

Μέτρηση της λευκαύγειας α (albedo) και του συντελεστή εκπομπής e (emissivity) σωμάτων με χρήση ιδιοκατασκευασμένων ηλεκτρονικών οργάνων.

Δημητρήντσης Πέτρος¹, Μητσιώνη¹ Μαριάννα-Φανουρία, Πίπης¹ Χαρίλαος,
Χατζημπεκιάρης¹ Θανάσης.

¹ Πρότυπο Γενικό Λύκειο Ευαγγελικής Σχολής Σμύρνης

fatsas10@gmail.com, mariannaki.2000.m@gmail.com, chpipis@gmail.com, arxipelagosth@gmail.com

Επιβλέπων καθηγητής:

Δρ. Χρήστος Δ. Φανίδης

Καθηγητής Φυσικής, Πρότυπο Γενικό Λύκειο Ευαγγελικής Σχολής Σμύρνης

cdfan@sch.gr

Περίληψη

Η λευκαύγεια (α) της επιφάνειας της Γης επηρεάζει την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και επομένως το κλίμα και τους ρύπους του ατμοσφαιρικού αέρα¹. Στο αστικό περιβάλλον η λευκαύγεια των υλικών που χρησιμοποιούνται στα κτίρια επηρεάζει το μικροκλίμα και μπορεί να βελτιώσει ή να χειροτερέψει την ποιότητα του αέρα.

Η μέτρηση της λευκαύγειας της επιφάνειας της Γης κατέστη δυνατή μετά τις πρώτες πτήσεις δορυφόρων² αλλά για την μέτρηση της λευκαύγειας των οικοδομικών υλικών απαιτείται μέτρηση σε επιτόπια κλίμακα.

Στην παρούσα εργασία υπολογίζουμε την λευκαύγεια και τον συντελεστή εκπομπής από διαφορετικές επιφάνειες του σχολείου μας.

Για τον υπολογισμό αυτών των φυσικών μεγεθών απαιτείται η μέτρηση της έντασης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας E_{inc} , της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας E_{ref} και της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Για τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής θεωρούμε ότι τα μελετώμενα σώματα είναι σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον.

Για την μέτρηση της έντασης του φωτός χρησιμοποιείται ο αισθητήρας Adafruit TSL2561 Luminosity Sensor και για την μέτρηση της θερμοκρασίας ο αισθητήρας Adafruit BMP180 PCB. Οι αισθητήρες συνδέονται στην ηλεκτρονική πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα Arduino. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η πλακέτα Arduino Mega και χρησιμοποιείται ο κατάλληλος κώδικας για την διασύνδεση των αισθητήρων με τον μικροελεγκτή ο οποίος ελέγχεται από Η/Υ.

Οι τιμές της λευκαύγειας α και του συντελεστή εκπομπής e συγκρίνονται με τιμές από την βιβλιογραφία^{3, 4}.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: Περιβαλλοντική Φυσική, ρομποτική, προγραμματισμός,

Εισαγωγή

Στον αστικό ιστό η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μια από τις υψηλές προτεραιότητες για τα δημόσια αλλά και για τα ιδιωτικά κτίρια. Σε χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια όπως η δική μας ένα μεγάλο ποσό ενέργειας καταναλίσκεται για την ψύξη κτιρίων κατά τους θερινούς μήνες.

Μία πρώτη λύση είναι να μην επιτρέψουμε στο κτίριο να απορροφήσει την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με υλικά που έχουν μεγάλη ανακλαστικότητα. Έτσι η θερμοκρασία της επιφάνειας της πόλης κρατιέται χαμηλή γεγονός που μειώνει και την απόδοση φωτοχημικών αντιδράσεων που παράγουν δευτερογενείς ρύπους¹ όπως το όζον.

Η ανακλαστικότητα των υλικών περιγράφεται από την λευκαύγεια που για την μέτρησή της απαιτούνται εξειδικευμένα όργανα (πυρανόμετρα). Στην παρούσα εργασία κατασκευάζουμε ένα όργανο μικρού κόστους (της τάξης των 50 ευρώ) για την μέτρηση της λευκαύγειας των επιφανειών

Δημητρήντσης Π, Μητσιώνη Μ., Πίπης Χ., Χατζημπεκιάρης Θ. Μέτρηση λευκαύγειας α και συντελεστή εκπομπής e του σχολείου μας. Χρησιμοποιώντας στην συνέχεια τον νόμο των Stefan – Boltzmann υπολογίζουμε τον συντελεστή εκπομπής e των επιφανειών χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις μας.

Η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την μελέτη της υγείας των φυτών καθώς, μπορεί να μετρηθεί η λευκαύγεια των φύλλων των φυτών, και να μας δείξει αν ένα φυτό κάνει σωστά φωτοσύνθεση. Συνήθως τα υγιή φυτά έχουν λευκαύγεια που κυμαίνεται από 0.03 σε 0.2, ανάλογα το φυτό. Όταν η τιμή της λευκαύγειας αυξηθεί σημαίνει ότι το φυτό δεν είναι υγιές, δεν κάνει σωστά φωτοσύνθεση, με αποτέλεσμα να μην απορροφά τις ακτίνες του ήλιου. Για αυτόν τον στόχο πραγματοποιούμε μετρήσεις που θα παρουσιαστούν σε μελλοντική εργασία.

Φυσικά μεγέθη και μονάδες μέτρησης ισχύος ακτινοβολιών.

Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν ακτινοβολίες χωρίζονται σε **ακτινομετρικά (radiant)** και σε **φωτομετρικά (luminous)**.

Τα ακτινομετρικά μεγέθη καλύπτουν όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Πρακτικά όμως αν δεν μελετάμε ραδιοκύματα, μικροκύματα, ακτίνες X και γάμμα τα ακτινομετρικά μεγέθη καλύπτουν το φάσμα υπέρυθρο – ορατό – υπεριώδες και σημειώνονται με τον δείκτη e από την λέξη energetic (π.χ. I_e)

Αντίθετα τα φωτομετρικά καλύπτουν μόνο το ορατό και σημειώνονται με τον δείκτη v από την λέξη visual (π.χ. I_v)⁵

Τα ακτινομετρικά φυσικά μεγέθη περιέχουν πληροφορία από όλα τα μήκη κύματος σταθμισμένη εξ ίσου, ενώ τα φωτομετρικά μεγέθη λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι το ανθρώπινο οπτικό σύστημα είναι πιο ευαίσθητο σε κάποια μήκη κύματος σε σχέση με κάποια άλλα και ως εκ τούτου στην πληροφορία από κάθε μήκος κύματος δίνεται ένα διαφορετικό βάρος.

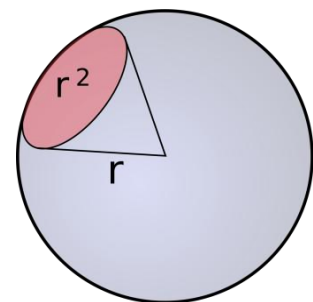
Ένταση ακτινοβολίας I_e (Radiant Intensity).

Η ένταση ακτινοβολίας I_e της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ισχύος P που προσπίπτει σε μία στερεά γωνία Ω ορίζεται ως

$$I_{e\Omega} = \frac{P}{\Omega} \quad (1)$$

και έχει μονάδες $W \cdot sr^{-1}$.

Στερεά γωνία 1 στερακτινίου (steradian) ισούται με στερεά γωνία που «βλέπει» σε τμήμα επιφάνειας σφαίρας εμβαδού σε σφαίρα ακτίνας r . Εφόσον το εμβαδόν της επιφάνειας μίας σφαίρας είναι $4\pi r^2$ η συνολική στερεά γωνία γύρω από ένα σημείο είναι $4\pi = 12,57$ sr.



Ισχύς (Ροή) ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας E_e (Irradiance - Ακτινοβολισμός).

Η ροή ακτινοβολίας E_e της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ισχύος P που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εμβαδού A ορίζεται ως

$$E_e = \frac{P}{A} \quad (1)$$

και έχει μονάδες $W.m^{-2}$.

Φωτεινή Ένταση I_V (Luminous Intensity)

Μονάδα της φωτεινής έντασης είναι το κηρίο (candela)⁶. Φωτεινή ένταση ενός κηρίου σε μία κατεύθυνση έχει πηγή κιτρινοπράσινου φωτός ($f=540.10^{12}$ Hz) που εκπέμπει 1/683 Watt ανά μονάδα στερεάς γωνίας (steradian) σε αυτή την κατεύθυνση.

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{683} \text{ Watt} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (2)$$

Φωτεινή Ροή (ή Ισχύς) Φ_V (Luminous flux)

Είναι **φωτεινή** ισχύς δηλαδή η ισχύς της ακτινοβολίας που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή **προσαρμοσμένη** στην απόκριση του ανθρώπινου ματιού. Μονάδα μέτρησης το lumen (lm) που ορίζεται ως η φωτεινή ροή που περνά από μία στερεά γωνία ενός στερακτινίου από μία πηγή φωτεινής έντασης 1 κηρίου (1 cd).

Για μονοχρωματική ακτινοβολία ορίζεται ως

$$\text{Φωτεινή ροή σε Lumens} = \text{Ισχύς ακτινοβολίας σε Watt} \times 683 \frac{\text{Lumens}}{\text{Watt}} \times \text{Αποτελεσματικότητα} \quad (3)$$

όπου η φωτεινή αποτελεσματικότητα δείχνει την απόκριση του ανθρώπινου ματιού στο συγκεκριμένο μήκος κύματος.

Για παράδειγμα στο κιτρινοπράσινο φως ($f=540.10^{12}$ Hz) η φωτεινή αποτελεσματικότητα (luminous efficacy) ορίζεται ως μονάδα (ένα)⁷.

Επομένως σε αυτή την συχνότητα κάθε ένα Watt ισχύος ακτινοβολίας αποδίδει 683 Lumens.

Η σχέση που υπολογίζει την φωτεινή ροή από μία ακτινοβολία που η ισχύς της σε σχέση με το μήκος κύματος δίνεται από την συνάρτηση $P(\lambda)$ είναι η παρακάτω⁶:

$$\Phi_V = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{360}^{830} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

Η συνάρτηση $V(\lambda)$ δείχνει την απόκριση του ανθρώπινου ματιού στα διαφορετικά μήκη κύματος

Η φωτεινή ροή Φ_V προκύπτει επομένως από μία **συνέλιξη (convolution)** της συνάρτησης ισχύος ανά μήκος κύματος της ακτινοβολίας $P(\lambda)$ με την συνάρτηση απόκρισης $V(\lambda)$ ανά μήκος κύματος του ανθρώπινου ματιού.

Το lumen επομένως είναι το φωτομετρικό ισοδύναμο του Watt που έχει τροποποιηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζει στην απόκριση του ματιού του μέσου παρατηρητή.

Φωτεινή ροή (ισχύς) ανά μονάδα επιφάνειας E_V (Illuminance - Φωτισμός)

$$E_V = \frac{\Phi_V}{A} \quad (5)$$

Είναι η ποσότητα της φωτεινής ροής που δέχεται σημείο μιας επιφάνειας κάθετα τοποθετημένης στη διεύθυνση διάδοσης του φωτός ανά μονάδα επιφάνειας.

Έχει μονάδα το $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen} / 1 \text{ m}^2$. Δηλαδή 1 lux ισοδυναμεί με φωτεινή ροή 1 lm , κατανεμημένη ομοιόμορφα σε επιφάνεια εμβαδού 1 m^2 .

Ή αλλιώς για ακτινοβολία κίτρινοπράσινου χρώματος ($f=540.10^{12} \text{ Hz}$) κάθε 1 lux αντιστοιχεί σε φωτεινή ισχύ 683 Watt η οποία είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα σε επιφάνεια εμβαδού 1 m^2 . ($\text{Lux} = 683 \times \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$)

Ορισμός της λευκαύγειας a .

Όταν σε μία αδιαφανή επιφάνεια προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ένα τμήμα της ανακλάται και ένα άλλο απορροφάται. Επειδή η επιφάνεια είναι αδιαφανής δεν υπάρχει ακτινοβολία που διαπερνά την επιφάνεια.

Αν ορίσουμε ως $E_{e,inc}$ την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας και ως $E_{e,abs}$ και $E_{e,ref}$ την ισχύ της απορροφώμενης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας αντίστοιχα, τότε λόγω της διατήρησης της ενέργειας

$$E_{e,inc} = E_{e,ref} + E_{e,abs} \quad (6)$$

Η λευκαύγεια ($albedo$) μιας επιφάνειας ορίζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας της ακτινοβολίας $E_{e,ref}$ προς την προσπίπτουσα ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας της ακτινοβολίας $E_{e,inc}$

$$a = \frac{E_{e,ref}}{E_{e,inc}} \quad (7)$$

Κάποιες φορές η λευκαύγεια αναφέρεται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος⁸.

$$a = \frac{E_{e,ref,\lambda}}{E_{e,inc,\lambda}} \quad (8)$$

Αν η μέτρηση δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος αναφέρεται σε ένα μέσο όρο στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα⁹. Οι ακτινοβολίες που συνήθως προσπίπτουν και ανακλώνται στην επιφάνεια της Γης είναι η υπέρυθη, η ορατή και η υπεριώδης.

Ορισμός του συντελεστή εκπομπής e .

Η απορροφώμενη ακτινοβολία αυξάνει την θερμοκρασία του σώματος που την απορροφά. Η απορροφώμενη ενέργεια επανεκπέμπεται από το σώμα ως ενέργεια υπέρυθρης ακτινοβολίας. Όταν η εκπεμπόμενη ενέργεια $Energy_{emit}$ ισούται με την απορροφώμενη $Energy_{abs}$, το σώμα φτάνει σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον και η θερμοκρασία του T σταθεροποιείται.

Αν θεωρήσουμε κατά προσέγγιση ότι το σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μόνο από την επιφάνεια που απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (για παράδειγμα τοίχος ή επιφάνεια οροφής) τότε στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας προκύπτει

$$Energy_{emit} = Energy_{abs} \stackrel{/\Delta t}{\Leftrightarrow} P_{emit} = P_{abs} \stackrel{/A}{\Leftrightarrow} E_{e,emit} = E_{e,abs} \quad (9)$$

Η εκπεμπόμενη ισχύς P_{emit} από μία επιφάνεια εμβαδού A και θερμοκρασίας T δίνεται από τον νόμο των Stefan - Boltzmann

$$P_{emit} = e\sigma AT^4 \quad (10)$$

όπου e ο συντελεστής εκπομπής και σ σταθερά με τιμή $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Ο συντελεστής εκπομπής e είναι καθαρός αριθμός και παίρνει τιμές μικρότερες από την μονάδα και την τιμή $e=1$ όταν το σώμα είναι ένα μέλαν σώμα (black body).

Ο συντελεστής εκπομπής ορίζεται ως

$$e = \frac{P_{emit}}{P_{emit}^{black\ body}} \quad (11)$$

Υπολογισμός του συντελεστή εκπομπής e μέσω της λευκαύγειας a .

Η εκπεμπόμενη ισχύς ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφανείας προκύπτει από τον νόμο Stefan – Boltzmann (10) ως

$$E_{e,emit} = e\sigma T^4 \quad (12)$$

Η απορροφώμενη ισχύς ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφανείας μπορεί από την (6) να υπολογιστεί ως

$$E_{e,abs} = E_{e,inc} - E_{e,ref} \Leftrightarrow E_{e,abs} = E_{e,inc} - a \cdot E_{e,inc} \Leftrightarrow E_{abs} = E_{inc}(1 - a) \quad (13)$$

Στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας ισχύει

$$E_{e,emit} = E_{e,abs} \Leftrightarrow e\sigma T^4 = E_{e,inc}(1 - a) \quad (14)$$

και επομένως

$$e = \frac{E_{e,inc}(1 - a)}{\sigma T^4} \quad (15)$$

Κατασκευή του οργάνου μέτρησης.

Για την κατασκευή του οργάνου μέτρησης χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής ανοιχτού κώδικα Arduino Mega 2560 (εικόνα 1).



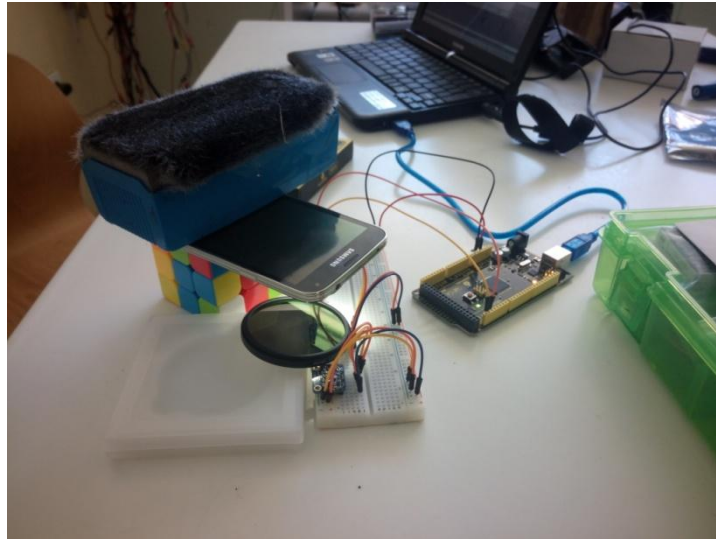
Εικόνα 1.
Ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560



Εικόνα 2.
Ο αισθητήρας φωτεινότητας.

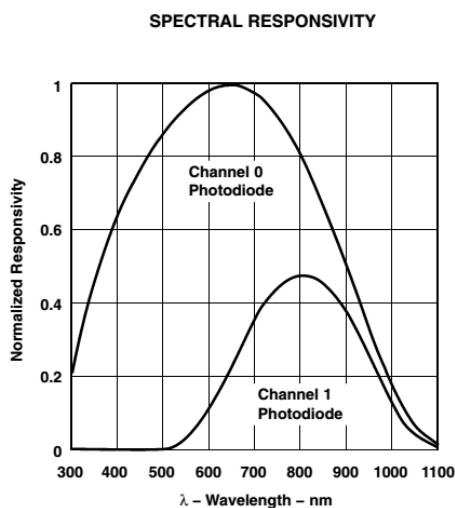
Επίσης δύο αισθητήρες μέτρησης φωτός. Ο ένας για την μέτρηση της ισχύος του προσπίπτοντος φωτός ανά μονάδα επιφανείας και ο άλλος για την μέτρηση του ανακλώμενου.

Ο αισθητήρας ανίχνευσης φωτός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο αισθητήρας φωτεινότητας Adafruit TLS2561 (εικόνα 2). Ο αισθητήρας διαθέτει φωτοδιόδους που ανιχνεύουν την ορατή (Channel 0 Photodiode) αλλά και την υπέρυθρη ακτινοβολία (Channel 1 Photodiode).

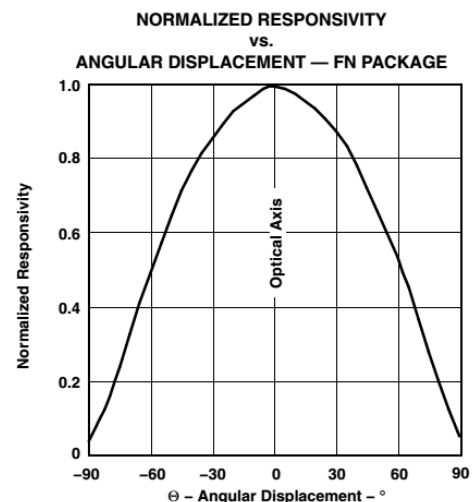


Εικόνα 3. Η πειραματική διάταξη συναρμολογημένη.

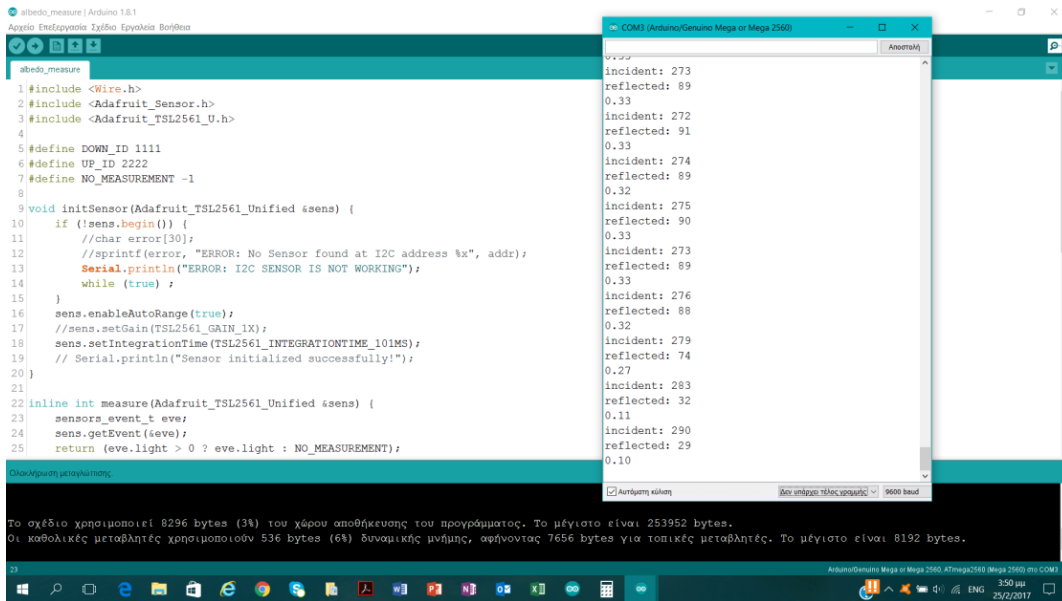
Η καμπύλη απόκρισης του αισθητήρα στα μήκη κύματος από 300 – 1100 nm για τις δύο φωτοδιόδους παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Η καμπύλη απόκρισης του αισθητήρα σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης του φωτός παρουσιάζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 1. Καμπύλη φασματικής απόκρισης για τις δύο φωτοδιόδους του αισθητήρα



Σχήμα 2. Κανονικοποιημένη καμπύλη απόκρισης σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης.



Εικόνα 4. Τμήμα του προγράμματος και το παράθυρο με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Οι τιμές από τις δύο φωτοδιόδους χρησιμοποιούνται από τον κατασκευαστή σε έναν μαθηματικό τύπο που προσεγγίζει την ανταπόκριση του ανθρώπινου ματιού και υπολογίζει το αποτέλεσμα σε φωτεινή ισχύ E_V ανά μονάδα επιφανείας σε μονάδες Lux.

Η λογική του αλγορίθμου για τον υπολογισμό της φωτεινής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας E_V σε Lux παρουσιάζεται παρακάτω.

For $0 < CH1/CH0 \leq 0.52$	$Lux = 0.0315 \times CH0 - 0.0593 \times CH0 \times ((CH1/CH0)^{1.4})$
For $0.52 < CH1/CH0 \leq 0.65$	$Lux = 0.0229 \times CH0 - 0.0291 \times CH1$
For $0.65 < CH1/CH0 \leq 0.80$	$Lux = 0.0157 \times CH0 - 0.0180 \times CH1$
For $0.80 < CH1/CH0 \leq 1.30$	$Lux = 0.00338 \times CH0 - 0.00260 \times CH1$
For $CH1/CH0 > 1.30$	$Lux = 0$

Εικόνα 5. Τμήμα του αλγορίθμου του κατασκευαστή για τον υπολογισμό της φωτεινής ισχύος.

Το αποτέλεσμα εξαρτάται από τον λόγο της τιμής $CH1/CH0$ δηλαδή από τον λόγο της μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (Channel 1 Photodiode) προς την μέτρηση που κάνει η φωτοδίοδος που ανιχνεύει την ορατή (Channel 0 Photodiode).

Ανάλογα με την τιμή του λόγου $CH1/CH0$ οι μετρήσεις από τις φωτοδιόδους διαμορφώνονται από κατάλληλους πολλαπλασιαστικούς παράγοντες.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή ο μαθηματικός τύπος έχει προκύψει εμπειρικά με οπτικό έλεγχο με πηγές πυρακτώσεως και φθορίζουσες¹⁰.

Συνδεσμολογία – Τεχνικές λεπτομέρειες.

Οι αισθητήρες συνδέθηκαν σε γραμμή δεδομένων (bus) του μικροελεγκτή Arduino Mega που χρησιμοποιεί πρωτόκολλο I2C (Inter Integrated Circuit). Το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει την σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων στην ίδια γραμμή δεδομένων και την σειριακή ανάγνωση των μετρήσεων από τους διαφορετικούς αισθητήρες ανά μικρά καθορισμένα χρονικά διαστήματα, της τάξης των ms.

Χρήση του ιδιοκατασκευασμένου οργάνου για μέτρηση της λευκαύγειας.

Επίλυση προβλημάτων.

Φωτεινή Ισχύς και Ισχύς ακτινοβολίας.

Η **φωτεινή** ισχύς είναι η ισχύς της **ακτινοβολίας** της πηγής προσαρμοσμένη στην απόκριση του ανθρώπινου ματιού στο ορατό φάσμα. Οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες μετρούν **φωτεινή** ισχύ ανά μονάδα επιφανείας E_v , όχι μόνο στο ορατό αλλά επεκτείνονται και στο υπέρυθρο φάσμα μέχρι τα 1100 nm (επομένως καλύπτουν λίγο παραπάνω από το ορατό φάσμα).

Η λευκαύγεια όμως ορίζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης ισχύος **ακτινοβολίας** ανά μονάδα επιφανείας $E_{e,ref}$ προς την προσπίπτουσα $E_{e,inc}$ στην επιφάνεια, δηλαδή καλύπτει το φάσμα της υπέρυθρης, ορατής και υπεριώδους ακτινοβολίας.

Επομένως οι μετρήσεις μας, που χρησιμοποιούν **φωτεινή** ισχύ ανά μονάδα επιφανείας, αποκλίνουν από τον ορισμό των φυσικών μεγεθών της λευκαύγειας που αναφέρονται στην ισχύ **ακτινοβολίας** ανά μονάδα επιφανείας, στο ότι είναι προσαρμοσμένες στην απόκριση του ανθρώπινου ματιού.

Η απόκλιση αυτή απαιτεί διόρθωση των μετρούμενων τιμών με βαθμονόμηση του οργάνου με πρότυπο όργανο (πυρανόμετρο). Τέτοιο όργανο υπάρχει στο ΤΕΙ Αθηνών στο Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας όμως στην παρούσα εργασία δεν ήταν χρονικά εφικτή η χρήση του οργάνου ώστε να γίνει μια τέτοια βαθμονόμηση.

Μια άλλη λύση που μπορεί να δοθεί στο πρόβλημα είναι η αποσυνέλιξη (deconvolution) της συνάρτησης $V(\lambda)$ και $P(\lambda)$ της σχέσης (4) ώστε να πάρουμε την τιμή της $P(\lambda)$. Όμως κάτι τέτοιο γίνεται μόνο με χρήση προγράμματος H/Y και χρονικά κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό να δοκιμαστεί.

Τελικά για τον υπολογισμό της λευκαύγειας α χρησιμοποιήθηκαν οι μετρηθείσες τιμές της φωτεινής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας E_v αντί της ισχύος ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφανείας E_e που υπάρχουν στον ορισμό της λευκαύγειας. Ο ορισμός της λευκαύγειας ως λόγος των δύο φωτεινών ισχύων μειώνει το πρόβλημα όπως αποδεικνύεται από τις τιμές της α που μετρήθηκαν.

Κορεσμός των αισθητήρων.

Ένα άλλο πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί ήταν ο κορεσμός των αισθητήρων σε περίπτωση απευθείας έκθεσης στο ηλιακό φως. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν μέχρι 40.000 Lux ενώ το ηλιακό φως σε απευθείας έκθεση φτάνει τα 140.000 Lux.

Για να λυθεί το πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε πάνω από τον αισθητήρα, στην απευθείας έκθεση του στο ηλιακό φως, φίλτρο φακού φωτογραφικής μηχανής ουδέτερης πυκνότητας με ND8. Αυτό το φίλτρο σύμφωνα με τον κατασκευαστή επιτρέπει την δίοδο του 1/8 της προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας.

$$E_v^{transmit} = \frac{1}{8} E_v^{incident} \quad (16)$$

Για να ελέγξουμε την ορθότητα του παράγοντα μείωσης 1/8 κάναμε μια σειρά μετρήσεων με και χωρίς φίλτρο, για φωτισμό που δεν δημιουργούσε κορεσμό στον αισθητήρα

$E_{incident, Filter}$ με Φίλτρο (Lux)	$E_{incident}$ χωρίς Φίλτρο (Lux)	$E_{incident} / E_{incident, Filter}$
35	315	9
26	250	9,615385

99	920	9,292929
33	294	8,909091
975	9200	9,435897

Μέση τιμή 9,313326

Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι ο παράγοντας μείωσης ήταν $1/9,31$ και όχι $1/8$. Άρα

$$E_{incident} = 9,31 \times E_{incident}^{filter} \quad (17)$$

Υπολογισμός του συντελεστή εκπομπής e .

Ο συντελεστής εκπομπής όπως υπολογίστηκε στην σχέση (15) περιλαμβάνει την ισχύ ανά μονάδα ακτινοβολίας σε Watt, όπως φαίνεται εξάλλου από τις μονάδες της σταθεράς σ . Για να μετατρέψουμε τα Lux σε $Watt \cdot m^{-2}$ θεωρήσαμε σε πρώτη προσέγγιση ότι φωτεινή αποτελεσματικότητα (luminous efficacy) ορίζεται ως μονάδα (ένα) για όλα τα μήκη κύματος και όχι μόνο για τα 555 nm (κιτρινοπράσινο χρώμα). Επομένως η σχέση

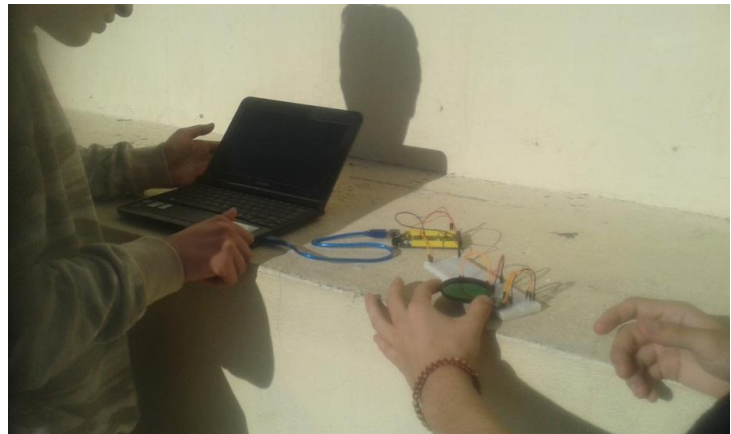
$$Lux = 683 \times \frac{Watt}{m^2} \quad (18)$$

που ισχύει για τα 555 nm εφαρμόστηκε σε όλες τις τιμές. Επομένως για την σχέση (15) υπολογίσαμε την ισχύ ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφανείας $E_{e,inc}$ μέσω της φωτεινής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας $E_{v,inc}$ από την σχέση

$$E_{e,inc} = \frac{E_{v,inc}}{683} \quad (19)$$

Διαδικασία μέτρησης

Κατά την μέτρηση των τιμών της φωτεινής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας E_V φροντίσαμε ώστε ο οπτικός άξονας του αισθητήρα προσπίπτοντος να κατευθύνεται προς την πηγή φωτισμού. Ομοίως και ο οπτικός άξονας του αισθητήρα ανακλώμενου να είναι κάθετος στην ανακλώσα επιφάνεια.



Εικόνα 6. Μέτρηση σε απευθείας ηλιακό φως.

Σε περίπτωση που ο αισθητήρας μετρούσε απευθείας ηλιακή ακτινοβολία για να αποφευχθεί ο κορεσμός του αισθητήρα τοποθετήθηκε πάνω από αυτόν το φίλτρο ουδέτερης πυκνότητας ND8. Οι μετρημένες τιμές της φωτεινής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας $E_{incident,filter}$ με πολλαπλασιασμό με 9,31 μας έδωσαν τις πραγματικές τιμές της φωτεινής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας $E_{incident}$. Οι τρεις πρώτες μετρήσεις έγιναν σε εσωτερικό χώρο με διάχυτο φωτισμό και οι υπόλοιπες μετρήσεις έγιναν σε απευθείας ηλιακό φως. Η θερμοκρασία στις τρεις πρώτες μετρήσεις που έγιναν σε εσωτερικό χώρο είναι $T_1=21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ και οι υπόλοιπες σε εξωτερικό χώρο με $T_2=18,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Αποτελέσματα των μετρήσεων

Η λευκαύγεια και ο συντελεστής εκπομπής Albedos and emissivities of urban materials depend on their components, colors, surface roughnesses, thermal admittances, solar locations and so on. T

Επιφάνεια	$E_{v,incident}$ (Lux) Με Φίλτρο	$E_{v,incident}$ (Lux) Χωρίς Φίλτρο	$E_{v,reflected}$ (Lux) Χωρίς Φίλτρο	α	$E_{e,incident} =$ $E_{v,incident} /$ 683 (Watt.m ⁻²)	e
Λευκή επιφάνεια εργαστηριακού πάγκου		950	600	0,63	1,39	0,00125
Συνθετικό ύφασμα ερυθρού χρώματος		885	358	0,40	1,30	0,00188
Συνθετικό ύφασμα μαύρου χρώματος		930	59	0,06	1,36	0,00312
Τοίχος χρώματος κίτρινου	13.450	125.220	22.716	0,18	183,34	0,367
Δάπεδο με μωσαϊκό ανοιχτόχρωμο	13.200	122.892	29.100	0,24	179,93	0,335
Δάπεδο με μωσαϊκό σκουρόχρωμο	13.350	124.289	19.100	0,15	181,97	0,376
Δάπεδο με μωσαϊκό από 5 m ύψος	12.000	111.720	27.200	0,24	163,57	0,302
Μόνωση οροφής πολυουρεθάνης	12.250	114.048	29.650	0,26	166,98	0,302
Μόνωση οροφής πολυουρεθάνης φθαρμένη	12.250	114.048	16.500	0,14	166,98	0,349
Δάπεδο γηπέδου άσφαλτος γκρι	13.200	122.892	17.350	0,14	179,93	0,377
Δάπεδο γηπέδου άσφαλτος 3m ύψος	12.700	118.237	31.450	0,27	173,11	0,310
Δάπεδο γηπέδου με κόκκινο τάπητα	13.500	125.685	6.950	0,06	184,02	0,425
Δάπεδο γηπέδου με πράσινο τάπητα	13.350	124.289	7.500	0,06	181,97	0,418
Δάπεδο γηπέδου με πράσινο τάπητα σκιά		9.200	1.750	0,19	13,47	0,027
Κήπος	13.300	123.823	11.300	0,09	181,29	0,402

Πίνακας 1. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Παρατηρούμε στα αποτελέσματα ότι οι τιμές της λευκαύγειας είναι μεγάλες για ανοιχτόχρωμες επιφάνειες και μικρές για τις σκουρόχρωμες. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι η φθαρμένη

Σύγκριση με τιμές από την βιβλιογραφία

Για τα υλικά για τα οποία μπορέσαμε να βρούμε τιμές από την βιβλιογραφία οι τιμές της λευκαύγειας α είναι εντός των ορίων πλην του τοίχου κίτρινου χρώματος.

Οι τιμές που βρήκαμε στην βιβλιογραφία⁴ για τον συντελεστή εκπομπής κυμαίνονται για τις περισσότερες επιφάνειες από 0,9 – 0,95 και άρα υπάρχει σημαντική απόκλιση με τις τιμές που υπολογίσαμε εμείς. Όμως οι τιμές της βιβλιογραφίας είναι μετρημένες σε μήκος κύματος από 8 – 14 μm δηλαδή στο υπέρυθρο φάσμα. Αντίθετα οι δικές μας μετρήσεις περιλαμβάνουν και το ορατό φάσμα. Επίσης οι δύο πρώτες τιμές του συντελεστή, που παρατίθενται στον πίνακα 2, είναι πολύ μικρές. Αυτές έχουν μετρηθεί με διάχυτο φως (λίγα Lux) και επομένως μπορεί να έχουν επηρεαστεί σημαντικά από την προσέγγιση της διαίρεσης με το 683 για την μετατροπή της φωτεινής ισχύος σε ισχύ ακτινοβολίας.

Επιφάνεια	α Μετρηθείσα	α	e Μετρηθείσα
Λευκή επιφάνεια εργαστηριακού πάγκου	0,63	Λευκό χαρτί 0.6-0.7 ¹¹	0,00125
Συνθετικό ύφασμα μαύρου χρώματος	0,06	Μαύρο βελούδο 0,004 ¹²	0,00312
Τοίχος χρώματος κίτρινου	0,18	0,35 – 0,50 ¹²	0,367
Δάπεδο γηπέδου άσφαλτος γκρί	0,14	0,12 – 0,25 ³	0,377
Κήπος	0,09	0,1 – 0,25 ¹³	0,402

Πίνακας 2. Σύγκριση μετρήσεων με τιμές από την βιβλιογραφία.

Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήσαμε ένα ιδιοκατασκευασμένο όργανο που αποτελείται από έναν μικροελεγκτή Arduino, δύο αισθητήρες φωτός για να μετρήσουμε την λευκαύγεια διάφορων επιφανειών και έναν θερμοκρασίας για τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής e .

Αν και οι αισθητήρες μετρούσαν φωτεινή ισχύ ανά μονάδα επιφανείας (illuminance) και στον ορισμό της λευκαύγειας υπάρχει ισχύς ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφανείας (irradiance) οι τιμές της λευκαύγειας που μετρήθηκαν είναι συμβατές με τις τιμές που παρέχονται από την βιβλιογραφία. Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα που προέκυψε είναι ότι η φθαρμένη μόνωση πολουρεθάνης της οροφής έχει μικρότερη λευκαύγεια από την μόνωση σε καλή κατάσταση.

Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής των επιφανειών προέκυψαν τιμές που διαφέρουν από τις τιμές της βιβλιογραφίας, που όμως είναι μετρημένες μόνο στο υπέρυθρο φάσμα.

Μία σειρά προβλημάτων, θεωρητικών και τεχνικών, επιλύθηκαν κατά την κατασκευή του οργάνου και τις μετρήσεις. Η ακρίβεια του οργάνου μπορεί όμως να βελτιωθεί αν βαθμονομηθεί με πρότυπο όργανο και κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει σε μελλοντική εργασία.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	1
Εισαγωγή.....	1
Φυσικά μεγέθη και μονάδες μέτρησης ισχύος ακτινοβολιών.....	2
Ένταση ακτινοβολίας I_e (Radiant Intensity).....	2
Ισχύς (Ροή) ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφανείας E_e	2
(Irradiance - Ακτινοβολισμός).	2
Φωτεινή Ένταση I_v (Luminous Intensity)	3
Φωτεινή Ροή (ή Ισχύς) Φ_v (Luminous flux).....	3
Φωτεινή ροή (ισχύς) ανά μονάδα επιφανείας E_v (Illuminance - Φωτισμός)	4
Ορισμός της λευκαύγειας α	4
Ορισμός του συντελεστή εκπομπής e	4
Υπολογισμός του συντελεστή εκπομπής e μέσω της λευκαύγειας α	5
Κατασκευή του οργάνου μέτρησης.	5
Συνδεσμολογία – Τεχνικές λεπτομέρειες.....	7
Χρήση του ιδιοκατασκευασμένου οργάνου για μέτρηση της λευκαύγειας.....	8
Επίλυση προβλημάτων.....	8
Φωτεινή Ισχύς και Ισχύς ακτινοβολίας.....	8
Κορεσμός των αισθητήρων.....	8
Υπολογισμός του συντελεστή εκπομπής e	9
Διαδικασία μέτρησης	9
Αποτελέσματα των μετρήσεων	10
Σύγκριση με τιμές από την βιβλιογραφία	11
Συμπεράσματα	11
Πίνακας Περιεχομένων.....	12
Αναφορές	12

Αναφορές

¹ MODELING THE IMPACTS OF LARGE-SCALE ALBEDO CHANGES ON OZONE AIR QUALITY IN THE SOUTH COAST AIR BASIN. HAIDER TAHA, *Atmospheric Environment* Vol. 31, No. 11, pp. 1667-1676, 1997.

² Satellite Measurement Program to Determine Ozone Concentration and Albedo in the Near Ultraviolet SEMIANNUAL TECHNICAL NOTE (1 Januy-30June 1962) Prepared by E. B. Mayfield and R. M. Friedman. El Segundo, California.

³ Tom Markvart; Luis CastaŁzer (2003). Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Elsevier. ISBN 1-85617-390-9.

⁴ ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 94, August 2014, Pages 194–212, Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy, Simone Kotthaus', Thomas E.L. Smith, Martin J. Wooster, C.S.B. Grimmond, <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.05.005>, σελ. 210.

⁵ http://users.ntua.gr/eglytsis/OptEng/Radiometry_Photometry_p.pdf

⁶ <http://physics.nist.gov/cuu/Units/candela.html>

⁷ <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/calibrations/sp250-37.pdf> σελ. 2.

⁸ SPECTRAL ALBEDO MEASUREMENTS IN THE UV AND VISIBLE REGION OVER DIFFERENT TYPES OF SURFACES. UWE FEISTER* and ROLF GREWE *Photochemistry and photobiology* Vol . 62, NO. 4. pp. 736-744, 1995.

⁹ Reflectance and Albedo, Surface J.A. Coakley, Oregon State University Elsevier. σελ. 1915

¹⁰ <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf> σελ. 22.

¹¹ <https://corona-renderer.com/forum/index.php?topic=2359.0>

¹² Vision: Images, Signals and Neural Networks: Models of Neural Processing in Visual Perception, Jeanny Herault, World Scientific Publishing Co Inc, σελ 15

¹³ Albedo, Endre Dobos, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemvaros, Hungary σελ. 1