ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΦΩΤΙΣΤΙΚΩΝ LED ΜΕ DC ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ

Λάμπρος Θ. Δούλος [1,2,3], Αντώνης Κονταδάκης [1], Φραγκίσκος Τοπαλής [3] και Άρης Τσαγκρασούλης [1]
[1] Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίο Αρεως, Βόλος 38443
[2] Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, Πάτρα 26335
[3] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 15780
e-mail: ldoulos@uth.gr

Περίληψη

Τα τροφοδοτικά (drivers) των LEDs αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα ενός συστήματος εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού με αισθητήρες φωτισμού γιατί ρυθμίζουν τη στάθμη φωτισμού των φωτιστικών σωμάτων. Η μεταβολή της στάθμης του φωτισμού θεωρείται ανάλογη του σήματος του αισθητήρα. Εντούτοις στην πράξη δεν ισχύει αυτό, για αυτό και είναι σημαντική η καταγραφή και η επαλήθευση της απόδοσής τους. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με drivers φωτιστικών σωμάτων LED αφορούσαν α) στον έλεγχο της συσχέτισης μεταξύ της τάσης ελέγχου τους και των αντίστοιχων παραγόμενων επίπεδων φωτισμού, β) στον έλεγχο της συσχέτισης μεταξύ της τάσης ελέγχου τους και της αντίστοιχης σχετικής ισχύος και γ) στον έλεγχο της συσχέτισης μεταξύ της τάσης ελέγχου τους και του συντελεστή ισχύος τους. Οι μετρήσεις για τον έλεγχο των παραπάνω πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Φωτοτεχνίας του ΕΜΠ με τη χρήση κατάλληλων πειραματικών διατάξεων. Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις έγινε συσχέτιση της σχετικής φωτεινής εξόδου και της σχετικής ισχύος των drivers των LEDs, από την οποία προέκυψαν πολυωνυμικές συναρτήσεις μεταξύ τους. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μελέτη ευαισθησίας για τον έλεγχο της επίδρασης δυο διαφορετικών driver με DC τροφοδοσία στον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση κοινού σήματος αναφοράς αισθητήρα φωτισμού ως δεδομένο εισόδου στις συναρτήσεις της πολυωνυμικής παλινδρόμησης μεταξύ της σχετικής φωτεινής εξόδου και της σχετικής ισχύος σε κάθε driver.

Λέξεις-Κλειδιά: Εξοικονόμηση ενέργειας, Μετρήσεις φωτεινής ροής σε σχέση με την καταναλισκόμενη ενέργεια, Ρύθμιση φωτισμού, Φωτιστικά σώματα LED με DC τροφοδοσία

Abstract

The LED drivers are an important part of a daylight harvesting system using photosensors because they dim the light output of the luminaires. The change in the lighting levels is considered to be proportional to the sensor signal. However, in practice this is not the case, so it is important to record and verify their performance. The experiments carried out with LED drivers concerned a) the correlation between their control signal and the corresponding lighting output, b) the correlation between their control signal and the corresponding relative power, and c) the correlation between their control signal and their power factor. Measurements were carried out in the Photographic Laboratory of the NTUA using appropriate experimental set-up. Based on the experimental measurements, the relative light

output and the relative power of LED drivers were correlated, resulting in polynomial functions between them. A sensitivity analysis was then conducted to investigate the effect of two different drivers with DC supply on the energy savings calculation using a common photosensor reference signal as input to the polynomial functions between the relative light output and the relative power to each driver.

Keywords: Dimming, Energy savings, LED luminaires with DC supply, Lighting output ratio in regards power

1. Εισαγωγή

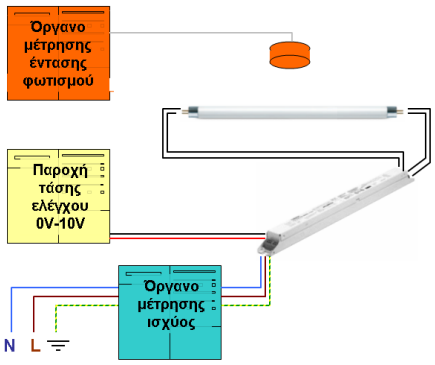
Η ανάγκη για μεγαλύτερα ποσά εξοικονόμησης ενέργειας έχει μετατραπεί πλέον σε απαιτούμενη προϋπόθεση στη λειτουργία των σημερινών εγκαταστάσεων είτε αυτές είναι κτιριακές είτε οδικές είτε αφορούν τον κλάδο των μεταφορών. Αυτό γίνεται πλέον αντιληπτό από τον πολίτη μέσα από την προώθηση νέων νομοθεσιών από την Ε.Ε. (Directive 2010/31/EU) στα κράτη μέλη της (οδηγίες cost optimal, near Zero Energy Buildings κλπ) αλλά και τις επιβολές υψηλών προστίμων σε μεγάλες εταιρίες, αρχικά ακόμα, στον τομέα της ενέργειας (πχ Δ.Ε.Η., Ελληνικά Πετρέλαια κλπ). Η επιβολή αυτή πραγματοποιείται εφόσον οι εταιρίες αυτές δεν υλοποιήσουν ορισμένους στόχους που τους αντιστοιχούν, όπως είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στα κτίριά τους ή η προώθηση δράσεων για την αύξηση της ευαισθησίας των χρηστών τους για τη προστασία του περιβάλλοντος κλπ. Ένας σημαντικός καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό είναι το σχολικό κτίριο (Dimoudi et al 2009, Reinhart et al 2012, Reinhart et 2014, Santamouris et al 2007). Το ωράριο λειτουργίας τους είναι κατά τη διάρκεια της ημέρας και ο λόγος της επιφάνειας των εξωτερικών ανοιγμάτων σε σχέση με την επιφάνεια του δαπέδου είναι αυξημένος σε σχέση με τα τυπικά κτίρια γραφείων. Αυτό καθιστά τις σχολικές αίθουσες ιδανικές για χρήση συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας με αισθητήρες φωτισμού. Αν κάποιος συνδυάσει την εξοικονόμηση ενέργειας από τους αισθητήρες φωτισμού με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία με τη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων (Mandalaki et al 2012), τότε μπορεί να υποθέσει πως ο στόχος για σχεδόν μηδενική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί. Για την πιο αποδοτική χρήση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στα σχολικά κτίρια, τα αντίστοιχα φωτιστικά σώματα θα πρέπει να έχουν τροφοδοσία DC. Για να πραγματοποιηθεί όμως με ακρίβεια η παραπάνω υπόθεση, χρειάζεται η πληροφορία με το πόση ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται στο σύστημα φωτισμού ανάλογα με τον φυσικό φωτισμό που ανιχνεύεται από τον αισθητήρα φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας (Δούλος 2010). Επειδή το σύστημα είναι δυναμικό αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με μετρήσεις της σχετικής φωτεινής ροής ενός φωτιστικού σώματος ως προς την καταναλισκόμενη ενέργεια για όλο το εύρος ρύθμισης στάθμης φωτισμού (Choi et al 2005, Doulos et al 2008). Στην παρούσα αναφορά πραγματοποιείται η ανάλυση ενός συστήματος εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού στα επί μέρους τμήματά του και η ανάδειξη του ρόλου του εξοπλισμού ρύθμισης της στάθμης φωτισμού. Επιλέχθηκαν δυο διαφορετικοί τύποι εξοπλισμού ρύθμισης της στάθμης φωτισμού (dimmable drivers) κατάλληλοι για DC τροφοδοσία φωτιστικών σωμάτων LED (Doulos et al 2017). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σχετικής φωτεινής ροής ως προς την καταναλισκόμενη ενέργεια για εύρος ρύθμισης στάθμης φωτισμού από 10% έως 100%. Στις μετρήσεις εφαρμόζεται πολυωνυμική παρεμβολή με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σε προσομοιώσεις φυσικού φωτισμού για τυπικό χώρο σχολικού συγκροτήματος σε ωριαία βάση για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος στην περιοχή της Αθήνας (Doulos et al 2008).

2. Πειραματική διαδικασία

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο φωτοτεχνίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε ελεγχόμενο περιβάλλον και σταθερές συνθήκες. Ο χώρος των μετρήσεων ήταν η ειδική μαύρη αίθουσα (20mX7mX4m) η οποία αποτελείται από επιφάνειες (τοίχοι, οροφή, δάπεδο και εξοπλισμό) χρώματος μαύρου ματ για τον περιορισμό των ανεπιθύμητων ανακλάσεων. Εξετάστηκαν 2 LED drivers με 24V DC τροφοδοσία και τάση ελέγχου 0-10V τα οποία προέρχονταν από 2 κατασκευαστές. Η ιδιαιτερότητα της τροφοδοσίας τους με DC τάση περιόρισε των αριθμό περισσότερων δειγμάτων από διαφορετικούς κατασκευαστές.

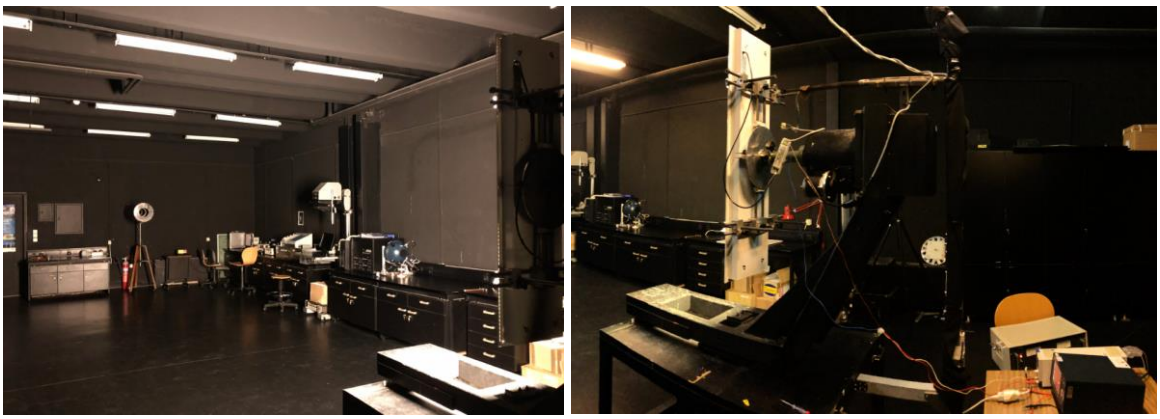
Οι LED drivers εξετάστηκαν με το ίδιο φωτιστικό σώμα. Το φωτιστικό σώμα που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις είχε υποστεί γήρανση, όπως προβλέπεται από τα διεθνή πρότυπα (CIE 70, CIE 121). Ο χρόνος προθέρμανσης του φωτιστικού πριν από την πρώτη μέτρηση ήταν μία ώρα για όλες τις περιπτώσεις των μετρήσεων (για κάθε driver). Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν σταθερή στους 26^{o}C. Ομοίως, η τάση εισόδου στα drivers (τάση τροφοδοσίας) ήταν σταθερή στα 24V DC σε όλες τις μετρήσεις, χρησιμοποιώντας σταθεροποιητή τάσης.

Η συνδεσμολογία των πειραμάτων για τις φωτομετρικές και ηλεκτρικές μετρήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Για τις ηλεκτρικές μετρήσεις το όργανο μέτρησης ενεργής και άεργης ισχύος συνδέθηκε ανάμεσα στην είσοδο παροχής του LED driver και την τροφοδοσία του δικτύου. Απέναντι από τη διάταξη των λαμπτήρων με το LED driver τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας μέτρησης φωτισμού. Ο αισθητήρας μέτρησης φωτισμού βρισκόταν μέσα σε κύλινδρο με εγκάρσια διαφράγματα για την αποφυγή παράσιτου φωτισμού και ήταν συνδεδεμένος με καταγραφικό όργανο για τις φωτομετρικές μετρήσεις (Εικόνα 1).

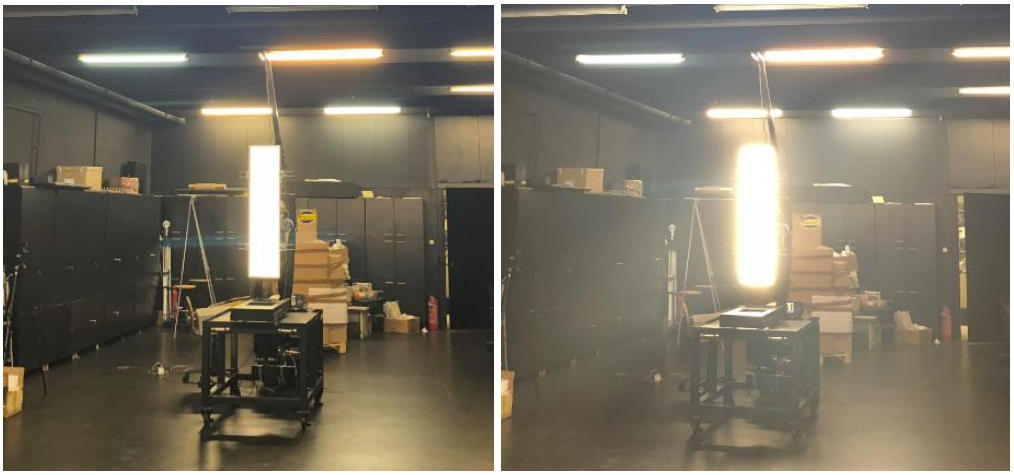


Σχήμα 1: Συνδεσμολογία φωτομετρικών και ηλεκτρικών μετρήσεων για κάθε εξεταζόμενο τροφοδοτικό (Driver) με δυνατότητα προσαρμογής των επιπέδων φωτισμού.

Οι σχετικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διάφορες τιμές τάσης ελέγχου του LED driver (0-10V). Κάθε LED driver τροφοδοτήθηκε με διακριτές τιμές τάσης ελέγχου (0-10V) μέσω ενός ψηφιακού τροφοδοτικού παροχής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (KIKUSUI PWR400L). Με την έναρξη των μετρήσεων, η τροφοδοσία της τάσης ελέγχου του LED driver ήταν μέγιστη και ίση με 10V. Εν συνεχεία, η τροφοδοσία της τάσης ελέγχου μειωνόταν σταδιακά, με βήμα 1V, από τη μέγιστη τιμή των 10V έως την ελάχιστη τιμή των 0V. Συνεχίζοντας τη διαδικασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε αντιστρόφως αύξηση στη τροφοδοσία της τάσης ελέγχου από την ελάχιστη τιμή των 0V προς τη μέγιστη τιμή των 10V (Εικόνα 2). Η μείωση και η αντίστροφη αύξηση της τροφοδοσίας της τάσης ελέγχου έγινε διαδοχικά για όλα τα LED drivers ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις (Choi et al 2005, Doulos et al 2008, Doulos et al 2017).



Εικόνα 1. Τοποθέτηση του αισθητήρα μέτρησης φωτισμού μέσα σε κυλινδρικό διάφραγμα για προστασία από παράσιτο φωτισμό (αριστερά) απέναντι από τη μετρούμενη διάταξη (φωτιστικό LED και driver, δεξιά).



Εικόνα 2: Αύξηση στη τροφοδοσία της τάσης ελέγχου από την ελάχιστη τιμή των 0V (αριστερά) προς τη μέγιστη τιμή των 10V (δεξιά).

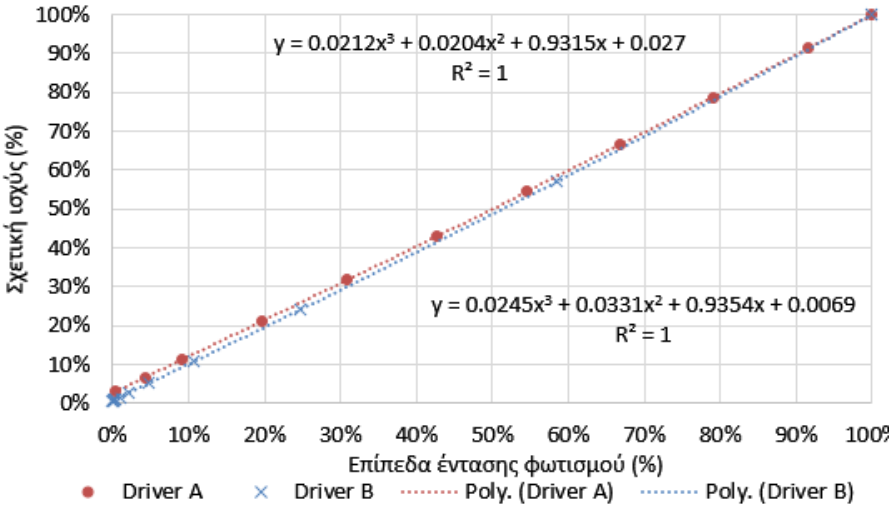
Οι μετρήσεις της έντασης φωτισμού (illuminance, lx) πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα της CIE (CIE 70, CIE 121). Η απόσταση μεταξύ της πειραματικής διάταξης (φωτιστικό σώμα και LED driver) και του αισθητήρα μέτρησης φωτισμού (International Light Technologies 1700) ήταν σταθερή κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Ο αισθητήρας μέτρησης φωτισμού τοποθετήθηκε σε απόσταση 9,9 μέτρων από το κέντρο συμμετρίας των λαμπτήρων. Η φωτεινή δέσμη από το εν λόγω κέντρο προσπίπτει κάθετα στον αισθητήρα. Ο παράσιτος φωτισμός μηδενίζεται με την τοποθέτηση του αισθητήρα στο βάθος κυλινδρικού κελύφους με απορροφητική επιφάνεια και εγκάρσια διαφράγματα. Το οπτικό πεδίο του αισθητήρα μέτρησης καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια εκπομπής των εξεταζόμενων λαμπτήρων. Οι μετρήσεις της έντασης φωτισμού καταγράφονταν κάθε 5min μέχρι να σταθεροποιηθεί η τιμή της, για κάθε μεταβολή στη τροφοδοσία της τάσης ελέγχου. Ως σταθεροποιημένη τιμή της έντασης φωτισμού οριζόταν η τελευταία τιμή, όπου η τυπική απόκλιση μεταξύ του ζεύγους των δύο τελευταίων μετρήσεων ήταν μικρότερη από 2%. Η διαδικασία για τη μέτρηση της έντασης φωτισμού διαρκούσε συνήθως από 15 έως 20min για κάθε βήμα μεταβολής στη τροφοδοσία της τάσης ελέγχου (Doulos et al 2017, NLPIP 1999). Με τον μετρητή ισχύος (Fluke NORMA 4000) πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ενεργούς ισχύος της πειραματικής διάταξης που ενσωμάτωνε το φωτιστικό με τον αντίστοιχο LED driver για τις επιλεγμένες τιμές τροφοδοσίας της τάσης ελέγχου του LED driver.

Εικόνα 3: Ψηφιακό τροφοδοτικό παροχής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (KIKUSUI PWR400L) και μετρητής ισχύος (Fluke NORMA 4000)

3. Αποτελέσματα μετρήσεων

Οι τιμές της έντασης φωτισμού και της καταναλισκόμενης ισχύος κανονικοποιήθηκαν με βάση την αντίστοιχη μέγιστη μετρούμενη τιμή για κάθε LED driver. Έτσι το 100% καθορίστηκε σαν το ανώτατο όριο και το 0% σαν το κατώτατο όριο. Σε καμία περίπτωση το φωτιστικό δεν έσβησε ή να παρατηρήθηκε φωτεινή μαρμαρυγή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και ειδικά όταν η τροφοδοσία της τάσης ελέγχου των LED drivers είχε την ελάχιστη τιμή της (0V).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής καταναλισκόμενης ισχύος σε συνάρτηση με τη σχετική φωτεινή έξοδο για κάθε εξεταζόμενο LED driver (A και B) και η πολυωνυμική παλινδρόμηση μεταξύ τους. Σε όλες τις περιπτώσεις οι υπολογιζόμενες τυπικές αποκλίσεις της σχετικής καταναλισκόμενης ισχύος για την ίδια τάση ελέγχου (CV) ήταν στατιστικά μη σημαντικές για το επίπεδο εμπιστοσύνης των 0,05.



Σχήμα 2: Ζεύγη πειραματικών σημείων της σχετικής ισχύος σε συνάρτηση με τη σχετική φωτεινή έξοδο για τα A και B LED drivers και η πολυωνυμική παλινδρόμηση μεταξύ τους.

Τα πειραματικά αποτελέσματα εμφανίζουν αποκλίσεις μεταξύ των δοκιμίων A και B. Επομένως, τα εξεταζόμενα LED drivers παράγουν την ίδια ποσότητα φωτισμού καταναλώνοντας διαφορετικά ποσά ενέργειας. Για παράδειγμα, μεταξύ των δυο δοκιμίων,

όταν η σχετική φωτεινή έξοδος ήταν στο 50%, η διαφορά στη σχετική ισχύ ήταν 1,5%. Σε μεγαλύτερο πλήθος δοκιμίων από διαφορετικούς κατασκευαστές η διαφορά ενδέχεται να αυξηθεί όπως είχε παρατηρηθεί σε δοκιμές με LED drivers 230V AC (περίπου 5%, Doulos et al 2017).

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες συναρτήσεις από την πολυωνυμική παλινδρόμηση μεταξύ της σχετικής ισχύος (y, από 0 έως 1) και της σχετικής φωτεινής εξόδου (x, από 0 έως 1). Από τη σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις αντίστοιχες υπολογιζόμενες (βάσει των πολυωνυμικών συναρτήσεων), δεν προέκυψαν διαφορές. Αυτό επιβεβαιώνεται από τους συντελεστές προσδιορισμού R^2, οι οποίοι δίνονται στον ίδιο πίνακα.

Πίνακας 1: Υπολογιζόμενες συναρτήσεις από πολυωνυμική παλινδρόμηση των μετρήσεων της σχετικής φωτεινής εξόδου (x, από 0 έως 1) και της σχετικής καταναλισκόμενης ισχύος (y, από 0 έως 1) και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2.

Δείγμα	Υπολογιζόμενη συνάρτηση $y = \alpha_1 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^1 + \alpha_4$				R^2
	α_1	α_2	α_3	α_4	
A	0,0212	0,0204	0,9315	0,027	1
B	0,0245	0,0331	0,9354	0,0069	1

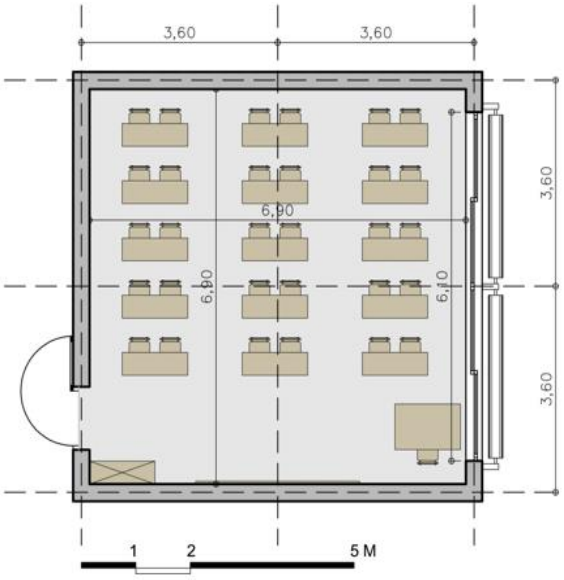
Οι συγκεκριμένες πολυωνυμικές συναρτήσεις μπορούν:

- Να προβλέψουν την ακριβή εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση τεχνητού φωτισμού σε συστήματα εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού που ελέγχονται από αισθητήρες φωτισμού.
- Να χρησιμοποιηθούν σε προγράμματα προσομοιώσεων για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς της καταναλισκόμενης ενέργειας.
- Να χρησιμοποιηθούν για τη βέλτιστη επιλογή LED driver στον αρχικό σχεδιασμό ενός συστήματος φωτισμού προσδιορίζοντας τις διαφορές της εξοικονόμησης ενέργειας μεταξύ των εξεταζόμενων LED drivers.

4. Υπολογισμοί εξοικονόμησης ενέργειας

Ο υπολογισμός της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος φωτισμού με χρήση διαφορετικών LED drivers είναι απαραίτητος για τον καθορισμό της ενεργειακής τους απόδοσης. Ο καθορισμός αυτός πραγματοποιείται υπολογίζοντας και συγκρίνοντας την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα σύστημα εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού με χρήση διαφορετικών driver. Για την παραγωγή μιας στάθμης φωτισμού που θα είναι ίδια για όλα τα LED drivers υπολογίστηκε ένα σήμα αναφοράς από ένα τυπικό αισθητήρα φωτισμού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν α) οι υπολογιζόμενες συναρτήσεις μεταξύ της σχετικής φωτεινής εξόδου και της σχετικής καταναλισκόμενης ισχύος των LED drivers από τις πειραματικές μετρήσεις και β) το σήμα αναφοράς του αισθητήρα φωτισμού από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων της λειτουργίας του σε μια τυπική σχολική αίθουσα. Εν συνεχεία υπολογίστηκε η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας στο ίδιο σύστημα φωτισμού, χρησιμοποιώντας τον ίδιο αισθητήρα φωτισμού, και αλλάζοντας μόνο τα A και B LED drivers. Από τις υπολογιζόμενες διαφορές στην εξοικονόμηση ενέργειας καθορίστηκε το αποδοτικότερο LED driver με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Για τον υπολογισμό του σήματος αναφοράς πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για μια αντιπροσωπευτική αίθουσα σχολείου (Σχήμα 3, Doulos et al 2017) στην οποία ήταν εγκαταστημένος ένας

τυπικός αισθητήρας φωτισμού. Η θέση τοποθέτησης, η στόχευση, η θέση σε λειτουργία και οι διαδικασίες βαθμονόμησης του αισθητήρα φωτισμού προσαρμόστηκαν κατάλληλα (Mistrick and Sarkar 2005, Δούλος 2010) προκειμένου να υπάρξει μια αξιόπιστη απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 3: Τυπική σχολική αίθουσα (Doulos et al 2017) Ελληνικού δημόσιου σχολείου με διαστάσεις 7,2m (μήκος) x 7,2m (πλάτος) x 3,2m (ύψος).

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Daysim, το οποίο χρησιμοποιεί την πλατφόρμα υπολογισμών Radiance. Το Daysim έχει χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικές μελέτες με αισθητήρες φωτισμού και λειτουργεί με πλήρη συμβατότητα και ακρίβεια με άλλα λογισμικά (Reinhart and Jones, 2004). Οι προσομοιώσεις εκτελέσθηκαν σε ωριαία βάση για ένα τυπικό έτος χρησιμοποιώντας κλιματικά δεδομένα για την περιοχή της Αθήνας (Αρχείο Athens, Greece, TMY). Συνολικά εξετάστηκαν δύο αλγόριθμοι ελέγχου:

- Ολοκληρωτικής λειτουργίας (Integral Reset)
- Αλγόριθμος ελέγχου κλειστού κύκλου (closed loop)

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις λειτουργικές εξισώσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για αυτούς τους δύο αλγόριθμους (Rubinstein et al 1989). Η προσομοίωση της νυχτερινής ρύθμισης (χρήση μόνο τεχνητού φωτισμού) πραγματοποιήθηκε για να καθορίσει το σήμα του αισθητήρα φωτισμού (S_{Em}) και την ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (I_{Em}), μόνο όταν προσπίπτει τεχνητός φωτισμός στον αισθητήρα φωτισμού. Το σήμα εξόδου του αισθητήρα φωτισμού υπολογίστηκε ως το ποσοστό παραγωγής τεχνητού φωτισμού δ σε ωριαίες τιμές για ένα τυπικό χρόνο.

Με τη χρησιμοποίηση του ποσοστού παραγωγής τεχνητού φωτισμού δ ως σχετική φωτεινή έξοδος στις υπολογιζόμενες συναρτήσεις των εξεταζόμενων LED drivers υπολογίστηκε η καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος φωτισμού για κάθε LED driver. Εν συνεχεία υπολογίστηκαν οι απόλυτες διαφορές στην εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ των εξεταζόμενων LED drivers. Ο Πίνακας 3 μαζί με το Σχήμα 4 παρουσιάζει την ετήσια και τις μηνιαίες τιμές εξοικονόμησης ενέργειας για τους δυο εξεταζόμενους αλγόριθμους για κάθε εξεταζόμενο LED driver. Συνολικά, η μέγιστη ετήσια διαφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ των εξεταζόμενων driver ήταν ίση με 1,97% για τον αλγόριθμο κλειστού κύκλου και 1,94% για τον αλγόριθμο ολοκληρωτικής λειτουργίας.

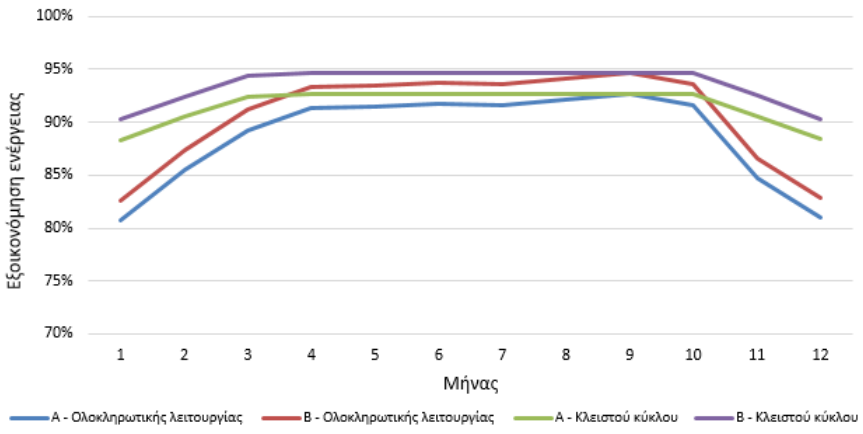
Πίνακας 2: Λειτουργικές εξισώσεις των αλγόριθμων ελέγχου (Rubinstein et al 1989).

Αλγόριθμος ελέγχου	Συνάρτηση λειτουργίας	Ένταση φωτισμού στο επίπεδο εργασίας	Αναγκαία συνθήκη
Ολοκληρωτικής λειτουργίας (Integral Reset)	$S_T(t) = S_{Em}$ $\delta = 1 - \frac{S_D(t)}{S_{Em}}$	$I_T(t) = I_D(t) + I_{Em}\left(1 - \frac{S_D(t)}{S_{Em}}\right)$	$\frac{I_D(t)}{S_D(t)} = \frac{I_{Em}}{S_{Em}}$
Κλειστού κύκλου (Closed Loop)	$\delta = M(S_T(t) - S_{Em}) + 1$ ή $\delta = \frac{1 + M(S_D(t) - S_{Em})}{1 - MS_{Em}}$	$I_T(t) = I_D(t) + I_{Em}\left(\frac{1 + M(S_D(t) - S_{Em})}{1 - MS_{Em}}\right)$ $M = \frac{I_D(t_{cal})}{I_D(t_{cal})S_{Em} - I_{Em}S_D(t_{cal})}$	$\frac{I_D(t)}{S_D(t)} = \frac{I_D(t_{cal})}{S_D(t_{cal})}$

Όπου: $S_T(t)$: το σήμα του αισθητήρα (χρονικά εξαρτώμενο), $S_D(t)$: η συνιστώσα του $S_T(t)$ για το φυσικό φωτισμό, $S_D(t_{cal})$: η συνιστώσα του $S_T(t)$ για το φυσικό φωτισμό τη χρονική στιγμή της θέσης σε λειτουργία (commissioning) του αισθητήρα, $S_E(t)$: η συνιστώσα του $S_T(t)$ για τον τεχνητό φωτισμό, δ: ο συντελεστής σχετικής παραγωγής τεχνητού φωτισμού ή η στάθμη της έντασης του τεχνητού φωτισμού ($\delta_{min} \leq \delta \leq 1$). Πλήρης απόδοση τεχνητού φωτισμού για δ=1, ελάχιστη απόδοση τεχνητού φωτισμού για δ= $\delta_{min.}$, I_{Em}: η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας για δ=1 (πλήρης απόδοση τεχνητού φωτισμού χωρίς φυσικό φωτισμό), S_{Em}: το σήμα αισθητήρα για δ=1 (πλήρη απόδοση τεχνητού φωτισμού χωρίς φυσικό φωτισμό), $I_T(t)$: η συνολική ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (χρονικά εξαρτώμενη), $I_D(t)$: η ένταση φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (χρονικά εξαρτώμενη), $I_D(t_{cal})$: η ένταση φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας τη χρονική στιγμή της θέσης σε λειτουργία (commissioning) του αισθητήρα, $I_E(t)$: η ένταση τεχνητού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (χρονικά εξαρτώμενη).

Πίνακας 3: Ετήσια και μηνιαίες τιμές εξοικονόμησης ενέργειας με τα A και B LED drivers για τον αλγόριθμο ελέγχου κλειστού κύκλου (closed loop)και ολοκληρωτικής λειτουργίας (Integral Reset).

	Εξοικονόμηση ενέργειας			
	Ολοκληρωτικής λειτουργίας		Κλειστού κύκλου	
	A	B	A	B
Ιανουάριος	80,7%	82,5%	88,3%	90,3%
Φεβρουάριος	85,5%	87,4%	90,5%	92,4%
Μάρτιος	89,3%	91,2%	92,4%	94,3%
Απρίλιος	91,3%	93,3%	92,6%	94,6%
Μάιος	91,4%	93,4%	92,6%	94,6%
Ιούνιος	91,8%	93,8%	92,6%	94,6%
Ιούλιος	91,6%	93,6%	92,6%	94,6%
Αύγουστος	92,1%	94,1%	92,6%	94,6%
Σεπτέμβριος	92,6%	94,6%	92,6%	94,6%
Οκτώβριος	91,5%	93,5%	92,6%	94,6%
Νοέμβριος	84,7%	86,6%	90,6%	92,5%
Δεκέμβριος	81,0%	82,8%	88,4%	90,3%
Ετήσια	88,6%	90,6%	91,5%	93,5%
Διαφορά	1,94%		1,97%	



Σχήμα 4: Μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας με τα A και B LED drivers για τον αλγόριθμο ελέγχου κλειστού κύκλου (closed loop)και ολοκληρωτικής λειτουργίας (Integral Reset).

5. Συμπεράσματα

Η βέλτιστη επιλογή ενός LED driver μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη αξιοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας του συστήματος φωτισμού. Οι μετρήσεις κάποιων ιδιοτήτων ενός LED driver που επηρεάζουν την ενεργειακή τους απόδοση μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σύγχρονα προγράμματα προσομοιώσεων ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η χρήση τυπικών κατανομών των τεχνικών χαρακτηριστικών τους μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένους υπολογισμούς. Για τον ακριβή υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας σε συστήματα εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού πρέπει να αναπτυχθούν νέα προγράμματα προσομοιώσεων ώστε να δέχονται πλέον, ως δεδομένα εισόδου τις τεχνικές προδιαγραφές των LED driver. Ειδικά όταν σχεδιάζονται κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης, η ακρίβεια στον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας είναι σημαντική. Στις σχολικές αίθουσες, ειδικά όταν η τροφοδοσία του συστήματος φωτισμού γίνεται από φωτοβολταϊκά πανέλα για μηδενική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το διασυνδεδεμένο δίκτυο, η ακρίβεια πρέπει να είναι ακόμα μεγαλύτερη. Ο σκοπός είναι να επιλέγεται ο αποδοτικότερος εξοπλισμός ακόμα και έχουν παρατηρηθεί διαφορές της τάξης 2% με 5% (Doulos et al 2017) στην κατανάλωση ενέργειας μεταξύ 2 driver.

Οι πολυωνυμικές συναρτήσεις που εκφράζουν τη μεταβολή της σχετικής καταναλισκόμενης ισχύος και της σχετικής φωτεινής εξόδου ενός LED driver, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν την απόδοση των συστημάτων ελέγχου φωτισμού. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προέκυψε ότι σε ένα σύστημα εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού ακόμα και μια μικρή τροποποίηση στις τεχνικές προδιαγραφές του LED driver είναι δυνατό να οδηγήσει σε διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας.

Επιπλέον, ο αλγόριθμος ελέγχου του αισθητήρα φωτισμού επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος ελέγχου φωτισμού. Η χωρική και φασματική απόκριση του αισθητήρα φωτισμού, η βαθμονόμηση και η θέση σε λειτουργία, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία του αισθητήρα (Δούλος 2010). Παρόλα αυτά, ακόμα και η βέλτιστη επιλογή του LED driver κρίνεται αναγκαία, επειδή οι διαφορές στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντικές. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, πρέπει να αναπτυχθούν νέα μοντέλα προσομοίωσης και λογισμικά, στοχεύοντας στον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας από διαφορετικά LED drivers. Οι μετρήσεις των τεχνικών χαρακτηριστικών τους μπορούν να ενισχύσουν τα υπολογιστικά προγράμματα έτσι ώστε να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Η χρήση προκαθορισμένων τιμών κατανάλωσης ενέργειας για συγκεκριμένα επίπεδα φωτισμού στα LED drivers μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρές αποκλίσεις στους υπολογισμούς.

6. Αναγνώριση - Ευχαριστία

«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»

7. Βιβλιογραφία

Δούλος Λάμπρος, "Ανάπτυξη συστήματος αυτόματης προσαρμογής του τεχνητού φωτισμού με στόχο τη βέλτιστη εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού Διδακτορική διατριβή", Οκτώβριος 2010, ΕΜΠ, Αθήνα.

Choi A., K. Song, Y. Kim, "The characteristics of photosensors and electronic dimming ballasts in daylight responsive dimming systems", Building and Environment, 40 39-50, 2005

Dimoudi, P. Kostarela, “Energy monitoring and conservation potential in schoolbuildings in the C’climatic zone of Greece”, Renewable Energy 34 (2009) 289–296.

Directive 2010/31/EU

Doulos, L., Tsangrassoulis, A., and Topalis, F.V., "Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts", Energy and Buildings, 40 (2008) 36–50

Doulos L., A. Tsangrassoulis and F. Topalis, “Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor“, Energy Conversion and Management, 86 (2014) 1069–1077

Doulos L.T., A. Tsangrassoulis, P.A. Kontaxis, A. Kontadakis, F.V. Topalis, “Harvesting daylight with LED or T5 fluorescent lamps? The role of dimming“, Energy and Buildings, 140, (2017)

Doulos L.T., M. Papadatou, A. Tsangrassoulis “Energy saving potential by retrofitting the artificial lighting system in the typical classroom in Greece“, «Energy in Buildings 2017», 6th International Conference October 21st 2017, Athens, Greece, TEE, ASHRAE Hellenic Chapter (DOI: 10.13140/RG.2.2.22209.86881)

Mandalaki, M., Zervas, K., Tsoutsos, T., Vazakas, A., 2012. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. Sol.Energy 86, 2561–2575

Mistrick R., A. Sarkar, "A study of daylight-responsive photosensor control in five daylighted classrooms", Leukos, 3 (1) 51-74, 2005

NLPIP, Specifier Report: "Dimming electronic ballasts", 7 (3), 1999

Publication CIE 70, "The measurement of absolute luminous intensity distributions", 1987.

Publication CIE 121, "The photometry and goniophotometry of Luminaires", 1996.

Reinhart Christoph, Tarek Rakha & Dan Weissman, Predicting the Daylit Area—A Comparison of Students Assessments and Simulations at Eleven Schools of Architecture, LEUKOS, 10:193–206, 2014.

Reinhart F., Jones C., "Electric lighting energy savings for an on/off photocell control - a comparative simulation study using DOE2.1 and DAYSIM", in: Proceedings of eSim 2004, Vancouver, Canada, 183-189, 2004

Reinhart Christoph F., Daniel A. Weissman, The daylit area e Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics, Building and Environment 50 (2012) 155-164.

Rubinstein F., G. Ward, R. Verderber, "Improving the performance of photo-electrically controlled lighting systems", Journal of the Illuminating Engineering Society 18 (1) 70-94, 1989

Santamouris M, Mihalakakou G, Patargias P, Gaitani N, Sfakianaki K, Papaglastra M, et al. Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings. Energy Build 2007; 39 (1): 25–51.