

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

**Τσικαλουδάκη Κατερίνα, Αραβαντινός Δημήτρης**  
Εργαστήριο Οικοδομικής και Δομικής Φυσικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 540 06 Θεσσαλονίκη  
e-mail: katgt@civil.auth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γνώση του φωτισμού σε μία συγκεκριμένη περιοχή έχει ιδιαίτερη σημασία στην τοπική αρχιτεκτονική, στις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια, στην περιβαλλοντική πολιτική και γενικά σε όλους τους τομείς, για τους οποίους ο υπολογισμός του φυσικού φωτισμού είναι απαραίτητος. Επειδή σε πολλές περιοχές παρατηρείται απουσία καταγεγραμμένων μεγθών του φυσικού φωτισμού, θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψής τους μέσω άλλων διαθέσιμων μετεωρολογικών στοιχείων. Τη δυνατότητα αυτή παρέχει η φωτεινή απόδοση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του φωτισμού ( $lux$ ) προς την ακτινοβολία ( $W/m^2$ ), για κάθε συνιστώσα της (διάχυτη, άμεση, ολική).

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου υπολογισμού της φωτεινής απόδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας για τα ελληνικά κλιματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, διερευνάται η προσέγγιση της φωτεινής ικανότητας της ακτινοβολίας σε συνάρτηση απλών παραμέτρων, όπως είναι η θέση του ήλιου και η καθαρότητα του ουρανού. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν μαθηματικές σχέσεις, μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση του άμεσου, διάχυτου και ολικού φυσικού φωτισμού στο εξωτερικό περιβάλλον. Η αξιοπιστία του μοντέλου ελέγχεται με στατιστική ανάλυση μεταξύ των υπολογισμένων και των καταγεγραμμένων τιμών.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τον προσδιορισμό της στάθμης του φυσικού φωτισμού σε έναν εσωτερικό χώρο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των επιπέδων του φωτός στο εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, τόσο στην Ελλάδα, όσο και σε άλλες χώρες της Ευρώπης παρατηρείται απουσία καταγεγραμμένων μεγθών φυσικού φωτός. Αντίθετα, υπάρχει πληθώρα άλλων μετεωρολογικών στοιχείων, όπως είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία αέρα υγρού και ξηρού θερμομέτρου κ.α., τα οποία καταγράφονται στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς παγκοσμίως. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη μαθηματικών σχέσεων, μέσω των οποίων γίνεται εφικτός ο υπολογισμός του ολικού και διάχυτου φωτισμού με τη βοήθεια άλλων μετρημένων ή εύκολα υπολογίσιμων μετεωρολογικών παραμέτρων. Τη δυνατότητα αυτή παρέχει ο όρος της φωτεινής απόδοσης της ακτινοβολίας, ο οποίος ουσιαστικά εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας με μήκος κύματος εντός του ορατού φάσματος.

Συγκεκριμένα, ως φωτεινή απόδοση της ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται ο λόγος του φωτισμού (lux) προς την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) [1]:

$$K = K_{in} \times \left[ \int_{400}^{700} V_{\lambda} \times E_{ελ} d\lambda \right] / \int_0^{\infty} E_{ελ} d\lambda,$$

όπου:

- $\lambda$  το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας [σε nm]
- $V_{\lambda}$  η φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού,
- $E_{ελ}$  η ένταση της ακτινοβολίας με μήκος κύματος  $\lambda$  [σε  $W/(m^2 \text{ nm})$ ] και
- $K_{in}$  η σταθερά της φωτεινής απόδοσης της ακτινοβολίας [σε lm/W] για συνθήκες φωτοπικής όρασης, ίση με 683 lm/W.

Επομένως, η φωτεινή ικανότητα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί θεωρητικά να φτάσει την τιμή των 683 lm/W. Ωστόσο, η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική, αλλά αποτελείται από διάφορα μήκη κύματος, και επομένως η πραγματική φωτεινή ικανότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ χαμηλότερη. Συγκεκριμένα, αν όλη η προσπίπτουσα στη γη ηλιακή ακτινοβολία ήταν ορατό φως, η φωτεινή της απόδοση δεν θα υπερέβαινε τα 204 lm/W [2].

## 2. ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Όπως είναι φυσικό, η διακύμανση του μεγέθους της φωτεινής ικανότητας της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από τον τρόπο, με τον οποίο αυτή κατανέμεται στο ορατό και στο μη ορατό φάσμα (υπεριώδες και υπέρυθρο). Επομένως οι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν το μήκος κύματος και την ποσότητα της προσπίπτουσας στη γη ηλιακής ακτινοβολίας, προσδιορίζουν και το μέγεθος της φωτεινής ικανότητάς της. Συγκεκριμένα, το υπέρυθρο τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζεται από την ποσότητα των εμπειερχόμενων στην ατμόσφαιρα υδρατμών, ενώ στο υπεριώδες και στο ορατό τμήμα του φάσματος επιδρούν περισσότερο τα μόρια του αέρα και τα λεπτά, αιωρούμενα σωματίδια. Ακόμη, η φωτεινή ικανότητα των τριών συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση, διάχυτη και ολική) ποικίλλει ανάλογα με την κατάσταση της νέφωσης, την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς και αιωρούμενα σωματίδια και την απόσταση, την οποία διανύει το φως μέσα στην ατμόσφαιρα ώπου να φτάσει στη γη [3].

Κατά τη διέλευσή της στην ατμόσφαιρα η ηλιακή ακτινοβολία υφίσταται απώλειες και μεταβολές, οι οποίες οφείλονται στους μηχανισμούς της σκέδασης και της απορρόφησης. Κατά τη διαδικασία της σκέδασης, τα μόρια των ατμοσφαιρικών μορίων και αιωρημάτων, τα οποία παρεμβάλλονται στην πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας, απορροφούν ενέργεια απ' αυτή, την οποία στη συνέχεια επανεκπέμπουν προς όλες τις κατευθύνσεις δημιουργώντας τη διάχυτη ακτινοβολία. Όσο μεγαλύτερη απόσταση διανύσει το φως στην ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα σκέδασής του και συνεπώς τόσο περισσότερη ενέργεια θα αποσβεστεί.

Ο τρόπος σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από το μέσο που την προκαλεί και περιγράφεται από τις θεωρίες των Rayleigh και Mie, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με το είδος και το μέγεθος του μέσου διάχυσης. Η σκέδαση Rayleigh συμβαίνει όταν το σωματίδιο, στο οποίο προσκρούει η ηλιακή ακτινοβολία, έχει μέγεθος μικρότερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όπως είναι τα μόρια των ατμοσφαιρικών αερίων και συνήθως τα μόρια του οξυγόνου ή του αζώτου. Σύμφωνα με το νόμο του Rayleigh η ακτινοβολία με μήκος κύματος εντός του ορατού και του υπεριώδους φάσματος διαχέεται

περισσότερο απ' ότι η μεγάλου κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία. Επομένως, η διάχυτη ακτινοβολία περιέχει περισσότερο φυσικό φως και εμφανίζει υψηλότερη φωτεινή απόδοση συγκριτικά με την άμεση [3].

Εκτός από τα μόρια του αέρα, τα αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα σωματίδια (π.χ. σκόνη, αιθάλη) προκαλούν τη σκέδαση της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Τα σωματίδια αυτά έχουν μέγεθος ίδιο ή μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του ορατού φωτός. Η περίπτωση αυτή είναι πιο περίπλοκη σε σχέση με την προηγούμενη, όμως και εδώ η μικρού κύματος ακτινοβολία σκεδάζεται περισσότερο από την υπέρυθρη. Επομένως, η σκέδαση της ακτινοβολίας από τα αιωρούμενα σωματίδια μειώνει τη φωτεινή απόδοση της άμεσης ακτινοβολίας. Η σκέδαση της ακτινοβολίας αυτού του τύπου είναι γνωστή με το όνομα του ερευνητή Mie και εξαρτάται λιγότερο από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας απ' ό,τι συμβαίνει όταν αυτή προκαλείται από τα μόρια του αέρα [3].

Τέλος, κατά τη διεργασία της απορρόφησης μόρια μιας ένωσης ή μικρά σωματίδια απορροφούν ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία και μεταβάλλουν τη μορφή της, μετατρέποντάς την σε θερμική ή φωτοχημική. Στην ατμόσφαιρα σημαντικότεροι απορροφητές είναι οι υδρατμοί. Αντίθετα με τη διαδικασία της σκέδασης, η απορρόφηση λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος της εισερχόμενης στην ατμόσφαιρα ηλιακής ακτινοβολίας και εξαρτάται από τα επίπεδα ενέργειας των ηλεκτρονίων μέσα στο μόριο του απορροφητή [3]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενέργεια που απορροφάται περισσότερο είναι μικρού κύματος και η ποσότητά της αυξάνεται αναλογικά με τη συγκέντρωση των υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Επομένως, η φωτεινή απόδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται αναλογικά με την ποσότητα των περιεχομένων στην ατμόσφαιρα υδρατμών.

### 3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι μηχανισμοί διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς αυτή διανύει την ατμόσφαιρα, έχουν ισχυρή επίδραση τόσο στον ποσοτικό προσδιορισμό των τριών συνιστωσών της, όσο και στον καθορισμό της φωτεινής ικανότητας κάθε μιας από αυτές. Επομένως, για να υπολογιστεί η φωτεινή απόδοση της άμεσης, διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητη η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των φυσικών φαινομένων κατά τη μετάδοσή της στην ατμόσφαιρα.

Πειραματικά ο προσδιορισμός της φωτεινής απόδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με την καταγραφή των συνιστωσών του φυσικού φωτισμού και της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, συνήθως το οριζόντιο, και τον υπολογισμό των λόγων τους. Επειδή όμως σπάνια είναι διαθέσιμα τέτοια δεδομένα σε κάθε περιοχή, αρκετοί ερευνητές ασχολήθηκαν με το θεωρητικό υπολογισμό της φωτεινής απόδοσης της ακτινοβολίας, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους επιρροής του μεγέθους.

Στις σημαντικότερες διατυπωμένες θεωρίες για τον υπολογισμό της άμεσης, διάχυτης και ολικής φωτεινής ικανότητας της ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές η γωνία ύψους ηλίου (Navnab [1], Aydinli και Krochmann [1]), ο δείκτης αιθριότητας του ουρανού  $K_t$  (Muneer [1]), το ποσοστό νεφοκάλυψης (Littlefair [1]), ο συντελεστής λαμπρότητας του ουρανού  $\Delta$  και η ποσότητα του κατακρημνίσμου νερού της ατμόσφαιρας (Perez [1]).

Τέλος, αντί των σχετικά περίπλοκων μοντέλων χρησιμοποιούνται ευρέως σταθερές τιμές για τη φωτεινή απόδοση των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες συνήθως αποτελούν το μέσο όρο των παρατηρηθεισών τιμών. Στη βιβλιογραφία η μέση τιμή της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας αναφέρεται μεταξύ 93 lm/W-115 lm/W [3], η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ 105 lm/W-128 lm/W [3], ενώ η αντίστοιχη μέση τιμή για την ολική ακτινοβολία είναι ίση με 110 lm/W [1].

### 3.1. Ο προσδιορισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στον ελλαδικό χώρο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα μεγέθη του φυσικού φωτός καταγράφονται σε λίγους μετεωρολογικούς σταθμούς παγκοσμίως. Στην Ελλάδα, μόνο το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών διαθέτει επαρκή δεδομένα φυσικού φωτισμού. Οι εγκαταστάσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών βρίσκονται στο λόφο των Νυμφών, σε γεωγραφικό πλάτος  $37^{\circ} 58' B$ , γεωγραφικό μήκος  $23^{\circ} 43' A$  και υψόμετρο 107 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το κλίμα της Αθήνας είναι μεσογειακό, με θερμό καλοκαίρι και ήπιο χειμώνα. Το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών είναι εξοπλισμένο με έναν πλήρη μετεωρολογικό σταθμό πρώτης κλάσεως και ακολουθεί τις υποδείξεις της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού (CIE).

Για την ανάπτυξη της μεθόδου υπολογισμού του φωτισμού διατέθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών κλιματικά δεδομένα 2 ετών (1996-1997). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι ωριαίες τιμές έντασης της ολικής ( $I_g$ ) και διάχυτης ( $I_d$ ) ακτινοβολίας, του ολικού ( $E_g$ ) και διάχυτου ( $E_d$ ) φυσικού φωτισμού, της σχετικής υγρασίας, της θερμοκρασίας του αέρα και της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Ο έλεγχος της καταλληλότητας των δεδομένων έγινε σε δύο φάσεις. Αρχικά ελέγχθηκαν στατιστικά και αφαιρέθηκαν από το σύνολο των δεδομένων όλες οι τιμές, οι οποίες βρίσκονταν εκτός του διαστήματος της τυπικής απόκλισης. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν τα κριτήρια ποιότητας ελέγχου των τιμών της έντασης ακτινοβολίας και του φυσικού φωτισμού, τα οποία έχουν υιοθετηθεί από τη CIE [4]:

$$0 < I_g < 1,2 \times I_o,$$

$$0 < I_d < 0,8 \times I_o,$$

$$I_d < 1,1 \times I_g,$$

$$I_g \geq 10 \text{ W/m}^2$$

$$0 < E_g < 1,2 \times E_o,$$

$$0 < E_d < 0,8 \times E_o$$

$$E_d < 1,1 \times E_g$$

$$E_g \geq 500 \text{ lux}$$

όπου:

- $I_o$  η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στα ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας, ίση με  $1367 \text{ W/m}^2$
- $E_o$  ο φωτισμός στα ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας, ίσος με  $133,8 \text{ klux}$

Μετά από τους παραπάνω ελέγχους ποιότητας, από το σύνολο των 14934 τιμών προέκυψαν 14898 ομάδες ασφαλών τιμών για τη στατιστική ανάλυση και αξιολόγησή τους. Από αυτές, οι 9511 αναφέρονταν σε συνθήκες καθαρού ουρανού, οι 2027 σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού, ενώ οι υπόλοιπες 3360 αναφέρονται σε ενδιάμεσες συνθήκες. Είναι φανερό ότι ο καθαρός ουρανός παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης με ποσοστό 63%, ενώ μόνο το 14% των περιπτώσεων εμπίπτει σε συνθήκες νεφελώδους ουρανού.

Για να διευρευνηθεί η σχέση της φωτεινής απόδοσης της ακτινοβολίας με διάφορες παραμέτρους, οι παραπάνω τιμές εισήχθησαν στο πρόγραμμα στατιστικής επεξεργασίας S.P.S.S., το οποίο είναι ένα από τα πιο εξελιγμένα υπολογιστικά προγράμματα στατιστικής και καλύπτει σχεδόν το σύνολο των γνωστότερων στατιστικών τεχνικών. Επειδή η απλότητα και η ευχρηστία του μοντέλου είναι ιδιαίτερα σημαντική, επιλέχθηκαν ως μεταβλητές η γωνία ύψους ηλίου  $\gamma_s$  και ο δείκτης αιθριότητας του ουρανού  $K_i$ , ο οποίος εκφράζει την κατάσταση της νέφωσης και ισούται με το λόγο των εντάσεων της ολικής προς την προσπίπτουσα στα ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας ακτινοβολία. Οι παράμετροι αυτές είναι εύκολα υπολογίσιμες και περιγράφουν με αρκετή ακρίβεια το προς εξέταση μέγεθος. Η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της άμεσης, διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία ύψους ηλίου και το δείκτη αιθριότητας του ουρανού παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες ουρανού. Στο τέλος παρατίθεται ο πίνακας 1, ο οποίος περιγράφει συνοπτικά τη στατιστική αξιολόγηση των μοντέλων. Συγκεκριμένα περιέχει τις προκύπτουσες τιμές του *συντελεστή συσχέτισης R*, ο οποίος ορίζει πόσο ισχυρή είναι η σχέση μεταξύ των μεταβλητών, της μέσης ροπής σφάλματος (Mean Bias Error –MBE),

η οποία παρέχει μια ένδειξη για την τάση του μοντέλου να υπερεκτιμά ή να υποτιμά το εξεταζόμενο μέγεθος, και της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error –RMSE), η οποία προβλέπει το βαθμό διασποράς των αποτελεσμάτων και ουσιαστικά δηλώνει την αξιοπιστία και την επαναληπτική δεινότητα του μοντέλου [1].

### 3.1.1 Συνθήκες καθαρού ουρανού

Σε συνθήκες έντονης ηλιοφάνειας χωρίς νέφωση η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι ποσοτικά αρκετά σημαντικότερη σε σχέση με τη διάχυτη ακτινοβολία. Από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα προκύπτει ότι η φωτεινή απόδοση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται από 75,93 lm/W ως 109,59 lm/W, με μέση τιμή ίση με 103,55 lm/W. Οι αντίστοιχες τιμές για τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλότερες, με διακύμανση μεταξύ των ορίων 116,49 lm/W-151,37 lm/W και μέσο όρο ίσο με 126,00 lm/W. Τέλος, η φωτεινή απόδοση της ολικής ακτινοβολίας εμφανίζει πολύ μικρότερο εύρος διακύμανσης με ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή ίση με 103,74 lm/W, 114,49 lm/W και 111,26 lm/W αντίστοιχα.

Στο σχήμα 1 απεικονίζεται σε διάγραμμα διασποράς η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία ύψους του ήλιου. Όπως είναι φανερό, η διασπορά των παρατηρηθεισών τιμών είναι πολύ μικρή, αποδεικνύοντας έτσι την ισχυρή συσχέτιση της άμεσης φωτεινής απόδοσης με το ύψος του ήλιου, η οποία μάλιστα, όπως φαίνεται από το διάγραμμα, πλησιάζει αρκετά την πολυωνυμική κατανομή. Ο ρυθμός αύξησης της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ακτινοβολίας είναι μεγάλος για γωνίες ύψους ήλιου μέχρι περίπου 30°, στη συνέχεια ελαττώνεται για το διάστημα των 30°-50°, ενώ στις υψηλότερες θέσεις του ήλιου σταθεροποιείται. Η διακύμανση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί με τη θεωρία του Rayleigh για τη σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας, σύμφωνα με την οποία η πρόσκρουση της ακτινοβολίας στα μόρια του αέρα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της άμεσης ακτινοβολίας με μήκος κύματος εντός του ορατού φάσματος. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο για τις χαμηλές θέσεις του ήλιου στον ουράνιο θόλο, επειδή όσο η γωνία ύψους αυξάνεται, η σχετική αέρια οπτική μάζα μειώνεται και η πιθανότητα σκέδασης της ακτινοβολίας μειώνεται [3].

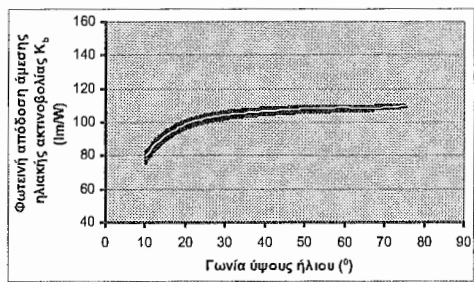
Από την παλινδρομική ανάλυση των τιμών της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ακτινοβολίας και των αντίστοιχων τιμών της γωνίας ύψους ήλιου προκύπτει η μαθηματική σχέση (1), η οποία παρουσιάζει αρκετά υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R=0,974$ ). Όπως φαίνεται στον πίνακα 1, η παρακάτω εξίσωση παρέχει κατά μέσο όρο ελάχιστα χαμηλότερες τιμές άμεσου φωτισμού σε σχέση με τις πραγματικές, ενώ η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι αρκετά περιορισμένη (8%).

$$K_b = 0,0003 \times \gamma_s^3 - 0,0526 \times \gamma_s^2 + 2,7316 \times \gamma_s + 61,196 \quad (1)$$

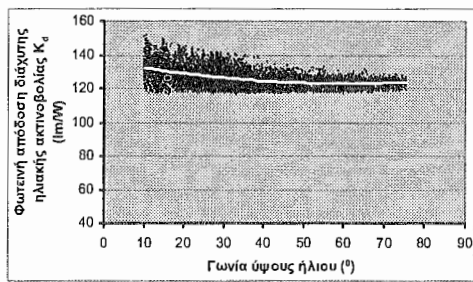
Η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της διάχυτης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη θέση του ήλιου εκφράζεται παραστατικά στο σχήμα 2. Είναι εμφανές ότι η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας μειώνεται ελαφρά με την αύξηση του ηλιακού ύψους, όπως άλλωστε προβλέπει και η θεωρία του Rayleigh για τη σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τη βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει η πολυωνυμική μαθηματική σχέση:

$$K_d = 0,0037 \times \gamma_s^2 - 0,4476 \times \gamma_s + 136,54 \quad (2)$$

Ωστόσο, ο συντελεστής συσχέτισης για την παραπάνω εξίσωση είναι ίσος με 0,522, γεγονός που δηλώνει ότι μόνο το 27,3% ( $=0,522^2$ ) των περιπτώσεων μπορούν να ερμηνευτούν επαρκώς από το μοντέλο. Για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου εισήχθηκε μία ακόμη μεταβλητή, ο δείκτης αιθριότητας  $K_t$ , ο οποίος ουσιαστικά παρέχει πληροφορίες για τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η εξίσωση που προκύπτει έχει υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης ( $R=0,702$ ) και έχει την παρακάτω μορφή:



**Σχήμα 1:** Η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία ύψους του ήλιου υπό συνθήκες καθαρού ουρανού.



**Σχήμα 2:** Η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της διάχυτης ακτινοβολίας σε σχέση με τη γωνία ύψους του ήλιου υπό συνθήκες καθαρού ουρανού.

$$K_d = 0,212 \times \gamma_s + 33,883 \times K_i + 74,967 \quad (3)$$

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ο διάχυτος φωτισμός μπορεί να υπολογιστεί με αρκετά καλή ακρίβεια (πίνακας 1) όταν η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας θεωρηθεί σταθερή και ίση με την παρατηρηθείσα μέση τιμή  $K_d = 126 \text{ lm/W}$ .

Η φωτεινή απόδοση της ολικής ακτινοβολίας προκύπτει από τις δύο συνιστώσες της:

$$K_g = (K_d \times I_d + K_b \times I_b) / I_g \quad (4)$$

Αν και η παραπάνω εξίσωση εμπεριέχει τα σφάλματα από τον υπολογισμό των εξαρτημένων μεταβλητών  $K_d$  και  $K_b$ , η τιμή της στατιστικής παραμέτρου RMSE είναι αρκετά χαμηλή (5%, αν κατά τον υπολογισμό της χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 3, και 9%, όταν η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας θεωρηθεί σταθερή και ίση με  $126 \text{ lm/W}$ ), και επομένως μπορεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια για την εκτίμηση του ολικού φωτισμού στο εξωτερικό περιβάλλον.

### 3.1.2 Συνθήκες νεφελώδους ουρανού

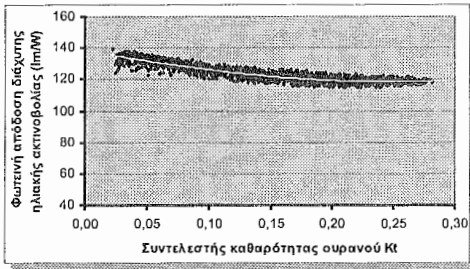
Ο νεφελώδης ουρανός αντιπροσωπεύει τις συνθήκες εκείνες κατά τις οποίες η νέφωση είναι εκτενής και η άμεση ακτινοβολία είναι ελάχιστη ή ανύπαρκτη. Ως εκ τούτου, η ολική ακτινοβολία ισούται ουσιαστικά με τη διάχυτη. Η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας υπό νεφοσκεπή ουρανό κυμαίνεται μεταξύ  $114,56 \text{ lm/W}$  και  $139,57 \text{ lm/W}$  και εμφανίζει μέση τιμή ίση με  $123,96 \text{ lm/W}$ .

Από τη στατιστική επεξεργασία προέκυψε ότι το ηλιακό ύψος δεν επηρεάζει σημαντικά τον καθορισμό της φωτεινής απόδοσης της διάχυτης ακτινοβολίας. Αντίθετα, παρουσιάζεται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της φωτεινής απόδοσης της ακτινοβολίας και του δείκτη αιθριότητας  $K_i$ , η οποία απεικονίζεται διαγραμματικά στο σχήμα 3. Σύμφωνα με το διάγραμμα, η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας είναι υψηλή όταν ο δείκτης αιθριότητας του ουρανού εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή του, δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της νέφωσης. Οι συνθήκες ισχυρής νεφοκάλυψης συνοδεύονται συνήθως από υψηλά ποσοστά περιεχόμενων στην ατμόσφαιρα υδρατμών, τα οποία, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, έχουν ως αποτέλεσμα την απορρόφηση περισσότερης ορατής ακτινοβολίας και συνεπώς την αύξηση της φωτεινής ικανότητάς της.

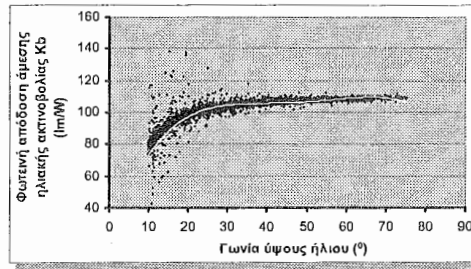
Από τη γραμμική παλινδρόμηση της παρατηρηθείσας φωτεινής απόδοσης και των αντίστοιχων τιμών του δείκτη αιθριότητας προκύπτει η εξίσωση:

$$K_d = 138,418 - 138,41 \times K_i + 130,972 \times K_i^2 + 414,073 \times K_i^3 \quad (5)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης της παραπάνω εξίσωσης είναι αρκετά υψηλός (0,917). Η τιμή της μέσης ροπής σφάλματος δείχνει ότι η εφαρμογή του μοντέλου έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό ελαφρά υψηλότερων τιμών διάχυτου φωτισμού σε σχέση με τις παρατηρηθείσες. Παράλληλα, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα προκύπτει πολύ χαμηλό, μόλις 2% (πίνακας 1).



Σχήμα 3: Η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της διάχυτης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τον δείκτη αιθριότητας του ουρανού  $K_t$  υπό νεφροσκεπή ουρανό.



Σχήμα 4: Η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη γωνία ύψους του ήλιου για ενδιάμεσες συνθήκες ουρανού.

### 3.1.3 Ενδιάμεσες συνθήκες ουρανού

Οι συνθήκες αυτές αντιπροσωπεύουν τις περιπτώσεις εκείνες, κατά τις οποίες ο ουρανός καλύπτεται τμηματικά από σχετικά μικρού πάχους σύννεφα, και δεν μπορούν να ενταχθούν στις δύο παραπάνω κατηγορίες. Επομένως, είναι λογικό να υπάρχει μεγαλύτερη διασπορά στη διακύμανση της φωτεινής απόδοσης των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η φωτεινή απόδοση της άμεσης ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ 42 lm/W και 138 lm/W με μέση τιμή ίση με 101,876 lm/W. Για τη διάχυτη ακτινοβολία το αντίστοιχο μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ 111,14 lm/W και 123,51 lm/W με μέσο όρο 116,41 lm/W, ενώ η φωτεινή ικανότητα της ολικής ακτινοβολίας εμφανίζει ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή ίση με 105,26 lm/W, 121,16 lm/W και 113,336 lm/W αντίστοιχα.

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η διακύμανση της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ακτινοβολίας ως προς τη γωνία ύψους του ήλιου. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται κάποια διασπορά στις τιμές γύρω από τη γραμμή μέσης τάσης, η οποία μάλιστα είναι μεγαλύτερη για χαμηλές τιμές του ηλιακού ύψους και ελαχιστοποιείται όσο ο ήλιος πλησιάζει την υψηλότερη θέση του. Ωστόσο, υπάρχει σαφής θετική σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών του διαγράμματος, η οποία και επαληθεύεται από τον υψηλό συντελεστή συσχέτισής τους (0,866). Η μαθηματική σχέση που εκφράζει τη συμμεταβολή των δύο μεγεθών έχει ως εξής:

$$K_b = 58,4244 + 2,928 \times \gamma_s - 0,0528 \times \gamma_s^3 + 0,0004 \times \gamma_s^3 \quad (6)$$

Όπως και στην περίπτωση των συνθηκών καθαρού ουρανού, η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας μεταβάλλεται αναλογικά με τη γωνία ύψους ήλιου και του δείκτη αιθριότητας  $K_t$ . Από την παλινδρόμηση των τιμών προκύπτει η μαθηματική σχέση:

$$K_d = 113,115 + 0,0774 \times \gamma_s + 1,559 \times K_t \quad (7)$$

Ωστόσο, ο συντελεστής συσχέτισης των δύο μεταβλητών και της φωτεινής απόδοσης της διάχυτης ακτινοβολίας είναι ίσος με  $R=0,778$ , δηλώνοντας έτσι ότι περίπου το 40% των τιμών δεν εξηγούνται επαρκώς από το μοντέλο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει και κάποια άλλη παράμετρος, η οποία επηρεάζει τη φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας και η οποία δεν έχει ληφθεί υπόψη. Ενδεχομένως η παράμετρος αυτή να σχετίζεται με την ποσότητα των περιεχόμενων στην ατμόσφαιρα υδρατμών.

Συγκρίνοντας όμως τα στατιστικά μεγέθη ελέγχου της αξιοπιστίας των μοντέλων του πίνακα 1 προκύπτει ότι ο υπολογισμός του διάχυτου φυσικού φωτισμού είναι ασφαλέστερος όταν εφαρμόζεται η εξίσωση (7), παρά όταν η φωτεινή απόδοση της διάχυτης ακτινοβολίας θεωρείται σταθερή και ίση με τη μέση τιμή της.

Η φωτεινή ικανότητα της ολικής ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί με ασφάλεια σε συνάρτηση των δύο συνιστωσών της:

$$K_g = (K_d \times I_d + K_b \times I_b) / I_g \quad (8)$$

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		ΕΞΙΣΩΣΗ	R	ΜΒΕ	RSME
Φωτεινή απόδοση	Φωτισμός				
<i>ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΟΥΡΑΝΟΥ</i>					
$K_d$ (lm/W) = 103,55 lm/W	$E_b$ (lux) = 58160,8 lx	(1)	0,949	-4,00%	8,00%
$K_d$ (lm/W) = 126,00 lm/W	$E_d$ (lux) = 19721,5 lx	(2)	0,273	4,70%	3,00%
$K_d$ (lm/W) = 126,00 lm/W	$E_d$ (lux) = 19721,5 lx	(3)	0,702	-16,00%	9,00%
$K_d$ (lm/W) = 126,00 lm/W	$E_d$ (lux) = 19721,5 lx	σταθ. τιμή, $K_d=126$	-	1,00%	4,00%
$K_g$ (lm/W) = 111,26 lm/W	$E_g$ (lux) = 38439,3 lx	(4), με $K_d$ από εξ. 2	-	8,00%	9,00%
$K_g$ (lm/W) = 111,26 lm/W	$E_g$ (lux) = 38439,3 lx	(4), με $K_d=126$	-	2,00%	5,00%
<i>ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΝΕΦΕΛΩΔΟΥΣ ΟΥΡΑΝΟΥ</i>					
$K_d$ (lm/W) = 123,96 lm/W	$E_d$ (lux) = 12956,9 lx	(5)	0,917	1,00%	2,00%
<i>ΕΝΔΙΑΜΕΞΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΟΥΡΑΝΟΥ</i>					
$K_b$ (lm/W) = 101,87 lm/W	$E_b$ (lux) = 9201,54 lx	(6)	0,866	2,13%	4,92%
$K_d$ (lm/W) = 116,42 lm/W	$E_d$ (lux) = 27779,9 lx	(7)	0,778	0,02%	0,76%
$K_d$ (lm/W) = 116,42 lm/W	$E_d$ (lux) = 27779,9 lx	σταθ. $K_d=116,42$	-	-4,98%	5,96%
$K_g$ (lm/W) = 113,34 lm/W	$E_g$ (lux) = 36981,4 lx	(8), με $K_d$ από εξ. 7	-	0,55%	1,55%
$K_g$ (lm/W) = 113,34 lm/W	$E_g$ (lux) = 36981,4 lx	(8), με $K_d=116,42$	-	12,92%	3,80%

*Πίνακας 1: Τα μεγέθη στατιστικού ελέγχου των μοντέλων υπολογισμού της φωτεινής ικανότητας της άμεσης ( $K_d$ ), διάχυτης ( $K_d$ ) και ολικής ( $K_g$ ) ακτινοβολίας, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες ουρανού.*

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την στατιστική ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής των Αθηνών προέκυψαν μαθηματικές εξισώσεις, μέσω των οποίων είναι εφικτός ο υπολογισμός της φωτεινής απόδοσης της ακτινοβολίας για κάθε τύπο ουρανού σε συνάρτηση διαθέσιμων και εύκολα υπολογίσιμων παραμέτρων. Η γωνία ύψους ηλίου είναι καθοριστική για τον υπολογισμό της φωτεινής απόδοσης της άμεσης ακτινοβολίας, ειδικά σε συνθήκες καθαρού ουρανού, ενώ το αντίστοιχο μέγεθος της διάχυτης ακτινοβολίας επηρεάζεται περισσότερο από την καθαρότητα της ατμόσφαιρας.

Η χρησιμότητα των παραπάνω μοντέλων έγκειται στον απλό και γρήγορο υπολογισμό κάθε συνιστώσας του φυσικού φωτισμού, πολλαπλασιάζοντας τη φωτεινή απόδοση με την ένταση της ακτινοβολίας. Το σφάλμα στη διαδικασία πρόβλεψης είναι χαμηλό, όπως φαίνεται στον πίνακα 1, ιδιαίτερα για συνθήκες καθαρού και νεφελώδους ουρανού. Άλλωστε, οι ακραίες αυτές συνθήκες ενδιαφέρουν περισσότερο στον καθορισμό της διακύμανσης του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων: για τον έλεγχο της επάρκειας του φυσικού φωτός σε έναν εσωτερικό χώρο ως επικρατούσες εξωτερικές συνθήκες λαμβάνονται οι δυσμενέστερες (νεφοσκεπής ουρανός), ενώ αντίθετα, η αξιολόγηση της ποιότητας του φυσικού φωτισμού και ο έλεγχος πιθανότητας δημιουργίας θάμβωσης γίνεται υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, οι οποίες εμφανίζουν την υψηλότερη ένταση.

#### BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Muneer T., Tregenza P., Kambezidis H., 'Solar radiation and Daylight Models for the energy efficient design of buildings', 1997.
2. Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems, 'Thermal use of Solar Energy in Buildings', pp. 476, Freiburg, Germany, 1994.
3. Littlefair Paul J., 'The luminous efficacy of daylight: a review', Lighting Research and Technology, Vol. 17, Issue 4, pp. 162-182, 1985.
4. CIE Technical report, 'Guide to recommended practice of daylight measurement', 1994.



**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**