8/ 3,8/ 9,Summer - Week Nearest Average Temperature For
```

Period,Typical,6/29,7/ 5,Winter - Week Nearest Min Temperature For  
 Period,Extreme,2/17,2/23,Winter - Week Nearest Average Temperature For  
 Period,Typical,1/13,1/19,Autumn - Week Nearest Average Temperature For  
 Period,Typical,10/13,10/19,Spring - Week Nearest Average Temperature For  
 Period,Typical,4/ 5,4/11

# GROUND

TEMPERATURES,3,,5,,,9.73,11.26,14.24,17.06,22.41,25.22,25.99,24.57,21.27,17.1  
 7,13.13,10.46,2,,,11.84,12.22,13.91,15.81,19.91,22.54,23.84,23.55,21.67,18.84,15.65  
 ,13.14,4,,,14.02,13.76,14.50,15.58,18.29,20.32,21.64,21.96,21.14,19.47,17.31,15.35  
 HOLIDAYS/DAYLIGHT SAVINGS,No,0,0,0

Το αρχείο athens.wea δημιουργεί ένα πλέγμα ουρανού για συγκεκριμένη γεωγραφική  
 θέση. Ένα μέρος του αρχείου παρουσιάζεται παρακάτω και αφορά την δεκατη Τρίτη  
 ημέρα του Αυγούστου :

place ATHENS\_GRC  
 latitude 37.90  
 longitude -23.73  
 time\_zone -30  
 site\_elevation 15.0  
 weather\_data\_file\_units 1

8 13 0.500 0 0  
 8 13 1.500 0 0  
 8 13 2.500 0 0  
 8 13 3.500 0 0  
 8 13 4.500 0 0  
 8 13 5.500 0 2  
 8 13 6.500 37 54  
 8 13 7.500 237 147  
 8 13 8.500 449 194  
 8 13 9.500 614 196  
 8 13 10.500 677 217  
 8 13 11.500 710 229  
 8 13 12.500 722 232  
 8 13 13.500 714 227  
 8 13 14.500 696 202  
 8 13 15.500 625 188  
 8 13 16.500 498 167  
 8 13 17.500 323 122  
 8 13 18.500 41 54  
 8 13 19.500 0 2  
 8 13 20.500 0 0  
 8 13 21.500 0 0

8 13 22.500 0 0

8 13 23.500 0 0

❖ **gendaymtx:** Η εντολή δέχεται ένα αρχείο καιρού ως είσοδο και παράγει έναν πίνακα τιμών ενός ουράνιου πλέγματος χρησιμοποιώντας το παντός καιρού μοντέλο Perez. Το αρχείο καιρού είναι σε απλή μορφή ASCII ώστε να γίνεται κατανοητό από το λογισμικό DAYSIM το οποίο περιέχει μία επικεφαλίδα με τις παραμέτρους της ιστοσελίδας μαζί με πληροφορίες όπως το μήνα, τη μέρα την ώρα, τιμές ακτινοβολίας κ.α. Η παράμετρος -h συμβολίζει ότι αποτρέπει το αρχείο εξόδου του από τις συνήθεις πληροφορίες της επικεφαλίδας[17].

❖ **athens\_1.wea:** Το αρχείο καιρού athens\_1.wea αποτελεί μορφοποίηση του αρχείου athens.wea για τις ανάγκες της εργασίας και προσομοίωση μικρότερου χρονικού διαστήματος. Το διάστημα που επιλέχθηκε για τη πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι η 1/1 από τις 00.30 (0.500) μέχρι τις 23.30 (23.500) όπως φαίνεται παρακάτω. Οι υπόλοιποι αριθμοί αφορούν κλιματικά δεδομένα της περιοχής.

place ATHENS\_GRC

latitude 37.90

longitude -23.73

time\_zone -30

site\_elevation 15.0

weather\_data\_file\_units 1

1	1	0.500	0	0
1	1	1.500	0	0
1	1	2.500	0	0
1	1	3.500	0	0
1	1	4.500	0	0
1	1	5.500	0	0
1	1	6.500	0	0
1	1	7.500	0	1
1	1	8.500	0	38
1	1	9.500	8	109
1	1	10.500	30	162
1	1	11.500	5	188
1	1	12.500	2	173
1	1	13.500	0	135
1	1	14.500	0	130
1	1	15.500	0	94
1	1	16.500	0	34
1	1	17.500	0	1
1	1	18.500	0	0
1	1	19.500	0	0
1	1	20.500	0	0
1	1	21.500	0	0
1	1	22.500	0	0
1	1	23.500	0	0

- ❖ **athensnor\_1.smx**: Αρχείο που περιέχει πληροφορίες σχετικά με την κατανομή του ουρανού
- ❖ **geo\_rot.rad**: Περιλαμβάνει το χώρο που μοντελοποιήθηκε για την προσομοίωση χωρίς τα διαφανή τμήματα, δείγμα του οποίου παρουσιάζεται παρακάτω. Η εντολή xform μετατρέπει κάθε αρχείο περιγραφής σκηνικού με βάση την παράμετρο που δίνεται. Η παράμετρος -rz -182 περιστρέφει το σκηνικό κατά -182 μοίρες στον άξονα z. . Η δομή των εντολών περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.3.

```
# xform -rz -182
1k117 polygon roomonly_03m.dxf_2D4.0.1
0
0
12
-1.64828169484 -5.00802655289 1.125
-1.64906693352 -5.0305128465 1.125
-0.707141079052 -5.06340562214 1.125
-0.706355840377 -5.04091932853 1.125
```

```
1k117 polygon roomonly_03m.dxf_2DE.0.1
0
0
12
-1.81068270423 -5.00235538468 2.175
-1.81146794291 -5.02484167828 2.175
-1.81146794291 -5.02484167828 2.865
-1.81068270423 -5.00235538468 2.865
```

```
1k117 polygon roomonly_03m.dxf_2C4.0.1
0
0
12
-0.57722027154 -5.06794255671 2.015
-0.57722027154 -5.06794255671 2.175
-2.97575825639 -4.98418376463 2.175
-2.97575825639 -4.98418376463 2.015
```

```
1k117 polygon roomonly_03m.dxf_2D5.0.1
0
0
12
-1.90312635573 -4.99912718123 1.125
-1.90391159441 -5.02161347484 1.125
-1.90391159441 -5.02161347484 2.015
```

-1.90312635573	-4.99912718123	2.015
----------------	----------------	-------

1k117 polygon roomonly\_03m.dxf\_2DF.0.1

0

0

12

-1.81146794291	-5.02484167828	2.175
-1.81068270423	-5.00235538468	2.175
-2.93000043049	-4.96326794837	2.175
-2.93078566917	-4.98575424198	2.175

1k117 polygon roomonly\_03m.dxf\_2C5.0.1

0

0

12

-0.622192858756	-5.06637207936	2.175
-0.57722027154	-5.06794255671	2.175
-0.57722027154	-5.06794255671	2.9
-0.622192858756	-5.06637207936	2.9

1k117 polygon roomonly\_03m.dxf\_2D6.0.1

0

0

12

-1.90312635573	-4.99912718123	2.015
-1.90391159441	-5.02161347484	2.015
-2.84583744887	-4.9887206992	2.015
-2.8450522102	-4.96623440559	2.015

1k117 polygon roomonly\_03m.dxf\_2C6.0.1

0

0

12

-1.74151058502	-5.02728464305	2.175
-1.74151058502	-5.02728464305	2.865
-1.81146794291	-5.02484167828	2.865
-1.81146794291	-5.02484167828	2.175

1k117 polygon roomonly\_03m.dxf\_2D7.0.1

0

0

12

-2.8450522102	-4.96623440559	2.015
-2.84583744887	-4.9887206992	2.015



-2.84583744887	-4.9887206992	1.125
-2.8450522102	-4.96623440559	1.125

1k117 polygon roomonly\_03m.dxf\_2C7.0.1

0

0

12

-2.93078566917	-4.98575424198	2.9
-2.97575825639	-4.98418376463	2.9
-2.97575825639	-4.98418376463	2.175
-2.93078566917	-4.98575424198	2.175

❖ **window.rad:** Περιλαμβάνει τη γεωμετρική περιγραφή και το υλικό διάφανων στοιχείων.

void glow glazing

0

0

4 1 1 1 0

glazing polygon roomonly\_03m.dxf\_2CD.1.1

0

0

12

-2.8450522102	-4.96623440559	1.125
-2.8450522102	-4.96623440559	2.015
-1.90312635573	-4.99912718123	2.015
-1.90312635573	-4.99912718123	1.125

glazing polygon roomonly\_03m.dxf\_2CE.2.1

0

0

12

-1.64828169484	-5.00802655289	1.125
-1.64828169484	-5.00802655289	2.015
-0.706355840377	-5.04091932853	2.015
-0.706355840377	-5.04091932853	1.125

glazing polygon roomonly\_03m.dxf\_2CF.3.1

0

0

12

-2.93000043049	-4.96326794837	2.175
----------------	----------------	-------

-2.93000043049	-4.96326794837	2.865
-1.81068270423	-5.00235538468	2.865
-1.81068270423	-5.00235538468	2.175

glazing polygon roomonly\_03m.dxf\_2D0.4.1

0

0

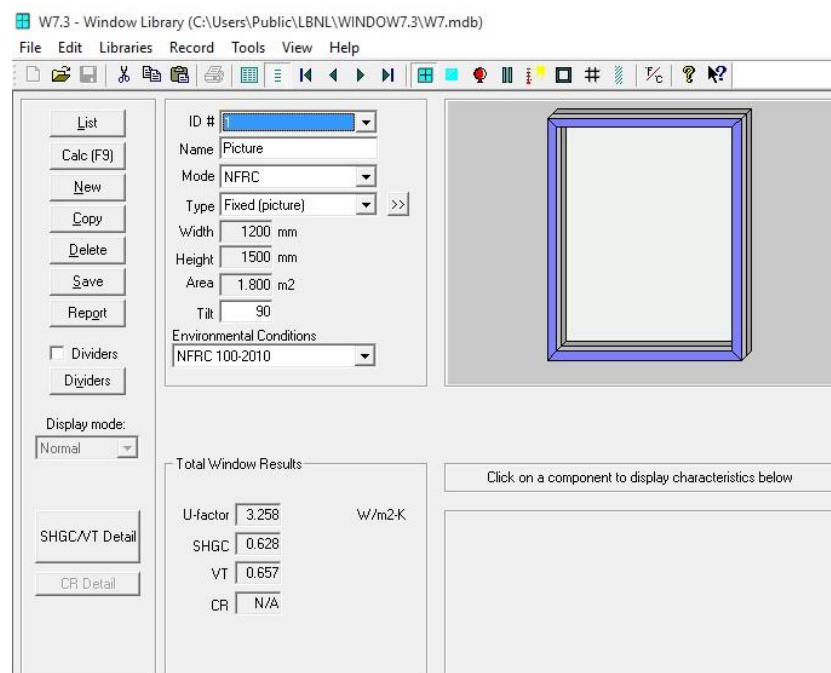
12

-1.74072534634	-5.00479834944	2.175
-1.74072534634	-5.00479834944	2.865
-0.62140762008	-5.04388578575	2.865
-0.62140762008	-5.04388578575	2.175

❖ **test2.oct**: Αρχείο σε μορφή octrees.

❖ **rcontrib**: Με την εντολή rcontrib υπολογίζουμε τους συντελεστές ακτινοβολίας σε μία σκηνή Radiance. Η παράμετρος **-f** χρησιμοποιείται για να δοθεί η διεύθυνση μίας μεταβλητής ή μίας σταθεράς που περιέχεται στην εντολή. Εδώ χρησιμοποιείται το αρχείο **klems\_full.cal** που επεξηγείται παρακάτω. Η επιλογή **-b** χρησιμοποιείται για να καθορίσει περαιτέρω τον αριθμό των “bin” ενός αντικειμένου εφόσον αυτό χρειάζεται περισσότερη ανάλυση. Ο καθορισμός αυτός γίνεται με την παράμετρο **-bn** κάτι που είναι απαραίτητο για αρχεία εξόδου με πολλαπλές τιμές ανά εγγραφή. Η παράμετρος **-m** σχετίζεται με τις ρυθμίσεις των modifier που χρησιμοποιούνται[17].

❖ **klems\_full.cal**: Το **klems\_full.cal** είναι ένα αρχείο εικόνας που περιγράφει ένα παράθυρο και έχει δημιουργηθεί με το πρόγραμμα WINDOW 7.3.



Εικ. 6.2: Windows 7.3

- ❖ **test2.vmx**: Αρχείο που περιέχει στοιχεία καιρού.
- ❖ **white.rad**: Περιλαμβάνει τον ουρανό με ομοιόμορφη κατανομή λαμπρότητας. Το πακέτο του Radiance περιέχει ένα πρόγραμμα που ονομάζεται gensky και το οποίο δημιουργεί την περιγραφή της σκηνης για την κατανομή του ουρανού σύμφωνα με τα πρότυπα της CIE (Commission Internationale de l'Eclairage). Αυτή η περιγραφή υφίσταται για οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια του έτους, οπουδήποτε στον κόσμο χρησιμοποιώντας είτε έναν ηλιόλουστο ουρανό, με ή χωρίς ήλιο, είτε ένα συννεφιασμένο ουρανό. Το υλικό και η επιφάνεια για τη γεωμετρία του ουρανού αφήνονται στην επιλογή του χρήστη. Η εντολή gensky δημιουργεί δύο αντικείμενα τύπου source, ένα για το ημισφαίριο του ουρανού και ένα για το έδαφος. Τα αντικείμενα τύπου source βρίσκονται απείρως μακριά από οποιοδήποτε παρατηρητή και ορίζουν μία διεύθυνση και μία γωνία αντί για x,y,z συντεταγμένες. . Η δομή των εντολών περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.3.

```
# gensky 12 12 12 -u -g 0.2
# Local solar time: 11.98
# Solar altitude and azimuth: 29.1 -0.3
# Ground ambient level: 21.2
```

```
void brightfunc skyfunc
2 skybr skybright.cal
0
3 3 2.12e+001 4.25e+000
```

```
skyfunc glow sky_glow
0
0
4 1 1 1 0
```

```
sky_glow source sky
0
0
4 0 0 1 180
```

```
skyfunc glow ground_glow
0
0
4 0.2 0.2 0.2 0
```

```
ground_glow source ground
```

0  
0  
4 0 0 -1 180

- ❖ **white112.oct**: Αρχείο σε μορφή octrees χωρίς τις τεχνητές φωτεινές πηγές.
- ❖ **genklmsamp**: Η εντολή genklmsamp δημιουργεί την κατεύθυνση των ακτινών για τη δοκιμή των επίπεδων επιφανειών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των ακτινοβολιών ή των συντελεστών του ημερήσιου φωτός. Αυτή η εντολή συνδυάζεται με την εντολή rcontrib για την ανάλυση του ημερήσιου φωτός για ετήσια προσομοίωση. Η παράμετρος -c καθορίζει τον αριθμό των ακτινών ανά κατεύθυνση Klems. Το αρχείο reinhart είναι ίδιου τύπου αρχείου με το clemms\_full.cal. Για την εκτέλεση αυτής της εντολής χρειάστηκε η εγκατάσταση του **active perl** και η τροποποίηση της εντολής για την αναγνώριση των αρχείων σε perl genklmsamp.pl[17] .
- ❖ **test12.vmx**: Αρχείο που περιέχει στοιχεία καιρού.
- ❖ **dctimestep**: Η εντολή αυτή υπολογίζει τα «χρονοβήματα» της ετήσιας προσομοίωσης μέσω πολλαπλασιασμό πινάκων. Υπάρχουν δύο μορφές επίκλησης. Ο πρώτος δίνει μία προδιαγραφή των συντελεστών ακτινών της ημέρας και ένα διάνυσμα πλέγματος ουρανού και το αποτέλεσμα δίνεται από τον πολλαπλασιασμό των δύο. Η δεύτερη μορφή βασίζεται στη δημιουργία ενός πλέγματος ουρανού από τέσσερα αρχεία, ένα που προέρχεται από την εντολή rcontrib, ένα από ένα πρότυπο XML περιγραφής, ένα από την εντολή gendaymtx και ένα που προέρχεται από ένα αρχείο DAYLIGHT (genklmsamp). Η παράμετρος -n σχετίζεται με τον αριθμό των «χρονοβημάτων»[17].
- ❖ **double\_clear.xml**: Περιλαμβάνει την περιγραφή των οπτικών ιδιοτήτων του τζαμιού (για τη δημιουργία του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα WINDOW 7.3)
- ❖ **test12.dmx**: Αρχείο που περιέχει πληροφορίες για το ημερήσιο φώς.
- ❖ **day\_sensor.dat**: Το αρχείο αυτό εκτός από τις τελικές τιμές φωτεινότητας φυσικού φωτισμού σε μορφή RGB περιέχει και κάποιες επικεφαλίδες. Στην εικόνα παρουσιάζεται δείγμα του αρχείου. Η επεξεργασία του αρχείου έγινε με τη βοήθεια του Matlab.

[illegible]

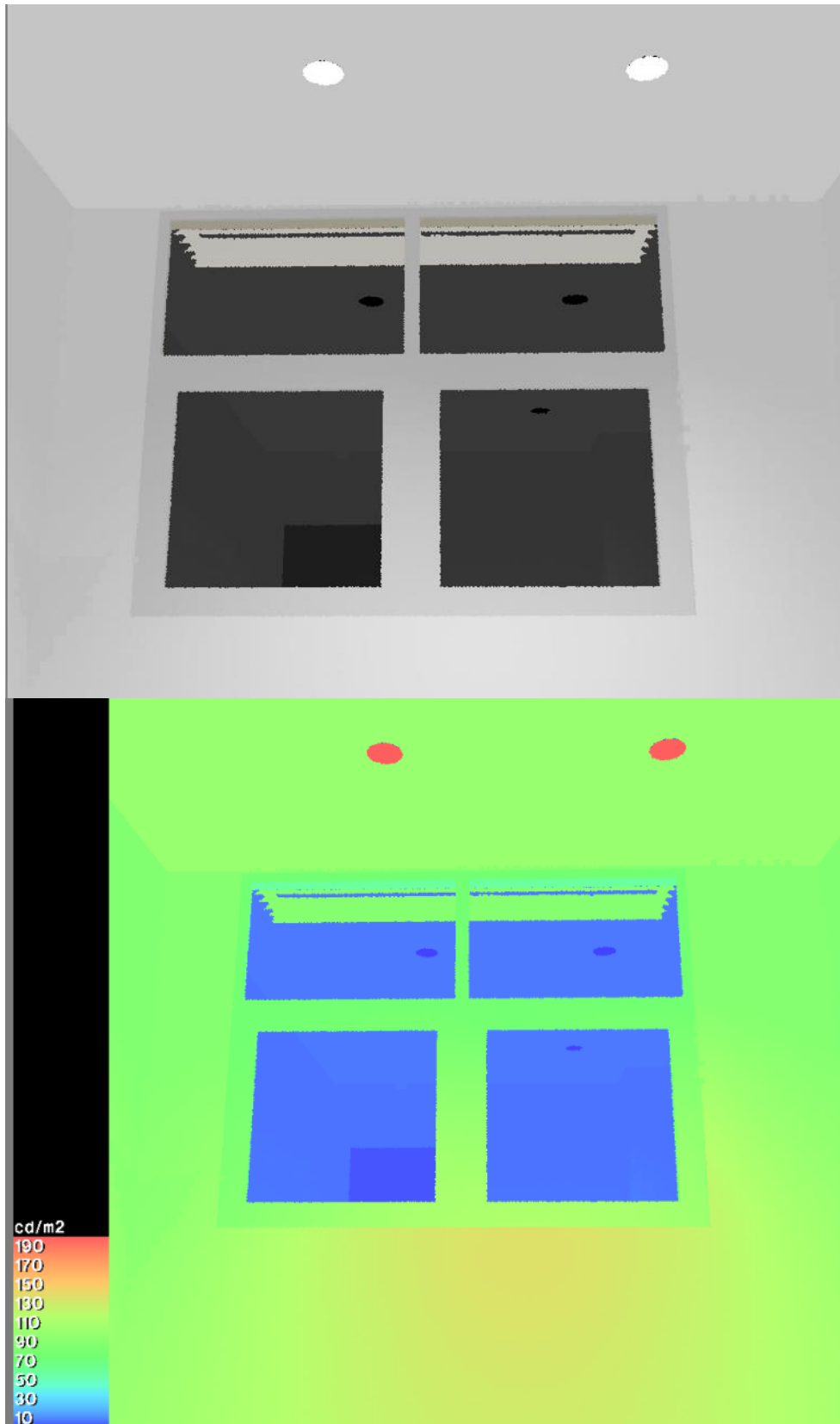
Εντολή	Επεξήγηση
Aim	Zoom
Exposure	Ρύθμιση της έκθεσης
Last	Επαναφορά της προηγούμενης θέσης παρατήρησης
New	Επανασχεδιασμός εικόνας
Quit	Έξοδος
Rotate	Περιστροφή της κάμερας
Set	Αλλαγή των τιμών του προγράμματος
Trace	Ανίχνευση ακτίνας
View	Αλλαγή παραμέτρων παρατήρησης
Write	Εγγραφή σε αρχείο εικόνας

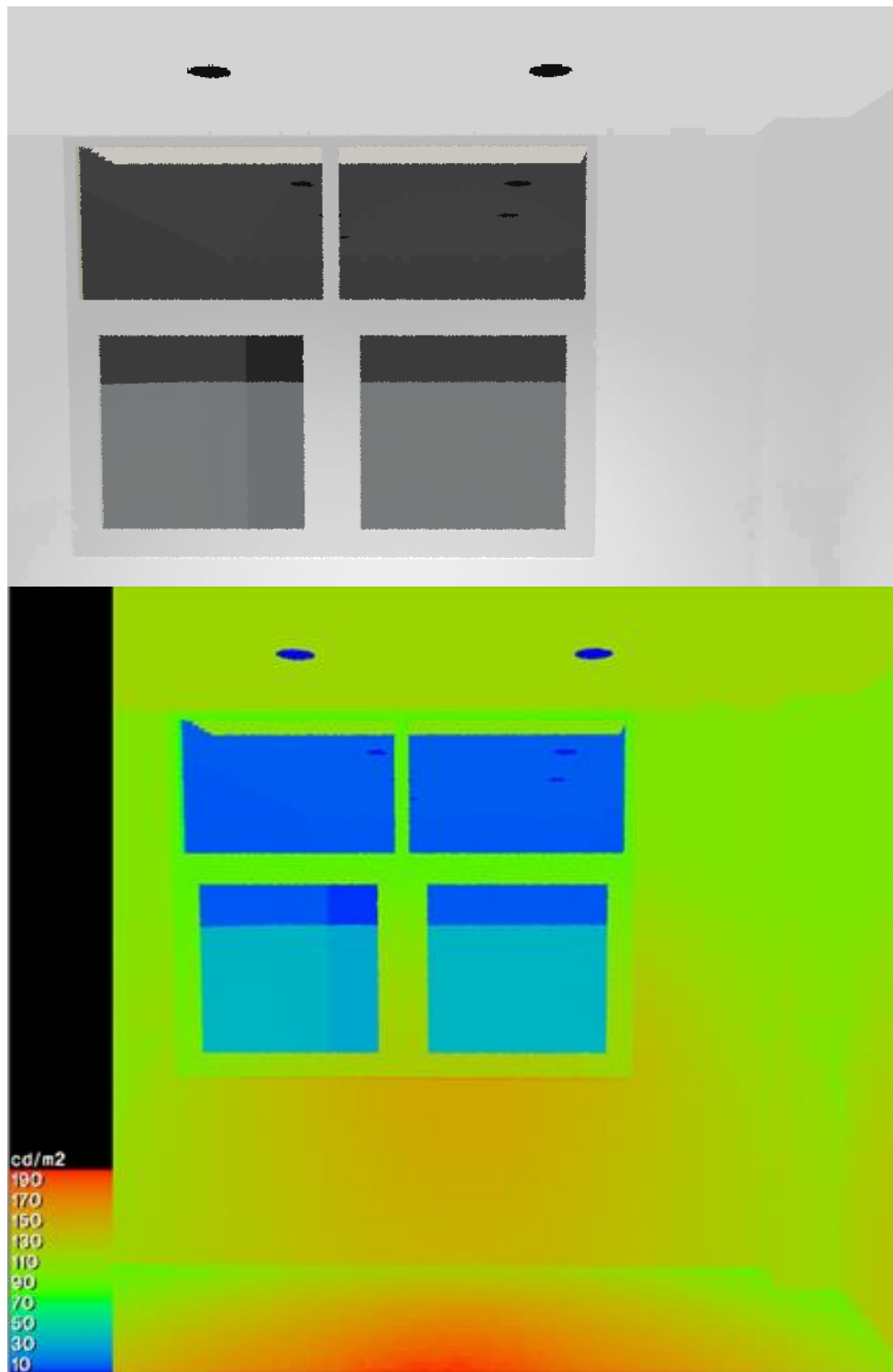
Πιν.6.3: Εντολές rnu

```
perl falsecolor.pl -ip 1.hdr -s 200 -n 10 -pal spec > 2.hdr
```

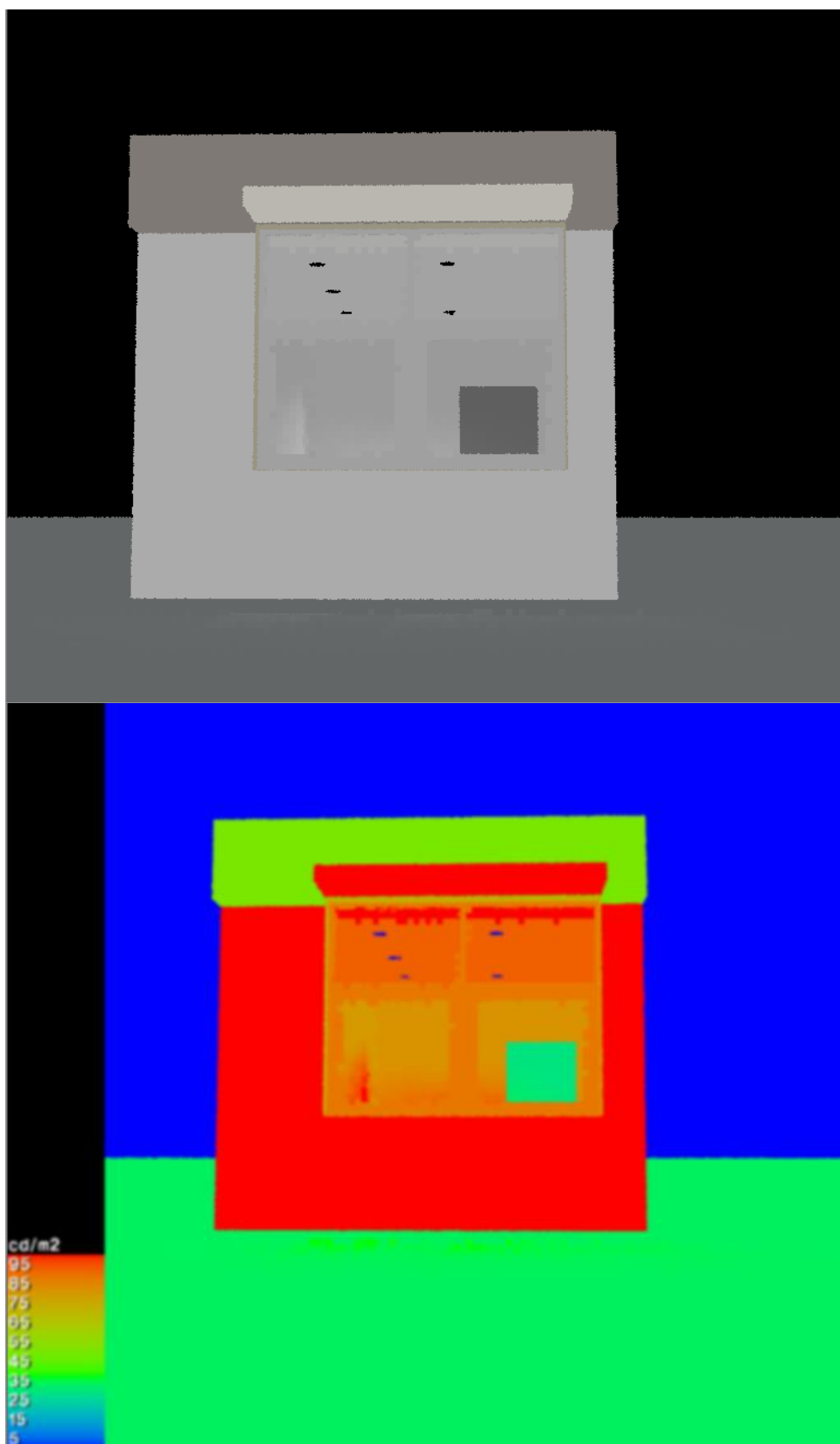
- ❖ Η εντολή falsecolor έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει την κατανομή της λαμπρότητας ή της έντασης φωτισμού με χρωματική κλίμακα (χρωματικές επιφάνειες ή περίγραμμα επιφάνειας όπου τα σημεία έχουν τις ίδιες τιμές) στην εικόνα που αναλύεται. Δέχεται σαν είσοδο μία εικόνα που έχει προέλθει από την εντολή rnu. Οι παράμετροι -s και -n αναφέρονται στην χρωματική κλίμακα της εικόνας. Για την εκτέλεση αυτής της εντολής χρειάστηκε η εγκατάσταση του active perl και η τροποποίηση της εντολής για την αναγνώριση των αρχείων σε perl falsecolor.pl[17] .

Παρακάτω παρουσιάζεται ζεύγος εικόνων που έχουν δημιουργηθεί με τις εντολές rnu και falsecolor.









## Κεφάλαιο 7 Σύζευξη Radiance - Matlab

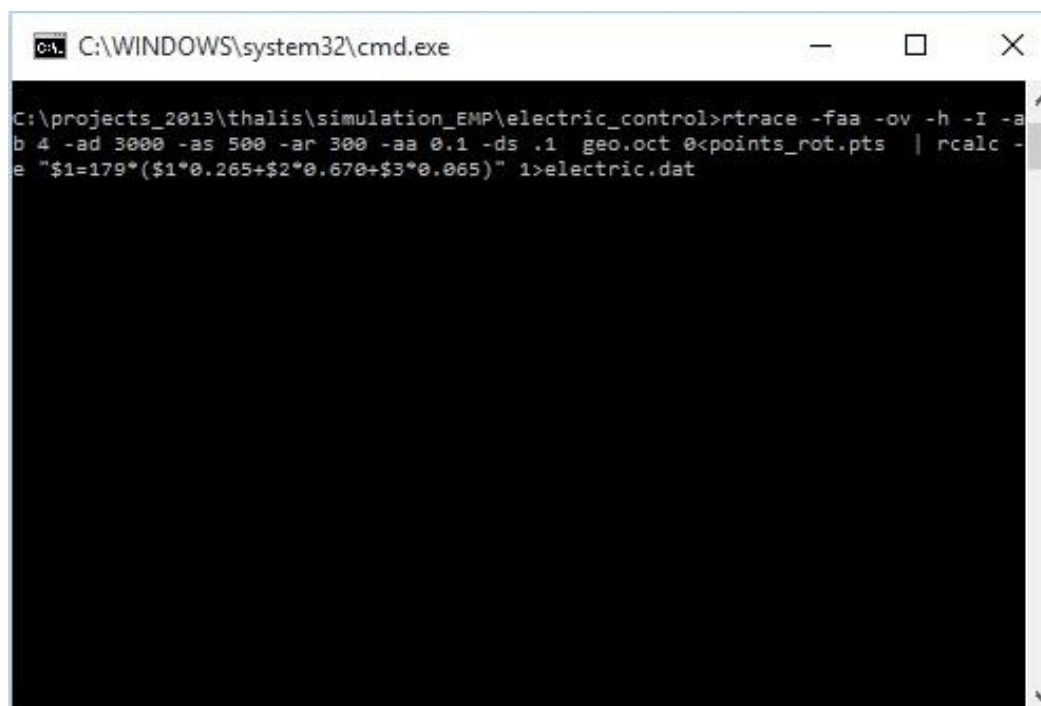
Το MATLAB, έχει ονομαστεί από τις λέξεις MATrix LABoratory, και αποτελεί ένα λογισμικό περιβάλλον προγραμματισμού αριθμητικών μεθόδων, προσομοίωσης και γραφικής οπτικοποίησης με το βασικό στοιχείο-μεταβλητή του MATLAB να είναι ο πίνακας. Η βασική ικανότητα του MATLAB (που επέτρεψε και τη σύζευξη) είναι η κλήση εντολών στο περιβάλλον γραμμής εντολών (command line) και η μετέπειτα επεξεργασία των δημιουργούμενων αρχείων από το MATLAB. Η έκδοση του MATLAB που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι η R2014a.

Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στο MATLAB για την εξαγωγή αποτελεσμάτων παρουσιάζονται παρακάτω :

- Εκτέλεση ομαδικού αρχείου για υπολογισμό τεχνητού φωτισμού

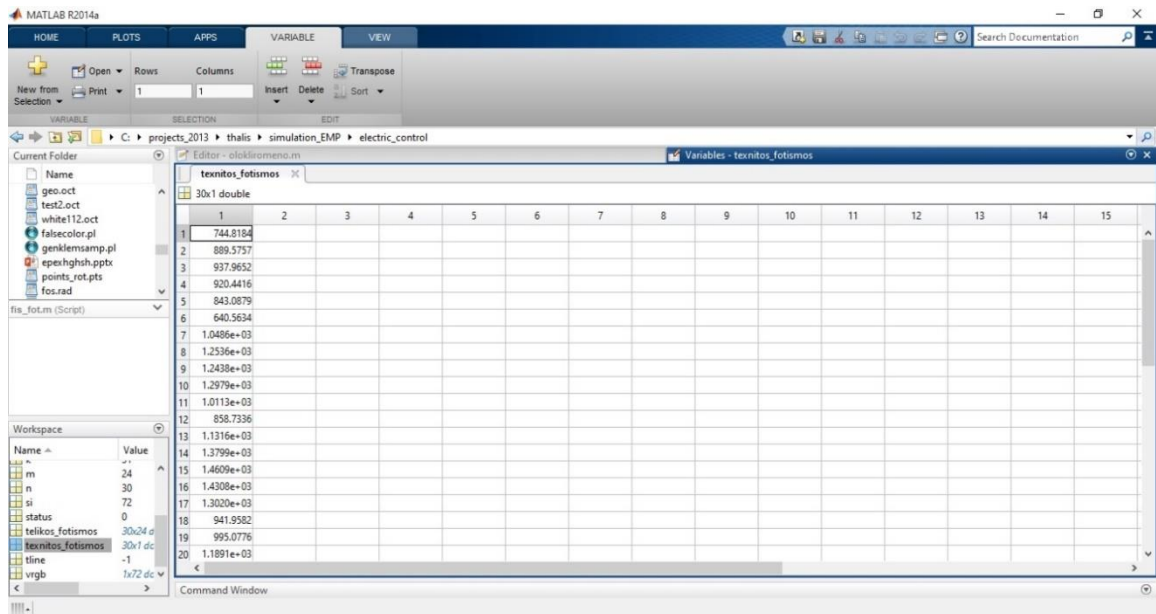
```
status = dos('electric.bat &');  
pause(250)  
texnitos_fotismos=importdata('electric.dat');
```

Αρχικά πραγματοποιείται η εκκίνηση της γραμμής εντολών των windows για την εκτέλεση του ομαδικού αρχείου electric.bat.



Εικ. 7.1: Εκτέλεση αρχείου electric.bat

Η εντολή `pause(250)` αφήνει ένα χρονικό περιθώριο διακοσίων πενήντα δευτερολέπτων για την εκτέλεση της εντολής `status = dos('electric.bat &');` και στη συνέχεια γίνεται η καταχώρηση των αποτελεσμάτων με την εντολή `texnitos_fotismos=importdata('electric.dat');`.



Εικ. 7.2: Πίνακας τιμών τεχνητού φωτισμού

- Εκτέλεση ομαδικού αρχείου για υπολογισμό φυσικού φωτισμού

```
status = dos('run.bat &');
pause(300)
fisikos_fotismos=importdata('day_sensor.dat');
```

Αρχικά πραγματοποιείται η εκκίνηση της γραμμής εντολών των windows για την εκτέλεση του αρχείου run.bat.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

C:\projects_2013\thalis\simulation_EMP\electric_control>epw2wea athens.epw athen
s.wea
place ATHENS_GRC
latitude 37.90
longitude -23.73
time_zone -30
site_elevation 15.0
weather_data_file_units 1

C:\projects_2013\thalis\simulation_EMP\electric_control>gendaymtx -h athens_1.we
a 1>athensnor_1.smx

C:\projects_2013\thalis\simulation_EMP\electric_control>oconv materials.rad geo_
rot.rad window.rad 1>test2.oct

C:\projects_2013\thalis\simulation_EMP\electric_control>rcontrib -f klems_full.
cal -bn Nkbins -b "kbin(0.034,0.999,0, 0,0,1)" -m glazing -I+ -ab 12 -ad 50000
-ds .15 -lw 1e-5 test2.oct 0<points_rot.pts 1>test2.vmx
```

**Εικ. 7.3:** Εκτέλεση αρχείου *run.bat*

Η εντολή `pause(300)` αφήνει ένα χρονικό περιθώριο τριακοσίων δευτερολέπτων για την εκτέλεση της εντολής `status = dos('run.bat &');` και στη συνέχεια γίνεται η καταχώρηση των αποτελεσμάτων με την εντολή `fisikos_fotismos=importdata('day_sensor.dat');`.

[illegible]

**Εικ.7.4:Πίνακας τιμών φυσικού φωτισμού**

- Επεξεργασία αρχείου day\_sensor.dat που περιέχει τις τιμές φυσικού φωτισμού

```
fid = fopen('day_sensor.dat')
for i = 1: 9
    fgetl(fid);
end
read first data line
tline = fgetl(fid);
k = 1;
while ischar(tline)
    vrgb = str2num(tline);
    si = size(vrgb, 2);
    j = 1;
    for i = 1: 3: si
        illum(k, j) = 179*(0.265074126*vrgb(i) +
0.670114631*vrgb(i+1) + 0.064811243*vrgb(i+2));
```

```

        j = j + 1;
    end
    tline = fgetl(fid);
    k = k + 1;
end
fclose(fid);

```

Αρχικά γίνεται η απαλοιφή των επικεφαλίδων δηλαδή των πρώτων οχτώ γραμμών του αρχείου day sensor.dat όπως αυτό φαίνεται στην εικόνα 7.4 και στη συνέχεια η μετατροπή για κάθε σημείο σε φωτεινότητα από τη μορφή RGB με την εξής διαδικασία :

$$179(0.265074126 R + 0.670114631 G + 0.064811243 B) = \text{illuminance}(\text{lux})$$

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πίνακας 30X24 που περιέχει τη φωτεινότητα κάθε σημείου(30), κάθε ώρα της προσομοίωσης(24) όπως αυτό φαίνεται στην εικόνα 7.5

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	4.9330	190.1431	635.5767
2	0	0	0	0	0	0	0	5.4212	210.2216	716.2461
3	0	0	0	0	0	0	0	6.1472	240.5683	832.4344
4	0	0	0	0	0	0	0	7.0387	278.2910	969.5195
5	0	0	0	0	0	0	0	7.7211	306.1241	1.0588e+03
6	0	0	0	0	0	0	0	7.0070	276.5148	935.2039
7	0	0	0	0	0	0	0	5.2550	199.0052	648.1960
8	0	0	0	0	0	0	0	5.7282	217.6657	713.7230
9	0	0	0	0	0	0	0	7.2202	275.9441	924.0113
10	0	0	0	0	0	0	0	8.1523	311.5559	1.0524e+03
11	0	0	0	0	0	0	0	10.7110	405.7477	1.3458e+03
12	0	0	0	0	0	0	0	11.4846	428.7087	1.3938e+03
13	0	0	0	0	0	0	0	5.1285	190.6023	611.8259
14	0	0	0	0	0	0	0	5.9329	220.1818	706.5652
15	0	0	0	0	0	0	0	7.1448	264.5787	848.4503
16	0	0	0	0	0	0	0	9.0150	332.1775	1.0697e+03
17	0	0	0	0	0	0	0	11.6001	424.5545	1.3824e+03
18	0	0	0	0	0	0	0	13.2501	475.3217	1.5149e+03
19	0	0	0	0	0	0	0	5.3170	194.2558	614.9818
20	0	0	0	0	0	0	0	5.8910	214.4505	677.6810

*Εικ. 7.5: Πίνακας τιμών φυσικού φωτισμού*

- Δημιουργία πίνακα με τελικές τιμές φωτεινότητας για κάθε σημείο

```

for m=1:24
    for n=1:30
        telikos_fotismos(n,m)=texnitos_fotismos(n,1)+illum(n,m);
    end
end

```

Τέλος υπολογίζεται η τελική φωτεινότητα σε κάθε κάθε μία ώρα από τις 00.30 μέχρι τις 11.30 για κάθε σημείο αθροίζοντας την τιμή του τεχνητού και του φυσικού φωτισμού.

telikos_fotismos										
30x24 double										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	744.8184	744.8184	744.8184	744.8184	744.8184	744.8184	744.8184	749.7514	934.9615	1.3804e+03
2	889.5757	889.5757	889.5757	889.5757	889.5757	889.5757	889.5757	894.9970	1.0998e+03	1.6058e+03
3	937.9652	937.9652	937.9652	937.9652	937.9652	937.9652	937.9652	944.1124	1.1785e+03	1.7704e+03
4	920.4416	920.4416	920.4416	920.4416	920.4416	920.4416	920.4416	927.4802	1.1987e+03	1.8900e+03
5	843.0879	843.0879	843.0879	843.0879	843.0879	843.0879	843.0879	850.8090	1.1492e+03	1.9019e+03
6	640.5634	640.5634	640.5634	640.5634	640.5634	640.5634	640.5634	647.5703	917.0781	1.5758e+03
7	1.0486e+03	1.0486e+03	1.0486e+03	1.0486e+03	1.0486e+03	1.0486e+03	1.0486e+03	1.0538e+03	1.2476e+03	1.6968e+03
8	1.2536e+03	1.2536e+03	1.2536e+03	1.2536e+03	1.2536e+03	1.2536e+03	1.2536e+03	1.2593e+03	1.4712e+03	1.9673e+03
9	1.2438e+03	1.2438e+03	1.2438e+03	1.2438e+03	1.2438e+03	1.2438e+03	1.2438e+03	1.2510e+03	1.5197e+03	2.1678e+03
10	1.2979e+03	1.2979e+03	1.2979e+03	1.2979e+03	1.2979e+03	1.2979e+03	1.2979e+03	1.3061e+03	1.6095e+03	2.3503e+03
11	1.0113e+03	1.0113e+03	1.0113e+03	1.0113e+03	1.0113e+03	1.0113e+03	1.0113e+03	1.0220e+03	1.4171e+03	2.3572e+03
12	858.7336	858.7336	858.7336	858.7336	858.7336	858.7336	858.7336	870.2182	1.2874e+03	2.2525e+03
13	1.1316e+03	1.1316e+03	1.1316e+03	1.1316e+03	1.1316e+03	1.1316e+03	1.1316e+03	1.1368e+03	1.3222e+03	1.7435e+03
14	1.3799e+03	1.3799e+03	1.3799e+03	1.3799e+03	1.3799e+03	1.3799e+03	1.3799e+03	1.3858e+03	1.6001e+03	2.0865e+03
15	1.4609e+03	1.4609e+03	1.4609e+03	1.4609e+03	1.4609e+03	1.4609e+03	1.4609e+03	1.4680e+03	1.7254e+03	2.3093e+03
16	1.4308e+03	1.4308e+03	1.4308e+03	1.4308e+03	1.4308e+03	1.4308e+03	1.4308e+03	1.4399e+03	1.7630e+03	2.5005e+03
17	1.3020e+03	1.3020e+03	1.3020e+03	1.3020e+03	1.3020e+03	1.3020e+03	1.3020e+03	1.3136e+03	1.7266e+03	2.6844e+03
18	941.9582	941.9582	941.9582	941.9582	941.9582	941.9582	941.9582	955.2083	1.4173e+03	2.4569e+03
19	995.0776	995.0776	995.0776	995.0776	995.0776	995.0776	995.0776	1.0004e+03	1.1893e+03	1.6101e+03
20	1.1891e+03	1.1891e+03	1.1891e+03	1.1891e+03	1.1891e+03	1.1891e+03	1.1891e+03	1.1950e+03	1.4035e+03	1.8668e+03
<										
Command Window										

Εικ.7.6:Πίνακας τιμών συνολικού φωτισμού



## Βιβλιογραφία

- [1] Santamouris, M., Argiriou, a., Dascalaki, E., Balaras, C. and Gaglia, a. 1994. Energy characteristics and savings potential in office buildings. *Solar Energy* 52(1), pp. 59–66.
- [2] Raphael, B. 2011. Active Control of Daylighting Features in Buildings. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 26(5), pp. 393–405
- [3] Βικιπαίδεια, Η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια, 2013 Φως : [el.wikipedia.org/wiki/Φως](http://el.wikipedia.org/wiki/Φως) (τελευταία πρόσβαση 21/9/2015)
- [4] L Piazza, T.T.A. Lummen, E Quiñonez, Y Murooka, B.W. Reed, B Barwick & F Carbone. 2015. Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field
- [5] Τοπαλής Φ. Β., 1994. Φωτοτεχνία, Βασικές αρχές φωτομετρίας φωτισμού , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [6] The integrated approach: Tips for daylighting with windows: [https://windows.lbl.gov/daylighting/designguide/LBNL\\_Tips\\_for\\_Daylighting.pdf](https://windows.lbl.gov/daylighting/designguide/LBNL_Tips_for_Daylighting.pdf) (τελευταία πρόσβαση 24/9/2015)
- [7] SynthLight Handbook, Chapter 1: Fundamentals: [www.new-learn.info/packages/synthlight/handbook/doc/chapter1.pdf](http://www.new-learn.info/packages/synthlight/handbook/doc/chapter1.pdf) (τελευταία πρόσβαση 30/9/2015)
- [8] Διπλωματική Εργασία: Προσομοίωση Συνθηκών Φωτισμού σε Σήραγγες με το Λογισμικό Radiance, Νικόλαος Ευθ. Πάνος
- [9] Αρχές, Συστήματα και Τεχνικές Φυσικού Φωτισμού: [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/fysikos\\_fotismos.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/fysikos_fotismos.htm) (τελευταία πρόσβαση 3/10/2015)
- [10] Η ιστορία του Φωτισμού και της Λάμπας: <http://technilampsi.eu/i-istoria-tou-fotismou-kai-tis-lampas/> (τελευταία πρόσβαση 10/10/2015)
- [11] Διπλωματική Εργασία: Προσομοίωση χώρου σε λογισμικό με βάση παράγοντες φωτισμού, Γούλα Ευγενία
- [12] S.G.: Electrical Solutions: <http://www.sgeorgakopoulos.gr/index.php/2013-10-13-19-50-39/sygekrisi-lamptiron.html>

- [13] Διπλωματική Εργασία: Προσομοίωση χώρου σε λογισμικό με βάση παράγοντες φωτισμού, Γούλα Ευγενία
- [14] Συστήματα ελέγχου:  
[http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/tecnitos\\_fotismos\\_systymata\\_elegxou.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/tecnitos_fotismos_systymata_elegxou.htm)
- [15] Sotiris Papantoniou, Denia Kolokotsa, Kostas Kalaitzakis, Davide NardiCesarini, Eduard Cubi and Cristina Cristalli: A development of a lighting controller using smart sensoris
- [16] Simon Crone, 1992. Radiance Users Manual (Volume 2)
- [17] Α. Τσαγκρασούλης, Α. Δράκου, 2012: Συνοπτική παραμετρική περιγραφή αισθητήρων φωτισμού χρησιμοποιώντας το RADIANCE /DAYSIM.
- [18] Building Technologies Department, Lawrence Berkeley Laboratory, 1999. The Radiance 3.5 Synthetic Imaging System <http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/refman.pdf>
- [19] Greg Ward Larson, Rob A. Shakespeare, 1998. Rendering with Radiance