



**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**“ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ**  
**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”**



**Επιβλέπων Καθηγητής:**  
**Σπουδαστής:**

Ιωαννίδης Γεώργιος    Αν. Καθηγητής  
Πατσατζής Απόστολος

ΑΜ: 35125

**Αθήνα**

**Δεκέμβριος - 2012**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της πτυχιακής εργασίας Ιωαννίδη Γεώργιο Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρολογίας του Α.Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ για την εμπιστοσύνη του, την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την εκπόνηση της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους Ανδρέα Νάτση και Δημήτρη Κορναράκη για την βοήθεια τους.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	i
Περιεχόμενα .....	ii
Λίστα σχημάτων .....	iv
Λίστα πινάκων .....	viii
Summary .....	ix
Πρόλογος.....	1
<b>1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Φως” .....</b>	<b>3</b>
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Ιστορία του φωτός .....	4
1.3 Διαδικασία όρασης .....	5
1.3.1 Σκληρός χιτώνας και χοριοειδής μεμβράνη .....	7
1.3.2 Κερατοειδής.....	7
1.3.3 Ίριδα.....	7
1.3.4 Κόρη.....	8
1.3.5 Φακός.....	8
1.3.6 Υδατοειδές υγρό και υαλώδες σώμα (υγρό).....	8
1.3.7 Αμφιβληστροειδής χιτώνας.....	9
1.3.8 Εξωφθάλμιοι μυς .....	9
1.3.9 Ραβδία και Κωνία .....	9
1.4 Φύση και χαρακτηριστικά.....	10
<b>2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “ Διάδοση Φωτός ” .....</b>	<b>13</b>
2.1 Ήλιος και διάδοση .....	13
2.1.1 Ανάκλαση.....	14
2.1.2 Διάθλαση.....	15
2.1.3 Περίθλαση .....	16
2.1.4 Χρώμα επιφάνειας .....	17
2.2 Φωτομετρικά μεγέθη .....	18
2.2.1 Φωτεινή ροή .....	18
2.2.2 Ένταση φωτεινής πηγής.....	19
2.2.3 Φωτισμός της Επιφάνειας ή Φωτισμός .....	19
2.2.4 Λαμπρότητα.....	20
2.2.5 Θάμβωση.....	21
2.2.6 Χρωματική απόδοση.....	25
2.2.7 Ποσοτικά κριτήρια.....	26
2.3 Φυσικό φως και κλιματικά δεδομένα .....	28
2.4 Φυσικό φως και ανθρώπινη υγεία .....	34
2.4.1 Φως και κερκαδιανοί ρυθμοί.....	35
<b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Τεχνολογικά Ευρήματα” .....</b>	<b>39</b>
3.1 Επιρροές φυσικού φωτισμού .....	39
3.1.1 Τυποποιημένες ζώνες φυσικού φωτισμού.....	40
3.1.1.1 Πλευρικά ανοίγματα.....	41
3.1.1.2 Ανοίγματα οροφής.....	42
3.1.1.3 Αξιολόγηση πραγματικής χρήσης φυσικού φωτισμού.....	43
3.1.2 Συστήματα ελέγχου του τεχνητού φωτισμού .....	43
3.1.2.1 Συντελεστής επίδρασης φυσικού φωτισμού ( $F_D$ ).....	47
3.1.2.2 Συντελεστής επίδρασης χρηστών ( $F_O$ ).....	47

3.2	Φωτοενισχυτικές Τεχνικές .....	48
3.2.1	Εξελιγμένοι τύποι τζαμιών .....	49
3.2.2	Εξελιγμένοι τύποι σκιάστρων.....	51
3.2.3	Κινητά στόρια και περσίδες σκίασης.....	52
3.2.4	Συμπεράσματα από έρευνες σχετικά με την εφαρμογή διαφόρων τύπων σκιαδίων.....	54
3.2.5	Ράφια Φωτισμού .....	56
3.2.6	Πρισματικοί υαλοπίνακες.....	57
3.2.6.1	<i>Συμπεράσματα από έρευνες σχετικά με την εφαρμογή πρισματικών υαλοπινάκων..</i>	<i>59</i>
3.2.7	Υαλοπίνακες ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ .....	59
3.2.7.1	<i>Συμπεράσματα από έρευνες υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ .....</i>	<i>60</i>
3.2.7.2	<i>Χρήση των επεξεργασμένων με λέιζερ υαλοπινάκων για φωτισμό οροφής .....</i>	<i>61</i>
3.2.8	Ολογραφικοί υαλοπίνακες.....	61
3.2.9	Ανειδωλικά συστήματα οροφής .....	64
3.2.9.1	<i>Συμπεράσματα από ανειδωλικών συστημάτων οροφής.....</i>	<i>65</i>
3.2.9.2	<i>Ανειδωλικά συστήματα φωτισμού από την οροφή .....</i>	<i>66</i>
3.2.10	Ανειδωλικά σκιάδια .....	67
3.2.11	Φωτοσωλήνες.....	68
3.2.12	Υβριδικά συστήματα.....	71
<b>4<sup>ο</sup></b>	<b>Κεφάλαιο “ Στατιστικά και Μελέτες ” .....</b>	<b>72</b>
4.1	Συγκριτική μελέτη φωτοενισχυτικών τεχνικών .....	72
4.2	Έρευνα απόδοσης συστημάτων φυσικού φωτισμού .....	76
4.3	Έρευνα απόδοσης φωτοενισχυτικών διατάξεων .....	78
<b>5<sup>ο</sup></b>	<b>Κεφάλαιο “ Μελέτη Προσομοίωσης Φυσικού Φωτισμού” .....</b>	<b>82</b>
5.1	Μεθοδολογία.....	82
5.1.1	Χαρακτηριστικά του μοντέλου της σχολικής αίθουσας.....	82
5.1.2	Συστήματα ενίσχυσης φυσικού φωτισμού .....	82
5.1.3	Η προσομοίωση .....	85
5.2	Τα επτά (7) στάδια της μελέτης.....	86
5.2.1	Στάδιο 1.....	86
5.2.2	Στάδιο 2.....	86
5.2.3	Στάδιο 3.....	86
5.2.4	Στάδιο 4.....	87
5.2.5	Στάδιο 5.....	87
5.2.6	Στάδιο 6.....	87
5.2.7	Στάδιο 7.....	87
5.3	Αποτελέσματα – Συμπεράσματα .....	89
5.3.1	Στάδιο 1.....	89
5.3.2	Στάδιο 2.....	95
5.3.3	Στάδιο 3.....	105
5.3.4	Στάδιο 4.....	107
5.3.5	Στάδιο 5.....	109
5.3.6	Στάδιο 6.....	112
5.3.7	Στάδιο 7.....	116
<b>6<sup>ο</sup></b>	<b>Κεφάλαιο “ Συμπεράσματα ”.....</b>	<b>119</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>120</b>

## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Φως .....	3
Σχήμα 1.2 Φεγγαρόφως .....	4
Σχήμα 1.3 Λευκή πηγή και πράσινη πηγή προσπίπτουν σε επιφάνειες κόκκινες πράσινες και μπλε.....	6
Σχήμα 1.4 Διαγραμματική απεικόνιση του ματιού .....	7
Σχήμα 1.5 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του φωτός .....	10
Σχήμα 1.6 Πλήρης κλίμακα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος .....	11
Σχήμα 1.7 Τα έξι χρώματα του ορατού φάσματος.....	12
Σχήμα 2.1 Διαπερατότητα επιφάνειας .....	14
Σχήμα 2.2 Διάφορες κατηγορίες ανάκλασης, ανάλογα με την επιφάνεια πρόσπτωσης.....	14
Σχήμα 2.3 Διάθλαση φωτός.....	15
Σχήμα 2.4 Η κατανομή της ενέργειας που εκπέμπεται σε κάθε μήκος κύματος, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του Ιουνίου. Το φως είναι σχεδόν λευκό, εξαιτίας της περίπου ισόποσης κατανομής. (Πηγή:[53]).....	16
Σχήμα 2.5 Η κατανομή της ενέργεια που εκπέμπεται σε κάθε μήκος κύματος, όταν το φυσικό φως εισέρχεται από βορεινό παράθυρο. Ως αποτέλεσμα, το φως έχει μια κυανή απόχρωση. (Πηγή: [53]).....	16
Σχήμα 2.6 Το χρώμα μιας επιφάνειας αποτελεί το γινόμενο της κατανομής της ενέργειας του φυσικού φωτός σε κάθε μήκος κύματος επί το βαθμό ανακλαστικότητας της επιφάνειας επίσης για κάθε μήκος κύματος.(Πηγή:[53]) .....	17
Σχήμα 2.7 Η θερμοκρασία χρώματος για διάφορες γνωστές φωτεινές πηγές.(Πηγή [70]) .....	18
Σχήμα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση των φωτομετριών μεγεθών.....	19
Σχήμα 2.9 Ο φωτισμός επιφάνειας $E (lx)$ σε απόσταση $d$ είναι αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της απόστασης $d$ .....	21
Σχήμα 2.10 Απευθείας θάμβωση: αποδεκτές τιμές λαμπρότητας ανάλογα με τη θέση της φωτεινής.....	22
Σχήμα 2.11 Παράδειγμα έμμεσης ανακλώμενης θάμβωσης (Πηγή:[ <a href="http://www.nyserda.org/sclp2/technicalGuide/terminology/glare.asp?section">http://www.nyserda.org/sclp2/technicalGuide/terminology/glare.asp?section</a> ]) .....	22
Σχήμα 2.12 Θάμβωση «πέπλου» σε οριζόντια επιφάνεια.(Πηγή: [19]) .....	22
Σχήμα 2.13 Η σχέση μεταξύ δείκτη θάμβωσης φυσικού φωτισμού (DGI) και μέγεθος παραθύρων, για τιμές λαμπρότητας ουρανού μεταξύ 1.600 και 8.900 cd/m <sup>2</sup> . Η θέαση το παράθυρο είναι απευθείας (δηλαδή υπό γωνία 90°), από απόσταση 6μ., σε ένα χώρο διαστάσεων 12μ. x 12μ. x 6μ. και μέσης ανακλαστικότητας επιφανειών 0,4. ....	24
Σχήμα 2.14 α) Ειδική διάταξη αξιολόγησης της χρωματικής απόδοσης του φωτισμού. β) Χρώματα κάτω από φωτισμό διαφορετικών δεικτών χρωματικής απόδοσης. ....	25
Σχήμα 2.15 Ο Συντελεστής Φυσικού Φωτισμού ισούται με $E_i / E_{ox} 100 \%$ .....	27
Σχήμα 2.16 α) Παρουσιάζονται οι τρεις παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ποσότητα του φυσικού φωτισμού σε ένα σημείο εσωτερικού χώρου και κατά συνέπεια ο Σ.Φ.Φ. στο σημείο αυτό. β) Η σχετική συνεισφορά του φωτός από τον ουρανό, καθώς και του εξωτερικά και του εσωτερικά ανακλώμενου, στο φωτισμό ενός τυπικού χώρου με εξωτερικό εμπόδιο. ....	28
Σχήμα 2.17 Διαθεσιμότητα του φυσικού φωτός στην ύπαιθρο, ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους του τόπου. (Πηγή:[39]) .....	29
Σχήμα 2.18 Τιμές λαμπρότητας στο ζενίθ του ουράνιου θόλου ως συνάρτηση του ηλιακού ύψους, για α) καθαρό και β) νεφοσκεπή ουρανό, σύμφωνα με τον Nakamura. (Πηγή:[19])..	30

Σχήμα 2.19 Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων τιμών φωτισμού σε οριζόντιο επίπεδο στη διάρκεια ενός χρόνου. α) Η περίπτωση της Αθήνας και β) Η περίπτωση της πόλης Bergen στη Νορβηγία. (Πηγή:[21]) .....	31
Σχήμα 2.20 Φωτογραφίες του ουράνιου θόλου που εμφανίζουν την κατανομή λαμπρότητας σε τρεις περιπτώσεις. (Πηγές:[21],[53]) .....	32
Σχήμα 2.21 Σύμφωνα με τους Leaman και Bordass [2000], η παραγωγικότητα των εργαζομένων αυξάνει όσο μικραίνει η απόσταση μεταξύ τη θέσης εργασίας και παραθύρου. (Πηγή: [22]).....	35
Σχήμα 2.22 Σύγκριση μεταξύ α) τιμών Σ.Φ.Φ., β) ποσοστών Αυτονομίας σε Φυσικό Φωτισμό και γ) ποσοστών Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού, σε μελέτη των Nabil και Mardaljevic . (Πηγή: [59]).....	38
Σχήμα 3.1 Σύγκριση μεταξύ α) τιμών Σ.Φ.Φ., β) ποσοστών Αυτονομίας σε Φυσικό Φωτισμό και γ) ποσοστών Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμου. (Πηγή: [59]) .....	40
Σχήμα 3.2 Ζώνη φυσικού φωτισμού από πλευρικά ανοίγματα χώρων .....	41
Σχήμα 3.3 Ζώνη φυσικού φωτισμού από ανοίγματα οροφής (Πηγή : [10]) .....	42
Σχήμα 3.4 Απλοποιημένη παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας ενός συστήματος σύζευξης. ....	44
Σχήμα 3.5 Μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά μήνα. ....	46
Σχήμα 3.6 Μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας.....	46
Σχήμα 3.7 .....	50
Σχήμα 3.8 Σύγκριση τιμών διαπερατότητας και ανακλαστικότητας για .....	51
Σχήμα 3.9 Ηλεκτροκίνητα σκιαδία – ανακλαστήρες φωτός σε κτίριο γραφείων στη Γερμανία .....	52
Σχήμα 3.10 Ενδεικτική λειτουργία των κλασσικών σκιαδίων .....	53
Σχήμα 3.11 Το σύστημα «ψάρι» αποτρέπει τη θάμβωση και ανακατευθύνει τμήμα του φυσικού .....	53
Σχήμα 3.12 α) Η λειτουργία των ενσωματωμένων σκιαδίων σε διπλό υαλοπίνακα (προϊόν ..	54
Σχήμα 3.13 α) Ενδεικτική λειτουργία ενός εξωτερικού οριζόντιου ραφιού φωτισμού.....	56
Σχήμα 3.14 Οι πρισματικοί υαλοπίνακες μπορούν να έχουν πολλαπλή λειτουργία, ανάλογα με το .....	58
Σχήμα 3.15 Οι πρισματικοί υαλοπίνακες απορρίπτουν ή ανακατευθύνουν το φως, ανάλογα με τις ανάγκες του χώρου.(Πηγή: [46]) .....	58
Σχήμα 3.16 Ενδεικτική λειτουργία των υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λείζερ .....	59
Σχήμα 3.17 Η πολλαπλή χρήση των υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λείζερ:σκίαση, ανακατεύθυνση του φωτός ή συνδυασμός των δύο.(Πηγές: [21],[44]) .....	60
Σχήμα 3.18 Η λειτουργία των υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λείζερ για φωτισμό οροφής.....	61
Σχήμα 3.19 α) Σχηματική λειτουργία ενός ολογραφικού υαλοπίνακα .....	62
Σχήμα 3.20 Περιπτώσεις χρήσης ολογραφικών υαλοπινάκων σε .....	63
Σχήμα 3.21 .....	63
Σχήμα 3.22 Οι ολογραφικοί υαλοπίνακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως «επιλεκτικά» σκίαστρα τα οποία αποκόπτουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ενώ είναι διαπερατά στη διάχυτη.(Πηγή: [45]).....	64
Σχήμα 3.23 α) Σχηματική λειτουργία ενός ανειδωλικού συστήματος οροφής .....	65
Σχήμα 3.24 Τομή ενός ανειδωλικού συστήματος φωτισμού από την οροφή .....	67
Σχήμα 3.25 α) Σχηματική λειτουργία των ανειδωλικώνσκιαδίων .....	68
Σχήμα 3.26 Σχηματική λειτουργία ενός φωτοσωλήνα .....	69
Σχήμα 3.27 Παραδείγματα χρήσης φωτοσωλήνων σε κτίρια .....	69
Σχήμα 3.28 Ο οριζόντιος φωτοσωλήνας που μελετήθηκε μέσω προσομοίωσης στο Πανεπιστήμιο της Βενετίας προσφέρει ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού σε όλο το χώρο σε συνθήκες καθαρού ουρανού με ήλιο(Πηγή: [26]) .....	70

Σχήμα 3.29 α) Σχηματική διάταξη του συστήματος.....	71
Σχήμα 4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πειραματικών κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα του BRE.....	73
Σχήμα 4.2 Φωτογραφία των πειραματικών κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα.....	77
Σχήμα 4.3 Σχηματικές τομές των διατάξεων που μελετήθηκαν: α) η περίπτωση του απλού παραθύρου β) το ράφι φωτισμού και γ) ο ανειδωλικός συλλέκτης.....	79
Σχήμα 4.4 Διαγράμματα των τιμών του Δείκτη Θάμβωσης Φυσικού Φωτισμού DGI με τις αντίστοιχες εικόνες από το πρόγραμμα RADIANCE για την 21η Δεκεμβρίου στις 12:00 και στις 16:00, σε νότιο προσανατολισμό, στο Τελ Αβίβ.....	80
Σχήμα 5.1 Η κάτοψη της σχολικής αίθουσας που προσομοιώθηκε στο RADIANCE.....	84
Σχήμα 5.2 Η τομή της σχολικής αίθουσας που προσομοιώθηκε στο RADIANCE.....	85
Σχήμα 5.3 Οι έξι βασικοί «τύποι» ραφιών φωτισμού καθένας από τους οποίους μελετήθηκε σε δύο.....	85
Σχήμα 5.4 Οι περιπτώσεις χρήσης τωνημιδιαφανών περσίδων.....	85
Σχήμα 5.5 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών.....	89
Σχήμα 5.6 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών.....	90
Σχήμα 5.7 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «60» (Πηγή: [7]).....	90
Σχήμα 5.8 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «60/20» (Πηγή: [7]).....	91
Σχήμα 5.9 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών.....	92
Σχήμα 5.10 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «40/60» (Πηγή: [7]).....	92
Σχήμα 5.11 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού.....	93
Σχήμα 5.12 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις του ραφιού φωτισμού τύπου.....	94
Σχήμα 5.13 Σε συνθήκες ηλιοφάνειας, τα ράφια φωτισμού ίδιου βάθους προσφέρουν, σε γενικές γραμμές, τον ίδιο σκιασμό σε νότια ανοίγματα. (Πηγή: [7]).....	95
Σχήμα 5.14 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 12°) (Πηγή: [7]).....	96
Σχήμα 5.15 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 12°) (Πηγή: [7]).....	97
Σχήμα 5.16 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28 °) (Πηγή: [7]).....	97
Σχήμα 5.17 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28 °) (Πηγή: [7]).....	98
Σχήμα 5.18 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 28,1°) (Πηγή: [7]).....	98
Σχήμα 5.19 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 28,1°) (Πηγή: [7]).....	99
Σχήμα 5.20 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51,1°) (Πηγή: [7]).....	99
Σχήμα 5.21 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51,1°) (Πηγή: [7]).....	100
Σχήμα 5.22 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 43,9°) (Πηγή: [7]).....	100
Σχήμα 5.23 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 43,9°) (Πηγή: [7]).....	101

Σχήμα 5.24 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 74,4°) (Πηγή: [7]).....	101
Σχήμα 5.25 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 74,4°) (Πηγή: [7]).....	102
Σχήμα 5.26 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για κατοπτρικά και διαχυτικά ράφια φωτισμού σε κλίση 10° 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28°) (Πηγή: [7]) .....	103
Σχήμα 5.27 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για κατοπτρικά και διαχυτικά ράφια φωτισμού σε κλίση 10° 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51,1°) (Πηγή: [7]) .....	104
Σχήμα 5.28 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για κατοπτρικά και διαχυτικά ράφια φωτισμού σε κλίση 10° 21 Ιουνίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 74,4°) (Πηγή: [7]) .....	104
Σχήμα 5.29 Τα δύο εξωτερικά εμπόδια που μελετήθηκαν στο ΣΤΑΔΙΟ 3.....	105
Σχήμα 5.30 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση του Εμποδίου 1 (Πηγή: [7]).....	106
Σχήμα 5.31 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση του Εμποδίου 2 .....	107
Σχήμα 5.32 Στο ΣΤΑΔΙΟ 4 μελετήθηκαν δύο φεγγίτες διαφορετικών υψών σε συνδυασμό με δύο παράπλευρους διαδρόμους διαφορετικού πλάτους (Πηγή: [7]).....	108
Σχήμα 5.33 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση του κατοπτρικού ραφιού φωτισμού «80» στα 2,00μ. από το δάπεδο και σε κλίση 10°, σε συνδυασμό με φεγγίτες διαφορετικών υψών και παράπλευρων διαδρόμων διαφορετικού πλάτους (Πηγή: [7]) .....	108
Σχήμα 5.34 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση χρήσης περσίδων σκίασης σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης κουρτίνας 21 Δεκεμβρίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 12 °) .....	111
Σχήμα 5.35 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση χρήσης περσίδων σκίασης σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης κουρτίνας 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28 °) .....	111
Σχήμα 5.36 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση χρήσης περσίδων σκίασης σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης κουρτίνας 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51 °) .....	112
Σχήμα 5.37 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφιού φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (Πηγή: [7]) .....	113
Σχήμα 5.38 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφιού φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7]) .....	113
Σχήμα 5.39 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφιού φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Μαρτίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7]) .....	114
Σχήμα 5.40 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφιού φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Ιουνίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7]) .....	115
Σχήμα 5.41 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας του ραφιού φωτισμού τύπος «80» σε κλίση 10°, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (Πηγή: [7]) .....	116
Σχήμα 5.42 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας του ραφιού .....	117
Σχήμα 5.43 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας του ραφιού φωτισμού τύπος «80» σε κλίση 10°, σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Μαρτίου, ώρα 12:00) .....	117



## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Μέγιστοι αποδεκτοί δείκτες θάμβωσης για τεχνητό και φυσικό φωτισμό .....	23
Πίνακας 2.2 (Πηγή: [70]).....	26
Πίνακας 2.3 Οι νέοι 15 τύποι ουρανού.....	33
Πίνακας 2.4 Τα τρία εύρη τιμών φυσικού φωτισμού .....	37
Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές του συντελεστή επίδρασης φυσικού φωτισμού λόγω χρήσης αυτοματισμών ελέγχου (Πηγή : [10]) .....	47
Πίνακας 3.2 Τυπικές τιμές του συντελεστή επίδρασης παρουσίας ή απουσίας χρηστών (Πηγή : [10]).....	48
Πίνακας 4.1 Αλλαγές στην ελάχιστη τιμή φωτισμού (E <sub>min</sub> ) στο χώρο.....	74
Πίνακας 4.2 Αλλαγές στην ομοιομορφία της κατανομής του φυσικού φωτισμού στο χώρο. .	75
Πίνακας 4.3 Αλλαγές στην τιμή του Δείκτη Θάμβωσης Φυσικού Φωτισμού DGI (Daylight Glare Index).....	76
Πίνακας 5.1 Συνοπτική περιγραφή των επτά σταδίων της μελέτης προσομοίωσης φυσικού φωτισμού. (Πηγή: [7]) .....	87

# SUMMARY

The reduction of energy consumption is a significant goal to be accomplished globally. Electrical Energy is the cornerstone of modern civilization. 19 per cent of electrical energy is being used for lighting. As a result, lighting is a major factor in energy consumption. At first the physics of lighting are being discussed. Next the ways of maximizing the natural lighting in buildings are being presented. Moreover, tests and results operated through the software Radiance show the efficiency of new methods in natural lighting. The review of the existing methods proved that the selection of the most appropriate method should take into account the climate and the environmental conditions around the building. Furthermore, in order to avoid glaring, the direction of light through mirrors should focus only on the desired target.

**Keywords:** natural lighting, lighting of buildings, reduction of energy consumption, Radiance, glaring

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί πλέον σημαντικό στόχο όχι μόνο σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο αλλά και σε εθνικό. Η παραγωγή και η ορθολογική κατανομή ενέργειας εξακολουθούν βέβαια να αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα θέματα που καλείτε κάθε χώρα να αντιμετωπίσει καθημερινά όσον αφορά στην οικονομική της ανάπτυξη και στη βελτίωση του επιπέδου ζωής των κατοίκων της καθώς και στη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ειδικότερα η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί τη βάση της οικονομίας και της σύγχρονης διαβίωσης. Ο φωτισμός αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες σπατάλης ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή φωτισμού αγγίζει συνολικά σήμερα το 19% ([7]).

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται ιστορικά, με το πέρασμα των χρόνων, οι προσπάθειες των επιστημόνων να χαρακτηρίσουν την φύση του φωτός. Γίνεται αναφορά στην κατανομή του φωτός ως κύμα, το οποίο αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος, στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα καθώς και ο τρόπος με τον οποίον ο οφθαλμός του ανθρώπου αντιδρά σε αυτό με αποτέλεσμα την όραση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι μονάδες με τις οποίες περιγράφουμε το φως, ο τρόπος με τον οποίο προσπίπτει, ανακλάται και διαθλάται στο περιβάλλον. Αναφέρεται η επίδραση των κλιματικών δεδομένων στην μετάδοση του καθώς και η αναγκαιότητα αλλά και η σωστή κατανομή του φωτός για την υγεία του ανθρώπου.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται ο τρόπος εισχώρησης του φυσικού φωτός στα κτήρια και η τυποποιημένη περιγραφή των ζωνών φυσικού φωτισμού. Ακόμα περιγράφονται τεχνολογικά ευρήματα και διατάξεις με τα οποία μπορούμε να επιτύχουμε αύξηση του εισερχόμενου φυσικού φωτισμού στα κτήρια αλλά και την σωστή κατανομή του στο χώρο και στο επίπεδο εργασίας .

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται μελέτες που αφορούν την σύγκριση διαφόρων φωτοενισχυτικών διατάξεων. Οι μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε ερευνητικά κέντρα και τα στατιστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σε συγκριτικούς πίνακες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πειραματική διαδικασία στην οποία γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφόρων τεχνολογικών ευρημάτων αύξησης φυσικού φωτισμού. Η πειραματική διαδικασία αναλύεται σε στάδια όπου μεταβάλλονται παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ενισχυτικών διατάξεων. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού RADIANCE.

**Λέξεις κλειδιά:** φυσικός φωτισμός, τεχνικός φωτισμός, φωτισμός κτηρίων, εξοικονόμηση ενέργειας, φωτοενισχυτικές τεχνικές.

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## “ΦΩΣ ”

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εξιστόρηση και προσπάθεια κατανόησης του φωτός. Αναφέρεται η σημαντικότητα του στην καθημερινότητα μας, η διαδικασία με την οποία ο ανθρώπινος οργανισμός αντιλαμβάνεται την όραση καθώς και κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτός.

### 1.1 Εισαγωγή

Το φως είναι ένα φυσικό φαινόμενο που κανονίζει όλες τις δραστηριότητες μας στη Γη. Την ημέρα η μόνη πηγή φωτός είναι αναμφισβήτητα ο Ήλιος και την νύχτα το φως της Σελήνης. Δεν πρέπει επομένως να φανεί παράδοξο ότι από αρχαιοτάτων χρόνων οι άνθρωποι προσπάθησαν να παράγουν φως με τεχνητό τρόπο. Τέτοιες πηγές από την παλιά εποχή που παρήγαγαν φωτισμό είναι : η φωτιά των ξύλων, οι λαμπτήρες με λάδι, κεριά, ενώ σήμερα οι ηλεκτρικές πηγές φωτός είναι τα ηλεκτρικά νήματα πυρακτώσεως των λαμπτήρων, οι λαμπτήρες αερίων σε μεγάλες ποικιλίες και οι σωλήνες εκφορτίσεως.



Σχήμα 1.1 Φως



Σχήμα 1.2 Φεγγαρόφως

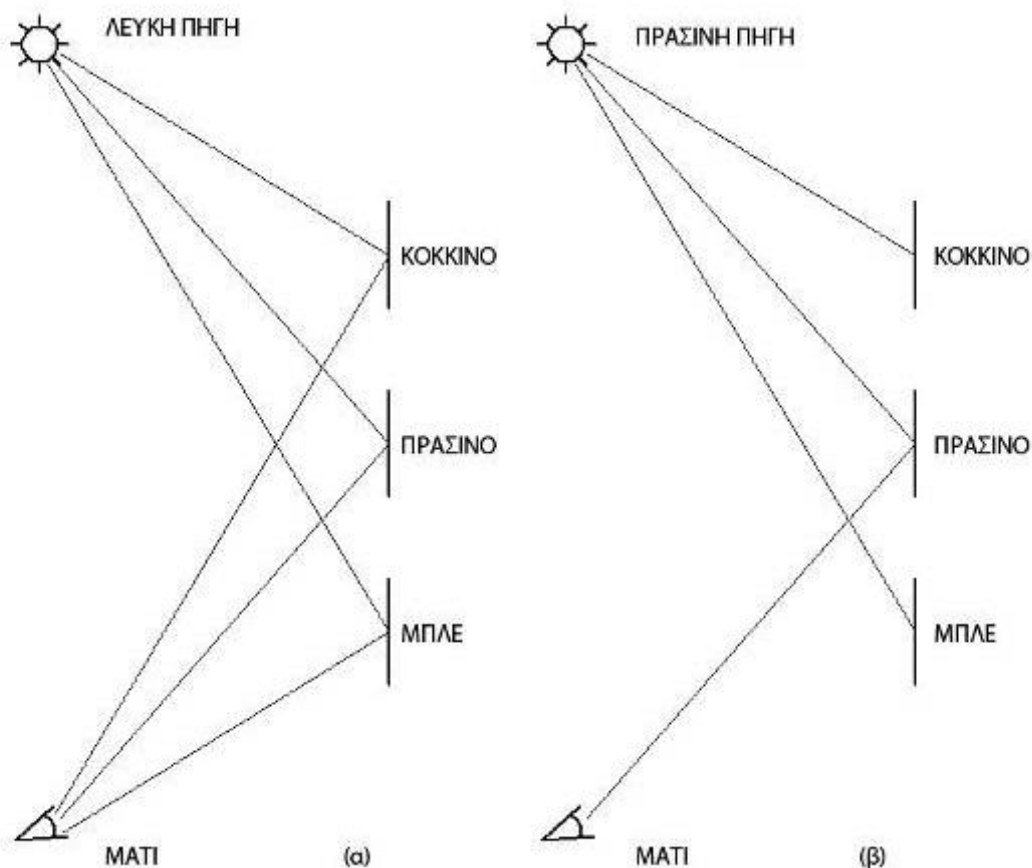
## 1.2 Ιστορία του φωτός

Η φύση του φωτός αποτελεί ένα από τα πολυπλοκότερα και ελκυστικότερα θέματα που απασχόλησαν ποτέ τους επιστήμονες. Οι αρχαίοι Έλληνες πρώτοι προσπάθησαν να εξηγήσουν τι είναι φως, οι οποίοι υπέθεσαν ότι τα μάτια εκπέμπουν ακτινοβολίες προς τα γύρω αντικείμενα και έτσι τα βλέπουμε. Δηλαδή υπεστήριζαν το αντίθετο απ’ ότι πράγματι συμβαίνει. Έπειτα ο Αριστοτέλης, αλλά και άλλοι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι της εποχής εκείνης πρώτον μεν απέρριψαν την παραπάνω πλάνη και εισήγαγαν την θεωρία ότι το φως συνίσταται από πολύ μικρά στοιχειώδη σωματίδια που εκπέμπονται από τις πηγές φωτός κατά συνεχή τρόπο με το ένα πολύ κοντά στο άλλο και εισέρχονται στο ανθρώπινο μάτι και δημιουργούν την αίσθηση του φωτός. Μετέπειτα σχεδόν ταυτόχρονα τον 17ο αιώνα, ο Isaac Newton και ο Christian Huygens ανέπτυξαν θεωρίες που για πολλά χρόνια αντιμάχονταν: - Σύμφωνα με τον Newton, τα φωτεινά σώματα εκπέμπουν σωματίδια, τα οποία κινούνται ευθύγραμμα και με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός ([Βικιπαίδεια, λήμμα «φως», 04/11/2008]). Από την άλλη, σύμφωνα με τον Huygens, το φως είναι κύματα που μεταδίδονται μέσω του αιθέρα, ο οποίος δεν γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο ([70]). Οι δύο αυτές θεωρίες παρουσίαζαν κάποια κενά καθώς δεν μπορούσαν να ερμηνεύσουν κάποιες πλευρές του θέματος, όπως τη φύση του μέσου μετάδοσης. Το 1870 ο James Maxwell απέδειξε θεωρητικά την ηλεκτρομαγνητική φύση των κυμάτων του φωτός, θεωρία που επικράτησε μέχρι το τέλος του 19ου αιώνα. Στις αρχές του 20ου αιώνα προστέθηκαν νέοι

προβληματισμοί στο θέμα της φύσης του φωτός. Παρατηρήθηκε πως όταν φωτεινή δέσμη μικρού μήκους κύματος προσπέσει σε μεταλλική πλάκα αποσπώνται από αυτήν ηλεκτρόνια και μάλιστα αμέσως, όσο ασθενές κι αν είναι το φως. Όμως για να αποσπαστεί ένα ηλεκτρόνιο απαιτείται κάποια ενέργεια. Αν επομένως το φως είναι κύμα, που έχει το χαρακτηριστικό της συνέχειας, θα έπρεπε να περάσει κάποιος χρόνος μέχρι αυτό το ηλεκτρόνιο να απορροφήσει ενέργεια για να αποσπαστεί. Τη λύση στο πρόβλημα έδωσε το 1900 ο φυσικός και καθηγητής του Πανεπιστημίου του Βερολίνου Mack Planck, θέτοντας τη βάση της θεωρίας των κβάντων με την οποία ανατράπηκε η μέχρι τότε αντίληψη περί της συνέχειας της ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το φως ως ενέργεια ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου εκπέμπεται και διαδίδεται στο χώρο κατά στοιχειώδη ποσά - δηλαδή ούτε συνέχεια ούτε ομοιόμορφα κατ' έκταση - τα οποία καλούνται κβάντα ενέργειας (αργότερα ονομάστηκαν φωτόνια). Η νέα αυτή θεωρία κατόρθωσε να εξηγήσει ικανοποιητικά όλα τα φυσικά φαινόμενα, και έτσι άνοιξε νέους δρόμους στον τομέα της φυσικής ([70]). Το 1905, ο Albert Einstein ολοκλήρωσε την περιπέτεια της φύσης του φωτός, συνδυάζοντας τις παλιότερες θεωρίες. Σύμφωνα με αυτόν, το φως έχει και σωματιδιακό και κυματικό χαρακτήρα. Σήμερα είναι πλέον κοινώς αποδεκτή η δυαδικότητα κύματος – σωματιδίου του φωτός καθώς και το γεγονός ότι κάποιες ιδιότητές του εξηγούνται μέσω της σωματιδιακής θεωρίας και κάποιες μέσω της κυματικής ([70]).

### **1.3 Διαδικασία όρασης**

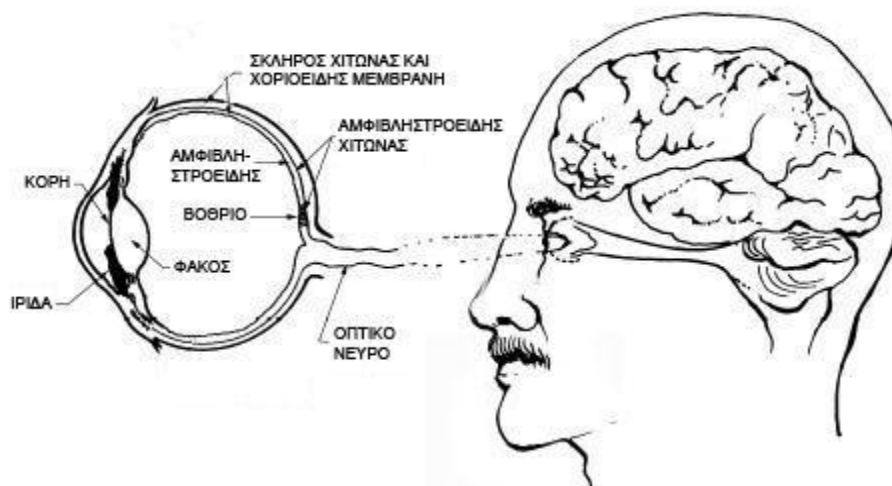
Προαπαιτούμενο είναι να υπάρχει μια πηγή όπως ο ήλιος, μια φλόγα ή μια από τις πολλές διαθέσιμες ηλεκτρικές πηγές φωτός. Έπειτα είναι κάποιο είδος φωτός που μπορεί να είναι ένα φυσικό ή κατασκευασμένο αντικείμενο που ανακλά ή μεταφέρει φως στο μάτι ή απορροφά επίσης φως. Για παράδειγμα το παράθυρο, η σελήνη, η σελίδα ενός βιβλίου είναι περιπτώσεις τέτοιου φωτός, διότι αλλάζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας από την πηγή.



Σχήμα 1.3 Λευκή πηγή και πράσινη πηγή προσπίπτουν σε επιφάνειες κόκκινες πράσινες και μπλε

Αυτό διευκρινίζεται στο παραπάνω σχήμα 1.3 Στο σχήμα 1.3α λευκό φως που περιέχει όλα τα φασματικά χρώματα προσπίπτει σε επιφάνειες κόκκινη, πράσινη και μπλε. Το μάτι βλέπει τρία κύματα φωτός που ανακλώνται από τις επιφάνειες και είναι το κόκκινο από την κόκκινη επιφάνεια, το πράσινο από την πράσινη επιφάνεια και μπλε από την μπλε επιφάνεια αντιστοίχως. Οπότε η κόκκινη επιφάνεια εμφανίζεται κόκκινη στον θεατή, η πράσινη πράσινη και η μπλε μπλε. Στο σχήμα 1.3β η πηγή έχει μόνο πράσινα μήκη κύματος. Πράσινο φως ανακλάται στο μάτι από την πράσινη επιφάνεια, η οποία τότε εμφανίζεται πράσινη στον παρατηρητή. Οι άλλες δυο επιφάνειες εμφανίζονται σκούρες, διότι δεν ανακλάται κανένα φως στο μάτι από αυτές. Έτσι ενώ αυτά είναι τα φασματικά χαρακτηριστικά αμοτέρων των πηγών, ο τροποποιητής είναι που ορίζει τι αντιλαμβάνεται ο θεατής. Το μάτι το οποίο είναι ο δέκτης του φωτός και επίσης στέλνει πληροφορίες στον επεξεργαστή αυτών που είναι ο εγκέφαλος. Ο εγκέφαλος είναι ο κρίκος ερμηνείας στην διαδικασία της οράσεως. Αυτός λαμβάνει τα σήματα από το οπτικό νεύρο, αποκρυπτογραφεί αυτά και έτσι εφοδιάζει τον θεατή με αντίληψη και κατανόηση του θεώμενου αντικειμένου ([11]).





Σχήμα 1.4 Διαγραμματική απεικόνιση του ματιού

Το μάτι δεικνύεται διαγραμματικά στο Σχήμα 1.4 και θα το περιγράψουμε λεπτομερώς.

### 1.3.1 Σκληρός χιτώνας και χοριοειδής μεμβράνη

Αυτά είναι το εξωτερικό περίβλημα του οφθαλμού. Ο σκληρός χιτώνας διατηρεί το μάτι σε σχεδόν σφαιρικό σχήμα περίπου 2,54cm σε διάμετρο. Μπροστά σχηματίζει το λευκό του ματιού. Ο χοριοειδής είναι το μαύρο κάλυμμα που καλύπτει τον σκληρό χιτώνα εσωτερικά. Απορροφά το αδέσποτο φως μέσα στο μάτι και έτσι κάνει την όραση πιο οξεία, υπηρετώντας τον ίδιο σκοπό όπως το μαύρο εσωτερικό μιας φωτογραφικής μηχανής.

### 1.3.2 Κερατοειδής

Αυτός είναι το πρώτο από τα τρία κύρια μέρη της οπτικής συσκευής του οφθαλμού. Είναι μια εξογκωμένη διαφανής μεμβράνη στο εμπρόσθιο μέρος του οφθαλμού, αποτελούμενη από 5 στιβάδες. Ο κερατοειδής έχει ακτίνα καμπυλότητας 7.5mm περίπου, πάχος 0.4mm και δείκτη διαθλάσεως 1.37. Αυτός έχει συγκεκριμένη εστιακή απόσταση και παρέχει 70% της συγκλίνουσας ισχύος του ματιού. Απορροφά απ' όλα τα μήκη κύματος που είναι λιγότερα από 295nm, μήκος κύματος υπεριώδους στο οποίο ο αέρας γίνεται αδιαφανής.

### 1.3.3 Ίριδα

Αυτή είναι η συνέχεια του χοριοειδούς στο εμπρός τμήμα του ματιού. Είναι το χρωματιστό μέρος του ματιού (μπλε, καφέ, πράσινο κ.λπ) και αυτή παίζει τον ίδιο ρόλο όπως ένα διάφραγμα στην κάμερα που ελέγχει το μέγεθος του ανοίγματος δια μέσου του οποίου επιτρέπεται η είσοδος του φωτός προστατεύοντας έτσι το μάτι από υπερβολικό φως.

Σημειωτέον ότι το μάτι προστατεύεται επίσης πολύ καλά από υπερβολικό φως από την επάνω μεριά με το φρύδι, το βλέφαρο και τις βλεφαρίδες, αλλά δεν προστατεύεται τόσο καλά από την κάτω πλευρά.

#### 1.3.4 Κόρη

Αυτή είναι ένα μικρό κυκλικό άνοιγμα της κόρης είναι 3 έως 4mm και μεταβάλλεται από 8mm για αμυδρό φως έως 2mm για πολύ λαμπρό φως, πράγμα που σημαίνει ότι η οπτική προσαρμογή του ματιού είναι 16:1. Δεδομένου ότι η καθημερινή ένταση φωτισμού μεταβάλλεται από  $10^7$  έως 1, προκύπτει ότι το μάτι πρέπει να προσαρμόζεται φωτοχημικά στις αλλαγές του επιπέδου φωτισμού, αφού το οπτικό σύστημα δεν είναι σχεδιασμένο να κάνει οπουδήποτε ολόκληρη την εργασία προσαρμογής χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το μάτι δεν είναι ένα πολύ ευαίσθητο όργανο.

#### 1.3.5 Φακός

Αυτός είναι το τρίτο μέρος του οπτικού συστήματος του ματιού. Είναι κρυσταλλικός, τοποθετημένος πίσω από την ίριδα και αναρτάται από τον βλεφαρικό μυ, στο πίσω μέρος της ίριδας. Στην κάμερα η προσαρμογή κατορθώνεται μετακινώντας τους φακούς ενώ στο μάτι ο βλεφαρικός μυς αλλάζει το σχήμα του φακού για να επιτευχθεί η εστίαση. Η εξωτερική επιφάνεια του φακού έχει ακτίνα καμπυλότητας 10mm, ενώ η εσωτερική 6mm. Ο φακός έχει ένα μέσο δείκτη διαθλάσεως 1,44 που είναι υψηλότερος στο κέντρο παρά στην περιφέρεια, η δε εξωτερική επιφάνεια του φακού είναι αυτή που αλλάζει περισσότερο στο σχήμα κατά την διάρκεια προσαρμογής. Όταν το μάτι βλέπει ένα αντικείμενο σε απόσταση, ο βλεφαρικός μυς αναπαύεται και ο φακός έχει περισσότερο επίπεδο σχήμα, ενώ συμβαίνει το αντίθετο όταν το αντικείμενο βρίσκεται κοντά. Να σημειωθεί ότι ο φακός απορροφά όλα τα μήκη κύματος που είναι λιγότερο από 350nm, ενώ επίσης θαμπώνει τα αντικείμενα που είναι πολλαπλών χρωμάτων, διότι ο φακός δεν μπορεί να εστιάσει ακριβώς περισσότερα από ένα μήκος κύματος ταυτοχρόνως.

#### 1.3.6 Υδατοειδές υγρό και υαλώδες σώμα (υγρό)

Αυτά είναι διαφανή υγρά που γεμίζουν τους δύο εσωτερικούς χώρους του ματιού. Το υδατοειδές υγρό κείται μεταξύ του κερατοειδούς και του φακού, ενώ το υαλώδες υγρό κείται πίσω από τον φακό και έχει μεγαλύτερη πυκνότητα, αμφότερα δε τα υγρά έχουν σκοπό να κάμπτουν και να εστιάζουν το προσπίπτον φως.

### 1.3.7 Αμφιβληστροειδής χιτώνας

Αυτός είναι η εσωτερική επένδυση του οπίσθιου μέρους του ματιού και αποτελεί το φιλμ της κάμερας. Εκεί υπάρχουν δύο τύποι φωτουποδοχέων τα ραβδία και τα κωνία. Επίσης παρόντα είναι δύο σημεία :

Η ωχρά κηλίδα, που είναι μια μικρή περιοχή με 0,5mm διάμετρο υποτείνουσα μια γωνία 2° μέχρι την κόρη του οφθαλμού, όπου εκεί λαμβάνει χώρα η περισσότερη τρισδιάστατη όραση και η διάκριση των χρωμάτων. Το έτερο σημείο είναι το τυφλό σημείο στην ρινική πλευρά του αμφιβληστροειδούς και στο οποίο λαμβάνει χώρα η σύνδεση του ματιού προς το οπτικό νεύρο. Ο αμφιβληστροειδής έχει πάχος λιγότερο από 0,25mm και συντίθεται από 10 στρώσεις με τα ραβδία και τα κωνία διαμένοντα στην δεύτερη στρώση από το υαλώδες σώμα. Η ακτίνα καμπυλότητας του αμφιβληστροειδούς 12mm και η απόσταση από τον φακό προς τον αμφιβληστροειδή είναι 14,6mm.

### 1.3.8 Εξωφθάλμιοι μυς

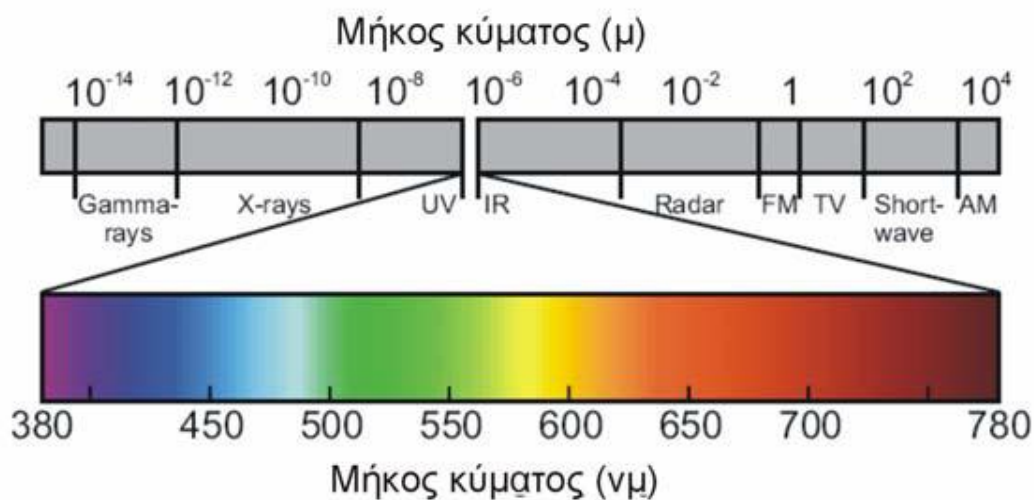
Αυτοί καθιστούν ικανό το μάτι να εστιάζει σ' ένα αντικείμενο και να κοιτάζει εμπρός προς την επιθυμητή διεύθυνση. Κάθε μάτι είναι εφοδιασμένο με μια ομάδα έξι εξωφθάλμιων μυών οι οποίοι συντονίζονται από τον εγκέφαλο να εργασθούν αρμονικά το ένα με το άλλο έτσι που στην πλειοψηφία των ατόμων καμία ομάδα να μην επικρατεί και να προκύψει στραβισμός.

### 1.3.9 Ραβδία και Κωνία

Αυτά είναι δύο τύποι υποδοχέων στον αμφιβληστροειδή που μετασχηματίζουν την εισερχόμενη ακτινοβολία στο μάτι σε χημική ενέργεια, η οποία προκαλεί ηλεκτρική ώση μεταβιβαζόμενη μέσω του οπτικού νεύρου στον εγκέφαλο. Αναφέρθηκε ότι η περιοχή προσαρμογής του ματιού είναι από  $10^7$  έως 1, αλλά το οπτικό σύστημα του ματιού μεταβάλλεται σε περιοχή 16:1. Έτσι ένας άλλος μηχανισμός πρέπει να ληφθεί υπόψη για το μεγαλύτερο τμήμα της ικανότητας του ματιού να προσαρμόζεται σε αλλαγές στα επίπεδα φωτός. Αυτός ο μηχανισμός είναι στην φύση φωτοχημικός. Η έρευνα έδειξε ότι ο φωτοχημικός κύκλος ο απεικονιζόμενος στο σχήμα 1.4 λαμβάνει χώρα στον αμφιβληστροειδή. Στα ραβδία υπάρχει ένα υδατώδες υγρό ευαίσθητο στο φως, χρώματος βυσσινί, που ονομάζεται ροδοψίνη. Όταν το φως προσπίπτει σ' αυτό το υγρό, αυτό απλώνεται στον αμφιβληστροειδή, αποχρωματίζεται και αποσυντίθεται χημικά, πρώτα σε μια κίτρινη ουσία καλούμενη ρετινίνη και μια πρωτεΐνη καλούμενη οψίνη και εν συνέχεια σε βιταμίνη Α.

Όλα αυτά λαμβάνουν χώρα στο φως. Τώρα στο σκότος ή στην απουσία φωτός ανασυντίθεται εκ νέου η ροδοψίνη, η δε ανασύνθεση αυτή είναι μέγιστη όταν τα ραβδία είναι πλήρως προσαρμοσμένα στο σκότος. Ακόμη δεν είναι ξεκαθαρισμένα τα πράγματα όσον αφορά την διαδικασία δημιουργίας ηλεκτρικού παλμού προς το οπτικό νεύρο εξ αιτίας των παραπάνω χημικών μεταβολών. Μια κρατούσα θεωρία είναι ότι λαμβάνουν χώρα ορισμένες μοριακές αλλαγές στην ρετινίνη και την οψίνη που παράγουν αλλαγές στην ηλεκτρική ενέργεια ή το δυναμικό των ραβδίων το οποίο τελικά έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη νευρικού παλμού στα γαγγλιακά (κέντρα δραστηριότητας) νευρικά κύτταρα του οπτικού νεύρου. Αυτοί οι παλμοί τότε μεταδίδονται στο οπτικό κέντρο του εγκεφάλου με μια ταχύτητα 8km/min περίπου, πράγμα που σημαίνει ότι ο παλμός χρειάζεται λιγότερο από 2ms να φτάσει στον φλοιό του εγκεφάλου που εδράζεται και το οπτικό κέντρο μαζί με τα άλλα κέντρα αναγνωρίσεως αντικειμένων, μνήμης κτλ. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μεταξύ διεγέρσεως του αμφιβληστροειδούς και παραγωγής νευρικού παλμού και επίσης λέμε ότι ανάλογη διαδικασία λαμβάνει χώρα και στα κωνία ([11]).

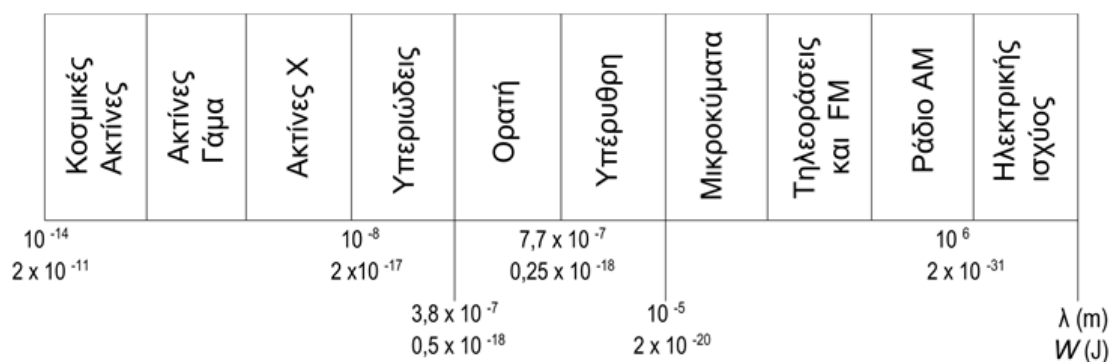
#### 1.4 Φύση και χαρακτηριστικά



Σχήμα 1.5 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του φωτός

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται από τις ακτίνες γάμα με ελάχιστο μήκος κύματος  $10^{-7}$  μm έως τα ραδιοφωνικά κύματα και περαιτέρω σε ακτινοβολίες παραγόμενες από εμπορικές γεννήτριες E.P που έχουν μήκος κύματος 6.000km. Δεδομένου ότι, όπως φαίνεται, τα μήκη κύματος στο φάσμα μεταβάλλονται σε μια τρομακτική περιοχή έχουν αξιοσημείωτες

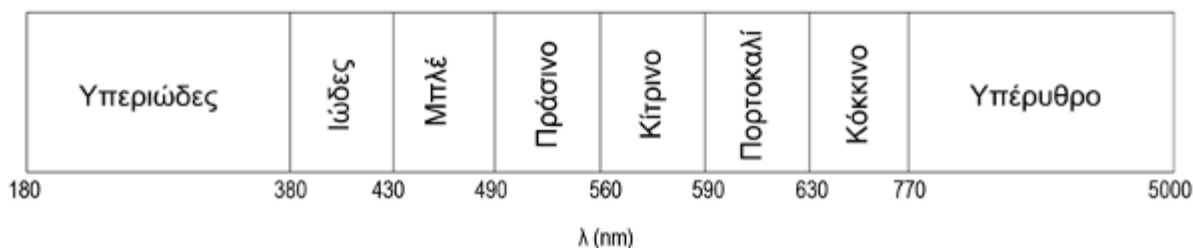
ιδιότητες που ορίζονται κυρίως από την ενέργεια του φωτονίου. Στο μέσο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι η οπτική περιοχή, η οποία περιλαμβάνει και την υπέρυθη ακτινοβολία σε μήκη κύματος 1,0mm έως 0,78μm, την ορατή ακτινοβολία με μήκη κύματος 0,78 έως 0,38μm και την υπεριώδη ακτινοβολία περιοχής 0,38 έως 0,01 μm. Αυτές όλες οι ακτινοβολίες ονομάζονται οπτικές ακτινοβολίες και συνιστούν μια ομάδα, αφού παρουσιάζουν ομοιότητα μεθόδων παραγωγής, μετατροπής και εφαρμογής. Η αίσθηση οράσεως είναι άμεσα υπεύθυνη στην ορατή ακτινοβολία, η οποία περιλαμβάνει 15 οκτάδες και μια μόνο εξ αυτών ανήκει στο ορατό φως. Ως οκτάδα δε είναι το διάστημα μεταξύ μηκών κύματος του φάσματος που έχουν λόγο 2:1. Η μεγαλύτερη μερίδα της οπτικής περιοχής με 10 οκτάδες κατέχεται από τις υπέρυθρες ακτίνες που έχουν χαμηλή ενέργεια φωτονίου μεταξύ  $2 \cdot 10^{-22}$  έως  $2,5 \cdot 10^{-19}$  Joule και εξακριβώνονται από την θερμική τους ενέργεια. Η υπέρυθη ακτινοβολία ευρέως χρησιμοποιείται για θέρμανση και ξήρανση, όπως επίσης μας καθιστά ικανούς να δούμε αντικείμενα στο σκοτάδι δια μετατροπής των υπέρυθρων ακτινών σε ορατές. Στην τελευταία αυτή περίπτωση ομιλούμε περί ενισχυτών ειδώλου, οποίοι ανεπτύχθησαν ταχύτατα για ικανότητα οράσεως σε πολύ χαμηλά επίπεδα λαμπρότητας, μάλιστα εδώ αναφέρουμε και την τεχνική φωτογράφισης με υπέρυθρες ακτίνες. Εν αντιθέσει προς την υπέρυθη ακτινοβολία, οι υπεριώδεις ακτίνες έχουν μεγαλύτερη ενέργεια φωτονίου μέσα στην οπτική περιοχή που κυμαίνεται από  $5,2 \cdot 10^{-19}$  έως  $2,0 \cdot 10^{-17}$  Joule. Η πλήρης κλίμακα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος φαίνεται στο σχήμα 1.6. Αξιοσημείωτη είναι η αχανής περιοχή των μηκών κύματος που κυμαίνονται από τα πολύ μικρά των κοσμικών ακτινοβολιών(10-14m) έως τα πολύ μεγάλα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ισχύος(5.580km) ([11]).



Σχήμα 1.6 Πλήρης κλίμακα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Εξ αυτού προκύπτει ότι τα κύματα φως κατέχουν μια πολύ μικρή περιοχή του φάσματος, εκτεινόμενη χονδρικά από 380 έως 780nm. Χαρακτηριστικά είναι τα έξι χρώματα του ορατού φάσματος (Σχήμα 1.7) τα οποία δεν είναι διακεκριμένες λωρίδες όπως

υποδηλώνεται στο ίδιο σχήμα αλλά μάλλον αναμειγνύονται το ένα στο διαδοχικό επόμενο, ή προηγούμενο χρώμα, όπως μπορούμε να δούμε στην περίπτωση του ουράνιου τόξου ή όταν αναλύουμε το φως του ήλιου με ένα πρίσμα. Αλλά γιατί η παραπάνω στενή λωρίδα είναι τόσο μεγάλης σημασίας; Η απάντηση βεβαίως είναι ότι το μάτι μας μπορεί και ανταποκρίνεται μόνον σ' αυτά τα μήκη κύματος. Αυτή η ευαισθησία του δέκτη να ανταποκρίνεται σε ορισμένα μήκη κύματος και όχι σε άλλα είναι σημαντική μεν, αλλά όχι και η μοναδιαία με το μάτι. Για παράδειγμα έχουμε την ευαισθησία του δέρματος σε κέντρα μαυρίσματος με υπεριώδη ακτινοβολία 300nm. Τέλος οι λαμπτήρες βλαστήσεως χρησιμοποιούν ακτινοβολία στα 253,7nm όπως επίσης για παραγωγή εξυγιασμένης ατμόσφαιρας για εξάλειψη των βακτηρίων σε αναρρωτήρια, σανατόρια, ή δωμάτια νηπίων. Αν και ενδιαφερόμαστε για τα ποικίλα φάσματα χρωμάτων, το πρωτεύον ενδιαφέρον μας συγκεντρώνεται στην αίσθηση του λευκού φωτός. Ορίζουμε δε λευκό φως ίσης ενέργειας ως την ταυτόχρονη παρουσία σε ποσά ίσης ενέργειας από όλα τα μήκη κύματος μέσα στο ορατό φάσμα. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, φθορισμού και εκφορτίσεως υψηλής εντάσεως δεν εξασφαλίζουν λευκό φως ίσης ενέργειας. Για παράδειγμα οι λαμπτήρες πυρακτώσεως περιέχουν μεγάλες ποσότητες κόκκινου και κίτρινου παρά μπλε και πράσινου, οι τυποποιημένοι λαμπτήρες φθορισμού είναι κάπως αδύνατοι σε μπλε και κόκκινο, ενώ του υδραργύρου έχουν μόνο μπλε, πράσινο και κίτρινο και κιτρινοπράσινο και τέλος οι του νατρίου περιέχουν μεγάλες ποσότητες κίτρινου. Το ηλιακό φως παρουσιάζει μια ομοιόμορφη φασματική διανομή, αλλά είναι κάπως ελλιπές σε μπλε και ιώδες. Παρά το ανωτέρω κάθε ένας από τους παραπάνω λαμπτήρες μόνος του εμφανίζεται στο ανθρώπινο μάτι να παράγει λευκό φως αν και αυτό το λευκό φως μπορεί να φαίνεται θερμότερο ή ψυχρότερο από ένα άλλο. Έτσι δεν είναι ανάγκη να έχουμε λευκό ίσης ενέργειας για να δημιουργήσουμε την αίσθηση της λευκότητας ([11]).



Σχήμα 1.7 Τα έξι χρώματα του ορατού φάσματος

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ ΔΙΑΔΟΣΗ ΦΩΤΟΣ ”

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία με την οποία το φως διαχέεται στο περιβάλλον επηρεασμένο από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και τα κλιματικά δεδομένα καθώς και οι μονάδες με τις οποίες το χαρακτηρίζουμε και το ποσοτικοποιούμε. Ακόμα γίνεται αναφορά στην σημαντικότητα του για την ανθρώπινη υγεία.

#### 2.1 Ήλιος και διάδοση

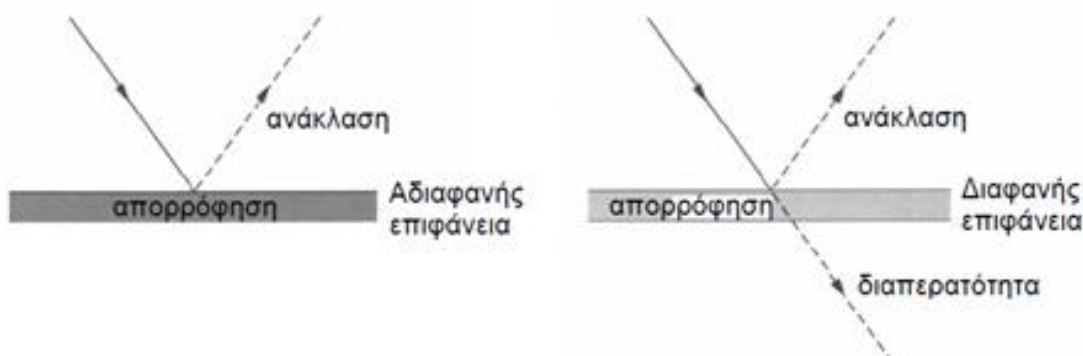
Όταν η παραγωγή ενέργειας είναι φθινή και άφθονη δεν υπάρχει κανένα κίνητρο για να εκμεταλλευτεί ο άνθρωπος το φως του ήλιου ή του ουρανού, για να φωτίσει εσωτερικούς χώρους εργασίας. Στην εποχή που διανύουμε όμως αυτή η νοοτροπία έχει αλλάξει. Επικρατεί πλέον η άποψη εξοικονόμησης ενέργειας μέσω του φυσικού φωτισμού.

Ο ήλιος είναι βεβαίως η πηγή του φωτός της ημέρας και αν και είναι ένα σχετικά μικρό άστρο, έχει τεράστια αποθέματα ενέργειας. Η ορατή επιφάνεια του έχει διάμετρο  $1,6 \cdot 10^6$  km, έχει όγκο  $1,3 \cdot 10^6$  φορές μεγαλύτερο από της γης και η μάζα του είναι  $0,3 \cdot 10^6$  φορές μεγαλύτερη της μάζας της γης.

Ως φως ορίζεται το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στο οποίο είναι οπτικά ευαίσθητο το ανθρώπινο μάτι ([52]). Το τμήμα αυτό κυμαίνεται περίπου μεταξύ 380 – 780nm. Όταν το φως προσπέσει σε μία επιφάνεια,- ένα τμήμα του θα ανακλαστεί, ανάλογα με την ανακλαστικότητα R της επιφάνειας- ένα τμήμα του θα απορροφηθεί, ανάλογα με την απορροφητικότητα a της επιφάνειας- ένα τμήμα του θα διαπεράσει την επιφάνεια εφόσον αυτή έχει διαπερατότητα  $T > 0$  (Σχήμα 2.1) .Το άθροισμα των τριών προαναφερόμενων τμημάτων ισούται με τη μονάδα, δηλαδή :

$$R + T + a = 1 \quad (2.1)$$

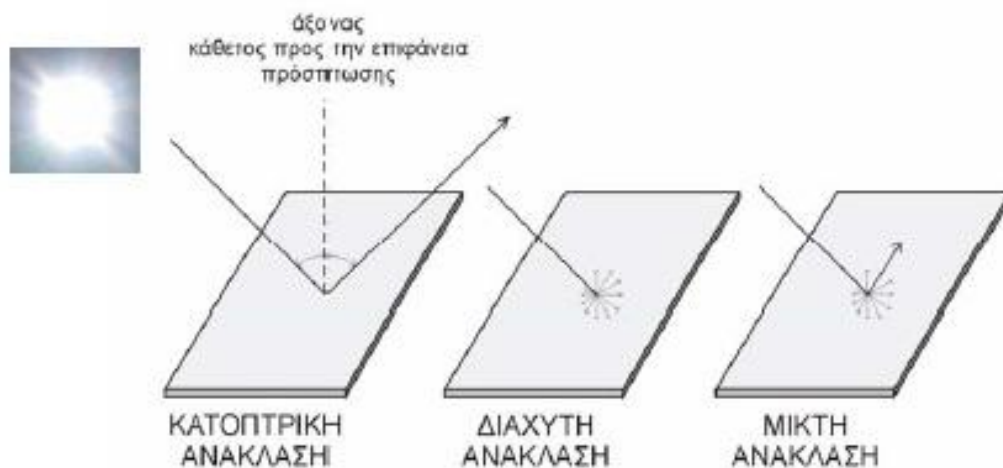
### 2.1.1 Ανάκλαση



Σχήμα 2.1 Διαπερατότητα επιφάνειας

Κατά την πρόσπτωση φωτός σε μία επιφάνεια, ένα τμήμα του θα ανακλαστεί, ένα θα απορροφηθεί και ένα θα διαπεράσει την επιφάνεια εάν αυτή είναι διαφανής ([21]).

Η ανάκλαση του φωτός είναι ιδιαίτερα σημαντική σαν φαινόμενο (η αλλαγή διεύθυνσης διάδοσής του, μέσα στο ίδιο μέσο, από μια διαχωριστική επιφάνεια ([Βικιπαίδεια, λήμμα «ανάκλαση»]) για την αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού στα κτίρια. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες ανάκλασης, ανάλογα με την επιφάνεια πρόσπτωσης (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Διάφορες κατηγορίες ανάκλασης, ανάλογα με την επιφάνεια πρόσπτωσης

Οι κατηγορίες ανάκλασης είναι :

- Κατοπτρική ανάκλαση
- Διάχυτη ανάκλαση

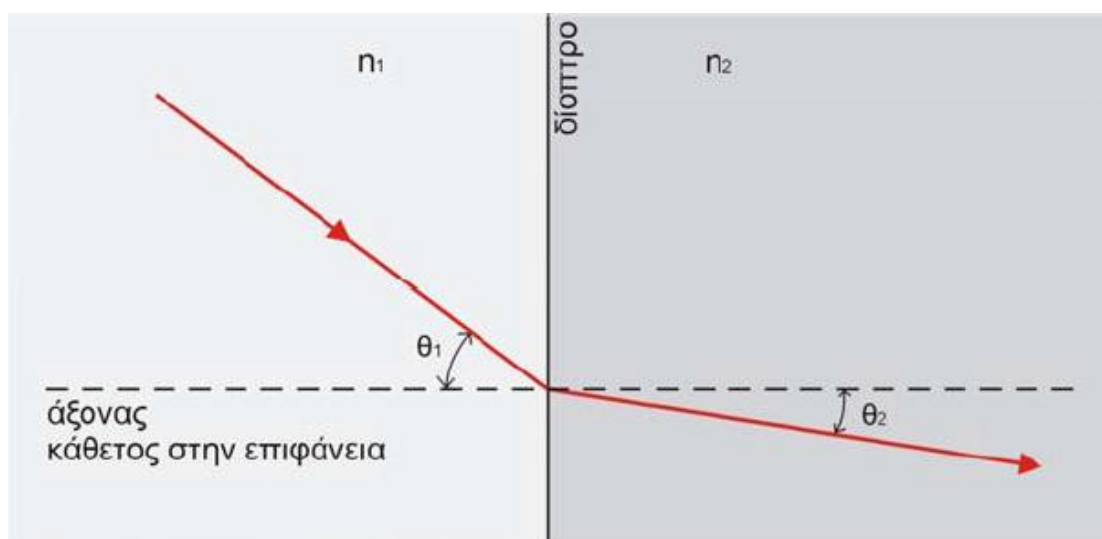


- Μικτή ανάκλαση

Οι τέλεια διαχυτικές επιφάνειες ονομάζονται λαμπερτιανές (lambertian), ενώ για τα περισσότερα υλικά, φυσικά ή τεχνητά, ισχύει η μικτή ανάκλαση ([53]).

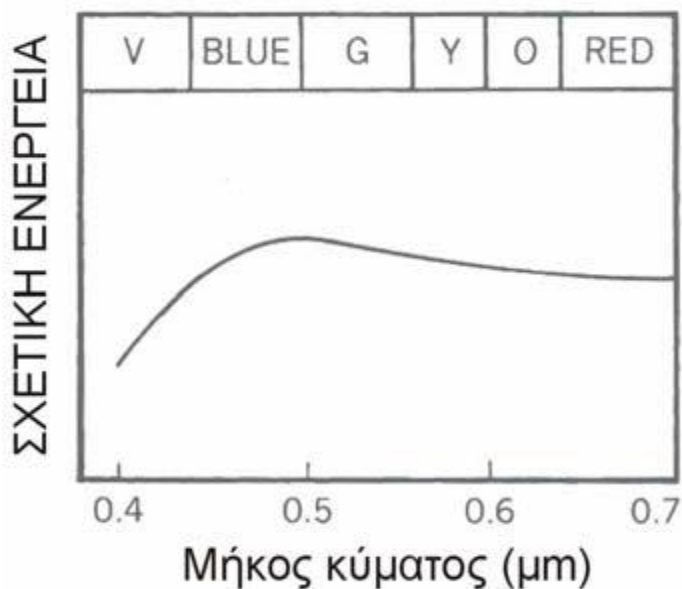
### 2.1.2 Διάθλαση

Διάθλαση φωτός χαρακτηρίζεται κάθε οπτικό φαινόμενο της εκτροπής της διεύθυνσης των φωτεινών ακτινών κατά τη μετάβασή τους από ένα διαπερατό μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης  $n_1$  σε άλλο μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης  $n_2 \neq n_1$  ([Βικιπαίδεια ,λήμμα «διάθλαση»]) (Σχήμα 2.3).

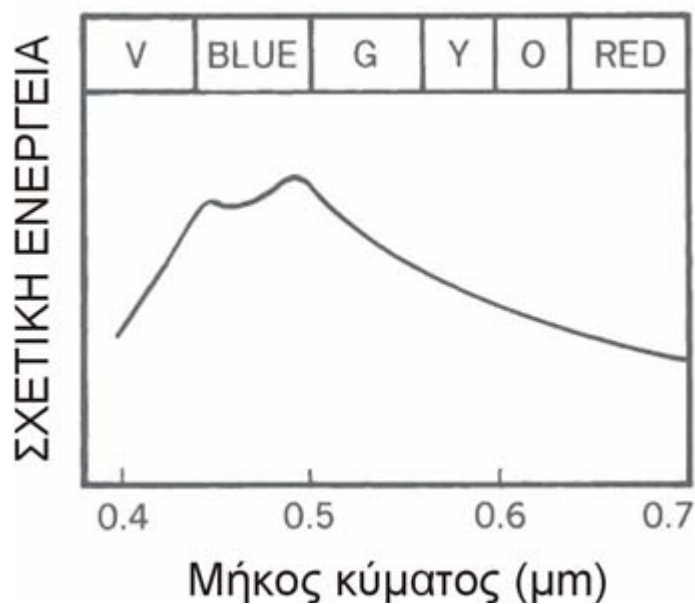


Σχήμα 2.3 Διάθλαση φωτός

Όσον αφορά στο χρώμα του φωτός, αυτό οφείλεται στην εκπομπή ενέργειας σε διαφορετικά μήκη κύματος. Για παράδειγμα, το φυσικό φως μιας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας έχει σχετικά λευκό χρώμα. Διαφορετική απόχρωση φωτός και συγκεκριμένα κυανή θα δούμε μέσω ενός βόρειου παραθύρου. Η κατανομή της ενέργεια που εκπέμπεται σε κάθε μήκος κύματος φαίνεται στα σχήματα 2.4 και 2.5 που ακολουθούν.



Σχήμα 2.4 Η κατανομή της ενέργειας που εκπέμπεται σε κάθε μήκος κύματος, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του Ιουνίου. Το φως είναι σχεδόν λευκό, εξαιτίας της περίπου ισόποσης κατανομής. (Πηγή:[53])



Σχήμα 2.5 Η κατανομή της ενέργεια που εκπέμπεται σε κάθε μήκος κύματος, όταν το φυσικό φως εισέρχεται από βορεινό παράθυρο. Ως αποτέλεσμα, το φως έχει μια κυανή απόχρωση. (Πηγή: [53])

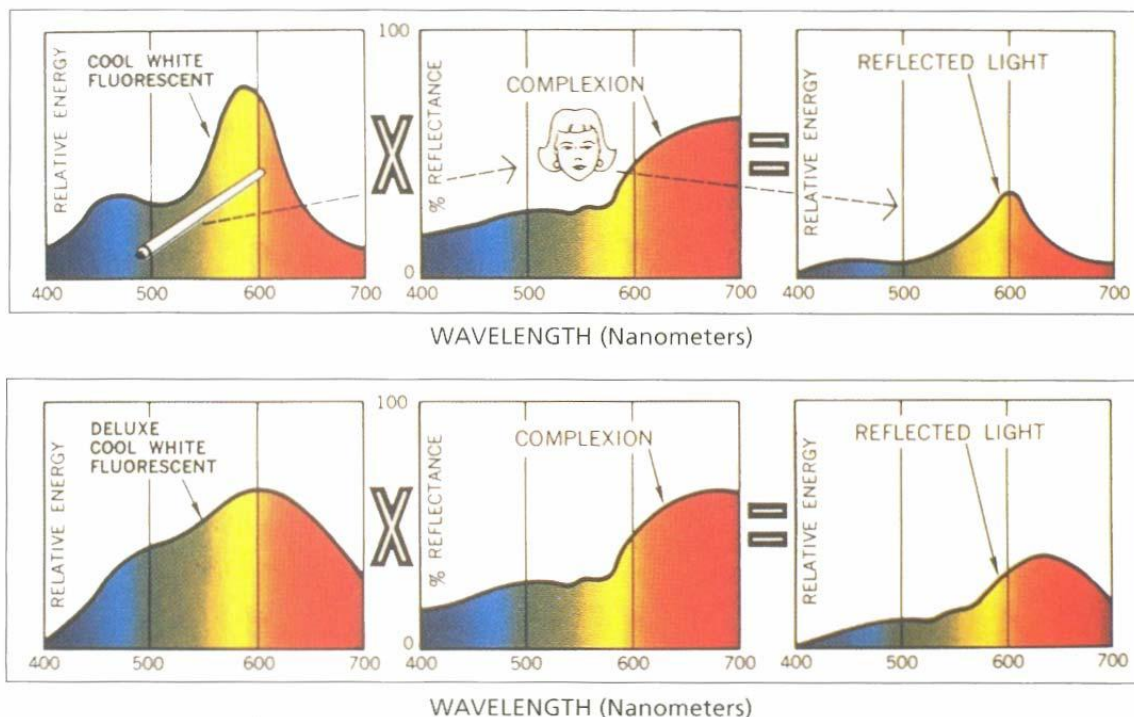
### 2.1.3 Περίθλαση

Περίθλαση φωτός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το φως επεκτείνεται στην περιοχή όπισθεν των διαφραγμάτων, δηλαδή εντός της σκιάς, δημιουργούμενων επιπλέον φωτεινών και σκοτεινών κροσσών ελαττωμένης φωτεινότητας ως αποτέλεσμα της αρχής του Huygens.

Στην γεωμετρική οπτική το φως διαδίδεται ευθυγράμμως, με αποτέλεσμα όπισθεν των διαφραγμάτων να σχηματίζεται σκιά, άνευ παρασκιάς όταν η φωτεινή πηγή είναι σημειακή.

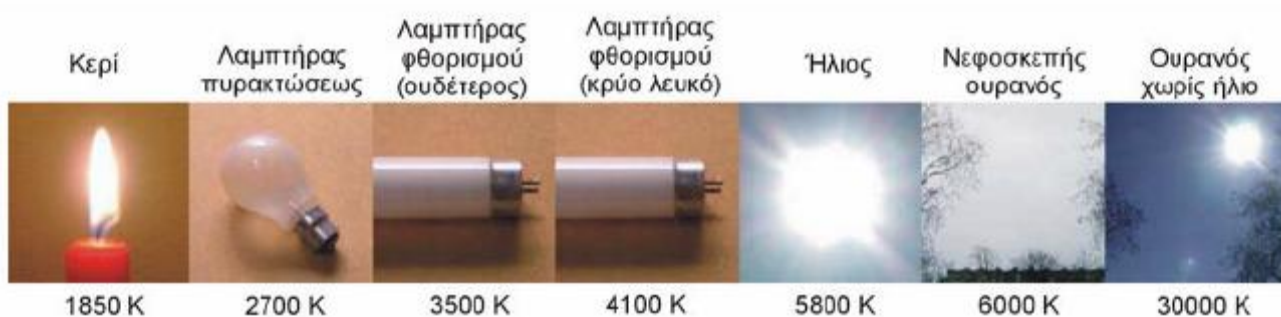
### 2.1.4 Χρώμα επιφάνειας

Από την άλλη, το χρώμα μιας επιφάνειας δεν οφείλεται αποκλειστικά στο φάσμα εκπομπής του φωτός, αλλά και στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας, όπως εξηγείται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Το χρώμα μιας επιφάνειας αποτελεί το γινόμενο της κατανομής της ενέργειας του φυσικού φωτός σε κάθε μήκος κύματος επί το βαθμό ανακλαστικότητας της επιφάνειας επίσης για κάθε μήκος κύματος. (Πηγή: [53])

Το χρώμα είναι η αίσθηση που δημιουργείται όταν από τα διάφορα στοιχεία που μας περιβάλλουν εκπέμπεται φως σε ένα κύτταρο του ματιού. Δεν είναι λοιπόν ιδιότητα μιας ουσίας ή αντικειμενικό χαρακτηριστικό. Επίσης, σημαντική έννοια είναι η θερμοκρασία χρώματος φωτεινής πηγής, η οποία εκφράζεται σε βαθμούς Kelvin. Η θερμοκρασία χρώματος εκφράζει τη θερμοκρασία που θα έπρεπε να έχει ένα μαύρο σώμα εκπομπός ενέργειας ώστε να παραχθεί φως αντίστοιχου χρώματος ([70]).



Σχήμα 2.7 Η θερμοκρασία χρώματος για διάφορες γνωστές φωτεινές πηγές. (Πηγή [70])

Η απόχρωση της φωτεινής πηγής είναι ανάλογη με την θερμοκρασία χρώματος. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο ψυχρότερη είναι η απόχρωση. Θερμοκρασίες χρώματος των 5300 K και άνω αντιστοιχούν σε λευκή και ψυχρή απόχρωση, ενώ θερμοκρασίες χρώματος μικρότερες των 3300 K αντιστοιχούν σε θερμές αποχρώσεις π.χ. λαμπτήρες πυράκτωσης.

## 2.2 Φωτομετρικά μεγέθη

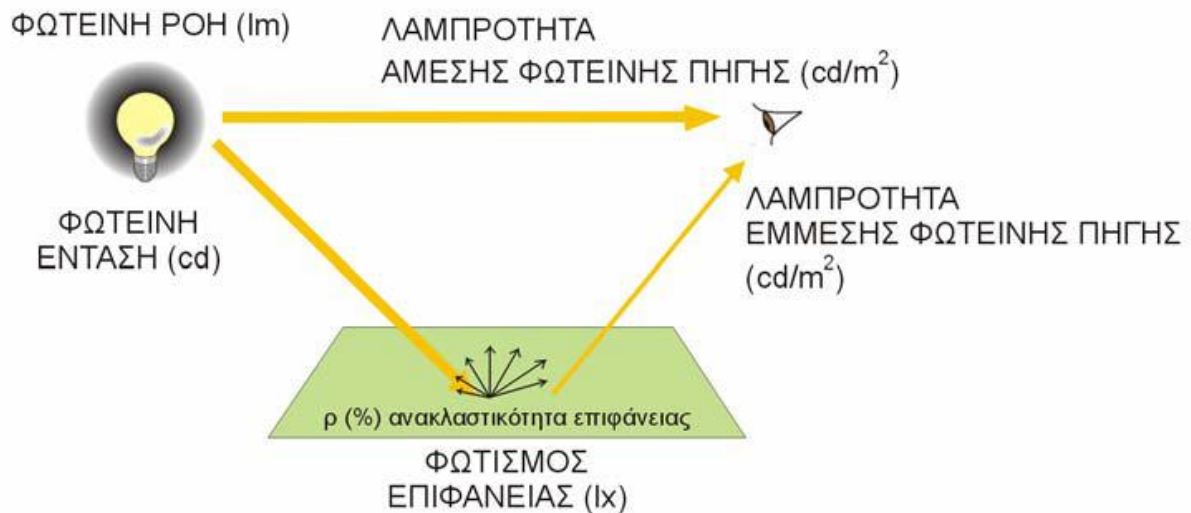
Σε αυτό το υποκεφάλαιο αναφέρονται τα μεγέθη με τα οποία περιγράφουμε και μετρούμε το φως.

### 2.2.1 Φωτεινή ροή

Φωτεινή ροή ( $\Phi$ ) – Luminous flux (F)

Μονάδα μέτρησης (SI): lumen (lm)

Η φωτεινή ροή εκφράζει την ισχύ του φωτός, δηλαδή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο οπτικό φάσμα. Με άλλα λόγια, φωτεινή ροή είναι η φωτεινή ενέργεια που αποδίδεται από μια φωτεινή πηγή και διέρχεται από ή προσπίπτει σε μια επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου (sec). Η μονάδα μέτρησης ορίστηκε έτσι ώστε  $1 \text{ lumen} = 1/683 \text{ Watt}$  στο μήκος κύματος των 555 nm όπου το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια λάμπα πυράκτωσης των 100W αποδίδει 1.630 lumens, ενώ μια λάμπα φθορισμού των 100W αποδίδει 4.400 lumens. Ο λόγος της φωτεινής ροής προς την ισχύ κατανάλωσης μιας λάμπας (lumen/watt) ορίζει την ποσοστιαία απόδοσή της. Η απόδοση εξαρτάται και από το μέγεθος της φωτεινής πηγής. Όσο αυξάνεται η ισχύς, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η ικανότητα του λαμπτήρα να μετατρέπει την ηλεκτρική σε φωτεινή ενέργεια ([2]).



Σχήμα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση των φωτομετρικών μεγεθών.  
(Πηγή: [70])

## 2.2.2 Ένταση φωτεινής πηγής

Ένταση φωτεινής πηγής (I) – Luminous Intensity (I)

Μονάδα μέτρησης (SI): candela (cd)

Ένταση φωτεινής πηγής ονομάζεται η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Η μονάδα μέτρησης, το κηρίο (cd), είναι η ένταση μιας ορισμένης ως πρότυπο φωτεινής πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία σε μια δεδομένη κατεύθυνση με συχνότητα  $540 \times 10^{12}$  Hertz και έχει ένταση  $1/683$  Watt ανά μονάδα στερεάς γωνίας (στερακτίνο) ([2]). Συνεπώς ισχύει ότι  $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm} / \text{sr}$ .

## 2.2.3 Φωτισμός της Επιφάνειας ή Φωτισμός

Φωτισμός της Επιφάνειας ή Φωτισμός (E) – Illuminance (E)

Μονάδα μέτρησης: lux (lx) (SI) και footcandle (fc) (USA)  $1 \text{ fc} = 10,76 \text{ lx}$

Φωτισμός της Επιφάνειας ή Φωτισμός είναι η φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας. Η μονάδα μέτρησης, το lux, είναι φωτεινή ροή που προσπίπτει σε 1 τ.μ. επιφάνειας. Άρα ισχύει ότι  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / \text{m}^2$  και  $1 \text{ fc} = 1 \text{ lm} / \text{ft}^2$ .

## 2.2.4 Λαμπρότητα

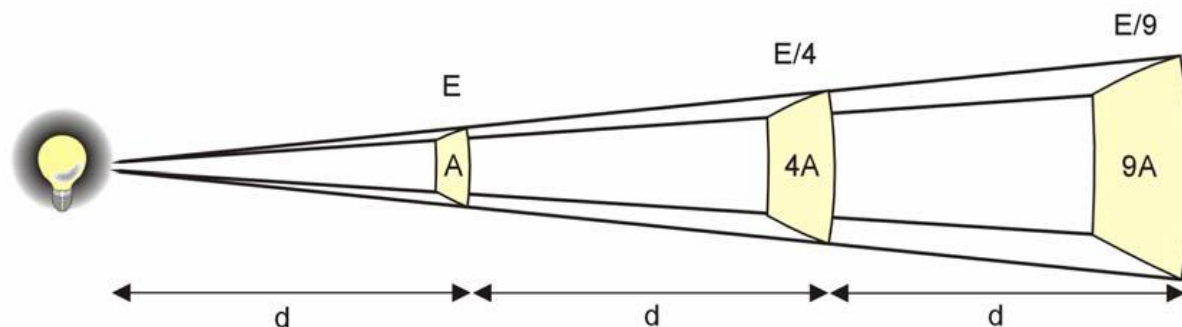
Λαμπρότητα – Luminance (L)

Μονάδα μέτρησης: στίλβη (sb) ή Lambert (SI) και apostilb ή foot-lambert (ft-L) (USA)

Λαμπρότητα ονομάζεται η φωτεινή ένταση που αποδίδεται από μια επιφάνεια (αυτόφωτη ή ετερόφωτη) προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, διαιρούμενη με την προβαλλόμενη επιφάνεια, όπως αυτή φαίνεται από την κατεύθυνση αυτή. Η λαμπρότητα μιας επιφάνειας ποικίλλει ανάλογα με τη γωνία θέασης, εκτός κι αν είναι τέλεια διαχυτική (Lambertian) ([70]). Μονάδα μέτρησης είναι η στίλβη (sb), δηλαδή η λαμπρότητα φωτεινής πηγής η οποία από 1 cm της επιφάνειάς της εκπέμπει καθέτως ένταση ίση με 1 κηρίο (cd). Δηλαδή ισχύει ότι  $1sb = 1cd/m^2$ . Στην ουσία, η λαμπρότητα μιας επιφάνειας είναι αποτέλεσμα τόσο του φωτισμού (E) που δέχεται η επιφάνεια, όσο και της ανακλαστικότητας της επιφάνειας  $\rho$  (%) η οποία δεν εκφράζει το είδος της ανάκλασης, αλλά το ποσοστό της προσπίπτουσας φωτεινής ενέργειας που ανακλάται. Αξίζει, τέλος, να σημειωθούν δύο από τους σημαντικότερους φωτομετρικούς νόμους. Ο πρώτος είναι ο λεγόμενος «φωτομετρικός νόμος του συνημιτόνου», σύμφωνα με τον οποίο ο φωτισμός (E) μιας επιφάνειας είναι ανάλογος προς την ένταση (I) της φωτεινής πηγής, αντιστρόφως ανάλογος προς το τετράγωνο της απόστασης (R) της επιφάνειας από την πηγή και ανάλογος προς το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης ( $\alpha$ ).  $E = I/R^2 \times \sigma_{\alpha}$ . Όταν η πρόσπτωση των ακτινών είναι κάθετη, τότε  $\sigma_{\alpha} = 1$  και άρα ισχύει  $E = I/R^2$ . Ο δεύτερος είναι ο «νόμος του αντίστροφου τετραγώνου». Δεδομένου ότι η φωτεινή ροή από μια σημειακή πηγή καλύπτει όλο και μεγαλύτερες επιφάνειες όσο αυξάνει η απόσταση από την πηγή, ο φωτισμός επιφάνειας σε απόσταση d είναι αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της απόστασης d. Αναλυτικότερα:

$$E (lx) = lumen / m^2 = cd sr / m^2 \quad (2.2)$$

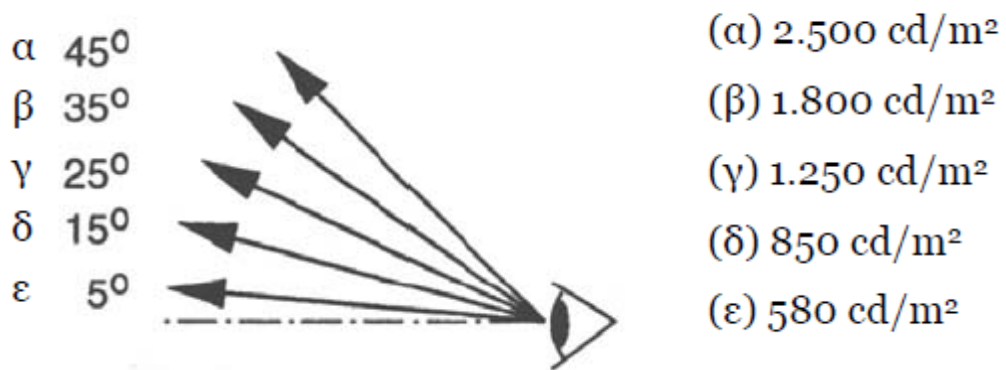
Επίσης, για τις στερεές γωνίες ισχύει ότι  $sr = m^2 / d^2$  όπου d = η ακτίνα της στερεάς γωνίας. Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι  $E (lx) = cd / d^2$ .



Σχήμα 2.9 Ο φωτισμός επιφάνειας  $E$  (lx) σε απόσταση  $d$  είναι αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της απόστασης  $d$ .

### 2.2.5 Θάμβωση

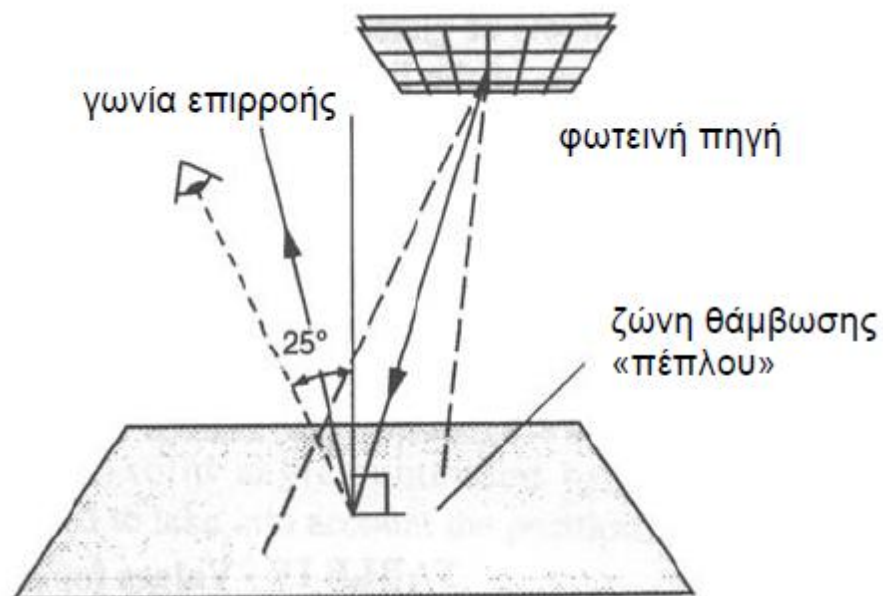
Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού, θάμβωση είναι η έλλειψη οπτικής άνεσης ή η μείωση της ικανότητας να διακρίνονται οι λεπτομέρειες των αντικειμένων, η οποία οφείλεται είτε σε ακατάλληλες αναλογίες λαμπρότητας των γύρω επιφανειών, είτε σε πολύ έντονες αντιθέσεις στη φωτεινότητά τους ([19]). Η θάμβωση αποτελεί σύνθετο φαινόμενο, στο οποίο εμπλέκεται η κατανόηση πολλών παραμέτρων, όπως η χρονική διάρκεια της πηγής θάμβωσης, οι αναλογίες λαμπρότητας μεταξύ της πηγής θάμβωσης και των γύρω επιφανειών και οι απαιτήσεις σε φωτισμό του χώρου. Συνήθως θάμβωση προκαλείται από λαμπτήρες, παράθυρα και επιφάνειες που εμφανίζονται πολύ φωτεινότερες από τις υπόλοιπες. Διακρίνονται δύο είδη θάμβωσης, η απευθείας θάμβωση και η έμμεση θάμβωση. Η απευθείας θάμβωση προκαλείται από φωτεινές πηγές, φυσικές τεχνητές, που είναι άμεσα ορατές. Όσο κεντρικότερα στο οπτικό πεδίο βρίσκεται η φωτεινή πηγή, τόσο πιθανότερο είναι να αποτελέσει πηγή θάμβωσης ([65]) (Σχήμα 2.10). Η έμμεση θάμβωση διακρίνεται σε ανακλώμενη θάμβωση και θάμβωση «πέπλου» (veiling reflections). Η ανακλώμενη θάμβωση προκαλείται από έντονα λείες και γυαλιστερές επιφάνειες οι οποίες στην ουσία αναπαράγουν τη φωτεινή πηγή της οποίας το φως ανακλούν (Σχήμα 2.11). Από την άλλη, όταν η λεία και γυαλιστερή επιφάνεια βρίσκεται στο επίπεδο εργασίας προκαλείται έμμεση θάμβωση «πέπλου» γιατί μειώνεται η αντίθεση μεταξύ του ανοιχτόχρωμου χαρτιού (άμεσου περιβάλλοντος) και των γραμμάτων, με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην ανάγνωση, σαν να υπάρχει ένα πέπλο μπροστά στα μάτια (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.10 Απευθείας θάμβωση: αποδεκτές τιμές λαμπρότητας ανάλογα με τη θέση της φωτεινής πηγής ως προς τον οφθαλμό του παρατηρητή. (Πηγή: [20])



Σχήμα 2.11 Παράδειγμα έμμεσης ανακλώμενης θάμβωσης (Πηγή: [http://www.nyserda.org/scip2/technicalGuide/terminology/glare.asp?section])



Σχήμα 2.12 Θάμβωση «πέπλου» σε οριζόντια επιφάνεια. (Πηγή: [19])



Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές προσπάθειες ποσοτικοποίησης του φαινομένου της θάμβωσης, μέσω του ορισμού ενός Δείκτη Θάμβωσης. Όσον αφορά στον τεχνητό φωτισμό, η IES (Illuminating Engineering Society – Η.Π.Α.) προσδιόρισε το δείκτη θάμβωσης GI (Glare Index) ο οποίος υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης που ακολουθεί ([19]).

$$GI = 10 * \log_{10} * K * P * \frac{L_s^{1.6} * \omega^{0.8}}{L_b} \quad (2.3)$$

όπου:

K, μια σταθερά που εξαρτάται από τις μονάδες

P, ένας συντελεστής «θέσης» που εξαρτάται από τη θέση της φωτεινής πηγής σε σχέση με τη γραμμή της όρασης

L<sub>s</sub>, η τιμή λαμπρότητας της φωτεινής πηγής

L<sub>b</sub>, η τιμή λαμπρότητας του περιβάλλοντα χώρου

ω, η στερεά γωνία που ξεκινά από τον οφθαλμό και περικλείει τη φωτεινή πηγή

Επίσης, ορίστηκε ένας δείκτης θάμβωσης φυσικού φωτισμού DGI (Daylight Glare Index) ο οποίος σχετίζεται με τον IES GI ως εξής :  $DGI = 2/3 (GI + 14)$  για τιμές έως 28 ([19]). Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει το γεγονός ότι έχει παρατηρηθεί μεγαλύτερη ανοχή των παρατηρητών σε θάμβωση μέσω φυσικού φωτισμού (συγκεκριμένα σε θάμβωση που προκαλείται από τη θέα του ουρανού μέσω ενός παραθύρου) από ότι μέσω τεχνητού φωτισμού. Ο παρακάτω πίνακας 2.1 παρουσιάζει τους μέγιστους αποδεκτούς δείκτες θάμβωσης για τεχνητό και φυσικό φωτισμό.

*Πίνακας 2.1 Μέγιστοι αποδεκτοί δείκτες θάμβωσης για τεχνητό και φυσικό φωτισμό  
(Πηγή: [19])*

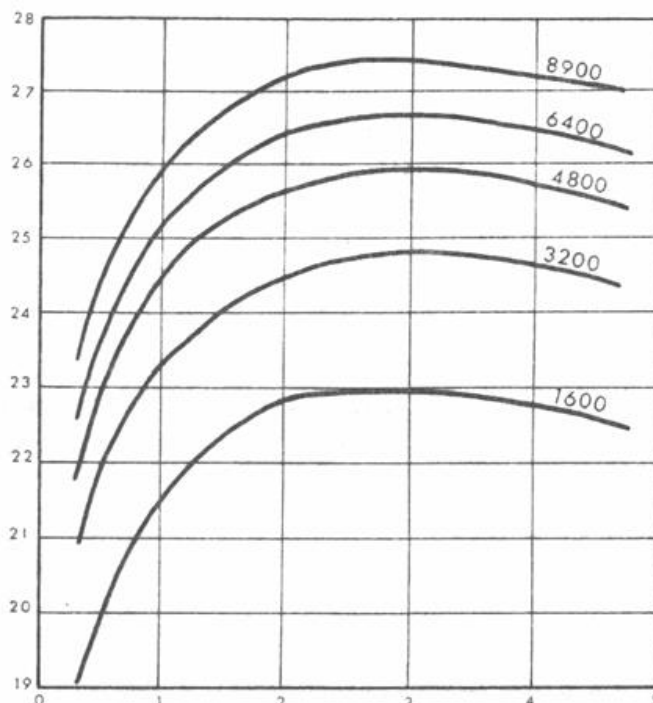
Χαρακτηρισμός θάμβωσης	IESGI	DGI
Ανεπαίσθητη θάμβωση	10-13	16-18
Αποδεκτή θάμβωση	16-19	20-22
Μη ανεκτή θάμβωση	22-25	24-26
Αφόρητη θάμβωση	28	28

Κάποια συμπεράσματα από σχετικές έρευνες είναι τα παρακάτω: Σύμφωνα με τον Baker [19] οι βασικοί τρόποι για την αποφυγή της θάμβωσης από τα ανοίγματα είναι οι εξής:

- Μείωση της λαμπρότητας του ουρανού μέσω εξαρτημάτων όπως σκίαστρα ή ειδικά υαλοστάσια.
- Μείωση της αντίθεσης σε φωτεινότητα (κοντραστ) μεταξύ ουρανού και κουφωμάτων εσωτερικών τοίχων.
- Μείωση του ορατού τμήματος του ουρανού από το εσωτερικό του χώρου.

Η θάμβωση που προκαλείται από την απευθείας θέαση ενός παραθύρου (δηλαδή υπό γωνία  $90^\circ$ ) ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό από παρατηρητή σε παρατηρητή, ενώ σχετίζεται και με παράγοντες όπως η εμφάνιση του παραθύρου, η εξωτερική θέα κτλ. Επίσης, η θάμβωση που προκαλείται από την απευθείας θέαση ενός παραθύρου είναι πρακτικά ανεξάρτητη από το μέγεθος του ανοίγματος και την απόσταση του παρατηρητή, ενώ εξαρτάται κυρίως από τη λαμπρότητα του ουρανού και λιγότερο από την ανακλαστικότητα των εσωτερικών επιφανειών.

Τέλος, σε ένα χώρο με μέσο συντελεστή ανακλαστικότητας 0,4, ο Δείκτης Θάμβωσης παραμένει ουσιαστικά σταθερός για όλες τις περιπτώσεις παραθύρων με μέγεθος μεγαλύτερο του 2% της επιφάνειας του χώρου (Σχήμα 2.13) όταν πρόκειται για απευθείας θέαση του παραθύρου.

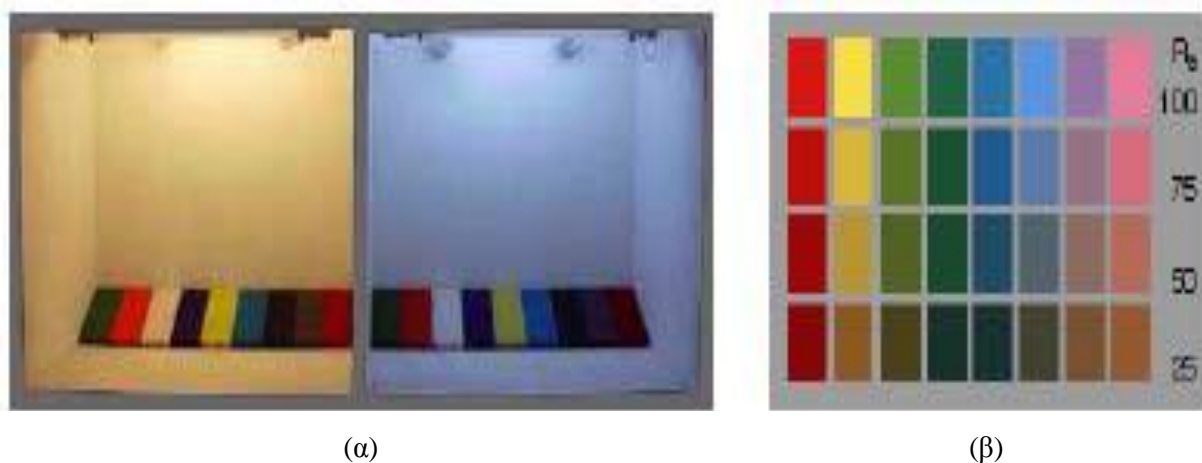


Σχήμα 2.13 Η σχέση μεταξύ δείκτη θάμβωσης φυσικού φωτισμού (DGI) και μεγέθους παραθύρων, για τιμές λαμπρότητας ουρανού μεταξύ 1.600 και 8.900  $cd/m^2$ . Η θέαση το παραθύρου είναι απευθείας (δηλαδή υπό γωνία  $90^\circ$ ), από απόσταση 6μ., σε ένα χώρο διαστάσεων 12μ. x 12μ. x 6μ. και μέσης ανακλαστικότητας επιφανειών 0,4.

Φωτεινές πηγές σε γωνία μεγαλύτερη των  $50^\circ$  σε σχέση με την ευθεία της όρασης (σε οριζόντιο επίπεδο) δεν επηρεάζουν το δείκτη θάμβωσης φυσικού φωτισμού. Έτσι, η τοποθέτηση των θέσεων εργασίας σύμφωνα με αυτό το κριτήριο αποτελεί έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αντιμετώπισης της θάμβωσης ([19]).

### 2.2.6 Χρωματική απόδοση

Χρωματική απόδοση μιας φωτεινής πηγής είναι η ικανότητά της να αποδίδει το χρώμα ενός σώματος όπως θα το απέδιδε το φυσικό φως ([70]). Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (CIE), η χρωματική απόδοση μπορεί να περιγραφεί ως ένας δείκτης (Color Rendering Index – Ra) με τιμές από 0 έως 100, οι χαμηλές τιμές του οποίου θα αντιστοιχούν σε κακή χρωματική απόδοση, ενώ οι ψηλές θα αντιστοιχούν σε καλή χρωματική απόδοση. Κατά κύριο λόγο, η χρωματική απόδοση μια φωτεινής πηγής συγκρίνεται με αυτήν του φυσικού φωτός που έχει δείκτη  $R_a = 100$ .



Σχήμα 2.14 α) Ειδική διάταξη αξιολόγησης της χρωματικής απόδοσης του φωτισμού. β) Χρώματα κάτω από φωτισμό διαφορετικών δεικτών χρωματικής απόδοσης.  
(Πηγή: [70])

Οι λαμπτήρες φθορισμού, αν και έχουν μεγαλύτερη φωτιστική απόδοση (lumen/Watt), από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, έχουν χειρότερη χρωματική απόδοση ([70]). Για την ευκολότερη σύγκριση της χρωματικής απόδοσης των διαφόρων φωτεινών πηγών η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού κατηγοριοποίησε τους δείκτες χρωματικής απόδοσης όπως φαίνεται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 (Πηγή: [70])

Κατηγορία	Δείκτης χρωματικής απόδοσης Ra	Απαιτήσεις	Τυπικές εφαρμογές
1A	90-100	μεγάλη σημασία στην ακρίβεια των χρωμάτων	Γκαλερί τέχνης, ιατρεία, ανάμειξη χρωμάτων, γραφιστική,
1B	80-90	σχετικά μεγάλη σημασία στην ακρίβεια	Κατοικίες, γραφεία, ξενοδοχεία, σχολεία
2	60-80	μέτρια σημασία στην ακρίβεια	Βιομηχανίες, γραφεία,
3	40-60	μικρή σημασία στην ακρίβεια	Βιομηχανίες, αθλητικοί χώροι
4	20-40	Καθόλου ακρίβεια	Φωτεινοί σηματοδότες

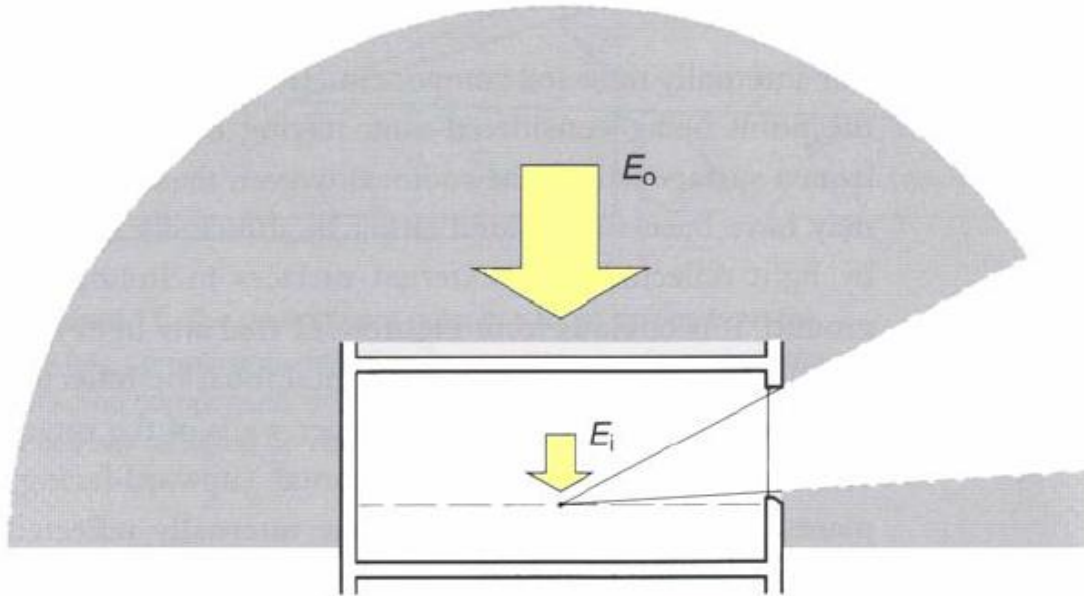
### 2.2.7 Ποσοτικά κριτήρια

Τα ποσοτικά κριτήρια του φωτισμού στα κτίρια αναφέρονται στις τιμές φωτισμού (lx) κυρίως για τεχνητό αλλά και για φυσικό φωτισμό, ή στον Συντελεστή Φυσικού Φωτισμού (%) για φυσικό φωτισμό, συνήθως στο επίπεδο εργασίας, δηλαδή σε ύψος 70-80εκ. από το δάπεδο.

Ο Συντελεστής Φυσικού Φωτισμού (Daylight Factor) είναι ο λόγος του φωτισμού που δέχεται ένα σημείο του εσωτερικού χώρου ( $E_i$ ), συνήθως στο ύψος του επιπέδου εργασίας, προς τον αντίστοιχο φωτισμό σε εξωτερικό ανεμπόδιο σημείο ( $E_o$ ) σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού, εκφρασμένος επί τοις εκατό (Σχήμα 2.15).

$$\Sigma. \Phi. \Phi. = \frac{E_i}{E_o} * 100\%$$

(2.4)



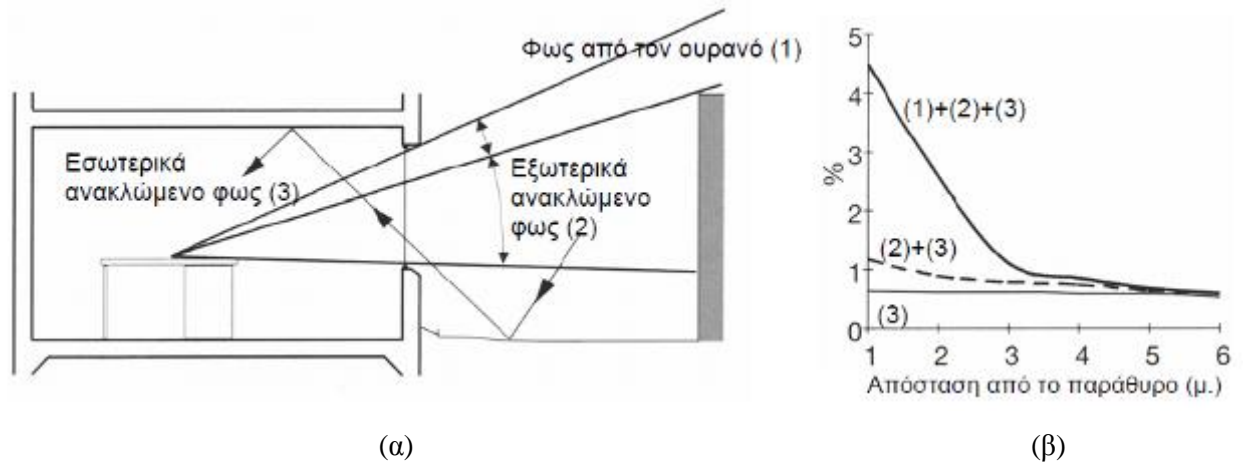
Σχήμα 2.15 Ο Συντελεστής Φυσικού Φωτισμού ισούται με  $E_i / E_o \times 100 \%$   
(Πηγή:[21])

Ο λόγος αυτός είναι πάντοτε σταθερός για ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου (είτε ο χώρος είναι στο Όσλο είτε στην Αθήνα), αφού όσο αυξάνεται ο αριθμητής αυξάνεται και ο παρονομαστής. Στην ουσία, ο Σ.Φ.Φ. εκφράζει τη γεωμετρία και τα φωτομετρικά χαρακτηριστικά ενός χώρου.

Η ποσότητα του φυσικού φωτός σε ένα σημείο, και συνεπώς ο Σ.Φ.Φ., εξαρτάται από:

- το φως που προέρχεται απευθείας από τον ουρανό
- το φως που προέρχεται από ανάκλαση σε εξωτερικές επιφάνειες
- το φως που προέρχεται από ανάκλαση σε εσωτερικές επιφάνειες

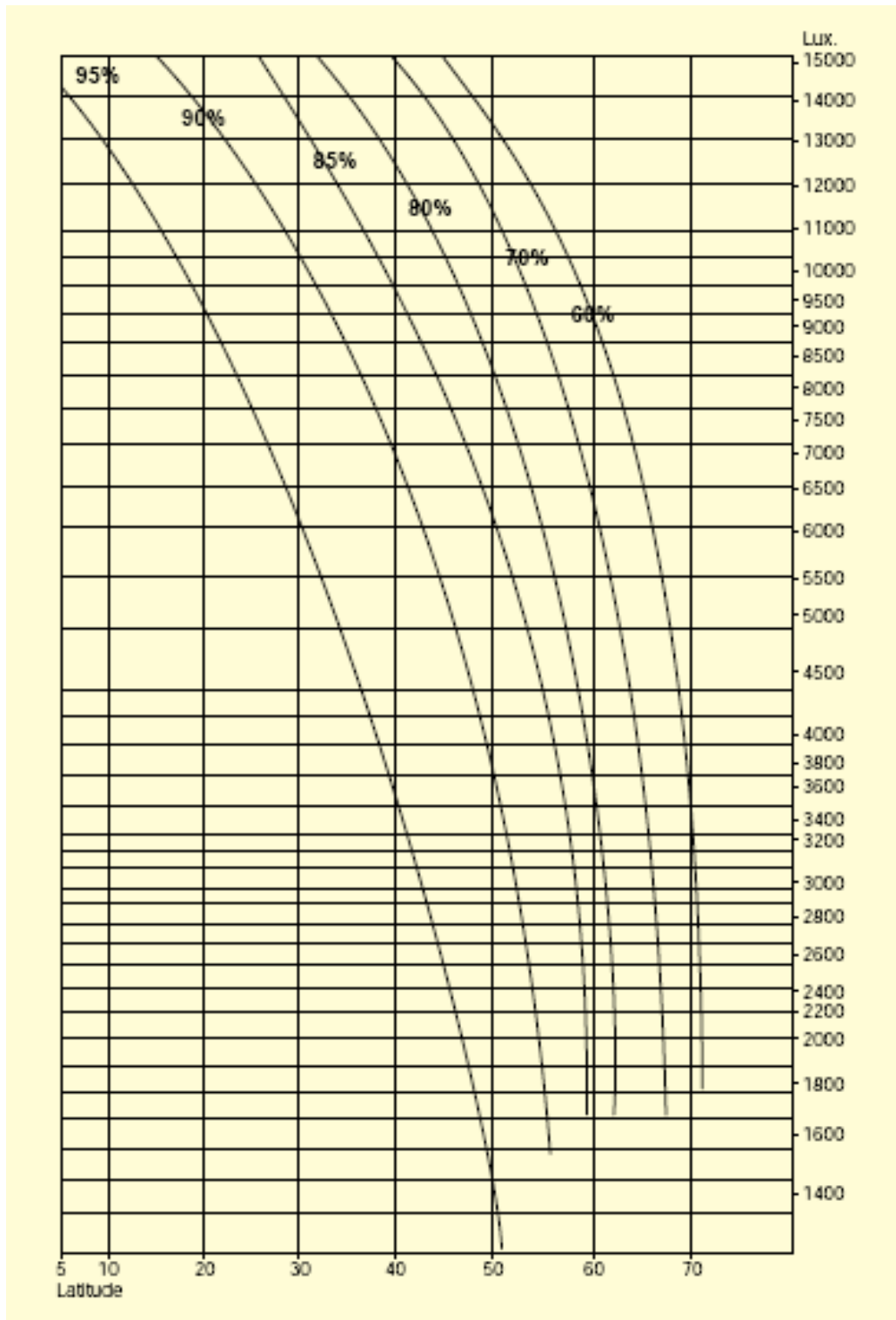
Σε ένα τυπικό χώρο με εξωτερικά εμπόδια, η συνεισφορά του εσωτερικά ανακλώμενου φωτός είναι ίδια σε όλο το βάθος του χώρου. Η συνεισφορά του εξωτερικά ανακλώμενου φωτός και αυτού που προέρχεται απευθείας από τον ουρανό μειώνονται όσο αυξάνει η απόσταση από το παράθυρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16.



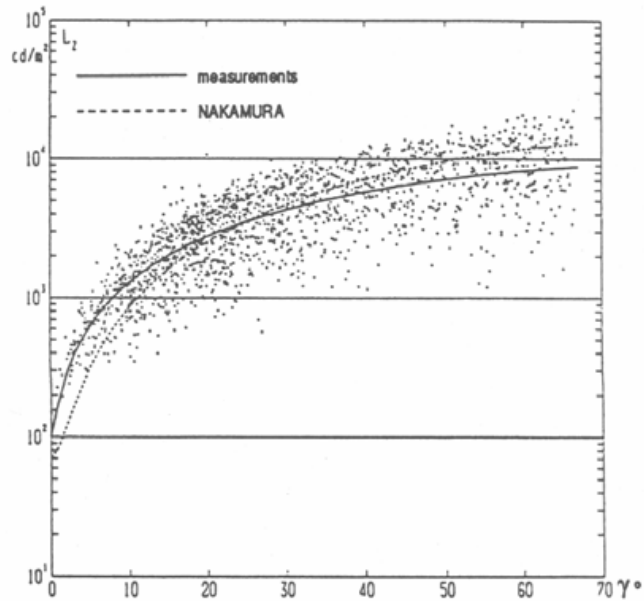
Σχήμα 2.16 α) Παρουσιάζονται οι τρεις παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ποσότητα του φυσικού φωτισμού σε ένα σημείο εσωτερικού χώρου και κατά συνέπεια ο Σ.Φ.Φ. στο σημείο αυτό. β) Η σχετική συνεισφορά του φωτός από τον ουρανό, καθώς και του εξωτερικά και του εσωτερικά ανακλώμενου, στο φωτισμό ενός τυπικού χώρου με εξωτερικό εμπόδιο. (Πηγή: [21])

### 2.3 Φυσικό φως και κλιματικά δεδομένα

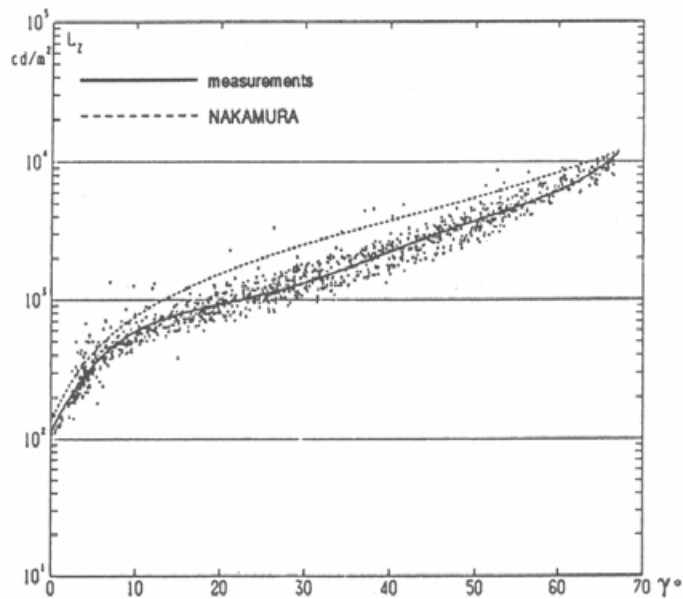
Η μεταβλητή λαμπρότητα του ουράνιου θόλου έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του φωτισμού της γης με γρήγορους, συχνά ταχύτατους, ρυθμούς. Παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα του φυσικού φωτός είναι το γεωγραφικό πλάτος και οι κυρίαρχοι τύποι ουρανού στην συγκεκριμένη περιοχή (Σχήμα 2.17). Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρούς και στερεούς ρύπους επηρεάζει και αυτή την ποσότητα που δέχεται μια επιφάνεια. Το φυσικό φως μπορεί να είναι άμεσο φως από τον ήλιο ή διάχυτο φως από τον ουράνιο θόλο. Και στις δύο περιπτώσεις ο φωτισμός αυξάνεται όσο μεγαλώνει το ηλιακό ύψος (Σχήμα 2.18). Αυτό συμβαίνει διότι η απόσταση που έχει να διανύσει η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα μειώνεται ([21]).



Σχήμα 2.17 Διαθεσιμότητα του φυσικού φωτός στην ύπαιθρο, ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους του τόπου. (Πηγή:[39])



(α)



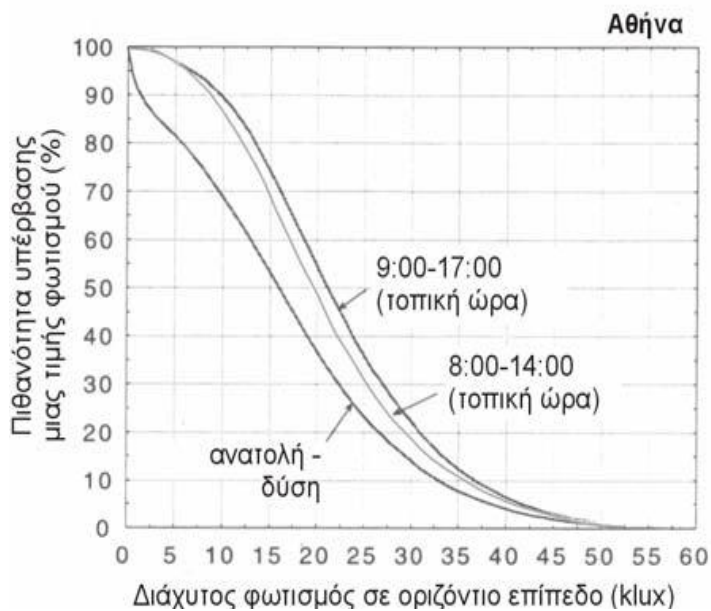
(β)

Σχήμα 2.18 Τιμές λαμπρότητας στο ζενίθ του ουράνιου θόλου ως συνάρτηση του ηλιακού ύψους, για α) καθαρό και β) νεφροσκεπή ουρανό, σύμφωνα με τον Nakamura. (Πηγή:[19])

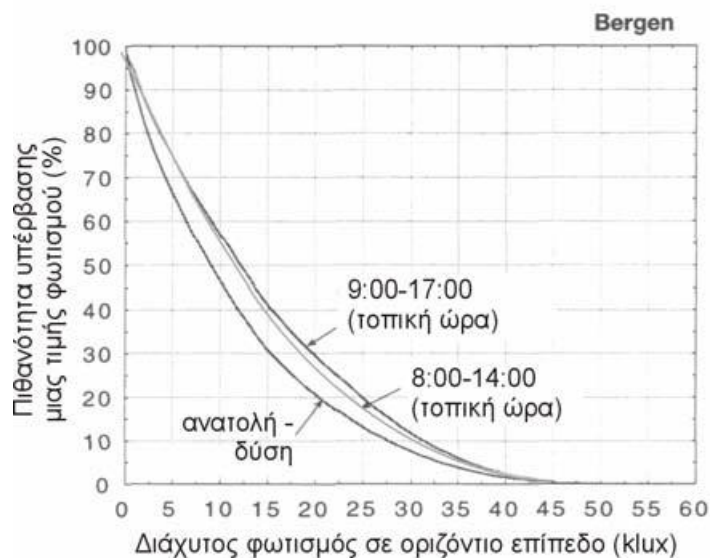
Ισχύει ότι τοποθεσίες με μικρότερο γεωγραφικό πλάτος δέχονται περισσότερο φως από αυτές με μεγαλύτερο Γ.Π., τόσο σε επίπεδο στιγμιαίων τιμών, όσο και σε επίπεδο αριθμού εργασιμων ωρών που αξιοποιούν τη διαθεσιμότητα σε φυσικό φως ([21]). Παρόλο που το ετήσιο άθροισμα των ωρών με φυσικό φως είναι το ίδιο για κάθε τοποθεσία στον πλανήτη, η ύπαρξη φυσικού φωτός στις 12:00 το βράδυ είναι ουσιαστικά άχρηστη όταν οι εργασιμες ώρες είναι π.χ. μεταξύ 9:00 και 18:00. Από το σχήμα 2.19 προκύπτει, για παράδειγμα, ότι



στην Αθήνα το 80% των εργάσιμων ωρών μεταξύ 8:00 και 14:00 αξιοποιεί εξωτερικά επίπεδα φωτισμού της τάξεως των 13.500lx περίπου, ενώ το 80% των αντίστοιχων ωρών στο Bergen της Νορβηγίας αξιοποιεί φωτισμό της τάξεως των 4.000lx περίπου.



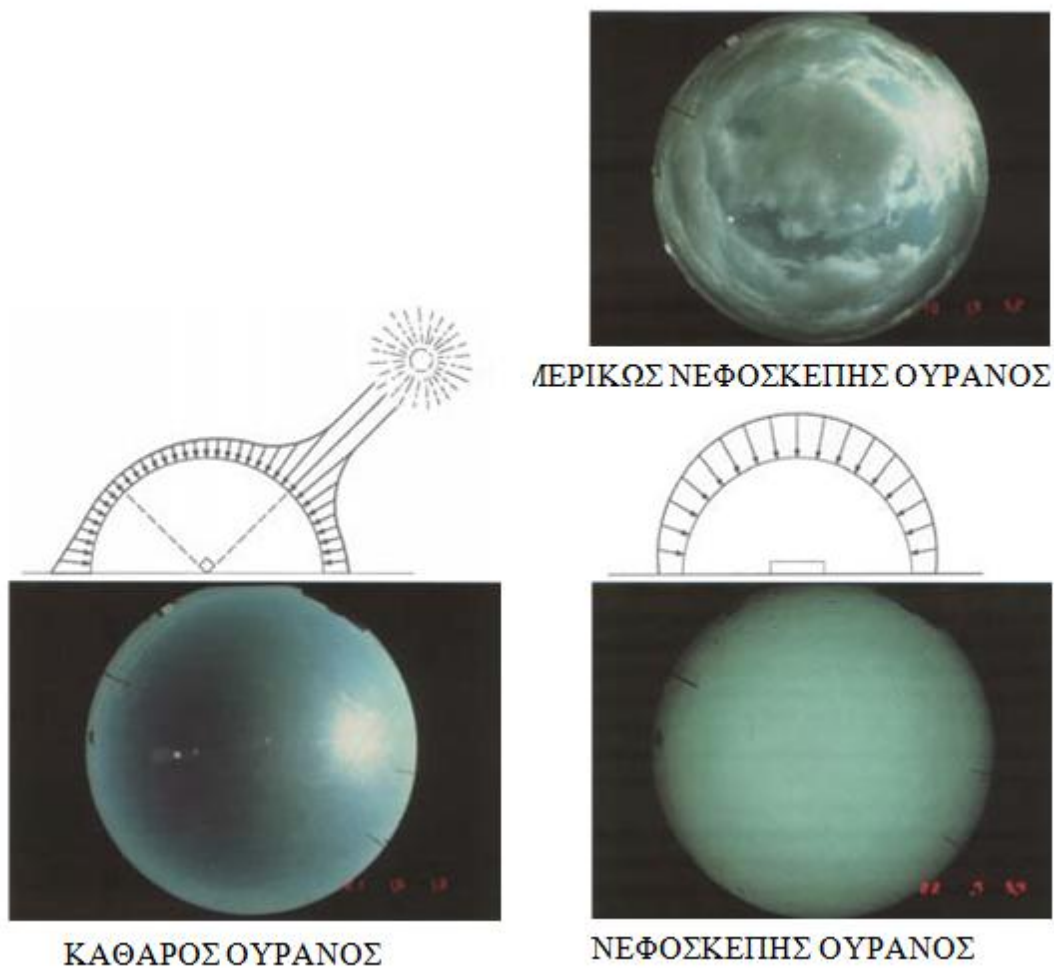
(α)



(β)

Σχήμα 2.19 Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων τιμών φωτισμού σε οριζόντιο επίπεδο στη διάρκεια ενός χρόνου. α) Η περίπτωση της Αθήνας και β) Η περίπτωση της πόλης Bergen στη Νορβηγία. (Πηγή:[21])

Ο πρώτος τύπος ουρανού ορίστηκε από τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού το 1955 ([29]) και ήταν ο νεφοσκεπής ουρανός (CIE standard overcast sky), στον οποίο η λαμπρότητα ενός σημείου στο ζενίθ του ουράνιου θόλου είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν σε ένα σημείο του ορίζοντα. Το 1973 ορίστηκε από την ίδια Επιτροπή ([31]) ένας νέος τύπος ουρανού, ο καθαρός ουρανός (CIE clear sky), στον οποίο η λαμπρότητα σε ένα σημείο γύρω από τον ήλιο είναι δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτήν σε ένα σημείο που βρίσκεται αντιδιαμετρικά του ουράνιου θόλου σε σχέση με τον ήλιο. Το 1996 οι δύο αυτοί τύποι ουρανού ορίστηκαν ως ISO και CIE Standards ([32]).



Σχήμα 2.20 Φωτογραφίες του ουράνιου θόλου που εμφανίζουν την κατανομή λαμπρότητας σε τρεις περιπτώσεις. (Πηγές:[21],[53])

Με το πέρασμα του χρόνου και επειδή δύο τύποι ουρανού δεν επαρκούν, για την περιγραφή της κατανομής της λαμπρότητας του ουρανού σε κάθε τόπο, το 1983 ξεκίνησε στα πλαίσια της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού το πρόγραμμα International Daylight Monitoring Programme (IDMP) με σκοπό τη συλλογή στοιχείων για το διαθέσιμο φυσικό φως σε

διάφορους τύπους. Το 2003 η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού όρισε ως ISO standards τα αποτελέσματα μιας Σλοβακικής – Αμερικάνικης έρευνας. Στον πίνακα 2.3 καταγράφεται μια ομάδα από 15 τύπους ουρανού, συμπεριλαμβανομένων και τον δύο προηγούμενων, που καλύπτουν όλο το πιθανό φάσμα ουρανών στον κόσμο ([55]).

Πίνακας 2.3 Οι νέοι 15 τύποι ουρανού.

α/α	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Νεφοσκεπής ουρανός με απότομη διαβάθμιση και ομοιομορφία ως προς το αζιμούθιο	I.1
2	Νεφοσκεπής ουρανός με απότομη διαβάθμιση και μεγαλύτερη φωτεινότητα γύρω από τον ήλιο	I.2
3	Νεφοσκεπής ουρανός με μέτρια διαβάθμιση και ομοιομορφία ως προς το αζιμούθιο	II.1
4	Νεφοσκεπής ουρανός με μέτρια διαβάθμιση και μεγαλύτερη φωτεινότητα γύρω από τον ήλιο	II.2
5	Νεφοσκεπής, ομιχλώδης ή συννεφιασμένος με γενική ομοιομορφία	III.1
6	Μερικώς συννεφιασμένος, με ομοιόμορφη διαβάθμιση και μεγαλύτερη φωτεινότητα γύρω από τον ήλιο	III.2
7	Μερικώς συννεφιασμένος, με ομοιόμορφη διαβάθμιση και λαμπρότερη περιηλιακή περιοχή	III.3
8	Μερικώς συννεφιασμένος, σχετικά ομοιόμορφος, με καθαρή ηλιακή κορώνα	III.4
9	Μερικώς συννεφιασμένος, με σκιασμένη την περιοχή του ήλιου	IV.2
10	Μερικώς συννεφιασμένος, με λαμπρότερη περιηλιακή περιοχή	IV.3
11	Λευκός – μπλε ουρανός, με καθαρή ηλιακή κορώνα	IV.4
12	Πολύ καθαρός/ μη τυρβώδης ουρανός, με καθαρή ηλιακή κορώνα	V.4
13	Καθαρός ουρανός με πολύ μόλυνση, με καθαρή ηλιακή κορώνα	V.5

14	Καθαρός τυρβώδης ουρανός με καθαρή ηλιακή κορώνα	VI.5
15	Λευκός – γαλανός τυρβώδης ουρανός, με ευρεία ηλιακή κορώνα	VI.6

## 2.4 Φυσικό φως και ανθρώπινη υγεία

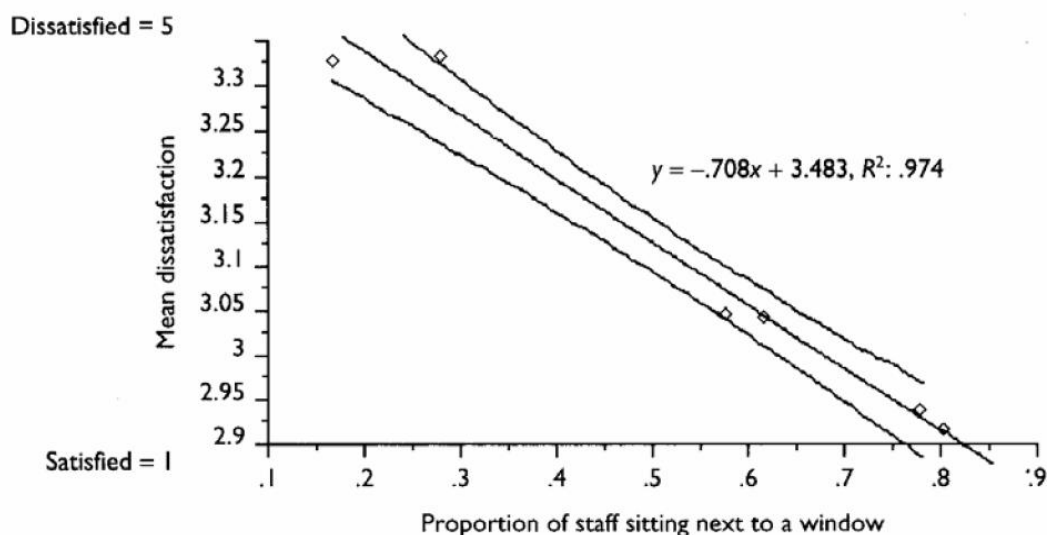
Η υγεία θεωρείται το σημαντικότερο αγαθό του ανθρώπου. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας ([72]), υγεία είναι η φυσική, πνευματική και κοινωνική ευρωστία, και όχι απλά η έλλειψη αρρώστιας ή αναπηρίας. Δεδομένου ότι η κοινωνική ευρωστία είναι μια έννοια συγκεχυμένη, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στις μέχρι σήμερα επιβεβαιωμένες επιστημονικές θεωρίες σχετικά με την επίδραση του φυσικού φωτός στη φυσική και πνευματική κατάσταση του ανθρώπου.

Είναι αξιοσημείωτο το πρόσφατο ιδιαίτερο ενδιαφέρον της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το θέμα της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στον άνθρωπο (Οδηγία 2006/25/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 5ης Απριλίου 2006, περί των ελαχίστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες). Μάλιστα, στα δύο Παραρτήματα που συνοδεύουν τη σχετική Οδηγία γίνεται εκτενής αναφορά στις οριακές τιμές έκθεσης σε κάθε φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (threshold limit values) συσχετισμένες με το όργανο του σώματος που κινδυνεύει σε κάθε περίπτωση, καθώς και την ανάλογη πάθηση.

Υπερκόπωση των ματιών μπορεί να προκληθεί τόσο από φυσικό όσο και από τεχνητό φως. Το φως είναι απαραίτητο για την όραση, αλλά υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να βλάψει την υγεία, προκαλώντας ερεθισμό στα μάτια, θολή όραση και πονοκεφάλους. Τα συμπτώματα αυτά μπορεί να προκληθούν είτε από φυσιολογικούς παράγοντες, είτε από δυσκολία στην αντίληψη. Παράδειγμα φυσιολογικού παράγοντα αποτελεί η πολύωρη εστίαση του ματιού σε ένα σημείο καθώς και η επαναλαμβανόμενη κίνηση του οφθαλμού. Από την άλλη, δυσκολία στην αντίληψη υπάρχει όταν κάποιος, για διάφορους λόγους, δεν κατορθώνει να διακρίνει αυτό που θέλει. Υπερκόπωση των ματιών μπορεί να προκληθεί από χαμηλό φωτισμό, υπερβολικά μεγάλες διαφορές σε τιμές λαμπρότητας (κοντράστ) στο οπτικό πεδίο, μειωμένη όραση του ατόμου, καθώς και από το τρεμοπαίξιμο μιας λάμπας ακόμα κι αν αυτό δεν είναι άμεσα ορατό. Η υπερκόπωση των ματιών έχει αρνητικές επιπτώσεις στην παραγωγικότητα, όχι μόνο μειώνοντας τη οπτική ικανότητα, αλλά και επηρεάζοντας την ανθρώπινη συμπεριφορά ([22]). Σύμφωνα με τους Heerwagen [42], οι εργαζόμενοι σε γραφεία χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους για να μειώσουν την οπτική δυσφορία, όπως να

σηκώνονται από τη θέση εργασίας για μια βόλτα ή για νερό, να εκφράζουν παράπονα στους συναδέλφους ή να μεταβάλλουν το άμεσο περιβάλλον εργασίας τους.

Οι εργαζόμενοι σε γραφεία με αρκετό φυσικό φως είναι αποδοτικότεροι σε σχέση με συναδέλφους τους σε γραφεία με λίγο φυσικό φως, γεγονός που πιθανώς σχετίζεται με τους κερκαδιανούς ρυθμούς ([40]). Μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί πάρα πολλές έρευνες που αφορούν τη σχέση φωτισμού και παραγωγικότητας. Οι περισσότερες από αυτές αναφέρονται ή/και αναλύονται στην εκτενή βιβλιογραφική έρευνα του Lighting Research Center στη Νέα Υόρκη ([22]). Για παράδειγμα, οι Leaman και Bordass ([54]) αναφέρουν ότι η παραγωγικότητα των εργαζομένων αυξάνει όσο μικραίνει η απόσταση μεταξύ τη θέσης εργασίας και παραθύρου (Σχήμα 2.21).



Σχήμα 2.21 Σύμφωνα με τους Leaman και Bordass [2000], η παραγωγικότητα των εργαζομένων αυξάνει όσο μικραίνει η απόσταση μεταξύ τη θέσης εργασίας και παραθύρου. (Πηγή: [22])

Επίσης, σύμφωνα με τους Figueiro [40], οι εργαζόμενοι σε γραφεία με παράθυρα περνούν περισσότερο χρόνο δουλεύοντας στον υπολογιστή, παρά μιλώντας στο τηλέφωνο ή σε άλλους ανθρώπους, σε σχέση με συναδέλφους τους σε γραφεία χωρίς παράθυρα. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές δηλώνουν πως πιθανώς υπάρχει σχέση μεταξύ της παραγωγικότητας των εργαζομένων και της ρύθμισης των κερκαδιανών ρυθμών.

#### 2.4.1 Φως και κερκαδιανοί ρυθμοί

Οι κερκαδιανοί ρυθμοί (στα αγγλικά Circadian, από το λατινικό circa = περίπου και το dies = ημέρα) αποτελούν τον 24ωρο κύκλο που ακολουθούν πολλές βιοχημικές λειτουργίες στα ζώα και στα φυτά, ως μέρος του βιολογικού ρολογιού που διαθέτει κάθε ζωντανός

οργανισμός ώστε να συμβαδίζει με τις εναλλαγές ημέρας-νύχτας ([Wikipedia, λήμμα circadian rhythm]). Έρευνες που έγιναν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '60 επιβεβαίωσαν ότι στην περίπτωση του ανθρώπου το βιολογικό αυτό ρολόι βρίσκεται στον υπερχιασματικό πυρήνα του εγκεφάλου, μια ομάδα νευρικών κυττάρων στον υποθάλαμο η οποία συντονίζει τους ημερήσιους και νυκτερινούς κύκλους του σώματος. Πειράματα έδειξαν ότι μπορεί να λειτουργεί ακόμα και χωρίς εξωτερικά ερεθίσματα, και μάλιστα ότι παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από την ηλικία. Έχει αποδειχθεί, ωστόσο, ότι ο οργανισμός χρησιμοποιεί τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και κυρίως το φωτισμό για να επαναριθμήσει τους κύκλους των περιόδων του λειτουργιών ώστε αυτοί να έχουν 24ωρη διάρκεια όπως και η ημέρα: καθώς το φως πέφτει πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού, παράγονται σήματα τα οποία μεταφέρονται στον υπερχιασματικό πυρήνα για να τον διεγείρουν. Ο υπερχιασματικός πυρήνας λαμβάνει την αρχική πληροφορία για τη διάρκεια της ημέρας από τον αμφιβληστροειδή, την ερμηνεύει και στη συνέχεια τη μεταδίδει στην υπόφυση, η οποία εκκρίνει την ορμόνη μελατονίνη σε απάντηση στο αρχικό μήνυμα. Το νυκτερινό σκοτάδι προκαλεί αύξηση της έκκρισης μελαμίνης, ενώ το φως της ημέρας αναστέλλει την έκκρισή της. Ακόμη και όταν λείπουν οι ενδείξεις του φωτός, η μελατονίνη εξακολουθεί να εκκρίνεται με κυκλικό τρόπο. Αν καταστραφεί το τμήμα του εγκεφάλου που ρυθμίζει την έκκρισή της, τότε ο κίρκαδιανός ρυθμός εξαφανίζεται εντελώς ([3]).

Σε πρόσφατες έρευνες τους οι Nabil και Mardaljevic [59] προτείνουν έναν νέο τρόπο αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού στα κτίρια, ο οποίος σχετίζεται κυρίως με την ποσότητα, αλλά σαφώς και με την ποιότητα του φωτός στο επίπεδο εργασίας. Η νέα μέθοδος ονομάζεται Χρήσιμες Τιμές Φυσικού Φωτισμού (ΧΤΦΦ) και βασίζεται σε κλιματικά δεδομένα ωριαίων τιμών φυσικού φωτισμού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Σε αντίθεση με τον Συντελεστή Φυσικού Φωτισμού, η νέα προσέγγιση - που χρησιμοποιεί πολύ αναλυτικότερα κλιματικά δεδομένα - λαμβάνει υπόψη πραγματικούς, ρεαλιστικούς τύπους ουρανού (και όχι απλά τον νεφοσκεπή), προβλέποντας ωριαίες τιμές φυσικού φωτισμού (lx) μέσα στα κτίρια. Η νέα, όμως, μέθοδος των ΧΤΦΦ δεν περιορίζεται στον υπολογισμό του φωτισμού στο επίπεδο εργασίας για όλο το έτος. Επιπρόσθετα, παρέχει πληροφορίες σχετικά με την τάση των υψηλών τιμών φωτισμού να προκαλούν οπτική δυσφορία στους χρήστες (θάμβωση) καθώς και ανεπιθύμητα ηλιακά κέρδη, όπως αναλύεται στη συνέχεια. Μέχρι πρόσφατα, ερευνητές και μελετητές χρησιμοποιούσαν την έννοια της Αυτονομίας σε Φυσικό Φωτισμό (Daylight autonomy) για να αξιολογήσουν τις προβλέψεις τιμών φυσικού φωτισμού σε ένα κτίριο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η αυτονομία ενός χώρου σε φυσικό φωτισμό περιγράφει τη συχνότητα (π.χ. ποσοστό των ωρών εργασίας για ένα έτος) κατά την οποία μία οριακή τιμή

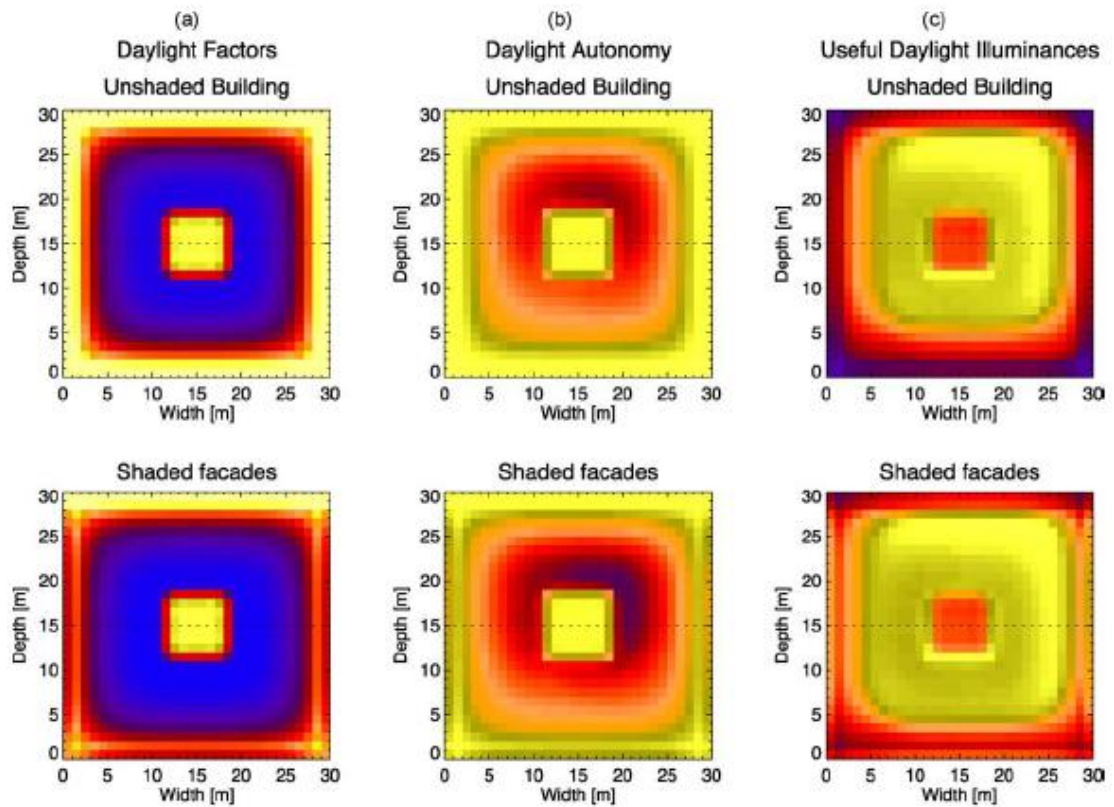
φωτισμού (π.χ. τα 500lx) καλύπτεται αποκλειστικά μέσω του φυσικού φωτισμού. Σε αντίθεση με αυτό, η νέα μέθοδος των ΧΤΦΦ υπολογίζει τη συχνότητα κατά την οποία επιτυγχάνονται τιμές φυσικού φωτισμού συγκεκριμένου εύρους (κλίμακας).

Ως χρήσιμες τιμές φυσικού φωτισμού ορίζονται αυτές που περιλαμβάνονται στο εύρος 100-2000 lx. Το εύρος αυτό καθορίστηκε βάσει πρόσφατων επιτόπιων ερευνών σχετικά με τη συμπεριφορά χρηστών κάτω από διαφορετικές συνθήκες φυσικού φωτισμού. Σύμφωνα με τη μέθοδο των Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού, οι τιμές που υπολογίζονται κατηγοριοποιούνται όπως φαίνεται στον πίνακα 2.4.

*Πίνακας 2.4 Τα τρία έρη τιμών φυσικού φωτισμού  
( Πηγή: [59] )*

<b>&lt; 100lx</b>	<b>100lx – 2000lx</b>	<b>&gt; 2000lx</b>
Μικρές τιμές φυσικού φωτισμού, ανεπαρκείς για τις περισσότερες δραστηριότητες	Οι χρήσιμες τιμές φυσικού φωτισμού που εξασφαλίζουν ικανοποιητικό φωτισμό για τις περισσότερες δραστηριότητες	Υψηλές τιμές φυσικού φωτισμού που πιθανόν οδηγούν σε θάμβωση

Στο παράδειγμα του σχήματος 2.22 απεικονίζονται α) οι τιμές Σ.Φ.Φ β) τα ποσοστά Αυτονομίας σε Φυσικό Φωτισμό και γ) τα ποσοστά των Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού, για τη περίπτωση ενός κτιρίου τετραγωνικής κάτοψης με εσωτερικό αίθριο ([59]). Εδώ παρουσιάζονται δύο από τις περιπτώσεις που μελέτησαν οι ερευνητές, μία χωρίς σκίαστρα και μία όπου σκιάζονται οι τρεις πλευρές του κτιρίου (εκτός της βορεινής). Εάν κάποιος βασιστεί αποκλειστικά στις τιμές Σ.Φ.Φ. και στα ποσοστά της Αυτονομίας Φυσικού Φωτισμού, συμπεραίνει πως η περίπτωση χωρίς την σκίαση είναι καλύτερη, αφού ο φωτισμός είναι περισσότερος. Λαμβάνοντας υπόψη, όμως, τα ποσοστά των Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού, προκύπτει πως, στην περίπτωση χωρίς τα σκίαστρα, οι υψηλές τιμές φωτισμού κοντά στα παράθυρα είναι πολύ πιθανό να οδηγήσουν σε οπτική δυσφορία. Άρα, η περίπτωση με τα σκίαστρα είναι σαφώς καλύτερη, αφού τα ποσοστά των Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού είναι αυξημένα.



Σχήμα 2.22 Σύγκριση μεταξύ α) τιμών Σ.Φ.Φ., β) ποσοστών Αυτονομίας σε Φυσικό Φωτισμό και γ) ποσοστών Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού, σε μελέτη των Nabil και Mardaljevic . (Πηγή: [59])

Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, η μέθοδος των Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού θεωρείται σήμερα πολύ πιο χρήσιμη από τις τιμές Σ.Φ.Φ. και αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στις έρευνες πάνω στο φυσικό φωτισμό των κτιρίων.



## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ”

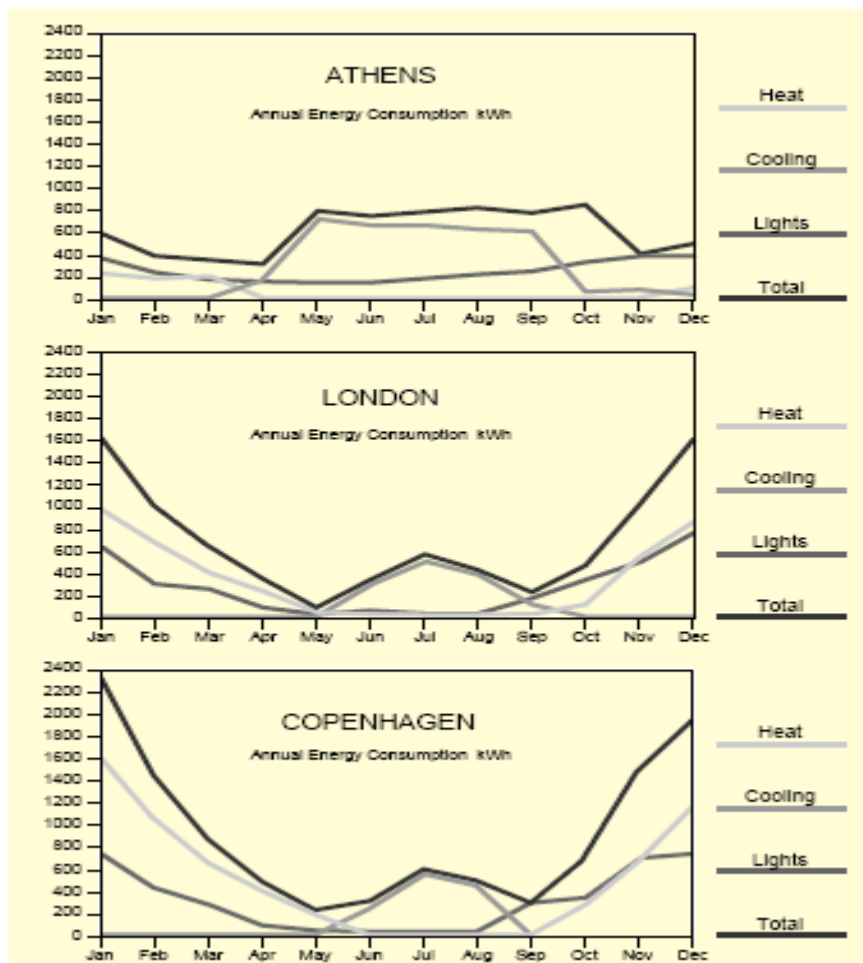
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε διάφορα τεχνολογικά ευρήματα με τα οποία μπορούμε να επιτύχουμε αύξηση του εισερχόμενου φυσικού φωτισμού στον εκάστοτε χώρο. Βέβαια πρωταρχικός ρόλος στην εισροή φυσικού φωτισμού είναι η αρχιτεκτονική του κτιρίου. Ωστόσο η εφαρμογή και εγκατάσταση αυτών των ευρημάτων αυξάνει σημαντικά την εξοικονόμηση ενέργειας των κτιρίων.

#### 3.1 Επιρροές φυσικού φωτισμού

Η χρήση του φυσικού φωτισμού επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας ενός κτιρίου άμεσα και έμμεσα.

- Άμεσα την επηρεάζει όταν το φυσικό φως αντικαθιστά τμήμα της ηλεκτρικής ενέργειας για το φωτισμό των χώρων.
- Έμμεσα την επηρεάζει με δύο τρόπους: Αφενός, μεγαλύτερες επιφάνειες υαλοστασίων (άρα περισσότερο φυσικό φως) συνεπάγονται περισσότερες θερμικές απώλειες το χειμώνα και περισσότερα θερμικά κέρδη το καλοκαίρι, αφού αυξάνεται ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας των εξωτερικών τοίχων. Αφετέρου, συχνά η διείσδυση φυσικού φωτός στο εσωτερικό ενός κτιρίου συνεπάγεται και την είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία άλλοτε είναι επιθυμητή και άλλοτε όχι.

Σύμφωνα με μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα, στο Λονδίνο και στην Κοπεγχάγη (Σχήμα 3.1) προέκυψε ότι η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό ενός γραφείου 54τ.μ αποτελεί περίπου το 35% της συνολικής κατανάλωση ενέργειας έκαστος. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτίσματος, τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής και η συμπεριφορά των χρηστών επηρεάζουν την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται (θέρμανση, ψύξη, φωτισμό) ([41]).



Σχήμα 3.1 Σύγκριση μεταξύ α) τιμών Σ.Φ.Φ., β) ποσοστών Αυτονομίας σε Φυσικό Φωτισμό και γ) ποσοστών Χρήσιμων Τιμών Φυσικού Φωτισμού. (Πηγή: [59])

### 3.1.1 Τυποποιημένες ζώνες φυσικού φωτισμού

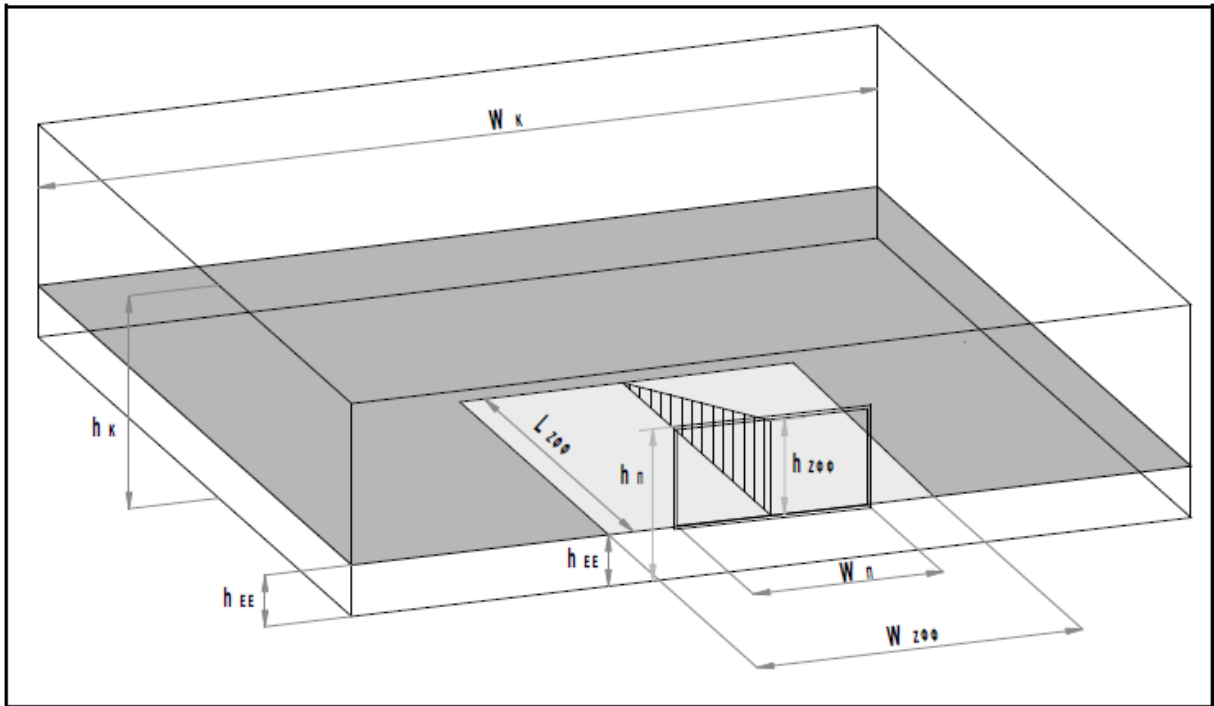
Περιγραφή ζωνών φυσικού φωτισμού πλευρικών ανοιγμάτων και ανοιγμάτων οροφής για βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων.

Όπως έχουμε αναφέρει ήδη για την αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού και την αποτελεσματικότερη χρήση του σε ένα κτήριο πρέπει να συνδυάσουμε τις εξής παραμέτρους :

- Προσανατολισμός κτηρίου
- Ηλιασμό του κτηρίου
- Πλευρικά ανοίγματα των χώρων
- Ανοίγματα οροφής των χώρων
- Ώρες λειτουργίας
- Χρήση κτηρίου
- Διαστάσεις των χώρων (βάθος, μήκος, πλάτος, ύψος)

### 3.1.1.1 Πλευρικά ανοίγματα

Σύμφωνα με το παρακάτω τυποποιημένο σχήμα 3.2 υπολογίζουμε την ζώνη φυσικού φωτισμού για πλευρικά ανοίγματα.



Σχήμα 3.2 Ζώνη φυσικού φωτισμού από πλευρικά ανοίγματα χώρων  
(Πηγή : [10])

Εάν σε έναν χώρο υπάρχει πλευρικό άνοιγμα το οποίο έχει πλάτος  $W_{\pi}$  και ύψος πρεκιού  $h_{\pi}$  τότε η ζώνη φυσικού φωτισμού που σχηματίζεται καλύπτει μέρος του χώρου επάνω από την επιφάνεια εργασίας (με ύψος  $h_{EE}$ ) και έχει βάθος  $L_{Z\Phi\Phi}$ , που εξαρτάται από το ύψος της δέσμης φυσικού φωτισμού  $h_{Z\Phi\Phi}$  (ύψος μεταξύ πρεκιού και επιφάνεια εργασίας) και υπολογίζεται από τις σχέσεις :

$$L_{Z\Phi\Phi} = 2,5 \times h_{Z\Phi\Phi} \quad (3.1)$$

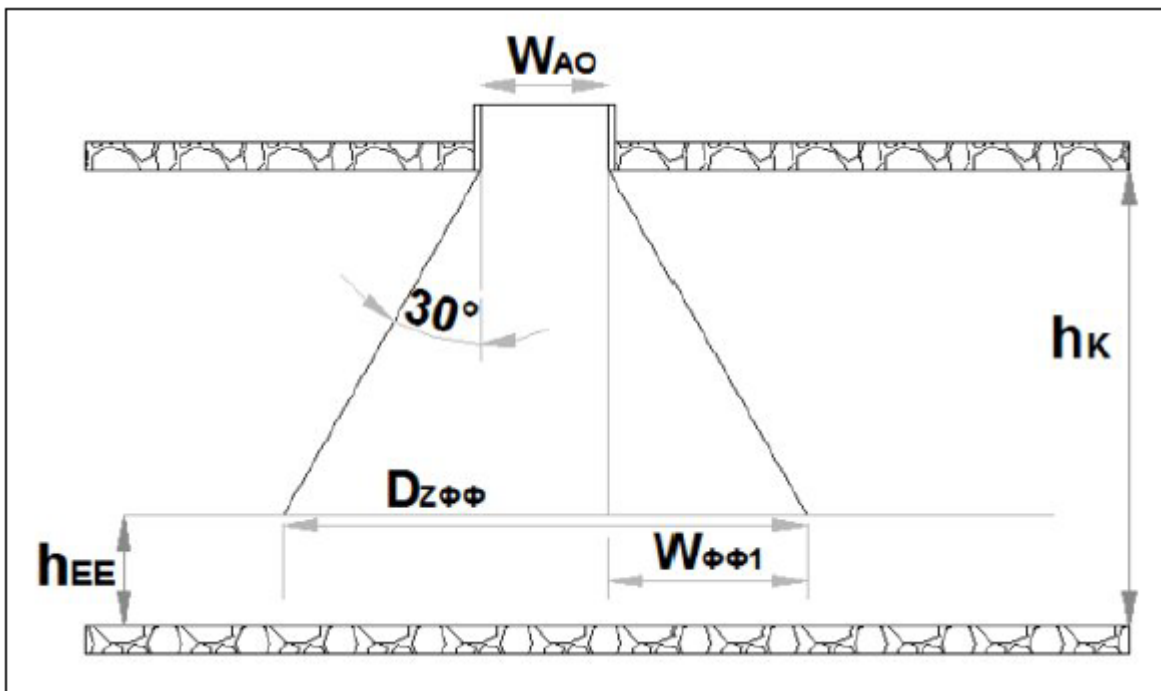
$$h_{Z\Phi\Phi} = h_{\pi} - h_{EE} \quad (3.2)$$

Αντίστοιχα το πλάτος της ζώνης φυσικού φωτισμού  $W_{\Pi}$  υπολογίζεται ως το άθροισμα του πλάτους του παραθύρου  $W_{\Pi}$  και το μισό του βάθους της ζώνης φυσικού φωτισμού  $L_{Z\Phi\Phi}$  όπως περιγράφεται στην ακόλουθη σχέση :

$$W_{Z\Phi\Phi} = W_{\Pi+} + 0,5 \times L_{Z\Phi\Phi} \quad (3.3)$$

### 3.1.1.2 Ανοίγματα οροφής

Σύμφωνα με το παρακάτω τυποποιημένο σχήμα 3.3 υπολογίζουμε την ζώνη φυσικού φωτισμού για ανοίγματα οροφής.



Σχήμα 3.3 Ζώνη φυσικού φωτισμού από ανοίγματα οροφής (Πηγή : [10])

Η περιοχή φυσικού φωτισμού από τα ανοίγματα οροφής υπολογίζεται ανάλογα με το πλάτος του ανοίγματος  $W_{AO}$  το ύψος του χώρου  $h_K$  και το ύψος της επιφάνειας εργασίας  $h_{EE}$ . Η περιοχή που μπορεί να καλυφθεί με φυσικό φωτισμό από ένα άνοιγμα οροφής ορίζεται περιμετρικά με την ευθεία που ξεκινάει από το άνοιγμα οροφής και προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια εργασίας (με ύψος  $h_{EE}$ ) με κλίση  $30^\circ$ . Για ένα κυκλικό άνοιγμα, η περιοχή στο επίπεδο επιφάνειας εργασίας που καλύπτει το άνοιγμα οροφής θα αντιστοιχεί σε μια κυκλική περιοχή με διάμετρο  $D_{Z\Phi\Phi}$  όπως υπολογίζεται από τη σχέση :

$$D_{Z\Phi\Phi} = W_{AO} + 2 \times (h_K - h_{EE}) \times \text{Xef}(30^\circ) \quad (3.4)$$

### 3.1.1.3 Αξιολόγηση πραγματικής χρήσης φυσικού φωτισμού

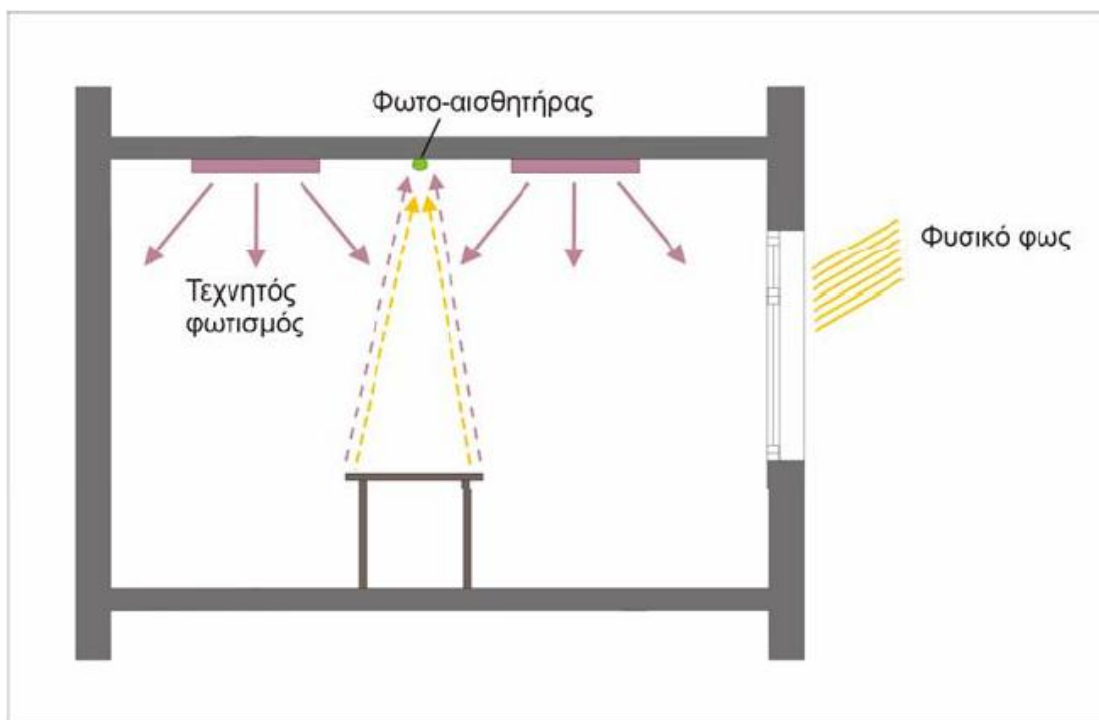
Λαμβάνοντας υπόψη τις αναφορές για τα πλευρικά ανοίγματα και τα ανοίγματα οροφής και σύμφωνα και με τα τυποποιημένα σχήματα 3.2, 3.3 ορίζεται ως περιοχή φυσικού φωτισμού για την κάθε περίπτωση η περιοχή :

- **Πλευρικά ανοίγματα** προς το εσωτερικό του χώρου σε απόσταση (βάθος)  $L_{z\phi\phi} = 4\text{m}$  από τα πλευρικά ανοίγματα ενός τοίχου και με πλάτος ίσο με το πλάτος του ανοίγματος αυξημένο κατά δύο μέτρα ( $W_{\text{IT}} + 2\text{m}$ )
- **Οριζόντια ανοίγματα** που βρίσκεται κάτω από το άνοιγμα οροφής και εκτείνεται 1,5mπέρα από τα όρια προβολής του ανοίγματος επί της επιφάνειας εργασίας ([10]).

Ωστόσο διευκρινίζεται ότι, για να αξιολογηθεί η πραγματική χρήση φυσικού φωτισμού στις ζώνες φυσικού φωτισμού, θα πρέπει οι ζώνες να εξοπλίζονται και από ανάλογα συστήματα διαχείρισης φυσικού φωτισμού (συστήματα αυτόματης αφής/σβέσης φωτιστικών ανά ζώνη φυσικού φωτισμού). Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 15193:2008, για να θεωρηθεί αξιολογήσιμη οποιαδήποτε διάταξη αυτομάτου ελέγχου των συστημάτων φωτισμού, θα πρέπει να ελέγχεται τουλάχιστον το 60% της εγκατεστημένης ισχύος φωτισμού. Σε διαφορετική περίπτωση αγνοείτε η ύπαρξη της και δεν αξιολογείτε ([10]).

### 3.1.2 Συστήματα ελέγχου του τεχνητού φωτισμού

Με ένα σύστημα ελέγχου τεχνητού φωτισμού μπορούμε να αποφέρουμε εξοικονόμηση ενέργειας από 30% έως 70%. Αυτό επιτυγχάνεται με συσκευές που ρυθμίζουν τη λειτουργία του τεχνητού φωτισμού σε συνάρτηση με ένα εξωτερικό σήμα όπως χειροκίνητη επαφή, ανίχνευση παρουσίας, χρονοδιακόπτη ή στάθμη φυσικού φωτισμού ([39]). Αποδοτικότερο είναι το σύστημα σύζευξης φυσικού/τεχνητού φωτισμού το οποίο διατηρεί σταθερό φωτισμό στο επίπεδο εργασίας μέσω αυξομείωσης της έντασης των λαμπτήρων ([16]). Η εξοικονόμηση ενέργειας που θα επιτευχθεί με αυτόν τον τρόπο εξαρτάται από τα κλιματικά δεδομένα, την ικανότητα του συστήματος ελέγχου και το μέγεθος των ελεγχόμενων ζωνών ([46]). Τα συστήματα ελέγχου που βασίζονται στη σύζευξη φυσικού και τεχνητού φωτισμού λειτουργούν με φωτοκύτταρο το οποίο ανιχνεύει τα επίπεδα φυσικού φωτισμού και στέλνει το ανάλογο σήμα στη μονάδα ελέγχου (controller) η οποία αυξομειώνει την ένταση των λαμπτήρων ή τους αναβοσβήνει.



Σχήμα 3.4 Απλοποιημένη παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας ενός συστήματος σύζευξης φυσικού και τεχνητού φωτισμού, κλειστού βρόγχου.  
 ([Πηγή: Επανασχεδιασμός σύμφωνα με διάγραμμα του Lighting Research Center])

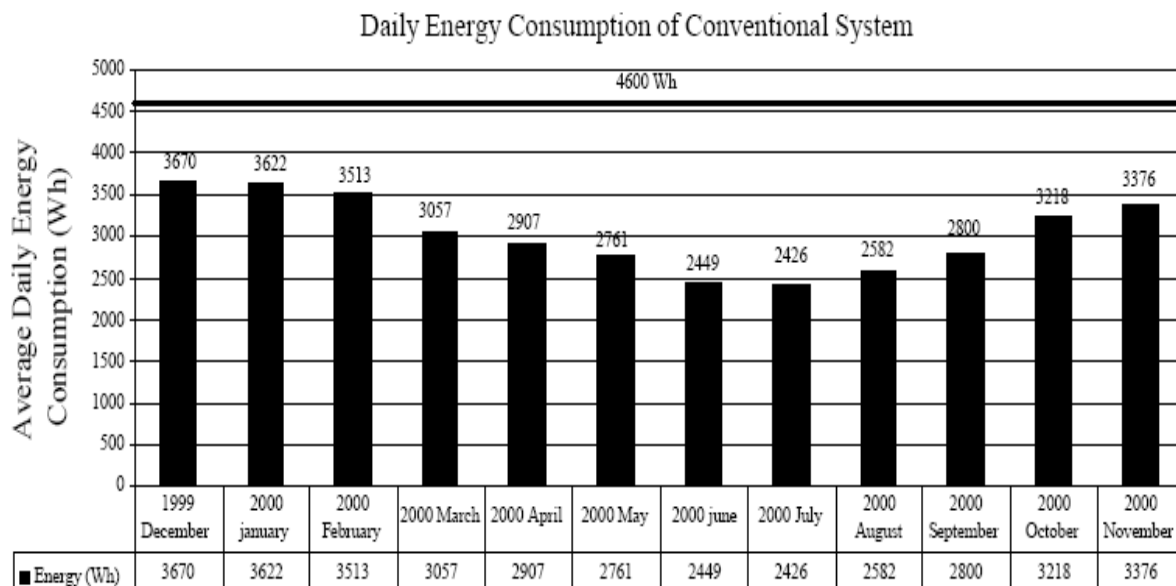
Η τοποθέτηση του φωτοαισθητήρα έχει μεγάλη σημασία γιατί σχετίζεται με τον αλγόριθμο ελέγχου που θα χρησιμοποιηθεί. Συχνά τοποθετείται στην οροφή και βαθμονομείται επί τόπου ώστε να διατηρεί σταθερά επίπεδα φωτισμού στο επίπεδο εργασίας. Όταν ένα φωτοκύτταρο ελέγχει έναν μεγάλο χώρο, μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα εάν τμήματα του χώρου σκιάζονται από εξωτερικούς όγκους (π.χ. κτίρια, δένδρα). Επίσης, όταν χρησιμοποιούνται φωτοενισχυτικές διατάξεις όπως π.χ. ράφια φωτισμού, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη θέση και στο είδος καλύμματος του αισθητήρα, ώστε αυτός να μη δέχεται ανακλώμενο φως από το σύστημα και μειώσει άδικα την ένταση του φωτισμού στο επίπεδο εργασίας ([56]). Η μονάδα ελέγχου, η οποία είναι τοποθετημένη στην αρχή του κυκλώματος, περιλαμβάνει έναν αλγόριθμο που επεξεργάζεται το σήμα από το φωτοαισθητήρα και το μετατρέπει σε εντολή προς τη μονάδα αυξομείωσης (ή τη μονάδα έναυσης / σβέσης) των λαμπτήρων. Η αυξομείωση είναι προτιμότερη από την έναυση / σβέση γιατί δεν είναι ενοχλητική για τους χρήστες και γιατί καταναλώνει λιγότερη ενέργεια ([46]). Μάλιστα, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν γίνεται σωστή ομαδοποίηση των φωτιστικών σωμάτων όπου εφαρμόζεται η αυξομείωση της έντασης φωτισμού ([52]). Η εξοικονόμηση ενέργειας που θα επιτευχθεί με αυτόν τον τρόπο εξαρτάται

από τα κλιματικά δεδομένα, την ικανότητα του συστήματος ελέγχου και το μέγεθος των ελεγχόμενων ζωνών ([46]).

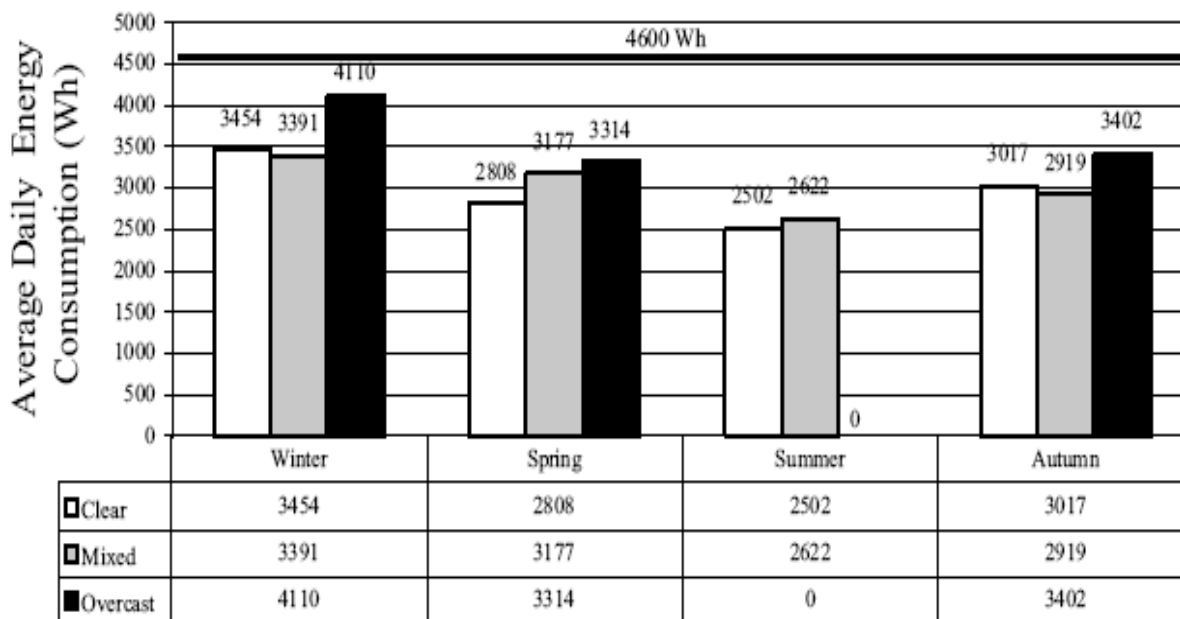
Γενικά, υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων ελέγχου του φωτισμού.

- Τα συστήματα κλειστού βρόγχου όπου ο φωτοαισθητήρας είναι τοποθετημένος σε σημείο από όπου ανιχνεύει τόσο το φυσικό φωτισμό, όσο και τον τεχνητό φωτισμό που πηγάζει από τον λαμπτήρα (ή την ομάδα λαμπτήρων) τον οποίο ελέγχει.
- Τα συστήματα ανοικτού βρόγχου όπου ο φωτοαισθητήρας ανιχνεύει μόνο τα επίπεδα φυσικού φωτισμού, «αδιαφορώντας» για το φωτισμό από τους λαμπτήρες τους οποίους ελέγχει. Σε αυτήν την περίπτωση ο αισθητήρας θα μπορούσε να βρίσκεται ακόμα και έξω από το παράθυρο.

Σύμφωνα με τους Reynolds & Stein [64], κάθε χώρος του οποίου τουλάχιστον ο μισός φωτισμός του οφείλεται στο φυσικό φως, για αρκετές ώρες της ημέρας, οφείλει να ελέγχεται από σύστημα σύζευξης φυσικού / τεχνητού φωτισμού. Η πρόβλεψη της εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της αξιοποίησης του φυσικού φωτισμού είναι σημαντική για τον ενεργειακό σχεδιασμό κτιρίων. Αρχικά αναπτύχθηκαν μαθηματικές και γραφοεικονικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης αυτής ([44],[56]). Σήμερα, έχει κάποιος τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ειδικά λογισμικά που μπορούν να υπολογίσουν την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με τη χρήση αυτόματων συστημάτων ελέγχου του φωτισμού σε σχέση με την απλή περίπτωση της έναυσης / σβέσης. Στα σχήματα 3.5 και 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας έρευνας σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της σύζευξης φυσικού και τεχνητού φωτισμού σε ένα τυπικό γραφείο στην Κωνσταντινούπολη ([60]). Στα διαγράμματα, η ευθεία γραμμή στις 4.600Wh αντιστοιχεί στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς το σύστημα ελέγχου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η εξοικονόμηση ενέργειας υπολογίστηκε στο 30%.



Σχήμα 3.5 Μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά μήνα.  
Πηγή: [60]



Σχήμα 3.6 Μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές καιρικές συνθήκες και ανά εποχή.  
Πηγή: [60]

Στην Ελλάδα, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος GREEN LIGHT 2000-2006 και με εθνικό εκπρόσωπο το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, εφαρμόστηκε σε διάφορα κτίρια η σύζευξη φυσικού και τεχνητού φωτισμού, σε συνδυασμό και με άλλα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που αφορούν αποκλειστικά στον τεχνητό φωτισμό. Σε κάθε περίπτωση, ο αρχιτέκτονας θα πρέπει πρώτα να εξασφαλίζει την αξιοποίηση του φυσικού



φωτισμού μέσω της ίδιας της αρχιτεκτονικής του κτιρίου (προσανατολισμός χώρων, σχήμα-μέγεθος-θέση ανοιγμάτων, σωστή σκίαση κ.τ.λ.) και στη συνέχεια να διερευνάται η δυνατότητα περαιτέρω εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της χρήσης συστημάτων σύζευξης φυσικού και τεχνητού φωτισμού.

### 3.1.2.1 Συντελεστής επίδρασης φυσικού φωτισμού ( $F_D$ )

Ο συντελεστής επίδρασης φυσικού φωτισμού είναι ο συντελεστής μείωσης της αρχικά υπολογιζόμενης κατανάλωσης ενέργειας για φωτισμό, λόγω της χρήσης διατάξεων αυτομάτου ελέγχου που παρέχουν τη δυνατότητα αξιοποίησης φυσικού φωτισμού σε ένα χώρο. Ο συντελεστής ισούται με τη μονάδα όταν δεν εφαρμόζεται καμία διάταξη αυτομάτου ελέγχου του συστήματος φωτισμού και μικρότερος από τη μονάδα όταν εφαρμόζονται διατάξεις αυτομάτου ελέγχου φωτισμού. Στον πίνακα καθορίζονται τυπικές τιμές του συντελεστή επίδρασης φυσικού φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 15193:2008, οι οποίες θα λαμβάνονται για τους υπολογισμούς της ενεργειακής κατανάλωσης για φωτισμό. Για να ισχύουν οι τιμές του πίνακα θα πρέπει τουλάχιστον το 60% της ισχύος φωτισμού του χώρου να ελέγχεται από την αντίστοιχη διάταξη αυτοματισμού ([10]).

*Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές του συντελεστή επίδρασης φυσικού φωτισμού λόγω χρήσης αυτοματισμών ελέγχου (Πηγή : [10])*

<b>Διατάξεις αυτοματισμών ελέγχου για την αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού</b>	<b><math>F_D</math></b>
Χειροκίνητος έλεγχος φωτισμού για όλες τις χρήσεις κτηρίων	1,0
Αυτόματος έλεγχος φωτισμού (με αισθητήρα φυσικού φωτισμού) για όλες τις χρήσεις κτηρίων εκτός εκπαίδευσης και περίθαλψης	0,9
Αυτόματος έλεγχος φωτισμού (με αισθητήρα φυσικού φωτισμού) για κτήρια εκπαίδευσης και περίθαλψης	0,8

### 3.1.2.2 Συντελεστής επίδρασης χρηστών ( $F_o$ )

Ο συντελεστής επίδρασης χρηστών είναι ο συντελεστής μείωσης της αρχικά υπολογιζόμενης κατανάλωσης ενέργειας για φωτισμό λόγω της χρήσης διατάξεων αυτοματισμών ανίχνευσης ή παρουσίας. Ο συντελεστής λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα όταν δεν εφαρμόζεται καμία μείωση της χρήσης φωτισμού κατά την απουσία των χρηστών, και μηδενική τιμή όταν εφαρμόζεται πλήρης μείωση της χρήσης φωτισμού κατά την απουσία των χρηστών ([10]).

Πίνακας 3.2 Τυπικές τιμές του συντελεστή επίδρασης παρουσίας ή απουσίας χρηστών (Πηγή : [10])

<b>Συστήματα χωρίς αισθητήρες ανίχνευσης παρουσίας ή απουσίας</b>	<b>F<sub>0</sub></b>
Χειροκίνητος διακόπτης (αφής / σβέσης)	1,00
Χειροκίνητος διακόπτης (αφής /σβέσης) και πρόσθετη αυτόματη ένδειξη για συνολική σβέση	0,95
<b>Συστήματα με αισθητήρες ανίχνευσης παρουσίας ή απουσίας</b>	<b>F<sub>0</sub></b>
Αυτόματη έναυση / ρύθμιση φωτεινής ροής	0,95
Αυτόματη έναυση και σβέση	0,90
Χειροκίνητη έναυση / ρύθμιση φωτεινής ροής	0,90
Χειροκίνητη έναυση / αυτόματη σβέση	0,80

### 3.2 Φωτοενισχυτικές Τεχνικές

Η βασική πηγή φυσικού φωτός στα κτίρια είναι τα παράθυρα στην κοινή τους μορφή χωρίς όμως την ικανότητα να ενισχύουν το φως στο βάθος των χώρων αλλά και να σκιάζουν επαρκώς όταν προκαλείται υπερθέρμανση ή θάμβωση. Για το λόγο αυτό ερευνήθηκαν διάφοροι νέοι εξοπλισμοί που ενσωματώνονται ή προστίθενται στα παράθυρα. Στην ουσία, οι εξελιγμένες τεχνικές φυσικού φωτισμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στις παρακάτω τέσσερις περιπτώσεις ([21]):

- Όταν ένα κτίριο περιβάλλεται από μεγάλα εμπόδια (συνήθως κτιριακούς όγκους) μία εξελιγμένη διάταξη μπορεί να «συλλέξει» φως από τα ορατά τμήματα του ουρανού και να το ανακατευθύνει προς το εσωτερικό του χώρου.
- Στην περίπτωση που ένας χώρος έχει μεγάλο βάθος και το φως από τα ανοίγματα δεν επαρκεί, τότε μια φωτοενισχυτική διάταξη μπορεί να ανακατευθύνει τμήμα του εισερχόμενου φυσικού φωτός προς το βάθος του χώρου και με τον τρόπο αυτό να βελτιώσει την ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού.
- Σε τόπους με μεγάλη ηλιοφάνεια, μια σωστά σχεδιασμένη διάταξη είναι ικανή να περιορίσει τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας ή/και να ανακατευθύνει το φως στο βάθος των χώρων.
- Όταν οι απαιτήσεις κάποιων χώρων σε φωτισμό είναι αυστηρά προκαθορισμένες (π.χ. σε μουσεία), ένα εξελιγμένο σύστημα φυσικού φωτισμού θα επιχειρήσει να μειώσει τη θάμβωση ή/και να αποκόψει εντελώς την ηλιακή ακτινοβολία. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην απόδοση μιας εξελιγμένης τεχνικής φυσικού φωτισμού συνεκτιμούνται και άλλοι παράγοντες, όπως ο αερισμός, ο σκιασμός και η καθαρή θέα προς τα έξω, και συχνά μια διάταξη δεν ικανοποιεί πλήρως όλες τις παραμέτρους. Η εφαρμογή των καινοτόμων

αυτών συστημάτων θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, αφού ληφθούν υπόψη τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, η λειτουργία του χώρου και οι ανάγκες του σε φυσικό φωτισμό.

### 3.2.1 Εξελιγμένοι τύποι τζαμιών

Σήμερα υπάρχει μία πληθώρα τύπων τζαμιών, τα οποία υπόσχονται να συμβάλουν στην καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων. Κύριες κατηγορίες τέτοιων τζαμιών είναι οι παρακάτω:

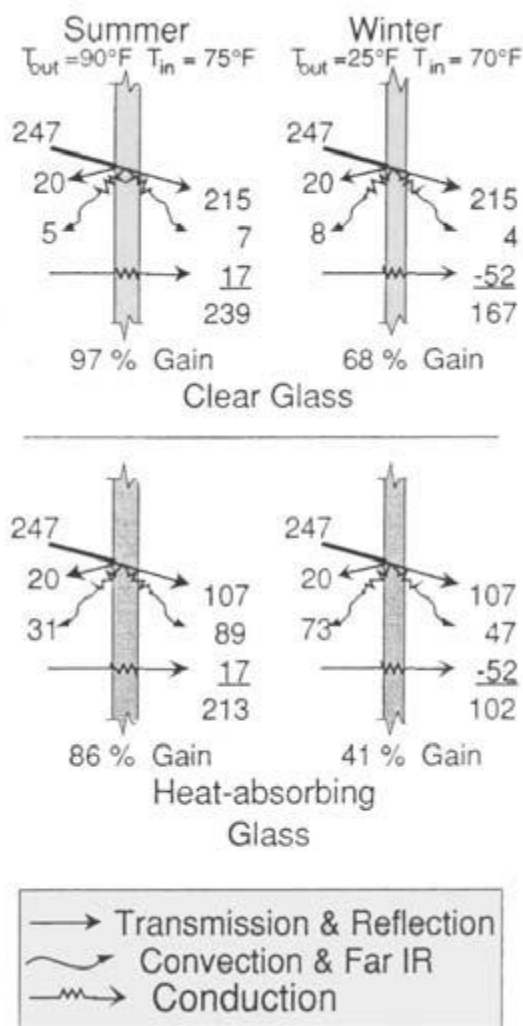
- **Θερμοαπορροφητικά τζάμια.** Το γυαλί που απορροφά τη θερμότητα κατασκευάζεται με την προσθήκη μικρής ποσότητας μεταλλικών οξειδίων στην υαλομάζα. Τα οξείδια αυτά προσδίδουν στα τζάμια ελαφριά απόχρωση και υψηλότερο ποσοστό απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας έτσι ώστε η εισερχόμενη στο εσωτερικό ακτινοβολία να είναι περιορισμένη. Τα τζάμια αυτά χρησιμοποιήθηκαν αρκετά, κυρίως σε κτίρια γραφείων, με σκοπό τη μείωση της υπερθέρμανσης, αλλά και της θάμβωσης. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7, η μείωση των θερμικών κερδών το καλοκαίρι δεν είναι σημαντική. Αυτό συμβαίνει γιατί το θερμοαπορροφητικό τζάμι (η θερμοκρασία του οποίου μπορεί να φτάσει τους 54° C το καλοκαίρι) εκπέμπει μεγάλη ποσότητα θερμικής ακτινοβολίας προς το εσωτερικό. Ένα ακόμα μειονέκτημα των τζαμιών αυτών είναι η αλλοίωση της χρωματικής απόδοσης, αλλά και της ποσότητας του εισερχόμενου φυσικού φωτός ([50]).

- **Ανακλαστικά τζάμια.** Τα τζάμια αυτά φέρουν επιφανειακή επένδυση μετάλλων ή μεταλλικών οξειδίων κι έτσι αποτρέπουν τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μεγάλο ποσοστό (έως και 50%). Το κυριότερο μειονέκτημα είναι η μεγάλη μείωση των θερμικών κερδών και του εισερχόμενου φυσικού φωτός κατά τη χειμερινή περίοδο ([39]).

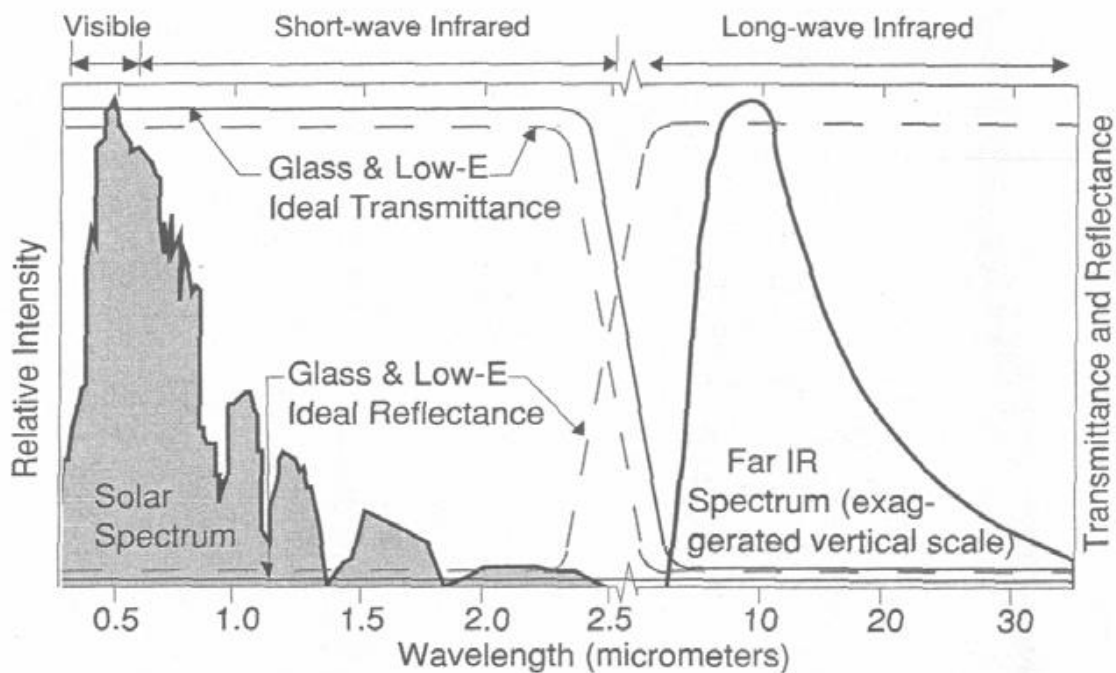
- **Τζάμια μεταβλητής διαπερατότητας.** Τα ηλεκτροχρωμικά τζάμια αλλάζουν τη φωτοδιαπερατότητά τους υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Τα θερμοχρωμικά τζάμια εναλλάσσονται μεταξύ μιας θερμοδιαπερατής και μιας θερμοανακλαστικής κατάστασης, ανάλογα με τις επιλεγμένες οριακές θερμοκρασίες. Τα φωτοχρωμικά τζάμια αλλάζουν το χρώμα τους (από σκούρο σε ανοιχτόχρωμο και αντίστροφα) ανάλογα με τη φωτεινή ένταση. Όλα τα τζάμια μεταβλητής διαπερατότητας βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, αφού το κόστος είναι μεγάλο και η αντοχή στο χρόνο μικρή ([39]).

- **Τζάμια χαμηλής εκπομπής (low-e).** Τα τζάμια αυτά χαρακτηρίζονται, σε γενικές γραμμές, από μεγάλη τιμή διαπερατότητας και χαμηλή τιμή ανακλαστικότητας όσον αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία (μικρού μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία), ενώ αντίθετα,

όσον αφορά την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα (μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία) εμφανίζουν σχετικά χαμηλή τιμή διαπερατότητας και μεγάλη τιμή ανακλαστικότητας ([58]). Αυτό πρακτικά σημαίνει πως τα τζάμια αυτά επιτρέπουν τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα διαφυλάσσουν τη ζέστη μέσα στο χώρο. Η λειτουργία τους αυτή οφείλεται σε μία πρόσθετη επικάλυψη από οξείδια μετάλλου στην εσωτερική επιφάνεια ενός από τα δύο πετάσματα γυαλιού από τα οποία αποτελούνται. Η θερμομονωτική λειτουργία τους βελτιώνεται ακόμα περισσότερο με την προσθήκη αφυγρασμένου αέρα ή αδρανούς αερίου (π.χ. αργό) στο διάκενο του τζαμιού. Τα τζάμια χαμηλής εκπομπής εφαρμόζονται σήμερα με επιτυχία σε όλο τον κόσμο και σε κτίρια διαφόρων χρήσεων. Σύγκριση με το απλό τζάμι βλέπουμε στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.7



Σχήμα 3.8 Σύγκριση τιμών διαπερατότητας και ανακλαστικότητας για απλό τζάμι και τζάμι χαμηλής εκπομπής (Πηγή: [50])

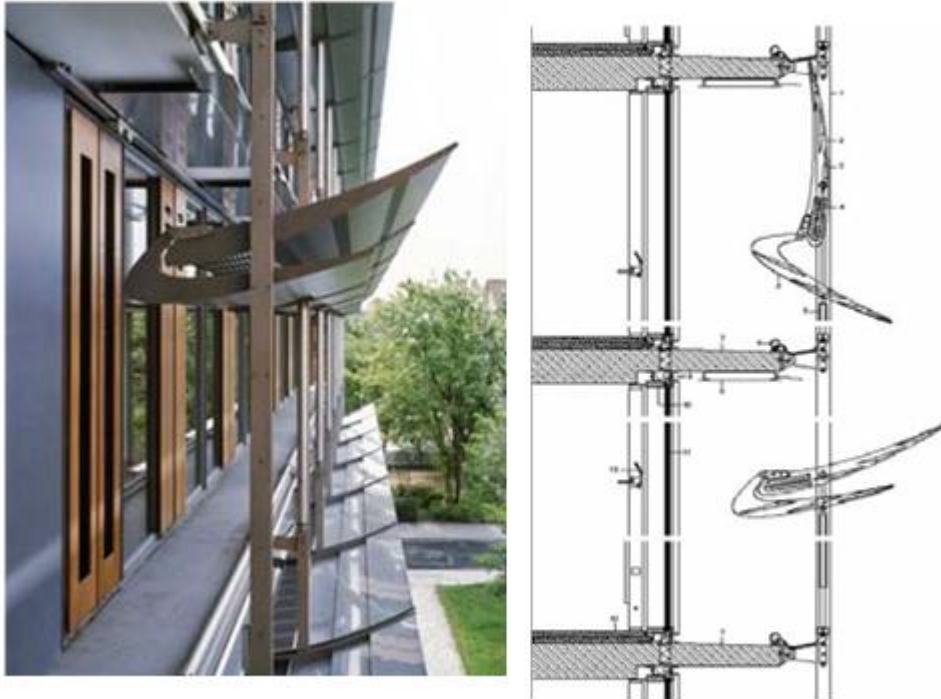
### 3.2.2 Εξελιγμένοι τύποι σκιάστρων

Τα σκιάστρα σαν συστήματα από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί από όλους τους πολιτισμούς. Η τεχνολογική ανάπτυξη και οι αυξημένες απαιτήσεις του ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων έχουν αποφέρει κατασκευές υψηλής τεχνολογίας οι οποίες ανταποκρίνονται στο όλο ένα υψηλό βιοτικό επίπεδο καθώς και στον σύγχρονο σχεδιασμό.

Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Εσωτερικές κι εξωτερικές περσίδες σκίασης, από διάφορα υλικά, που περιστρέφονται και εισέλκονται ηλεκτροκίνητα μέσω τηλεχειριστηρίου (και με δυνατότητα χρήσης χρονοδιακόπτη). Μπορούν να συνδυαστούν με τη χρήση αισθητήρων φωτός ώστε να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του κάθε χώρου και του κάθε χρήστη ατομικά.
- Εξελιγμένες τέντες και ειδικά υφάσματα που, εκτός του ότι προστατεύουν από την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία, μπορούν και αυτές να συνδυαστούν με τη χρήση αισθητήρων φωτός ώστε να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του κάθε χώρου και του κάθε χρήστη ατομικά.

- Σκιάστρα – ανακλαστήρες φωτός που λειτουργούν διπλά παρέχοντας σκιά όταν χρειάζεται και ενισχύοντας το φως των εσωτερικών χώρων μέσω ανάκλασης στην άνω επιφάνεια των σκιάστρων (η οποία πρέπει να είναι έντονα ανακλαστική)
- Διάφορες πρωτότυπες εκδοχές «έξυπνων» σκιάστρων που κινούνται και αλλάζουν μορφή ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες ηλιασμού.



Σχήμα 3.9 Ηλεκτροκίνητα σκιάδια – ανακλαστήρες φωτός σε κτίριο γραφείων στη Γερμανία  
(Πηγή: [43])

### 3.2.3 Κινητά στόρια και περσίδες σκίασης

Τα κινητά στόρια και οι περσίδες σκίασης αποτελούν κλασσικούς τρόπους αποφυγής για :

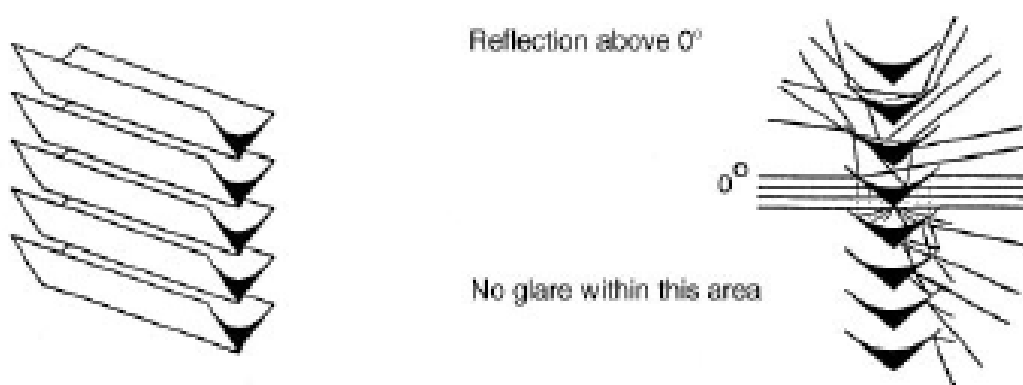
- διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας
- θάμβωση

Σε πολλές, μάλιστα, περιπτώσεις, οι διατάξεις αυτές ανακατευθύνουν το φως προς το βάθος του χώρου, βελτιώνοντας έτσι την ομοιομορφία του φωτισμού. Οι περσίδες σκίασης τοποθετούνται κατά κανόνα εξωτερικά των ανοιγμάτων, ενώ τα κινητά στόρια μπαίνουν εσωτερικά ή και ανάμεσα στα υαλοπετάσματα. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να είναι οριζόντιες, κάθετες, καμπύλες, ανάλογα με τον προσανατολισμό του ανοίγματος και τη λειτουργία των σκιαδίων.



Σχήμα 3.10 Ενδεικτική λειτουργία των κλασικών σκιαδίων  
(Πηγή: [21])

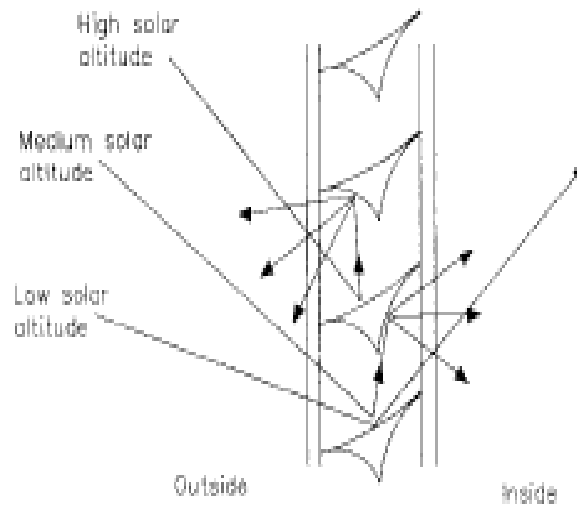
Μία καινοτόμο μορφή αποτελεί το σύστημα «ψάρι» (“Fish” system”) στο οποίο σταθερά σκιάδια τριγωνικής διατομής αποτρέπουν τη θάμβωση και ανακατευθύνουν τμήμα του φυσικού φωτός προς την οροφή του χώρου. Απαιτείται, όμως, πρόσθετος σκιασμός για την αποφυγή των θερμικών κερδών, εάν αυτά είναι ανεπιθύμητα ([46]). Μειονέκτημα αποτελεί η περιορισμένη θέα προς τα έξω.



Σχήμα 3.11 Το σύστημα «ψάρι» αποτρέπει τη θάμβωση και ανακατευθύνει τμήμα του φυσικού φωτός προς την οροφή του χώρου (Πηγή: [46])

Μία ακόμα εφαρμογή σκιαδίων τα οποία ενσωματώνονται σε υαλοστάσιο είναι η περίπτωση των προϊόντων Okasolar της εταιρείας Okalux ([www.okalux.de](http://www.okalux.de)). Τα τριγωνικής διατομής ανακλαστικά σκιάδια το χειμώνα ανακατευθύνουν το φως στην οροφή, ενώ το

καλοκαίρι σκιάζουν. Η ακριβής μορφή τους καθορίζεται κάθε φορά από το Γεωγραφικό Πλάτος του κάθε τόπου ([46]).



(α)



(β)

Σχήμα 3.12 α) Η λειτουργία των ενσωματωμένων σκιαδίων σε διπλό υαλοπίνακα (προϊόν Okasolar της εταιρείας Okalux) β) το ίδιο το προϊόν.  
Πηγές: [46]

### 3.2.4 Συμπεράσματα από έρευνες σχετικά με την εφαρμογή διαφόρων τύπων σκιαδίων

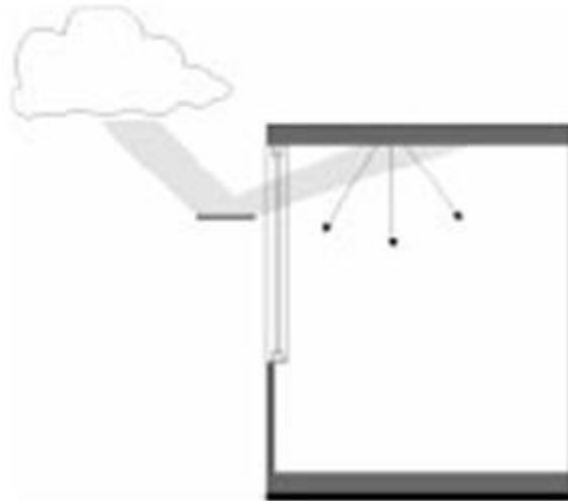
Τα συμπεράσματα συνοψίζονται σε:



- Όσον αφορά στα απλά βενετικά στόρια, η κλίση τους πέρα των  $45^\circ$  δεν επιφέρει αυξημένη προστασία από τη θάμβωση, ενώ μειώνει αισθητά τα επίπεδα φωτισμού στο χώρο. Για τον λόγο αυτό, οι χρήστες θα πρέπει να είναι προσεκτικοί και τα στόρια να παίρνουν μεγάλη κλίση μόνο όταν αυτό είναι άκρως απαραίτητο ([46]).
- Τα βενετικά στόρια που κινούνται αυτόματα μέσω κεντρικού συστήματος ελέγχου (BEMS) προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, αφού προσαρμόζονται στις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Μπορούν να εφαρμοστούν σε τόπους κάθε γεωγραφικού πλάτους με την προϋπόθεση ότι θα προσαρμοστεί κατάλληλα ο αλγόριθμος ρύθμισης της κίνησης των σκιαδίων.
- Τα ημιδιαφανή σκιάδια σε γενικές γραμμές εξασφαλίζουν αποφυγή της θάμβωσης χωρίς μεγάλη μείωση των επιπέδων φωτισμού μέσα στο χώρο. Προϋπόθεση για τη σωστή χρήση τους είναι να μην αποτελέσουν τα ίδια τα σκιάδια πηγή θάμβωσης.
- Το σύστημα «ψάρι» προσφέρει λίγο μεγαλύτερες τιμές φωτισμού σε σχέση με τα απλά βενετικά στόρια σε κλειστή θέση. Παρόλα αυτά, η διάταξη αυτή θα πρέπει να ερευνηθεί αναλυτικότερα για να υπάρξουν πιο αξιόπιστα συμπεράσματα.
- Από έρευνα που διεξήχθη στη Μεγάλη Βρετανία, προέκυψε πως εάν μεταλλικά βενετικά στόρια χρησιμοποιηθούν ως αντεστραμμένα, δηλαδή με την κοίλη πλευρά τους προς τα πάνω (η οποία θα πρέπει να έχει μεγάλη ανακλαστικότητα), τότε αυτά κατορθώνουν να αυξήσουν το φυσικό φωτισμό του χώρου, ειδικά στην περίπτωση μεγάλων ηλιακών υψών (καλοκαίρι). Μπορούν, όμως, ταυτόχρονα να αποτελέσουν πηγή θάμβωσης, άρα καλό είναι να χρησιμοποιούνται από τα 2,00μ. και πάνω.
- Σε μία άλλη μελέτη, στη Δανία, τα βενετικά στόρια εξετάστηκαν ως αντεστραμμένα (με την κοίλη επιφάνειά τους προς τα πάνω) και ως ημιδιαφανή (λιγότερο από 10% διαπερατότητα). Η απόδοσή τους ήταν καλύτερη το καλοκαίρι και κατά τις δύο ισημερίες, όταν προσέφεραν αυξημένα επίπεδα φωτισμού στο κέντρο και στο πίσω μέρος του χώρου σε σύγκριση με την περίπτωση που εφαρμόστηκαν με την κοίλη επιφάνεια προς τα κάτω (όπως συνηθίζεται). Σε ορισμένες περιπτώσεις, όμως, τα βενετικά στόρια αποτελούσαν πηγή θάμβωσης και αρκετές φορές περιόριζαν τη θέα προς τα έξω.
- Οι υπόλοιπες κλασσικές διατάξεις σκίασης, όπως ρολά, τέντες, πρόβολοι κτλ, δεν εξετάζονται, διότι αφορούν αποκλειστικά τον σκιασμό και δεν στοχεύουν στην ενίσχυση του φυσικού φωτισμού στο χώρο. Παρόλα αυτά, η επίδρασή τους σε αυτόν είναι άμεση και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε περίπτωση ([38]).

### 3.2.5 Ράφια Φωτισμού

Τα ράφια φωτισμού (lights helves) είναι οριζόντιες ή κεκλιμένες επιφάνειες, οι οποίες έχουν διπλό ρόλο: αφενός ανακατευθύνουν την ηλιακή ακτινοβολία και το διάχυτο φυσικό φως προς το βάθος ενός χώρου βελτιώνοντας έτσι την ομοιομορφία του φωτισμού και αφετέρου σκιάζουν το άνοιγμα. Τα ράφια φωτισμού μπορούν να είναι μόνο εξωτερικά, μόνο εσωτερικά, ή συνδυασμός.



(α)



(β)

Σχήμα 3.13 α) Ενδεικτική λειτουργία ενός εξωτερικού οριζόντιου ραφιού φωτισμού  
β) Χρήση ραφιών φωτισμού στο Λονδίνο της βικτωριανής εποχής (Πηγή: [21])

Παρόλο που συγκαταλέγονται στα «εξελιγμένα» συστήματα ενίσχυσης του φυσικού φωτισμού, τα ράφια φωτισμού αποτελούν απλές κατασκευαστικές λύσεις που εφαρμόστηκαν ακόμα και από τους Αιγυπτίους ([46]), αλλά και στην Αγγλία της βικτωριανής εποχής (Σχήμα 3.13).

Τα ράφια φωτισμού συνήθως τοποθετούνται πάνω από το ύψος του ανθρώπινου ματιού, ώστε να μην αποτελούν πηγή θάμβωσης λόγω της μεγάλης ανακλαστικότητας της πάνω επιφάνειάς τους. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να προσφέρει διάχυτη ανακλαστικότητα (όπως π.χ. μία άσπρη ματ επιφάνεια) ή κατοπτρική (όπως π.χ. καθρέφτης ή γυαλισμένο αλουμίνιο) ή μια ενδιάμεση κατάσταση η οποία ίσως αποτελεί και την ιδανική περίπτωση ([56]).

Με την χρήση αυτών των διατάξεων μειώνεται η πιθανότητα χρήσης τεχνικού φωτισμού καθώς αυξάνουν την ομοιομορφία κατανομής του φωτισμού με αποτέλεσμα ο χώρος να φαίνεται περισσότερο φωτισμένος ([21]).

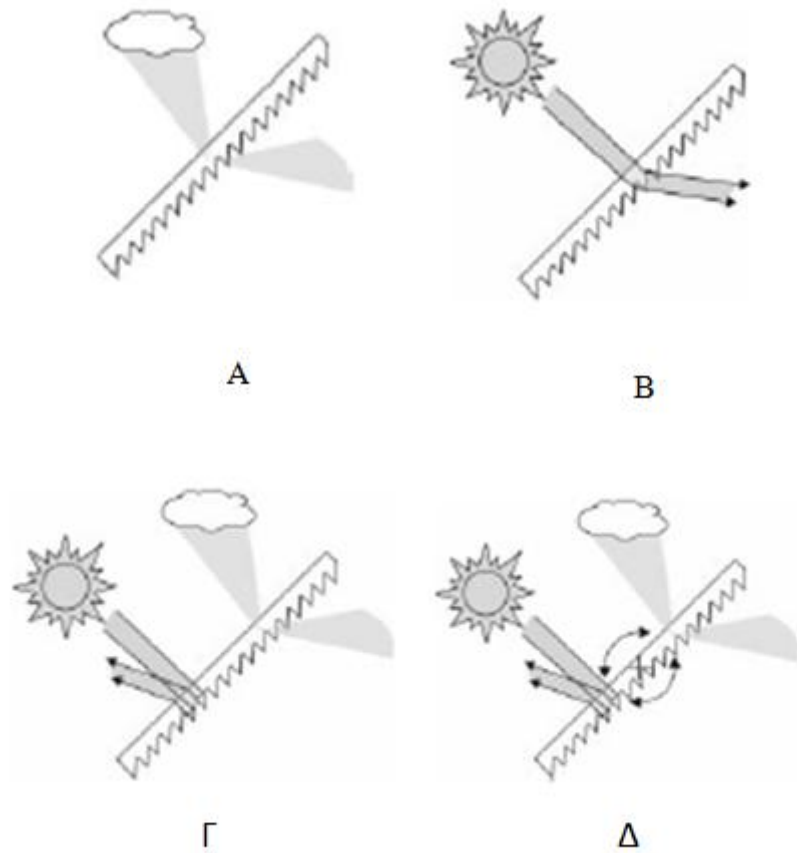
### 3.2.6 Πρισματικοί υαλοπίνακες

Οι πρισματικοί υαλοπίνακες είναι λεπτές, επίπεδες πριονωτές διατάξεις, κατασκευασμένες από καθαρό ακρυλικό. Συνήθως είναι σταθερές (ανάμεσα σε δύο απλούς υαλοπίνακες για να προστατεύονται από τη σκόνη), αλλά μπορούν να είναι και κινητές, υπό μορφή περσίδων ([46]). Η λειτουργία των πρισματικών υαλοπινάκων στηρίζεται σε δύο φυσικά φαινόμενα, τη διάθλαση του φωτός (στην ανώτερη πλευρά της πριονωτής επιφάνειας) και την ολική ανάκλασή του (στην εσωτερική επιφάνεια του πρίσματος). Η γεωμετρία του πρίσματος παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία της διάταξης και για αυτό αυτή καθορίζεται με ακρίβεια μέσω ειδικών λογισμικών ([21]). Ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, οι πρισματικοί υαλοπίνακες μπορούν να έχουν ηλιοπροστατευτική δράση, παρεμποδίζοντας την εισχώρηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την καλοκαιρινή περίοδο και επιτρέποντάς την το χειμώνα, ή παράλληλα να λειτουργούν ως φωτοενισχυτικές διατάξεις, εκτρέποντας την πορεία του φωτός προς συγκεκριμένες περιοχές του εσωτερικού χώρου ([12]).

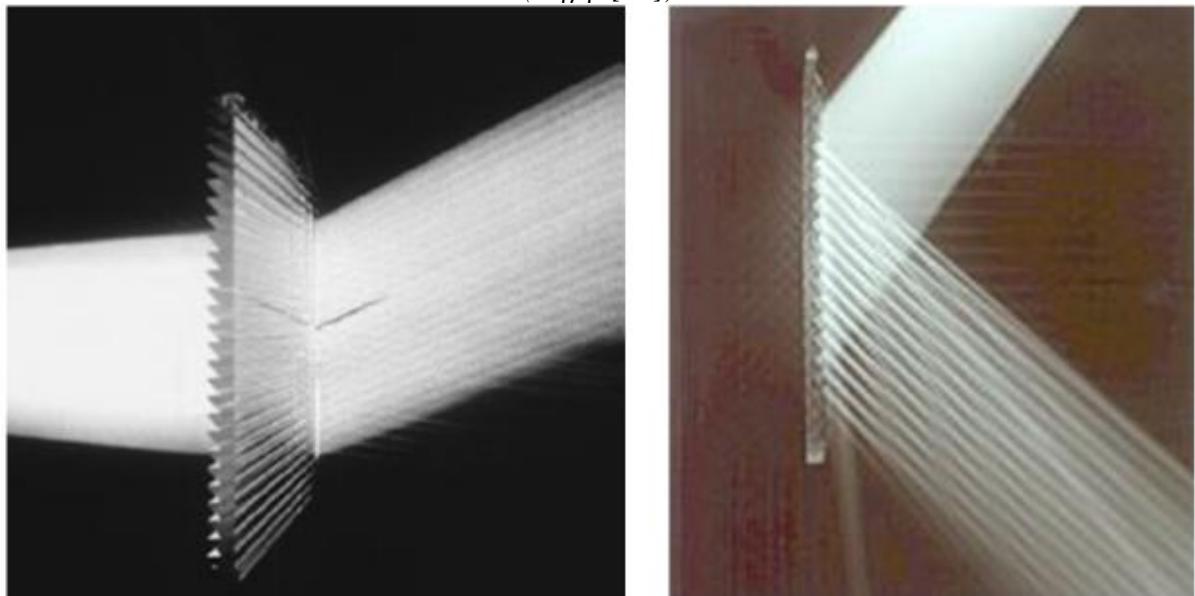
Αναλυτικότερα, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις ([46]), όπως φαίνονται στο σχήμα 3.14:

- A. Συνήθως οι πρισματικοί υαλοπίνακες χρησιμοποιούνται για να ανακατευθύνουν το φως στο βάθος του χώρου, ενώ παράλληλα μειώνουν τη λαμπρότητα του παραθύρου. Σε τόπους με μεγάλη ηλιοφάνεια απαιτείται, όμως, πρόσθετη σκίαση.
- B. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εισάγουν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία σε ένα χώρο. Για να αποφευχθεί η θάμβωση και η αλλοίωση του χρώματος, είναι σημαντικός ο σωστός καθορισμός της γεωμετρίας του συστήματος καθώς και η δυνατότητα κλίσης.
- Γ. Στις γυάλινες οροφές οι πρισματικοί υαλοπίνακες μπορούν να λειτουργήσουν ως μέσο σκίασης, εάν σχεδιαστούν παίρνοντας υπόψη την κίνηση του ήλιου.

Δ. Μπορούν, τέλος, να λειτουργήσουν ως κινητές περσίδες σκίασης, αποκόπτοντας την ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 3.14 Οι πρισματικοί υαλοπίνακες μπορούν να έχουν πολλαπλή λειτουργία, ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα (Πηγή: [46])



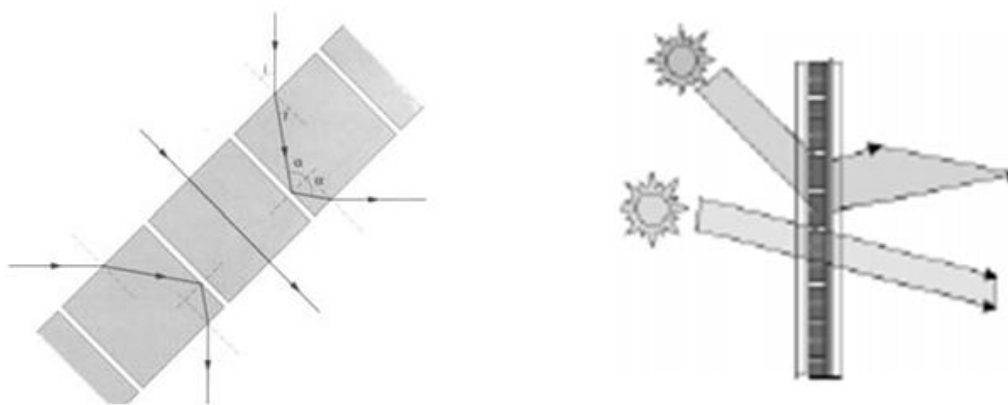
Σχήμα 3.15 Οι πρισματικοί υαλοπίνακες απορρίπτουν ή ανακατευθύνουν το φως, ανάλογα με τις ανάγκες του χώρου. (Πηγή: [46])

### 3.2.6.1 Συμπεράσματα από έρευνες σχετικά με την εφαρμογή πρισματικών υαλοπινάκων

- Από έρευνα που διεξήχθη στη Νορβηγία προέκυψε ότι σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού τα επίπεδα φυσικού φωτισμού μειώθηκαν κατά 20%-35% σε όλο τον χώρο, χωρίς να βελτιωθεί η ομοιομορφία στην κατανομή του. Αντίθετα, σε συνθήκες καθαρού ουρανού ο πρισματικός υαλοπίνακας προσέφερε ψηλότερα επίπεδα φωτισμού κατά 30% στο κέντρο του χώρου και 14% στο βάθος του ([46]).
- Παρόμοια συμπεράσματα με τα παραπάνω προέκυψαν και από έρευνες στη Γερμανία, στην Αυστρία και στη Μεγ.Βρετανία. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι σε συνθήκες ηλιοφάνειας οι πρισματικοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά πάντα σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία της διατομής τους.

### 3.2.7 Υαλοπίνακες ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ

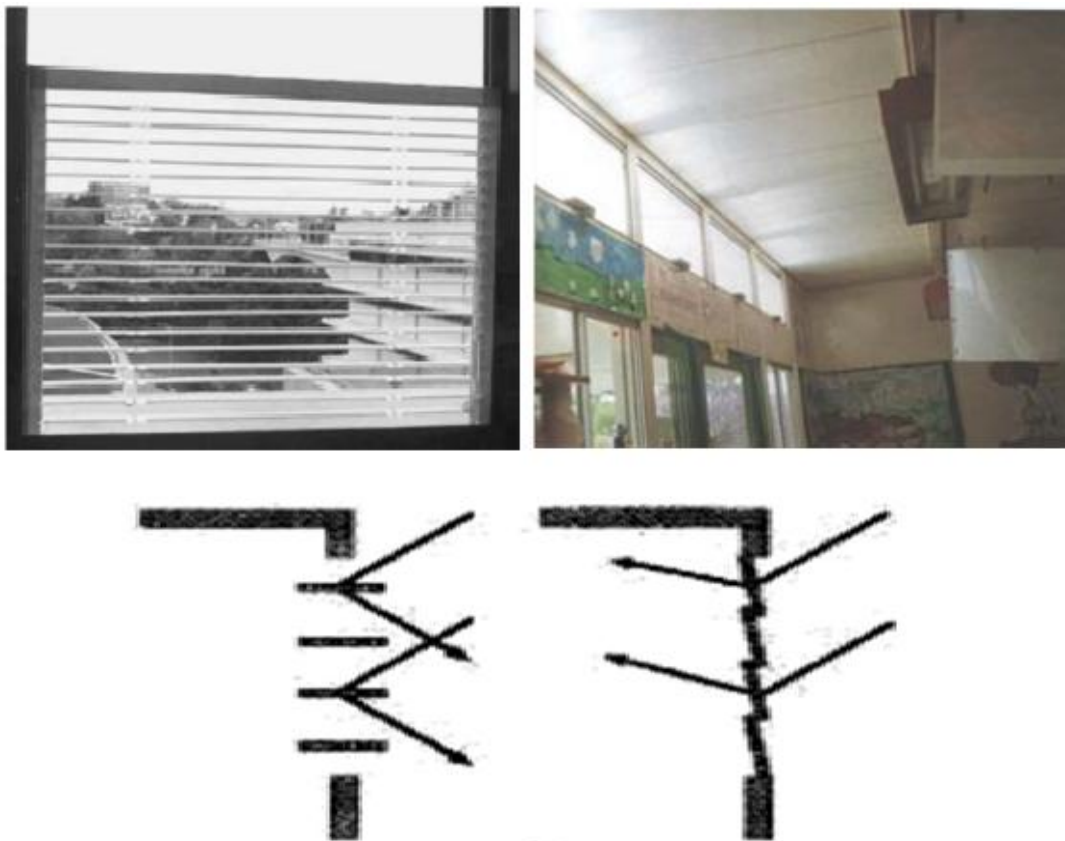
Οι υαλοπίνακες της κατηγορίας αυτής είναι λεπτά ακρυλικά πάνελα στα οποία έχουν δημιουργηθεί παράλληλες εγκοπές με τη βοήθεια λέιζερ ([46]). Οι εγκοπές αυτές αποτελούν διαφανή παραλληλεπίπεδα μεγάλης ανακλαστικότητας που αναδιανέμουν το φως προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Όπως και οι πρισματικοί υαλοπίνακες, έτσι και οι διατάξεις αυτές συνήθως τοποθετούνται στο εσωτερικό διπλών τζαμιών για λόγους προστασίας ([21]).



Σχήμα 3.16 Ενδεικτική λειτουργία των υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ (Πηγή: [21])

Οι υαλοπίνακες ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ χρησιμοποιούνται ως:

- σταθερό μέσο σκίασης στα παράθυρα
- σταθερό ή κινητό σύστημα ανακατεύθυνσης του φωτός ή
- μέσο σκίασης αλλά και ανακατεύθυνσης του φωτός σε μορφή περσίδων



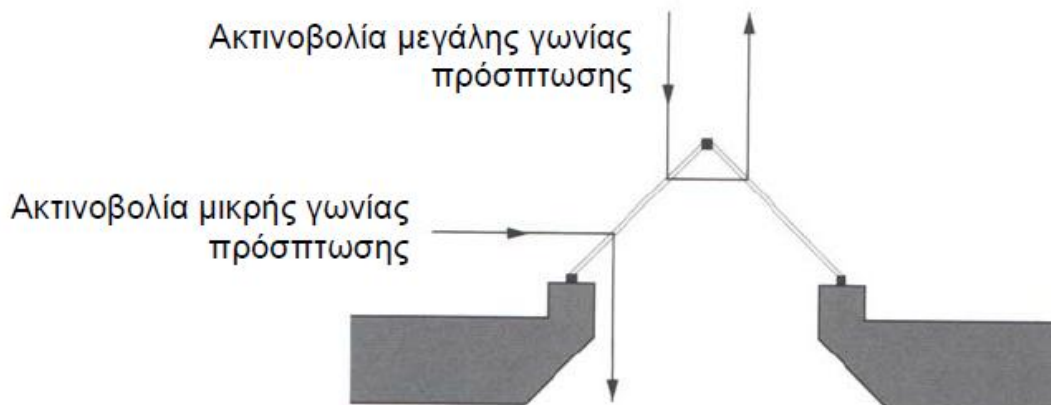
Σχήμα 3.17 Η πολλαπλή χρήση των υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ: σκίαση, ανακατεύθυνση του φωτός ή συνδυασμός των δύο. (Πηγές: [21],[44])

### 3.2.7.1 Συμπεράσματα από έρευνες υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ

- Από έρευνα στη Νορβηγία προέκυψε ότι σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού τα επίπεδα φυσικού φωτισμού δεν μεταβλήθηκαν καθόλου σε όλη την επιφάνεια του χώρου σε σχέση με την περίπτωση του συμβατικού υαλοπίνακα. Σε συνθήκες καθαρού ουρανού ο φωτισμός αυξήθηκε ελάχιστα στη μέση και στο βάθος του χώρου ([46]).
- Στη Γερμανία, αντίστοιχα πειράματα έδειξαν την ίδια απόδοση των υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (καμία σημαντική αλλαγή στο φωτισμό του χώρου). Κατά τις ημέρες με ήλιο, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση του φωτισμού όταν ο υαλοπίνακας έπαιρνε την κατάλληλη κλίση ανάλογα με τη θέση του ήλιου. Παρόλα αυτά, σε συνθήκες καθαρού ουρανού απαιτείται πρόσθετος σκιασμός και προστασία από τη θάμβωση. Τέλος, δεν παρατηρήθηκε αλλοίωση του χρώματος του φωτός ([46]).

### 3.2.7.2 Χρήση των επεξεργασμένων με λέιζερ υαλοπινάκων για φωτισμό οροφής

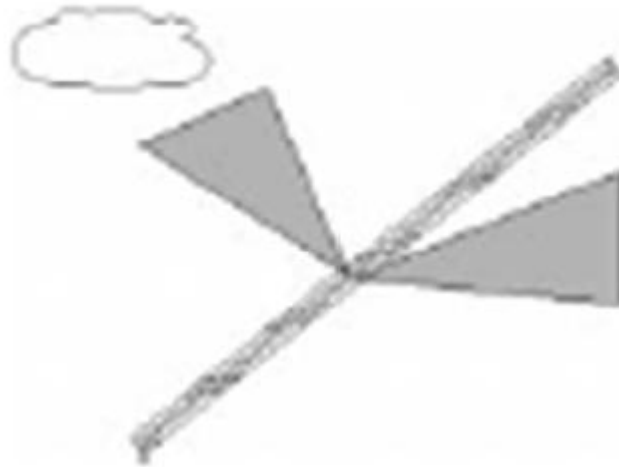
Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί και η χρήση των επεξεργασμένων με λέιζερ υαλοπινάκων για φωτισμό οροφής, η οποία βασίζεται στην απόρριψη της ανεπιθύμητης ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι και η ανακατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας το χειμώνα (Σχήμα 3.16).



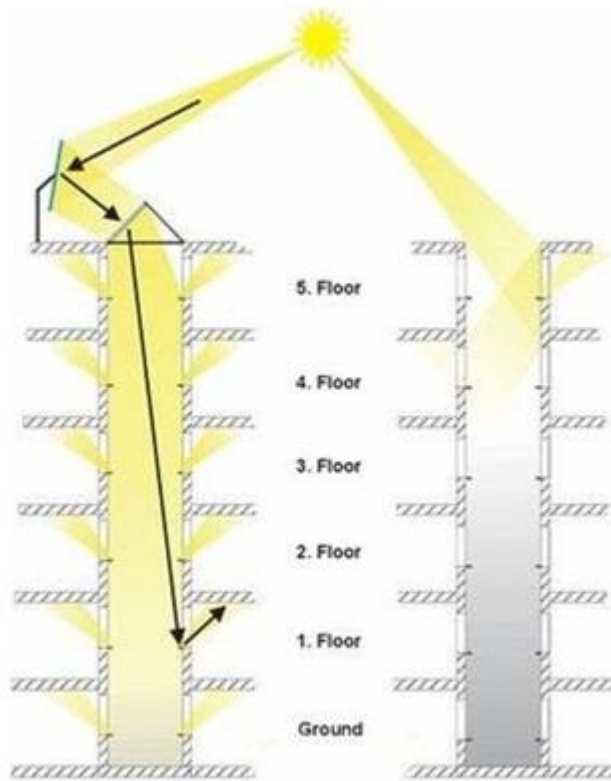
Σχήμα 3.18 Η λειτουργία των υαλοπινάκων ειδικής επεξεργασίας με λέιζερ για φωτισμό οροφής (Πηγή: [21])

### 3.2.8 Ολογραφικοί υαλοπίνακες

Οι ολογραφικοί υαλοπίνακες αξιοποιούν το φαινόμενο της περίθλασης του φωτός για να ανακατευθύνουν το φως. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ειδικής μεμβράνης που φέρει λεπτές λωρίδες οι οποίες προκαλούν την περίθλαση. Οι λωρίδες αυτές μπορούν να σχεδιαστούν με τρόπο ώστε να ανακατευθύνουν το φως που προσπίπτει υπό συγκεκριμένη γωνία, με το φως από τις υπόλοιπες κατευθύνσεις να μένει αναλλοίωτο. Στο τέλος, η ειδική μεμβράνη τοποθετείται ανάμεσα σε δύο απλούς υαλοπίνακες ([21]).



(α)



(β)

Σχήμα 3.19 α) Σχηματική λειτουργία ενός ολογραφικού υαλοπίνακα  
 β) Οι ολογραφικοί υαλοπίνακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αποτελεσματικότερο φωτισμό αιθρίων (Πηγή: [45])

Οι ολογραφικοί υαλοπίνακες αρχικά εφαρμόστηκαν στη Γερμανία, σε βόρειες όψεις και σε περιπτώσεις που τα ανοίγματα σκιάζονταν από εξωτερικά εμπόδια ([46]). Στην περίπτωση που άμεσο ηλιακό φως έρθει σε επαφή με την ειδική μεμβράνη, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα

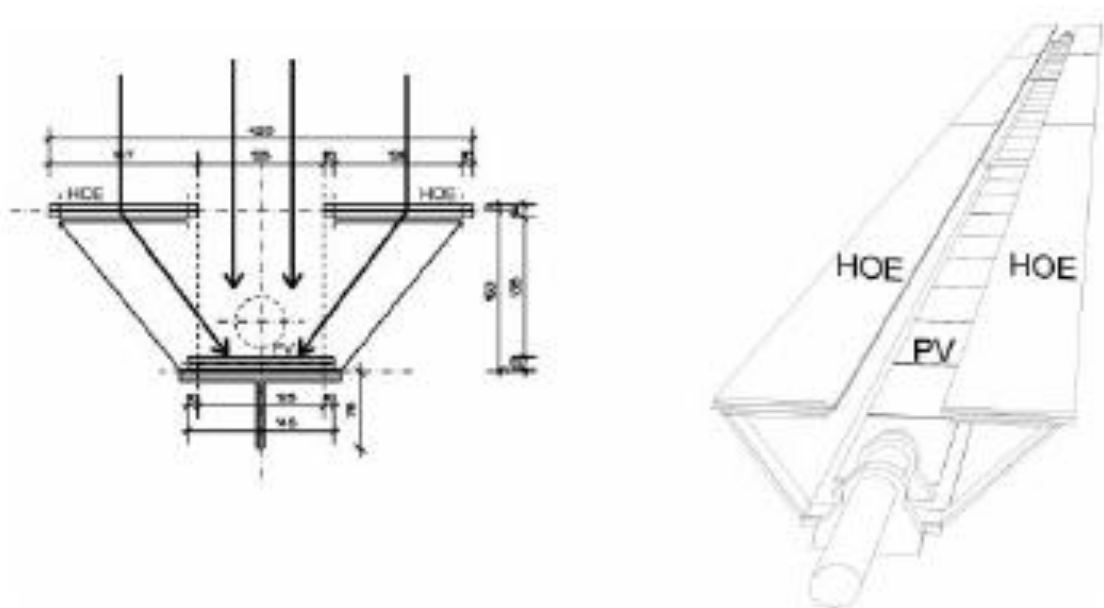


θάμβωσης καθώς και αλλοίωσης του χρώματος του φωτός. Παρόλα αυτά, σήμερα ερευνώνται τρόποι βελτίωσης του συστήματος για να ανταποκρίνεται και σε περιπτώσεις με ήλιο.



Σχήμα 3.20 Περιπτώσεις χρήσης ολογραφικών υαλοπινάκων σε γραφεία. (Πηγή:[46])

Επίσης, οι ολογραφικοί υαλοπινάκες χρησιμοποιούνται και σε ειδικότερες εφαρμογές, όπως στη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκά στοιχεία και σε ημιδιαφανή σκίαστρα που ακολουθούν την πορεία του ήλιου (Σχήμα 3.21).



Σχήμα 3.21

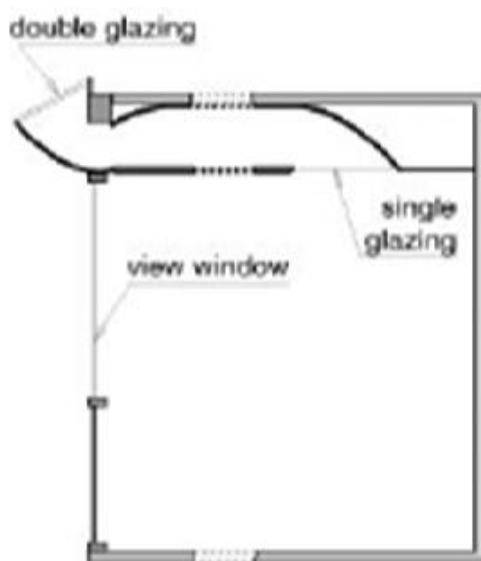


Σχήμα 3.22 Οι ολογραφικοί υαλοπίνακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως «επιλεκτικά» σκίαστρα τα οποία αποκόπτουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ενώ είναι διαπερατά στη διάχυτη. (Πηγή: [45])

Από την εφαρμογή ολογραφικών υαλοπινάκων σε διάφορα κτίρια, κυρίως στη Γερμανία, προκύπτει ότι οι διατάξεις αυτές είναι ικανές να προσφέρουν ικανοποιητική σκίαση χωρίς να μειώνουν υπερβολικά τα επίπεδα φωτισμού.

### 3.2.9 Ανειδωλικά συστήματα οροφής

Η λέξη «ανειδωλικό» υποδηλώνει την έλλειψη εικόνας (ειδώλου), αφού η κατασκευή των διατάξεων αυτών βασίζεται στο θεωρητικό υπόβαθρο της οπτικής χωρίς απεικόνιση (non-imaging optics) ([21]). Τα ανειδωλικά συστήματα οροφής χρησιμοποιούν τις οπτικές ιδιότητες σύνθετων παραβολικών διατάξεων που συγκεντρώνουν διάχυτο φωτισμό από το ανώτερο (και φωτεινότερο) τμήμα του ουράνιου θόλου. Το φως που συλλέγεται μεταφέρεται προς το βάθος του χώρου μέσω ενός κατοπτρικού αγωγού και στη συνέχεια αποδίδεται στους χρήστες με τη βοήθεια μιας επίσης ανειδωλικής διάταξης η οποία λειτουργεί αντίστροφα από την πρώτη (την εξωτερική), «αποσυγκεντρώνοντας» το φως ([46]).



(α)



(β)

Σχήμα 3.23 α) Σχηματική λειτουργία ενός ανειδωλικού συστήματος οροφής  
β) Πειραματική ανειδωλική διάταξη οροφής στη Λωζάννη της Ελβετίας  
(Πηγή: [45])

Παρόλη την περίπλοκη γεωμετρία τους, σήμερα οι ανειδωλικές διατάξεις αποτελούν κάποια από τα πιο υποσχόμενα συστήματα ενίσχυσης του φυσικού φωτισμού στα κτίρια. Όπως και τα ανακλαστικά ράφια φωτισμού, έτσι και τα ανειδωλικά συστήματα οροφής είναι αποδοτικότερα όταν εφαρμόζονται σε κτίρια που βρίσκονται μέσα σε πυκνό αστικό ιστό, λόγω του ότι σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ σημαντική η συλλογή φωτός από το ανώτερο τμήμα του ουράνιου θόλου ([46]).

#### 3.2.9.1 Συμπεράσματα από ανειδωλικών συστημάτων οροφής

Οι εν λόγω διατάξεις μελετήθηκαν διεξοδικά στην Πολυτεχνική Σχολή της Λωζάννης στην Ελβετία (Ecole Polytechnic Fédérale Lausanne - EPFL) ([36]). Από την έρευνα προέκυψε πως η εφαρμογή ενός ανειδωλικού συστήματος οροφής σε ένα χώρο βελτιώνει σημαντικά την ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού, λόγω του ότι προσφέρει φως στο βάθος, εκεί όπου χρειάζεται περισσότερο. Συγκεκριμένα, οι τιμές Σ.Φ.Φ. που προσφέρονται σε απόσταση 4-6 μέτρων από το άνοιγμα είναι της τάξης του 4% και περισσότερο, γεγονός που πολύ δύσκολα επιτυγχάνεται από ένα πλευρικό σύστημα ενίσχυσης του φυσικού φωτισμού ([46]). Επίσης, Τα ανειδωλικά συστήματα οροφής βελτίωσαν την οπτική άνεση των χρηστών και γενικά έγιναν πλήρως αποδεκτά από αυτούς.

- Με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος ελέγχου του τεχνητού φωτισμού (βασισμένο στα επίπεδα φυσικού φωτισμού) μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά σε κλίματα όπου επικρατούν οι νεφοσκεπείς τύποι ουρανού.

- Από αναλυτική έρευνα προσομοίωσης στα λογισμικά Lightscape και Photopia, προέκυψε πως ένα τυπικό ανειδωλικό σύστημα οροφής βελτιώνει σημαντικά την ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού στο χώρο και παράλληλα μειώνει τη θάμβωση ([71]). Μάλιστα, σύμφωνα και με αυτήν την έρευνα, η απόδοση του συστήματος είναι μεγαλύτερη σε τόπους με μεγάλη συχνότητα νεφοσκεπών και μερικώς νεφοσκεπών ουρανών.

- Πρόσφατα, στην Πολυτεχνική Σχολή της Λωζάνης (EPFL) μελετήθηκε ένα ανειδωλικό σύστημα με ηλεκτροχρωμικό τζάμι ([62]). Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του έδειξαν ότι η ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού βελτιώθηκε κατά πολύ, όπως και η οπτική άνεση γενικότερα, αλλά η ποσότητα του φωτισμού στο επίπεδο εργασίας μειώθηκε αρκετά, σε σημείο να απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από ότι στην περίπτωση του απλού διπλού υαλοπίνακα.

### 3.2.9.2 *Ανειδωλικά συστήματα φωτισμού από την οροφή*

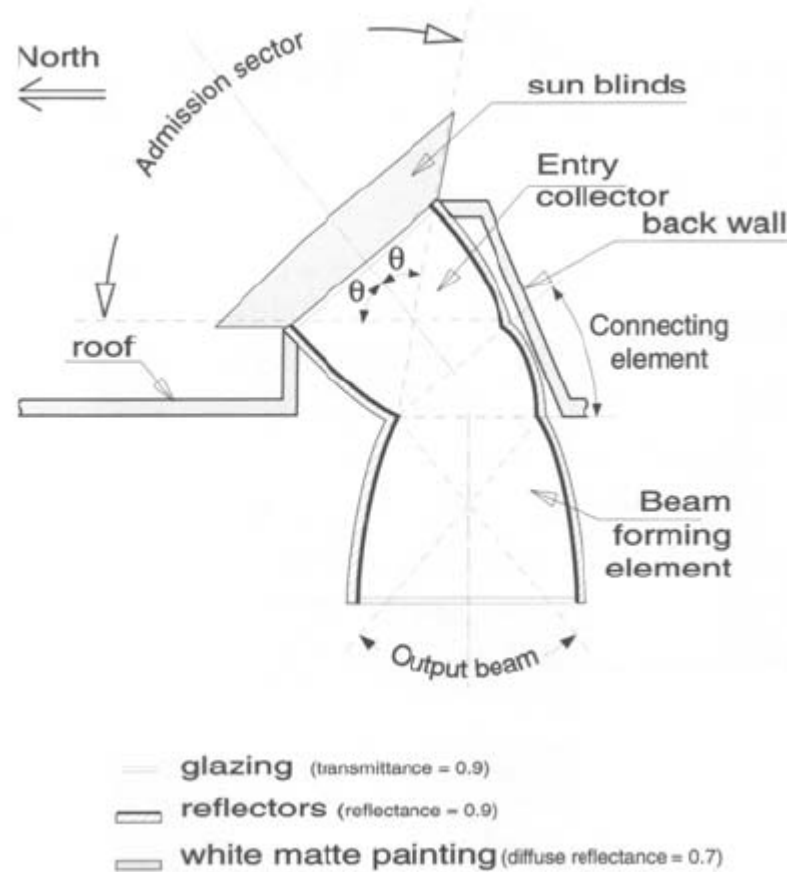
Οι ανειδωλικοί ανακλαστήρες προσφέρουν ικανοποιητικές λύσεις και σε περιπτώσεις φωτισμού από την οροφή, όταν πρόκειται για ισόγεια κτίσματα, αίθρια, ή τον τελευταίο όροφο πολώροφης οικοδομής.

Για να αυξήσουν τη διείσδυση φυσικού φωτός και ταυτόχρονα να αποκλείσουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, τα ανειδωλικά ανοίγματα στην οροφή είναι κεκλιμένα προς το βορρά. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ύπαρξη μιας διάταξης που συγκεντρώνει το φως από τον ουράνιο θόλο και μιας διάταξης που το «αποσυγκεντρώνει», αποδίδοντάς το στον εσωτερικό χώρο ([46]). Η κατασκευή των διατάξεων αυτών είναι σχετικά περίπλοκη και η τοποθέτησή τους στην οροφή ενός κτιρίου πρέπει να ληφθεί υπόψη στα αρχικά στάδια του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Από προσομοιωτική μελέτη προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των ανειδωλικών συστημάτων φωτισμού από την οροφή:

- Οι διατάξεις αυτές δεν προκαλούν θάμβωση, ενώ προσφέρουν ικανοποιητικά επίπεδα φυσικού φωτισμού ([47]).

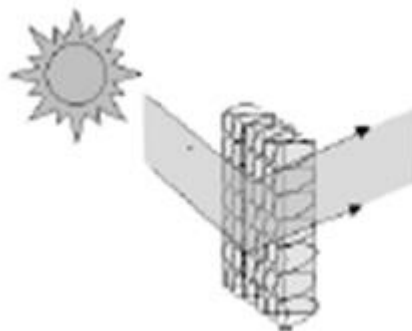
- Η απόδοσή τους είναι περίπου διπλάσια της απόδοσης των κοινών ανοιγμάτων οροφής (π.χ. πριονωτή στέγη κ.ά.) ([46]). Σίγουρα απαιτείται περαιτέρω έρευνα στο πεδίο αυτό ώστε να προκύψουν ασφαλέστερα συμπεράσματα από την εφαρμογή των συστημάτων αυτών σε πραγματικά κτίρια.



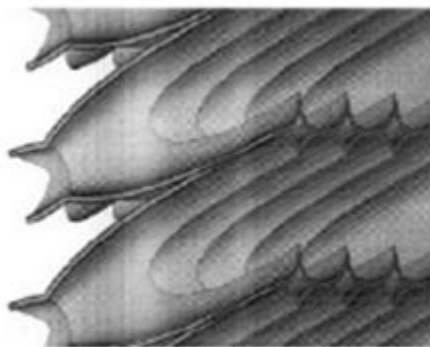
Σχήμα 3.24 Τομή ενός ανειδωλικού συστήματος φωτισμού από την οροφή (Πηγή: [21])

### 3.2.10 Ανειδωλικά σκιάδια

Τα ανειδωλικά σκιάδια αποτελούν έναν κάρναβο κενών ανακλαστικών στοιχείων, καθένα από τα οποία φέρει δύο τρισδιάστατους σύνθετους παραβολικούς συλλέκτες φωτός ([46]). Με τα σκιάδια αυτά επιτυγχάνεται πλευρικός φωτισμός και συγκεκριμένα επιλεκτική διείσδυση φωτός ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης, με σκοπό την αποφυγή της θάμβωσης και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Τα ανειδωλικά σκιάδια τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο απλά υαλοστάσια για λόγους προστασίας.



(α)



(β)



(γ)

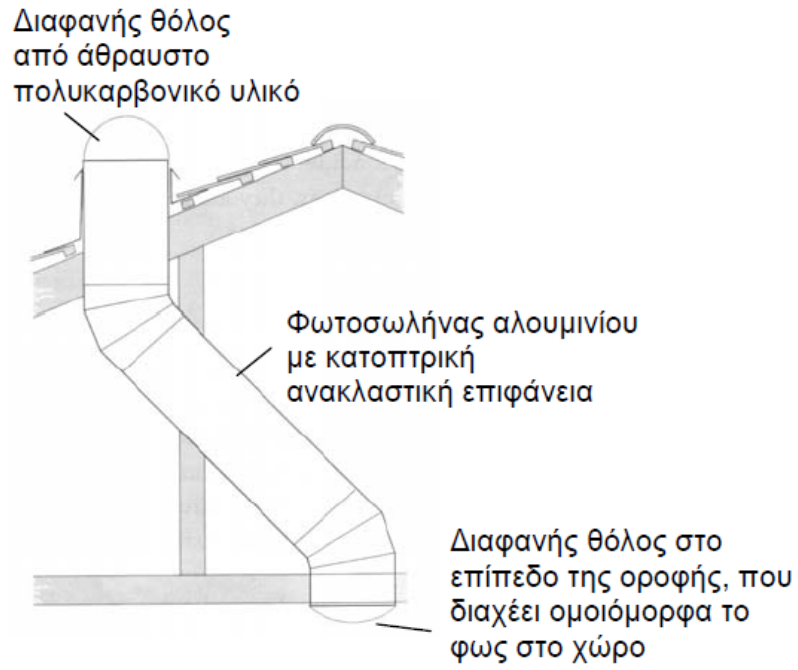
Σχήμα 3.25 α) Σχηματική λειτουργία των ανειδωλικών σκιαδίων  
 β) Τομή της διάταξης ανειδωλικού σκιαδίου σε προσομοιωτικό μοντέλο  
 γ) Φωτογραφία του εσωτερικού των ανειδωλικών σκιαδίων(Πηγή: [46])

Οι διατάξεις αυτές βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Παρόλα αυτά, από έρευνα που διενεργήθηκε σε πειραματική κυψέλη και η οποία σύγκρινε κάποια ανειδωλικά σκιάδια με κοινά βενετικά στόρια προέκυψε το εξής συμπέρασμα:

- Τα ανειδωλικά σκιάδια είναι ικανά να βελτιώσουν την ομοιομορφία της κατανομής του φυσικού φωτισμού σε ένα χώρο προσφέροντας φως στο βάθος, όπου χρειάζεται περισσότερο. Η «επιλεκτική» τους λειτουργία δίνει τη δυνατότητα για επαρκή σκiasμό (όταν αυτός απαιτείται) και προστασία από τη θάμβωση.

### 3.2.11 Φωτοσωλήνες

Οι φωτοσωλήνες ή ηλιοσωλήνες είναι απλές, σχετικά, κατασκευές, οι οποίες εισάγουν φως σε σκοτεινά σημεία των κτιρίων. Αποτελούνται από ένα διαφανή θόλο από όπου εισέρχεται το φυσικό φως, έναν κατοπτρικό σωλήνα μεταφοράς της ακτινοβολίας και ένα θόλο που διαχέει το φως στο εσωτερικό του κτιρίου.

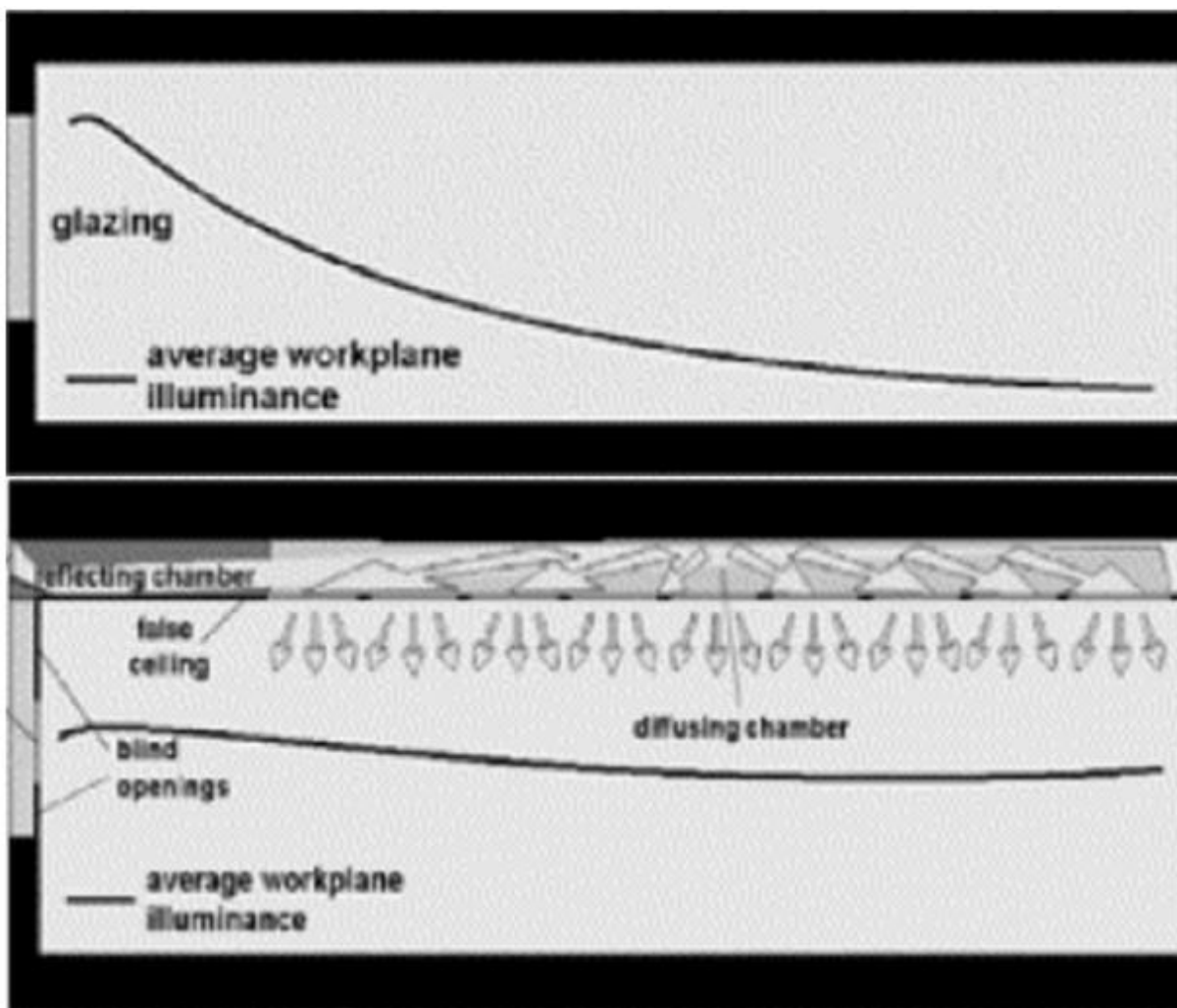


Σχήμα 3.26 Σχηματική λειτουργία ενός φωτοσωλήνα  
(Πηγή: [21])



Σχήμα 3.27 Παραδείγματα χρήσης φωτοσωλήνων σε κτίρια  
([Πηγή: Εταιρεία MIPECO [www.mipeco.gr](http://www.mipeco.gr)])

Η απόδοση των φωτοσωλήνων είναι συνήθως μικρή, λόγω της αδυναμίας τους να συλλέξουν αρκετό φως, αλλά και λόγω των πολλών αντανακλάσεων που μεσολαβούν μέσα στο σωλήνα μεταφοράς ([21]). Όπως είναι λογικό, η απόδοσή τους είναι μεγαλύτερη σε τόπους με μεγαλύτερες τιμές διαθέσιμου φυσικού φωτός. Μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί πολλές αξιολογικές έρευνες για τη διερεύνηση και την αύξηση της απόδοσης των φωτοσωλήνων (π.χ. [73], [68], [27],[49]). Μία από τις πιο πρόσφατες μελέτες αφορά έναν νέο τύπο φωτοσωλήνα, οριζόντιας μορφής ([26]).



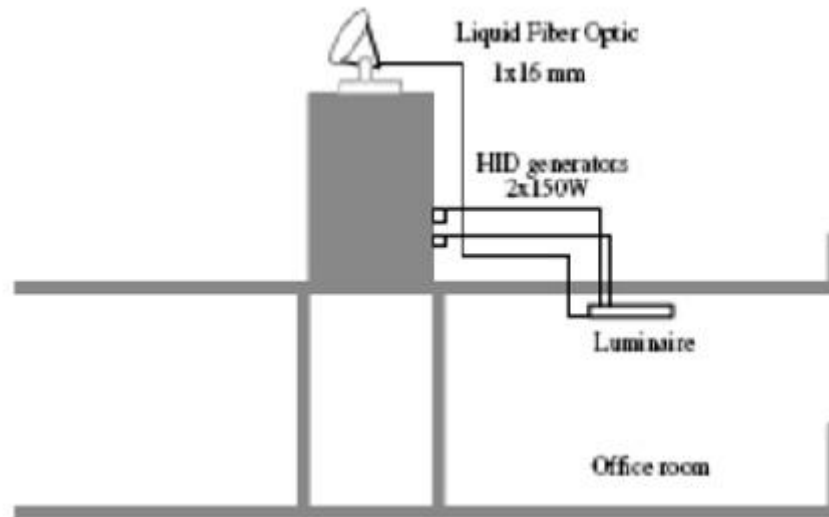
Σχήμα 3.28 Ο οριζόντιος φωτοσωλήνας που μελετήθηκε μέσω προσομοίωσης στο Πανεπιστήμιο της Βενετίας προσφέρει ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού σε όλο το χώρο σε συνθήκες καθαρού ουρανού με ήλιο (Πηγή: [26])

Ο οριζόντιος αυτός διπλός φωτοσωλήνας μελετήθηκε μέσω προσομοίωσης σε συνθήκες καθαρού ουρανού με ήλιο. Η απόδοσή του αποδείχθηκε πολύ καλή, αφού σχεδόν εξομάλυνε το φωτισμό σε όλη την επιφάνεια του χώρου, παρόλα αυτά η λειτουργία του σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες χρήζει περαιτέρω διερεύνηση.



### 3.2.12 Υβριδικά συστήματα

Κατά τη δεκαετία που διανύουμε μελετώνται και εφαρμόζονται κάποιες εξελιγμένες διατάξεις που συνδυάζουν τη χρήση του φυσικού και του τεχνητού φωτισμού, με σκοπό την πλήρη κάλυψη των αναγκών ενός χώρου σε φωτισμό και την παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας ([66]). Εδώ επιλέγεται να παρουσιαστεί το υβριδικό σύστημα που μελετήθηκε μέσω του προγράμματος UFO (Universal Fiber Optics) το οποίο χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από την Ε.Ε.Η εν λόγω διάταξη μεταφέρει φυσικό φως από έναν ηλιοστάτη με φακό fresnel προς το φωτιστικό σώμα ενός χώρου χωρίς παράθυρα. Το μέσο μεταφοράς είναι υγρή οπτική ίνα μεγάλης διαμέτρου, ενώ το σύστημα περιλαμβάνει επίσης πηγές τεχνητού φωτισμού (λαμπτήρες αλογόνου) και κεντρικό σύστημα ελέγχου ([70]). Η λειτουργία της διάταξης βασίζεται στην παρουσία άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 3.29).



(α)



(β)

Σχήμα 3.29 α) Σχηματική διάταξη του συστήματος. β) Ο ηλιοστάτης με υγρή οπτική ίνα (Πηγή: [70])

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ ”

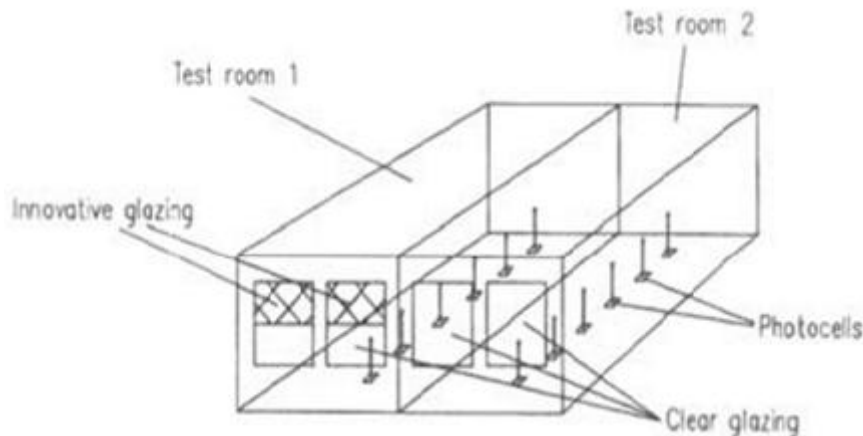
Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται συγκριτικές μελέτες σχετικά με την απόδοση των εξελιγμένων φωτοενισχυτικών τεχνικών. Τα αποτελέσματα των μελετών αναλύονται σε συγκριτικούς πίνακες.

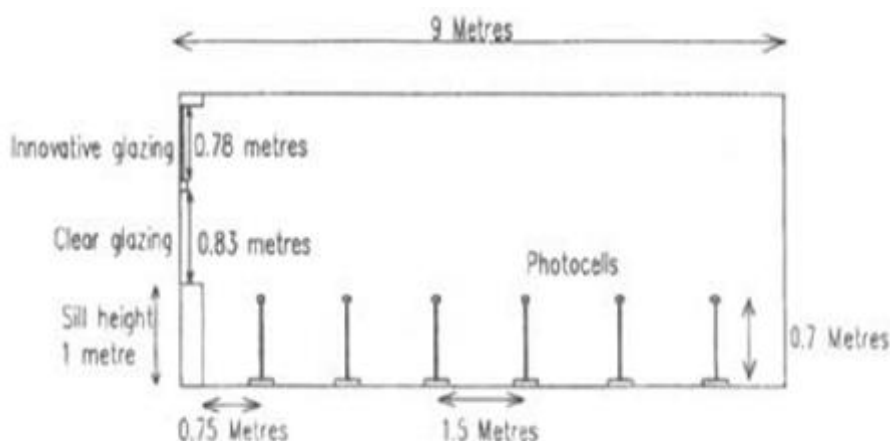
#### 4.1 Συγκριτική μελέτη φωτοενισχυτικών τεχνικών

Μία από τις πρώτες αξιολογικές έρευνες που σύγκριναν την απόδοση διαφόρων εξελιγμένων διατάξεων φυσικού φωτισμού διεξήχθη από το βρετανικό ερευνητικό κέντρο BRE (British Research Establishment), το 1993 ([14],[18]). Μελετήθηκαν τέσσερα συστήματα, συγκρινόμενα με την περίπτωση του απλού παραθύρου:

- εσωτερικό ράφι φωτισμού,
- πρισματικό τζάμι,
- υαλοστάσιο με ενσωματωμένα κατοπτρικά σκιάδια και
- υαλοστάσιο με πρισματικό φιλμ.

Οι πειραματικές κυψέλες που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στο σχήμα 4.1.





Σχήμα 4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πειραματικών κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα του BRE.  
(Πηγή: [14])

Από την έρευνα προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα ([14]):

- Το πρισματικό τζάμι ήταν το μόνο που πρόσφερε μεγάλη αύξηση των τιμών φωτισμού στο βάθος του χώρου. Παρόλα αυτά, η μεγάλη αυτή αύξηση παρατηρήθηκε λίγες μόνο ημέρες του έτους, ενώ σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού η συγκεκριμένη διάταξη απέδωσε χειρότερα από ότι το ράφι φωτισμού και το υαλοστάσιο με πρισματικό φιλμ. Όσον αφορά στη θάμβωση κατά τους φθινοπωρινούς μήνες, το πρισματικό τζάμι πρόσφερε την καλύτερη προστασία σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα.
- Τα ενσωματωμένα κατοπτρικά σκιάδια σχεδιάστηκαν με τρόπο ώστε να εμποδίζουν τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι, πράγμα που το καταφέρνουν. Παρόλα αυτά, εμποδίζουν αρκετό και από το διάχυτο φως, το οποίο είναι επιθυμητό. Η γενική τους απόδοση έχει κοινά χαρακτηριστικά με αυτήν του πρισματικού τζαμιού, με τη διαφορά ότι τα κατοπτρικά σκιάδια δεν αύξησαν το φωτισμό στο βάθος του χώρου. Επίσης, η προστασία από τη θάμβωση είναι ανεπαρκής για κάποιες ημέρες του έτους.
- Κατά τις ημέρες ηλιοφάνειας το καλοκαίρι, την άνοιξη και το φθινόπωρο το υαλοστάσιο με πρισματικό φιλμ προσέφερε προστασία από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και μικρή αύξηση των τιμών φωτισμού σε όλο το χώρο (τα μικρότερα ποσοστά αύξησης παρατηρήθηκαν στο βάθος). Κατά τις νεφοσκεπείς ημέρες, η μείωση των επιπέδων φωτισμού (της τάξης του 5-30%) ήταν μικρότερη από αυτή που προκάλεσαν το πρισματικό τζάμι και τα κατοπτρικά ενσωματωμένα σκιάδια. Όσον αφορά στη θάμβωση, η προστασία ήταν ανά διαστήματα ανεπαρκής.
- Το ράφι φωτισμού ήταν το απλούστερο σύστημα από αυτά που μελετήθηκαν. Προσέφερε μία περιοχή προστασίας από την ηλιακή ακτινοβολία μειώνοντας ελαφρώς τα

επίπεδα φωτισμού κατά 0-20%. Η γενικότερη μείωση που προκάλεσε ήταν της τάξης του 5-30%, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού, και είναι συγκρίσιμη με την περίπτωση του πρισματικού φιλμ. Η πρόκληση θάμβωσης δεν μελετήθηκε, αφού το ράφι φωτισμού ήταν τοποθετημένο πάνω από το ύψος των ματιών και ανακατεύθυνε το φως μόνο προς την οροφή.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποια συνοπτικά αποτελέσματα της έρευνας αυτής ([18]).

Από τον πίνακα 4.1 προκύπτει πως, κατά μέσο όρο για το σύνολο του έτους, τα ράφια φωτισμού είναι αυτά που προκαλούν τη μικρότερη μείωση της ελάχιστης τιμής φωτισμού στο χώρο.

*Πίνακας 4.1 Αλλαγές στην ελάχιστη τιμή φωτισμού (E<sub>min</sub>) στο χώρο.*

<b>Νεφοσκεπής ουρανός</b>	M.O. E <sub>min</sub> (%)	Μείωση (%)
Απλό παράθυρο	100	--
Κατοπτρικά σκιάδια	74	26
Ράφια φωτισμού	89	11
Πρισματικό τζάμι	62	38
Πρισματικό φιλμ	84	16
<b>Χειμωνιάτικη ημέρα με ήλιο</b>		
Απλό παράθυρο	100	--
Κατοπτρικά σκιάδια	72	28
Ράφια φωτισμού	92	8
Πρισματικό τζάμι	53	47
Πρισματικό φιλμ	66	34
<b>Φθινοπωρινή / ανοιξιιάτικη ημέρα με ήλιο</b>		
Απλό παράθυρο	100	--
Κατοπτρικά σκιάδια	73	27
Ράφια φωτισμού	93	7
Πρισματικό τζάμι	91	9
Πρισματικό φιλμ	82	18
<b>Καλοκαιρινή ημέρα με ήλιο</b>		
Απλό παράθυρο	100	--
Κατοπτρικά σκιάδια	75	25
Ράφια φωτισμού	92	8
Πρισματικό τζάμι	67	33
Πρισματικό φιλμ	78	22

Αντίστοιχα, στον επόμενο πίνακα 4.2 φαίνεται πως όλες οι διατάξεις βελτιώνουν, σε γενικές γραμμές, την ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού στο χώρο, εκτός από την περίπτωση της τυπικής χειμωνιάτικης μέρας με ήλιο όπου οι χαμηλές ακτίνες του ήλιου διεισδύουν στο χώρο. Και πάλι τα ράφια φωτισμού φαίνεται πως απέδωσαν, κατά μέσο όρο, καλύτερα από τις υπόλοιπες διατάξεις.

Πίνακας 4.2 Αλλαγές στην ομοιομορφία της κατανομής του φυσικού φωτισμού στο χώρο.

<b>Νεφοσκεπής ουρανός</b>	M.O. Emax / Emin	Βελτίωση (%)
Απλό παράθυρο	3	--
Κατοπτρικά σκιάδια	2.65	13
Ράφια φωτισμού	2.5	20
Πρισματικό τζάμι	3.3	-10
Πρισματικό φιλμ	2.64	14
<b>Χειμωνιάτικη ημέρα με ήλιο</b>		
Απλό παράθυρο	3	--
Κατοπτρικά σκιάδια	4	-26
Ράφια φωτισμού	3.4	-11
Πρισματικό τζάμι	8.4	-64
Πρισματικό φιλμ	4.5	-33
<b>Φθινοπωρινή / ανοιξιιάτικη ημέρα με ήλιο</b>		
Απλό παράθυρο	3	--
Κατοπτρικά σκιάδια	2.65	13
Ράφια φωτισμού	1.22	146
Πρισματικό τζάμι	2.82	6
Πρισματικό φιλμ	3.46	-13
<b>Καλοκαιρινή ημέρα με ήλιο</b>		
Απλό παράθυρο	3	--
Κατοπτρικά σκιάδια	1.46	105
Ράφια φωτισμού	1.49	100
Πρισματικό τζάμι	2.07	45
Πρισματικό φιλμ	2.15	40

Από τον πίνακα 4.3 που ακολουθεί, συμπεραίνουμε πως, σε γενικές γραμμές, το πρισματικό τζάμι απέδωσε καλύτερα όσον αφορά τη μείωση της θάμβωσης σε σχέση με τα κατοπτρικά σκιάδια και το πρισματικό φιλμ. Η μείωση αυτή είναι σημαντική γιατί σχετίζεται έμμεσα με την ενεργειακή κατανάλωση, αφού οι χρήστες ενός χώρου συνήθως αποφεύγουν

τη θάμβωση χρησιμοποιώντας μέσα που μειώνουν υπερβολικά τα επίπεδα φωτισμού στο χώρο, με αποτέλεσμα να απαιτείται πρόσθετος τεχνητός φωτισμός ([18]).

Πίνακας 4.3 Αλλαγές στην τιμή του Δείκτη Θάμβωσης Φυσικού Φωτισμού DGI (Daylight Glare Index).

Νεφοσκεπής ουρανός	Δείκτης Θάμβωσης Φυσικού Φωτισμού DGI	Μείωση (Μ.Ο.)	Χαρακτηρισμός θάμβωσης
Απλό παράθυρο	24	--	Μη ανεκτή
Κατοπτρικά σκιάδια	21	3	Αποδεκτή
Πρισματικό τζάμι	15	9	Ανεπαίσθητη
Πρισματικό φιλμ	19	5	Αποδεκτή
<b>Καθαρός ουρανός</b>			
Απλό παράθυρο	26	--	Μη ανεκτή
Κατοπτρικά σκιάδια	24	2	Μη ανεκτή
Πρισματικό τζάμι	17	9	Ανεπαίσθητη
Πρισματικό φιλμ	22	6	Αποδεκτή

Το σημαντικότερο συμπέρασμα της έρευνας που αναλύθηκε είναι ότι παρόλο που όλα τα συστήματα υπό μελέτη μείωσαν την ποσότητα του εισερχόμενου φυσικού φωτός κατά τη διάρκεια του έτους, αύξησαν τη «χρησιμότητά» του, διότι βελτίωσαν την ομοιομορφία της κατανομής του με αποτέλεσμα ο χώρος να φαίνεται φωτεινότερος ακόμα και με λιγότερο φως, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση.

## 4.2 Έρευνα απόδοσης συστημάτων φυσικού φωτισμού

Στα μέσα της δεκαετίας του '90 διεξήχθη από το δανέζικο ερευνητικό κέντρο SBI μία έρευνα σχετικά με την απόδοση των εξής συστημάτων ενίσχυσης του φυσικού φωτισμού:

- εξωτερικό και εσωτερικό ράφι φωτισμού με διαχυτική και κατοπτρική ανακλαστική επιφάνεια
- βενετικά στόρια με διαχυτική και κατοπτρική ανακλαστική επιφάνεια



Σχήμα 4.2 Φωτογραφία των πειραματικών κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα.  
Πηγή: ([28])

Η μελέτη διεξήχθη σε πειραματικές κυψέλες με διαστάσεις 3,2 μ. πλάτος, 6,75 μ. βάθος και 3,1 μ. ύψος και προσανατολισμό 15° δυτικά του νότου. Οι μετρήσεις για την απόδοση των ραφιών φωτισμού έλαβαν χώρα από το μήνα Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο, σε συνθήκες νεφοσκεπούς και καθαρού ουρανού. Συνοπτικά, σύμφωνα με τον Christoffersen [28], τα αποτελέσματα της έρευνας όσον αφορά τα ράφια φωτισμού έδειξαν ότι:

- Το εξωτερικό ράφι απέδωσε καλύτερα από το εσωτερικό, διότι μείωσε τις τιμές φωτισμού κοντά στο παράθυρο, σε αντίθεση με το εσωτερικό που μείωσε το φωτισμό στο κέντρο περίπου του χώρου. Με άλλα λόγια, το εξωτερικό ράφι φωτισμού προσέφερε μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φωτισμού.
- Σε συνθήκες καθαρού ουρανού το κατοπτρικό ράφι φωτισμού απέδωσε καλύτερα από το διαχυτικό.
- Σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού όλοι οι τύποι ραφιών φωτισμού μείωσαν, λιγότερο ή περισσότερο, το φωτισμό σε όλο το χώρο.

Όσον αφορά στα βενετικά στόρια, τα κυριότερα συμπεράσματα από τη μελέτη είναι τα παρακάτω:

- Η καλύτερη κλίση αποδείχθηκε η οριζόντια, αφού με αυτήν επιτεύχθηκε η καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φωτισμού στο χώρο.

- Η μόνη περίπτωση που τα βενετικά στόρια αύξησαν ελάχιστα το φωτισμό στο βάθος του χώρου ήταν τα βενετικά στόρια με την κατοπτρική ανακλαστική επιφάνεια. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως, η θάμβωση εξαιτίας των λαμπερών επιφανειών ήταν εμφανής, αφού τα βενετικά στόρια απέκτησαν λαμπρότητα πάνω από 100.000 cd/m<sup>2</sup>. Αντίθετα, τα βενετικά στόρια με τη διαχυτική επιφάνεια (λευκή ματ) προσέφεραν πιο ικανοποιητική προστασία απέναντι στην ηλιακή ακτινοβολία.

Οι ερευνητές κατέληξαν σε ορισμένα χρήσιμα γενικά συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των διατάξεων που μελετήθηκαν:

- Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης φωτισμού θα πρέπει να βασίζεται στα κλιματικά δεδομένα του τόπου και συγκεκριμένα στους κυρίαρχους τύπους ουρανού. Για παράδειγμα, στη Δανία όπου κυριαρχούν οι νεφοσκεπείς ουρανοί, τα συστήματα ενίσχυσης του φυσικού φωτισμού σπάνια αξιολογούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ή χρειάζεται να προστατέψουν τους χρήστες από αυτήν.

- Κάθε διάταξη φυσικού φωτισμού, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού μειώνει το φωτισμό σε ένα χώρο, σε σύγκριση με την περίπτωση του απλού παραθύρου. Για τον λόγο αυτό, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η επιρροή της κάθε διάταξης στην κατανομή του φωτισμού, δηλαδή το κατά πόσο μειώνει το φωτισμό κοντά στο παράθυρο και τον αυξάνει στο βάθος του χώρου. Εξάλλου, σύμφωνα με τον Hunt [45], ένας χώρος με πιο ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού, φαίνεται φωτεινότερος.

- Οι κατοπτρικές επιφάνειες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με τρόπο ώστε να ανακατευθύνουν το φως μόνο προς την επιθυμητή κατεύθυνση, ώστε να μην αποτελούν οι ίδιες πηγή θάμβωσης.

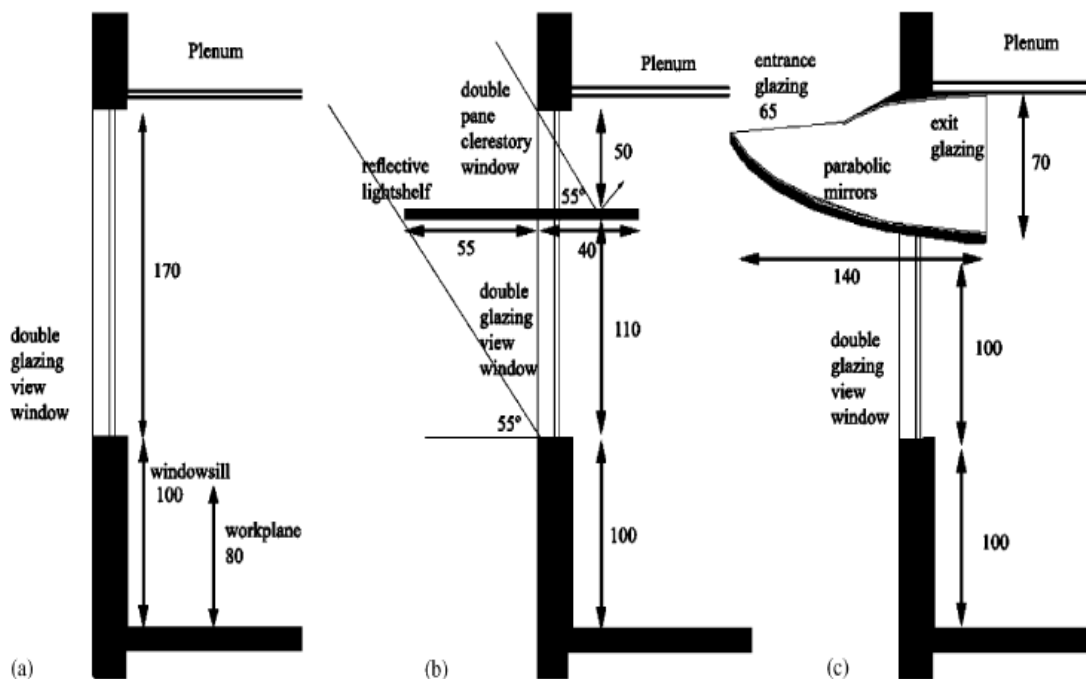
### 4.3 Έρευνα απόδοσης φωτοενισχυτικών διατάξεων

Μία πρόσφατη μελέτη στο Εργαστήριο Κλίματος και Ενέργειας στο τμήμα Αρχιτεκτονικής και Πολεοδομίας του Τεχνικού Ινστιτούτου του Ισραήλ ερεύνησε την εφαρμογή :

- ενός ραφιού φωτισμού
- ενός ανειδωλικού συλλέκτη
- σε παράθυρο ενός χώρου γραφείου, με σκοπό τη διερεύνηση της απόδοσης των διατάξεων αυτών σε κλίμα με μεγάλη ηλιοφάνεια ([61]). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοίωσης στο λογισμικό RADIANCE και τα κριτήρια της αξιολόγησης ήταν οι τιμές φωτισμού στο επίπεδο εργασίας και η πιθανότητα θάμβωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι



ερευνήθηκε η απόδοση των διατάξεων σε όλους τους προσανατολισμούς. Επίσης, λήφθηκε υπόψη και ο ανθρώπινος παράγοντας, δηλαδή το γεγονός ότι οι χρήστες ενός χώρου τείνουν να βελτιώνουν την οπτική τους άνεση με το να ελέγχουν την ποσότητα του εισερχόμενου φωτός από ένα παράθυρο.

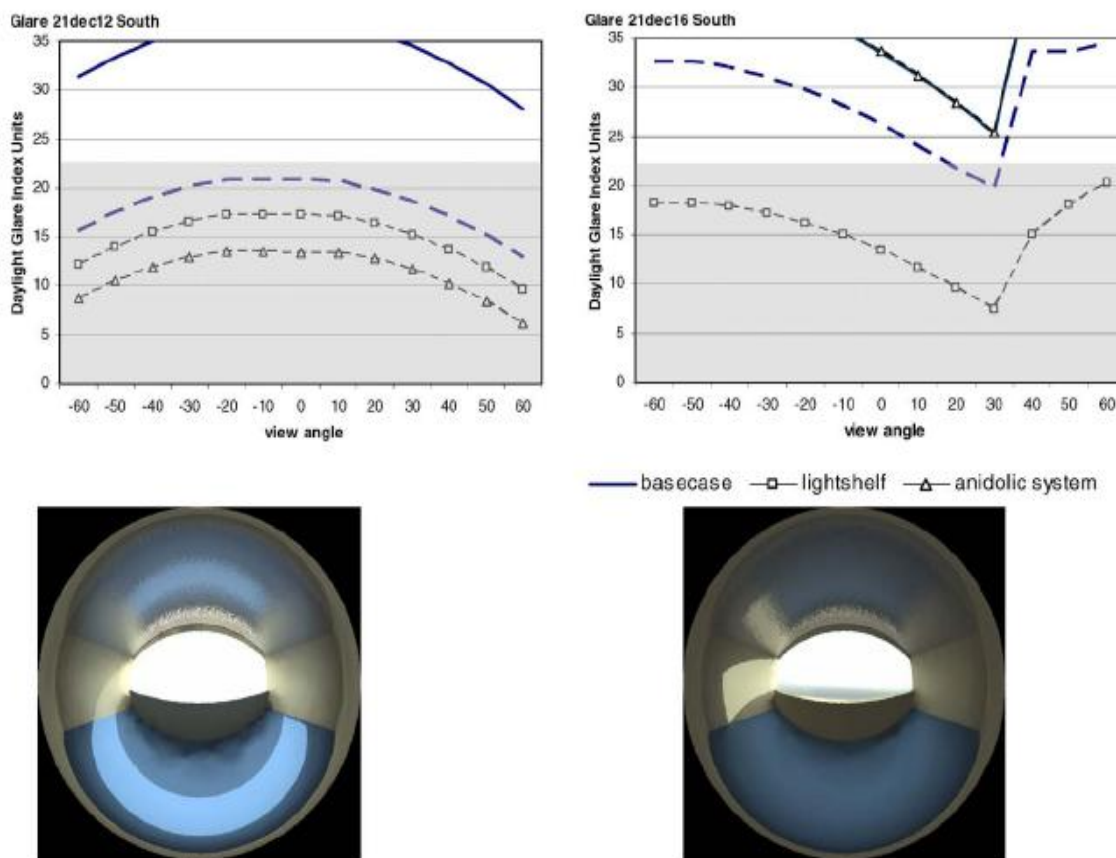


Σχήμα 4.3 Σχηματικές τομές των διατάξεων που μελετήθηκαν :α) η περίπτωση του απλού παραθύρου β) το ράφι φωτισμού και γ) ο ανειδωλικός συλλέκτης (Πηγή: [61])

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα, σχετικά με τα επίπεδα φωτισμού στο χώρο, είναι τα εξής:

- Το ράφι φωτισμού μείωσε την αντίθεση μεταξύ ψηλών τιμών φωτισμού κοντά στο παράθυρο και χαμηλών τιμών στο βάθος του χώρου. Η μεγαλύτερη απόδοση του ραφιού φωτισμού σημειώθηκε όταν αυτό δεχόταν άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Σε κάθε περίπτωση, η διάταξη αυτή μείωσε την πιθανότητα θάμβωσης, αλλά δεν προτείνεται για βόρειο προσανατολισμό γιατί μειώνει αισθητά τα επίπεδα φωτισμού.
- Ο ανειδωλικός συλλέκτης αύξησε τα επίπεδα φωτισμού σε όλο το χώρο και σε όλους τους προσανατολισμούς, σε σχέση με την απλή περίπτωση του παραθύρου με ή χωρίς σκίαστρα. Στο βορρά η απόδοση ήταν μειωμένη, ενώ στην ανατολή και στη δύση το σύστημα απέδωσε πολύ καλά. Παρόλα αυτά, υπήρξαν περιπτώσεις, ειδικά το Δεκέμβριο, που τα επίπεδα φωτισμού στο χώρο παρέμειναν αρκετά χαμηλά. Επίσης, ένα θέμα που θα πρέπει να

λαμβάνεται υπόψη όταν εφαρμόζονται ανειδωλικοί συλλέκτες είναι η συντήρησή τους και η «συνεργασία» τους με τον τεχνητό φωτισμό.



Σχήμα 4.4 Διαγράμματα των τιμών του Δείκτη Θάμβωσης Φυσικού Φωτισμού DGI με τις αντίστοιχες εικόνες από το πρόγραμμα RADIANCE για την 21η Δεκεμβρίου στις 12:00 και στις 16:00, σε νότιο προσανατολισμό, στο Τελ Αβίβ. (Πηγή: [61])

Όσον αφορά στη θάμβωση, προέκυψε ότι:

- Η εφαρμογή σκιάστρων στο απλό παράθυρο προστατεύει επαρκώς από τη θάμβωση, παρόλα αυτά δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση γενικότερα αφού μειώνει κατά πολύ τα επίπεδα φωτισμού στο χώρο.
- Το ανειδωλικό σύστημα μείωσε, στις περισσότερες περιπτώσεις, τις τιμές του DGI (Daylight Glare Index). Έτσι προέκυψε πως και οι δύο διατάξεις που μελετήθηκαν μειώνουν τη θάμβωση όταν το ηλιακό ύψος είναι μεγάλο.
- Στις περιπτώσεις χαμηλού ηλιακού ύψους, το ανειδωλικό σύστημα αφενός προσφέρει αυξημένες τιμές φωτισμού στο επίπεδο εργασίας, αφετέρου όμως αποτελεί πιθανή πηγή θάμβωσης.

Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, σε συνθήκες ηλιοφάνειας, ο ανειδωλικός συλλέκτης προσφέρει μεγαλύτερες τιμές φυσικού φωτισμού, αλλά κινδυνεύει ταυτόχρονα να προκαλέσει θάμβωση όταν ο ήλιος χαμηλώνει. Υπό αυτό το πρίσμα, το ράφι φωτισμού αποτελεί μια «ασφαλέστερη» λύση, προσφέροντας ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού στο χώρο, θυσιάζοντας την ποσότητα του φωτισμού.

## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ”

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε μια σχολική αίθουσα με την βοήθεια του λογισμικού RADIANCE. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης ανάμεσα σε ράφια φωτισμού, φεγγίτες και περσίδες παρουσιάζονται σε σχήματα ([7]).

#### 5.1 Μεθοδολογία

Το πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας αποτέλεσε μια προσομοιωτική μελέτη φυσικού φωτισμού στο λογισμικό RADIANCE. Πιο συγκεκριμένα, σε μια τυπική σχολική αίθουσα μελετήθηκαν διάφοροι τύποι ραφιών φωτισμού, εξωτερικές περσίδες σκίασης καθώς και φεγγίτες διαφορετικών διαστάσεων, σε συνθήκες νεφοσκεπούς και ηλιόλουστου ουρανού και με τα κλιματικά δεδομένα της Αθήνας.

##### 5.1.1 Χαρακτηριστικά του μοντέλου της σχολικής αίθουσας

Το μοντέλο της σχολικής αίθουσας που δημιουργήθηκε στο ECOTECT v5.5 είναι διαστάσεων 7μ. x 7μ. x 3,2μ., όπως φαίνεται στα σχήματα 5.1, 5.2. Τα ανοίγματα είναι νότια, διαστάσεων Επαραθ. = 20% Εαίθ. όπως προτείνεται από τον Ο.Σ.Κ.

Οι ανακλαστικότητες των εσωτερικών επιφανειών ορίστηκαν ως εξής:

- Ανακλαστικότητα οροφής: 85%
- Ανακλαστικότητα πλαϊνών τοίχων: 65%
- Ανακλαστικότητα δαπέδου: 25%
- Ανακλαστικότητα διπλού τζαμιού: 11%
- Ανακλαστικότητα κουφωμάτων: 30%
- Η διαπερατότητα του διπλού τζαμιού ορίστηκε 70%.

##### 5.1.2 Συστήματα ενίσχυσης φυσικού φωτισμού

- Ράφια φωτισμού

Μελετήθηκαν έξι (6) βασικοί τύποι ραφιών φωτισμού, οι οποίοι ορίστηκαν με βάση τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά (Σχήμα 5.3). Καθένας από αυτούς τους τύπους εξετάστηκε ως οριζόντιος, αλλά και κεκλιμένος. Επίσης, κάθε τύπος εξετάστηκε σε δύο ύψη, στα 2,00μ.

και στα 2,20μ. από το δάπεδο1. Έτσι προέκυψαν 24 περιπτώσεις, οι οποίες εξετάστηκαν με κριτήρια τη βελτίωση της ομοιομορφία της κατανομής φωτισμού και την αύξηση των τιμών φωτισμού στο βάθος της αίθουσας.

- Φεγγίτες

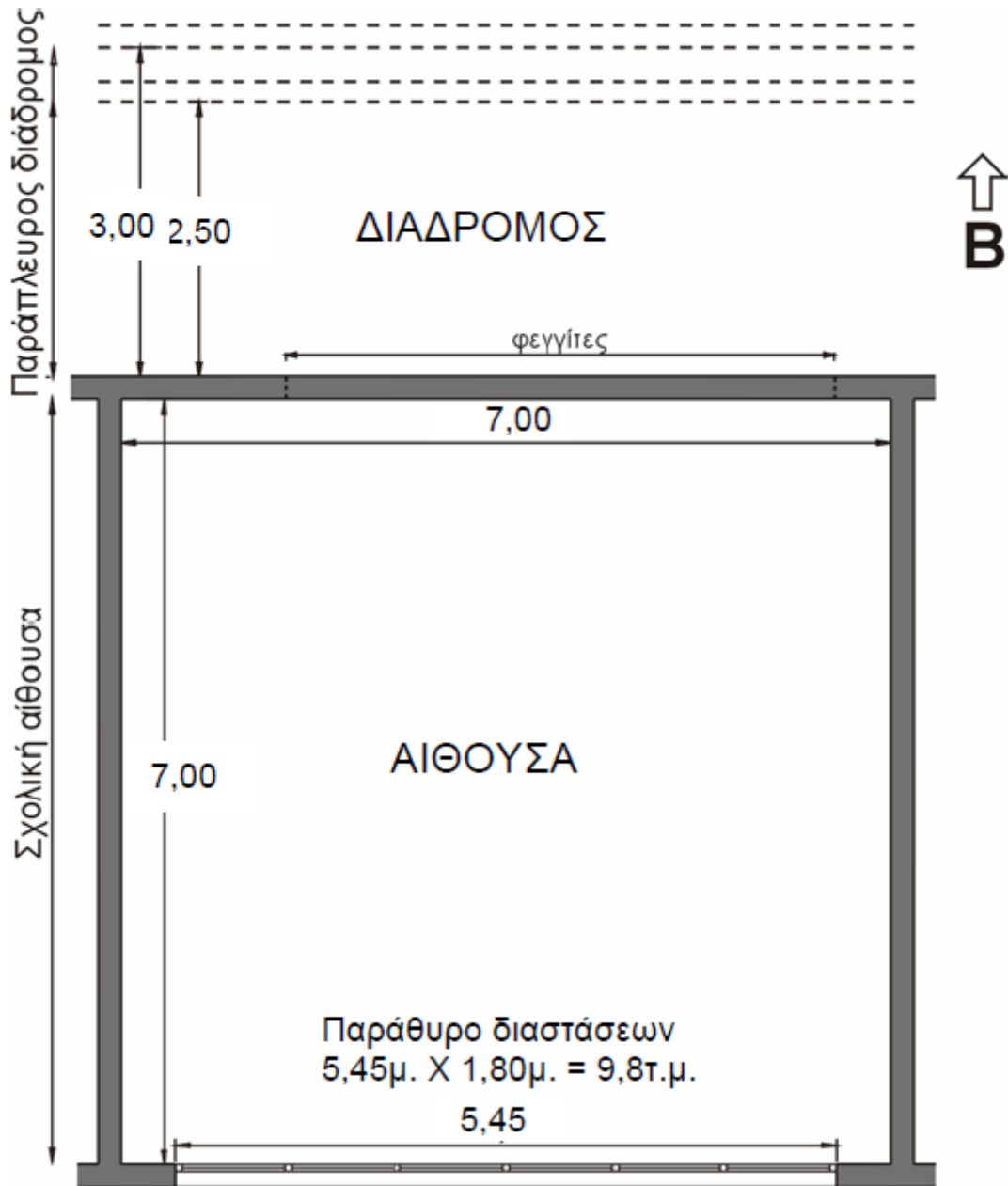
Μελετήθηκαν 4 περιπτώσεις φεγγιτών, οι οποίες προέκυψαν από τον συνδυασμό 2φεγγιτών διαφορετικών υψών και 2 παράπλευρων διαδρόμων διαφορετικού πλάτους. Οι περιπτώσεις αυτές είχαν ως σκοπό τη διερεύνηση του ρόλου των φεγγιτών στην αύξηση του φωτισμού στο κεντρικό και πίσω μέρος της αίθουσας.

- Κινητές εξωτερικές ημιδιαφανείς περσίδες

Για τον επαρκή σκιασμό της αίθουσας μελετήθηκε ένα σύστημα εξωτερικών, κινητών, ημιδιαφανών περσίδων (Σχήμα 5.4). Το σύστημα αυτό, θεωρητικά τουλάχιστον, έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ως εξωτερικό, αποτρέπει την υπερθέρμανση κατά τους θερμότερους μήνες.
- Η δυνατότητα κίνησης προσφέρει ελευθερία επιλογών στους χρήστες και άρα μεγαλύτερο εύρος θερμικής και οπτικής άνεσης.
- Η ημιδιαφάνεια αποτρέπει τη θάμβωση χωρίς να μειώνει υπερβολικά τα επίπεδα φυσικού φωτισμού στο χώρο.

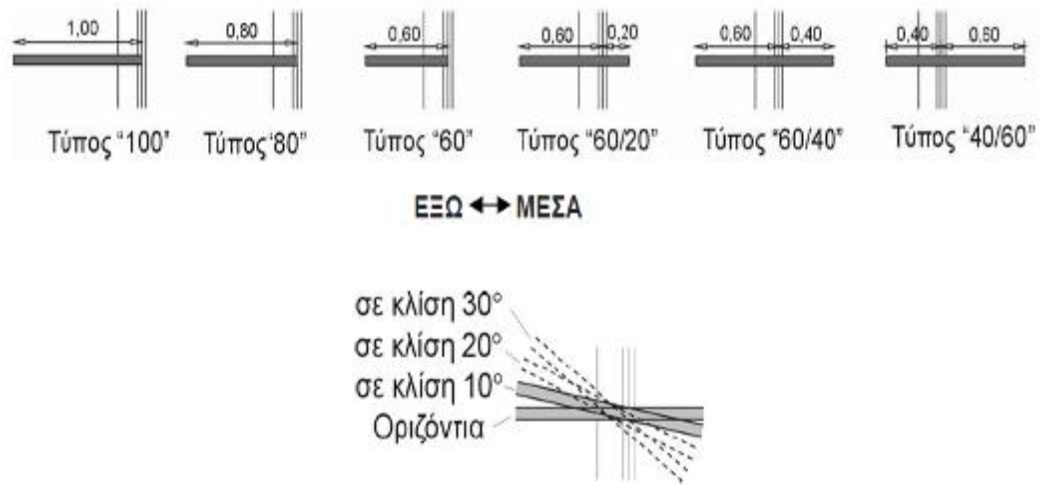
Έτσι, οι περσίδες σκίασης εξετάστηκαν με κριτήρια τον επαρκή σκιασμό, την απόφυγή της θάμβωσης και τη μείωση των επιπέδων φωτισμού που συνεπάγεται η χρήση τους.



Σχήμα 5.1 Η κάτοψη της σχολικής αίθουσας που προσομοιώθηκε στο RADIANCE.  
(Πηγή:[7])



Σχήμα 5.2 Η τομή της σχολικής αίθουσας που προσομοιώθηκε στο RADIANCE. (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.3 Οι έξι βασικοί «τύποι» ραφιόν φωτισμού καθένας από τους οποίους μελετήθηκε σε δύο κλίσεις (οριζόντιος και σε κλίση 10°) και σε δύο ύψη (στα 2,00μ. και στα 2,20μ. από το δάπεδο) . Στο ΣΤΑΔΙΟ 6 εξετάστηκαν ακόμα δύο κλίσεις, 20° και 30°. (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.4 Οι περιπτώσεις χρήσης των ημιδιαφανών περσίδων. (Πηγή: [7])

### 5.1.3 Η προσομοίωση

Οι παράμετροι ακρίβειας στο RADIANCE ορίστηκαν ως εξής:

- Model Detail: Medium
- Lighting Variability: High
- Image Quality: High
- Εσωτερικές ανακλάσεις (Internal Reflections): 7

Οι τύποι ουρανού που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Ο νεφοσκεπής ουρανός (CIE Overcast Sky) και
- Ο καθαρός ουρανός με ήλιο (CIE Sunny with Sun)

## 5.2 Τα επτά (7) στάδια της μελέτης

### 5.2.1 Στάδιο 1

Αρχικά εξετάστηκαν οι 24 περιπτώσεις ραφιών φωτισμού, συγκρινόμενες με την απλή περίπτωση του παραθύρου χωρίς κανένα σύστημα, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού που αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση από πλευράς ποσότητας εξωτερικού (άρα και εσωτερικού) φωτισμού. Τα ράφια φωτισμού περιγράφηκαν ως κατοπτρικά (με δείκτη κατοπτρικότητας 0.5), ώστε να αντανακλούν περισσότερο φως στο βάθος του χώρου. Παρόλα αυτά, ένας από τους τύπους των ραφιών φωτισμού που απέδωσαν καλύτερα εξετάστηκε και ως διαχυτικός ώστε να φανεί πιθανή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων.

### 5.2.2 Στάδιο 2

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν 4 από τις 24 πρώτες περιπτώσεις (2 τύποι ραφιών φωτισμού σε 2 κλίσεις) και μελετήθηκαν σε συνθήκες καθαρού ουρανού σε τρεις ημερομηνίες (21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου και 21 Ιουνίου) και δύο χρονικές στιγμές της ημέρας (στις 9:00 και στις 12:00). Οι 2 αυτοί τύποι ραφιών φωτισμού εξετάστηκαν ως κατοπτρικοί, αλλά και ως διαχυτικοί. Σε αυτό το στάδιο δεν λαμβάνεται υπόψη ο σκιασμός της αίθουσας, παρά μόνο η ικανότητα των ραφιών φωτισμού να μεταφέρουν φως στο βάθος του χώρου κάτω από συνθήκες διαφορετικών ηλιακών υψών. Ο σκιασμός λαμβάνεται υπόψη στο Στάδιο 5.

### 5.2.3 Στάδιο 3

Στο τρίτο στάδιο της μελέτης εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ύπαρξης εξωτερικών εμποδίων και διερευνήθηκε η απόδοση δύο ραφιών φωτισμού από αυτά που λειτούργησαν καλύτερα στα Στάδια 1 και 2.



#### 5.2.4 Στάδιο 4

Στο τέταρτο στάδιο εξετάστηκαν οι 4 περιπτώσεις φεγγιτών και παράπλευρων διαδρόμων, σε συνδυασμό με ένα από τα ράφια φωτισμού που προσέφεραν μεγαλύτερη ομοιομορφία κατανομής φωτισμού στα προηγούμενα στάδια. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού, με σκοπό την αξιολόγηση του ρόλου των φεγγιτών στην αύξηση του φωτισμού στο κέντρο και στο βάθος του χώρου.

#### 5.2.5 Στάδιο 5

Στο πέμπτο στάδιο της μελέτης εξετάστηκε ξανά η περίπτωση του καθαρού ουρανού με ήλιο. Σε αντίθεση, όμως, με το Στάδιο 2 όπου δεν λήφθηκε υπόψη ο σκιασμός, στο στάδιο 5 μελετήθηκε ένα από τα ράφια φωτισμού σε συνδυασμό με εξωτερικές ημιδιαφανείς κινητές περσίδες σκίασης. Για την καλύτερη αξιολόγηση της απόδοσής τους οι περσίδες συγκρίθηκαν με κουρτίνες της ίδιας διαπερατότητας.

#### 5.2.6 Στάδιο 6

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές κλίσεις (10°, 20°, 30°) του ραφιού φωτισμού πλάτους 80εκ. Κάθε περίπτωση μελετήθηκε σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (21 Δεκεμβρίου), αλλά και ουρανού με ήλιο (21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου και 21 Ιουνίου).

#### 5.2.7 Στάδιο 7

Στο τελευταίο στάδιο της μελέτης εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας (50%, 60%, 70%, 80%, 90%) του ραφιού φωτισμού πλάτους 80εκ. και σε κλίση 10°. Κάθε περίπτωση μελετήθηκε σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (21 Δεκεμβρίου), αλλά και ουρανού με ήλιο (21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου).

*Πίνακας 5.1 Συνοπτική περιγραφή των επτά σταδίων της μελέτης προσομοίωσης φυσικού φωτισμού. (Πηγή: [7])*

ΣΤΑΔΙΑ	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΣ ΣΤΟΧΟΣ	ΤΥΠΟΙ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ / ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ	ΠΙΝΑΚΕΣ
1	Η διερεύνηση της απόδοσης των ραφιών φωτισμού σε συνθήκες λίγου και διάχυτου	ΟΛΟΙ Κατοπτρικά (και ένα διαχυτικό) (25 περιπτώσεις)	Νεφοσκεπής ουρανός	5.2 – 5.9

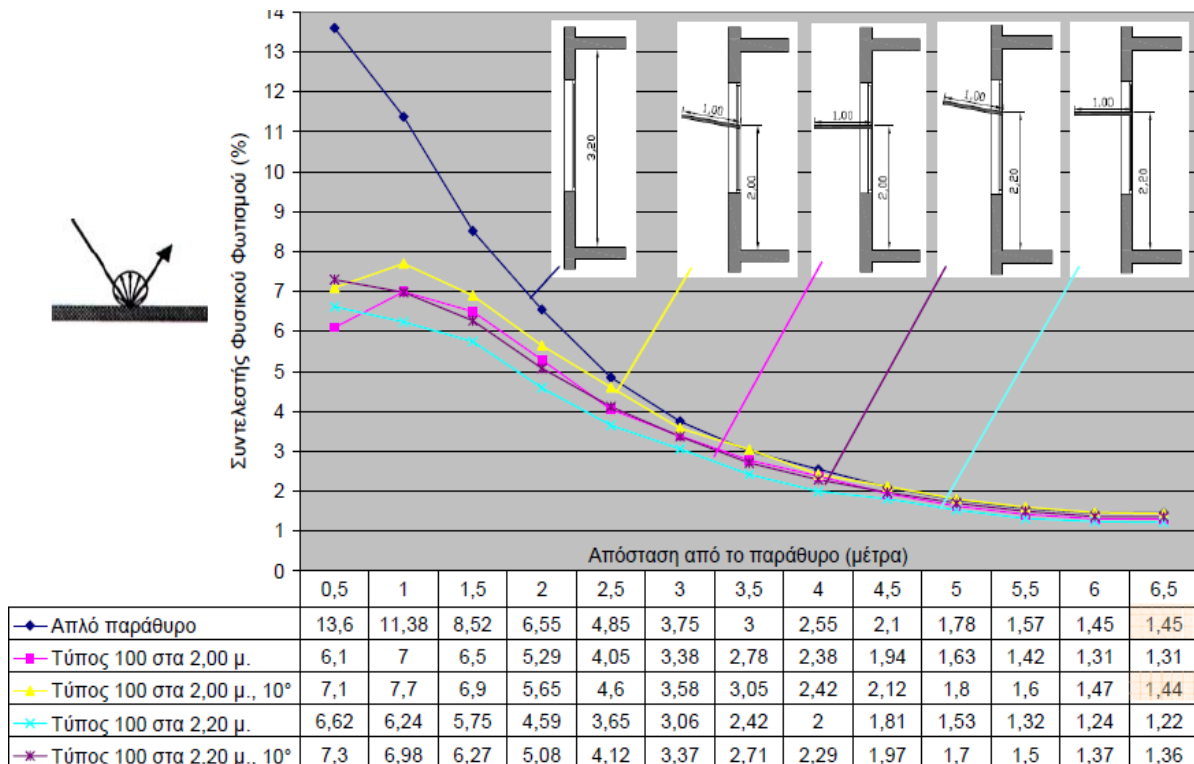
	φυσικού φωτισμού			
2	Η διερεύνηση της απόδοσης των ραφιών φωτισμού σε συνθήκες άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας	Ο τύπος «100» και ο τύπος «60/40» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο της αίθουσας, και σε δύο κλίσεις Κατοπτρικά και διαχυτικά (48 περιπτώσεις)	Καθαρός ουρανός 21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου και 21 Ιουνίου 9:00 και 12:00	5.10 – 5.24
3	Η διερεύνηση της απόδοσης των ραφιών φωτισμού όταν υπάρχουν εξωτερικά εμπόδια (κτίρια)	Οι τύποι «100» και «60/40» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10° Κατοπτρικά (4 περιπτώσεις)	Νεφοσκεπής ουρανός	5.25 – 5.26
4	Η διερεύνηση της απόδοσης φεγγιτών (αμφίπλευρος φωτισμός)	Ο τύπος «80» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10° Κατοπτρικό (4 περιπτώσεις)	Νεφοσκεπής ουρανός	5.27
5	Η διερεύνηση της απόδοσης των ραφιών φωτισμού και των περσίδων σκίασης σε συνθήκες άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας	Ο τύπος «80» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10° Κατοπτρικό (3 περιπτώσεις)	Καθαρός ουρανός 21η Δεκεμβρίου (09:00 και 12:00) και 21η Μαρτίου (12:00)	5.28 – 5.30
6	Η διερεύνηση της απόδοσης των ραφιών φωτισμού σε τρεις διαφορετικές κλίσεις (10°, 20°, 30°)	Ο τύπος «80» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο Κατοπτρικό (12 περιπτώσεις)	Νεφοσκεπής ουρανός + Καθαρός ουρανός 21η Δεκεμβρίου, 21η Μαρτίου, 21η Ιουνίου (όλα στις 12:00)	5.31 – 5.34

7	Η διερεύνηση της απόδοσης ραφιών φωτισμού με διαφορετική κατοπτρική (50%, 60%, 70%, 80%, 90%)	Ο τύπος «80» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και σε κλίση 10° (15 περιπτώσεις)	Νεφοσκεπής ουρανός + Καθαρός ουρανός 21η Δεκεμβρίου, 21η Μαρτίου, (όλα στις 12:00)	5.35 – 5.37
---	---	---	---	-------------

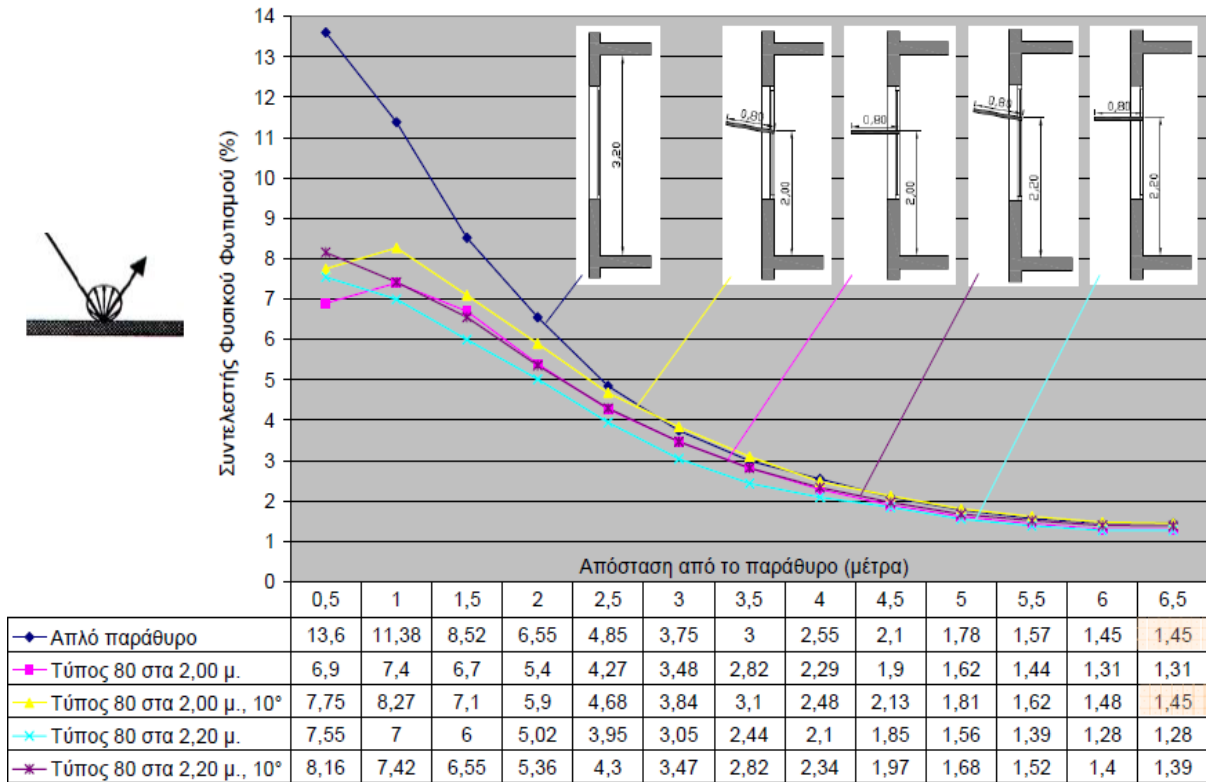
### 5.3 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

#### 5.3.1 Στάδιο 1

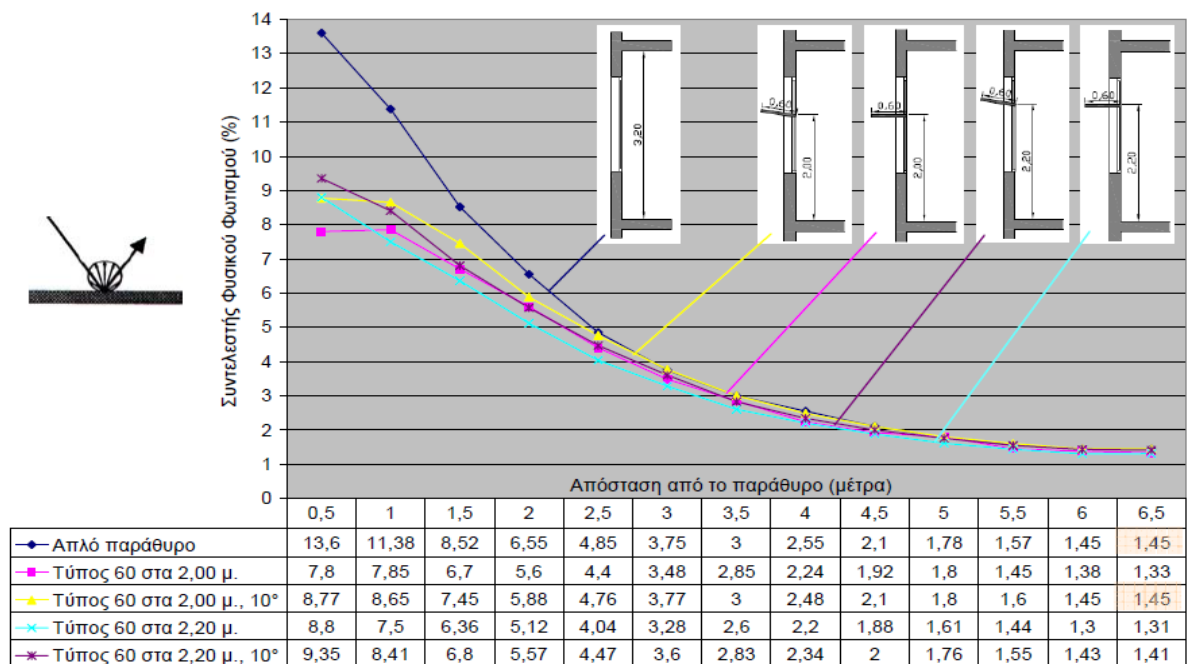
Στα Διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή του φυσικού φωτισμού στις περιπτώσεις των 6 βασικών τύπων ραφιών φωτισμού, συγκρινόμενη με την κατανομή φωτισμού στην περίπτωση του απλού παραθύρου, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού. Σε κάθε Διάγραμμα έχουν τονιστεί με σκιά οι μεγαλύτερες τιμές Σ.Φ.Φ. (%) στο βάθος της αίθουσας.



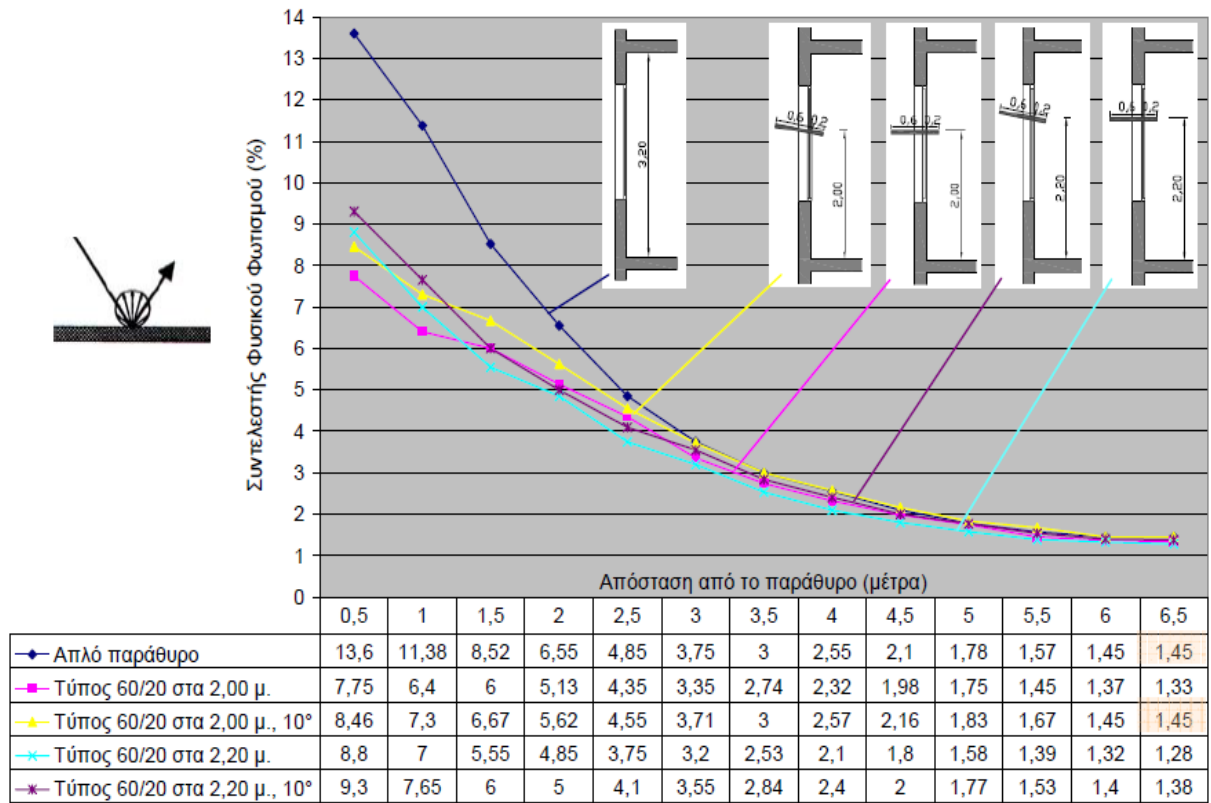
Σχήμα 5.5 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «100» (Πηγή: [7])



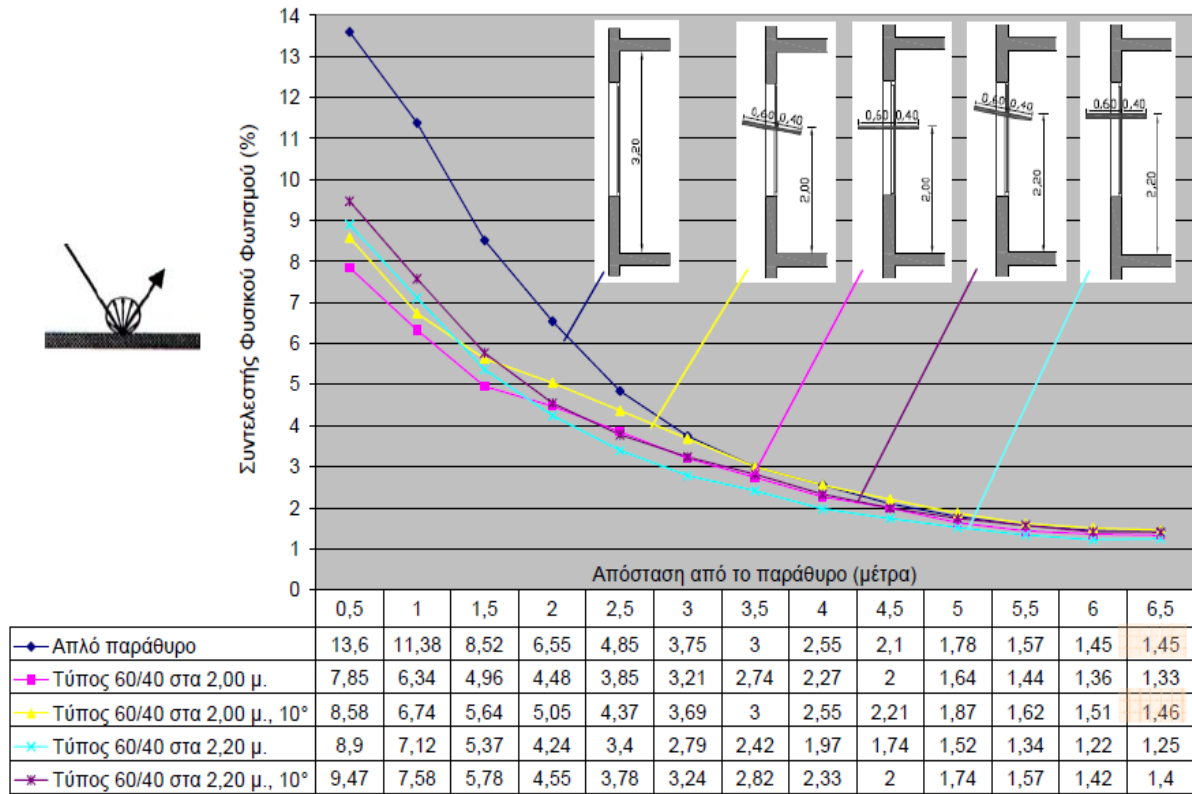
Σχήμα 5.6 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «80» (Πηγή: [7])



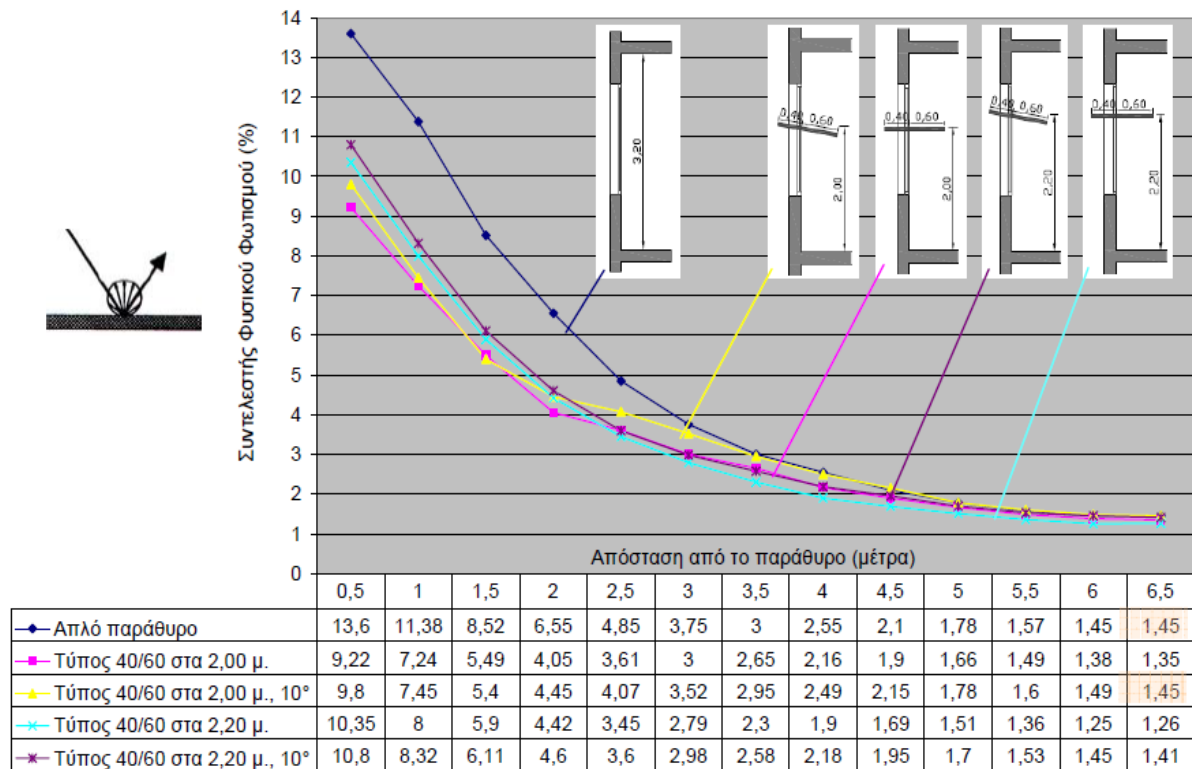
Σχήμα 5.7 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «60» (Πηγή: [7])



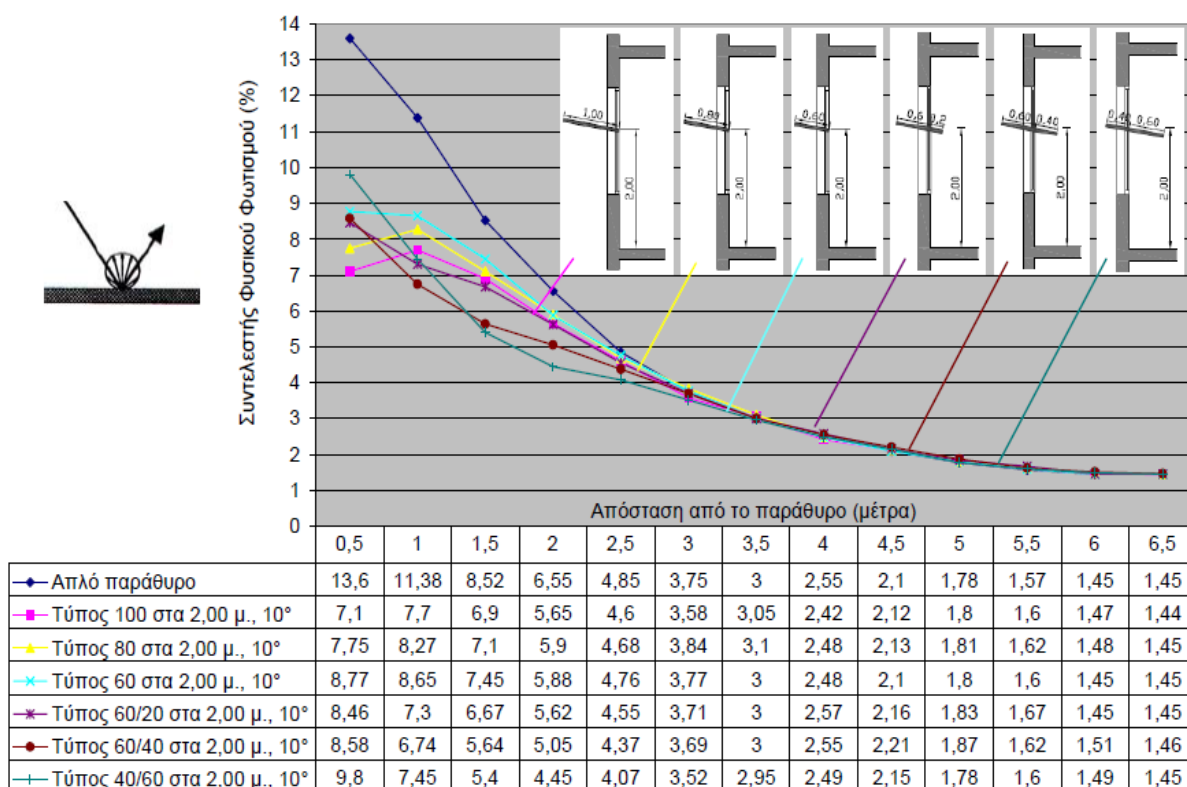
Σχήμα 5.8 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «60/20» (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.9 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «60/40» (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.10 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού τύπου «40/60» (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.11 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις κατοπτρικών ραφιών φωτισμού (όλων των τύπων) σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και σε κλίση 10° (Πηγή: [7])

### Συμπεράσματα

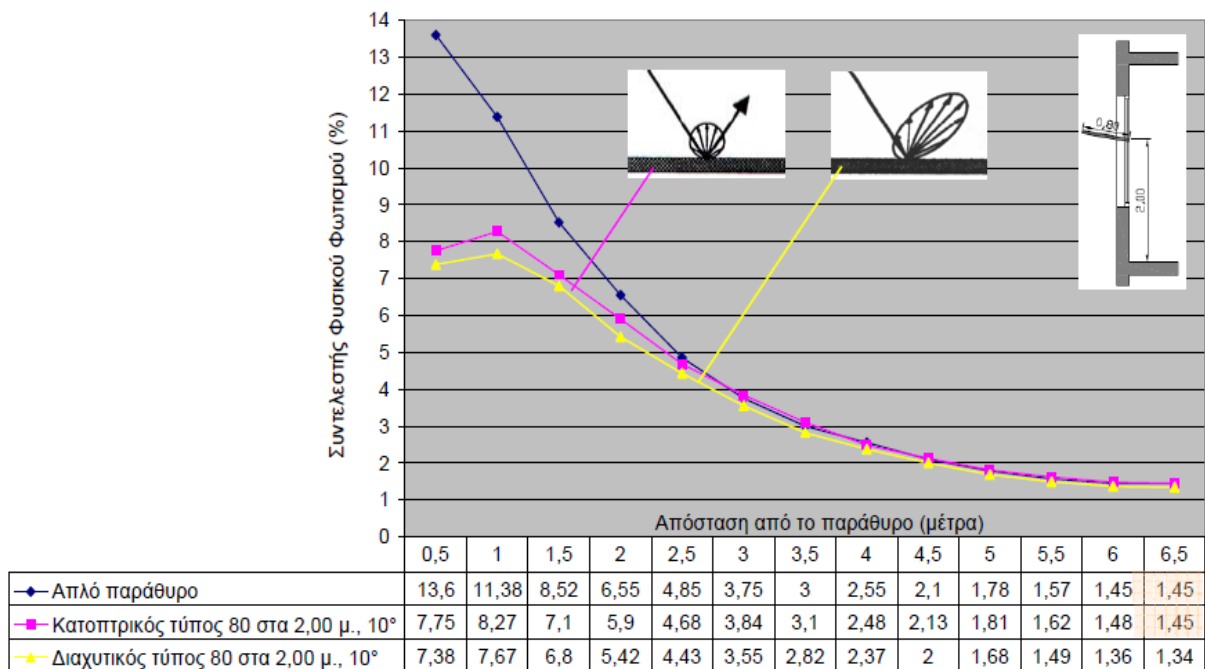
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Σε όλες τις περιπτώσεις, τα ράφια φωτισμού βελτίωσαν την ομοιομορφία της κατανομής του φυσικού φωτισμού, μειώνοντας το εισερχόμενο φως κοντά στο παράθυρο και διατηρώντας ή ελαφρώς αυξομειώνοντάς το στο βάθος της αίθουσας.
- Την λιγότερο ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού παρουσίασαν οι τύποι «60/40» και κυρίως ο «40/60», δίνοντας μεγάλες τιμές κοντά στο παράθυρο και μικρές σε απόσταση 1,5 - 2μ. από αυτό.
- Για κάθε έναν από τους 6 βασικούς τύπους ραφιών φωτισμού, η καλύτερη θέση ήταν αυτή στα 2,00μ. από το δάπεδο (δηλαδή η χαμηλότερη από τις δύο που μελετήθηκαν) και σε κλίση 10°. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά (Σχήμα 5.11), τα επίπεδα φωτισμού στα 6,5μ. βάθους έμειναν ίδια με αυτά της περίπτωσης του απλού παραθύρου, ενώ στα 3 – 6μ. βάθους υπήρξαν περιπτώσεις που αύξησαν το φωτισμό κατά περίπου 1-6%. Έτσι προέκυψε πως, σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού, έχει μεγάλη σημασία το ύψος από το δάπεδο και η κλίση των ραφιών φωτισμού.

- Την πιο ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού έδωσε ο τύπος «100» στα 2,00μ. και με κλίση 10°, με μικρή διαφορά από τον τύπο «80» με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Όπως προαναφέρθηκε, τα ράφια φωτισμού μελετήθηκαν ως κατοπτρικά, ώστε να αντανακλούν περισσότερο φως στο βάθος του χώρου. Βέβαια, το κατοπτρικό ράφι φωτισμού που μελετήθηκε δεν είναι 100% καθρέφτης, αλλά ένα μίγμα καθρέφτη και ανακλαστικού μετάλλου, ώστε κατά τις περιόδους ηλιοφάνειας να μην σχηματίζεται το είδωλο του ραφιού στην οροφή προκαλώντας θάμβωση. Στη συνέχεια επιλέχθηκε ο τύπος «80» στα 2,00μ. και με κλίση 10° για να μελετηθεί και ως διαχυτικός. Από την σύγκριση, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12 που ακολουθεί, προκύπτει ότι το κατοπτρικό ράφι φωτισμού προσφέρει αυξημένα επίπεδα φωτισμού κατά 7,8% κοντά στο παράθυρο και κατά 6,6% στο βάθος του χώρου. Άρα, ένα ακόμα συμπέρασμα από το ΣΤΑΔΙΟ 1 είναι ότι:

- Σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού, ένα κατοπτρικό ράφι φωτισμού προσφέρει αυξημένα, κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό, επίπεδα φωτισμού σε όλο το χώρο, σε σχέση με ένα διαχυτικό ράφι φωτισμού.

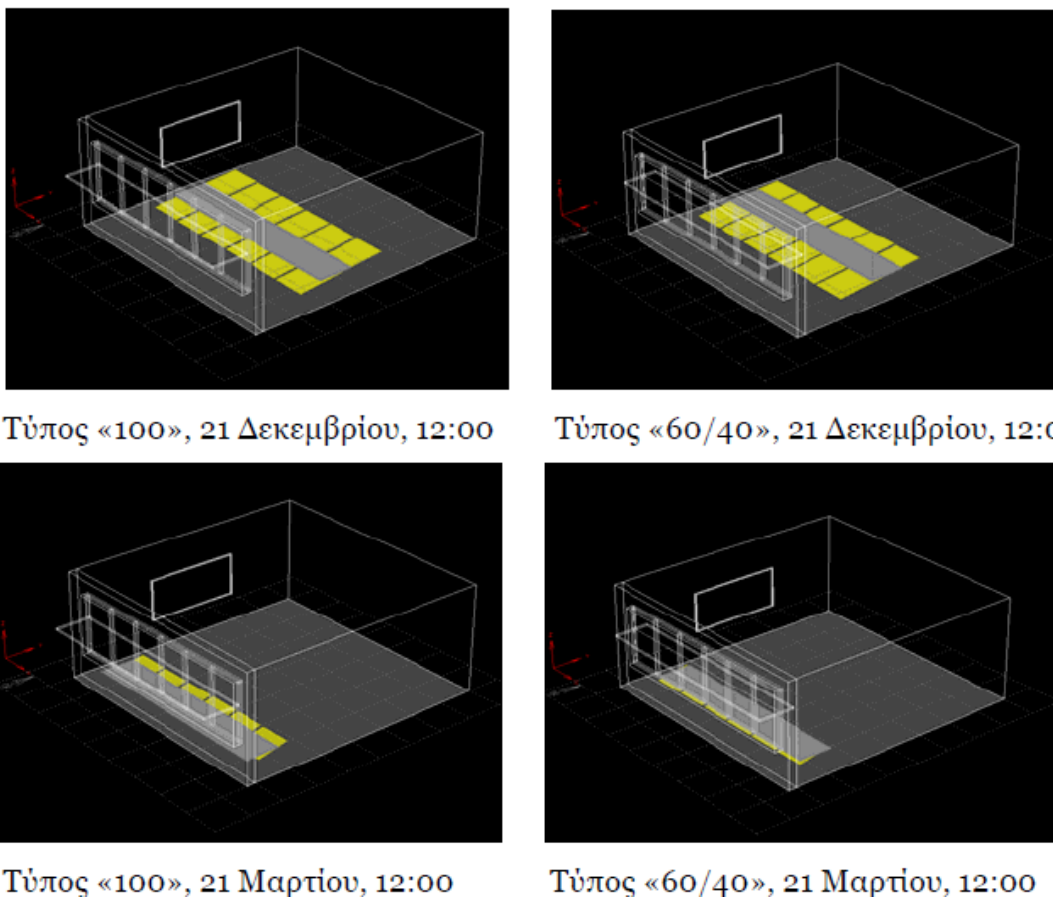


Σχήμα 5.12 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τις περιπτώσεις του ραφιού φωτισμού τύπου «80» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10° ως κατοπτρικό και ως διαχυτικό (Πηγή: [7])



### 5.3.2 Στάδιο 2

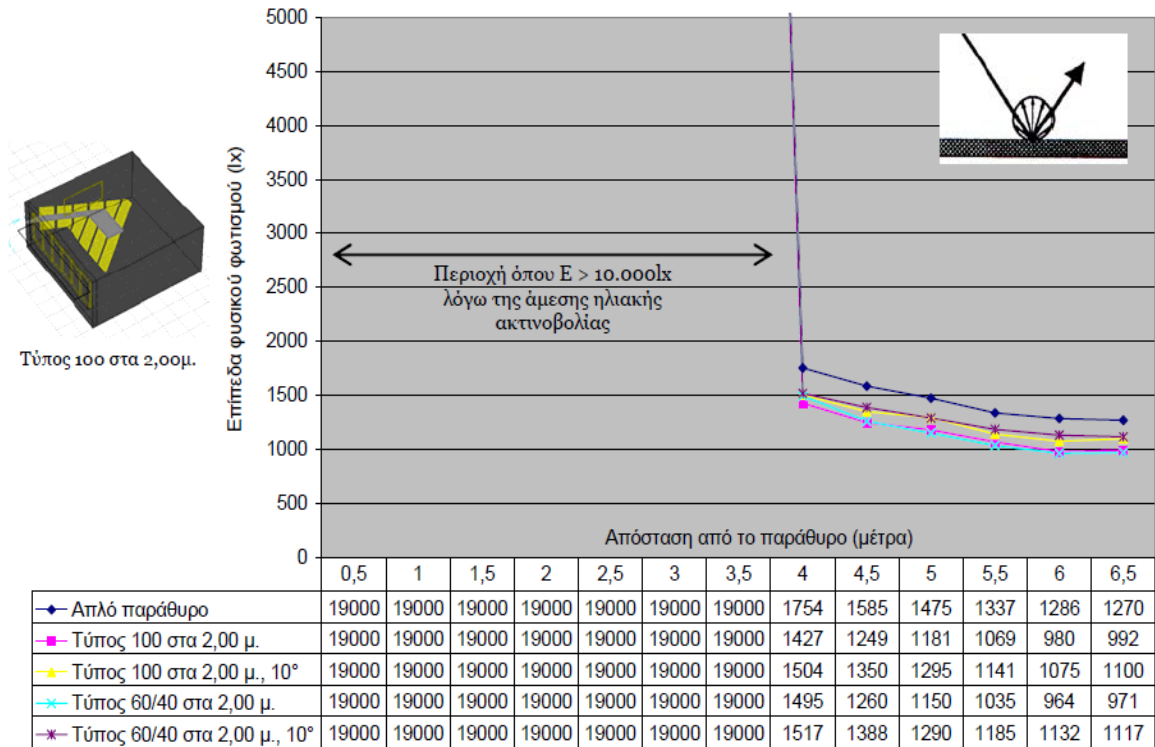
Σε συνθήκες ηλιοφάνειας, τόσο τα εξωτερικά όσο και τα εσωτερικά ράφια φωτισμού ίδιου βάθους προσφέρουν σε γενικές γραμμές τον ίδιο σκιασμό σε νότια ανοίγματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13.



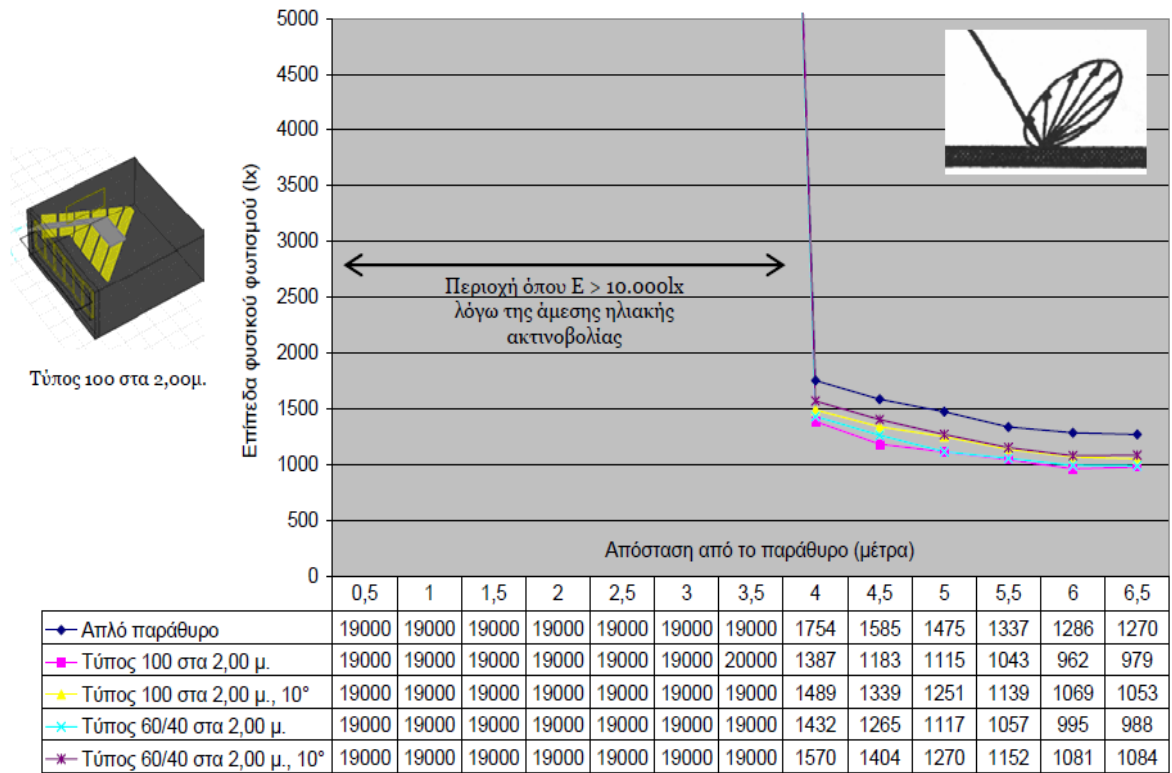
Σχήμα 5.13 Σε συνθήκες ηλιοφάνειας, τα ράφια φωτισμού ίδιου βάθους προσφέρουν, σε γενικές γραμμές, τον ίδιο σκιασμό σε νότια ανοίγματα. (Πηγή: [7])

Όπως έχει προαναφερθεί, στο παρόν στάδιο δεν λαμβάνεται υπόψη ο σκιασμός της αίθουσας 1, παρά μόνο η ικανότητα των ραφιών φωτισμού να μεταφέρουν το φως στο βάθος του χώρου κάτω από συνθήκες διαφορετικών ηλιακών υψών. Τα ράφια φωτισμού που μελετήθηκαν είναι ο τύπος «100» και ο τύπος «60/40» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο της αίθουσας, και σε δύο κλίσεις (οριζόντιοι και με κλίση 10°). Οι παραπάνω περιπτώσεις μελετήθηκαν σε συνθήκες καθαρού ουρανού, σε τρεις ημερομηνίες (21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου και 21 Ιουνίου) και δύο χρονικές στιγμές της ημέρας (στις 9:00 και στις 12:00). Επίσης, τα ράφια φωτισμού εξετάστηκαν ως κατοπτρικά, αλλά και ως διαχυτικά. Έτσι προέκυψε ένα σύνολο  $2 \times 3 \times 2 \times 2 = 48$  περιπτώσεων, οι οποίες παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Η απόδοση των ραφιών φωτισμού παρουσιάζεται ανά μήνα,

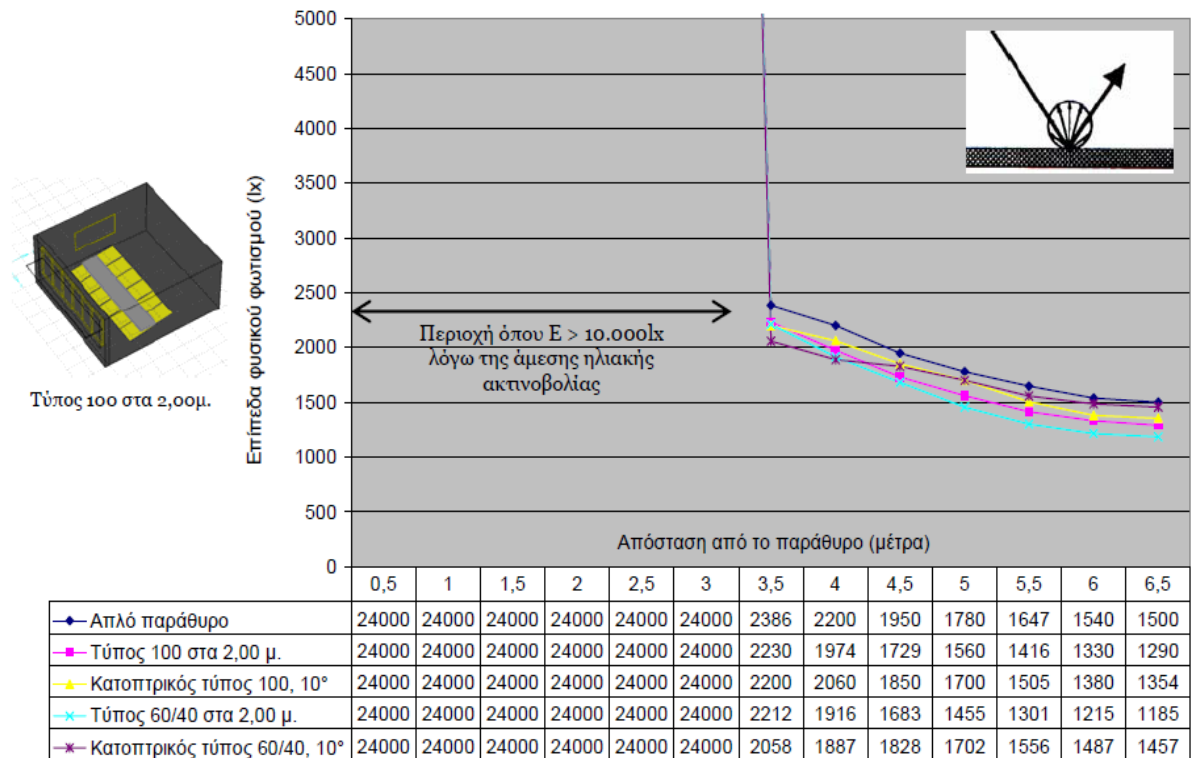
ώστε να είναι πιο κατανοητές οι διαφορές μεταξύ κατοπτρικών και διαχυτικών επιφανειών κάτω από ίδια ηλιακά ύψη.



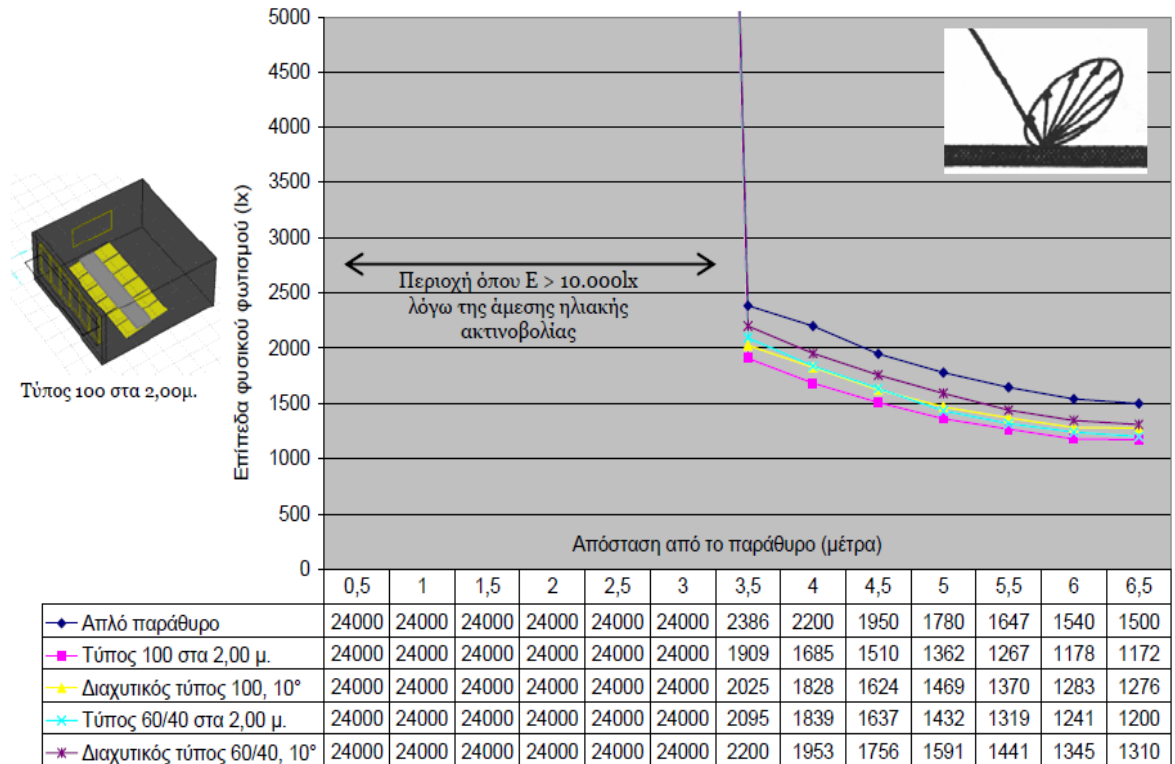
Σχήμα 5.14 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 12°) (Πηγή: [7])



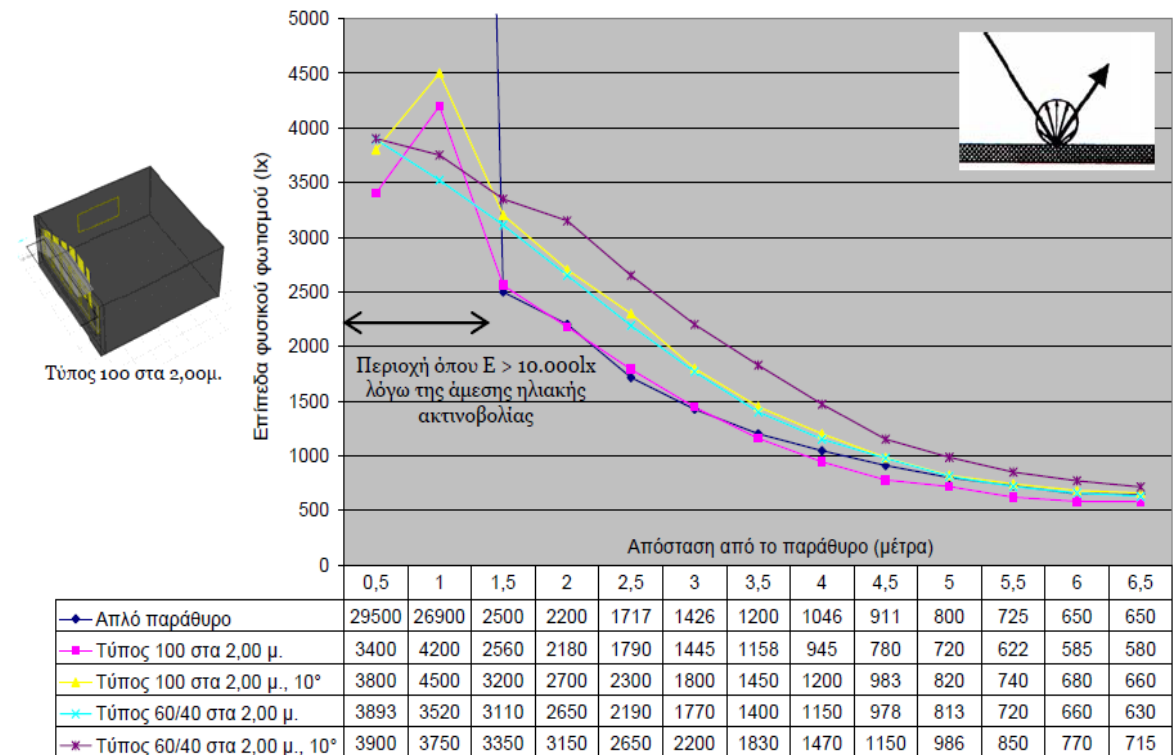
Σχήμα 5.15 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχτυκτά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 12°) (Πηγή: [7])



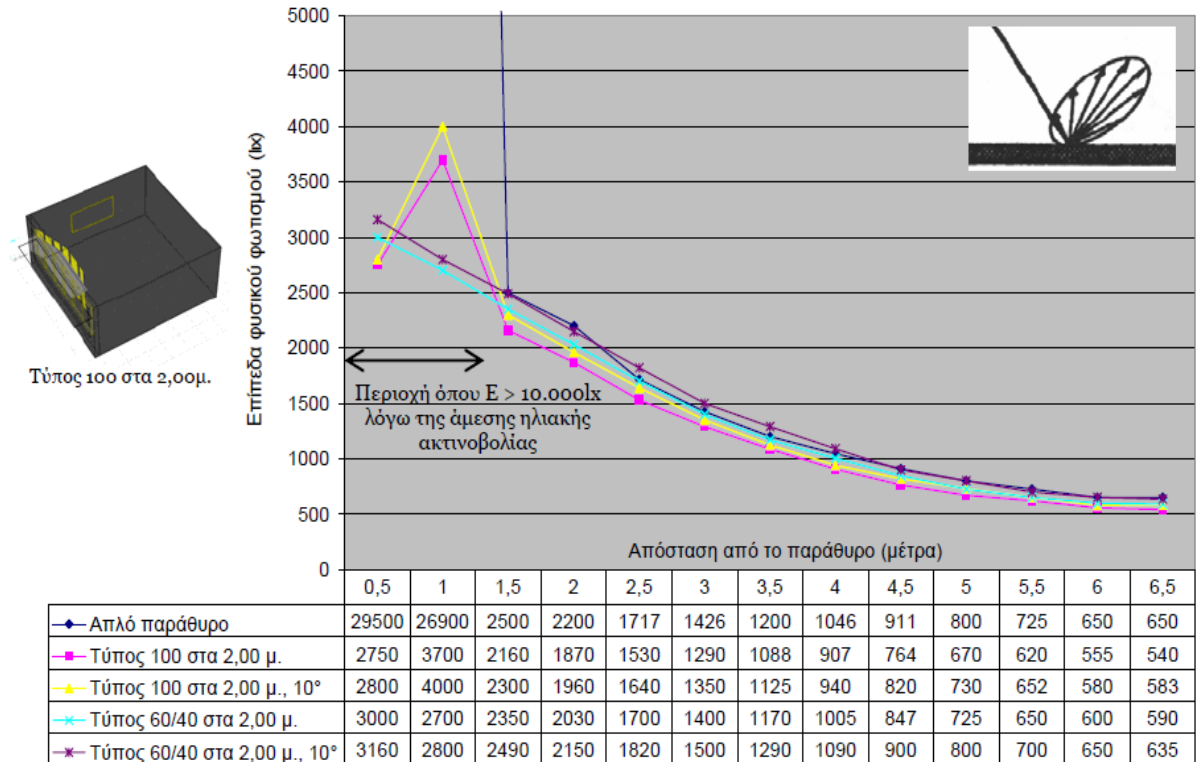
Σχήμα 5.16 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28 °) (Πηγή: [7])



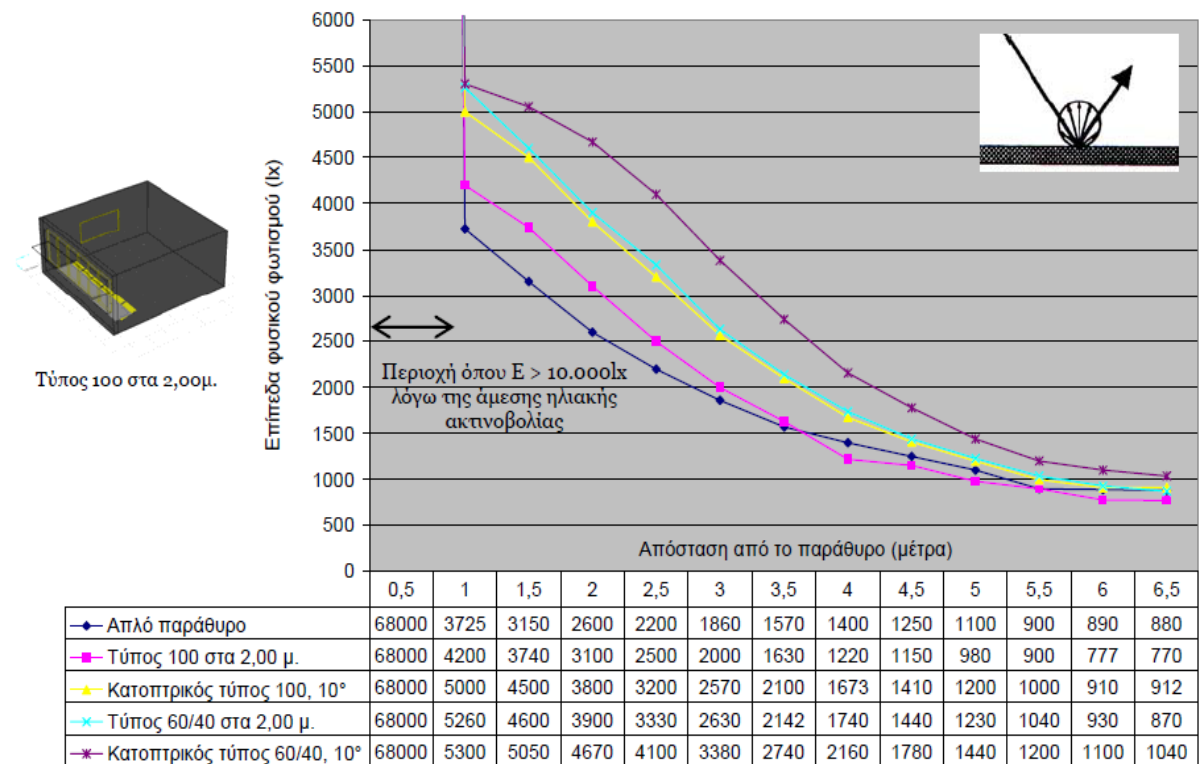
Σχήμα 5.17 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28 °) (Πηγή: [7])



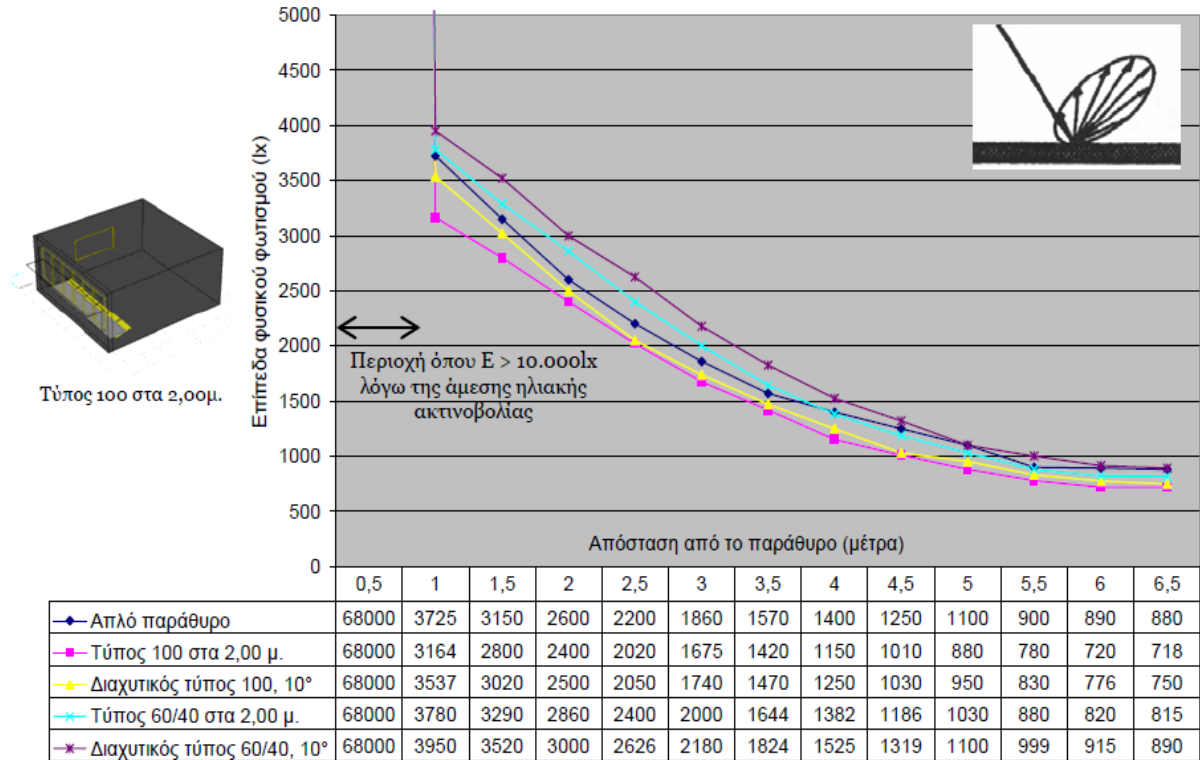
Σχήμα 5.18 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 28,1°) (Πηγή: [7])



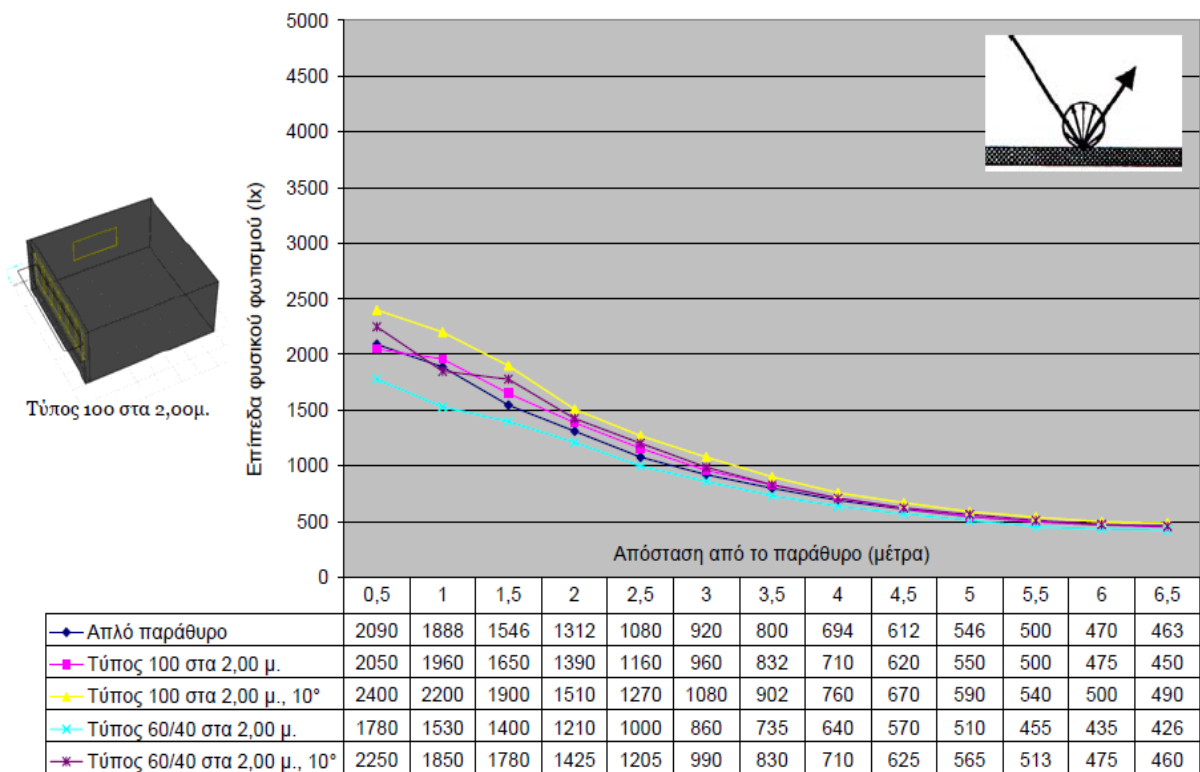
Σχήμα 5.19 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχρητικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 28,1°) (Πηγή: [7])



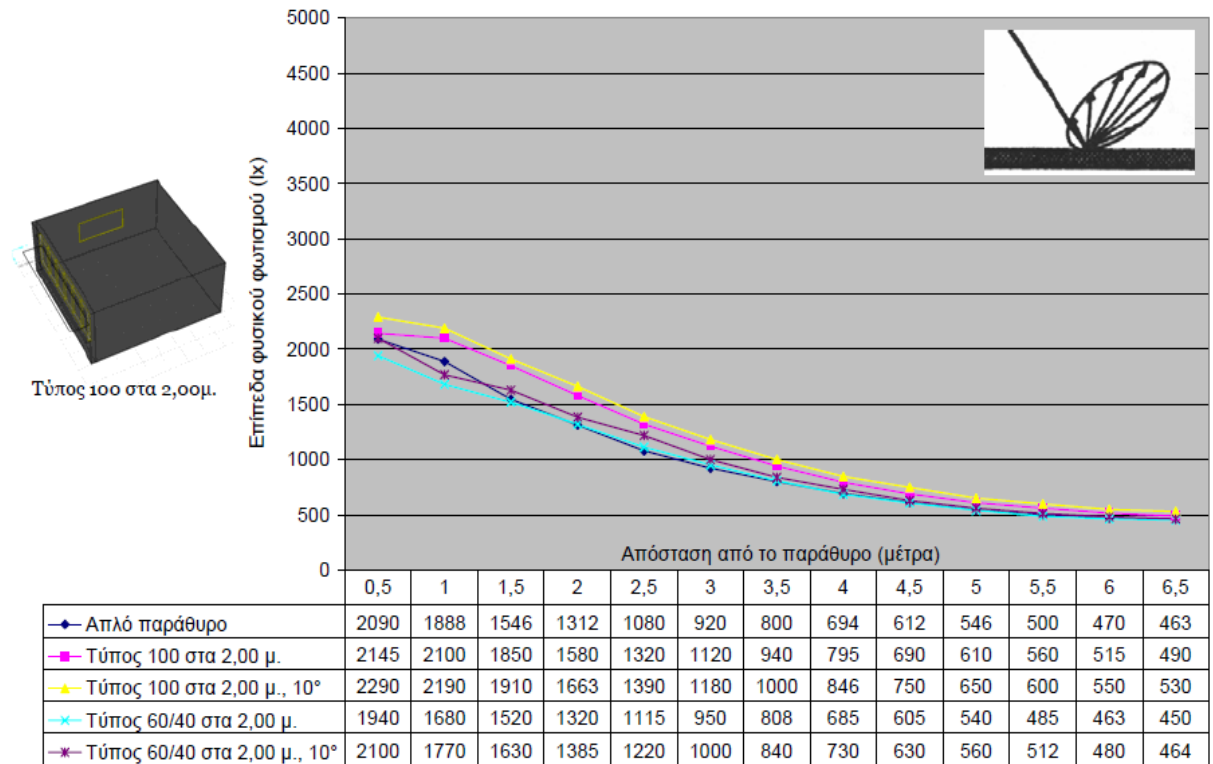
Σχήμα 5.20 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51,1°) (Πηγή: [7])



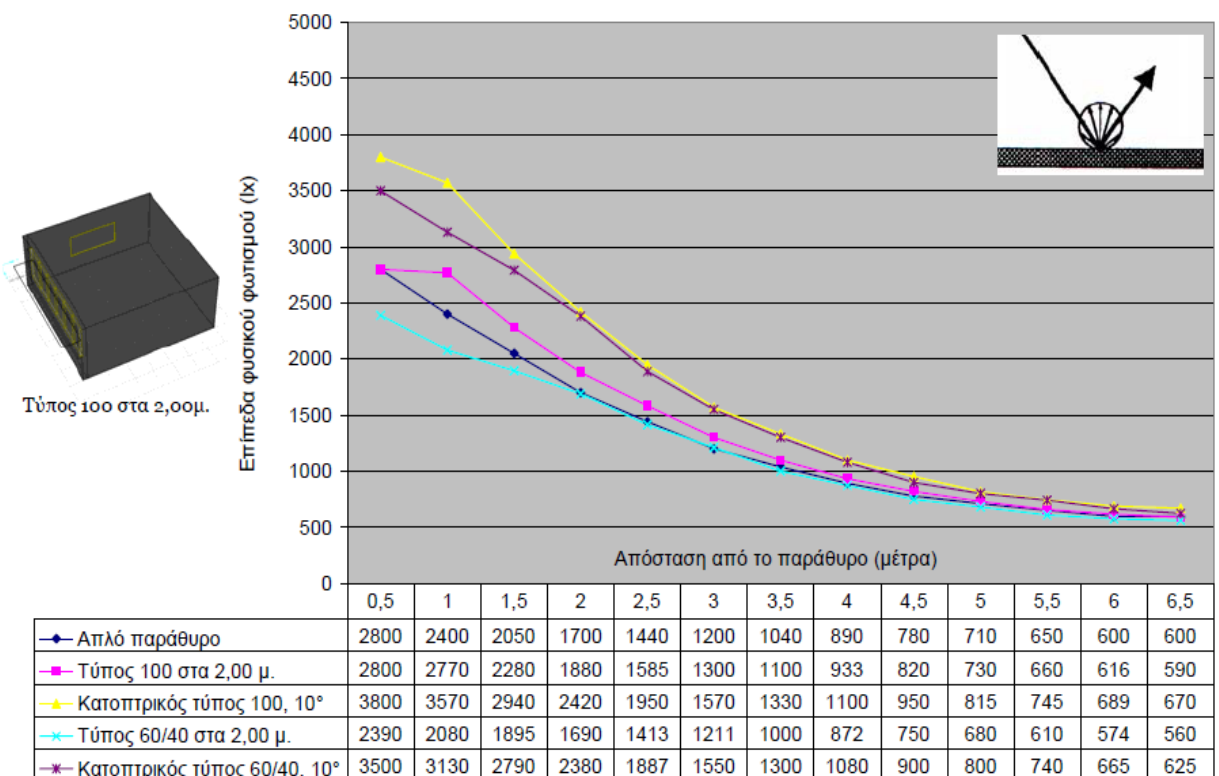
Σχήμα 5.21 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51,1°) (Πηγή: [7])



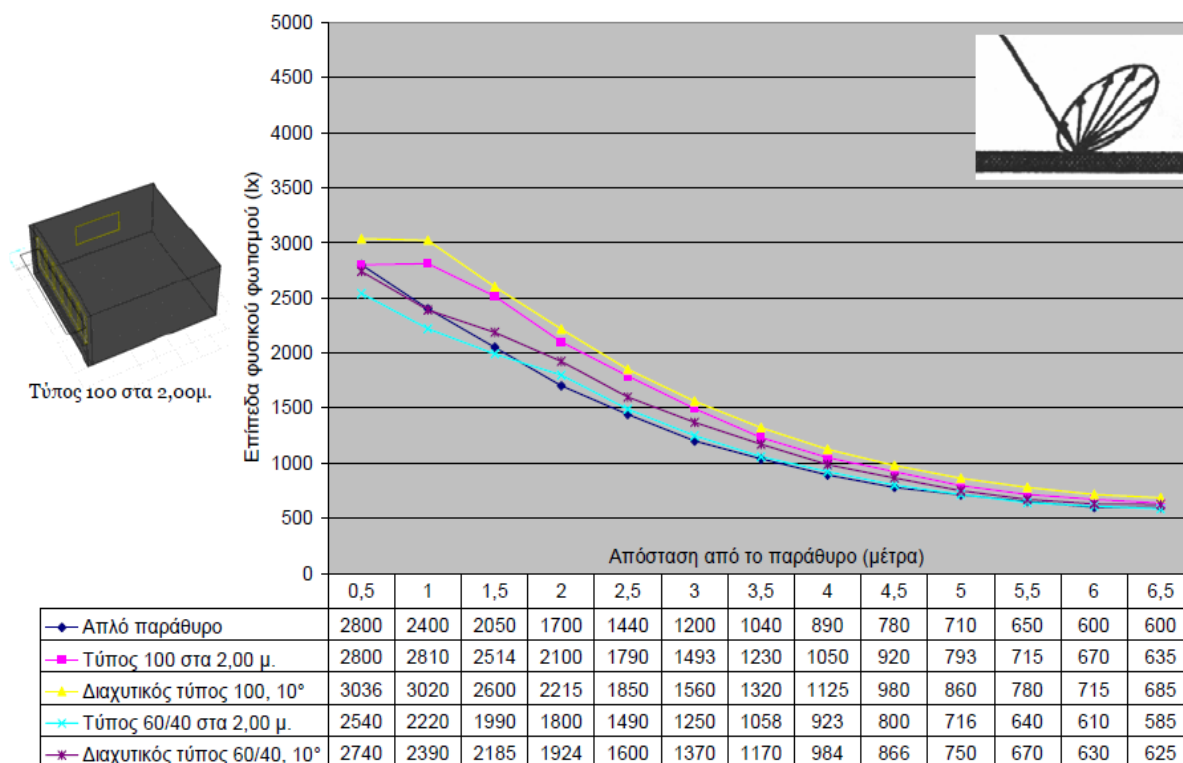
Σχήμα 5.22 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 43,9°) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.23 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχρητικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 43,9°) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.24 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 74,4°) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.25 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για τα διαχυτικά ράφια φωτισμού 21 Ιουνίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 74,4°) (Πηγή: [7])

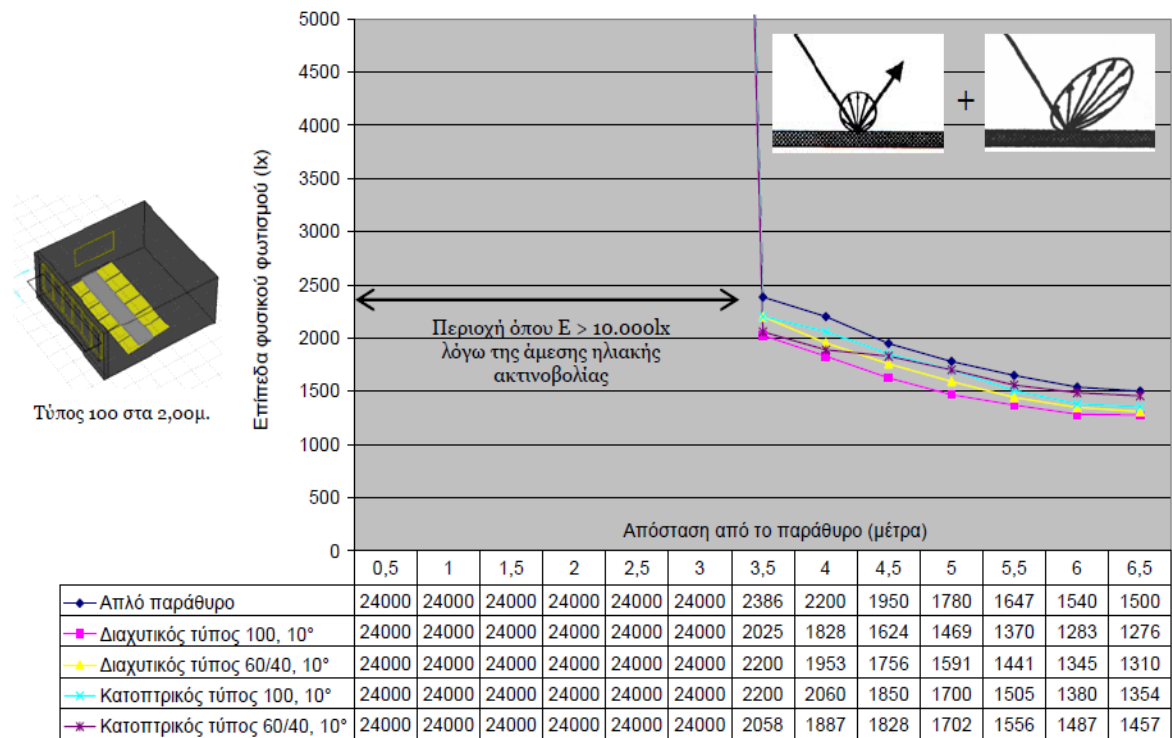
### Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το ΣΤΑΔΙΟ 2 είναι τα εξής:

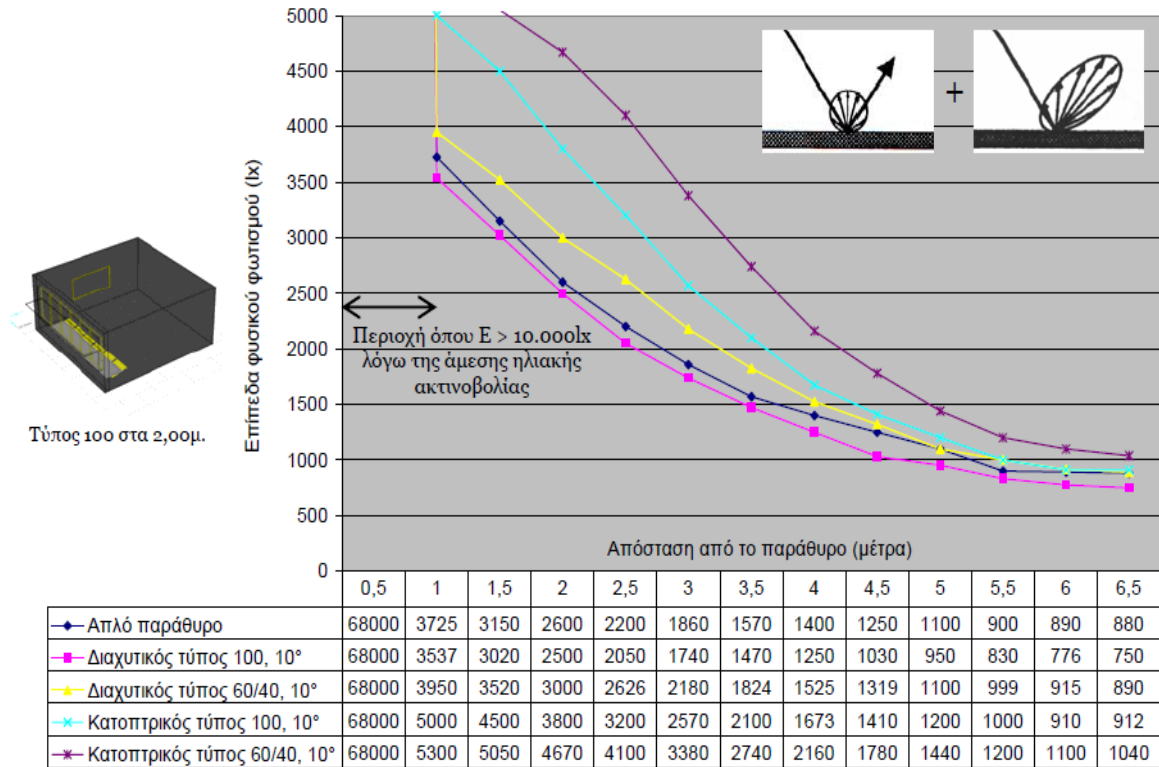
- Σε όλες τις περιπτώσεις, τα ράφια φωτισμού σε κλίση 10° προσέφεραν μεγαλύτερες τιμές φωτισμού στο βάθος της αίθουσας σε σύγκριση με τα οριζόντια. Οι διαφορές κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 7 – 10 %.
- Στις περιπτώσεις με χαμηλό ηλιακό ύψος (21 Δεκεμβρίου), τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού προσέφεραν υψηλότερες τιμές φωτισμού στο βάθος της αίθουσας σε σύγκριση με τα διαχυτικά, τόσο στις 9:00, όσο και στις 12:00. Το αποδοτικότερο ράφι φωτισμού υπήρξε ο κατοπτρικός τύπος «60/40» στα 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10°. Συγκεκριμένα, στις 12:00, ο φωτισμός που προσέφερε στο βάθος της αίθουσας σχεδόν άγγιξε τα 1.500lx, την τιμή, δηλαδή, της περίπτωσης του απλού παραθύρου.
- Στις 21 Μαρτίου, και πάλι τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού προσέφεραν υψηλότερες τιμές φωτισμού στο βάθος της αίθουσας σε σύγκριση με τα διαχυτικά, τόσο στις 9:00, όσο και στις 12:00. Κι εδώ το αποδοτικότερο ράφι φωτισμού υπήρξε ο κατοπτρικός τύπος «60/40» στα 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10°.



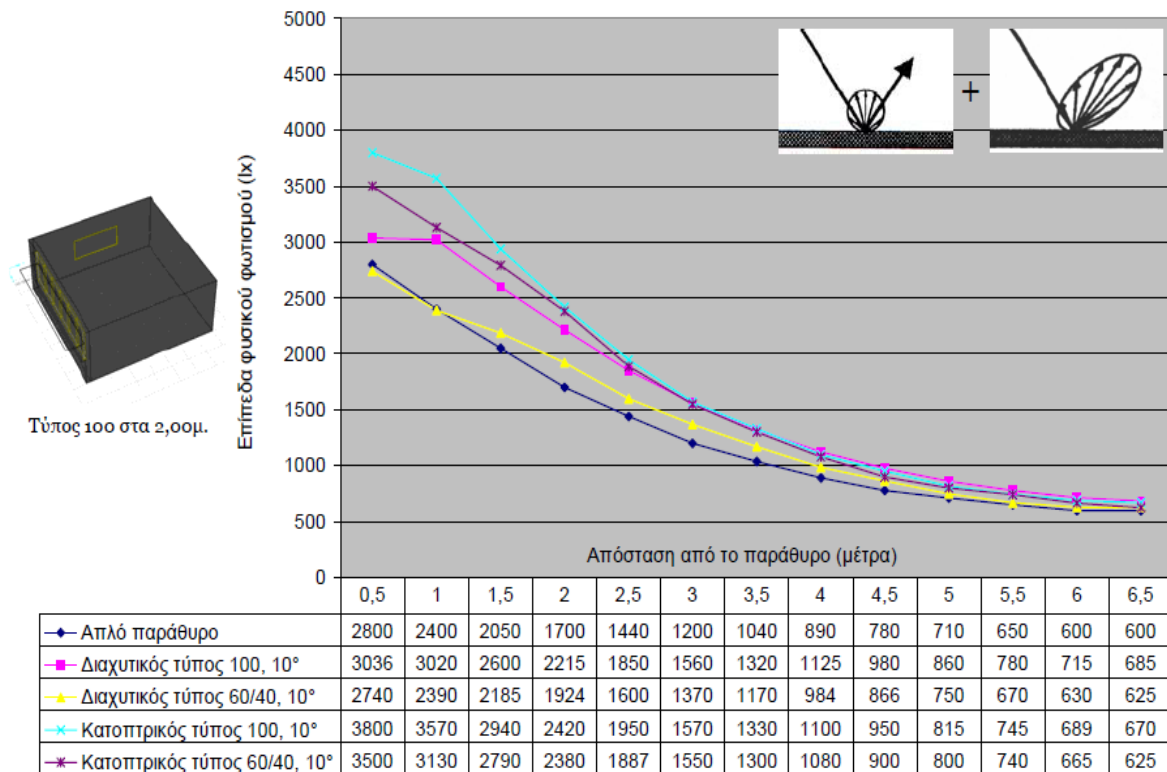
• Στις 21 Ιουνίου, σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, τα διαχυτικά ράφια φωτισμού προσέφεραν μεγαλύτερη ομοιομορφία κατανομής φωτισμού σε όλο το χώρο, καθώς και μεγαλύτερες τιμές στο βάθος, σε σύγκριση με τα κατοπτρικά, τόσο στις 9:00, όσο και στις 12:00. Ο διαχυτικός τύπος «100» στα 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10° ήταν αυτός που απέδωσε καλύτερα στις περιπτώσεις μεγάλου ηλιακού ύψους. Μάλιστα, κατόρθωσε να ξεπεράσει κατά 14% περίπου την τιμή φωτισμού στο βάθος της αίθουσας στην περίπτωση του απλού παραθύρου, τόσο στις 9:00, όσο και στις 12:00. Το γεγονός ότι στην περίπτωση του μεγαλύτερου ηλιακού ύψους τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού απέδωσαν χειρότερα από τα διαχυτικά, προφανώς οφείλεται στο ότι η μεγάλη γωνία πρόσπτωσης (άρα και ανάκλασης) της ηλιακής ακτινοβολίας εμπόδισε το φως να φτάσει αρκετά βαθιά στο χώρο.



Σχήμα 5.26 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για κατοπτρικά και διαχυτικά ράφια φωτισμού σε κλίση 10° 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28°) (Πηγή: [7])



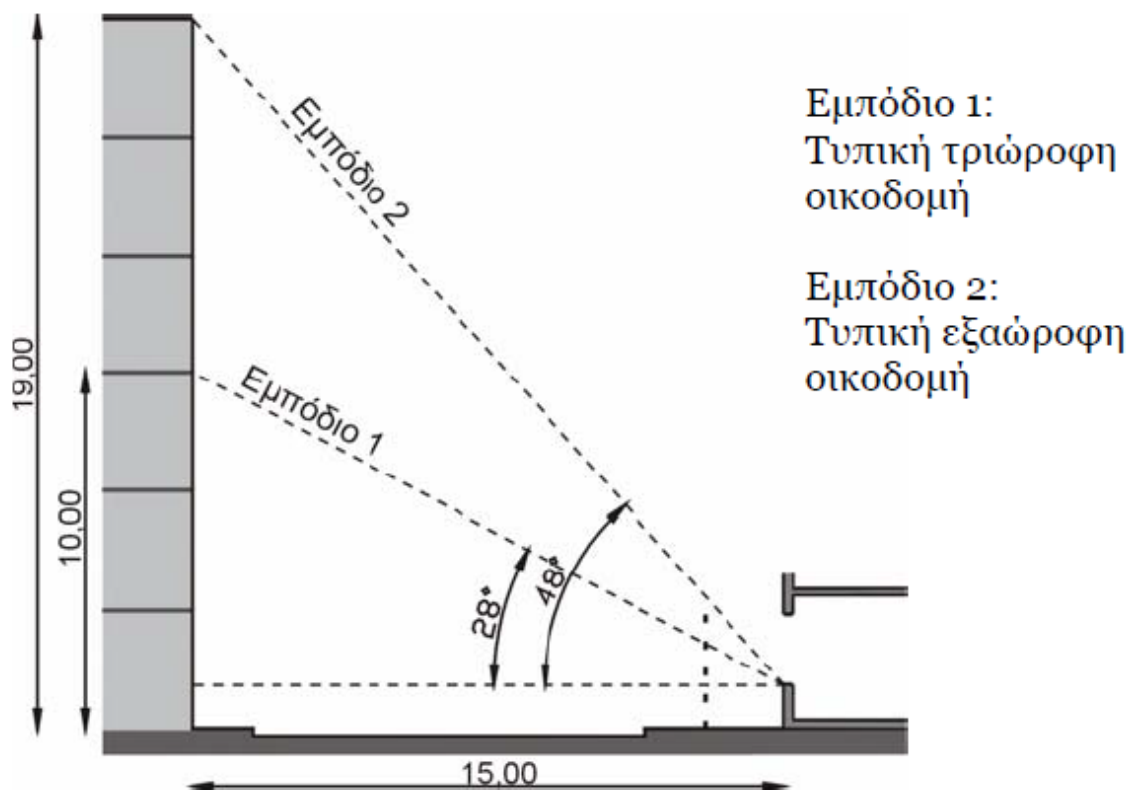
Σχήμα 5.27 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για κατοπτρικά και διαχυτικά ράφια φωτισμού σε κλίση 10° 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51,1°) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.28 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για κατοπτρικά και διαχυτικά ράφια φωτισμού σε κλίση 10° 21 Ιουνίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 74,4°) (Πηγή: [7])

### 5.3.3 Στάδιο 3

Στο τρίτο στάδιο της μελέτης εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις εξωτερικών εμποδίων, όπως φαίνονται στο σχήμα 5.29.



Σχήμα 5.29 Τα δύο εξωτερικά εμπόδια που μελετήθηκαν στο ΣΤΑΔΙΟ 3.  
(Πηγή: [7])

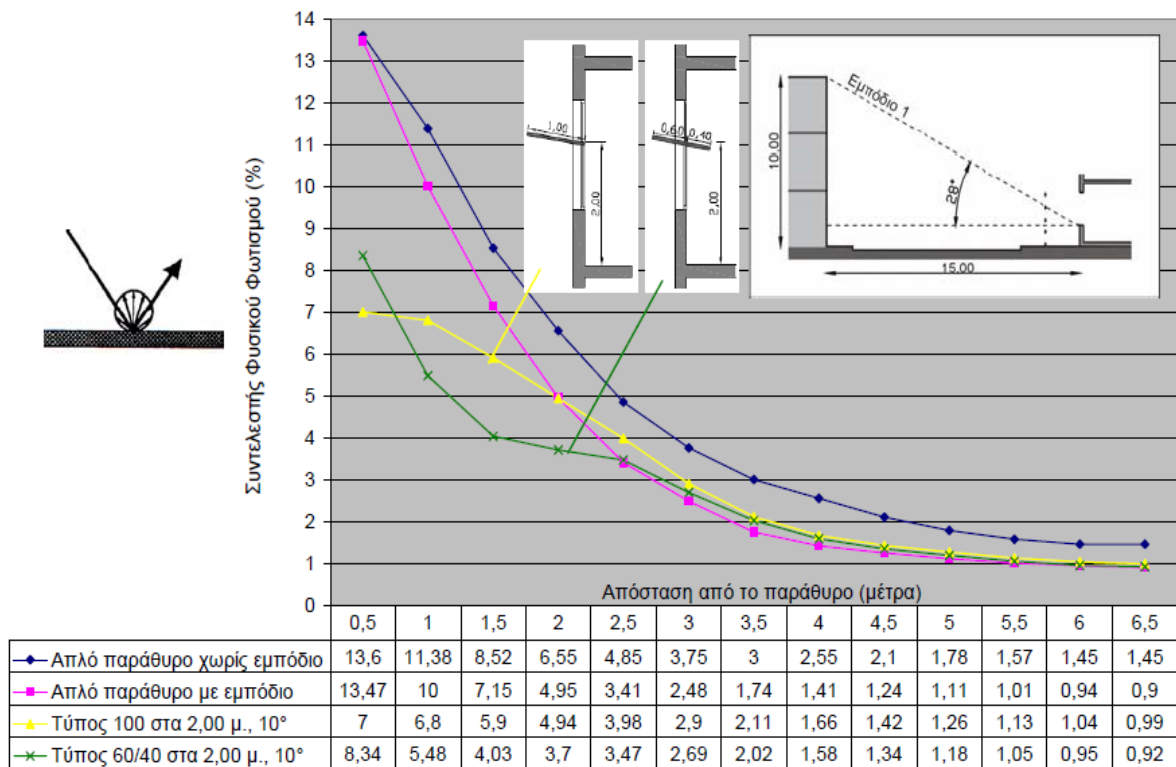
Τα ράφια φωτισμού που επιλέχθηκαν να μελετηθούν ήταν οι τύποι «100» και «60/40» ως κατοπτρικοί, σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση  $10^\circ$ . Οι περιπτώσεις αυτές εξετάστηκαν σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού που αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση όσον αφορά στην ποσότητα του φωτισμού. Εξάλλου, εάν φτάνει ηλιακή ακτινοβολία στο άνοιγμα, το υποθετικό εμπόδιο παύει να λειτουργεί ως τέτοιο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.30, 5.31 που ακολουθούν.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

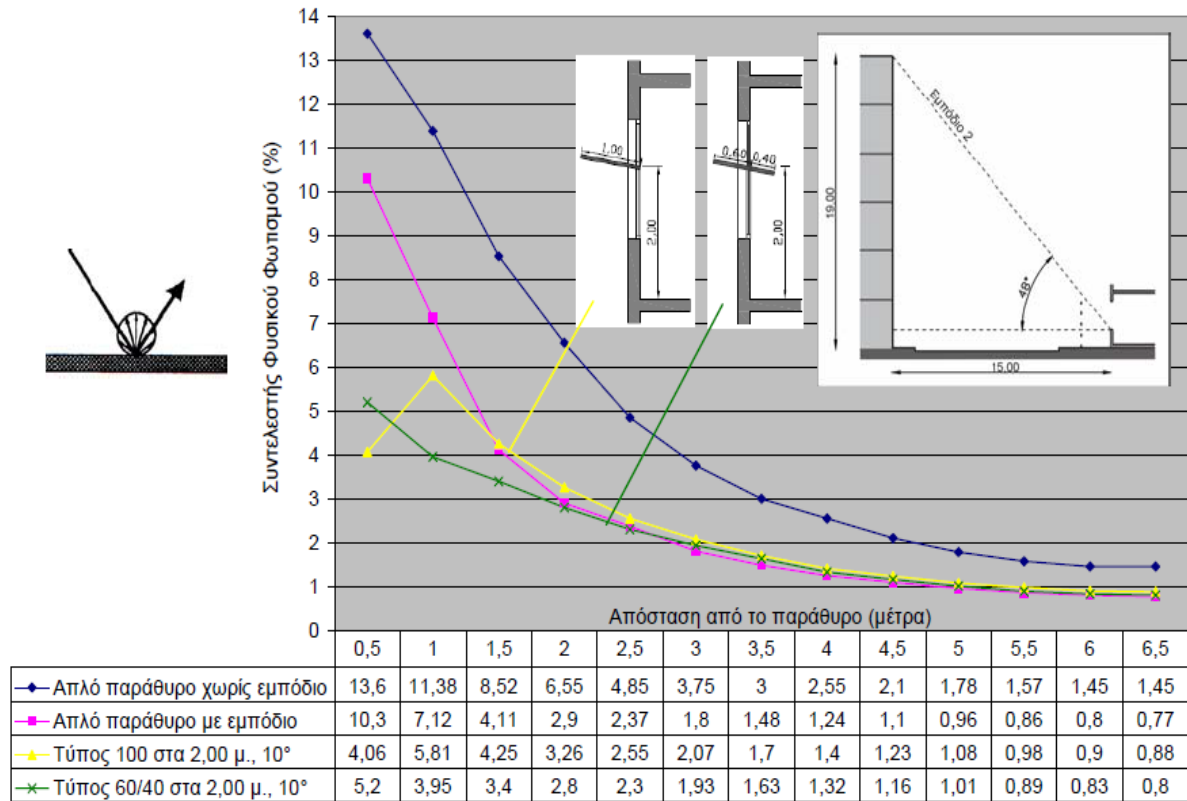
- Στις περιπτώσεις εξωτερικών εμποδίων, τα ράφια φωτισμού που μελετήθηκαν προσέφεραν μεγαλύτερες τιμές φωτισμού στη μέση και στο βάθος της αίθουσας σε σύγκριση με την περίπτωση του απλού παραθύρου.

- Ο τύπος «100» απέδωσε καλύτερα από τον τύπο «60/40», προσφέροντας καλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φωτισμού και μεγαλύτερες τιμές (Ix) στη μέση και στο βάθος της αίθουσας.

- Γενικά, η απόδοση των ραφιών φωτισμού είναι μεγαλύτερη όταν υπάρχουν εξωτερικά εμπόδια. Συγκεκριμένα, σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού το ράφι φωτισμού «100» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και σε κλίση 10° έδωσε τις ίδιες τιμές φωτισμού με την περίπτωση του απλού παραθύρου όταν δεν υπήρχαν εμπόδια, ενώ με το Εμπόδιο 1 φώτισε περισσότερο το βάθος της αίθουσας κατά 10% και το κέντρο κατά 16% (σε σύγκριση με την περίπτωση απλού παραθύρου με εμπόδιο). Αντίστοιχα, με το Εμπόδιο 2 το ράφι φωτισμού φώτισε περισσότερο το βάθος της αίθουσας κατά 14% και το κέντρο κατά 7%, πάντα σε σύγκριση με την περίπτωση του απλού παραθύρου με εμπόδιο.



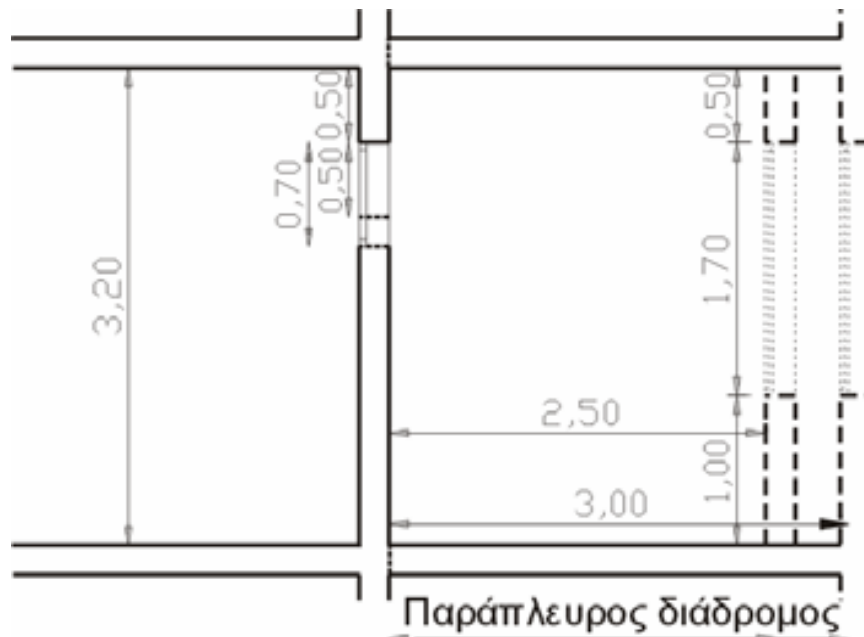
Σχήμα 5.30 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση του Εμποδίου 1 (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.31 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση του Εμποδίου 2 (Πηγή: [7])

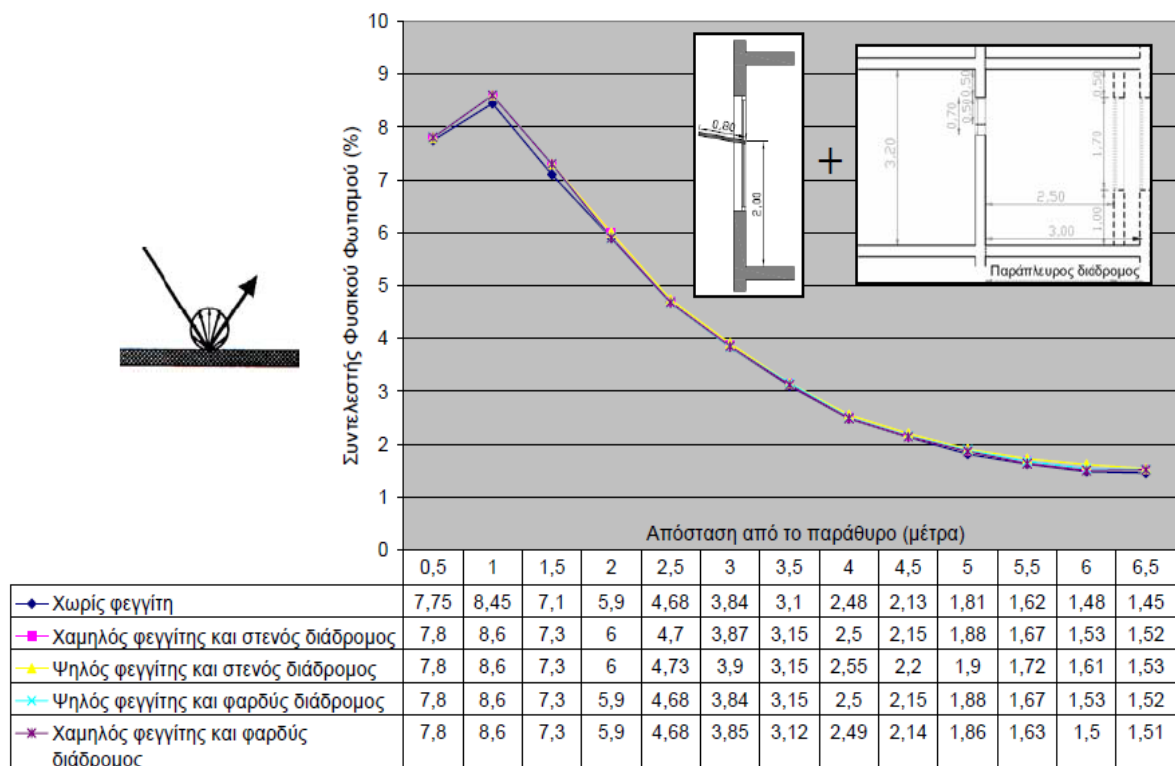
### 5.3.4 Στάδιο 4

Σε αυτό το στάδιο εξετάστηκαν οι περιπτώσεις φεγγιτών σε συνδυασμό με διαδρόμους διαφορετικού πλάτους, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού. Οι 4 περιπτώσεις που προέκυψαν φαίνονται στο σχήμα 5.33.



Σχήμα 5.32 Στο ΣΤΑΔΙΟ 4 μελετήθηκαν δύο φεγγίτες διαφορετικών υψών σε συνδυασμό με δύο παράπλευρους διαδρόμους διαφορετικού πλάτους (Πηγή: [7])

Οι 4 περιπτώσεις εξετάστηκαν σε συνδυασμό με το κατοπτρικό ράφι φωτισμού τύπου «80» σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο και σε κλίση 10°.



Σχήμα 5.33 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση του κατοπτρικού ραφίου φωτισμού «80» στα 2,00μ. από το δάπεδο και σε κλίση 10°, σε συνδυασμό με φεγγίτες διαφορετικών υψών και παράπλευρων διαδρόμων διαφορετικού πλάτους (Πηγή: [7])

Από το σχήμα 5.33 είναι φανερό ότι όλες οι περιπτώσεις φεγγιτών που μελετήθηκαν συνέβαλαν ελάχιστα στην αύξηση των τιμών φωτισμού στο χώρο. Όπως ήταν αναμενόμενο, η καλύτερη περίπτωση ήταν αυτή του μεγαλύτερου φεγγίτη σε συνδυασμό με τον στενότερο διάδρομο, η οποία αύξησε τον Συντελεστή Φυσικού Φωτισμού στο βάθος του χώρου κατά περίπου 6% και στη μέση σχεδόν καθόλου.

### 5.3.5 Στάδιο 5

Στο πέμπτο στάδιο της μελέτης επανεξετάστηκε η περίπτωση του καθαρού ουρανού με ήλιο. Σε αντίθεση, όμως, με το ΣΤΑΔΙΟ 2 όπου δεν λήφθηκε υπόψη ο σκιασμός, στο παρόν στάδιο μελετήθηκε ένα σύστημα εξωτερικών ημιδιαφανών κινητών περσίδων σκίασης. Για την καλύτερη αξιολόγηση της απόδοσής τους, τα σκίαστρα αυτά συγκρίθηκαν με κουρτίνες της ίδιας διαπερατότητας. Η κοινή αυτή διαπερατότητα των δύο συστημάτων (σκίαστρα και κουρτίνες) ορίστηκε ως 30%, όσο περίπου ο μέσος όρος διαπερατότητας των υφασμάτων που χρησιμοποιούνται για κουρτίνες στα σχολεία. Οι εξωτερικές ημιδιαφανείς περσίδες μελετήθηκαν σε συνδυασμό με ένα από τα ράφια φωτισμού που απέδωσαν καλύτερα στο 1ο ΣΤΑΔΙΟ της μελέτης, το κατοπτρικό ράφι φωτισμού τύπου «80» στα 2,00μ. από το δάπεδο και με κλίση 10°. Το όλο σύστημα αξιολογήθηκε σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές: την 21η Δεκεμβρίου στις 09:00 και στις 12:00 καθώς και την 21η Μαρτίου στις 12:00. Με αυτόν τον τρόπο εξετάστηκαν τρία διαφορετικά ηλιακά ύψη: 12°, 28° και 51°. Για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις, στις περσίδες δόθηκε η απαραίτητη κλίση ώστε να σκιάζουν επαρκώς το χώρο.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.34, 5.35, 5.36 που ακολουθούν, καθένα από τα οποία συνοδεύεται από εικόνα ηλιασμού της αίθουσας για την απλή περίπτωση, χωρίς κανένα σύστημα σκιασμού. Επίσης, στο σχήμα 5.35 παρουσιάζεται, συν τοις άλλοις, η περίπτωση χρήσης κουρτίνας σε συνδυασμό με το ράφι φωτισμού, ώστε να φανεί πόσο μειώνεται η απόδοσή του.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Στην περίπτωση που ο ήλιος είναι αρκετά χαμηλά (Σχήμα 5.34), οι περσίδες παίρνουν μεγάλη κλίση ώστε να σκιάζουν επαρκώς (55° στην συγκεκριμένη ημερομηνία και ώρα). Το σύστημα ραφιού φωτισμού και ημιδιαφανών περσίδων σκίασης βελτιώνει την ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού και μάλιστα στο βάθος της αίθουσας οι τιμές φωτισμού είναι

περίπου ίδιες με την περίπτωση της κουρτίνας (κατά 7,5% μεγαλύτερες όταν χρησιμοποιούνται το ράφι φωτισμού και οι περσίδες).

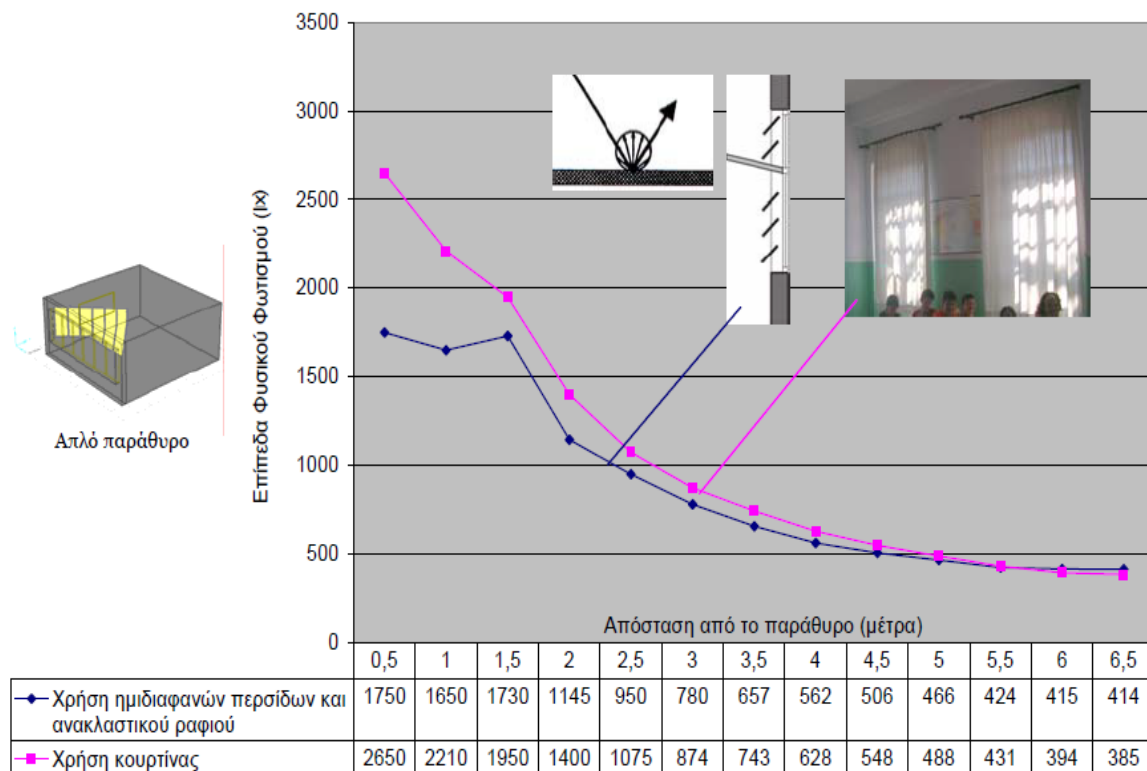
- Από το σχήμα 5.35, όπου ο ήλιος βρίσκεται ψηλότερα, προκύπτει πως εάν η κουρτίνα αντικατασταθεί με το ράφι φωτισμού και τις ημιδιαφανείς περσίδες σκίασης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φωτισμού, καθώς και ψηλότερες τιμές στο βάθος του χώρου κατά περίπου 46%. Αυτό συμβαίνει για τους εξής δύο λόγους:

- Οι περσίδες έχουν τέτοια κλίση ( $45^\circ$  στην συγκεκριμένη περίπτωση) ώστε να σκιάζουν επαρκώς, χωρίς όμως να αποκόπτουν εντελώς το παράθυρο από το διάχυτο εξωτερικό φως. Αντίθετα, η κουρτίνα μαζί με την ηλιακή ακτινοβολία εμποδίζει και τον έμμεσο φωτισμό να εισέλθει στην αίθουσα.

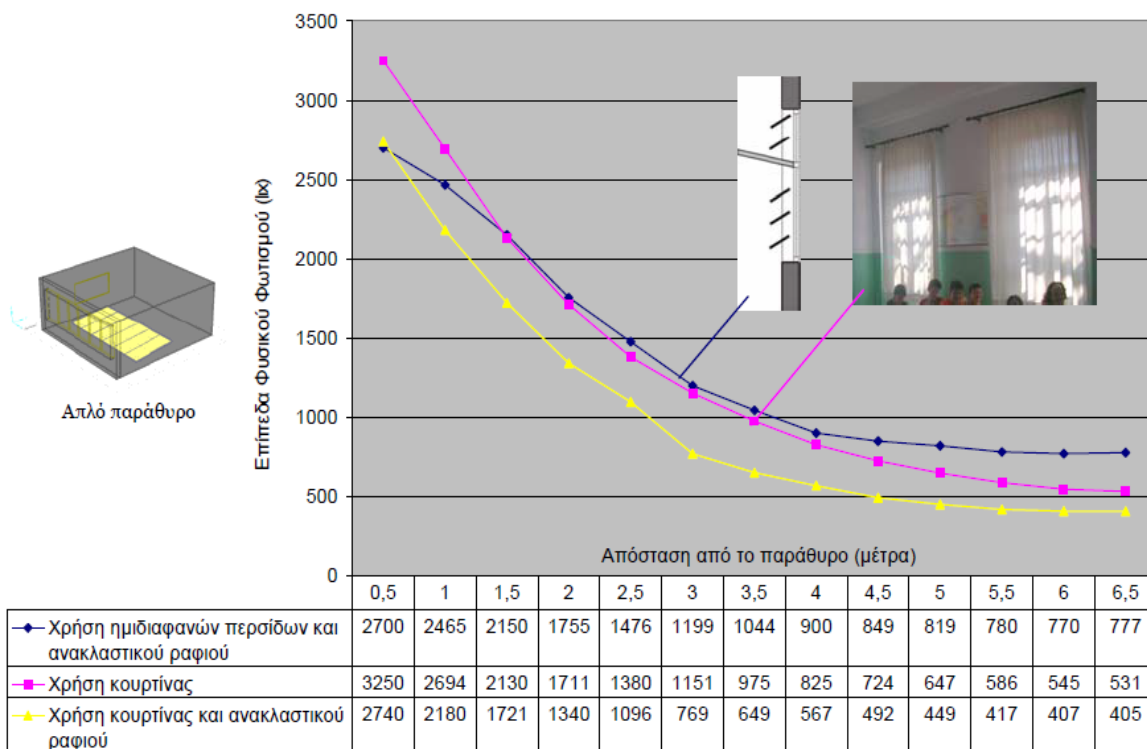
- Στην περίπτωση της κουρτίνας, το ράφι φωτισμού παύει να λειτουργεί ευεργετικά, αφού προσφέρει επιπρόσθετο σκιασμό σε επιφάνεια που ήδη σκιάζεται και αφού δεν κατορθώνει, λόγω της κουρτίνας που μεσολαβεί, να μεταφέρει φως στο βάθος της αίθουσας. Αντίθετα, στην περίπτωση των περσίδων, το ράφι φωτισμού κατορθώνει να μεταφέρει ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο βάθος της αίθουσας.

- Στις 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (Σχήμα 5.36), ο ήλιος είναι ακόμα ψηλότερα και οι περσίδες σκιάζουν επαρκώς όταν βρίσκονται σε οριζόντια θέση. Εδώ η απόδοση του συστήματος ραφιού φωτισμού και ημιδιαφανών περσίδων είναι ακόμα μεγαλύτερη, αφού βελτιώνουν την ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού προσφέροντας 29% χαμηλότερες τιμές κοντά στο παράθυρο, περίπου 73% μεγαλύτερες τιμές στη μέση του χώρου και 41,5% μεγαλύτερες τιμές στο βάθος.

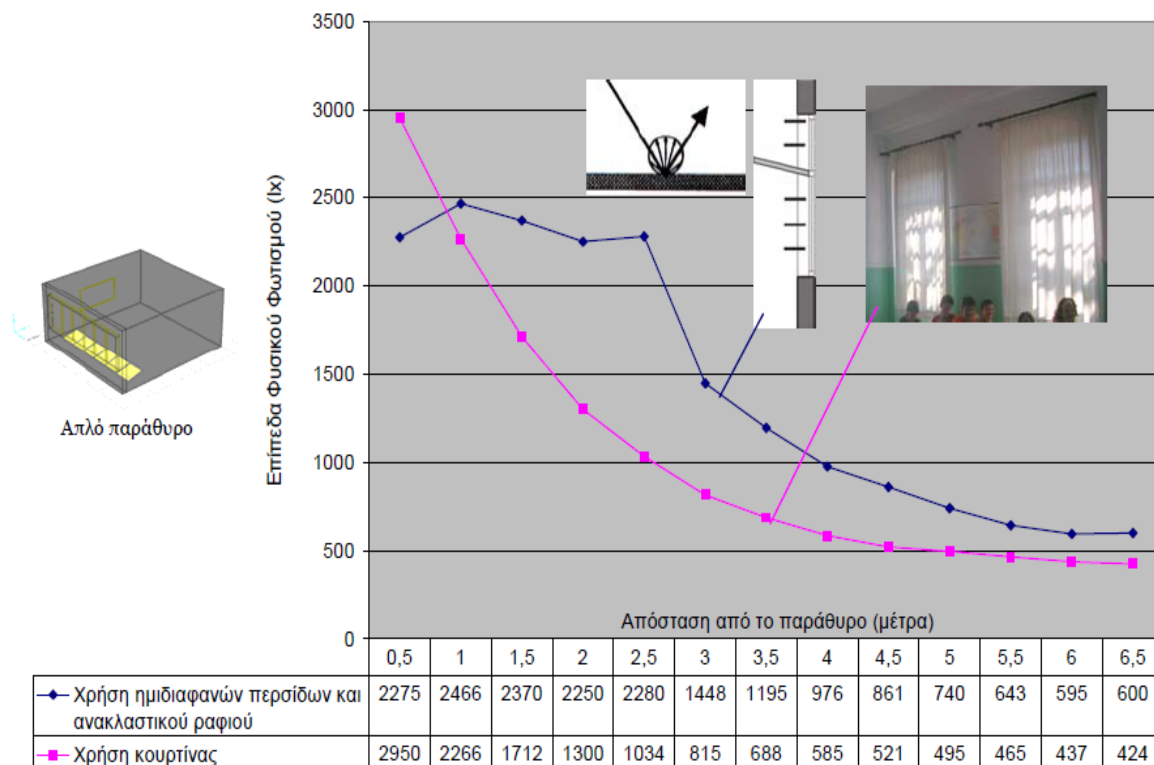




Σχήμα 5.34 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση χρήσης περσίδων σκίασης σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης κουρτίνας 21 Δεκεμβρίου, ώρα 09:00 (ηλιακό ύψος: 12 °) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.35 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση χρήσης περσίδων σκίασης σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης κουρτίνας 21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 28 °) (Πηγή: [7])



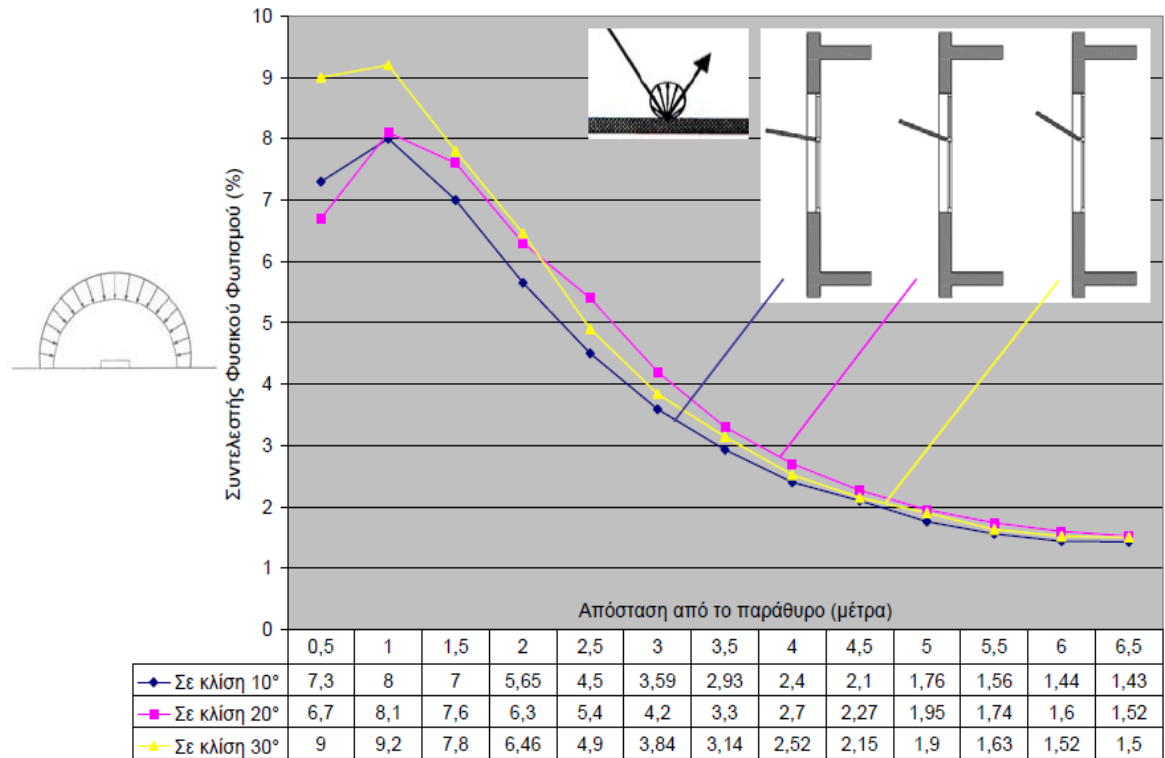
Σχήμα 5.36 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για την περίπτωση χρήσης περσίδων σκίασης σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης κουρτίνας 21 Μαρτίου, ώρα 12:00 (ηλιακό ύψος: 51 °) (Πηγή: [7])

### Συμπεράσματα

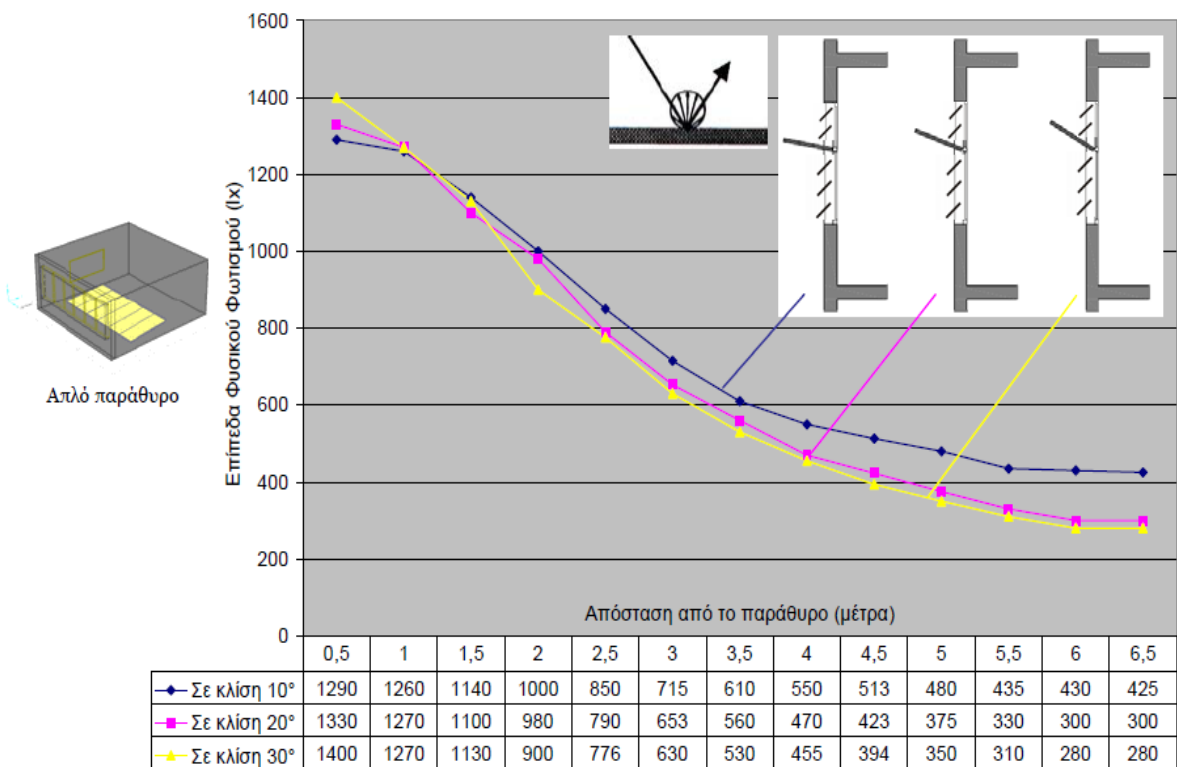
Το γενικό συμπέρασμα από το ΣΤΑΔΙΟ 5 είναι ότι, με δεδομένο τον πλήρη σκιασμό της σχολικής αίθουσας κατά τη διάρκεια λειτουργίας της, το σύστημα ραφιού φωτισμού και εξωτερικών κινητών ημιδιαφανών περσίδων σκίασης είναι αποδοτικότερο από μια απλή κουρτίνα. Όσο περισσότερη ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία κατορθώνει να περάσει ανάμεσα από τις περσίδες, τόσο περισσότερο αυξάνεται η απόδοση του συστήματος. Από τον Απρίλιο και μετά οι περσίδες αρχίζουν να μην είναι απαραίτητες για τον σκιασμό του χώρου, αλλά ακόμα και όταν είναι, αρκεί αυτές να βρίσκονται σε οριζόντια θέση.

#### 5.3.6 Στάδιο 6

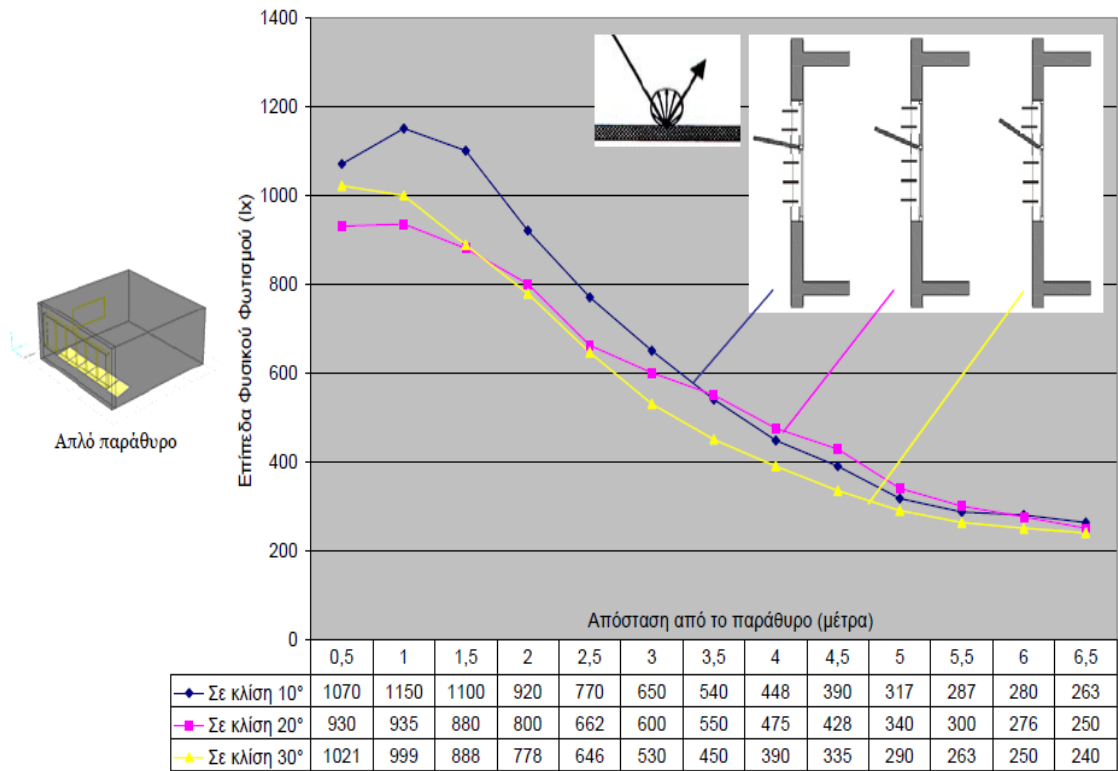
Στο έκτο στάδιο της μελέτης εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές κλίσεις (10°, 20°, 30°) του ραφιού φωτισμού πλάτους 80εκ. (ως κατοπτρικό), σε ύψος 2,00μ. από το δάπεδο, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού και καθαρού ουρανού με ήλιο (στις 21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου και 21 Ιουνίου, στις 12:00).



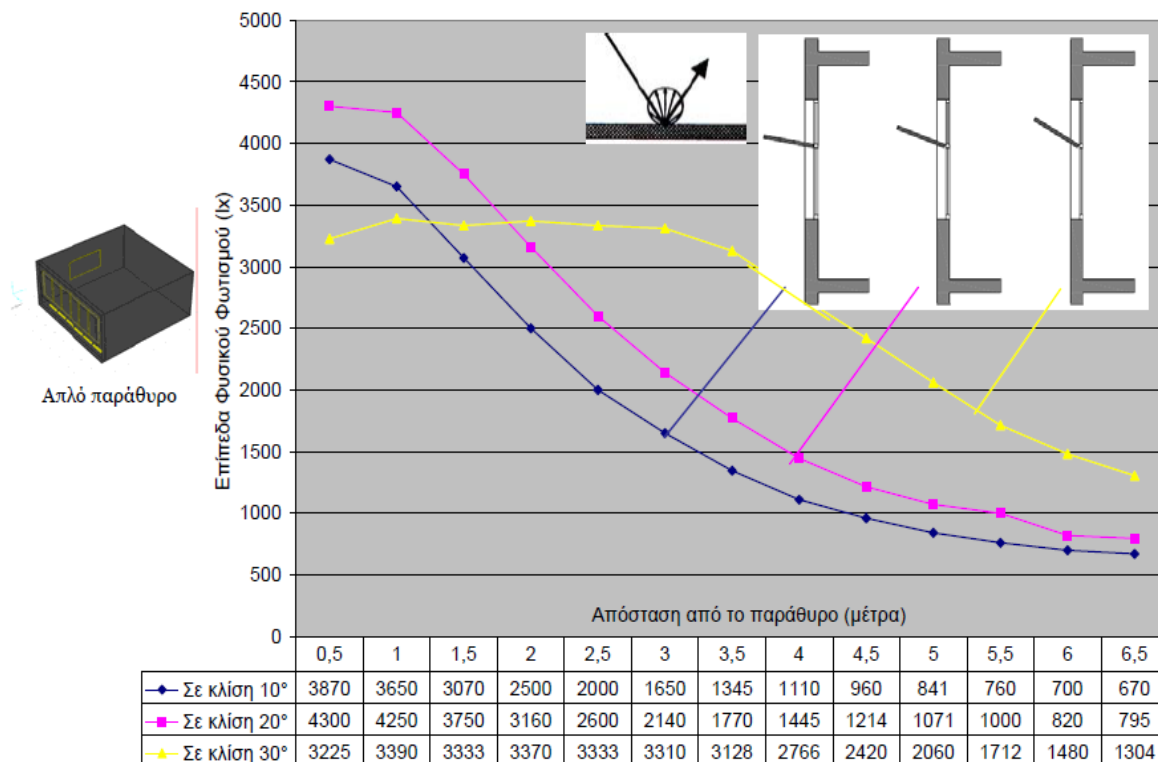
Σχήμα 5.37 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφίου φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.38 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφίου φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.39 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφιού φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Μαρτίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.40 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές κλίσεις του ραφιού φωτισμού τύπος «80», σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Ιουνίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7])

### Συμπεράσματα

Από το σχήμα 5.37 προκύπτει το συμπέρασμα πως σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού η κλίση 20° δίνει λίγο μεγαλύτερες τιμές Σ.Φ.Φ. στο βάθος του χώρου, σε ποσοστό 6,29% περίπου, σε σύγκριση με την κλίση 10°. Αξίζει να αναφερθεί ότι η αύξηση των τιμών Σ.Φ.Φ. στο βάθος του χώρου μεταξύ της οριζόντιας διάταξης και αυτής σε κλίση 10° ήταν 4,58% περίπου. Η κλίση του ραφιού φωτισμού σε 30° προσέφερε λίγο λιγότερο φωτισμό στο βάθος, σε σχέση με την κλίση 20°, αλλά λίγο περισσότερο σε σχέση με την κλίση 10°. Η μεγαλύτερη κλίση, βέβαια, έδωσε και την πιο ανομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού.

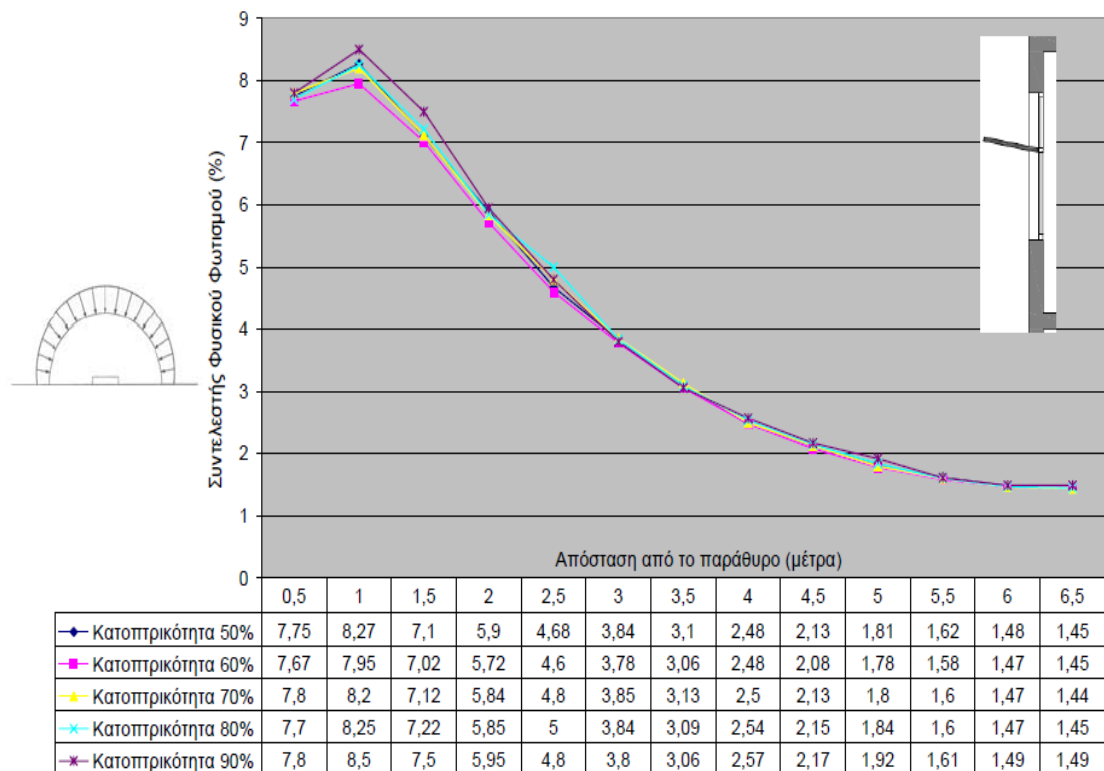
Όσον αφορά στις περιπτώσεις ουρανού με ήλιο, από το σχήμα 5.38 προκύπτει πως το χειμώνα που ο ήλιος είναι σχετικά χαμηλά, η μικρότερη κλίση του ραφιού φωτισμού απέδωσε καλύτερα, τόσο σε ποσότητα φυσικού φωτός στο βάθος του χώρου, όσο και σε ομοιομορφία κατανομής.

Στις 21 Μαρτίου, θα μπορούσε να πει κανείς ότι καλύτερα απέδωσε η κλίση 20°, αν και στα 6,5μ. βάθος η μικρότερη κλίση ήταν αυτή που έδωσε το περισσότερο φως. Στις 21 Ιουνίου που έχουμε το μεγαλύτερο ηλιακό ύψος, είναι ξεκάθαρη η υπεροχή της κλίσης 30°, τόσο σε ποσότητα φυσικού φωτός στο βάθος του χώρου, όσο και σε ομοιομορφία κατανομής. Εδώ, βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι και στις τρεις περιπτώσεις κλίσεων τα επίπεδα

φωτισμού στο βάθος της αίθουσας ξεπερνούν κατά πολύ τα 300lx κι έτσι θα μπορούσε να υποστηριχθεί πως το περισσότερο φως στο βάθος δεν είναι αξιοποιήσιμο ενεργειακά.

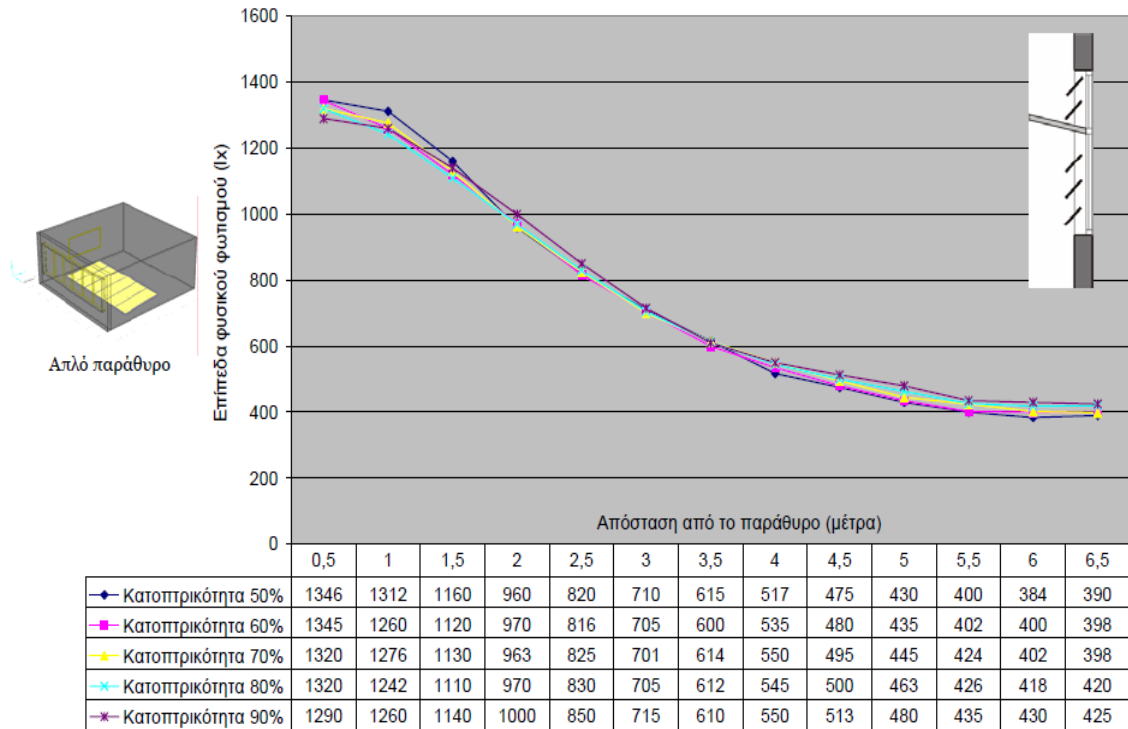
### 5.3.7 Στάδιο 7

Στο τελευταίο στάδιο της μελέτης εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας (50%, 60%, 70%, 80%, 90%) του ραφιού φωτισμού πλάτους 80εκ. και σε κλίση 10°. Κάθε περίπτωση μελετήθηκε σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (21 Δεκεμβρίου), αλλά και ουρανού με ήλιο (21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου). Η περίπτωση του Ιουνίου δεν εξετάστηκε, γιατί, όπως αποδείχθηκε στο ΣΤΑΔΙΟ 2, τα ράφια φωτισμού που αποδίδουν καλύτερα κάτω από μεγάλα ηλιακά ύψη είναι τα διαχυτικά.

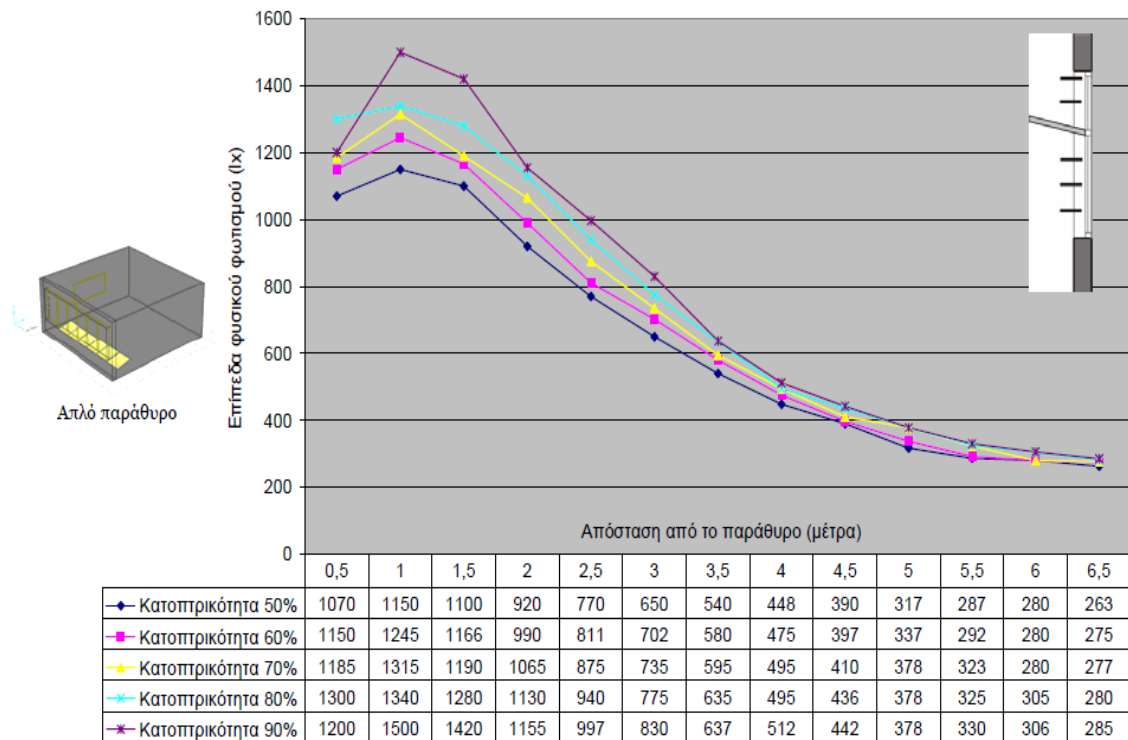


Σχήμα 5.41 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας του ραφιού φωτισμού τύπος «80» σε κλίση 10°, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού (Πηγή: [7])

Από το σχήμα 5.41 προκύπτει ότι σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού, η κατανομή του φωτισμού στο εσωτερικό της αίθουσας είναι σχεδόν ίδια για όλες τις τιμές κατοπτρικότητας των ραφιών φωτισμού.



Σχήμα 5.42 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας του ραφιού φωτισμού τύπος «80» σε κλίση 10°, σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Δεκεμβρίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7])



Σχήμα 5.43 Η κατανομή του φυσικού φωτισμού για διαφορετικές τιμές κατοπτρικότητας του ραφιού φωτισμού τύπος «80» σε κλίση 10°, σε συνθήκες ουρανού με ήλιο (21 Μαρτίου, ώρα 12:00) (Πηγή: [7])

## Συμπεράσματα

Από το σχήμα 5.42 προκύπτει ότι το χειμώνα, όταν δηλαδή το ηλιακό ύψος είναι μικρό, όσο μεγαλώνει η κατοπτρικότητα του ραφιού φωτισμού, τόσο αυξάνει ο φωτισμός στο βάθος του χώρου. Η διαφορά, όμως, μεταξύ των δύο ακραίων περιπτώσεων (τιμές κατοπτρικότητας 50% και 90%) είναι σχετικά μικρή, της τάξης του 8,9%. Στις 21 Μαρτίου (Σχήμα 5.43), όταν το ηλιακό ύψος είναι μεγαλύτερο, η κατανομή του φωτισμού στο χώρο διαφέρει αρκετά, ανάλογα με την τιμή κατοπτρικότητας. Παρόλο που στο βάθος δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές (8,3% διαφορά ανάμεσα στις δύο ακραίες περιπτώσεις), η ομοιομορφία της κατανομής του φωτισμού μειώνεται όσο αυξάνει η κατοπτρικότητα των διατάξεων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα επιμέρους συμπεράσματα όλων των Σταδίων που προηγήθηκαν συμφωνούν με τα συμπεράσματα των διαφόρων ερευνών σχετικά με τα ράφια φωτισμού. Τα κυριότερα κοινά σημεία είναι τα παρακάτω :

Ένα εξωτερικό ράφι φωτισμού προσφέρει μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φωτισμού από ότι ένα εσωτερικό ([28]), ([56]), ([23]).

- Τα ράφια φωτισμού αποδίδουν καλύτερα όταν δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία ([28]), ([61]), ([69]).
- Όσο μεγαλύτερη η απόσταση του ραφιού φωτισμού από την οροφή, τόσο μεγαλύτερη η απόδοσή του ([56]).
- Η ύπαρξη εξωτερικών εμποδίων αυξάνει την απόδοση των ραφιών φωτισμού ([56]).
- Σε μικρά και μεσαία ηλιακά ύψη τα κατοπτρικά ράφια φωτισμού αποδίδουν καλύτερα από τα διαχυτικά, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε μεγάλα ηλιακά ύψη (γύρω στον Ιούνιο) ([68]).
- Τα κεκλιμένα ράφια φωτισμού (η εξωτερική ακμή ψηλότερα από την εσωτερική) αποδίδουν καλύτερα από τα οριζόντια ([46]).



## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ”

Ο κτηριακός τομέας ευθύνεται για το 40% περίπου της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Στην Ελλάδα, η ενέργεια που καταναλώνεται για φωτισμό είναι 2.960 GWh ετησίως. Συνεπώς ο φωτισμός αποτελεί σημαντικό ενεργειακό καταναλωτή. Με την ενεργειακή αναβάθμιση του συστήματος φωτισμού των υφιστάμενων κτηρίων μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης και εξοικονόμηση μεγάλων ποσών ενέργειας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα συνθήκες οπτικής άνεσης.

Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε, ράφια φωτισμού, πρισματικά τζάμια, υαλοστάσια, ηλιοστάτες, φωτοσωλήνες, ανειδωλικά συστήματα, υαλοπίνακες κατέληξαν σε ορισμένα γενικά συμπεράσματα:

- Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης φωτισμού θα πρέπει να βασίζεται στα κλιματικά δεδομένα του τόπου και συγκεκριμένα στους κυρίαρχους τύπους ουρανού.
- Κάθε διάταξη φυσικού φωτισμού, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού μειώνει το φωτισμό σε ένα χώρο, σε σύγκριση με την περίπτωση του απλού παραθύρου.
- Οι κατοπτρικές επιφάνειες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με τρόπο ώστε να ανακατευθύνουν το φως μόνο προς την επιθυμητή κατεύθυνση, ώστε να μην αποτελούν οι ίδιες πηγή θάμβωσης. Εξάλλου ένας χώρος με πιο ομοιόμορφη κατανομή φωτισμού φαίνεται φωτεινότερος.

Στο μέλλον με την βοήθεια της εξέλιξης της τεχνολογίας και των μέσων κατασκευής μπορούμε να επιτύχουμε αποδοτικότερα συστήματα φυσικού φωτισμού. Αποτέλεσμα αυτών θα είναι αφενός μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας αφετέρου καλύτερες συνθήκες οπτικής άνεσης.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Ελληνική βιβλιογραφία

- [1] Αξαρλή, Κ., 1995. Ο Ενεργειακός Σχεδιασμός του Κελύφους και η Αξιοποίηση του «απευθείας» κέρδους στα σχολικά κτίρια – Καθοριστικές παράμετροι Σχεδιασμού για τον Ελληνικό Χώρο. Διδακτορική Διατριβή στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 1995.
- [2] Αξαρλή, Κ., Γιάννας Σ., Ευαγγελινός Ε., Ζαχαρόπουλος Η., Μάρδα Ν., 2001. Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντος Χώρου, Πάτρα : Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- [3] Βάρβογλη, Λίζα, 2003. *Είστε κουκουβάγια ή κορυδαλλός;*, Εφημερίδα *Το Βήμα*, 28-09-2003.[http://tonima.dolnet.gr/print\\_article.php?e=B&f=13976&m=H05&aa=1](http://tonima.dolnet.gr/print_article.php?e=B&f=13976&m=H05&aa=1) [04/11/2008]-
- [4] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 1996. Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική: Το Ευρωπαϊκό Εγχειρίδιο για τα Παθητικά Ηλιακά Κτίρια, μετάφραση και επιμέλεια από τον Ερωτόκριτο Π. Τσίγκα, Θεσσαλονίκη : Μαλλιάρης Α. – Παιδεία Α.Ε.
- [5] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2006. Οδηγία 2006/25/EK περί των ελαχίστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (τεχνητή οπτική ακτινοβολία), 5 Απριλίου 2006.
- [6] Μαραγκού-Πρόκου, Σ., 1980. Εκπαιδευτική Μεταρρύθμιση και Σχολικό Κτίριο. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [7] Μερεση.Αικ. «Εξοικονόμηση ενέργειας σε σχολική αίθουσα μέσω του φυσικού φωτισμού», διδακτορική διατριβή, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2010.

- [8] Παπαδόπουλος, Μ., Αξαρχή, Κ., 1989. Ενεργειακός Σχεδιασμός & Παθητικά Ηλιακά Συστήματα Κτιρίων. Θεσσαλονίκη : Αφοί Κυριακίδη.
- [9] Πολυχρονόπουλος, Θ., 1962. Τα Δημοτικά Σχολεία: Κτιριολογική Έρευνα, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα. όπως αναφέρεται στο [Φαρμακαλίδου, 2005 : 123]
- [10] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τεχνική Οδηγία, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 Αθήνα, Απρίλιος 2012
- [11] Τσακίρη, Ι., 2004. Φωτοτεχνία, Αθήνα, Μάιος 2004, Α' τεύχος.
- [12] Τσικαλουδάκη, Κ., 2006. Αξιοποιώντας το Φυσικό Φως με Υαλοπίνακες Προηγμένης Τεχνολογίας. Πρακτικά Συνεδρίου «Διαφάνεια και Αρχιτεκτονική: Όρια και προκλήσεις», Α.Π.Θ., Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Ιούνιος 2006, σελ. 493-498.
- [13] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 2002. Βιοκλιματικός Σχεδιασμός στην Ελλάδα: Ενεργειακή Απόδοση και Κατευθύνσεις Εφαρμογής. Πικέρμι Αττικής.

## Ξένη Βιβλιογραφία

- [14] Aizlewood, M.E., 1993. Innovative Daylighting Systems: An Experimental Evaluation. *Lighting Research and Technology*, 25(1), pp. 141-152.
- [15] Antoniou, K., Meresi, Aik., 2005. Analysis of Different Forms of Classrooms in Respect to Daylighting Performance. *Proceedings of PLEA 2005 – The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Beirut, Lebanon, 13-16 November 2005, pp.93-97.
- [16] ASHRAE, 1989. ASHRAE/IES Standard 90.1-1989: Energy Efficient Design of New Buildings Except Low Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta.
- [17] ASHRAE, 2001. *International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) Users Manual and CD-ROM*, Atlanta.  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_sources.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm)  
 [07/11/2008]

- [18] Assaf, L., 1997. Glare and Illuminance Uniformity as Components of Innovative Glazing Performance. *Right Light 4. Proceedings of the 4th European Conference on Energy- Efficient Lighting*, Copenhagen, Denmark 19-21 November 1997, Vol.1, pp. 207-210.
- [19] Baker, N., Fanchiotti, A., Steemers, K. (eds), 1993. *Daylighting in Architecture – A European Reference Book*, Commission of the European Communities Directorate - General XII for Science Research and Development, Brussels : James & James Ltd.
- [20] Baker, N., 1999. *The CRES Artificial Sky Design Study - Final Report*, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Πικέρμι Αττικής, Οκτώβριος 1999.
- [21] Baker, N., Steemers, K., 2002. *Daylight Design of Buildings*, London : James & James Ltd.
- [22] Boyce, P., Hunter, C., Howlett, O., 2003. *The Benefits of Daylight through Windows*. Sponsored by “Capturing the Daylight Dividend” program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
- [23] Boubarki, M., 1992. Impact of Position on the Performance of a Combined Light-Shelf. In S. Burley and M.E. Arden eds. Conference Proceedings, *17th National Passive Solar Conference*, Cocoa Beach, Florida, 15-18 June 1992. Όπως αναφέρεται στο [Brown & DeKay, 2001 : 257]
- [24] Brown, G.Z., DeKay, M., 2001. *Sun, Wind and Light: architectural design strategies*. New York : John Wiley and Sons nc.
- [25] Butti, K., Perlin, J., 1980, *A Golden Thread: Five Hundred Years of Solar Architecture and Technology*, London, Boston : Marion Boyers. Όπως αναφέρεται στο [Baker & Steemers, 2002:8,25]
- [26] Canziani, R., Peron, F., Rossi, G., 2004. Daylight and Energy Performances of a New Type of Light Pipe. *Energy and Buildings*, 36((11), pp. 1163-1176.
- [27] Carter, D.J., 2002. The measured and Predicted Performance of Passive Solar Light Pipe Systems. *Lighting Research and Technology*, 34(1), pp. 39-52

- [28] Christoffersen, J., Petersen, E., Johnsen, K., 1997. An Experimental Evaluation of Daylight Systems and Lighting Control. *Proceedings of the 4th European Conference on Energy-Efficient Lighting*, Copenhagen, Denmark 19-21 November 1997, vol. 2, pp. 245-254
- [29] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), 1955. *Natural Daylight*. Official Recommendation, Compte Rendu CIE 13 Session. 2, part 3.2, pp. 2-4. Όπως αναφέρεται στο [Darula et al, 2000 : 2,5]
- [30] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), 1970. *Daylight: International Recommendations for the calculation of natural daylight*. CIE Publication no 16, E-3.2, CIE, Paris.
- [31] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), 1973. *Standardisation of luminance distribution on clear skies*. CIE Publ. No.22, CIE Central Bureau, Paris. Όπως αναφέρεται στο [Darula et al, 2000 : 2,5]
- [32] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), 1996. *Spatial distribution of daylight – CIE standard overcast and clear sky*. S 003. Όπως αναφέρεται στο [Darula et al, 2000 : 2,5]
- [33] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), 2003. *Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky*. S 011/E, Standard, CIE Central Bureau, Vienna. <http://www.cie.co.at/publ/abst/s011.html> [07/11/2008] όπως αναφέρεται στο [Li, 2007 : 746,755]
- [34] Claros, S.T., Soler, A., 2001. Indoor Daylight Climate – comparison between light shelves and overhang performances in Madrid for hours with unit sunshine fraction and realistic values of model reflectance. *Solar Energy*, 71(4\$), pp. 233-239.
- [35] Claros, S.T., Soler, A., 2002. Indoor Daylight Climate – influence of lights shelf and model reflectance on lights shelf performance in Madrid for hours with unit sunshine fraction. *Building and Environment*, 37, pp. 589-598.
- [36] Courret, G., Scartezzini, J.L., Francioli, D., Meyer, J.J., 1998. Design and Assessment of an Anidolic Light-Duct, *Energy and Buildings*, 28, pp. 79-99.

- [37] Darula, S., Kittler, R., Kambezidis, H.D., Bartzokas, A., 2000. *Guidelines for more realistic daylight exterior conditions in energy conscious designs*, Slovak-Greek project, Bratislava – Athens.
- [38] Dubois, M.C., 2003. Shading Devices and Daylight Quality: an Evaluation Based on Simple Performance Indicators. *Lighting Research and Technology*, 35(1), pp. 61-76.
- [39] European Commission 1994. *Daylighting in Buildings*. Directorate-General for Energy (DGXVII). A Thermie Program Action, UCD-OPET, Dublin.
- [40] Figueiro, M. G., Rea, M. S., Stevens, R. G., and Rea, A.C., 2002. Daylight and Productivity—A Possible Link to Circadian Regulation. *Light and Human Health*, 5th International Lighting Research Symposium, The Lighting Research Office of the Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, pp. 185-193. <http://www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/pdf/daylightProductivity.pdf> [07/11/2008]
- [41] Goulding, J.R., Lewis, J.O., Steemers, T.C., 1992. *Energy Conscious Design: A Primer for Architects*. London, Batsford, for the European Commission. Όπως αναφέρεται στο [European Commission, 1994:3,25]
- [42] Heerwagen, J.H., Loveland, J., Diamond, R., 1992. Post-Occupancy Evaluation of Energy Edge Buildings. Center for Planning and Design, College of Architecture and Urban Planning, University of Washington, Seattle. όπως αναφέρεται στο [Boyce et al, 2003 : 46]
- [43] Herzog, T., 2006. Extension to the head office of SOKA-BAU, the pensions and benefits fund of the German building industry, in Wiesbaden: A new multi-use building with offices, restaurant, conference, computer centre (1994-2004). *PLEA 2006 –The 23rd*
- [44] International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006, pp. I.17-I.19.
- [45] Hunt, D.R., 1980. Predicting Artificial Lighting Use – a method based upon observed patterns of behaviour. *Lighting Research and Technology*, 12(1), pp. 7-14.

- [46] IEA (International Energy Agency), 2000. Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components, A report of the IEA Task 21. <http://gaia.lbl.gov/iea21/ieapubc.htm> [07/11/2008]
- [47] Iwata, T., Miyake, T., Sakamoto, S., Yoshimura, K., Kimura, K., 1997. Experimental Study on the Integrated Lighting System with Daylight and Artificial Light Based on the Subjective Response and Energy Saving. IAEEL RightLight 4 Proceedings, Copenhagen, Denmark, 1997, pp. 255-259.
- [48] Subjective Response and Energy Saving. *IAEEL Right Light 4 Proceedings*, Copenhagen, Denmark, 1997, pp. 255-259.
- [49] Jenkins, D., Muneer, T., 2003. Modelling light-pipe performances – a natural daylighting solution. *Building and Environment*, 38, pp. 965-972.
- [50] Johnson, T.E., 1991. *Low-E Glazing Design Guide*. Boston: Butterworth Architecture.
- [51] Kittler, R., Darula, S., Perez, R., 1998. *A set of standard skies*, Bratislava: Polygrafia.
- [52] Kovach-Hebling, A., Goller, M., Herkel, S., Wienold, J., 1997. Assessing the Energy Saving Potential of Daylighting Technologies for Non-residential Buildings in Germany. *Proceedings of RightLight 4 Conference*, Copenhagen, Denmark, 1997, pp. 115-118.
- [53] Lechner, N., 2001. *Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects*, Canada : John Wiley and Sons.
- [54] Leaman, A., Bordass, B., 2000. Productivity in buildings: The "killer" variables. Chapter 12 of *Creating the Productive Workplace*, ed: D. Clements-Croome, E. & F. N. Spon: London, pp. 167-191. Όπως αναφέρεται στο [Boyce et al, 2003 : 37]
- [55] Li, D.H.W., 2007. Daylight and energy implications for CIE standard skies. *Energy Conversion and Management*, 48, pp.745–755.

- [56] Littlefair, P.J., Lynes J.A., 1999. Responding to change. *Light & Lighting*, April 1999, pp. 27-28.
- [57] Mardaljevic, J., 2000. *Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients*. PhD Thesis, Leicester: De Montfort University. Όπως αναφέρεται στο [Mardaljevic, 2004 : 238]
- [58] Muneer, T., Abodahab, N., Weir, G., Kubie, J., 2000. *Windows in Buildings: Thermal, Acoustic, Visual and Solar Performance*. Oxford: Architectural Press.
- [59] Nabil, A., Mardaljevic, J., 2005. Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm for Assessing Daylight in Buildings, *Lighting Research and Technology*, 37(1), pp. 41-59.
- [60] Onaygil, S., Güller, Ö., 2003. Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul. *Building and Environment*, 38, pp. 973-977.
- [61] Ochoa, C.E., Capeluto, I.G., 2006. Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in high luminous climates. *Building and Environment*, 41, pp. 1128-1135.
- [62] Page, J., Scartezzini, J.L., Kaempf, J., Morel, N., 2007. On-site Performance of Electrochromic Glazings Coupled to an Anidolic Daylighting System. *Solar Energy*, 81, pp. 1166-1179.
- [63] Parpairi, K., Baker, N., Steemers, K., 2000. Daylighting Quality through User Preferences: Investigating Libraries. *Proceedings of PLEA 2000*, Cambridge, UK, July 2000, pp. 611- 616.
- [64] Reynolds, J.S., Stein, B., 2000. *Mechanical and Electrical Equipment for Buildings*, 9th ed, New York : Wiley. Όπως αναφέρεται στο [Brown & DeKay, 2001 : 279,355]
- [65] Robbins, C.L., 1986. *Daylighting Design and Analysis*, New York : Van Nostrand Reinhold. Όπως αναφέρεται στο [Baker et al, 1993:2.15]
- [66] Rosemann, A., Kaase, H., 2005. Lightpipe Applications for Daylighting Systems. *Solar Energy*, 78, pp. 772-780.



- [67] Schiller, M. (ed.), 1987. *Simulating Daylight with Architectural Models*, Daylighting Network of North America, University of Southern California, Los Angeles. Όπως αναφέρεται στο [Thanachareonkit, 2005 : 169,182]
- [68] Shao, L., Riffat, S.B., 2000. Daylighting Using Light Pipes and its Integration with Solar Heating and Natural Ventilation, *Lighting Research and Technology*, 32(3), pp. 133-139.
- [69] Soler, A., Oteiza, P., 1997. Light Shelf Performance in Madrid, Spain. *Building and Environment*, 32(2), pp. 87-93.
- [70] Tsangrassoulis, A., Doulos, L., Santamouris, M., Fontoynt, M., Maamari, F., Wilson, M., Jacobs, A., Solomon, J., Zimmerman, A., Pohl, W., Mihalakakou, G., 2005. On the Energy Efficiency of a Prototype Hybrid Daylighting System. *Solar Energy*, 79, pp. 56-64.
- [71] Wittkopf S.K., 2007. Daylight Performance of Anidolic Ceiling Under Different Sky Conditions. *Solar Energy*, 81, pp. 151-161.
- [72] World Health Organization, 1946. Constitution of the World Health Organization, Geneva. <http://www.who.int/suggestions/faq/en/index.html> [04/11/2008]
- [73] Zhang, X., Muneer, T., 2000. Mathematical model for the performance of light pipes. *Lighting Research & Technology*, 32(3), pp. 141-146.

**Αθήνα**  
**Δεκέμβριος - 2012**