



ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΦΥΣΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ

Α. Τσαγκρασούλης



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

HEALLINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών

ΦΥΣΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ

Dr. Α. Τσαγκρασούλης

Τμ. Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Παν. Θεσσαλίας

Licensed under the CC BY-NC-ND 4.0 International, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

HEALINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών

© 2016, Α. Τσαγκρασούλης

ISBN : 978-960-93-7943-4

ebook (PDF)

Το συγκεκριμένο εγχειρίδιο παρουσιάζει τις βασικές αρχές που διέπουν τη χρήση του φυσικού φωτισμού στο δομημένο περιβάλλον. Η ιδέα δημιουργίας του ξεκίνησε μετά από την ολοκλήρωση ενός θερινού σεμιναρίου το 2013 αποτελώντας ένα χρήσιμο βοήθημα για τους φοιτητές του Τμ. Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Παν. Θεσσαλίας.

Η δομή του καλύπτει σχεδόν όλες τις πτυχές του σχεδιασμού, με μερικά κεφάλαια να είναι περισσότερο ανεπτυγμένα σε επίπεδο περιεχομένου από άλλα, σε όλα όμως υπάρχουν εκτενείς αναφορές για εμβάθυνση. Παρουσιάζεται επίσης και η χρήση δύο πολυ γνωστών εργαλείων για τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων, ώστε ο χρήστης του εγχειρίδιου να μπορεί να χρησιμοποιήσει άμεσα τις πληροφορίες.

Παρέχεται στα πλαίσια του ανοικτού μαθήματος «Φωτισμός».

<http://eclass.uth.gr/eclass/courses/MHXD101/>

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1. ΨΥΧΟ-ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	10
Συνοπτική περιγραφή θεωριών οπτικής αντίληψης.....	17
Χρωματική αντίληψη.....	21
Χρωματικά συστήματα.....	22
Επίδραση στην φυσιολογική λειτουργία.....	26
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	31
Φωτεινή ροή ή φωτεινή ισχύς.....	31
Φωτεινή ένταση.....	32
Φωτισμός , ένταση φωτισμού.....	34
Λαμπρότητα.....	38
Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (CCT).....	44
Δείκτης χρωματικής απόδοσης.....	44
3. ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ.....	45
Τύποι ουρανού.....	45
Ήλιος.....	48
Διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού.....	55
4. ΦΥΣΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ : ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ/ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ.....	59
Τιμή έντασης φωτισμού.....	59
Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού (Daylight factor).....	59
Αυτονομία σε φυσικό φωτισμό (Daylight Autonomy).....	65
Ετήσια έκθεση σε ηλιακό φωτισμό (Annual Sunlight Exposure).....	70
UDI.....	71
Daylighting dashboard.....	71
LEED 2009.....	73
LEED v.4.....	74
5. ΧΡΗΣΗ ΜΑΚΕΤΩΝ.....	76
Τεχνητός ουρανός (Κουτί).....	82
Ημισφαιρικός ουρανός Τύπος I.....	82
Ημισφαιρικός ουρανός Τύπος II.....	83
6. ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΕΣΗ.....	88
Συζήτηση για ποιότητα.....	88
Οπτική άνεση.....	88

Δείκτες θάμβωσης.....	92
DGI	92
DGI _N	93
DGP.....	95
SR.....	96
Ισοροπημένη κατανομή λαμπροτήτων	96
Λαμπρότητες επιφανειών.....	98
Λαμπρότητα προσαρμογής	100
Οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον	103
7. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	105
Ζώνη Φυσικού Φωτισμού.....	109
Ανοίγματα (κάθετα/οριζόντια).....	119
Φεγγίτες στο δώμα.....	131
Υαλοπίνακες	134
Σκίαση.....	142
Δυναμικές προσόψεις.....	154
Συστήματα φυσικού φωτισμού	155
Ράφι Φωτισμού	156
Περσίδες.....	161
Πρισματικοί ακρυλικοί υαλοπίνακες	166
Ολογραφικά υμένια.....	170
Οδηγώντας φως σε μεγάλες αποστάσεις	171
Ηλιοστάτες.....	180
8.ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	185
Χρήση απλών υπολογιστικών εργαλείων	209
Dialux 4.11.....	209
Relux.....	214

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υπήρξαν εποχές στις οποίες το κέλυφος του κτηρίου αποτελούσε το κύριο μηχανισμό ρύθμισης των συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό. Η επίδραση του σχεδιασμού των ανοιγμάτων στην επάρκεια των επιπέδων φυσικού φωτισμού (δηλ. την κύρια πηγή φωτισμού) ήταν καθοριστική γιατί ταυτόχρονα έπρεπε να ρυθμιστεί και η δυνατότητα για φυσικό αερισμό. Προφανώς, ανάλογα με τον τύπο του κτηρίου η κατάλληλη χρήση του φυσικού φωτισμού λόγω θέσης και διαστάσεων ανοιγμάτων είχε (και ευτυχώς έχει!) καταλυτική επίδραση στην εμπειρία του χώρου. Οι περιμετρικές ζώνες των κτηρίων αποτελούσαν και τις κύριες περιοχές δραστηριότητας εντός αυτών. Η διαθεσιμότητα τεχνολογίας (αερισμού και φωτισμού) επέτρεψε την διεύρυνση των προαναφερθέντων περιοχών αφού πλέον η παροχή φωτισμού δεν εξαρτιόταν από την γειτνίαση με το εξωτερικό περιβάλλον. Έτσι στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με την ανέγερση κατασκευαστικά πολύπλοκων κτηρίων άρχισαν να τίθενται ζητήματα σχετικά με την οικονομική διαχείριση της κατασκευής. Φαίνεται ότι η κατανάλωση ενέργειας δεν εντάχθηκε στο ίδιο πλαίσιο αφού η εντατική χρήση των συστημάτων υποστήριξης (με την σχετική αύξηση της κατανάλωσης) θεωρήθηκε ένας απελευθερωτικός μηχανισμός από τους περιορισμούς του κλίματος. Την δεκαετία του '50 η εκτεταμένη χρήση των αποδοτικών λαμπτήρων φθορισμού και η σχετικά εύκολη επίτευξη υψηλών επιπέδων φωτισμού υποβάθμισε την σπουδαιότητα χρήσης του φυσικού φωτισμού. Μαζί με την ολοένα και αυξανόμενη χρήση του κλιματισμού αποσύνδεσε περαιτέρω το εσωτερικό των εργασιακών χώρων με το εξωτερικό περιβάλλον. Έτσι, παράλληλα την αύξηση της διαφάνειας της πρόσοψης (δυνατότητα κατασκευής υαλοπετασμάτων μεγάλων διαστάσεων), η επικράτηση εργασιακών χώρων ανοικτής κάτοψης διεύρυνε τις περιοχές που ο φυσικός φωτισμός ήταν ανεπαρκής. Όμως αυτό δεν αποτελούσε πρόβλημα, αφού πλέον η χρήση του τεχνητού φωτισμού επέτρεπε τον φωτισμό όλων των περιοχών που βρισκόταν στον πυρήνα του κτηρίου. Η ενεργειακή κρίση το 1973 ανέδειξε την πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών προβλημάτων, αρχίζοντας σοβαρά την συζήτηση για την αειφορία. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, η ενεργειακή βελτιστοποίηση των κτιρίων να γίνεται ένα όλο και πιο σημαντικό ζήτημα. Σε αυτό το σημείο ο φυσικός φωτισμός επανέρχεται στο προσκήνιο αφού με τη χρήση του θα μπορούσε να εξοικονομηθεί ενέργεια όχι μόνο από τον περιορισμό της χρήσης του ηλεκτροφωτισμού αλλά και από τη πιθανή μείωση των αναγκών θέρμανσης και ψύξης με δεδομένο ότι η φωτεινή δραστηριότητα (lm/W) των λαμπτήρων της εποχής ήταν σε γενικές γραμμές μικρότερη από αυτή του φυσικού φωτισμού. Είναι προφανές ότι οι σχεδιαστικές επιλογές άρχισαν να γίνονται ελαφρώς πιο πολύπλοκες αφού είναι πλέον αναγκαία η εξισορρόπηση ανταγωνιστικών παραμέτρων (π.χ. επάρκεια φυσικού φωτισμού- περιορισμός ηλιακών κερδών). Στην ίδια χρονική περίοδο ('80) η είσοδος του προσωπικού υπολογιστή στον εργασιακό χώρο προκάλεσε μια σημαντική αλλαγή. Η επιφάνεια εργασίας δεν είναι πια οριζόντια αλλά κάθετη (οθόνη). Με τη συγκεκριμένη αλλαγή, η πρόσοψη αρχίζει να έχει ένα σημαντικό ρόλο σε ζητήματα θάμβωσης. Προς το τέλος της δεκαετίας η επίδραση του φωτισμού¹

¹ R. Kuller, "The effects of indoor lighting on well-being and the annual rhythm of hormones", CIE 21st session, Vol.1, pp. 342-345, 1987.

στον ανθρώπινους βιολογικούς ρυθμούς αρχίζει να συζητείται, άλλα λόγω των τεχνικών σχεδιασμού του φωτισμού για την επίτευξη π.χ. συγκεκριμένων τιμών ομοιομορφίας, αναπτύχθηκε η αίσθηση ότι ο φυσικός φωτισμός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα, συνεπώς υποβαθμίστηκε και η σπουδαιότητά του στο εσωτερικό περιβάλλον των εργασιακών χώρων. Η πρόσοψη εξακολουθεί να παραμένει σαν ένα είδος κλειστού «κλιματικού σύνορου» και η ενεργειακή εξοικονόμηση να προέρχεται από τη σωστή διαστασιολόγηση/σχεδιασμό των συστημάτων θέρμανσης/ψύξης/αερισμού και φωτισμού.

Από τη δεκαετία του 1990, η τάση για αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα των κτηρίων γραφείων² εντάθηκε στην αγορά ακινήτων μαζί με το αυξημένο ενδιαφέρον για την υγεία και άνεση των εργαζομένων. Με δεδομένο το γεγονός ότι οι εργαζόμενοι αποτελούν την πλέον σημαντική παράμετρο, η βελτίωση των συνθηκών άνεσης έγινε το μέσο και για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας σε γραφεία³. Η ανάπτυξη προσαρμοστικών (αντί στατικών) μοντέλων θερμικής άνεσης με τη δυνατότητα φυσικού αερισμού άλλαξε την αντίληψη για τον σχεδιασμό των προσόψεων, επιτρέποντας μια «χαλάρωση» των απαιτήσεων, αναδεικνύοντας τη σημασία της προσαρμογής. Η αλλαγή αυτή ενθαρρύνεται επίσης από την υιοθέτηση περιβαλλοντικών δεσμεύσεων, καθώς και από τους κανονισμούς για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, με στόχο να περιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας και να μειωθεί η επίδραση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής. Συνεπώς αντί τώρα η πρόσοψη να θεωρείται μια ασπίδα προστασίας από το εξωτερικό περιβάλλον γίνεται μηχανισμός δυναμικής αλληλεπίδρασης με αυτό⁴. Θα ήταν ενδιαφέρον ένα αντίστοιχο μοντέλο για την οπτική άνεση γιατί τα μοντέλα υπολογισμού της συνυπάρχουν με σημαντικές ασυμφωνίες ανάμεσα στην πρόβλεψη και στην πραγματική κατάσταση. Για παράδειγμα η οπτική επαφή με ένα ενδιαφέρον εξωτερικό περιβάλλον είναι μια τέτοια περίπτωση ασυμφωνίας δηλ. παρόλο που λόγω κατανομής λαμπροτήτων τα μοντέλα προβλέπουν θάμβωση (άρα δυσκολία εκτέλεσης κάποιου έργου) η πραγματικότητα είναι ανεκτή. Η ανάπτυξη συστημάτων ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών ανάλογα με την παροχή φυσικού φωτισμού από τα ανοίγματα, μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση για φωτισμό καθώς και τα φορτία αιχμής κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Η ωριμότητα αυτής της τεχνολογίας μαζί με τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υαλοπινάκων επέτρεψε ξανά τη χρήση μεγάλων διαφανών επιφανειών με τον φυσικό φωτισμό να αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της στρατηγικής μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης. Τα παραπάνω, κανονισμοί και τεχνολογία, όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας έχουν ήδη διαμορφώσει ένα πλαίσιο σχεδιασμού που λίγο ως πολύ ακολουθείται σήμερα. Το 2002 οι Berson et al⁵ αναγνώρισαν (η υποψία ύπαρξης τους υπήρχε από το 1923) ένα νέο τύπο γαγγλιακών κυττάρων (ipRGC) τα οποία λειτουργούν λαμβάνοντας σήματα από τα κωνία/ραβδία αλλά και αυτόνομα όταν το οπτικό

² Lorenz, D. (1999): "New Work: Die Herausforderung neuer Arbeitsformen, Telearbeit verändert Arbeit und Bürohäuser", Beitrag zur Technologiekonferenz Mittelhessen, Wetzlar [in German]

³ Becker, F., Sims, W. (2001): Offices that work, Balancing communication, flexibility and cost, Cornell University, International Workplace Studies Program, <http://iwsp.human.cornell.edu>

⁴ A. Roetzel, A. Tsangrassoulis, U. Dietrich, S. Busching: "Occupant's comfort expectations - a thermal lifestyle?", 3rd International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, 29/9-1/10/ 2010, Rhodos.

⁵ Berson DM, Dunn FA, Takao M (2002). "Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock". Science 295.

σύστημα πάψει να λειτουργεί. Έτσι –ποσοτικά πιά- η επίδραση του φυσικού φωτισμού στους κερκαδιανούς ρυθμούς επανήλθε στο προσκήνιο. Σήμερα περισσότερο από ποτέ η εντατικοποίηση των συνθηκών εργασίας έχει σαν αποτέλεσμα ο χρόνος που δαπανάται στο εσωτερικό των κτηρίων να έχει αυξηθεί δραματικά σε σχέση με αυτόν του παρελθόντος και προφανώς - ανάλογα με το μέγεθος των ανοιγμάτων, τη διαπερατότητα των υαλοπινάκων και το βάθος του χώρου - η έκθεση στον φυσικό φωτισμό. Συνεπώς το σχεδιαστικό περιβάλλον (έχει ήδη χρησιμοποιηθεί ο όρος κερκαδιανή αρχιτεκτονική) που διαμορφώνεται (σχετικά πάντα με τη χρήση του φυσικού φωτισμού) καθοδηγείται από τη δημιουργία ποιοτικού εσωτερικού περιβάλλοντος με κύριο χαρακτηριστικό την παροχή της «σωστής ποσότητας» φωτισμού στον κατάλληλο χρόνο. Τώρα αρχίζει να συμπίπτει η απαίτηση για ευεξία με αυτή για εξοικονόμηση με συνέπεια να επηρεάζεται το πλάτος της κάτοψης ώστε να αυξηθεί το ποσοστό της περιμετρικής ζώνης. Είναι χαρακτηριστική η συζήτηση (ονομάσθηκε και “battle for the wall” !) για την πιθανή μείωση του ποσοστού μείωσης (WWR, window to wall ratio) των ανοιγμάτων στην πρόσοψη για το κτήριο αναφοράς όπως αυτό περιγράφεται στο ASHRAE 189.1 “Standard for the design of high performance green buildings”. Η σημερινή διαθεσιμότητα υαλοπινάκων με χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς και συστημάτων σκίασης που μπορούν και ρυθμίζουν εποχικά τα ηλιακά κέρδη με κατάλληλο χειρισμό του φυσικού φωτισμού επιτρέπουν σε πρακτικό επίπεδο πια την σχετική αύξηση του μεγέθους των ανοιγμάτων (και ταυτόχρονα του κόστους).

Την τελευταία πενταετία άρχισε να αναθεωρείται και η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των συνθηκών φωτισμού στο εσωτερικό των κτηρίων στο στάδιο του σχεδιασμού. Από την «μονοκρατορία» του Παράγοντα Φυσικού Φωτισμού (Daylight Factor), έχουν προταθεί⁶ κλιματικά δυναμικές παράμετροι όπως η χωρική αυτονομία φωτισμού (spatial Daylight Autonomy) αυξάνοντας ταυτόχρονα και την πολυπλοκότητα των υπολογισμών. Θα πρέπει να τονισθεί εδώ ότι αυτή η πολυπλοκότητα ενδεχομένως να προκαλέσει την εστίαση των σχεδιαστικών ομάδων στην ικανοποίηση των σχετικών κριτηρίων⁷, χάνοντας έτσι την ευρύτερη επίδραση που έχει ο φυσικός φωτισμός στην αισθητική του χώρου.

Καταλήγωντας, από τα παραπάνω, φαίνεται ότι η χρήση του φυσικού φωτισμού αντιπροσωπεύει ένα μηχανισμό σχεδιασμού που έχει πλεονεκτήματα ταυτόχρονα για τον άνθρωπο (χρήστη του κτηρίου) αλλά και το περιβάλλον (εξοικονόμηση). Όμως η διάδοση της τεχνολογίας εκμετάλλευσης του (σκίαση/συστήματα φυσικού φωτισμού, ρύθμιση του ηλεκτροφωτισμού, υαλοπίνακες) είναι σχετικά περιορισμένη⁸. Αυτός είναι και ο στόχος του παρόντος κειμένου, η παρουσίαση των βασικών τεχνικών και τεχνολογίας με απώτερο στόχο την ευαισθητοποίηση όλων των εμπλεκόμενων στον σχεδιασμό.

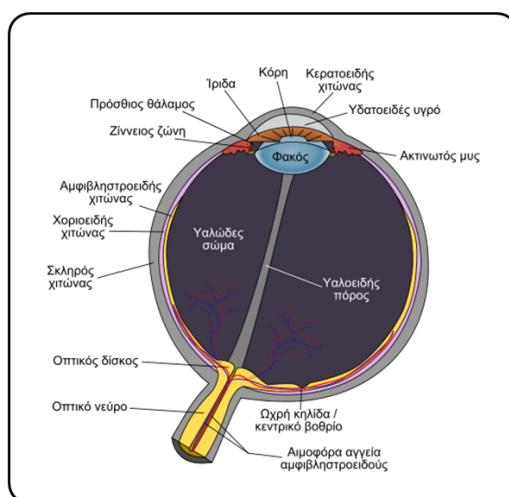
⁶ IESNA, LM-83-2012, Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)

⁷ “Getting the measure of daylight”, The Lighting Journal, Sep. 2014.

⁸ Seth W. Rose, “The 7 market obstacles to daylighting”, IESNA LD+A, Feb.2014.

1. ΨΥΧΟ-ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Το σύστημα όρασης του ανθρώπου αποτελεί συνδετήριο κρίκο με τον εξωτερικό κόσμο μέσω της μεταφοράς εικόνων στον εγκέφαλο. Η ανάλυση / επεξεργασία και επιλεκτική αποθήκευση των εικόνων –πληροφοριών καθορίζει τη μαθησιακή διαδικασία. Έτσι ικανοποιείται η ανάγκη για την ερμηνεία του κόσμου, η οποία δεν στηρίζεται μόνο στην απλή καταγραφή των οπτικών φαινομένων αλλά στην προσπάθεια θεμελίωσης των αιτών δημιουργίας και σχέσεων. Προφανώς η ερμηνεία εξαρτάται από τις ατομικές εμπειρίες και γνώσεις, τη διάθεση της στιγμής και τη ιδιοσυγκρασία. Επιπρόσθετα η λειτουργία του οργανισμού συντονίζεται με την ρυθμική εναλλαγή ημέρας-νύχτας με τον φυσικό φωτισμό να έχει ρυθμιστικό ρόλο σε αυτόν τον καρδιακό ρυθμό (βιολογικός ρυθμός με περίπου 24ωρη περίοδο). Το κύριο όργανο στην προαναφερθείσα διαδικασία είναι το μάτι, μια σφαίρα με διάμετρο ~2.5 εκ.



Σχήμα 1.1: Περιγραφή ανατομίας ματιού (εικόνα public domain)

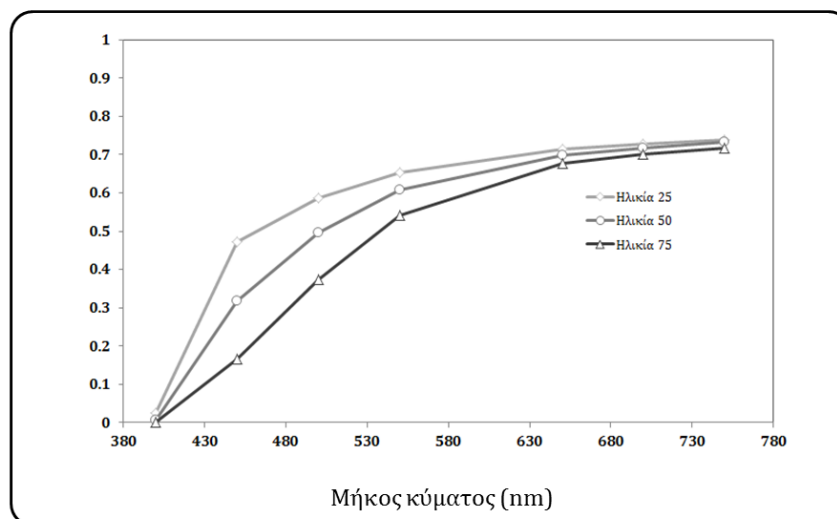
[http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Schematic_diagram_of_the_human_eye_el.svg](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF%Schematic_diagram_of_the_human_eye_el.svg)

Μια ενδιαφέρουσα παρένθεση σε αυτό το σημείο. Ο Πλάτωνας στον Τιμαίο ισχυρίζεται ότι η όραση πραγματοποιείται μέσω εκπομπής «ακτίνων» (πύρ) από τα μάτια που στη συνέχεια ενώνονται με το φυσικό φως ώστε να σχηματισθεί ένα “ομοιογενές σώμα” το οποίο χρησιμοποιείται σαν όργανο ανίχνευσης των αντικειμένων. Ενδιαφέρουσα η ανασκόπηση των αρχικών θεωριών όρασης από τον Charles Gross⁹.

Το μάτι αποτελείται από τον φακό που συγκεντρώνει τις φωτεινές ακτίνες στον αμφιβληστροειδή, το υαλώδες σώμα και το υδατώδες υγρό. Το υαλώδες σώμα βρίσκεται πίσω από τον φακό και αποτελείται από δίκτυο κολλαγόνων ινών τα διάκενα των οποίων είναι γεμάτα από μόρια υαλοουρονικού οξέος. Όπως είναι φυσικό το φως διαδίδεται μέσω του υαλώδους σώματος υφίσταται απορρόφηση και σε ένα μέρος σκέδαση. Αποτέλεσμα της σκέδασης είναι η μείωση της αντίθεσης. Στον αμφιβληστροειδή φτάνει ακτινοβολία με μήκη

⁹ Charles Gross, “The Fire that comes from the eye”, The neuroscientist, ISSN 1073-8584, 1999

κύματος από 380-950 nm. Στο ορατό φάσμα η διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος με την συνολική τιμή να κυμαίνεται μεταξύ 70-85%. Σε μεγάλες ηλικίες ο φακός κιτρινίζει, γεγονός που οδηγεί σε ελάττωση της διαπερατότητας σε όλα τα μήκη κύματος (ιδιαίτερα στα μικρά).



Σχήμα 1.2: Μεταβολή φασματικής διαπερατότητας ¹⁰ματιού σε συνάρτηση με την ηλικία

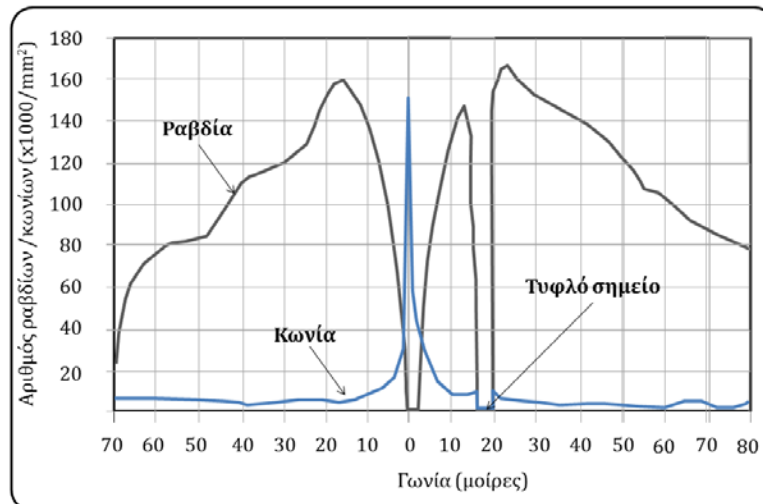
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συγκέντρωση των οπτικών ακτίνων στον αμφιβληστροειδή επιτυγχάνεται με τον κερατοειδή και τον φακό. Ο αμφιβληστροειδής περιέχει δύο τύπους φωτουποδοχέων, τα κωνία (6-7 εκατομμύρια¹¹) και τα ραβδία (~110-125 εκατομμύρια²). Η λειτουργία τους βασίζεται στη μετατροπή των φωτονίων που προσπίπτουν πάνω τους σε νευρικό ερέθισμα. Η μεταβίβαση του ερεθίσματος γίνεται με δίπολα και γαγγλιακά κύτταρα από τα οποία ξεκινούν νευρικές ίνες που σχηματίζουν το οπτικό νεύρο.

Η μεγαλύτερη συγκέντρωση των κωνίων εμφανίζεται σε μια μικρή περιοχή του αμφιβληστροειδούς που ονομάζεται ωχρά κηλίδα. Στο κέντρο της η περιοχή ονομάζεται κεντρικό βοθρίο αποτελείται μόνο από κωνία και καλύπτει 1^ο οπτικού πεδίου. Τα κωνία χρησιμοποιούνται κυρίως για την όραση ημέρας και ανάλογα με τον τύπο τους παρουσιάζουν ευαισθησία σε διαφορετικά μήκη κύματος. Γενικά η ωχρά κηλίδα «παύει» να λειτουργεί σε επίπεδα λαμπρότητας < 0.03 cd/m².

Η συγκέντρωση των ραβδίων αυξάνεται με την απόσταση από την ωχρά κηλίδα και είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στο φως. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η λειτουργία τους μόνο σε συνθήκες μικρών τιμών λαμπρότητας. Επειδή η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη από αυτή των κωνίων η οπτική ανάλυση που παρέχουν είναι μικρή.

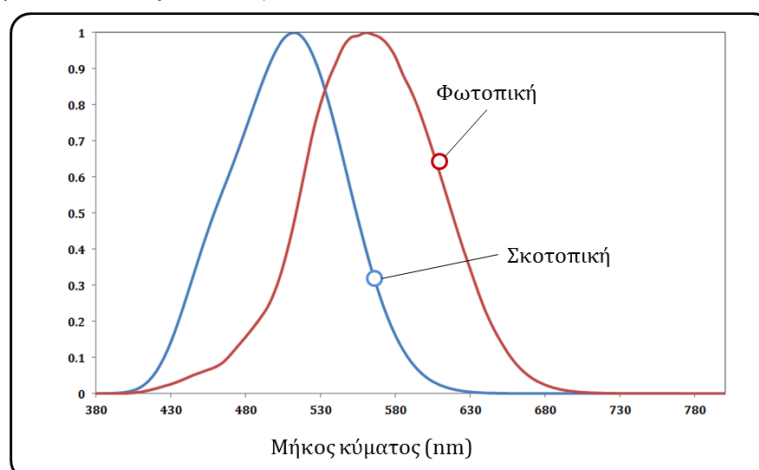
¹⁰ Optical radiation physics and illuminating engineering — Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings — Quantities, symbols and action spectra English version of DIN V 5031-100, 2009-06

¹¹ Osterberg G. Topography of the layer of rods and cones in the human retina. Acta Ophthalmol Suppl. 1935;6:1-103



Σχήμα 1.3: Κατανομή κωνίων και ραβδίων στον αμφιβληστροειδή

Το ανθρώπινο σύστημα όρασης δεν εμφανίζει την ίδια ευαισθησία σε όλα τα μήκη κύματος. Όταν δύο φωτεινές πηγές εκπέμπουν φως στο ίδιο μήκος κύματος αλλά εμφανίζουν διαφορετική λαμπρότητα (αντικειμενικό μέγεθος) τότε εμφανίζουν διαφορετική φωτεινότητα (υποκειμενικό μέγεθος). Όταν όμως διαφέρουν και στο μήκος κύματος και στη λαμπρότητα τότε μπορούν να συγκριθούν χρησιμοποιώντας μια ισοδύναμη φωτεινότητα (δηλαδή «μεταβάλλοντας» την αντικειμενική λαμπρότητα προσπαθούμε να πετύχουμε την ίδια φωτεινότητα). Μελετώντας την ισοδύναμη φωτεινότητα για διάφορα ζεύγη μηκών κύματος είναι δυνατόν να εκφραστεί η ευαισθησία του οπτικού μας συστήματος σε κάθε μήκος κύματος σε σχέση με το μήκος κύματος που παρουσιάζεται η μέγιστη ευαισθησία. Η σχετική καμπύλη ονομάζεται καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας. Με βάση στατιστικά δεδομένα μπορούν να ορισθούν δύο καμπύλες (φωτοπική για την όραση σε συνθήκες ημέρας και σκοτοπική για συνθήκες νύκτας). Στην φωτοπική όραση η μέγιστη ευαισθησία εμφανίζεται στα 555 nm ενώ στην σκοτοπική στα 505 nm. Το φαινόμενο ονομάζεται μετατόπιση Purkinje.



Σχήμα 1.4: Φωτοπική και σκοτοπική φασματική καμπύλη ευαισθησίας¹²

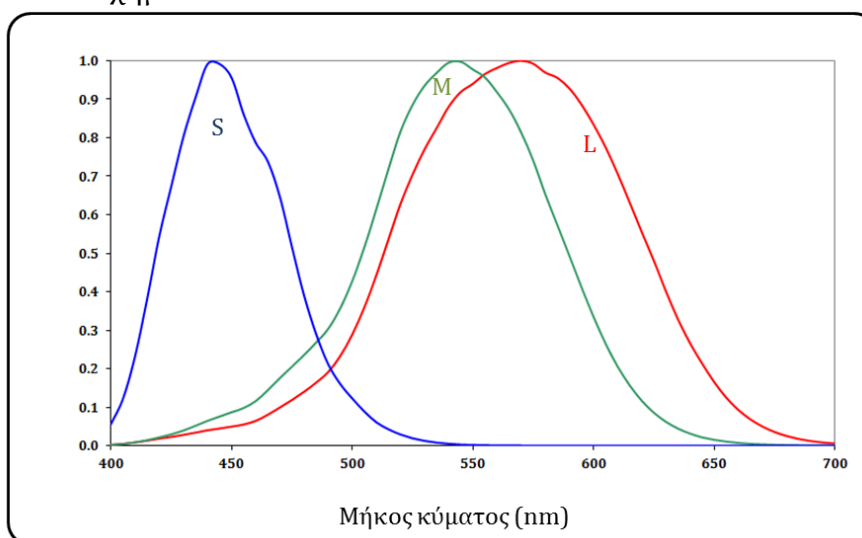
¹² Η σκοτοπική καμπύλη από CIE 1951, ενώ η φωτοπική από Sharpe, L. T., Stockman, A., Jagla, W. & Jägle, H. (2005). A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. Journal of Vision, 5, 948-968.

Η μετατόπιση ανάμεσα στη φωτοπική και σκοτοπική όραση πραγματοποιείται μέσω μιας ενδιάμεσης κατάστασης που ονομάζεται μεσοπική (παράδειγμα : συνθήκες νυχτερινού φωτισμού δρόμων).

Ενώ τα ραβδία αποτελούνται από μόνο ένα είδος, τα κωνία ανάλογα με την χρωστική που χρησιμοποιούν εμφανίζουν μέγιστη απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Διαχωρίζονται στις υποκατηγορίες S, M και L ανάλογα με το μήκος κύματος που εμφανίζεται η μέγιστη απορρόφηση (Short, Medium, Long wavelength).

Το εύρος των μηκών κύματος που τα κωνία L εμφανίζουν ευαισθησία είναι 410 - 690 nm με μέγιστο ~580 nm, τα M κωνία από 440-670 nm με μέγιστο ~ 540 nm ενώ τα S έχουν εύρος 400-540 nm με μέγιστο 440 nm.

Η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του κάθε φωτουποδοχέα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.5: Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας των υποδοχέων S, M και L

Είναι προφανής η σημασία της αλληλοκάλυψης των καμπυλών ώστε να καλύπτεται το ορατό φάσμα. Ο αριθμός των L κωνίων υπερτερεί με τον λόγο L/M/S να κυμαίνεται μεταξύ 12/6/1 και 40/20/1.

Λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού των φωτουποδοχέων η πληροφορία που περιέχεται στις εικόνες που σχηματίζονται στον αμφιβληστροειδή είναι μεγάλη. Η χρονική απόκριση των κωνίων είναι ~50 msec ενώ των ραβδίων ~200 msec. Έτσι ο αμφιβληστροειδής ανιχνεύει περισσότερο τις αλλαγές στην φωτεινότητα/χρώμα που εμφανίζονται σε μια φωτεινή σκηνή και υποβαθμίζει τη σημασία τμημάτων της σκηνής με σταθερή χρονικά και χωρικά φωτεινότητα¹³.)

Πέραν των προαναφερθέντων φωτουποδοχέων (κλασσικών κατά μια έννοια !) το 2002 οι Berson et al¹⁴ αναγνώρισαν ένα νέο τύπο γαγγλιακών κυττάρων (ipRGC) τα οποία αντιπροσωπεύουν 1-3% του συνόλου των γαγγλιακών κυττάρων και λειτουργούν λαμβάνοντας σήματα από τα κωνία/ραβδία αλλά

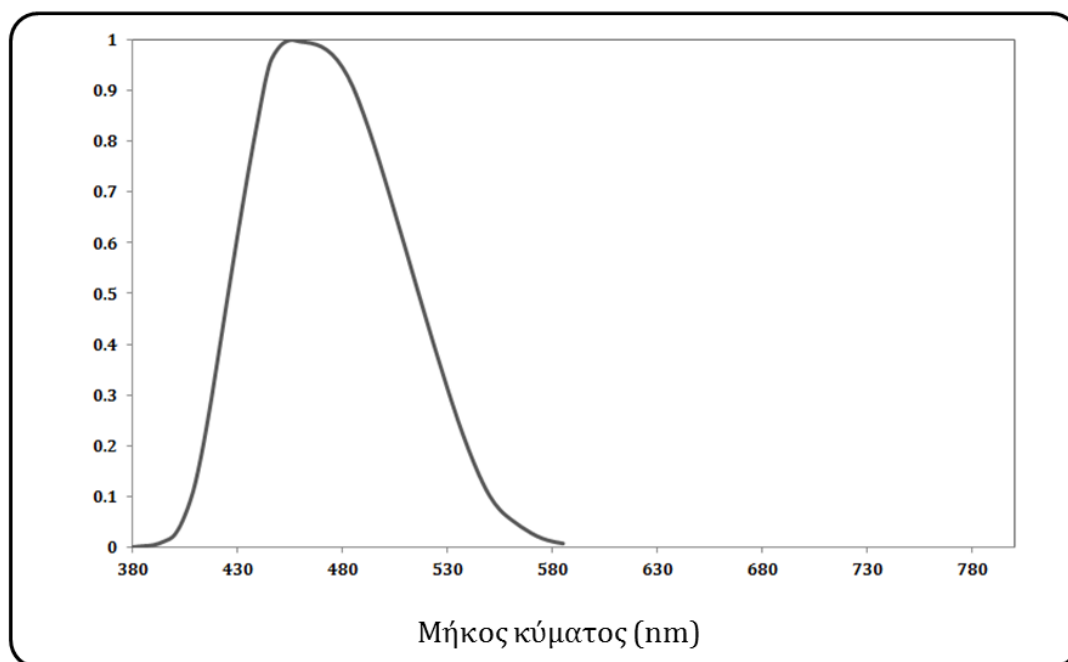
¹³ Σ. Πλαίνης, Μ. Τσιλιμπάρης, Ι Παλληκάρης, «Νευροφυσιολογία του αμφιβληστροειδή και των οπτικών οδών», Οφθαλμολογία 19 (4), 2007

¹⁴ Berson DM, Dunn FA, Takao M (2002). "Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock". Science 295.

και αυτόνομα όταν το οπτικό σύστημα πάψει να λειτουργεί¹⁵. Οι τελευταίοι φωτουποδοχείς μέσω των νευρικών ώσεων επικοινωνούν (αμφιβλιστοειδουποθαλαμική οδός) με τον υπεχιασματικό πυρήνα ο οποίος με τη σειρά του με την επίφυση με συνέπεια έκκριση μελατονίνης.

Η έκκριση της ορμόνης αυτής είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Οι Brainard & Hanifin¹⁶ χρησιμοποιώντας μονοχρωματικό φως κατά τη διάρκεια της νύχτας εκτίμησαν την επίδραση του στην καταστολή έκκρισης της μελατονίνης. Η σχετική καμπύλη ευαισθησίας (δηλ. τι επίδραση έχει στην έκκριση μελατονίνης ακτινοβολία με συγκεκριμένο μήκος κύματος) όπως αυτή που υιοθετείται από το πρότυπο DIN V 5031-100:2009¹⁷ δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.6: Σχετική καμπύλη ευαισθησίας όσον αφορά την έκκριση μελατονίνης. Έχει χρησιμοποιηθεί μονοχρωματική ακτινοβολία.

Το κύριο σώμα των υπολογισμών που πραγματοποιούνται στην φωτομετρία βασίζεται στην φωτοπική καμπύλη. Όταν όμως χρειάζεται να ληφθούν υπόψη διαφορετικά φαινόμενα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μια διαφορετική καμπύλη ευαισθησίας (π.χ. σκοτοπική). Έτσι αν χρειάζεται να εκτιμηθεί η επίδραση του φάσματος του φυσικού φωτισμού στην έκκριση μελατονίνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχετική καμπύλη ευαισθησίας του προηγούμενου σχήματος. Ορίζεται λοιπόν ένας παράγοντας επίδρασης στον κίρκαδιανό ρυθμό (circadian action factor) a_{cv} .

¹⁵ Lucas, R. J.; Douglas, R. H.; Foster, R. G.: Characterization of an ocular photopigment capable of driving pupillary constriction in mice, *Nature Neurosci.* 4, pp. 621-626, 2001

¹⁶ Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.: The Effects of Light on Human Health and Behavior: Relevance to Architectural Lighting, *Proc. Symp. 2004 «Light & Health», CIE x027: 2004*, pp. 2-16

¹⁷ DIN V 5031-100:2009, «Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra»

$$a_{cv} = \frac{\int_{380}^{580} X_{\lambda}(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d(\lambda)}{\int_{380}^{780} X_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d(\lambda)} \quad (1.1)$$

Όπου $X_{\lambda}(\lambda)$ η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας, $C(\lambda)$ η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας που αφορά την έκκριση μελατονίνης και $V(\lambda)$ η φωτοπική καμπύλη ευαισθησίας.

Συνεπώς, επειδή η παρουσία του υαλοπίνακα μπορεί να επηρεάσει την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο είναι ενδιαφέρουσα προσέγγιση η εκτίμηση μιας διαπερατότητας η οποία μπορεί να ονομασθεί «κιρκαδιανή» σε αντιστοιχία με την διαπερατότητα στο ορατό τμήμα του φάσματος. Ορίζεται δε ως εξής :

$$\tau_c = \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{580 \text{ nm}} D_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{580 \text{ nm}} D_{\lambda} \cdot C(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (1.2)$$

Όπου D_{λ} η σχετική φασματική κατανομή πρότυπης πηγής D65 (τεχνητή πηγή φωτισμού με συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος 6504K). Προφανώς όσο μικρότερος είναι ο λόγος της κिरκαδιανής προς τη φωτοπική διαπερατότητα (τ_c/τ_v) τόσο μικραίνει η κिरκαδιανή «αποδοτικότητα» του φωτισμού (δηλ. Μείωση της επίδρασης του μπλέ τμήματος του φάσματος). Τυπικές τιμές του λόγου αυτού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα¹⁸.

	Κιρκαδιανή διαπερατότητα (τ_c)	Φωτοπική διαπερατότητα (τ_v)	τ_c/τ_v
Υαλοπίνακας Antelio Blue 6 mm	0.69	0.57	1.2
Κουρτίνα κίτρινου χρώματος	0.08	0.24	0.33
Κουρτίνα κόκκινου χρώματος	0.0044	0.04	0.11
Κουρτίνα πράσινου χρώματος	0.09	0.21	0.44
Υαλοπίνακας Planibel green 6mm	0.74	0.74	1
Υαλοπίνακας Planibel bronze 6mm	0.44	0.50	0.89

Πίνακας 1.1: Τυπικές τιμές του λόγου τ_c/τ_v για διάφορους τύπους υαλοπίνακα και εσωτερικών σκιάστρων.

Ενδιαφέρον είναι επίσης και το γεγονός ότι φωτισμός με κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω είναι περισσότερο δραστικός στην καταστολή της έκκρισης της μελατονίνης¹⁹. Έτσι το μάτι επικοινωνεί με τον εγκέφαλο μέσω δύο οδών :

A) Κωνία/ραδβία → οπτική οδός → Ινιακός λοβός (έγχρωμη όραση, καθορίζει την οπτική απόδοση, αντίληψη κίνησης) και

B) ipRGC → αμφιβλιστοειδουποθαλαμική οδός → υπερχιασματικός πυρήνας → Βιολογικοί ρυθμοί, έκκριση ορμονών, κεντρικές λειτουργίες συγχρονισμού κλπ

¹⁸ Jozef Hraska, "Chronobiological aspects of green buildings daylighting", Renewable Energy, 73, pp 100-114, 2015

¹⁹ Glickman, G.; Hanifin, J. P.; Rollag, M. D.; Wang, J.; Cooper, H.; Brainard, G. C.: Inferior Retinal Light Exposure Is More Effective than Superior Retinal Exposure in Suppressing Melatonin in Humans, Journal of Biological Rhythms, Vol. 18 No. 1, pp 71-79, 2003

Η διάμετρος της κόρης μεταβάλλεται μεταξύ 2-8 μm ²⁰. Με δεδομένη τη συγκεκριμένη μεταβολή θα έπρεπε θεωρητικά η φωτεινή ροή που περνά από την ίριδα να παρουσιάζει εύρος τιμών $\sim 16/1$. Επειδή η ευαισθησία του ματιού μεταβάλλεται με τη γωνία πρόσπτωσης ο προαναφερθείς λόγος τροποποιείται 10/1. Στην πράξη όμως το εύρος τιμών είναι $\sim 1000/1$ (με ακραία τιμή την 10000/1) σε κάποια κατάσταση προσαρμογής. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μόνο με τη μεταβολή της διαμέτρου της κόρης δεν μπορεί να εξηγηθεί η προσαρμογή του ματιού στις επικρατούσες κάθε φορά συνθήκες. Το 1834 στην προσπάθεια ανίχνευσης της ελάχιστης αντιληπτής μεταβολής στην ένταση κάποιου ερεθίσματος ο Ε.Η. Weber πρότεινε τη σχέση :

$$\Delta I = K_w I \quad (1.3)$$

Όπου I η ένταση του ερεθίσματος και K_w σταθερά.

Πρακτικά η σπουδαιότητα της παραπάνω σχέσης φαίνεται με το εξής παράδειγμα . Σε χώρο με παράθυρο εμβαδού 1 τ.μ. διπλασιάζουμε το εμβαδό. Η αίσθηση της μεταβολής είναι ισχυρότερη από την αίσθηση που θα υπήρχε αν το εμβαδό του παράθυρου μεταβαλλόταν πάλι κατά 1 τμ αλλά τώρα από 10 τμ σε 11 τμ.

Στη συνέχεια ο G. Fechner²¹ παρουσίασε τη σχέση ανάμεσα στην αίσθηση (S) και στο ερέθισμα (I) που την προκαλεί (νόμος Weber-Fechner):

$$S = a \cdot \log I + b \quad (1.4)$$

Στη συνέχεια οι Plateau²², F. Brentano²³ και τελικά ο S. Stevens²⁴ ξεκινώντας από τον νόμο του Weber πρότειναν την σύνδεση της αίσθησης του ερεθίσματος με την αντίστοιχη έντασή του η οποία τώρα ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση :

$$S = k I^n \quad (1.5)$$

Όπου k, s σταθερές.

Ο Stevens εξέτασε μια σειρά διαφόρων ερεθισμάτων (π.χ. γεύση , όσφρηση κλπ). Όσον αφορά της φωτεινότητα (στόχος με γωνιακή έκταση 5^0 σε σκοτεινό υπόβαθρο) η τιμή της σταθεράς $n=0.33$ ενώ στην περίπτωση σημειακών φωτεινών πηγών η σταθερά γίνεται 0.5.

Η λαμπρότητα σαν μέγεθος έχει σημαντική επίδραση στο σχεδιασμό των χώρων. Η υποκειμενική αίσθηση της λαμπρότητας ονομάζεται φωτεινότητα. Ενώ η λαμπρότητα μιας επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί αντικειμενικά με τη βοήθεια μιας κάμερας λαμπρότητας η φωτεινότητα της (δηλ. ο τρόπος με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τη λαμπρότητα) εξαρτάται όχι μόνο από την απόλυτη

²⁰ Andrew B. Watson and John I. Yellott, "A unified formula for light-adapted pupil size", *Journal of Vision* September 25, 2012 vol. 12 no. 10

²¹ 1860 , The elements of Psychophysics

²² Plateau, J.A.F. 1872. Sur la mesure des sensations physiques, et sur la loi qui lie l' intensité de ces sensations à l' intensité de la cause excitante. Bulletins de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres, et des Beaux-Arts de Belgique. 33, 376-388

²³ Brentano, F. Psychologie vom Empirischen Standpunkt, Vol. 1, Dunker and Hunblot, Leipzig. 1874

²⁴ Stevens, S.S. 1970. Neural events and the psychophysical law. Science 170, 1043-1050

λαμπρότητα της συγκεκριμένης επιφάνειας αλλά και από την λαμπρότητα του υπόβαθρου που την περιβάλλει και φυσικά το σχήμα τις διαστάσεις και την θέση των διαφόρων επιφανειών που απαρτίζουν το υπόβαθρο. Το 1970 ο Marsden²⁵ πρότεινε μια σχέση για την εκτίμηση της φωτεινότητας (B) μιάς επιφάνειας σε π.χ. ένα δωμάτιο:

$$B = L^{0.6} \cdot L_{\max}^{-0.25} \quad (1.6)$$

Όπου L_{\max} η μέγιστη λαμπρότητα κάποιας επιφάνειας στο δωμάτιο και L η λαμπρότητα κάποιας άλλης επιφάνειας.

Η προσαρμογή του ματιού από φωτεινό σε σκοτεινό περιβάλλον και το αντίστροφο είναι φαινόμενο σημαντικό στο επίπεδο του σχεδιασμού. Ο μηχανισμός προσαρμογής στο σκοτάδι πιθανόν να συνδέεται με φωτοχημικές αντιδράσεις σχετιζόμενες με την αναγέννηση φωτοευαίσθητων χρωστικών (π.χ. ροδοψίνη για τα ραβδία). Η προσαρμογή στο σκοτάδι πραγματοποιείται σε δύο χρόνους. Αρχικά πραγματοποιείται η προσαρμογή των κωνίων (~7 λεπτά) και στη συνέχεια η προσαρμογή των ραβδίων (~1 ώρα). Η ανάστροφη προσαρμογή (από σκοτεινό σε φωτεινό περιβάλλον) πραγματοποιείται σε δύο στάδια με το πρώτο να διαρκεί ~0.05 sec ενώ το δεύτερο αργεί μέχρι να υπάρξει πλήρης ανάκτηση της ευαισθησίας.

Για την αποφυγή δημιουργίας δύο εικόνων ο εγκέφαλος συνενώνει τις δύο εικόνες σε μία. Η διόφθαλμη όραση διευρύνει το οπτικό πεδίο κατά την οριζόντια διεύθυνση και δημιουργεί την αίσθηση του βάθους (στερεοσκοπική όραση).

Συνοπτική περιγραφή θεωριών οπτικής αντίληψης

Τα προαναφερθέντα σχετίζονται με το βιολογικό υπόβαθρο της όρασης χωρίς να αναφερθούν στην διαδικασία επεξεργασίας των οπτικών πληροφοριών η οποία οδηγεί και στην ερμηνεία του ορατού περιβάλλοντος (οπτική αντίληψη). Συνεπώς η διαδρομή από το εξωτερικό ερέθισμα, στην αποτύπωση, στην μεταβίβαση, στην καταγραφή και στο τέλος στην ανάλυση αποτελεί ένα μηχανισμό στατικής λειτουργίας της αντίληψης, παραστατικό όμως όσον αφορά τα στάδια που τον απαρτίζουν.

Έχουν προταθεί αρκετές θεωρίες για την οπτική αντίληψη.

- **Η στρουκτουραλιστική προσέγγιση** βασίζεται στην μελέτη των αισθητηριακών εμπειριών μέσω της ενδοσκόπησης θεωρώντας άμεση σχέση αίσθησης – αντίληψης υπο την έννοια ότι η αντίληψη είναι τελικά το άθροισμα των εξωτερικών ερεθισμάτων.
- **Η θεωρία Gestalt** (κίνημα πειραματικής ψυχολογίας, 1920, από τους E. Mach, J. W. von Goethe, M. Wertheimer, K. Koffka, K. Lewin κα) βασίζεται στο ότι η αντίληψη των οπτικών πληροφοριών πραγματοποιείται μέσω δημιουργίας οργανωμένων μορφών/δομών των οπτικών πληροφοριών και όχι απλώς σαν άθροισμα επιμέρους συστατικών («There are wholes, the behaviour of which is not determined by that of their individual elements, but where the part-processes are themselves determined by the intrinsic nature of the whole. It is the hope of Gestalt

²⁵ Marsden A.M., "Brightness-luminance relationships in an interior", Lighting Research and Technology, 2(1), 1970

theory to determine the nature of such wholes», M. Wertheimer, 1924). Συνεπώς η αντίληψη βασίζεται στην οργάνωση των οπτικών πληροφοριών (ώστε να αποκτήσουν νόημα) και η θεωρία εστιάζεται στην ομαδοποίηση τους περιγράφοντας νόμους και αρχές που τη διέπουν (συμμετρίας, ομοιότητας, συμπλήρωσης, γειτνίασης, συνέχειας).

- **Στην οικολογική προσέγγιση** της οπτικής αντίληψης, ο Gibson²⁶ θεωρεί την όραση σαν δυναμική διαδικασία αλληλεπίδρασης²⁷ με το περιβάλλον με τη βοήθεια της οποίας αποδίδεται άμεσα νόημα στον παρατηρούμενο κόσμο χωρίς παρέμβαση κάποιας υπολογιστικής διαδικασίας για π.χ. την εκτίμηση του μεγέθους ενός αντικειμένου. Δηλ. όλες οι πληροφορίες που χρειάζονται περιέχονται στην εικόνα που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή²⁸.
- **Η υπολογιστική προσέγγιση** (computational approach) με κύριο τον D. Marr, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Helmholtz²⁹ (δηλ. τον ρόλο που διαδραματίζουν στην οπτική αντίληψη η μνήμη, η εμπειρία και η μάθηση) οδήγησε στην ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων για τις διεργασίες που σχετίζονται με την όραση. Σύμφωνα με αυτή ο Marr³⁰ περιέγραψε την όραση σαν μια διεργασία τριών σταδίων που ξεκινώντας από την δημιουργία της δισδιάστατης εικόνας στον αμφιβληστροειδή καταλήγει στην αντίληψη του τρισδιάστατου κόσμου. Τα τρία στάδια είναι α) ο σχηματισμός του πρωταρχικού σκίτσου (εκτίμηση θεμελιωδών στοιχείων της εικόνας όπως ακμές, άκρα περιοχές) β) ο σχηματισμός του σκίτσου 2 ½ διαστάσεων (αναγνώριση υφών) και τέλος γ) ο σχηματισμός του τρισδιάστατου μοντέλου.

Ζούμε σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον (τουλάχιστον οπτικά!) και πιθανόν να είναι απορίας άξιο πως ο αντιληπτός κόσμος είναι τόσο «σταθερός». Η ύπαρξη αυτής της σταθερότητας (των σχημάτων, του μεγέθους κλπ) είναι εξαιρετικά χρήσιμη στις καθημερινές μας δραστηριότητες. Ειδικά για τον φωτισμό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σταθερότητα που αφορά την αντίληψη της ανακλαστικότητας (lightness constancy) και του χρώματος (color constancy).

- **Σταθερότητα στην αντίληψη της ανακλαστικότητας (Lightness constancy)**

Η διαφορά φωτεινότητας ανάμεσα σε ανοικτές χρωματικά και σκούρες επιφάνειες διατηρείται σχεδόν ή ίδια ακόμη και αν οι συνθήκες φωτισμού μεταβληθούν. Δηλ. «αφαιρείται» η επίδραση του φωτισμού έτσι ώστε να διατηρηθούν σταθερές οι ιδότητες της επιφάνειας (ανακλαστικότητα).

²⁶ Gibson, J. J., 1979, An Ecological Approach to Visual Perception. Boston: Houghton, Muffin

²⁷

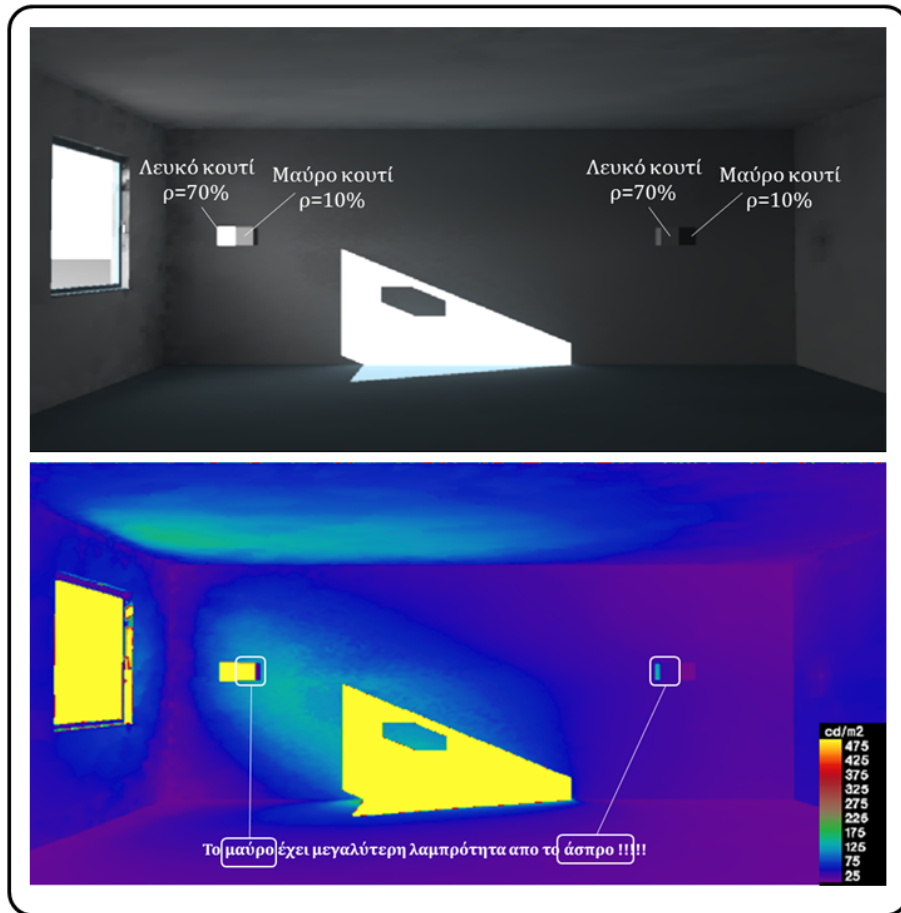
http://www.oikologos.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=1531&Itemid=186

²⁸

<ftp://ftp.soc.uoc.gr/Psycho/Oikonomou/Peiramatiki%20Psy%202/PRESENTATIONS/Gibson.pdf>

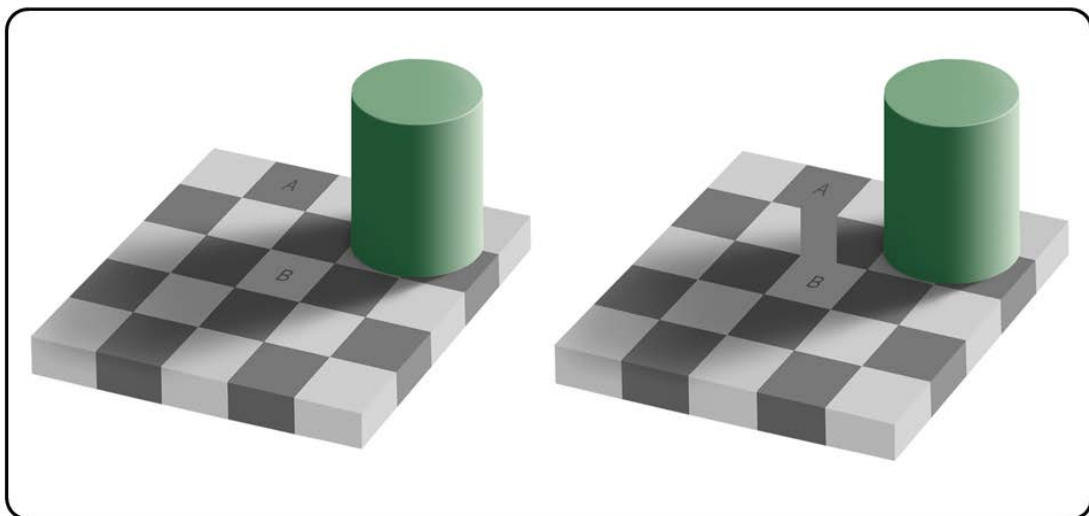
²⁹ Helmholtz, H., 1867, Handbuch der physiologischen Optik, Publ. Leopold Voss

³⁰ Marr D. 1982, Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information. San Francisco: W. H. Freeman



Σχήμα 1.7: Παρά το γεγονός ότι η λαμπρότητα της μαύρης επιφάνειας που εκτίθεται στο ηλιακό φως είναι μεγαλύτερη από αυτή τη λευκής που βρίσκεται στη σκιά, όταν συγκρίνονται μεταξύ τους διατηρείται η αίσθηση ότι η λευκή επιφάνεια έχει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα.

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση εξέτασης περίπτωσης της συγκεκριμένης λειτουργίας (lightness constancy) είναι και η οφθαλμαπάτη του Adelson (<http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow>)



Σχήμα 1.8: Οφθαλμαπάτη του Adelson. (Εικόνα copyrighted free) (http://en.wikipedia.org/wiki/Checker_shadow_illusion)

Στην παραπάνω εικόνα τα δύο τετράγωνα Α και Β είναι πανομοιότυπα άλλα το οπτικό μας σύστημα θεωρεί ότι το Β που βρίσκεται στη σκιά θα πρέπει να είναι άσπρο ενώ το Α που φωτίζεται θα πρέπει να είναι σκούρο.

- **Χρωματική σταθερότητα**

Η ικανότητα να αντιλαμβανόμαστε σαν σχεδόν ίδια την απόχρωση δύο όμοιων χρωματικά επιφανειών που φωτίζονται όμως από διαφορετική πηγή φωτισμού (δηλ. διαφορετικής φασματικής σύστασης). Αν και η εκτίμηση της απόχρωσης διατηρείται, μια αλλαγή στην αντίληψη της ανακλαστικότητας (lightness) υπάρχει. Δηλ. χρώματα που είναι κοντύτερα στο χρώμα της πηγής αντιλαμβάνονται ως πιο «ανοιχτά». Ένα παράδειγμα παρουσίασης της χρωματικής σταθερότητας είναι «The cube illusion of R. Beau Lotto», <http://www.echalk.co.uk/amusements/OpticalIllusions/colourPerception/colourPerception.html>.

Η χρωματική προσαρμογή διευκολύνει/υποβοηθά την χρωματική σταθερότητα. Με την χρωματική προσαρμογή το οπτικό σύστημα αντισταθμίζει το χρώμα που επικρατεί στο πεδίο παρατήρησης (μειώνοντας την ευαισθησία στα κωνία που σχετίζονται με αυτό το χρώμα). Κλασικό παράδειγμα της μείωσης αυτής είναι το παρακάτω παράδειγμα



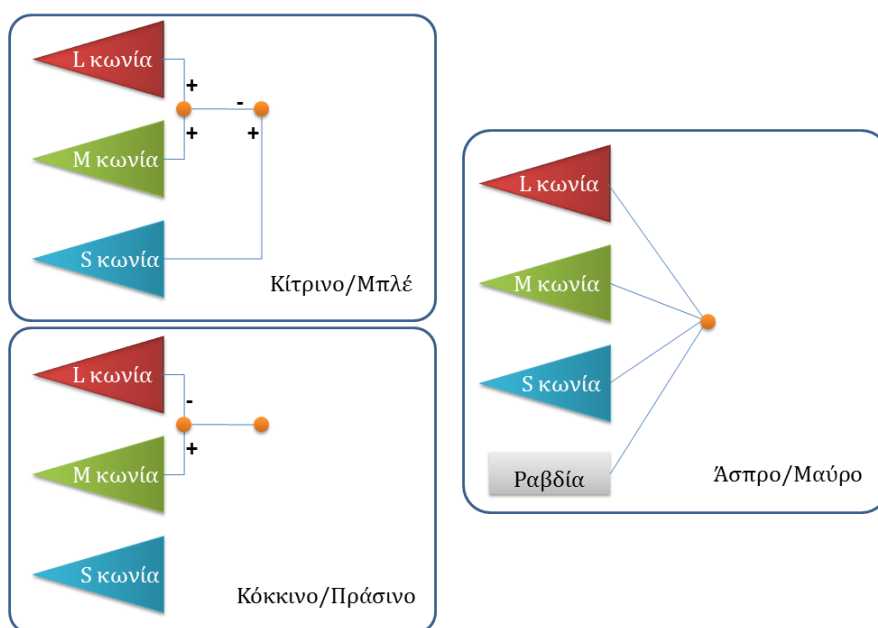
Σχήμα 1.9: Παράδειγμα χρωματικής προσαρμογής. Κοιτάζοντας πρώτα το κέντρο της δεξιάς εικόνας για 30 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια το κέντρο της αριστερής αντιλαμβανόμαστε ότι η διαφορετικότητα στο χρώμα της αριστερής εικόνας εξαφανίζεται (για λίγο!).

Ένα διαφορετικό παράδειγμα της χρωματικής προσαρμογής είναι το γεγονός ότι ένα φύλλο χαρτιού φαίνεται λευκό είτε όταν φωτίζεται με φυσικό φωτισμό (σχετικά πιο πλούσιο σε μικρά μήκη κύματος) είτε με λαμπτήρα πυράκτωσης (υπερισχύουν τα μεγάλα μήκη κύματος). Η εξήγηση βασίζεται στο γεγονός ότι με το φυσικό φως τα S κωνία γίνονται λιγότερο ευαίσθητα ενώ με τον λαμπτήρα πυράκτωσης τα L-κωνία.

Χρωματική αντίληψη

Για την χρωματική αντίληψη έχουν επίσης προταθεί διάφορες θεωρίες. Η θεωρία Young- Helmholtz άρχισε με την πρόταση του Young³¹ ότι η χρωματική αντίληψη οφείλεται σε τρία είδη φωτουποδοχέων και αργότερα ο Helmholtz³² παρατήρησε ότι χρειάζονται μόνο τρία μήκη κύματος για να δημιουργηθούν διάφορα χρώματα. Αν και η πρόταση για τα τρία είδη φωτουποδοχέων είναι σωστή, η πρόταση της μετάδοσης από το οπτικό σύστημα στον εγκέφαλο τριών –διαφορετικών χρωματικά- εικόνων απεδείχθη ανεπαρκής.

Η θεωρία των ανταγωνιστικών χρωματικών διεργασιών (Hering's Opponent-Colors Theory³³) προέκυψε μετά από την παρατήρηση ότι δεν είναι δυνατή η αντίληψη του συνδυασμού των χρωμάτων κόκκινο-πράσινο και κίτρινο-μπλέ. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει κάτι θεμελιώδες στους προαναφερθέντες χρωματικούς συνδυασμούς που κάνει τις συγκεκριμένες αποχρώσεις να αντιτίθενται. Έτσι προτείνονται τρία «κανάλια»/μηχανισμοί μετάδοσης της χρωματικής πληροφορίας α)Κίτρινο-μπλέ β)Πράσινο – κόκκινο και γ) Μαύρο – Άσπρο



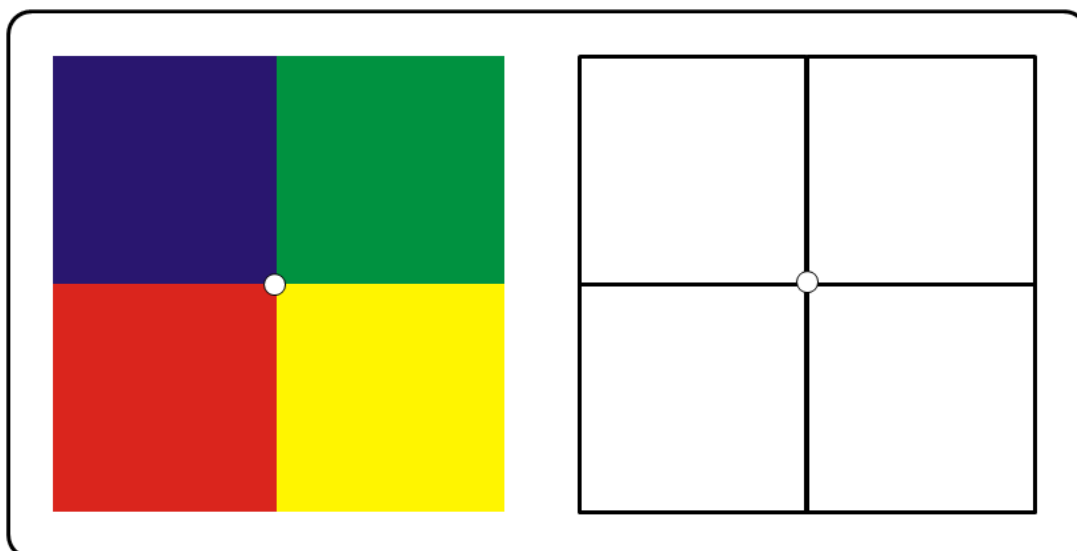
Σχήμα 1.10: Σχηματική αναπαράσταση της θεωρίας των ανταγωνιστικών χρωματικών διεργασιών

Τα χρώματα των μετεικασμάτων εξηγούνται καλύτερα με την θεωρία των ανταγωνιστικών χρωματικών διεργασιών όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα

³¹ The Bakerian Lecture: On the Theory of Light and Colours Phil. Trans. R. Soc. Lond. January 1, 1802 92 12-48

³² H. Helmholtz, "Ueber die Zusammensetzung von Spectralfarben", Annalen der Physik, Volume 170, Issue 1, pages 1–28, 1855

³³ E. Hering, «Zur Lehre vom Lichtsinn» (illustration), Vienna, 1878



Σχήμα 1.11: Εστιάστε το βέμμα στο κεντρο της αριστερής εικόνας για τριάντα περίπου δευτερόλεπτα και κατόπιν στην δεξιά. Τα χρώματα των μετεικασμάτων θα αντιστραφούν(το κόκκινο γίνεται πράσινο και το ίδιο συμβαίνει για τον συνδυασμό μπλέ-κίτρινο).

Έτσι η τριχρωματική θεωρία εξηγεί τον διαχωρισμό των χρωμάτων στον αμφιβληστροειδή ενώ η θεωρία των ανταγωνιστικών χρωματικών διεργασιών εξηγεί την επεξεργασία των σημάτων από τα κωνία.

Χρωματικά συστήματα

Τα παραπάνω συνδέονται με τον τρόπο που περιγράφονται τα χρώματα στα διάφορα χρωματικά συστήματα (δηλ. του τρόπου «καθορισμού» των χρωμάτων). Οι αρχικές μελέτες οφείλονται στον Νεύτωνα, ο οποίος στα μέσα της δεκαετίας του 1660 πραγματοποιώντας σειρά πειραμάτων, επινόησε μια ταξινόμηση για τα επτά βασικά ή κύρια χρώματα του φάσματος. Μετα την εφεύρεση του χρωματικού δίσκου από τον Νεύτωνα επινοήθηκαν πολλοί τρόποι για τον καθορισμό και την ταξινόμηση των χρωμάτων. Μεταξύ των σημαντικότερων είναι το σύστημα Munsell (Atlas of the Munsell Color System, 1915). Το σύστημα αυτό κατατάσσει τα χρώματα με βάση την απόχρωση (Hue), την αξία (value, lightness) και την καθαρότητα (χρωματική καθαρότητα δηλ. κορεσμός, chroma). Υπάρχουν δέκα κύριες αποχρώσεις

R- κόκκινο, YR-Κίτρινο-κόκκινο, Y-Κίτρινο, GY-Πράσινο-κίτρινο, G-Πράσινο, BG-Μπλέ-πράσινο, B-Μπλέ, PB-Μωβ-μπλέ, P-Μωβ, PR-Μωβ-κόκκινο

Η αξία κυμαίνεται από 0-10 και είναι μέτρο της ανακλαστικότητας. Ένας πρακτικός υπολογισμός είναι ο εξής :

$$\text{Ανακλαστικότητα} = \text{Αξία} * (\text{Αξία} - 1) \quad (1.7)$$

Δηλ. αν στο σύστημα Munsell ένα χρώμα έχει αξία 6 η ανακλαστικότητα του σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο υπολογίζεται σε 30%. Προσθέτωντας συνεχώς γκρι σε κάποιο χρώμα η καθαρότητα του μειώνεται έως οτου γίνει αχρωματικό (γκρι) και το ίδιο.

Το πλέον χρησιμοποιημένο σύστημα χρωματομετρίας είναι αυτό που υιοθετήθηκε το 1931 (οπτικό πεδίο παρατηρητή 2⁰) από τη Διεθνή Επιτροπή

Φωτισμού. Το σύστημα αυτό (το 1964 προστέθηκαν και δεδομένα για οπτικό πεδίο παρατηρητή 10^0) χρησιμοποιεί τρεις χρωματικές εντάσεις ως βασικά σημεία αναφοράς που αντιστοιχούν στο κόκκινο (R) στο πράσινο (G) και το κυανό (B). Έτσι ένα χρώμα (C) περιγράφεται με τη βοήθεια αντιστοιχων χρωματικών ερεθισμάτων ([R],[G],[B], δηλ. Red, Green, Blue)) :

$$c(C) = R[R] + G[G] + B[B] \quad (1.8)$$

Όπου R,G,B είναι οι αντίστοιχες «ποσότητες» από κάθε χρώμα (μαθηματικά θα ονομαζόταν συναρτήσεις βάρους (tristimulus values). Άρα:

$$c = R + G + B \quad (1.9)$$

Διαιρώντας τις παραπάνω:

$$1(C) = r[R] + g[G] + b[B] \quad (1.10)$$

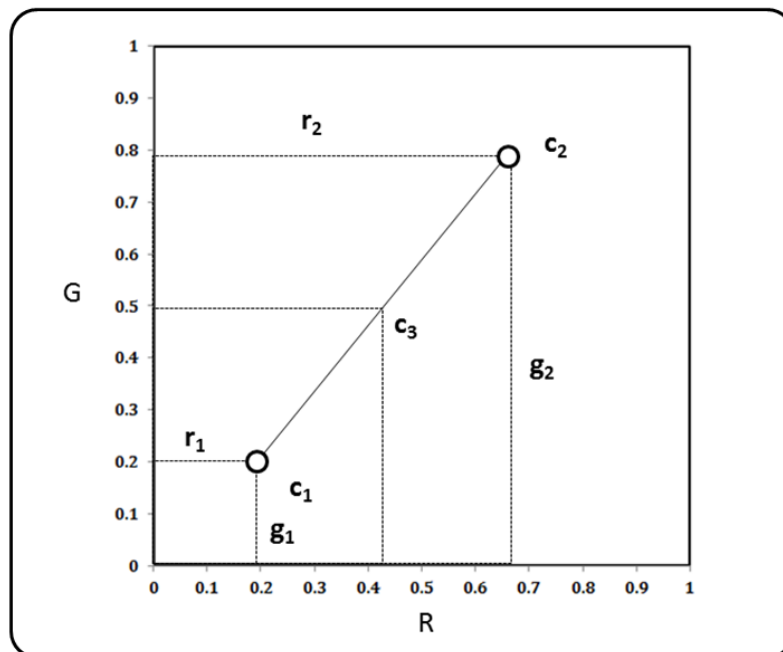
Με:

$$r = R/R+G+B, g = G/R+G+B, b = B/R+G+B \quad (1.11)$$

Τα r,g,b λέγονται χρωματικές συντεταγμένες του (C) και ισχύει :

$$r + g + b = 1 \quad (1.12)$$

Προφανώς αν οι δύο συντεταγμένες είναι γνωστές, η τρίτη ορίζεται αυτόματα. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία χρωματικών διαγραμάτων 2 αξόνων (R και G). Έτσι η ανάμιξη δύο χρωμάτων c_1 και c_2 (με ίσες συνεισφορές) δίνει ένα τρίτο χρώμα c_3 του οποίου οι χρωματικές συντεταγμένες υπολογίζονται εύκολα.



Σχήμα 1.12: Παράδειγμα ανάμιξης χρωμάτων σε χρωματικό διάγραμμα δύο διαστάσεων

Τα προαναφερθέντα παρουσιάζουν ένα πρόβλημα. Λογικά οι συναρτήσεις βάρους έχουν θετικές τιμές συνεπώς όλα τα χρώματα μπορούν να προέλθουν

από τον κατάλληλο συνδυασμό των αρχικών, **προσθετικά**. Όμως όταν αναμιγνύονται δύο χρώματα, το αποτέλεσμα είναι χρώμα με μικρότερο βαθμό κορεσμού. Συνεπώς είναι αδύνατο να παράγουμε χρώμα με υψηλό βαθμό κορεσμού με απλή ανάμειξη των τριών βασικών χρωμάτων.

Μαθηματικά βέβαια, αυτό το πρόβλημα ξεπερνάται αν οι συναρτήσεις βάρους έχουν αρνητικές τιμές. Έτσι για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αντι των αρχικών χρωμάτων R,G,B χρησιμοποιούνται ιδεατά αρχικά χρώματα X,Y,Z τα οποία όταν προστίθενται μπορούν να δώσουν χρώματα σε όλους τους βαθμούς κορεσμού με τις συναρτήσεις βάρους θετικές.

Σύμφωνα με το σύστημα αυτό (CIE, 1931) :

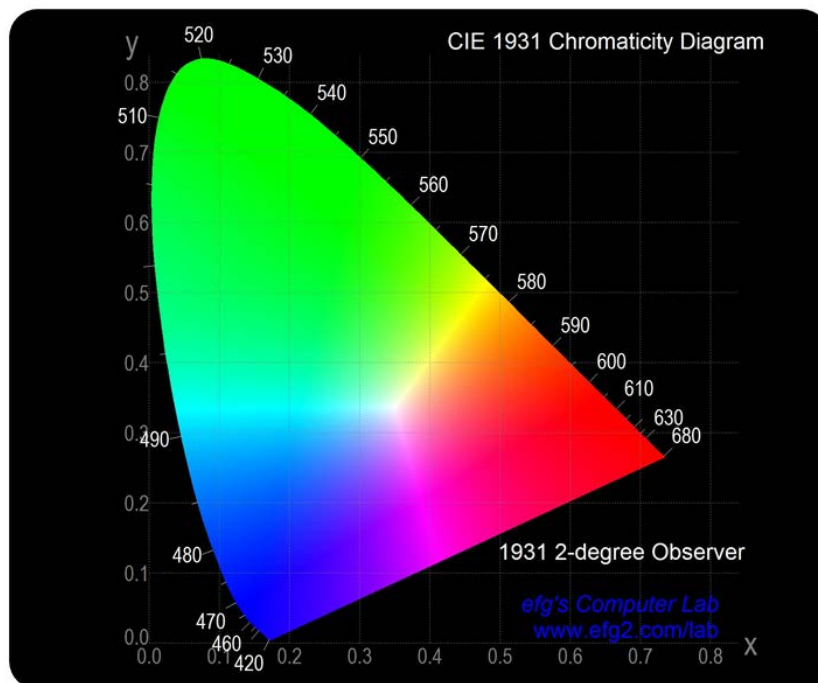
- Η παράμετρος Y είναι μέτρο της λαμπρότητας (άρα X,Z έχουν μηδενική λαμπρότητα).
- Το λευκό χρώμα τοποθετείται περίπου στο κέντρο του X,Y διαγράμματος
- Τα X,Y και Z δεν συσχετίζονται με χαρακτηριστικά που αντιλαμβανόμαστε, συσχετίζονται όμως οι παρακάτω :

$$x=X/(X+Y+Z) \quad (1.13)$$

$$y=Y/(X+Y+Z) \quad (1.14)$$

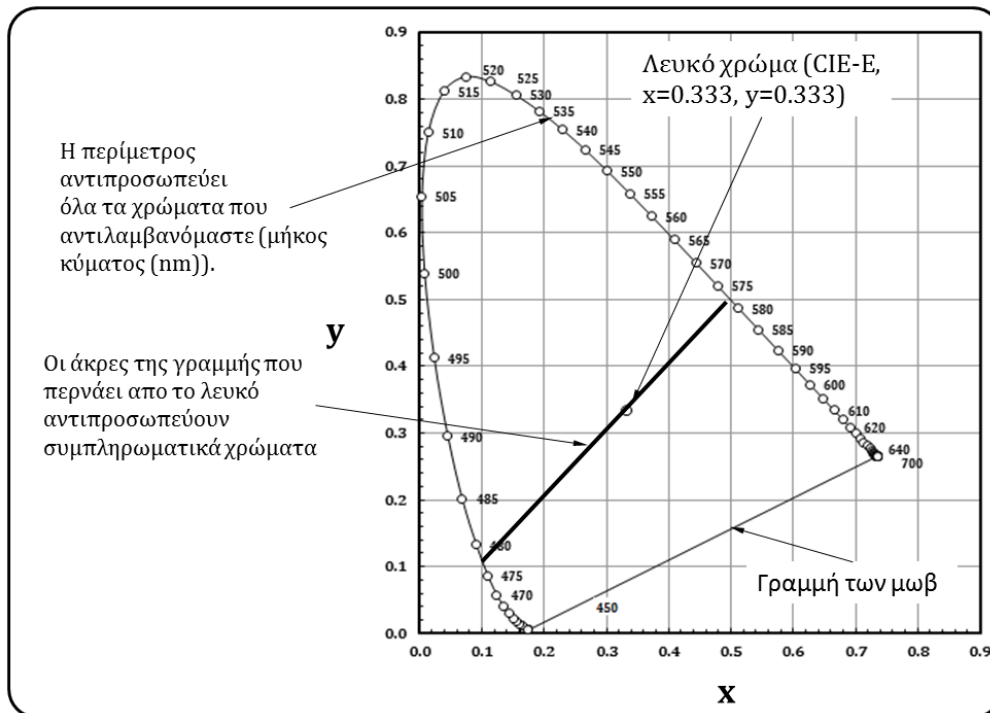
$$z=Z/(X+Y+Z) \quad (1.15)$$

Τα μεγέθη x,y ονομάζονται χρωματικές συντεταγμένες. Σχεδιάζοντας για κάθε ορατό χρώμα τα ζεύγη (x,y) σε ένα διάγραμμα x-y δημιουργούμε ένα δισδιάστατο χρωματικό χώρο γνωστό και ως χρωματικό διάγραμμα CIE.

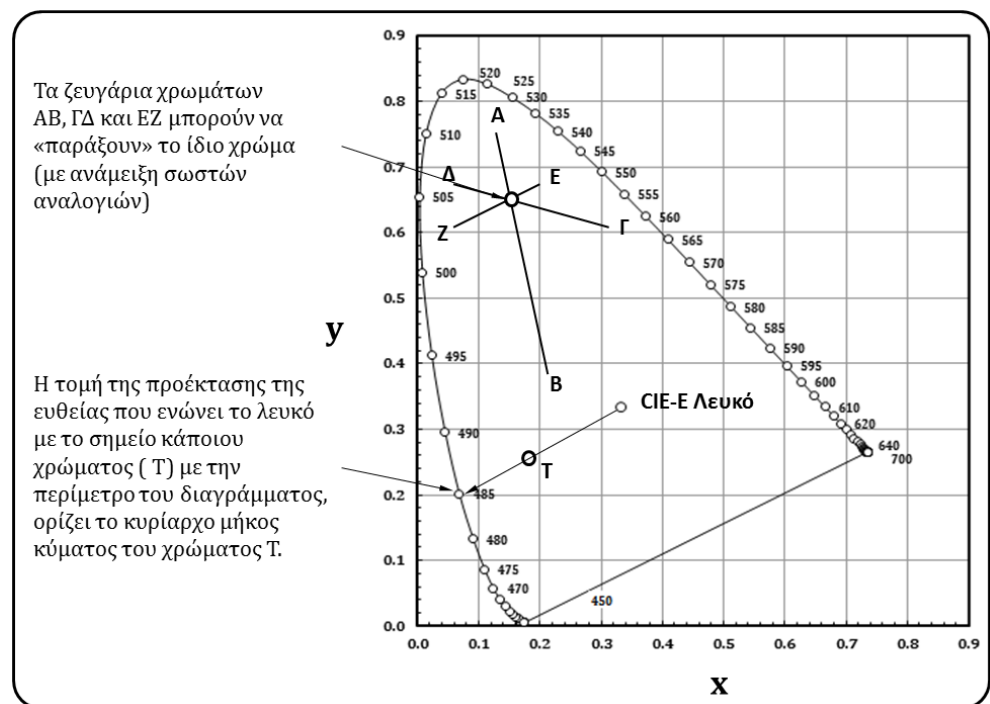


Σχήμα 1.13: Χρωματικό διάγραμμα CIE 1931

Μια μικρή επεξήγηση της χρήσης του προαναφερθέντος χρωματικού διαγράμματος παρουσιάζονται στα δύο επόμενα σχήματα.

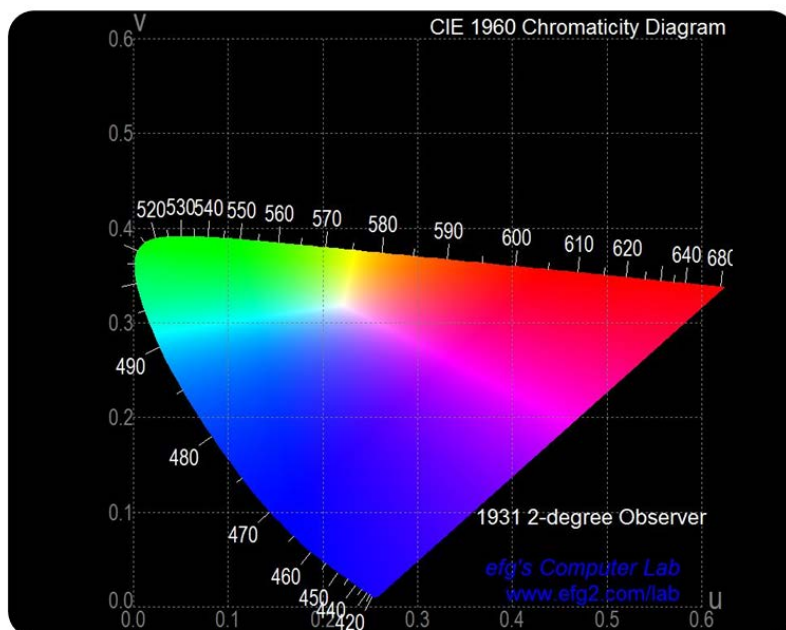


Σχήμα 1.14: Επεξήγηση της χρήσης του χρωματικού διαγράμματος



Σχήμα 1.15: Επεξήγηση της χρήσης του χρωματικού διαγράμματος

Το χρωματικό διάγραμμα CIE 1960 UCS εμφανίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κεντρική περιοχή του διαγράμματος. Χρησιμοποιείται κυρίως για απεικόνιση της συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος.



Σχήμα 1.16: Χρωματικό διάγραμμα CIE 1960 UCS

Υπάρχουν και άλλα χρωματικά συστήματα των οποίων η υιοθέτηση εξαρτάται από την εφαρμογή (π.χ. CIE LAB ($L^*a^*b^*$ κλπ)).

Επίδραση στην φυσιολογική λειτουργία

Η επίδραση του φωτισμού (ανεξαρτήτως πηγής, αν και η συγκεκριμένη παράγραφος εστιάζεται στο φυσικό φως και κυρίως στο εσωτερικό των κτηρίων) στην υγεία μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες :

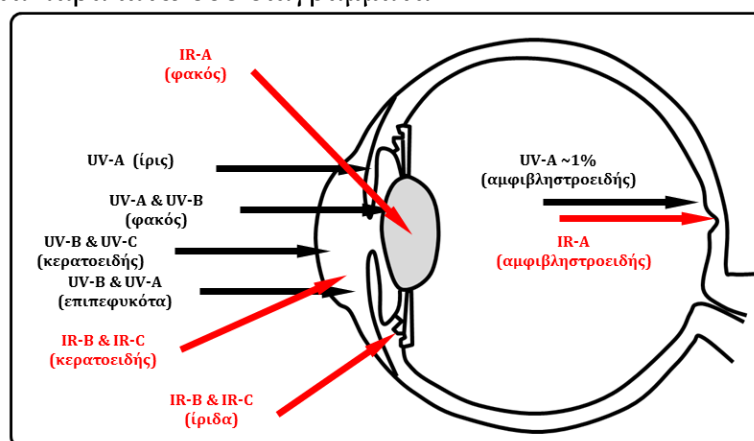
- Επίδραση που έχει σχέση με την ακτινοβολία per se. Αν και η ορατή ακτινοβολία «περιορίζεται» στο φάσμα των 380 -780 nm σχεδόν πάντα συνοδεύεται και από υπεριώδη (UV) [UV-C (100-280 nm), UV-B (280-315 nm) και UV-A (315-400 nm)] και υπέρυθρη (IR) [IR-A (780-1400 nm), IR-B(1400-3000 nm) και IR-C (3000-10⁶ nm)]. Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία για την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό. Χρησιμοποιείται για την σύνθεση της βιταμίνης D, ενώ η υπερέκθεση του δέρματος σε αυτή έχει βλαπτική επίδραση. Στο εσωτερικό των κτηρίων όμως, λόγω της μεσολάβησης των υαλοπινάκων υπάρχει φασματική τροποποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η τροποποίηση αφορά μεν το ορατό τμήμα αλλά ταυτόχρονα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το υπεριώδες αλλά και το υπέρυθρο (ιδίως σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται επιστρώσεις χαμηλής εκπεμπτικότητας). Σε τυπικές κατασκευές (δηλ. με τυπικό λόγο επιφάνειας ανοιγμάτων/επιφάνεια δαπέδου) τα επίπεδα έκθεσης σε UV ακτινοβολία είναι γενικά μικρά λόγω παρουσίας των υαλοπινάκων αφού η διαπερατότητα των υαλοπινάκων είναι σχετικά μικρή σε αυτό το τμήμα της ακτινοβολίας. Οι κατασκευαστές υαλοπινάκων παρέχουν δεδομένα όπως :
 - Η διαπερατότητα στο υπεριώδες (Tuv, 300-380 nm)

- Μια παράμετρο που σχετίζεται με το ξεθώριασμα των επιφανειών, χρωμάτων (Damage Weighted Transmission, Tdw.). Η έλλειψη υαλοπίνακα οδηγεί σε τιμή του Tdw=1. Προφανώς μικρότερη τιμή σημαίνει και μικρότερη επίδραση στις επιφάνειες του χώρου. Η συγκεκριμένη παράμετρος λαμβάνει υπόψη και την επίδραση τμήματος του ορατού φασματος, Tdw-K (Krochmann Damage Function, 300-500 nm) και Tdw-ISO (300-700 nm).

Περιγραφή	Πάχος	T _{uv}	T _{dw} -ISO
Απλός διαφανής υαλοπίνακας	6 mm	0.63	0.81
Απλός υαλοπίνακας πράσινου χρώματος	6 mm	0.29	0.41
Διπλός διαφανής	6mm/12mm διάκενο αερα/ 6mm	0.46	0.68
Διπλός διαφανής με επίστρωση low-e	6mm/12mm διάκενο αερα/ 6mm	0.36	0.61

Πίνακας 1.2: Τυπικές τιμές για διάφορους τύπους υαλοπινάκων (υπολογισμός με λογισμικό Window 6, LBNL).

Χώροι με ευαίσθητα στην υπεριώδη ακτινοβολία αντικείμενα (κυρίως μουσεία) μπορούν με χρήση κατάλληλων υαλοπινάκων να μειώσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την διείσδυση της. Οι περιοχές απορρόφησης των UV & IR στο οπτικό σύστημα παρουσιάζονται στα παρακάτω δύο διαγράμματα.



Σχήμα 1.17: Σχηματική αναπαράσταση περιοχών απορρόφησης υπέρυθρης (IR)³⁴ και υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας³⁵.

³⁴ J. Voke, "Radiation effects on the eye", Part 1 & Part 3b (http://www.optometry.co.uk/uploads/articles/48b2682cb5f43cbffaa4a831b75332ba_Voke1990730.pdf)

Η δράση του ορατού/υπέρυθρου τμήματος είναι διαφορετική αφού μπορούν λόγω διαπερατότητας του υαλώδους σώματος να φτάσουν στον αμφιβληστροειδή.

Η απορρόφηση μέρους της UV ηλ. ακτινοβολίας από τον φακό ενδέχεται να προκαλέσει θολότητα (καταρράκτης) λόγω χρόνιας έκθεσης³⁶ όπως συμβαίνει και για μακροχρόνια έκθεση στην υπέρυθρη (glassblower cataract). Όπως έχει αναφερθεί ήδη, στο εσωτερικό των κτηρίων η επίδραση του φυσικού φωτισμού στις προαναφερθείσες περιπτώσεις είναι περιορισμένη θεωρώντας φυσικά ότι αποφεύγεται η οπτική επαφή με τον ηλιακό δίσκο.

Κοντά στο υπεριώδες τμήμα, σε μήκη κύματος του ορατού φάσματος κυρίως από 400-550 nm και στην περίπτωση που έχει αφαιρεθεί ο φακός (π.χ. λόγω καταρράκτη) από 310 -550 nm μπορεί ο φωτισμός να προκαλέσει φωτοχημική βλάβη στον αμφιβληστροειδή (φωτοαμφιβληστροειδοπάθεια)³⁷ (Blue Light Hazard) ανάλογα πάντα με την ένταση και την φασματική του κατανομή.

Το τμήμα της ακτινοβολίας από 400-1400 nm μπορεί λόγω αυξημένης απορρόφησης του και συνεπακόλουθης αύξησης της θερμοκρασίας να προκαλέσει βλάβη ανάλογα με την έκθεση (συνδυασμός έντασης και διάρκειας) και το μέγεθος της εικόνας που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή. Η συνηθισμένη αντίδραση –δηλ. ο μηχανισμός προστασίας- στην οπτική επαφή με φωτεινή πηγή μεγάλης έντασης είναι να κλείσουν τα βλέφαρα και να απομακρυνθεί το βλέμμα από αυτή. Ο χρόνος αντίδρασης είναι πολύ μικρός ~150-300 msec και συνεπώς χρειάζεται πηγή εξαιρετικά μεγάλης έντασης για να προκληθεί βλάβη. Η μόνη περίπτωση στην οποία μπορεί να παρακαμφθεί ο προαναφερθείς μηχανισμός είναι η πηγή να εκπέμπει μεγάλο τμήμα της ενέργειας της στην υπέρυθρη περιοχή και μικρό στην ορατή.

Δυο εξαιρετικά ενδιαφέροντα κείμενα είναι τα :

1. το πρότυπο EN 62471:2008, «Photobiological safety of lamps and lamp systems» που σχετίζεται με την ασφάλεια στη χρήση διάφορων φωτεινών πηγών, και
2. η οδηγία για τον σχεδιασμό συστημάτων σκίασης με σκοπό τον περιορισμό της έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία ³⁸ (Guidelines for shade planning and design - Sunsmart Schools, http://www.sunsmartschools.co.nz/Guidelines_Under_Cover.pdf).

Πέραν της επίδρασης που έχει ο φυσικός φωτισμός σαν ακτινοβολία στο οπτικό μας σύστημα, η επάρκεια του στην περιοχή εκτέλεσης καποιου έργου , η

³⁵ J. Voke, "Radiation effects on the eye", Part 1 & Part 3b (http://www.optometry.co.uk/uploads/articles/48b2682cb5f43cbffaa4a831b75332ba_Voke1990730.pdf)

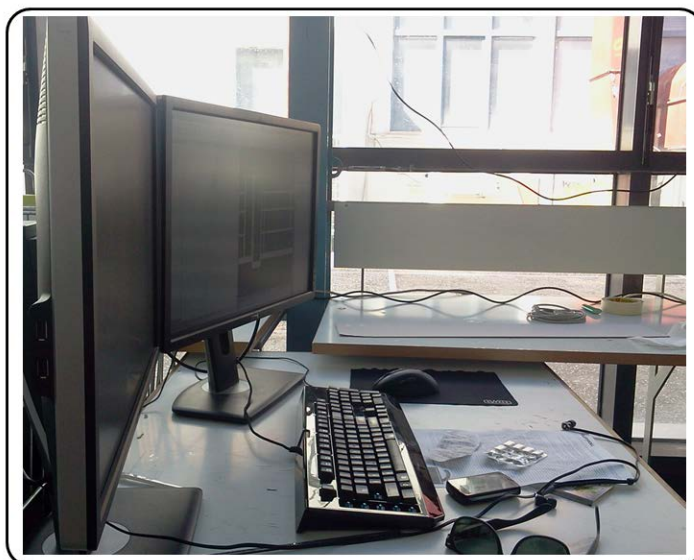
³⁶ Taylor HR, West SK, Rosenthal FS, Muñoz B, Newland HS, Abbey H, Emmett EA., « Effect of ultraviolet radiation on cataract formation », N Engl J Med. 1988 Dec 1;319(22)).

³⁷ Okuno T, " Hazards of solar blue light", Appl Opt. Jun 1;47(16):2988-92,2008

³⁸ Greenwood JS, Soulos GP, Thomas ND, "Under cover: Guidelines for shade planning and design", NSW Cancer Council & NSW Health Department, Sydney, 1998

κατανομή της λαμπρότητας στις διάφορες επιφάνειες του χώρου , η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον κλπ μπορεί επιπρόσθετα να :

- δημιουργήσει συνθήκες οπτικής κόπωσης. Συνήθως είναι αποτέλεσμα καταπόνησης του μυϊκού συστήματος του ματιού σε μια προσπάθεια να εστιάσει / προσαρμοσθεί καλύτερα στις υπάρχουσες συνθήκες. Η πλέον χαρακτηριστική είναι η κόπωση που οφείλεται στο ακτινωτό σώμα στην προσπάθεια του να ρυθμίσει το σχήμα του φακού κατά τη διάρκεια της προσαρμογής. Ο ανεπαρκής φωτισμός, η εστίαση στο ίδιο σημείο για μεγάλο χρονικό διάστημα ή η συχνή αλλαγή διεύθυνσης παρατήρησης που συνοδεύεται από διαφορετική απαίτηση προσαρμογής οδηγούν σε οπτική κόπωση. Ένας διαφορετικός μηχανισμός πρόκλησης οπτικής κόπωσης είναι και η ύπαρξη καποιου ερεθίσματος στο οπτικό πεδίο που προκαλεί περισπασμό από την δραστηριότητα που εκτελείται (π.χ. ανάκλαση σε περσίδες) ή η ύπαρξη θάμβωσης (αναπτύσσεται σε άλλη παράγραφο).



Σχήμα 1.18: Η συχνή εναλλαγή του βλέματος ανάμεσα στο πολύ φωτεινό περιβάλλον (χαρτιά στο τραπέζι) και στη χρήση σκοτεινού υπόβαθρου στην οθόνη προκαλεί καταπόνηση στο οπτικό σύστημα.

- να επιδράσει στο κερκαδιανό ρυθμό. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον συγκεκριμένο μηχανισμό έχουν ήδη αναφερθεί. Μια σχετικά χαρακτηριστική επίδραση του φωτισμού είναι η εποχική συναισθηματική διαταραχή (Seasonal Affective Disorder, SAD) της οποίας η εμφάνιση σχετίζεται με συγκεκριμένη εποχή. Αν και στη βιβλιογραφία αναφέρονται δύο τύποι της συγκεκριμένης διαταραχής (χειμερινή και θερινή) η πλέον γνωστή είναι η χειμερινή με συμπτώματα κατάθλιψης, υπνηλίας κλπ. Η αιτιολογία δεν είναι πλήρως καθορισμένη με τις πιθανές προσεγγίσεις να βασίζονται στη διαφοροποίηση του κερκαδιανού συστήματος από το εξωτερικό του οργανισμού σύστημα

συγχρονισμού (δηλ. την εναλλαγή ημέρας-νύχτας) ³⁹ είτε στην διακύμανση της σεροτονίνης (εμφανίζει ελάχιστο κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών) είτε λόγω γενετικών αιτιών. Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ ποσοστών εμφάνισης και γεωγραφικού πλάτους. Το ενδιαφέρον στην συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται στην θετική επίδραση (περίπου στο 80% των περιπτώσεων⁴⁰,) που έχει η έκθεση σε επίπεδα φωτισμού 2500-10000 lux για 2-0.5 ώρες (έχουν σχεδιασθεί και ειδικά φωτιστικά για την προτεινόμενη έκθεση) κυρίως τις πρωινές ώρες⁴¹. Ένα σχόλιο που πρέπει να γίνει σε αυτό το σημείο σχετίζεται με τη διαφοροποίηση του εργασιακού καθεστώτος. Ο χρόνος που δαπανάται στο εσωτερικό των κτηρίων έχει αυξηθεί δραματικά σε σχέση με αυτό που υπήρχε στο παρελθόν και προφανώς -ανάλογα με το μέγεθος των ανοιγμάτων, τη διαπερατότητα των υαλοπινάκων και το βάθος του χώρου -η έκθεση στον φυσικό φωτισμό.

³⁹ Lam RW. 2000. Pathophysiology of seasonal affective disorder: a review. *Journal of Psychiatry and Neuroscience* 25: 469-481

⁴⁰ «Daylighting, Architecture and Health Building Design Strategies», Mohamed Boubekri, ISBN: 978-0-7506-6724-1, 2008

⁴¹ Eastman, C.I., Young, M.A., Fogg, L.F., et al. (1998). Bright light treatment of winter depression. *Archives of General Psychiatry* 55, 883 – 89.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Θεωρητικά θα έπρεπε οι μονάδες μέτρησης που αφορούν φως να είναι ίδιες ακριβώς με τις μονάδες που χρησιμοποιούνται για την ακτινοβολία. Όμως εδώ εμφανίζεται στη σκηνή το μάτι. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στο μάτι μετράται φυσικά σε Watts. Όταν όμως φτάσει στον αμφιβληστροειδή τότε εμφανίζεται ένα ενδιαφέρον φαινόμενο. Μερικά μήκη κύματος είναι πιο “δραστικά” από άλλα (Σχήμα 1.4, φωτοπική καμπύλη). Συνεπώς χρειάζεται η εισαγωγή νέων μεγεθών τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη τους τον προαναφερθέντα μετασχηματισμό της ακτινοβολίας. Οι μονάδες των μεγεθών που σχετίζονται με το φως θεωρούνται ψυχο-φυσικές μονάδες αφού είναι συνδυασμός του τρόπου που αντιλαμβανόμαστε το φως και της ροής ενέργειας που το συνοδεύει. Βασικά φωτομετρικά μεγέθη είναι τα:

Φωτεινή ροή ή φωτεινή ισχύς (Φ_v , μονάδα : Lumen)

Είναι το αντίστοιχο της ισχύος ακτινοβολίας που εκπέμπεται από κάποιο σώμα (δηλ. Watt) ή λαμβάνεται από κάποια επιφάνεια και η μονάδα μέτρησης της είναι το Lumen. Όπως προαναφέρθηκε ο λόγος χρησιμοποίησης διαφορετικών μονάδων είναι η μεταβλητή ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού στα διάφορα μήκη κύματος. Η γνώση της επιτρέπει μια χονδροειδή εκτίμηση των επιπέδων του φυσικού φωτισμού σε κάποια επιφάνεια αν διαιρεθεί με το εμβαδό της επιφάνειας αυτής, με την προϋπόθεση ότι το σύνολο της ροής προσπίπτει στην επιφάνεια.

Η μετατροπή της ισχύος ακτινοβολίας σε φωτεινή ροή πραγματοποιείται με την βοήθεια της **φωτεινής δραστηριότητας (luminous efficacy) (K)**. Αυτή είναι ο λόγος της φωτεινής ροής προς τη ισχύ της ακτινοβολίας. Όπως είναι φυσικό η μονάδα μέτρησης είναι το lm/Watt και φυσικά εξαρτάται από το μήκος κύματος (στην περίπτωση της φασματικής φωτεινής δραστηριότητας). Η φωτεινή αποδοτικότητα του άμεσου ηλιακού φωτός εξαρτάται από την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς, την θόλωση της και φυσικά το ύψος του ήλιου με τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται στα μικρά ύψη (50-110 lm/W). Η φωτεινή αποδοτικότητα της διάχυτης ακτινοβολίας σε συνθήκες αίθριου ουρανού κυμαίνεται μεταξύ 115-135 lm/W ενώ για νεφοσκεπή ουρανό είναι περίπου 110 lm/W ⁴².

Μια τυπική τιμή φωτεινής δραστηριότητας για λαμπτήρα πυράκτωσης είναι 15 lm/W ενώ σήμερα διάφοροι τύποι λαμπτήρων εκκένωσης έχουν δραστηριότητες >90 lm/W. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το μάτι εμφανίζει διαφορετική ευαισθησία στα διάφορα μήκη κύματος με μέγιστη τιμή στα 555 nm (φωτοπική όραση). Σε αυτό το μήκος κύματος η φωτεινή δραστηριότητα είναι $K_m = 683 \text{ lm/watt}$. Συνεπώς αν έχουμε μονοχρωματικό φως (έστω σε μήκος κύματος λ) ισχύος Φ_e (Watt) η φωτεινή ροή υπολογίζεται με τη βοήθεια του τύπου:

$$\Phi_v = 683 * \Phi_e * V_\lambda \text{ (lm)} \quad (2.1)$$

⁴² A. Tsikaloudaki, “A study on luminous efficacy of global radiation under clear sky conditions in Athens, Greece O Renewable Energy, Volume 30, Issue 4, April 2005, Pages 551-563”

Όπου η V_λ (τιμή από 0-1) εκτιμάται από την φωτοπική φασματική καμπύλη ευαισθησίας (για το αντίστοιχο μήκος κύματος). Αν δεν έχουμε μονοχρωματική ακτινοβολία τότε η φωτεινή ροή υπολογίζεται ως εξής :

$$\Phi_v = 683 \cdot \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.2)$$

Στην παραπάνω σχέση $\Phi_e(\lambda)$ είναι η φασματική κατανομή ισχύος και $V(\lambda)$ η φωτοπική φασματική συνάρτηση ευαισθησίας του ματιού και λ το μήκος κύματος.

Αν υποθέσουμε ότι ακτινοβολία «περιοριζόταν» μόνο στο ορατό τμήμα, και την αντιλαμβανόμαστε σαν λευκή, τότε η μέγιστη τιμή φωτεινής δραστηριότητας είναι ~ 250 lumen/watt⁴³ (περίπου γιατί η τιμή εξαρτάται από τα μήκη κύματος των ορίων του φάσματος καθώς και από την φασματική σύσταση της ακτινοβολίας).

Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή της σχέσης ανάμεσα στην φωτεινή ροή και την ισχύ της ακτινοβολίας βρίσκει εφαρμογή στην εκτίμηση της επίδρασης της ακτινοβολίας στα έργα τέχνης. Σε αυτή την περίπτωση ενδιαφέρει το «περιεχόμενο» του φωτισμού (φυσικού και τεχνητού) σε υπεριώδη. Μετράται σε μWatt υπεριώδους ανα lumen φωτεινής ροής ($\mu\text{W/lm}$) Προφανώς ανάλογα με την πηγή υπάρχει διαφοροποίηση όπως φαίνεται και στο πίνακα⁴⁴.

Πηγή φωτισμού	«Περιεκτικότητα» σε UV ($\mu\text{W/lm}$)
Φυσικός φωτισμός	400-1500
Λάμπες Πυράκτωσης	70-80
Λάμπες αλογόνου	40-70
Λάμπες φθορισμού	30-100
Λάμπες αλογονιδίων μετάλλου	160-700
LED	<5 (πρέπει να ελέγχεται και η χρωματική τους απόδοση)

Πίνακας 2.1: Τυπικές πηγές φωτισμού και εκπομπή ακτινοβολίας UV.

Γενικά αυτό που επιδιώκεται σε χώρους με ευαίσθητα εκθέματα είναι η ταυτόχρονη ικανοποίηση ανταγωνιστικών παραμέτρων (ανάδειξη-προστασία). Έτσι οι συστάσεις είναι για μείωση της φωτεινής ροής με μήκος κύματος <400nm με «περιεκτικότητα» <75 $\mu\text{W/lm}$ (ISO 11799:2003 “Document storage requirements for archive and library materials) ή ακόμη μικρότερη (< 10 $\mu\text{W/lm}$).

Φωτεινή ένταση (I, μονάδα: cd)

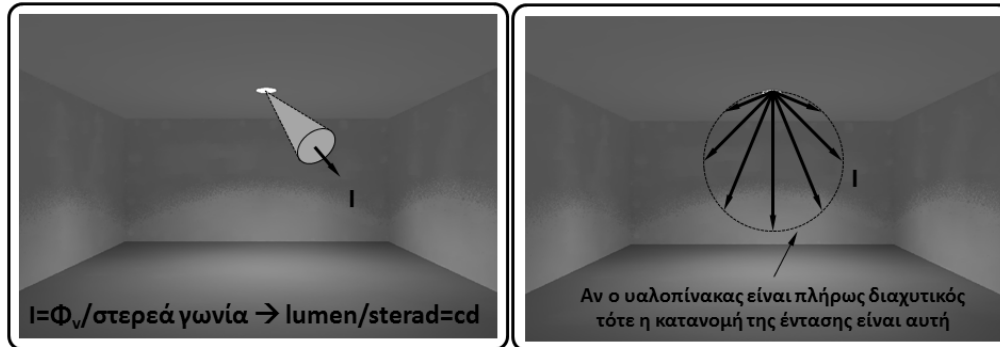
Εξαρτάται από την διεύθυνση και ορίζεται με τον λόγο της φωτεινής ροής (σε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση) προς την στερεά γωνία (η οποία «περιέχει» αυτή τη ροή).

⁴³ T. Murphy, “Maximum spectral luminous efficacy of white light”, J. Appl. Phys. 111, 104909 (2012)

⁴⁴ CIE 157:2004, Control of damage to museum objects by optical radiation

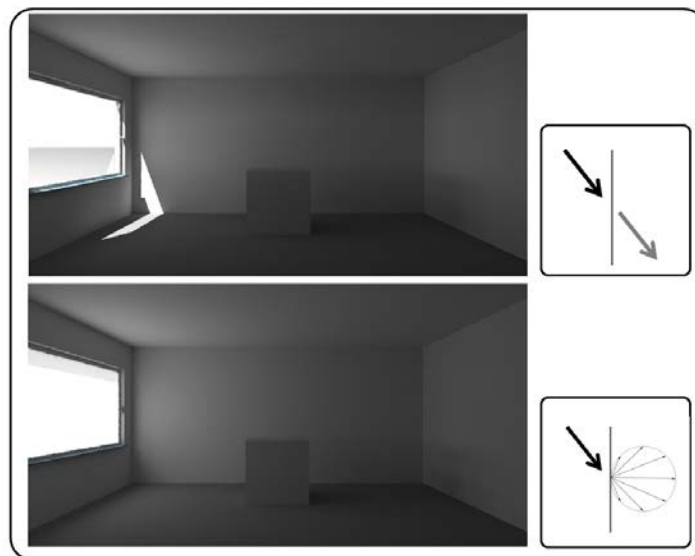
$$I = \Phi / \omega \quad (2.3)$$

Στην περίπτωση ιστροπικής πηγής (δηλ. ίδια εκπομπή σε όλες τις διευθύνσεις) η στερεά γωνία είναι 4π και τότε η ένταση ορίζεται σαν $I = \Phi / 4\pi$. Για παράδειγμα ο ήλιος και η σελήνη έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος όταν παρατηρούνται από τη γη, καταλαμβάνουν περίπου 0.001 % από το ημισφαίριο του ουρανού έχοντας στερεά γωνία 6×10^{-5} sr.



Σχήμα 2.1: Ορισμός φωτεινής έντασης

Η φωτεινή ένταση είναι καθοριστικό μέγεθος για τη δημιουργία των φωτομετρικών διαγραμμάτων φωτιστικών. Τέτοιου είδους διαγράμματα, μερικές φορές, χρησιμοποιούνται και για συστήματα σκίασης ή σε συστήματα φυσικού φωτισμού ώστε να παρουσιασθεί π.χ. η ικανότητα ανακατανομής του φωτισμού. Προφανώς λόγω της δυναμικής φύσης του φαινομένου (μεταβολή θέσης ήλιου, μεταβλητή τιμή άμεσου φωτισμού, μεταβλητή κατανομή λαμπρότητας στον ουρανό) ένα τέτοιο είδος φωτομετρικό διάγραμμα θα είναι χρονικά μεταβαλλόμενο και συνεπώς δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς⁴⁵. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται π.χ. μια σταθερή κατανομή λαμπρότητας του ουρανού (π.χ. πλήρως νεφοσκεπής) ή μόνο ηλιακός φωτισμός με συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης στο σύστημα.



⁴⁵ Αν και τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται μια τέτοιου είδους τεχνική. Three Phase Method (<http://www.radiance-online.org/learning/tutorials/Tutorial-ThreePhaseMethod.pdf>)

Σχήμα 2.2: Αντικατάσταση διαφανούς υαλοπίνακα (επάνω συνθετική εικόνα) με πλήρως διαχυτικό (κάτω). Παρατηρείστε το φωτομετρικό διάγραμμα κατανομής της έντασης. Γενικά η λαμπρότητα του ανοίγματος αυξάνεται σε αυτές τις περιπτώσεις με ιθανότητα εμφάνισης θάμβωσης (βλ. Σε επόμενες παραγράφους λεπτομέρειες).

Φωτισμός, ένταση φωτισμού (E, μονάδα: Lux)

Είναι ο λόγος της φωτεινής ροής που προσπίπτει σε σημείο επιφάνειας δια την στοιχειώδη επιφάνεια που περικλείει το υπο εξέταση σημείο. Μονάδα το lux=lumen/m².

Στα όρια της ατμόσφαιρας και στη μέση απόσταση Ήλιου-Γης ο φωτισμός σε επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου είναι 127500 lux ⁴⁶.

Έτσι η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από τον ήλιο «μοιράζεται» σε μια επιφάνεια σφαίρας με ακτίνα (R= 1.495978707*10¹¹μ) της απόστασης Ήλιου-Γης.

$$E=\Phi/A \rightarrow \Phi=E*A=E*4*\pi*R^2 \rightarrow \Phi=3.59*10^{28} \text{ Lumen} \quad (2.4)$$

Θεωρώντας επίσης τον ήλιο σαν ισοτροπική πηγή η φωτεινή ένταση υπολογίζεται ως εξής :

$$I=\Phi/\omega=3.59*10^{28} \text{ Lumen}/4*\pi \text{ sr}= 2.85*10^{27} \text{ cd} \quad (2.5)$$

Μερικές ενδεικτικές τιμές της έντασης φωτισμού είναι οι εξής:

Φεγγαρόφωτο	<1 lux
Τεχνητός φωτισμός γραφείου	~500 lux
Νεφοσκεπής ουρανός	~8000 lux
Αίθριος ουρανός	~100000-120000 lux

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές τιμές της έντασης φωτισμού

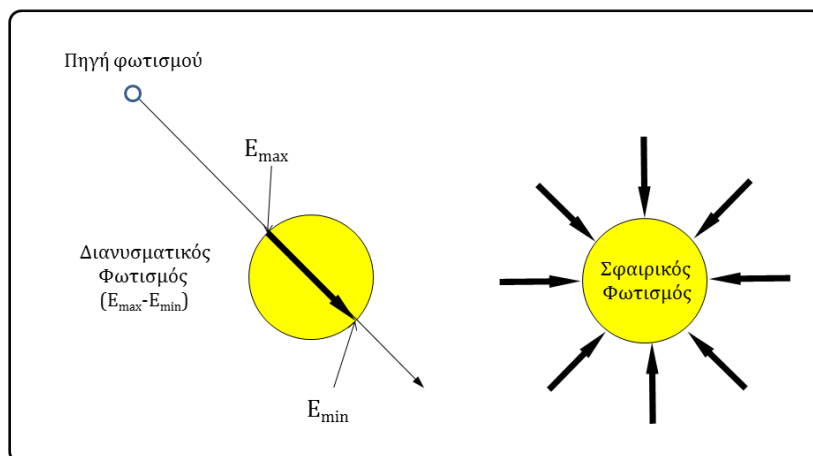
Μέχρι στιγμής οι τιμές των εντάσεων φωτισμού που έχουν αναφερθεί σχετίζονται με φωτισμό που προσπίπτει σε κάποιο επίπεδο (planar illuminance) και μετράται με κάποιο φωτόμετρο (το οποίο παρεπιπτόντως θα πρέπει οποσδήποτε να έχει α)διόρθωση συνημιτόνου και β) διόρθωση φασματική με χρήση φίλτρου που η διαπερατότητα του να είναι παρόμοια με αυτή της φωτοπικής (V(λ)). Η διόρθωση συνημιτόνου χρειάζεται γιατί ο αισθητήρας δεν είναι το ίδιο ευαίσθητος στην προσπίπτουσα φωτεινή ροή από περιοχές κοντα στον ορίζοντα του σε σχέση με αυτή που προσπίπτει κάθετα σε αυτόν. Συνήθως η διόρθωση πραγματοποιείται με λευκό διαχύτη.

⁴⁶ A. Pattini, A. Mermet and C. de Rosa, "An exterior illuminance predictive model for clear skies in mid-western Argentina", Energy and Buildings, volume 24, number 2, 1996



Σχήμα 2.3: Αισθητήρας φωτισμού (με διόρθωση συνημιτόνου)

Επιπρόσθετα υπάρχουν και μετρήσεις μεγεθών οι οποίες διαφοροποιούνται από την κλασική μέτρηση της έντασης φωτισμού. Είναι π.χ. ο διανυσματικός φωτισμός, ο σφαιρικός, ο κυλινδρικός, ο ημικυλινδρικός των οποίων η μέτρηση (ή ο υπολογισμός) χρησιμοποιείται για την απόδειξη της ικανοποίησης συγκεκριμένων απαιτήσεων (π.χ. τρισδιάστατη ανάδειξη).



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση υπολογισμού του διανυσματικού (αριστερά) και του σφαιρικού (δεξιά) φωτισμού.

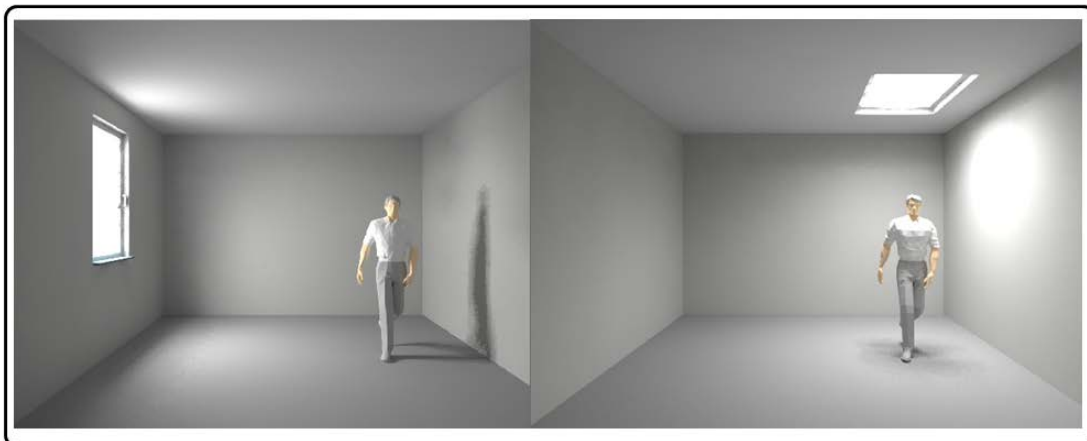
Ο διανυσματικός φωτισμός (illuminance vector, (lux)) έχει σαν μέτρο την η μέγιστη διαφορά της έντασης φωτισμού σε δύο αντιδιαμετρικές θέσεις όπως παρουσιάζεται και στο παραπάνω σχήμα και προφανώς μια κατεύθυνση.

Ο σφαιρικός φωτισμός (spherical, scalar illuminance (lux)) είναι η μέση τιμή του φωτισμού στην επιφάνεια μιας σφαίρας πολυ μικρών διαστάσεων γύρω από το σημείο που ενδιαφέρει.

Ο λόγος του διανυσματικού προς τον σφαιρικό φωτισμό καθορίζει και την τρισδιάστατη ανάδειξη αντικειμένων στο χώρο. Η τιμή του λόγου αυτού κυμαίνεται από 0 (πλήρης διάχυση) έως 4 (μονο κατευθυντικός φωτισμός).

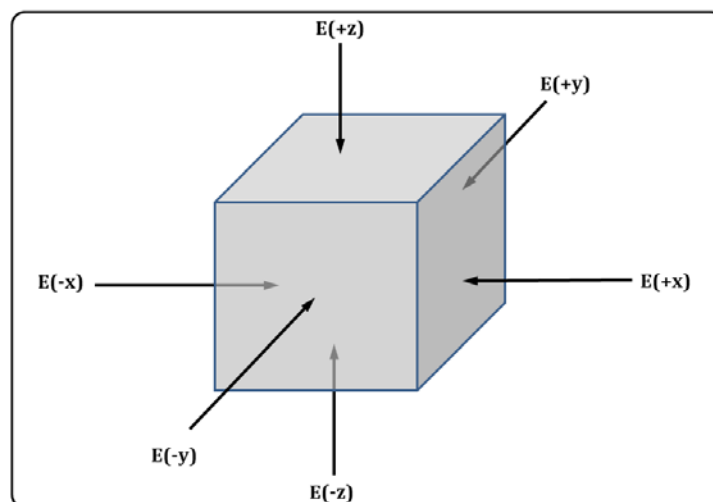
Σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού ο λόγος είναι ~2.5 με την τιμή να εξαρτάται από την ανακλαστικότητα του εδάφους ενώ το διάνυσμα σχηματίζει γωνία ~42° με τον ορίζοντα. Η ανάδειξη των χαρακτηριστικών των προσώπων απαιτεί

λόγο 1.1-1.5 με τον διανυσματικό να σχηματίζει με τον οριζοντα γωνία 15° - 45° ⁴⁷.



Σχήμα 2.5: Η διαφοροποίηση της θέσης των φωτεινών πηγών τροποποιεί την αντίληψη των χαρακτηριστικών (γενικώς επηρεάζει την τριασδιάστατη ανάδειξη).

Ενας άλλος τρόπος να υπολογισθεί ο διανυσματικός φωτισμός είναι να χρησιμοποιηθούν οι τιμές έξι φωτομέτρων τα οποία τοποθετούνται στις όψεις ενός μικρού κύβου ⁴⁸.



Σχήμα 2.6: Χρήση έξι φωτόμετρων στις όψεις ενός κύβου για τον υπολογισμό του διανυσματικού φωτισμού (cubic illuminantion).

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα από τις τιμές φωτισμού στις έξι όψεις υπολογίζονται αρχικώς τα διανύσματα:

$$E_x = E_{(+x)} - E_{(-x)} \quad (2.6)$$

$$E_y = E_{(+y)} - E_{(-y)} \quad (2.7)$$

$$E_z = E_{(+z)} - E_{(-z)} \quad (2.8)$$

⁴⁷ Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design, S. V. Szokolay, ISBN-10: 0415824982, Routledge Publ

⁴⁸ Lighting by Design, Christopher Cuttle, ISBN-10: 0750687681, Routledge, 2008

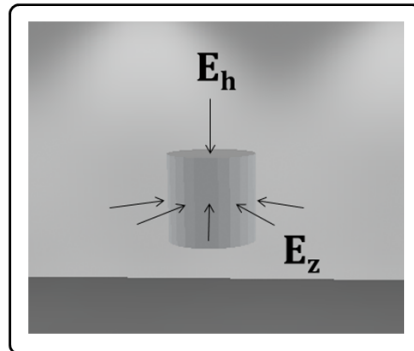
Και στη συνέχεια το μέτρο του διανυσματικού φωτισμού

$$|E| = (\mathbf{E}_x^2 + \mathbf{E}_y^2 + \mathbf{E}_z^2)^{0.5} \quad (2.9)$$

Η γωνία που σχηματίζει με τον οριζοντα υπολογίζεται ως εξής :

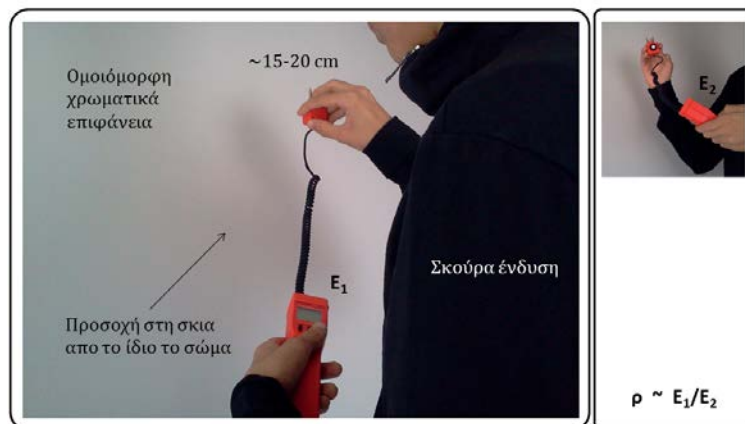
$$\theta = \text{atan} (\mathbf{E}_z / (\mathbf{E}_x^2 + \mathbf{E}_y^2)^{0.5}) \quad (2.10)$$

Ο κυλινδρικός φωτισμός (E_z) είναι η μέση τιμή του κάθετου φωτισμού στην επιφάνεια ενός κυλίνδρου. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1 /2011 (το οποίο εστιάζεται στον τεχνητό φωτισμό), για την τριασδιάστατη ανάδειξη (βελτίωση αναγνώρισης χαρακτηριστικών προσώπων κλπ) ο λόγος του κυλινδρικού φωτισμού προς τον οριζόντιο πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων 0.3-0.6 ενώ απαιτείται και καθορισμένη τιμή για τον κυλινδρικό φωτισμό (σε ύψος 1.2 μ. αν πρόκειται για ανθρώπους που κάθονται ή 1.6 μ. αν είναι όρθιοι. Η τιμή αυτή είναι π.χ. για χώρους γραφείων/χώρων συνεδριάσεων 150 lux με ομοιομορφία (λόγος ελάχιστης/μέση τιμη) >0.1.



Σχήμα 2.7: Σχέση οριζόντιου και κυλινδρικού φωτισμού.

Με τη χρήση του συγκεκριμένου μεγέθους (δηλ. ένταση φωτισμού) μπορεί να εκτιμηθεί και η ανακλαστικότητα διάχυτων επιφανειών (δηλ. χωρίς στιλπνότητα) καθώς και η ημισφαιρική διαπερατότητα υαλοπινάκων. Η μέθοδος (οσον αφορά την ανακλαστικότητα) παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.8: Απλοποιημένη τεχνική μέτρησης ανακλαστικότητας.

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν χρειάζεται να ξέρουμε μόνο την τιμή φωτισμού σε κάποια επιφάνεια αλλά την συνολική έκθεση σε κάποιο χρονικό διάστημα. Ο υπολογισμός της έκθεσης πραγματοποιείται με το γινόμενο του φωτισμού επί τον χρόνο έκθεσης (lux h). Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό του συστήματος φωτισμού σε μουσεία. Τα αντικείμενα χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την ευαισθησία τους και για κάθε κατηγορία προτείνεται μια τιμή για τον φωτισμό στην επιφάνεια τους καθώς και η συνολική έκθεση στο έτος⁴⁹.

Περιγραφή ευαισθησίας υλικών	Όριο τιμής φωτισμού(lux)	Όριο έκθεσης (lux *h/year)
Υλικά χωρίς ευαισθησία στο φως	Δεν υπάρχει	Δεν υπάρχει
Υλικά μικρής ευαισθησίας στο φως	200	600000
Υλικά μεσαίας ευαισθησίας στο φως	50	150000
Υλικά μεγάλης ευαισθησίας στο φως	50	15000

Πίνακας 2.3: Μέγιστη ένταση φωτισμού και έκθεση σε εκθέματα με διαφορετική ευαισθησία κατά CIE 157:2004.

Λαμπρότητα (L,μονάδα: cd/m²)

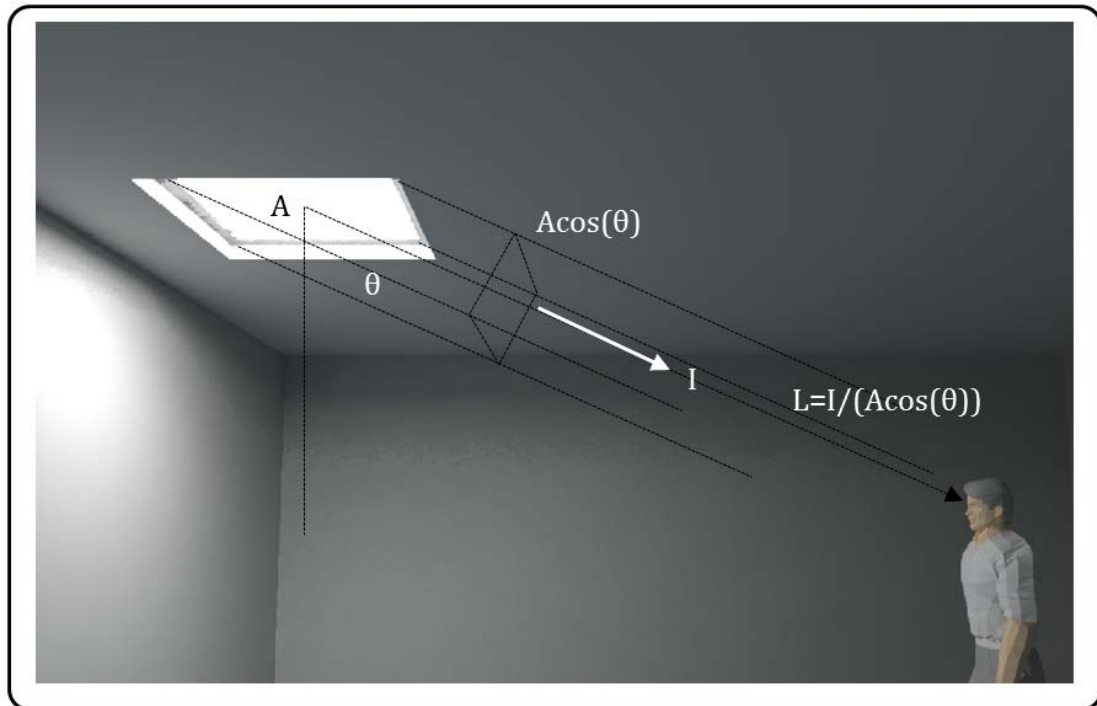
Η λαμπρότητα σε κάποιο σημείο μιάς επιφάνειας ορίζεται σαν ο λόγος της φωτεινής ροής που «περιέχεται» σε στοιχειώδη στερεά γωνία ορισμένης διεύθυνσης προς το γινόμενο της στερεάς γωνίας επί το εμβαδό της προβαλλόμενης στοιχειώδους επιφάνειας που βρίσκεται στο σημείο μέτρησης. Η μονάδα της είναι η cd/m².

Να σημειωθεί εδώ ότι αυτό που αντιλαμβανόμαστε σε κάποιο χώρο είναι κατανομή λαμπρότητας και όχι η κατανομή φωτισμού. Ο λόγος βεβαία είναι εξαιρετικά απλός. Ο φωτισμός είναι φωτεινή ροή που προσπίπτει σε επιφάνεια ενώ για να «μετατραπεί» σε λαμπρότητα πρέπει να ανακλαστεί στην επιφάνεια. Συνεπώς στην παραπάνω μετατροπή υπεισέρχεται και η ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Η λαμπρότητα φωτεινής πηγής με εμβαδό A και ένταση I (στην κατεύθυνση παρατήρησης) δίνεται από την παρακάτω σχήμα και παρουσιάζεται και στο αντίστοιχο σχήμα.

$$L=I/(A*\cos\theta) \quad (2.11)$$

Όπου A η επιφάνεια και θ η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη διεύθυνση παρατήρησης και στην κάθετο στην επιφάνεια

⁴⁹ CIE 157:2004, Control of damage to museum objects by optical radiation

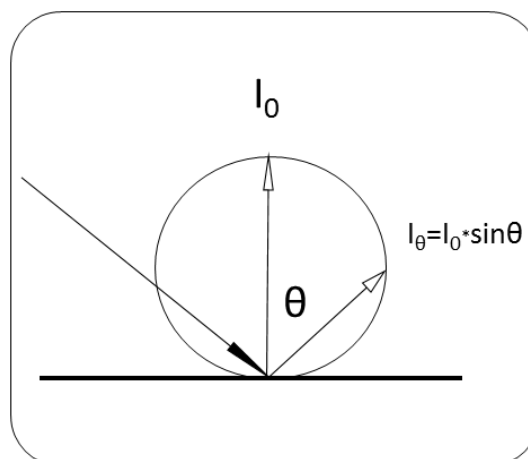


Σχήμα 2.9: Σχέση μεταξύ λαμπρότητας και έντασης

Προφανώς ο «τρόπος» με τον οποίο ανακλάται ο φωτισμός από κάποια επιφάνεια επηρεάζει και την λαμπρότητα της, όπως αυτή μετράται από το σημείο παρατήρησης. Στην περίπτωση πλήρως διαχυτικής επιφάνειας (λαμπερτιανή) η φωτεινή ένταση δίνεται από τη σχέση:

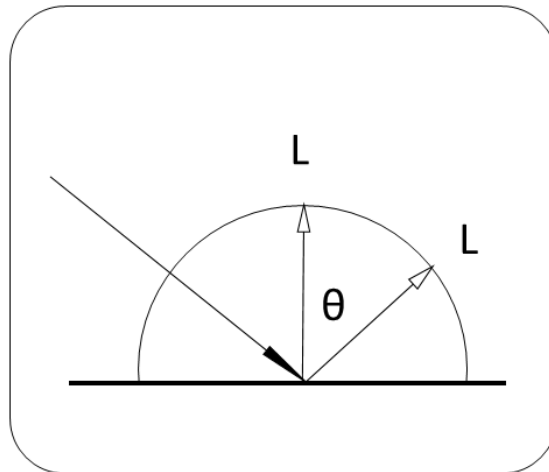
$$I_{\theta} = I_0 \cdot \sin\theta \quad (2.12)$$

όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.10: Κατανομή έντασης μετά από ανάκλαση σε πλήρως διαχυτική επιφάνεια.

Σε τέτοιου είδους επιφάνεια η λαμπρότητα είναι ή ίδια ανεξάρτητα από τη διεύθυνση παρατήρησης.



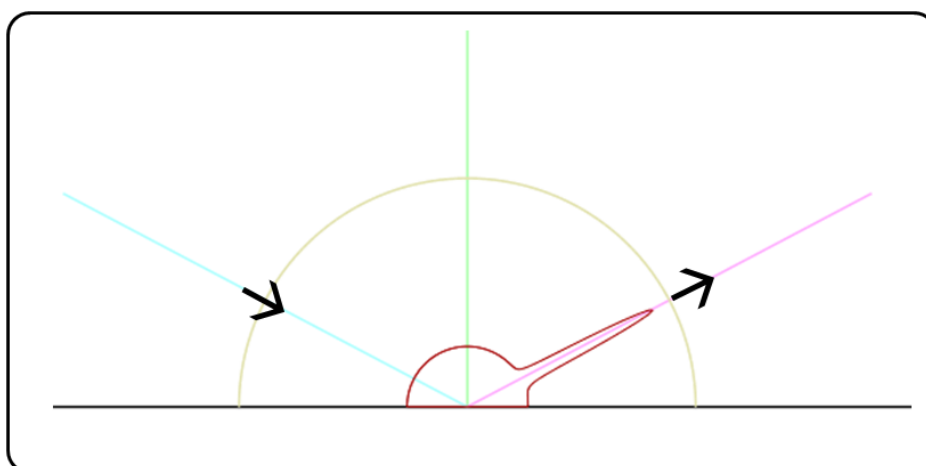
Σχήμα 2.11: Κατανομή λαμπρότητας μετά από ανάκλαση σε πλήρως διαχυτική επιφάνεια

Ενας εύκολος τύπος για να εκτιμηθεί η λαμπρότητα επιφάνειας (πλήρως διαχυτική ανάκλαση δηλ. ο τύπος δεν εφαρμόζεται όταν η επιφάνεια παρουσιάζει κάποια στιλπνότητα) είναι ο :

$$L = E \cdot \rho / \pi \quad (2.13)$$

Όπου L η λαμπρότητα της επιφάνειας, E ο προσπίπτων σε αυτή φωτισμός και ρ η ανακλαστικότητα.

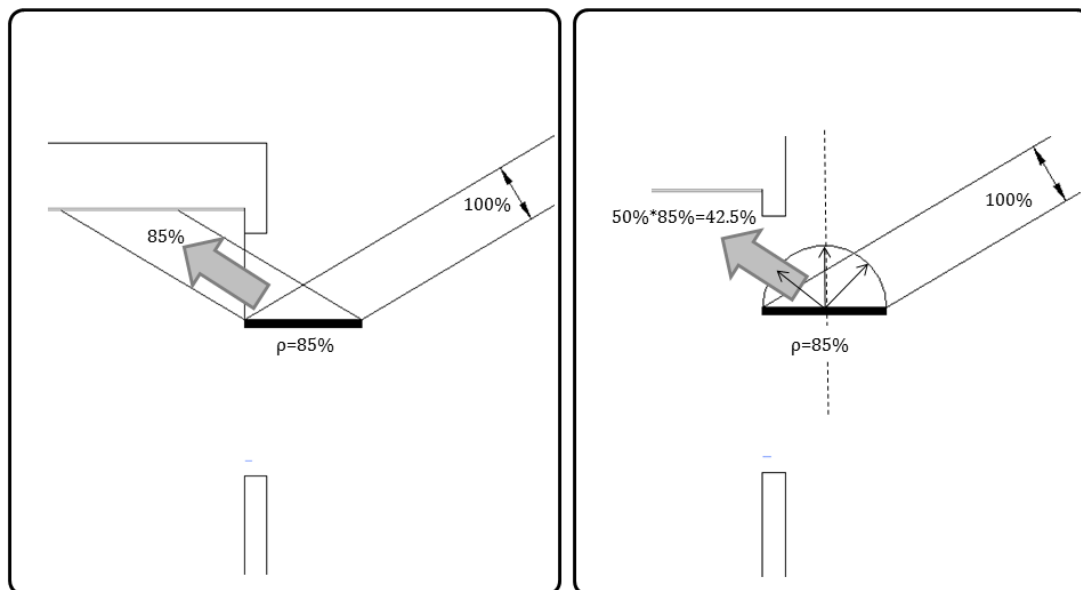
Εκτός των απλών περιπτώσεων που αντιπροσωπεύουν η πλήρως κατοπτρική & διαχυτική ανάκλαση, η πλειοψηφία των υλικών ανακλα το φως με πιο πολύπλοκο τρόπο. Η συνάρτηση BDRF (BiDirectional Reflection Function) περιγράφει ακριβώς αυτή την κατάσταση και μπορεί είτε να εκτιμηθεί με τη βοήθεια κάποιας συνάρτησης που περιγράφει την συγκεκριμένη ανάκλαση είτε να μετρηθεί. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η κατανομή της λαμπρότητας λόγω ανάκλασης σε επιφάνεια.



Σχήμα 2.12: Κατανομή λαμπρότητας μετά από ανάκλαση σε επιφάνεια όχι πλήρως διαχυτική (αποτέλεσμα προσομοίωσης με βάση θεωρητικό μοντέλο και όχι μέτρηση)

Η διαφορά στον τρόπο ανάκλασης εμφανίζεται με χαρακτηριστικό τρόπο σε μια περίπτωση υιοθέτησης ραφίου φωτισμού. Η επιλογή επιφάνειας με πλήρη

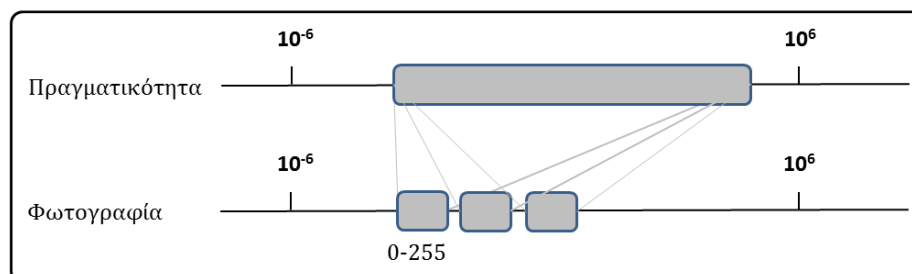
κατοπτρική ανάκλαση (π.χ. καθρέπτης) διαφοροποιεί την κατανομή της λαμπρότητας στο εσωτερικό του χώρου σε σχέση με το αν υιοθετηθεί πλήρως διαχυτική επιφάνεια.



Σχήμα 2.13: Η τιμή ανακλαστικότητα είναι η ίδια και στην αριστερή περίπτωση (κατοπτρική ανάκλαση σε ραφι φωτισμού) και στη δεξιά (πλήρως διαχυτική). Στην δεξιά όμως μόνο το μισό της ανακλώμενης ροής κατευθύνεται προς το εσωτερικό του χώρου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υποκειμενική αίσθηση της λαμπρότητας ονομάζεται φωτεινότητα με την λαμπρότητα να μετρηθεί αντικειμενικά με τη βοήθεια μιας κάμερας λαμπρότητας, η φωτεινότητα όμως (δηλ. ο τρόπος με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τη λαμπρότητα) εξαρτάται όχι μόνο από την απόλυτη λαμπρότητα της συγκεκριμένης επιφάνειας αλλά και από την λαμπρότητα του υπόβαθρου που την περιβάλλει. Επιπρόσθετα από το σχήμα τις διαστάσεις και την θέση των διαφόρων επιφανειών που απαρτίζουν το υπόβαθρο.

Ένας ενδιαφέρον τρόπος αποτύπωσης της λαμπρότητας επιφανειών γίνεται με τη χρήση της φωτογραφικής τεχνικής (High Dynamic Range). Μια μόνο φωτογραφία δεν είναι δυνατό να καλύψει το εύρος των τιμών λαμπρότητας που παρατηρείται στο περιβάλλον. Έτσι χρησιμοποιείται μια σειρά από φωτογραφίες με διαφορετική έκθεση.



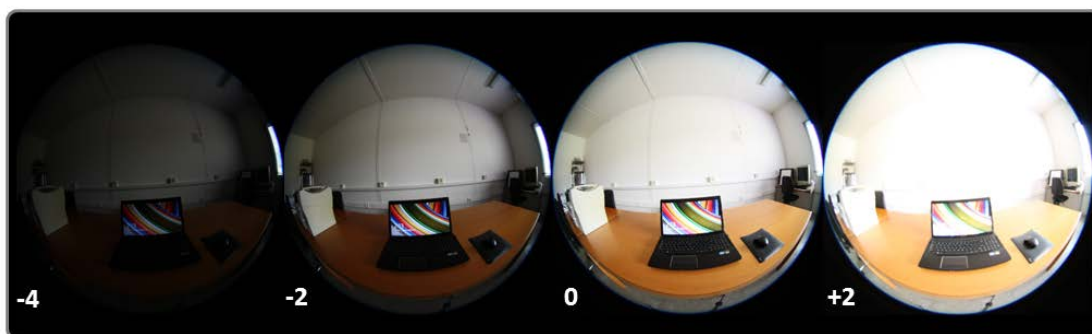
Σχήμα 2.14: Σύνθεση HDR φωτογραφίας από φωτογραφίες LDR (Low Dynamic Range).

Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται να συσχετισθεί η τιμή των εικονοστοιχείων με την πραγματική λαμπρότητα. Η τιμή αυτή έχει άμεση σχέση με την έκθεση η

οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ένταση ακτινοβολίας και το χρόνο έκθεσης. Αν λοιπόν υπάρχει μια σειρά φωτογραφιών με διαφορετική έκθεση οι οποίες θα «ενωθούν» σε μια και μια τιμή λαμπρότητας σε κάποια περιοχή της εικόνας, τότε μπορεί να εκτιμηθεί η κατανομή λαμπρότητας σε ολόκληρη την τελική φωτογραφία. Αν έχει δε χρησιμοποιηθεί και φακός fish-eye είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και ανάλυση θάμβωσης.

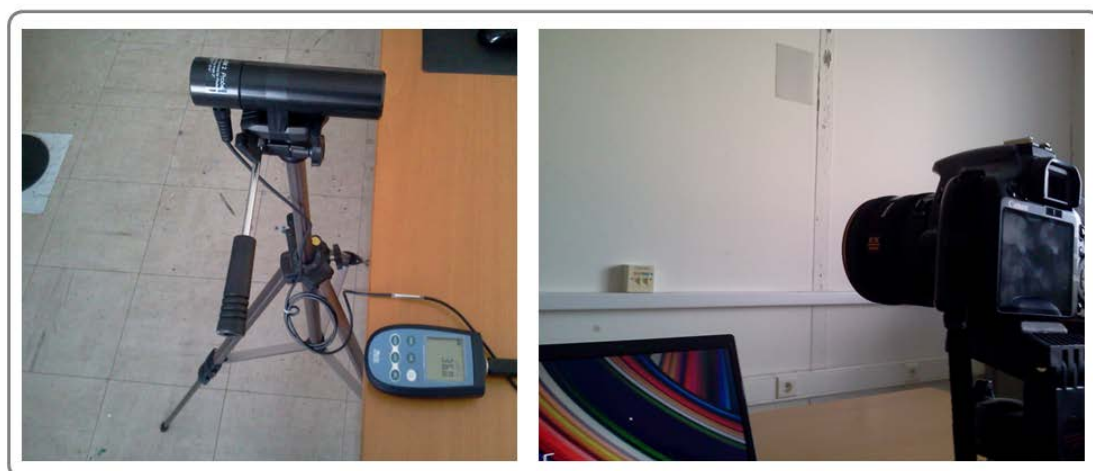
Η λήψη φωτογραφιών με σκοπό την εκτίμηση της κατανομή λαμπρότητας πραγματοποιείται ως εξής :

- Χρησιμοποιείται τρίποδο, ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και φακός αν είναι δυνατό fish-eye.
- Διόρθωση λευκού σε φυσικό φωτισμό και ταχύτητα φιλμ ISO 100.
- Με σταθερό το διάφραγμα, πραγματοποιούνται λήψεις με διαφορετική ταχύτητα διαφράγματος ώστε σε κάθε εικόνα να μεταβάλλεται η έκθεση. Θα πρέπει η φωτογραφία με την μικρότερη έκθεση να μην είναι «μαύρη» ούτε αυτή με της μεγαλύτερη «ασπρη».

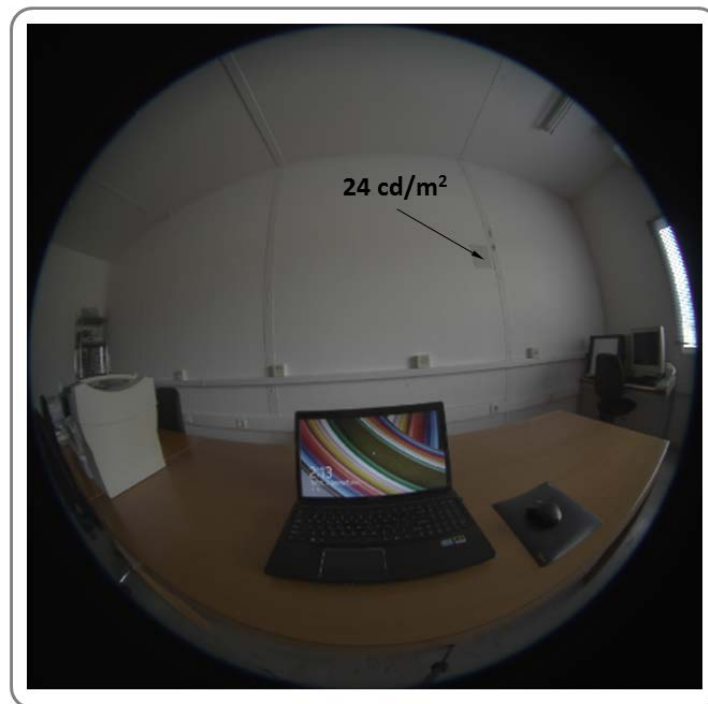


Σχήμα 2.15: . Σειρά φωτογραφιών με διαφορετική έκθεση.

- Η παραπάνω διαδικασία γίνεται γρήγορα (π.χ. η χρήση Automatic Exposure Bracketing μπορεί να βοηθήσει) και ταυτόχρονα σε κάποια περιοχή της εικόνας στην οποία έχουμε βάλει μια γκρι κάρτα μετράται η λαμπρότητα με τη βοήθεια κάμερας λαμπρότητας.

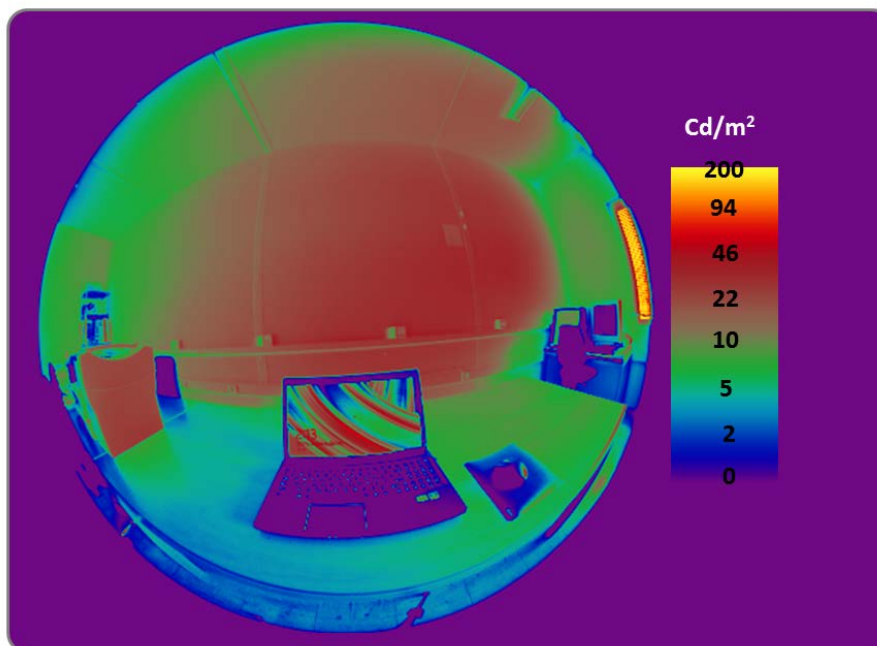


Σχήμα 2.16: Μέτρηση λαμπρότητας και τοποθέτηση κάμερας.



Σχήμα 2.17: Μέτρηση λαμπρότητας σε γκρι στόχο.

- Με κάποιο λογισμικό (Photosphere (<http://www.anywhere.com/>), HDRscope (<http://courses.washington.edu/hdrscope/>)) οι φωτογραφίες ενοποιούνται σε μια και με τη βοήθεια τη λαμπρότητας είναι δυνατή η περαιτέρω ανάλυση.



Σχήμα 2.18: Κατανομή λαμπρότητας στην εικόνα. Με τη χρήση αυτής της εικόνας μπορούν να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί για την εκτίμηση δεικτών θάμβωσης.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (CCT)

Είναι η θερμοκρασία μέλανος σώματος το οποίο σε κάποια θερμοκρασία εκπέμπει φως το οποίο μοιάζει χρωματικά με την φωτεινή πηγή που εξετάζεται (ίδιας λαμπρότητας). Στην ουσία η CCT είναι δείκτης της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1 :2011 «Light and lighting — Lighting of work places Part 1: Indoor work places» οι πηγές φωτισμού από πλευράς θερμοκρασίας χρώματος κατατάσσονται σύμφωνα με τον πίνακα

Θερμές	CCT < 3300 °K
Ουδέτερες	3300 ≤ CCT < 5300 °K
Ψυχρές	CCT > 5300 °K

Πίνακας 2.4: Ταξινόμηση πηγών φωτισμού με βάση την συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος.

Θεωρώντας τον ήλιο μέλαν σώμα η ενεργός θερμοκρασία του είναι ~5800 °K. Ο πλήρως νεφοσκεπής ουρανός ~7000 °K ενώ το διάχυτο φως από αίθριο ουρανό μπορεί να ξεπεράσει τις 25000 °K (ανάλογα με το σημείο παρατήρησης, την τοποθεσία, την κατάσταση του ουρανού από πλευράς ρύπανσης κλπ).

Η CCT προφανώς μπορεί να τροποποιηθεί λόγω της φασματικής διαπερατότητας κάποιου υαλοπίνακα.

Δείκτης χρωματικής απόδοσης (Color Rendering Index, CRI, Ra)

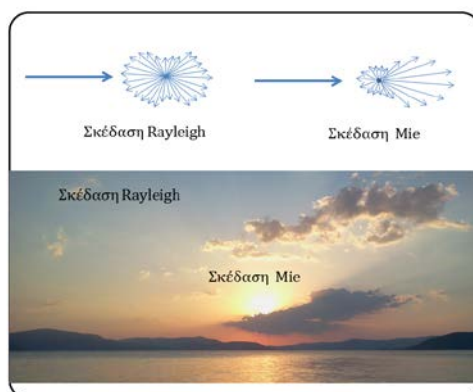
Ο συγκεκριμένος δείκτης χρησιμοποιείται σαν μέτρο της πιστότητας των χρωμάτων (δηλ. φαίνονται πραγματικά) σε σχέση με το πως φαίνονται όταν φωτίζονται από μια πρότυπη πηγή φωτισμού. Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία για τον τρόπο υπολογισμού του καθώς και για τα προβλήματα που υπάρχουν με τη χρήση του. Η μέγιστη τιμή είναι το 100. Η σύγκριση φωτεινών πηγών με βάση τον συγκεκριμένο δείκτη θα πρέπει να πραγματοποιείται με την προϋπόθεση ότι έχουν την ίδια CCT. Στην περίπτωση του φυσικού φωτισμού δεν έχει νόημα η χρήση του δείκτη όταν εξετάζουμε χρώματα στο εξωτερικό των κτηρίων. Έχει όμως πολύ μεγάλη σημασία όταν χρησιμοποιούνται έγχρωμοι υαλοπίνακες, οπότε ο δείκτης μπορεί να υπολογισθεί⁵⁰. Γενικά τιμές >90 αντιστοιχούν σε πολύ καλή χρωματική απόδοση, >80 σε καλή κοκ. Υαλοπίνακες έντονα χρωματισμένοι (π.χ. μπλέ) με μικρή διαπερατότητα μπορεί να εμφανίσουν δείκτη χρωματικής απόδοσης <70. Ενημερωτικά, η χρήση τεχνολογίας LED έκανε έντονη την ανάγκη για την τροποποίηση του συγκεκριμένου δείκτη.

⁵⁰ EN 410:2011, Glass in building. Determination of luminous and solar characteristics of glazing

3. ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Στο εσωτερικό των κτηρίων εισέρχεται φωτισμός από τρεις πηγές α)ήλιο β)ουρανός και γ) με ανάκλαση από έδαφος/εξωτερικά εμπόδια .

Το κύριο αίτιο είναι ο ήλιος αφού ο διάχυτος φωτισμός οφείλεται στην σκέδαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα αιωρούμενα σωματίδια. Η σκέδαση στα μόρια της ατμόσφαιρας (σκέδαση Rayleigh) είναι περισσότερο έντονη στα μικρά μήκη κύματος και αυτός είναι ο λόγος που επικρατεί το γαλάζιο χρώμα στον ουράνιο θόλο σε αίθριες συνθήκες. Η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων ή/και υδροσταγονιδίων αλλάζει τον τρόπο αυτής της σκέδασης (σκέδαση Mie) στην οποία συμμετέχουν όλα τα μήκη κύματος (άσπρο/γκρί χρώμα) .



Σχήμα 3.1: Διαφορά μεταξύ σκέδασης Rayleigh και Mie.

Τύποι ουρανού

Η εκτίμηση της επίδρασης του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτηρίων προϋποθέτει σε διάφορα στάδια σχεδιασμού και γνώση του διαθέσιμου φωτισμού. Όχι μόνο σαν ποσότητα αλλά με γνώση της κατανομής λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο επιτρέποντας έτσι και τη εκτίμηση της άμεσης ή έμμεσης συνεισφοράς των διαφόρων τμημάτων του ουρανού στον φωτισμό του εσωτερικού.

Λόγω της δυσκολίας εξέτασης εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού σε πραγματικές συνθήκες, για την αρχική μελετητική προσέγγιση χρησιμοποιούνται «τυπικοί ουρανοί». Η δυσκολία οφείλεται σε πολλούς λόγους όπως π.χ. το γεγονός ότι η κατανομή λαμπρότητας σε πραγματικό ουρανό μεταβάλλεται συνεχώς και συνεπώς τα αποτελέσματα μετρήσεων σε μακέτες δεν θα παραμένουν σταθερά. Επιπρόσθετα χάνεται και η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών σεναρίων.



Σχήμα 3.2: Φωτογραφία ουράνιου θόλου με χρήση φακού fish-eye.

Έτσι η επίδραση π.χ. της θέσης και του μεγέθους των ανοιγμάτων στην κατανομή φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτηρίων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες μιας συγκεκριμένης κατανομής λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο. Είναι προφανές ότι ο «τυπικός ουρανός» θα θέλαμε να αντιπροσωπεύει τις συνθήκες που επικρατούν (π.χ. ο νεφοσκεπής ουρανός επικρατεί σε βορειότερες περιοχές). Συνήθως όμως εξετάζουμε το κτήριο σε ένα εύρος συνθηκών για παράδειγμα α) σε συνθήκες πλήρως νεφοσκεπούς ουρανού β) σε συνθήκες αίθριου ουρανού με τον ήλιο στην χαμηλότερη τροχιά του (χειμερινό ηλιοστάσιο) και στην ψηλότερη (θερινό ηλιοστάσιο). Με αυτό τον τρόπο ελέγχονται τα όρια των συνθηκών στις οποίες θα βρεθεί το κτήριο.

Η πρώτη μη ομοιόμορφη κατανομή λαμπρότητας ουρανού που προτάθηκε ήταν από τους Moon & Spencer⁵¹ και αφορούσε πλήρως νεφοσκεπή ουρανός. Αυτός ο τύπος ουρανού εμφάνιζε αζιμουθιακή συμμετρία και η λαμπρότητα του ορίζοντα ήταν 3 φορές μικρότερη από τη λαμπρότητα στη κατακόρυφο. Η σχέση της λαμπρότητας σε κάποιο σημείο του ουρανού (L) με ζενίθια απόσταση Z (γωνία που σχηματίζει με την κατακόρυφο) σε σχέση με τη ζενίθια λαμπρότητα (Lz) δίνεται από τη σχέση :

$$L=(1+2*\cos Z)*Lz/3 \quad (3.1)$$

Με γνώση της ζενίθιας λαμπρότητας Lz μπορεί να υπολογισθεί τόσο ο φωτισμός σε οριζόντιο επίπεδο⁵² (σε lux) :

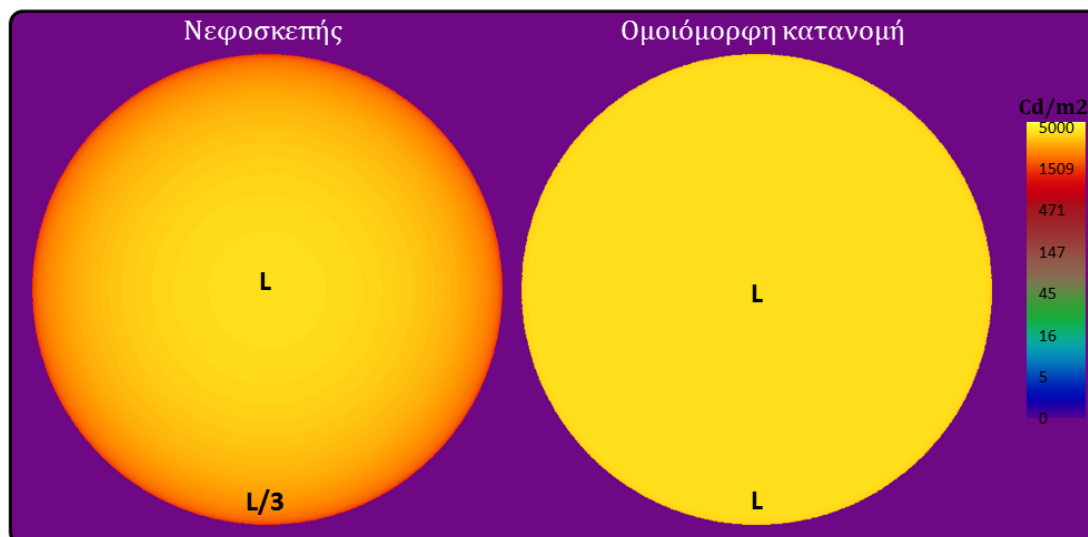
$$E_{h,ov}= 2.44*Lz \quad (3.2)$$

Ενώ σε κάθετο επίπεδο (μόνο εξαιτίας του ουρανού χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανάκλαση από το έδαφος):

$$E_{v,ov}=0.968*Lz$$

⁵¹ Moon, P., Spencer, (1942), 'Illumination from a nonuniform sky', Illum Eng., 37, 10, 707-726

⁵² P. Tregenza, (1994), "Daylighting Algorithms", Vol. 1350, Energy Technology Support Unit, University of Sheffield. School of Architecture Studies



Σχήμα 3.3: Ημισφαιρική κατανομή λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο. Αριστερά κατανομή λαμπρότητας νεφοσκεπούς ουρανού, δεξιά ομοιόμορφη κατανομή λαμπρότητας

Αν και η κατανομή της λαμπρότητας διατηρείται σταθερή στην περίπτωση του πλήρως νεφοσκεπούς ουρανού (όπως αυτός ορίστηκε παραπάνω) είναι προφανές ότι η τιμή του οριζόντιου φωτισμού είναι μεγαλύτερη γενικά το μεσημέρι από το πρωί ή το απόγευμα. Υπάρχει μια σχέση που συνδέει τον φωτισμό σε οριζόντιο επίπεδο από πλήρως νεφοσκεπή ουρανό με το ύψος του ήλιου (γ).

$$E_{h,ov} = 0.3 + 21 \cdot \sin(\gamma) \quad (\text{σε klux}) \quad (3.3)$$

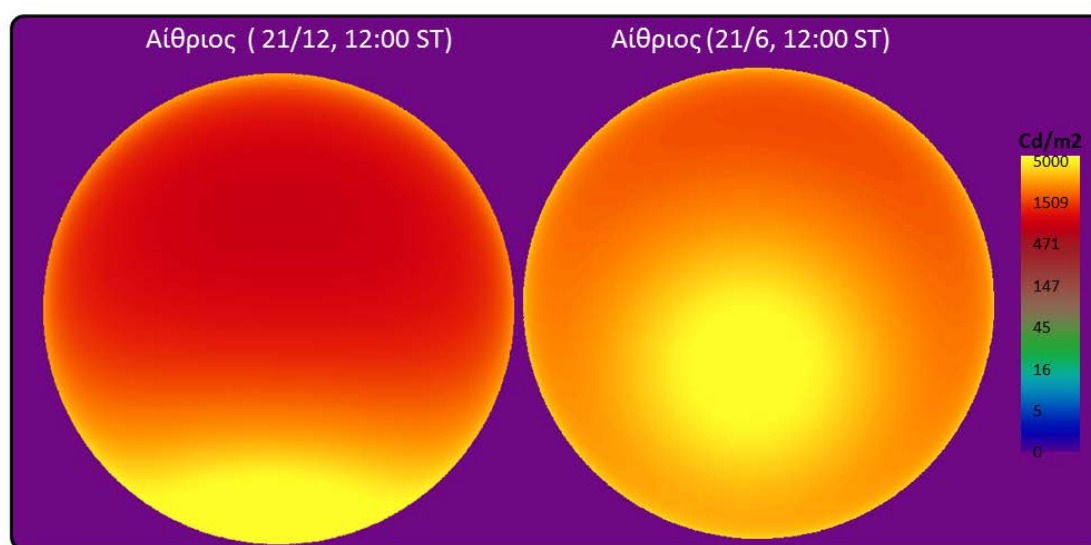
Σήμερα χρησιμοποιούνται 15 διαφορετικές τυπικές κατανομές λαμπρότητας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 15469:2003 (CIE S011/E:2003). Από τους δεκαπέντε τύπους ουρανού στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τέσσερις πλέον γνωστοί

Τύπος ουρανού	Κατηγορία διαβάθμισης λαμπρότητας ανάμεσα στον ορίζοντα και την κατακόρυφη	Κατηγορία σκέδασης (συνδέει τη λαμπρότητα κάποιου τμήματος ουρανού με τη γωνιακή απόσταση του από τον ηλιακό δίσκο)	Περιγραφή ουρανού
1	I	1	Τυπικός νεφοσκεπής ουρανόσ κατά CIE
2	I	2	
3	II	1	
4	II	2	
5	III	1	Ομοιόμορφη κατανομή λαμπρότητας
6	III	2	

7	III	3	
8	III	4	
9	IV	2	
10	IV	3	
11	IV	4	
12	V	4	Τυπικός αίθριος ουρανός με μικρή θόλωση κατά CIE
13	V	5	Τυπικός αίθριος ουρανός (έντονη παρουσία ρύπων) κατά CIE
14	VI	5	
15	VI	6	

Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση τύπων ουρανού σύμφωνα με το ISO 15469:2003 (CIE S011/E:2003).

Ο «παραδοσιακός» νεφοσκεπής ουρανός της σχέσης (1) θεωρείται σαν 16^{ος} τύπος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του Τύπου 1.

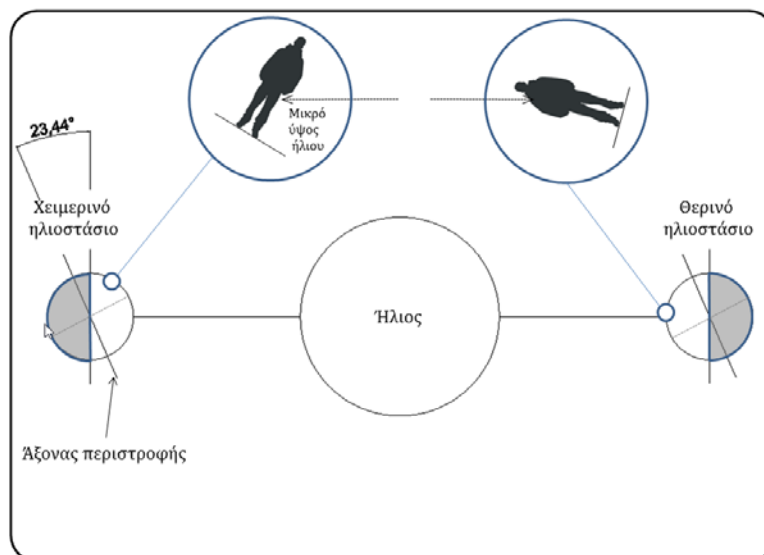


Σχήμα 3.4: Ημισφαιρική κατανομή λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο. Αριστερά κατανομή λαμπρότητας αίθριου ουρανού (21/12, 12:00 ηλιακός χρόνος), δεξιά Αίθριος αλλά στις 21/6. Δύο χαρακτηριστικά: α) Αυξημένη λαμπρότητα γύρω από τον ήλιο β) αυξημένη λαμπρότητα στον ορίζοντα.

Ήλιος

Η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο σε μια ελαφρώς ελλειπτική τροχιά. Η πλήρης περιστροφή χρειάζεται 365.25 ημέρες και καθώς το Γρηγοριανό ημερολόγιο χρησιμοποιεί 365 ημέρες στο έτος χρειάζεται μια μικρή διόρθωση με την προσθήκη μιάς ημέρας κάθε τέσσερα χρόνια.

Το επίπεδο περιστροφής της Γης λεγεται Εκλειπτική με τον άξονα περιστροφής της να σχηματίζει γωνία $\sim 23.5^{\circ}$ με την κάθετο στην εκλειπτική όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Αυτή ακριβώς η κλίση είναι και η αιτία των εποχών.



Σχήμα 3.5: Σχηματική περιγραφή της θέσης της γής σε σχέση με τον ήλιο το χειμερινό και το θερινό ηλιοστάσιο.

Η χρονική στιγμή που ο άξονας της Γής είναι όσο το δυνατό στραμμένος πιο μακριά από τον ήλιο λέγεται χειμερινό ηλιοστάσιο ενώ όταν είναι όσο το δυνατό περισσότερο στραμμένος προς τον ήλιο θερινό. Η απόσταση Γης –Ηλίου είναι μικρότερη κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο από ότι στο θερινό. Συνήθως το χειμερινό ηλιοστάσιο συμβαίνει στις 21/12 (ή 22 αλλά λόγω της προαναφερθείσας ασυμφωνίας ανάμεσα στον πραγματικό χρόνο περιστροφής και στον ημερολογιακό). Το θερινό ηλιοστάσιο συμβαίνει στις 21/6 (ή 20/6 λόγω της ίδιας αιτίας).

Η γνώση της τροχιάς του ήλιου είναι εξαιρετικής σπουδαιότητας για τον χειρισμό του άμεσου φωτισμού. Για πρακτικούς λόγους η θέση του ήλιου εκτιμάται από την θέση που βρισκόμαστε στη Γή χρησιμοποιώντας δύο γωνίες

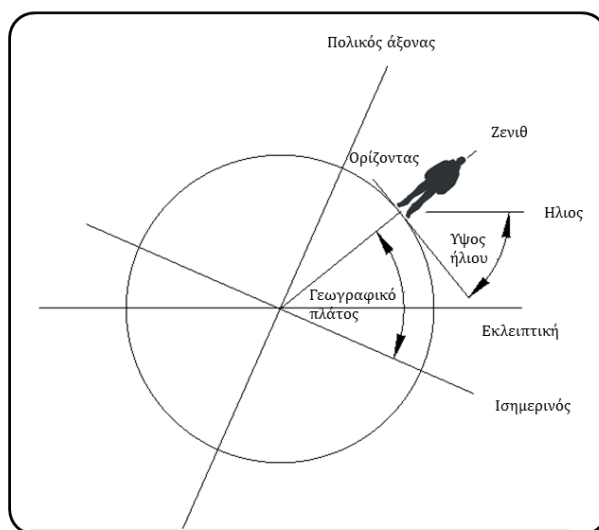
A) Το ύψος του ήλιου (θ , γωνιακή απόσταση από τον ορίζοντα). Η ζενίθια γωνία (Z , γωνιακή απόσταση από την κατακόρυφο) είναι η $Z=90^{\circ}-\theta$

B) και το αζιμούθιο (φ , γωνιακή απόσταση από τον Βορρά, Βορας= 0° , Ανατολή = 90° , Νότος = 180° , Δύση = 270°)

Έτσι για να προσδιοριστεί η τροχιά του ήλιου σε κάποιο χρονικό διάστημα χρειάζεται να βρεθεί η σχέση του ύψους και του αζιμούθιου του ήλιου με τον χρόνο.

Σε αρκετά ηλιακά διαγράμματα (βλ. παρακάτω) η θέση του ήλιου εκτιμάται με τον ηλιακό χρόνο (στις 12:00 μεσουρανει ο ήλιος). Για να διορθωθούν διάφορα προβλήματα (δηλ. να ισχύει ο ίδιος χρόνος στην έκταση μιας χώρας), η γη χωρίζεται σε 24 μεσημβρινούς (χρονικές ζώνες 15°) και ο τοπικός (πολιτικός) χρόνος για κάποια χώρα εξαρτάται από την ζώνη που βρίσκεται (δηλ. στην ουσία από την γωνιακή απόσταση από τον πρώτο μεσημβρινό του Greenwich, χωρίς η σχέση να είναι αναλογική) καθώς και από μια διόρθωση που οφείλεται

στον συνδυασμό μεταβαλλόμενης ταχύτητας περιστροφής της γής γύρω από τον ήλιο και μικρών ανωμαλιών στην περιστροφή της (εξίσωση χρόνου).



Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστικές γωνίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της θέσης του ήλιου.

Για την μετατροπή αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω απλές εξισώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτές η θερινή ώρα):

$$\text{Ηλιακός χρόνος} = \text{Τοπικός χρόνος} + \frac{4 \cdot (30 - \text{γεωγραφικό πλάτος}) + \text{EoT}}{60} \quad (\text{ώρες}) \quad (3.4)$$

$$\text{EoT} = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \quad (\text{λεπτά}) \quad (3.5)$$

Όπου $B = 360 - [(D - 81) / 365]$ (μοίρες) με D ο αριθμός των ημερών στον χρόνο (1-365).

Συνεπώς αν χρειαστεί να υπολογισθεί η θέση του ήλιου, είναι απαραίτητο να υπολογισθεί το ύψος του (θ) από τον ορίζοντα και το αζιμούθιο του (φ) σε σχέση με την ώρα/ημέρα στο έτος.

$$\theta = \arcsin(\cos(\delta) \cdot \cos(\text{LAT}) \cdot \cos(\text{HA}) + \sin(\delta) \cdot \sin(\text{LAT})) \quad (3.6)$$

$$\varphi = \arctan(\sin(\text{HA}) / [\sin(\text{LAT}) \cdot \cos(\text{HA}) - \cos(\text{LAT}) \cdot \tan(\delta)]) \quad (3.7)$$

όπου θ το ύψος του ήλιου, φ το αζιμούθιο, LAT το γεωγραφικό πλάτος, δ η απόκλιση και HA η ωριαία γωνία.

Μια απλή σχέση για την απόκλιση δ είναι αυτή που προτάθηκε από τον Cooper⁵³.

$$\delta = 23.4 \cdot (360 \cdot (284 + D) / 365) \quad (\text{σε μοίρες}) \quad (3.8)$$

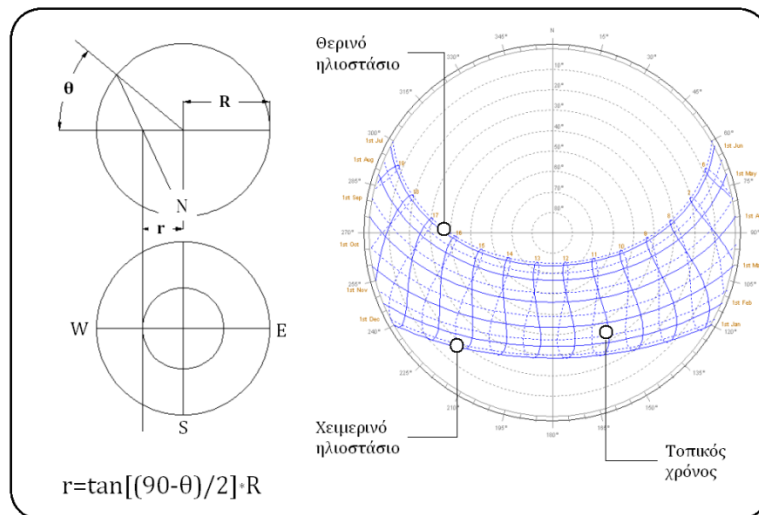
⁵³ Cooper, P.,I.: "The absorption of radiation in solar stills", Solar Energy Vol. 12, 1969, p.333-345

η ωριαία γωνία υπολογίζεται ως εξής :

$$HA=15*(h-12) \quad (\text{σε μοίρες}) \quad (3.9)$$

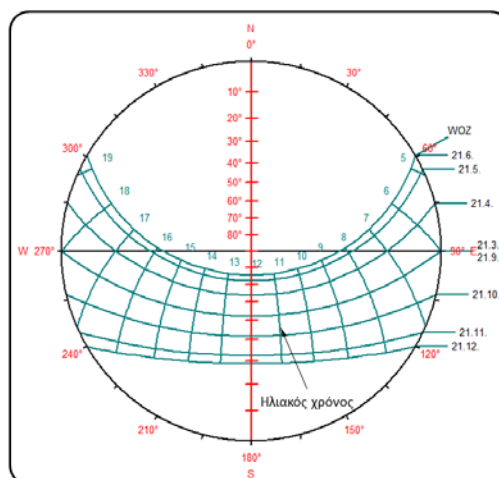
Δηλ. το ηλιακό μεσημέρι (h=12) η HA=0⁰, ενώ αν h=14:00 τότε HA=30⁰

Επειδή είναι πρακτικά αδύνατο να χρησιμοποιούνται οι προαναφερθέντες τύποι κάθε φορά που χρειάζεται κάποια εκτίμηση της θέσης του ήλιου σε κάποιο τόπο, χρησιμοποιούνται τα ηλιακά διαγράμματα. Αυτά είναι οι προβολές της τροχιάς του ήλιου σε ένα επίπεδο (οριζόντιο ή κάθετο). Για παράδειγμα το στερεογραφικό ηλιακό διάγραμμα (δηλ. παράγεται με στερεογραφική προβολή) δημιουργείται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα .



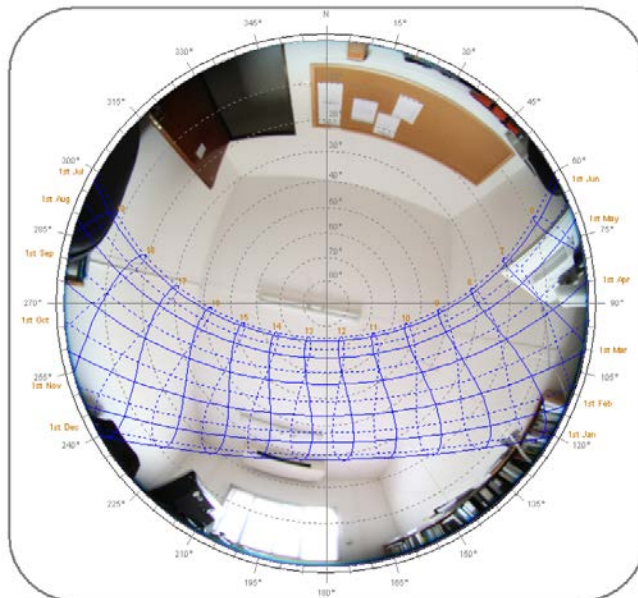
Σχήμα 3.7: Στερεογραφικό ηλιακό διάγραμμα

Αν στο διάγραμμα αυτό χρησιμοποιηθεί ηλιακός χρόνος τότε οι ωριαίες γραμμές τροποποιούνται (με φυσικά τη μεσουράνιση να συμβαίνει στις 12:00).



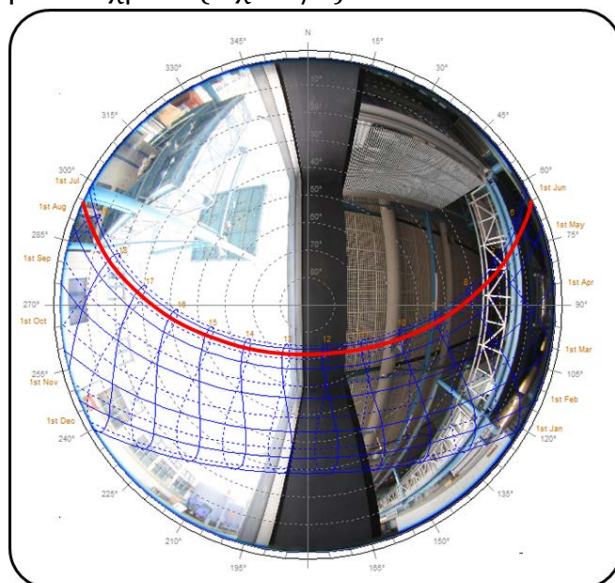
Σχήμα 3.8: Στερεογραφικό ηλιακό διάγραμμα με ηλιακό χρόνο

Υπάρχουν και άλλα είδη προβολών όπως π.χ. η ισαπέχουσα αζιμουθιακή προβολή η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με φωτογραφία από φακό fisheye αν ο φακός αυτός χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη προβολή. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια τέτοια περίπτωση συνδυασμού ηλιακού διαγράμματος με ισαπέχουσα προβολή και μιας φωτογραφίας fisheye (φακός SIGMA 4.5mm F2.8 EX DC HSM Circular Fisheye).



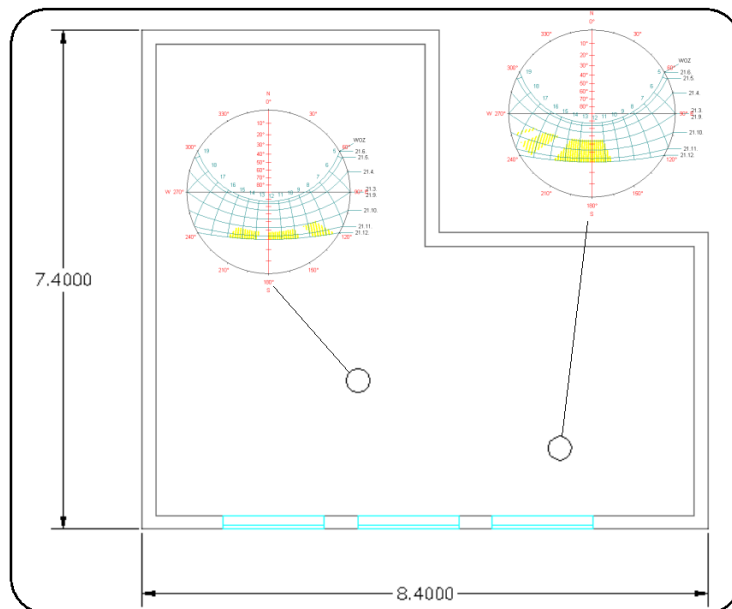
Σχήμα 3.9: Η εικόνα κατασκευάστηκε με υπέρθεση φωτογραφίας fisheye (equidistant projection) και ηλιακού διαγράμματος (ισαπέχουσα αζιμουθιακή προβολή).

Στην περίπτωση του σχήματος (3.9), οι τροχιές του ήλιου δεν συναντώνται καθόλου με το άνοιγμα. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση το συγκεκριμένο σημείο της φωτογραφίας δεν δέχεται καθόλου ήλιο κατά τη διάρκεια του έτους. Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής μπορεί να φανεί χρήσιμη και στην εκτίμηση των ωρών που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ένα άνοιγμα κάποια συγκεκριμένη ημέρα στο χρόνο (π.χ. 21/5).



Σχήμα 3.10: Υπέρθεση φωτογραφίας fisheye (equidistant projection) και ηλιακού διαγράμματος (ισαπέχουσα αζιμουθιακή προβολή) για άνοιγμα δυτικού προσανατολισμού. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην τροχιά του ήλιου την 21/5.

Τα ηλιακά διαγράμματα είναι ιδιαίτερα χρησιμα και σε περιπτώσεις που χρειάζεται να ελεγχθεί αν κάποιο σημείο στο εσωτερικό (ή εξωτερικό) χώρου δέχεται ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3.11: Εξέταση δυο σημείων όσον αφορά το χρονικό διάστημα παρουσίας ήλιου σε αυτά..

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια ενδιαφέρουσα συσκευή με την οποία εκτιμάται το χρονικό διάστημα στο οποίο ήλιος προσπίπτει στο σημείο που βρίσκεται η συσκευή. Πραγματοποιείται με την παρατήρηση του ειδώλου της πηγής σε σχέση με το ηλιακό διάγραμμα.

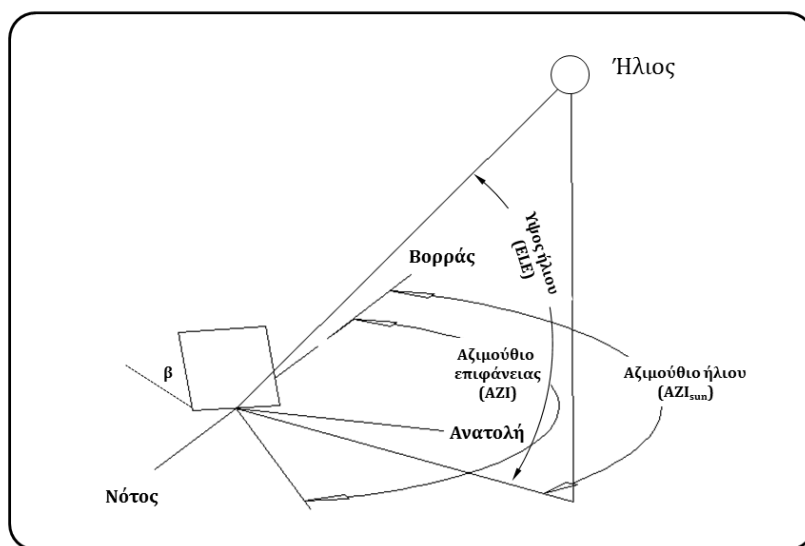


Σχήμα 3.12: Συσκευή εκτίμησης φυσικού φωτισμού (αριθμός κουκίδων που σχηματίζονται στο είδωλο του παραθύρου) και ηλιακών ιχνών (τομή ειδώλου παραθύρου με ηλιακό διάγραμμα).

Η σχέση που εκτιμά την γωνία πρόσπτωσης (i) των ηλιακών ακτίνων σε μια επιφάνεια κλίσης (β) ως προς τον ορίζοντα και αζιμούθιο (δηλ. γωνιακή απόσταση από βορρά) AZI είναι η εξής :

$$i = \arccos(\sin(ELE) \cdot \cos(\beta) + \cos(ELE) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(AZI_{\text{sun}} - AZI)) \quad (3.10)$$

όπου AZI_{sun} και ELE είναι το αζιμούθιο και ύψος του ήλιου.



Σχήμα 3.13: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης.

Στην περίπτωση που η επιφάνεια είναι κάθετη ($\beta=90^\circ$) τότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται :

$$i = \arccos(\cos(ELE) \cdot \cos(AZI_{\text{sun}} - AZI)) \quad (3.11)$$

αν δε είναι οριζόντια ($\beta=0^\circ$) , τότε:

$$i = 90^\circ - ELE \quad (3.12)$$

Προφανώς αν ισχύει $90^\circ < |AZI_{\text{sun}} - AZI| < 270^\circ$ τότε ο ήλιος βρίσκεται πίσω από την επιφάνεια.

Έτσι, ο υπολογισμός του άμεσου ηλιακού φωτισμού (E_d) σε κάποια επιφάνεια με κλίση (β) και αζιμούθιο (AZI) υπολογίζεται με το γινόμενο του άμεσου κάθετου ηλιακού φωτισμού (E_n) και του συνημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης (i).

$$E_d = E_n \cdot \cos(i) \quad (3.13)$$

Η διαφορά των αζιμούθιων επιφάνειας και ήλιου λέγεται και οριζόντια γωνία σκίασης (HAS) ενώ η προβολή του ύψους του ήλιου σε επίπεδο κάθετο στην πρόσοψη λέγεται κάθετη γωνία σκίασης (VSA) και υπολογίζεται ως εξής :

$$VSA = \arctan (\tan(ELE)/\cos(AZI_{\text{sun}}-AZI)) \quad (3.14)$$

Η γωνία VSA χρησιμοποιείται και όταν παρουσιάζεται η λειτουργία ενός συστήματος σκίασης σε τομή.

Θεωρώντας μια μέτρια θολότητα της ατμόσφαιρας, ο άμεσος φωτισμός σε οριζόντιο επίπεδο σχετίζεται⁵⁴ με το ύψος του ήλιου (γ) και μπορεί να εκτιμηθεί με τη σχέση :

$$E_{\text{dir,h,clear}}=0.8+15.5 * \text{SQRT}(\sin(\gamma)) \quad (\text{σε klux}) \quad (3.15)$$

Διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού

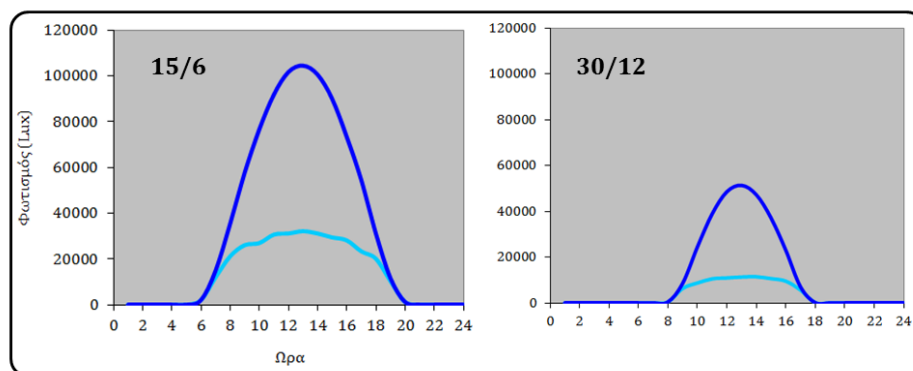
Η στατιστική επεξεργασία του φωτισμού σε κάποια περιοχή μπορεί να αποτελέσει σημαντική παράμετρο για τον σχεδιασμό. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι η έλλειψη σταθμών συστηματικής μέτρησης φωτισμού. Τέτοιου είδους σταθμοί είχαν αναπτυχθεί σε διάφορα μέρη του κόσμου κατά τη διάρκεια του προγράμματος International Daylight Measuring Program της Διεθνούς Ένωσης Φωτισμού (CIE). Στην Ελλάδα ο αντίστοιχος σταθμός βρισκόταν στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπάρχοντα κλιματικά αρχεία όπως αυτά που προέρχονται από το πρόγραμμα International Weather for Energy Calculations (IWEC) της ASHRAE και αφορά 227 τοποθεσίες εκτός Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής και Καναδά. Για την Ελλάδα είναι διαθέσιμα για τις περιοχές Αθηνών, Θεσσαλονίκης και Ανδραβίδας στον

ιστότοπο

(http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/rregion=6_europe_wmo_region_6/country=GRC/cname=Greece)

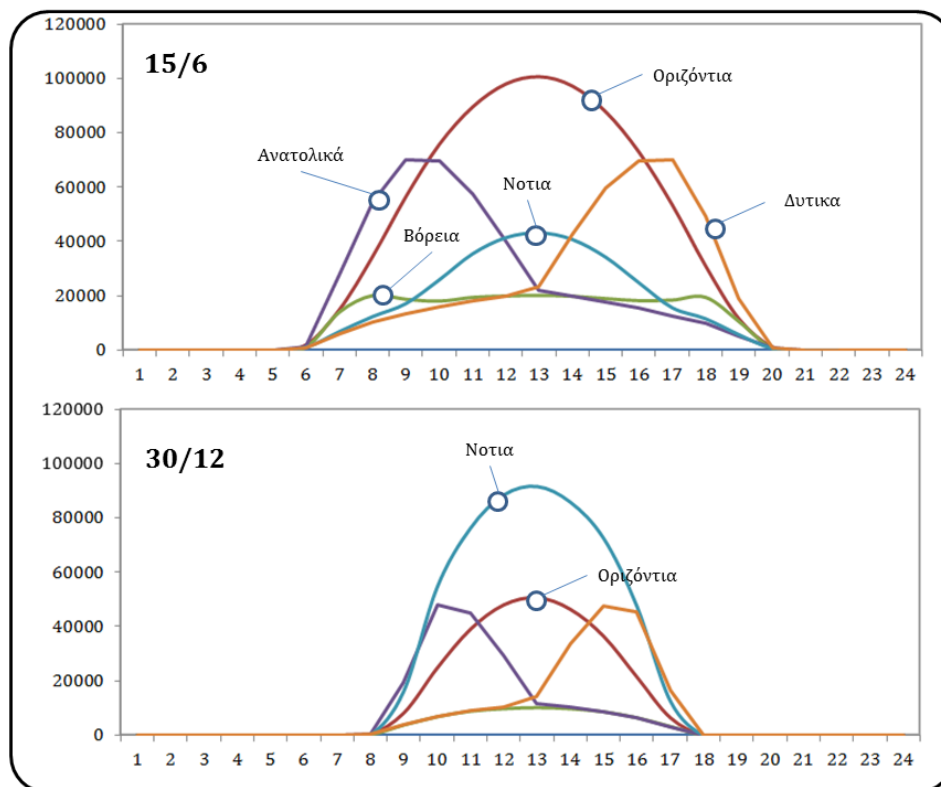
Επιπρόσθετες λύσεις για παραγωγή δεδομένων φωτισμού μπορεί να είναι η χρήση λογισμικού (METEONORM, <http://www.meteonorm.com>) ή η χρήση της φωτεινής δραστηριότητας της ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να μετατραπούν δεδομένα ακτινοβολίας σε φωτισμό. Μεγέθη που ενδιαφέρουν ώστε να εκτιμηθούν οι συνθήκες φυσικού φωτισμού είναι α) η χρονική κατανομή ολικού, άμεσου και διάχυτου φωτισμού β)τα ποσοστά νεφοκάλυψης.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται για δύο αίθριες ημέρες οι τιμές ολικού και διάχυτου οριζόντιου φωτισμού από δεδομένα IWEC για την Αθήνα καθώς επίσης και τμές φωτισμού στους τέσσερεις κύριους προσανατολισμούς.



Σχήμα 3.14: Ωριαία κατανομή τιμών ολικού και διάχυτου φωτισμού (αίθριες συνθήκες)

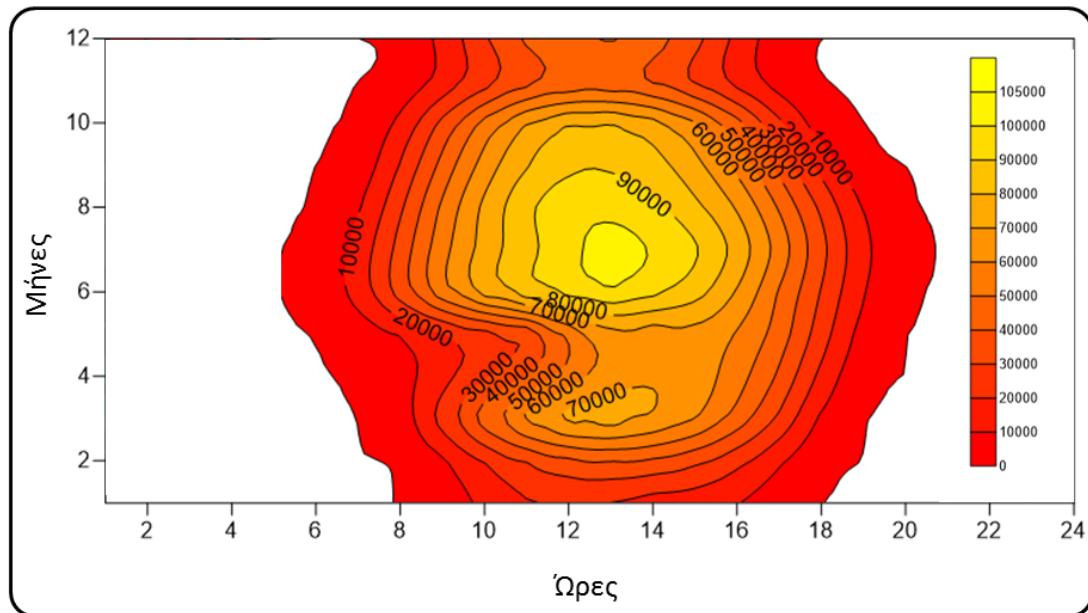
⁵⁴ IES Calculation procedures committee, (1984), "Recommended practice for the calculation of daylight availability", Journal of the IESNA, 13(4).



Σχήμα 3.15: Ωριαία κατανομή τιμών ολικού στο οριζόντιο και στις τέσσερις κύριες διευθύνσεις (αίθριες συνθήκες)

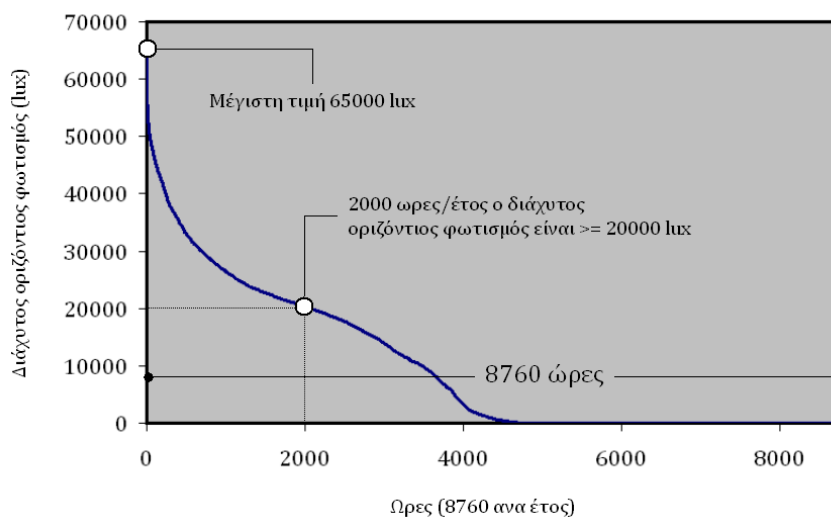
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείστε τη διαφορά των τιμών φωτισμού ανάμεσα σε νότια κάθετη πρόσοψη και σε οριζόντιο επίπεδο. Το χειμώνα τα νότια ανοίγματα σε αίθριες συνθήκες παρέχουν στο εσωτερικό μεγαλύτερη φωτεινή ροή από ίσων διαστάσεων άνοιγμα οροφής. Η κατάσταση αντιστρέφεται το καλοκαίρι. Επειδή στην τελευταία περίπτωση η μεγαλύτερη φωτεινή ροή συνοδεύεται και από αυξημένα ηλιακά κέρδη θα πρέπει να δοθεί προσοχή τόσο στο μέγεθος του οριζόντιου ανοίγματος όσο και στις ιδιότητες του υαλοπίνακα/ συστήματος σκίασης.

Πέραν των προαναφερθέντων ενδεικτικών διαγραμμάτων κατά τη διάρκεια της εξέτασης της διαθεσιμότητας φυσικού φωτισμού, πολλές φορές χρειάζεται και η παρουσίαση της χρονικής εξέλιξης των τιμών ολικού/διάχυτου φωτισμού. Στο παρακάτω σχήμα η ωραία κατανομή του ολικού φωτισμού.



Σχήμα 3.16: Κατανομή ολικού οριζόντιου φωτισμού (Αθήνα IWEC data, χωρίς διόρθωση θερινής ώρας).

Αρκετές φορές ο αρχικός σχεδιασμός καθοδηγείται από προσεγγίσεις που αφορούν το σύστημα σκίασης. Αν θεωρηθεί ότι η άμεση ακτινοβολία αποκόπτεται τότε η χρήση του διάχυτου φωτισμού (σε συνδυασμό π.χ. με τον παράγοντα φυσικού φωτισμού (σε επόμενη παράγραφο) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση π.χ. της εξοικονόμησης από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού. Έτσι ένα χρήσιμο διάγραμμα είναι το διάγραμμα που παρουσιάζει τις ώρες στο χρόνο που η τιμή π.χ. του διάχυτου οριζόντιου φωτισμού ξεπερνά μια καθορισμένη τιμή.

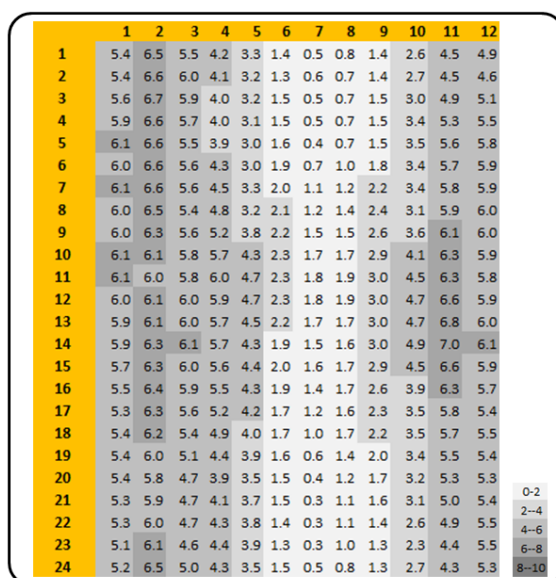


Σχήμα 3.17: Παρουσίαση αριθμού ωρών υπέρβασης τιμών διάχυτου οριζόντιου φωτισμού.

Περιπτώσεις που το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι π.χ. η εκτίμηση της φωτεινής ροής (πολλαπλασιασμός φωτισμού με την επιφάνεια) που φτάνει στην είσοδο ενός φωτοσωλήνα σε σχέση με μια προκαθορισμένη τιμ. Προφανώς το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η ανάλυση μπορεί

να μεταβληθεί (π.χ. 8:00-18:00) καθώς επίσης και ο προσανατολισμός της επιφάνειας για την οποία πραγματοποιείται ο υπολογισμός (π.χ. αν είναι άνοιγμα τότε χρειάζεται να εκτιμηθεί ο διαχυτός φωτισμός σε κάθετη επιφάνεια στον προσανατολισμό του ανοίγματος).

Περιοχές με διαφορετικό κλίμα εμφανίζουν διαφοροποιήσεις στο παραπάνω διάγραμμα οι οποίες οφείλονται στη διαφορετική χρονική εξέλιξη της νεφοκάλυψης. Αυτή μπορεί να παρουσιασθεί με τον εξής τρόπο (Heatmap με τις μέσες ωριαίες μηνιαίες τιμές).



Σχήμα 3.18: Μέσες ωριαίες μηνιαίες τιμές νεφοκάλυψης σε δέκατα (10/10 πλήρης νεφοκάλυψη, 0/10 αίθριος ουρανός). Κλιματικό αρχείο Αθηνών.

Αν και τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν σχετικές στατιστικές αναλύσεις για οριζόντιες τιμές παραμέτρων φυσικού φωτισμού, είναι προφανές ότι παρόμοια ανάλυση μπορεί να γίνει και στις περιπτώσεις που χρειάζεται μια ανάλυση σε κάποια κλίση (π.χ. σε άνοιγμα 90° κλίσης νότιου προσανατολισμού). Σε αυτές τις περιπτώσεις λαμβάνεται υπόψη και ο ανακλώμενος φωτισμός από το έδαφος και συνήθως χρειάζεται κάποιου είδους επεξεργασία για να παραχθούν τα δεδομένα.

4. ΦΥΣΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ : ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ/ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Για να εκτιμηθεί η επίδραση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού στην διαθεσιμότητα του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτηρίων υπάρχουν διαθέσιμες διάφορες προσεγγίσεις από απλές εξισώσεις μέχρι υπολογιστικές διαδικασίες. Σε γενικές γραμμές, έχουν δύο στόχους :

1. Την εκτίμηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτηρίων (είτε με εκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής είτε σε ωριαία βάση για ένα έτος).
2. Την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας αρχικά από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού.

Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω δείκτες :

Τιμή έντασης φωτισμού

Ο πλέον τυπικός δείκτης. Η ελάχιστη τιμή του εξαρτάται από την δραστηριότητα ενώ η μέτρηση πραγματοποιείται στην επιφάνεια εργασίας ή στα σημεία που κρίνονται απαραίτητα. Συνιστώμενες μέσες τιμές υπάρχουν σε κάθε πρότυπο σχετικό με το σχεδιασμό φωτισμού (π.χ. EN 12464-1:2011) ενώ η ελάχιστη τιμή μπορεί να καθοριστεί π.χ από το μοντέλο σχετικής απόδοσης⁵⁵.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτίμηση της κατανομής των τιμών φωτισμού στο επίπεδο του ματιού με τη βοήθεια του οποίου μπορούν να αποφασισθούν οι ώρες στην οποίες υπάρχει άμεση οπτική επαφή με τον ήλιο καθώς και η κατανομή στην οροφή περιοχή που συνισφέρει στην αίσθηση φωτεινότητας του χώρου⁵⁶. Η εκτίμηση της παρουσίας ήλιου ή όχι σε κάποιο σημείο μπορεί να πραγματοποιηθεί και με ηλιακό διάγραμμα. Εναλλακτικά μπορεί να εκτιμηθεί και υπολογιστικά (βλ. Παρακάτω ASE, Annual Sunlight Exposure).

Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού (Daylight factor)

Ένας από τους πλέον χρησιμοποιούμενους (και παλαιότερους) δείκτες. Ορίζεται σαν ο λόγος της τιμής φωτισμού στο εσωτερικό κάποιου χώρου προς την αντίστοιχη τιμή του οριζόντιου φωτισμού στο εξωτερικό υπο την προϋπόθεση ότι ο ουρανός είναι πλήρως νεφοσκεπής και φυσικά χωρίς την ύπαρξη σημαντικών εμποδίων τα οποία μειώνουν την τιμή του εξωτερικού φωτισμού. Λόγω της αζιμουθιακής συμμετρίας της κατανομής λαμπρότητας στον ουρανό οι τιμές του ΠΦΦ δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του χώρου καθώς επίσης και από τον χρόνο.

Επειδή ο ΠΦΦ είναι ένα πηλίκο η επίτευξη κάποιων συγκεκριμένης τιμής φωτισμού στο εσωτερικό εξαρτάται από την τιμή φωτισμού που επιτυγχάνεται στο εξωτερικό και η οποία προφανώς είναι διαφορετική ανά περιοχή.

Π.χ. $ΠΦΦ = E_{int} / E_{ext}$, αν η επιθυμητή τιμή στο εσωτερικό είναι 500 lux, και ο ΠΦΦ είναι π.χ. 1% τότε $E_{ext} = E_{int} / ΠΦΦ = 500 / 0.02 = 10000$ lux.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 15193:2007 “ Energy performance of buildings. Energy requirements for lighting” η συμβολή του φυσικού φωτισμού στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι μέτρια/σημαντική για τιμές ΠΦΦ $\geq 2\%$ / 3%

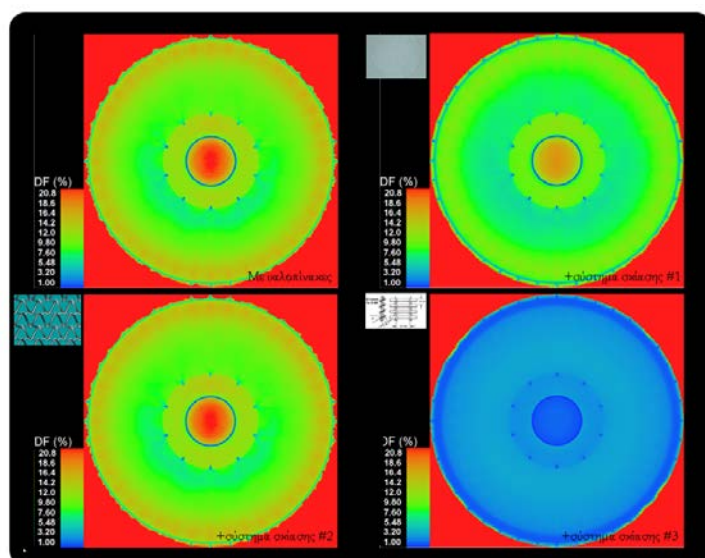
⁵⁵ Relative Visual Performance, Rea M, Ouellette M. «Relative visual performance:A basis for application». Lighting Research and Technology 1991; 23(3): 135-144.)

⁵⁶ J. Mardaljevic, L. Hescong, E.Lee, “Daylight Metrics and energy savings”, Lighting Research and Technology, 41:261, 2009)

αντίστοιχα. Γενικά και για χώρους γραφείων μια τυπική τιμή για τον μέσο ΠΦΦ είναι 2% (BS 8206/2-2008, Lighting for Buildings, Code of practice for daylighting). Να τονισθεί σε αυτό το σημείο ότι μια τιμή του ΠΦΦ π.χ. 2% δεν αντιστοιχεί στα ίδια επίπεδα φωτισμού στο εσωτερικό αφού οι εξωτερικές συνθήκες μπορεί να διαφέρουν. Δηλ. παρατηρούνται διαφορετικές τιμές φωτισμού.

Το ίδιο πρότυπο καθορίζει και τιμές ΠΦΦ για μερικούς χώρους κατοικιών (π.χ. κουζίνες 2% κλπ). Η χρήση του φυσικού φωτισμού είναι διαφορετική σε χώρους κατοικίας (ευεξία, υγιεινή κυρίως) από αυτούς της εργασίας (ικανότητα εκτέλεσης εργασίας, εξοικονόμηση ενέργειας) συνεπώς η ελάχιστη τιμή κάποιου δείκτη που αφορά φυσικό φωτισμό πρέπει να γίνεται με προσοχή και προφανώς σε συμφωνία με τα τοπικά κλιματικά δεδομένα.

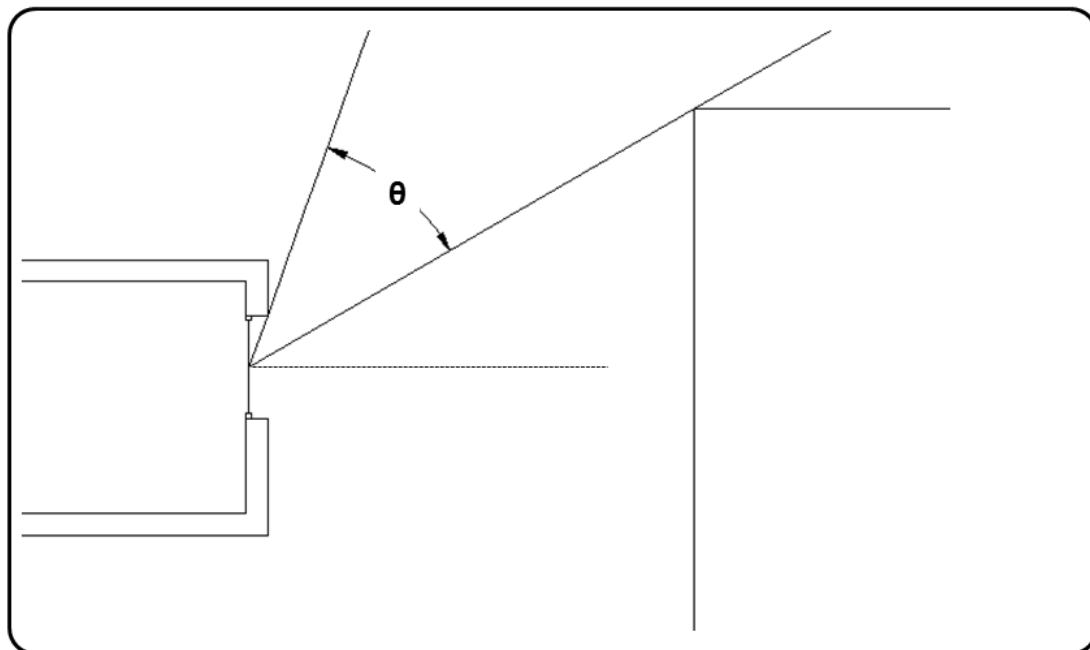
Η ανάλυση της κατανομής των ΠΦΦ σε κάποιο χώρο δίνει πληροφορίες σχετικά με την επάρκεια του φυσικού φωτισμού καθώς επίσης και μπορεί να οδηγήσει τις σχεδιαστικές ομάδες στις αρχικές επιλογές (π.χ. ιδιοτήτων υαλοπινάκων, τύπου σκίασης).



Σχήμα 4.1: Κατανομή Παραγόντων φυσικού φωτισμού σε κυκλική κατασκευή με την υιοθέτηση διαφορετικών συστημάτων σκίασης

Στο σύστημα περιβαλλοντικής αξιολόγησης BREEAM ο ΠΦΦ χρησιμοποιείται σαν κριτήριο. Η επίτευξη του στόχου (+1 μονάδα στο σύστημα) είναι η επίτευξη του 80% των χώρων να εμφανίζουν μέση τιμή ΠΦΦ >2% και ελάχιστη τιμή ομοιομορφίας 0.4.

Μια απλή εκτίμηση της μέσης τιμής του ΠΦΦ, ιδιαίτερα χρήσιμη στα αρχικά στάδια σχεδιασμού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της εξίσωσης:



Σχήμα 4.2: Εκτίμηση γωνίας που χρησιμοποιείται στη σχέση υπολογισμού της μέσης τιμής του ΠΦΦ. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει εμπόδιο η γωνία μετράται από τον οριζοντα.

$$\text{Μέση τιμή ΠΦΦ} = \frac{\tau \cdot A_w \cdot \theta}{A \cdot (1 - \rho^2)} \quad (\%) \quad (4.1)$$

Όπου τ η διαπερατότητα στο ορατό του υαλοπίνακα

A_w η επιφάνεια του υαλοπίνακα

A η επιφάνεια συνολικά οροφής, τοίχων, δαπέδου του υαλοπίνακα συμπεριλαμβανομένου

ρ η μέση ανακλαστικότητα των επιφανειών του χώρου. Υπολογίζεται με τον τύπο (A_1, A_2 οι επιφάνειες του χώρου και ρ_1, ρ_2 κλπ οι ανακλαστικότητες τους):

$$\rho = \frac{A_1 \cdot \rho_1 + A_2 \cdot \rho_2 + \dots + A_n \cdot \rho_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (4.2)$$

θ η γωνία η οποία ορίζεται με τη βοήθεια όπως στο σχήμα 4.2 από τη μέση του ανοίγματος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του CEN/TC 169/WG 11 «Daylight» (τα οποία είναι σε διαβούλευση, 10/2015), μια κατηγοριοποίηση των συνθηκών φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό κάποιου χώρου μπορεί να πραγματοποιηθεί με την βοήθεια των ΠΦΦ. Η κατηγοριοποίηση βασίζεται σε δύο τιμές ΠΦΦ, μια που χρειάζεται να επιτευχθεί στο 50% της επιφάνειας εργασίας (0.8μ) στο 50% του χρόνου (δηλ. ~ 4380 ώρες ανα έτος) και μια μικρότερη που πρέπει να

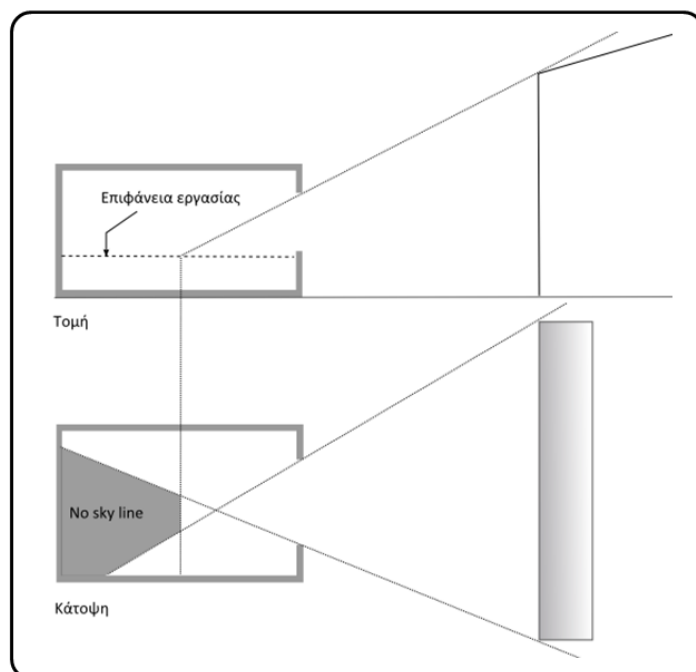
επιτευχθεί στο 100% της επιφάνειας εργασίας πάλι στο 50% του χρόνου. Έτσι για την Αθήνα η βασική απαίτηση (πρώτη κατηγορία) ικανοποιείται όταν τιμές ΠΦΦ >1.5% επιτυγχάνονται στο 50% του χώρου και ταυτόχρονα τιμές ΠΦΦ>0.5 % στο 100 % του χώρου. Για την δεύτερη κατηγορία οι τιμές είναι 3% και 2.6% και 1.5% αντίστοιχα.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αρχική της επιφάνειας των ανοιγμάτων εφόσον βέβαια ορισθεί η απαιτούμενη τιμή για τον ΠΦΦ. Δηλ. ορίζοντας μια μέση τιμή για τον ΠΦΦ (π.χ. 2%) μπορεί να υπολογισθεί η έκταση του υαλοπίνακα που απαιτείται για να ικανοποιηθεί η συνθήκη αυτή (η οποία προφανώς εξαρτάται από την διαπερατότητα που θα επιλεγεί). Όπως έχει ήδη αναφερθεί λόγω της αζιμουθιακής συμμετρίας στην κατανομή λαμπρότητας του ουρανού η τιμή του ΠΦΦ είναι σταθερή ανεξάρτητα του προσανατολισμού του ανοίγματος. Σε μια προσπάθεια να διαφοροποιηθούν οι υπολογισμοί ανάλογα με τον προσανατολισμό το προαναφθέν πρότυπο (BS 8206/2-2008) προτείνει να πολλαπλασιάζονται οι τιμές του ΠΦΦ με τους συντελεστές 0.97/1.15/1.55/ και 1.21 για προσανατολισμούς Βόρειο/Ανατολικό/Νότιο και Δυτικό αντίστοιχα.

Ο ΠΦΦ μπορεί να καταμερισθεί σε τρεις επιμέρους παράγοντες :

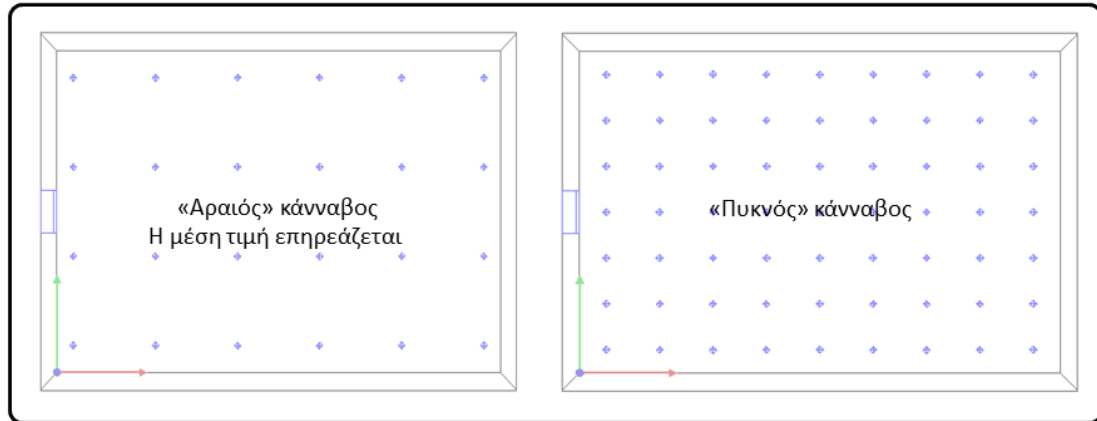
$$\text{ΠΦΦ} = \text{ΠΦΦ}_s + \text{ΠΦΦ}_e + \text{ΠΦΦ}_i \quad (4.3)$$

Όπου ΠΦΦ_s ο παράγοντας φυσικού φωτισμού που οφείλεται στον ουρανό, ΠΦΦ_e λόγω των ανακλάσεων σε εξωτερικά εμπόδια και ΠΦΦ_i λόγω εσωτερικών ανακλάσεων. Η περιοχή που ο ΠΦΦ_s μηδενίζεται στο επίπεδο εργασίας ορίζεται σαν η περιοχή NO SKY LINE στην οποία προφανώς τα επίπεδα φυσικού φωτισμού είναι μικρά. Άρα ο καθορισμός αυτής της περιοχής μπορεί να αποτελεί αρχικά μια εκτίμηση της επίδρασης του φυσικού φωτισμού.



Σχήμα 4.3: Σχεδιασμός της περιοχής (επι της επιφάνειας εργασίας) που δεν έχει «επαφή» με τον ουρανό (no-sky line).

Η μέτρηση των ΠΦΦ σε κάποιο χώρο χρειάζεται σχετικά καλή προετοιμασία ιδίως σε περιοχές που δεν επικρατούν συχνά νεφοσκεπείς συνθήκες. Στον χώρο αρχικά καθορίζεται ο κানাβος των μετρήσεων του οποίου οι διαστάσεις εξαρτώνται από το μέγεθος του χώρου καθώς επίσης και από την αναλογία των διαστάσεων των ανοιγμάτων σε σχέση με τον χώρο. Δηλ. Η ύπαρξη μικρών διαστάσεων ανοιγμάτων οδηγεί συνήθως σε πυκνό κানাβο ώστε η μέση τιμή που θα υπολογισθεί να είναι όσο το δυνατό πιο ακριβής.



Σχήμα 4.4: Ο συνδυασμός μικρών διαστάσεων ανοιγμάτων και αραιού καννάβου μέτρησης μπορεί να οδηγήσει σε προβληματικές εκτιμήσεις του φυσικού φωτισμού.

Στο EN 12464-1:2011 “Light and lighting. Lighting of work places. Indoor work places” αναφέρεται μια σχέση υπολογισμού του καννάβου μετρήσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό των σημείων υπολογισμού ή μετρήσεων στην επιφάνεια εργασίας (0.85 μ).

$$p=0.2 \cdot 5 \log_{10}(d) \quad (4.4)$$

όπου p είναι απόσταση μεταξύ των σημείων υπολογισμού και d η μεγαλύτερη διάσταση του χώρου (αν ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάσταση του χώρου είναι ≥ 2 τότε σαν d λαμβάνεται η μικρότερη).

Τα σημεία του χώρου που πρόκειται να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σημειώνονται με π.χ. ένα μικρό αυτοκόλλητο στο δάπεδο. Την ημέρα των μετρήσεων χρειάζονται συνήθως δύο άτομα εκ των οποίων ο ένας βρίσκεται σε χώρο εκτός κτιρίου (π.χ. δώμα) και ο άλλος στο εσωτερικό του. Σε κάθε σημείο μέτρησης (π.χ. αν χρειάζεται να μετρηθούν σε επιφάνεια που απέχει από το δάπεδο 0.8 μ. χρησιμοποιείται τρίποδο) διαιρείται η τιμή του φωτόμετρου στο εσωτερικό με την αντίστοιχη στο εξωτερικό. Η διαδικασία προϋποθέτει επικοινωνία των ατόμων μεταξύ τους (χρήση ασύρματου) ή εναλλακτικά μπορεί στο εξωτερικό να χρησιμοποιηθεί καταγραφικό το οποίο αποθηκεύει συνεχώς τιμές φωτισμού σε μικρά χρονικά διαστήματα. Στην τελευταία περίπτωση θα πρέπει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο εσωτερικό να καταγράφεται και ο χρόνος ώστε αργότερα να μπορεί να διαιρεθεί με την αντίστοιχη τιμή από το καταγραφικό.

Να τονισθεί ότι όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις στο εσωτερικό θα πρέπει το σώμα του ατόμου που ασχολείται με αυτό να μην επηρεάζει την ένδειξη (π.χ. σκύβοντας κάτω από το επίπεδο που βρίσκεται το φωτόμετρο).

Έχει ήδη αναφερθεί ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού. Η κατανομή της λαμπρότητας σε νεφοσκεπή ουρανό όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι :

$$L_{\theta}=L_z*(1+2\sin\theta)/3 \quad (4.5)$$

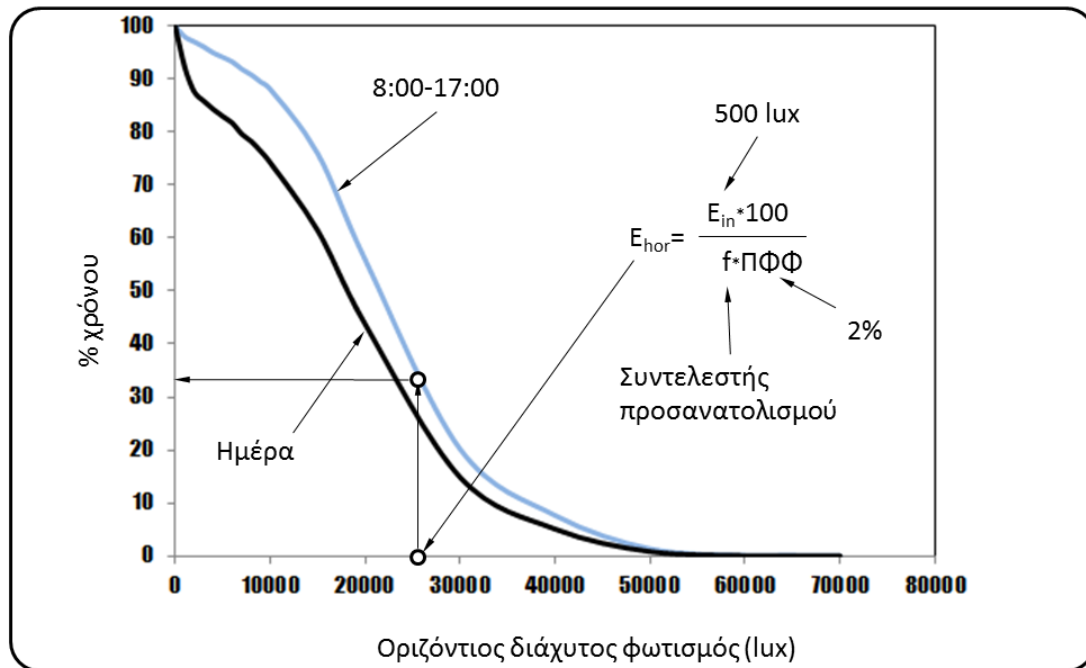
Όπου L_{θ} είναι η λαμπρότητα σε σημείο του ουρανού με ύψος (γωνία) από τον ορίζοντα θ , L_z η ζενίθεια λαμπρότητα .

Ο λόγος της ζενίθιας λαμπρότητας προς την λαμπρότητα του ορίζοντα είναι 3. Συνεπώς κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με τη βοήθεια κάμερας λαμπρότητας ελέγχεται η παραπάνω συνθήκη ώστε να διαπιστωθεί η απόκλιση από τις θεωρητικές συνθήκες. Προφανώς η εκτίμηση της λαμπρότητας της περιοχής στο ορίζοντα προκύπτει από τη μέση τιμή μετρήσεων σε διαφορετικό αζιμούθιο. Επιπρόσθετα ο ουρανός ελέγχεται οπτικά ώστε να διαπιστώνεται η πλήρης νεφοκάλυψη (μη ορατές «μπλε» περιοχές ή περιοχές στις οποίες ο δίσκος του ήλιου φαίνεται).

Μια προσέγγιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν τμήμα ουρανού δεν έχει πλήρη νεφοκάλυψη (όχι όμως με το δίσκο του ήλιου ορατό) είναι να καλυφθεί το ημισφαίριο του εξωτερικού φωτόμετρου με κατακόρυφη μαύρη επιφάνεια η οποία τοποθετείται ώστε να αποκλείσει τις προβληματικές περιοχές. Με αυτό τον τρόπο μετράται μόνο ο φωτισμός από το μισό ημισφαίριο του ουρανού και στη συνέχεια αυτή η τιμή πολλαπλασιάζεται με 2 ώστε να υπολογισθεί (προσοχή : με προσέγγιση) η τιμή του εξωτερικού οριζόντιου φωτισμού.

Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό των ΠΦΦ είναι η χρήση τους για την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας (τουλάχιστον στα αρχικά στάδια σχεδιασμού). Για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη ανάλυση χρειάζεται με τη βοήθεια κλιματικών δεδομένων να υπολογισθεί η πιθανότητα υπέρβασης τιμών του εξωτερικού διάχυτου φωτισμού. Δηλ. για π.χ. το χρονικό διάστημα 8:00-17:00 να υπολογισθεί η πιθανότητα ώστε η τιμή του εξωτερικού φωτισμού να είναι $> 1000 \text{ lux}$, $>2000 \text{ lux}$, ..., $>10000 \text{ lux}$ κοκ.

Αν η μέση τιμή του ΠΦΦ είναι γνωστή (π.χ. 2%) τότε για δεδομένα επίπεδα φωτισμού στο εσωτερικό του κτηρίου (π.χ. 500 lux) και προσανατολισμό (έστω βόρειος, άρα ο συντελεστής διόρθωσης είναι 0.97) μπορεί να υπολογισθεί η τιμή του εξωτερικού φωτισμού (προφανώς θεωρώντας ότι ο διάχυτος φωτισμός προέρχεται από ουρανό με κατανομή ίδια με του νεφοσκεπούς, γεγονός που δεν ισχύει φυσικά αλλά για το είδος της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί). Στην περίπτωση που μόλις αναφέρθηκε ο εξωτερικός φωτισμός θα πρέπει να είναι 25773 lux (δηλ. $\text{ΠΦΦ} = E_{\text{in}}/E_{\text{ext}} \rightarrow E_{\text{ext}} = E_{\text{in}}/0.97 * \text{ΠΦΦ} = 500/0.97 * 0.02 = 25000 \text{ lux}$). Έτσι η πιθανότητα υπέρβασης αυτής της τιμής είναι ~33% όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (άρα χονδροειδώς αυτή η τιμή προσεγγίζει και την πιθανή εξοικονόμηση).



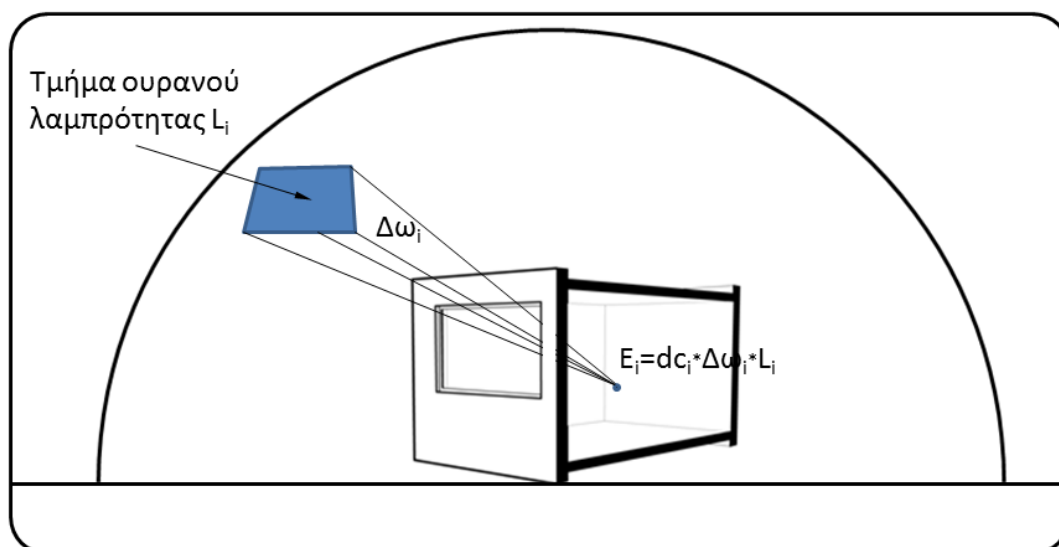
Σχήμα 4.5: Εκτίμηση εξοικονόμησης χρησιμοποιώντας την μέση τιμή ΠΦΦ και το διάγραμμα του ποσοστού υπέρβασης για τον οριζόντιο διάχυτο φωτισμό.

Αυτονομία σε φυσικό φωτισμό (Daylight Autonomy)

Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστούν τα επίπεδα φωτισμού σε τρισδιάστατα μοντέλα κτιρίων με αρκετά καλή προσέγγιση των φωτομετρικών ιδιοτήτων των επιφανειών τους. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ωριαία βάση για το τυπικό μετεωρολογικό έτος της περιοχής (Climate Based Daylight Modelling) συνεπώς λαμβάνονται υπόψη διάφοροι τύποι ουρανού (όχι μόνο ο νεφοσκεπής όπως στην επίπτωση υπολογισμού του ΠΦΦ) καθώς επίσης και η παρουσία του ήλιου. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση με τους συντελεστές φωτισμού⁵⁷ (daylight coefficients) είναι δυνατός ο ωριαίος υπολογισμός επιταχύνοντας τον χρονικά απαιτητικό υπολογισμό των εσωτερικών ανακλάσεων.

Με βάση αυτή την προσέγγιση ο ουράνιος θόλος χωρίζεται σε ένα αριθμό μικρών περιοχών (ο αρχικός διαχωρισμός ήταν 145) ενώ το έδαφος θεωρείται μια μονο «περιοχή». Σχηματικά η κατάσταση εμφανίζεται παρακάτω:

⁵⁷ P.R. Tregenza, I.M. Waters, "Daylight coefficients", Lighting Research and Technology June 1983 vol. 15 no. 2 65-71



Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση υπολογισμού των συντελεστών φωτισμού.

Η συνολική τιμή φωτισμού στο σημείο υπολογίζεται ως εξής :

$$E = \sum_{i=1}^N dc_i \cdot L_i \cdot \Delta\omega_i \quad (4.6)$$

Όπου L_i είναι η λαμπρότητα μιας περιοχής του ουράνιου θόλου (ή το εδάφος , $\Delta\omega_i$ η στερεά γωνία του και dc_i ο αντίστοιχος συντελεστής φωτισμού. Στο τμήμα του ουρανού που περιέχει και τη θέση του ήλιου η λαμπρότητα αυξάνεται αναλογικά με τις γωνιακές εκτάσεις του τμήματος και του ήλιου. Αν οι τιμές των συντελεστών dc έχουν υπολογισθεί , τότε ανα ώρα στο τυπικό μετεωρολογικό έτος χρειάζεται να εκτιμηθεί η λαμπρότητα των π.χ. 145 τμημάτων και να πολλαπλασιασθεί κατόπιν με τους συντελεστές και τη στερεά γωνία των τμημάτων του ουρανού για να εκτιμηθεί ο φωτισμός στη συγκεκριμένη ώρα. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται μια φορά μόνο (π.χ. με ανάστροφη ιχνηλασία ακτίνας (backwards ray tracing)).

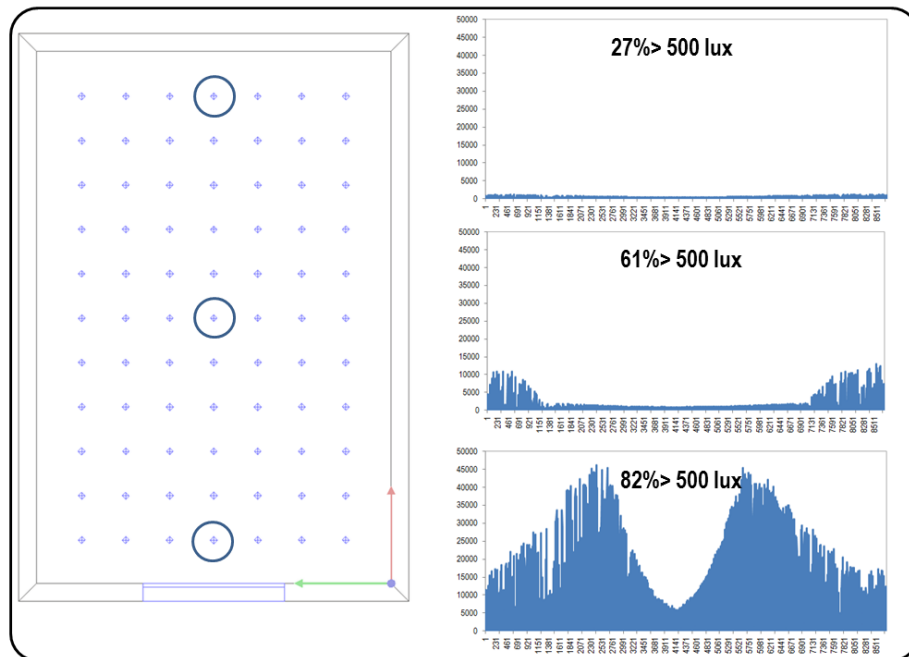
Η προαναφερθείσα προσέγγιση είναι η αρχική όπως αυτή προτάθηκε από P. Tregenza⁵⁸. Βελτιώσεις της μεθόδου που έχουν εμφανισθεί στη βιβλιογραφία σχετίζονται με διαχωρισμό του υπολογισμού του φωτισμού που οφείλεται στον ήλιο και με αυξημένο διαχωρισμό του ουράνιου θόλου. Για παράδειγμα το λογισμικό DAYSIM (<http://daysim.ning.com/>) χρησιμοποιεί δύο τρόπους για τον υπολογισμό των ωριαίων τιμών φωτισμού σε ετήσια βάση.

1ος τρόπος → 145 συντελεστές για τον ουρανό, 3 για το έδαφος (0° έως -10° , -10° έως -30° , και -30° έως -90°) και περίπου (εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος) 65 για ισάριθμες θέσεις του ήλιου.

2ος τρόπος → Η συγκεκριμένη μορφοποίηση ονομάζεται DDS και σύμφωνα με αυτή χρησιμοποιούνται 145 για τον ουρανό (διάχυτος φωτισμός), 1 για το έδαφος, 145 συντελεστές όμοιους με του πρώτους 145 για να υπολογισθεί η επίδραση του ανακλώμενου φωτισμού από ήλιο και 2305 για τον υπολογισμό του άμεσου φωτισμού (αντιστοιχούν σε ισάριθμες θέσεις για τον ήλιο).

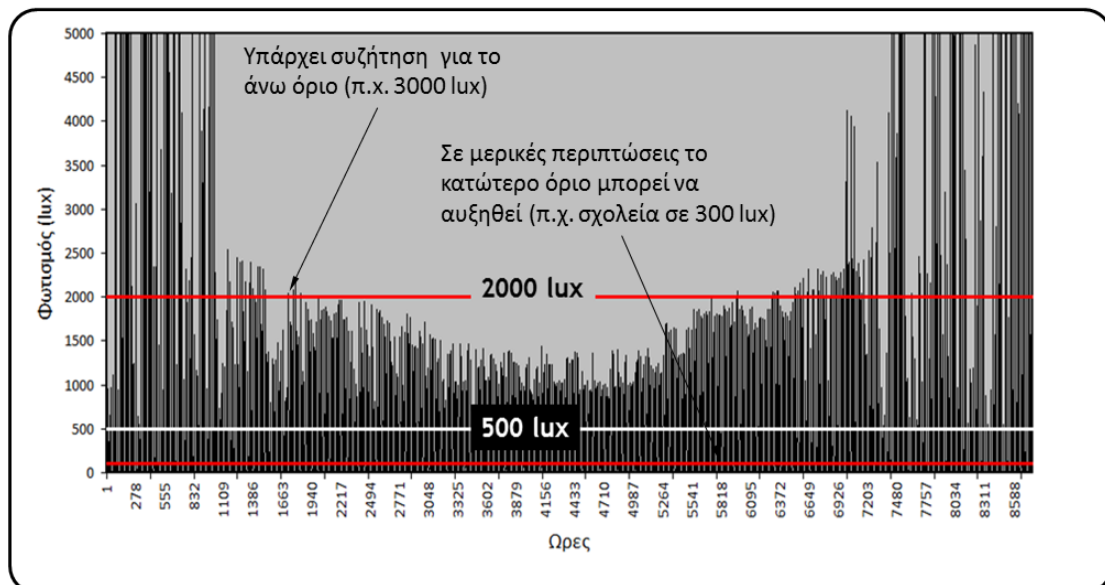
⁵⁸ Tregenza, P.R. and Waters, I.M. (1983) Daylight coefficients. Lighting Research & Technology, 15 (2), 65-71.

Ενα τέτοιο παράδειγμα υπολογισμού εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό παρουσιάζονται ωριαίες τιμές φωτισμού σε τρία σημεία χρησιμοποιώντας ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος.



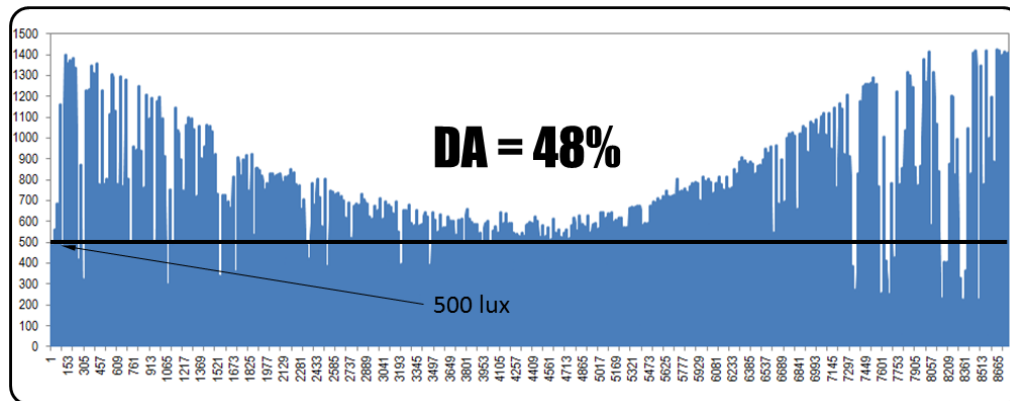
Σχήμα 4.7: Ωριαία κατανομή επιπέδων φυσικού φωτισμού για σημεία κοντά και μακριά από το άνοιγμα (επι της επιφάνειας εργασίας).

Προφανώς αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε με την κατάλληλη στατιστική επεξεργασία να παραχθούν δείκτες χρήσιμοι στον σχεδιασμό.



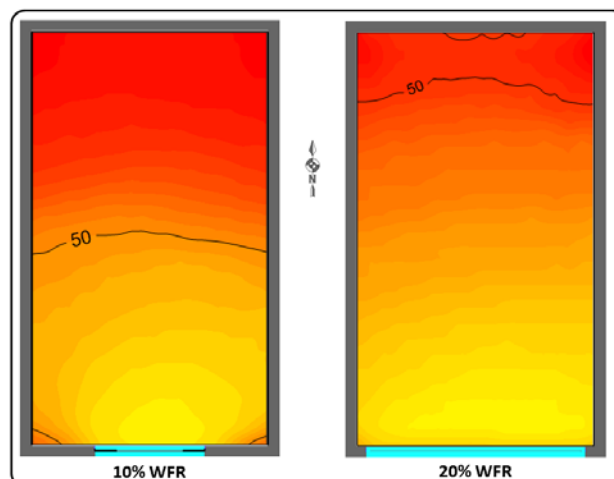
Σχήμα 4.8: Από τη στιγμή που έχουν υπολογισθεί οι ωριαίες τιμές φωτισμού, είναι δυνατή η όποια στατιστική τους επεξεργασία. Για παράδειγμα στο συγκεκριμένο σχήμα μπορεί να υπολογισθεί το ποσοστό των ωρών με τιμές φωτισμού μεταξύ 500-2000 lux.

Η αυτονομία φυσικού φωτισμού⁵⁹(DA, Daylight Autonomy) είναι ένας τέτοιος δείκτης). Ορίζεται σαν το ποσοστό των ωρών στο έτος στο οποίο η τιμή φωτισμού σε κάποιο σημείο του χώρου είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή σχεδιασμού (π.χ. 500 lux) όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Η τιμή της DA προφανώς επηρεάζεται και από το ωράριο λειτουργίας.



Σχήμα 4.9: Εκτίμηση Αυτονομίας φωτισμού από ωριαίες τιμές φωτισμού σε κάποιο σημείο στο εσωτερικό χώρο.

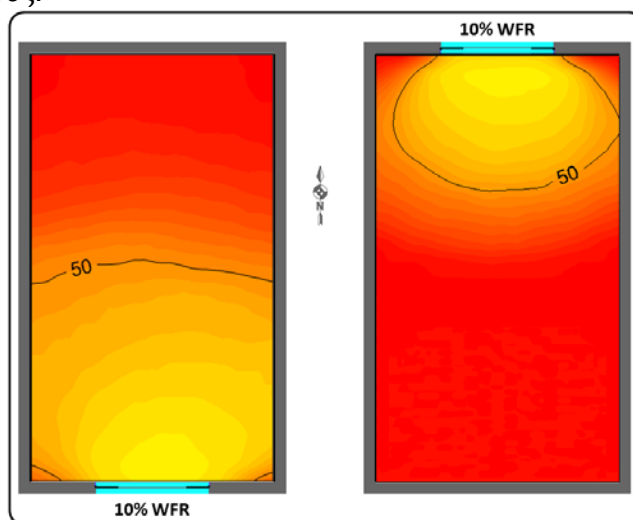
Μια παραλλαγή της DA είναι η συνεχής DA (cDA). Η διαφορά είναι η εξής : Αν για παράδειγμα η τιμή φωτισμού που απαιτείται από το σχεδιασμό είναι 500 lux και στο σημείο που εξετάζεται η τιμή κάποια ώρα είναι 250lux τότε ενώ η $DA=0$ η $cDA=250/500=0.5$. Δηλαδή λαμβάνεται υπόψη και το ποσοστό που χρειάζεται να συμπληρωθεί η απαιτούμενη. Προφανώς η προαναφερθείσα μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όποιο χρονικό διάστημα/ωράριο λειτουργίας χρειάζεται (π.χ. 08:00-16:00) . Έτσι στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών της αυτονομίας φωτισμού (τιμή ελέγχου 500 lux) σε ένα τυπικό χώρο (4x7x2.8 m) για δύο ποσοστά ανοιγμάτων , 10% και 20% επι του δαπέδου (Window to Floor Ratio, WFR). Διαπερατότητα υαλοπίνακα 0.65.



Σχήμα 4.10: Χωρική κατανομή στην επιφάνεια εργασίας τιμών DA_{500} lux για δύο διαφορετικές περιπτώσεις διαστάσεων ανοιγμάτων (WFR=Window to Floor Ratio).

⁵⁹ Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. Leukos, 3(1), 7-31

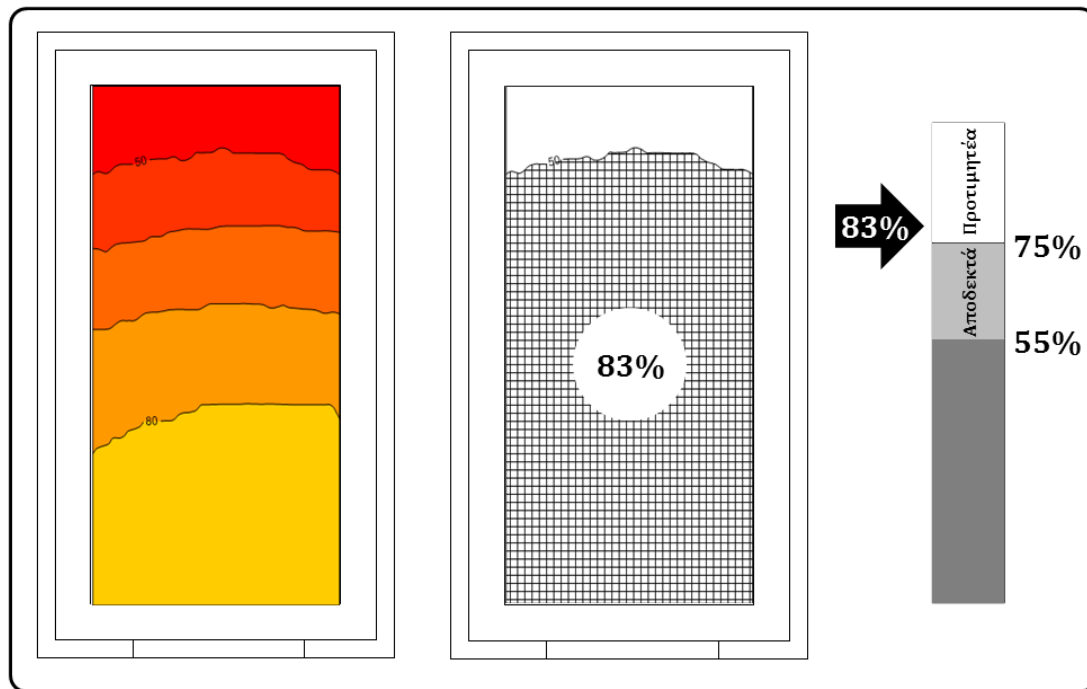
Παρατηρείστε το γεγονός της επίδρασης του μέγεθους του ανοίγματος. Προφανώς η χρήση της cDA είναι ακόμη περισσότερο ακριβής οσον αφορά τη συσχέτισή της με την εξοικονόμηση ενέργειας. Να ληφθεί υπόψη ότι αυτές οι τιμές (δηλ. της DA ή cDA) υπολογίζονται ανα σημείο. Προφανώς όταν εξετάζεται εξοικονόμηση ενέργειας ορίζεται μια περιοχή της οποίας τα φωτιστικά ελέγχονται από κάποιο αισθητήρα και σε αυτή την περιοχή υπολογίζεται η αυτονομία φωτισμού. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της κατανομής DA (τιμή ελέγχου 500 lux) για δύο προσανατολισμούς.



Σχήμα 4.11: Κατανομή DA_{500} lux για δύο προσανατολισμούς.

Μια δυσκολία που εμφανίζει η χρήση των τιμών DA (ή cDA) είναι το γεγονός ότι εξαρτώνται από το σημείο στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός. Συνεπώς όταν μας ενδιαφέρει μια επιφάνεια θα πρέπει να υπολογισθούν οι τιμές DA σε ένα αριθμό σημείων επι αυτής της επιφάνειας. Έτσι αναπτύχθηκε ένας δείκτης ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξετάσει την επάρκεια του φυσικού φωτισμού σε κάποιο χώρο. Ονομάζεται χωρική αυτονομία φωτισμού (Spatial Daylight Autonomy, sDA) και ορίζεται σαν το ποσοστό της επιφάνειας που εξετάζεται. Μια τυπική ανάλυση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας π.χ την $sDA_{300 \text{ lux}/50\%}$. Δηλ. το ποσοστό του χώρου στο οποίο τα επίπεδα φυσικού φωτισμού είναι $>300 \text{ lux}$ στο 50% του χρόνου λειτουργίας (08:00-18:00) θεωρώντας χρήση σκίασης για τον περιορισμό του άμεσου ηλιακού φωτισμού⁶⁰.

⁶⁰ IES LM 83:2012, "Approved Method: Ies Spatial Daylight Autonomy (Sda) And Annual Sunlight Exposure (Ase)"



Σχήμα 4.12: Τυπικό παράδειγμα χρήσης της χωρικής αυτονομίας φωτισμού (sDA)

Στις προαναφερθείσες περιπτώσεις η τιμή της αυτονομίας φωτισμού καθορίζεται με την χρήση ενός κατώτερου όριου (π.χ. 300 ή 500 lux). Ενδιαφέρει όμως η εισαγωγή ενός ανώτερου όριου (οπότε λέγεται maximum Daylight Autonomy, mDA) γιατί ένας τέτοιος δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για να συνδεθεί με την πιθανότητα θάμβωσης είτε με αυξημένα ηλιακά κέρδη. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι 10 φορές την τιμή της κατώτερης⁶¹. Μια παραλλαγή των DA είναι και το ποσοστό κορεσμού από τον φυσικό φωτισμό (Daylight Saturation Percentage, DSP). Χρησιμοποιείται σαν κριτήριο σχεδιασμού αιθουσών σχολείων από την Collaborative for High Performance Schools (CHPS, www.chps.net) και ορίζεται ως εξής⁶²:

$$DSP = cDA_{430 \text{ lux}} - 2 \cdot mDA_{4300 \text{ lux}} \quad (4.7)$$

Ο υπολογισμός πραγματοποιείται σε σημεία κανάβου (1.21 m x 1.21 m) στο ωράριο 8:00-15:00 Δευτέρα- Παρασκευή για τους μήνες λειτουργίας του σχολείου. Παργατοποιώντας τον υπολογισμό μπορεί να εκτιμηθεί η περιοχή στην οποία ικανοποιούνται τα κριτήρια του DSP κατά π.χ. ποσοστό 50%.

Ετήσια έκθεση σε ηλιακό φωτισμό (Annual Sunlight Exposure)

Ο δείκτης sDA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα με την εκτίμηση της έκθεσης σε άμεσο ηλιακό φως. Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται σε ετήσια

⁶¹ Rogers 2006 Rogers Z. 2006. Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations in the Sensor Placement Optimization Tool. Boulder, Colorado, USA. Architectural Energy Corporation

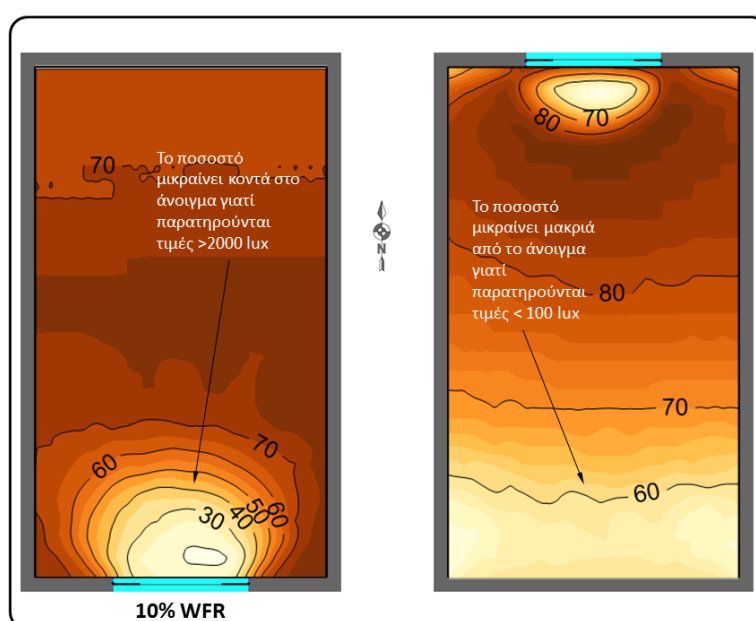
⁶²

http://energydesignresources.com/media/1702/EDR_DesignBriefs_daylightmetrics.pdf?tracked=true

βάση (Annual Sunlight Exposure) σαν το ποσοστό του χώρου το οποίο δέχεται άμεσο ηλιακό φως (δηλ. τιμές φωτισμού > 1000 lux) για περισσότερες από 250 ώρες το χρόνο.

UDI

Οι Χρήσιμες Τιμές Φωτισμού ⁶³(UDI, Useful Daylight Illuminance) παράγονται με την ίδια στατιστική επεξεργασία ωριαίων τιμών με τον εξής τρόπο: Υπολογίζεται το ποσοστό των ωρών με φωτισμό <100 lux, στο διάστημα 100-2000 lux και στο διάστημα >2000 lux. Ο σκοπός του διαχωρισμού είναι να χρησιμοποιηθούν οι τιμές στο διάστημα 100-2000 lux (χρήσιμες). Τιμές μεγαλύτερες από 2000 lux θεωρείται ότι πιθανόν να οδηγούν σε συνθήκες θάμβωσης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή (στην επιφάνεια εργασίας) του UDI 100-2000, για ένα χώρο (4x7x2.8 μ) νότιου και βόρειου προσανατολισμού (10% WFR, $T_{vis}=0.6$)



Σχήμα 4.13: Χωρική κατανομή τιμών UDI. Ενδιαφέρει να επιτυγχάνονται μεγάλα ποσοστά σε όλη την έκταση του χώρου

Daylighting dashboard

Σύστημα⁶⁴ με το οποίο εξετάζονται στα αρχικά στάδια σχεδιασμού 8 επιμέρους παράμετροι που σχετίζονται με τον φυσικό φωτισμό: α) Η επάρκεια φωτισμού β)Κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους του εξεταζόμενου χώρου με φυσικό φωτισμό γ) Ελεγχος άμεσου φωτισμού και διαχείριση διάχυτου δ)Εξοικονόμηση ενέργειας ε)Επίδραση στο κερκαδιανό ρυθμό στ) Μέγεθος των ανοιγμάτων ζ)Θέα η)Ηλιακά κέρδη . Για κάθε μια από τις παραπάνω παραμέτρους χρησιμοποιείται ένας δείκτης. Οι υπολογισμοί αυτών των δεικτών πραγματοποιούνται στην επιφάνεια εργασίας (0.8 μ από το δάπεδο) για αίθριο

⁶³ Nabil A, & Mardaljevic J. (2005a). Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. Lighting Research & Technology, 37(1), 41-59

⁶⁴ RP Leslie MArch, LC Radetsky BS and AM Smith MS, "Conceptual design metrics for daylighting", Lighting Res. Technol. 2012; 44: 277-290

και νεφοσκεπή ουρανό σε επιλεγμένες ώρες και ημέρες οι οποίες ταιριάζουν με το είδος και χρήση του χώρου. Στην εργασία τους οι Leslie et al. Χρησιμοποίησαν σαν ημέρες τις 21/3, 21/6/21/9 και 21/12 και οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τις ώρες 9:00 πμ, 12:00 και 15:00 .

Η προσέγγιση για την εκτίμηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται είναι η εξής :

α) Η επάρκεια φωτισμού

Εκτίμηση της μέσης τιμής φωτισμού στο επίπεδο εργασίας και σύγκρισή της με μια ελάχιστη τιμή (η ελάχιστη που απαιτείται από τη δραστηριότητα) και μια μέγιστη. Η μέγιστη που επελέγη είναι 5000 lux σύμφωνα με την απαίτηση του κριτηρίου IEQ 8.1 , LEED 2009.

β)Κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους του εξεταζόμενου χώρου με φυσικό φωτισμό

Εκτίμηση του ποσοστού της επιφάνειας εργασίας με τιμή φωτισμού μεγαλύτερη από την ελάχιστη.

γ) Ελεγχος άμεσου φωτισμού και διαχείριση διάχυτου

Εκτίμηση του ποσοστού των σημείων μέτρησης στα οποία ο φωτισμός είναι μεγαλύτερος από τον άμεσο φωτισμό λόγω ήλιου. Ανα εποχή προφανώς εκτιμάται και διαφορετική τιμή για τον άμεσο φωτισμό.

δ)Εξοικονόμηση ενέργειας

Υπολογίζεται η αυτονομία φυσικού φωτισμού (βλ. παραπάνω)

ε)Επίδραση στο κερκαδιανό ρυθμό

Δείκτης με τιμές από 0-24 με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη ο συνδυασμός τιμής φωτισμού, φασματικής σύστασης και διάρκειας.

στ) Μέγεθος των ανοιγμάτων

Εκτίμηση του λόγου Επιφάνεια Ανοιγμάτων / Επιφάνεια δαπέδου

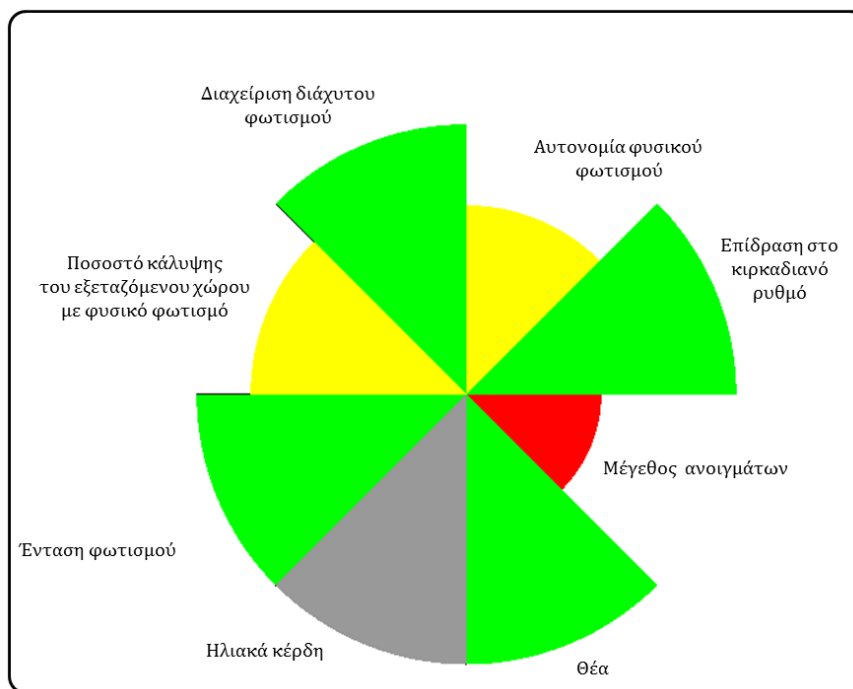
ζ)Θέα

Οπτική επαφή με ουρανό ή/και έδαφος

η)Ηλιακά κέρδη

Εκτίμηση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο δια το εμβαδό του χώρου($W/m^2/ημέρα$).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κυκλικό διάγραμμα με κάθε παράμετρο να ανάγεται σε τρεις κατηγορίες και να χρησιμοποιείται διαφορετικό χρώμα π.χ. το τμήμα του διαγράμματος που αναφέρεται στο μέγεθος των ανοιγμάτων έχει χρώμα πράσινο αν ο λόγος ανοιγμάτων/δαπέδου είναι >20%, κίτρινο αν ο λόγος αυτός βρίσκεται ανάμεσα σε 10-20% και κόκκινο αν <10%. Το τμήμα του διαγράμματος που αναφέρεται στην εξοικονόμηση ενέργειας χρωματίζεται πράσινο αν η αυτονομία φυσικού φωτισμού βρίσκεται ανάμεσα σε 80-100%, κίτρινο αν 50-79% και κόκκινο αν <50%. Σχηματικά ένα τυπικό κυκλικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.14: Αναπαράσταση (ενδεικτική, όχι πραγματική) που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της επίδρασης του φυσικού φωτισμού.

LEED 2009

Στο σύστημα περιβαλλοντικής και ενεργειακής αξιολόγησης LEED 2009 η έκταση της ζώνης φυσικού φωτισμού μπορεί να εκτιμηθεί είτε χρησιμοποιώντας μια απλοποιημένη μέθοδο είτε προσομοιώσεις είτε μετρήσεις στο κτίριο μετά την ανέγερση του. Η απλοποιημένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου και την διαπερατότητα του υαλοπίνακα αγνοώντας ανακλαστικότητες, σκίαση (απαιτεί όμως την ύπαρξη της) και εξωτερικά εμπόδια. Στις περιοχές στις οποίες η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρεί ότι υπάρχει επάρκεια φυσικού φωτισμού ικανοποιείται η σχέση:

$$0.15 < T_{vis} * WWR < 0.18 \quad (4.8)$$

όπου T_{vis} η διαπερατότητα του υαλοπίνακα στο ορατό τμήμα του φάσματος και WWR (Window to Wall Ratio) ο λόγος του ανοίγματος προς την επιφάνεια του τοίχου. Συνολικά θα πρέπει στο 75% του συνόλου της έκτασης των συχνά χρησιμοποιούμενων χώρων του κτιρίου (π.χ. οι διάδρομοι εξαιρούνται) να ισχύει η προαναφερθείσα σχέση.

Αν χρησιμοποιηθεί προσομοίωση χρησιμοποιείται η κατανομή λαμπρότητας αίθριου ουρανού και πρέπει να ικανοποιηθεί η παρακάτω απαίτηση στο 75% του συνόλου της έκτασης των συχνά χρησιμοποιούμενων χώρων του κτιρίου (2 σημεία) ή αν το ποσοστό που θα επιτευχθεί είναι 90% τότε τα σημεία που απονέμονται είναι 3. Έτσι για δύο ημέρες που βρίσκονται σε διάστημα δεκαπέντε ημερών γύρω από την 21/9 και 21/3 και για δύο ώρες 9:00 και 15:00 οι τιμές του φυσικού φωτισμού θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ 300-3000 lux. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω ο κανονισμός LM 83-2012 παρουσιάζει την αλλαγή που έχει επέλθει στον τρόπο υπόλογισμού της επάρκειας του φυσικού φωτισμού. Η μεθοδολογία είναι μάλλον πολύπλοκη και κατα κύριο λόγο

βασίσθηκε στην δυνατότητα των αλγορίθμων και προφανώς στην διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ.

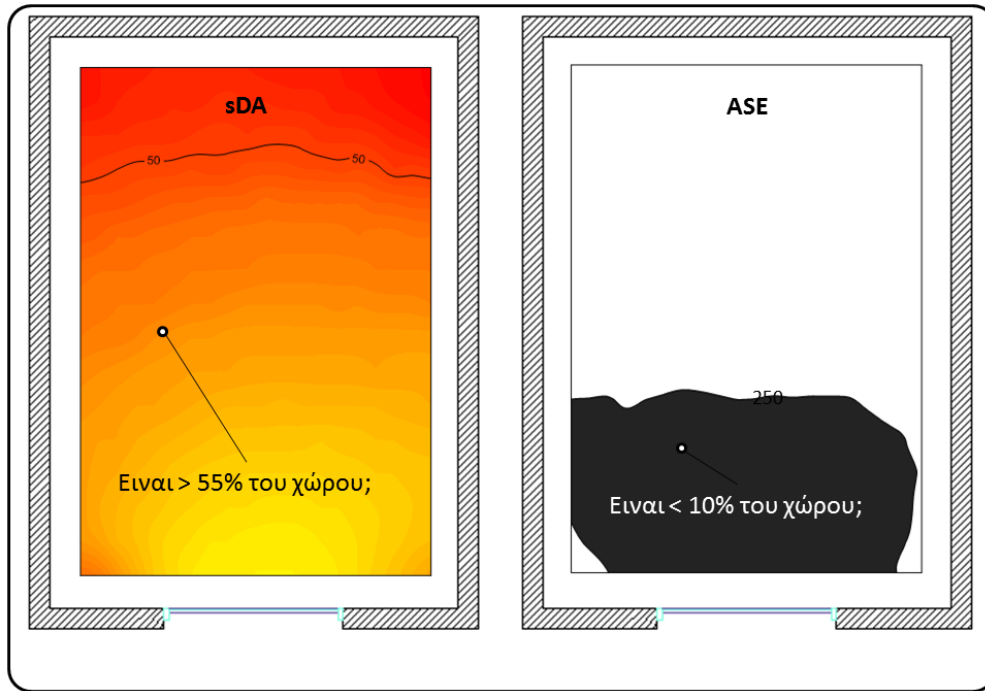
Σύμφωνα με τον LM 83-2012⁶⁵, παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό είναι α) $sDA_{300 \text{ lux}/50\%}$ και β) $ASE_{1000 \text{ lux}/250 \text{ h}}$. Η χωρική αυτονομία φωτισμού $sDA_{300 \text{ lux}/50\%}$ ορίζεται ως το ποσοστό του χώρου (επιφάνεια εργασίας) στο οποίο οι τιμές φωτισμού είναι μεγαλύτερες από 300 lux στο 50% του χρόνου λειτουργίας σε ετήσια βάση (ωράριο 8:00-16:00). Προτιμώμενη τιμή για τη συγκεκριμένη παράμετρο είναι το 75% ενώ η ελάχιστη αποδεκτή 55%. Ο υπολογισμός της χωρικής αυτονομίας δεν είναι ιδιαίτερα απλός γιατί χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και η λειτουργία με δυναμικό τρόπο τυχόν σκιάστρων (εσωτερικές περσίδες, roller κλπ). Π.χ αν δεν έχει αποφασισθεί το σύστημα σκίασης, (δεν αναφερόμαστε σε σταθερά συστήματα που υπάρχουν στην κατασκευή όπως πρόβολοι, πλευρικά κλπ) υιοθετείται εσωτερικό ρόλλερ με διαπερατότητα στο ορατό 5%. Το συγκεκριμένο σύστημα λειτουργεί ως εξής. Κάθε ώρα (ωριαίοι υπολογισμοί στο έτος) που η τιμή του άμεσου φωτισμού (δηλ. λαμβανοντας υπόψη μόνο την συνεισφορά του ήλιου) είναι $\geq 1000 \text{ lux}$ σε περισσότερο από 2% της έκτασης της επιφάνειας εργασίας το σύστημα της σκίασης ενεργοποιείται και προφανώς τροποποιούνται οι τιμές φωτισμού.

Η ετήσια έκθεση σε ηλιακό φως (ASE) υπολογίζεται σε ωριαία βάση πάλι λαμβάνοντας μόνο τον άμεσο ηλιακό φωτισμό (δηλ. σε υπολογιστικό επίπεδο δεν λαμβάνονται υπόψη εσωτερικές ανακλασεις και διάχυτος φωτισμός από τον ουρανό). Μια οριακά αποδεκτή τιμή για την $ASE_{1000 \text{ lux}/250 \text{ h}}$ είναι το 7%. Δηλ. άμεσος ηλιακός φωτισμός ($\geq 1000 \text{ lux}$) δεν παρατηρείται για περισσότερο από 250 ώρες σε ετήσια βάση σε ποσοστό μικρότερο από το 7% της επιφάνειας εργασίας. Προφανώς η επιφάνεια εργασίας υπολογιστικά προσεγγίζεται με ένα κάναβο σημείων αρκετά πυκνών ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του χώρου.

LEED v.4

Σύμφωνα με τον σύστημα ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης LEED v.4 οι παραπάνω δύο παράμετροι σχεδιασμού (δηλ. sDA & ASE) χρησιμοποιούνται για την επάρκεια σχεδιασμού όσον αφορά τον φυσικό φωτισμό ως εξής: Θα πρέπει (π.χ. σε χώρους γραφείων) να επιτευχθεί $sDA_{300 \text{ lux}/50\%}$ τιμή 55% (2 σημεία) ή 75% (3 σημεία) και $ASE_{1000 \text{ lux}/250 \text{ h}} \leq 10\%$. Ο κάναβος υπολογισμού είναι μικρότερος των 60 cm.

⁶⁵ IES LM 83:2012, "Approved Method: Ies Spatial Daylight Autonomy (Sda) And Annual Sunlight Exposure (Ase)"



Σχήμα 4.14: Αναπαράσταση υπολογισμού των κριτηρίων sDA & ASE

5. ΧΡΗΣΗ ΜΑΚΕΤΩΝ

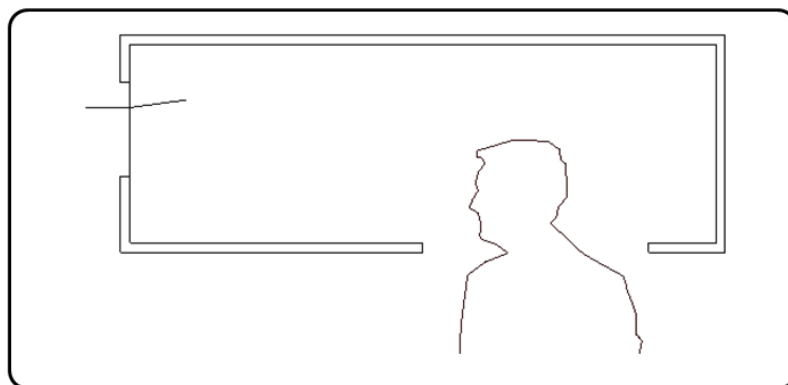
Τα φυσικά μοντέλα σε μικρή κλίμακα (μακέττες) αποτελούσαν και εξακολουθούν να αποτελούν πάγια μελετητική επιλογή για την εκτίμηση του φυσικού φωτισμού (και όχι μόνο). Είναι βέβαια φυσικό αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να οπτικοποιήσουν τις περισσότερες από τις σχεδιαστικές επιλογές καθώς επίσης και να διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ των μελετητικών ομάδων και των τελικών χρηστών.

Σε αντίθεση με τις μακέττες για την ακουστική αυτές για τις μελέτες φυσικού φωτισμού δεν χρειάζονται διορθώσεις λόγω κλίμακας αφού το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που αλληλεπιδρά με αυτά είναι σημαντικά μικρότερο από το μέγεθος τους. Τα κτήρια που έχουν μοντελοποιηθεί με αυτό τον τρόπο (εφόσον υπάρχει ταύτιση των γεωμετρικών στοιχείων και των ιδιοτήτων των επιφανειών που τα απαρτίζουν) παρέχουν την ίδια οπτική εντύπωση με τον αντίστοιχο πραγματικό χώρο γεγονός που αποτελεί και ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους.

Ανάμεσα στη ποικιλία τεχνικών που είναι ανταγωνιστικές (π.χ. συνθετικές εικόνες), τα μοντέλα κλίμακας παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Αντιπροσωπεύουν την απλούστερη «γλώσσα» επικοινωνίας.
2. Με σχετικά απλή κατασκευή μπορεί να αποδοθεί η εντύπωση του πραγματικού χώρου.
3. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση σχετικά πολύπλοκων γεωμετρικά χώρων. Να σημειωθεί εδώ ότι το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα μοντέλα είναι ότι επιτρέπουν την χρήση των πραγματικών υλικών. Σε αντιστοιχία με τα μοντέλα σε υπολογιστή όπου θα πρέπει να έχουν περιγραφεί μαθηματικά στα αρχικά στάδια επεξεργασίας, διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα.
4. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν όχι μόνο ποσοτικά δεδομένα φωτισμού (δηλ. μετρήσεις) αλλά και φωτογραφίες. Φυσικά τέτοιου είδους πληροφορίες βοηθούν στην έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων (π.χ. με την οπτική άνεση).
5. Μπορεί να δώσουν πληροφορίες για την δυναμική αλλαγή του φωτισμού στο χώρο μόνο και μόνο με την τοποθέτηση τους σε πραγματικό ουρανό κατά την διάρκεια της ημέρας.

Μπορούν να κατασκευαστούν πολύ μικρές μακέττες για γρήγορη/μικρού κόστους εξέταση εναλλακτικών σεναρίων με τη βοήθεια «ενδοσκοπίου», ή μεγαλύτερες ώστε να μπορεί κάποιος να έχει άμεση αντίληψη της κατανομής φωτισμού στο εσωτερικό.



Σχήμα 5.1: Η κατασκευή μακετών με διαστάσεις που επιτρέπουν την εξέτασή τους από το εσωτερικό είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις περιπτώσεις πολύπλοκων γεωμετρικά/οπτικά/χρωματικά προσόψεων.

Η κλίμακα του μακέτας εξαρτάται από το είδος της μελέτης (ηλιασμός σε αστικό περιβάλλον, κατανομή φωτισμού στο εσωτερικό κλπ) και τον τύπο του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί (π.χ. μετρήσεις, φωτογραφίες).

Η ταξινόμηση των μακετών σε σχέση με την κλίμακα τους παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα.

Κλίμακα	Είδος ανάλυσης
1/500-1/200	Ηλιασμός σε αστικό περιβάλλον (σκίαση από γειτονικά κτήρια), φωτογράφιση
1/200-1/50	Κατανομή φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό συμπεριλαμβανομένης της κατανομής/χρονικής εξέλιξης ηλιακών ιχνών
1/100-1/10	Λεπτομερής φωτογραφική αποτύπωση του εσωτερικού. Επιδιώκεται ομοιότητα με την πραγματικότητα.
1/10-1/1	Κατασκευή/ανάλυση συστημάτων φυσικού φωτισμού-σκίασης (ιδίως συστήματα με ανακλαστικές επιφάνειες). Εκτίμηση της επίδρασης τους στους χρήστες του χώρου (συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης της χρήσης τους)

Πίνακας 5.1: Σχέση κλίμακας και χρήσης μακεττών σύμφωνα με τους M. Bodart, A. Deneyer, A. De Herde and P. Wouters⁶⁶ και IEA⁶⁷.

⁶⁶ M. Bodart, A. Deneyer, A. De Herde and P. Wouters, "A Guide for Building Daylight Scale Models", Architectural Science Review, Volume 50.1, 2007

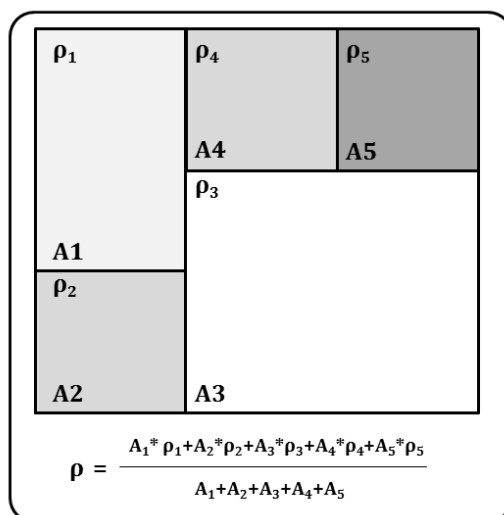
⁶⁷ International Energy Agency (2000). Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, Report of the IEA SHC Task 21/ ECBCS, Annex 29.

Για τις περισσότερες φωτομετρικές μελέτες δεν απαιτούνται ακριβείς οπτικές λεπτομέρειες αλλά απλά το μοντέλο να είναι ακριβές όσον αφορά την κλίμακα και οι επιφάνειες του να έχουν την ίδια ανακλαστικότητα με τις πραγματικές.

Είναι ιδιαίτερα σημαντική η δυνατότητα μέρους της μακέτας να μπορεί να αποσυνδέεται από αυτή ώστε να δίνεται η ευχέρεια μελέτης εναλλακτικών σεναρίων (π.χ. διαφορετικά συστήματα σκίασης).

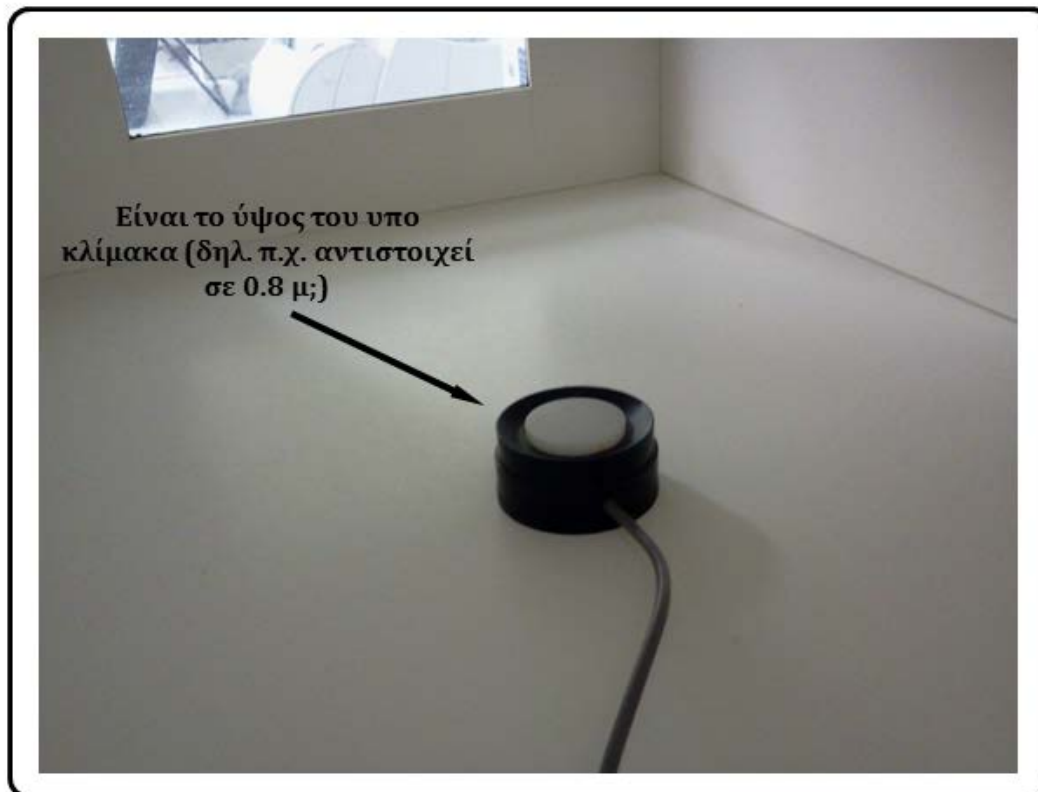
Εαν ο σκοπός είναι οι μετρήσεις φωτισμού θα πρέπει να προσεχθούν τα εξής σημεία:

- Οι στιλπνές επιφάνειες πρέπει να μοντελοποιούνται με χρήση των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και στην πραγματικότητα, αφού η ανακλαστικότητα δεν εξαρτάται μόνο από το χρώμα αλλά και από την στιλπνότητα της επιφάνειας.
- Αν στον πραγματικό χώρο μια επιφάνεια αποτελείται από ένα σύνολο μικρότερων επιφανειών με διαφορετικές ανακλαστικότητες τότε μπορεί (για ταχύτητα, ευκολία αλλά και διατήρηση της ακρίβειας) να αντικατασταθεί με μια επιφάνεια η οποία έχει την μέση ανακλαστικότητα (προσοχή : υπολογίζεται η σταθμισμένη ανα επιφάνεια μέση τιμή).



Σχήμα 5.2: Εκτίμηση της μέσης ανακλαστικότητας επιφάνειας που αποτελείται από μικρότερες επιφάνειες μια διάφορες τιμές ανακλαστικότητας η κάθε μία.

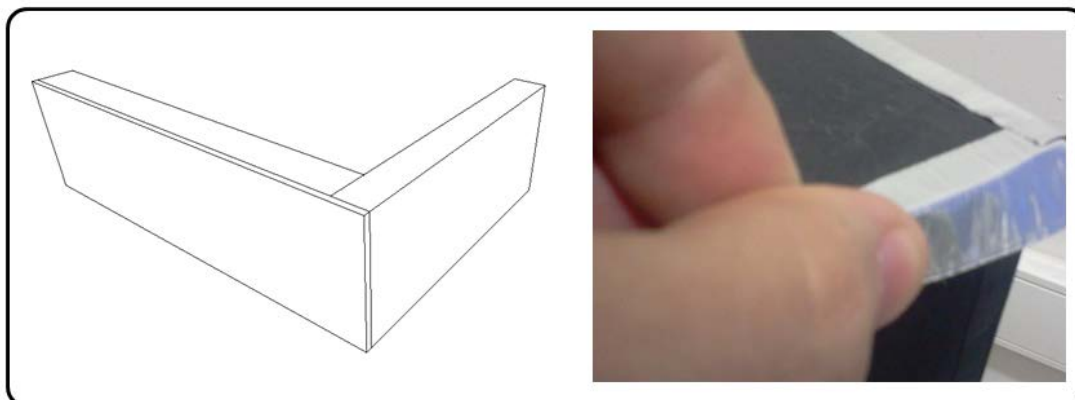
- Σημαντική είναι η ακριβής κατασκευή των ανοιγμάτων καθώς επίσης και των ιδιοτήτων των υαλοπινάκων που θα χρησιμοποιηθούν (τουλάχιστον όσον αφορά την διαπερατότητα στο ορατό) ιδίως όταν δέχονται φωτισμό σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Σε μικρά μεγέθη η χρήση τυπικών (για το κτήριο) παχών υαλοπινάκων είναι δύσκολη. Γενικά υαλοπίνακες πάχους 3mm μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κατάλληλη επιλογή της διαπερατότητας τους. Αν πραγματοποιηθούν μετρήσεις χωρίς υαλοπίνακα θα πρέπει εκ των υστέρων να διορθωθούν οι μετρήσεις.
- Η διάσταση του μοντέλου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η παρουσία του αισθητήρα στο εσωτερικό του να μην επηρεάζει τις ίδιες τις μετρήσεις.



Σχήμα 5.3: Χρειάζεται προσοχή στην επιλογή των αισθητήρων. Να σημειωθεί ότι προφανώς οι διαστάσεις τους πρέπει να είναι τέτοιες ώστε η μέτρηση να πραγματοποιείται στο υψος της επιφάνειας εργασίας

Γενικά η εντύπωση που επικρατεί είναι ότι με τα μοντέλα μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια. Αναλύσεις όμως δείχνουν ότι λόγω διαφόρων σφαλμάτων⁶⁸ (π.χ. γεωμετρικών, ανακλαστικότητας) το λάθος των μετρήσεων μπορεί εύκολα να ξεπεράσει το 20%.

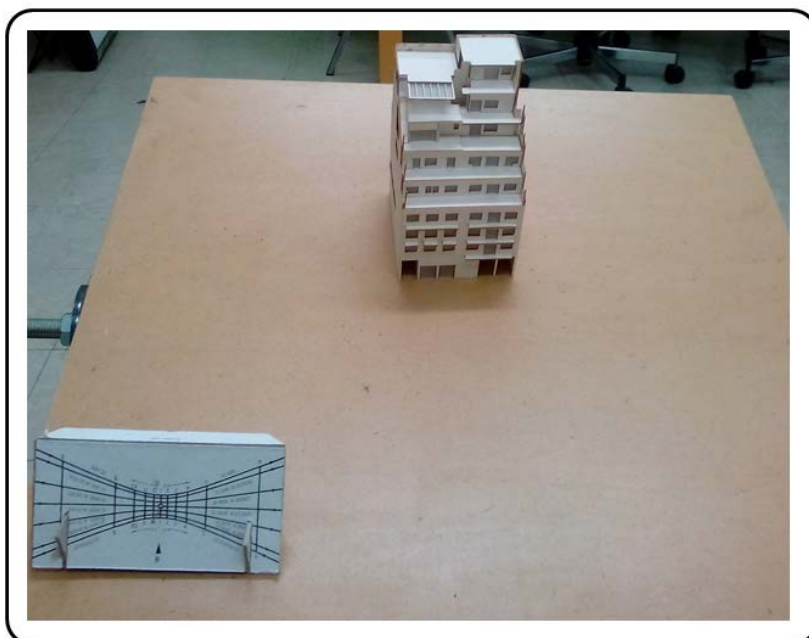
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για τις διάφορες επιφάνειες (τοίχοι κλπ) ώστε να μην είναι περατά στο φως καθώς επίσης και στις ενώσεις των επιφανειών μεταξύ τους.



⁶⁸ Cannon-Brookes, S.W.A. (1997). Simple scale models for daylighting design: Analysis of sources of error in illuminance prediction. *Lighting Research and Technology*, 29(3), 135-142

Σχήμα 5.4: Κόλληση ακμών μακέτας ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχει στο εσωτερικό φωτισμός από το εξωτερικό περιβάλλον. Στη δεξιά φωτογραφία χρησιμοποιείται μεταλλική αυτοκόλλητη ταινία.

Τα μοντέλα μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες πραγματικού ουρανού είτε να τοποθετηθούν σε τεχνητό ουρανό. Αν το μοντέλο πρόκειται να τοποθετηθεί σε παραγματικό ουρανό τότε θα πρέπει να προσανατολισθεί κατάλληλα. Είναι προφανές ότι η όποια μέτρηση ή φωτογράφιση πραγματοποιηθεί θα αναφέρεται στη συγκεκριμένη στιγμή (δηλ. στη συγκεκριμένη θέση του ήλιου). Με αυτό τον τρόπο όμως είναι πολύ δύσκολο να εξετασθούν οι τυπικές περιπτώσεις των ακραίων τροχιών του ήλιου κατά τη διάρκεια του θερινού/χειμερινού ηλιοστάσιου (εκτός και αν περιμένετε!). Συνεπώς επειδή είναι δύσκολο να τροποποιηθεί η θέση του ήλιου , τροποποιείται η θέση της μακέτας με τέτοιο τρόπο ώστε η θέση θέση του ήλιου σε σχέση με αυτή της μακέτας να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ώρα και ημέρα. Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα .



Σχήμα 5.5: Εκτίμηση θέσης ήλιου (δηλ. και εκτίμηση χρόνου) με τη βοήθεια ηλιακού ρολογιού που τοποθετείται στην τράπεζα με την μακέτα.

Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό με μια περιστροφή της μακέτας να οπτικοποιηθεί η μετακίνηση των ηλιακών ιχνών στο εσωτερικό. Με ένα μειονέκτημα : αν υπάρχουν πολλά ανοίγματα λόγω της κλίσης της μακέτας σε σχέση με το έδαφος η θέαση μέσα από αυτά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Προφανώς η έκθεση σε πραγματικό πλήρως νεφοσκεπή ουρανό επιτρέπει την μέτρηση των παραγόντων φυσικού φωτισμού. Προσοχή χρειάζεται και το άνοιγμα στο οποίο τοποθετείται η φωτογραφική μηχανή ώστε να αποφευχθεί κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης η είσοδος φωτός. Εξαιτίας της δυσκολίας εργασίας στο εξωτερικό περιβάλλον εναλλακτικά αντί του πραγματικού ουρανού μπορεί να χρησιμοποιηθεί τεχνητός ουρανός για τον διάχυτο φωτισμό και τεχνητός ήλιος για τον άμεσο. Μερικές παρατηρήσεις :

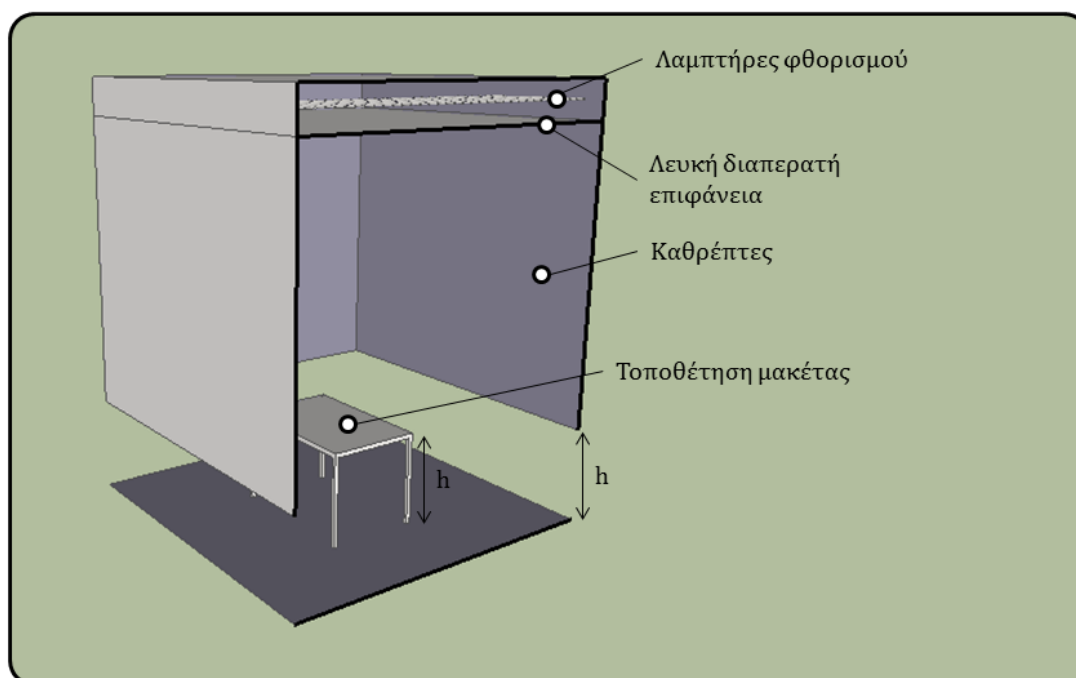
- Στον τεχνητό ουρανό τα επίπεδα φωτισμού είναι μικρότερα από αυτά του πραγματικού (π.χ. για όμοιες συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού). Δεν είναι ιδιαίτερο πρόβλημα όταν μετρώνται λόγοι (παράγοντες φυσικού φωτισμού) , υπάρχει όμως περίπτωση τα επίπεδα φωτισμού εντός της μακέτας να είναι πολύ μικρά. Ο συνδυασμός τους με φωτόμετρο μικρής ευαισθησίας μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα.
- Πιθανόν να χρειαστεί μια επιφάνεια η οποία θα αντιπροσωπεύει το έδαφος ιδίως σε περιπτώσεις που το ανακλώμενο από το έδαφος φως επηρεάζει σημαντικά τα επίπεδα φωτισμού στο εσωτερικό.
- Η θέση της μακέτας πρέπει να είναι συμβατή με τον ορίζοντα του τεχνητού ουρανού.
- Το μέγεθος της μακέτας παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην μέτρηση των επιπέδων φωτισμού. Στην πραγματικότητα ο ουρανός (δηλ. η φωτεινή πηγή) βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από το κτήριο. Στον τεχνητό ουρανό όμως, ιδίως αν η μακέτα είναι μεγάλων διαστάσεων (σε σχέση με τις διαστάσεις του ουρανού) παρουσιάζεται το σφάλμα παράλλαξης δηλ. σημεία στο εσωτερικό της μακέτας δέχονται φως από περιοχές του ουρανού που βρίσκονται σε διαφορετική γωνιακή απόσταση από τις αντίστοιχες των περιοχών στον πραγματικό ουρανό.



Σχήμα 5.6: Παρατηρήστε τις διαστάσεις των πηγών φωτισμού. Λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων τους αν η μακέτα έχει μεγάλες διαστάσεις, οι μετρήσεις επηρεάζονται από σφάλματα παράλλαξης.

Μερικοί τύποι τεχνητών ουρανών παρουσιάζονται παρακάτω:

Τεχνητός ουρανός (Κουτί)



Σχήμα 5.7: Τεχνητός ουρανός για προσομοίωση νεφοσκεπούς ουρανού. Γενικά υπάρχουν στους κάθετους τοίχους καθρέπτες ενώ η οροφή είναι φωτιζόμενη. Λόγω των ανακλάσεων επιτυγχάνεται κατανομή λαμπρότητας παρόμοια με αυτή του πλήρως νεφοσκεπούς ουρανού κατά CIE.

Είναι στην πράξη ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Η επιφάνεια της οροφής είναι φωτεινή με τη μέγιστη ομοιομορφία που μπορεί να επιτευχθεί. Συνήθως χρησιμοποιούνται λαμπτήρες φθορισμού παράλληλα και σε πυκνή διάταξη πίσω από διαχυτικό υλικό. Οι κάθετες πλευρές του ουρανού είναι καθρέπτες. Από τις διαδοχικές ανακλάσεις που συμβαίνουν η φωτεινή οροφή «φαίνεται» να εκτείνεται μέχρι το άπειρο (θεωρητικώς). Επίσης λόγω του ίδιου φαινομένου, η λαμπρότητα κοντά στον ορίζοντα είναι μικρότερη από αυτή της οροφής. Με κατάλληλη επιλογή της θέσης των λαμπτήρων, του διαχυτικού υλικού και των κατοπτρικών επιφανειών η κατανομή λαμπρότητας μπορεί να μιμηθεί αυτή του πλήρως νεφοσκεπούς ουρανού (δηλ. η λαμπρότητα κοντά στον ορίζοντα να είναι τρεις φορές μικρότερη από την ζενίθια λαμπρότητα). Τέτοιου είδους ουρανοί κατασκευάζονται σχετικά εύκολα και σε διάφορα μεγέθη. Φυσικά το μέγεθος των μοντέλων πρέπει να είναι αρκετά μικρότερο από το μέγεθος του ίδιου του ουρανού γιατί σε διαφορετική περίπτωση η παρουσία του μοντέλου επηρεάζει την κατανομή λαμπρότητας (και αυξάνονται τα σφάλματα παράλλαξης).

Ημισφαιρικός ουρανός Τύπος I

Πρόκειται για μια ημισφαιρική επιφάνεια στην οποία τοποθετούνται φωτιστικά στην περίμετρο του επιτυγχάνοντας συνήθως ομοιόμορφες κατανομές λαμπρότητας. Η επίτευξη ανομοιόμορφης κατανομής είναι σχετικά δύσκολη

αφού ο ουρανός λειτουργεί σαν σφαίρα ολοκλήρωσης. Παρουσιάζει σφάλματα που σχετίζονται με την οριοθέτηση του ορίζοντα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στο γεγονός της μη ύπαρξης φωτεινής ροής κάτω από το επίπεδο του ορίζοντα.

Ημισφαιρικός ουρανός Τύπος II

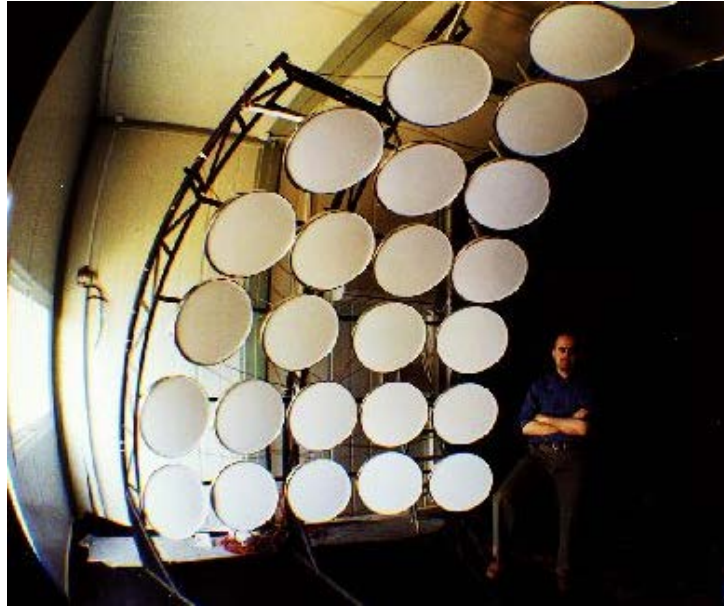
Σε αυτόν τον τύπο του ουρανού δεν υπάρχει επιφάνεια η οποία φωτίζεται από κάποιο σύστημα φωτιστικών αλλά τα ίδια τα φωτιστικά σώματα αποτελούν τον θόλο. Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί διαφόρων τύπων τέτοιοι ουρανοί είτε με τη χρήση λαμπτήρων πυρακτώσεως είτε με λαμπτήρες φθορισμού. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι η προσομοίωση διαφόρων τύπων κατανομής λαμπρότητας αφού με κάποιο σύστημα ελέγχου η φωτεινή ροή που προέρχεται από τα φωτιστικά μπορεί να ελέγχεται. Συνήθως χρησιμοποιούνται 145 φωτεινές πηγές⁶⁹ (αλλά υπάρχουν τεχνητοί ουρανοί με περισσότερες. Μια από τις δυσκολίες του σχεδιασμού είναι να καλυφθεί ολόκληρη η έκταση του θόλου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο θόλος και η κάλυψη από τις φωτεινές πηγές. Η περιοχή του ουρανού στην οποία δεν υπάρχουν φωτιστικά λαμβάνεται υπόψη μετά το περας των μετρήσεων με τη χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή.



Σχήμα 5.8: Τεχνητός ουρανός στο Τμ. Αρχιτεκτόνων Μηχ. Παν. Θεσσαλίας.

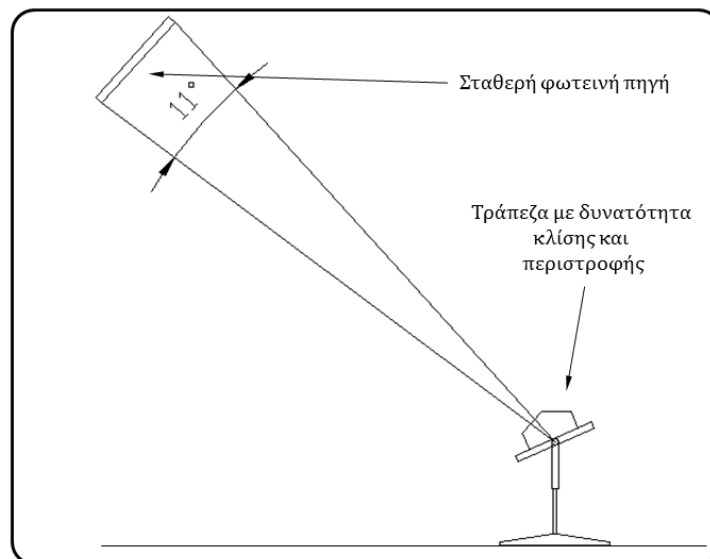
Λόγω του μεγάλου μεγέθους του συγκεκριμένου τύπου του τεχνητού ουρανού υπήρξαν διάφορες βελτιώσεις. Για παράδειγμα αντί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρος ο θόλος χρησιμοποιείται μόνο το 1/6 και το μοντέλο περιστρέφεται 6 φορές. Φυσικά οι μετρήσεις προστίθενται. Τέτοιου τύπου ουρανός υπάρχει στο LESO καθώς και στο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

⁶⁹ Tregenza, P.R., (1987), Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. *Lighting Research & Technology*, 19, 13-14



Σχήμα 5.9: Τεχνητός ουρανός στο Τμ. Φυσικής, Παν. Αθηνών

Πρόσφατα στο BBRI κατασκευάστηκε τεχνητός ουρανός μόνο με ένα φωτιστικό. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια το μοντέλο περιστρέφεται 145 φορές προκειμένου να καλυφθεί ο ουράνιος θόλος⁷⁰.



Σχήμα 5.10: Σχεδιαστική αναπαράσταση τεχνητού ουρανού με μια φωτεινή πηγή. Σε αυτή την περίπτωση περιστρέφεται η μακέτα και οι μετρήσεις προστίθενται. Προφανώς με όμοιο τρόπο μπορεί να τοποθετηθεί και πηγή με σχεδόν παράλληλες ακτίνες ώστε και η επίδραση του ήλιου να μπορεί να ληφθεί υπόψη

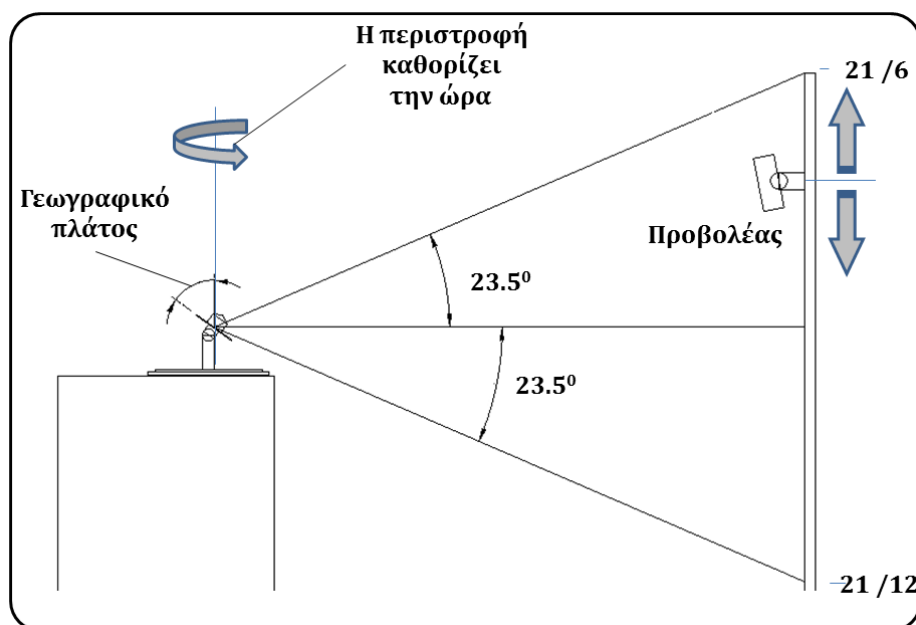
Η μελέτη της επίδρασης του ήλιου μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά εύκολα με την χρήση διάφορων συσκευών μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται

⁷⁰ Bodart M., Deneyer A., De Herde A., Wouters P., “Design of a new single-patch sky and sun simulator”, Lighting Research & Technology, 2006, vol. 38, n° 1

παρακάτω. Γενικά για αυτού του τύπου τις συσκευές τρεις ρυθμίσεις θα πρέπει να πραγματοποιούνται:

- Ρύθμιση όσον αφορά το γεωγραφικό πλάτος
- Ρύθμιση όσον αφορά την ημερομηνία
- Ρύθμιση όσον αφορά την ώρα της ημέρας

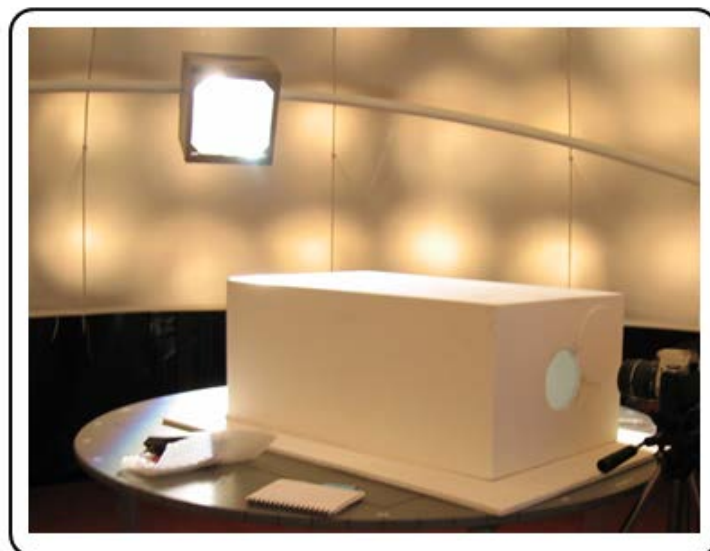
Φυσικά είναι χρήσιμη και η δημιουργία «τεχνητού ήλιου» δηλ. μια πηγή με όσον το δυνατό παράλληλη δέσμη ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της σκίασης σε μακέτες (heliodon). Η κατασκευή είναι σε γενικές γραμμές που επιτρέπει είτε μελέτη σκίασης λόγω εξωτερικών εμποδίων είτε την χρονική εξέλιξη των ηλιακών ιχνών στο εσωτερικό. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.11: Αρχή λειτουργίας τεχνητού ήλιου



Σχήμα 5.12: Οι πηγές φωτισμού που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν στενή δέσμη. Αν υπάρχει δαθεσιμότητα χώρου τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και φακός Fresnel για τον επιπλέον παραλληλισμό της φωτεινής δέσμης.



Σχήμα 5.13: Επάνω εικόνα : τεχνητός ήλιος στο Τμ. Αρχ./ΠΘ, κάτω εικόνα: Τεχνητός ήλιος εντός του ουρανού στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Μία περιστροφή της μακέτας αντιπροσωπεύει μία ημέρα ενώ η μετακίνηση της φωτεινής πηγής στον άξονα της την ημέρα του χρόνου. Σημαντικό πρόβλημα είναι η δημιουργία σχεδόν παράλληλης δέσμης φωτεινών ακτίνων (ο ήλιος εκτείνεται σε γωνία 0.5°)

Το συγκεκριμένο γεγονός αντιμετωπίζεται είτε με την απομάκρυνση του μοντέλου από την πηγή είτε με προσθήκη οπτικού συστήματος στην πηγή σε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί παράλληλη (σχεδόν) δέσμη. Τέτοια συστήματα είναι π.χ. τα παραβολικά κάτοπτρα ή οι φακοί fresnel.

Μια τυπική ανάλυση (πέραν της παρατήρησης) της επίδρασης των εξωτερικών εμποδίων είναι η φωτογράφιση/κινηματογράφιση της μακέτας κατά τη διάρκεια του θερινού και του χειμερινού ηλιοστασίου

Φυσικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορεί και σαν πηγή να χρησιμοποιηθεί και ο πραγματικός ήλιος εφόσον δοθεί η τράπεζα στην οποία εδράζεται το μοντέλο μπορεί να πραγματοποιήσει τις ρυθμίσεις που έχουν προαναφερθεί.

6.ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΕΣΗ

Συζήτηση για ποιότητα

Συνήθως απαραίτητο χαρακτηριστικό της ποιότητας του σχεδιασμού ενός συστήματος φωτισμού είναι και η ελαχιστοποίηση συνθηκών οπτικής δυσφορίας. Όμως η εστίαση π.χ. στην εξάλειψη της δυσφορίας δεν συνεπάγεται και επίτευξη αυτής της ποιότητας. Γενικά έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για την επίτευξη/χαρακτηρισμό της ποιότητας φωτισμού με την μεγαλύτερο τμήμα της έρευνας να σχετίζεται με τα τεχνητά συστήματα φωτισμού. Η ικανοποίηση των προσδοκιών των χρηστών του χώρου μέσα από το πλέγμα των διαφόρων περιορισμών που τίθενται στο σχεδιαστή έχει σαν αποτέλεσμα να αναδυθεί η έννοια της ποιότητας⁷¹.

Οι παράγοντες⁷² οι οποίοι επηρεάζουν την ποιότητα του φωτισμού εξαρτάται τόσο από παραμέτρους που μπορούν να εκτιμηθούν αντικειμενικά (αντίθεση, επίπεδα φωτισμού, λαμπρότητα πηγών, φωτεινότητα επιφανειών, φάσμα και χρωματική απόδοση αλλά και από παραμέτρους που χρειάζεται να διερευνηθούν με συμπεριφορικές αναλύσεις (π.χ. επίδραση θέας).

Οπτική άνεση

Μόνο η παροχή φυσικού φωτισμού σε κάποιο χώρο δεν εξασφαλίζει μονοσήμαντα συνθήκες οπτικής άνεσης η οποία σαν συνθήκη καθορίζεται από την απουσία δυσφορίας. Οπτική δυσφορία μπορεί να προκληθεί από ένα αριθμό αιτιών στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι προσδοκίες καθώς και η συνάφεια της σχεδίασης με τη χρήση του χώρου και επειδή αυτή αφορά το σύνολο του οπτικού πεδίου αντιμετωπίζεται διαφορετικά από την ικανότητα εκτέλεσης κάποιου έργου (όπου ενδιαφέρει μόνο το τμήμα του οπτικού πεδίου που καλύπτει την επιφάνεια εργασίας)⁷³].

Επιπρόσθετα με δεδομένο ότι ο φωτισμός σε κάποιο χώρο παρέχει την δυνατότητα στο μάτι να λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες από το περιβάλλον, η όποια διαταραχή αυτής της σύνδεσης μπορεί να προκαλέσει δυσφορία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η διαφοροποίηση των κατανομών λαμπρότητας ανάμεσα σε αυτά που οφείλονται σε φωτισμό και αυτών από την ανακλαστικότητα των αντικειμένων του χώρου. Η ύπαρξη πολύ λαμπρών μικρών περιοχών στην περιφεριακή όραση προκαλεί την εξέταση τους με την κεντρική. Αν δεν υπάρξει λόγος να εξετασθούν περαιτέρω η κεντρική όραση επιστρέφει στην προηγούμενη κατάσταση όμως η ύπαρξη των περιοχών αυτών προκαλεί δυσφορία.

⁷¹ Veitch, J. A. & Newsham, G. R. (1995). Quantifying Lighting Quality based on Experimental Investigations of End User Performance and Preference. Proc. of the 3rd European Conference on Energy-efficient Lighting. June 1995. Newcastle-upon-Tyne (UK.)

⁷² Miller, N. (1994). Pilot Study Reveals Quality Results. *Lighting Design + Application*. 24 (3). March. pp. 19-21.

⁷³ P. Boyce, "Human Factors in Lighting", CRC Press, ISBN: 978-0-7484-0949-5, 2003.



Σχήμα 6.1: Σημεία στα οποία πρέπει να δοθεί προσοχή κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού για την αποφυγή οπτικής δυσφορίας.

Κλασικό παράδειγμα είναι η δημιουργία πολύ λαμπρών περιοχών στα συστήματα σκίασης. Προφανώς η εκτέλεση εργασίας πολύ μικρής λεπτομέρειας σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού ή η συνεχής αλλαγή της λαμπρότητας προσαρμογής (π.χ. εισαγωγή στοιχείων σε υπολογιστή που συνοδεύεται με συνεχή αλλαγή περιοχών παρατήρησης (χαρτί-οθόνη)) είναι επίσης συνθήκες που μπορεί να προκαλέσουν δυσφορία.

Η εμφάνιση θάμβωσης μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά την άνεση των χρηστών καθώς επίσης και την απόδοσή τους. Η εκτίμησή της πραγματοποιείται με μεθοδολογίες που θα αναφερθούν στις επόμενες παραγράφους μετά από συσχέτιση υποκειμενικών αντιδράσεων με αντικειμενικές παραμέτρους. Ενώ είναι σχετικά εύκολο να μετρηθούν διάφορα μεγέθη (λαμπρότητες, κατανομή φωτισμού κλπ) σε κάποιο χώρο, η εκτίμηση των υποκειμενικών αντιδράσεων από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν τον χώρο επηρεάζεται και από παραμέτρους όπως π.χ. η θέα δηλ. το περιεχόμενο της εικόνας έχει σημαντική επίδραση στην εμφάνιση η όχι θάμβωσης.

Είναι τελικά η προτίμηση στα ανοίγματα αποτέλεσμα μιας εγγενούς μας τάσης να είμαστε σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (βιοφιλία)⁷⁴; Το συγκεκριμένο ερώτημα δεν είναι εύκολο να απαντηθεί γιατί θα πρέπει να εκτιμηθεί αν η σπουδαιότητα των ανοιγμάτων οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχουν μόνο φωτισμό (π.χ. φεγγίτες) , μόνο θέα ή και τα δύο; Είναι αρκετά συνηθισμένο χώροι με μεγάλα ανοίγματα να εκτιμώνται αρνητικά από πλευράς οπτικής άνεσης (π.χ. μεγάλες τιμές σε δείκτες θάμβωσης) λόγω της μεγάλης διαφοράς λαμπρότητων που παρουσιάζουν τα ανοίγματα σε σχέση με τις υπόλοιπες επιφάνειες του χώρου ενώ οι χρήστες να είναι εξαιρετικά ικανοποιημένοι από την θέα που τα ανοίγματα αυτά παρέχουν.

⁷⁴ <http://www.lrc.rpi.edu/programs/daylighting/pdf/daylightbenefits.pdf>

Σε ένα φυσικά φωτιζόμενο χώρο υπάρχει συνεχής αλλαγή στην κατανομή των λαμπροτήτων άλλοτε μικρή (ανοίγματα με βορεινό προσανατολισμό) άλλοτε έντονη (ίχνη ήλιου στο εσωτερικό) προκαλώντας συνεχή ερεθίσματα στο οπτικό μας σύστημα. Το γεγονός της δυναμικότητας αυτής κάνει τη σκηνή ενδιαφέρουσα μπορεί όμως να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση στην εκτέλεση κάποιας εργασίας.

Από τη δεκαετία του '80 άρχισε να αλλάζει η θέση της επιφάνειας εργασίας από οριζόντια σε κατακόρυφη λόγω της συνεχούς αυξανόμενης χρήσης ηλ. υπολογιστών. Αυτή η τροποποίηση της θέσης της κεφαλής έφερε στο οπτικό πεδίο μεγάλο τμήμα της πρόσοψης με αυξημένες τιμές λαμπρότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημερινή επικράτηση της χρήσης υπολογιστών σε χώρους γραφείων, ο σχεδιασμός των ανοιγμάτων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε τυχόν φαινόμενα θάμβωσης να μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Τι είναι θάμβωση ; Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται στην IESNA 2000⁷⁵ είναι «η αίσθηση που προκαλείται όταν η λαμπρότητα στο οπτικό πεδίο είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την λαμπρότητα στην οποία είναι προσαρμοσμένα τα μάτια και προκαλεί ενόχληση, δυσφορία ή μείωση της απόδοσης ή/και της ορατότητας». Ανάμεσα στι είδη θάμβωσης⁷⁶ που παρατηρούνται , στο εσωτερικό των κτηρίων ενδιαφέρει η:

1. Θάμβωση ανικανότητας (Disability glare, φυσιολογική θάμβωση). Το είδος αυτό της θάμβωσης εμποδίζει την όραση χωρίς αναγκαστικά να προκαλεί δυσφορία. Συνήθως όταν δημιουργηθεί, η αντίδραση είναι άμεση με τροποποίηση της θέσης εργασίας (δηλ. με τροποποίηση της διεύθυνσης παρατήρησης).

2. Θάμβωση δυσφορίας (Discomfort glare, ψυχολογική θάμβωση). Σε αυτό το είδος θάμβωσης προκαλείται απλώς δυσφορία χωρίς απαραίτητα να επηρεάζεται η ικανότητα εκτέλεσης κάποιας εργασίας. Το γεγονός ότι μπορεί να μην ανιχνεύεται άμεσα όταν συμβαίνει δεν σημαίνει όμως ότι συσσωρευτικά δεν παρατηρούνται αντιδράσεις (π.χ. πονοκέφαλοι).

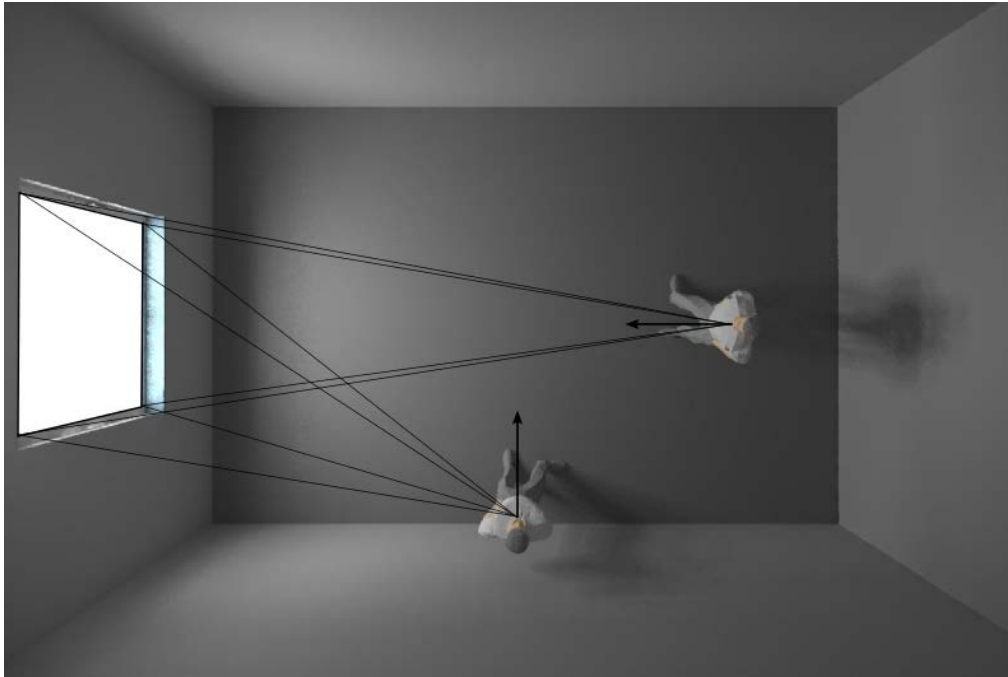
Συχνά παρατηρούνται και τα δύο είδη θάμβωσης ταυτόχρονα και υπάρχει αντικειμενική δυσκολία στο να διαχωρισθεί η αιτία. Σήμερα είναι φανερό ο μηχανισμός ανάπτυξης της θάμβωσης ανικανότητας (σκέδαση φωτός στο υαλώδες σώμα το ματιού με συνέπεια τη μείωση της αντίθεσης στην εικόνα που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή) όχι όμως της θάμβωσης δυσφορίας. Η τελευταία φαίνεται ότι σχετίζεται με τη συνδιαστική επίδραση αντίθεσης και κορεσμού του οπτικού συστήματος.

Στην περίπτωση της θάμβωσης δυσφορίας έχουν αναπτυχθεί αρκετοί δείκτες των οποίων ο υπολογισμός βασίζεται γενικώς σε τέσσερις παραμέτρους :

- Την λαμπρότητα της πηγής
- Την λαμπρότητα του υποβάθρου
- Το μέγεθος και τον αριθμό των πηγών
- Τη σχετική τους θέση ως προς τον παρατηρητή

⁷⁵ IESNA (2000), Lighting Handbook, Illuminating Engineering, 9th edition, ISBN-10: 0879951508.

⁷⁶ Voss J. Glare today in historical perspective: towards a new CIE glare observer and a new glare nomenclature, 24th session Proc. CIE, 24-30/6, Vol. 1, Part 1, CIE Publication 133, pp 38-42

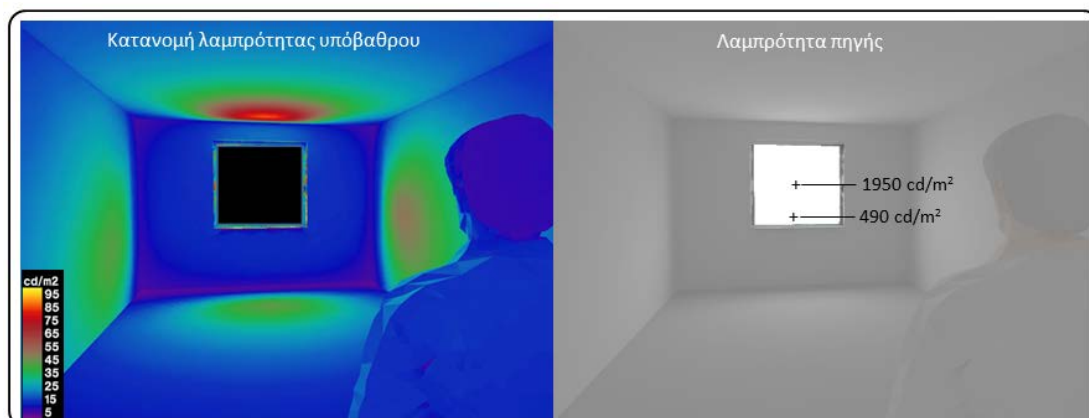


Σχήμα 6.2: Η κατεύθυνση παρατήρησης επηρεάζει την αίσθηση θάμβωσης

Οι προαναφερθέντες παράμετροι συνδυάζονται για την εκτίμηση της αίσθησης θάμβωσης με τη βοήθεια μιας σταθεράς η οποία υπολογίζεται ως εξής :

$$\text{Σταθερά θάμβωσης} = (\text{Λαμπρότητα πηγής})^m \cdot (\text{Γωνιακή έκταση της πηγής})^n / (\text{Λαμπρότητα υποβάθρου})^x \cdot (\text{Γωνιακή απόσταση της πηγής από την κατεύθυνση παρατήρησης})^y \quad (6.1)$$

Από τη παραπάνω εξίσωση είναι φανερό ότι η αύξηση της αίσθησης της θάμβωσης συνδυάζεται με αυξημένες λαμπρότητες πηγής, με πηγές μεγάλων διαστάσεων που βρίσκονται κεντρικά στο πεδίο όρασης.



Σχήμα 6.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη, τα οποία επηρεάζουν την εκτίμηση της θάμβωσης. Αριστερά η εκτίμηση της λαμπρότητας του υποβάθρου δεξιά του ανοίγματος (δηλ. της πηγής φωτισμού). Να τονισθεί ότι γενικά ενδιαφέρει και η κατανομή της λαμπρότητας εντός του ανοίγματος.

Η αύξηση της λαμπρότητας του υποβάθρου μειώνει την αίσθηση αυτή. Στην βιβλιογραφία έχουν παρουσιασθεί διάφοροι δείκτες για την εκτίμηση της

θάμβωσης (π.χ. BGI, CGI, UGR, J, SVR) . Σε αυτή την παράγραφο όμως θα παρουσιαστούν αυτοί οι δείκτες (DGI, DGI_N, VCP, DGP) που έχουν καλύτερη εφαρμογή στη περίπτωση εκτεταμένων πηγών φωτισμού (παράθυρα). Η πλειοψηφία των δεικτών αναφέρεται σε τεχνητά συστήματα φωτισμού των οποίων οι πηγές είναι σχετικά μικρών διαστάσεων από το σημείο παρατήρησης.

Δείκτες θάμβωσης

DGI

Η σχέση Cornell⁷⁷ υπολογίζει τον δείκτη θάμβωσης (GI) από πηγές μεγάλων διαστάσεων (τα πειράματα είχαν πραγματοποιηθεί με τεχνητές πηγές ομοιόμορφης λαμπρότητας)

$$GI = 10 \cdot \log 0.478 \left(\frac{L_s^{1.6} \cdot \Omega^{0.8}}{L_b + 0.07 \cdot \omega^{0.5} \cdot L_s} \right) \quad (6.2)$$

Όπου L_s η μέση λαμπρότητα της πηγής (cd/m^2)

L_b η μέση λαμπρότητα του υπόβαθρου (cd/m^2)

Ω η στερεά γωνία της πηγής θάμβωσης τροποποιημένη όμως με τη βοήθεια του συντελεστή θέσης (position index⁷⁸) (sr)

ω η στερεά γωνία της πηγής θάμβωσης όπως φαίνεται αυτή από το σημείο παρατήρησης (sr)

Ο προαναφερθείς τύπος τροποποιήθηκε ώστε να λαμβάνει υπόψη ανοίγματα⁷⁹ ως εξής (DGI, Daylight Glare Index) :

$$DGI = 10 \cdot \log 0.478 \sum_{i=1}^n \frac{L_s^{1.6} \cdot \Omega^{0.8}}{L_b + 0.07 \cdot \omega^{0.5} \cdot L_w} \quad (6.3)$$

Όπου L_s η μέση λαμπρότητα κάθε περιοχής που προκαλεί θάμβωση και βρίσκεται στο οπτικό πεδίο (cd/m^2)

L_b η μέση λαμπρότητα του υπόβαθρου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η λαμπρότητα της περιοχής (ή περιοχών) που προκαλούν θάμβωση (cd/m^2)

L_w η μέση λαμπρότητα του παραθύρου (cd/m^2)

Ω η στερεά γωνία κάθε περιοχής (πηγής) θάμβωσης τροποποιημένη όμως με τη βοήθεια του συντελεστή θέσης (position index, Petherbridge and Longmore, 1954) (sr)

ω η στερεά γωνία κάθε περιοχής (πηγής) θάμβωσης όπως φαίνεται αυτή από το σημείο παρατήρησης (sr)

n ο αριθμός των περιοχών θάμβωσης

Από πειράματα φάνηκε ότι η ανοχή στη θάμβωση από παράθυρα είναι μεγαλύτερη σε σχέση από παρόμοια περίπτωση αλλά με τεχνητό φωτισμό⁸⁰ (.).

⁷⁷ Hopkinson, R. G. (1963). Architectural Physics: Lighting. HMSO. London (UK)

⁷⁸ Petherbridge and Longmore, (1954), Light and Lighting, 47,173.

⁷⁹ Chauvel, J., Collins, B., Dogniaux, R. & Longmore, J. (1982). Glare from Windows: Current View of the Problem. Lighting Research & Technology. 14 (1). pp. 31-46

⁸⁰ Boubekri, M., L.L. Boyer (1992). Effect of window size and sunlight presence on glare, Lighting Research and Technology, 24, No. 2, pp. 69-74

Έτσι μπορεί να τροποποιηθεί ο αρχικός δείκτης θάμβωσης ώστε να ληφθεί υπόψη η προαναφερθείσα αυξημένη ανοχή. :

$$DGI=2*(GI+14)/3 \quad (6.4)$$

Συσχέτιση τιμών του δείκτη (DGI) με την αντιληπτή θάμβωση παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα⁸¹ (:

Αίσθηση θάμβωσης	DGI
Μόλις αντιληπτή	16
Ελάχιστα αποδεκτή	20
Οριακή τιμή διαχωρισμού άνεσης-δυσφορίας	22
Σχεδόν ενοχλητική	24
Σχεδόν ανυπόφορη	28

Πίνακας 6.1: Συσχέτισης αίσθησης θάμβωσης με τον δείκτη DGI

Γενικά τα αποτελέσματα πειραμάτων που σχετίζονται με τον δείκτη DGI φαίνεται ότι επηρεάζονται και από την ίδια την διαδικασία (χρόνος προσαρμογής, θέα) αλλά και εξαιτίας πολιτισμικών επιδράσεων⁸²).

Περιπτώσεις που δεν μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά από τον προαναφερθέντα δείκτη είναι :

- Η πηγή καλύπτει σχεδόν όλο το οπτικό πεδίο
- Η λαμπρότητα του υπόβαθρου έχει την ίδια τιμή με αυτή της πηγής
- Όταν η πηγή εμφανίζει ανισοκατανομή στην λαμπρότητα⁸³(.).

Η μέτρηση του δείκτη DGI απέχει πολύ από το να θεωρηθεί εύκολη λόγω ιδίως της ανάγκης καταγραφής της κατανομής λαμπρότητας. Το γεγονός αυτό οδήγησε αρκετούς ερευνητές σε μια προσπάθεια δημιουργίας μιας μεθοδολογίας για την εκτίμησή του (η τεχνική με τη χρήση High Dynamic Range φωτογραφίας αναφέρεται στη παράγραφο του σχεδιασμού).

DGI_N

Ο Nazzal⁸⁴ πρότεινε ένα νέο δείκτη (DGI_N) ο οποίος βασίζεται στη σχέση Cornell αλλά οι παράμετροι που εμπλέκονται στον υπολογισμό του μπορούν να μετρηθούν . Η σχέση είναι :

⁸¹Bellia, L., Cesarano, A., Iuliano, G., and Spada, G. (2008). Daylight glare: a review of discomfort indexes. In Proceedings of Visual quality and energy efficiency in indoor lighting: today for tomorrow, Rome, Italy

⁸² Pulpitova, J., P. Detkova (1993). Impact of the cultural and social background on the visual perception in living and working perception, *Proceedings of the international symposium 'Design of amenity'*, Fukuoka, Japan

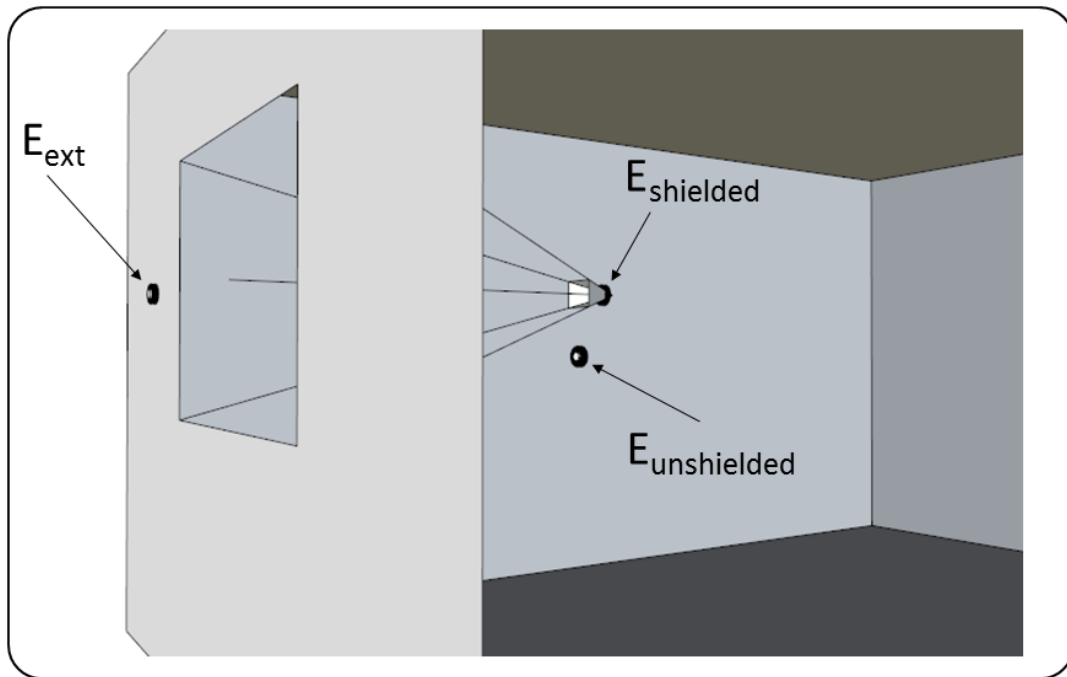
⁸³ Waters, C.E., R.G. Mistrick, C.A. Bernecker (1995). Discomfort glare from sources of nonuniform luminance, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **24**, No. 2, pp. 73-85

⁸⁴ Nazzal, A. A. (2001), A New Daylight Glare Evaluation Method: Introduction of the Monitoring Protocol and Calculation Method. *Energy and Buildings*. 33 (2001). pp. 257-265....

$$DGI_N = 8 \cdot \log_{10} 0.25 \left[\frac{\sum_{i=1}^n L_{ext}^2 \cdot \Omega_{pN}}{L_{adapt} + 0.07 \sqrt{\sum_{i=1}^n L_{window}^2 \cdot \omega_N}} \right] \quad (6.5)$$

Όπου L_{ext} η λαμπρότητα που εκτιμάται με τη βοήθεια φωτόμετρου τοποθετημένου κάθετα στο εξωτερικό μέρος του ανοίγματος (cd/m^2),
 L_{window} η λαμπρότητα που μετράται με φωτόμετρο που φέρει μάσκα ώστε να δέχεται φωτισμό μόνο από το άνοιγμα (cd/m^2),
 L_{adapt} ίδια όπως η προηγούμενη αλλά χωρίς μάσκα (cd/m^2),
 ω_N η στερεά γωνία του ανοίγματος όπως αυτή εκτιμάται από το σημείο παρατήρησης (sr)
 Ω_{pN} η τροποποίηση της στερεάς γωνία του ανοίγματος με τον δείκτη θέσης

Ο εξοπλισμός της μέτρησης παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω :



Σχήμα 6.4: Τρόπος μέτρησης των παραμέτρων που υπισέρχονται στον υπολογισμό του δείκτη θάμβωσης κατά Nazzal.

Η μέτρηση του δείκτη αυτού πραγματοποιείται με χρήση τριών φωτόμετρων εκ των οποίων το ένα τοποθετείται εξωτερικά την πρόσοψη (E_{ext}) ενώ τα υπόλοιπα τοποθετούνται σε κάθετη θέση στο εσωτερικό με ένα εξ αυτών να φέρει μάσκα ($E_{shielded}$) η οποία περιορίζει το οπτικό πεδίο ώστε να δέχεται φως μόνο από το άνοιγμα. Έτσι οι λαμπρότητες που εμφανίζονται στον τύπο του DGI_N υπολογίζονται ως εξής :

$$L_{ext} = \frac{E_{ext}}{2 \cdot (\pi - 1)} \quad (6.6)$$

$$L_{\text{adapt}} = \frac{E_{\text{unshielded}}}{\pi} \quad (6.7)$$

$$L_{\text{window}} = \frac{E_{\text{shielded}}}{2 \cdot \varphi \cdot \pi} \quad (6.8)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις η μόνη δυσκολία υπολογισμού εμφανίζεται στον «παράγοντα μορφής» $2\varphi\pi$, υπολογισμός που εξαρτάται από τη σχετική γεωμετρία του ανοίγματος και την απόσταση του αισθητήρα από αυτό.

DGP

Ενας από τους πρόσφατους δείκτες για τον υπολογισμό της θάμβωσης είναι και ο Daylight Glare Probability⁸⁵). Ο συγκεκριμένος δείκτης εκτιμά το ποσοστό των ανθρώπων που ενοχλούνται λόγω θάμβωσης και έχει αναπτυχθεί με τη συσχέτιση υποκειμενικών αντιδράσεων και μετρήσεων σε χώρους με κάθετα ανοίγματα εφοδιασμένα με βενετικά στόρια.

Η σχέση για τον υπολογισμό του DGP είναι

$$\text{DGP} = 5.87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 9.18 \cdot 10^{-2} \cdot \log \left(1 + \sum_j \frac{L_{s,j}^2 \cdot \omega_{s,j}}{E_v^{1.87} \cdot p_j^2} \right) + 0.16 \quad (6.9)$$

E_v είναι ο κάθετος φωτισμός στο επίπεδο του ματιού (lux),

L_s είναι η λαμπρότητα της πηγής θάμβωσης

ω_s είναι η στερεά γωνία της πηγής και p ο παράγοντας θέσης.

Η παραπάνω σχέση απλοποιείται αφού εξαρτάται κυρίως από τον πρώτο όρο. Έτσι σε πιο απλή μορφή (DGPs) ο δείκτης γίνεται :

$$\text{DGPs} = 6.22 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 0.184 \quad (6.10)$$

ο συγκεκριμένος δείκτης δεν «χειρίζεται» την έντονη κατανομή των λαμπροτήτων αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της θάμβωσης σε ωριαία βάση για το τυπικό έτος.

Η πρόταση⁸⁶ για το συγκεκριμένο δείκτη είναι να

	Βέλτιστη κατάσταση: Στο 95% του χρόνου εργασίας η θάμβωση είναι ανεπαίσθητη	Καλή κατάσταση: Στο 95% του χρόνου εργασίας η θάμβωση είναι αισθητή (ή μικρότερη)	Αποδεκτή κατάσταση: Στο 95% του χρόνου εργασίας η θάμβωση είναι ενοχλητική (ή μικρότερη)
--	---	---	--

⁸⁵ J. Wienold, J. Christoffersen, Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras, Energy and Buildings 38 (2006) pp. 743-757

⁸⁶ Wienold J., "Dynamic Daylight Glare Evaluation", 11th International IBPSA Conference, 2009

Όριο τιμής DGP	<= 0.35	<=0.40	<=0.45
Μέση τιμή τιμές DGP (εύρος 5%)	0.38	0.42	0.53

Πίνακας 6.2: Εύρος τιμών δείκτη DGP.

SR

Μια απλή εκτίμηση της θάμβωσης ιδίως από μεγάλων διαστάσεων πηγές έχει προταθεί από τους Osterhaus & Bailey ⁸⁷ () με τη βοήθεια του δείκτη SR (subjective rating). Υπολογίζεται με τη βοήθεια του φωτισμού σε κάθετο επίπεδο στο ύψος του ματιού (E_v) και δίνεται από τον τύπο:

$$SR=0.1909 \cdot E_v^{0.31} \quad (6.11)$$

Η κατηγοριοποίηση της αίσθησης θάμβωσης βασίζεται στην παρακάτω κλίμακα:

0.5 = ανεπαίσθητη – σχεδόν αισθητή

1.5 = σχεδόν αισθητή-σχεδόν ενοχλητική

2.5 = σχεδόν ενοχλητική-σχεδόν αφόρητη

Οι δείκτες για την θάμβωση μπορούν να αποτελέσουν νέα σχεδιαστικό εργαλείο υπο την προϋπόθεση ότι είναι κατανοητή η πολυπλοκότητα της πραγματικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εξής κατάσταση. Σε όλους τους τύπους για την εκτίμηση της θάμβωσης υπάρχει κάποιος όρος για την λαμπρότητα των πηγών. Τι όμως θεωρείται πηγή; Η σχετική διαφορά της λαμπρότητας π.χ. μιας πηγής από την λαμπρότητα προσαρμογής θα καθορίσει και το μέγεθος της.

Έτσι σε πιο πρακτικό επίπεδο, στρατηγικές που μπορούν να υιοθετηθούν ώστε να περιοριστούν τα προβλήματα θάμβωσης είναι :

Ισοροπημένη κατανομή λαμπροτήτων .

Γενικά στη μελέτη της κατανομής των λαμπροτήτων εξετάζονται συνήθως οι λαμπρότητες του αντικείμενου της εργασίας (π.χ. κάποιο έγγραφο) , του εγγύς περιβάλλοντος σε αυτό (επιφάνεια εργασίας) και του υποβάθρου (τοίχοι κλπ). Οι συστάσεις από διαφορετικές πηγές^{88,89, 90}) ,) παραδόξως συγκλίνουν στο ότι οι προτιμητέοι λόγοι λαμπροτήτων είναι :

3:1 ή 1:3 (αντικείμενο συμπεριλαμβανομένης οθόνης /εγγύς περιβάλλον)

10:1 ή 1:10 (αντικείμενο / υπόβαθρο)

⁸⁷ Osterhaus, W. K. E., and I. L. Bailey, "Large Area Glare Sources and Their Effect on Discomfort and Visual Performance at Computer Workstations", 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, TX, 10/1992

⁸⁸ IESNA 1993 (IES (Rea, M. S., ed.) (1993). Lighting Handbook: Reference and Application. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA).8th edition

⁸⁹ NUTEK 1994 (NUTEK (1994). Programkrav: belysning på kontor. Programkrav för god och energieffektiv belysning på kontor. 1994-11. Utgåva 2. Näringsoch teknikutvecklingsverket (NUTEK).

⁹⁰ CIBSE 1994 (CIBSE (1994). Code for Interior Lighting. Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). London (UK).

Να τονισθεί ότι οι προαναφεθέντες λόγοι αναφέρονται σε περιπτώσεις σχεδιασμού εργασιακών χώρων. Αν το οπτικό μας σύστημα προσαρμοσθεί σε κάποια κατάσταση μπορεί να «ανεχθεί» λόγους λαμπροτήτων της τάξεως του 1:1000 (και σε τμήματα του οπτικού πεδίου 1:10000).

Η σύσταση για μέγιστο λόγο λαμπροτήτων στο οπτικό πεδίο κυμαίνεται από 20:1 (NUTEK) έως 40:1 (IESNA) .

Σήμερα η χρήση ψηφιακών φωτογραφιών η κατανομή λαμπρότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά εύκολα όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

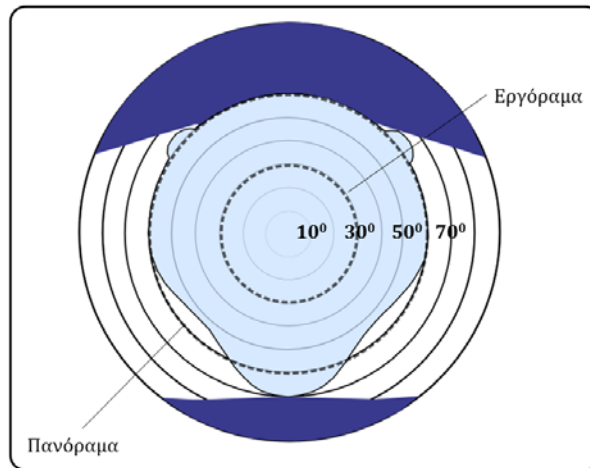


Σχήμα 6.5: Συνιστώμενοι λόγοι λαμπροτήτων ανάμεσα στην περιοχή εκτέλεσης κάποιου έργου, στις γειτονικές αυτής επιφάνειες και στις πηγές (δηλ. τα ανοίγματα).

Μικρές περιοχές στο οπτικό πεδίο που εμφανίζουν μεγαλύτερους λόγους λαμπρότητας από τους συνιστώμενους προκαλούν ενδιαφέρον συνεπώς πρέπει να περιορίζεται η δημιουργία μονότονων ομοιόμορφων κατανομών λαμπρότητας⁹¹..). Δυστυχώς δεν υπάρχει κάποιος εμπειρικός κανόνας γιατί η όποια υπερβολή στη μέγιστη τιμή λαμπρότητας μιας περιοχής στο οπτικό πεδίο μπορεί να την μετατρέψει σε πηγή θάμβωσης.

Οι περιοχές του αντικείμενου εργασίας (κεντρική/βοθηρική foveal vision) , του εγγύος περιβάλλοντος (κώνος 60⁰ (ergorama) και του υπόβαθρου (κώνος 120⁰ (panorama)) παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.

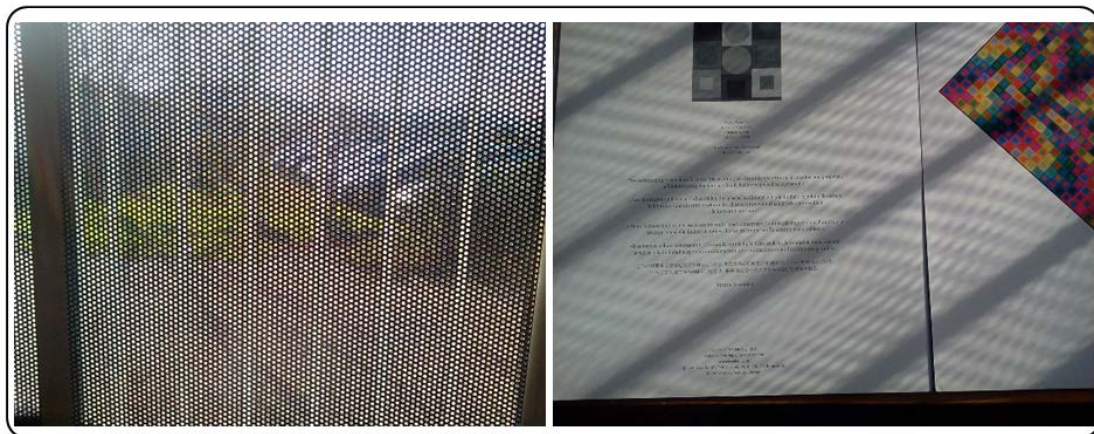
⁹¹ Loe, D. L. Task and Building Lighting: The Link between Lighting Quality and Energy Efficiency. Proc. of the Right Light 4 Conference. Nov. 19-21, Copenhagen (Denmark). Vol. 1. pp. 11-15, 1997.



Σχήμα 6.6: Σχηματική αναπαράσταση οπτικού πεδίου.

Λαμπρότητες επιφανειών

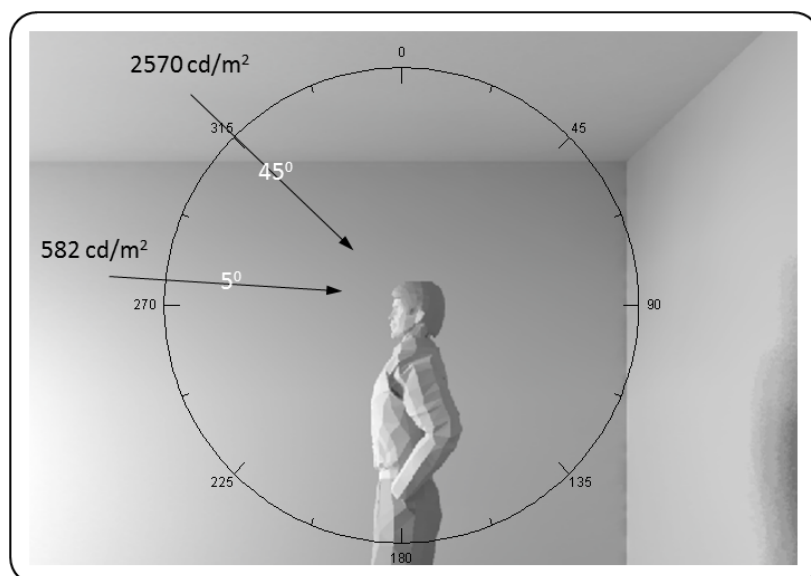
Πέραν της επάρκειας του φωτισμού στο επίπεδο εργασίας (κριτήριο επάρκειας) η λαμπρότητα των επιφανειών του χώρου είναι σημαντική στην αντίληψη που δημιουργείται. Η πλέον πρόσφατη έκδοση του ευρωπαϊκού πρότυπου (EN 12464-1/2011, Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places) υιοθετεί μαζί με τις συνήθεις απαιτήσεις σε χώρους γραφείων (φωτισμός, ομοιομορφία, θάμβωση κλπ) και απαίτηση για τα επίπεδα φωτισμού τοίχων και οροφής μαζί με μια σχετικά μικρή ομοιομορφία. Επιφάνειες στο οπτικό πεδίο με μεγάλες τιμές λαμπρότητας αποσπούν την προσοχή ενώ η δημιουργία περιοχών με επαναλαμβανόμενες περιοχές υψηλών/χαμηλών τιμών λαμπρότητας δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στην εκτέλεση εργασιών ιδίως όταν βρίσκονται στην επιφάνεια εργασίας.



Σχήμα 6.7: Η σκίαση είναι δυνατό να δημιουργήσει ενοχλητικά μοτίβα (περιοχές που εναλλάσσονται μεγάλες και μικρές περιοχές λαμπρότητας) στην επιφάνεια εργασίας.

Ανεχόμαστε μεγαλύτερες τιμές λαμπροτήτων από πηγές που βρίσκονται σε μεγάλη γωνιακή απόσταση από την κατεύθυνση παρατήρησης⁹².

⁹² Robbins C.L., «Daylighting: Design and Analysis», Van Nostrand Reinhold (9/1986), ISBN-10: 0442279493



Σχήμα 6.8: Παρατηρείται μεγαλύτερη ανοχή στις υψηλές τιμές λαμπροτήτων όταν προέρχονται από πηγές που σχηματίζουν μεγάλη γωνία με τον άξονα όρασης

Είναι προφανές ότι περιοχές με μεγάλες τιμές λαμπροτήτων στο οπτικό πεδίο πρέπει να αποφεύγονται οι οποίες επιπρόσθετα δημιουργούν και προβλήματα θέασης οθονών υπολογιστών. Σύμφωνα με τον Osterhaus⁹³ η μέγιστη τιμή της λαμπρότητας στο οπτικό πεδίο λόγω ύπαρξης ανοιγμάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1500 cd/m². Στην πραγματικότητα παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές (π.χ. 10000 cd/m² από την άμεση θέαση τμημάτων του ουρανού).

Σε περιπτώσεις που οι υαλοπίνακες που χρησιμοποιούνται εκτείνονται σε μεγάλο ύψος μια τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η μείωση της διαπερατότητας των υαλοπινάκων (βλ. Σχ. 6.9).

Η M.C Dubois⁹⁴ στην ανασκόπηση αναφέρει ότι προτεινόμενες μέγιστες τιμές από διάφορες πηγές δεν συνίσταται να υπερβαίνουν τα 1000cd/m² κατ' απολύτη τιμή ή τα 500 cd/m² όταν γίνεται έντονη χρήση ηλ. υπολογιστών.

Οι Clear et al⁹⁵ θεωρούν τα 2000cd/m² σαν την τιμή της λαμπρότητας του ανοίγματος πάνω από την οποία η πιθανότητα οι χρήστες του χώρου να κατεβάσουν τα σκίαστρα ώστε να μειωθεί η θάμβωση είναι 50%.

Γενικά ανοίγματα με τιμές λαμπρότητας >2500cd/m² πρέπει να θεωρούνται πηγές θάμβωσης.

⁹³ Osterhaus, (2002). Recommended Luminance Ratios and their Application in the Design of Daylighting Systems for Offices. In: The Modern Practice of Architectural Science: From Pedagogy to Andragogy, Proceedings of the 35th Annual Conference of the Australia and New Zealand Architectural Science Association, Geelong, Australia

⁹⁴ M.C.Dubois, "Impact of Shading Devices on Daylight Quality in Offices. Simulations with Radiance", Report No TABK--01/3062, Department of Construction and Architecture, Lund University, Lund, ISSN 1103-4467, 2001

⁹⁵ Clear, R.D., V. Inkarojrit, and E.S. Lee. 2006. "Subject responses to electrochromic windows". Energy and Buildings 38(7):758-779



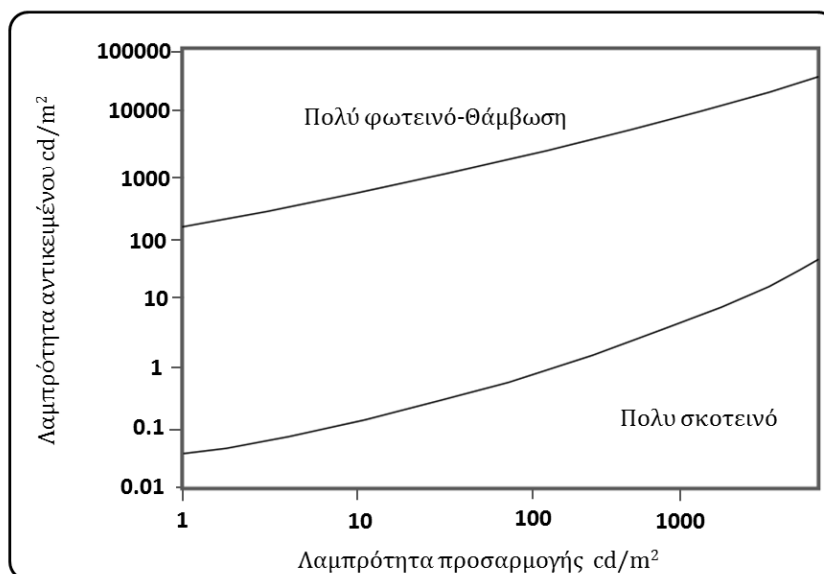
Σχήμα 6.9: Μείωση διαπερατότητας υαλοπινάκων σε σχέση με το ύψος.

Λαμπρότητα προσαρμογής

Είναι η λαμπρότητα στην οποία το οπτικό μας σύστημα προσαρμόζεται ματαβάλλοντας την ευαισθησία του και είναι καθοριστικό μέγεθος για την θάμβωση αφού οι πηγές που την προκαλούν έχουν λαμπρότητα πολλαπλάσια από την λαμπρότητα προσαρμογής. Η προσαρμογή αυτή είναι απαραίτητη εξαιτίας του γεγονότος του μεγάλου εύρους των τιμών λαμπρότητας το οποίο αντιμετωπίζουμε καθημερινά και μπορεί να κυμανθεί από 0.000001 cd/m^2 (νύχτα) σε 100000 cd/m^2 (ανέφελη ημέρα). Συνεπώς το μάτι μπορεί να προσαρμοστεί σε κάποια κατάσταση η οποία καθορίζεται από ένα κάτω και ένα άνω όριο.

Οι λαμπρότητες περιοχών παρατήρησης που είναι μεγαλύτερες από το άνω όριο προκαλούν θάμβωση. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη σχέση ανάμεσα στη λαμπρότητα προσαρμογής και τη λαμπρότητα μια περιοχής παρατήρησης⁹⁶.

⁹⁶ Hopkinson R.G. and Collins J.B., "The ergonomics of lighting", McDonald Publ., 1970



Σχήμα 6.10: Σχέση ανάμεσα στη λαμπρότητα αντικειμένου και την λαμπρότητα προσαρμογής.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι το γεγονός ότι η ίδια τιμή λαμπρότητας προσαρμογής μπορεί να δημιουργηθεί από διαφορετικές κατανομές λαμπροτήτων στο οπτικό πεδίο. Η μέτρησή της απαιτεί γενικά μια πολύπλοκη διαδικασία για τον εξής λόγο. Χρειάζεται να εκτιμηθεί η κατεύθυνση παρατήρησης η οποία φυσικά μπορεί να μην είναι σταθερή. Π.χ. στην περίπτωση προσέγγισης σε τούνελ η διεύθυνση παρατήρησης είναι εύκολα να εκτιμηθεί και για τον υπολογισμό της λαμπρότητας προσαρμογής χρησιμοποιείται η λαμπρότητα που αντιστοιχεί σε πεδίο 20° γύρω από την διεύθυνση παρατήρησης. Σε εσωτερικό χώρο όμως που το βλέμμα κινείται θα πρέπει να εκτιμηθούν τα σημεία που το βλέμμα σταματά καθώς και τον χρόνο πριν την επόμενη κίνηση. Συνεπώς χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μια σειρά μετρήσεων λαμπρότητας σε διάφορα σημεία του οπτικού πεδίου (ή να χρησιμοποιηθεί μια φωτογραφική τεχνική όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο (High Dynamic Range)).

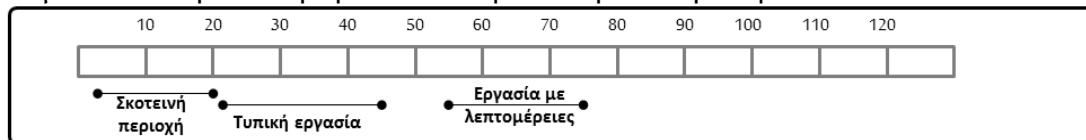
Μια σχετικά απλή προσέγγιση (προσοχή : η εφαρμογή αφορά κυρίως περιπτώσεις με σχετικά μικρή διακύμανση της λαμπρότητας) πραγματοποιείται με τη μέτρηση του φωτισμού στο επίπεδο του ματιού (E_v). Η λαμπρότητα προσαρμογής ($L_{adaptation}$) δίνεται από τον τύπο :

$$L_{adaptation} = E_v / \pi \quad (6.12)$$

Ο παραπάνω τύπος υπονοεί ότι η κατανομή λαμπρότητας είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο οπτικό πεδίο γεγονός που γενικά απέχει από τις συνθήκες που υπάρχουν στην πραγματικότητα.

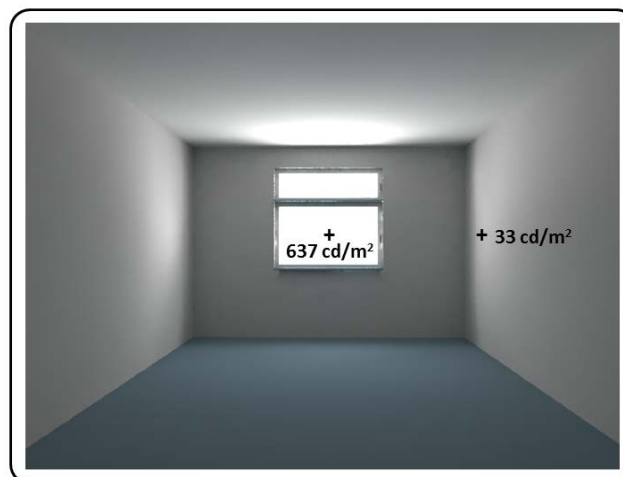
Το όριο της φωτοπικής όρασης είναι $\sim 3 \text{ cd/m}^2$ ενώ σε συνθήκες αίθριου ουρανού η λαμπρότητα προσαρμογής μπορεί να είναι $> 1000 \text{ cd/m}^2$. Στο εσωτερικό των χώρων φυσικά η λαμπρότητα προσαρμογής είναι μικρότερη. 10 cd/m^2 αντιπροσωπεύουν ένα υποφωτισμένο χώρο ενώ 100 cd/m^2 ένα σχετικά καλά φωτισμένο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον σχεδιασμό γειτονικών χώρων όταν σε αυτούς η λαμπρότητα προσαρμογής είναι διαφορετική. Η προσαρμογή στις περιπτώσεις μετακίνησης από χώρους με

μικρή σε μεγάλη λαμπρότητα προσαρμογής πραγματοποιείται γρήγορα σε αντίθεση με το αντίστροφο. Ένα κριτήριο που προτάθηκε αρχικά από τον Lynes⁹⁷ για να περιορίσει το βάθος των χώρων αλλά και από τους Nick Baker - Koen Steemers⁹⁸, και μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις που υπάρχει συχνή μετακίνηση από ένα χώρο σε κάποιο άλλο είναι ο λόγος της μέσης τιμής των παραγόντων φωτισμού σε αυτούς να είναι μικρότερος από 3. Η λαμπρότητα σαν μέγεθος έχει σημαντική επίδραση στο σχεδιασμό των χώρων. Η υποκειμενική αίσθηση της λαμπρότητας ονομάζεται φωτεινότητα. Ενώ η λαμπρότητα μιας επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί αντικειμενικά με τη βοήθεια μιας κάμερας λαμπρότητας η φωτεινότητα της (δηλ. ο τρόπος με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τη λαμπρότητα) εξαρτάται όχι μόνο από την απόλυτη λαμπρότητα της συγκεκριμένης επιφάνειας αλλά και από την λαμπρότητα του υπόβαθρου που την περιβάλλει και φυσικά το σχήμα τις διαστάσεις και την θέση των διαφόρων επιφανειών που απαρτίζουν το υπόβαθρο. Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση διατυπώθηκε από τον Hopkinson⁹⁹ και σχετίζεται με την εκτίμηση της σχετικής φωτεινότητας με βάση μια αυθαίρετη κλίμακα. Τα δεδομένα που χρειάζονται είναι η λαμπρότητα προσαρμογής και μια λαμπρότητα κάποιας περιοχής που βρίσκεται στο οπτικό πεδίο. Με βάση την παρακάτω αυθαίρετη κλίμακα παρουσιάζει τη συσχέτιση ανέμεσα σε αυτή την κλίμακα και την αίσθηση του πόσο φωτεινή είναι η επιφάνεια.



Σχήμα 6.11: Κλίμακα σχετικής φωτεινότητας.

Η χρήση της μεθόδου παρουσιάζεται με ένα παράδειγμα. Στην παρακάτω εικόνα υποθέτουμε ότι ο παρατηρητής εστιάζει στο κέντρο του ανοίγματος (υπάρχει εξωτερικό εμπόδιο) και συνεπώς η λαμπρότητα προσαρμογής είναι 637 cd/m^2 . Πως φαίνεται η περιοχή δεξιά του ανοίγματος με λαμπρότητα 33 cd/m^2 ;



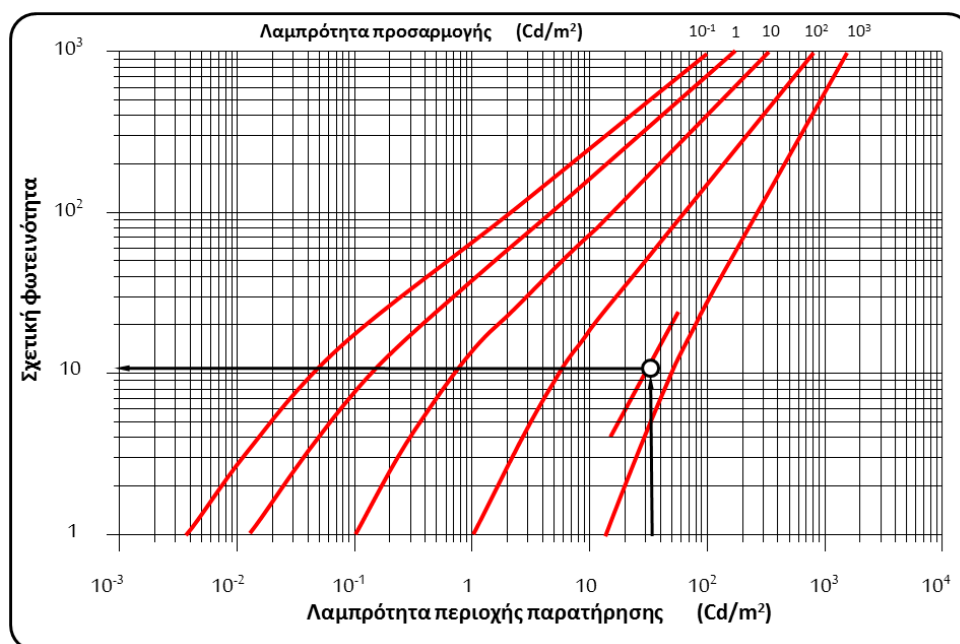
Σχήμα 6.12: Εκτίμηση σχετικής φωτεινότητας

⁹⁷ Lynes J.A., "Principles of natural lighting", Elsevier Publ., London, 1968

⁹⁸ («Daylight Design of Buildings: A Handbook for Architects and Engineers», Routledge Publ., 2002

⁹⁹ Hopkinson R.G., "Assessment of Brightness", Journal for Illuminating Engineering, 4/1957.

Έτσι χρησιμοποιώντας το παρακάτω σχήμα φαίνεται ότι η σχετική φωτεινότητα είναι ~11 όποτε με τη βοήθεια του Σχ. 6.11 φαίνεται ότι η επιφάνεια είναι μάλλον σκοτεινή.



Σχήμα 6.13: Εκτίμηση σχετική φωτεινότητας με τη βοήθεια της λαμπρότητας προσαρμογής και την λαμπρότητα της περιοχής παρατήρησης.

Οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον

Δεν χρειάζεται να αναφερθεί η προτίμηση των χρηστών ενός χώρου στην ύπαρξη ανοιγμάτων. Πέραν της παροχής φωτισμού αποτελούν τη σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλον (πληροφορίες για τον χρόνο της ημέρας, τις καιρικές συνθήκες) και λόγω της δυναμικότητας του φυσικού φωτισμού (διακύμανση τόσο της έντασης όσο και του φάσματος) δημιουργείται οπτικά ενδιαφέρον εσωτερικό περιβάλλον. Φυσικά αυτή προτίμηση σταματά όταν δημιουργηθούν φαινόμενα δυσφορίας ή παραβίασης της ιδιωτικότητας.

Έχουν αναφερθεί διάφορες αιτίες της προτίμησης αυτής στην βιβλιογραφία. Φαίνεται ότι κύριο λόγο έχει η θέα. Σε πειράματα στα οποία εξετάστηκαν οι προτιμήσεις χρηστών ανάμεσα σε ανοίγματα που παρήχαν φυσικό φως και θέα σε σύγκριση με ανοίγματα που παρήχαν περιορισμένο φωτισμό αλλά επίσης θέα, δεν βρέθηκε σημαντική διαφοροποίηση¹⁰⁰. Ο ορίζοντας, το όριο με γεωμετρική πολυπλοκότητα και έντονες αντίθεσεις λαμπροτήτων είναι εξαιρετικά ελκυστική στη θέαση¹⁰¹.

Η προτίμηση της θεας πιθανόν να εξηγείται και με την εικασία της βιοφιλίας (έμφυτη συναισθηματική σύνδεση με τις μορφές ζωής συμπεριλαμβανομένων

¹⁰⁰ Young H. And Berry G. (1979), The impact of environment on the productivity attitudes of intellectually challenged office workers, Human Factors 21pp. 399-407

¹⁰¹ N. Baker, K. Steemers, "Daylight Design of Buildings", James and James Publ., 2002, ISBN 1 873936885 p.180

φυτών/ζώων¹⁰². Προς επίρρωση της τελευταίας παρατήρησης είναι και το γεγονός της χρήσης εικόνων με φυσικά τοπία σε γραφεία χωρίς ανοίγματα¹⁰³. Μια εξαιρετική ανασκόπηση των πλεονεκτημάτων του φυσικού φωτισμού από ανοίγματα είναι η “The benefits of daylight through Windows” by P. Boyce, C. Hunter and O. Howlett, 2003, Capturing the daylight dividend program, Lighting Research Center.

Σε γενικές γραμμές οριζόντια ανοίγματα μικρού ύψους είτε κατακόρυφα μικρού πλάτους προσφέρουν περιορισμένη θέα. Το ύψος της ποδιάς πρέπει να είναι κάτω από το επίπεδο του ματιού για τους χρήστες του χώρου που κάθονται. Ιδιαίτερη σημασία στον σχεδιασμό παρουσιάζει το ύψος του πρεκιού ιδίως σε αίθουσες διδασκαλίας και θαλάμους νοσοκομείων. Μια ενδιαφέρουσα φωτογραφία είναι και η παρακάτω όσον αφορά το ύψος των ανοιγμάτων (Κατασκευή 1902-1926, Αρχιτέκτων Δημ. Καλλίας, Δημ. Σχολείο Καστρακίου, Καλαμπάκας)



Σχήμα 6.14: Χρήση ανοιγμάτων με αυξημένη κατακόρυφη διάσταση.

Το ελάχιστο μέγεθος των ανοιγμάτων που βρίσκονται σε ένα τοίχο κάποιου χώρου ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής θέα –σύμφωνα με το BS 8206-2-2008¹⁰⁴ δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Βάθος χώρου (m)	Ποσοστό ανοίγματος επί του τοίχου (%)
<8	20
≥8 - ≤11	25
>11- ≤14	30
>14	35

Σε χώρους με ανοίγματα σε ένα τοίχο συστήνεται το πλάτος του ανοίγματος να είναι τουλάχιστον το 35% του μήκους του τοίχου

Πίνακας 6.3: Ελάχιστο ποσοστό ανοίγματος επι τοίχου σε σχέση με το βάθος του χώρου κατά BS 8206-2-2008

¹⁰² Kellert S. And Wilson E. (1993) The Biophilia Hypothesis, Island Press, ISBN-10: 1559631473

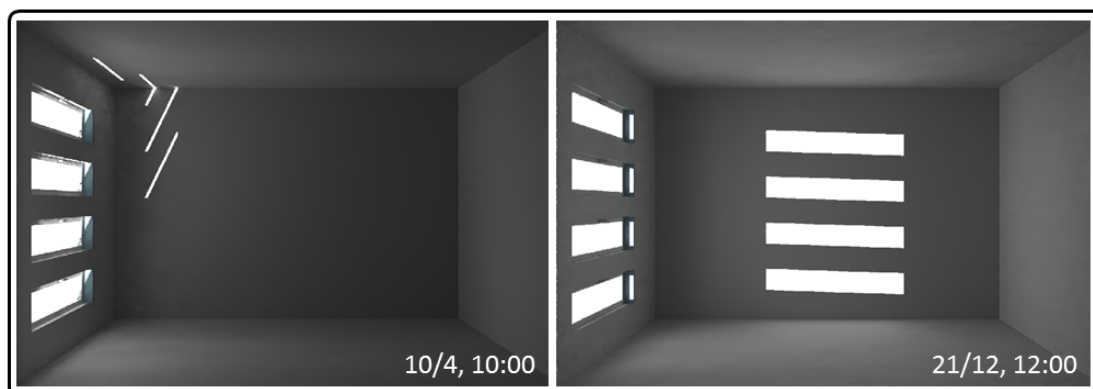
¹⁰³ Heerwagen J. And Orians G., (1986) “Adaptations to windowlessness: A study of the use of visual décor in windowed and windowless offices”, Environment and Behavior, 5.

¹⁰⁴ BS 8206-2-2008, Lighting for buildings. Code of practice for daylighting

7. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη «συνταγή» για τον σχεδιασμό του φυσικού φωτισμού λόγω του γεγονότος ότι εμπλέκεται με τις αρχική/βασική αρχιτεκτονική σύνθεση και αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο του ενεργειακού σχεδιασμού.

Είναι γνωστή η προτίμηση –ανάμεσα σε διάφορες φωτεινές πηγές- στον φυσικό φωτισμό κυρίως λόγω της επίδρασης που έχει σε ψυχολογικό επίπεδο. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά που τον συνοδεύουν είναι η επίτευξη υψηλών τιμών φωτεινότητας (ανάλογα και με την ανακλαστικότητα των επιφανειών) και το οπτικό ενδιαφέρον. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο φωτισμός πέραν της επίδρασης που έχει στην απόδοση επηρεάζει επίσης και την διάθεση αφού συνοδεύεται από θέα και μια δυναμική μεταβολή. Έτσι δημιουργείται η αίσθηση της απρόσμενης αλλαγής στις εσωτερικές συνθήκες σε αντίθεση με τον φωτισμό από το τεχνητό σύστημα ο οποίος είναι «σταθερός» χρονικά.



Σχήμα 7.1: Δυναμικότητα στην κατανομή λαμπρότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Υπάρχουν ανάγκες που πρέπει να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα και πολλές φορές ανταγωνιστικές μεταξύ τους (βλ. Επάρκεια φυσικού φωτισμού και σκίασης) ή π.χ. απαιτήσεις που έχουν άμεση σχέση με το κόστος των διαφανών τμημάτων της πρόσοψης. Η αρχική σχεδιαστική ιδέα πρέπει να συμβιβάζει την εξαιρετική ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος με το χαμηλό κόστος ικανοποιώντας όχι μόνο ένα αριθμό παραμέτρων που μετρώνται εύκολα / δύσκολα και οι οποίοι καθορίζονται από κάποιο πρότυπο ή σχεδιαστική πρακτική (κατανομές φωτεινότητας, αντιθέσεις κλπ) αλλά και παραμέτρους που σχετίζονται με την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, το ενδιαφέρον της θέας, την ευκρίνεια της χωρικής πληροφορίας.

Η συνήθης γραμμική εξέλιξη της μελέτης ενός έργου φαίνεται ότι σήμερα με την υιοθέτηση των διάφορων συστημάτων ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης κτηρίων να αλλάζει. Η προσέγγιση που υιοθετείται από αυτά τα συστήματα (LEED, BREEAM, DGNB) είναι η προσέγγιση σε θέματα ενέργειας και περιβάλλοντος της αρχικής σχεδιαστικής ιδέας να πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας ομάδας η οποία συμβάλλει στην ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος (δηλ. την ικανοποίηση απαιτήσεων που σχετίζονται με την επίδραση του κτηρίου στην περιοχή που ανεγείρεται, τη διαχείριση των ομβρίων, την εξοικονόμηση νερού και ενέργειας, την χρήση υλικών φιλικών στο περιβάλλον κλπ).

Η στρατηγική χρήσης του φυσικού φωτισμού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις αποφάσεις που σχετίζονται με τον προσανατολισμό του κτηρίου, την κάτοψη και τις προσόψεις του. Σε γενικές γραμμές η εξέλιξη της ανάλυσης για τον φυσικό φωτισμό βασίζεται στα παρακάτω στάδια:

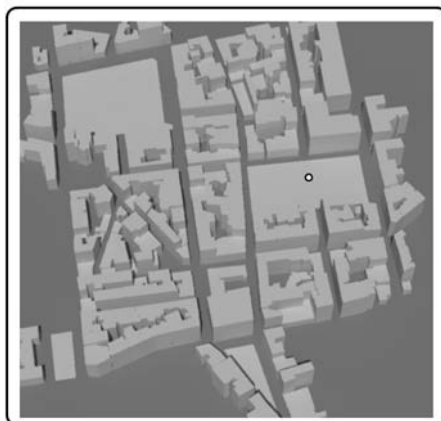
1	Διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού/ απαιτήσεις	Κλιματική περιοχή, αστικό περιβάλλον, χρήση κτηρίου
2	Κάτοψη/διαμερισματοποίηση	Περιμετρική ζώνη, προσανατολισμός, αίθρια
3	Μέγεθος / ιδιότητες /θέση υαλοπινάκων	Επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο (θέρμανση/ψύξη) , οπτική άνεση
4	Σχεδιασμός σκίασης ή/και συστημάτων φυσικού φωτισμού	
5	Χρήση συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών με αισθητήρα φωτισμού	Εξοικονόμηση

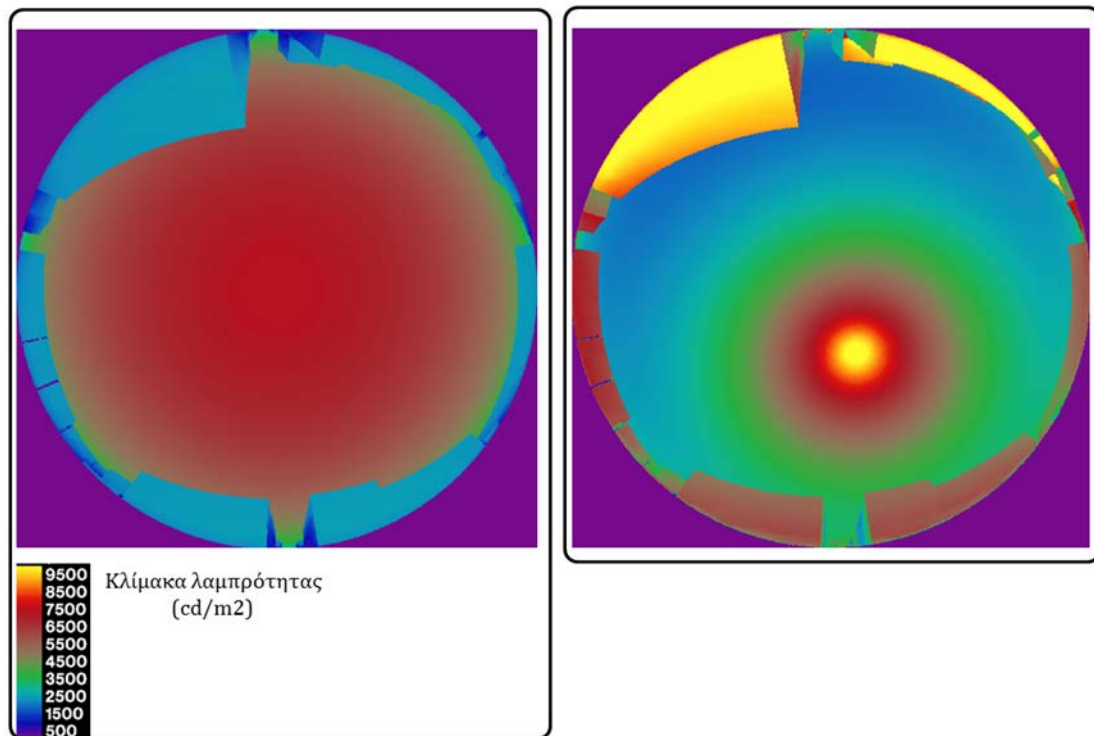
Πίνακας 7.1: Στάδια ανάλυσης

Μια από τις μεγάλες προκλήσεις είναι η εξασφάλιση (στο μέτρο του δυνατού!) φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό χώρων που βρίσκονται σε πυκνό αστικό περιβάλλον. Η αστική γεωμετρία επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό της διαθεσιμότητα του φυσικού φωτισμού ιδίως σε χώρους που βρίσκονται κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Χρήσιμη μέθοδος για την επίδραση των εξωτερικών εμποδίων είναι η εκτίμηση της περιοχής της επιφάνειας εργασίας η οποία δεν έχει «οπτική» σύνδεση με τμήματα του ουρανού. Η μετατόπιση του όριου αυτής της περιοχής (no-sky line) εξαρτάται από τις διαστάσεις των εξωτερικών εμποδίων με την εκτίμηση της να πραγματοποιείται με χρήση μόνο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του χώρου. Η μεθοδολογία εκτίμησης της συγκεκριμένης περιοχής έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο.

Είναι ενδιαφέρουσα η επίδραση του ύψους πρεκτιού στην έκταση της προαναφερθείσας περιοχής. Η αύξηση του οδηγεί σε αύξηση της περιοχής του κτηρίου που μπορεί να εκμεταλλευθεί τον φυσικό φωτισμό.

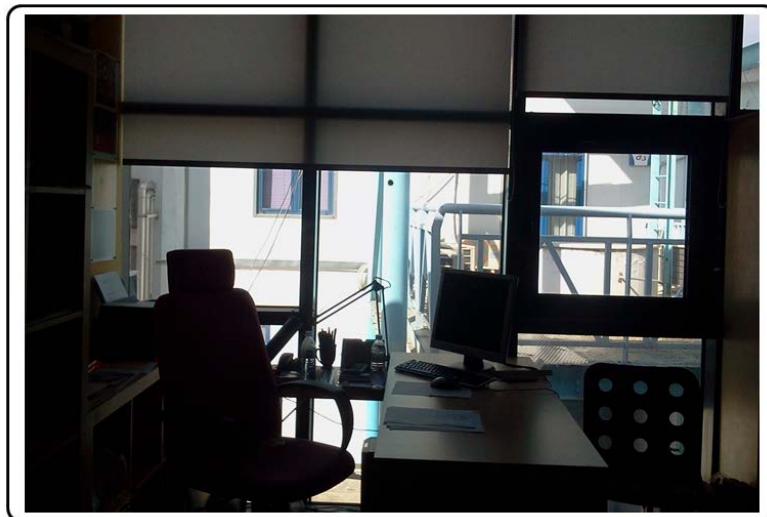
Ανοίγματα σε επαφή με αστικό περιβάλλον, δέχονται φωτισμό από ουρανό/ήλιο αλλά και από τις εξωτερικές επιφάνειες λόγω ανάκλασης. Σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού οι απέναντι επιφάνειες των κτηρίων έχουν μικρότερη λαμπρότητα από την περιοχή του ουρανού που καλύπτουν ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε αίθριες συνθήκες με παρουσία ήλιου.





Σχήμα 7.2: Κατανομή λαμπροτήτων στις επιφάνειες αστικού περιβάλλοντος σε συνθήκες νεφοσκεπούς (αριστερά) και αίθριου (δεξιά) ουρανού. Παρατηρήστε την αύξηση των λαμπροτήτων των προσόψεων στην περίπτωση του αίθριου ουρανού.

Στην τελευταία περίπτωση είναι δυνατό, οι απέναντι προσόψεις (ανάλογα με την ανακλαστικότητα τους) να είναι σημαντικοί παροχείς φυσικού φωτισμού ο οποίος πιθανόν να συνοδεύεται από θάμβωση. Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνεται η συγκεκριμένη διαπίστωση.

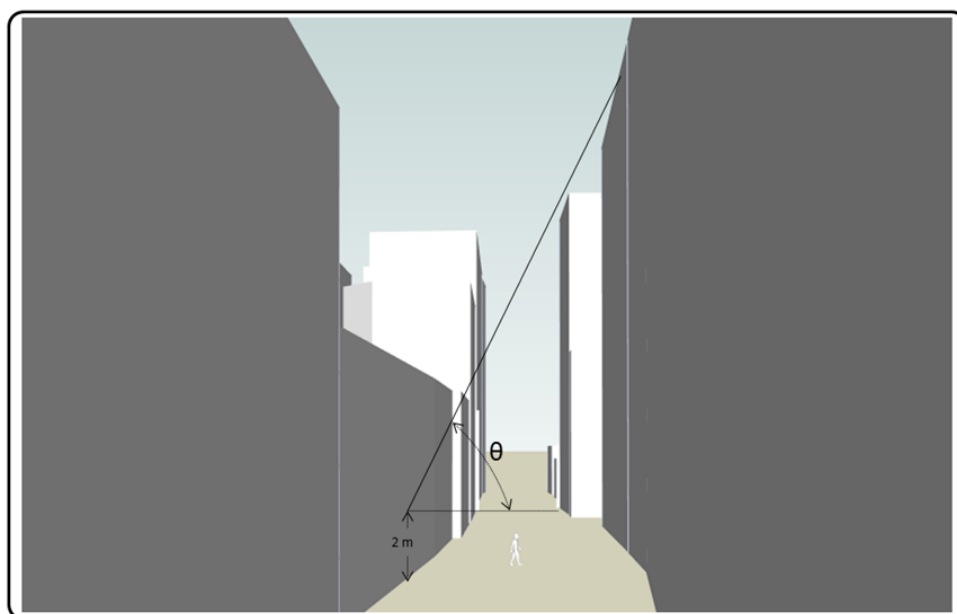


Σχήμα 7.3: Γραφείο βορεινού προσαντολισμού απέναντι από νοτια λευκή πρόσοψη.

Η πλήρης κάλυψη των προσόψεων με υαλοπετάσματα μπορεί να επιτείνει τα προβλήματα που συνοδεύουν την ανάκλαση (ανάλογα και με την

ανακλαστικότητα τους). Σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται ηλιακά ίχνη σε κάποιο χώρο από ανάκλαση, τα οποία ανάλογα με τον προσανατολισμό είναι ενδεχόμενο να δημιουργούν σημαντική ενόχληση.

Η χρήση του Παράγοντα Φυσικού Φωτισμού αποτελεί μια σχετικά απλή προσέγγιση στο ζήτημα της εκτίμησης της παροχής φυσικού φωτισμού σε αστικό περιβάλλον φυσικά χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανάκλαση από το έδαφος ή τις απέναντι επιφάνειες (ΠΦΦ_{ουρανού}). Έτσι εκτιμάται ο ΠΦΦ σε σημείο επί της πρόσοψης κατοικίας και σε απόσταση 2μ από το έδαφος. Λόγω της κατανομής λαμπρότητας του νεφροσκεπούς ουρανού η αύξηση του ΠΦΦ_{ουρανού} οφείλεται στη μείωση του μέγιστου ύψους των απέναντι εμποδίων. Χωρίς την ύπαρξη εμποδίων η τιμή του ΠΦΦ_{ουρανού} στην πρόσοψη είναι 40%. Η ύπαρξη εμποδίου με ύψος 25° (γωνία που σχηματίζεται από την οριζόντια και την ευθεία που ενώνει το σημείο στην πρόσοψη (2μ από έδαφος) με το απέναντι εμπόδιο) οδηγεί σε τιμή του ΠΦΦ_{ουρανού} = 27%¹⁰⁵). Χρησιμοποιώντας αυτή την αναλογία έχουν υπολογισθεί και οι πιθανές τιμές του ΠΦΦ_{ουρανού} για διάφορες τοποθεσίες στην Ευρώπη¹⁰⁶). Για την Αθήνα προτείνεται ΠΦΦ_{ουρανού} = 18% οποίος αντιστοιχεί σε ύψος εμποδίου 40°. Προφανώς το ύψος των απέναντι εμποδίων είναι καθοριστική και σε περιπτώσεις που τα ηλιακά κέρδη χρησιμοποιούνται στα πλαίσια μιας στρατηγικής ηλιακού παθητικού σχεδιασμού. Στην ίδια εργασία προτείνεται για αυτόν το σκοπό ότι το ύψος των εμποδίων στη ζώνη που εκτείνεται 45° εκατέρωθεν του νότου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από [66.5°-γεωγραφικό πλάτος] σε περιοχές με γεωγραφικό πλάτος < 46.5°.



Σχήμα 7.4: Εκτίμηση γωνίας εμποδίου η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ΠΦΦ_{ουρανού}.

¹⁰⁵ P. Littlefair, "Site layout planning for daylight and sunlight: a guide to good practice", BRE, ISBN 085125 506 X

¹⁰⁶ P. Littlefair, "Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment", Solar Energy, Vol. 70, No. 3, pp. 177-185, 2001

Με βάση τα παραπάνω είναι προφανές ότι σε περιπτώσεις πυκνών αστικών γεωμετριών, οι χώροι που βρίσκονται χαμηλότερα δέχονται λιγότερο φυσικό φωτισμό. Η σχεδιαστική διόρθωση αυτού του γεγονότος οδηγεί σε διαφοροποίηση του μεγέθους των ανοιγμάτων, με τα μεγαλύτερα να χρησιμοποιούνται στο ισόγειο.



Σχήμα 7.5: Οι διαστάσεις των ανοιγμάτων μειώνονται με την αύξηση της απόστασης τους από το έδαφος (μεγαλύτερη παροχή φυσικού φωτισμού).

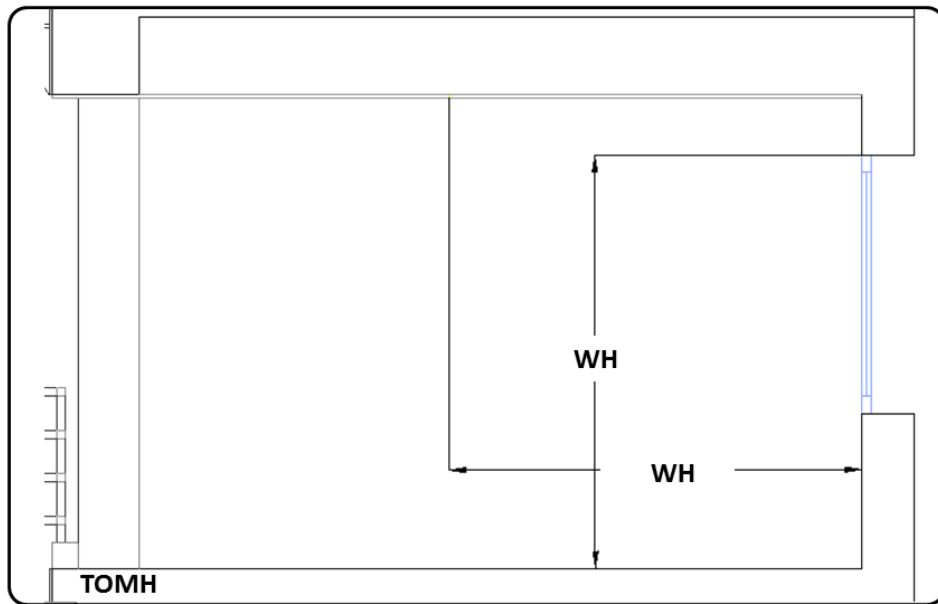
Ζώνη Φυσικού Φωτισμού

Η κάτοψη του κτηρίου μαζί με την εσωτερική διαρύθμιση καθορίζει και την περιοχή που μπορεί να εκμεταλλευθεί το φυσικό φως (Ζώνη Φυσικού Φωτισμού, ΖΦΦ). Σε διάφορα συστήματα ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης (πχ. LEED) το ποσοστό της ΖΦΦ σε σχέση με τη έκταση των περιοχών που χρησιμοποιούνται συχνά αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης.

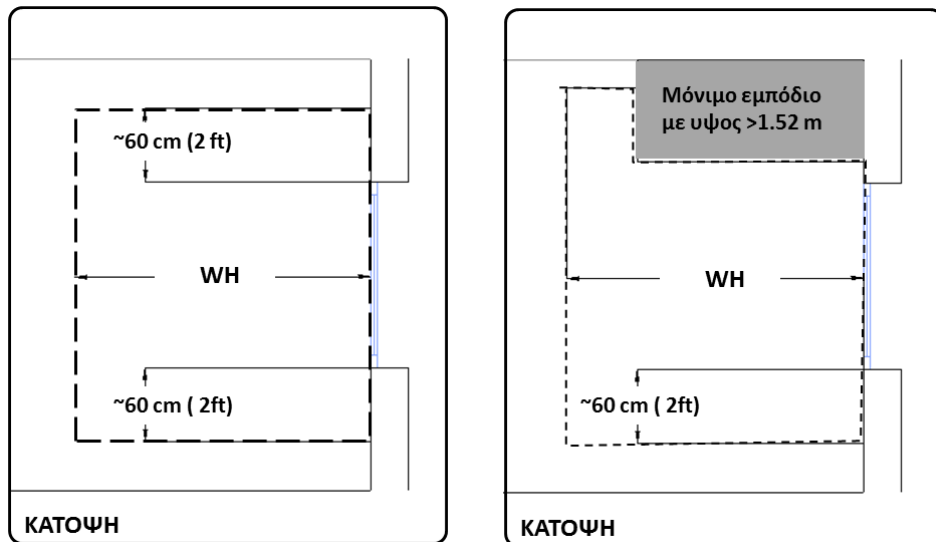
Ο καθορισμός της ζώνης φωτισμού επιτρέπει τον υπολογισμό της έκτασης στην οποία μπορεί να υιοθετηθεί κάποιο σύστημα ελέγχου της φωτεινής ροής των φωτιστικών -στη συγκεκριμένη περιοχή- και συνεπώς και την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας.

Η εκτίμηση της περιοχής αυτής γίνεται συνήθως με γεωμετρικά κριτήρια με έμφαση στην απλότητα. Είναι προφανές ότι θα πρέπει μέσα στη ζώνη η κατανομή των τιμών φυσικού φωτισμού να εμφανίζει μια σχετική ομοιομορφία έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος ρύθμισης να μην υπάρχουν περιοχές στις οποίες ο φωτισμός είναι μικρότερος από κάποιο επιθυμητό επίπεδο (π.χ. 500 lux). Παλαιότερα ο λόγος της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή δεν ήταν¹⁰⁷ μεγαλύτερος από **9/1**. Στην περίπτωση που αυτό συμβαίνει τότε η συγκεκριμένη ζώνη χρειάζεται επιμέρους διαχωρισμό. Σύμφωνα με τον κανονισμό της ASHRAE 90.1 -2010 η ζώνη εκμετάλευσης του φυσικού φωτισμού από πλευρικά ανοίγματα ορίζεται ως εξής :

¹⁰⁷ Robbins C.L., «Daylighting: Design and Analysis», Van Nostrand Reinhold (9/1986), ISBN-10: 0442279493

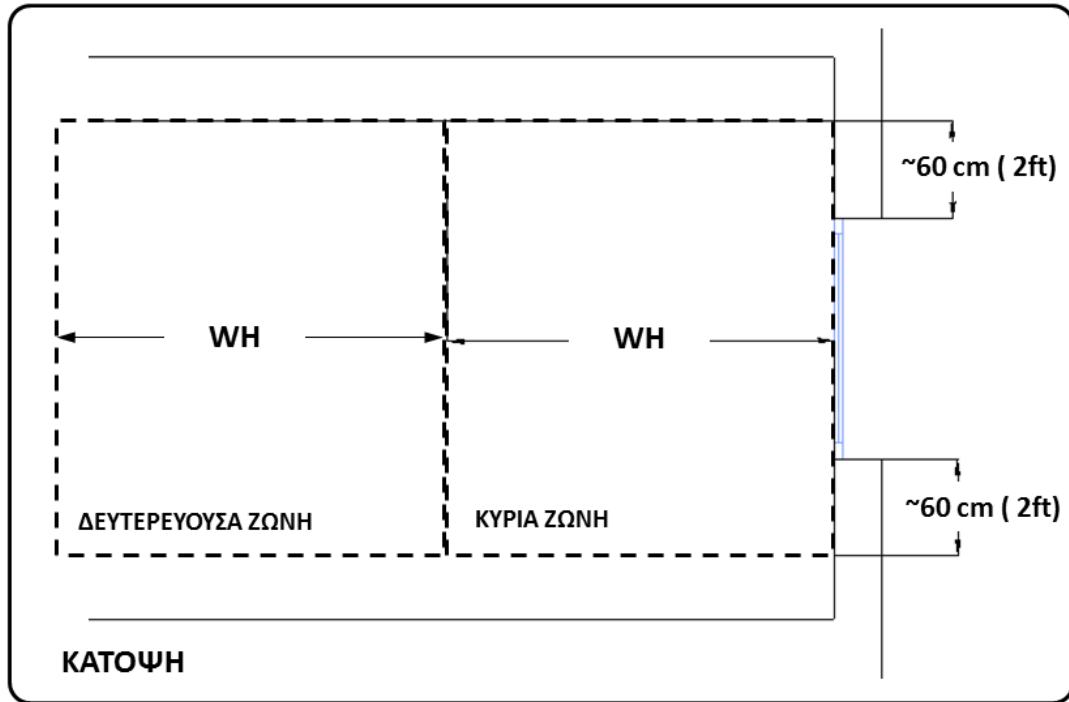


Σχήμα 7.6: Εκτίμηση βάθους ΖΦΦ κατά ASHRAE 90.1 –2010.



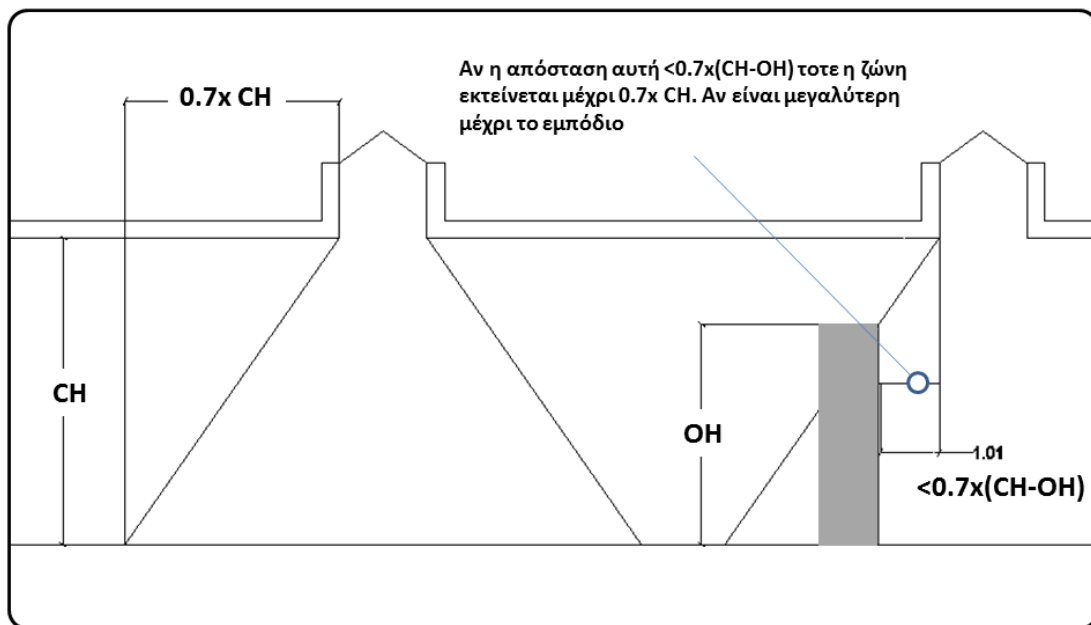
Σχήμα 7.7: Εκτίμηση πλάτους ΖΦΦ κατά ASHRAE 90.1 –2010.

Εκτός από την προαναφερθείσα κύρια ζώνη ορίζεται και η δευτερεύουσα :



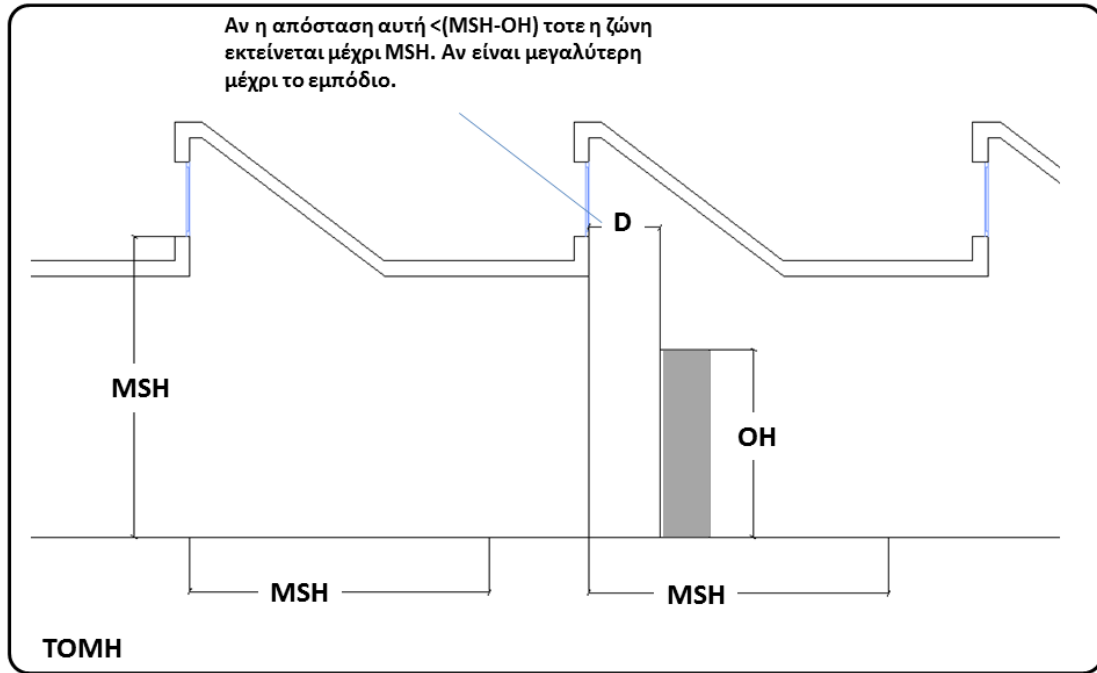
Σχήμα 7.8: Καθορισμός κύριας και δευτερεύουσας ΖΦΦ.

Στην περίπτωση οριζόντιων ανοιγμάτων οροφής η ζώνη ορίζεται ως εξής :



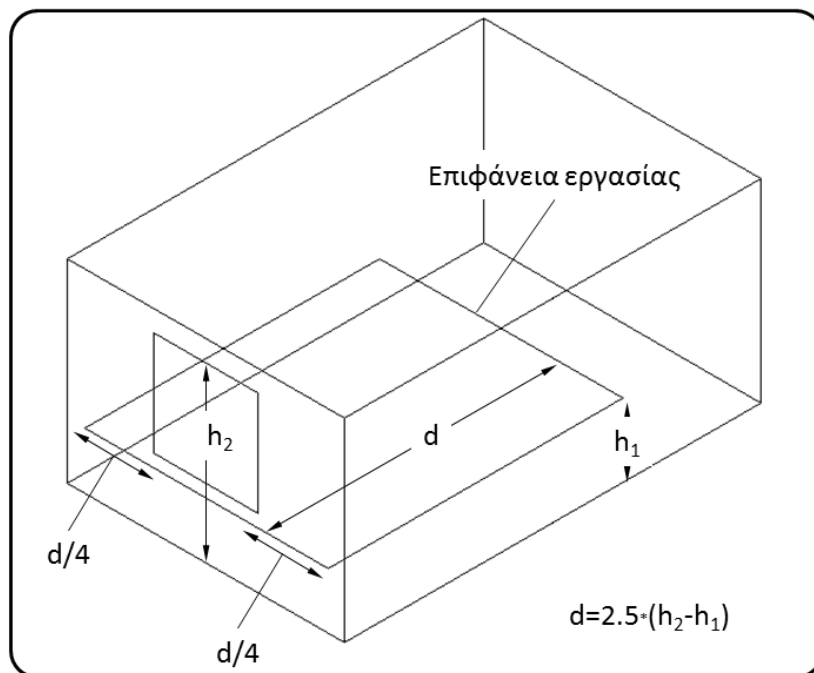
Σχήμα 7.9: Εκτίμηση ΖΦΦ από οριζόντια ανοίγματα κατά ASHRAE 90.1 –2010.

ενώ για φεγγίτες στην οροφή

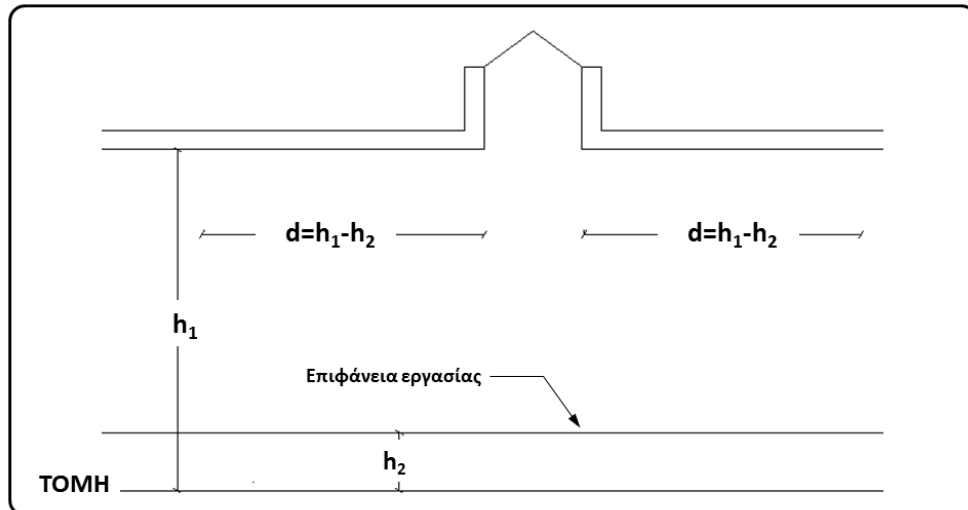


Σχήμα 7.10: : Εκτίμηση ΖΦΦ από φεγγίτες και κατακόρυφα ανοίγματα στο δώμα κατά ASHRAE 90.1 -2010.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 15193 καθορίζει την ζώνη εκμετάλευσης φυσικού φωτισμού με τους εξής τρόπους για πλευρικό άνοιγμα και για άνοιγμα οροφής :

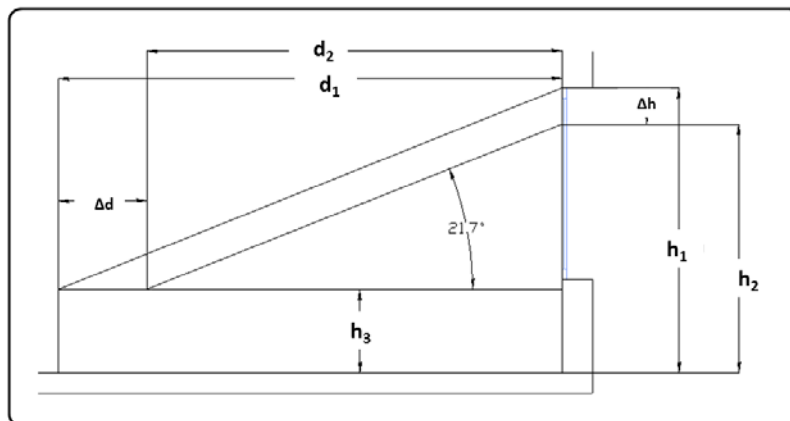


Σχήμα 7.11: Εκτίμηση βάθους και πλάτους ΖΦΦ κατά EN 15193:2007.



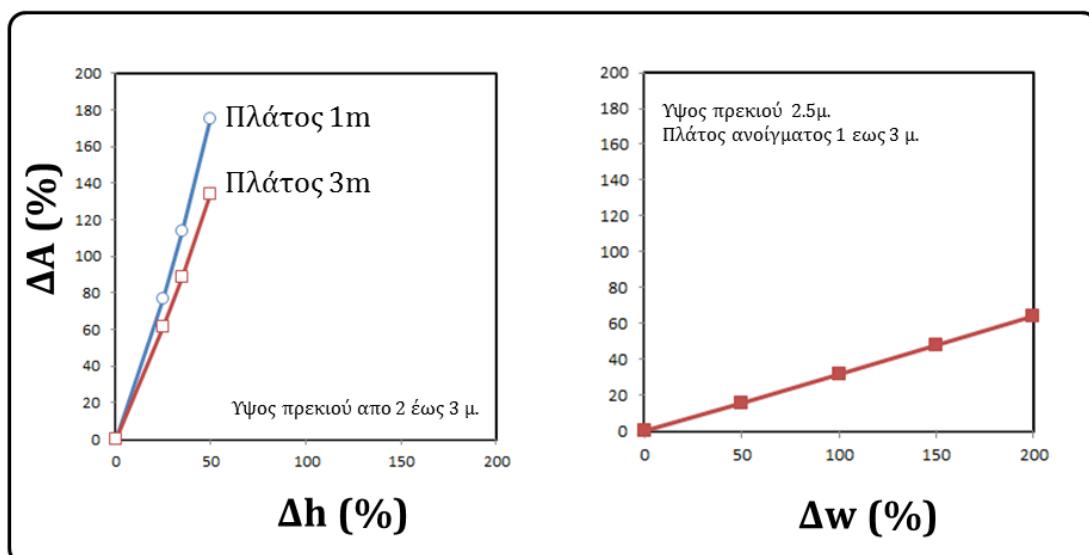
Σχήμα 7.12: Εκτίμηση πλάτους ΖΦΦ λόγω ανοίγματος οροφής κατά EN 15193:2007.

Η επίδραση του υψους πρεκιού είναι καθοριστική για το μέγεθος της ΖΦΦ. Με αυτό τον τρόπο αυξάνονται και τα επιπέδα φωτισμού και προφανώς αυτή η αύξηση αφορά και περιοχές που βρίσκονται μακριά από το άνοιγμα.



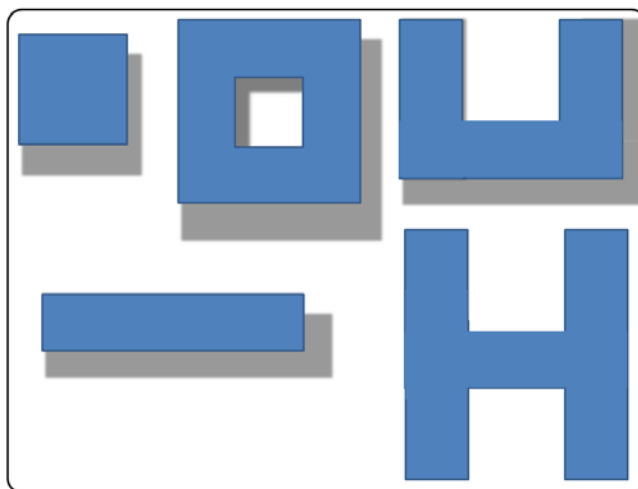
Σχήμα 7.13: Το ύψος του πρεκιού επηρεάζει το βάθος της ΖΦΦ.

Όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα η περιοχή της ΖΦΦ (Α) επηρεάζεται περισσότερο με την τροποποίηση του πρεκιού (Δh) παρά με την τροποποίηση του πλάτους του ανοίγματος (Δw).



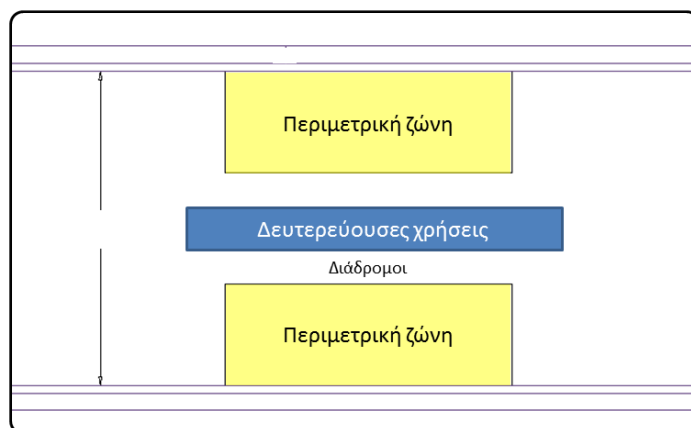
Σχήμα 7.14: Σχετική μεταβολή της επιφάνειας της ΖΦΦ σε σχέση με την τροποποίηση του ύψους προεκτιμού (αριστερά) και του πλάτους του ανοίγματος (δεξιά).

Το συνολικό ποσοστό της ζώνης σε σχέση με την επιφάνεια του δαπέδου μεταβάλλεται με το σχήμα του κτηρίου. Η «επιμήκυνση» της κάτοψης με συνεπακόλουθο της αύξηση της περιμέτρου οδηγεί σε αύξηση της έκτασης της ΖΦΦ.



Σχήμα 7.15: Η αύξηση της ΖΦΦ σε σχέση με την έκταση της κάτοψης επηρεάζεται από το σχήμα της. Γενικά επιμήκεις μορφές έχουν αυξημένα ποσοστά ΖΦΦ.

Όπως έχει αναφερθεί η ΖΦΦ επιδρά σε σημαντικό βαθμό στην εξοικονόμηση ενέργειας από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού όταν συνδέεται με χώρους οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνά στο ωράριο λειτουργίας. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, οι συγκεκριμένοι χώροι τοποθετούνται στην περίμετρο αφήνοντας στον πυρήνα του κτηρίου τις βοηθητικές χρήσεις.



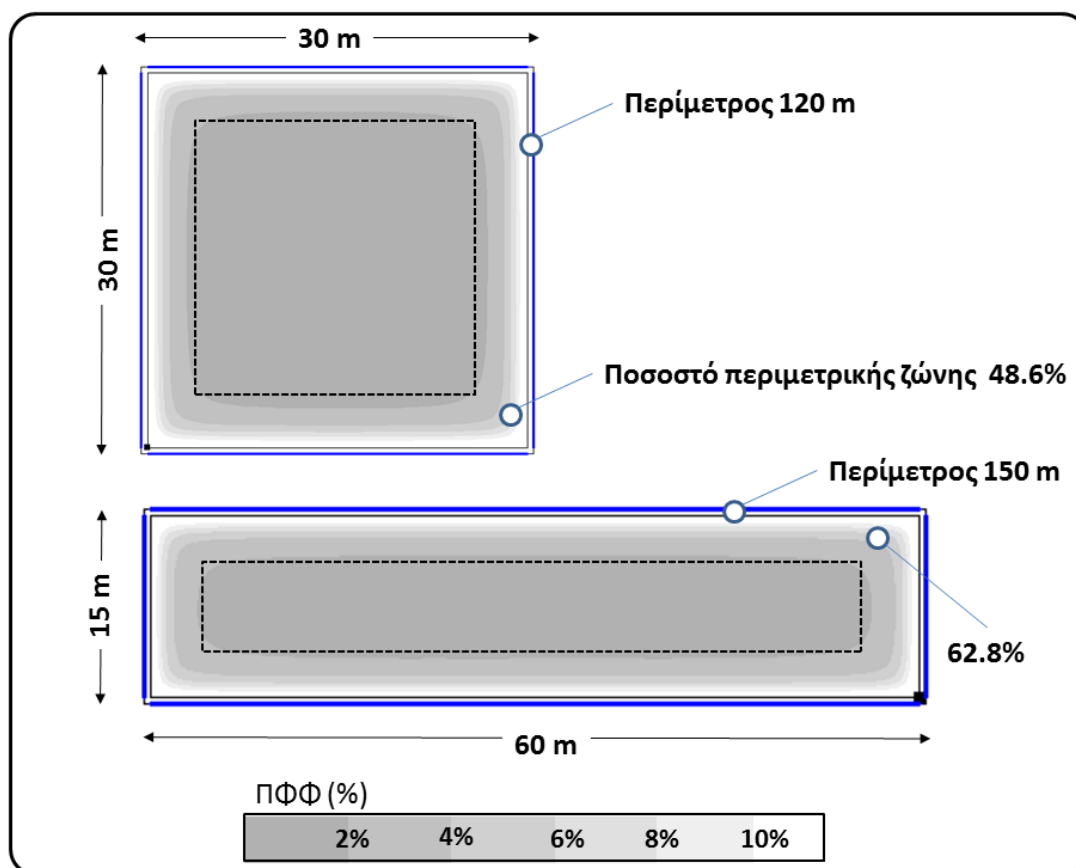
Σχήμα 7.16: Μεταφορά χώρων δευτερεύουσας λειτουργίας (υπο την έννοια ότι δεν χρειάζονται φυσικό φωτισμό συνεχώς) στο κέντρο της κατασκευής.

Να ληφθεί υπόψη ότι η ΖΦΦ μειώνεται αισθητά με την π.χ. χρήση εμποδίων όπως τα διαχωριστικά ανάμεσα στα γραφεία ή βιβλιοθήκες. Π.χ. στον ASHRAE 90.1-2010 ότι εμπόδιο (με μόνιμη τοποθέτηση) έχει μεγαλύτερο ύψος από 60 ίντσες (1.52m), η έκταση που καλύπτει αφαιρείται από την έκταση της ΖΦΦ. Η τοποθέτηση διαχωριστικών ανάμεσα σε γραφεία και μάλιστα παράλληλα με τα ανοίγματα μπορεί να μειώσει σημαντικά τα επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας περιορίζοντας της διείσδυση του φυσικού φωτισμού στο χώρο. Η χρήση διαφανών πετασμάτων αποκαθιστά μερικώς (ανάλογα με τις ιδιότητες του διαφανούς τμήματος) το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Στα συστήματα ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης υπάρχει κριτήριο στο ποσοστό των ζωνών εκμετάλλευσης σε σχέση με το σύνολο των χώρων με συνεχή χρήση. Π.χ. στο παλαιότερο LEED (2009) απαιτείται το 75% των χώρων με τακτική χρήση να ικανοποιεί κάποιο από τα παρακάτω κριτήρια:

- Ο λόγος της επιφάνειας του ανοίγματος (από το συνολικό ύψος του ανοίγματος αφαιρούνται 76.2 cm ποδιάς, ακόμη και όταν υπάρχει πλήρης κάλυψη της πρόσοψης με υαλοπίνακα) προς την επιφάνεια του χώρου που εξετάζεται πολλαπλασιασμένος επί την διαπερατότητα (στο ορατό) του υαλοπίνακα θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0.15 και 0.18. Λαμβάνεται υπόψη η τυχόν επίδραση ψευδοροφής ενώ απαιτείται και παρουσία σκίασης (χωρίς να συμμετέχει στον υπολογισμό)
- Με προσομοίωση κατά την διάρκεια των ισημεριών σε επιφάνεια εργασίας ύψους 76.2 cm και κάναβο μικρότερο από 1.5 m στις 9:00 και 15:00 με αιθριες αυρανό θα πρέπει τα επίπεδα φωτισμού στον χώρο που εξετάζεται να είναι μεταξύ 25-5000 lux.
- Με μετρήσεις

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η έκταση της περιμετρικής ζώνης (όπως αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με το EN 15193 βλ. επίσης σχ. Παράγραφο) για διάφορες κατόψεις ίδιου εμβαδού. Στον υπολογισμό έχει θεωρηθεί ύψος πρεκιού στα ανοίγματα 2.5 μ όποτε το βάθος της ΖΦΦ είναι 4.25 μ από την πρόσοψη.



Σχήμα 7.17: Η επίδραση του σχήματος της κάτοψης είναι καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος της ΖΦΦ (καθώς επίσης και για το μήκος της περιμέτρου).

Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει αναφορά στον προσανατολισμό του κτηρίου ο οποίος επηρεάζει σημαντικά το συνολικό ενεργειακό του ισοζύγιο. Η «επιμήκυνση» της κάτοψης προφανώς αυξάνει τη δυνατότητα εξοικονόμησης από τον περιορισμό χρήσης του συστήματος ηλεκτροφωτισμού αλλά θα πρέπει να είναι συμβατή και με τις ανάγκες για περιορισμό των ηλιακών κερδών κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Στις προσόψεις με νότιο προσανατολισμό επιτυγχάνεται πιο εύκολα η ισορροπία ανάμεσα στην επάρκεια φυσικού φωτισμού και την ικανοποιητική αποκοπή ηλιακών κερδών λόγω του ύψους του ήλιου ιδίως την χρονική περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου. Στις ανατολικού και κυρίως δυτικού προσανατολισμού προσόψεις (ανάλογα και με το ωράριο λειτουργίας του κτηρίου) η σκίαση αποτελεί καθοριστική επιλογή η οποία επηρεάζει και την επάρκεια φυσικού φωτισμού. Η βορεινή πρόσοψη δεν εμφανίζει τα προβλήματα ρύθμισης των ηλιακών κερδών όπως η νότια και είναι παροχέας σταθερού φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των υαλοπινάκων ανα προσανατολισμό μπορεί να συνισφέρει σε σημαντική ρύθμιση των ηλιακών κερδών με ταυτόχρονη παροχή φυσικού φωτισμού (δηλ. αυξημένη διαπερατότητα στο ορατό τμήμα της ηλ. ακτινοβολίας).

Η χρήση αιθρίου επίσης «αυξάνει» την περιμετρική ζώνη μόνο που σε αυτή την περίπτωση το όφελος μειώνεται όσο οι όροφοι βρίσκονται πλησιέστερα στο έδαφος. Η κατανομή του φυσικού φωτισμού σε αίθρια καθορίζεται από :

- Το σχήμα του αίθριου (π.χ. τετράγωνο) σε σχέση με τον προσανατολισμό.
- Την σχέση μεταξύ των διαστάσεων του (ύψος, πλάτος, μήκος)
- Την διαπερατότητα του καλύμματος (αν υιοθετηθεί κάλυμμα)
- Την ανακλαστικότητα των εσωτερικών προσόψεων η οποία επηρεάζεται από το σχετικό ποσοστό υαλοπινάκων. Η ανακλαστικότητα του δαπέδου παίζει σημαντικό ρόλο στον φωτισμό του ισογείου.

Η σύγκριση της επίδρασης διαφόρων σχημάτων αιθρίων στην επίτευξη συγκεκριμένων τιμών φωτισμού πραγματοποιείται με τη χρήση δεικτών που περιγράφουν γεωμετρικά το αίθριο. Ιδιαίτερα χρήσιμος –μεταξύ άλλων- είναι ο δείκτης AR (Aspect Ratio, Διάταμμα) που ορίζεται ως εξής :

$$\text{Aspect Ratio (AR)} = \text{Πλάτος} * \text{Μήκος} / \text{Υψος}^2$$

Μερικά χαρακτηριστικά των αιθρίων (σχετιζόμενα με τον φυσικό φωτισμό) είναι :

- Αυξημένες τιμές ανακλαστικότητας στο ανώτερο τμήμα των πλευρικών προσόψεων του αιθριου χρειάζονται για την επίτευξη μεγαλύτερων επιπέδων φωτισμού στη βάση. Η επίδραση του ποσοστού των υαλοπινάκων και της σχετικής ανακλαστικότητας τους είναι σημαντική. Γενικά το ποσοστό των υαλοπινάκων επι της πρόσοψης ελλατώνεται όσο αυξάνεται το ύψος από το δάπεδο.

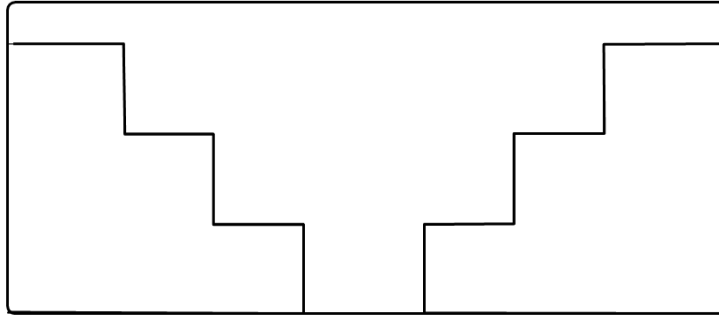


Σχήμα 7.18: Εσωτερικά ανοίγματα σε αίθριο. Παρατηρήστε τη διαφοροποίηση του μεγέθους αυτών καθ' ύψος.

Προφανώς θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα και για την σκίαση σε όσα ανοίγματα των εσωτερικών προσόψεων χρειάζεται , ιδίως αυτών που βρίσκονται κοντά στην οροφή. Η επίδραση της ανακλαστικότητας είναι περιορισμένη στις περιπτώσεις που το ύψος του αίθριου είναι μικρότερο

από το πλάτος του , οπότε η επίδραση του άμεσου φωτισμού από τον ουρανό είναι μεγαλύτερη.

- Στενά αίθρια (μικρό AR) είναι γενικά υποφωτισμένα. Μια καλή στρατηγική (αν και δύσκολη, επηρεάζεται από το συνολικό ύψος) είναι η υποχώρηση του κάθε ορόφου κατα μια απόσταση ώστε το πάνω μέρος του αίθριου να είναι μεγαλύτερο σε έκταση από αυτό της βάσης .



Σχήμα 7.19: Η υποχώρηση κάθε ορόφου προσφέρει αυξημένη παροχή φυσικού φωτισμού.

- Για το ίδιο γινόμενο (μήκος*πλάτος) οι μεγαλύτερες τιμές του ΠΦΦ στο κέντρο της βάσης του αίθριου παρατηρούνται σε αίθρια τεράγωνου σχήματος
- Αν το αίθριο καλύπτεται με διαφανή οροφή, η διαπερατότητα των επιφανειών που την απαρτίζουν επηρεάζει την ροή φυσικού φωτισμού που εισέρχεται σε αυτό. Με παρόμοιο τρόπο οτιδήποτε συνιστά εμπόδιο (π.χ. ο σκελετός της οροφής , διάδρομοι που συνδέουν ορόφους κλπ) ενδέχεται να επηρεάσει τον φυσικό φωτισμό των γειτονικών χώρων. Σε κλιματικές περιοχές με επικράτηση αίθριων συνθηκών η μείωση των ηλιακών κερδών μέσω της σκίασης είναι απαραίτητη. Μπορούμε να χειριστούμε την άμεση ηλ. ακτινοβολία μετατρέποντας ένα σημαντικό ποσοστό της σε διάχυτη (μπορεί να πραγματοποιηθεί με εξωτερικό σκίαστρο, με διαχυτικό υαλοπίνακα ή με χρήση εσωτερικών πετασμάτων) είτε με χρήση συστημάτων φυσικού φωτισμού (βλ. Σχετική παράγραφο).



Σχήμα 7.20: Χρήση εσωτερικής σκίασης αιθρίου.

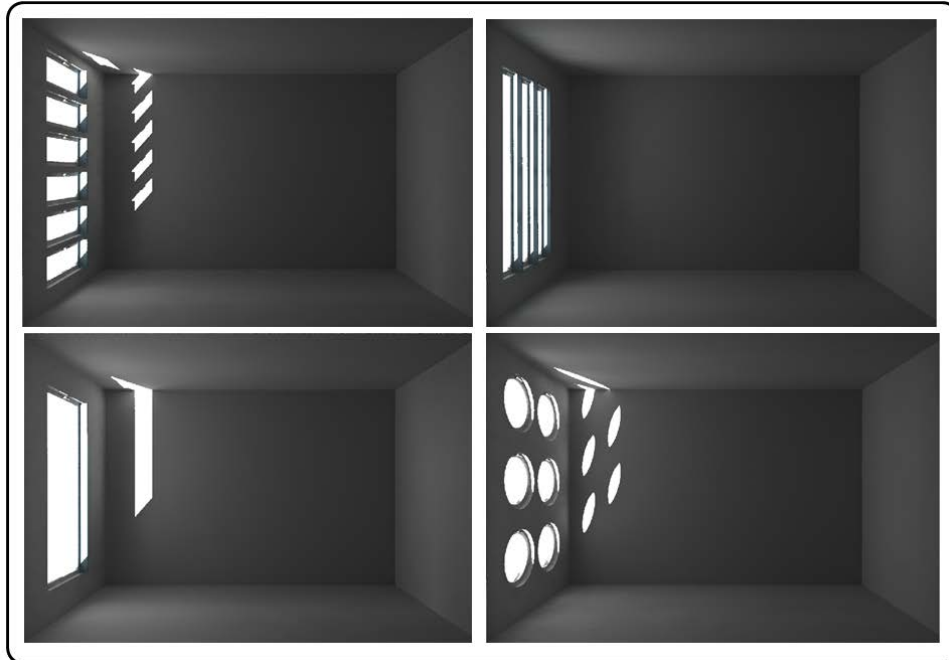
- Έχει ήδη αναφερθεί ότι η αύξηση της ανακλαστικότητας του δαπέδου αυξάνει και την παροχή ανακλώμενου φωτισμού σε χώρους του ισογείου. Πολλές φορές όμως η ανακλαστικότητα επηρεάζεται από την παρουσία κατασκευών ή φύτευσης. Για την επιλογή της φύτευσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι πολλοί τύποι φυτών απαιτούν σημαντικά ποσά φωτισμού για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στη μέρα για την ανάπτυξη τους και ενδεχομένως το υπο σχεδιασμό αίθριο να μην μπορεί να τα παρέχει.

Ανοίγματα (κάθετα/οριζόντια)

Τα επίπεδα φυσικού φωτισμού καθώς και η κατανομή τους καθορίζονται πέραν των κλιματικών παραμέτρων από το μέγεθος, τη θέση και τον προσανατολισμό των ανοιγμάτων, τον τύπο του υαλοπίνακα και τα πιθανά συστήματα σκίασης. Επιπρόσθετα από την γεωμετρία του χώρου και την ανακλαστικότητα των επιφανειών που τον απαρτίζουν. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η επάρκεια του φυσικού φωτισμού θα πρέπει να συνοδεύεται από ταυτόχρονη ικανοποίηση και επιπρόσθετων απαιτήσεων όπως π.χ. η ρύθμιση των ηλιακών κερδών, θάμβωσης. Συνεπώς η στρατηγική διαστασιολόγησης των ανοιγμάτων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό :

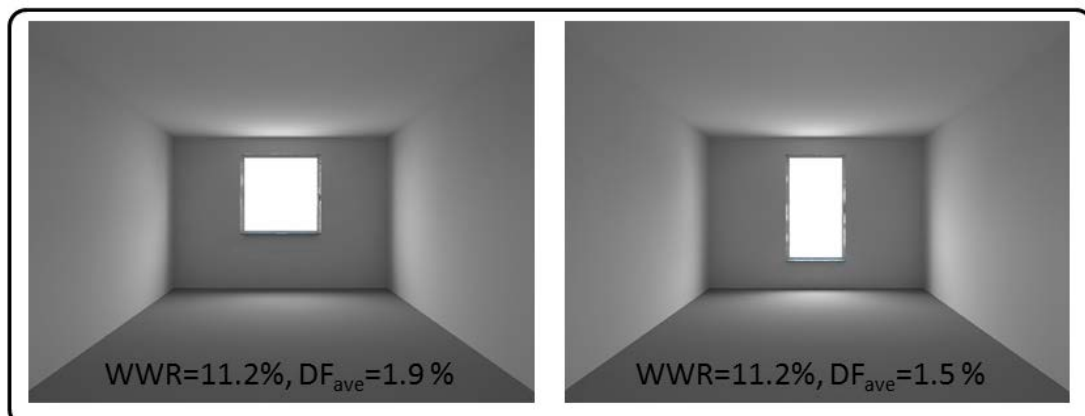
- Βορεινά ανοίγματα: ελάχιστα ηλιακά κέρδη, σχετική σταθερότητα στην παροχή διάχυτου φωτισμού, γενικά μικρές τιμές φυσικού φωτισμού (το μέγεθος των ανοιγμάτων έχει σημασία) , θερμικές απώλειες για τους χώρους.
- Νότια ανοίγματα : Ηλιακά κέρδη, «δυναμικά» χαρακτηριστικά του φυσικού φωτισμού λόγω της πιθανής παρουσίας ηλιακών ιχνών. Η χρήση σκίασης πιθανόν να τροποποιήσει τα προαναφεθέντα χαρακτηριστικά.
- Δυτικά, ανατολικά ανοίγματα: χαμηλή θέση ήλιου, είσοδος ηλιακών ακτίνων, τα δυτικά ανοίγματα χρειάζονται τη σχετική ηλιοπροστασία (μείωση φορτίων αιχμής για ψύξη).

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο διαφορετικός χειρισμός του άμεσου ηλιακού φωτισμού λόγω της διαφοροποίησης της γεωμετρίας των ανοιγμάτων. Είναι σημαντική η εξής παρατήρηση. Μικρότερων διαστάσεων ανοίγματα μετατρέπουν το πάχος του τοίχου σε πολύ καλής απόδοσης σύστημα σκίασης ιδίως δε αν ο υαλοπίνακας τοποθετηθεί στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου.



Σχήμα 7.21: Επίδραση διαφορετικής γεωμετρίας ανοιγμάτων στην κατανομή του άμεσου ηλιακού φωτισμού.

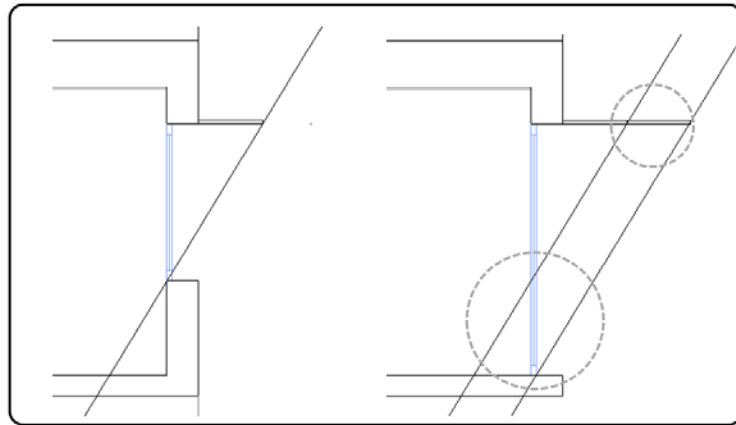
Τα επίπεδα του φυσικού φωτισμού εκτιμώνται σε επιφάνεια που ενδιαφέρει (εργασίας) ή σε συγκεκριμένα σημεία στον χώρο. Συνεπώς η σχετική θέση του ανοίγματος με την επιφάνεια εργασίας έχει καθοριστική σημασία και για τα επίπεδα αλλά και την κατανομή του φυσικού φωτισμού. Το παρακάτω παράδειγμα παρουσιάζει την κατανομή των παραγόντων φυσικού φωτισμού (μια σχετικά εύκολη στη χρήση παράμετρο) σε οριζόντιο επίπεδο εργασίας (0.8 μ από το δάπεδο).



Σχήμα 7.22: Η θέση αλλά και σχήμα του ανοίγματος επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή του φυσικού φωτισμού στο χώρο.

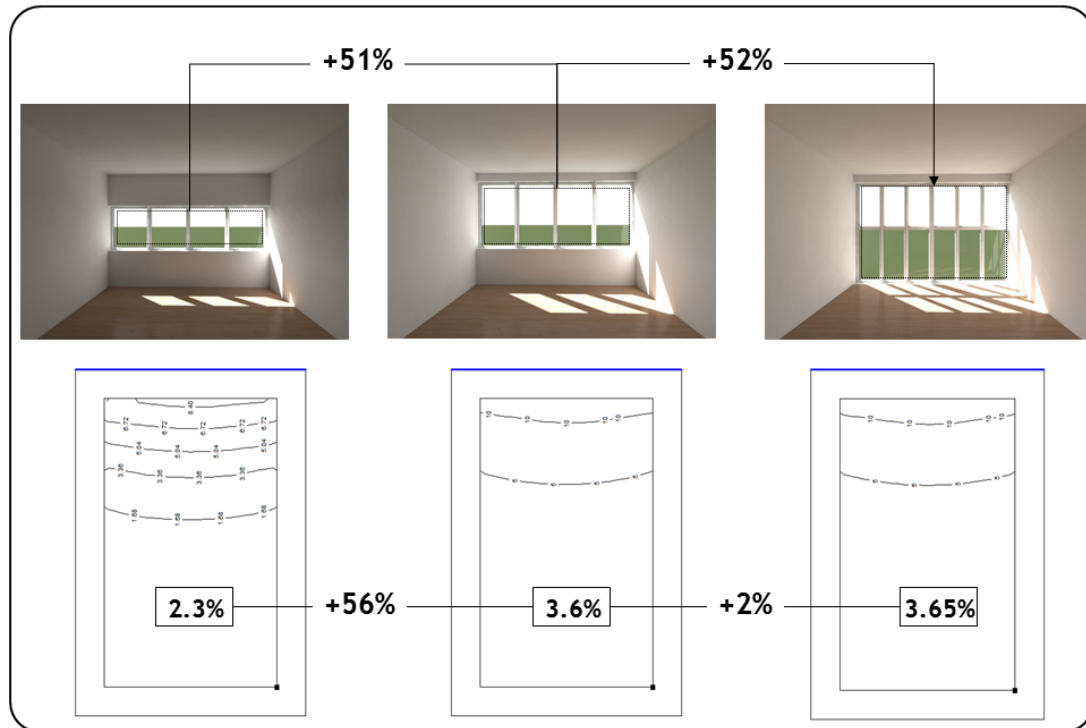
Η επέκταση του ανοίγματος προς το δάπεδο και κάτω από την επιφάνεια εργασίας δεν προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την αύξηση των επιπέδων φωτισμού. Αν ο σκοπός είναι η αύξηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού, έχει σημασία ο τρόπος με τον οποίο θα «συνδεθεί» αυτή με την αύξηση του μεγέθους του ανοίγματος. Σε γενικές γραμμές η σημαντική αύξηση του μεγέθους του ανοίγματος που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια εργασίας (~0.85μ) συνοδεύεται συνήθως και από σημαντική αύξηση των επιπέδων φωτισμού κάτι που δεν παρατηρείται στην περίπτωση που το άνοιγμα επεκτείνεται με μείωση του ύψους της ποδιάς του.

Η επέκταση του ανοίγματος με την μείωση της ποδιάς δημιουργεί και ένα επιπρόσθετο πρόβλημα που θα πρέπει να αντιμετωπισθεί και είναι η σκίαση αυτού του τμήματος. Αν π.χ. είχε υιοθετηθεί πρόβολος τώρα το μήκος του θα πρέπει να αυξηθεί για να αντιμετωπισθεί το μεγαλύτερο ύψος του ανοίγματος (πολλές φορές η συγκεκριμένη αύξηση δεν είναι εφικτή).



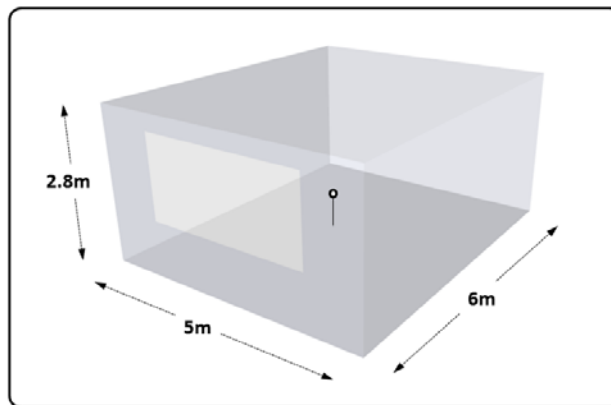
Σχήμα 7.23: Η τροποποίηση της ποδιάς σε διαφανές στοιχείο επηρεάζει τη σκίαση αλλά δεν συνιστά σημαντικό στην αύξηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια τυπική αύξηση (ίδιο ποσοστό) της επιφάνειας ενός ανοίγματος λόγω α) αύξησης του ύψους του προεκκίτου β) λόγω αύξησης του πλάτους του ανοίγματος και γ) λόγω μείωσης του ύψους της ποδιάς και η συνεπακόλουθη αύξηση του ΠΦΦ.

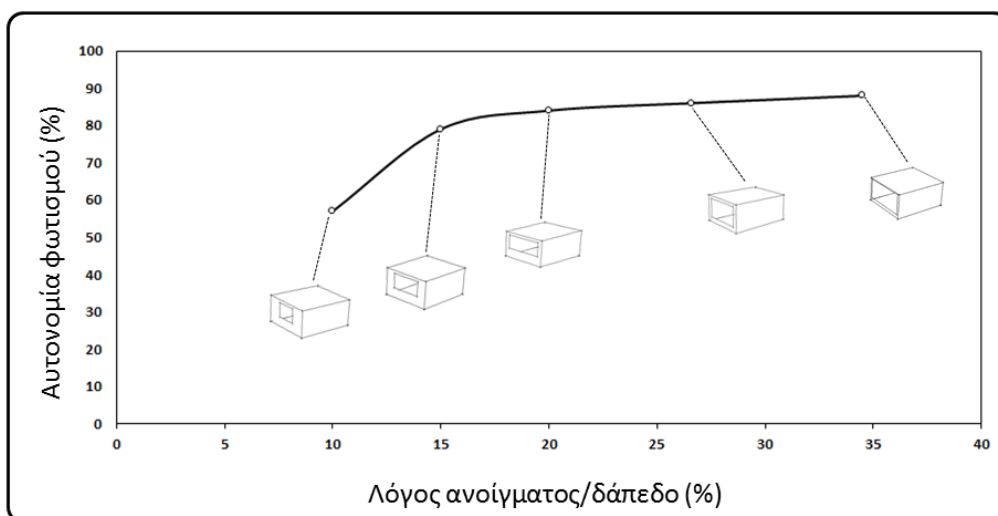


Σχήμα 7.24: Σχετική μεταβολή μεγέθους ανοιγμάτων και συσχετισμός της με την αύξηση της μέσης τιμής του ΠΦΦ. Παρατηρείστε ποσο λίγο διαφέρουν οι τιμές του ΠΦΦ στις δύο τελευταίες περιπτώσεις.

Συνήθως οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με την παρουσία του συστήματος σκίασης. Αν χρειαστεί να αυξηθεί σε κάποιο βαθμό η επιφάνεια του ανοίγματος είναι προφανές ότι πρέπει να τροποποιηθεί και το σύστημα σκίασης ώστε να ικανοποιεί κάποια συγκεκριμένη απαίτηση. Η συνεχής αύξηση του ανοίγματος οδηγεί σε μεγαλύτερη είσοδο φωτεινής ροής αλλά αυτό συνοδεύεται και από ηλιακά κέρδη. Επειδή τα συνιστώμενα επίπεδα φωτισμού για διάφορους χώρους αποφασίζονται στα αρχικά στάδια της ανάλυσης (π.χ. 500 lux στις επιφάνειες εργασίας τυπικών χώρων γραφείου) τα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας από το σύστημα φωτισμού ρυθμίζονται ώστε να είναι σε θέση να παρέχουν αυτή την τιμή. Δηλ. σε σύστημα συνεχούς ρύθμισης της φωτεινής ροής (βλ. σχετική παράγραφο, dimming) των λαμπτήρων, η κατανάλωση ενέργειας σε αυτό μειώνεται όσο αυξάνονται τα επίπεδα φυσικού φωτισμού και ελαχιστοποιείται όταν επιτευχθούν τιμές π.χ. > 500 lux. Συνεπώς από αυτή την τιμή και πάνω δεν υπάρχουν πρόσθετα ενεργειακά οφέλη από την μείωση της κατανάλωσης του ηλεκτροφωτισμού. Συνοπτικά, η αύξηση του μεγέθους των ανοιγμάτων σε σχέση με την επιφάνεια του χώρου αυξάνει την κατανάλωση ηλεκτρισμού για ψύξη ενώ μειώνει την κατανάλωση ηλεκτροφωτισμού μέχρι ενός σημείου. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω γραφήμα.

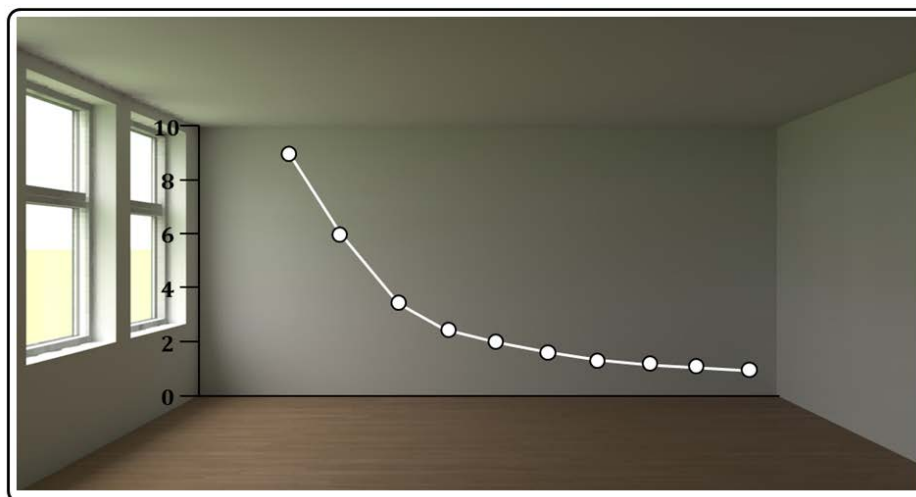


Σχήμα 7.25: Τυπικός χώρος για τον υπολογισμό .



Σχήμα 7.26: «Κορεσμός» όσον αφορά την εξοικονόμηση από τον φυσικό φωτισμό (εννοείται στην συγκεκριμένη περίπτωση η εξοικονόμηση από τον περιορισμό της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτροφωτισμού).

Η ανισοκατανομή του φυσικού φωτισμού σε χώρους με κάθετα ανοίγματα είναι εγγενές χαρακτηριστικό του. Συνεπώς είναι δύσκολο μόνο με τη χρήση πλευρικών ανοιγμάτων σε κάποιο χώρο να επιτευχθεί ομοιομορφία ($E_{min}/E_{average}$) ίδια με αυτή που απαιτείται στον σχεδιασμό του συστήματος ηλεκτροφωτισμού (και ίσως μη επιθυμητή !). Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή των παραγόντων φυσικού φωτισμού σε σχέση με την απόσταση από το άνοιγμα (εκθετική μείωση).



Σχήμα 7.27: Εκθετική μείωση των τιμών ΠΦΦ.

Η βελτίωση της ομοιομορφίας μπορεί να επιτευχθεί :

- με μείωση του βάθους του χώρου. Με αυτό τον τρόπο «αυξάνεται» η ελάχιστη τιμή. Μια πρακτική προσέγγιση είναι η εφαρμογή του τύπου του Lynes^{108,109} για την αποφυγή σχεδιασμού χώρων με μεγάλο βάθος. Η εξίσωση που περιγράφει αυτή την συνθήκη είναι η εξής:

$$L/W + L/Hw \leq 2/(1-\rho) \quad (7.1)$$

Όπου L,W,Hw είναι το μήκος, πλάτος και ύψος του προεκκυστού από το δάπεδο του χώρου και ρ η μέση ανακλαστικότητα των επιφανειών στο πίσω μισό μέρος του χώρου. Η μέση ανακλαστικότητα υπολογίζεται με τη βοήθεια του τύπου :

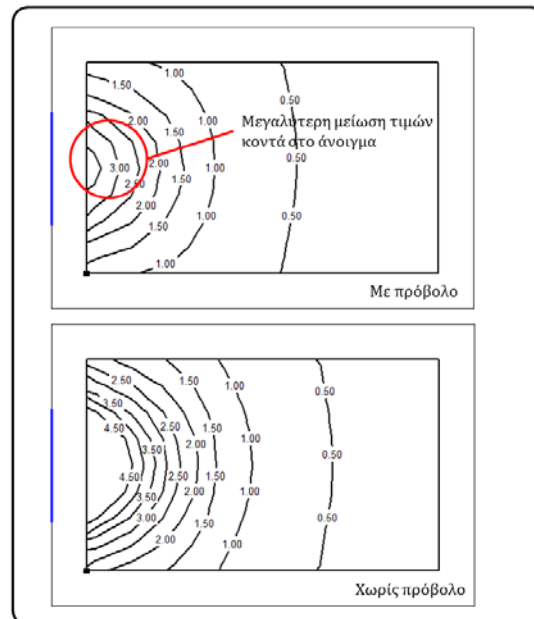
$$\rho = (\rho_{\text{επιφάνειας1}} * A_{\text{επιφάνειας1}} + \rho_{\text{επιφάνειας2}} * A_{\text{επιφάνειας2}} + \dots) / (A_{\text{επιφάνειας1}} + A_{\text{επιφάνειας2}} + \dots) \quad (7.2)$$

Η επίδραση του παραπάνω τύπου είναι να διατηρηθεί ο λόγος της στάθμης φυσικού φωτισμού στους εμπρός μισό τμήμα του δωματίου προς το πίσω μισό στο 3/1.

- με χρήση σκίασης. Η σκίαση επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό της κατανομή του φυσικού φωτισμού. Ενδιαφέρει γενικά η υιοθέτηση συστημάτων σκίασης που και να παρέχουν επαρκή έλεγχο των ηλιακών κερδών χωρίς να επυβαρύνουν δυσμενώς την ομοιομορφία. Για παράδειγμα, η χρήση προβόλου έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των επιπέδων φωτισμού πολύ περισσότερο κοντά στο άνοιγμα από ότι σε σημεία μακριά από αυτό. Αυτή η περίπτωση παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

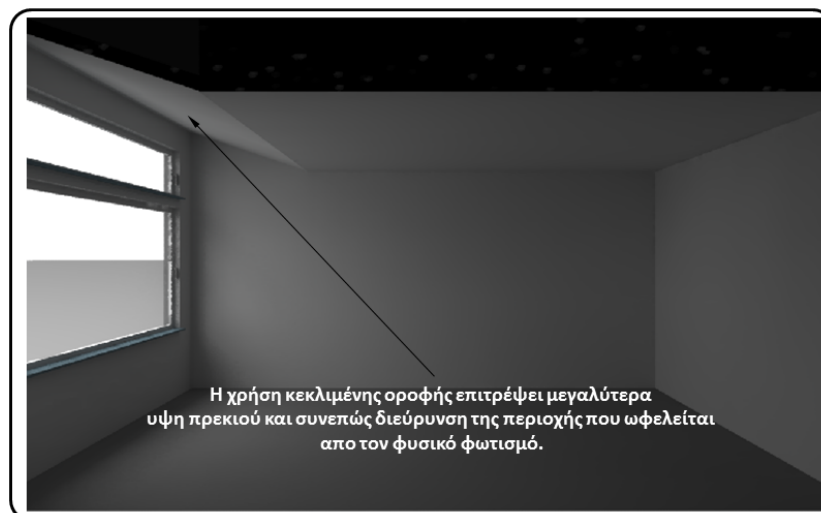
¹⁰⁸ Lynes J.A. "A sequence for daylighting design", Lighting Research and Technology ,11(2), 1979

¹⁰⁹ CIBSE , Daylighting and window design, Lighting Guide LG10, 1999



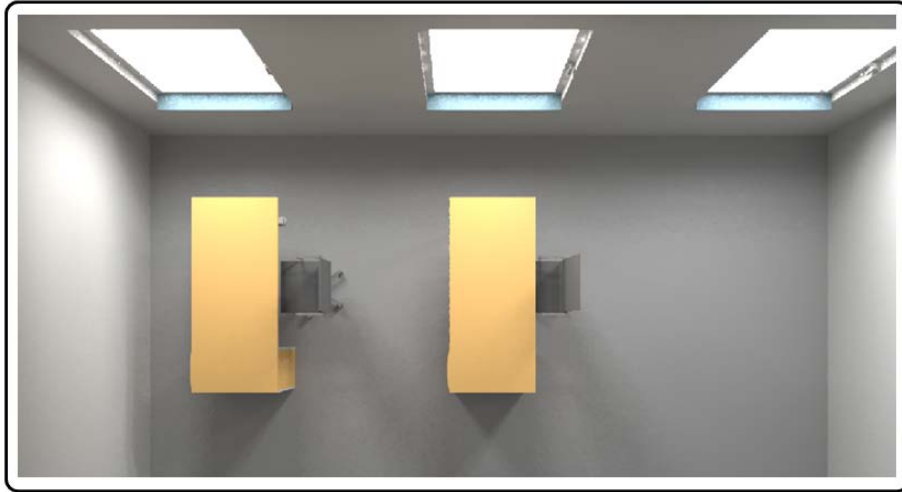
Σχήμα 7.28: Τροποποίηση κατανομής ΠΦΦ λόγω ύπαρξης σκίασης σε τυπικό γραφειακό χώρο.

- Τα οριζόντια ανοίγματα συμβάλλουν περισσότερο στην αύξηση της ομοιομορφίας, χρειάζεται όμως προσοχή στη σκίαση τους.
- Με τη δημιουργία κλίσης στην οροφή του χώρου. Η συγκεκριμένη τεχνική επιτρέπει την αύξηση του ύψους των φεγγιτών και με αυτό τον τρόπο και το βάθος της περιμετρικής ζώνης.



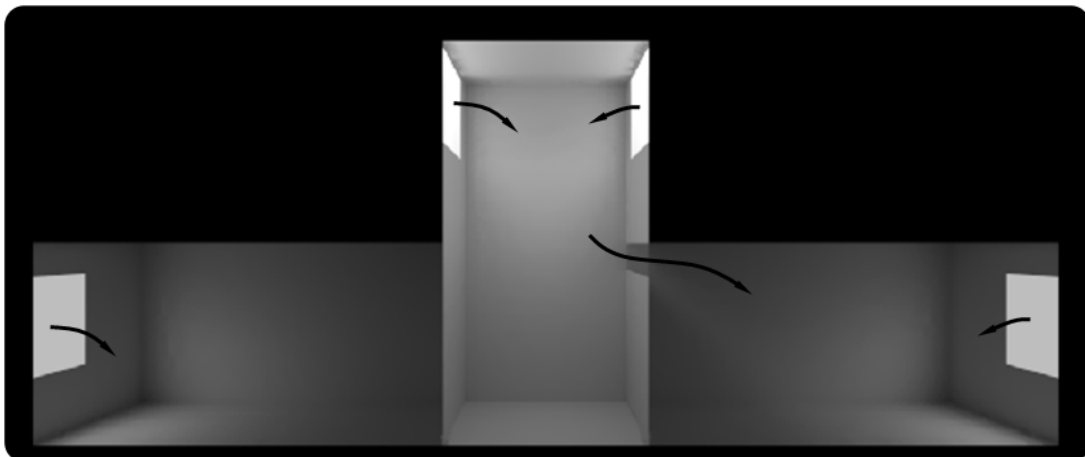
Σχήμα 7.29: Χρήση κεκλιμένης οροφής

- Η ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού τροποποιείται σημαντικά όταν αντί ενός συνεχούς οριζόντιου ανοίγματος χρησιμοποιείται μια σειρά από μικρότερα δημιουργώντας αντίθεσεις. Ο συνδυασμός ανοίγματος με π.χ. γραφεία ενδείκνυται σε αυτή την περίπτωση.



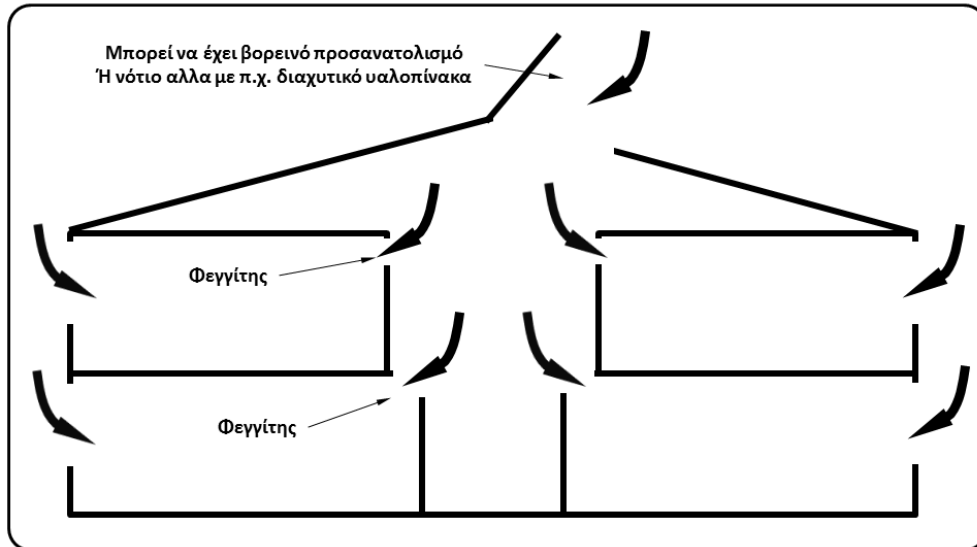
Σχήμα 7.30: Συνδυασμός θέσης ανοιγμάτων με γραφεία

- Με αμφίπλευρο φωτισμό. Συνήθως η χρήση φεγγιτών στον τοίχο απέναντι από το κύριο άνοιγμα μέσω των οποίων μεταφέρεται φυσικό φως από γειτονικό χώρο π.χ. αίθριο ή διάδρομο βελτιώνει την ομοιομορφία σημαντικά.



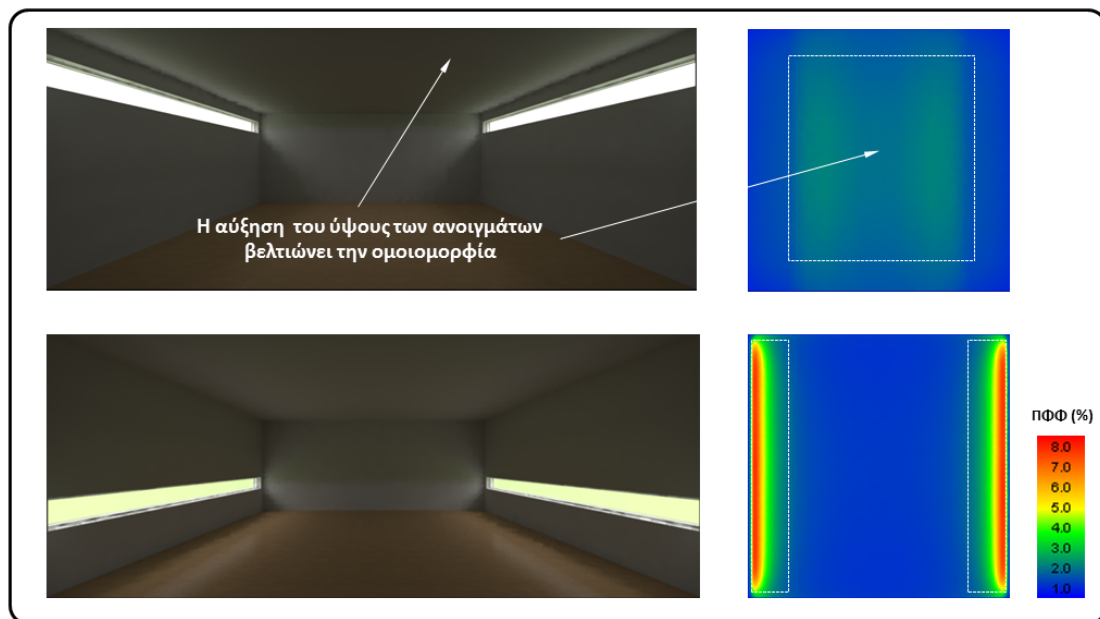
Σχήμα 7.31: Η χρήση αμφίπλευρου φωτισμού βελτιώνει την ομοιομορφία.

Μια χαρακτηριστική περίπτωση παρουσιάζεται στο παρακάτω σκαρίφημα. Παρατηρήστε τη κλίση των υαλοπινάκων του φεγγίτη στο ισόγειο.



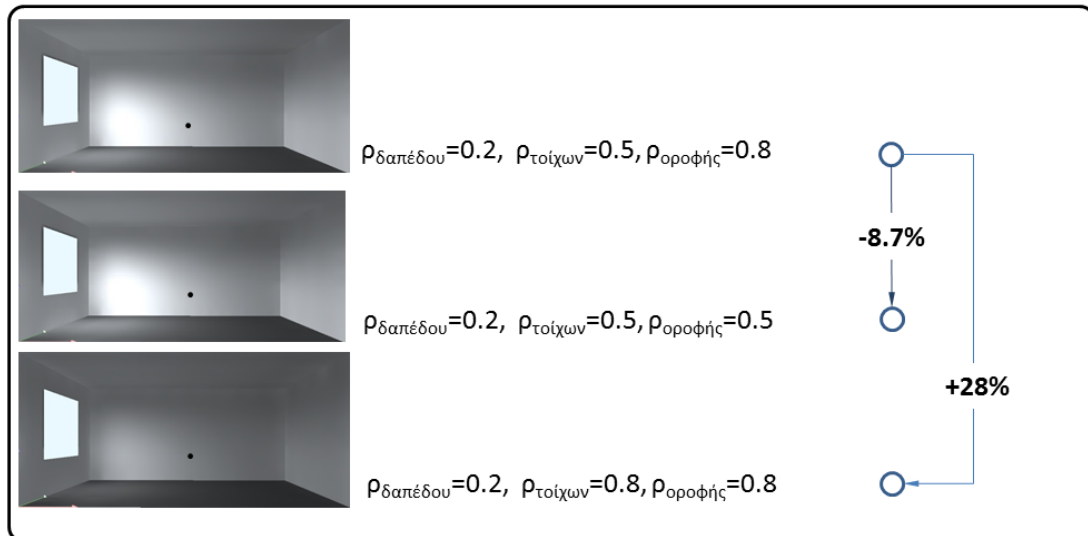
Σχήμα 7.32: Σχεδιαστική προσέγγιση αμφίπλευρου φωτισμού.

Οι φεγγίτες μπορούν να βοηθήσουν και στην διεύρυνση της περιμετρικής ζώνης όπως έχει παρουσιασθεί και σε προηγούμενη παράγραφο αλλά και να αυξήσουν την ομοιομορφία.



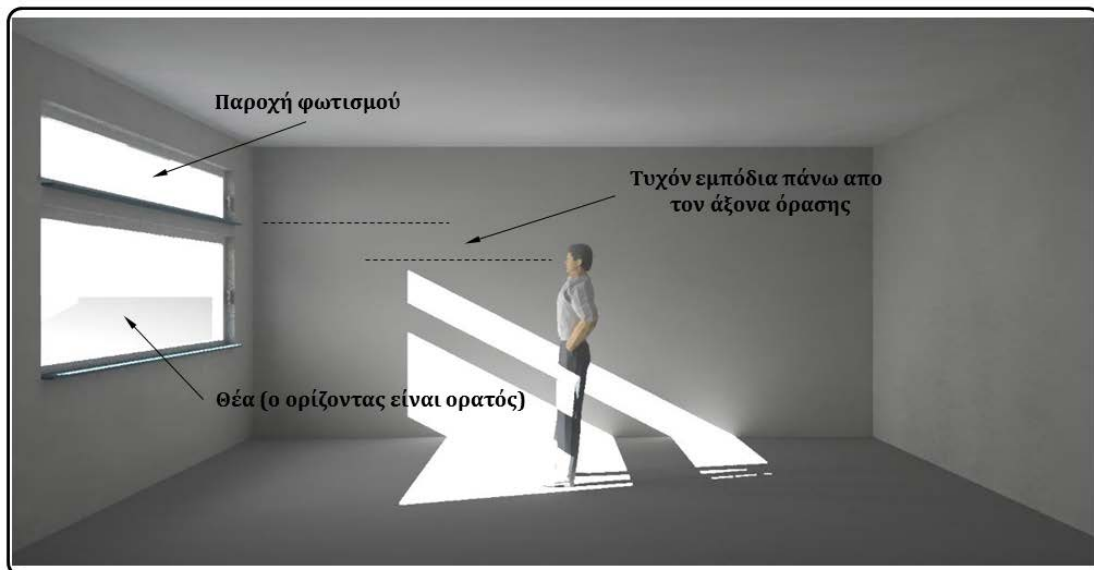
Σχήμα 7.33: Αμφίπλευρος φωτισμός. Η αύξηση του ύψους των ανοιγμάτων βελτιώνει την ομοιομορφία.

- Αύξηση ανακλαστικότητας. Η αύξηση της ανακλαστικότητας προφανώς συμβάλλει στην αύξηση του φωτισμού που οφείλεται στις εσωτερικές ανακλάσεις. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η επίδραση της ανακλαστικότητας μιας επιφάνειας δωματίου στην τιμή φωτισμού στο κέντρο του (ύψος 0.85μ).



Σχήμα 7.34: Δωμάτιο $4 \times 6 \times 2.8$ m με άνοιγμα 2×1.5 και $T_{\text{vis}}=0.65$, συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού. Μεταβολή της τιμής της εντάσης φωτισμού στο κέντρο του δωματίου λόγω τροποποίησης των ανακλαστικότητων.

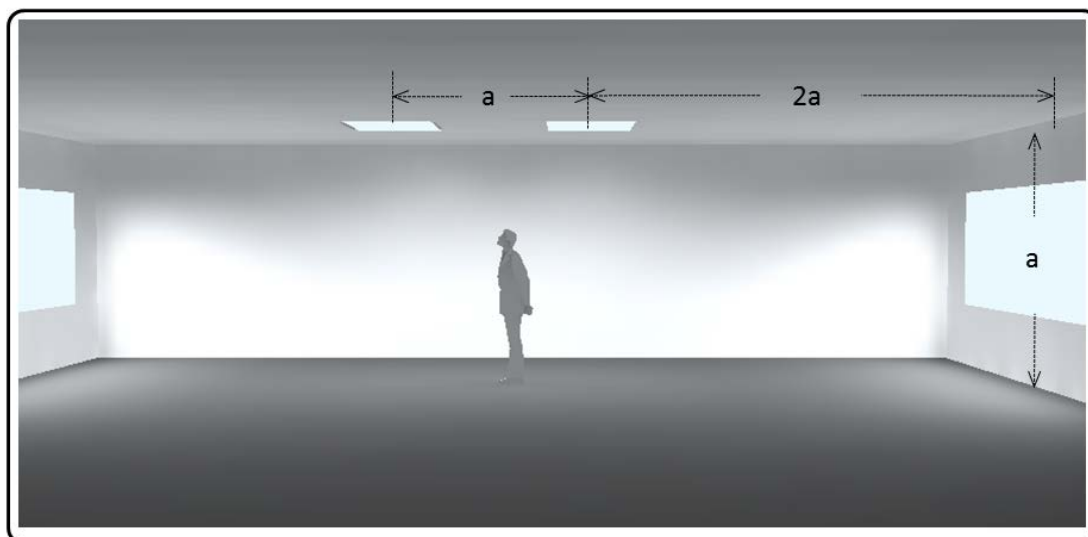
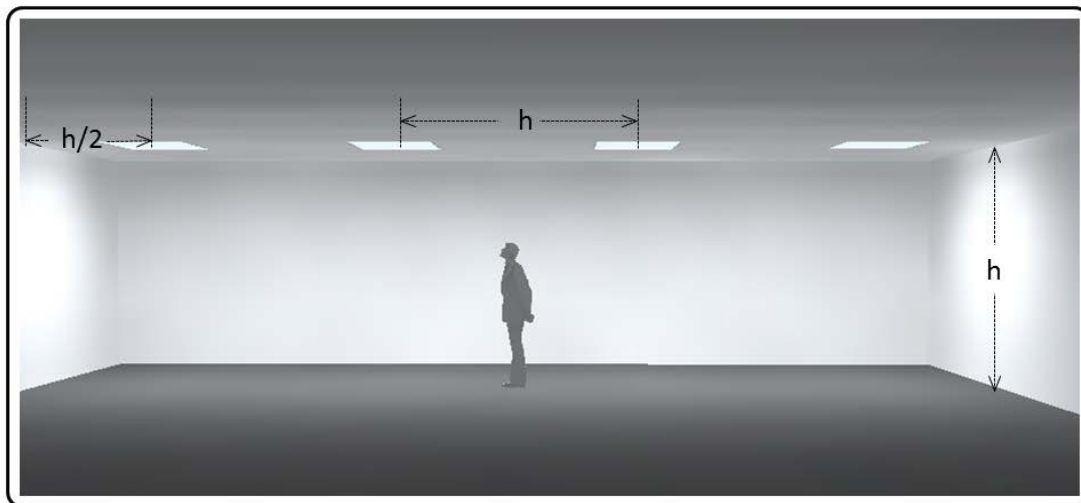
Ο χωρισμός του ανοίγματος σε δύο τμήματα καθ' ύψος με το χαμηλότερο να αποτελεί κυρίως τον παροχέα θέας και το ψηλότερο κυρίως τον παροχέα φωτισμού είναι μια ενδιαφέρουσα διαχείριση της πρόσοψης.



Σχήμα 7.35: Διαχωρισμός κάθετου ανοίγματος σε δύο επιμέρους με δυνατότητα διαφορετικής λειτουργίας.

Σε νεφοσκεπείς συνθήκες ο φωτισμός σε οριζόντιο επίπεδο είναι πολλαπλάσιος από τον φωτισμό σε κάθετο επίπεδο συνεπώς η παρεχόμενη ροή από οριζόντια ανοίγματα είναι μεγαλύτερη. Όμως τα οριζόντια ανοίγματα δέχονται σημαντικά αυξημένη άμεση ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και αυτό έχει σαν συνέπεια -στην περιοχή μας- η διαστασιολόγησή και η σκίαση τους να χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή.

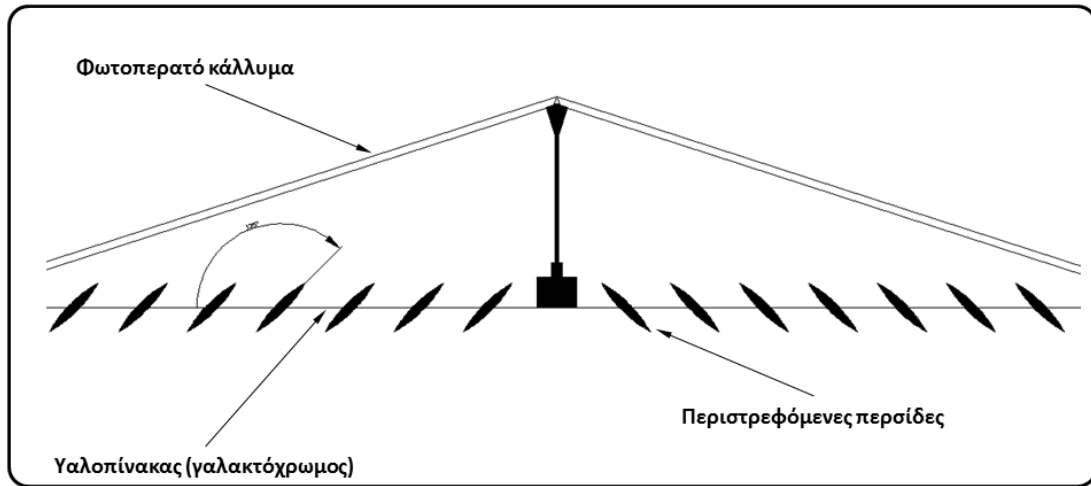
Μια αρχική προσέγγιση τοποθέτησης ανοιγμάτων¹¹⁰ είναι η απόσταση διαδοχικών ανοιγμάτων να είναι περίπου όση και το ύψος τους από το δάπεδο.



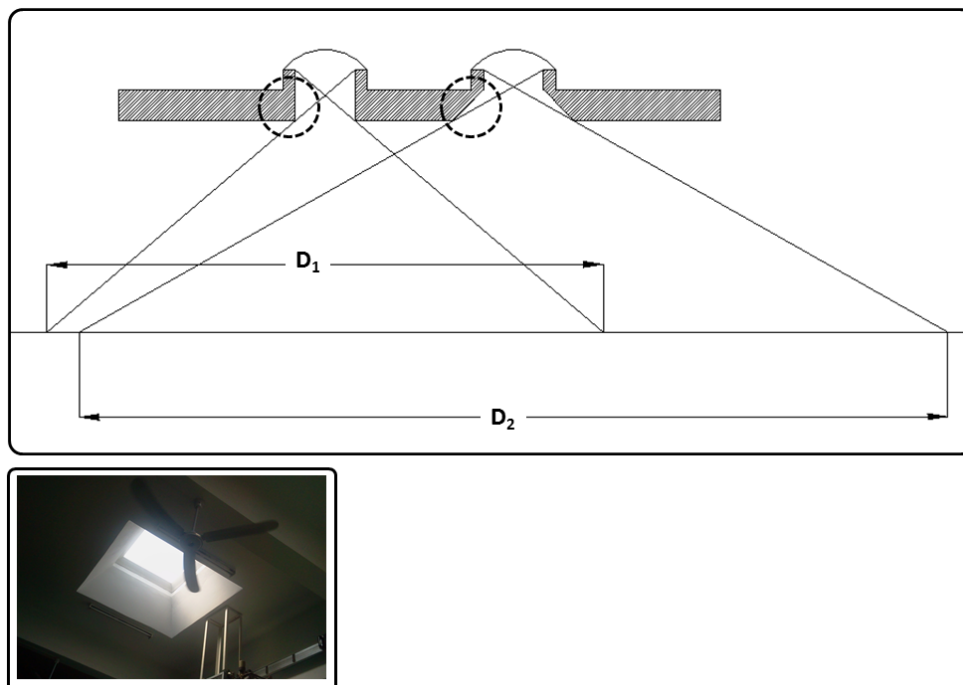
Σχήμα 7.36: Τοποθέτηση ανοιγμάτων οροφής με σκοπό την καλύτερη κατανομή του φυσικού φωτισμού.

Η χρήση τους επιτρέπει την επίτευξη μεγαλύτερων τιμών ομοιομορφίας (σε σχέση με τα κάθετα) ενώ σε μερικές περιπτώσεις, ο σχεδιασμός κάποιου συστήματος ελέγχου επιτρέπει τη ρύθμιση της φωτεινής ροής που εισέρχεται από αυτά. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις είναι η ρύθμιση των συστημάτων σκίασης π.χ. αιθρίου όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

¹¹⁰ Daylight guide for canadian commercial buildings
(<http://www.greenglobes.com/advancedbuildings/Daylighting%20Guide%20for%20Canadian%20Buildings%20Final6.pdf>)



Σχήμα 7.37: Ρύθμιση φυσικού φωτισμού με χρήση κινούμενων περσίδων ανάμεσα σε δύο φωτοπερατές (εξωτερική και εσωτερική) επιφάνειες.



Σχήμα 7.38: Τεχνική διεύρυνσης της ζώνης εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού.

Με τα ανοίγματα οροφής, η αύξηση του ύψους του χώρου οδηγεί σε βελτίωση της ομοιομορφίας κατανομής του φυσικού φωτισμού. Κλασικό παράδειγμα είναι το οπαίον (~4% επι του δαπέδου) στο Πάνθεον (Ρώμη). Το ύψος που βρίσκεται το άνοιγμα είναι ίσο με τη διάμετρο του θόλου. Οι μετρήσεις¹¹¹ της κατανομής των ΠΦΦ παρουσιάζουν μια εξαιρετική ομοιομορφία με μέση τιμή ~ 1%.

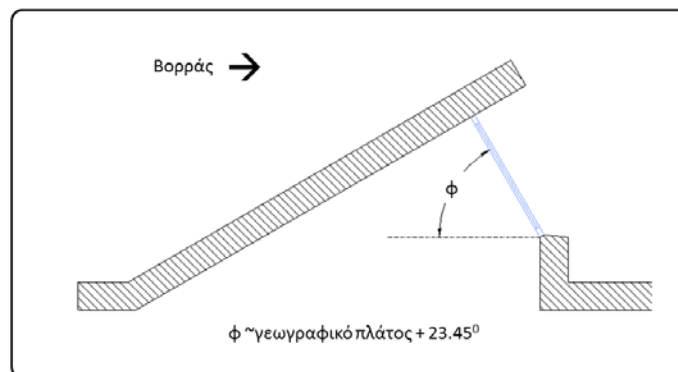
¹¹¹ Marc Fontoynt (Ed.), 1999, Daylight Performance of buildings, James&James Publ., ISBN 1-873936-87-7.



Σχήμα 7.39: Πάνθεον, Ρώμη.

Φεγγίτες στο δώμα

Προσφέρουν ένα σχετικό πλεονέκτημα που σχετίζεται με τον χειρισμό της ηλ. ακτινοβολίας. Ανάλογα με τον προσανατολισμό επιτρέπουν την είσοδο της (νότιος) ή όχι (βορράς). Στην τελευταία περίπτωση η κλίση τους πρέπει να ρυθμιστεί σε γωνία μεγαλύτερη του αθροίσματος (γεωγραφικό πλάτος τόπου $+23.45^\circ$).

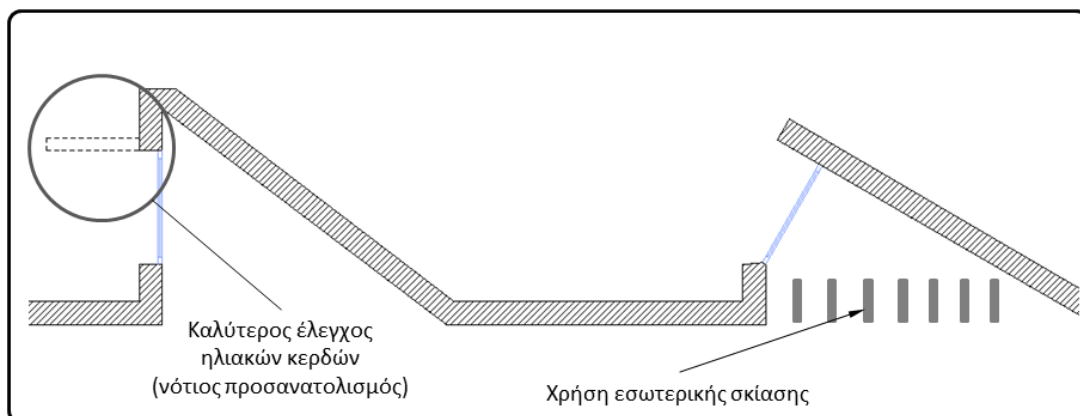


Σχήμα 7.40: Συνστώμενη κλίση φεγγιτών δώματος με βόρειο προσανατολισμό.



Σχήμα 7.41: Χρήση διαδοχικών φεγγιτών στο δώμα. Ένα αποτέλεσμα της συγκεκριμένης λύσης είναι η επίτευξη ομοιομορφίας φωτισμού.

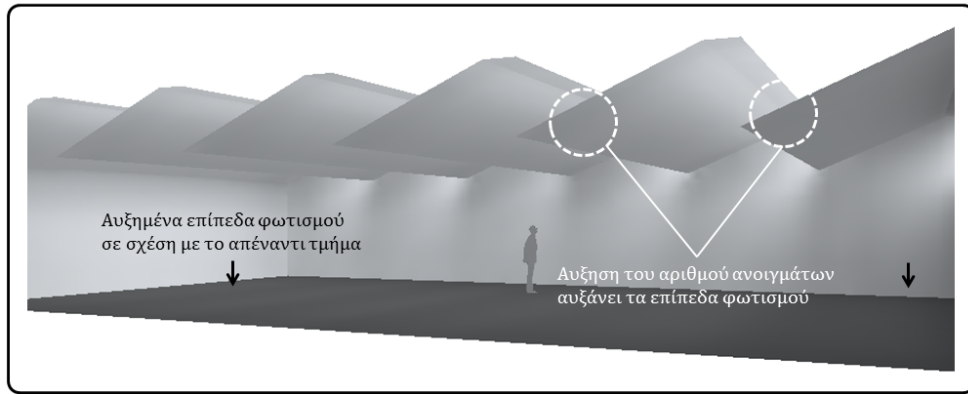
Κλασική περίπτωση υιοθέτησης αυτού του συστήματος είναι τα βιομηχανικά κτήρια. Ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων προς τον βορρά δεν δημιουργεί έντονες διακυμάνσεις στη λαμπρότητα των επιφανειών του χώρου λόγω εισόδου άμεσου ηλιακού φωτισμού. Το τελευταίο γεγονός ενδεχομένως να είναι ενοχλητικό στις περιπτώσεις υπάρξης μηχανών με κινούμενα μέρη.



Σχήμα 7.42: Χρειάζεται προσοχή στη σκίαση ανοιγμάτων οροφής με νότιο προσανατολισμό.

Μερικές σημαντικές παρατηρήσεις:

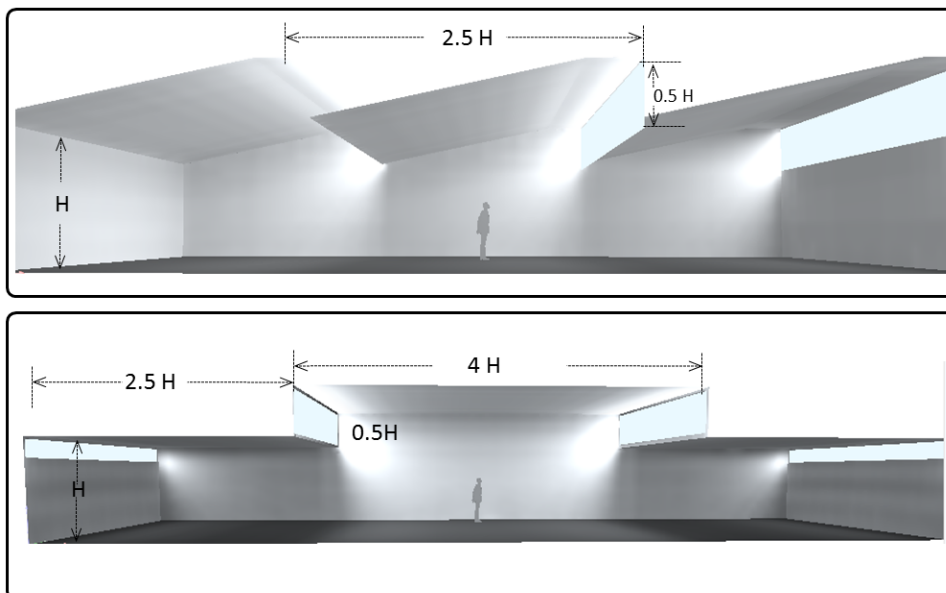
1. Η αύξηση του αριθμού των ανοιγμάτων αυξάνει γενικά και τα επίπεδα φωτισμού



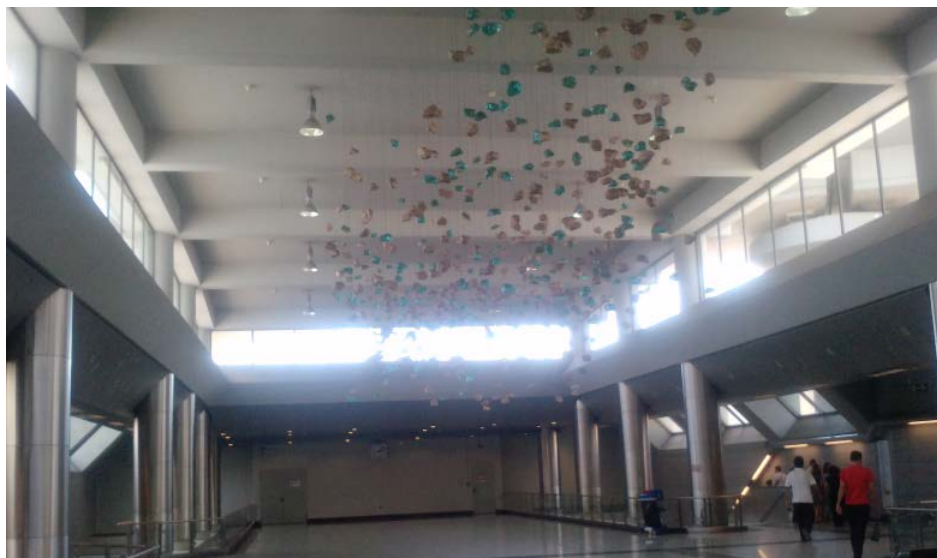
Σχήμα 7.43: Η πυκνότητα των ανοιγμάτων έχει καθοριστική σημασία για τα επίπεδα φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό.

2. Κατά μήκος του χώρου, τα επίπεδα φυσικού φωτισμού αυξάνονται όσο το σημείο υπολογισμού δέχεται φωτεινή ροή από μεγαλύτερο αριθμό ανοιγμάτων.
3. Η αυξημένη ανακλαστικότητα του δώματος αυξάνει και την φωτεινή ροή που φτάνει στο επίπεδο των ανοιγμάτων

Μερικοί πρακτικοί κανόνες διαστασιολόγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα αρχικά στάδια σχεδιασμού παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Να τονισθεί για μια ακόμη φορά η προσοχή που πρέπει να δοθεί στη συμπεριφορά των ανοιγμάτων κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών .



Σχήμα 7.44: Κανόνες διαστασιολόγησης φεγγιτών.



Σχήμα 7.45: Αμφίπλευροι φεγγίτες σε μεγάλο ύψος χρησιμοποιούνται για αύξηση της ομοιομορφίας

Υαλοπίνακες

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υαλοπινάκων είναι καθοριστικής σημασίας για το ενεργειακό ισιζύγιο του κτιρίου και επηρεάζει σημαντικά την θερμική και οπτική άνεση.

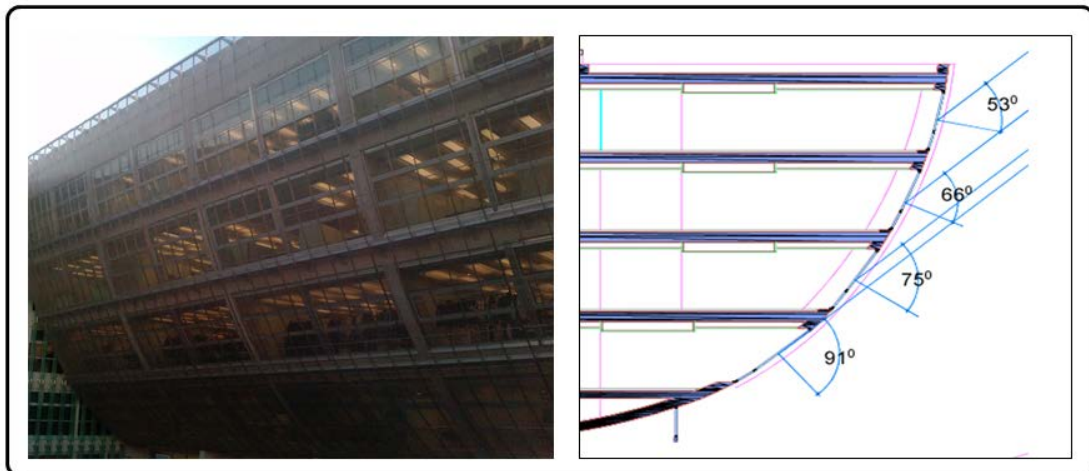
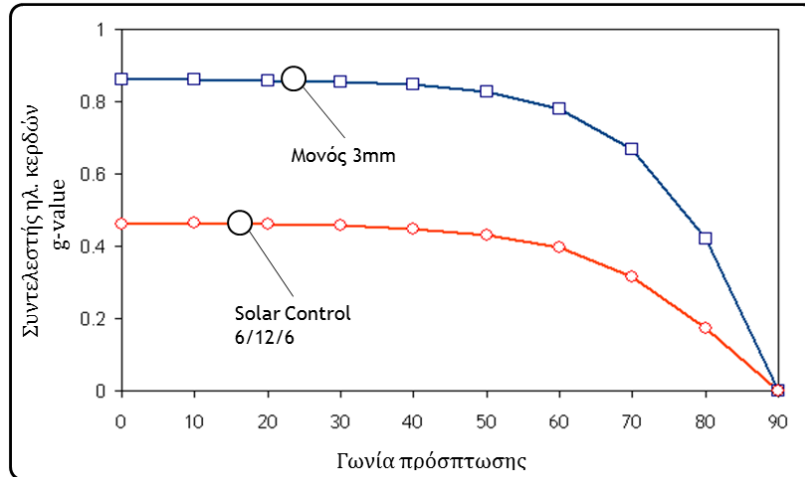
Προφανώς η διαδικασία επιλογής θα πρέπει να ικανοποιήσει ανταγωνιστικές παραμέτρους (π.χ. επάρκεια σε φυσικό φωτισμό-περιορισμό ηλιακών κερδών) και θα πρέπει επίσης να πραγματοποιείται σε συνδυασμό με το σύστημα σκίασης. Η σχεδιαστική προσέγγιση εδώ είναι η δημιουργία ενός κελύφους που αποτελείται από διαδοχικά επίπεδα (εξ. σκίαση/υαλοπίνακας/εσ. σκίαση) προσφέροντας τη δυνατότητα -επιπρόσθετα των ενεργειακών-να ρυθμιστούν και παράμετροι που συνδέονται με την ιδιωτικότητα, την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και τη ρύθμιση της θάμβωσης.

Σήμερα οι διαθέσιμοι υαλοπίνακες μπορούν να ικανοποιήσουν ένα τεράστιο εύρος πιθανών επιλογών. Τα χαρακτηριστικά τους μπορούν να ρυθμιστούν με :

- Την τροποποίηση των ιδιοτήτων με την βοήθεια χημικής επεξεργασίας (έγχρωμοι υαλοπίνακες).
- Την χρήση ειδικών επιστρώσεων. Υπάρχουν ανακλαστικές επιστρώσεις με σκοπό να ελατώσουν τα ηλιακά κέρδη, επιστρώσεις με μικρό συντελεστή εκπεμπτικότητας (Low-E) (περιορίζουν τη διάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας) και επιστρώσεις που εμφανίζουν ισχυρή φασματική επιλεκτικότητα. Η χρήση των τελευταίων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις που χρειάζεται να διατηρηθεί υψηλή τιμή στη διαπερατότητα στο ορατό (δηλ. πρακτικά να εξοικονομηθεί ενέργεια από τη χρήση του φυσικού φωτισμού) άλλα ταυτόχρονα να μειωθούν και τα ηλιακά κέρδη
- Την δυναμική μεταβολή της διαπερατότητας τους (ηλεκτροχρωμικοί, αεριοχρωμικοί, υγρών κρυστάλλων κλπ) με μια μικρή δαπάνη ηλ. ενέργειας.

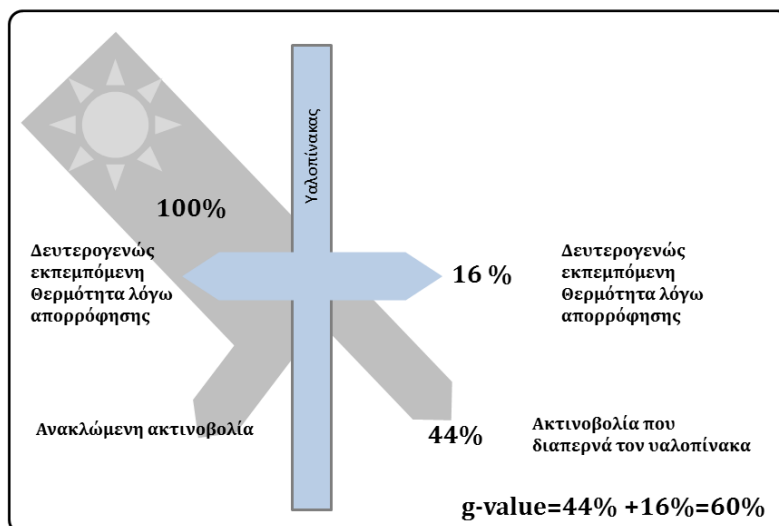
Χαρακτηριστικά μεγέθη που ενδιαφέρουν -και σχετίζονται άμεσα με τη χρήση του φυσικού φωτισμού- είναι :

1. Η διαπερατότητα στο ορατό τμήμα (380 - 780 nm) της ηλιακής ακτινοβολίας (T_{vis}). Είναι προφανές ότι αυξημένες τιμές της οδηγούν σε αυξημένα επίπεδα φυσικού φωτισμού. Η διαπερατότητα εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης με μείωση της προφανώς όταν αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Συνεπώς η κλίση της πρόσοψης μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας διατηρώντας όμως την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον



Σχήμα 7.46: Η κλίση (αρνητική) των υαλοπετασμάτων τροποποιεί τη είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας χωρίς σοβαρή μείωση της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον

2. Ο συντελεστής ηλιακών κερδών (g-value) ο οποίος είναι το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας (300 nm - 2500 nm) που διαπερνά τον υαλοπίνακα άμεσα μαζί και της δευτερογενώς εκπεμπόμενης θερμότητας από αυτόν προς το εσωτερικό σε σχέση με την προσπίπτουσα, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



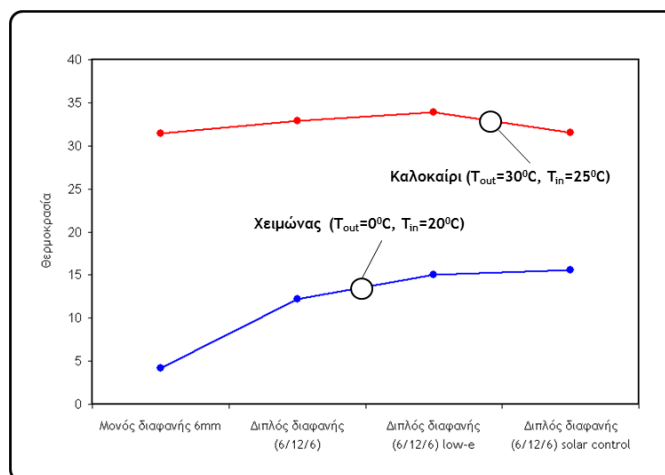
Σχήμα 7.47: Ορισμός συντελεστή ηλιακών κερδών

3. Ανακλαστικότητα (εσωτερική ή εξωτερική) στο ορατό τμήμα της ηλ. ακτινοβολίας. Το άθροισμα διαπερατότητας, ανακλαστικότητας και απορροφητικότητας είναι 100%. Η εξωτερική τιμή επηρεάζει ιδιαίτερα το γειτονικό περιβάλλον του κτηρίου μέσω της αύξησης της ανακλώμενης ακτινοβολίας και σε πολλές περιπτώσεις της θάμβωσης που μπορεί να προκληθεί.
4. Δείκτης χρωματικής απόδοσης (Ra). Με μέγιστη τιμή το 100 ο δείκτης εκτιμά την επίδραση του συγκεκριμένου υαλοπίνακα στην απόδοση των χρωμάτων του χώρου αλλά και στο τρόπο που φαίνεται το εξωτερικό περιβάλλον. Γενικά τιμές >80 είναι σχετικά καλές, >90 πολύ καλές. Για την εκτίμηση του συγκεκριμένου δείκτη χρησιμοποιείται πηγή φωτισμού D65 (δηλ. πηγή με συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος ~6500°K).

Να τονισθεί σε αυτό το σημείο ότι η επιλογή των υαλοπινάκων βασίζεται και σε επιπλέον παραμέτρους (π.χ. U-value, αντοχή σε πυρκαϊά, διαπερατότητα στο υπεριώδες, κλπ) για τις οποίες δεν γίνεται λεπτομερής αναφορά σε αυτό το κείμενο. Μια απλή σχέση μεταξύ διαπερατότητας (τ), ανακλαστικότητας (ρ) και απορροφητικότητας (α) είναι η :

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (7.3)$$

Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες περιορίζουν τα ηλιακά κέρδη λόγω απορρόφησης ενώ οι ανακλαστικοί λόγω -προφανώς- της ανάκλασης. Σαν συνέπεια της αυξημένης απορρόφησης οι έγχρωμοι υαλοπίνακες αναπτύσσουν μεγαλύτερη θερμοκρασία. Συνεπώς σε διπλή υάλωση ο έγχρωμος υαλοπίνακας τοποθετείται εξωτερικά (απομάκρυνση θερμότητας) αν ενδιαφέρει η μείωση των ηλιακών κερδών. Το συγκεκριμένο γεγονός (δηλ. της θέρμανσης των υαλοπινάκων) έχει μια σημαντική επίδραση και στην θερμική άνεση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια ενδεικτική διαφοροποίηση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας των υαλοπινάκων ανάλογα με τον τύπο τους και την εποχή.



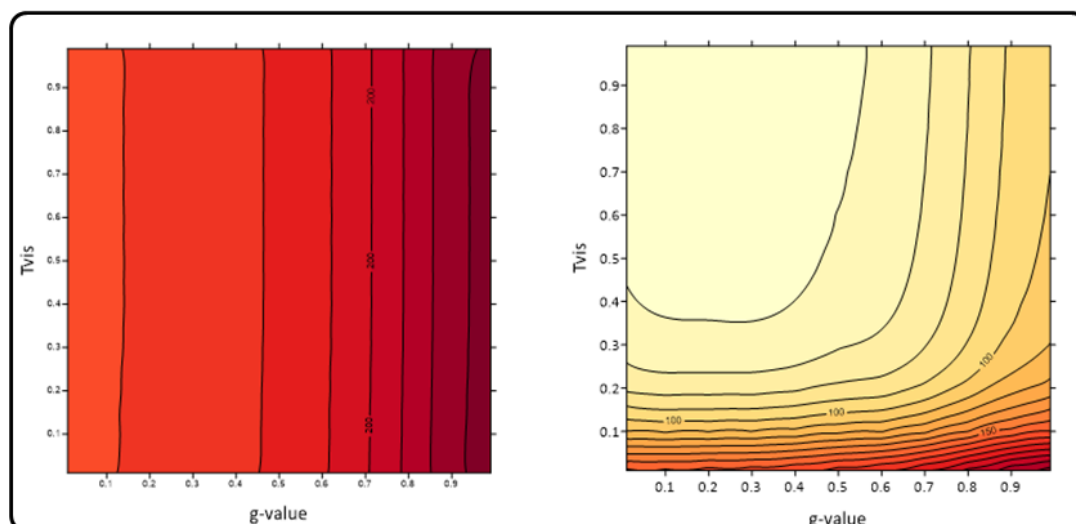
Σχήμα 7.48: Ενδεικτική διαφοροποίηση της θερμοκρασίας των υαλοπινάκων ανάλογα με τον τύπο τους και την εποχή.

Διαφορετικής απόχρωσης υαλοπίνακες έχουν διαφορετικές τιμές τόσο στη διαπερατότητα στο ορατό όσο και στον συντελεστή και ηλιακών κερδών. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τιμές για την διαπερατότητα στο ορατό και τον συντελεστή ηλιακών κερδών έγχρωμων υαλοπινάκων με πάχος 6 mm (χρησιμοποιήθηκε η International Glazing Data Base v.14). Οι υαλοπίνακες με πράσινο χρώμα γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές διαπερατότητας στο ορατό για την ίδια τιμή του συντελεστή ηλιακών κερδών (δηλ. μεγαλύτερη τιμή του λόγου T_{vis}/g -value).

	Διαπερατότητα στο ορατό (T_{vis})	Συντελεστής ηλιακών κερδών (g -value)	T_{vis}/g -value
Διαφανής	0.884	0.817	1.08
Πράσινου χρώματος	0.754	0.6	1.25
Μπλέ χρώματος	0.574	0.581	0.98
Γκρί χρώματος	0.437	0.604	0.72

Πίνακας 7.2.: Τυπικά χαρακτηριστικά έγχρωμων υαλοπινάκων.

Με τους έγχρωμους υαλοπίνακες η μείωση του συντελεστή ηλιακών κερδών συνοδεύεται με μείωση της διαπερατότητας (και το αντίστροφο). Σήμερα είναι ζητούμενη η κατασκευή υαλοπινάκων με κάποια φασματική επιλεκτικότητα γεγονός που επιτρέπει και την χρήση φυσικού φωτισμού αλλά και την μείωση των ηλιακών κερδών. Ο λόγος (T_{vis}/g -value) είναι ενδεικτικός για την φασματική επιλεκτικότητα του υαλοπίνακα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ταυτόχρονα και η σχετική μείωση των ηλιακών κερδών αλλά και η εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται με παραμετρική ανάλυση η επίδραση δύο παραμέτρων (της διαπερατότητας στο ορατό (T_{vis}) και του συντελεστή ηλιακών κερδών (g -value)) στην πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας. Ο χώρος που έχει χρησιμοποιηθεί είναι ένα τυπικό γραφείο διαστάσεων (5.4x 3.4 m) με μια εξωτερική επιφάνεια (οι υπόλοιπες θεωρούνται αδιαβατικές), ποσοστό υαλοπινάκων 20% επι του δαπέδου και νότιο προσανατολισμό. Η εγκατεστημένη ισχύς για φωτισμό είναι 16 W/m^2 , με δέκα ώρες λειτουργίας και τυπικές τιμές για επιθυμητές θερμοκρασίες θέρμανσης - ψύξης (20° & 26° C).



Σχήμα 7.49: Αν δεν υιοθετηθεί σύστημα ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών με χρήση αισθητήρα φωτισμού ή αύξηση του συντελεστή ηλιακών κερδών οδηγεί μονοσήμαντα σε αύξηση της πρωτογενούς κατανάλωσης (αριστερό διάγραμμα). Η υιοθέτηση του όμως (δεξί διάγραμμα) δημιουργεί περιοχές με ελάχιστες τιμές. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται κάποιος υαλοπίνακας του οποίου ο συνδυασμός $T_{vis}/g\text{-value}$ βρίσκεται στην περιοχή αυτή. Να ληφθεί υπόψη ότι δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί $T_{vis}/g\text{-value}$.

Στο αριστερό σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή στην πρωτογενή ενέργεια (για ψύξη, θέρμανση, φωτισμό) για διάφορους συνδυασμούς $T_{vis}/g\text{-value}$ χωρίς να έχει υιοθετηθεί κάποιο σύστημα που εκμεταλλεύεται τον φυσικό φωτισμό ρυθμίζοντας την φωτεινή ροή από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού (dimming). Να τονισθεί ότι δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί τιμών $T_{vis}/g\text{-value}$ (δηλ. δεν υπάρχουν υαλοπίνακες π.χ. με $T_{vis}=87\%$ και $g\text{-value}=0.1$). Είναι φανερό ότι η αύξηση της τιμής του συντελεστή ηλιακών κερδών οδηγεί σε αύξηση της πρωτογενούς κατανάλωσης. Στο δεξί σχήμα έχει υιοθετηθεί σύστημα ρύθμισης του ηλεκτροφωτισμού με χρήση του φυσικού φωτισμού. Είναι φανερή η μείωση της κατανάλωσης αλλά και η αλλαγή στους συνδυασμούς τιμών $T_{vis}/g\text{-value}$ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη κατανάλωση.

Γενικά για μεγιστοποίηση χρήσης φυσικού φωτισμού χρειάζεται $T_{vis}>65-70\%$. Σε περιπτώσεις που η κατανάλωση για ψύξη είναι σημαντική συνιστώμενες τιμές για τον συντελεστή ηλιακών κερδών είναι $<40-50\%$ (οι τιμές αυτές τροποποιούνται και λόγω υπαρξης σκίασης) ενώ χρησιμοποιούμε μεγαλύτερες τιμές όταν χρειάζονται τα ηλιακά κέρδη (παθητική θέρμανση).

Σήμερα η επιλεκτική συμπεριφορά των ιδιοτήτων των υαλοπινάκων δεν βασίζεται στο χρώμα αλλά επιτυγχάνεται με τροποποίηση των ιδιοτήτων των υαλοπινάκων λόγω επίστρωσης διαφανών υλικών στην επιφάνεια τους. Δύο τεχνικές υπάρχουν :

- **Πυρόλυση**

Η επίστρωση πραγματοποιείται είτε με εκτόξευση του υλικού (οξείδιο ίνδιου-κασσίτερου) από σειρά ακροφυσίων πάνω στην επιφάνεια υαλοπινάκων οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλη θερμοκρασία είτε με εναπόθεση ατμών (atmospheric pressure vapor deposition, APCVD) . Αυτού του είδους οι

επικαλύψεις λέγονται «σκληρές» και μπορούν να εκτεθούν σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σε μονό υαλοπίνακα.

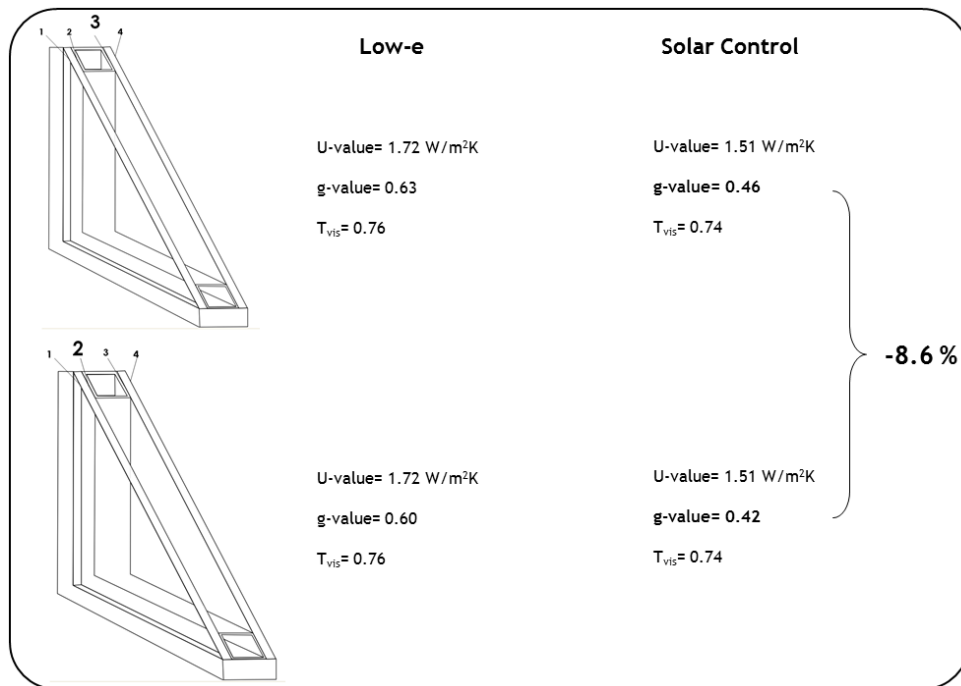
- **Εναπόθεση με ιοντοβολή**

Σε αυτή την τεχνική, ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε ιονισμένο αέριο (10^{-3} mbar). Λόγω επιτάχυνσης των ιόντων από το ηλεκτρικό πεδίο και της επακόλουθης πρόσκρουσης των στη μεταλλική κάθοδο, άτομα από το μέταλλο (άργυρος στην συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικά διαθέσιμων επιστρώσεων) αποσπώνται από την κάθοδο και εναποτίθενται σαν λεπτό φιλμ (πάχος 5-20 nm) στην επιφάνεια του υαλοπίνακα. Αυτού του είδους οι επιστρώσεις λέγονται και “μαλακές” γιατί δεν μπορούν να είναι εκτεθειμένες στο εξωτερικό περιβάλλον. Συνεπώς τοποθετούνται στον εσωτερικό χώρο διπλών υαλοπινάκων. Η προηγούμενη περιγραφή είναι σχετικά απλοποιημένη οσον αφορά τη διαδικασία παραγωγής. Αυτού του είδους οι επιστρώσεις δεν αποτελούνται μόνο από μια στρώση αλλά από διαδοχικές στρώσεις διαφανών υλικών που σκοπό έχουν την καλύτερη συγκράτηση και προστασία της στρώσης του αργύρου και επηρεάζουν προφανώς τις οπτικές ιδιότητες του υαλοπίνακα. Ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες μπορεί να χρησιμοποιηθεί διπλή στρώση αργύρου με τον αριθμό των υπολοίπων στρώσεων να αυξάνεται επίσης. Π.χ. μια επίστρωση low-e μπορεί να αποτελείται από τα εξής στρώματα :Υαλοπίνακας/TiO₂ (20nm)/ZnO (5nm) /Ag (12nm) /ITO (3nm)/SnO_x (40 nm). Τα διαδοχικά στρώματα της επίστρωσης υαλοπίνακα με φασματική επιλεκτικότητα (περιορίζει ακόμη περισσότερο τη διάδοση υπέρυθρης χωρίς να μειώνει κατα το ίδιο ποσό την διαπερατότητα στο ορατό) είναι :

Υαλοπίνακας/TiO₂ (20nm)/ZnO (5nm) /Ag (9nm) /ITO (3nm)/SnO_x (90 nm)/Ag (9nm) /ITO (3nm)/SnO_x (30 nm)¹¹².)

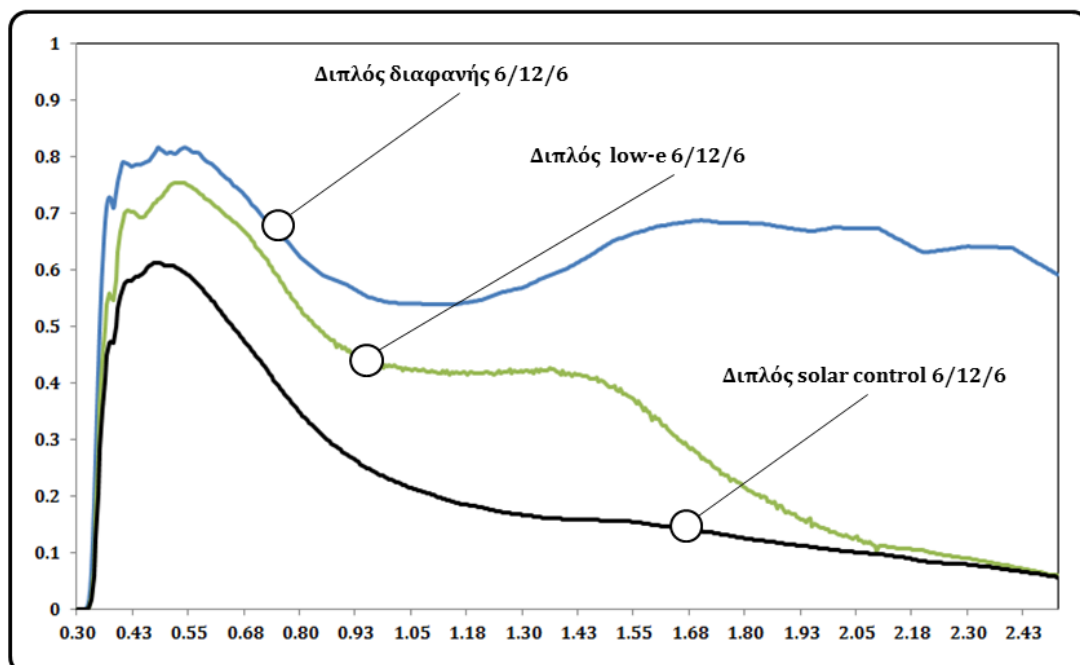
Οι προαναφερθείσες επιστρώσεις αποτελούν εμπόδιο στη διάδοση θερμότητας (υπέρυθρη ακτινοβολία) λόγω του μικρού συντελεστή εκπομπής που παρουσιάζουν (εξαιτίας αυτού του γεγονότος και η ονομασία low-e). Συνήθως τοποθετούνται είτε στην επιφάνεια 2 είτε στην 3 ενός διπλού υαλοπίνακα. Η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων σε αυτή την περίπτωση δεν είναι τόσο έντονη σε σχέση με την περίπτωση να υπάρχει ή όχι κάποια επίστρωση. Στη θέση 2 μειώνεται ο συντελεστής ηλιακών κερδών και συνεπώς η κατανάλωση για ψύξη. Σχετική σύγκριση σε μια τυπική μονάδα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

¹¹² Large Area Coating for Glazing 3rd Vacuum Symposium 17th October 2012 Ricoh Arena – Coventry, John Oldfield, Thin Film Technology and Analytical Science Group, NSG European Technical Centre



Σχήμα 7.50: Η αλλαγή στ θέση τοποθέτησης της επίστρωσης τροποποιεί τον συντελεστή ηλιακών κερδών.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η φασματική διαπερατότητα για υαλοπίνακα low-e και solar control.



Σχήμα 7.51: Φασματική διαπερατότητα τριών τύπων υαλοπινάκων.

Ενδιαφέρον έχουν οι των οποίων οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται ανάλογα με την επίδραση κάποιου παράγοντα (π.χ. θερμοκρασία, UV). Η μεταβολή

μπορεί να γίνει παθητικά (δηλ. χωρίς την επίδραση του χρήστη) ή εξαιτίας του χρήστη. Έτσι έχουμε κυρίως :

α. Ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες οι οποίοι αλλάζουν οπτικές και θερμικές ιδιότητες ανάλογα με το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται (χρειάζονται τροφοδοσία 1-3 V). Με την εφαρμογή ανάστροφου ηλ. πεδίου οι ιδιότητες τους αποκαθίστανται. Ο συντελεστής διαπερατότητας στο ορατό μεταβάλλεται (δεδομένα 2013) στη κλίμακα από 0.05 ως ~0.65. Αυτοί οι υαλοπίνακες είναι κατά πάσα πιθανότητα οι αντικαταστάτες των έγχρωμων υαλοπινάκων στο προσεχές μέλλον.



Σχήμα 7.52: Λειτουργία ηλεκτροχρωμικού υαλοπίνακα (Πρόγραμμα Swift, Τμ. Φυσικής, Παν. Αθηνών)

β. Υγρών κρυστάλων. Όταν εφαρμόζεται τάση αυτοί οι υαλοπίνακες αλλάζουν απλώς κατάσταση και γίνονται διαφανείς από γαλακτόχρωμοι και το αντίστροφο. Είναι χρήσιμοι για λόγους ιδιωτικότητας αλλά όχι για εξοικονόμηση ενέργειας αφού ο συντελεστής διαπερατότητας μεταβάλλεται μεταξύ ~0.3-0.7 ενώ απαιτούν συνεχή παροχή ενέργειας για να διατηρηθούν σε κατάσταση πλήρους διαφάνειας.

γ. Θερμοτροπικοί υαλοπίνακες. Οι υαλοπίνακες αυτοί μεταβάλλουν τις ιδιότητες τους (παθητικά) με την μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία γίνονται πλήρως διαχυτικοί στην προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η ανακλαστικότητα τους αυξάνεται και συνεπώς μπορούν να μειώσουν τον συντελεστή ηλιακών κερδών μειώνοντας αντίστοιχα και το ψυκτικό φορτίο.

δ. Φωτοχρωμικούς υαλοπίνακες. Η διαπερατότητα τους μεταβάλλεται (παθητικά) αντιστρόφως ανάλογα με τα επίπεδα φωτισμού (επίδραση UV βασικά) στα οποία εκτίθενται.

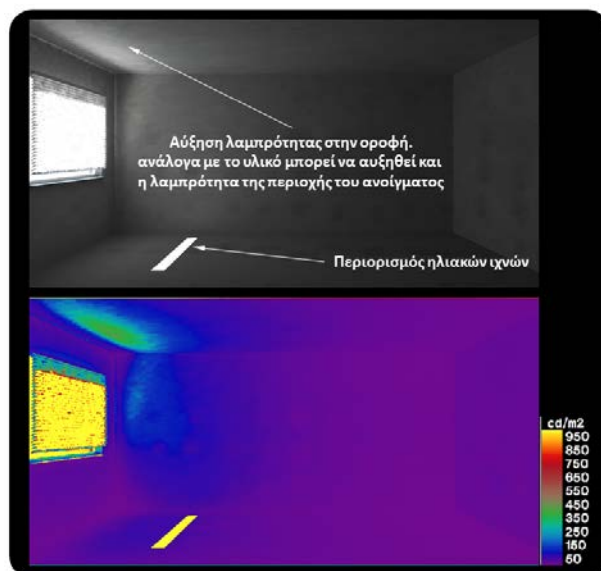
Προφανώς οι παραπάνω τύποι αντιπροσωπεύουν τις κύριες κατηγορίες χωρίς το παρόν εγχειρίδιο να ασχολείται σε βάθος με την πλήρη περιγραφή των αρχών λειτουργίας των διαθέσιμων «έξυπνων υαλοπινάκων».

Σκίαση

Ο ρόλος των συστημάτων σκίασης είναι η βελτίωση των συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης μέσω της μείωσης της πιθανότητας για υπερθέρμανση και θάμβωση. Επιπρόσθετα επηρεάζουν και την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, την ιδιωτικότητα καθώς και τη δυνατότητα φυσικού αερισμού (ανάλογα με τον τρόπο που ανοίγει το παράθυρο).

Με βάση τα παραπάνω ένα σύστημα σκίασης θα πρέπει :

- Να ρυθμίζει (ή εμποδίζει όταν χρειάζεται) την είσοδο άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στον χώρο
- Να ρυθμίζει την είσοδο διάχυτης ακτινοβολίας (άμεσα από ουρανό ή ανακλώμενη από εξωτερικά εμπόδια)
- Να μειώνει την λαμπρότητα του ανοίγματος
- Να επιτρέπει τη δυνατότητα οπτικής επαφής από το εσωτερικό με το εξωτερικό περιβάλλον και ταυτόχρονα να μην δημιουργεί συνθήκες δυσκολίας εκτέλεσης συγκεκριμένων εργασιών.
- Να παρέχει ιδιωτικότητα



Σχήμα 7.53: Τροποποίηση της κατανομής λαμπρότητας στις επιφάνειες χώρου με διαφοροποίηση της κλίσης εσωτερικού συστήματος περσίδων.

Η ίδια η γεωμετρία του συστήματος σκίασης τροποποιεί προφανώς τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε το εξωτερικό περιβάλλον. Συνεπώς δεν ενδιαφέρει μόνο π.χ. το ποσοστό στο οποίο το σύστημα σκίασης «καλύπτει» την εικόνα του περιβάλλοντος στα ανοίγματα. Πλέον κλασσικό παράδειγμα είναι η χρήση διάτρητης μεταλλικής επιφάνειας. Το ποσοστό της διάτρησης μπορεί να π.χ. να διατηρηθεί στο 50% άλλα είτε με ένα μικρό αριθμό τρυπών /μεγάλης διαμέτρου είτε με το αντίστροφο. Παρόλο που στον χειρισμό της ηλιακής ακτινοβολίας τα δυο προαναφερθέντα συστήματα συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο η «ποιότητα» της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον είναι διαφορετική.

Ενα δευτερογενές χαρακτηριστικό είναι η συγκεκριμένη επίδραση στα ηλιακά ίχνη. Πολύπλοκης γεωμετρίας σκίαση δημιουργεί επίσης μια πολυπλοκότητα

στα ηλιακά ίχνη, η οποία μπορεί να καταλήξει σε ενόχληση ανάλογα με το μέγεθος και την εργασία που πραγματοποιείται.



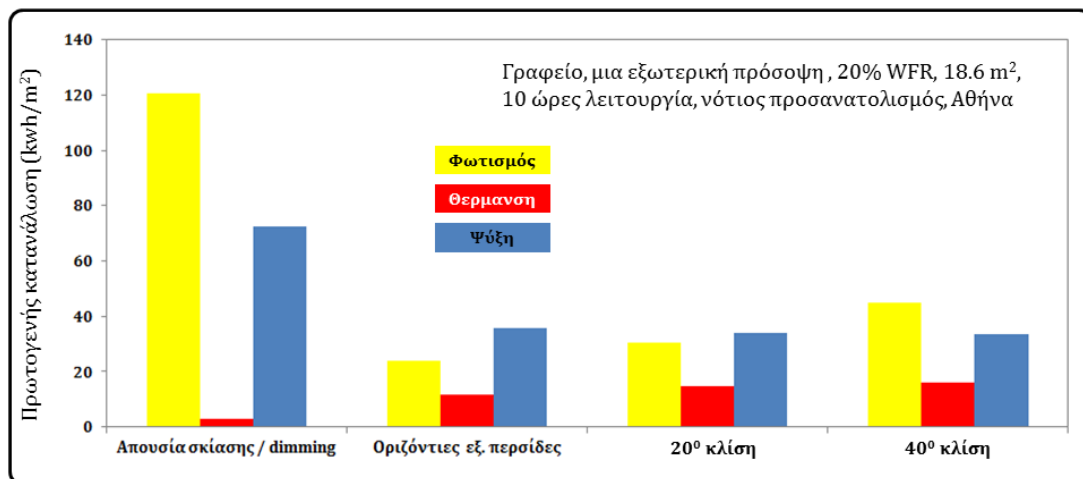
Σχήμα 7.54: Δημιουργία μοτίβων στην επιφάνεια εργασίας λόγω του συστήματος σκίασης.

Η ταυτόχρονη απαίτηση για επαρκή επίπεδα φωτισμού και ταυτόχρονα για σημαντική μείωση των ηλιακών κερδών κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου είναι ανταγωνιστικές και θα πρέπει να μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού να ικανοποιηθούν. Η επιλογή του συστήματος σκίασης μπορεί να γίνει αρκετά πολύπλοκη διαδικασία αφού θα πρέπει όχι μόνο να αποφασισθεί με βάση τις όποιες απαιτήσεις για ενεργειακή κατανάλωση άλλα και να ενσωματωθεί κατάλληλα στο κτιριακό κέλυφος για αισθητικούς λόγους. Μια πανσπερμία συστημάτων είναι διαθέσιμα σήμερα χωρίς βεβαίως να αναφερθεί και η δυνατότητα για σχεδιασμό εξαρχής ενός συστήματος σκίασης που είτε αναπτύσσεται ξεχωριστά από το κτιριακό κέλυφος είτε είναι μέρος της δομής του. Η επιλογή π.χ. εσωτερικού ή εξωτερικού συστήματος σκίασης μπορεί να μην επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τη στάθμη φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό αλλά μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το υπόλοιπο θερμικό ισοζύγιο του κτηρίου αφού η χρήση του εσωτερικής σκίασης οδηγεί συνήθως σε αύξηση του συντελεστή ηλιακών κερδών του συστήματος.



Σχήμα 7.55: Απορρόφηση ηλ. ακτινοβολίας από το σύστημα σκίασης, αύξηση της θερμοκρασίας του και συνεπώς αύξηση στην εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας από αυτό.

Παρομοίως με την ανάλυση που παρουσιάστηκε για τους υαλοπίνακες, η επίδραση ενός συστήματος εξωτερικής σκίασης έχει σημαντική επίδραση στην κατανάλωση του ηλεκτροφωτισμού (υπο την προϋπόθεση βεβαία υιοθέτησης συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής με κάποιο αισθητήρα). Είναι χαρακτηριστικό (και γνωστό !) ότι η μείωση της κατανάλωσης για ψύξη είναι σημαντική με την χρήση συστήματος σκίασης. Όμως από την ώρα που υπάρχει σύστημα σκίασης η τροποποίησή του (π.χ. κλίση περσίδων) έχει μεγαλύτερη επίδραση στην κατανάλωση του ηλεκτροφωτισμού.



Σχήμα 7.56: Η μείωση της κατανάλωσης από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού βασίστηκε σε τιμή φωτισμού σημείου στο κέντρο του δωματίου. Εξωτερικό σύστημα περσίδων

Στα αρχικά στάδια σχεδιασμού εκτιμάται η περίοδος που η σκίαση είναι απαραίτητη. Μια απλουστευτική προσέγγιση για τον καθορισμό αυτής της περιόδου είναι η σύγκριση μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας με την θερμοκρασία

που αντιπροσωπεύει το χαμηλότερο όριο για θερμική άνεση ¹¹³. Η υπέρβαση του ορίου σηματοδοτεί την αρχή της περιόδου σκίασης (π.χ. για την Αθήνα η περίοδος είναι από Μάιο έως και Σεπτέμβριο).

Σήμερα λόγω εκτεταμένης χρήσης προσομοιωτικών αλγορίθμων η περίοδος αυτή μπορεί να εκτιμηθεί με λεπτομέρεια λαμβάνοντας υπόψη κι άλλες παραμέτρους (θερμική μάζα, προσανατολισμό, εσωτερικά κέρδη κλπ).

Ο συνδυασμός κάποιου ηλιακού διαγράμματος και μάσκας σκίασης μπορεί να δώσει ενδείξεις για την αποτελεσματικότητα του συστήματος σκίασης (εννοώντας με αυτό κατα πόσο περιορίζει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία). Να ληφθεί υπόψη ότι η επίδραση της σκίασης στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου οφείλεται στη ρύθμιση της ακτινοβολίας (άμεσης/διάχυτης). Συνεπώς η εκτίμηση μόνο του ποσοστού σκίασης (χωρίς να συνυπολογίζεται η επίδραση της ηλ. ακτινοβολίας) είναι μόνο η «μισή» ιστορία.

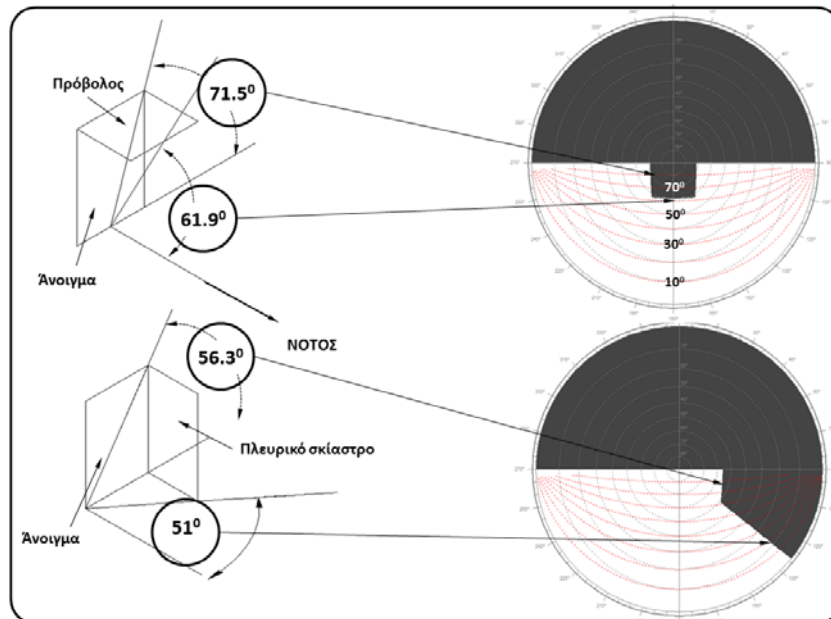
Στην περίπτωση κτηρίου η περίοδος σκίασης εκτείνεται χρονικά στο διάστημα που η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία σημείου ισορροπίας (T_{bal} , balance point temperature). Η συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι η εξωτερική θερμοκρασία στην οποία το κτήριο μόλις από ανάγκη θέρμανσης έχει ανάγκη ψύξης ή το αντίστροφο. Προφανώς για κτήρια (π.χ. γραφεία) τα οποία έχουν σημαντικά αυξημένα εσωτερικά κέρδη (άνθρωποι, φωτισμός, εξοπλισμός κλπ) η θερμοκρασία σημείου ισορροπίας είναι μικρότερη από την εξωτερική και συνεπώς το χρονικό διάστημα σκίασης αυξάνεται. Η μέθοδος¹¹⁴ υπολογισμού της T_{bal} μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τη βοήθεια πινάκων αρκεί να είναι γνωστά τα κέρδη και οι απώλειες του κτηρίου τουλάχιστο σε μέση μηνιαία ωριαία βάση.

Μόλις υπολογισθεί η χρονική κατανομή των T_{bal} κατασκευάζεται ένα απλό ημερολόγιο σκίασης στο με το οποίο και εκτιμάται το χρονικό διάστημα της σκίασης.

Στην συνέχεια της ανάλυσης, για να αποφασισθεί πλέον η επίδραση του συστήματος σκίασης που επελέγη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μάσκα σκίασης σε συνδυασμό με ηλιακό διάγραμμα όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

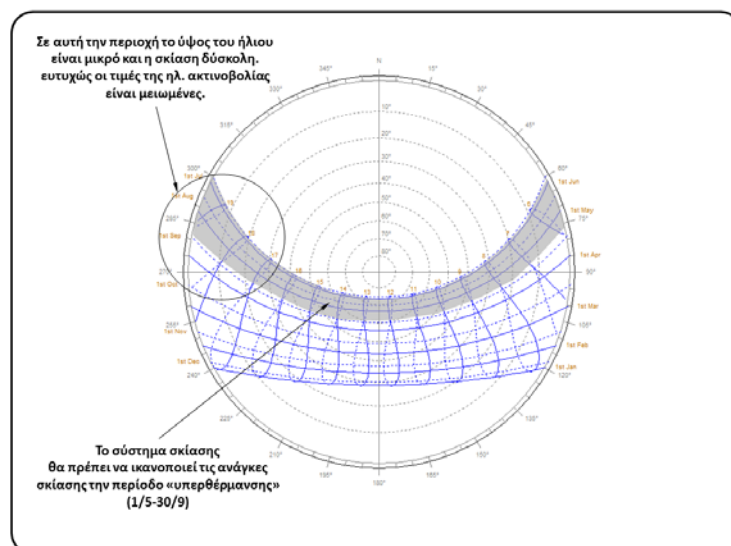
¹¹³ Steven Szokolay, "Solar geometry", Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland Brisbane, 2007, ISBN 0 86766 634 4

¹¹⁴ G.Z. Brown, Mark DeKay, (2000), Sun, Wind & Light: Architectural Design Strategies, 2nd Edition, Wiley Publ., ISBN-10: 0471348775.



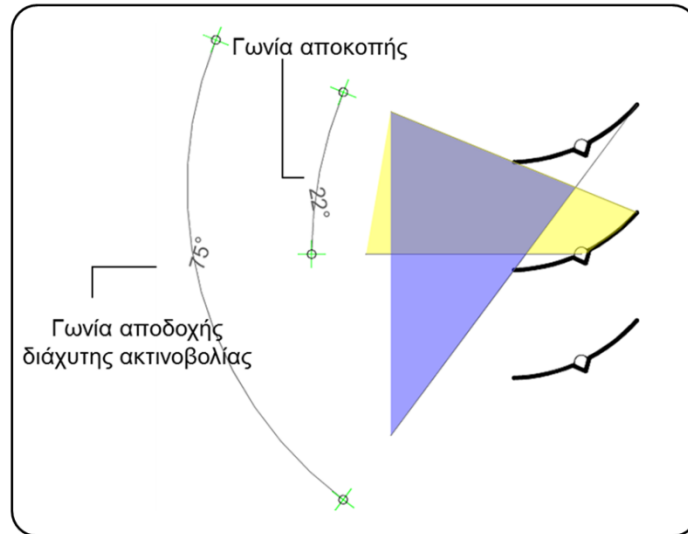
Σχήμα 7.57: Δημιουργία μάσκας σκίασης (σκίαση 100%) σε δύο περιπτώσεις συστημάτων σκίασης α) πρόβολος (επάνω) και πλευρικό (κάτω) σε άνοιγμα με νότιο προσανατολισμό.

Είναι προφανές ότι με την μάσκα σκίασης εκτιμάται χρονικά η περίοδος που το συγκεκριμένο σύστημα σκιάζει (κατα ένα συγκεκριμένο ποσοστό π.χ. 100% ή 50% ή διαφορετικό) το άνοιγμα. Ο στόχος είναι σαφώς το σύστημα σκίασης να εμποδίζει την είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας την περίοδο ψύξης μειώνοντας έτσι την κατανάλωση αλλά και τα φορτία αιχμής.



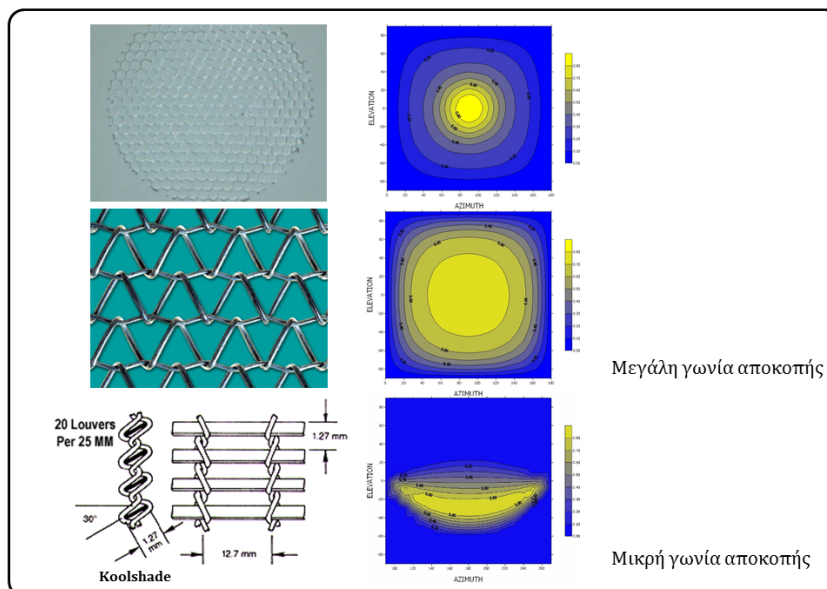
Σχήμα 7.58: Απλά συμπεράσματα από την εξέταση ηλιακού διαγράμματος.

Εξετάζοντας την τροχιά του ήλιου μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά τη γεωμετρία των συστημάτων σκίασης σε σχέση με τον προσανατολισμό. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό -χρήσιμο στην αρχή του σχεδιασμού- είναι η εκτίμηση της γωνίας αποκοπής των ηλιακών ακτίνων η οποία ορίζεται σαν η μέγιστη γωνία στην οποία μπορούν ηλιακές ακτίνες να περάσουν από το σύστημα όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



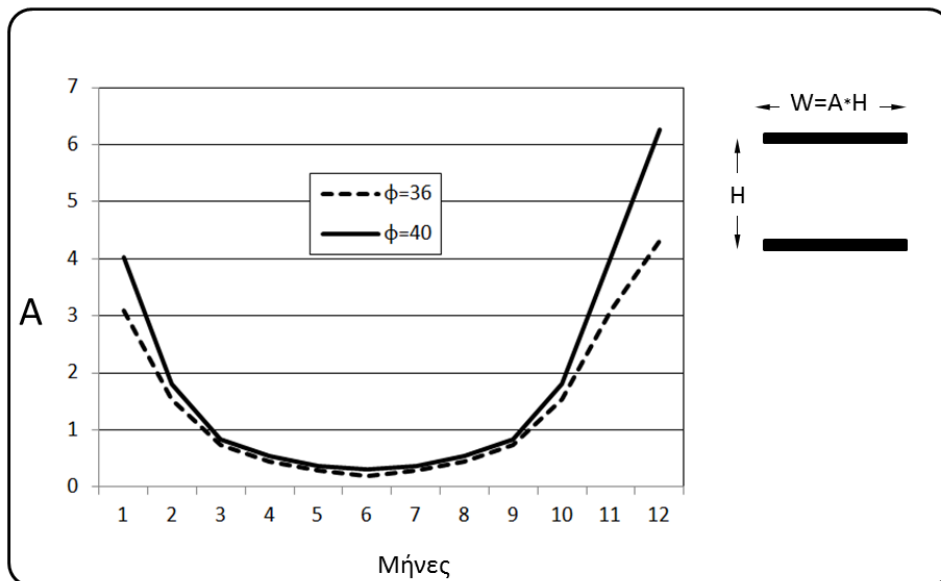
Σχήμα 7.59: Ορισμοί γωνιών αποκοπής άμεσης και αποδοχής διάχυτης ηλ. ακτινοβολίας. Αυτή η γεωμετρία επιτρέπει μια εποχική επιλεκτικότητα την οποία δεν εμφανίζουν σκίαστρα όπως π.χ. υφασματινα ρολλά.

Βασικά είναι παραλλαγή της χρήσης ηλιακού διαγράμματος. Θα πρέπει να προσεχθεί το γεγονός ότι η γωνία αποκοπής είναι χαρακτηριστικό της γεωμετρίας του συστήματος όμως ο προσανατολισμός του θα καθορίσει αν αυτή είναι επαρκής για σκίαση. Είναι προφανές ότι στη χρήση συνθετικών ή όχι υφασμάτων (ή πλεγμάτων) η προαναφερθείσα εποχική επιλεκτικότητα δεν ισχύει.



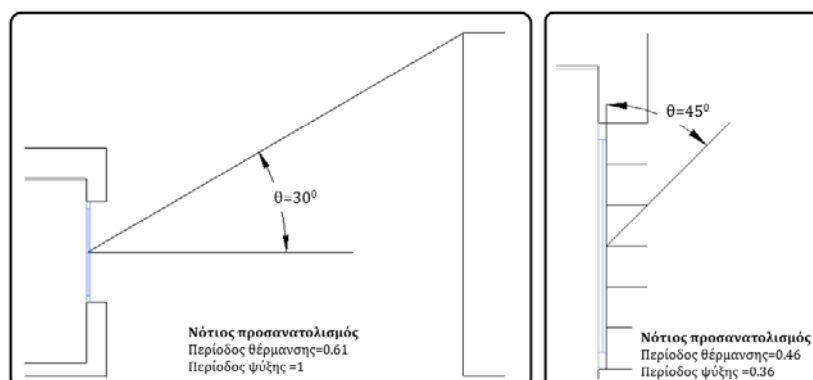
Σχήμα 7.60: Διαπερατότητα άμεσου ηλιακού φωτισμού από διαφορετικά συστήματα σκίασης. Παρατηρηστε το τελευταίο όπου του οποίου η γωνία αποκοπής είναι σχετικά μικρή.

Ένας γρήγορος τρόπος για την εκτίμηση του πλάτους εξωτερικών περσίδων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα για ανοίγματα νότιου προσανατολισμού¹⁰⁹.



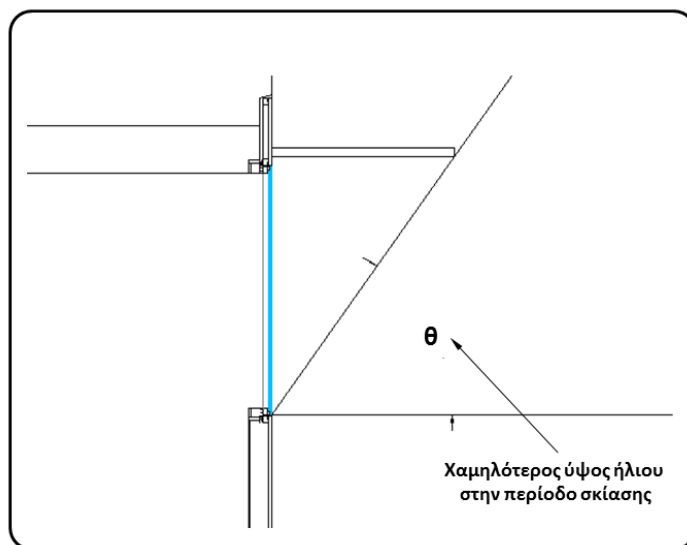
Σχήμα 7.61: Διαστασιολόγηση σταθερών οριζόντιων συστημάτων σκίασης για ανοίγματα νότιου προσανατολισμού σε γεφυγραφικά πλάτη 36° , 40° και ωράριο 8:00-16:00.

Στον KENAK η επίδραση της σκίασης εκτιμάται με τη χρήση του υπολογισμού του συντελεστή σκίασης για δύο περιόδους (θέρμανσης και ψύξης) στον προσανατολισμό. Ο υπολογισμός βασίζεται στην εκτίμηση της γωνίας που σχηματίζεται -στην περίπτωση απέναντι εμποδίων- μεταξύ της ευθείας κέντρο του ανοίγματος- άκρο απέναντι εμποδίου και οριζόντιας. Τα συστήματα σκίασης που εξετάζονται είναι πρόβολοι, πλευρικά, εξωτερικά εμπόδια αλλά και περσίδες. Η γωνία από την οποία εξαρτάται ο υπολογισμός παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.62: Με τη βοήθεια των γωνιών που παρουσιάζονται στο σχήμα υπολογίζεται ο συντελεστής σκίασης στον KENAK.

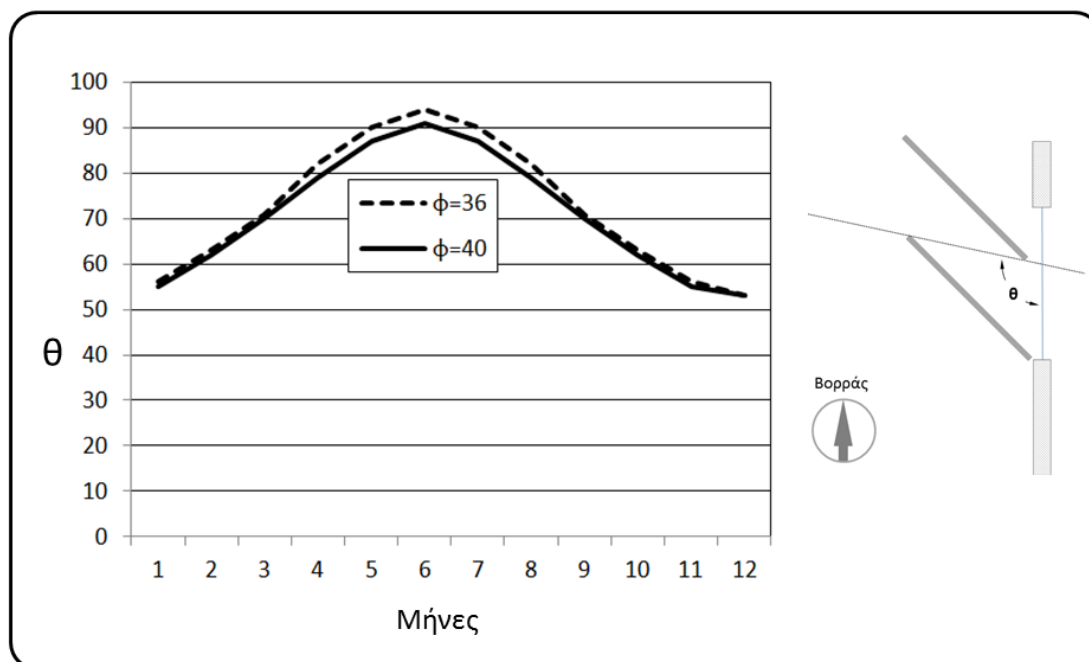
Έτσι στην περίπτωση σταθερών συστημάτων σκίασης λόγω της κίνησης του ήλιου, υιοθετείται γενικά η χρήση οριζόντιων διατάξεων στα νότια ανοίγματα και κάθετων στα ανατολικά/δυτικά. Όσον αφορά το σχεδιασμό προβόλων, η διαστασιολόγησή τους μπορεί να βασισθεί στον υπολογισμό του χαμηλότερου ύψους ήλιου κατά τη διάρκεια του διαστήματος σκίασης. Να τονισθεί εδώ ότι η περίοδος σκίασης εξαρτάται από το κτήριο (π.χ. αν καθοδηγείται από τα εσωτερικά κέρδη ή από το κέλυφος). Στην πρώτη περίπτωση η γωνία (θ) που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα είναι μικρότερη για τα κτήρια με μεγάλα εσωτερικά κέρδη. Για παράδειγμα σύμφωνα με τον N. Lechner¹¹⁵ στο Los Angeles η γωνία θ που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει τη βάση του υαλοπίνακα και την άκρη του πρόβολου, για κτήρια με μεγάλα εσωτερικά κέρδη είναι 33° ενώ για κτήρια που καθοδηγούνται από το κέλυφος (π.χ. κατοικίες) είναι 61° .



Σχήμα 7.63: Καθορισμός του πλάτους πρόβολου μέσω καθορισμού της γωνίας θ για νότια ανοίγματα (+/- 20°).

Σε ανατολικά και δυτικά ανοίγματα όπως έχει ήδη αναφερθεί προτιμώνται σταθερά κάθετα σκίαστρα με κλίση προς τον βορρά ώστε να αποκόπτεται η είσοδος ηλ. ακτινοβολίας.

¹¹⁵ N. Lechner, (2001), "Heating, Cooling, Lighting. Design methods for architects", Wiley, ISBN 0-471-24143-1



Σχήμα 7.64: Σε ανατολικά-δυτικά ανοίγματα τα σταθερά κάθετα σκίαστρα σχηματίζουν γωνία αποκοπής θ^{109} για γεωγραφικό πλάτος 36° & 40° για ωράριο λειτουργίας 8:00-16:00.

Η υιοθέτηση οριζόντιων διατάξεων σε ανατολικά/δυτικά ανοίγματα αλλά με δυνατότητα τροποποίησης της κλίσης τους ενδεχομένως να επηρεάσει δυσμενώς την επίτευξη των στόχων όσον αφορά τον φυσικό φωτισμό (παροχή χωρίς θάμβωση).

Οι παράμετροι που εκτιμώνται για την εκτίμηση της σκίασης στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτηρίου δεν είναι διαφορετικές (επι της αρχής) από αυτές που χρησιμοποιούνται στους υαλοπίνακες. Τα ευρωπαϊκά πρότυπα^{116,117} περιγράφουν τις μεθοδολογίες υπολογισμού του g-value (συντελεστή ηλιακών κερδών) και T_{vis} (διαπερατότητα στο ορατό) για συνδυασμούς συστημάτων σκίασης και υαλοπίνακα.

Η απλοποιημένη μέθοδος εκτιμά τον ολικό συντελεστή ηλιακών κερδών (σκίαση-υαλοστάσιο) για εξωτερικό σκίαστρο ως εξής:

$$g_{total} = \tau_{shading} \cdot g + a_{shading} \cdot \frac{G}{10} + \tau_{shading} \cdot (1 - g) \cdot \frac{G}{5} \quad (7.4)$$

Όπου g ο συντελεστής ηλιακών κερδών του υαλοπίνακα, $\tau_{shading}$ και $\alpha_{shading}$ η διαπερατότητα και η απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία του συστήματος σκίασης. Η τελευταία εκτιμάται με τη παρακάτω απλή εξίσωση

$$\alpha_{shading} = 1 - \tau_{shading} - \rho_{shading} \quad (7.5)$$

¹¹⁶ EN 13363-1:2003 + A1:2007 Solar protection devices combined with glazing — Calculation of solar and light transmittance — Part 1: Simplified method

¹¹⁷ EN 13363-2:2005 Solar protection devices combined with glazing — Calculation of total solar energy transmittance and light transmittance — Part 2: Detailed calculation method

όπου $\rho_{shading}$ είναι η ανακλαστικότητα του συστήματος της σκίασης. Η παράμετρος G εκτιμάται με τη βοήθεια της εξίσωσης :

$$G=(1/U_g+0.3)^{-1} \quad (7.6)$$

Όπου U_g ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα (W/m^2K).

Για εσωτερικά τοποθετημένο σκίαστρο η εξίσωση για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή ηλιακών κερδών είναι :

$$g_{total} = g \cdot (1 - g \cdot \rho_{shading} \cdot g - a_{shading} \cdot \frac{G}{30}) \quad (7.7)$$

Η παράμετρος G εκτιμάται με τη βοήθεια της εξίσωσης :

$$G=(1/U_g+1/30)^{-1} \quad (7.8)$$

Μερικές τυπικές τιμές για U_g , g , τ και ρ υαλοπινάκων δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	U_g (W/m^2K)	g-value	τ_v	ρ_v
Μονός διαφανής υαλοπίνακας	5.7	0.85	0.9	0.08
Διπλός διαφανής υαλοπίνακας	3	0.75	0.82	0.15
Διπλός διαφανής υαλοπίνακας με επίστρωση low-e	1.6	0.7	0.75	0.17

Πίνακας 7.3: ιδιότητες τυπικών υαλοπινάκων

Η διαπερατότητα αντίστοιχα στο ορατό υπολογίζεται με απλοποιημένο τρόπο χρησιμοποιώντας την εξίσωση :

$$\tau_{v,total}=\tau_v \cdot \tau_{shading}/(1-\rho_v \cdot \rho'_{shading}) \quad (\text{εξωτερικό σκίαστρο}) \quad (7.9)$$

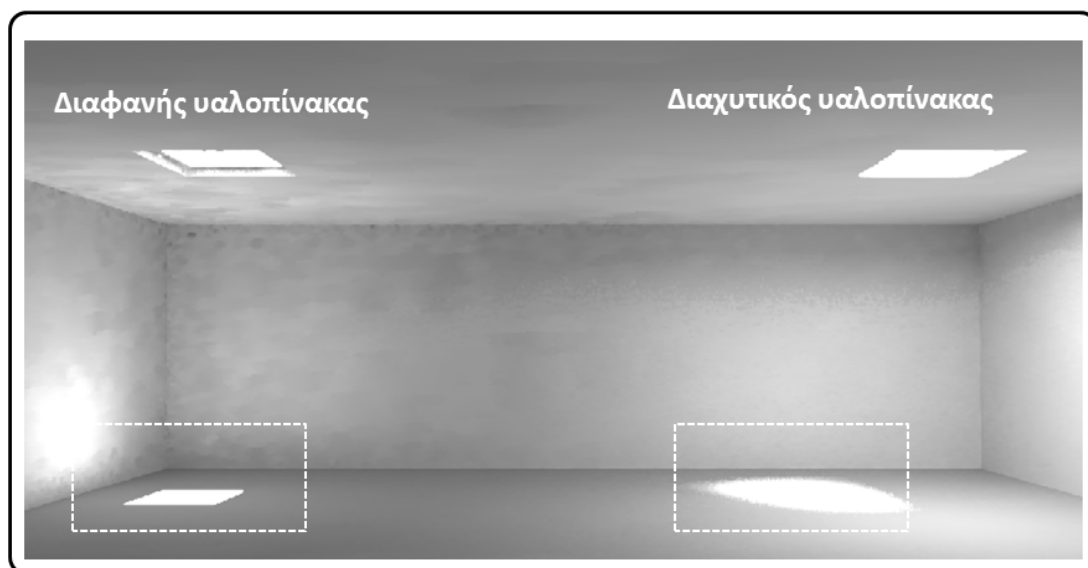
$$\tau_{v,total}=\tau_v \cdot \tau_{shading}/(1-\rho'_v \cdot \rho_{shading}) \quad (\text{εσωτερικό σκίαστρο}) \quad (7.10)$$

όπου ρ_v η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα από την πλευρά που δέχεται ηλ. ακτινοβολία και ρ'_v από την αντίθετη. Με παρόμοιο τρόπο ορίζεται και η ανακλαστικότητα του συστήματος σκίασης από την πλευρά που δέχεται ηλ. ακτινοβολία $\rho_{shading}$ και από την αντίθετη $\rho'_{shading}$.

Η προαναφερθείσα προσέγγιση ισχύει για διαπερατότητα και ανακλαστικότητα του συστήματος σκίασης από 0-0.5 και 0.1-0.8 αντίστοιχα.

Πέραν φυσικά των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν η επιλογή ενός συστήματος σκίασης που διαχειρίζεται άμεση και διάχυτη ακτινοβολία με τον

ίδιο τρόπο (π.χ. εξωτερικά/εσωτερικά roller , μεμβράνες , εξωτερικές γυάλινες λευκές περσίδες) διαφοροποιεί σε σημαντικό βαθμό τη λαμπρότητα του ανοίγματος σε σχέση με σύστημα σκίασης που διαχειρίζεται άμεση/διάχυτη με διαφορετικό τρόπο (π.χ. απλές περσίδες). Λόγω της διαπερατότητας της πρώτης κατηγορίας των συστημάτων σκίασης η πρόσπτωση άμεσου ηλιακού φωτισμού στην επιφάνεια τους αυξάνει σε σημαντικό βαθμό την λαμπρότητά τους. Ανάλογα με την κατανομή λαμπρότητας που υπάρχει στο χώρο είναι πιθανό αυτή η κατάσταση να οδηγήσει σε θάμβωση δυσφορίας. Συνεπώς μόνο η εξάλειψη των ηλιακών ιχνών (δηλ. η μετατροπή της άμεσης ακτινοβολίας σε διάχυτη) δεν εγγυάται ούτε την μείωση της θάμβωσης ούτε την σημαντική μείωση των ηλιακών κερδών.



Σχήμα 7.65: Ο τρόπος που φαίνονται τα ηλιακά ίχνη τροποποιείται αν χρησιμοποιηθεί διάχυτος υαλοπίνακας. Προσοχή στον συντελεστή ηλιακών κερδών γιατί η εμφανής μείωση των ηλ. ιχνών δεν σημαίνει απαραίτητα και σημαντική μείωση της εισερχόμενης ηλ. ακτινοβολίας.

Φυσικά αυτό δεν ισχύει (δηλ. η αύξηση της λαμπρότητας) για όλα τα είδη των υλικών. Π.χ. η χρήση ανακλαστικών συνθετικών εσωτερικών σκιαδίων μπορεί να μειώσει σχετικώς τα ηλιακά κέρδη , να μειώσει την λαμπρότητα του ανοίγματος αλλά και να διατηρήσει την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον.



Σχήμα 7.66: Ανακλαστικό εσωτερικό σκιάδιο. Η όψη (προς το εξωτερικό) είναι ανακλαστική συνεπώς ανακλά την μικρού μήκους ακτινοβολία πάλι προς το εξωτερικό περιβάλλον ενώ επιτρέπει την οπτική επαφή με αυτό.

Ενδιαφέρουσα τεχνική σκίασης είναι η χρήση μεταξοτυπίας στους υαλοπίνακες. Ενα μοτίβο επαναλαμβάνεται (τελείες, γραμμές, τετράγωνα κλπ) και έχει σαν σκοπό –πέραν της αισθητικής- να μειώσει σημαντικά τα ηλιακά κέρδη προσφέροντας την αίσθηση της διαφάνειας αλλά με πολύ μικρό συντελεστή ηλιακών κερδών.



Σχήμα 7.67: Η υιοθέτηση αυτών των συστημάτων επιτρέπει την διατήρηση της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον και ταυτόχρονα (ανάλογα με την πυκνότητα του σχεδίου) τη μείωση των ηλιακών κερδών.

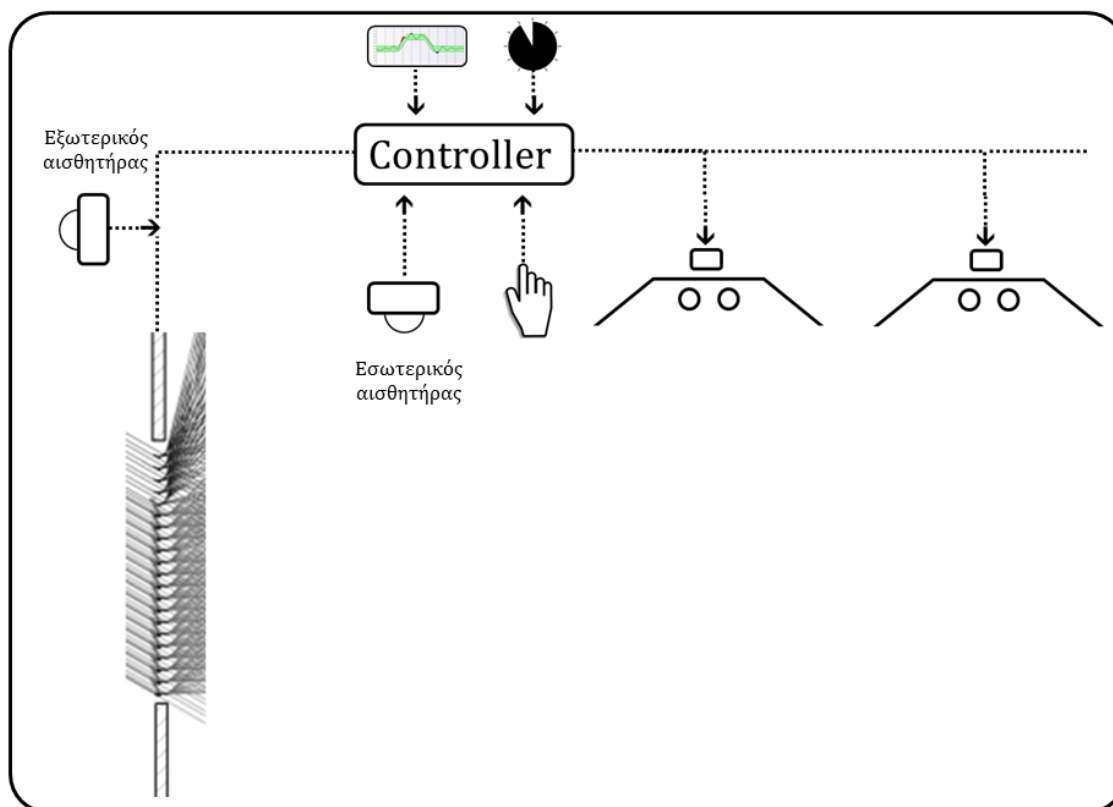
Στην παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζεται η δοκιμή αυτής της στρατηγικής στο Νέο Μουσείο Ακρόπολης. Το μοτίβο παρουσιάζει αύξηση της πυκνότητας του από το επίπεδο του ματιού προς τα πάνω και προς τα κάτω.



Σχήμα 7.68: Η μέση τιμή του συντελεστή ηλιακών κερδών (της πρόσοψης) μπορεί να μειωθεί σημαντικά με αύξηση της πυκνότητας του σχεδίου εκτύπωσης όσο αυξάνεται η γωνία από τον άξονα όρασης.

Δυναμικές προσόψεις

Σε μια μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων εξοικονόμησης ενέργειας τα τελευταία χρόνια έχει προωθηθεί η ιδέα των δυναμικών προσόψεων, δηλ. προσόψεων των οποίων π.χ. τα συστήματα σκίασης να μπορούν να προσαμόζονται δυναμικά στις εξωτερικές συνθήκες. Ο σκοπός είναι φυσικά η βελτιστοποίηση των συνθηκών του εσωτερικού περιβάλλοντος με ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας. Ο συνολικός έλεγχος δεν είναι πολύ απλός γιατί η στρατηγική ελέγχου της σκίασης επηρεάζει συνολικά το ενεργειακό ισοζύγιο του κτηρίου.



Σχήμα 7.69: Αρχή λειτουργίας συστήματος με ταυτόχρονο έλεγχο σκίασης / φωτισμού.

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο ναι μεν αναφέρεται στη σκίαση άλλα εστιάζεται στην επίδραση που έχει αυτή στον φυσικό φωτισμό. Έχει ήδη αναφερθεί ότι η χρήση του φυσικού φωτισμού αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο στη στρατηγική εξοικονόμησης ενέργειας. Συνεπώς αυτό το γεγονός καθόρισε και την απαίτηση της ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων για σκίαση και επάρκεια φυσικού φωτισμού με την προσθήκη της μεταφοράς φωτισμού στον πυρήνα του κτηρίου. Η τεχνολογική απάντηση σε αυτό το αίτημα ήταν η ανάπτυξη νέων συστημάτων σκίασης που είχαν πρόσθετες ιδιότητες όσον αφορά το χειρισμό του φυσικού φωτισμού (συντομογραφία συστημάτων φυσικού φωτισμού, ΣΦΦ).

Συστήματα φυσικού φωτισμού

Παρόλο που στα πλαίσια διαφόρων ερευνητικών προγραμμάτων αναπτύχθηκε ένας αριθμός από νέες ιδέες, η διάδοσή τους ήταν περιορισμένη λόγω α) του αυξημένου κόστους που απαιτούσε η ακρίβεια στην παραγωγή τους β) της απουσίας μετρήσεων (π.χ. g-value) και γ) της δυσκολίας που εμφάνιζε ο έλεγχος τους.

Η ταξινόμηση τους βασίζεται στον McCluney¹¹⁸(1998) και στην Matusiak¹¹⁹ (2004). Σύμφωνα με τον πρώτο ο διαχωρισμός γίνεται ως εξής :

¹¹⁸ McCluney, R. (1998) 'Advanced fenestration and daylighting systems', Paper presented to Daylighting 1998 International Conference on Daylighting Technologies for Energy Efficiency in Buildings, 10-13 May 1998, Ottawa, Canada

¹¹⁹ Matusiak, B. (2004) Lighting Systems in Smart Energy Efficient Buildings: A State of the Art, Report STF22A04504, Norwegian Research Council, Norway

1. Συστήματα που τοποθετούνται στα ανοίγματα είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά
2. Συστήματα που έχουν σαν σκοπό την μεταφορά φυσικού φωτισμού στον πυρήνα του κτηρίου.

Σύμφωνα με τη δεύτερη ο διαχωρισμός γίνεται με βάση τη δυνατότητα να παρέχουν σκίαση . Έτσι προτείνει :

1. ΣΦΦ με σκίαση α)και απόρριψη άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας β)με ανακατεύθυνση της άμεσης ακτινοβολίας προς την οροφή πάνω από το επίπεδο του ματιού ώστε να περιορισθούν τα φαινόμενα θάμβωσης.
2. ΣΦΦ χωρίς σκίαση τα οποία μπορούν και μεταφέρουν φωτισμό (διάχυτο είτε ηλιακό) ή τον διαχέουν στο χώρο που τοποθετούνται.

Συνοπτικά ο στόχος της ανάπτυξης αυτών των συστημάτων είναι:

- Η αύξηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού σε περιοχές μακριά από τα ανοίγματα
- Η βελτίωση της ομοιομορφίας κατανομής του
- Η βελτίωση οπτικής άνεσης
- Η παροχή σκίασης (αν είναι δυνατόν εποχικά επιλεκτικής).
- Η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται με λεπτομέρειες οι αρχές λειτουργίας μερικών συστημάτων φυσικού φωτισμού.

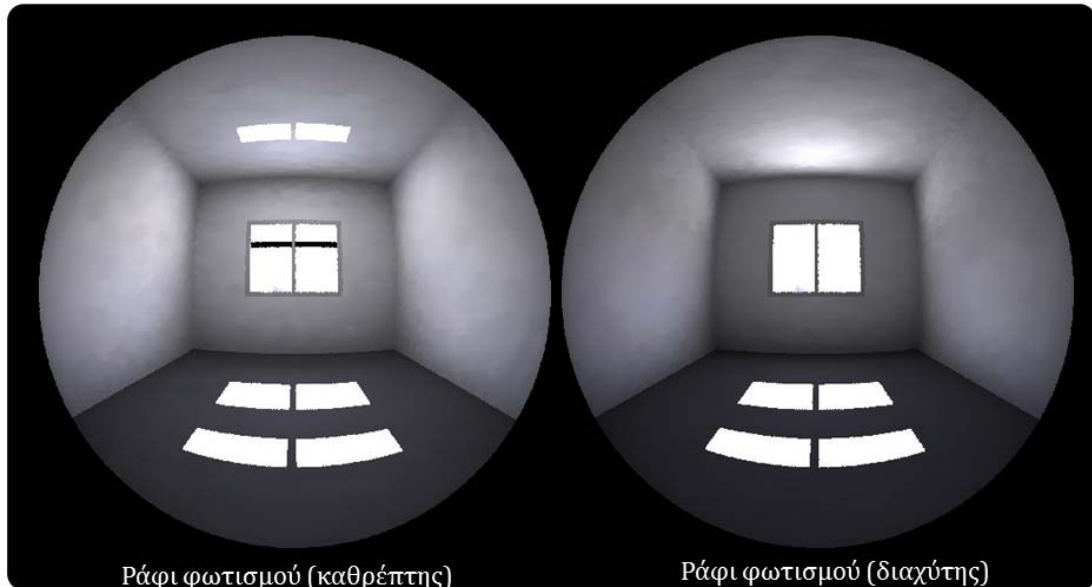
Ράφι Φωτισμού

Από τα πλέον απλά συστήματα διαχείρισης του φυσικού φωτισμού. Διαχωρίζει το άνοιγμα σε δύο τμήματα α) αυτο που θεωρείται σαν παροχέας θέας(χαμηλότερο) και) αυτό που είναι παροχές φωτισμού (ψηλότερο).



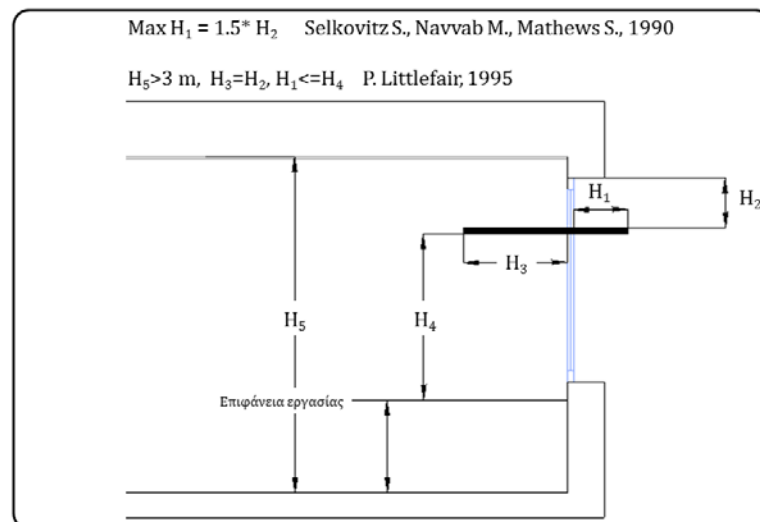
Σχήμα 7.70: Εξωτερικό και εσωτερικό ράφι φωτισμού.

Ταυτόχρονα μπορεί –χρήση πρόβολου ενδιάμεσα– να παρέξει σκίαση στο χαμηλότερο τμήμα. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι αυξημένης ανακλαστικότητας. Μπορεί να ανακλούν κατοπτρικά ή διαχυτικά με την πρώτη περίπτωση να έχει καλύτερη απόδοση όμως θα πρέπει να προσεχθεί όσον αφορά τα θέματα των ανακλάσεων στην οροφή αλλά και πιθανών προβλημάτων θάμβωσης λόγω ακριβώς αυτών των ανακλάσεων.



Σχήμα 7.71: Παρατηρήστε την ανάκλαση στην οροφή.

Συνήθως τοποθετούνται σε νότιο προσανατολισμό ενώ οι σχεδιαστικοί παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση παρουσιάζονται στο παρακάτω σκαρίφημα.



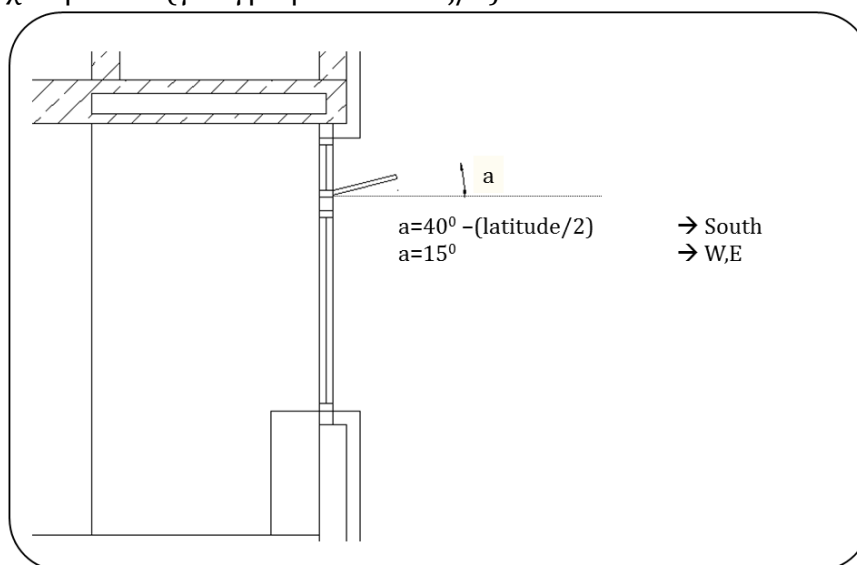
Σχήμα 7.72: Χαρακτηριστικά μεγέθη που επηρεάζουν την απόδοση του ραφιού φωτισμού.

Η ταυτόχρονη δυνατότητα παροχής φυσικού φωτισμού από τον φεγγίτη αλλά και η σκίαση του παράθυρου είναι το κύριο πλεονέκτημα των ραφιών. Το 1983

στην ανάλυση των Selkowitz et al^{120 121} προτάθηκε, το μήκος του εξωτερικού στατικού ραφιού μπορούν να είναι μέχρι 1.5 μεγαλύτερη από το ύψος του φεγγίτη. Κατά τον Littlefair¹²²) η απόδοση του ραφιού μεγιστοποιείται σε ψηλούς γενικά χώρους (>3μ) ενώ το μήκος του είναι περίπου ίδιο με το ύψος του φεγγίτη για τα εσωτερικά ράφια και όχι μεγαλύτερο από την απόστασή τους από την επιφάνεια εργασίας για το εξωτερικό.

Γενικά, η απόδοση των ραφιών είναι καλύτερη σε όταν τοποθετούνται σε χώρους στους οποίους υπάρχουν εξωτερικά εμπόδια. Σαν γενικό συμπέρασμα, όπως άλλωστε έχει αναφερθεί και στις προηγούμενες εργασίες, είναι ότι η διαστολότητα των ραφιών εξαρτάται από τις διαστάσεις του φεγγίτη, το ύψος της οροφής και τη διαμόρφωση του χώρου¹²³.

Η κλίση επίσης είναι ένας επιπρόσθετος παράγοντας. Σύμφωνα με τον Moore¹²⁴ () για νότιο προσανατολισμού ανοίγματα η κλίση του ραφιού υπολογίζεται από τη σχέση: $40^\circ - (\text{γεωγραφικό πλάτος}/2)$.



Σχήμα 7.73: Κλίση ραφιού φωτισμού.

Από το 1990 άρχισε να υπάρχει ενδιαφέρον για την δυναμική κίνηση των ανακλαστικών ραφιών σύμφωνα με τη θέση του ήλιου σε μια προσπάθεια να αυξηθούν τα επίπεδα φωτισμού σε περιοχές μακριά από την πρόσοψη. Οι περιοχές αυτές είναι συνήθως το όριο της περιμετρικής ζώνης (Ζώνη Εκμετάλλευσης Φυσικού Φωτισμού όπως ορίζεται στο EN 15193:2007¹²⁹). Η επίδραση του στην αύξηση της στάθμης φωτισμού σε περιοχές πέραν της περιμετρικής ζώνης (άρα αυξημένη εξοικονόμηση) εξαρτάται και από το μέγεθος

¹²⁰ Selkowitz, S., Navvab, M. and S. Mathews, "Design and Performance of Light Shelves", International Daylighting Conference, Phoenix, AZ, 1983

¹²¹ Place, Wayne and Thomas C. Howard "Daylighting Multistorey Office Buildings", North Carolina Alternative Energy Corporation, 1990

¹²² P. Littlefair, "Light shelves: Computer assessment of daylight performance", Lighting Research and Technology 27(2), 79-91, 1995

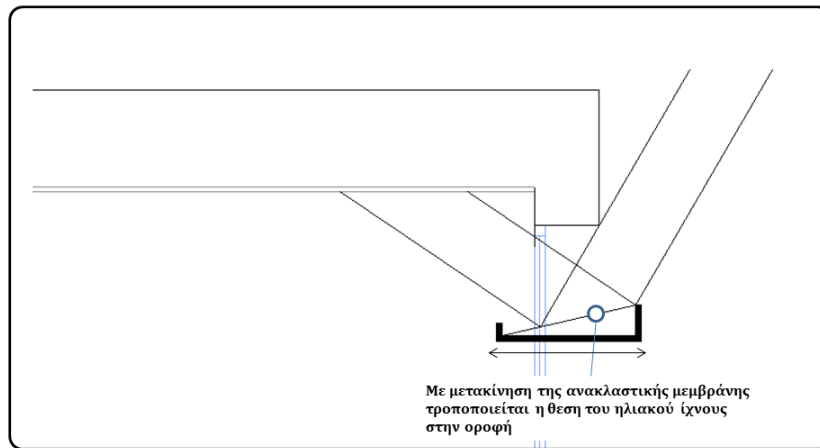
¹²³ Jianxin Hu, Jiangtao Du, Wayne Place, "The Assessment of Advanced Daylighting Systems in Multi-Story Office Buildings Using a Dynamic Method" World Renewable Energy Congress, 8-13 May 2011, Linkoping, Sweden

¹²⁴ Moore Fuller, "Concepts and practice in architectural daylighting", New York, Van Nostrand Reinhold, 1991

του ανοίγματος σε σχέση με το χώρο. Σε μικρά ανοίγματα η επίδραση του κινούμενου ραφίου φαίνεται να είναι σημαντική.

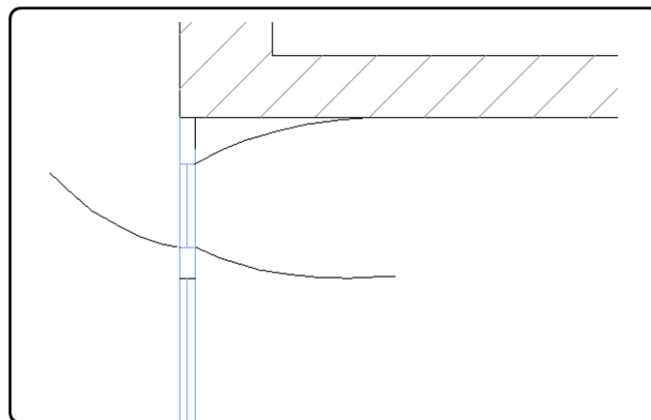
Το γεγονός της ύπαρξης φεγγίτη παρουσιάζει και το εξής πρόβλημα. Όταν ο ήλιος είναι σχετικά χαμηλά η διείσδυση μέσω του φεγγίτη είναι μεγάλη και συνεπώς χρειάζεται τότε να σκιασθεί (π.χ. εσωτερικές περσίδες) εξουδετερώνοντας το πλεονέκτημα της ανάκλασης φωτεινής ροής σε περιοχές απομακρυσμένες από τα ανοίγματα. Εναλλακτικά υιοθετείται και εσωτερικό ράφι μεγάλου πλάτους.

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση το 1986, είναι το σύστημα VALPRA (Variable Area Light Reflecting Assembly). Σε αυτή τη περίπτωση υπήρχε τροποποίηση της κλίσης της ανακλαστικής επιφάνειας. Να τονισθεί ότι αυτή η επιφάνεια προστατεύεται με την τοποθέτηση της σε κλειστή διαφανή κοιλότητα. Γενικά υπάρχει μείωση της ανακλαστικότητας των επιφανειών όταν εκτίθενται στις περιβαλλοντικές συνθήκες με συνέπεια και τη μείωση της απόδοσης.



Σχήμα 7.74: Σχηματική απεικόνιση VALPRA (Variable Area Light Reflecting Assembly)

Έχουν δοκιμασθεί είσης ανειδωλικά ράφια φωτισμού στα οποία το προφίλ είναι τμήμα παραβολής. Πάλι προστατεύεται από την έκθεση στις εξωτερικές συνθήκες με υαλοπίνακα και είναι ικανά να αυξήσουν τα επίπεδα φυσικού φωτισμού μακριά από το άνοιγμα, ιδίως σε περιπτώσεις που τοποθετούνται σε πυκνό αστικό περιβάλλον.

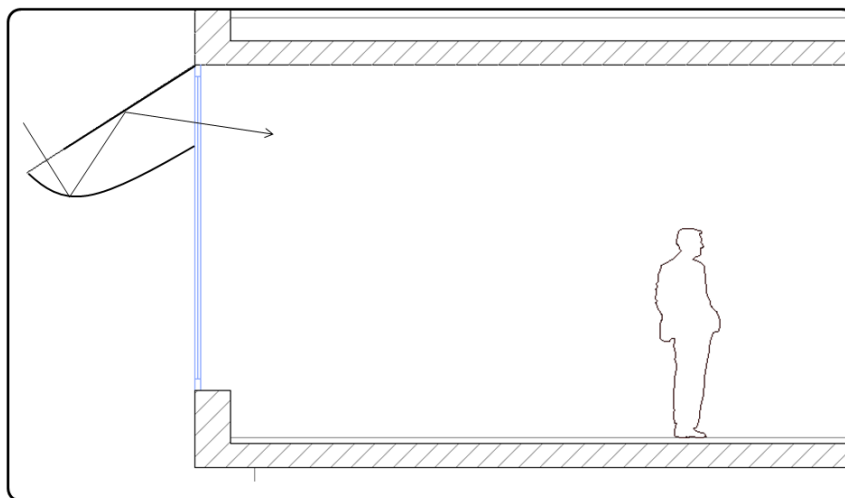


Σχήμα 7.75: Ανειδωλικό ράφι φωτισμού¹²⁵.

Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η συγκέντρωση διάχυτου φωτισμού (εξωτερικό τμήμα) και η διασπορά του στο εσωτερικό του χώρου (εσωτερικό τμήμα). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια εγκατάσταση αυτού του συστήματος.



Σχήμα 7.76: Κτήριο με εγκατεστημένο ανειδωλικό σύστημα φυσικού φωτισμού. Φωτ. Α. Δράκου, TAM, ΠΘ.



Σχήμα 7.77: Ενδιαφέρουσα μίξη δυο συστημάτων¹²⁶. Πρόβολος για σκίαση άλλα και ταυτόχρονη μεταφορά φωτισμού στην οροφή.

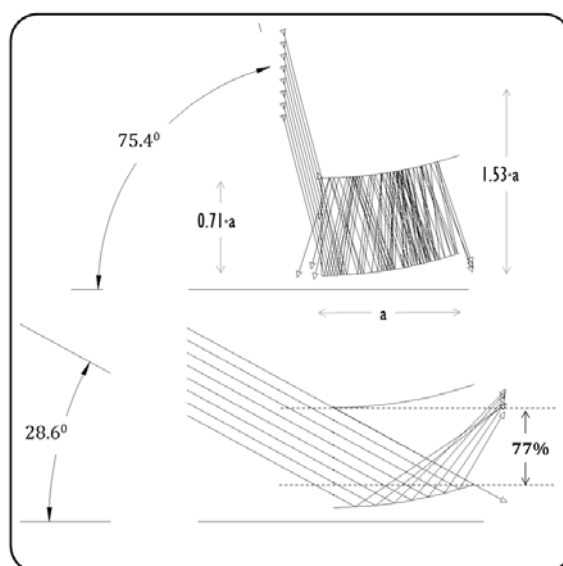
¹²⁵ Siân Kleindienst, Marilyne Andersen, "Improving Daylighting in Existing Buildings: Characterizing the Effect of Anidolic Systems", SOLAR 2006 : Renewable Energy-Key to climate recovery, Denver, July 7-13, 2006

¹²⁶ I.R Edmonds, P.J Greenup, "Daylighting in the tropics", Solar Energy, Volume 73, Issue 2, August 2002, Pages 111-121

Περσίδες

Η πλέον συνήθης μορφή είναι τα βενετικά στόρια (αφήνεται στον αναγνώστη η προέλευση της ονομασίας!). Εδώ η προσπάθεια μείωσης της ηλιακών κερδων οδηγεί συνήθως σε σημαντική μείωση της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον. Η χρήση διάτρησης βελτιώνει αυτή την κατάσταση, έτσι ώστε ακόμη και κλειστές να είναι διατηρείται η οπτική επαφή.

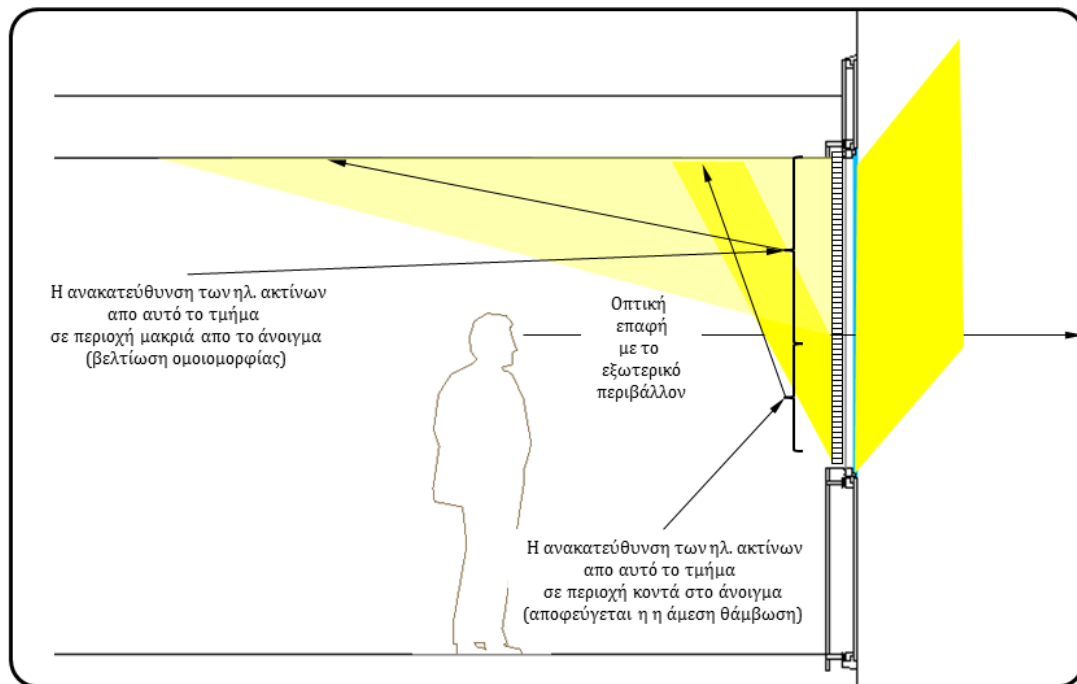
Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ο σχεδιασμός περσίδων οι οποίες μαζί με τις παραπάνω παρατηρήσεις ανακατευθύνουν σημαντική ποσότητα φωτισμού στην οροφή παρουσιάζοντας ταυτόχρονα μια εποχική επιλεκτικότητα (δηλ. μεγαλύτερη είσοδο ηλ. ενέργειας τον χειμώνα από το καλοκαίρι). Η προαναφερθείσα απαίτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση στατικών ανακλαστικών περσίδων και συγκεκριμένου προφίλ (καμπύλη τομής).



Σχήμα 7.78: Ο κατάλληλος σχεδιασμός του προφίλ ανακλαστικών περσίδων μπορεί να μεταβάλλει τη διαπερατότητα τους στον άμεσο ηλιακό φωτισμό. Στο σχήμα, χρήση ιχνηλασίας ακτίνας σε παραβολικό προφίλ περσίδας¹²⁷.

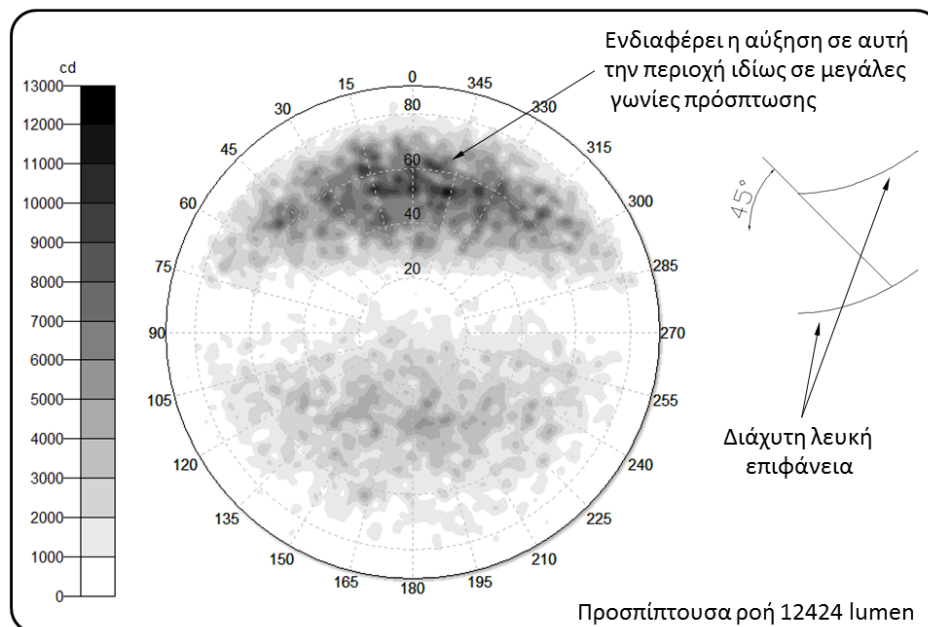
Γενικά ένας σωστός τρόπος διαχείρισης της ανακλώμενης ακτινοβολίας είναι ο εξής : οι περσίδες που βρίσκονται κοντά στο δάπεδο ανακατανέμουν την ηλιακή ροή σε περιοχή κοντά στο άνοιγμα και με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η άμεση θάμβωση από ανάκλαση ήλιου ενώ το ανώτερο τμήμα τους που βρίσκεται στην οροφή κατευθύνει ροή στο πίσω μέρος του δωματίου, όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα. Η ιδέα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με διαφορετική λειτουργία του συστήματος είτε με διαφορετική γεωμετρία (δηλ. διαφορετικό προφίλ).

¹²⁷ A. Tsangrassoulis, V. Maheras, K. Axarli, "Simplified Design of a specular slat profile curve using 2D ray tracing and gentic algorithms", 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, BS 2013, 25-28/8/2013, Savoie Technolac, France



Σχήμα 7.79: Διαχείριση ηλιακής ακτινοβολίας από το σύστημα σκίασης/φυσικού φωτισμού.

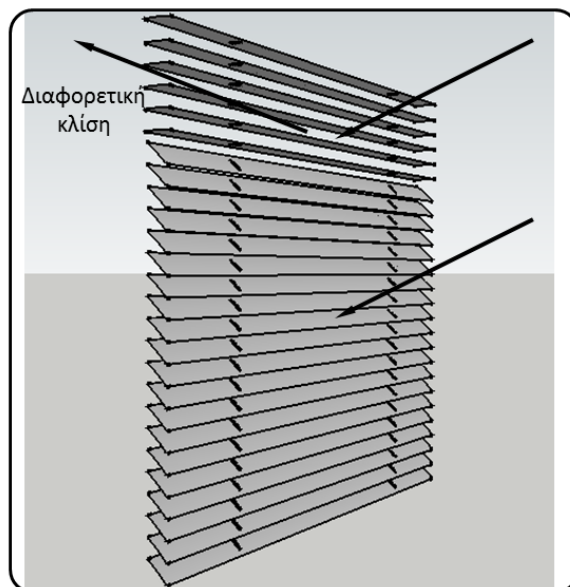
Σήμερα με την βοήθεια ειδικών λογισμικών μπορούν να σχεδιαστούν περσίδες με συγκεκριμένες ιδιότητες ανακατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.80: Υπολογισμός κατανομής λαμπρότητας λόγω πρόσπτωσης άμεσου φωτισμού. Γωνία πρόσπτωσης 45° . Ανάλυση με TRACE-PRO (<http://lambdaires.com/>). Τέτοιου είδους λογισμικά επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του σχήματος της τομής των περσίδων ώστε να ικανοποιηθούν συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Όπως αναφέρθηκε, η πλέον απλή προσέγγιση για την ρύθμιση των ηλιακών κερδών είναι η αλλαγή της κλίσης των περσίδων περιορίζοντας βέβαια την

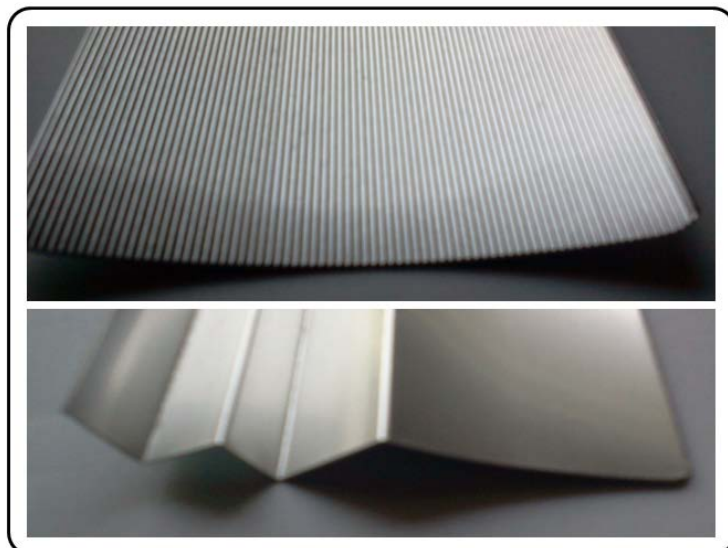
οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι η τροποποίηση της κλίσης των περσίδων ανάλογα με το ύψος από το δάπεδο. Οι ψηλότερες περσίδες διατηρούνται σε πιο ανοιχτή θέση και με αντίστροφη καμπυλότητα επιτρέποντας την είσοδο φυσικού φωτισμού. (http://www.eckelt.at/en/produkte/sonnenschutz/dls_ecklite_evolution/index.aspx)



Σχήμα 7.81: Αντι της χρήσης πολύπλοκου συστήματος σκίασης / διαχείρισης του φυσικού φωτισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο απλούστερο αλλά με «καινοτομικό» τρόπο. Στο σχήμα ένα απλό σύστημα περσίδων διαχωρίζεται σε δύο μέρη (τα οποία ελέγχονται διαφορετικά) επιτρέποντας σκίαση αλλά και κάποια παροχή φωτισμού.

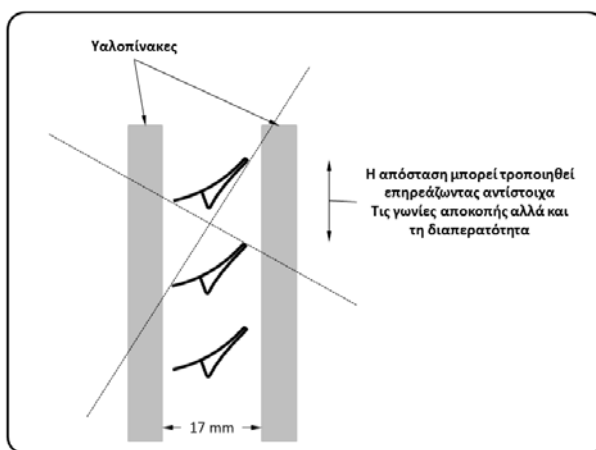
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό ενός συστήματος περσίδων. Στο πρότυπο EN 14501:2005 “Blinds And Shutters - Thermal And Visual Comfort - Performance Characteristics and Classification” αναφέρεται μια κατηγοριοποίηση της παραμέτρου «οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον». Αυτή η κατηγοριοποίηση (από 0-4) βασίζεται στην ικανότητα αναγνώρισης προσώπου που βρίσκεται 5μ μακριά από την πρόσοψη στο εξωτερικό από παρατηρητή που βρίσκεται 1μ από την πρόσοψη στο εσωτερικό. Υπάρχουν ενδιαφέροντες σχεδιασμοί με περσίδες των οποίων η κλίση δεν μεταβάλλεται. Η εποχική διαφοροποίηση στον χειρισμό της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιείται είτε με κατάλληλο σχεδιασμό της τομής είτε με τροποποίηση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας της περσίδας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα συστήματα RetroLux και RetroFlex της Koester LichtPlanung¹²⁸.

¹²⁸ http://www.koester-lichtplanung.de/pages_gb/news_01.html, http://www.koester-lichtplanung.de/downloads/03flex_kl.pdf

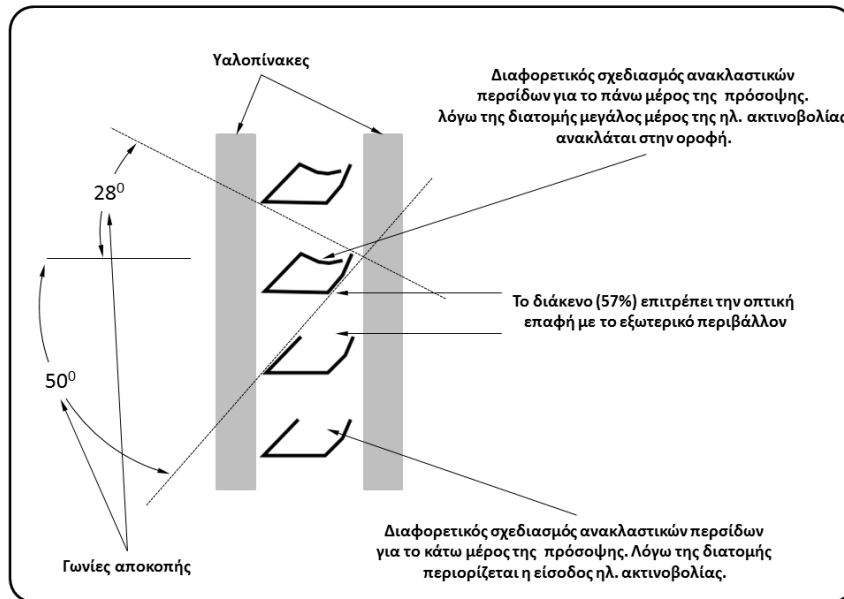


Σχήμα 7.82: Τομή περσίδας συστήματος Retroflex (επάνω) και Retrolux (κάτω) από την Koester LichtPlanung.

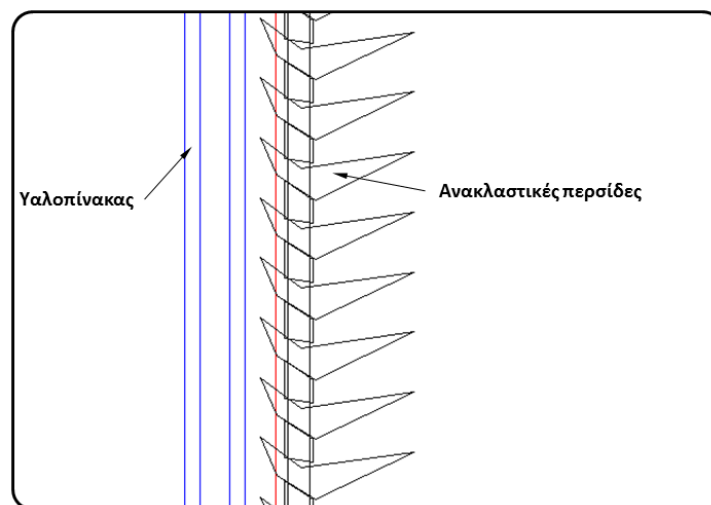
Η χρήση ανακλαστικών περσίδων για καλύτερη έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας προϋποθέτει και μια σχετική τους προστασία για την αποφυγή μείωσης της απόδοσης τους. Η πλέον τυπική λύση είναι η τοποθέτησή τους σε διπλό υαλοπίνακα. Αυτή η διευθέτηση παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ρύθμισης του συντελεστή ηλιακών κερδών και της διαπερατότητας στο ορατό ανάλογα με την επιλογή του υαλοπίνακα. Σε πολλές περιπτώσεις δε, η γεωμετρία του συστήματος μπορεί να τροποποιηθεί πριν τοποθετηθεί στο διάκενο, ικανοποιώντας διαφορετικές απαιτήσεις. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας δύο τέτοιων συστημάτων από την οικογένεια OKASOLAR.



Σχήμα 7.83: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας συστήματος OKASOLAR W¹²⁹. Η γεωμετρία του μπορεί να τροποποιηθεί (μείωση απόστασης ανάμεσα στις περσίδες). Η διαπερατότητα στο ορατό κυμαίνεται από 4-57% ενώ ο συντελεστής ηλιακών κερδών με υαλοπίνακα low-e από 17-45%.



Σχήμα 7.84: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας συστήματος OKASOLAR F¹³⁰. Η διαφοροποίηση του σχεδιασμού των ανακλαστικών περσίδων επιτρέπει τον διαχωρισμό της λειτουργίας των πρόσοψης σε τμήματα. Με υαλοπίνακα low-e η διαπερατότητα στο ορατό κυμαίνεται από 2-47% ενώ ο συντελεστής ηλιακών κερδών με υαλοπίνακα low-e από 17-42%.



Σχήμα 7.85: Σταθερό εσωτερικό σύστημα σκίασης με δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας προς της οροφή. Σύστημα LightLouver¹³¹

Παρόμοιας φιλοσοφίας σύστημα είναι και το Micro Sun Shielding Louver της Siteco¹³². Το συγκεκριμένο τοποθετείται σε οριζόντια ανοίγματα και έχει σαν σκοπό να μειώσει σημαντικά την είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας αλλά αφήνει

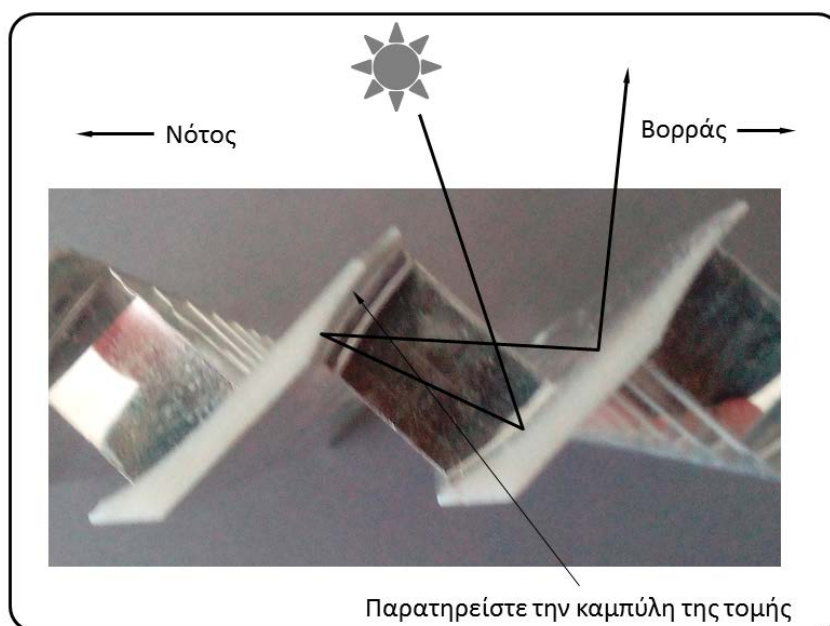
130

http://www.okalux.de/fileadmin/Downloads/Downloads_englisch/Infotexte/i_okasolar_w_e.pdf

¹³¹ <http://lightlouver.com/>

¹³² <http://www.siteco.com/en/products/daylight-systems/micro-sun-shielding-louvre.html>

σχεδόν ανεμπόδιστη τη θέα στο βορεινό τμήμα του ουρανού. Ο συνολικός συντελεστής ηλιακών κερδών είναι 12%.

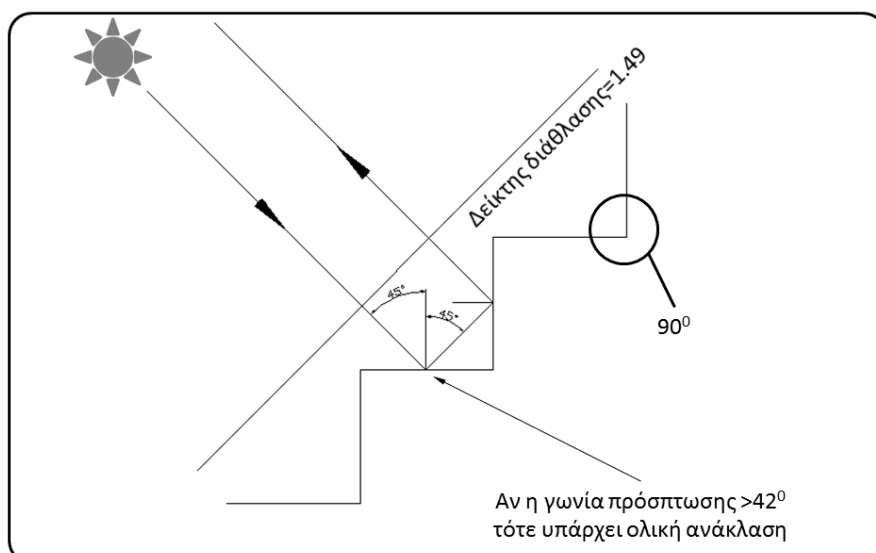


Σχήμα 7.86: Λειτουργία συστήματος *Micro Sun Shielding Louver*.

Πρισματικοί ακρυλικοί υαλοπίνακες¹³³.

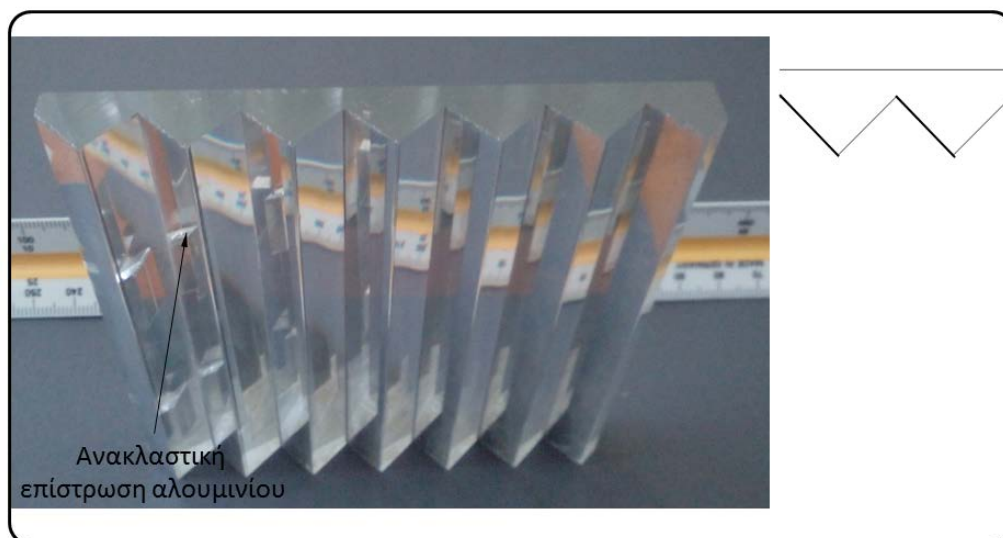
Σήμερα αποτελούν μια συμβατική λύση για την σκίαση αφού με κατάλληλο προσανατολισμό μπορούν να αποτρέψουν την είσοδο ηλιακών ακτίνων. Για μέγιστη ηλιοπροστασία θα πρέπει η κλίση τους να ρυθμίζεται ανάλογα με το ύψος του ήλιου ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης για την απόρριψη των ηλιακών ακτίνων. Προφανώς η διαπερατότητα στην διάχυτη ακτινοβολία είναι αυξημένη. Τυπικές τιμές για τον συντελεστή ηλιακών κερδών (g-value) ~15% ενώ η διαπερατότητα στο ορατό (διάχυτη) μέχρι 43%. Με τιμή συντελεστή διάθλασης 1.49 (PMMA) όταν μια ακτίνα φωτός βρίσκεται στο υλικό, ανακλάται ολικά (δηλ. δεν βγαίνει από το υλικό) όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι $>42^\circ$. Συνεπώς αν απαιτείται πλήρης αποκοπή της άμεσης ηλ. ακτινοβολίας θα πρέπει το πρισματικό πάνελ να είναι κάθετο στις ακτίνες του ήλιου. Η λειτουργία του τότε παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

¹³³ <http://www.siteco.com/en/products/daylight-systems/static-prismatic-systems.html>



Σχήμα 7.87: Η κατάλληλη τοποθέτηση πρισματικού υαλοπίνακα μπορεί να αποτρέψει την είσοδο (σε μεγάλο βαθμό) άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας επτρέπωντας όμως την είσοδο σημαντικού ποσοστού διάχυτης.

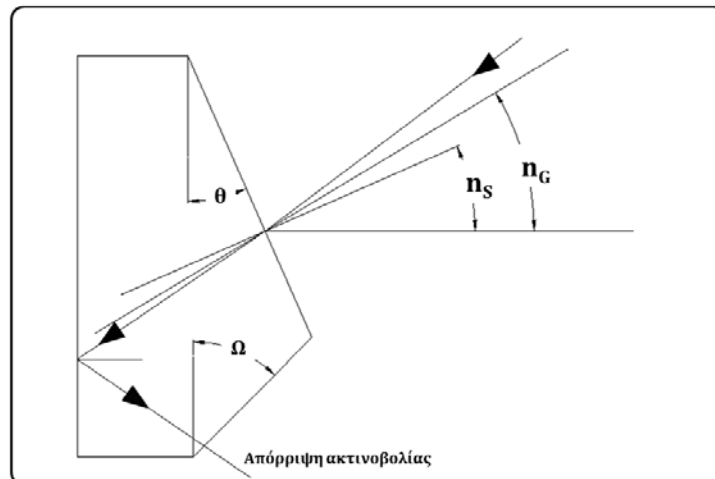
Μια παραλλαγή είναι η επίστρωση μιας επιφάνειας των στοιχειωδών πρισμάτων με αλουμίνιο (ανακλαστική επίστρωση).



Σχήμα 7.88: Πρισματικός συμμετρικός υαλοπίνακας (υλικό PMMA) με ανακλαστική επίστρωση.

Οι πρισματικοί υαλοπίνακες εμποδίζουν την θέαση και έτσι συνήθως τοποθετούνται σχετικά ψηλά (φεγγίτες) είτε στο διάκενο διπλών υαλοπινάκων (επιπρόσθετη προστασία) είτε σε σύστημα σκίασης

Οι ασύμμετροι (δηλ. αυτοί των οποίων τα στοιχειώδη πρίσματα δεν έχουν όμοιες πλευρές) χρησιμοποιούνται και για αλλαγή της διεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων (συνήθως προς την οροφή) με αποτέλεσμα βελτίωση των συνθηκών οπτικής άνεσης. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε μια απλή αρχή. Τον σχεδιασμό πρισμάτων τα οποία επιτρέπουν την είσοδο ηλιακών ακτίνων όταν η γωνία πρόσπτωσης στον υαλοπίνακα είναι π.χ. μικρότερη από κάποια τιμή και την απόρριψη όταν η γωνία ξεπεράσει αυτή την τιμή.



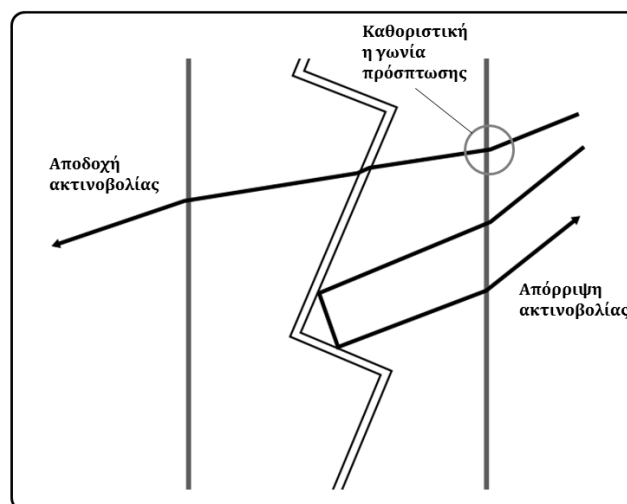
Σχήμα 7.89: Ασύμμετρος πρισματικός υαλοπίνακας. Ρυθμίζοντας τις γωνίες των στοιχειωδών πρισμάτων μπορεί να ρυθμισθεί και η γωνία πέραν της οποίας αποτρέπεται η είσοδος ηλιακών ακτίνων.

Χρησιμοποιώντας στοιχεία από τον W. Lorentz¹³⁴ που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα, όλες οι ακτίνες με γωνία μεγαλύτερη από την η_G απορρίπτονται. Η γωνία αυτή καθορίζεται από τη σχέση :

$$\sin(\eta_G - \theta) = n \cdot \sin(\sin^{-1}(1/n) - \theta) \quad (7.11)$$

όπου n ο δείκτης διάθλασης.

Διάφορες παραλλαγές έχουν αναπτυχθεί στην παραπάνω ιδέα. Μια από αυτές είναι και η παρακάτω¹³⁵ .:



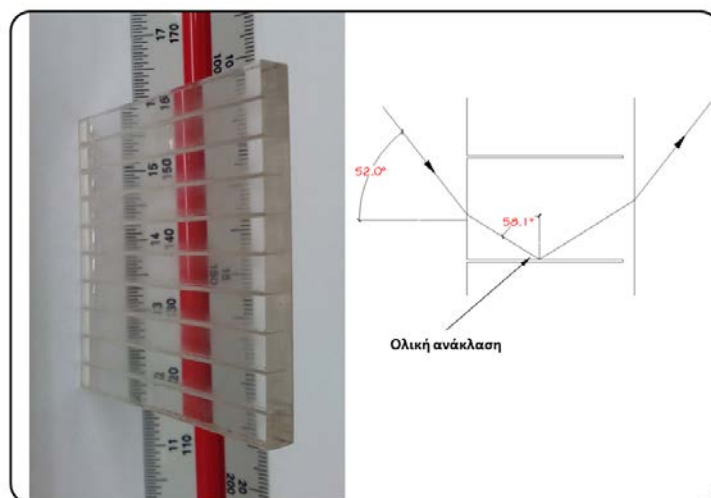
Σχήμα 7.90: Χρήση πρισματικών υαλοπινάκων με ενδιάμεσο διάκενο.

Σε αυτή την περίπτωση δυο πρισματικοί υαλοπίνακες τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μεσολαβεί εάν μικρό στρώμα αέρα ανάμεσα στα πρίσματα.

¹³⁴ W. Lorentz " A glazing unit for solar control daylighting and energy conservation" , Solar Energy Vol. 70, No. 2, pp. 109-130, 2001

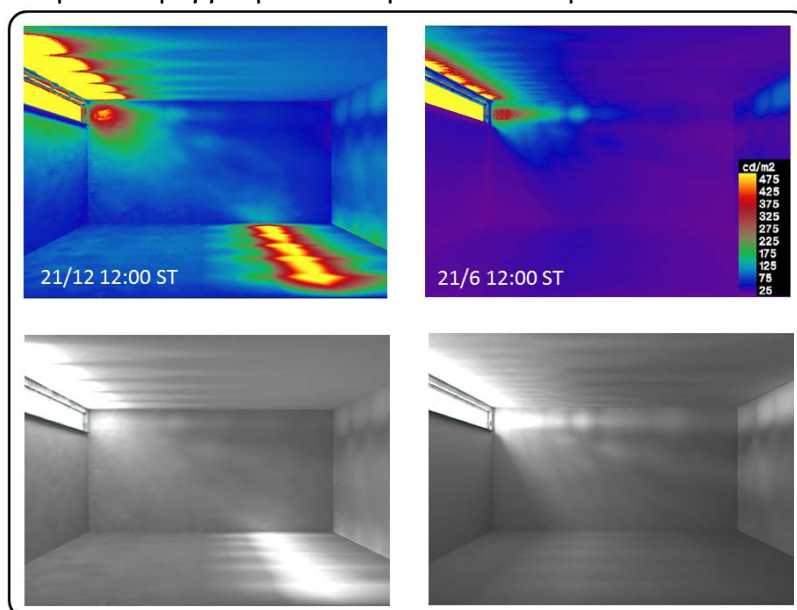
¹³⁵ Yonah Y. B. (1983). Selectively Light Transmitting Panel, European patent application 833 01687.6, publication 0092322 A1

Η ίδια αρχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ένα απλούστερο γεωμετρικά σύστημα. Σε φύλλο ακρυλικού πραγματοποιούνται τομές (laser cut panel) όπως παρουσιάζεται στο σχήμα :



Σχήμα 7.91: Ακρυλικό υλικό με τομές από laser cutter¹³⁶.

Και σε αυτό το σύστημα ο στόχος είναι η αλλαγή στην κατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων προς της οροφή και σε μεγάλη –κατα το δυνατο- απόσταση από το άνοιγμα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συμπεριφορά αυτού του πανελ όταν τοποθετηθεί σε φεγγίτη νότιου προσανατολισμού.



Σχήμα 7.92: Παρατηρήστε της αύξηση της λαμπρότητας της οροφής. Νότιο άνοιγμα σε χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα.

Η διαδικασία παραγωγής των πρισματικών δομών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή αφού για παράδειγμα μια ατέλεια στην ακμή των στοιχειωδών πρισμάτων

¹³⁶ I.R Edmonds, P.J Greenup, “Daylighting in the tropics”, Solar Energy , Volume 73, Issue 2, August 2002, Pages 111-121

οδηγεί π.χ. στην εμφάνιση χρωμάτων στις επιφάνειες που προσπίπτει η ηλ. ακτινοβολία μετά την αλλαγή της κατεύθυνσης από τον υαλοπίνακα. Γενικά έχουν προταθεί –άλλα και παραχθεί σαν προϊόν- διάφορα συστήματα τα οποία στηρίζουν τη λειτουργία τους σε κάποια ακρυλική μικροδομή η οποία είναι ικανή να τροποποιήσει την κατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων. Όπως και στα προαναφερθέντα συστήματα συνήθως τοποθετούνται σε φεγγίτες όπως για παράδειγμα το Lumitor SGG¹³⁷ (g-value=30%).

Ολογραφικά υμένια

Κατασκευάζονται με φωτογραφική επεξεργασία διχρωμικής ζελατίνας. Η τοποθέτηση τους (κόλληση) σε υαλοπίνακες (laminated) επιτρέπει την χρήση στο κτιριακό περιβάλλον. Μπορούν να αλλάξουν κατεύθυνση στις ηλιακές ακτίνες ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης επιρεάζοντας δυσμενώς την οπτική σπαφή με το περιβάλλον.

(<http://www.visionoptics.de/index.php?id=6&L=1>)



Σχήμα 7.93: Συνθετικές εικόνες με την κατανομή λαμπρότητας σε δωμάτιο νότιου προσανατολισμού στην Αθήνα. Ολογραφικό υμένιο έχει τοποθετηθεί στον φεγγίτη. Προφανώς η αλλαγή θέσης του ήλιου τροποποιεί και την κατανομή λαμπρότητας.

¹³⁷ <http://merint.com/site/ourbusiness/SGG%20LUMITOP.pdf>

Οδηγώντας φως σε μεγάλες αποστάσεις

Παρόλο που η τεχνολογία μεταφοράς φωτισμού είναι σήμερα τεχνολογίας αιχμής ο πρώτος σχεδιασμός ενός πρότυπου συστήματος πραγματοποιήθηκε το 1881. Ο William Wheeler σχεδίασε ένα σύστημα μεταφοράς φωτισμού που μοιάζει πάρα πολύ με τα σημερινά συστήματα οπτικών ινών.

Το πρώτο τμήμα ενός συστήματος μεταφοράς είναι η συγκέντρωση του άμεσου ηλιακού φωτισμού. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με κάτοπτρα είτε με φακούς (π.χ. φακοί Fresnel).

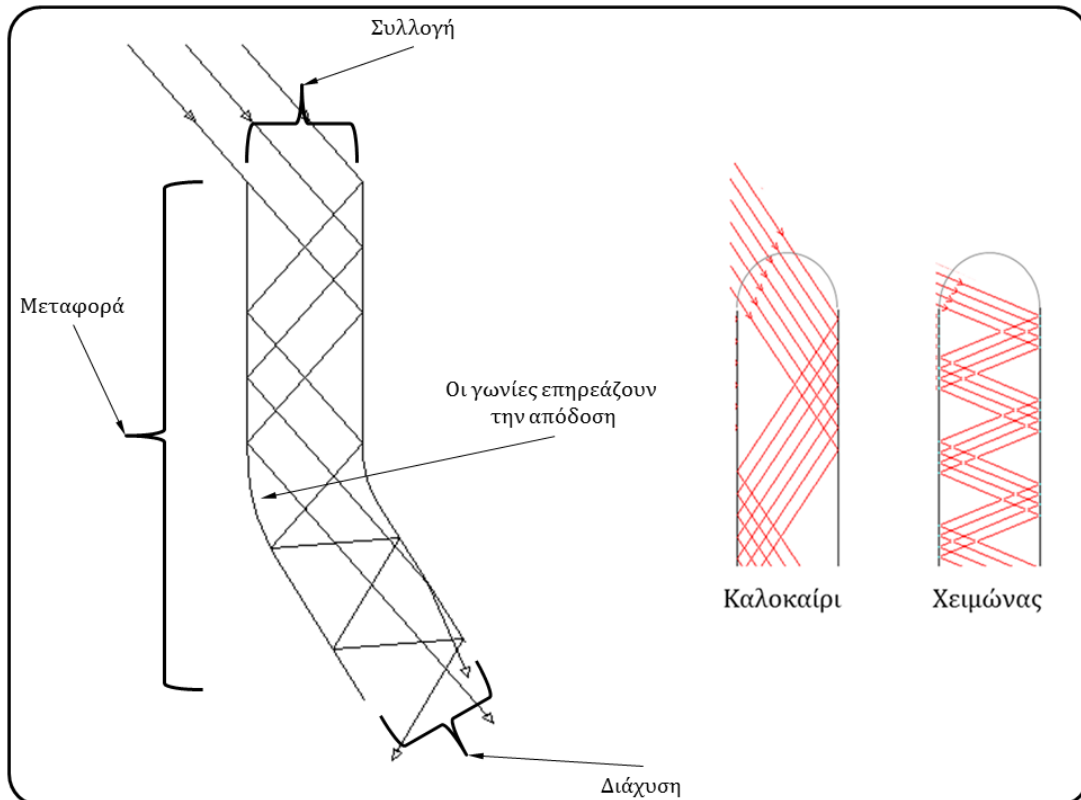
Υπερβολική συγκέντρωση ακτινοβολίας είναι δυνατό να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα υπερθέρμανσης του υλικού μεταφοράς. Χαμηλή συγκέντρωση πιθανόν να καθιστά την μεταφορά αντιοικονομική (πάντα σε σύγκριση με το κόστος συμβατικών πηγών).

Το πλέον απλό σύστημα αναφοράς είναι σωλήνας που κατασκευάζεται από υλικό με μεγάλη ανακλαστικότητα (φωτοσωλήνας/ ηλιοσωλήνας). Είναι παθητικό σύστημα, με την έννοια ότι δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, ώστε με κάποιο τρόπο να είναι δυνατή η παρακολούθηση του ήλιου.

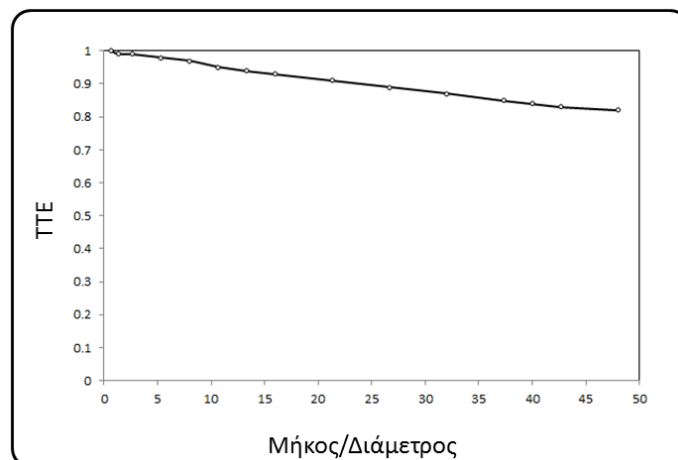
Φυσικά τα δύο άκρα του σωλήνα πρέπει να είναι καλυμένα, διαφορετικά η επικάθιση σκόνης ελλατώνει την απόδοση του συστήματος. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση είναι οι τυχόν γωνίες (και ο αριθμός τους αλλά και το μέγεθος της κάθε μιας) καθώς επίσης και η διαφοροποίηση της απόδοσης χειμώνα –καλοκαίρι. Λόγω χαμηλής τροχιάς του ήλιου τον χειμώνα απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός ανακλάσεων για να φτάσει η φωτεινή ροή στην επιφάνεια εξόδου στο εσωτερικό του κτηρίου. Η επίλυση του τελευταίου προβλήματος έχει οδηγήσει κατασκευαστές να υιοθετούν την ιδέα της αλλαγής της κατεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων μέσω χρήσης συστημάτων (π.χ. πρισματικά διαφανή στοιχεία) είτε κατάλληλης τροποποίησης του εξωτερικού διαφανούς καλύματος (π.χ. δημιουργώντας ένα είδος φακού).

Όπως ήδη αναφέρθηκε η απόδοση ολόκληρου του συστήματος εκτιμάται με τη βοήθεια χαρακτηριστικών των επιμέρους τμημάτων δηλ. την διαπερατότητα των των καλυμμάτων (εσωτερικού και εξωτερικού), την απόδοση του ίδιου του σωλήνα η οποία εξαρτάται από την ανακλαστικότητα του υλικού καθώς επίσης και από τον αριθμό των γωνιών. Σύμφωνα με το CIE173:2006 Tubular Daylight Guidance Systems μια τυπική ανάλυση περιλαμβάνει :

1. Την εκτίμηση των επιπέδων εξωτερικού φωτισμού (άθροισμα άμεσης και διάχυτης)
2. Εκτίμηση διαπερατοτήτων συλλέκτη/διαχύτη (T_{top} , T_{bottom}) καθώς επίσης και του συντελεστή συντήρησης MF (λόγω σκόνης μειώνεται η διαπερατότητα).
3. Εκτίμηση της απόδοσης (TTE, transmission tube efficiency) του σωλήνα λαμβάνοντας υπόψη την διάμετρο (D), το μήκος του (L) και την ανακλαστικότητα του υλικού. Γενικά επιδιώκονται τιμές TTE>0.4 διαφορετικά θα πρέπει να αυξηθεί η διάμετρος. Ένα παράδειγμα με τιμές TTE παρουσιάζεται στο σχήμα 7.95.



Σχήμα 7.94: Χαρακτηριστικά τμήματα συστήματος μεταφοράς φυσικού φωτισμού (ηλιοσωλήνας) και λειτουργία του καλοκαίρι και χειμώνα.



Σχήμα 7.95: Τυπική μεταβολή απόδοσης ηλιοσωλήνα σαν συνάρτηση του διατάμματος. Διάμετρος 0.357 μ, ανακλαστικότητα υλικού 0.995.

4. Η φωτεινή ροή που εξέρχεται από τον σωλήνα υπολογίζεται σαν το γινόμενο της φωτεινής ροής που εισέρχεται επί την ολική απόδοση:

$$\Phi_{\text{out}} = \Phi_{\text{in}} \cdot T_{\text{top}} \cdot T_{\text{bottom}} \cdot MF \cdot TTE = E_h \cdot A$$

Όπου E_h είναι ο ολικός εξωτερικός φωτισμός σε οριζόντια επιφάνεια και A η επιφάνεια του φωτοσωλήνα. Όπως είναι φανερό, σε αυτή την προσέγγιση ο φωτισμός θεωρείται διάχυτος.

5. Θεωρώντας ότι η φωτεινή ροή που εξέρχεται από τον διαχύτη έχει πλήρως ιστροπική κατανομή, υπολογίζεται ο συντελεστής χρήσης (Coefficient of Utilisation) ανάλογα με τον δείκτη χώρου.

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο Lumen στη συνέχεια είναι δυνατό να εκτιμηθεί η στάθμη φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας.

Ενας απλός τύπος για τον υπολογισμό της διαπερατότητας του με μήκος L και ακτίνα R , φωτοσωλήνα στον άμεσο φωτισμό, δίνεται από τη σχέση¹³⁸:

$$T = \rho^{2L \tan \theta / \pi R} \quad (7.12)$$

όπου ρ η ανακλαστικότητα, θ η γωνία πρόσπτωσης, L το μήκος του σωλήνα και R η ακτίνα.

Προφανώς και για τους φωτοσωλήνες όπως και για τα ανοίγματα οροφής υπάρχουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά (π.χ. g-value) ώστε να μπορούν να συγκριθούν. Ενα όμως από τα πλεονεκτήματα των φωτοσωλήνων είναι η εκπομπή της φωτεινής ροής από χαμηλότερο ύψος δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για την επίτευξη μεγαλύτερων επιπέδων φωτισμού (θυμηθείτε ότι η ένταση φωτισμού είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την φωτεινή πηγή).



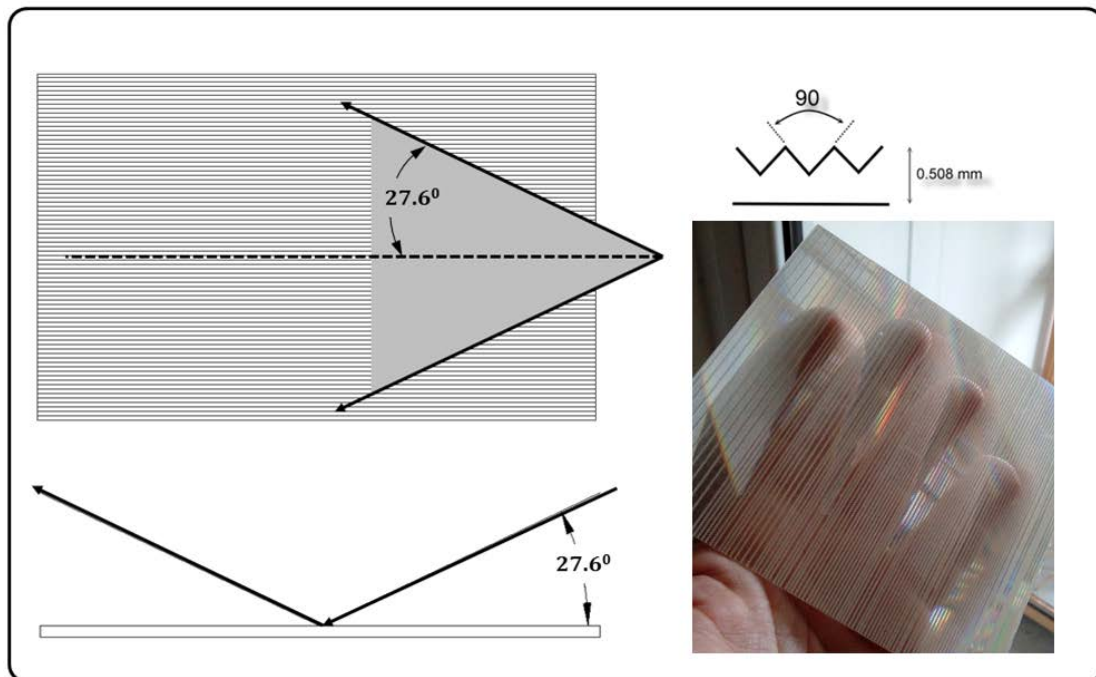
Σχήμα 7.96: Τυπική εγκατάσταση ηλιοσωλήνων. (Φωτ. Ν. Αλούπη, TAM, ΠΘ).

Εναλλακτικά αντί για χρήση μεταλλικής επικάλυψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφανές πρισματικής διατομής (Optical Light Film, 3M). Το πάχος του υλικού είναι αρκετά μικρό ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί για να σχηματίσει σωλήνες τετράγωνης ή κυκλικής διατομής.

Η λειτουργία του βασίζεται στην επίτευξη ολικής ανάκλασης των ακτίνων που εισέρχονται για συγκεκριμένο φυσικά εύρος γωνιών εισόδου. Η είσοδος φωτεινών ακτίνων με γωνία μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρέπει την διαφυγή τους από το σωλήνα. Έτσι όσες φωτεινές ακτίνες προσπίπτουν στην λεία πλευρά του υλικού με γωνίες μικρότερες των 27.6° σε σχέση με τον διαμήκη άξονα (δηλ. κατά μήκος των αυλακιών) ανακλώνται. Η ανακλαστικότητα του συγκεκριμένου υλικού φτάνει μέχρι 99% (εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης). Η συνθήκη ολικής ανάκλασης μπορεί να διακοπεί είτε με την προσθήκη στο εσωτερικό του σωλήνα τμημάτων κάποιου διαχύτη είτε ανοίγοντας τρύπες είτε τροποποιώντας την επιφάνεια. Το γεγονός αυτό

¹³⁸ A. Zastrow and V. Wittwer, 'Daylighting with mirror light pipes and with fluorescent planar concentrators,' *SPIE* 692 227, 1986.

αναγκάζει το φως να εξέρχεται απον σωλήνα μετατρέπωντας τον σε ένα φωτιστικό. Συνεπώς καθοριστικής σημασίας είναι η ύπαρξη μια φωτεινής πηγής στην μία άκρη του σωλήνα (προφανώς μπορεί να είναι φωτισμός από τον ήλιο) της οποίας η φωτεινή ροή περιορίζεται μέσα σε γωνία $2 \times 27.6^\circ$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

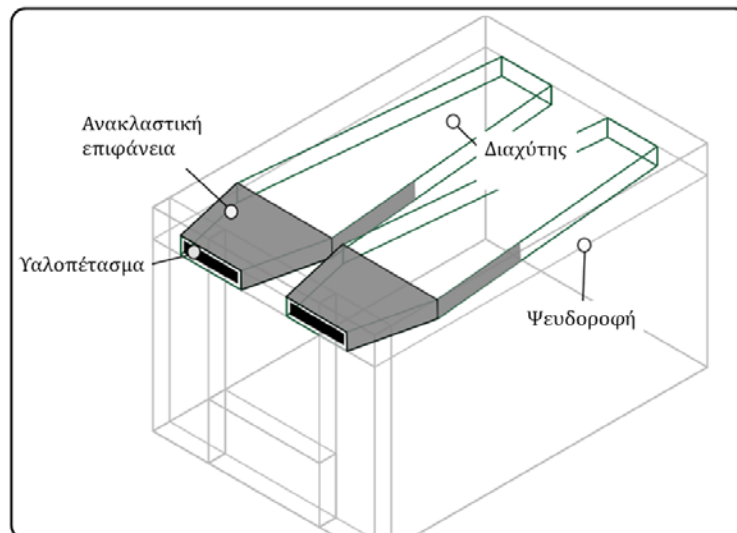


Σχήμα 7.97: Αρχή λειτουργίας OLF. Περισσότερες πληροφορίες όσον αφορά την ανάλυση στην εργασία του L. Whitehead¹³⁹.

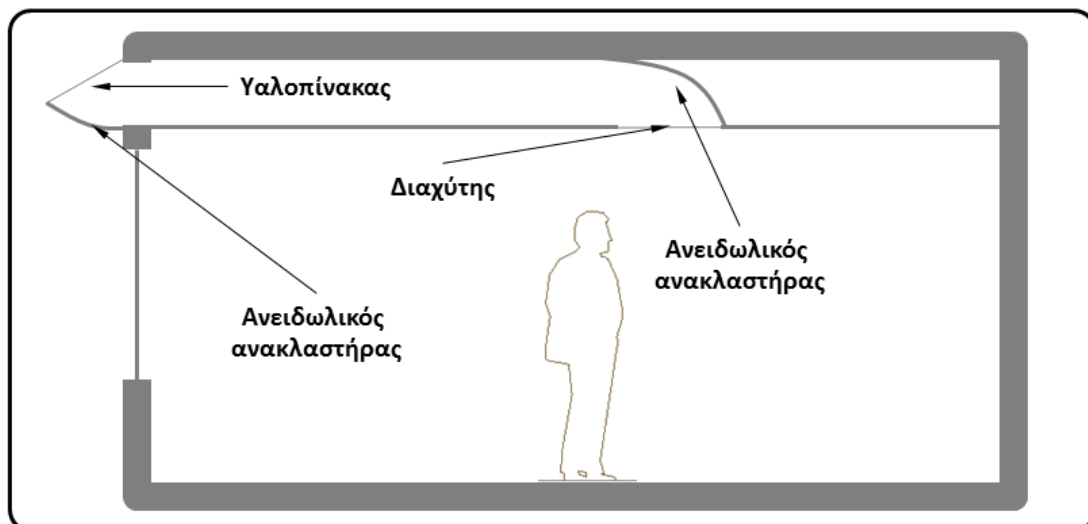
Σε γενικές γραμμές τα προαναφερθέντα τοποθετούνται κατακόρυφα, σε μια προσπάθεια να μεταφερθεί φυσικός φωτισμός σε περιοχές του κτηρίου με περιορισμένη ή καθόλου πρόσβαση σε αυτόν. Όμως υπάρχουν και προτάσεις στην οποίες αυτή μεταφορά πραγματοποιείται οριζόντια συνήθως μέσα από την ψευδοροφή του χώρου. Στα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων συστημάτων είναι τα εμπόδια της αστικής γεωμετρίας τα οποία περιορίζουν χρονικά τον άμεσο ηλιακό φωτισμό στην είσοδο τους.

Τέτοιου είδους συστήματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα :

¹³⁹ Whitehead, A. Lorne. "New Simplified Design Procedures for Prism Light Guide Luminaires". Journal of the Illuminating Engineering Society. Vancouver, BC. Summer 1998



Σχήμα 7.98: Μεταφορά φυσικού φωτισμού χρησιμοποιώντας χώρο στην ψευδοροφή¹⁴⁰.



Σχήμα 7.99: Χρήση ανειδωλικού συστήματος συλλογής και μεταφορά φωτισμού μέσω ψευδοροφής¹⁴¹.

Ο διαχύτης στην έξοδο του συστήματος είναι απαραίτητος διαφορετικά μπορεί τα ηλιακά ίχνη που σχηματίζονται να προκαλέσουν ενόχληση

¹⁴⁰ Canziani, R., Peron, F. and Rossi, G. (2004) Daylight and energy performances of a new type of light pipe, Energy and Buildings, 36

¹⁴¹ J-L Scartezzini, G. Courret, 2002, Anidolic daylighting Systems, Solar Energy, Vol.73, No 2



Σχήμα 7.100: Αν δεν χρησιμοποιηθεί διαχύτης στην έξοδο του συστήματος μεταφοράς τότε υπάρχει περίπτωση τα ηλιακά ίχνη που σχηματίζονται (μετα τις ανακλασεις) να δημιουργούν ενοχλητικά μοτίβα.

Στα προαναφερθέντα συστήματα φυσικού φωτισμού θα πρέπει να προστεθούν και οι οπτικές ίνες. Αποτελούνται από πυρήνα διαφανούς υλικού (πλαστικό ή γυαλί) ο οποίος περιβάλλεται από υλικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης έτσι ώστε να μπορούν να επιτευχθούν συνθήκες ολικής ανάκλασης. Το συνολικό σύστημα περιβάλλεται από εξωτερικό κάλυμμα για λόγους προστασίας. Φυσικά πολλές οπτικές ίνες μπορούν να ενωθούν μαζί προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό ενός συστήματος φωτισμού.

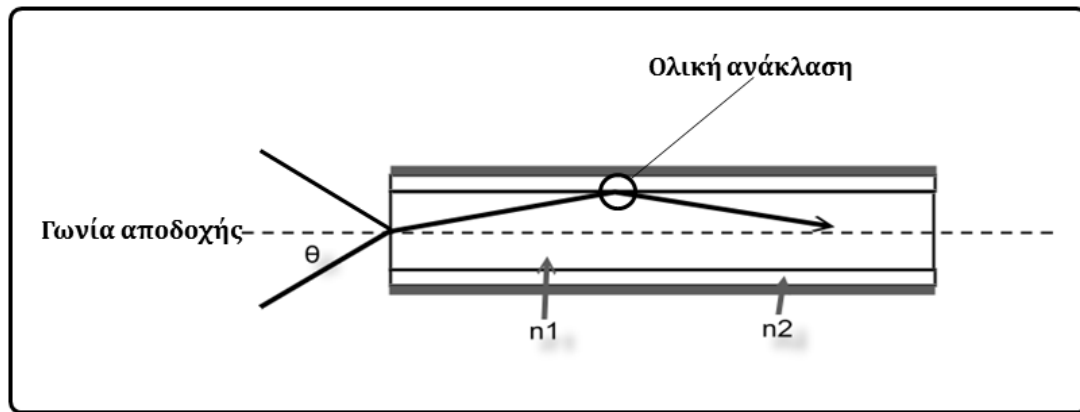
Οι οπτικές ίνες που συνήθως χρησιμοποιούνται για μεταφορά φωτισμού έχουν διάμετρο μεταξύ 0.25 -5 mm. Η διάμετρος καθορίζει και την ευελιξία της ίνας (δηλ. πρακτικά την μικρότερη ακτίνα καμπύλωσης). Διάφορα διαφανή υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ινών όμως για τις συγκεκριμένες εφαρμογές μεταφοράς ηλιακής ενέργειας οι ακρυλικές (PMMA) είναι επικρατέστερες λόγω καλής διαπερατότητας και θερμοαντοχής (-55-70 °C σε περιβάλλον μικρής υγρασίας) με περίβλημα π.χ. PVC.

Οι γυάλινες ίνες (διαμέτρου συνήθως 0.05 -2 mm) παράγονται με διέλαση βοριοπυριτικού γυαλιού. Η χρήση πυριτικού γυαλιού στον πυρήνα της ίνας μπορεί να μειώσει την εξασθένιση σημαντικά. Ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι η φασματική κατανομή του φωτός όταν εξέρχεται από την ίνα. Οι ακρυλικές (PMMA) είναι περισσότερο διαφανείς στα μικρά μήκη κύματος ενώ τα αντίθετο συμβαίνει με τις γυάλινες (λόγω σκέδασης Rayleigh). Συνεπώς έχει ιδιαίτερη σημασία το φασματικό περιεχόμενο της ακτινοβολίας σε σχέση με την απόσταση που χρειάζεται να διανυθεί.

Χαρακτηριστικό μέγεθος της ίνας αποτελεί η γωνία αποδοχής θ_A η οποία αντιπροσωπεύει την μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης - σε σχέση με τον άξονα της ίνας- με την οποία μπορεί να επιτευχθεί ολική ανάκλαση (και συνεπώς μεταφορά). Η γωνία αποδοχής ορίζεται ως εξής:

$$\theta_A = \sin^{-1} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (7.13)$$

όπου n_1 είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού του πυρήνα της ίνας ενώ n_2 ο δείκτης διάθλασης του εξωτερικού καλύματος (μικρότερος από τον n_1). Τυπικές τιμές για το $\sin\theta_A$ είναι 0.2-0.5 (δηλ $\theta_A \sim 11^\circ$ - 30°). Φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν με γωνίες μεγαλύτερες από την γωνία αποδοχής δεν οδηγούνται από την οπτική ίνα.



Σχήμα 7.101: Αρχή λειτουργίας οπτικής ίνας.

Προφανώς η φωτεινή ροή που εξέρχεται από την οπτική ίνα περιέχεται σε κώνο που καθορίζεται από την γωνία αποδοχής.

Όπως είναι φυσικό μεγαλύτερη γωνία αποδοχής πρακτικά σημαίνει και μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ενέργειας. Από την παραπάνω σχέση αν ο $n_2 = 1$ τότε επιτυγχάνουμε μεγάλες τιμές του θ_A . Αυτό βέβαια στη θεωρία, γιατί στην πράξη η αφαίρεση του περιβλήματος συνεπάγεται και γρήγορη μεταβολή των ιδιοτήτων της επιφάνειας του πυρήνα με αποτέλεσμα οι συνθήκες ολικής ανάκλασης να επιτυγχάνονται δυσκολότερα.

Η ολική διαπερατότητα οπτικής ίνας μήκους L δίνεται από τη σχέση (για ακτινοβολία παράλληλη με τον άξονα της οπτικής ίνας)

$$T = T_{in} * T_{out} * e^{-\gamma L} \quad (7.14)$$

Όπου T_{in} , T_{out} αντιπροσωπεύουν την διαπερατότητα για την είσοδο και έξοδο της φωτεινής ροής από την οπτική ίνα. Τυπικές τιμές είναι για την μεν T_{in} 0.94-0.96 ενώ για την T_{out} 0.96. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην ανάκλαση (Fresnel) καθώς επίσης και στις μικροανωμαλίες της επιφάνειας εξόδου και εισόδου.

Ο συντελεστής εξασθένισης γ εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και φυσικά από την γωνία που σχηματίζουν οι φωτεινές ακτίνες σε σχέση με τον άξονα της οπτικής ίνας. Έτσι ο παραπάνω τύπος εφαρμόζεται ακριβώς στην περίπτωση μονοχρωματικής -παράλληλης δέσμης- ακτινοβολίας. Η εξασθένιση οφείλεται κυρίως σε σκέδαση και απορρόφηση από το υλικό του πυρήνα της ίνας.

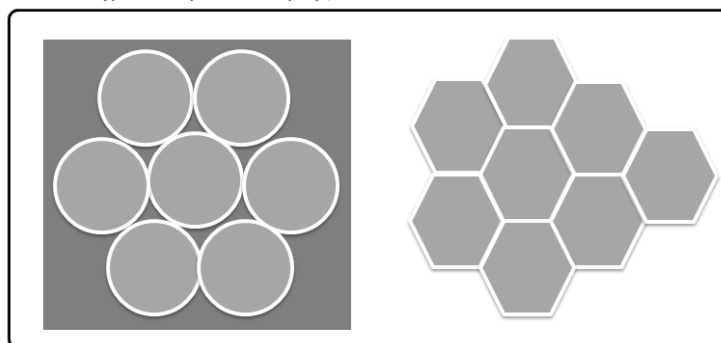
Η μέση διαπερατότητα για όλο το ηλιακό φάσμα δίνεται από τον τύπο¹⁴²:

$$T_{ave} = 10^{-0.1tL} \quad (7.15)$$

¹⁴² William Gris , Charles Patrick, (2002), Passive solar lighting using fiber optics, Journal of Industrial Technology, Vol. 19, No1.

όπου L το μήκος της ίνας και t η εξασθένιση σε μονάδες dB/m (δίνεται από τον κατασκευαστή π.χ. για PMMA 1mm, 0.2 dB/m).

Λόγω της διαμέτρου της ίνας δεν είναι δυνατό με μόνο μια ίνα να μεταφερθεί κάποια «λειτουργική» φωτεινή ροή. Έτσι ενοποιείται μια ομάδα ινών ώστε να σχηματίσουν μια δέσμη. Χρησιμοποιείται είτε κόλληση είτε τήξη των ινών. Στην πρώτη περίπτωση δημιουργείται προφανώς μια μεγαλύτερη επιφάνεια, όμως λόγω των περιοχών της κόλλησης η επιφάνεια που «μεταδίδει» φως είναι λίγο μικρότερη (απώλειες ~9-11%). Συνεπώς αν θεωρήσουμε μια τελεια κατασκευασμένη δέσμη ινών, αυτή εμφανίζει τις εξής απώλειες α) Απώλειες λόγω ανακλασης Fresnel σε είσοδο/έξοδο ~8% β) Απώλειες λόγω του γεγονότος ότι η κάθε οπτική ίνα έχει και περιβλήμα ~15-17% και γ) απώλειες λόγω της κόλλησης για τον σχηματισμό δέσμης ~9-11%.

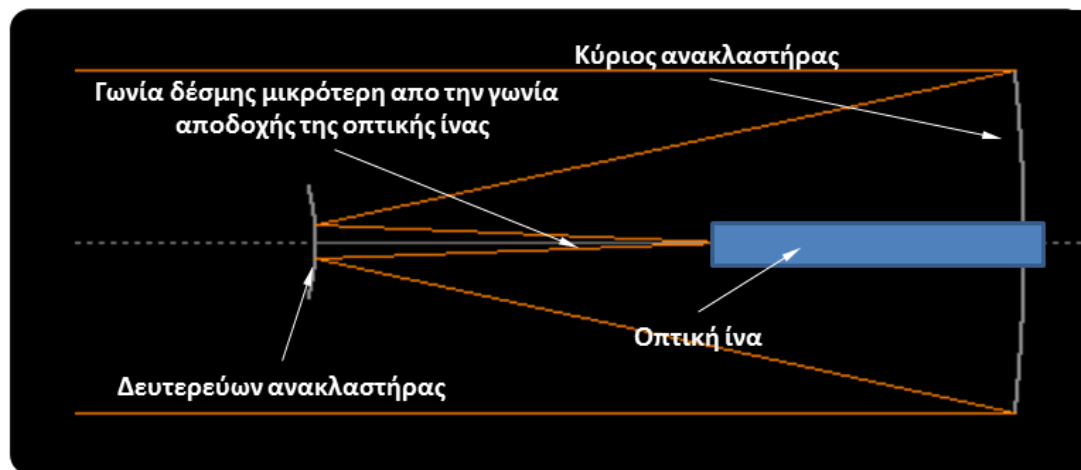


Σχήμα 7.102: Διαφορετικές τεχνικές σύνδεσης πολλών οπτικών ινών. Στην αριστερή εικόνα ο ενδιάμεσος χώρος επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες.

Βέβαια η απόδοση μιας οπτικής ίνας είναι πολύ μικρή αν απλώς το ένα ακρο της τοποθετηθεί στο εξωτερικό του κτιρίου και το άλλο στο εσωτερικό. Έτσι χρειαζόμαστε κάποιο είδος συγκεντρωτήρα (π.χ φακό fresnel ή παραβολικό κάτοπτρο). Προφανώς πρέπει να επιλεγεί συγκεντρωτήρας ο οποίος να προκαλεί σημαντική συγκεντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. Δύο παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψη είναι η αντοχή της ίνας σε μεγάλες συγκεντρώσεις ακτινοβολίας (ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών) και το γεγονός θα πρέπει η ακτινοβολία να βρίσκεται μέσα στη γωνία αποδοχής της ίνας.

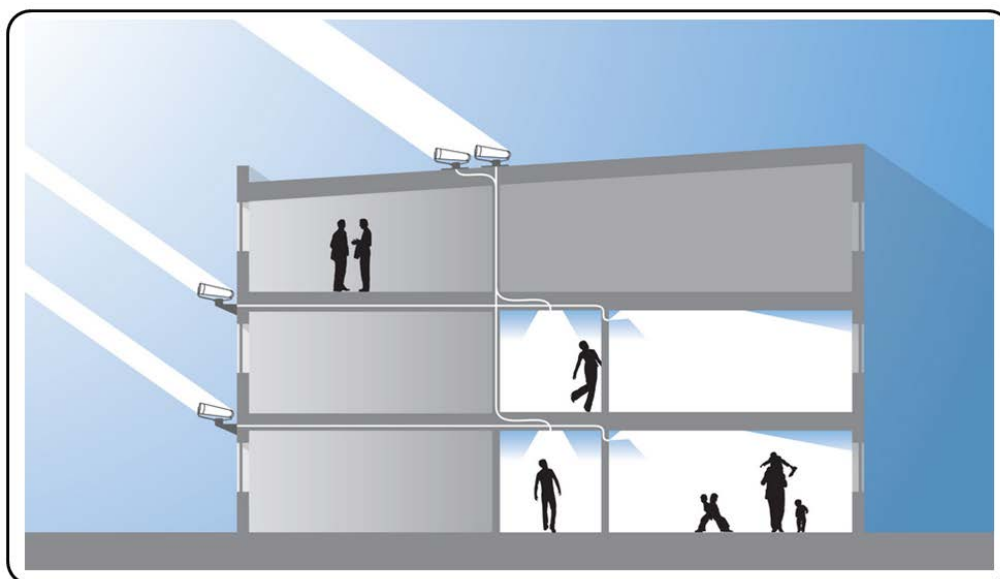
Ο σχεδιασμός λοιπόν ενός τέτοιου συστήματος αρχίζει να γίνεται πολύπλοκος. Επιπρόσθετα υπάρχουν και οι εξής παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και φυσικά σχετίζονται με την συνολική απόδοση του συστήματος:

1. Το είδωλο του ήλιου στο σημείο συγκέντρωσης δεν είναι σημείο αλλά μια επιφάνεια. Για παράδειγμα σε παραβολικό κάτοπτρο η ακτίνα του είδωλου του ήλιου στο εστιακό σημείο είναι ίση με το γινόμενο της εστιακής απόστασης επί το γωνιακό άνοιγμα του ήλιου. Αν χρησιμοποιηθεί κάτοπτρο με μεγάλη εστιακή απόσταση (το οποίο κατασκευάζεται ποιο εύκολα από ένα με μικρή εστιακή απόσταση) τότε προφανώς παράγει μεγάλο ηλιακό είδωλο και προφανώς χρειάζεται και οπτική ίνα αντίστοιχης διαμέτρου.
2. Το μέγεθος του ειδώλου του ήλιου θα πρέπει να είναι μικρότερο από την διατομή της οπτικής ίνας έτσι ώστε όλη η ενέργεια να συλλέγεται από την ίνα.



Σχήμα 7.103: Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας σε οπτική ίνα μέσω ανάκλασης σε παραβολή επιφάνεια.

3. Αν η διάμετρος της ίνας μεγαλώσει τότε υπάρχουν προβλήματα με την κίνηση του κατόπτρου αφού αυτό θα πρέπει να παρακολουθεί τον ήλιο.
4. Χρήση κατόπτρου μεγάλης συγκέντρωσης απαιτεί και σύστημα για την παρακολούθηση του ήλιου εξαιρετικής ακρίβειας.
5. Το υλικό και η κατασκευή του κατόπτρου είναι καθοριστικής σημασίας για την απόδοση. Κάτοπτρο γυάλινο αυξάνει το κόστος αφού λόγω βάρους αυξάνεται και το κόστος του συστήματος παρακολούθησης του ήλιου.



Σχήμα 7.104: Αρχή λειτουργίας συστήματος PARANS (Χρήση εικόνας μετά από άδεια, <http://www.parans.com/eng/>)

Ενδιαφέρουσα επίσης τεχνολογία είναι η δημιουργία οπτικών ινών με υγρό πυρήνα (liquid fiber optic). Περιβλήμα φθοριούχο πολυμερές πληρώνεται με υγρό με μεγάλο δείκτη διάθλασης (>1.4). Πολλές φορές υπάρχει και εσωτερική επίστρωση στο περίβλημα από Teflon. Η συγκεκριμένη τεχνολογία περιορίζει σημαντικά τις απώλειες από τη δημιουργία δεσμών οπτικών ινών και σύμφωνα με μετρήσεις έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα στο ορατό τμήμα από τις γυάλινες. Η διάμετρος είναι αρκετά μεγαλύτερη των τυπικών οπτικών ινών (π.χ.

10 mm). Ένα παράδειγμα είναι το σύστημα Universal Fiber Optic¹⁴³ που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα :

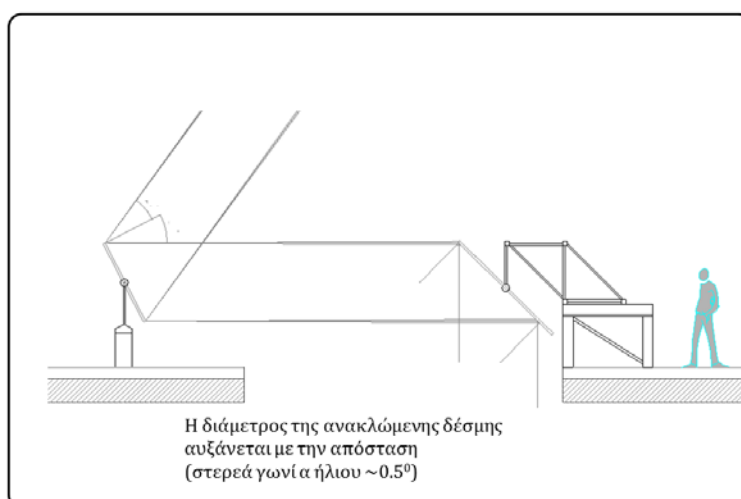


Σχήμα 7.105: Μεταφορά φυσικού φωτισμού με υγρή οπτική ίνα.

Στο συγκεκριμένο σύστημα, ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται με φακό Fresnel (σύστημα SOLUX) στην άκρη από την υγρή οπτική ίνα αφού πρώτα περάσει από φίλτρο νερού. Στην άλλη άκρη συνδέεται μια φύλλο Prismex για διάχυση της φωτεινής ροής. Η ιδέα της ανάπτυξης του συστήματος είναι να αποτελέσει παράδειγμα χρήσης «φωτιστικού» δώματος (κατα το μηχανολογικό δώμα!). Σε αυτό θα είναι συγκεντρωμένες οι τεχνητές πηγές αλλά και κάποιο σύστημα εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού. Η διανομή στο κτήριο θα γίνεται με δίκτυο οπτικών ινών (ενδιαφέρον πρόβλημα είναι η δημιουργία διακτοπτών για το σύστημα).

Ηλιοστάτες

Μεταφορά ηλιακού φωτός μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση κατόπτρων (κινούμενων ανάλογα με τη θέση του ήλιου, ηλιοστάτες) όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 7.106: Λειτουργία ηλιοστάτη

¹⁴³ Universal Fiber Optic Project, 2003, JOULE programme (ERK6-CT-99900011),

Γενικά και για εφαρμογές όπως η σκίαση θεωρούμε ότι οι ακτίνες του ηλιακού φωτός είναι παράλληλες χωρίς η ακρίβεια των υπολογισμών να επηρεάζεται σημαντικά. Όμως όταν πρόκειται να μεταφέρουμε φως μέσω ανακλάσεων σε μεγάλη απόσταση, το γεγονός ότι οι ακτίνες εκπέμπονται από σώμα (ήλιος) κάποιων διαστάσεων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Έτσι το σφάλμα στους υπολογισμούς λόγω του μεγέθους του ηλιακού δίσκου είναι ανάλογο με την γωνία με την οποία «φαίνεται» ο ηλιακός δίσκος από κάποιο σημείο στην επιφάνεια της γής δηλ. $2 \times \varepsilon$ ($\varepsilon=0.26^\circ$). Όταν αρχίζει η σχεδίαση ενός συστήματος μεταφοράς φωτισμού με ηλιοστάτη θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η γωνία στην οποία θα «περιέχεται» το φως μεταβάλλεται σε κάθε ανάκλαση. Οι λόγοι αυτής της μεταβολής είναι:

- Μικροανωμαλίες της επιφάνειας του κατόπτρου ($2 \times \delta$)
- Σφάλματα καμπυλότητας ($2 \times \beta$)
- Σφάλματα ευθυγράμμισης (σχετίζονται είτε με την ευθυγράμμιση κατόπτρων μεταξύ τους είτε με τον ήλιο) ($2 \times \alpha$)

Έτσι μετά από κάθε ανάκλαση, η απόκλιση της δέσμης του φωτός καθορίζεται από την στερεά γωνία :

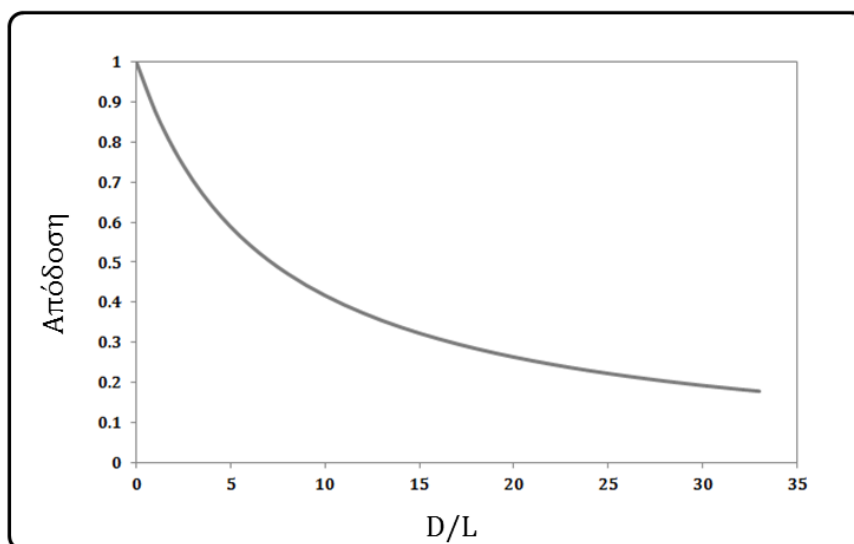
$$2 \times \omega = 2 \times (0.26 + 2\alpha + \beta + \delta) \quad (7.16)$$

Σήμερα μπορούν να επιτευχθούν τιμές της τάξης

$$\delta < 0.1^\circ, \beta 0.1^\circ - 0.7^\circ, \alpha 0.5^\circ - 0.7^\circ \quad (7.17)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η απόδοση της μεταφοράς (ενέργεια που προσλαμβάνεται δια την ενέργεια που εκπέμπεται) της φωτεινής ενέργειας από ένα επίπεδο καθρέπτη σε κάποιον άλλο χωρίς την μεσολάβηση οδηγού συστήματος. Οι καθρέπτες θεωρούνται κυκλικού σχήματος διαμέτρου L ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι D .

Είναι προφανές ότι κακής ποιότητας καθρέπτες ή σφάλματα ευθυγράμμισης (δηλ. μεγάλη γωνία $2 \times \omega$) προκαλούν σημαντική ελάττωση της φωτεινής ροής που μεταδίδεται. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η απόδοση συστήματος με $2 \times \omega$ ίση με $2 \times 4^\circ$.

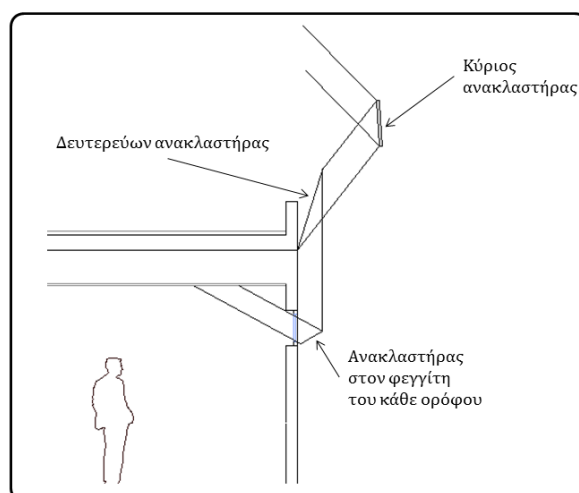


Σχήμα 7.107: Μεταβολή στο ποσοστό που μπορεί να εκμεταλλευθεί ο δευτερεύων ανακλαστήρας σε σχέση με την απόσταση του από τον πρωτεύοντα.

Πρόσφατα σε μία προσπάθεια να ελαττωθεί το βάρος των καθρεπτών που χρησιμοποιούνται (αφού προς το παρόν η καλής ποιότητας είναι γυάλινοι) χρησιμοποιήθηκαν μεμβράνες υψηλής ανακλαστικότητας. Αυτές αν και παρουσιάζουν εξαιρετικές οπτικές ιδιότητες (όσον αφορά την ανακλαστικότητα) εμφανίζουν προβλήματα με την διάρκεια ζωής τους. Το κάτοπτρο σχηματίζεται με το τέντωμα της μεμβράνης γύρω από κυψελωτή κατασκευή. Επειδή αυτή τη στιγμή αυτά τα υλικά αποτελούν τεχνολογία αιχμής η έμφαση έχει δοθεί στην επίτευξη (με τη σειρά που παρουσιάζονται) των παρακάτω στόχων:

- Αύξηση ανακλαστικότητας
- Αύξηση διάρκειας ζωής
- Ελάττωση κόστους

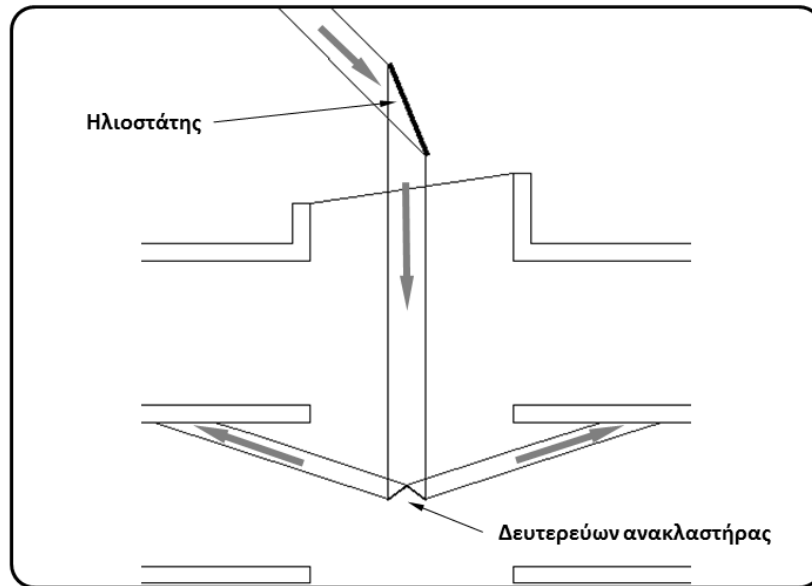
Η διαχείριση του αναλώμενου φωτός στη συνέχεια μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Από τις πρώτες ενδιαφέρουσες ιδέες ήταν η με τη βοήθεια δευτερευόντων ανακλαστήρων ο φωτισμός της οροφής γραφειακών χώρων.



Σχήμα 7.108: Ενδιαφέρουσα προσέγγιση για μεταφορά φυσικού φωτισμού από την βορεινή πρόσοψη¹⁴⁴.

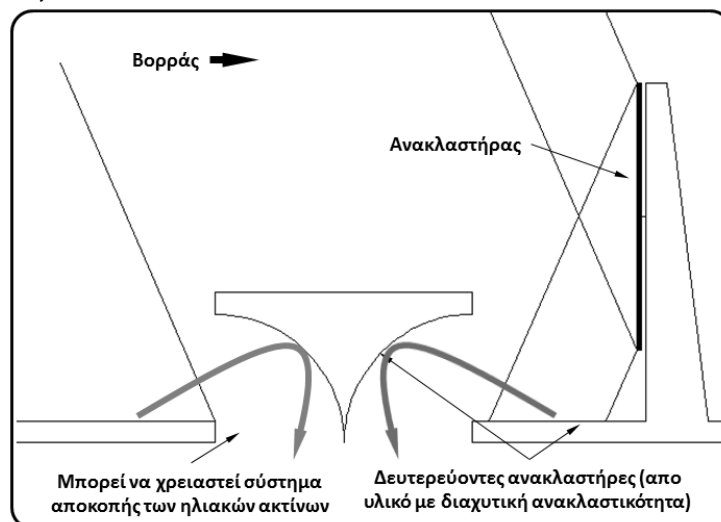
Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι διαχείρισης του άμεσου ηλιακού φωτισμού. Η βασική προσέγγιση είναι η χρήση ηλιοστάτη έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια σταθερή δέσμη. Με τη χρήση δευτερευόντων ανακλαστήρων φωτεινή ροή μπορεί να κατευθυνθεί σε γειτονικούς χώρους.

¹⁴⁴ M. Smart & J. Ballinger, "Tracking mirror beam sunlighting for deep interior spaces", Solar Energy, Vol. 30, No. 6, pp. 527-536, 1983



Σχήμα 7.109: Αρχή λειτουργίας συστήματος μεταφοράς άμεσου ηλιακού φωτισμού.

Φυσικά και χωρίς την χρήση ηλιοστάτη, ανακλαστήρες που βρίσκονται απέναντι από βόρεια ανοίγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης σαν παροχείς φωτισμού.



Σχήμα 7.110: Χρήση σταθερού ανακλαστήρα για παροχή φωτισμού σε βορεινά ανοίγματα¹⁴⁵.

Ένα από τα πρώτα συστήματα μεταφοράς φωτισμού είναι και το SunCentral System (<http://www.suncentralinc.com>). Εδώ υπάρχει στην πρόσοψη ένα σύστημα (Sunbeamer) που ανακατευθύνει τις ηλιακές ακτίνες σε ένα ανακλαστικό ράφι (Sunshade) που με τη σειρά του κατευθύνει τις συγκεκριμένες πλέον ακτίνες σε ένα μικρών διαστάσεων άνοιγμα (μέσω ειδικά σχεδιασμένου οπτικού συστήματος (Sunsprandrel)) ώστε να είναι δυνατή η διανομή του στο εσωτερικό του κτηρίου. Η λειτουργία του συστήματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

¹⁴⁵ Patrick Cunningham, Paul Zaferiou, Kera Lagios, «A case study in reflective daylighting», Perkins+Will Research Journal, Vol 06.01, 2014



Σχήμα 7.111: Αρχή λειτουργίας του Suncentral System (Χρήση εικόνας μετά από άδεια)

Παρά τις δυσκολίες η μεταφορά φυσικού φωτισμού αποτελεί πρόκληση και είναι σίγουρα μια τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο στο μέλλον.

8.ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην αρχή του βιβλίου η χρήση φυσικού φωτισμού επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη λειτουργική διαρύθμιση των χώρων, τη διάθεση των χρηστών τους καθώς και την κατανάλωση ενέργειας.

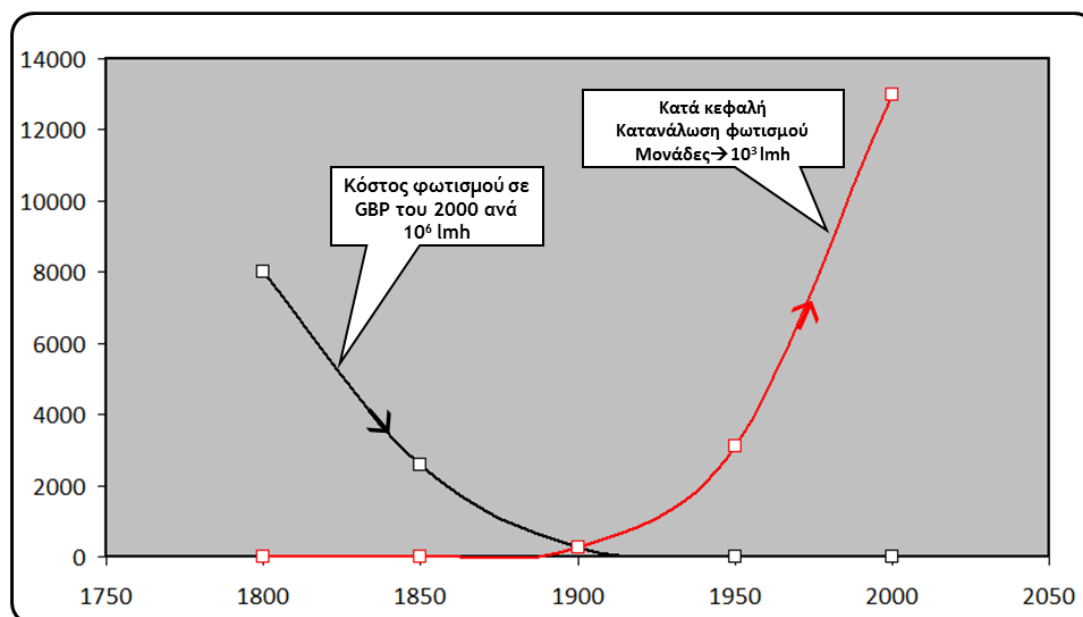
Λόγω της διαθέσιμης πλέον τεχνολογίας (πηγές φωτισμού αλλά και συστήματα ελέγχου) χαρακτηριστικό της εποχής είναι η προσαρμογή των συνιστώμενων επιπέδων φωτισμού σε τιμές απαραίτητες για την εκτέλεση κάποιας εργασίας αλλά και η προσπάθεια για μεγιστοποίηση της χρήσης του φυσικού φωτισμού. Δεν είναι μόνο λειτουργικοί οι λόγοι. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η σπουδαιότητα του φυσικού φωτισμού ιδίως σε εργασιακούς χώρους έγκειται στο γεγονός ότι συνοδεύεται με τη δυνατότητα της θέας γιατί με αυτό τον τρόπο αποκτά περιεχόμενο (επίδραση σε βιολογικό και ψυχολογικό επίπεδο) η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον.

Η κατανάλωση για φωτισμό αντιπροσωπεύει περίπου το 19% της συνολικής παραγωγής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο¹⁴⁶. Αν και υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά στην κατανάλωση φωτισμού ανάμεσα στις χώρες το πλανήτη (π.χ. οι χώρες με πρόσβαση σε ηλεκτρισμό εμφανίζουν 500 φορές μεγαλύτερη κατανάλωση από τις υπόλοιπες¹⁴⁷), η κατα κεφαλή κατανάλωση αυξάνεται συνεχώς με ρυθμό ~ 1.8% σε ετήσια βάση για τις χώρες της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας (IEA). Ο ρυθμός αυτός είναι μικρότερος από αυτόν που είχε παρατηρηθεί την προηγούμενη δεκαετία και ίσως να οφείλεται πια σε κάποιο κορεσμό της ζήτησης. Στις αναπτυσσόμενες όμως χώρες αναμένεται ισχυρή αύξηση λόγω της αύξησης των επιπέδων φωτισμού σε συνδυασμό με την αύξηση του αριθμού των κτηρίων. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα το οποίο εμφανίζει το κόστος του φωτισμού μαζί με την κατανάλωση φωτισμού (μονάδες φωτεινής ροής επί χρόνο δηλ. $\text{lumen}\cdot\text{h}=\text{lmh}$). Όπως φαίνεται το κόστος μειώνεται συνεχώς (συνδυασμός τιμών ηλεκτρισμού και αποδοτικότερης τεχνολογίας) ενώ οι απαιτήσεις για φωτισμό αυξάνονται (δηλ. μια κλασική περίπτωση rebound effect)¹⁴⁸.

¹⁴⁶ International Energy Agency, 2006, Light's Labour's Cost, IEA Publ.

¹⁴⁷ L. Halonen, E. Tetri, P. Bhusal (Ed), 2010, Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings, Aalto University, School of Science and Technology, ISBN 978-952-60-3229-0.

¹⁴⁸ Roger Fouquet and Peter J.G. Pearson, 2011, The Long Run Demand for Lighting: Elasticities and Rebound Effects in Different Phases of Economic Development, Basque Centre for Climate Change, BC3 Working paper series.



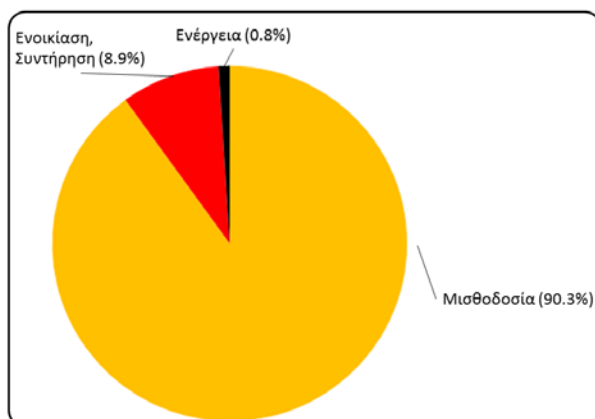
Σχήμα 8.1: Χρονική εξέλιξη του κόστους φωτισμού σε λίρες Αγγλίας (GBP 2000) ανά 10^6 lmh σε συνδυασμό με την κατά κεφαλή κατανάλωση φωτισμού (οι μονάδες εδώ είναι 10^3 lmh)

Μια συζήτηση η οποία συνεχίζεται σήμερα, σχετίζεται με τις απαιτήσεις για ενεργειακή κατανάλωση που αφορούν το σύστημα φωτισμού. Στην Ευρώπη ο κανονισμός για τις ενεργειακές απαιτήσεις του φωτισμού (EN 15193:2007: Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting) ο οποίος βρίσκεται και σε διαδικασία αλλαγής του, προτείνει τον διαχωρισμό των κτηρίων γραφείων με βάση την εγκατεστημένη ισχύ για φωτισμό, σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες σχετίζονται με την ικανοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων σχεδιασμού (ας τις ονομάσουμε κλάσεις ποιότητας). Συσχετίζει δε την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος με ποιοτικότερο σχεδιασμό. Οι τιμές της εγκατεστημένης ισχύος είναι 15, 20 και 25 W/m² αντίστοιχα. Στην Ελλάδα, ο Κανονισμός για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα Κτηρίων (KENAK¹⁴⁹) υιοθετεί την τιμή των 16 W/m² για το κτήριο αναφοράς (γραφεία) και για 500 lux ενώ στο πρότυπο ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013 -- Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings στις ΗΠΑ, προτείνεται –για την ίδια κατηγορία κτηρίων- η τιμή των 10.9 W/m² (whole Building Method).

Η μείωση της κατανάλωσης για φωτισμό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μείωση της εγκατεστημένης ισχύος (καλύτερος σχεδιασμός με π.χ. διαχωρισμό γενικού-τοπικού φωτισμού, υιοθέτηση αποδοτικότερης τεχνολογίας) είτε με μείωση του χρόνου λειτουργίας (αισθητήρες παρουσίας/φωτισμού, προσωπική ευαισθητοποίηση). Γενικά το θέμα του σχεδιασμού επανέρχεται επιτακτικά λόγω της σημαντικής επίδρασης στην ευεξία αλλά και παραγωγικότητα και προφανώς θα πρέπει να υπάρξει μια ισορροπία με την πιεστική ανάγκη για

¹⁴⁹ ΤΕΕ, 2010, ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010, «Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης».

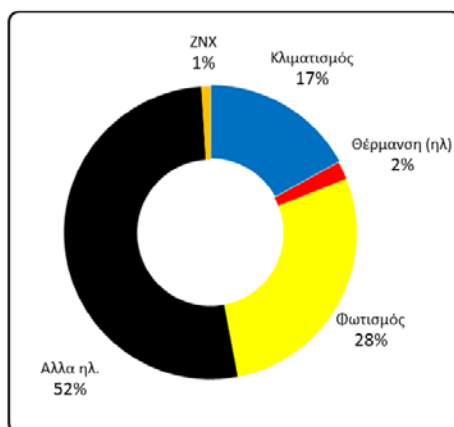
μείωση της κατανάλωσης. Το κόστος λειτουργίας μιας επιχείρησης κατανέμεται ως εξής¹⁵⁰ :



Σχήμα 8.2: Κατανομή κόστους λειτουργίας κτηρίων επιχειρήσεων.

Είναι φανερό ότι όποια σχεδιαστική επιλογή επηρεάζει την παραγωγικότητα μεταφράζεται σε μεγαλύτερο κόστος από αυτό που προκύπτει από την εξοικονόμηση ενέργειας.

Σύμφωνα με το Σχέδιο για την Ενεργειακή Απόδοση κατά την πενταετία 2001-2005 (2) στον οικιακό τομέα ο φωτισμός αντιστοιχεί σε 14% της τελικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενώ στα δημόσια κτήρια γραφείων στο 27%. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή ανά χρήση της τελικής ηλεκτρικής ενεργειακής κατανάλωσης σε κτήρια γραφείων του δημόσιου τομέα.

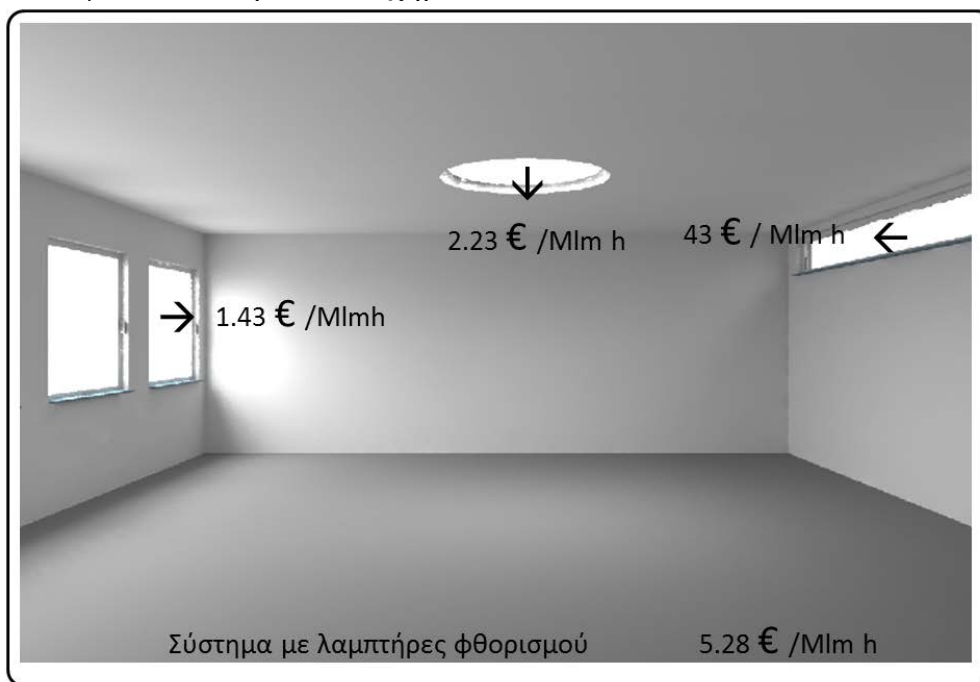


Σχήμα 8.3: Κατανομή ανά χρήση της τελικής ηλεκτρικής ενεργειακής κατανάλωσης σε κτήρια υπηρεσιών του δημόσιου τομέα.

Με δεδομένα τα προαναφερθέντα ποσοστά η χρήση του φυσικού φωτισμού, καθίσταται ακρογωνιαίος λίθος της στρατηγικής για εξοικονόμηση ενέργειας.

¹⁵⁰ Terrapin Bright Green LLC, 2012, The economics of biophilia: Why designing with nature in mind makes financial sense, http://www.interfacereconnect.com/wp-content/uploads/2012/11/The-Economics-of-Biophilia_Terrapin-Bright-Green-2012e_1.pdf.

Ο φυσικός φωτισμός μπορεί να «χρησιμοποιηθεί» για περίπου 4000 ώρες ετησίως. Σε παγκόσμιο επίπεδο (αλλά όχι σε όλες τις χώρες) η αλλαγή της ώρας σε θερινή προσφέρει 210 ώρες/έτος με φυσικό φωτισμό το απόγευμα με την εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας από το μέτρο να μην είναι προφανής λόγω αντικρουόμενων αναφορών. Η χρήση του φυσικού φωτισμού είναι ανταγωνιστική¹⁵¹ του ηλεκτροφωτισμού ακόμη και σε επίπεδο κόστους όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.4: Κόστος φωτισμού ανα εκατομμύριο lmh.

Σήμερα όλα τα συστήματα περιβαλλοντικής (έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους) και ενεργειακής αξιολόγησης των κτιρίων (π.χ. LEED, BREEAM) περιλαμβάνουν σχεδιαστικές προτροπές όχι μόνο για την αύξηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού (μέχρι κάποιο όριο) αλλά για την ταυτόχρονη εξασφάλιση της οπτικής επαφής της πλειοψηφίας των χρηστών του χώρου με το εξωτερικό περιβάλλον. Παραδοσιακά η μεγιστοποίηση των χώρων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν φυσικό φως λύνεται με την επιλογή της κατάλληλης κάτοψης, με κατάλληλο σχεδιασμό των ανοιγμάτων της πρόσοψης και τροποποίηση των διαστάσεων του εσωτερικού. Όπως έχει αναφερθεί οι απαιτήσεις που απαιτούνται και σχετίζονται με τη συμπεριφορά της πρόσοψης στο φυσικό φωτισμό είναι :

- η αύξηση επιπέδων φωτισμού στο χώρο χωρίς όμως υπέρμετρη αύξηση των ηλιακών κερδών την περίοδο ψύξης.
- η αύξηση των επιπέδων φωτισμού σε περιοχές μακριά από τα ανοίγματα
- η ελαχιστοποίηση φαινομένων θάμβωσης
- και η δυνατότητα θέας

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εστιάζεται στην πιθανή εξοικονόμηση από τον περιορισμό της χρήσης του συστήματος ηλεκτροφωτισμού λόγω υιοθέτησης τεχνολογιών ελέγχου που μπορούν να περιορίσουν είτε το χρονικό διάστημα

¹⁵¹ M. Fontoynt, 2009, "Which Daylight in 2050?", D&A 12, VELUX.

λειτουργίας του είτε/και να ρυθμίσουν την φωτεινή ροή από αυτό ανάλογα με τα επίπεδα φυσικού φωτισμού στον χώρο.

Από τα προαναφερθέντα είναι προφανές ότι η τυχόν υιοθέτηση συστημάτων ελέγχου έχει σαν σκοπό τόσο την επίτευξη εξοικονόμησης (μείωση της ηλ. κατανάλωσης για φωτισμό, μείωση φορτίων αιχμής, μείωση κατανάλωσης συστήματος ψύξης) όσο και την ικανοποίηση των χρηστών του χώρου αφού επηρεάζονται άμεσα από την «ποιότητα φωτισμού» .

Η παροχή φωτισμού θα πρέπει να γίνεται:

- Όταν χρειάζεται και
- στην « ποσότητα» που χρειάζεται (και επειδή σήμερα η τεχνολογία είναι διαθέσιμη θα μπορούσε να προστεθεί και η φασματική σύσταση).

Η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας ενός συστήματος ελέγχου του φωτισμού καθώς και η βελτιστοποίηση του λόγου κόστους/ωφέλειας μπορεί να επιτευχθεί αν προβλεφθεί η εγκατάσταση κατά τη διάρκεια του αρχικού σχεδιασμού του κτιριακού κελύφους.

Υπάρχουν αρκετές στρατηγικές ελέγχου οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν αυτόματα ή/και χειροκίνητα ενώ η ρύθμιση της φωτεινής ροής των φωτιστικών μπορεί να είναι συνεχής ή σε βαθμίδες ανάλογα φυσικά και με το είδος του φωτιστικού (λαμπτήρες και ρυθμιστικές διατάξεις) που θα επιλεγεί ή υπάρχει.

Η χειροκίνητη λειτουργία βασίζεται στην πιο απλή μορφή της σε διακόπτες με την βοήθεια των οποίων μπορεί να ρυθμίζονται τα επίπεδα φωτισμού σε κάποια ζώνη. Ζώνη ονομάζεται η περιοχή του κτιρίου που εφαρμόζεται κάποια στρατηγική ελέγχου και εμφανίζει σχετικά ομοιόμορφα χαρακτηριστικά λειτουργίας / δραστηριοτήτων / φυσικού φωτισμού / συστήματος ηλεκτροφωτισμού. Με κυριώτερο πλεονέκτημα την απλότητα, η ρύθμιση των επιπέδων φωτισμού με τη βοήθεια διακοπών δεν εμφανίζει ευελιξία όταν παρουσιασθεί η ανάγκη να μεταβληθούν οι δραστηριότητες ούτε όταν γίνουν αλλαγές που αφορούν τη χρήση. Ανάλογα με τον αριθμό λαμπτήρων στα φωτιστικά οι διακόπτες μπορεί να ενεργοποιούν ένα μέρος αυτών επιτυγχάνοντας έτσι μεταβολή στα επίπεδα φωτισμού αν υποθέσουμε 0%-50%-100% στην περίπτωση που το φωτιστικό έχει δύο λαμπτήρες. Φυσικά η έναυση και σβέση των φωτιστικών της ζώνης με την προαναφερθείσα στρατηγική μπορεί να γίνει και αυτόματα με την βοήθεια ηλεκτρονόμων οι οποίοι μπορεί να λαμβάνουν εντολές από ένα ευρύτερο σύστημα ελέγχου (βλ. στη συνέχεια).

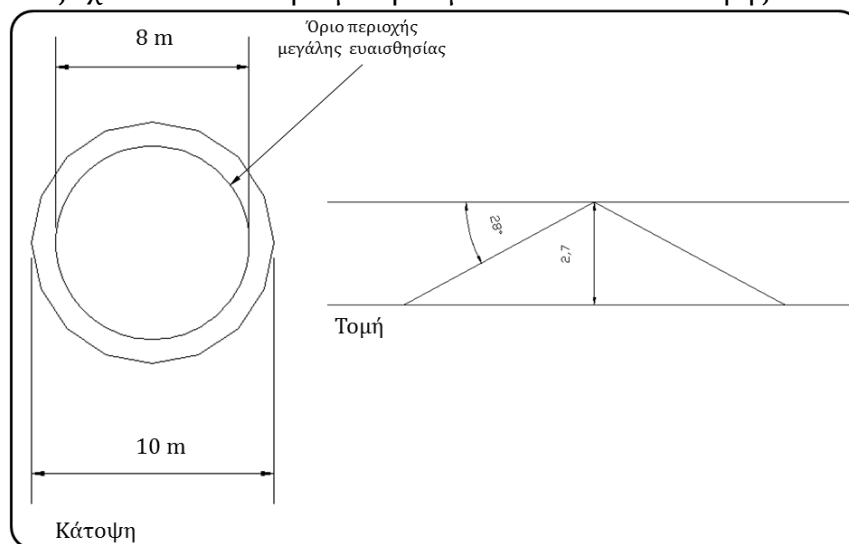
Οι στρατηγικές ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφορούν α)την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας β)την δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος φωτισμού σε μελλοντικές απαιτήσεις και γ)την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών. Είναι (χωρίς φυσικά να αποκλείονται πιθανοί συνδυασμοί μεταξύ τους) δε οι παρακάτω :

1. **Χρονοπρογραμματισμός.** Εξαιρετικά αποδοτικός σε περιπτώσεις που το ωράριο λειτουργίας είναι αυστηρά καθορισμένο.
2. **Έλεγχος με χρήση αισθητήρων παρουσίας.** Με τοποθέτηση αισθητήρων παρουσίας ενεργοποιείται ένας αριθμός φωτιστικών. Υπάρχει η δυνατότητα η έναυση και η σβέση να πραγματοποιούνται αυτόματα καθώς και να ρυθμίζεται και ο χρόνος που το σύστημα

αναμένει πριν απενεργοποιήσει το σύστημα φωτισμού. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με τη βοήθεια αισθητήρα ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί στην οροφή, σε πλευρικό τοίχο ή και σε τοπικά σε κάθε γραφείο και να ανιχνεύει παρουσία κυρίως με την βοήθεια υπέρυθρης ακτινοβολίας (PIR), υπερήχων ή και με συνδυασμό αυτών (περιορισμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ακουστικοί αισθητήρες). Οι αισθητήρες που βασίζονται στην ανίχνευση (παθητικά) υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι σχετικά μικρού κόστους ενώ δεν θα πρέπει να υπάρχουν ανάμεσα στον αισθητήρα και την κίνηση ενδιάμεσα εμπόδια. Αντίθετα αυτοί που χρησιμοποιούν υπερήχους, έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν κίνηση ακόμη και όταν υπάρχουν εμπόδια. Οι τελευταίοι είναι κατάλληλοι για πλήρη κάλυψη ανοικτών χώρων, αποθηκών κλπ. Να ληφθεί υπόψη ότι όταν τοποθετείται ένας αριθμός αισθητήρων υπερήχων σε κάποιο χώρο θα πρέπει να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να επηρεάζονται μεταξύ τους.

Κύρια χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοσή τους και τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού είναι:

- Το πεδίο κάλυψης το οποίο καθορίζει και τον χώρο (δηλ. τον αριθμό των φωτιστικών) ο οποίος ελέγχεται από τον αισθητήρα. Τυπικό διάγραμμα κάλυψης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα ενώ κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού οι περιοχές ελέγχου σχεδιάζονται επί των σχεδίων με την βοήθεια είτε κατάλληλου λογισμικού είτε με χρήση διαφανειών (σε κάτοψη και τομή) οι οποίες έχουν υπο καθορισμένη κλίματα το πεδίο κάλυψης.



Σχήμα 8.5: Πεδίο κάλυψης αισθητήρα PIR οροφής σε κάτοψη και τομή

Θα πρέπει να προσεχθούν «τυφλές» περιοχές που ενδεχομένως να δημιουργηθούν λόγω επίπλων, διαχωριστικών κλπ.

- Η ευαισθησία του. Αισθητήρες που δεν είναι αρκετά ευαίσθητοι π.χ. να ανιχνεύσουν κίνηση χεριού από μικρή απόσταση πιθανόν να απενεργοποιούν το σύστημα φωτισμού όταν ο χρήστης μένει

σχετικά ακίνητος κάποιο χρονικό διάστημα. Ανάλογα με τον κατασκευαστή η ευαισθησία των αισθητήρων μπορεί να παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση. Γενικά οι αισθητήρες PIR είναι ικανοί να ανιχνεύουν κίνηση χεριού σε απόσταση ~3.5 μ, κίνηση κορμού ~7 μ. και κίνηση ολόκληρου του σώματος σε απόσταση ~14 μ. Οι αισθητήρες υπερήχων έχουν γενικά μεγαλύτερη ευαισθησία ανιχνεύοντας κινήσεις χεριού σε απόσταση ~8 μ.

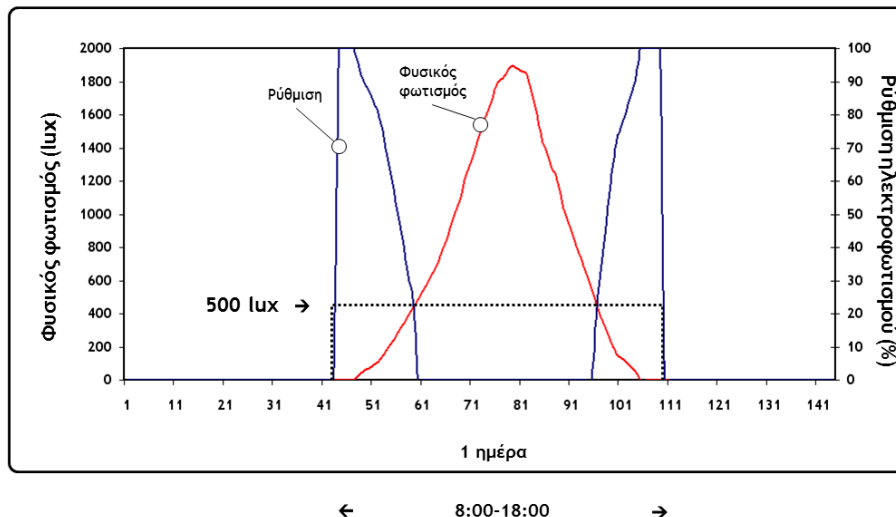
Οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετούνται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και με τέτοιο τρόπο ώστε να μην ενεργοποιούνται εξαιτίας π.χ. γειννίας τους με στόμια αερισμού, ανεμιστήρες οροφής ή λόγω του γεγονότος ανίχνευσης κίνησης εκτός του χώρου που έχουν σχεδιαστεί να καλύπτουν (π.χ. κίνηση ανθρώπων στο διάδρομο). Οι αισθητήρες μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να λειτουργούν ως εξής:

Auto ON / Auto OFF	Ο αισθητήρας προκαλεί έναυση/σβέση των φωτιστικών που ελέγχει αυτόματα
Manual ON /Auto OFF	Τα φωτιστικά επανεργοποιούνται όταν είναι σβηστά χειροκίνητα και όχι αυτόματα. Ο συγκεκριμένος τρόπος εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια.
Auto ON / Manual OFF	Αυτόματη έναυση , η σβέση χειροκίνητα

Πίνακας 8.1: Τρόποι ρύθμισης λειτουργίας αισθητήρα παρουσίας

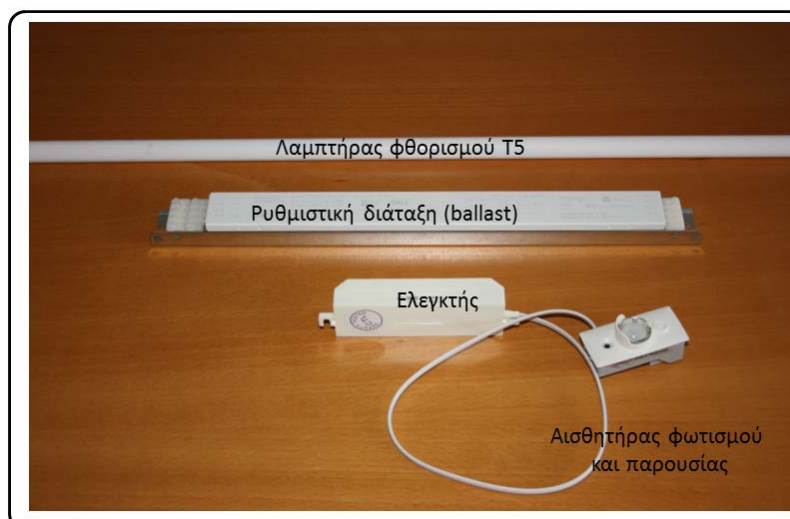
Όπως έχει ήδη αναφερθεί το το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην ανίχνευση ή μη κίνησης και στην σβέση μπορεί να ρυθμιστεί επι τόπου. Πρέπει να τονισθεί σε αυτό το σημείο ότι η ρύθμιση του χρόνου απόκρισης είναι καθοριστικής σημασίας για την διάρκεια ζωής των λαμπτήρων (π.χ. φθορισμού) αφού μια μεγάλη συχνότητα έναυσης-σβέσης μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους (σημ. Η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων εκτιμάται με συγκεκριμένη συχνότητα και η απόκλιση από αυτή είτε αυξάνει (μικρότερη συχνότητα) είτε μειώνει (μεγαλύτερη συχνότητα) την διάρκεια ζωής).

- 3. Έλεγχος με χρήση αισθητήρων φωτισμού.** Οι αισθητήρες φωτισμού χρησιμοποιούνται σε ζώνες που υπάρχει επάρκεια φυσικού φωτισμού και είτε λειτουργούν σαν διακόπτες (συνήθως σε ζώνες με αυξημένα επίπεδα φυσικού φωτισμού κατά τη διάρκεια λειτουργίας όπως π.χ. διάδρομοι πλησίον πρόσοψης) είτε μπορούν να ρυθμίζουν (dimming) τα επίπεδα φωτισμού ανάλογα με την φωτεινή ροή που εισέρχεται από τα ανοίγματα.



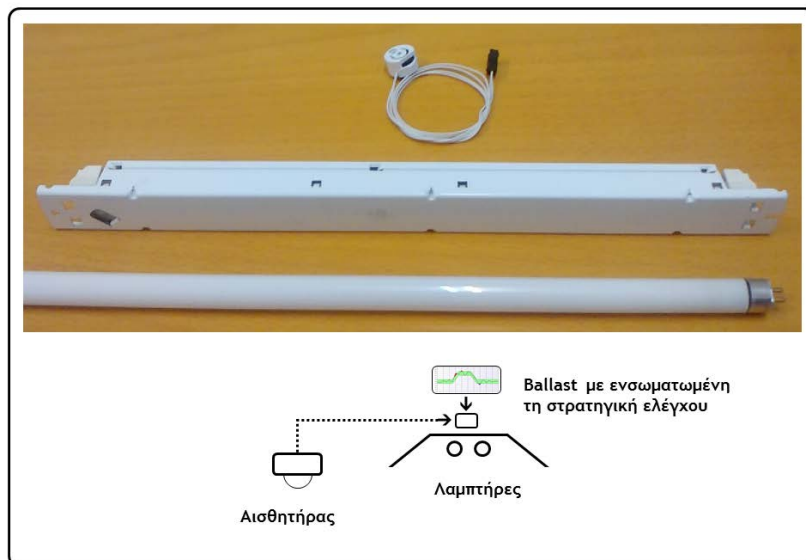
Σχήμα 8.6: Ο λόγος χρήσης κάποιου συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής με αισθητήρα φωτισμού είναι να εξοικονομεί ενέργεια όταν υπάρχει διαθέσιμος φυσικός φωτισμός. Στο σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικώς η ιδανική λειτουργία ενός συστήματος.

Ο σκοπός της υιοθέτησης της συγκεκριμένης στρατηγικής ελέγχου είναι να διατηρηθούν τα επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας σταθερά (όσο το δυνατόν) με την ελάχιστη χρήση του συστήματος ηλεκτροφωτισμού. Το σύστημα αποτελείται συνήθως από ένα αισθητήρα, μια μονάδα ελέγχου (controller) στην οποία συνδέεται ο αισθητήρας και μια ρυθμιστική διάταξη (ballast) η οποία λαμβάνοντας σήμα από την μονάδα ελέγχου ρυθμίζει τη φωτεινή ροή των λαμπτήρων. Ο έλεγχος πραγματοποιείται είτε αναλογικά (1-10 Volt) είτε ψηφιακά (σε μικρή/μέτρια κλίμακα εφαρμογής π.χ. DALI ή μεγαλύτερη π.χ. KNX/LON). Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.7.: Επιμέρους τμήματα συστήματος ρύθμισης φωτεινής ροής (δεν περιλαμβάνεται διακόπτης).

Υπάρχουν και διαφοροποιήσεις από την προαναφερθείσα διάταξη με ενσωμάτωση συνήθως της μονάδας ελέγχου στη ρυθμιστική διάταξη. Με αυτό τον τρόπο κάθε φωτιστικό μπορεί να ελέγχεται ανεξάρτητα. Συνήθως προορίζεται για χρήση σε μεμονωμένα φωτιστικά κοντά σε ανοίγματα.



Σχήμα 8.8: Απλό σύστημα ρύθμισης στο οποίο ο ελεγκτής συμπεριλαμβάνεται στην διάταξη ρύθμισης (ballast).

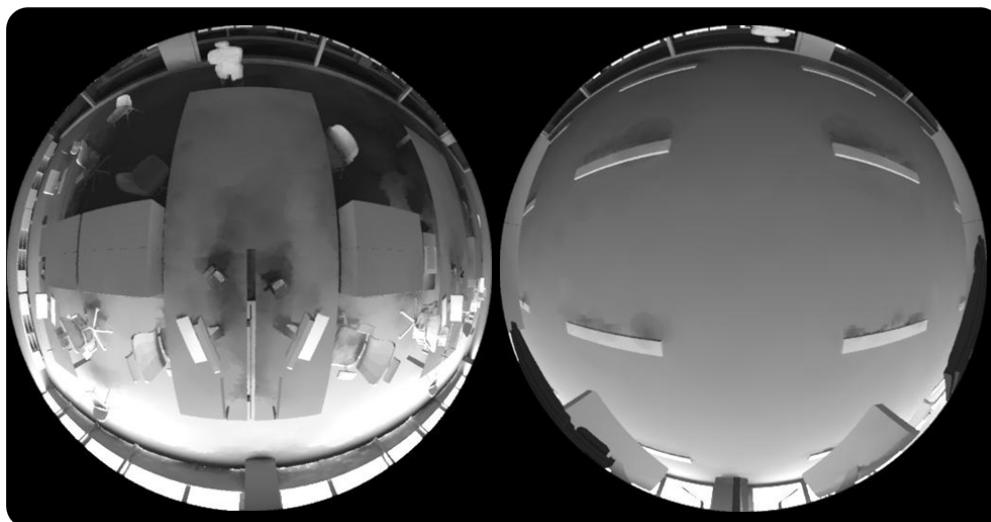
Ο αισθητήρας τοποθετείται συνήθως στην οροφή (ή στο εξωτερικό του κτιρίου) ώστε να μην επηρεάζεται από τυχόν δραστηριότητες στην επιφάνεια εργασίας και να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα σύνδεσης του με την μονάδα ελέγχου.

Όπως έχει αναφερθεί γενικά ένας αισθητήρας ελέγχει μια περιοχή στην οποία τα φωτιστικά ρυθμίζονται με τον ίδιο τρόπο (αν και σήμερα αυτό μπορεί να προγραμματισθεί ώστε να μην ρυθμίζονται με τον ίδιο τρόπο δηλ. τα πλέον απομακρυσμένα από το άνοιγμα φωτιστικά να εκπέμπουν περισσότερη φωτεινή ροή). Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα –τα οποία προφανώς επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος- είναι :

- Το πεδίο θέασης
- Η φασματική απόκριση
- η ταχύτητα απόκρισης
- το είδος του σήματος που παράγει

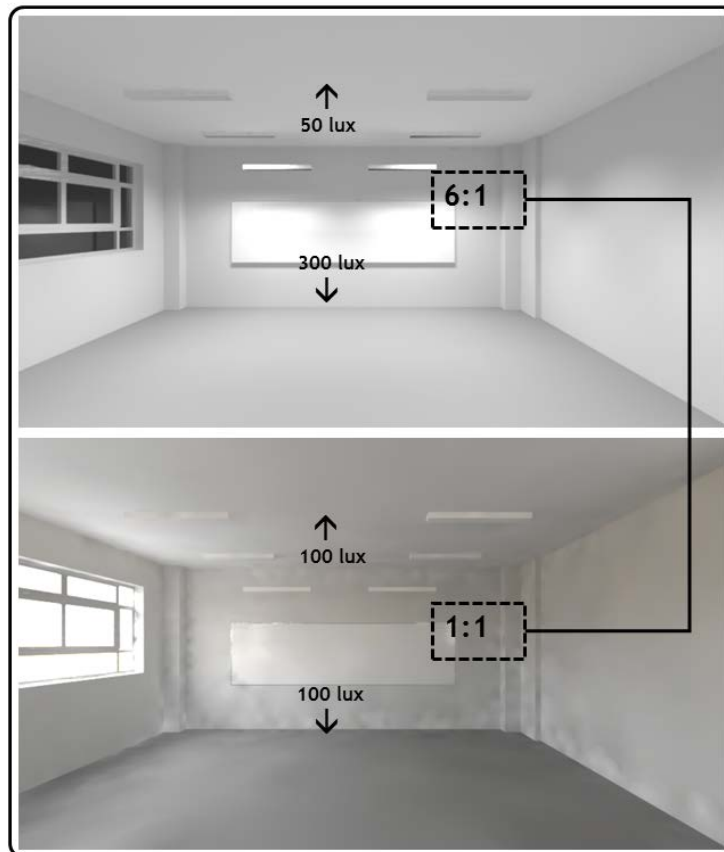
Ένα σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι συνήθως οι κατασκευαστές των συστημάτων συνήθως δίνουν συνήθως πληροφορίες που αφορούν μόνο το πεδίο θέασης των αισθητήρων και όχι τον αλγόριθμο ελέγχου (τελευταία άρχισε να αλλάζει η κατάσταση). Ο τελευταίος έχει καθοριστική σημασία για την απόδοση του συστήματος και θα πρέπει -κατά κάποιο τρόπο- να διορθώνει το γεγονός της τοποθέτησης του αισθητήρα στην οροφή. Και αυτό γιατί : ο λόγος μεταξύ της τιμής φωτισμού που μετρά ο αισθητήρας οροφής με την τιμή αισθητήρα που τοποθετείται στο επίπεδο εργασίας ΔΕΝ διατηρείται σταθερός κατά τη διάρκεια του χρόνου καθώς εξαρτάται από την ανακλαστικότητα των επιφανειών του χώρου, την γεωμετρία του χώρου

και από τον τύπο του ουρανού (π.χ. νεφοσκεπής, αίθριος) και φυσικά τη θέση τοποθέτησης. Είναι προφανές ότι ο αισθητήρας φωτισμού της οροφής μπορεί να δίνει το ίδιο σήμα (δηλ. να μετράει την ίδια τιμή φωτισμού) ενώ τα επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας να μην είναι τα ίδια. Ή μπορεί να συμβεί τα αντίστροφο, δηλ. τα επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας να είναι τα ίδια δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, ο αισθητήρας οροφής όμως να δίνει διαφορετικό σήμα.



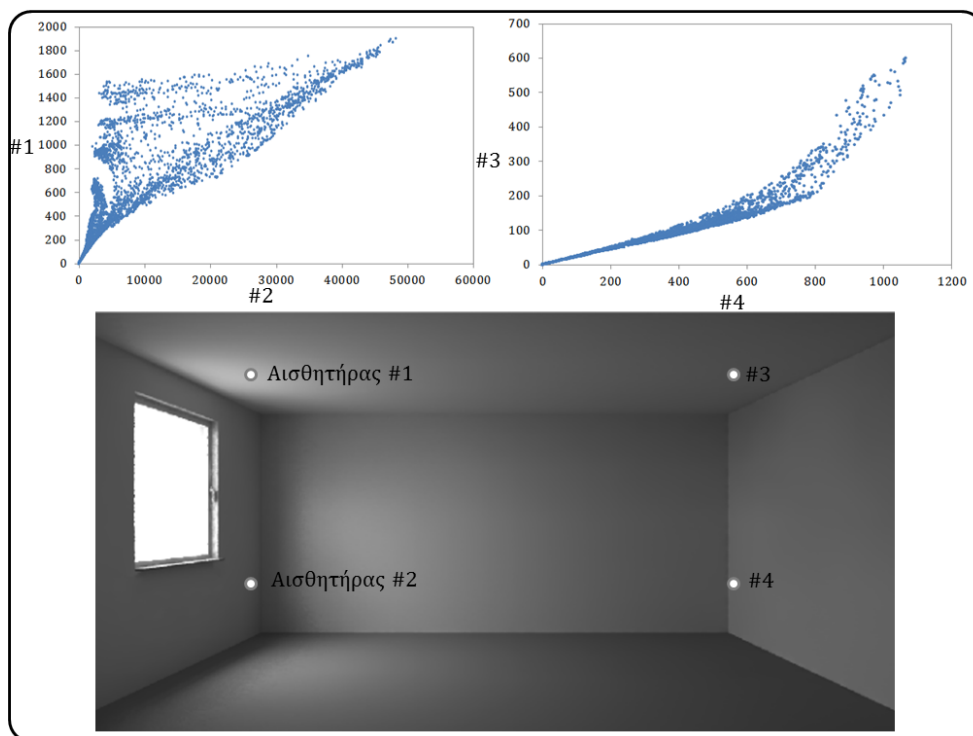
Σχήμα 8.9: Πεδίο θέασης αισθητήρα (στην συγκεκριμένη περίπτωση 180°) στην επιφάνεια εργασίας (δεξιά) και στην οροφή (αριστερά).

Ενα επιπρόσθετο πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι ο λόγος των τιμών φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας προς αυτή που μετρά ο αισθητήρας στην οροφή είναι διαφορετικός σε συνθήκες φυσικού φωτισμού από τον ίδιο λόγο όταν το σύστημα φωτισμού λειτουργεί (νύχτα).



Σχήμα 8.10: Λόγος φωτισμού (επιφάνεια εργασίας/οροφή) την νύχτα (επάνω) και την ημέρα(κάτω). Προφανώς ανάλογα με τις συνθήκες ο λόγος κατά τη διάρκεια της ημέρας μεταβάλλεται.

Γενικά ο λόγος του φωτισμού στον αισθητήρα προς αυτόν σε σημείο (α) στην επιφάνεια εργασίας είναι επιθυμητό να διατηρείται σταθερός. Μπορεί αυτό να προσεγγισθεί μετατοπίζοντας τον αισθητήρα μακριά από το άνοιγμα όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.11: Ο λόγος των τιμών μεταξύ του αισθητήρα οροφής (στη συγκεκριμένη περίπτωση το πεδίο θέασης του είναι 90°) και αυτού στην επιφάνεια εργασίας είναι σταθερότερος όσο αυξάνεται η απόσταση από το άνοιγμα (όμως τότε πιθανόν να μειωθεί και η εξοικονόμηση). Ο αισθητήρας #1 έχει τοποθετηθεί πολύ κοντά στο άνοιγμα για τον τονισμό της διαφοράς των τιμών φωτισμού που μετρά σε σχέση με αυτές που μετρά ο #2. Γενικά η περιοχή εκτός του ανοίγματος δεν βρίσκεται εντός του πεδίου θέασης των αισθητήρων.

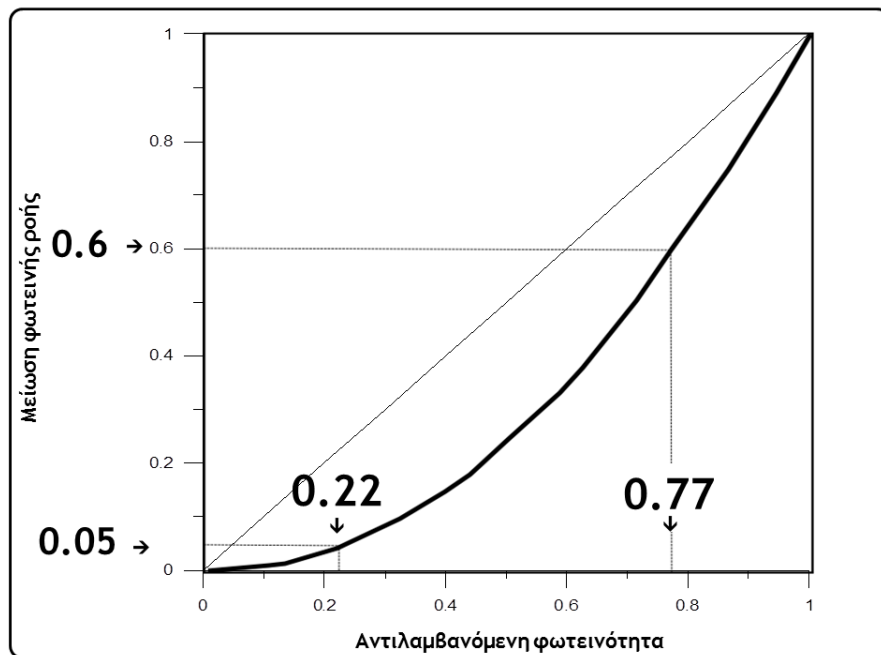
Είναι επίσης φανερό σε αυτό το σημείο ότι η μετατόπιση του αισθητήρα μακριά από το άνοιγμα μειώνει την εξοικονόμηση ενώ η τοποθέτηση του πιο κοντά σε αυτό την αυξάνει με κάποιο κίνδυνο τμήματα των περιοχών που ελέγχονται από αυτό να έχουν τιμές φωτισμού μικρότερες από αυτές του σχεδιασμού. Γενικά οι κατασκευαστές προτείνουν κάποια θέση η οποία έχει σχέση με το οπτικό πεδίο του αισθητήρα (π.χ. έτσι ώστε να μην δέχεται φως από ανάκλαση από επιφάνειες ακτός του χώρου). Τα παραπάνω προβλήματα προσπαθούν να αντιμετωπίσουν οι αλγόριθμοι ελέγχου.

Δύο βασικοί αλγόριθμοι ελέγχου για τον συνεχή έλεγχο (dimming) της φωτεινής ροής των φωτιστικών παρουσιάζονται παρακάτω. Πρίν την ανάλυση τους όμως θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι με τη χρήση κατάλληλων ρυθμιστικών διατάξεων (ballast) η φωτεινή ροή των φωτιστικών μπορεί να ελαχιστοποιηθεί (όχι να μηδενισθεί) με άμεση συνέπεια να καταναλώνεται ενέργεια. Να τονισθεί ότι η συγκεκριμένη παράγραφος εστιάζεται κυρίως σε γραμμικούς λαμπτήρες φθορισμού.

Γενικά για λόγους μόνο εξοικονόμησης ενέργειας, ballasts που μπορούν να ρυθμίσουν την φωτεινή ροή του λαμπτήρα μεταξύ 100% και 5% /10% προτιμώνται. Αν και η ρύθμιση μπορεί να φτάσει και σε τιμές της τάξης του 1% , η περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται περισσότερο για

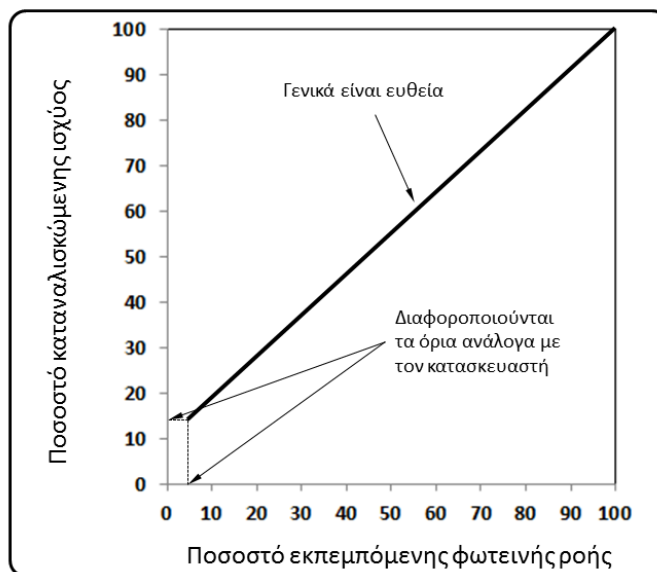
δημιουργία συγκεκριμένων «σκηνών» φωτισμού (αίθουσες συνεδριάσεων, θέατρα, εστιατόρια κλπ).

Διαφορετικοί τύποι λαμπτήρων εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά όταν ρυθμίζεται η φωτεινή ροή τους (π.χ. λαμπτήρες αλογόνου ρυθμίζονται συνεχώς μέχρι 0% (να σβήσουν), οι HID μέχρι ~20% με χρωματικές αλλαγές και αυξημένους χρόνους προσαρμογής κλπ). Ένα ενδιαφέρον γεγονός είναι η σχέση ανάμεσα στην φωτεινότητα (υποκειμενική αντίληψη) και στα πραγματικά μετρούμενα επίπεδα φωτισμού. Η σχέση αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.12: Η φωτεινότητα (υποκειμενική αίσθηση της λαμπρότητας) του εσωτερικού περιβάλλοντος που αντιλαμβανόμαστε δεν μεταβάλλεται γραμμικά με την φωτεινή ροή που ακέμπεται από τα φωτιστικά.

Όταν ο λαμπτήρας ρυθμίζεται στην ελάχιστη φωτεινή ροή (π.χ. 3%) η ισχύς που καταναλίσκεται δεν ακολουθεί την μείωση της φωτεινής ροής. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια τυπική σχέση ανάμεσα στο ποσοστό της καταναλισκόμενης ισχύος σε ένα σύστημα γραμμικού λαμπτήρα φθορισμού-ballast σε σχέση με την σχετική φωτεινή ροή.



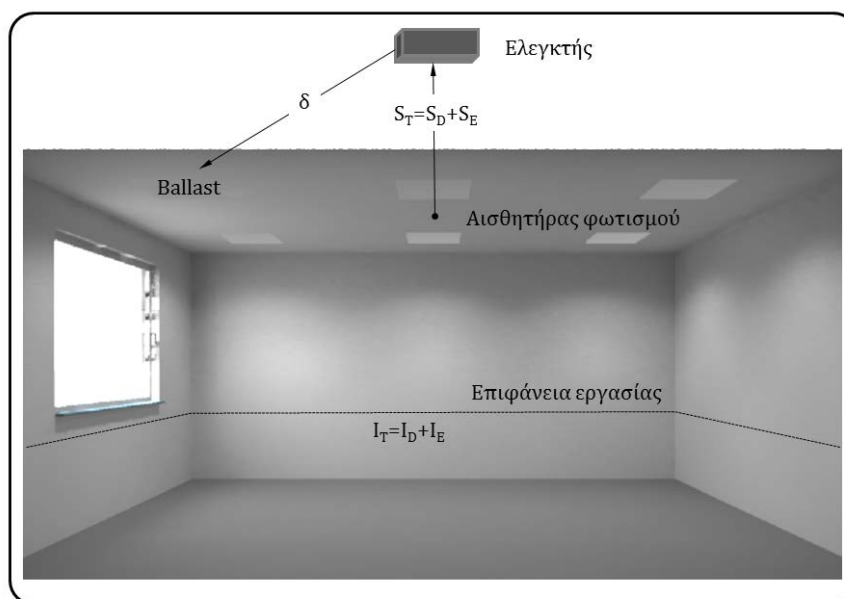
Σχήμα 8.13: Τυπική σχέση ανάμεσα στο ποσοστό ρύθμισης της φωτεινής ροής και την σχετική καταναλισκόμενη ισχύ για γραμμικούς λαμπτήρες φθορισμού και ηλεκτρονικές ρυθμιστικές διατάξεις. Υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τον κατασκευαστή¹⁵².

Αυτή η καταναλισκόμενη ισχύς θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργεια από το σύστημα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Τα ballasts μπορεί να δέχονται σήμα 0-10 V από τον ελεγκτή ώστε να ρυθμίζουν την φωτεινή ροή των λαμπτήρων (σε αυτή την περίπτωση επιτρέπεται η σύνδεση εξαρτημάτων από διαφορετικούς κατασκευαστές) ή να ρυθμίζονται ψηφιακά. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των αλγορίθμων ελέγχου. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν εδώ¹⁵³. Επίσης ένα βασικό κείμενο περιγραφής των αλγορίθμων είναι η εργασία των F. Rubinstein, G. Ward & R. Verderber¹⁵⁴.

¹⁵² L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F. Topalis, « Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts», Energy and Buildings 40 (2008) 36–50

¹⁵³ Δούλος Λ., «Ανάπτυξη συστήματος αυτόματης προσαρμογής του τεχνητού φωτισμού με στόχο τη βέλτιστη εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού», Διδακτορική διατριβή, 2010. (<http://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/22943>)

¹⁵⁴ F. Rubinstein, G. Ward, R. Verderber, “Improving the performance of photo-electrically controlled lighting systems”, Proceedings of IESNA Conference, 1988



Σχήμα 8.14: Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή των αλγορίθμων ελέγχου. S_T = σήμα που παράγεται από τον αισθητήρα, S_D = το τμήμα του S_T που οφείλεται στον φυσικό φωτισμό, S_E = το τμήμα του S_T που οφείλεται στον ηλεκτροφωτισμό. I_T = τιμή φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας, I_D = το τμήμα του I_T που οφείλεται στον φυσικό φωτισμό, I_E = το τμήμα του I_T που οφείλεται στον ηλεκτροφωτισμό. Επιπλέον $S_{E_{design}}$ =σήμα από τον αισθητήρα την νύχτα (έλλειψη φυσικού φωτισμού) όταν το σύστημα λειτουργεί και ρυθμίζεται ώστε να παρέχει φωτισμό στην επιφάνεια εργασίας $I_{E_{design}}$. δ =το ποσοστό ρύθμισης της φωτεινής ροής του συστήματος ηλεκτροφωτισμού ($0 \leq \delta \leq 1$). Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε σύστημα ηλεκτροφωτισμού με πλήρη παροχή φωτεινής ροής ενώ η τιμή δ_{min} όταν το σύστημα έχει την ελάχιστη παροχή (π.χ. 3%)

Να τονισθεί εδώ ότι ενα πραγματικό σύστημα ρύθμισης της φωτεινής ροής συμπεριλαμβάνει και επιπρόσθετα χαρακτηριστικά (π.χ. εύρος νεκρής ζώνης, απενεργοποίηση των φωτιστικών όταν λειτουργούν κάποιο χρονικό διάστημα στην ελάχιστη ροή κλπ).

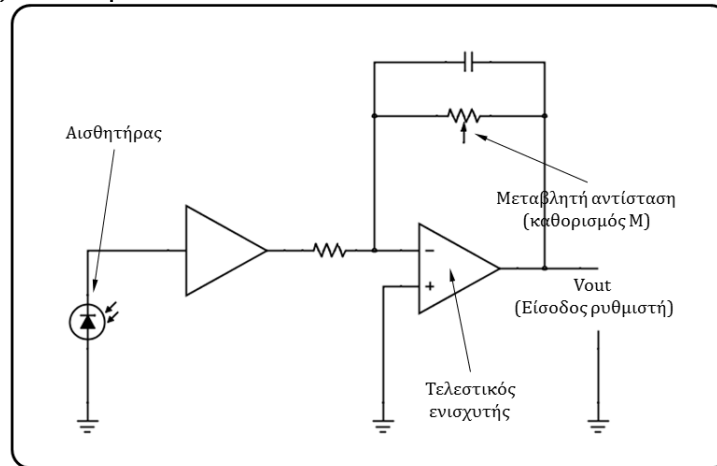
1. Αναλογικός έλεγχος ανοιχτού βρόγχου (proportional open loop)

Ο αισθητήρας σε αυτή την περίπτωση δεν ανιχνεύει φωτισμό από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού αλλά μόνο φυσικό φωτισμό. Ανάλογα με τα επίπεδα φυσικού φωτισμού που ανιχνεύει ρυθμίζει αναλογικά και την φωτεινή ροή των φωτιστικών. Το κύριο μειονέκτημα βρίσκεται στο γεγονός ότι το σύστημα δεν τροποποιεί καθόλου την ρύθμιση αν π.χ. χρησιμοποιηθεί σκίαση αφού δεν έχει καμμία επαφή με το εσωτερικό του κτιρίου. Το μόνο που χρειάζεται να ρυθμιστεί σε αυτή την περίπτωση είναι η σχέση ανάμεσα στα επίπεδα φυσικού φωτισμού στον εξωτερικό αισθητήρα και την ρύθμιση (δ σε %) του συστήματος ηλεκτροφωτισμού. Αυτό πραγματοποιείται μέσω του καθορισμού της παραμέτρου M .

$$\delta = M \cdot S_T(t) + 1 \quad (8.1)$$

$$I_T(t) = I_D(t) + I_{E_{design}} * (M * S_D(t) + 1) / (1 - M * S_{E_{design}}) \quad (8.2)$$

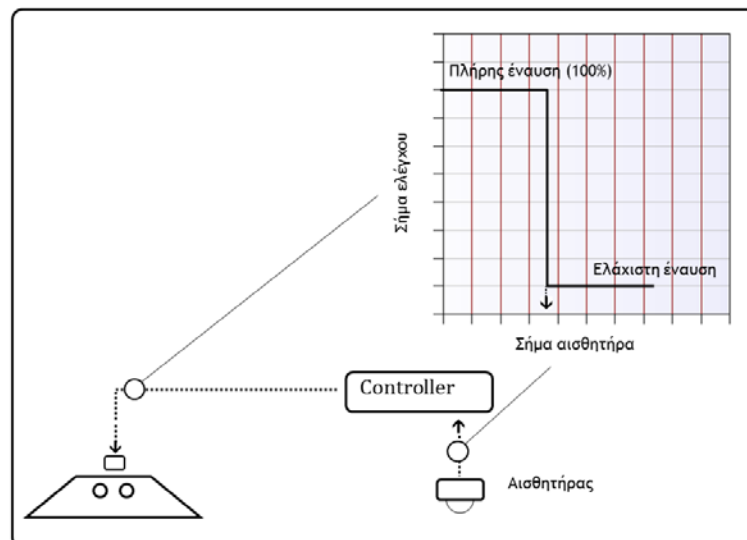
Γενικά το πεδίο όρασης του αισθητήρα σε αυτό τον αλγόριθμο ελέγχου είναι στενό. Σχηματικά το κύκλωμα λειτουργίας αυτού του ελεγκτή παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 8.15: Κύκλωμα (σηματική αναπαράσταση) για τον αναλογικό έλεγχο ανοιχτού βρόγχου.

2. Ολοκληρωτικός έλεγχος κλειστού βρόγχου (με επαναφορά) (Integral reset)

Είναι ο πλέον κοινός αλγόριθμος με τη βοήθεια του οποίου ρυθμίζεται η φωτεινή ροή των λαμπτήρων με τέτοιο τρόπο ώστε το συνολικό σήμα του αισθητήρα (που οφείλεται στην επίδραση τόσο του τεχνητού όσο και του φυσικού φωτισμού) να διατηρείται σταθερό.



Σχήμα 8.16: Σχέση μεταξύ σήματος ελέγχου και σήματος αισθητήρα για τον αλγόριθμο με ολοκληρωτικό έλεγχο.

Το σήμα αυτό καθορίζεται από την τελική δοκιμή και προσαρμογή του συστήματος που γίνεται το βράδυ (απουσία φυσικού φωτισμού). Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται ως εξής. Ο αισθητήρας συνήθως έχει έχει

μια μικρή βίδα η περιστροφή της οποίας μεταβάλλει την φωτεινή ροή των φωτιστικών.



Σχήμα 8.17: Αισθητήρας φωτισμού.

Έτσι με την βοήθεια ενός φωτόμετρου που τοποθετείται στην επιφάνεια εργασίας ρυθμίζεται η φωτεινή ροή ώστε το φωτόμετρο να δείχνει τα επίπεδα φωτισμού που είναι αναγκαία (π.χ. 500 lux). Όπως αναφέρθηκε το σύστημα λειτουργεί προσπαθώντας να διατηρήσει το σήμα που παράγεται από τον αισθητήρα σταθερό και ίσο με αυτό που παράγεται κατά τη διάρκεια της ρύθμισης του συστήματος δηλ:

$$S_T(t) = S_{E_{design}} \quad (8.3)$$

Επειδή

$$S_T(t) = S_D(t) + S_E(t) = S_D(t) + \delta * S_{E_{design}} \quad (8.4)$$

Από (1) και (2) υπολογίζεται το ποσοστό (δ) κατά το οποίο ρυθμίζεται η φωτεινή ροή των φωτιστικών:

$$S_T = S_D(t) + \delta * S_{E_{design}} \rightarrow \delta = 1 - (S_D(t) / S_{E_{design}}) \quad (8.5)$$

Έτσι τα επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας όταν υπάρχει και φυσικός φωτισμός δίνονται από τη σχέση :

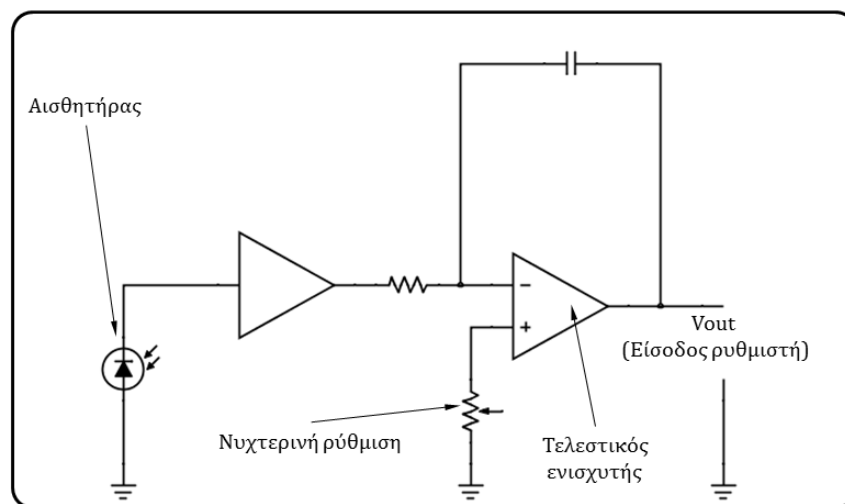
$$I_T(t) = I_D(t) + I_{E_{design}} * (1 - S_D(t) / S_{E_{design}}) \quad (8.6)$$

Μια συνοπτική αλλά και απλοϊκή περιγραφή λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος είναι η εξής¹⁵⁵ :

Ας υποθέσουμε ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας (λειτουργία ηλεκτροφωτισμού μόνο) η σχέση ανάμεσα στον αισθητήρα στο επίπεδο

¹⁵⁵ <http://www.lrc.rpi.edu/nlpip/tutorials/photosensors/index.asp>

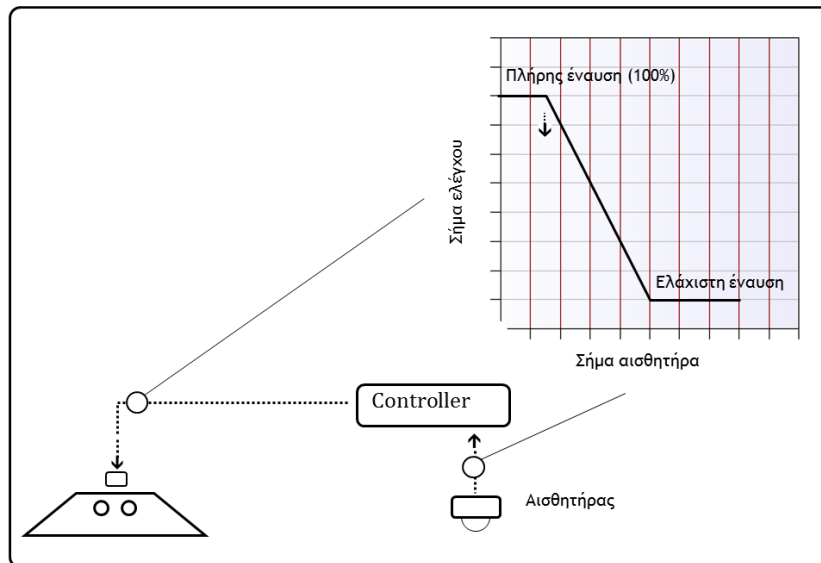
εργασίας και σε αυτό της οροφής είναι 6/1. Δηλ. αν θέλουμε 500 lux στην επιφάνεια εργασίας ο αισθητήρας στην οροφή θα «μετρά» ($500/6=83.3$ lux). Την επόμενη ημέρα λόγω του φυσικού φωτισμού ας υποθέσουμε ότι στο επίπεδο εργασίας (π.χ. κάτω από τον αισθητήρα οροφής) προστίθενται 300 lux και το ίδιο συμβαίνει και στον αισθητήρα οροφής (υποθέτουμε αναλογία 1/1). Το σύστημα προσπαθεί να διατηρήσει το «σήμα» του αισθητήρα οροφή στα ~ 83 lux, συνεπώς μειώνει την φωτεινή ροή από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού για να το επιτύχει. Στην περίπτωση που μόλις αναφέρθηκε ο αισθητήρας απενεργοποιεί το σύστημα φωτισμού γεγονός που έχει σαν συνέπεια την επίτευξη εξοικονόμησης μεν άλλα τα επίπεδα φωτισμού που επιτυγχάνονται στην επιφάνεια εργασίας να είναι μικρότερα από τα επιθυμητά (δηλ. 300 lux αντί 500).



Σχήμα 8.18: Κύκλωμα (σηματική αναπαράσταση) για τον ολοκληρωτικό έλεγχο κλειστού βρόγχου.

3. Αναλογικός έλεγχος κλειστού βρόγχου (proportional closed loop)

Εδώ ο έλεγχος πραγματοποιείται διαφορετικά. Αντι να διατηρείται σταθερό το σήμα του αισθητήρα, ο ελεγκτής ρυθμίζει τη φωτεινή ροή των φωτιστικών με τέτοιο τρόπο ώστε το ποσοστό ρύθμισης (δ) να έχει γραμμική σχέση με την διαφορά του σήματος του αισθητήρα την ημέρα μείον το σήμα κατά τη διάρκεια της ρύθμισης.



Σχήμα 8.19: Σχέση μεταξύ σήματος ελέγχου και σήματος αισθητήρα για τον αλγόριθμο με αναλογικό έλεγχο κλειστού βρόγχου

Σε αυτή την περίπτωση όμως εκτός από την νυχτερινή ρύθμιση πρέπει να γίνει και μια κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να ρυθμιστεί η παράμετρος M , δηλ.

$$\delta = M * (S_T(t) - S_{E_{design}}) + 1 \quad (8.7)$$

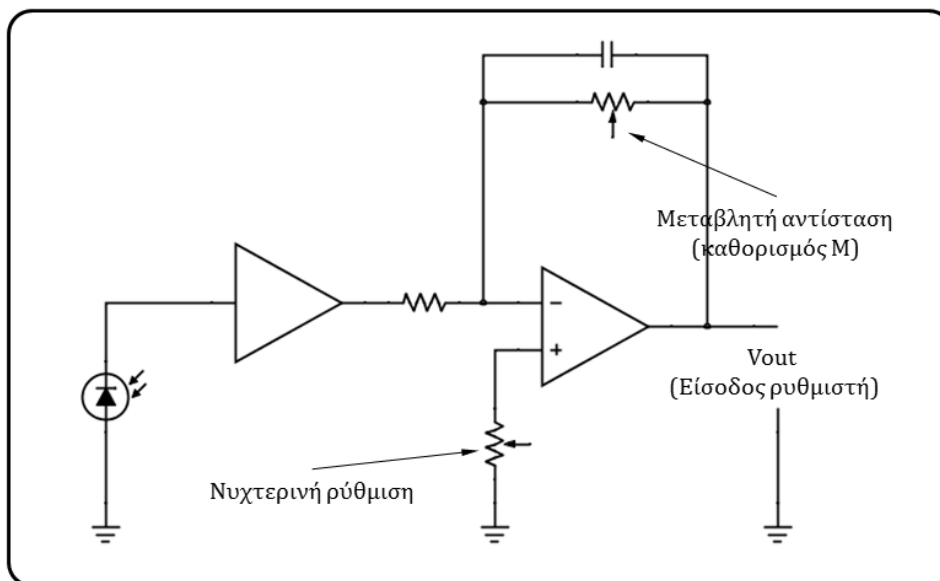
$$I_T(t) = I_D(t) + I_{E_{design}} * (1 + M * (S_D(t) - S_{E_{design}})) / (1 - M * S_{E_{design}}) \quad (8.8)$$

Ακολουθώντας το παράδειγμα που έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγραφεί απλοικά τη λειτουργία του πρώτου αλγόριθμου ελέγχου (integral reset), η λειτουργία του συγκεκριμένου αλγόριθμου είναι η εξής¹²⁸:

Υποθέτουμε ξανά ότι ο λόγος των τιμών φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας και στον αισθητήρα στην οροφή είναι 6/1. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το βράδυ πραγματοποιείται η πρώτη ρύθμιση του αισθητήρα. Με φωτόμετρο στην επιφάνεια εργασίας μετώνται τα επίπεδα φωτισμού και ρυθμίζεται το σύστημα έτσι ώστε να επιτευχθούν π.χ. 500 lux. Εστω τότε ότι ο αισθητήρας οροφής «αντλαμβάνεται» 83 lux (δηλ. το 1/6 των 500 lux). Προφανώς μόλις η ένταση φωτισμού στον αισθητήρα αυξηθεί περισσότερο από 83 lux αρχίζει η ρύθμιση της φωτεινής ροής των φωτιστικών. Σε αυτό τον αλγόριθμο ελέγχου χρειάζεται και μια ρύθμιση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Εστω ότι το πρωί επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση με το βράδυ μόνο που τώρα διαλέγουμε μια ημέρα/ώρα ώστε ο φυσικός φωτισμός να παρέχει 500 lux. Λόγω της σχέσης ανάμεσα στον αισθητήρα οροφής και σε αυτόν στην επιφάνεια εργασίας (δηλ. 1/1 στην περίπτωση φυσικού φωτισμού), ο αισθητήρας οροφής «αντλαμβάνεται» και αυτός 500 Lux. Συνεπώς η ρύθμιση του συστήματος μεταβάλλεται από 100 % στα 83 lux στο 0% στα 500 lux. Δηλ. υπάρχει μια μείωση 100% στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτροφωτισμού όταν η φυσικό φωτισμό ένταση φωτισμού στον αισθητήρα μεταβάλλεται κατά 500-83=417 lux. Δηλ. Ο ρυθμός μείωσης της φωτεινής ροής είναι $-100/417 = -0.24 \%$ /lux.

Το σύστημα είναι έτοιμο για λειτουργία τώρα . Ας υποθέσουμε ότι ο φυσικός φωτισμός παρέχει 300 lux στην επιφάνεια εργασίας αλλά και στον αισθητήρα στην οροφή. Επειδή από τα 83 lux στην οροφή αρχίζει η ρύθμιση το σύστημα αρχίζει να μειώνει την ροή των λαμπτήρων. Κατα πόσο; $0.24\%/lux \times 300 lux = 72\%$. Συνεπώς τώρα η ένταση φωτισμού στον αισθητήρα θα είναι α) 300 lux λόγω φυσικού φωτισμού και β) $83 lux - (0.72 \times 83 lux) = 23 lux$ λόγω του συστήματος ηλεκτροφωτισμού. Σύνολο=323 lux. Θυμηθείτε ότι ο στόχος του συστήματος είναι να επιτύχει τα 83 lux στην οροφή. Άρα τώρα έχουμε $323 - 83 = 240 lux$ περισσότερα. Η προαναφερθείσα μέθοδος συνεχίζεται λοιπόν, $0.24\%/lux \times 240 lux = 57.6\%$. Συνεπώς τώρα η ένταση φωτισμού στον αισθητήρα θα είναι α) 300 lux λόγω φυσικού φωτισμού και β) $83 lux - (0.576 \times 83 lux) = 35.1 lux$ λόγω του συστήματος ηλεκτροφωτισμού. Σύνολο=335.1 lux. Τώρα έχουμε $335.1 - 83 = 252.1 lux$ περισσότερα. Ξανά $0.24\%/lux \times 252.1 lux = 60.5\%$. Συνεπώς τώρα η ένταση φωτισμού στον αισθητήρα θα είναι α) 300 lux λόγω φυσικού φωτισμού και β) $83 lux - (0.605 \times 83 lux) = 32.7 lux$ λόγω του συστήματος ηλεκτροφωτισμού. Σύνολο=332.7 lux.

Όπως αρχίζει να φαίνεται το ποσοστό ρύθμισης του ηλεκτροφωτισμού είναι ~60%. Δηλ. έχουμε 300 lux από φυσικό φωτισμό και $(1 - 0.6) \times 500 = 200 lux$ από τον ηλεκτροφωτισμό. Σύνολο 500 lux , οπότε ο αλγόριθμος ελέγχου πραγματοποίησε τον στόχο του.



Σχήμα 8.20: Κύκλωμα (σχηματική αναπαράσταση) για τον αναλογικό έλεγχο κλειστού βρόγχου.

Στους δύο τελευταίους αλγόριθμους ελέγχου που αναφέρθηκαν θα πρέπει να τονισθούν τα εξής :

A) Το πεδίο όρασης του αισθητήρα είναι μεγαλύτερο αυτού του ανοιχτού βρόγχου (γωνία κώνου $\sim 60^\circ$)

B) Κατα την τοποθέτηση του αισθητήρα δεν θα πρέπει να δέχεται φως από τα φωτιστικά. Ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση έμμεσου φωτισμού όπου θα

πρέπει να εξετασθεί η περίπτωση να τοποθετηθεί ο αισθητήρας στο επίπεδο των φωτιστικών και όχι πάνω από αυτά.

Γ) Φως από ανακλάσεις μέσω των ανοιγμάτων πιθανό να προκαλέσουν εσφαλμένη λειτουργία. Πρέπει να εξετασθεί η περίπτωση το πεδίο όρασης να τροποποιηθεί (κάλυμα ή χρήση αισθητήρα με ασύμμετρη χωρική ευαισθησία) ώστε να περιοσθεί η επαφή με το άνοιγμα. Παρόμοιο πρόβλημα μπορεί να εμφανιστεί και από ανακλάσεις σε συστήματα σκίασης (ανακλαστικές περσίδες).

Εκτός των απλών αλγορίθμων ελέγχου μπορούν να υιοθετηθούν πολυπλοκότεροι με ικανότητα αυτορύθμισης καθώς και τη δυνατότητα να λαμβάνουν υπόψη τις προτιμήσεις των χρηστών ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να απενεργοποιηθεί το σύστημα.

Ο ευρωπαϊκός κανονισμός EN 15193:2007¹⁵⁶ περιγράφει την μεθοδολογία με την οποία μπορεί να υπολογισθεί η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση αυτοματιστών στο σύστημα ηλεκτροφωτισμού.

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού υπολογίζεται ως εξής:

$$W_t = W_{L,t} + W_{P,t} \quad (8.9)$$

όπου W_t η συνολική κατανάλωση, $W_{L,t}$ η κατανάλωση ενέργειας φωτισμού και $W_{P,t}$ η παρασιτική κατανάλωση που οφείλεται στη φόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος φωτισμού ασφαλείας και στην λειτουργία σε κατάσταση αναμονής κάποιου συστήματος ρύθμισης (παρουσίας ή με χρήση αισθητήρα φωτισμού).

Η κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό υπολογίζεται τόσο στις ζώνες εκμετάλευσης του φυσικού φωτισμού (ΖΕΦΦ) όσο και στις υπόλοιπες. Η ύπαρξη των ζωνών αυτών συνδέεται με την ύπαρξη πλευρικών ανοιγμάτων ή οροφής και εκτιμώνται γεωμετρικά όπως έχει παρουσιασθεί στην παράγραφο (??). Η κατανάλωση υπολογίζεται με την βοήθεια του τύπου για το άθροισμα όλως των ζωνών:

$$W_{L,t} = \sum \{ (P_n \cdot F_C) \cdot [(t_D \cdot F_0 \cdot F_D) + (t_N \cdot F_0)] \} / 1000 \quad (\text{kWh}) \quad (8.10)$$

Όπου :

P_n η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος φωτισμού

F_C , ο συντελεστής διατήρησης σταθερών επιπέδων φωτισμού. Χρησιμοποιείται μόνο όταν υπάρχει σύστημα ρύθμισης.

t_D ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτροφωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας (σε ώρες)

F_0 ο συντελεστής επίδρασης χρηστών

F_D ο συντελεστής επίδρασης φυσικού φωτισμού

t_N ο χρόνος λειτουργίας κατά τη διάρκεια της νύχτας (σε ώρες)

Η παρασιτική κατανάλωση υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση για κάθε ζώνη:

¹⁵⁶ EN 15193:2007, «Energy performance of buildings — Energy requirements for lighting»

$$W_{P,t} = \Sigma\{P_{pc} \cdot [t_y - t_D + t_N]\} + (P_{em} \cdot t_e) / 1000 \text{ (kWh)} \quad (8.11)$$

Όπου :

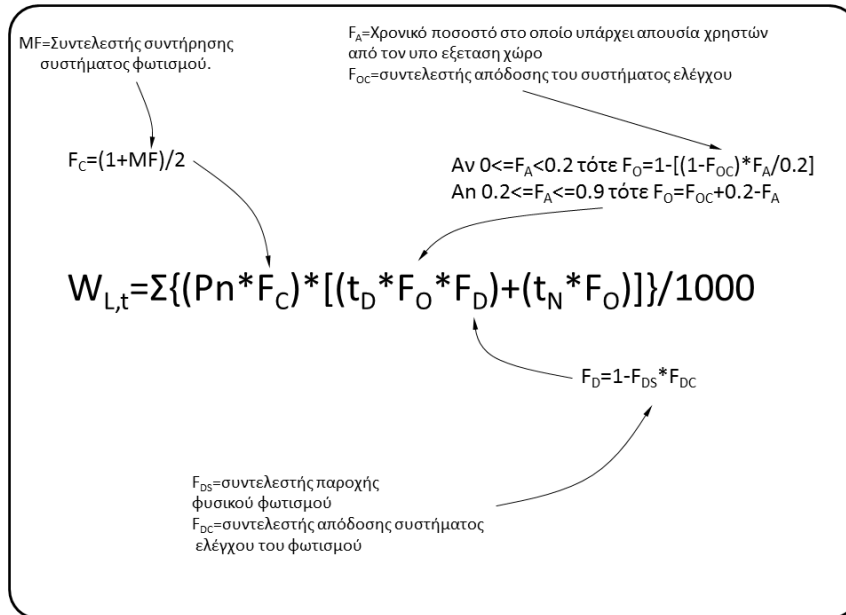
P_{pc} η ισχύς στο σύστημα ελέγχου

t_y συνολικά οι ώρες ανά έτος (8760)

P_{em} η ισχύς φόρτισης στο σύστημα ασφαλείας

t_e ο χρόνος λειτουργίας για τη φόρτιση του συστήματος φωτισμού (σε ώρες)

Συνολικά οι παράμετροι που συμμετέχουν στον υπολογισμό της κατανάλωσης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα :

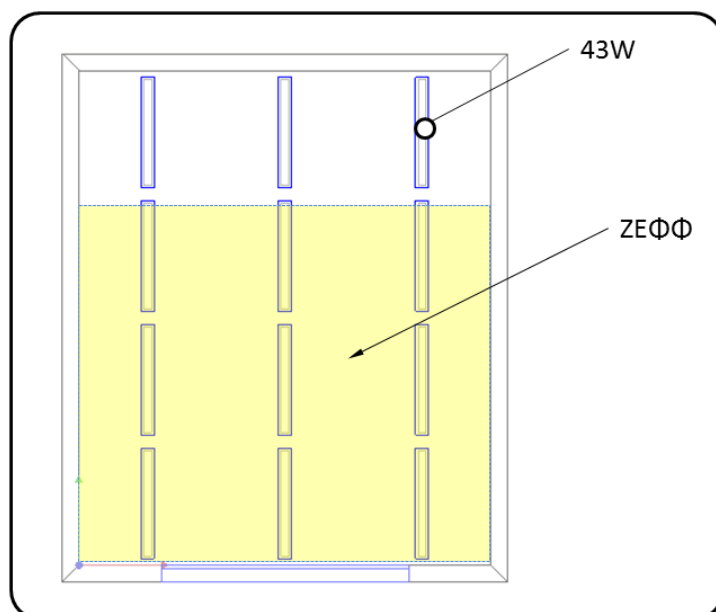


Σχήμα 8.21: Παράμετροι οι οποίοι τροποποιούν της κατανάλωση του συστήματος ηλεκτροφωτισμού σύμφωνα με το EN 15193-2007.

Ο λόγος της καταναλισκόμενης ενέργειας για φωτισμό σε ετήσια βάση, προς το εμβαδό των φωτιζόμενων χώρων του κτηρίου αποτελεί δείκτη αξιολόγησης (LENI, Lighting Energy Numerical Indicator σε kWh/m² annum). Ο συγκεκριμένος δείκτης μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές αναφοράς (benchmark) είτε φυσικά με λεπτομερή υπολογιστική διαδικασία ή επιτόπια μέτρηση κατά τη διάρκεια της ενεργειακής επιθεώρησης. Για παράδειγμα, χώρος γραφείων με εγκατεστημένη ισχύ 20 W/m² για φωτισμό, χωρίς αυτοματισμούς και χειροκίνητη λειτουργία αντιστοιχεί σε 54.6 kWh/m² (παραδοχές : $t_D = 2250$ ώρες, $t_N = 250$ ώρες, παρασιτική κατανάλωση α) στο σύστημα ελέγχου 5 kWh/m² annum και β) στο σύστημα ασφαλείας 1 kWh/m² annum).

Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό του LENI χρειάζεται εκτίμηση των προαναφερθέντων συντελεστών με τη βοήθεια πινάκων από τους οποίους επιλέγεται η κατάλληλη τιμή ανάλογα με τη χρήση του χώρου και το σύστημα ρύθμισης του συστήματος φωτισμού. Ένα παράδειγμα της διαδικασίας είναι το εξής :

Χώρος διαστάσεων 5x6x2.8 μ, με άνοιγμα 3x1.5 μ και ποδιά 1μ.



Σχήμα 8.22: Κάτοψη τυπικού χώρου παραδείγματος.

Αρχικά εκτιμάται η Ζώνη Εκμετάλλευσης Φυσικού Φωτισμού (ΖΕΦΦ). Αν και η ΖΕΦΦ υπολογίζεται γεωμετρικά είναι προφανές ότι σε αυτές χρειάζεται να εκτιμηθεί και η επάρκεια του φυσικού φωτισμού. Αυτή είναι δυνατό να είναι εξαιρετικά περιορισμένη λόγω εξωτερικών εμποδίων (απέναντι κτίρια,) , συστημάτων σκίασης, μικρού μεγέθους ανοιγμάτων ή/και μικρή διαπερατότητα υαλοπινάκων. Καθοριστικό κριτήριο (τουλάχιστο αυτό που προτείνεται στην EN 15193) είναι ο Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού. Ανάλογα με την τιμή του Παράγοντα Φυσικού Φωτισμού (D) εκτιμάται και η συμβολή του φυσικού φωτισμού στην πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού (ισχύει για ωράριο 8:00-17:00).

Τιμή ΠΦΦ (D) %	Συμβολή φυσικού φωτισμού
$D \geq 3 \%$	Ισχυρή
$3\% > D \geq 2\%$	Μέτρια
$2 > D \geq 1\%$	Ασθενής
$1\% >$	Μηδενική

Πίνακας 8.2.: Συμβολή φυσικού φωτισμού στην εξοικονόμηση ενέργειας ανάλογα με την τιμή του ΠΦΦ.

Έστω ότι στο παραπάνω παράδειγμα η διαπερατότητα του υαλοπίνακα είναι 0.65 και το πλαίσιο καλύπτει επιφάνεια 15% του ανοίγματος. Ο παράγοντας φυσικού φωτισμού υπολογίζεται σε 2.4 %. Η επιθυμητή ένταση φωτισμού είναι 500 lux με τον συντελεστή συντήρησης (MF) ίσο με 0.8. Το σύστημα φωτισμού στην ΖΕΦΦ ελέγχεται με τη χρήση αισθητήρα παρουσίας και φωτισμού. Ο συντελεστής έχει συνεπώς τιμή $F_c=0.9$. Λόγω της τιμής του παράγοντα φυσικού φωτισμού (D) η συμβολή του φυσικού φωτισμού είναι μέτρια (οσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας). Σε συνδυασμό με την επιθυμητή στάθμη φωτισμού (500 Lux) υπολογίζεται ο συντελεστής $F_{DS}=0.78$.

Με δεδομένη τη μετρία επίδραση του φυσικού φωτισμού υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή $F_{DC}=0.77$. Άρα $F_D=1- F_{DS} \cdot F_{DC}=0.39$

Ο χώρος είναι γραφείο και μια τυπική τιμή για τον συντελεστή $F_A=0.3$. Το σύστημα ελέγχου ενεργοποιεί αυτόματα τα φωτιστικά ενώ ρυθμίζει συνεχώς την φωτεινή τους ροή. Συνεπώς $F_{OC}=0.95$. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των συντελεστών F_A και F_{OC} υπολογίζεται ο συντελεστής $F_O=0.85$. Θεωρώντας $t_D=2250$ ώρες, $t_N=250$ ώρες και εφαρμόζοντας την εξίσωση (8.11), η κατανάλωση στη ΖΕΦΦ είναι 333 kWh ενώ στην περιοχή που εκτός ΖΕΦΦ είναι 322 kWh. Έτσι

$$W_{L,t}=655 \text{ kWh} \quad (8.12)$$

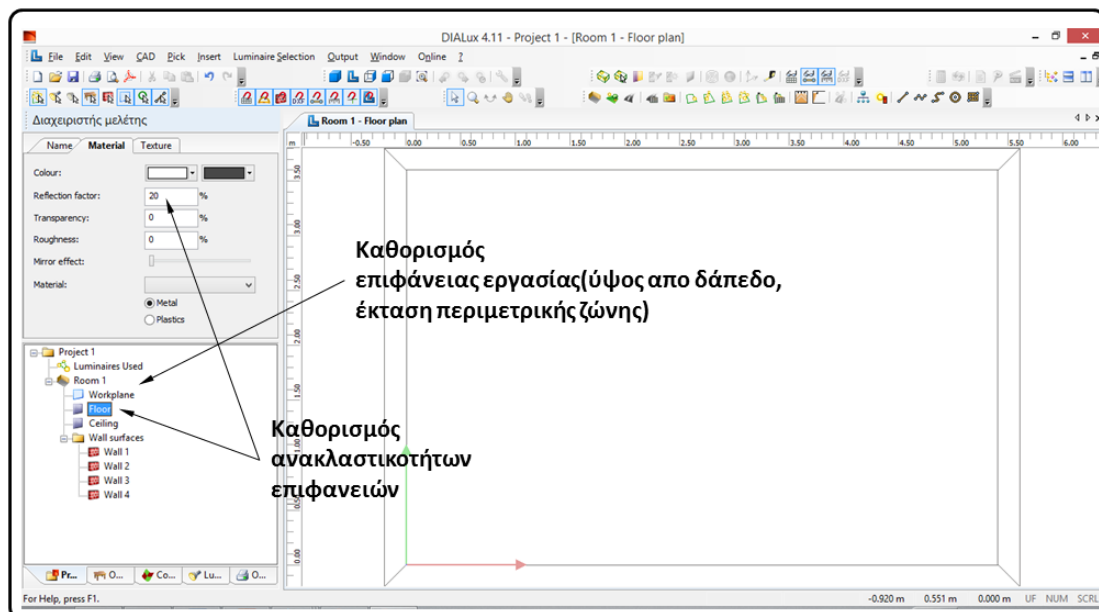
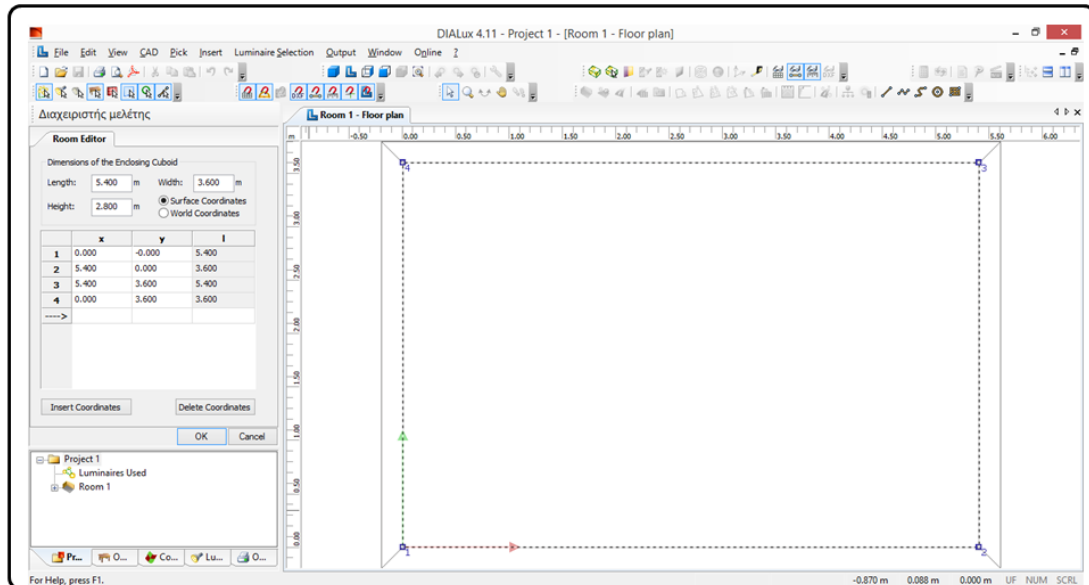
Αν δεν χρησιμοποιηθεί κάποιο σύστημα ελέγχου τότε η κατανάλωση θα ήταν 1290 kWh.

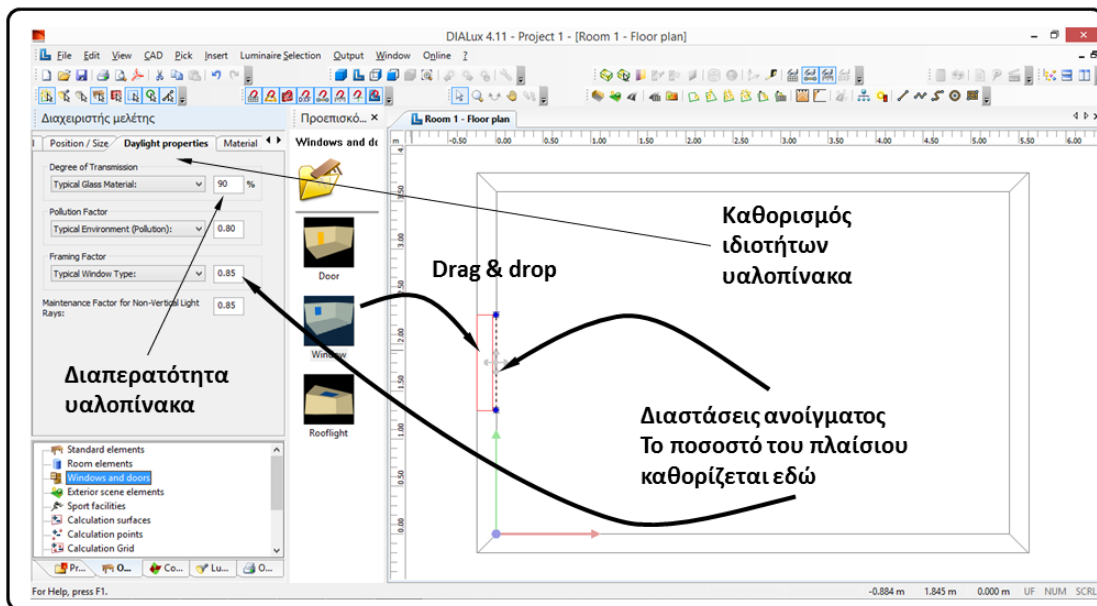
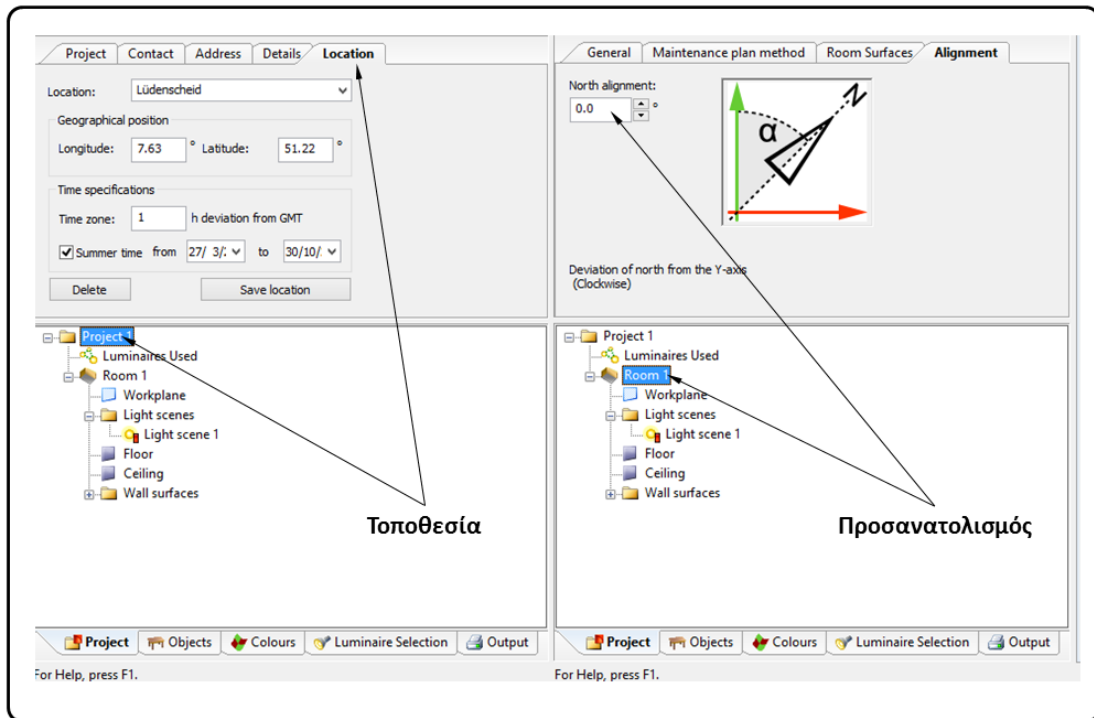
4. **Έλεγχος με σκοπό τον περιορισμό των φορτίων φωτισμού όταν χρειάζεται.** Χρήσιμη στρατηγική σε περιόδους με αυξημένα φορτία αιχμής (π.χ. περίοδος καύσωνα). Ανάλογα με τον τύπο της ρυθμιστικής διάταξης είτε μειώνεται κατά ένα ποσοστό η φωτεινή ροή είτε ένα αριθμός φωτιστικών απενεργοποιείται.
5. **Έλεγχος με βάση τη δυνατότητα διαφορετικών ρυθμίσεων ημέρα και νύχτα (Adaptive compensation).** Η προσαρμογή του ανθρώπινου οφθαλμού είναι διαφορετική όταν διαφοροποιείται η λαμπρότητα του περιβάλλοντος. Με βάση αυτή την αρχή είναι δυνατό να ρυθμίζεται (συνεχώς ή σε βαθμίδες) το σύστημα φωτισμού κατά τη διάρκεια νυχτερινών ωρών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ρύθμιση του συστήματος φωτισμού στην είσοδο των σηράγγων.
6. **Έλεγχος με σκοπό τη διατήρηση των επιπέδων φωτισμού συντήρησης.** Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος φωτισμού λόγω της αθροιστικής δράσης φαινόμενων όπως η γήρανση των λαμπτήρων, η συγκέντρωση σκόνης στον ανακλαστήρα/διαχύτη κλπ τα επίπεδα φωτισμού στην αρχή της λειτουργίας του συστήματος είναι μεγαλύτερα από τα επίπεδα σχεδιασμού (κατά τον παράγοντα (1/συντελεστής συντήρησης)). Αυτό το σύστημα ελέγχου μειώνει τη φωτεινή ροή των λαμπτήρων έτσι ώστε να επιτυγχάνονται από την αρχή τα επίπεδα σχεδιασμού με συνέπεια φυσικά εξοικονόμηση ενέργειας. Με την πάροδο του χρόνου το σύστημα ελέγχου αυξάνει την φωτεινή ροή κατα λίγο ώστε να διατηρεί τα επίπεδα φωτισμού στα επιθυμητά (για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα φυσικά ή καλύτερα για κάποιους κύκλους συντήρησης).
7. **Έλεγχος με βάση τις προτιμήσεις των χρηστών.** Επιτυγχάνεται μέσω τοπικών διακοπών ή dimmers. Επιτρέπει την ευελιξία όσον αφορά την διαφοροποίηση των επιπέδων φωτισμού ανάλογα με την δραστηριότητα που εκτελείται και προφανώς στοχεύει στην ικανοποίηση των χρηστών. Σε αυτό το είδος ελέγχου περιλαμβάνεται και η δημιουργία προκαθορισμένων “σκηνών” φωτισμού

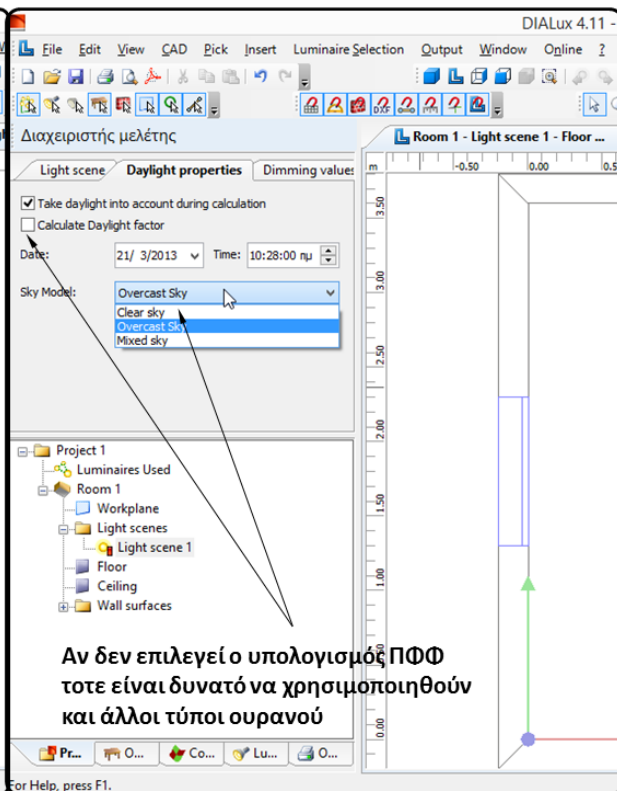
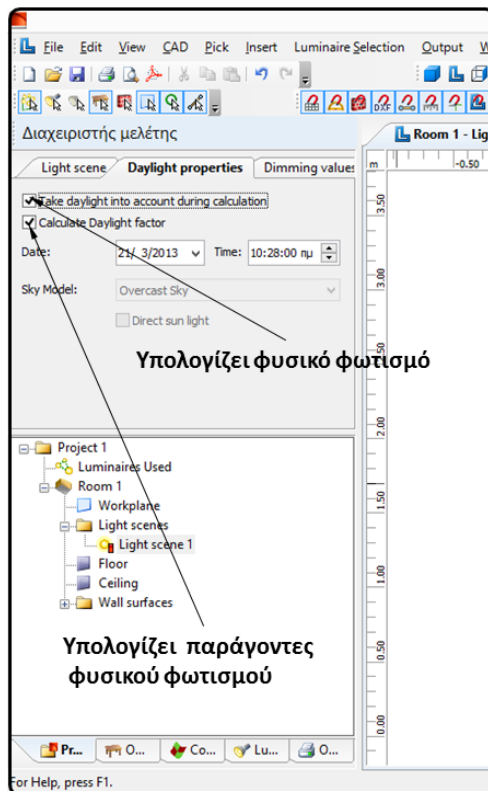
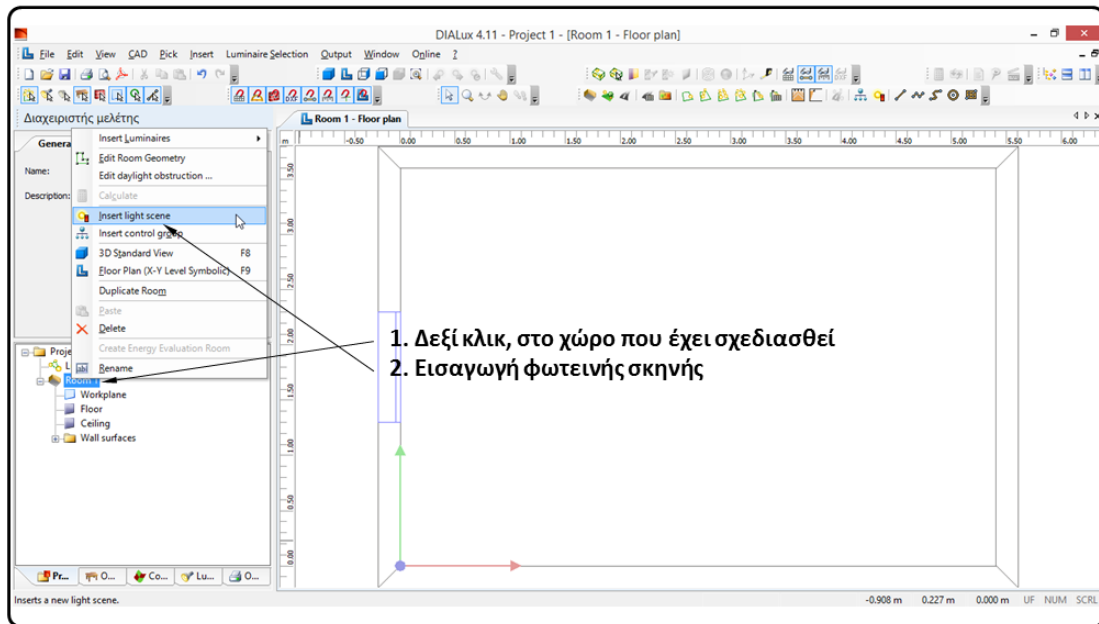
Χρήση απλών υπολογιστικών εργαλείων

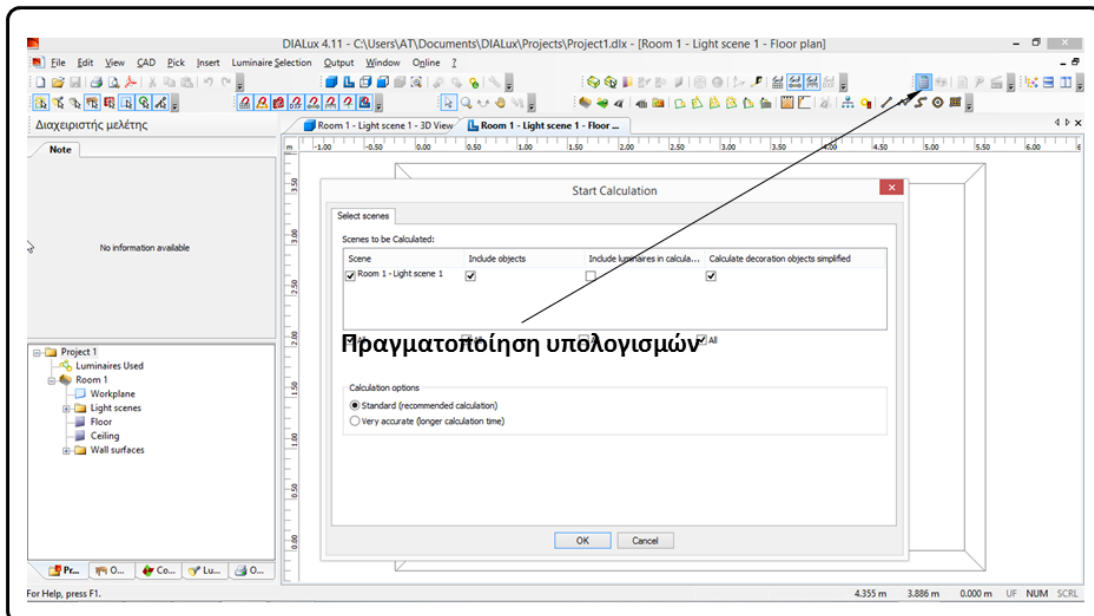
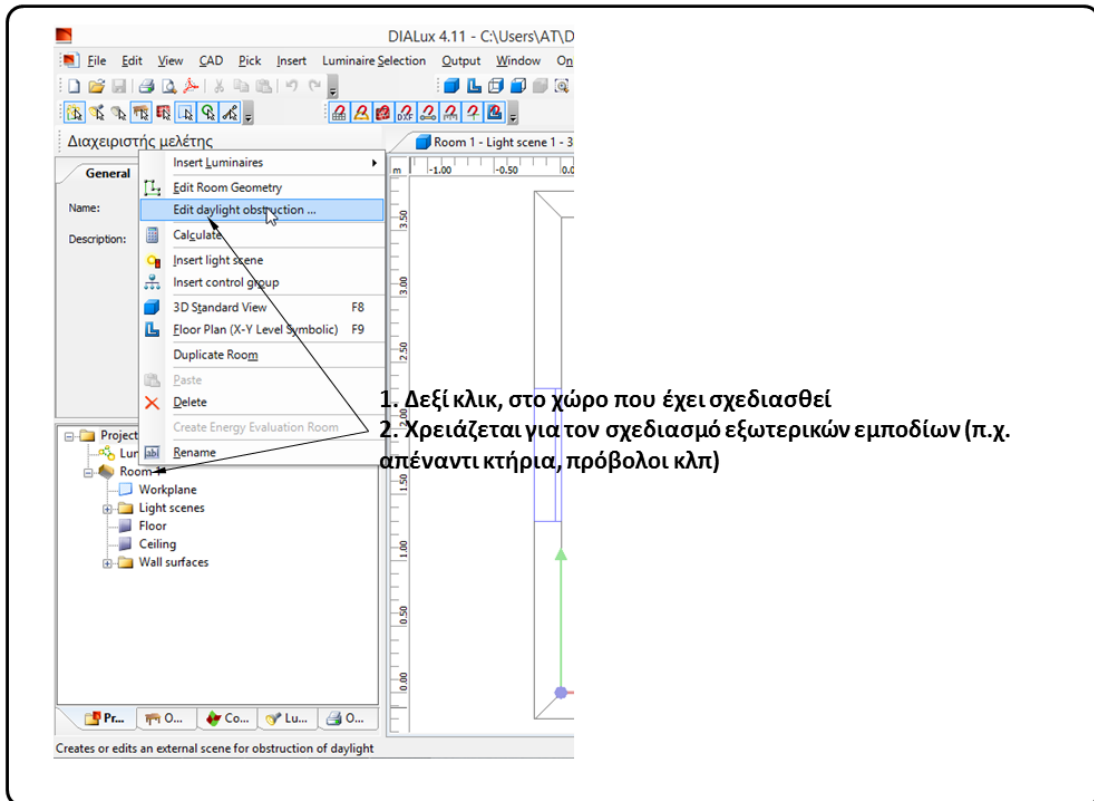
Ο σκοπός αυτής της παραγράφου δεν είναι να αποτελέσει ένα πλήρες εγχειρίδιο χρήσης των λογισμικών άλλα με δεδομένο κάποιες βασικές γνώσεις χειρισμού – πολύ γρηγορα- να χρησιμοποιηθούν ώστε να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση για φυσικό φωτισμό.

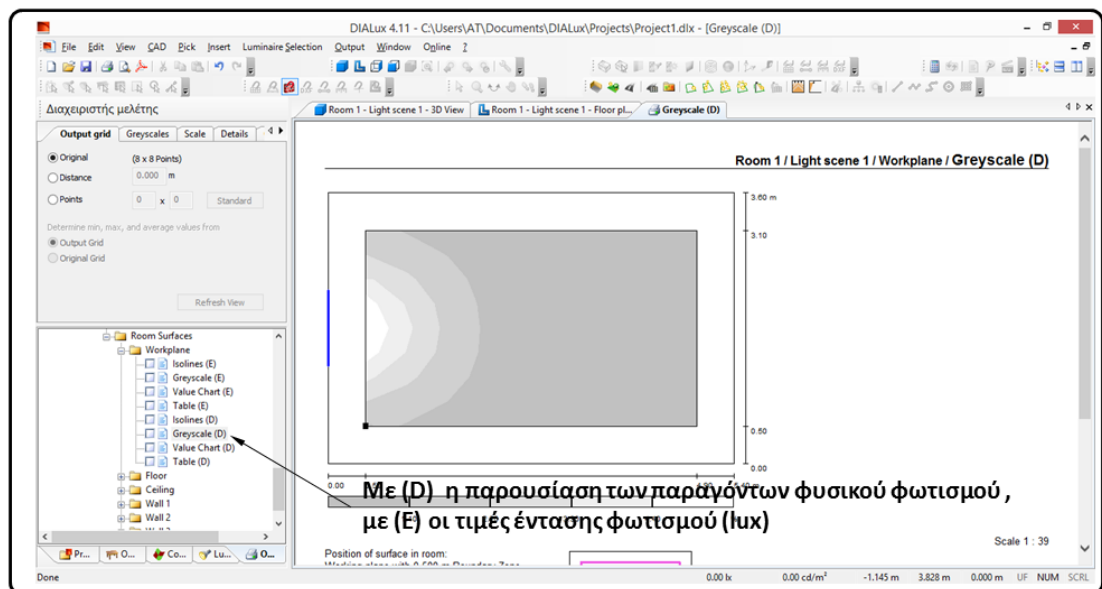
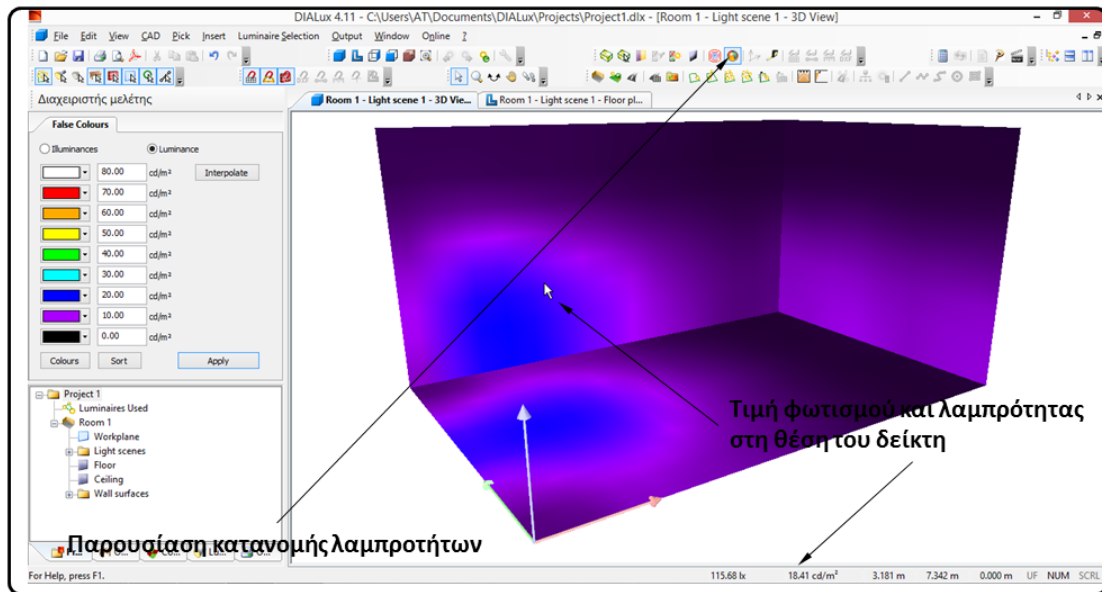
Dialux 4.11



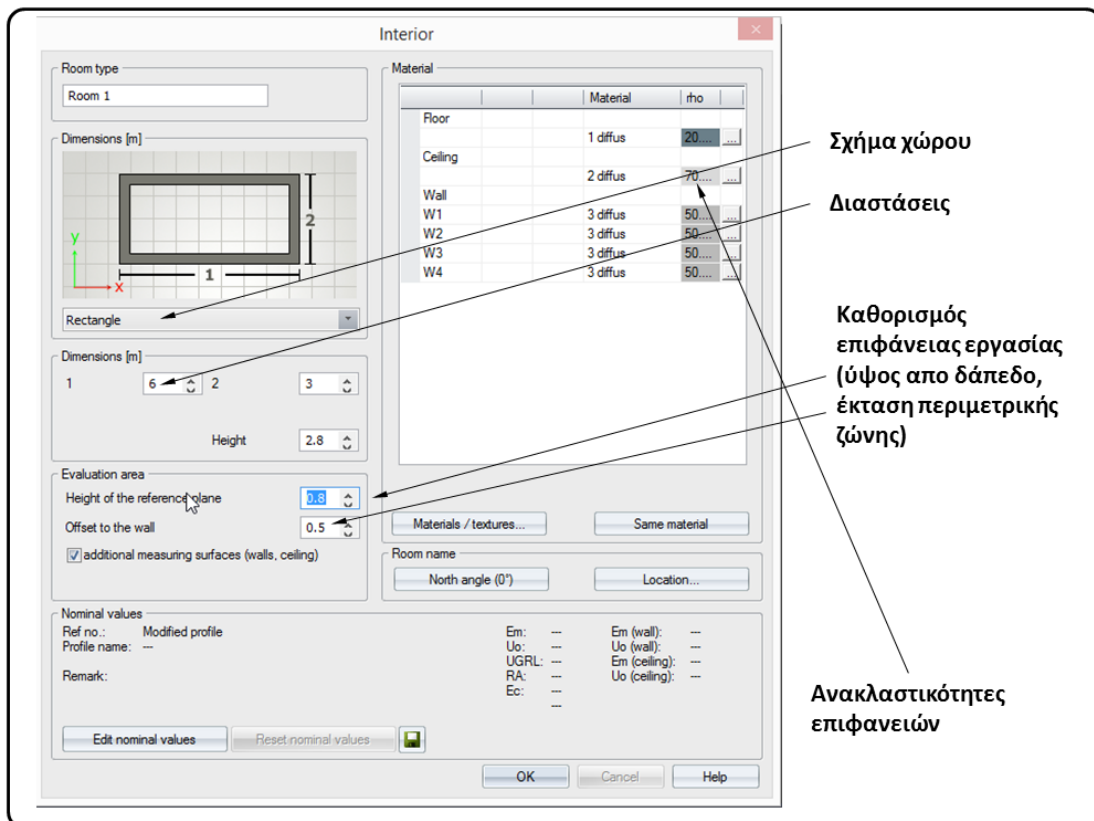
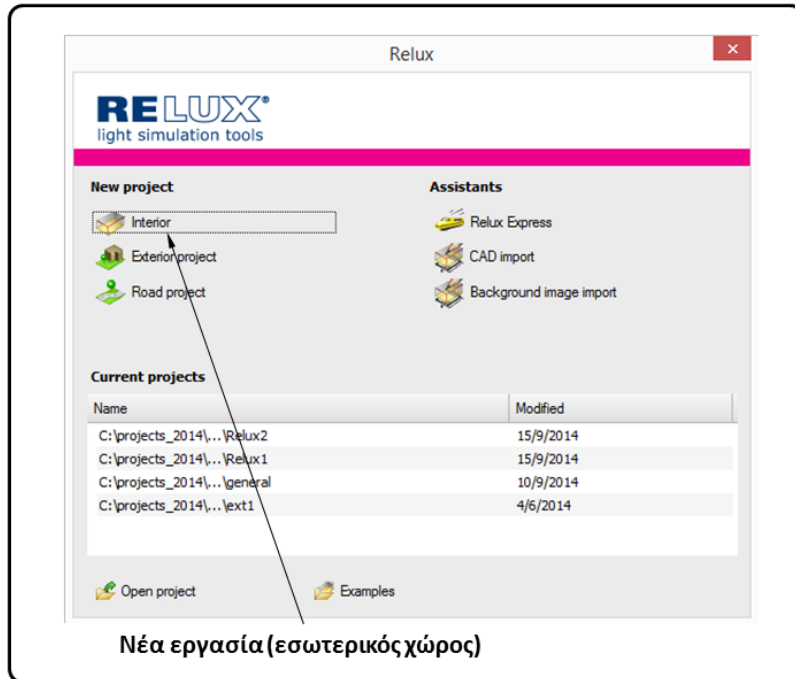


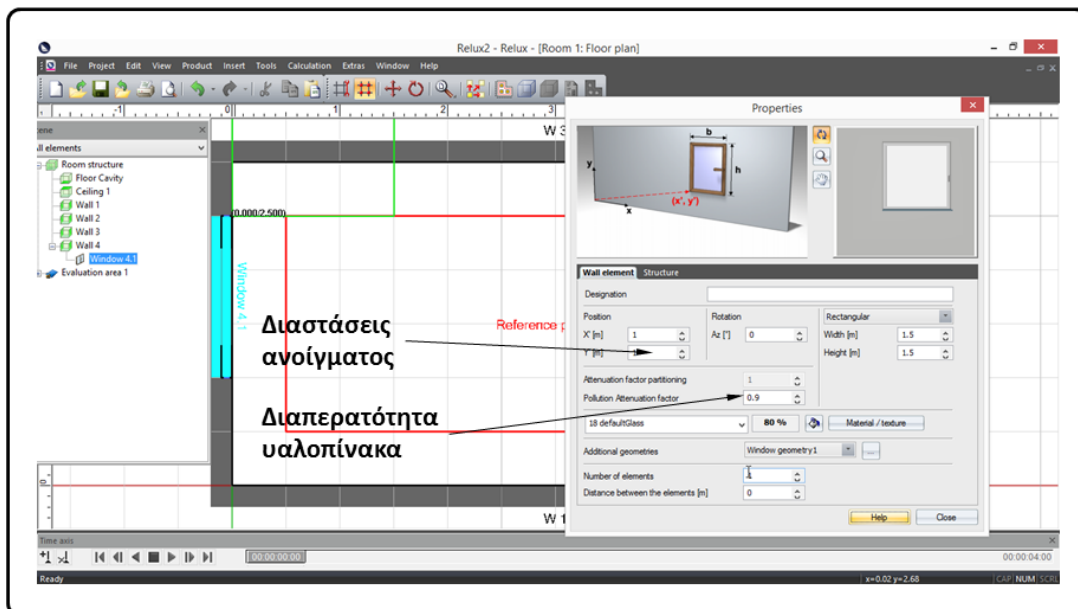
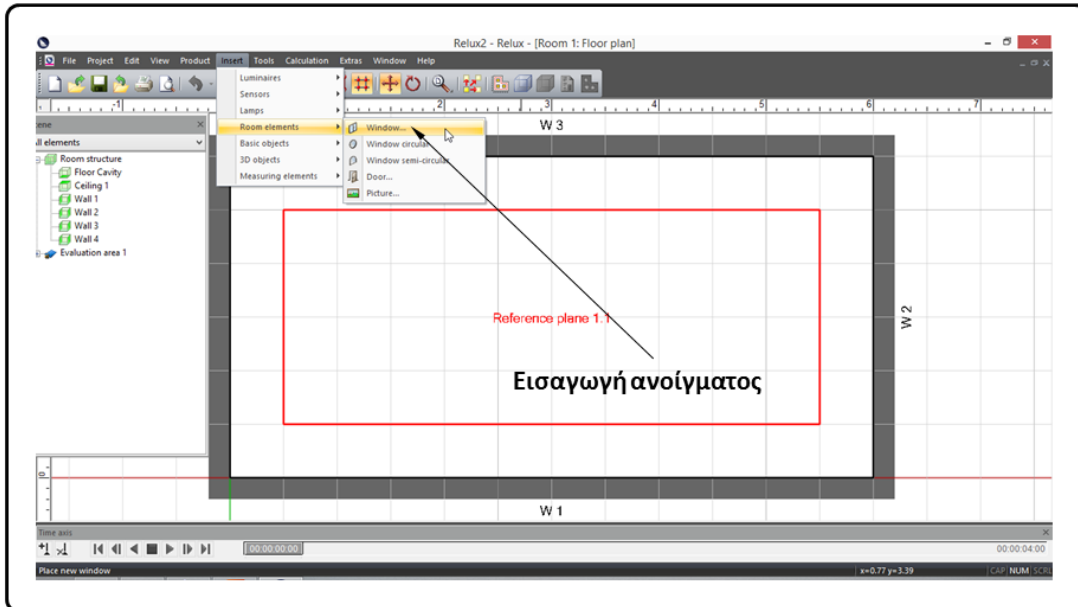


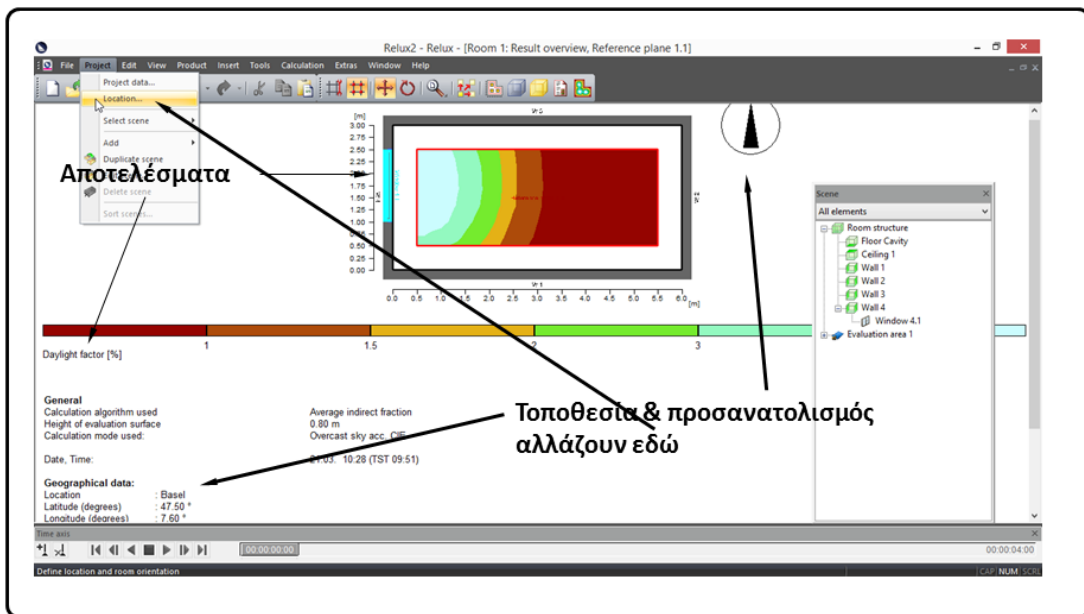
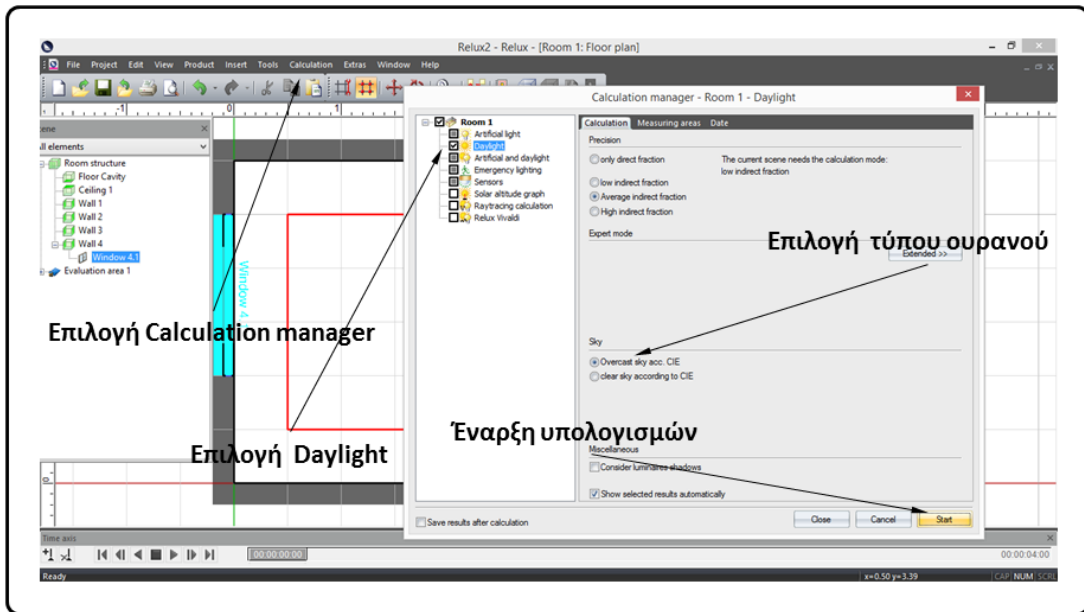


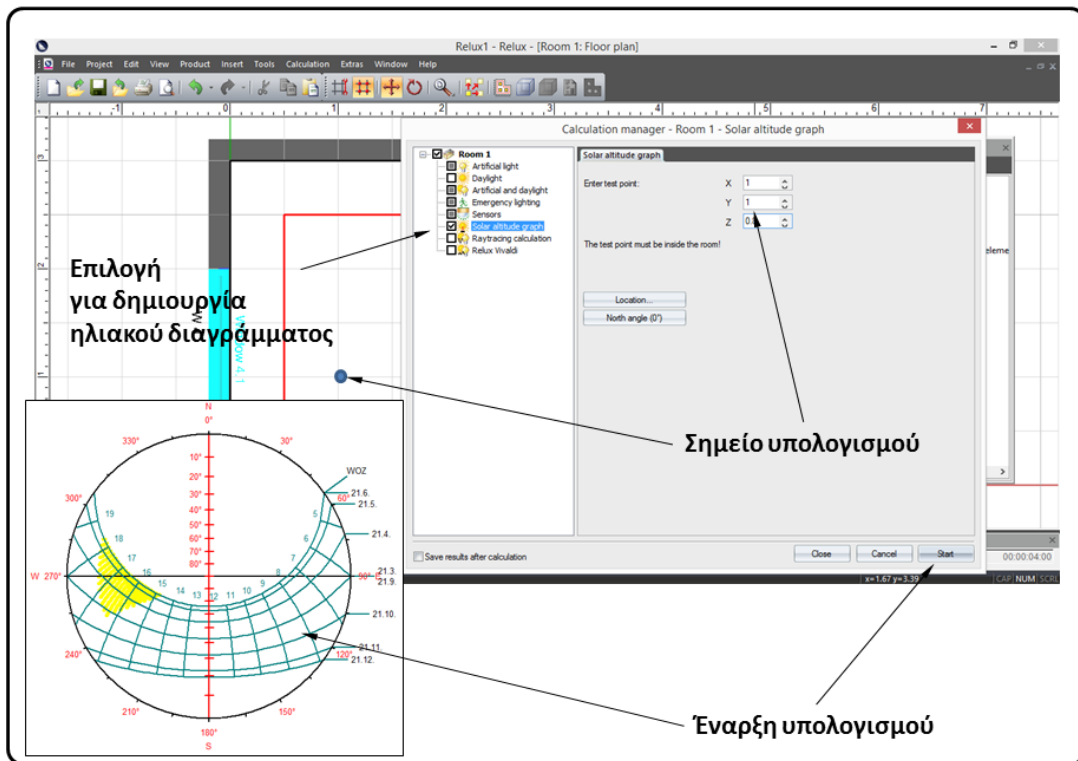
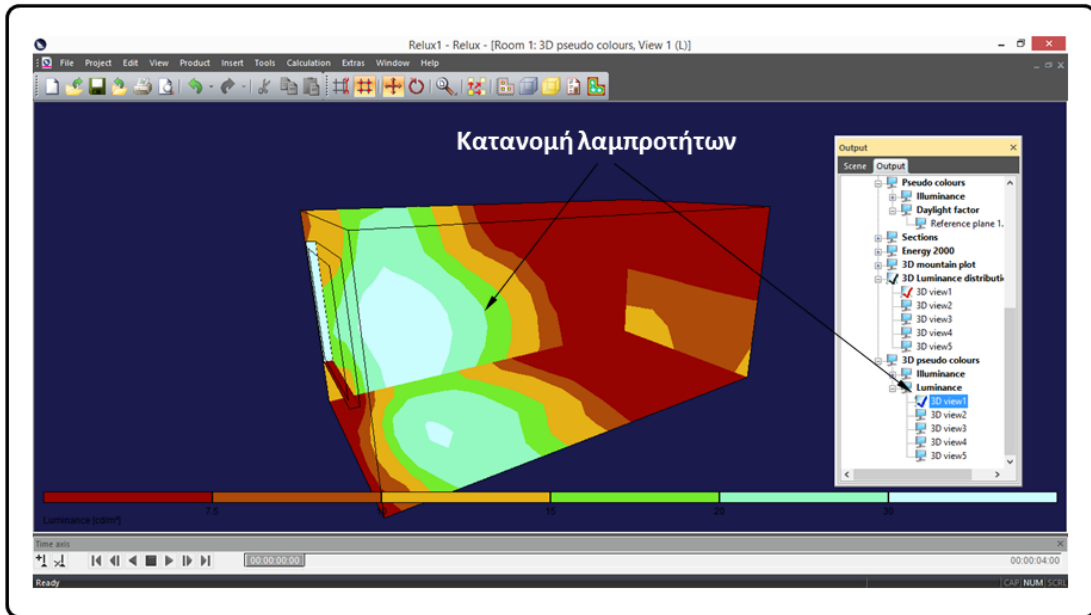


Relux









ISBN: 978-960-93-7943-4 ebook (PDF)