

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Α. Τσαγκρασούλης^{1,*}, Λ. Δούλος^{1,2}, Α. Κονταδάκης¹, Φ. Τοπαλής²

^{1*} Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Παν. Θεσσαλίας, Πεδίο Αρεως 38443, Βόλος,
e-mail: atsagras@uth.gr

² Εργαστήριο Φωτοτεχνίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχ. Υπολογιστών, ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση του φυσικού φωτισμού αποτελεί κυρίαρχη στρατηγική μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κτίρια γραφείων. Ο μετασχηματισμός της στρατηγικής αξιοποίησης φυσικού φωτισμού σε εξοικονόμηση ενέργειας προϋποθέτει την υιοθέτηση κάποιου συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών με τη βοήθεια αισθητήρων φωτισμού. Η ευρεία υιοθέτηση αυτών των συστημάτων, παρόλο το εξαιρετικά μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης, επηρεάζεται δυσμενώς από μια σειρά αιτιών, όπως η σύνθετη διαδικασία σχεδιασμού, λόγω της μοναδικότητας του κάθε χώρου και των παραμέτρων σχεδιασμού (προσανατολισμός, χαρακτηριστικά εξωτερικών ανοιγμάτων, σκίαση κλπ κλπ), η αναξιοπιστία των υπολογιστικών μεθόδων αλλά και η μη αποδοχή των συστημάτων ρύθμισης από τους χρήστες του χώρου όταν αυτά δεν έχουν τεθεί σε λειτουργία κατάλληλα. Συνεπώς η διαθεσιμότητα του φυσικού φωτισμού και τα πιθανά εργαλεία εκτίμησης της εξοικονόμησης ενέργειας είναι κρίσιμα για την τελική απόφαση. Είναι προφανές ότι η χρήση διαφορετικών εργαλείων στα διάφορα στάδια σχεδιασμού, ξεκινώντας από τα απλά στην αρχή του σχεδιασμού και καταλήγοντας στα περισσότερο πολύπλοκα στο τέλος, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την εκτίμηση της συνολικής εξοικονόμησης. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται μια σειρά μεθόδων υπολογισμού και τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πλήρη προσομοίωση ενός συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής συμπεριλαμβάνοντας και τα φωτιστικά σώματα και το σύστημα ελέγχου με τους αισθητήρες φωτισμού. Η πλήρης προσομοίωση απαιτεί α) τον ακριβή υπολογισμό του φυσικού φωτισμού, β) την ακριβή προσομοίωση της απόδοσης του αισθητήρα και γ) την αξιόπιστη προσομοίωση της εξόδου του συστήματος τεχνητού φωτισμού σε σχέση με την τάση ελέγχου. Τα δυο τελευταία χαρακτηριστικά έχουν μετρηθεί εργαστηριακά. Τα αποτελέσματα εμφανίζουν σημαντικές διαφορές οι οποίες εξαρτώνται από την μεθοδολογία με τις μεγαλύτερες κατ' απόλυτη τιμή (74%) να εμφανίζονται ανάμεσα στην πλήρη προσομοίωση και την εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης με χρήση Παραγόντων Φυσικού Φωτισμού και τις μικρότερες μεταξύ των μεθοδολογιών προσομοίωσης (~1%).

Λέξεις Κλειδιά: *Εξοικονόμηση, ηλεκτροφωτισμός, φυσικός φωτισμός*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίδραση του φωτισμού στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο των κτηρίων γραφείων είναι εξαιρετικά σημαντική με την κατανάλωση για φωτισμό να αντιστοιχεί στο 17% της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης σε κτίρια γραφείων [1]. Από την ανάλυση των ενεργειακών πιστοποιητικών στην Ελλάδα από το 2011 έως το 2015 η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από φωτισμό σε κτίρια γραφείων αντιστοιχεί σε 39% της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας [2]. Συνεπώς φαίνεται ότι υπάρχει ένα σημαντικό δυναμικό εξοικονόμησης λόγω υιοθέτησης πιο αποδοτικών τεχνολογιών ή/και μείωσης των ωρών λειτουργίας λόγω υιοθέτησης κάποιου αυτοματισμού (π.χ. αισθητήρες παρουσίας, φωτισμού). Η χρήση του φυσικού φυσικού φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση από 22-70% [3]. Έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες υπολογισμού της συγκεκριμένης εξοικονόμησης οι οποίες καθώς η υπολογιστική ισχύς αυξανόταν γινόταν περισσότερο ακριβείς και συγχρόνως χρονοβόρες. Προφανώς ανάλογα με την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είτε στα αρχικά στάδια σχεδιασμού είτε στην τελική φάση εκτίμησης της ενεργειακής κατανάλωσης κάποιου κτιρίου, τα αποτελέσματα που αφορούν την εξοικονόμηση από το σύστημα φωτισμού λόγω χρήσης του φυσικού φωτισμού δεν είναι ίδια. Αυτό –μεταξύ άλλων- είναι ένα από τα προβλήματα της μειωμένης διείσδυσης συστημάτων ελέγχου φωτισμού.

Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται έξι μέθοδοι υπολογισμού αυτής της εξοικονόμησης που καλύπτουν όλο το εύρος των διαθέσιμων τεχνικών από απλές εμπειρικές σχέσεις μέχρι την πλήρη προσομοίωση του συστήματος ελέγχου.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΦΩΤΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΧΡΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

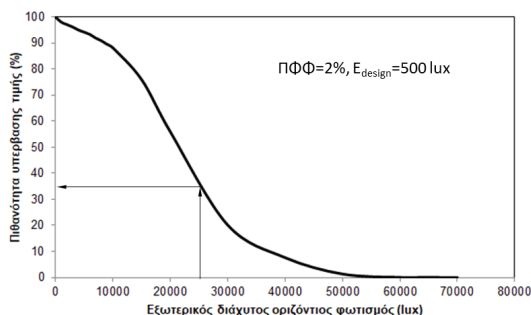
Είναι προφανές ότι η εκτίμηση της εξοικονόμησης από τη χρήση του φυσικού φωτισμού πραγματοποιείται σε περιοχή του κτιρίου που έχει πρόσβαση στο φυσικό φωτισμό. Συνήθως είναι περιοχές κοντά σε ανοίγματα (περιμετρικές ζώνες). Για την εκτίμηση του βάθους των περιμετρικών ζωνών χρησιμοποιούνται είτε μόνο γεωμετρικά δεδομένα είτε υπολογισμός της κατανομής της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας [4]. Η εισαγωγή της περιμετρικής περιοχής συνδέεται και με τον έλεγχο των φωτιστικών αφού όλα ανήκουν σε αυτή μπορούν να ελεγχονται με κοινό τρόπο.

Ετσι, η εκτίμηση της εξοικονόμησης από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον υπολογισμό των επιπέδων φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας εντός της περιμετρικής ζώνης. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια αυτό που εκτιμάται είναι το δυναμικό εξοικονόμησης αφού δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η περιγραφή του συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών (δηλ. αισθητήρας, ελεγκτής και ρυθμιστικές διατάξεις έναυσης των λαμπτήρων). Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τον υπολογισμό της προαναφερθείσας εξοικονόμησης με την πιο απλή από αυτές να βασίζεται στην κατανομή των Παραγόντων Φυσικού Φωτισμού (ΠΦΦ). Ετσι οι Li & Tsang [5] θεωρούν ότι η επίτευξη μέσων τιμών ΠΦΦ μεγαλύτερων του 5% συνεπάγεται τη μη χρήση του συστήματος ηλεκτροφωτισμού, μεταξύ 2-5% η εξοικονόμηση είναι 50% και στην περίπτωση που ο μέσος ΠΦΦ είναι μικρότερος του 2% η εξοικονόμηση είναι μηδενική. Παρότι απλή σαν προσέγγιση έχει το μειονέκτημα ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το σύστημα φωτισμού δεν χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές οι οποίες ελέγχονται/ρυθμίζονται ξεχωριστά και συνεπώς η εκτίμηση της εξοικονόμησης δεν είναι πολύ ακριβής. Γενικά λόγω της απλότητας του υπολογισμού των ΠΦΦ, χρησιμοποιούνται και στην πρόταση του CEN/TC 169/WG 11 –«Daylight» για την κατηγοριοποίηση των συνθηκών φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό κάποιου χώρου. Η κατηγοριοποίηση βασίζεται σε δύο τιμές ΠΦΦ, μια που χρειάζεται να επιτευχθεί στο 50% της επιφάνειας εργασίας (0.8μ) στο 50% του χρόνου (δηλ. ~ 4380 ώρες ανά έτος) και μια μικρότερη που πρέπει να επιτευχθεί στο 100% της επιφάνειας εργασίας πάλι στο 50% του χρόνου. Επίσης έχει προταθεί και ένας αριθμός τεχνικών οι οποίες έχουν προκύψει από επεξεργασία αποτελεμάτων προσομοιώσεων [6]. Στην παρούσα εργασία έχουν επιλεγεί πέντε μέθοδοι που αντιπροσωπεύουν τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα καλύτερα από τρία από την αρχική σχεδίαση μέχρι την προσομοίωση και τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με αποτελέσματα που προκύπτουν από μέθοδο πλήρους προσομοίωσης του συστήματος ρύθμισης (μέθοδος 6).

2.1. Μέθοδος 1: Χρήση ΠΦΦ

Η μέση τιμή του ΠΦΦ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της εξοικονόμησης σε συνδυασμό με δεδομένα οριζόντιου διάχυτου φωτισμού. Χρειάζεται να υπολογισθεί η πιθανότητα υπέρβασης τιμών του εξωτερικού διάχυτου φωτισμού για κάποιο χρονικό διάστημα στο έτος (π.χ.

8:00-17:00). Συνεπώς αν η ένταση φωτισμού σχεδιασμού είναι 500 lux μπορεί να υπολογισθεί και το ποσοστό των ωρών που η ένταση φωτισμού είναι μεγαλύτερη από την τιμή σχεδιασμού. Το συγκεκριμένο ποσοστό προσεγγίζει και τη σχετική εξοικονόμηση [7]. Επειδή η κατανομή της λαμπρότητας στον ουράνιο θόλο εξαρτάται από το αζιμούθιο έχουν προταθεί συντελεστές διόρθωσης των ΠΦΦ στους τέσσερις κύριους προσανατολισμούς [8] αλλά αυτοί εφαρμόζονται μόνο σε περιπτώσεις χειροκίνητης εναυσης/σβέσης του συστήματος. Ο τρόπος υπολογισμού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Ο μέσος ΠΦΦ σε κάποιο χώρο είναι 2% με την τιμή έντασης φωτισμού σχεδιασμού 500 lux. Να τονισθεί εδώ ότι στην πρόταση του CEN/TC 169/WG 11 –«Daylight» για την Αθήνα ο ΠΦΦ που χρειάζεται ώστε να επιτευχθούν τιμές φωτισμού ≥ 500 lux στο 50% του χρόνου είναι 2.6%.



Σχήμα 1. Εκτίμηση του ποσοστού των ωρών στο οποίο η τιμή φωτισμού είναι μεγαλύτερη από 25000 lux. Η τιμή αυτή υπολογίσθηκε από την διαίρεση της τιμής σχεδιασμού με τον ΠΦΦ. Η καμπύλη αναφέρεται στην Αθήνα για ωράριο λειτουργίας 8:00-17:00

2.2. Μέθοδος 2: Χρήση ΠΦΦ και μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας

Μια παραλλαγή της παραπάνω μεθόδου είναι και αυτή που βασίζει τον υπολογισμό της εξοικονόμησης με βάση την μέση τιμή του ΠΦΦ και την μέση μηνιαία ηλιοφάνεια [9].

2.3. Μέθοδος 3: EN 15193

Η χρήση του ΠΦΦ προτείνεται και από το EN15193:2017 [10]. Εδώ ο υπολογισμός της μέσης τιμής πραγματοποιείται στην περιμετρική ζώνη με απλή μέθοδο που παρέχεται από το πρότυπο ή εναλλακτικά μπορεί να υπολογισθεί και με κάποιο εξωτερικό λογισμικό. Η κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό ($W_{L,t}$) υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$W_{L,t} = \Sigma \{ (P_n \cdot F_c) \cdot [(t_b \cdot F_o \cdot F_D) + (t_n \cdot F_o)] \} / 1000 \text{ (kWh)} \quad (1)$$

Όπου :

P_n η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος φωτισμού, F_c ο συντελεστής διατήρησης σταθερών επιπέδων φωτισμού, t_b ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτροφωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας (σε ώρες), F_o ο συντελεστής επίδρασης χρηστών, F_D ο συντελεστής επίδρασης φυσικού φωτισμού, t_n ο χρόνος λειτουργίας κατά τη διάρκεια της νύχτας (σε ώρες). Στην προαναφερθείσα κατανάλωση ενέργειας προστίθεται και η παρασιτική κατανάλωση που οφείλεται στη φόρτιση του συστήματος ασφαλείας και στο σύστημα ελέγχου.

Καθοριστικής σημασίας στον υπολογισμό της κατανάλωσης αποτελεί η εκτίμηση του συντελεστή F_D ο οποίος εκτιμάται με την βοήθεια του συντελεστή παροχής φυσικού φωτισμού (F_{DS}) και του συντελεστή απόδοσης συστήματος ελέγχου του φωτισμού (F_{DC}). Ο τελευταίος καθορίζει και την ικανότητα του συστήματος ελέγχου να εκμεταλλευθεί τον φυσικό φωτισμό.

$$F_D = 1 - F_{DS} \cdot F_{DC} \quad (2)$$

Αν ο υπολογισμός γίνεται σε μηνιαία βάση τότε ο παραπάνω τύπος τροποποιείται λαμβάνοντας υπόψη την μηνιαία διανομή μέσω του συντελεστή v με αποτέλεσμα η προηγούμενη εξίσωση να τροποποιηθεί σε :

$$F_{D,j} = 1 - v_j \cdot F_{DS} \cdot F_{DC} \quad (3)$$

Όπου j ο μήνας.

Ο συντελεστής F_{DS} , μπορεί να υπολογισθεί είτε με την βοήθεια της μέσης τιμής του ΠΦΦ στην περιμετρική ζώνη είτε με τη βοήθεια προσομοίωσης. Στην εργασία [11] για την προηγούμενη έκδοση του πρότυπου EN 15193, είχε εκτιμηθεί ο συντελεστής F_{DS} με προσομοίωση χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$F_{DS} = \frac{\int_0^{t_A} E_D dt}{E_s * t_A} \quad (4)$$

Όπου E_D είναι η ένταση φωτισμού λόγω φυσικού φωτισμού, E_s η ένταση φωτισμού σχεδιασμού (π.χ. 500 lux) και t_A ο χρόνος λειτουργίας. Στην εξίσωση όταν ισχύει $E_D < E_s$ τότε $E_D = E_D$ διαφορετικά $E_D = E_s$. Φαίνεται ότι η τιμή του F_{DS} που υπολογίζεται από την προσομοίωση είναι μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται με χρήση του ΠΦΦ. Στην νέα έκδοση του πρότυπου προτείνεται μια μεθοδολογία η οποία λαμβάνει υπόψη της τον χρόνο στον οποίο υπάρχει πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα σκίασης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιεί τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος ρύθμισης ή έναυσης/σβέσης του συστήματος φωτισμού μέσω της επιλογής των προαναφερθέντων συντελεστών αλλά τελικά η εξοικονόμηση υπολογίζεται με βάση την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας.

Η χρήση του ΠΦΦ για την εκτίμηση της έντασης φωτισμού είναι μεν ένας απλός στην εκτέλεσή του υπολογισμός δεν παύει όμως να αντιπροσωπεύει ένα υπολογισμό που βασίζεται στη δυσμενέστερη περίπτωση (νεφοσκεπής ουρανό). Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα πλέον με χρήση τυπικών κλιματικών αρχείων να πραγματοποιηθεί υπολογισμός της έντασης φωτισμού στο εσωτερικό χώρων πολύπλοκης γεωμετρίας ετησίως με ωριαίο βήμα (ή και μικρότερο) [12,13,14].

2.4. Μέθοδος 4^η: Συνεχής αυτονομία φωτισμού (cDA)

Ετσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνεχής αυτονομία φωτισμού (cDA) η οποία είναι μια τροποποιημένη έκδοση της αυτονομίας φωτισμού (DA). Η τελευταία ορίζεται σαν το ποσοστό ωρών στο έτος (φυσικά εντός της ωραρίου λειτουργίας) στο οποίο η ένταση φωτισμού στο επίπεδο εργασίας είναι μεγαλύτερη από μια προεπιλεγμένη τιμή σχεδιασμού (π.χ. 500 lux). Προφανώς αν είναι μικρότερη από αυτή την τιμή τότε δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η συγκεκριμένη ώρα. Στον υπολογισμό όμως της cDA υπολογίζεται ο λόγος της έντασης φωτισμού προς την αντίστοιχη σχεδιασμού και αυτός αθροίζεται στις τιμές των υπολοίπων ωρών [15].

2.5. Μέθοδος 5: Energy+ a)Split flux b)DELIGHT

Από την στιγμή που είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός των ωριαίων τιμών φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να πραγματοποιηθεί η επίδραση της όποιας εξοικονόμησης από το σύστημα φωτισμού στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Συνεπώς οι αλγόριθμοι ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων περιλαμβάνουν και την δυνατότητα υπολογισμού του φυσικού φωτισμού μαζί με τον αλγόριθμο ελέγχου. Το EnergyPlus [16] χρησιμοποιεί τα κλάσματα φωτισμού (λόγος εσωτερικού προς εξωτερικό οριζόντιο φωτισμό). Υπάρχουν δύο κλάσματα, ένα για τον διάχυτο φωτισμό και ένα για τον άμεσο ηλιακό φωτισμό ο οποίος υπολογίζεται για ένα προκαθορισμένο αριθμό θέσεων του ήλιου. Τα προαναφερθέντα κλάσματα υπολογίζονται με την βοήθεια της μεθόδου Split Flux [17] η οποία έχει μεν το πλεονέκτημα της ταχύτητας υπολογισμού αλλά υστερεί σε ακρίβεια ιδίως στο τμήμα των υπολογισμών που σχετίζονται με τις εσωτερικές ανακλάσεις. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος DELIGHT [18] η οποία βασικά είναι μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (radiosity).

Μετα τον υπολογισμό των επιπέδων φυσικού φωτισμού σε κάποιο σημείο μπορεί να εκτιμηθεί η εξοικονόμηση από το σύστημα φωτισμού -το οποίο ελέγχεται από το συγκεκριμένο σημείο- με τη βοήθεια ενός ιδεατού συστήματος ρύθμισης (integral reset). Σε αυτό το ποσοστό της ισχύος του συστήματος φωτισμού f_p έχει μια γραμμική σχέση με το ποσοστό της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής f_L . Αυτή η ροή υπολογίζεται ως εξής όταν η ένταση φωτισμού σχεδιασμού είναι 500 lux:

$$f_L = \max[0, (500 - E) / 500] \quad (5)$$

E είναι η τιμή της έντασης φωτισμού στο σημείο ελέγχου επί της επιφάνειας εργασίας. Το ελάχιστο ποσοστό της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής (f_{Lmin}) αντιστοιχεί σε ένα ελάχιστο ποσοστό ισχύος f_{Pmin} . Αυτά τα ελάχιστα ποσοστά εξαρτώνται από το είδος της ρυθμιστικής διάταξης. Η σχέση μεταξύ f_p και f_L είναι η εξής :

$$\text{Εαν } f_L < f_{Lmin} \text{ τότε } f_p = f_{pmin} \quad (6)$$

$$\text{Εαν } f_{Lmin} \leq f_L \leq 1 \text{ τότε } f_p = (f_L + (1 - f_L) * f_{pmin} - f_{Lmin}) / (1 - f_{Lmin}) \quad (7)$$

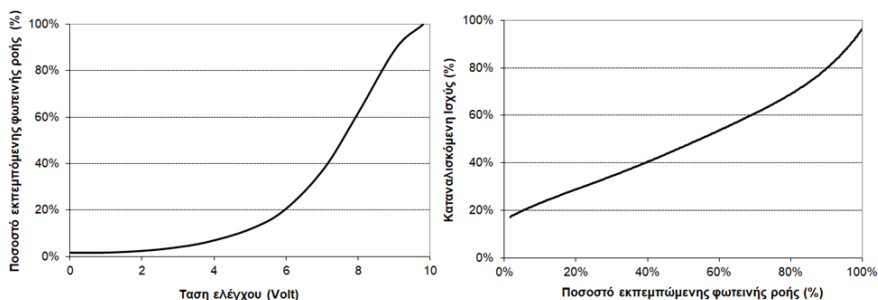
Ακριβώς η ίδια προαναφερθείσα μεθοδολογία μπορεί να επαναληφθεί με χρήση του RADIANCE ή του DAYSIM για τον υπολογισμό των ωριαίων τιμών φωτισμού σε κάποιο σημείο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σαν σημείο ελέγχου για το σύστημα ηλεκτροφωτισμού.

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι υπολογισμού βασίζονται στην εκτίμηση των επιπέδων φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας είτε λαμβάνοντας υπόψη την μέση τιμή σε κάποια περιοχή είτε σε κάποιο σημείο. Η θέση του σημείου απομακρυσμένη από το άνοιγμα η εξοικονόμηση ενέργειας απτο το σύστημα φωτισμού μειώνεται, βελτιώνεται όμως το ποσοστό των ωρών σο χρόνο που οι τιμές φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας είναι μεγαλύτερες από την τιμή σχεδιασμού [19].

Προφανώς η απάντηση στα προβλήματα που προαναφέρθηκαν βρίσκεται στην πλήρη προσομοίωση του συστήματος ελέγχου του φωτιστικού λαμβάνοντας υπόψη τις ρυθμιστικές διατάξεις αλλά και την χωρική ευαισθησία του αισθητήρα ο οποίος και τοποθετείται στην οροφή. Ήδη υπάρχουν λογισμικά που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιότητες του αισθητήρα φωτισμού [20,21]. Συνεπώς αυτό που λείπει από μια πλήρη μεθοδολογία σήμερα είναι η δημιουργία μέσω μετρήσεων της σχέσης ανάμεσα στην τάση ελέγχου μιας ρυθμιστικής διάταξης (ballast, driver) και το ποσοστό της εκπεμπόμενης ροής από το φωτιστικό καθώς επίσης και η υιοθέτηση όλων των δυνατών αλγορίθμων ελέγχου μαζί φυσικά με την χωρική ευαισθησία των αισθητήρων. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται μια τέτοια μεθοδολογία και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης ενέργειας σε μηνιαία βάση με τις υπόλοιπες.

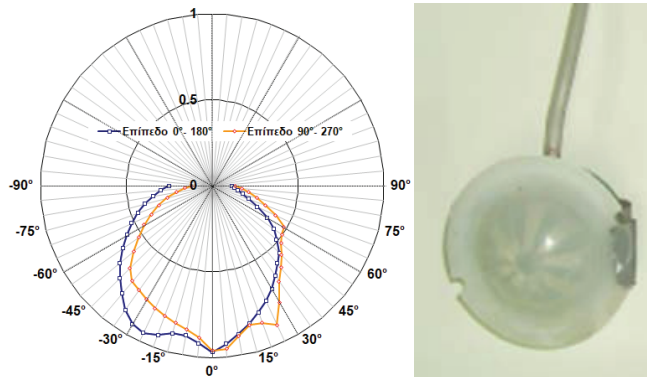
2.6. Μέθοδος 6: Πλήρης προσομοίωση συστήματος

Τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης ενέργειας από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού όπως αυτά υπολογισθηκαν από τις πέντε (5) παραπάνω μεθόδους συγκρίθηκαν με μια νέα μέθοδο (Μέθοδος 6) στην οποία προσομοιώνεται η πλήρης λειτουργία ενός συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροή των φωτιστικών. Η ηλεκτρονική διάταξη ρύθμισης της φωτεινής ροής του λαμπτήρα έχει μετρηθεί εργαστηριακά [22] και οι χαρακτηριστικές της καμπύλες παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 2. Στο αριστερό διάγραμμα είναι η καμπύλη μεταξύ ποσοστού εκπεμπόμενης ροής σε σχέση με την τάση ελέγχου ενώ στο δεξιό η καμπύλη μεταξύ ποσοστού καταναλισκώμενης ισχύος και ποσοστού εκπεμπόμενης ροής.

Ο αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στο κέντρο του χώρου στην οροφή και η χωρική του ευαισθησία έχει μετρηθεί και παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3. Χωρική απόκριση αισθητήρα φωτισμού

Η μοντελοποίηση του αισθητήρα στο Radiance πραγματοποιήθηκε με την εξής τεχνική. Γύρω από το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε μια μικρή διαφανής σφαίρα ακτίνας 1 cm της οποίας η διαπερατότητα στο ορατό τροποποιείται με βάση το αρχείο που περιέχει την χωρική απόκριση του αισθητήρα [23].

Ο αλγόριθμος ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ολοκληρωτικός κλειστού βρόχου (integral reset) ο οποίος ρυθμίζει την φωτεινή ροή των λαμπτήρων με τέτοιο τρόπο ώστε το συνολικό σήμα του αισθητήρα (που οφείλεται στην επίδραση τόσο του τεχνητού όσο και του φυσικού φωτισμού) να διατηρείται σταθερό. Το ποσοστό (f_{Lmin}) κατά το οποίο ρυθμίζεται η φωτεινή ροή των φωτιστικών δίνεται από την σχέση :

$$f_L(t) = 1 - (S_D(t)/S_{Edesign}) \quad - \quad (8)$$

όπου S_D είναι το σήμα του αισθητήρα που οφείλεται στον φυσικό φωτισμό μόνο ενώ η παράμετρος $S_{Edesign}$ είναι το σήμα από τον αισθητήρα την νύχτα (έλλειψη φυσικού φωτισμού) όταν το σύστημα λειτουργεί και ρυθμίζεται ώστε να παρέχει την ένταση φωτισμού σχεδιασμού στην επιφάνεια εργασίας. Με τη γνώση του ποσοστού f_{Lmin} μπορεί να υπολογισθεί το ποσοστό της καταναλισκώμενης ισχύος από το σύστημα με βάση την σχέση [22] :

$$f_p = 0.97 f_L^6 + 0.23 f_L^5 - 3.67 f_L^4 + 4.08 f_L^3 - 1.66 f_L^2 + 0.84 f_L + 0.15 \quad (9)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για το συγκεκριμένο σύστημα $f_{Lmin}=5\%$ και $f_{Pmin}=19\%$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού της εξοικονόμησης ενέργειας από το σύστημα φωτισμού χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό δωμάτιο γραφείων του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τυπικού δωματίου γραφείων.

Διαστάσεις	3.4x5.4x2.7 m
Ποσοστό ανοίγματος επι της πρόσοψης (Glazing to Wall Ratio , GWR)	20%, 100% χωρίς να υπάρχουν πλαίσια. Το πρώτο ποσοστό αντιπροσωπεύει το μικρότερο άνοιγμα σύμφωνα με τον Κτιριοδομικό Κανονισμό ενώ το δεύτερο τη μέγιστη τιμή που μπορεί να έχει.
Διαπερατότητα υαλοπίνακα	0.64

Ανακλαστικότητα δαπέδου, οροφής, τοίχων	0.2,0.8,0.5
Προσανατολισμός	Εξετάσθηκαν δύο προσανατολισμοί, Νότιος και Βόρειος
Σύστημα φωτισμού	4 φωτιστικά με ένα λαμπτήρα το καθένα T16 54W. Εγκατεστημένη ισχύς 11.7 W/m ²
Ένταση φωτισμού σχεδιασμού	500 lux
Αλγόριθμος ελέγχου	Integral reset
fL _{min} / fP _{min} (Ελάχιστο ποσοστό εκπεμπόμενης φωτεινής ροής /Ελάχιστη τιμή καταναλισκόμενης ισχύος)	0.05/0.19
Κλιματική περιοχή	Αθήνα
Ωράριο λειτουργίας εκτός Σαββάτου-Κυριακής	8:00-17:00
Αισθητήρας	Στο κέντρο της οροφής

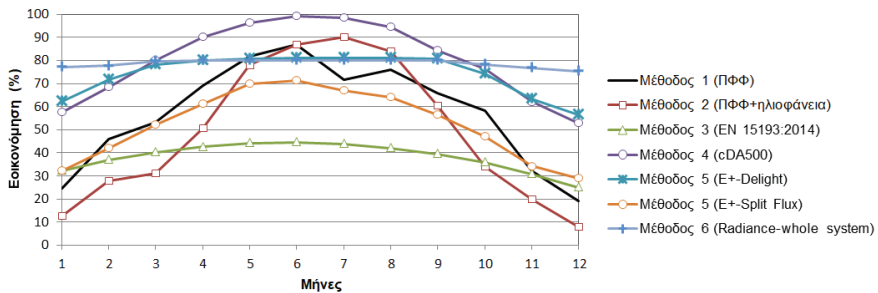
Οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για τις προαναφερόμενες μεθόδους υπολογισμού βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2. Παραδοχές υπολογισμών στις μεθόδους που έχουν εξετασθεί.

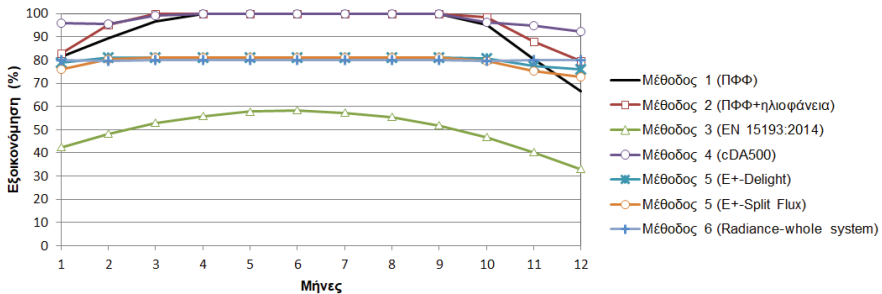
Μέθοδος	Παραδοχές
1	Έχει χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή των ΠΦΦ χωρίς συντελεστές προσανατολισμού. Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις χειροκίνητης έναυσης/σβέσης. Η κατανομή των ΠΦΦ έχει υπολογισθεί χρησιμοποιώντας κάνναβο 198 σημείων με το Radiance.
2	Ο υπολογισμός έγινε με το λογισμικό Relux
3	Χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των ΠΦΦ στην περιμετρική ζώνη με δεδομένα από την μέθοδο 1. Η περιμετρική ζώνη περιέχει το σύνολο των φωτιστικών του χώρου και συνεπώς το σύνολο της ισχύος ελέγχεται από το σύστημα ρύθμισης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής: α) για GWR 20% και νότιο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.67$, $F_{DC}=0.74$, $F_C=1$, $F_O=1$ β) για GWR 100% και νότιο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.80$, $F_{DC}=0.81$, $F_C=1$, $F_O=1$ γ) για GWR 20% και βόρειο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.51$, $F_{DC}=0.74$, $F_C=1$, $F_O=1$ και δ) για GWR 100% και βόρειο προσανατολισμό υπολογίσθηκε $F_{DS}=0.51$, $F_{DC}=0.81$, $F_C=1$, $F_O=1$. Σε όλες τις περιπτώσεις έχει θεωρηθεί ωράριο λειτουργίας 8:00-17:00 χωρίς Σαβ-Κυρ. Συνολικά 2530 ώρες χωρίς να έχει θεωρηθεί λειτουργία του συστήματος φωτισμού βράδυ ($t_N=0$). Επίπροσθετα επελέγη να μην ενεργοποιείται καθόλου κανένα σύστημα σκίασης. Δεν χρησιμοποιήθηκε λογισμικό για τον υπολογισμό αλλά απλώς εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις από το πρότυπο.
4	Υπολογισμός της συνεχούς αυτονομίας φωτισμού (cDA_{500}) σε σημείο στο κέντρο του δωματίου

5	Έχουν χρησιμοποιηθεί και οι δύο μεθοδολογίες (Split-Flux, DELight) με σημείο ελέγχου το κέντρο του δωματίου.
6	Πλήρης προσομοίωση του συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής χρησιμοποιώντας μετρήσεις α) της χωρικής ευαισθησίας του αισθητήρα και β) της σχέσης ανάμεσα στο ποσοστό καταναλισκόμενης ισχύος και στο ποσοστό εκπεμπόμενης φωτεινής ροής (δηλ. τις χαρακτηριστικές καμπύλες της ηλεκτρονικής διάταξης ρύθμισης).

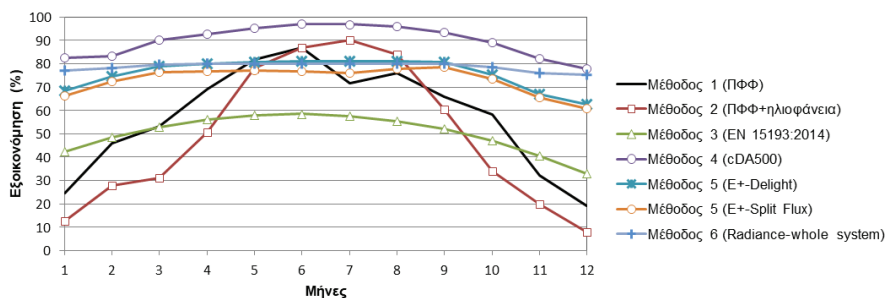
Ετσι η μηνιαία τιμή της εξοικονόμησης ενέργειας για τις τεσσereis περιπτώσεις (GWR 20% και 100% δύο προσανατολισμοί βόρειος και νότιος) παρουσιάζονται παρακάτω.



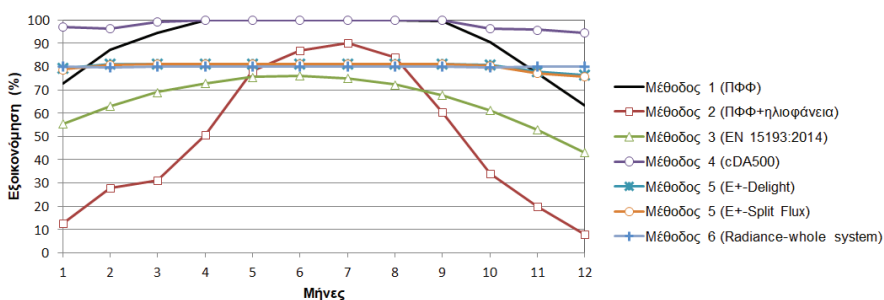
Σχήμα 4. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR20% και βορεινό προσανατολισμό.



Σχήμα 5. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR100% και βορεινό προσανατολισμό.



Σχήμα 6. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR20% και νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 7. Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας για την περίπτωση με GWR100% και νότιο προσανατολισμό.

Οι μέθοδοι 1,2,4 βασίζονται μόνο στις τιμές φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο αλγόριθμος ελέγχου του ηλεκτροφωτισμού. Στην μέθοδο 3 απλώς επιλέγεται ένας αριθμός παραμέτρων ανάλογα με την γενική κατηγορία που ανήκει το σύστημα ελέγχου ενώ οι μέθοδοι 5 και 6 λαμβάνουν υπόψη το σύστημα ελέγχου. Η μέθοδος 5 θεωρεί ένα ιδεατό σύστημα ενώ η μέθοδος 6 βασίζεται σε δεδομένα μετρήσεων με τον έλεγχο να πραγματοποιείται λόγω υπολογισμού του φυσικού φωτισμού στο επίπεδο του αισθητήρα (οροφή) και λαμβάνοντας υπόψη την χωρική του ευαισθησία.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξετάζοντας τις εξοικονομήσεις ενέργειας σε μηνιαία βάση που παρουσιάζονται στα σχήματα 4-7 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Τα αποτελέσματα των μεθόδων 5 (DELlight) και 6 παρουσιάζουν μικρές σχετικά διαφορές. Η μεγαλύτερη αυτών συμβαίνει στην περίπτωση βόρειου προσανατολισμού και μικρού ανοίγματος (-5.9%) ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η μέση τιμή της σχετικής διαφοράς κυμαίνεται από 0.11%-3.7%. Σε επίπεδο ανάλυσης μηνών οι μικρότερες διαφορές (1.13-1.16% σε όλες τις περιπτώσεις) εμφανίζονται το καλοκαίρι ενώ οι μεγαλύτερες τον χειμώνα. Συνεπώς η εκτίμηση της εξοικονόμησης μπορεί να πραγματοποιηθεί και χρησιμοποιώντας την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας αρκεί να μπορεί να μοντελοποιηθεί ο αλγόριθμος ελέγχου. Η Μέθοδος 6 έχει πραγματικό πλεονέκτημα όταν χρειάζεται επιπρόσθετα να υπολογισθεί και η κατανομή της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας.

2. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση υπολογίζεται σε όλες τις περιπτώσεις με την χρήση της συνεχούς αυτονομίας φωτισμού (cDA). Οι τιμές 100% ιδίως το καλοκαίρι οφείλονται στο ότι οι τιμές φωτισμού στο κέντρο του χώρου είναι συνεχώς μεγαλύτερες από την τιμή σχεδιασμού (500 lux).

3. Η μέθοδος 3 (EN 15193) εμφανίζει στατιστικά τις μικρότερες τιμές εξοικονόμησης κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών.

4. Η μέθοδος 1 που αντιπροσωπεύει τον απλούστερο τρόπο εκτίμησης του δυναμικού της εξοικονόμησης σε σχέση με την μέθοδο 6 εμφανίζει σχετικές διαφορές που κυμαίνονται από -74.8% έως +24.8% για όλες τις περιπτώσεις. Οι μικρότερες διαφορές εμφανίζονται στην περίπτωση της πλήρους κάλυψης της πρόσοψης με υαλοπίνακα και αυτό λόγω του κορεσμού (συστηματικά τιμές φωτισμού > 500 lux).

Οι μεθοδολογίες που βασίζονται στον ΠΦΦ σε μια προσπάθεια να ισορροπήσει η απλότητα με την ταχύτητα οδηγούν τελικά σε τιμές εξοικονόμησης που διαφέρουν σημαντικά από αυτές που προκύπτουν από προσομοιώσεις. Η διαφορά είναι τόσο μεγάλη που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες σχεδιαστικές προσεγγίσεις ιδίως όταν αυτές αφορούν συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Είναι φανερό επίσης το πρόβλημα με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αυτού του υπολογισμού, σε περιπτώσεις πιστοποίησης, με δεδομένο ότι ο ηλεκτροφωτισμός επηρεάζει καταλυτικά το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Η πλέον ακριβής μεθοδολογία –σε σχέση με την πραγματικότητα– βασίζεται προφανώς στην πλήρη προσομοίωση του συστήματος ρύθμισης της φωτεινής ροής. Το πρόβλημα όμως που υπάρχει είναι η έλλειψη δεδομένων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Λόγω της διαθεσιμότητας πλέον αλγόριθμων υπολογισμού των επιπέδων φωτισμού σε πολύπλοκους γεωμετρικά χώρους είναι προφανές ότι το επόμενο βήμα θα πρέπει να είναι η δημιουργία μιας τράπεζας δεδομένων για την συμπεριφορά των ηλ. ρυθμιστικών διατάξεων των λαμπτήρων καθώς και των χαρακτηριστικών των αισθητήρων,

5. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ

Η Μεταδιδακτορική Έρευνα υλοποιήθηκε με υποτροφία του ΙΚΥ η οποία χρηματοδοτήθηκε από την Πράξη «Ενίσχυση Μεταδιδακτόρων Ερευνητών / Ερευνητριών» από τους πόρους ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» με άξονες προτεραιότητας 6, 8, 9 και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο – ΕΚΤ και το ελληνικό δημόσιο

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] US EIA, Commercial Buildings Energy Consumption Survey, 2012, Release date 2016
- [2] K.G. Droutsas, S. Kontoyiannidis, E.G. Dascalaki and C.A. Balaras, "Benchmarking Energy Use of Existing Hellenic Non-Residential Buildings", *Procedia Environmental Sciences* 38 (2017) 713 – 72
- [3] Xu Yu, Yuehong Su " Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation –A literature review" , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (2015), 494-50
- [4] A. Kontadakis, A.Tsangrassoulis, A. Roetzel, "Defining the Boundaries of Daylight Penetration. The use of dynamic and static daylight methods to predict the daylight zone within sidelit spaces, a comparison", *Balkan Light 2015, The 6th Balkan Conference on Lighting, Athens, Greece*
- [5] Danny H.W.Li, Ernest K.W.Tsang, «An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong», *Building and Environment*, Volume 43, Issue 9, September 2008, Pages 1446-1458)
- [6] Pyonchan Ihm, Abderrezek Nemri , Moncef Krarti, "Estimation of lighting energy savings from daylighting", *Building and Environment* 44 (2009) 509–514
- [7] Lynes J A and Littlefair P J, "Lighting energy savings from daylight: estimation at the sketch design stage" , *Lighting Res. Technol.* ,22,(3) pp 129-137 (1990).
- [8] Littlefair P J, " Predicting annual lighting use in daylight buildings", *Building and Environment*, 2,(1) pp 43-54 (1990)
- [9] ReluxSuite 2016, <https://relux.com/en/downloads.html>
- [10] EN 15193:2017, Energy performance of buildings. Energy requirements for lighting. Specifications, Module M9

- [11] A. Tsangrassoulis, A. Kontidakis A. L. Doulos, " Assessing Lighting Energy Saving Potential from Daylight Harvesting in Office Buildings Based on Code Compliance & Simulation Techniques: A Comparison", *Procedia Environmental Sciences*, Volume 38, 2017, Pages 420-427
- [12] RADIANCE : Ward and R. Shakespeare, *Rendering with Radiance, the Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufmann Publishers, 1998.,
- [13] DAYSIM C. F Reinhart, *DaySim version 3.1*, USA: Cambridge, 2013, <http://daysim.ning.com>.,
- [14] LICASO, <http://www.licaso.com/docs/2017/Content/Home.htm>
- [15] Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos*, 3(1), 7-31
- [16] EnergyPlus Documentation : Engineering Reference, https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf
- [17] R.G. Hopkinson, J. Longmore, P. Petherbridge, "An Empirical Formula for the Computation of the Indirect Component of Daylight Factor", *Lighting Research and Technology*, Vol 19, Issue 7, 1954.
- [18] Winkelmann, F.C. and S. Selkowitz. 1985. Daylighting Simulation in the DOE-2 Building Energy Analysis Program. *Energy and Buildings* 8, 271-286.
- [19] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F.V. Topalis, "Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor", *Energy Conversion and Management*, Volume 86, October 2014, Pages 1069-1077)
- [20] SPOT, Sensor Placement –Optimization Tool, <https://www.daylightinginnovations.com/spot-home>
- [21] DAYSIMps <https://daysim.ning.com/page/download>)
- [22] L. Doulos , A. Tsangrassoulis , F. Topalis , "Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts" , *Energy and Buildings* 40 (2008) 36–50
- [23] Younju Yoon, PhD Thesis, " Development of a fast and accurate annual daylight approach for complex window systems", Penn State University, School of Engineering", 2006