



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση φορτίου  
αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κωνσταντίνος Θ. Πανταζής**

**Επιβλέπων :** Νίκος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση φορτίου αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Θ. Πανταζής

**Επιβλέπων :** Νίκος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29<sup>η</sup> Μαρτίου 2013.

.....  
Ν. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σ. Παπαθανασίου  
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Π. Γεωργιάκης  
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....  
Κωνσταντίνος Θ. Πανταζής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Πανταζής, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται, η εφαρμογή ενεργειακής διαχείρισης στα φορτία ενός δωματίου αυτόνομου κτιρίου και πως αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος, που εξυπηρετεί τις ενεργειακές ανάγκες του δωματίου. Η ενεργειακή διαχείριση επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB, έναντι της χειροκίνητης λειτουργίας από το χρήστη, με την εκμετάλλευση της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το δωμάτιο καθ' όλη της διάρκεια της ημέρας, μέσω ελέγχου των ρολών και έλεγχο του φωτισμού ανάλογα με τη φωτεινότητα στο δωμάτιο. Το υβριδικό σύστημα αποτελείται από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, μπαταρίες και μία ντιζελογεννήτρια. Με το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας HDKR υπολογίζεται η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία στο δωμάτιο και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στη φ/β γεννήτρια. Με την ανάπτυξη ενός θερμοδυναμικού μοντέλου γίνεται πρόβλεψη της θερμοκρασίας του δωματίου με την εφαρμογή της ενεργειακής διαχείρισης και κατ' επέκταση πρόβλεψη του φορτίου του κλιματιστικού. Ενώ με το μοντέλο μπαταριών KiBaM παρακολουθείται το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών. Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ, της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ μετρούνται οι αποδόσεις όλων των επιμέρους συστημάτων ενός υβριδικού, που είναι το φ/β πάνελ, ο φ/β αντιστροφέας και ο αντιστροφέας μπαταριών. Τέλος γίνονται προσομοιώσεις της λειτουργίας του υβριδικού συστήματος, αξιολογείται και παρουσιάζονται τα οικονομικά οφέλη της ενεργειακής διαχείρισης.

## Λέξεις Κλειδιά

ενεργειακή διαχείριση, υβριδικό, μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας HDKR, θερμοδυναμικό μοντέλο, αισθητήρες KNX/EIB, μοντέλο μπαταριών KiBaM, απόδοση, δείκτες αξιολόγησης

## **Abstract**

The proposal of this diploma thesis is to present how demand side management in air-condition of a room, change the behavior of the hybrid system which services the energy consumptions of the room. The demand side management is achieved with KNX/EIB sensors, which control air-condition, in contrast with the manual operation of air-condition by the user, with shutter control, which allow the absorbed solar irradiation to heat the room and light control, which deepened of the lightness in the room. The hybrid system consisted of a pv-generator, batteries and a diesel-generator. The solar irradiation model HDKR is used to find the absorbed solar irradiation in the room and the incident solar irradiation in pv-generator. A thermodynamic model is developed to predict the temperature of the room and the load of air-condition, with the demand side management. The state of charge of the batteries is estimated with KiBaM battery model. The microgrid in the Power Systems Laboratory at National Technical University of Athens is used to measure the efficiency of pv-panels, pv inverter and batter inverter. Finally simulations and evaluated indexes of the hybrid system and the economic profit of demand side management are presented.

## **Key Words**

demand side management, hybrid system, solar irradiation model HDKR, thermodynamic model, KNX/EIB sensors, battery model KiBaM, efficiency, evaluation indexes

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Παναγιώτη Ρωμανό για την καθοδήγησή του και την πολύτιμη βοήθειά του σε όλη τη πορεία της διπλωματικής. Ενέπνευσε όλη την ομάδα για την κατασκευή ενός εργαστηρίου, ώστε οι διπλωματικές εργασίες να μη μείνουν σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά να βρουν πρακτική εφαρμογή. Οργάνωσε πληθώρα τεχνικών σεμιναρίων που μας βοήθησαν στην υλοποίηση του εργαστηρίου, αλλά και θα μας φανούν πολύτιμα στην επαγγελματική μας σταδιοδρομία. Σε προσωπικό επίπεδο μου έμαθε πόσο σημαντική είναι η απόδοση ενός συστήματος και πως η θεωρία γίνεται πράξη. Μέσα από τις συζητήσεις μας έμαθα να έχω αυτοπεποίθηση και να αντιμετωπίζω καθετί δύσκολο με αρετή και τόλμη.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Νίκο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μας έδωσε να κάνουμε αυτή τη διπλωματική και να ασχοληθούμε με το εργαστήριο. Είχαμε την ελευθερία και το χρόνο να χρησιμοποιήσουμε όλο το διαθέσιμο εξοπλισμό, ώστε να βγάλουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας, αλλά ιδιαίτερα τους Νίκο Δανιήλ, Στέφανο Μπόνια και Γιώργο Τσολάκο, που μαζί καταφέραμε να ολοκληρώσουμε το εργαστήριο. Περάσαμε πολλές και ωραίες στιγμές με αποτέλεσμα πέραν του εργαστηρίου να γεννηθεί και μια πολλή καλή φιλία. Εύχομαι κάποια μέρα να συνεργαστούμε ξανά όλοι μαζί με τον ίδιο ενθουσιασμό και την ίδια δημιουργικότητα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου Θωμά και Γιαννούλα, για τη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια. Κοντά στον Πατέρα μου έμαθα τα πρώτα μυστικά της ηλεκτρολογίας και πως πρέπει να αγαπάς αυτό που κάνεις, για να τα καταφέρεις.





## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| 1. Εισαγωγή.....  | 13 |
| 1.1 Ενέργεια και Περιβάλλον.....  | 13 |
| 1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας και σύντομος οδηγός των κεφαλαίων .....  | 14 |
| 2. Περιγραφή του συστήματος και μεθοδολογία .....   | 15 |
| 2.1 Περιγραφή του δωματίου.....   | 15 |
| 2.2 Περιγραφή του υβριδικού συστήματος.....   | 15 |
| 2.3 Περιγραφή του συστήματος KNX/EIB .....  | 16 |
| 2.4 Μεθοδολογία .....   | 17 |
| 3. Υλικοτεχνικός εξοπλισμός.....  | 19 |
| 3.1 Εργαστηριακό μικροδίκτυο.....   | 19 |
| 3.2 Σύστημα μέτρησης της θερμοκρασίας στο δωμάτιο .....   | 23 |
| 4. Το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας HDKR .....   | 25 |
| 4.1 Περιγραφή του μοντέλου HDKR .....   | 25 |
| 4.2 Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το δωμάτιο .....   | 29 |
| 4.3 Αναλυτικά στοιχεία δωματίου.....  | 31 |
| 4.4 Σκίαση του δωματίου.....  | 32 |
| 4.5 Απορροφούμενη ακτινοβολία από το δωμάτιο .....  | 34 |
| 4.6 Προσπίπτουσα ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά .....   | 36 |
| 5. Το θερμοδυναμικό μοντέλο .....   | 37 |
| 5.1 Περιγραφή του θερμοδυναμικού μοντέλου .....   | 37 |
| 5.1.1 Πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής.....  | 37 |
| 5.1.2 Μεταφορά θερμότητας στα δομικά στοιχεία.....  | 38 |
| 5.1.3 Η εξίσωση του θερμοδυναμικού μοντέλου.....  | 44 |
| 5.2 Το Κλιματιστικό .....   | 45 |
| 5.3 Πρόβλεψη θερμοκρασίας στο δωμάτιο χωρίς τη χρήση κλιματιστικού.....   | 47 |
| 5.4 Χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού.....   | 49 |
| 5.5 Έλεγχος του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB .....   | 51 |
| 5.6 Σύγκριση χειροκίνητης λειτουργίας του κλιματιστικού με την ενεργειακή διαχείρισή του μέσω αισθητήρων KNX/EIB..... | 53 |
| 5.7 Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο φορτίο του κλιματιστικού.....   | 55 |
| 6. Το μοντέλο μπαταριών .....   | 59 |
| 6.1 Περιγραφή του μοντέλου μπαταριών .....  | 59 |
| 6.2 Λειτουργία του μοντέλου μπαταριών .....   | 64 |
| 7. Μετρήσεις στο εργαστήριο .....   | 67 |
| 7.1 Υπολογισμός παραμέτρων του μοντέλου μπαταριών.....  | 67 |
| 7.2 Απόδοση φωτοβολταϊκής γεννήτριας.....   | 69 |
| 7.3 Απόδοση φωτοβολταϊκού αντιστροφέα.....  | 71 |
| 7.4 Απόδοση αντιστροφέα μπαταριών .....   | 72 |
| 8. Προσομοιώσεις.....   | 75 |
| 8.1 Διαστασιολόγηση .....   | 75 |
| 8.2 Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος.....   | 76 |
| 8.3 Διαδικασία προσομοιώσεων.....   | 78 |
| 8.4 Επίδραση της ενεργειακής διαχείρισης του κλιματιστικού στο υβριδικό σύστημα .....                                 | 78 |
| 8.4.1 Σύγκριση της χειροκίνητης λειτουργίας του κλιματιστικού με τον έλεγχο του από αισθητήρες KNX/EIB.....           | 78 |
| 8.4.2 Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο φορτίο του κλιματιστικού.....   | 81 |
| 8.5 Το κόστος και τα οικονομικά οφέλη της ενεργειακής διαχείρισης.....  | 85 |

|   |    |
|---|----|
| 9. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....                         | 87 |
| Παραρτήματα .....   | 89 |
| Α. Μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για γραμμικά συστήματα.....     | 89 |
| Β. Αριθμητική μέθοδος της τέμνουσας .....                           | 90 |
| Γ. Μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για μη γραμμικά συστήματα ..... | 91 |
| Δ. Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών.....                               | 93 |
| Βιβλιογραφία .....  | 94 |

## Εικόνες

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 2.1.1 : Κάτοψη διαμερίσματος.....   | 15 |
| Εικόνα 2.2.1 : Υβριδικό σύστημα και φορτία δωματίου.....   | 16 |
| Εικόνα 2.3.1 : Ολοκληρωμένο σύστημα KNX/EIB.....   | 17 |
| Εικόνα 3.1.1 : Μικροδίκτυο.....  | 19 |
| Εικόνα 3.1.2 : Σχεδιάγραμμα του εργαστηριακού μικροδικτύου .....   | 20 |
| Εικόνα 3.1.3 : Σύστημα ανεμογεννήτριας .....   | 21 |
| Εικόνα 3.1.4 : Φορτία.....   | 21 |
| Εικόνα 3.1.5 : Ο αισθητήρας ακτινοβολίας τοποθετημένος στα φ/β πάνελ.....                                      | 22 |
| Εικόνα 3.1.6 : Πολύοργανο Deif.....  | 22 |
| Εικόνα 3.1.7 : Λογισμικό ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων του μικροδικτύου .....                               | 23 |
| Εικόνα 3.2.1 : Σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας - φωτεινότητας στο δωμάτιο .....                                  | 23 |
| Εικόνα 4.1.1 : Το ανισοτροπικό μοντέλο HDKR .....  | 28 |
| Εικόνα 4.2.1 : Διαδοχικές ανακλάσεις της ακτινοβολίας μέσα στο τζάμι .....                                     | 29 |
| Εικόνα 4.4.1: Σκίαση πλαϊνών εμποδίων .....  | 33 |
| Εικόνα 4.4.2: Σκίαση προβόλου .....  | 34 |
| Εικόνα 4.5.1: Μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.....   | 34 |
| Εικόνα 4.5.2: Απορροφούμενη ακτινοβολία από το δωμάτιο ανά m <sup>2</sup> .....                                | 35 |
| Εικόνα 4.5.3: Συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία από τη μπαλκονόπορτα του<br>δωματίου.....                     | 35 |
| Εικόνα 4.5.4: Απορροφούμενες ακτινοβολίες από το δωμάτιο στις 5/11/09.....                                     | 36 |
| Εικόνα 4.6.1: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στη φ/β γεννήτρια ανά m <sup>2</sup> .....                              | 36 |
| Εικόνα 5.1.1: Μεταφορά θερμότητας στο τοίχο.....   | 38 |
| Εικόνα 5.1.2: Μεταφορά θερμότητας μέσω των διαφόρων υλικών του τοίχου.....                                     | 41 |
| Εικόνα 5.1.3: Θερμικές ισχύς στους τοίχους του δωματίου.....   | 41 |
| Εικόνα 5.1.4: Οι διαστάσεις του δωματίου .....   | 43 |
| Εικόνες 5.1.5-5.1.10: Διαστάσεις και υλικά των δομικών στοιχείων .....   | 44 |
| Εικόνα 5.2.2: Καμπύλες απόδοσης κλιματιστικών.....   | 47 |
| Εικόνα 5.3.1: Θερμική ισχύς ανθρώπων και συσκευών.....   | 48 |
| Εικόνα 5.3.2: Θερμοκρασία πρόβλεψης του δωματίου χωρίς τη χρήση κλιματιστικού<br>για όλο το πενήθερο .....     | 48 |
| Εικόνα 5.3.3: Θερμοκρασία πρόβλεψης του μοντέλου χωρίς τη χρήση κλιματιστικού<br>στις 5/11/09.....             | 49 |
| Εικόνα 5.4.1: Μετρήσεις θερμοκρασίας για όλο το πενήθερο .....   | 51 |
| Εικόνα 5.4.2: Χρόνος λειτουργίας του κλιματιστικού κατά τη χειροκίνητη χρήση....                               | 51 |
| Εικόνα 5.5.1: Κατάσταση αισθητήρα παρουσίας και αισθητήρα θερμοκρασίας.....                                    | 52 |
| Εικόνα 5.5.2: Θερμοκρασία δωματίου με έλεγχο του κλιματιστικού μέσω.....                                       | 52 |
| αισθητήρων KNX/EIB .....   | 52 |
| Εικόνα 5.5.3: Θερμοκρασία δωματίου στις 5/11/2009 με έλεγχο του κλιματιστικού<br>μέσω αισθητήρων KNX/EIB ..... | 53 |
| Εικόνα 5.6.1: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού κατά τη χειροκίνητη λειτουργία.....                               | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 5.6.2: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού όταν ελέγχεται μέσω αισθητήρων KNX/EIB .....  | 54 |
| Εικόνα 5.6.3: Ρύθμιση θερμοκρασίας στον αισθητήρα KNX/ EIB και το κλιματιστικό .....   | 54 |
| Εικόνα 5.6.4: Χρόνος λειτουργίας κλιματιστικού .....   | 55 |
| Εικόνα 5.7.1: Θερμική ισχύς ανθρώπων και συσκευών στο δεύτερο σενάριο.....   | 55 |
| Εικόνα 5.7.2: Κατάσταση αισθητήρα παρουσίας και αισθητήρα θερμοκρασίας .....   | 56 |
| στο δεύτερο σενάριο.....   | 56 |
| Εικόνα 5.7.3: Μετρήσεις φωτεινότητας - Κατάσταση αισθητήρα παρουσίας και Dimmer .....  | 56 |
| Εικόνα 5.7.4: Θερμοκρασία δωματίου όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό .....  | 57 |
| Εικόνα 5.7.5: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό .....  | 57 |
| Εικόνα 5.7.6: Θερμοκρασία δωματίου όταν το ρολό είναι κλειστό .....  | 58 |
| Εικόνα 5.7.7: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού όταν το ρολό είναι κλειστό.....   | 58 |
| Εικόνα 6.1.1: Γραφική απεικόνιση μοντέλου μπαταριών .....  | 59 |
| Εικόνα 6.1.2: Γραφική απεικόνιση μοντέλου μπαταριών .....  | 60 |
| Εικόνα 6.1.3: Καμπύλες Χωρητικότητας – Ρεύματος Εκφόρτισης των μπαταριών για διάφορες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου .....  | 63 |
| Εικόνα 6.2.1: Επίπεδο φόρτισης του διαθέσιμου, του δεσμευμένου και του συνολικού φορτίου των μπαταριών για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα 132,5A .....                             | 65 |
| Εικόνα 6.2.2: Επίπεδο φόρτισης του διαθέσιμου, του δεσμευμένου και του συνολικού φορτίου των μπαταριών για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα 10A .....                                | 66 |
| Εικόνα 6.2.3: Επίπεδο φόρτισης του διαθέσιμου, του δεσμευμένου και του συνολικού φορτίου των μπαταριών για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα αρχικά 132,5A και στη συνέχεια 10A ..... | 66 |
| Εικόνα 7.1.1: Καμπύλη $V - I$ για την εύρεση της εσωτερικής αντίστασης $R_o$ .....   | 67 |
| της μπαταρίας.....   | 67 |
| Εικόνα 7.1.2: Εσωτερική τάση της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση .....  | 68 |
| Εικόνα 7.1.3: Εσωτερική τάση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση.....  | 69 |
| Εικόνα 7.2.1: Σύγκριση της ισχύος της φ/β γεννήτριας με την ηλιακή ακτινοβολία ..  | 70 |
| που προσπίπτει σ' αυτήν.....   | 70 |
| Εικόνα 7.2.2: Απόδοση φ/β γεννήτριας κατά τη διάρκεια της ημέρας .....   | 70 |
| Εικόνα 7.3.1: Απόδοση φ/β αντιστροφέα συναρτήσεως του επιπέδου λειτουργίας του   | 72 |
| Εικόνα 7.4.1: Απόδοση sunny island ως αντιστροφέας συναρτήσεως του επιπέδου λειτουργίας του .....  | 73 |
| Εικόνα 7.4.2: Απόδοση sunny island ως ανορθωτής συναρτήσεως του επιπέδου λειτουργίας του .....   | 74 |
| Εικόνα 8.1.1: Φορτία ηλεκτρικών συσκευών .....   | 75 |
| Εικόνα 8.4.1: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού.....  | 79 |
| Εικόνα 8.4.2: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB .....   | 79 |
| Εικόνα 8.4.3: SOC και τάση μπαταριών κατά τις προσομοιώσεις για χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού και για έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων ..                   | 81 |
| Εικόνα 8.4.4: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με το ρολό κλειστό κατά ..  | 82 |
| την απουσία του χρήστη.....  | 82 |
| Εικόνα 8.4.5: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με το ρολό ανοιχτό κατά ..  | 82 |
| τη διάρκεια της ημέρας.....  | 82 |
| Εικόνα 8.4.6: SOC και τάση μπαταριών κατά τις προσομοιώσεις για ανοιχτό και ..   | 84 |
| κλειστό ρολό .....   | 84 |

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 8.4.7: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με το επιπλέον φορτίο φωτισμού και το ρολό κλειστό..... | 84 |
| Εικόνα 8.4.8: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με φ/β γεννήτρια 990Wr ...                              | 85 |
| και το ρολό κλειστό.....   | 85 |

## Πίνακες

|   |    |
|---|----|
| Πίνακας 5.2.1 : Χαρακτηριστικά κλιματιστικού PHILCO.....  | 45 |
| Πίνακας 5.4.1 : Ωρες έναρξης και λήξης της λειτουργίας.....   | 49 |
| του κλιματιστικού κατά τη χειροκίνητη χρήση .....   | 49 |
| Πίνακας 6.1.1 : Δεδομένα εκφόρτισης των μπαταριών.....  | 61 |
| Πίνακας 6.1.2 : Τιμές παραμέτρων του μοντέλου μπαταριών.....  | 62 |
| Πίνακας 7.2.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελ της Isofoton.....  | 69 |
| Πίνακας 7.3.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του φ/β αντιστροφέα.....   | 71 |
| Πίνακας 7.4.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα μπαταριών .....                                      | 72 |
| Πίνακας 8.4.1: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με χειροκίνητη λειτουργία.....                            | 80 |
| του κλιματιστικού.....  | 80 |
| Πίνακας 8.4.2: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB ..... | 80 |
| Πίνακας 8.4.3: Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού στο σενάριο A.....  | 80 |
| Πίνακας 8.4.4: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με το ρολό κλειστό κατά την απουσία του χρήστη .....      | 82 |
| Πίνακας 8.4.5: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με το ρολό ανοιχτό όλη τη διάρκεια της ημέρας .....       | 83 |
| Πίνακας 8.4.6: Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού στο σενάριο B.....  | 83 |
| Πίνακας 8.4.7: Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού με το επιπλέον φορτίο και το ρολό κλειστό .....             | 84 |
| Πίνακας 8.5.1: Υλικά KNX/EIB για τον έλεγχο του .....   | 85 |
| κλιματιστικού με αισθητήρες.....  | 85 |
| Πίνακας 8.5.2: Υλικά KNX/EIB για τον έλεγχο του .....   | 86 |
| ρολού της μπαλκονόπορτας και του φωτισμού .....   | 86 |
| Πίνακας Δ1: Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με μεταγωγή .....  | 93 |
| Πίνακας Δ2: Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών.....  | 93 |

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Ενέργεια και Περιβάλλον

Ο σύγχρονος άνθρωπος καταναλώνει όλο και περισσότερη ενέργεια λόγω των νέων αναγκών (υπολογιστές, κλιματισμός, ηλεκτρικά τρένα) που προκύπτουν στη καθημερινότητά του. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, λιθάνθρακας, πετρέλαιο) με αποτέλεσμα να υπάρχει αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, αλλά και η εκτεταμένη καταστροφή οικοσυστημάτων, λόγω της εξόρυξης των καυσίμων αυτών.

Στα πλαίσια λοιπόν της προστασίας του περιβάλλοντος υιοθετήθηκε από ένα μεγάλο αριθμό χωρών το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο προβλέπει την επιβολή υψηλών προστίμων στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ανάλογα με τους ρύπους που παράγουν, αυξάνοντας έτσι τη τιμή της κιλοβατώρας. Ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση προχώρησε ένα βήμα παραπέρα βάζοντας στόχο έως το 2020 το 20% της καταναλισκόμενης ενέργειας να προέρχεται από Α.Π.Ε για κάθε χώρα μέλος.

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι πρέπει η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό σύστημα να γίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Αυτό όμως καθίσταται οικονομικά και τεχνικά δύσκολο, αφού οι ανανεώσιμες πηγές έχουν προς το παρόν υψηλό κόστος, μικρή απόδοση και δεν είναι πάντα διαθέσιμες.

Παράλληλα λοιπόν με την ανάπτυξη των Α.Π.Ε πρέπει να γίνεται και εξοικονόμηση ενέργειας, με σκοπό την ορθότερη χρήση και σωστότερη διαχείριση της ενέργειας που καταναλώνεται. Εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να γίνει είτε στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής μειώνοντας τις απώλειές τους, είτε στη βιομηχανία χρησιμοποιώντας πιο σύγχρονες γραμμές παραγωγής, αλλά κυρίως εφαρμόζοντας ενεργειακή διαχείριση των φορτίων στα κτίρια. Η Ελλάδα παρά το ήπιο κλίμα που διαθέτει αναδεικνύεται πρωταθλήτρια Ευρώπης στις ενεργοβόρες κατοικίες, ξεπερνώντας ακόμα και βόρειες χώρες όπως η Σουηδία, που έχουν ψυχρότερο κλίμα.

Τα κτίρια πρέπει να εκμεταλλεύονται απευθείας τον ήλιο και τον άνεμο, ώστε να λειτουργούν συμπληρωματικά με τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στα σπίτια για θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης και φωτισμό. Για να γίνει όμως αυτό πρέπει να χρησιμοποιούνται έξυπνα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης που μπορούν να αποφασίζουν ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τις καταναλώσεις του κτιρίου.

Η Ελλάδα εξαιτίας του γεωγραφικού της ανάγλυφου έχει ανάγκη από αυτόνομα συστήματα. Η χώρα μας αποτελείται από πάρα πολλά απομακρυσμένα χωριά που παρότι είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο της Δ.Ε.Η αντιμετωπίζουν προβλήματα. Αλλά κι από πολλά νησιά που είναι αποκομμένα από το κεντρικό δίκτυο και εξυπηρετούνται αποκλειστικά από ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη.

Έτσι στη παρούσα διπλωματική εφαρμόζεται ενεργειακή διαχείριση στα φορτία του κλιματιστικού και του φωτισμού και μελετάται η επίδραση της στη συμπεριφορά ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος.

## 1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας και σύντομος οδηγός των κεφαλαίων

Στη διπλωματική εργασία μελετάται πως η εφαρμογή ενός συστήματος ενεργειακής διαχείριση στα φορτία ενός δωματίου αυτόνομου κτιρίου, επιδρά στη λειτουργία του υβριδικού συστήματος, που εξυπηρετεί το δωμάτιο. Η ενεργειακή διαχείριση επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB, έναντι της χειροκίνητης λειτουργίας του από το χρήστη, με τον έλεγχο του ρολού της μπαλκονόπορτας του δωματίου, ώστε να επιτρέπεται στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας μέσα στο δωμάτιο και τον έλεγχο του φωτισμού ανάλογα με τη φωτεινότητα στο δωμάτιο. Το υβριδικό σύστημα αποτελείται από μία φ/β γεννήτρια, μπαταρίες και μία ντιζελογεννήτρια. Για τη μελέτη της ενεργειακής διαχείρισης του κλιματιστικού και της λειτουργίας του υβριδικού χρησιμοποιούνται και αναπτύσσονται διάφορα μοντέλα. Ενώ πραγματοποιούνται μετρήσεις θερμοκρασίας και φωτεινότητας στο δωμάτιο και μετρήσεις των αποδόσεων των συστημάτων που αποτελούν το υβριδικό σύστημα.

Στο **κεφάλαιο 2** περιγράφεται το δωμάτιο στο οποίο εξετάζεται η ενεργειακή διαχείριση, το υβριδικό σύστημα και τα συστήματα KNX/EIB . Επίσης αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται στη διπλωματική.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται το μικροδίκτυο του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο μικροδίκτυο έγιναν μετρήσεις στις μπαταρίες και στις αποδόσεις, των επιμέρους συστημάτων που αποτελούν το μικροδίκτυο. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις του υβριδικού συστήματος. Επίσης στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται και το σύστημα με το οποίο έγιναν οι μετρήσεις θερμοκρασίας και φωτεινότητας στο δωμάτιο του κτιρίου.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας HDKR, με το οποίο υπολογίζεται η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το δωμάτιο και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στη φ/β γεννήτρια.

Στο **κεφάλαιο 5** αναπτύσσεται ένα θερμοδυναμικό μοντέλο για το δωμάτιο που εξετάζεται, ώστε να κάνουμε πρόβλεψη της θερμοκρασίας του δωματίου και του φορτίου του κλιματιστικού, με την εφαρμογή της ενεργειακής διαχείρισης.

Στο **κεφάλαιο 6** περιγράφεται το μοντέλο μπαταριών KiBaM, το οποίο χρησιμοποιείται ώστε να γνωρίζουμε το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών.

Στο **κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο, για τον υπολογισμό των αποδόσεων των συστημάτων του μικροδικτύου, αλλά και τον προσδιορισμό παραμέτρων του μοντέλου των μπαταριών. Τα στοιχεία που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για το υβριδικό σύστημα που εξυπηρετεί το δωμάτιο.

Στο **κεφάλαιο 8** γίνεται η διαστασιολόγηση και οι προσομοιώσεις του υβριδικού συστήματος, ενώ παρουσιάζονται τα οικονομικά οφέλη της ενεργειακής διαχείρισης.

Τέλος στο **κεφάλαιο 9** παρατίθενται τα συμπεράσματα από τη διπλωματική και η μελλοντική εργασία.

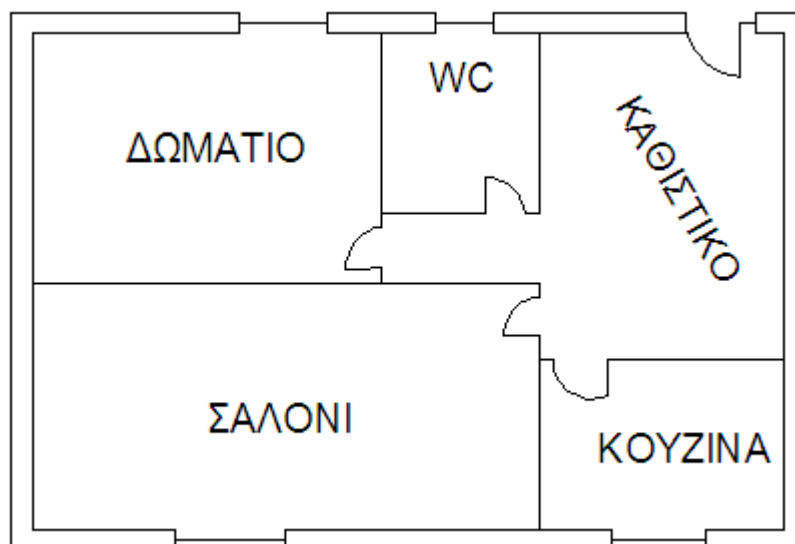
## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### 2. Περιγραφή του συστήματος και μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το δωμάτιο που εξετάζεται, το υβριδικό σύστημα και τα συστήματα KNX/EIB που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή διαχείριση. Ενώ αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται με τα διάφορα μοντέλα, ώστε να γίνει η ενεργειακή διαχείριση του κλιματιστικού και να προσομοιωθεί η λειτουργία του υβριδικού φ/β συστήματος.

#### 2.1 Περιγραφή του δωματίου

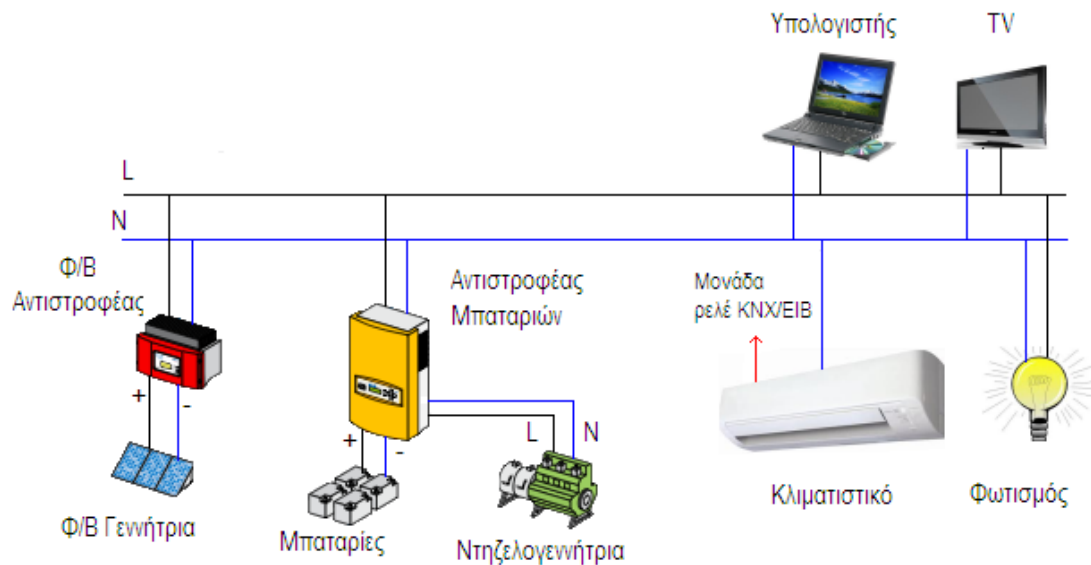
Το δωμάτιο που εξετάζεται βρίσκεται σε ένα διαμέρισμα του 1<sup>ου</sup> ορόφου, σε μια πολυκατοικία στην Ηλιούπολη. Το δωμάτιο φαίνεται στην κάτοψη του διαμερίσματος στην εικόνα (2.1.1) και διαθέτει μια μπαλκονόπορτα με νοτιοδυτικό προσανατολισμό.



Εικόνα 2.1.1 : Κάτοψη διαμερίσματος

#### 2.2 Περιγραφή του υβριδικού συστήματος

Για τη μελέτη της επίδρασης της ενεργειακής διαχείρισης του φορτίου σε αυτόνομα κτίρια, θεωρείται ένα υβριδικό φ/β σύστημα που εξυπηρετεί τις ενεργειακές ανάγκες του δωματίου. Στην εικόνα (2.2.1) παρουσιάζονται το υβριδικό σύστημα και τα φορτία του δωματίου. Το υβριδικό σύστημα αποτελείται από μία φ/β γεννήτρια, έναν φ/β αντιστροφέα, μπαταρίες, έναν αντιστροφέα μπαταριών και μία ντιζελογεννήτρια. Τα φορτία του δωματίου είναι ένας υπολογιστής, μία τηλεόραση, ο φωτισμός και το κλιματιστικό.



Εικόνα 2.2.1 : Υβριδικό σύστημα και φορτία δωματίου

## 2.3 Περιγραφή του συστήματος KNX/EIB

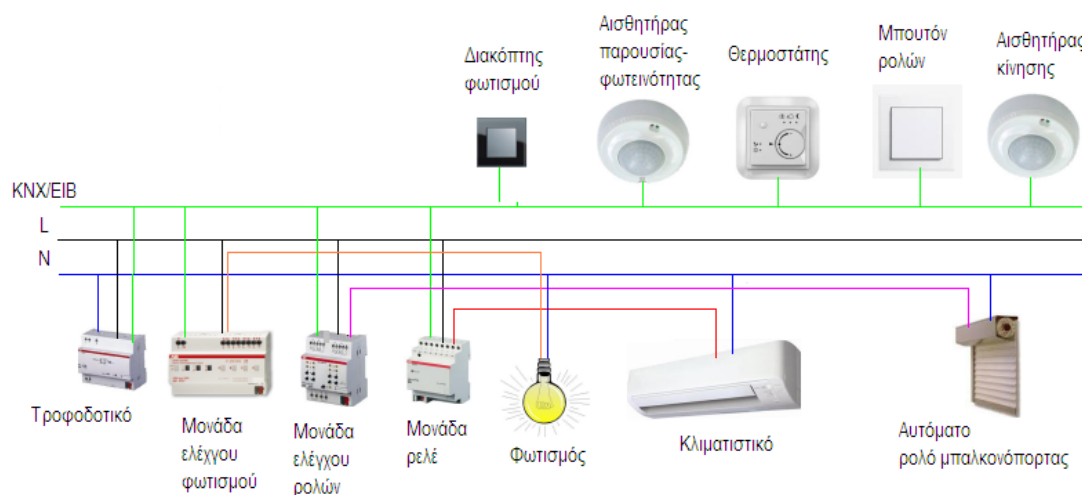
Για την ενεργειακή διαχείριση των φορτίων εξετάζονται δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο ο χρήστης βρίσκεται στο δωμάτιο από τις 20:00 το βράδυ μέχρι τις 7:00 το πρωί και συγκρίνεται ο έλεγχος του κλιματιστικού από αισθητήρες, με τη χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού από το χρήστη. Επειδή ο χρήστης βρίσκεται στο δωμάτιο μόνο τις βραδινές ώρες δεν ελέγχουμε το φωτισμό.

Στο δεύτερο σενάριο ο χρήστης βρίσκεται στο δωμάτιο τα χρονικά διαστήματα 10:00-12:00 το πρωί, 14:00-16:00 το μεσημέρι, 20:00-7:00 το βράδυ και εφαρμόζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης, που ελέγχει το κλιματιστικό και το φωτισμό του δωματίου. Το κλιματιστικό ελέγχεται από τους αισθητήρες και συγκρίνεται το φορτίο του, όταν το ρολό της μπαλκονόπορτας παραμένει κλειστό κατά την απουσία του χρήστη, με όταν είναι ανοιχτό όλη την ημέρα. Στη περίπτωση που το ρολό παραμένει ανοιχτό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας υπάρχει πρόβλημα ασφάλειας για το κτίριο. Γι' αυτό απαιτείται ένας αισθητήρας κίνησης, τοποθετημένος στο μπαλκόνι του δωματίου που θα ελέγχει το ρολό. Ο φωτισμός ελέγχεται τα χρονικά διαστήματα 10:00-12:00 και 14:00-16:00, ανάλογα με τη φωτεινότητα στο δωμάτιο.

Για το έλεγχο του κλιματιστικού από αισθητήρες χρειάζονται ένα ρελέ, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας και ένας αισθητήρας παρουσίας. Για τον έλεγχο του ρολού χρειάζονται μία μονάδα ελέγχου ρολών, ένας αισθητήρας κίνησης και ένα μπουτόν, για το άνοιγμα ή το κλείσιμο του ρολού από το χρήστη. Ενώ για τον έλεγχο του φωτισμού χρειάζεται μια μονάδα ελέγχου του φωτισμού (Dimmer ON/OFF), ένας αισθητήρας φωτεινότητας και ένας διακόπτης φωτισμού για το άνοιγμα ή το κλείσιμο του φωτισμού από το χρήστη. Ο εξοπλισμός, του ολοκληρωμένου συστήματος ενεργειακής διαχείρισης, φαίνεται στο σχεδιάγραμμα της εικόνας (2.3.1) και βασίζεται στο πρωτόκολλο KNX/EIB.



Το KNX/EIB (European Installation Bus) είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας για έξυπνες συσκευές, που προήλθε από τη συνένωση των πρωτοκόλλων EIB, Batibus και EHS για κτιριακά συστήματα από την Konnex Association. Το KNX/EIB χρησιμοποιείται στις περισσότερες νέες εγκαταστάσεις κτιρίων, αφού υποστηρίζεται από τις περισσότερες εταιρίες ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Η τοπολογία του δικτύου KNX/EIB έχει δομή δέντρου και αποτελείται από το πολύ τρία διαφορετικά επίπεδα : τη γραμμή διαύλου (bus line), τη κύρια γραμμή (main line) και τη γραμμή περιοχών (area line). Απλές εφαρμογές σαν αυτή του δωματίου μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με τη γραμμή διαύλου, στην οποία μπορούν να συνδεθούν μέχρι 64 συσκευές. [1]



Εικόνα 2.3.1 : Ολοκληρωμένο σύστημα KNX/EIB

## 2.4 Μεθοδολογία

Για τη προσομοίωση του υβριδικού χρειάζεται να γνωρίζουμε τρία πράγματα:

1. Τη παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά.
2. Το ηλεκτρικό φορτίο των καταναλώσεων του δωματίου.
3. Τη κατάσταση των μπαταριών μας κατά τη φόρτιση και την εκφόρτισή τους.

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιείται το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας HDKR, με το οποίο υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη φ/β γεννήτρια. Ενώ μετρούνται στο εργαστήριο η απόδοση της φ/β γεννήτριας και του φ/β αντιστροφέα.

Το ηλεκτρικό φορτίο χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- α) Το φορτίο ηλεκτρικών συσκευών, που θεωρείται γνωστό.
- β) Το φορτίο του κλιματιστικού, που εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες αλλά και το χρήστη. Για τον υπολογισμό του κατά τη χειροκίνητη λειτουργία λαμβάνονται μετρήσεις θερμοκρασίας στο δωμάτιο το διάστημα 2-6 Νοεμβρίου 2009. Ενώ αναπτύσσεται ένα θερμοδυναμικό μοντέλο που προβλέπει τη θερμοκρασία του δωματίου και κατ' επέκταση το φορτίο του κλιματιστικού όταν εφαρμόζεται η ενεργειακή διαχείριση.

γ) Το φορτίο του φωτισμού, που εξαρτάται από την φωτεινότητα που επικρατεί στο δωμάτιο κατά τις πρωινές και τις μεσημεριανές ώρες. Για τον υπολογισμό του λαμβάνονται μετρήσεις φωτεινότητας στο δωμάτιο το διάστημα 2-6 Νοεμβρίου 2009. Ενώ κατά τις βραδινές ώρες εξαρτάται από το χρήστη και θεωρείται γνωστό.

Για τον προσδιορισμό της κατάστασης των μπαταριών χρησιμοποιείται το μοντέλο μπαταριών KiBaM. Με το μοντέλο υπολογίζεται το επίπεδο φόρτισης και η τάση των μπαταριών. Ενώ στο εργαστήριο μετρούνται παράμετροι του μοντέλου και η απόδοση του αντιστροφέα μπαταριών.

Για το πενθήμερο από 2 έως 6 Νοεμβρίου του 2009 γίνονται οι προσομοιώσεις του υβριδικού συστήματος, για τα δύο σενάρια ενεργειακής διαχείρισης που εξετάζονται. Η συμπεριφορά του υβριδικού αξιολογείται βάσει δεικτών αξιολόγησης και του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών. Τέλος αναφέρονται τα οικονομικά οφέλη από την εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει, μέσω της ενεργειακής διαχείρισης, σε κάθε σενάριο.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### 3. Υλικοτεχνικός εξοπλισμός

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ και η διάταξη που χρησιμοποιείται, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της φωτεινότητας στο δωμάτιο.

#### 3.1 Εργαστηριακό μικροδίκτυο

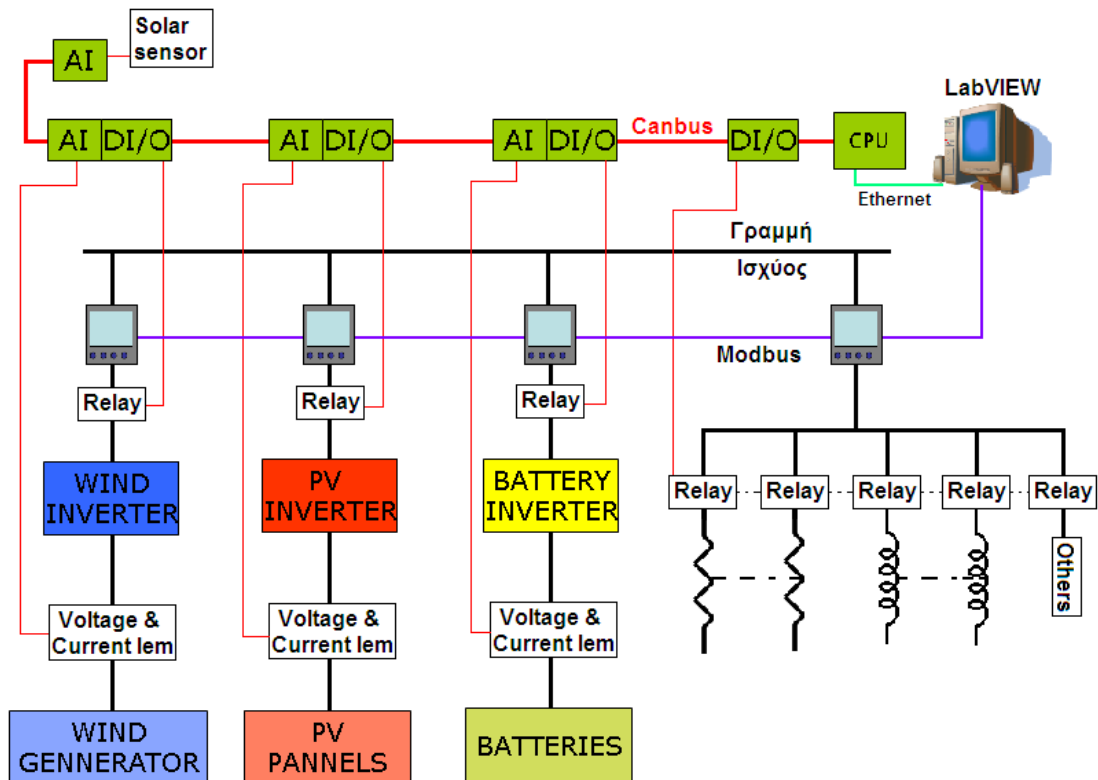
Ο λόγος για τον οποίο μελετούμε ένα μόνο δωμάτιο και όχι ολόκληρο το κτίριο είναι ότι αν η ενεργειακή διαχείριση του κλιματιστικού του δωματίου επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του υβριδικού, τότε το ίδιο θα ισχύει και για τα φορτία των υπολοίπων δωματίων του κτιρίου.

Για τη μελέτη των συστημάτων του υβριδικού χρησιμοποιείται το μικροδίκτυο του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ, που φαίνεται στην εικόνα (3.1.1). Για τις ανάγκες της διπλωματικής αναβαθμίστηκε το μικροδίκτυο του εργαστηρίου, ώστε να μπορεί να προσομοιώνει τα φορτία ενός δωματίου και να συλλέγει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Το προφίλ φορτίου του δωματίου υλοποιείται αυτόματα από το μικροδίκτυο, ώστε να καταγράφεται η πραγματική συμπεριφορά του, ότι δηλαδή θα συνέβαινε στο πραγματικό κτίριο. Για την αναβάθμιση του μικροδικτύου χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακές και αναλογικές μονάδες PLC, πολυόργανα, αισθητήρες ακτινοβολίας, πηνία και τοποθετήθηκαν αντιστάσεις στη ταράτσα του εργαστηρίου.



Εικόνα 3.1.1 : Μικροδίκτυο

Στην εικόνα (3.1.2) παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα του μικροδικτύου του εργαστηρίου.



Εικόνα 3.1.2 : Σχεδιάγραμμα του εργαστηριακού μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο της εικόνας (3.1.2) χωρίζεται σε τέσσερα μέρη:

1. Τη γραμμή ισχύος AC.
2. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας Canbus, για τον έλεγχο του μικροδικτύου και τη καταγραφή μετρήσεων.
3. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus, για τις μετρήσεις των τιμών στο AC, μέσω των πολυοργάνων.
4. Το λογισμικό ελέγχου και καταγραφής των δεδομένων του μικροδικτύου, το οποίο αναπτύχθηκε με το λογισμικό LabVIEW.

### Γραμμή ισχύος

Στη γραμμή ισχύος συνδέονται τα εξής συστήματα:

1. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελούμενο από 11 φ/β πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου των 110Wp της Isofoton, εγκατεστημένα στη ταράτσα του εργαστηρίου και ένα φ/β αντιστροφέα (SMA sunny boy) 1,2kW.
2. Ένα σύστημα μπαταριών αποτελούμενο από 30 μπαταρίες μολύβδου-οξέος OPzS 250Ah των 2V και ένα αντιστροφέα μπαταριών (SMA sunny island 4500) 3,7kW.
3. Ένα σύστημα ανεμογεννήτριας όπως φαίνεται στην εικόνα (3.1.3) αποτελούμενο από μια ανεμογεννήτρια 1kW, που βρίσκεται στη ταράτσα του εργαστηρίου, ένα μετατροπέα AC-DC (Whisper link) και έναν αντιστροφέα (SMA windy boy) 1,3kW.
4. Διάφορα φορτία όπως φαίνονται στην εικόνα (3.1.4), που είναι τα εξής: δεκαπέντε αντιστάσεις που βρίσκονται στη ταράτσα του εργαστηρίου 1kW η καθεμία, πηνία των 3kVar, λαμπτήρες διαφόρων ειδών συνολικής ισχύος 580W και ένα μοτέρ 0,5HP.

Το σύστημα της ανεμογεννήτριας καθώς και τα πηνία δε χρησιμοποιούνται στη διπλωματική.



Εικόνα 3.1.3 : Σύστημα ανεμογεννήτριας



Αντιστάσεις



Πηνία



Λαμπτήρες - Μοτέρ

Εικόνα 3.1.4 : Φορτία

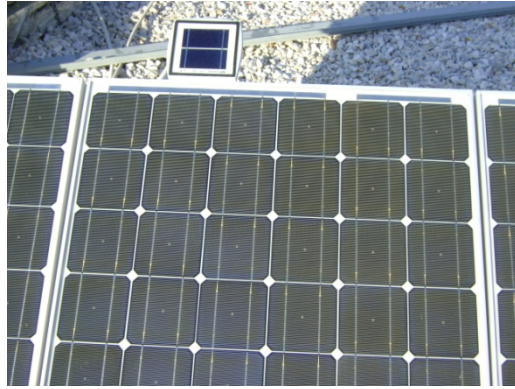
### Πρωτόκολλο επικοινωνίας Canbus

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας Canbus αποτελείται από:

1. Ψηφιακές μονάδες εισόδου / εξόδου (DI/O) που ελέγχουν ρελέ, τα οποία με τη σειρά τους ελέγχουν τα φορτία.
2. Αναλογικές μονάδες εισόδου (AI) που μετράνε τα σήματα των αισθητήρων.
3. Μία κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) και ένα τροφοδοτικό.

Τα PLC είναι της εταιρείας Golden A/S.[2] Επικοινωνούν βασίζόμενα στο πρωτόκολλο Canopen/Canbus.[3] Ενώ ο προγραμματισμός τους γίνεται με το codesys.[4]

Οι αισθητήρες είναι Iem τάσης και ρεύματος που μετράνε τη συνεχή τάση και το συνεχές ρεύμα αντίστοιχα στους αντιστροφείς και αισθητήρες ακτινοβολίας που είναι τοποθετημένοι στη ταράτσα του εργαστηρίου. Ο αισθητήρας ακτινοβολίας είναι του ερευνητικού κέντρου ISET και φαίνεται στην εικόνα (3.1.5). [5]



Εικόνα 3.1.5 : Ο αισθητήρας ακτινοβολίας τοποθετημένος στα φ/β πάνελ.

### Πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus [6] αποτελείται από πολυόργανα της εταιρείας Deif [7], όπως αυτό που φαίνεται στην εικόνα (3.1.6). Με τα πολυόργανα μετρούνται τα παρακάτω μεγέθη στο AC:

1. Ενεργός, άεργος και φαινόμενη ισχύς
2. Τάση και ρεύμα
3. Συχνότητα και συντελεστή ισχύος
4. Αρμονική παραμόρφωση τάσης και ρεύματος



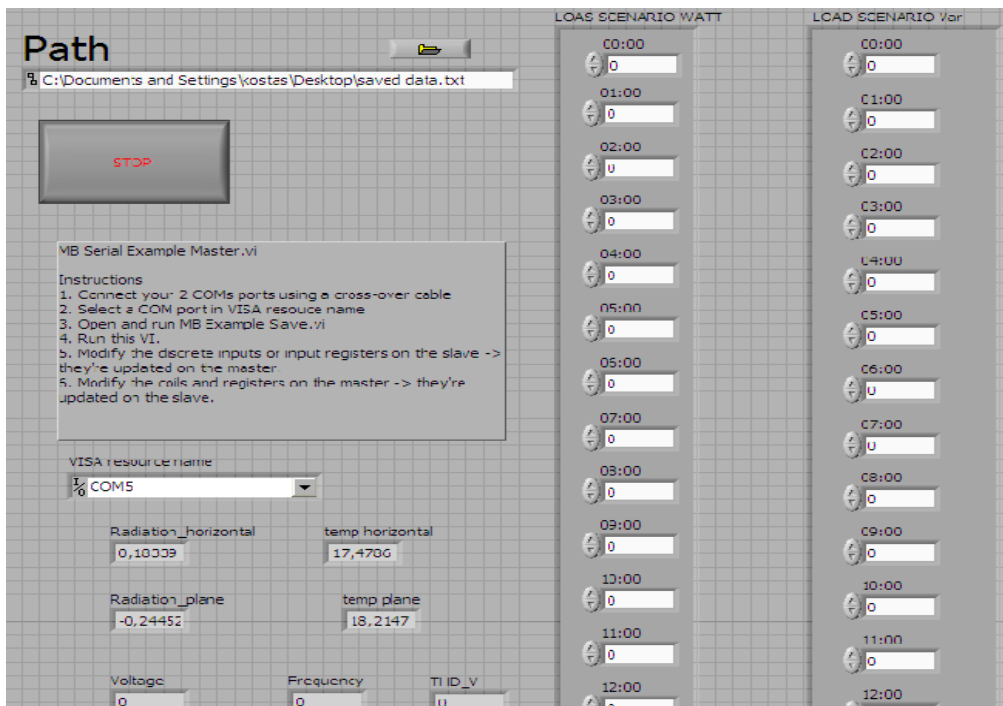
Εικόνα 3.1.6 : Πολυόργανο Deif

### Λογισμικό ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων του μικροδικτύου

Οι μονάδες των PLC επικοινωνούν με τον υπολογιστή μέσω Ethernet, ενώ τα πολυόργανα μέσω ενός μετατροπέα από RS232 σε USB. Για τον έλεγχο και τη καταγραφή μετρήσεων του μικροδικτύου αναπτύχθηκε ένα λογισμικό σε LabVIEW, που φαίνεται στην εικόνα (3.1.7). [8], [9]

Μέσω του λογισμικού υλοποιείται ένα σενάριο φορτίων ανά ώρα και καταγράφονται οι μετρήσεις.

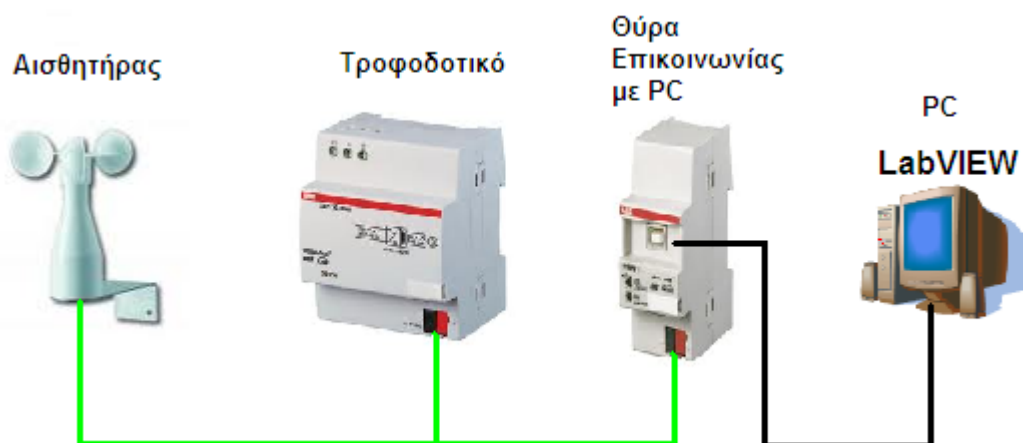
Για τις ανάγκες της διπλωματικής υλοποιήθηκε ένα σενάριο φορτίων αντιπροσωπευτικό του δωματίου και καταγράφηκαν μετρήσεις που αφορούν τις μπαταρίες, τα φωτοβολταϊκά, τον φ/β αντιστροφέα και τον αντιστροφέα των μπαταριών. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο.



Εικόνα 3.1.7 : Λογισμικό ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων του μικροδικτύου

### 3.2 Σύστημα μέτρησης της θερμοκρασίας στο δωμάτιο

Στο δωμάτιο μετρήθηκε η θερμοκρασία και η φωτεινότητα με ένα σύστημα, βασισμένο στο KNX/EIB, που φαίνεται στην εικόνα (3.2.1). Το σύστημα μέτρησης αποτελείται από έναν αισθητήρα, ένα τροφοδοτικό και μία θύρα επικοινωνίας με τον υπολογιστή, της εταιρίας ABB.[10] Ο αισθητήρας μετρά θερμοκρασία, φωτεινότητα και υγρασία . Για τις ανάγκες της διπλωματικής καταγράφηκαν η θερμοκρασία και η φωτεινότητα του δωματίου στον υπολογιστή, με ένα πρόγραμμα στο LabVIEW.



Εικόνα 3.2.1 : Σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας - φωτεινότητας στο δωμάτιο





## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### 4. Το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας HDKR

Το μοντέλο HDKR (Hays-Davies-Klucher-Reindl) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το δωμάτιο και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στα φ/β πάνελ. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας και παρατίθενται τα διαγράμματα ηλιακής ακτινοβολίας, για το δωμάτιο και τα φ/β πάνελ, το πενήνήμερο που εξετάζεται.[11]

#### 4.1 Περιγραφή του μοντέλου HDKR

Το μοντέλο HDKR υπολογίζει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οποιαδήποτε κεκλιμένη επιφάνεια, βάσει μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο.

Για τη θέση του ήλιου ως προς τη κεκλιμένη επιφάνεια και άρα της γωνίας με την οποία η άμεση ακτινοβολία προσπίπτει στη επιφάνεια χρειάζονται οι κάτωθι γωνίες:

1) **Το γεωγραφικό πλάτος(φ)** όπου βρίσκεται η επιφάνεια, με το βόρειο ημισφαίριο να έχει θετικές τιμές. Εύρος τιμών  $-90^{\circ} \leq \gamma \leq 90^{\circ}$ .

2) **Ο προσανατολισμός (γ)** της επιφάνειας με το μηδέν να βρίσκεται στο νότο, ανατολικά να γίνεται αρνητικός και δυτικά θετικός. Εύρος τιμών  $-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$ .

3) **Η κλίση (β)** της επιφάνειας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Εύρος τιμών  $0 \leq \beta \leq 180^{\circ}$ .

4) **Η ηλιακή απόκλιση (δ)**, που είναι η γωνία απόκλισης του επιπέδου του ισημερινού της γης από την ευθεία που ενώνει το κέντρο του ήλιου μ' αυτό της γης. Εύρος τιμών  $-23,45^{\circ} \leq \gamma \leq 23,45^{\circ}$ . Δίνεται από την εξίσωση (4.1).

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (4.1)$$

όπου n η ημέρα του χρόνου που αναφερόμαστε με τη 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου να έχει n=1.

5) **Η ωριαία γωνία (ω)**, που αντιπροσωπεύει τη τοπική ηλιακή ώρα και είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου από το τοπικό μεσημβρινό καθώς η γη περιστρέφεται. Κάθε ώρα αντιστοιχεί σε γωνιακή μετατόπιση  $15^{\circ}$ . Με σημείο αναφοράς το ηλιακό μεσημέρι  $0^{\circ}$  έχουμε αρνητικές γωνίες το πρωί και θετικές το απόγευμα.

6) **Η γωνία πρόσπτωσης (θ)**, που είναι η γωνία μεταξύ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή και δίνεται από την εξίσωση (4.2).

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (4.2)$$

7) Η γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ), που είναι η γωνία πρόσπτωσης σε οριζόντια επιφάνεια. Δίνεται από την εξίσωση (4.2) αν θέσουμε όπου  $\beta=0$ .

Ανάλογα τη μέρα του χρόνου που εξετάζεται έχουμε διαφορετική διάρκεια ημέρας και νύχτας μέσα στο 24ώρο. Η εξίσωση (4.3) μας δίνει τη διάρκεια της ημέρας.

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4.3)$$

Όλοι οι υπολογισμοί του μοντέλου γίνονται βάσει της ηλιακής ώρας. Για τη μετατροπή της τοπικής ώρας, στην ηλιακή ώρα χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.4),(4.5) και (4.6).

$$\text{Solar time} - \text{standard time} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (4.4)$$

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B) \quad (4.5)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (4.6)$$

όπου,

solar time: η ηλιακή ώρα, δηλαδή η γωνία  $\omega$ , εκφρασμένη σε λεπτά.

standard time: η ώρα της περιοχής όπου εξετάζεται, στη παρούσα εργασία αυτή της Ελλάδας.

$L_{st}$ : ο μεσημβρινός από τον οποίο καθιερώνεται η χειμερινή ώρα της Ελλάδας και είναι  $L_{st} = -30^\circ$ .

$L_{loc}$ : ο μεσημβρινός της περιοχής που εξετάζεται, στη παρούσα εργασία αυτός της Αθήνας και είναι  $L_{loc} = -24^\circ$ .

Η ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται ωριαία, ημερήσια και μηνιαία. Στη παρούσα εργασία ο υπολογισμός γίνεται ωριαία για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η ωριαία ακτινοβολία που φτάνει από τον ήλιο σε μια οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα της γης ονομάζεται εξωγήινη και δίνεται από την εξίσωση (4.7).

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta] \quad (4.7)$$

όπου  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  είναι η ηλιακή σταθερά με  $\omega_2 > \omega_1$ .

Η ύπαρξη όμως ατμόσφαιρας έχει σαν αποτέλεσμα η πραγματική ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια να είναι διαφορετική από την εξωγήινη. Εκτός λοιπόν από την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία υπάρχει και η διαχεόμενη που σχετίζεται με τα σύννεφα της ατμόσφαιρας.

Λόγω του φαινομένου της διάχυσης το μοντέλο ορίζει ένα δείκτη καθαρότητας της ατμόσφαιρας  $k_T$  που δίνεται από το τύπο (4.8).

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (4.8)$$

όπου  $I$  είναι η συνολική ωριαία μετρούμενη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.

Η ακτινοβολίας διάχυσης δίνεται από την εξίσωση (4.9).

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,09k_T & \text{για } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 & \text{για } 0,22 < k_T \leq 0,8 \\ -16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 & \text{για } k_T > 0,8 \\ 0,165 & I \end{cases} \quad (4.9)$$

Ενώ η άμεση ακτινοβολία θα δίνεται από την εξίσωση (4.10).

$$I_b = I - I_d \quad (4.10)$$

Σε μία κεκλιμένη επιφάνεια εκτός από την άμεση και τη διαχεόμενη ακτινοβολία θα υπάρχει και η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία, οπότε τη προσπίπτουσα ακτινοβολία αποτελούν τρεις συνιστώσες:

**Η άμεση (beam)  $I_b$** , που είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει κατευθείαν στην επιφάνεια.

**Η διάχυσης (diffuse)  $I_d$** , που είναι η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια, αφού πρώτα σκεδαστεί από τα σύννεφα της ατμόσφαιρας και ανακλαστεί μέσα σ' αυτά.

**Η ανακλώμενη από το έδαφος (ground reflected)  $I_{refl}$** , που είναι η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια, αφού πρώτα ανακλαστεί στο έδαφος.

Εάν παραμείνουμε σ' αυτή την ανάλυση το μοντέλο λέγεται ισοτροπικό και η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο δίνεται από την εξίσωση (4.11).

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (4.11)$$

όπου,

$\rho_g$ : είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους.

$R_b$ : είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο και δίνεται από την εξίσωση (4.12).

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4.12)$$

Σαν συντελεστή ανάκλασης από το έδαφος θεωρείται ένας ενιαίος συντελεστής για τα διαφορετικά αντικείμενα που αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία στο χώρο που εξετάζεται.

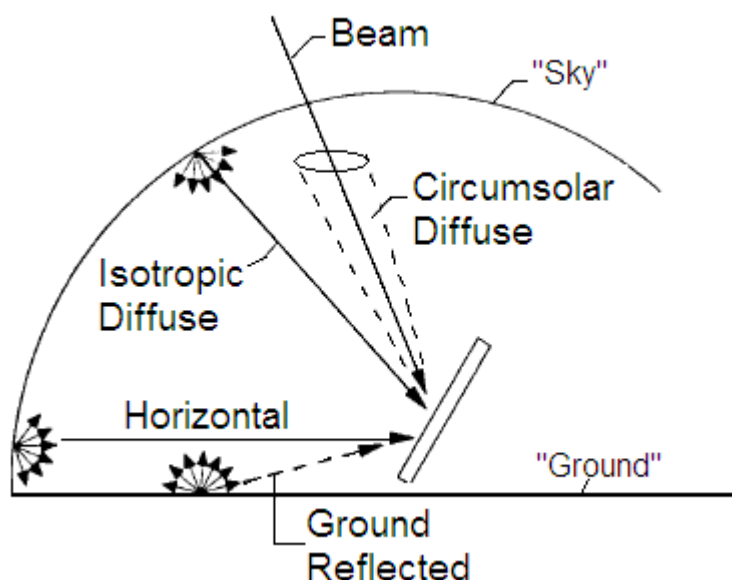
Το μοντέλο HDKR βασίζεται στη παραδοχή ότι η διαχεόμενη συνιστώσα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αναλύεται σε τρεις επιμέρους συνιστώσες, οι οποίες είναι:

**Η ισοτροπική διαχεόμενη ( isotropic diffuse)  $I_{d,iso}$**  , που ορίζεται όπως η προηγούμενη ακτινοβολία διάχυσης.

**Η περιηλίουσα (circumsolar diffuse)  $I_{d,cs}$**  , που είναι η ακτινοβολία διάχυσης που σχηματίζεται από τον ηλιακό δίσκο.

**Η ακτινοβολία από τον ορίζοντα ( horizon diffuse)  $I_{d,horiz}$**  , που είναι η ακτινοβολία διάχυσης λόγω της φωτεινότητας του ορίζοντα.

Η πλήρης ανάλυση του μοντέλου στις επιμέρους ακτινοβολίες φαίνεται στην εικόνα (4.1.1).



Εικόνα 4.1.1 : Το ανισοτροπικό μοντέλο HDKR

Για την ανάλυση της ακτινοβολίας διάχυσης στις τρεις συνιστώσες το μοντέλο ορίζει:

i) Έναν ανισοτροπικό δείκτη  $A_i$ , που αντιπροσωπεύει το τρόπο μετάδοσης της άμεσης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και ισούται με  $A_i = \frac{I_b}{I_o}$ .

ii) Ένα παράγοντα  $f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)$  για τη φωτεινότητα του ορίζοντα, όπου  $f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$ .

Επομένως η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο σύμφωνα με το ανισοτροπικό μοντέλο HDKR θα δίνεται από την εξίσωση (4.13).

$$I_{T,HDKR} = \begin{cases} I_b \cdot R_b & \text{Προσπίπτουσα} \\ +I_d \cdot A_i \cdot R_b & \text{Περιηλιούσα} \\ +I_d \cdot (1-A_i) \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) & \text{Ισοτροπικά διαχεόμενη} \\ +I_d \cdot (1-A_i) \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \cdot f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) & \text{Ακτινοβολία από τον ορίζοντα} \\ +I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) & \text{Ανακλώμενη από το έδαφος} \end{cases} \quad (4.13)$$

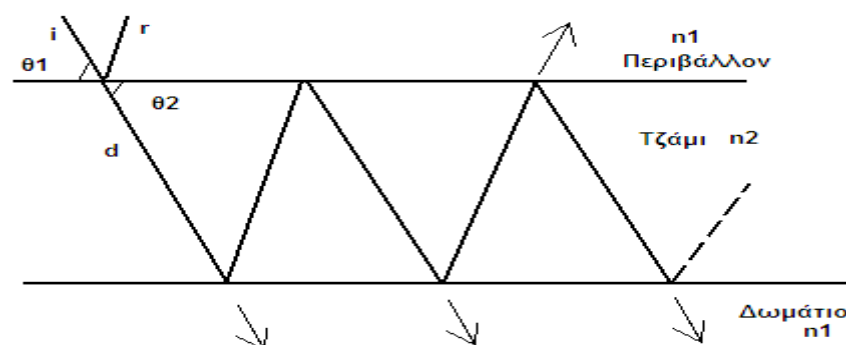
## 4.2 Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το δωμάτιο

Με το ανισοτροπικό μοντέλο HDKR υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στο τζάμι. Για να βρεθεί η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το δωμάτιο χρειάζονται ένας συντελεστής μετάδοσης του τζαμιού και ένας συντελεστής απορρόφησης του δωματίου.

### Ο συντελεστής μετάδοσης του τζαμιού

Η μετάδοση, η ανάκλαση και η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα υλικά εξαρτάται από παράγοντες του υλικού, όπως π.χ ο δείκτης διάθλασης, που με τη σειρά τους εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για το τζάμι θεωρείται ότι οι παράγοντες αυτοί είναι ανεξάρτητοι του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

Όταν μια ακτινοβολία (i) προσπίπτει με γωνία  $\theta_1$  ως προς τη κάθετο σ' μια διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, τότε δημιουργείται μια ανακλώμενη ακτινοβολία (r) ίσης γωνίας και μια διαθλώμενη ακτινοβολία (d), γωνίας  $\theta_2$  ως προς τη κάθετο. Το τζάμι που μελετάται έχει δύο διαχωριστικές επιφάνειες μία ως προς τον αέρα του περιβάλλοντος και μία ως προς τον αέρα του δωματίου με αποτέλεσμα να συμβαίνουν διαδοχικές ανακλάσεις, όπως φαίνονται στην εικόνα (4.2.1).



Εικόνα 4.2.1 : Διαδοχικές ανακλάσεις της ακτινοβολίας μέσα στο τζάμι

Αν αγνοηθεί το φαινόμενο της απορρόφησης που συμβαίνει μέσα στο τζάμι, ο συντελεστής μετάδοσης λόγω των απωλειών των διαδοχικών ανακλάσεων δίνεται από την εξίσωση (4.14).

$$\tau_r = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1-r_{\square}}{1+r_{\perp}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\square}} \right) \quad (4.14)$$

όπου  $r_{\perp}$ ,  $r_{\square}$  είναι η κάθετη και η παράλληλη συνιστώσα αντίστοιχα τη μη πολωμένης ακτινοβολίας και δίνονται από τις εξισώσεις (4.15) και (4.16) αντίστοιχα.

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.15) \quad , \quad r_{\square} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (4.16)$$

Οι γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  δίνονται από το τύπο (4.17) του snell.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (4.17)$$

όπου  $n_1 = 1$  και  $n_2 = 1,526$  οι δείκτες διάθλασης του αέρα και του γυαλιού αντίστοιχα.

Αν θεωρηθεί ότι συμβαίνει μόνο το φαινόμενο της απορρόφησης, τότε ο συντελεστής μετάδοσης δίνεται από την εξίσωση (4.18).

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{K \cdot L}{\cos \theta_2}\right) \quad (4.18)$$

όπου  $L$  το πάχος του τζαμιού και  $K$  ο συντελεστής εξάλειψης, που σχετίζεται με το πόσο σκούρο είναι το τζάμι.

Αν ληφθούν υπόψη και οι δύο λόγοι απωλειών, ο συντελεστής μετάδοσης με μια καλή προσέγγιση θα δίνεται από την εξίσωση (4.19).

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \quad (4.19)$$

Ο συντελεστής μετάδοσης εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ . Στη περίπτωση της άμεσης και της περιηλίουσας ακτινοβολίας έχουμε  $\theta_1 = \theta$ . Για την ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία, την ακτινοβολία διάχυσης και την ακτινοβολία από τον ορίζοντα χρησιμοποιούνται σταθερές γωνίες που προκύπτουν από την εξίσωση (4.21).

$$\theta = \begin{cases} 90 - 0,5788 \cdot \beta - 0,002693 \cdot \beta^2 & \text{ανακλώμενη από έδαφος} \\ 59,7 - 0,1388 \cdot \beta + 0,001497 \beta^2 & \text{ακτιν. διάχυσης - ορίζοντα} \end{cases} \quad (4.21)$$

## Ο συντελεστής απορρόφησης του δωματίου

Ο συντελεστής απορρόφησης του δωματίου δίνεται από την εξίσωση (4.20).

$$a_{eff} = \frac{a_i}{a_i + (1 - a_i)\tau_d \cdot \frac{A_a}{A_i}} \quad (4.20)$$

όπου,

$a_i$ : η απορροφητικότητα των εσωτερικών επιφανειών του δωματίου. Το δωμάτιο περιέχει διάφορα έπιπλα, γι' αυτό επιλέγεται μια μέση τιμή 0,45.

$\tau_d$ : ο συντελεστής μετάδοσης του τζαμιού για γωνία  $60^\circ$ , που αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία που ανακλάται από τους τοίχους στο εσωτερικό του δωματίου.

$A_a$ : η επιφάνεια του τζαμιού.

$A_i$ : η επιφάνεια των εσωτερικών τοίχων.

## Η απορροφούμενη ακτινοβολία

Η συνολική απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το δωμάτιο δίνεται από την εξίσωση (4.22).

$$S = (I_b + I_d \cdot A_i) \cdot R_b \cdot (\tau\alpha)_b + I_d \cdot (1 - A_i) \cdot (\tau\alpha)_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \cdot \left[1 + f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + I \cdot \rho_g \cdot (\tau\alpha)_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (4.22)$$

όπου τα  $(\tau\alpha)_b$ ,  $(\tau\alpha)_d$ ,  $(\tau\alpha)_g$  προκύπτουν από τη γενική εξίσωση (4.23).

$$(\tau\alpha)_n = \tau \cdot a_{eff} \cdot (\tau\alpha) / (\tau\alpha)_n \quad (4.23)$$

όπου,

$\tau$ : ο συντελεστής μετάδοσης από την εξίσωση (4.19) για την ανάλογη γωνία πρόσπτωσης.

$a_{eff}$ : από την εξίσωση (4.20).

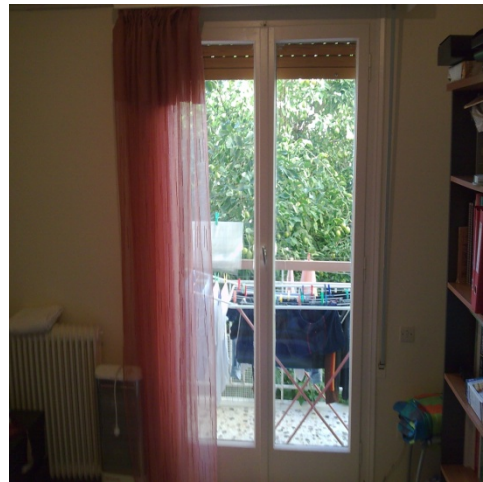
$(\tau\alpha) / (\tau\alpha)_n$ : είναι ο λόγος γωνιακής εξάρτησης ([11] - εικόνα 5.6.1).

## 4.3 Αναλυτικά στοιχεία δωματίου

Το δωμάτιο βρίσκεται σε ένα διαμέρισμα του 1<sup>ου</sup> όροφου μιας πολυκατοικίας στην Ηλιούπολη. Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο δωμάτιο από το τζάμι της μπαλκονόπορτας, που έχει προσανατολισμό νοτιοδυτικό και βλέπει σε ακάλυπτο χώρο. Μια κάτοψη του διαμερίσματος φαίνεται στην εικόνα (4.3.1) ενώ το εσωτερικό του δωματίου φαίνεται στην εικόνα (4.3.2).



Εικόνα 4.3.1 : Κάτοψη διαμερίσματος



Εικόνα 4.3.2: Εσωτερικό δωματίου

**Για το δωμάτιο έχουμε τα εξής στοιχεία:**

- 1) Γεωγραφικό πλάτος ( $\phi$ ):  $37,95^\circ$
- 2) Γεωγραφικό μήκος ( $\lambda_{loc}$ ):  $23,75^\circ$
- 3) Προσανατολισμός ( $\gamma$ ):  $20^\circ$
- 4) Επιφάνεια τοίχων ( $A_i$ ):  $67,7 \text{ m}^2$

**Για το τζάμι της μπαλκονόπορτας έχουμε τα εξής στοιχεία:**

- Κλίση ( $\beta$ ):  $90^\circ$   
 Πάχος ( $L$ ):  $3\text{mm}$   
 Συντελεστής εξάλειψης ( $K$ ):  $4 \text{ m}^{-1}$   
 Επιφάνεια:  $1,51 \text{ m}^2$

Ο συντελεστή ανάκλασης  $\rho_g$  θεωρείται ίσος με  $0,4$ .

#### 4.4 Σκίαση του δωματίου

Εξαιτίας γειτονικών εμποδίων που υπάρχουν εκατέρωθεν της μπαλκονόπορτας, όπως φαίνεται στην εικόνα (4.3.1), υπάρχει σκίαση του δωματίου ορισμένες ώρες της ημέρας. Για τον υπολογισμό της σκίασης χρησιμοποιείται η ηλιακή γωνία αζιμούθιου ( $\gamma_s$ ).

**Ηλιακή γωνία αζιμούθιου ( $\gamma_s$ ):** είναι η γωνιακή μετατόπιση από το νότο, της προβολής της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Δυτικά έχουμε αρνητικές τιμές, ανατολικά θετικές και δίνεται από την εξίσωση (4.23).

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (4.23)$$

Στην εικόνα (4.4.1) φαίνονται οι γωνίες  $\gamma_s$  κατά τις οποίες δημιουργείται σκίαση στο δωμάτιο. Κατά τις πρωινές ώρες υπάρχει σκίαση για  $\gamma_s > \gamma_{s1}$ . Σύμφωνα με την εικόνα (4.4.1) το  $\gamma_{s1}$  θα είναι :

$$\gamma_{s1} = 90^\circ - 59^\circ - 20^\circ = 11^\circ$$



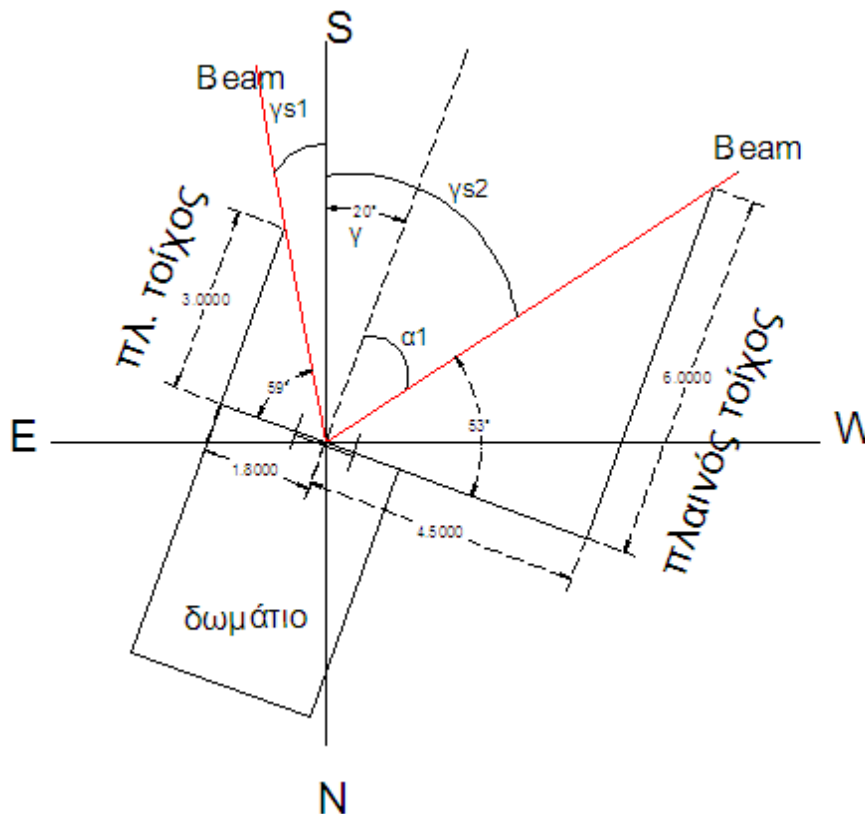
Από την εξίσωση (4.23) το  $\gamma_s$  νοτιοανατολικά είναι αρνητικό, οπότε θα υπάρχει σκίαση για  $\gamma_s < -11^\circ$  ή η μπαλκονόπορτα θα δέχεται την άμεση και την περιηλίουσα ακτινοβολία μετά τις 11:30 το πρωί.

Κατά τις απογευματινές ώρες υπάρχει σκίαση για  $\gamma_s > \gamma_{s2}$ . Από την εικόνα (4.4.1) το  $\gamma_{s2}$  θα είναι :

$$\gamma_{s2} = \alpha_1 + 20^\circ \Rightarrow$$

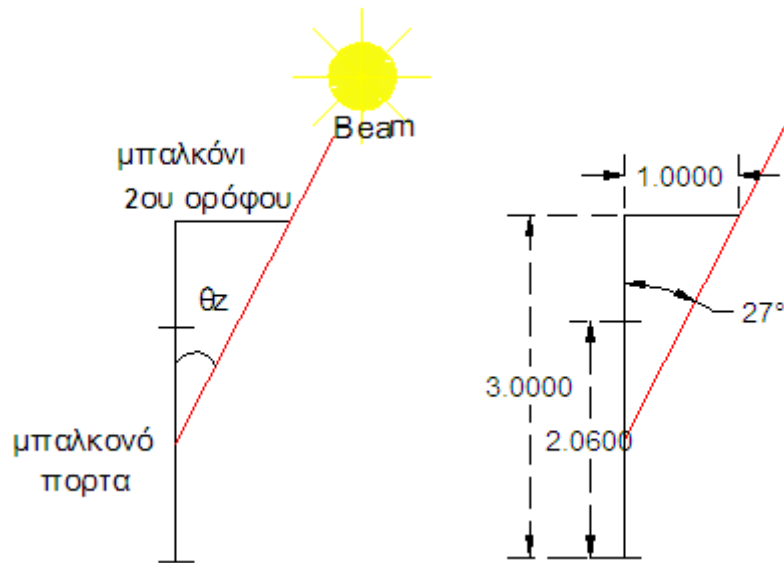
$$\gamma_{s2} = 90^\circ - 53^\circ + 20^\circ = 57^\circ$$

Το απόγευμα λοιπόν θα υπάρχει σκίαση για  $\gamma_s > 57^\circ$  ή η μπαλκονόπορτα δε θα δέχεται την άμεση και την περιηλίουσα μετά τις 16:00.



Εικόνα 4.4.1: Σκίαση πλαϊνών εμποδίων

Σκίαση μπορεί να υπάρχει και από το μπαλκόνι του πάνω ορόφου όπως φαίνεται στην εικόνα (4.4.2). Στο πενήμερο όμως που εξετάζεται το  $\theta_z$  είναι μικρότερο από  $27^\circ$ , οπότε η μπαλκονόπορτα δεν θα σκιάζεται από το πρόβολο του 2<sup>ου</sup> ορόφου.

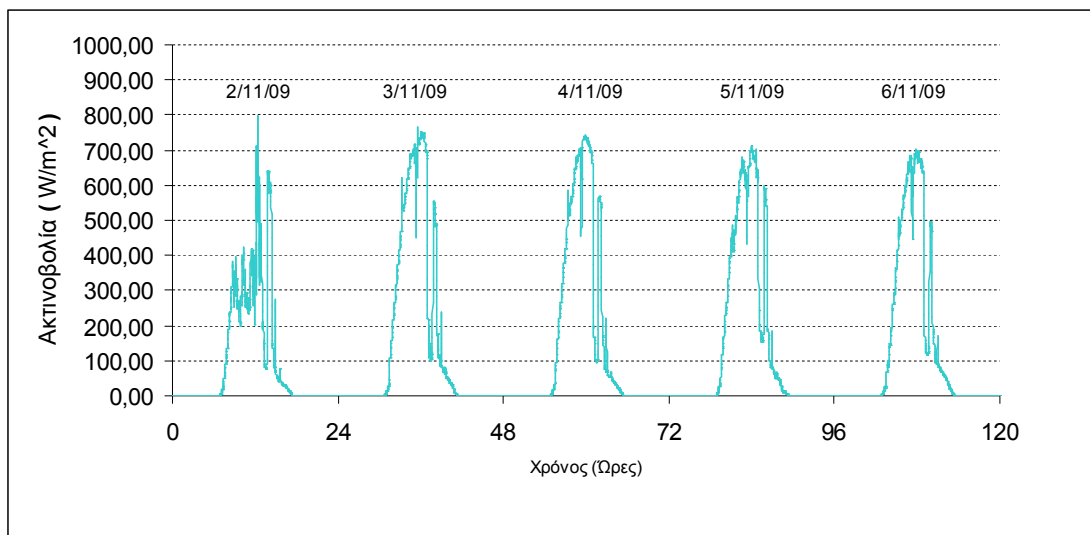


Εικόνα 4.4.2: Σκίαση προβόλου

#### 4.5 Απορροφούμενη ακτινοβολία από το δωμάτιο

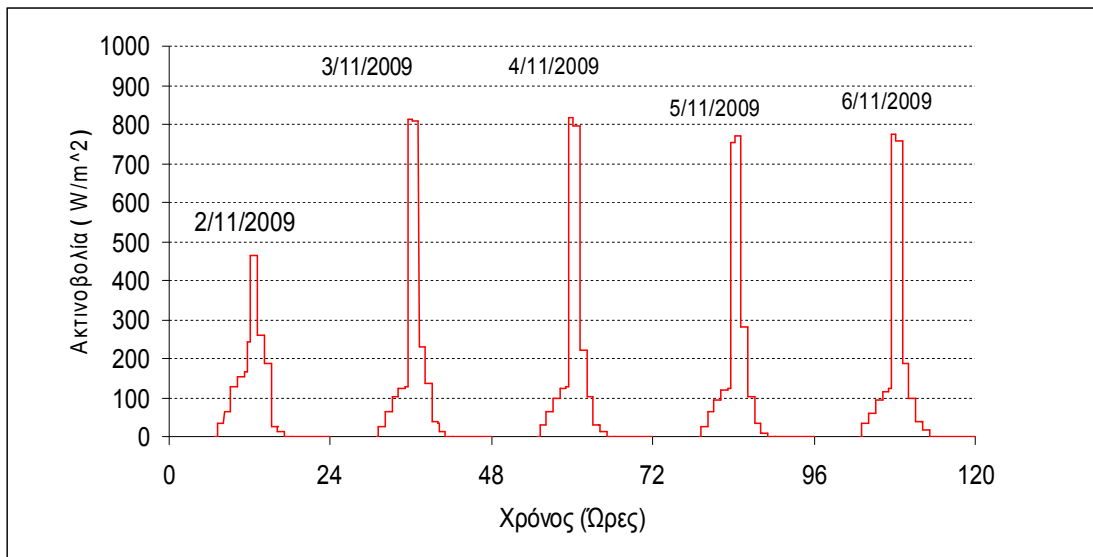
Το μοντέλο HDKR χρησιμοποιεί μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις ανά 47sec από τη περιοχή του Γέρακα.

Στην εικόνα (4.5.1) φαίνεται η μετρούμενη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για το πενήνήμερο που εξετάζεται.



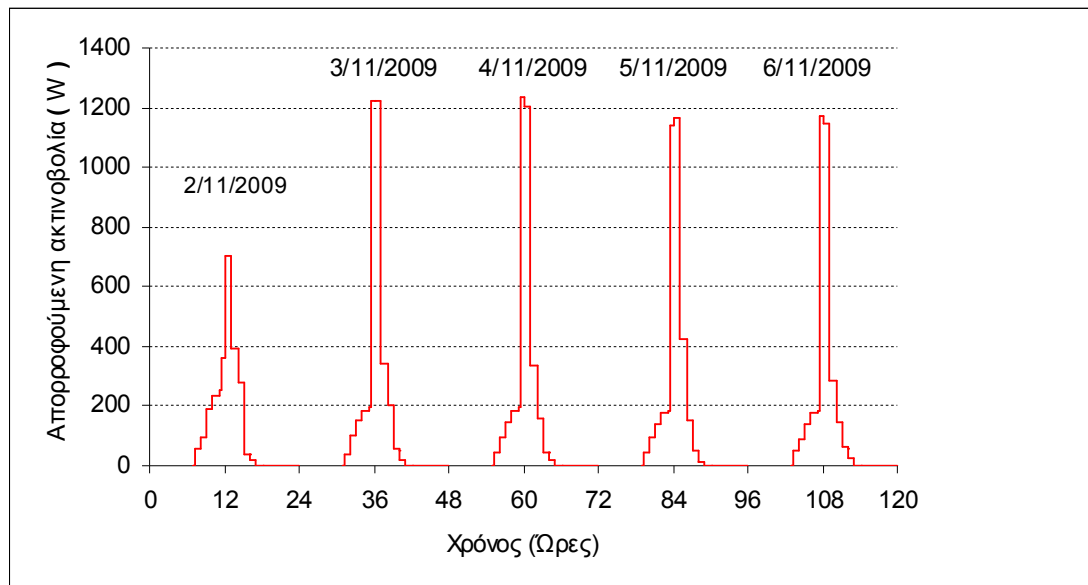
Εικόνα 4.5.1: Μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο

Στην εικόνα (4.5.2) φαίνεται η απορροφούμενη ακτινοβολία από το δωμάτιο ανά τετραγωνικό μέτρο, όπως προκύπτει από την εξίσωση (4.22) του μοντέλου HDKR.



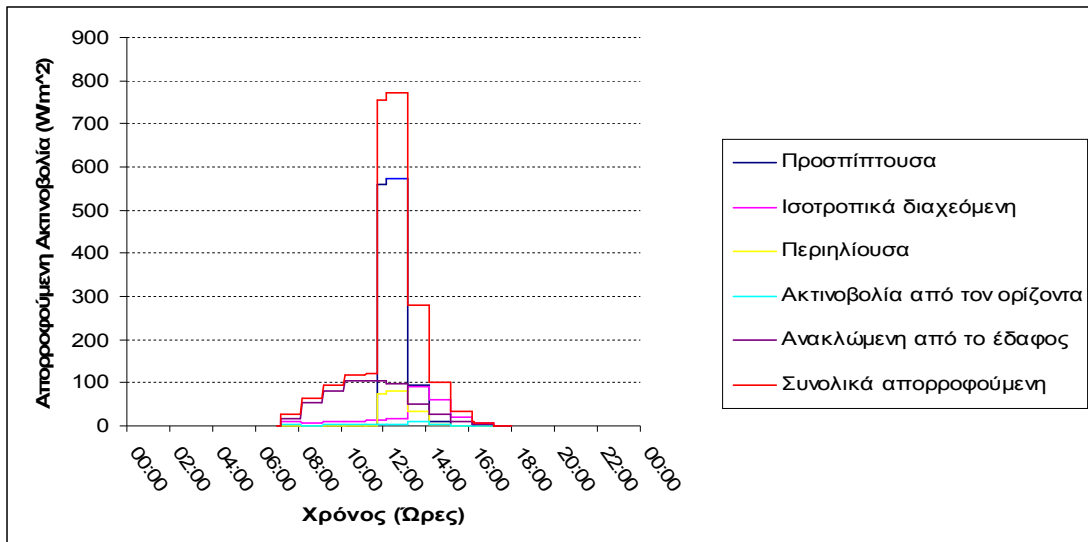
Εικόνα 4.5.2: Απορροφούμενη ακτινοβολία από το δωμάτιο ανά m<sup>2</sup>

Στην εικόνα (4.5.3) φαίνεται η συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία από τη μπαλκονόπορτα του δωματίου.



Εικόνα 4.5.3: Συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία από τη μπαλκονόπορτα του δωματίου

Στην εικόνα (4.5.4) φαίνονται αναλυτικά οι ακτινοβολίες που απορροφά το δωμάτιο στις 5/11/09.



Εικόνα 4.5.4: Απορροφούμενες ακτινοβολίες από το δωμάτιο στις 5/11/09

#### 4.6 Προσπίπτουσα ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά

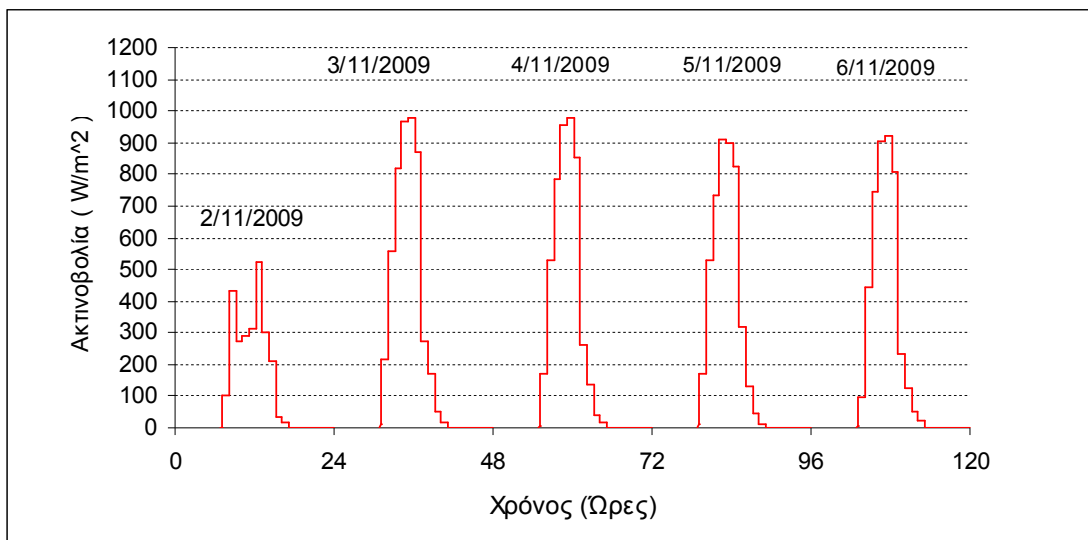
**Στοιχεία των φ/β πάνελ του εργαστηρίου:**

Συνολική επιφάνεια:  $9,5\text{m}^2$

Προσανατολισμός: Νότιος

Κλίση:  $30^\circ$

Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.13), ενώ δεν υπάρχουν προβλήματα σκίασης. Στην εικόνα (4.6.1) φαίνεται η προσπίπτουσα στα πάνελ ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 4.6.1: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στη φ/β γεννήτρια ανά  $\text{m}^2$

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### 5. Το θερμοδυναμικό μοντέλο

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το θερμοδυναμικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται για τη πρόβλεψη της θερμοκρασίας του δωματίου. Οι προσομοιώσεις που γίνονται για τα δύο σενάρια, δείχνουν πως μέσω των αισθητήρων KNX/EIB επιτυγχάνεται η ενεργειακή διαχείριση του κλιματιστικού.

#### 5.1 Περιγραφή του θερμοδυναμικού μοντέλου

##### 5.1.1 Πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής

Το δωμάτιο θεωρείται ένα κλειστό σύστημα που περιέχει αέρα. Η μάζα του αέρα θεωρείται σταθερή και δεν μεταβάλλεται.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής δίνεται από την εξίσωση (5.1). [12]

$$\Delta E = Q - W \Rightarrow \Delta U + \Delta P + \Delta K = Q - W \quad (5.1)$$

Η εξίσωση (5.1) μας πληροφορεί ότι οποιαδήποτε μεταβολή στην ενέργεια του συστήματος ( $\Delta E$ ) ισούται με τη διαφορά, της ενέργειας που εισήλθε στο σύστημα με τη μορφή θερμότητας ( $Q$ ), από την ενέργεια που εξήλθε από το σύστημα μέσω κάποιου έργου ( $W$ ).

Στο δωμάτιο πραγματοποιείται μεταβολή μόνο της εσωτερικής ενέργειας ( $U$ ) του αέρα. Ενώ δεν υπάρχει κάποια μεταβολή στη κινητική ( $K$ ) ή τη δυναμική ( $P$ ) ενέργεια του αέρα και δεν παράγεται κάποιο έργο μέσα στο δωμάτιο. Επομένως αν η εξίσωση (5.1) εκφραστεί στιγμιαία προκύπτει η εξίσωση (5.2).

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} \quad (5.2)$$

Η μάζα του αέρα θεωρείται σταθερή και από τη περαιτέρω ανάλυση της στιγμιαίας μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας της εξίσωσης (5.2) προκύπτει η εξίσωση (5.3). [12]

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} = \dot{Q} &\Rightarrow \frac{d(m \cdot u)}{dt} = \dot{Q} \Rightarrow m \frac{du \cdot dT_{in}}{dT_{in} \cdot dt} = \dot{Q} \Rightarrow \rho \cdot V \cdot \frac{du \cdot dT_{in}}{dT_{in} \cdot dt} = \dot{Q} \Rightarrow \\ &\rho \cdot V \cdot c_v \cdot \frac{dT_{in}}{dt} = \dot{Q} \end{aligned} \quad (5.3)$$

όπου,

m: η μάζα του αέρα του δωματίου.

u: η ειδική εσωτερική ενέργεια.

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα.

V: ο όγκος του δωματίου.

$c_v$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα για σταθερό όγκο.  
 $T_{in}$ : η θερμοκρασία του δωματίου.

Το  $\dot{Q}$  της εξίσωσης (5.3) αναλύεται στις επιμέρους θερμικές ισχύς που συμβαίνουν στο δωμάτιο και προκύπτει η εξίσωση (5.4).

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}} + \dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}} + \dot{Q}_{\text{ΗΛΙΟΥ}} + \dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}} + \dot{Q}_{\text{ΔΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}} \quad (5.4)$$

όπου,

$\dot{Q}_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}}$ : θερμική ισχύς από τους ανθρώπους που βρίσκονται στο δωμάτιο (50W/άτομο). [13]

$\dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}}$ : θερμική ισχύς από συσκευές που λειτουργούν μέσα στο δωμάτιο (λάμπα 60W, τηλεόραση 100W, Laptop 100W).

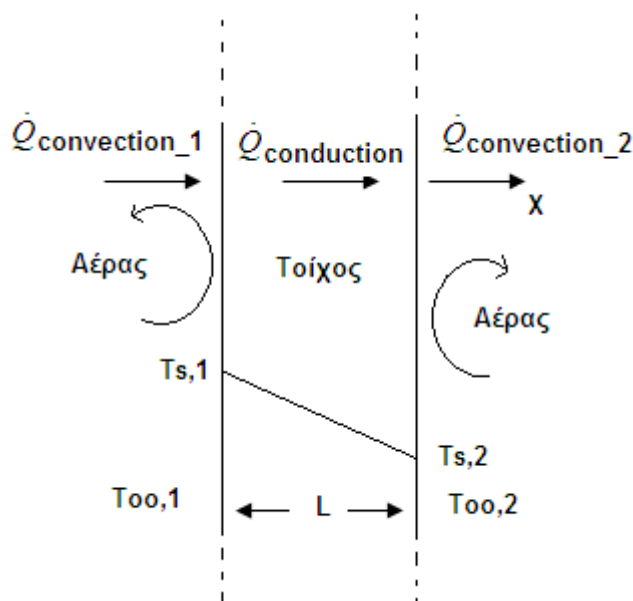
$\dot{Q}_{\text{ΗΛΙΟΥ}}$ : θερμική ισχύς από τον ήλιο, που εισέρχεται στο δωμάτιο μέσω του τζαμιού της μπαλκονόπορτας και είναι ίση με την απορροφούμενη από το δωμάτιο ηλιακή ακτινοβολία, όπως φαίνεται στην εικόνα (4.5.3).

$\dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}$ : θερμική ισχύς από το κλιματιστικό. Στο πενήμημερο του Νοεμβρίου που εξετάζεται έχουμε για το κλιματιστικό λειτουργία θέρμανσης. Η λειτουργία του κλιματιστικού παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα (5.2).

$\dot{Q}_{\text{ΔΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}}$ : θερμική ισχύς που εξέρχεται από το δωμάτιο προς το περιβάλλον και τους γειτονικούς χώρους και παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα (5.1.2).

### 5.1.2 Μεταφορά θερμότητας στα δομικά στοιχεία

Στα δομικά στοιχεία γίνεται μεταφορά θερμότητας με αγωγή (conduction) και μεταγωγή (convection), ενώ δε λαμβάνεται υπόψη ο τρίτος τρόπος που είναι η ακτινοβολία (radiation). Στην εικόνα (5.1.1) φαίνεται τι συμβαίνει στη περίπτωση του τοίχου.



Εικόνα 5.1.1: Μεταφορά θερμότητας στο τοίχο

Το μοντέλο που αναπτύσσεται θεωρεί ότι η μετάδοση θερμότητας στο τοίχο γίνεται σε μία διάσταση, δε λαμβάνει υπόψη του την αποθήκευση θερμότητας στο τοίχο, ενώ οι τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών δεν αλλάζουν.

Η ροή θερμότητας λόγω αγωγής που συμβαίνει στο εσωτερικό των υλικών στη κατεύθυνση του x περιγράφεται από το νόμο του Fourier και δίνεται από την εξίσωση (5.5). [12]

$$\dot{Q}_x = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5.5)$$

Για γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει του x η εξίσωση (5.5) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (5.6). [12]

$$\dot{Q}_x = -k \cdot A \cdot \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{L} \quad (5.6)$$

όπου,

k: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και θεωρείται σταθερός.

A: η επιφάνεια του τοίχου.

L: το μήκος του τοίχου.

T<sub>s,1</sub>, T<sub>s,2</sub>: οι θερμοκρασίες των επιφανειών του τοίχου προς το δωμάτιο και το περιβάλλον αντίστοιχα, με T<sub>s,1</sub> > T<sub>s,2</sub>.

Το αρνητικό πρόσημο εκφράζει ότι η ροή θερμότητας γίνεται προς τη μικρότερη θερμοκρασία.

Η ροή θερμότητας λόγω μεταγωγής που συμβαίνει μεταξύ μιας επιφάνειας και του αέρα περιγράφεται από το νόμο του Newton και δίνεται από την εξίσωση (5.7). [12]

$$\dot{Q}_c = h \cdot A \cdot (T_{\infty,1} - T_{s,1}) \quad (5.7)$$

όπου,

h: ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μεταγωγή.

T<sub>∞,1</sub>: η θερμοκρασία του αέρα του δωματίου (T<sub>∞,1</sub> > T<sub>s,1</sub>).

Αν δεχθούμε ότι υπάρχει αναλογία μεταξύ ηλεκτρικής και θερμικής ροής, τότε αναλογικά με την ηλεκτρική αντίσταση θα υπάρχει και η θερμική αντίσταση. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει η θερμική αντίσταση αγωγής, που δίνεται από την εξίσωση (5.8) και η θερμική αντίσταση μεταγωγής, που δίνεται από την εξίσωση (5.9). [13]

$$R_{th,cond} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (5.8) \quad , \quad R_{th,conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (5.9)$$

Λόγω των εξισώσεων (5.6) και (5.8) η ροή θερμότητας με αγωγή θα δίνεται από την εξίσωση (5.10). Ενώ λόγω των εξισώσεων (5.7) και (5.9) η ροή θερμότητας με μεταγωγή θα δίνεται από την εξίσωση (5.11).

$$\dot{Q}_{conduction} = \dot{Q}_x = -\frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{R_{th,conduction}} \quad (5.10) \quad , \quad \dot{Q}_{convection} = \dot{Q}_c = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{R_{th,convection}} \quad (5.11)$$

Η θερμική ροή μέσα από τα υλικά όπως φαίνεται και στην εικόνα (5.1.2) θα είναι σταθερή, οπότε για το τοίχο της εικόνας (5.1.1) ισχύει η ισότητα (5.12). [13]

$$\dot{Q}_{convection\_1} = \dot{Q}_{conduction} = \dot{Q}_{convection\_2} = \dot{Q} \quad (5.12)$$

Από την εφαρμογή των εξισώσεων (5.10) και (5.11) στην ισότητα (5.12) προκύπτει η ισότητα (5.13).

$$\frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{R_{th,convection\_1}} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{R_{th,conduction}} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{R_{th,convection\_2}} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{th,tot}} \quad (5.13)$$

όπου,

$R_{th,tot}$  : είναι η συνολική θερμική αντίσταση.

$T_{\infty,2}$  : η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Από την ισότητα (5.13) προκύπτει ότι η συνολική θερμική αντίσταση ισούται με το άθροισμα των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων, σαν να ήταν δηλαδή ηλεκτρικές αντιστάσεις σε σειρά, οπότε παίρνουμε την εξίσωση (5.14).

$$R_{th,tot} = R_{th,convection\_1} + R_{th,conduction} + R_{th,convection\_2} \quad (5.14)$$

Στην εικόνα (5.1.2) φαίνονται οι θερμικές αντιστάσεις αγωγής των διαφορετικών υλικών και οι θερμικές αντιστάσεις μεταγωγής, όταν συμβαίνει μεταφορά θερμότητας στο τοίχο. Για τη θερμική ροή θα ισχύει ο γενικός τύπος (5.15) και για τη συνολική θερμική αντίσταση, όταν τα υλικά είναι σε σειρά, ο γενικός τύπος (5.16). [13]

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{th,tot}} = \frac{\Delta T}{R_{th,tot}} \quad (5.15)$$

όπου  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας.

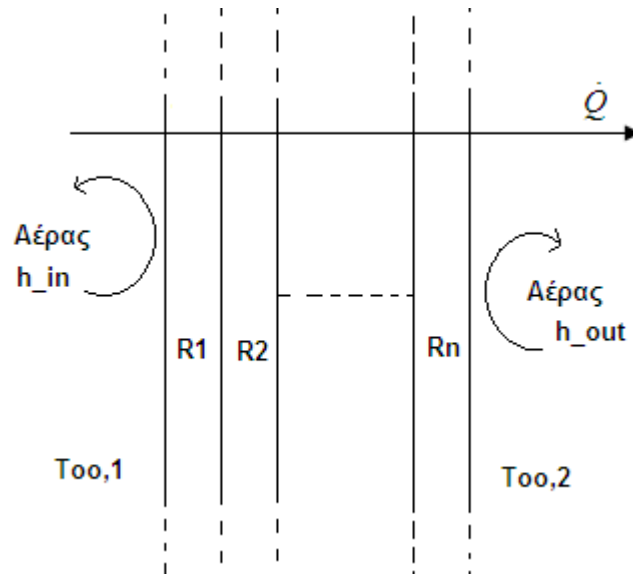
$$R_{th,tot} = R_{h\_in} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{h\_out} \quad (5.16)$$

όπου,

$R_{h\_in}$ ,  $R_{h\_out}$  : οι θερμικές αντιστάσεις μεταγωγής στο δωμάτιο και το περιβάλλον αντίστοιχα.

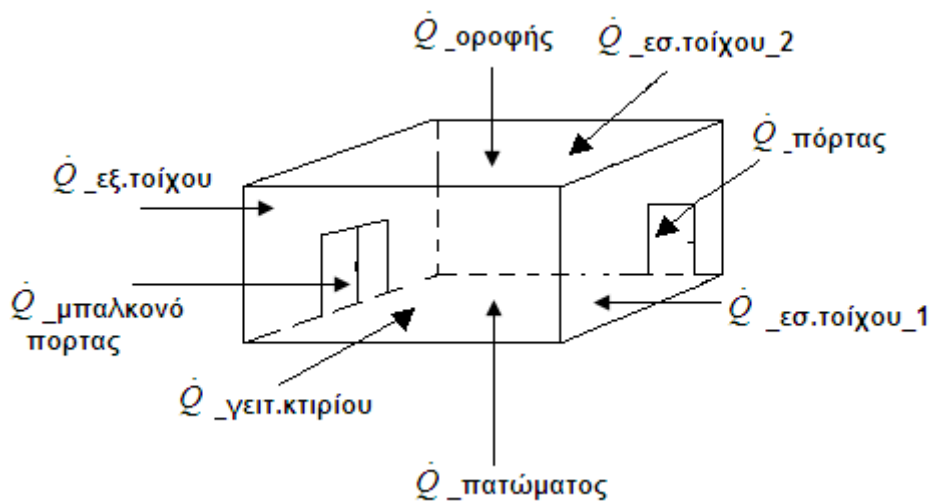
$R_1$ ,  $R_2$ , ...,  $R_n$  : οι θερμικές αντιστάσεις αγωγής, για τα διάφορα υλικά του τοίχου.





Εικόνα 5.1.2: Μεταφορά θερμότητας μέσω των διαφόρων υλικών του τοίχου

Οι ροές θερμότητας μέσω των δομικών στοιχείων του δωματίου, θα είναι αυτές που απεικονίζονται στην εικόνα (5.1.3). Επομένως το  $\dot{Q}_{\Delta\text{ΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}}$  θα δίνεται από την εξίσωση (5.17).



Εικόνα 5.1.3: Θερμικές ισχύς στους τοίχους του δωματίου

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\Delta\text{ΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}} = & \dot{Q}_{\text{εξ.τοιχου}} + \dot{Q}_{\text{μπαλκον.}} + \dot{Q}_{\text{εσ.τοιχου}_1} + \dot{Q}_{\text{εσ.τοιχου}_2} \\ & + \dot{Q}_{\text{πόρτας}} + \dot{Q}_{\text{οροφής}} + \dot{Q}_{\text{πατώματος}} + \dot{Q}_{\text{γειτ.κτιρίου}} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Με την εφαρμογή των γενικών τύπων (5.15) και (5.16) στην εξίσωση (5.17), προκύπτει η εξίσωση (5.18).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{ΔΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}} &= \frac{T_{out} - T_{in}}{R_{\text{εξ.τοιχου}}} + \frac{T_{out} - T_{in}}{R_{\text{μπαλκον.}}} + \frac{T_{20^{\circ}\text{C}} - T_{in}}{R_{\text{εσ.τοιχου\_1}}} + \frac{T_{20^{\circ}\text{C}} - T_{in}}{R_{\text{εσ.τοιχου\_2}}} \\ &+ \frac{T_{20^{\circ}\text{C}} - T_{in}}{R_{\text{πόρτας}}} + \frac{T_{20^{\circ}\text{C}} - T_{in}}{R_{\text{οροφής}}} + \frac{T_{10^{\circ}\text{C}} - T_{in}}{R_{\text{πατώματος}}} + \frac{T_{20^{\circ}\text{C}} - T_{in}}{R_{\text{γειτ.κτιριου}}} \end{aligned} \quad (5.18)$$

όπου

$T_{out}$ : Η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$T_{in}$ : Η θερμοκρασία δωματίου.

$T_{20^{\circ}\text{C}}$ : Η θερμοκρασία των γειτονικών δωματίων, όπου τη θεωρούμε  $20^{\circ}\text{C}$  σταθερή.

$T_{10^{\circ}\text{C}}$ : Η θερμοκρασία υπογείου, όπου τη θεωρούμε  $10^{\circ}\text{C}$  σταθερή. Κάτω από το δωμάτιο βρίσκεται χώρος του υπογείου.

Για τον υπολογισμό των θερμικών αντιστάσεων των δομικών στοιχείων χρειάζονται οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες (παράρτημα Δ) και οι διαστάσεις τους. Οι διαστάσεις τους είναι όλες σε μέτρα (m) και φαίνονται στην εικόνα (5.1.4) και στην εικόνα (5.1.5)-(5.1.10).

Ο εξωτερικός τοίχος : έχει την ίδια τομή με τον εσωτερικό τοίχο της εικόνας (5.1.5), αλλά με διπλό τούβλο. Με την εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16) βρίσκουμε:  $R_{\text{εξ.τοιχου}} = 0,0659 \text{ K/W}$ .

Ο εσωτερικός τοίχος 1 : έχει τη τομή της εικόνας (5.1.6). Με την εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16) βρίσκουμε:  $R_{\text{εσ.τοιχου\_1}} = 0,0888 \text{ K/W}$ .

Ο εσωτερικός τοίχος 2 : έχει τη τομή της εικόνας (5.1.5). Με την εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16) βρίσκουμε:  $R_{\text{εσ.τοιχου\_2}} = 0,0399 \text{ K/W}$ .

Η πόρτα : έχει τη τομή της εικόνας (5.1.7). Με την εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16) βρίσκουμε:  $R_{\text{πόρτας}} = 0,9781 \text{ K/W}$ .

Η οροφή / το πάτωμα : έχουν τη τομή της εικόνας (5.1.10). Με την εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16) βρίσκουμε:  $R_{\text{οροφής}} = R_{\text{πατώματος}} = 0,0323 \text{ K/W}$ .

Ο γειτονικός τοίχος : έχει την ίδια τομή με τον εσωτερικό τοίχο της εικόνας (5.1.5), αλλά με τέσσερα τούβλα. Με την εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16) βρίσκουμε:  $R_{\text{γειτ.κτιριου}} = 0,075 \text{ K/W}$ .

Η μπαλκονόπορτα : αποτελείται από ξύλο και τζάμι. Τα υλικά αυτά θεωρείται ότι είναι συνδεδεμένα παράλληλα. [13] Στην εικόνα (5.1.8) φαίνεται η πρόσοψη της μπαλκονόπορτας, ενώ στην εικόνα (5.1.9) η πλάγια όψη της, σαν να ήταν τα υλικά συνδεδεμένα παράλληλα. Η συνολική αντίσταση της μπαλκονόπορτας θα δίνεται από την εξίσωση (5.19).

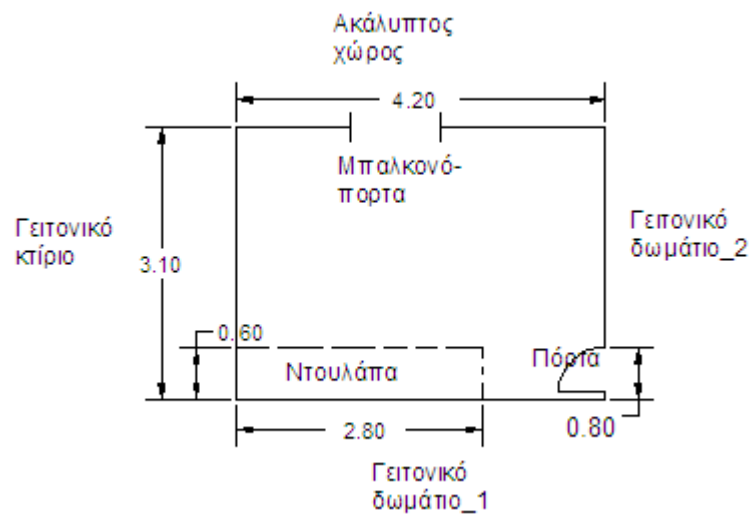
$$\frac{1}{R_{\text{μπαλκον.}}} = \frac{1}{R_{\text{ξύλου}}} + \frac{1}{R_{\text{τζαμιού}}} \Rightarrow R_{\text{μπαλκον.}} = \frac{R_{\text{ξύλου}} \cdot R_{\text{τζαμιού}}}{R_{\text{ξύλου}} + R_{\text{τζαμιού}}} \quad (5.19)$$

όπου,

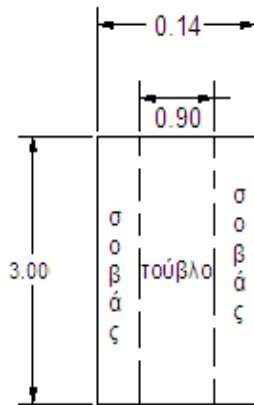
$R_{\xi\lambda\omicron\upsilon\upsilon}$  : η θερμική αντίσταση του ξύλου της εικόνας (5.1.9) και υπολογίζεται με εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16).

$R_{\tau\zeta\alpha\mu\iota\omicron\upsilon}$  : η θερμική αντίσταση του τζαμιού της εικόνας (5.1.9) και υπολογίζεται με εφαρμογή των εξισώσεων (5.8), (5.9) και (5.16).

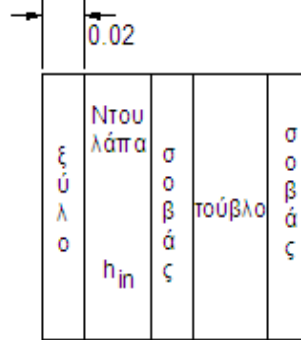
Με εφαρμογή της εξίσωσης (5.19) βρίσκουμε:  $R_{\mu\pi\alpha\lambda.\kappa\omicron\nu\nu} = 0,0989 \text{ K/W}$ .



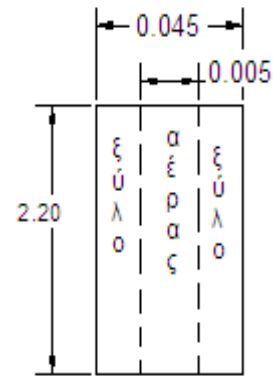
Εικόνα 5.1.4: Οι διαστάσεις του δωματίου



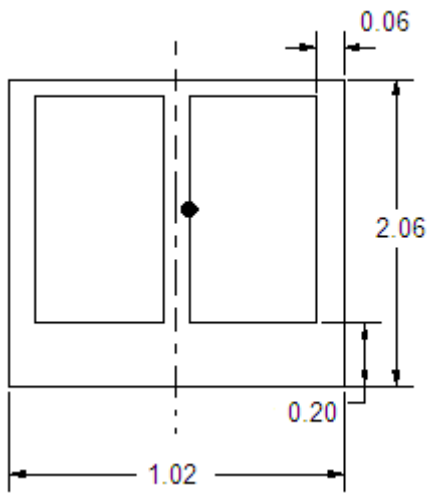
5.1.5: Τομή εσ.τοιχίου\_2



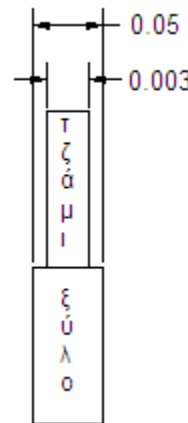
5.1.6: Τομή εσ.τοιχίου\_1



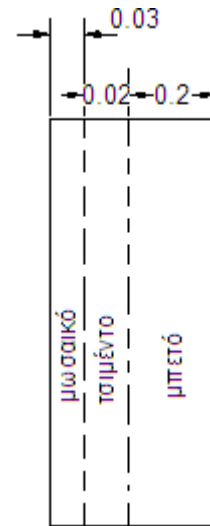
5.1.7: Τομή πόρτας



5.1.8: Πρόσοψη μπαλκονόπορτας



5.1.9: Πλάγια όψη μπαλκον.



5.1.10: Τομή οροφής

Εικόνες 5.1.5-5.1.10: Διαστάσεις και υλικά των δομικών στοιχείων

### 5.1.3 Η εξίσωση του θερμοδυναμικού μοντέλου

Η εξίσωση (5.18) γίνεται:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\Delta\text{ΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}} = & T_{out} \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{εξ.τοιχίου}}} + \frac{1}{R_{\text{μπαλκον.}}} \right) + T_{20^\circ C} \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{εσ.τοιχίου}_1}} + \frac{1}{R_{\text{εσ.τοιχίου}_2}} \right) \\ & + \frac{1}{R_{\text{πόρτας}}} + \frac{1}{R_{\text{οροφής}}} + T_{10^\circ C} \cdot \frac{1}{R_{\text{πατώματος}}} - T_{in} \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{εξ.τοιχίου}}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{πατώματος}}} \right) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Η εξίσωση (5.3) επιλύεται, αφού αντικατασταθούν τα  $\dot{Q}$  και  $\dot{Q}_{\Delta\text{ΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}}$  από τις εξισώσεις (5.4) και (5.20) αντίστοιχα. Η λύση της διαφορικής εξίσωσης τη χρονική στιγμή  $t_{n+1}$  θα δίνεται από την εξίσωση (5.21).

$$T_{in}^{n+1} = (T_{in}^n - \gamma^n / \beta) \cdot e^{-\left(\frac{\beta}{\alpha} \cdot t_n\right)} + \gamma^n / \beta \quad (5.21)$$

όπου,

$$\alpha = \rho \cdot V \cdot c_v$$

$$\beta = \left( \frac{1}{R_{\epsilon\zeta.\tau\omicron\iota\chi\omicron\upsilon}} + \dots + \frac{1}{R_{\pi\alpha\tau\omicron\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} \right) =$$

$$= \left( \frac{1}{R_{\epsilon\zeta.\tau\omicron\iota\chi\omicron\upsilon}} + \frac{1}{R_{\mu\pi\alpha\lambda\kappa\omicron\nu.}} + \frac{1}{R_{\epsilon\sigma.\tau\omicron\iota\chi\omicron\upsilon\_1}} + \frac{1}{R_{\epsilon\sigma.\tau\omicron\iota\chi\omicron\upsilon\_2}} + \frac{1}{R_{\gamma\epsilon\iota\tau.\kappa\tau\iota\rho\iota\omicron\upsilon}} + \frac{1}{R_{\pi\omicron\rho\tau\alpha\varsigma}} + \frac{1}{R_{\omicron\rho\rho\phi\eta\varsigma}} + \frac{1}{R_{\pi\alpha\tau\omicron\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} \right)$$

$$\gamma^n = \dot{Q}_{thermal}^n + T_{20^\circ C} \left( \frac{1}{R_{\epsilon\sigma.\tau\omicron\iota\chi\omicron\upsilon\_1}} + \frac{1}{R_{\epsilon\sigma.\tau\omicron\iota\chi\omicron\upsilon\_2}} + \frac{1}{R_{\gamma\epsilon\iota\tau.\kappa\tau\iota\rho\iota\omicron\upsilon}} + \frac{1}{R_{\pi\omicron\rho\tau\alpha\varsigma}} + \frac{1}{R_{\omicron\rho\rho\phi\eta\varsigma}} \right)$$

$$+ T_{10^\circ C} \cdot \frac{1}{R_{\pi\alpha\tau\omicron\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} + T_{out}^n \cdot \left( \frac{1}{R_{\epsilon\zeta.\tau\omicron\iota\chi\omicron\upsilon}} + \frac{1}{R_{\mu\pi\alpha\lambda\kappa\omicron\nu.}} \right)$$

$$\dot{Q}_{thermal}^n = \dot{Q}_{\text{Ανθρώπων}}^n + \dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}}^n + \dot{Q}_{\text{ΗΛΙΟΥ}}^n + \dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}^n$$

$T_{in}^n$  : η θερμοκρασία του δωματίου τη χρονική στιγμή  $t_n$ .

Από την εξίσωση (5.21) και γνωρίζοντας το  $T_{out}^n$  και το  $\dot{Q}_{thermal}^n$ , μπορούμε να κάνουμε πρόβλεψη της θερμοκρασίας του δωματίου για τη χρονική στιγμή  $t_{n+1}$ . Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούνται μετρήσεις θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά 47sec από έναν αισθητήρα στο Γέρακα.

## 5.2 Το Κλιματιστικό

Το κλιματιστικό που βρίσκεται στο δωμάτιο είναι της εταιρίας PHILCO. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στο πίνακα (5.2.1).

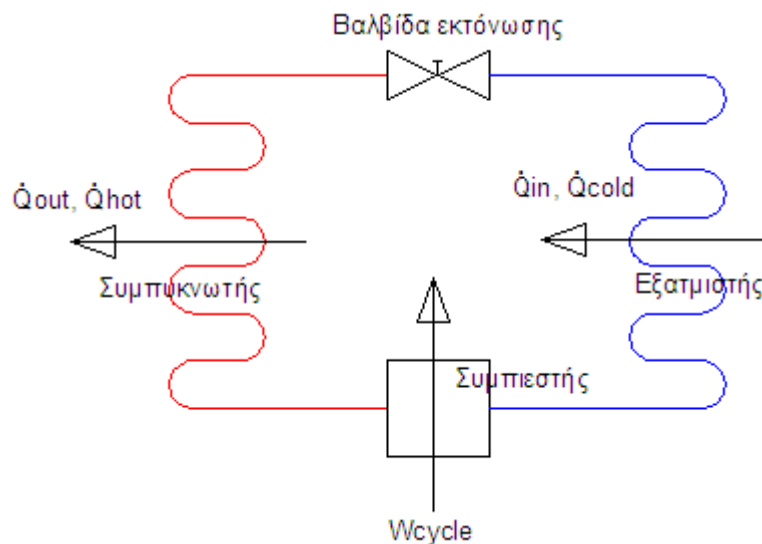
|             |             |
|-------------|-------------|
| Model       | PSAR12PTGMA |
| Τάση        | 220 – 240 V |
| Συχνότητα   | 50Hz        |
| Watts-Cool  | 1350        |
| Watts-Heat  | 1350        |
| Btu/Hr-Cool | 12000       |
| Btu/Hr-Heat | 13500       |

Πίνακας 5.2.1 : Χαρακτηριστικά κλιματιστικού PHILCO

Το κλιματιστικό χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του δωματίου, δηλαδή σαν αντλία θερμότητας. Από το 2<sup>ο</sup> νόμο της θερμοδυναμικής γνωρίζουμε ότι είναι αδύνατο να μεταφερθεί θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα σε ένα θερμό, χωρίς τη κατανάλωση ενέργειας. Για το κλιματιστικό κατά τη λειτουργία της θέρμανσης ισχύει το κύκλωμα της εικόνας (5.2.1). Από το ψυχρό περιβάλλον έχουμε τη ροή θερμότητας  $\dot{Q}_{in}$ , στη συνέχεια κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή Wcycle και τελικά ροή θερμότητας  $\dot{Q}_{out}$  στο θερμό δωμάτιο. Για να έχουμε ροή θερμότητας στο ζεστό δωμάτιο πρέπει να ανέβει η θερμοκρασία στη μεριά του συμπυκνωτή αρκετά ψηλά π.χ. 40° C. Στη συνέχεια λόγω της βαλβίδας εκτόνωσης η θερμοκρασία πέφτει αρκετά χαμηλά, γι' αυτό και έχουμε ροή θερμότητας από το περιβάλλον προς τον εξατμιστή. Ενώ για να ξαναέβει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, στους 40° C θα πρέπει να προσφερθεί ενέργεια μέσω του συμπιεστή.

Βάσει του ισοζυγίου ενέργειας θα ισχύει η εξίσωση (5.22). [12]

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} + W_{cycle} \quad (5.22)$$



Εικόνα 5.2.1: Λειτουργία κλιματιστικού κατά τη θέρμανση

Ο βαθμό απόδοσης του κλιματιστικού δίνεται από την εξίσωση (5.23). [12]

$$cop = \gamma = \frac{\dot{Q}_{out}}{W_{cycle}} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in}} \quad (5.23)$$

Βάσει της απόδοσης της “μηχανής Carnot” ο μέγιστος βαθμός απόδοσης δίνεται από την εξίσωση (5.24). [12]

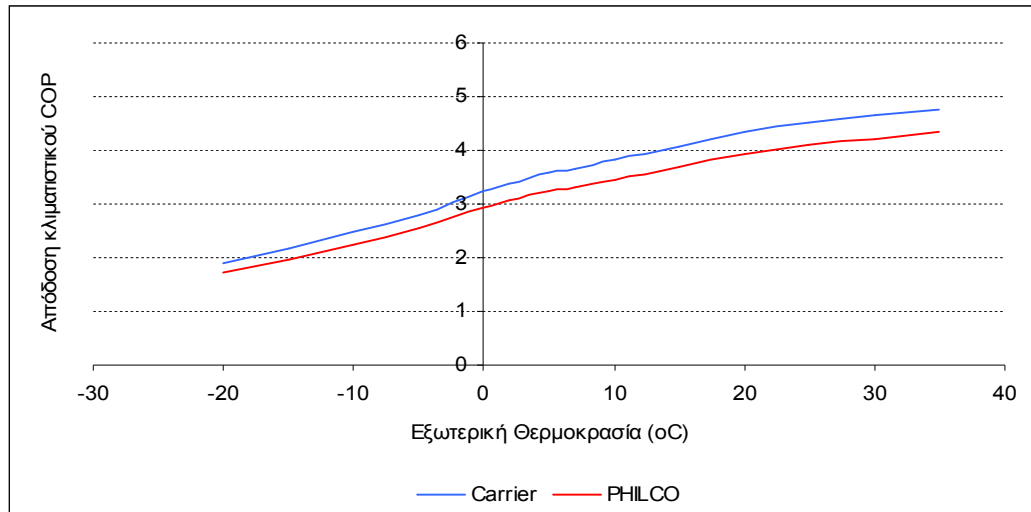
$$\gamma_{max} = \frac{T_{hot}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad (5.24)$$

Από την εξίσωση (5.24) γίνεται αντιληπτό ότι η απόδοση του κλιματιστικού δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τα  $T_{hot}$ ,  $T_{cold}$ . Όμως η εξίσωση αυτή δίνει το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Επειδή δεν διατίθεται καμπύλη απόδοσης από τη Philco,

χρησιμοποιείται μια καμπύλη απόδοσης από τεχνικό φυλλάδιο της Carrier για να εξαχθεί μια καμπύλη απόδοσης για το δικό μας κλιματιστικό, όπως φαίνεται στην εικόνα (5.2.2). [14] Για την εύρεση της εξίσωσης της καμπύλης απόδοσης χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (παράρτημα Α), απ' όπου προκύπτει το πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού της εξίσωση (5.25).

$$\gamma = 2,9357 + 0,0563 \cdot T - 0,0004 \cdot T^2, \quad -20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C} \quad (5.25)$$

όπου T η θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 5.2.2: Καμπύλες απόδοσης κλιματιστικών

Από την εξίσωση (5.23) εξάγεται η θερμική ισχύς του κλιματιστικού, που δίνεται από την εξίσωση (5.26).

$$\dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}^n = \dot{Q}_{out} = \gamma \cdot W_{cycle} \quad (5.26)$$

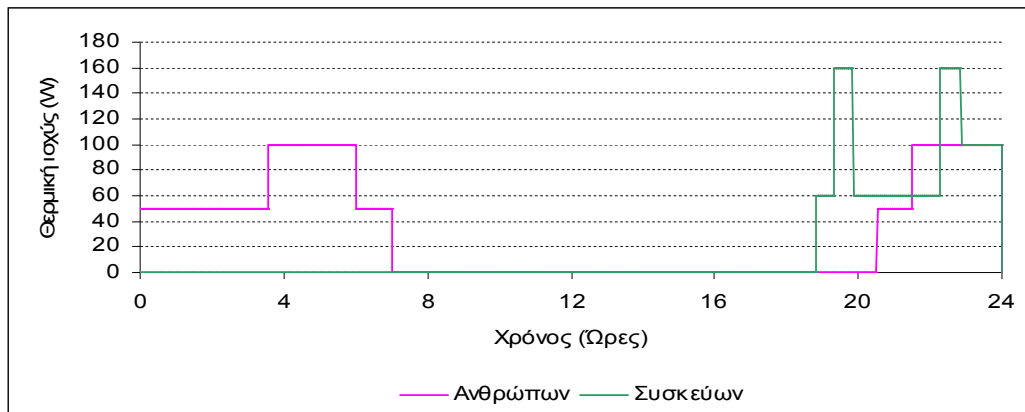
όπου

$W_{cycle}$ : η ηλεκτρική ισχύς του κλιματιστικού (1350W), που δίνεται στο πίνακα (5.2.1).

$\gamma$ : η απόδοση του κλιματιστικού, που δίνεται από την εξίσωση (5.25).

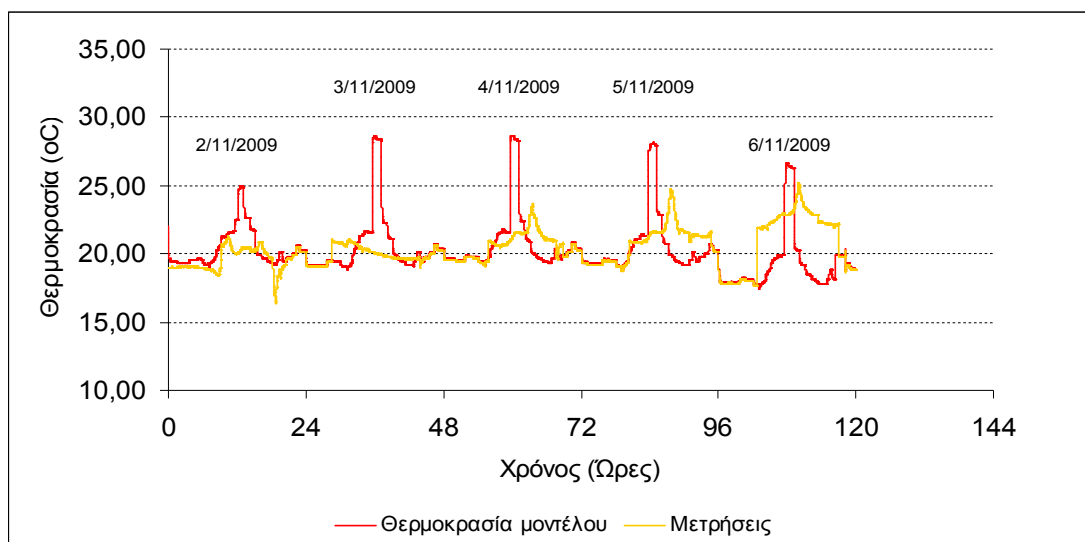
### 5.3 Πρόβλεψη θερμοκρασίας στο δωμάτιο χωρίς τη χρήση κλιματιστικού

Στην ενότητα αυτή γίνεται η σύγκριση του θερμοδυναμικού μοντέλου με τις μετρήσεις θερμοκρασίας που καταγράφηκαν στο δωμάτιο, χωρίς τη χρήση κλιματιστικού. Στην εικόνα (5.3.1) φαίνεται η θερμική ισχύς των ανθρώπων και των συσκευών, που βρίσκονταν στο δωμάτιο το πενήνήμερο που καταγράφηκαν οι μετρήσεις.



Εικόνα 5.3.1: Θερμική ισχύς ανθρώπων και συσκευών

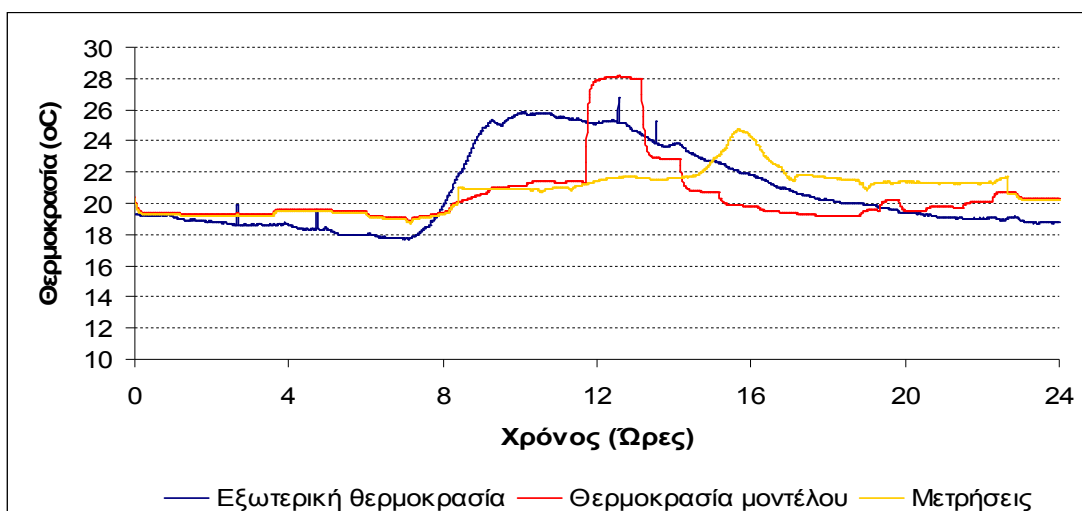
Από την εξίσωση (5.21), για  $\dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}^n$  ίσο με το μηδέν,  $\dot{Q}_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}}^n$ ,  $\dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}}^n$  όπως φαίνονται στην εικόνα (5.3.1) και  $\dot{Q}_{\text{ΗΛΙΟΥ}}^n$  όπως φαίνεται στην εικόνα (4.5.3), υπολογίζεται η πρόβλεψη θερμοκρασίας στο δωμάτιο για όλο το πενθήμερο, χωρίς τη χρήση κλιματιστικού και παρουσιάζεται στην εικόνα (5.3.2).



Εικόνα 5.3.2: Θερμοκρασία πρόβλεψης του δωματίου χωρίς τη χρήση κλιματιστικού για όλο το πενθήμερο

Στο διάγραμμα της εικόνας (5.3.3) φαίνεται η πρόβλεψη της θερμοκρασίας του δωματίου, η μετρούμενη και η εξωτερική θερμοκρασία στις 5/11/09. Με το θερμοδυναμικό μοντέλο παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας το χρονικό διάστημα 12:00 με 14:00, τις ώρες δηλαδή που απορροφάται η περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία από το δωμάτιο. Ενώ στις μετρήσεις καταγράφεται αύξηση της θερμοκρασίας το χρονικό διάστημα 14:00 με 16:00. Αυτό συμβαίνει διότι στο θερμοδυναμικό μοντέλο δεν λαμβάνεται υπόψη η αποθήκευση ενέργειας μέσα στο τοίχο.





Εικόνα 5.3.3: Θερμοκρασία πρόβλεψης του μοντέλου χωρίς τη χρήση κλιματιστικού στις 5/11/09

## 5.4 Χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού

Ως χειροκίνητη λειτουργία ορίζεται αυτή κατά την οποία ο χρήστης ανοίγει το κλιματιστικό κάποια στιγμή, το αφήνει να δουλέψει και όταν αισθανθεί ότι το δωμάτιο ζεστάθηκε, τότε το κλείνει. Στο δωμάτιο που εξετάζεται μετρήθηκε η θερμοκρασία από τις 2/11/09 έως τις 6/11/09. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το κλιματιστικό ξεκίνησε και σταμάτησε να δουλεύει τις ώρες που φαίνονται στο πίνακα (5.4.1).

| Ημέρα     | Έναρξη λειτουργίας κλιματιστικού | Λήξη λειτουργίας κλιματιστικού |
|-----------|----------------------------------|--------------------------------|
| 2/11/2009 | 20:00                            | 22:00                          |
| 3/11/2009 | 20:55                            | 22:40                          |
| 4/11/2009 | 20:55                            | 23:00                          |
| 5/11/2009 | 22:00                            | 24:00                          |
| 6/11/2009 | 20:55                            | 22:30                          |

Πίνακας 5.4.1 : Ώρες έναρξης και λήξης της λειτουργίας του κλιματιστικού κατά τη χειροκίνητη χρήση

Η μόνη μεταβολή ενέργειας που πραγματοποιείται στο δωμάτιο κατά τη χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού είναι αυτή της εσωτερική ενέργειας ( $U$ ), ενώ δε παράγεται κάποιο έργο ( $W=0$ ). Οπότε από την εξίσωση (5.1) προκύπτει η εξίσωση (5.27).

$$\Delta U = Q \quad (5.27)$$

Το  $Q$  της εξίσωσης (5.27) αναλύεται στις επιμέρους θερμότητες που προσφέρονται στο δωμάτιο και προκύπτει η εξίσωση (5.28). Η θερμότητα από τον ήλιο είναι μηδενική, αφού το κλιματιστικό λειτουργεί το βράδυ.

$$\Delta U = Q_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}} + Q_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}} + Q_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}} + Q_{\text{ΔΟΜΙΚΩΝ_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}} \quad (5.28)$$

Η εξίσωση (5.28) λύνεται ως προς  $Q_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}$  και προκύπτει η εξίσωση (5.29), με την οποία υπολογίζεται η θερμότητα που θα προσδώσει το κλιματιστικό στο δωμάτιο το χρονικό διάστημα που λειτουργεί.

$$Q_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}} = \Delta U - Q_{\text{ΔΟΜΙΚΩΝ_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}} - Q_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}} - Q_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}} \quad (5.29)$$

Οι θερμότητες της εξίσωσης (5.29) εκφράζονται σαν γινόμενο της θερμικής ισχύος επί το χρόνο που διαρκεί η καθεμία και προκύπτει η εξίσωση (5.30).

$$\dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}} \cdot t = \Delta U - (\dot{Q}_{\text{Ανθρώπων}} + \dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}} + \dot{Q}_{\text{ΔΟΜΙΚΩΝ_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}}) \cdot (t_{\Lambda} - t_{\text{E}}) \quad (5.30)$$

όπου,

$t$ : χρόνος λειτουργίας του κλιματιστικού

$t_{\Lambda}$ : η ώρα λήξης της λειτουργίας του κλιματιστικού

$t_{\text{E}}$ : η ώρα έναρξης της λειτουργίας του κλιματιστικού

Τα  $t_{\Lambda}$ ,  $t_{\text{E}}$  είναι γνωστά από το πίνακα (5.4.1).

Για την ειδική θερμοχωρητικότητα ( $c_V$ ) ισχύει η εξίσωση (5.31). [12]

$$c_V = \frac{du}{dT} \quad (5.31)$$

Από την εξίσωση (5.31) για  $c_V$  σταθερό, προκύπτει η εξίσωση (5.32) που δίνει τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας. [12]

$$u(T_K) - u(T_{\Lambda}) = \int_{T_{\Lambda}}^{T_K} c_V \cdot dT \Rightarrow m \cdot [u(T_K) - u(T_{\Lambda})] = m \cdot c_V \cdot (T_K - T_{\Lambda}) \Rightarrow$$

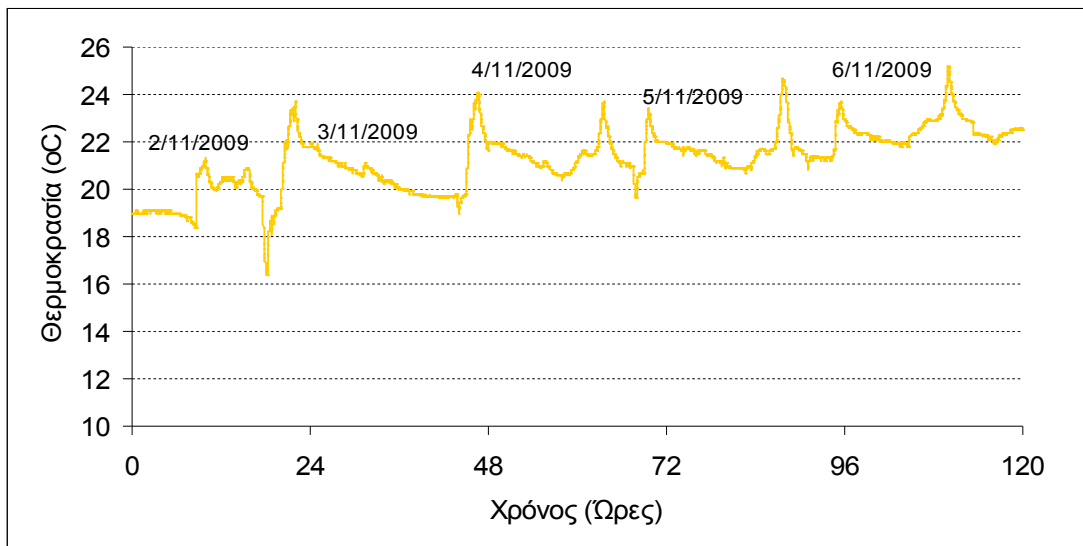
$$\Delta U = \rho \cdot V \cdot c_V \cdot (T_K - T_{\Lambda}) \quad (5.32)$$

όπου,

$T_{\Lambda}$ : η θερμοκρασία του δωματίου την ώρα που σταμάτησε το κλιματιστικό να δουλεύει

$T_{\text{E}}$ : η θερμοκρασία του δωματίου την ώρα που ξεκίνησε το κλιματιστικό να δουλεύει

Τα  $T_{\Lambda}$ ,  $T_{\text{E}}$  λαμβάνονται από το διάγραμμα της εικόνας (5.4.1), στο οποίο φαίνονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας στο δωμάτιο για όλο το πενήθμερο.

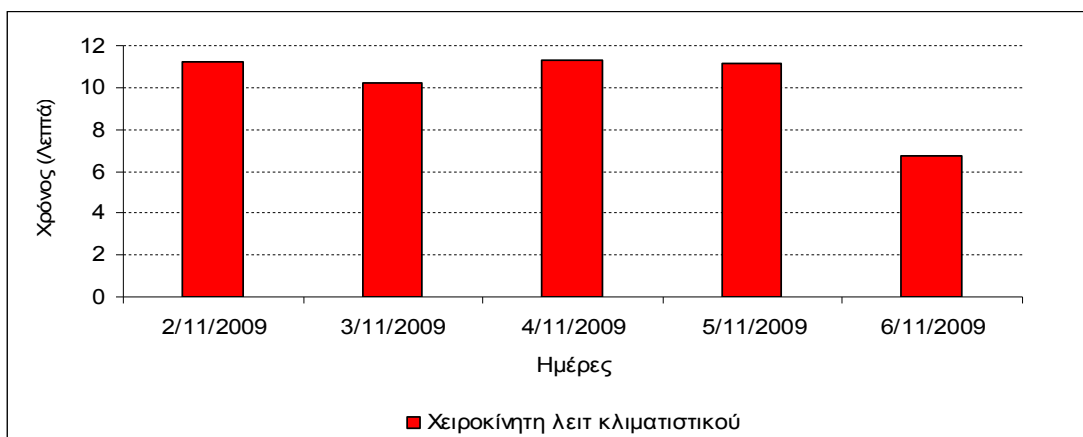


Εικόνα 5.4.1: Μετρήσεις θερμοκρασίας για όλο το πενήήμερο

Από τις εξισώσεις (5.30), (5.32) και (5.26) προκύπτει η εξίσωση (5.33) που δίνει το χρόνο λειτουργίας του κλιματιστικού.

$$t = \frac{\rho \cdot V \cdot c_v \cdot (T_K - T_A) - (\dot{Q}_{\text{Ανθρώπων}} + \dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}} + \dot{Q}_{\text{ΛΟΜΙΚΩΝ\_ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}}) \cdot (t_K - t_A)}{\gamma \cdot W_{\text{cycle}}} \quad (5.33)$$

Στην εικόνα (5.4.2) παρουσιάζεται ο χρόνος λειτουργίας του κλιματιστικού, κατά τη χειροκίνητη χρήση για όλο το πενήήμερο.



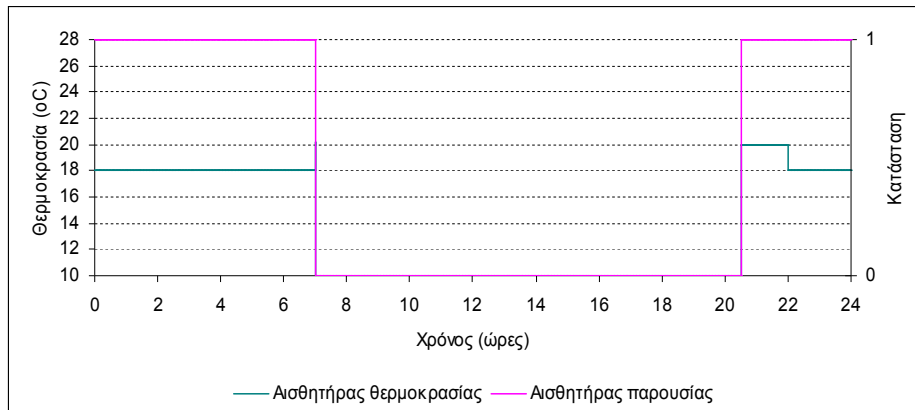
Εικόνα 5.4.2: Χρόνος λειτουργίας του κλιματιστικού κατά τη χειροκίνητη χρήση

## 5.5 Έλεγχος του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB

Στην ενότητα αυτή μελετάται η ενεργειακή διαχείριση του κλιματιστικού, με τη βοήθεια του θερμοδυναμικού μοντέλου, για το πρώτο σενάριο, όταν δηλαδή ο χρήστης βρίσκεται στο δωμάτιο μόνο τις βραδινές ώρες. Η θερμική ισχύς των ανθρώπων και των ηλ. συσκευών φαίνονται στην εικόνα (5.3.1).

Για την ενεργειακή διαχείριση του κλιματιστικού χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες KNX/EIB. Ένας αισθητήρας παρουσίας, ο οποίος είναι στη κατάσταση 1 όταν έχουμε παρουσία ανθρώπου και στη κατάσταση 0 όταν δεν έχουμε παρουσία ανθρώπου. Κι

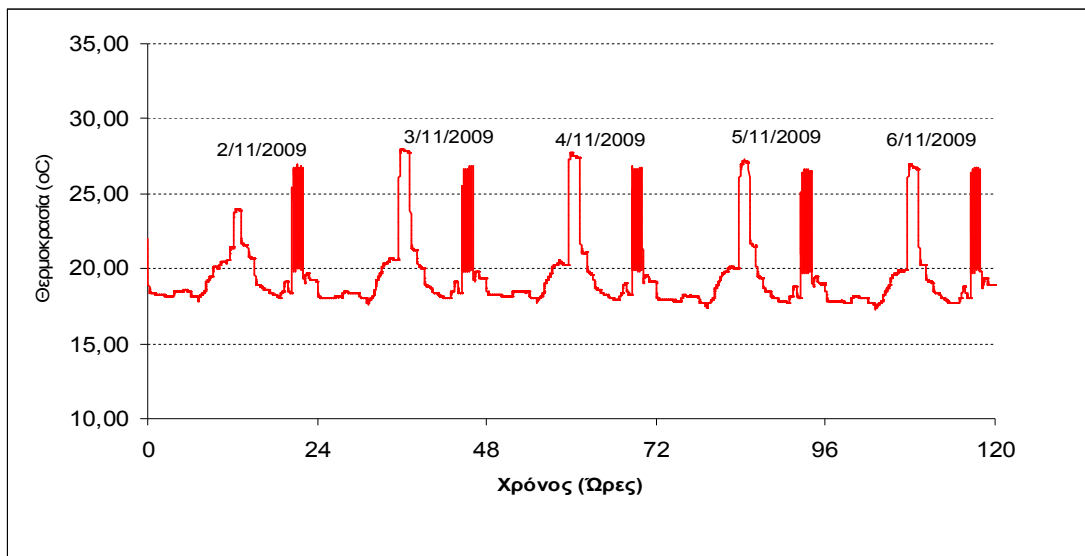
έναν αισθητήρα θερμοκρασίας με τον οποίο ρυθμίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία στο δωμάτιο. Τους χειμερινούς μήνες η επιθυμητή θερμοκρασία στο δωμάτιο είναι 20°C. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας διαθέτει και λειτουργία ύπνου, κατά την οποία η επιθυμητή θερμοκρασία είναι 18°C και εφαρμόζεται από τις 22:00 το βράδυ έως τις 7:00 το πρωί. Μέσω των αισθητήρων επιτρέπεται στο κλιματιστικό να λειτουργήσει μόνο όταν υπάρχει άνθρωπος στο δωμάτιο και η θερμοκρασία πέσει κάτω από την επιθυμητή. Η κατάσταση λειτουργίας των αισθητήρων φαίνεται στην εικόνα (5.5.1) και ισχύει για όλο το πενήθημερο.



Εικόνα 5.5.1: Κατάσταση αισθητήρα παρουσίας και αισθητήρα θερμοκρασίας

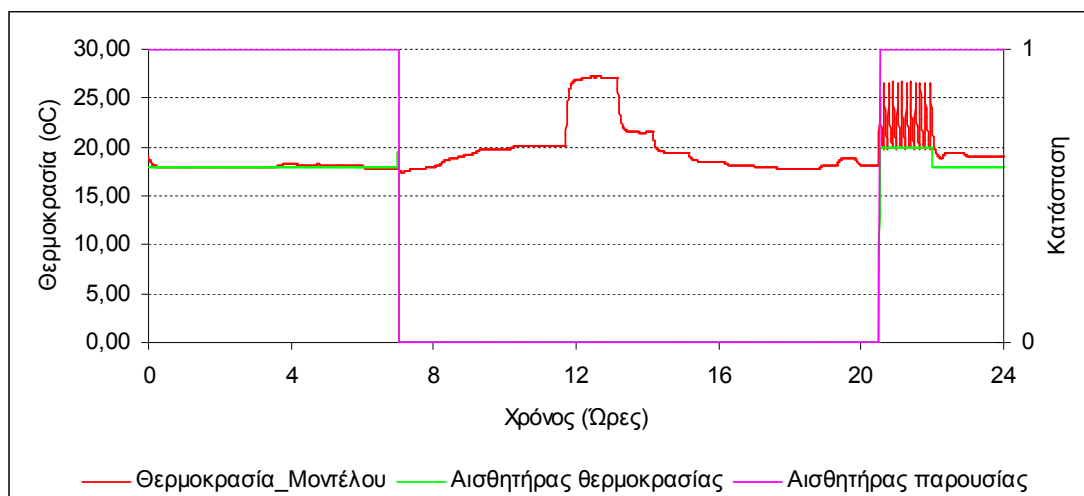
Η θερμοκρασία του δωματίου υπολογίζεται από την εξίσωση (5.21) του θερμοδυναμικού μοντέλου, για  $\dot{Q}''_{\text{ΗΛΙΟΥ}}$  σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας (4.5.3),  $\dot{Q}''_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}}$ ,  $\dot{Q}''_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}}$  όπως στην εικόνα (5.3.1) και  $\dot{Q}''_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}$  από την εξίσωση (5.26).

Στην εικόνα (5.5.2) φαίνεται η πρόβλεψη θερμοκρασίας στο δωμάτιο όταν το κλιματιστικό ελέγχεται από τους αισθητήρες KNX/EIB.



Εικόνα 5.5.2: Θερμοκρασία δωματίου με έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB

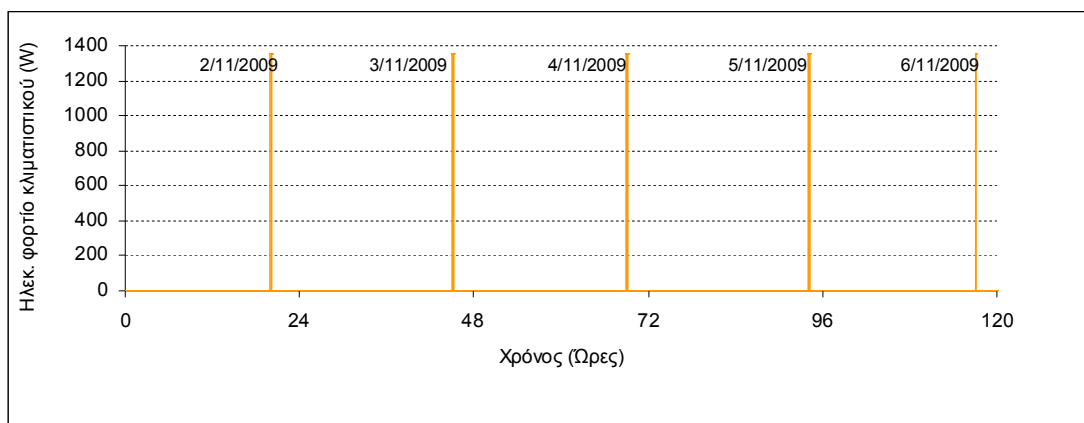
Στην εικόνα (5.5.3) παρουσιάζεται αναλυτικά τη θερμοκρασία του δωματίου και η κατάσταση των αισθητήρων στις 5/11/09.



Εικόνα 5.5.3: Θερμοκρασία δωματίου στις 5/11/2009 με έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB

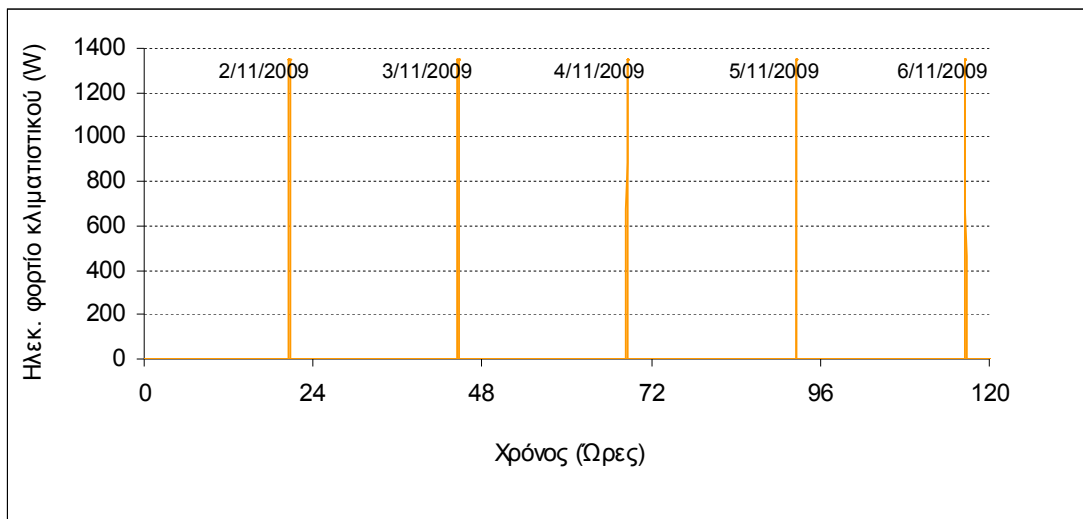
## 5.6 Σύγκριση χειροκίνητης λειτουργίας του κλιματιστικού με την ενεργειακή διαχείρισή του μέσω αισθητήρων KNX/EIB

Το ηλεκτρικό φορτίο του κλιματιστικού, κατά τη χειροκίνητη λειτουργία, προκύπτει από το πίνακα (5.4.1) και την εικόνα (5.4.2) και φαίνεται στην εικόνα (5.6.1)



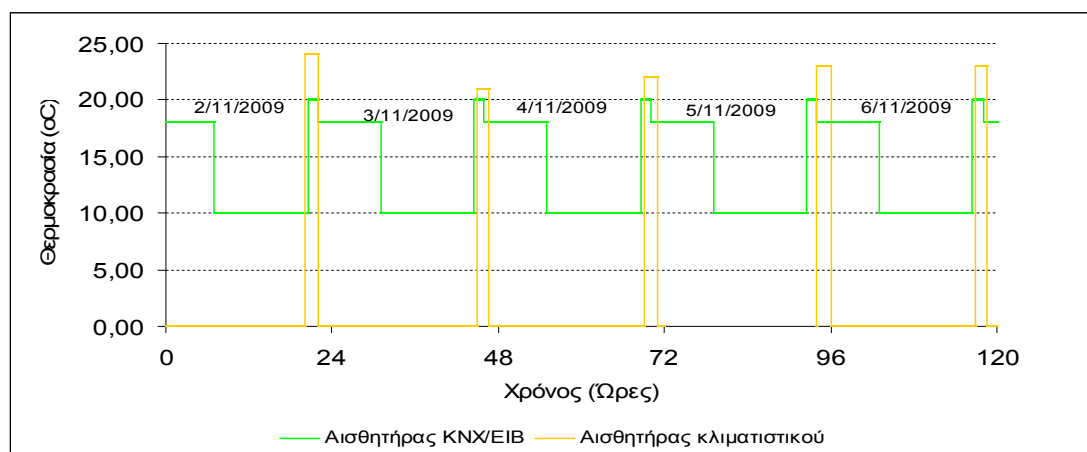
Εικόνα 5.6.1: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού κατά τη χειροκίνητη λειτουργία

Το ηλεκτρικό φορτίο του κλιματιστικού, όταν ελέγχεται από τους αισθητήρες KNX/EIB, προκύπτει από την εικόνα (5.5.2) και φαίνεται στην εικόνα (5.6.2).



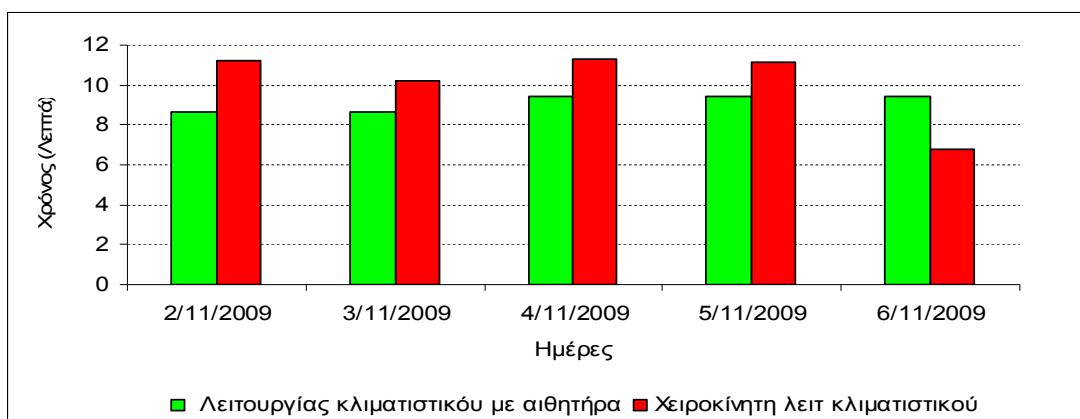
Εικόνα 5.6.2: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού όταν ελέγχεται μέσω αισθητήρων KNX/EIB

Στην εικόνα (5.6.3) φαίνεται τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στον αισθητήρα του KNX/EIB και του κλιματιστικού. Παρατηρείται ότι ο χρήστης ρυθμίζει το κλιματιστικό πιο πάνω από την επιθυμητή θερμοκρασία.



Εικόνα 5.6.3: Ρύθμιση θερμοκρασίας στον αισθητήρα KNX/ EIB και το κλιματιστικό

Στην εικόνα (5.6.4) φαίνεται ο χρόνος λειτουργίας του κλιματιστικού, κατά τη χειροκίνητη χρήση και όταν ελέγχεται από τους αισθητήρες KNX/EIB.



Εικόνα 5.6.4: Χρόνος λειτουργίας κλιματιστικού

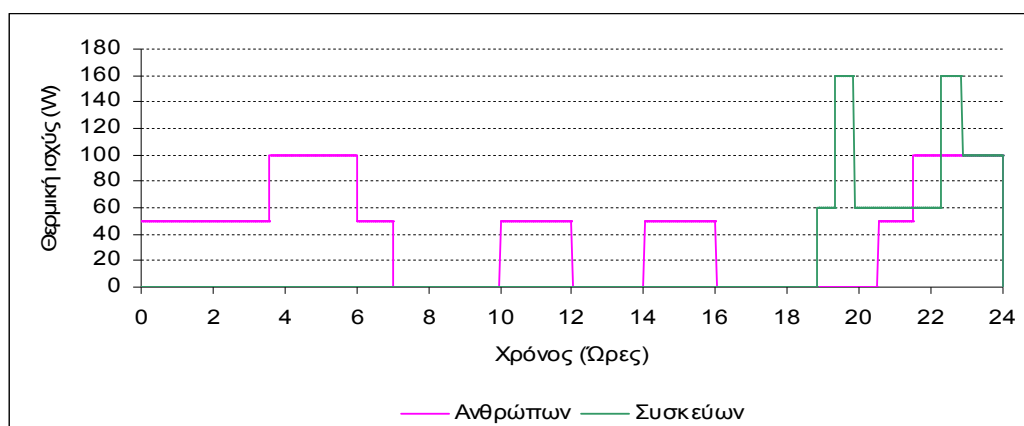
Με την ενεργειακή διαχείριση του κλιματιστικού εξοικονομούνται 160Wh.

## 5.7 Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο φορτίο του κλιματιστικού

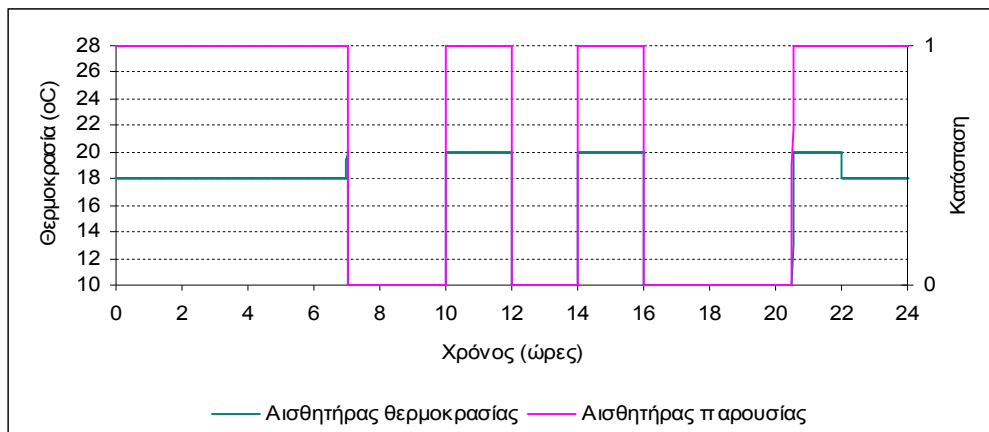
Στην ενότητα αυτή μελετάται το δεύτερο σενάριο κατά το οποίο ο χρήστης βρίσκεται στο δωμάτιο, εκτός από τις βραδινές ώρες και το διάστημα 10:00 με 12:00 το πρωί και 14:00 με 16:00 το μεσημέρι.

Η θερμική ισχύς των ανθρώπων και των συσκευών γι' αυτό το σενάριο φαίνονται στην εικόνα (5.7.1). Το κλιματιστικό ελέγχεται από τους αισθητήρες παρουσίας και θερμοκρασίας KNX/EIB, των οποίων η κατάσταση φαίνεται στην εικόνα (5.7.2). Ενώ ο φωτισμός κατά τα διαστήματα 10:00 με 12:00 και 14:00 με 16:00 ελέγχεται από τον αισθητήρα παρουσίας - φωτεινότητας. Οι μετρήσεις φωτεινότητας, η κατάσταση του αισθητήρα παρουσίας και της μονάδας ελέγχου του φωτισμού (Dimmer), για όλο το πενήνήμερο φαίνονται στην εικόνα (5.7.3).

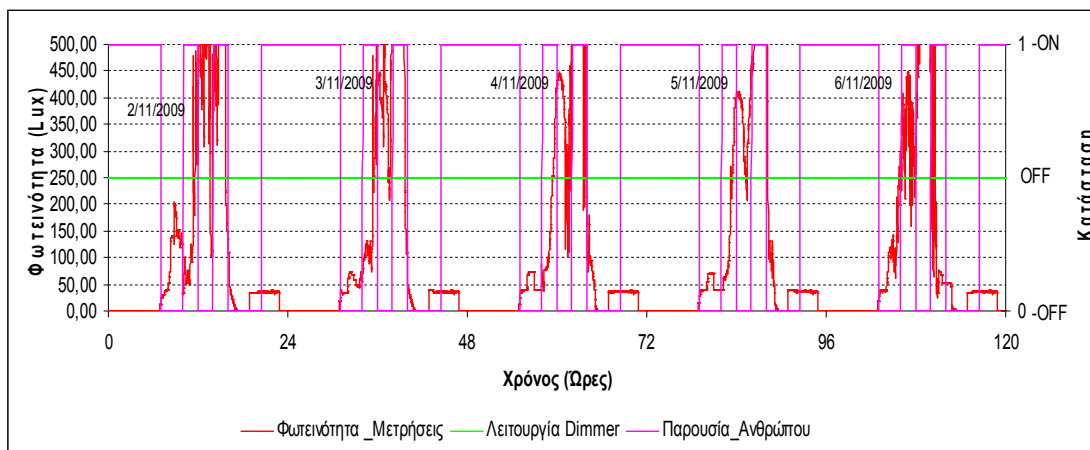
Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι δύο. Στη πρώτη περίπτωση όταν απουσιάζει ο χρήστης το ρολό της μπαλκονόπορτας είναι κλειστό, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το ρολό παραμένει ανοιχτό, οπότε η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο δωμάτιο όλη την ημέρα.



Εικόνα 5.7.1: Θερμική ισχύς ανθρώπων και συσκευών στο δεύτερο σενάριο



Εικόνα 5.7.2: Κατάσταση αισθητήρα παρουσίας και αισθητήρα θερμοκρασίας στο δεύτερο σενάριο



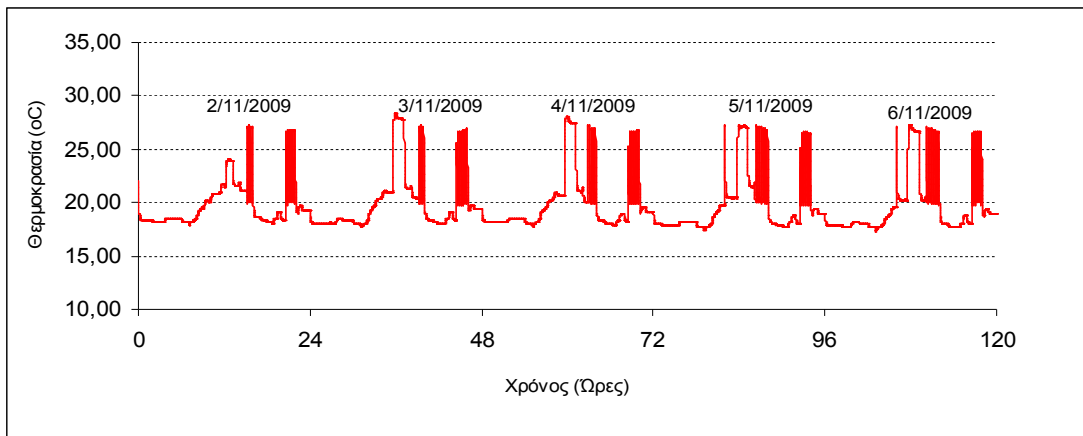
Εικόνα 5.7.3: Μετρήσεις φωτεινότητας - Κατάσταση αισθητήρα παρουσίας και Dimmer

Από την εικόνα (5.7.3) παρατηρείται ότι για όλο το πενήήμερο ο Dimmer είναι στη κατάσταση OFF που σημαίνει ότι δεν χρειάζεται επιπλέον φωτισμός του δωματίου. Όταν το βράδυ είναι αναμμένο το φως του δωματίου ο αισθητήρας φωτεινότητας μετράει 30 Lux. Για να λειτουργήσει ο Dimmer πρέπει η μέτρηση από τον αισθητήρα φωτεινότητας να είναι μικρότερη από 30 Lux. Άρα στο δεύτερο σενάριο δεν προκύπτει επιπλέον φορτίο φωτισμού.

Η θερμοκρασία του δωματίου όταν το ρολό είναι ανοιχτό υπολογίζεται από την εξίσωση (5.21) του θερμοδυναμικού μοντέλου, για  $\dot{Q}_{\text{ΗΛΙΟΥ}}$  σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας (4.5.3),  $\dot{Q}_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}}$  όπως στην εικόνα (5.7.1) και  $\dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}$  από την εξίσωση (5.26).

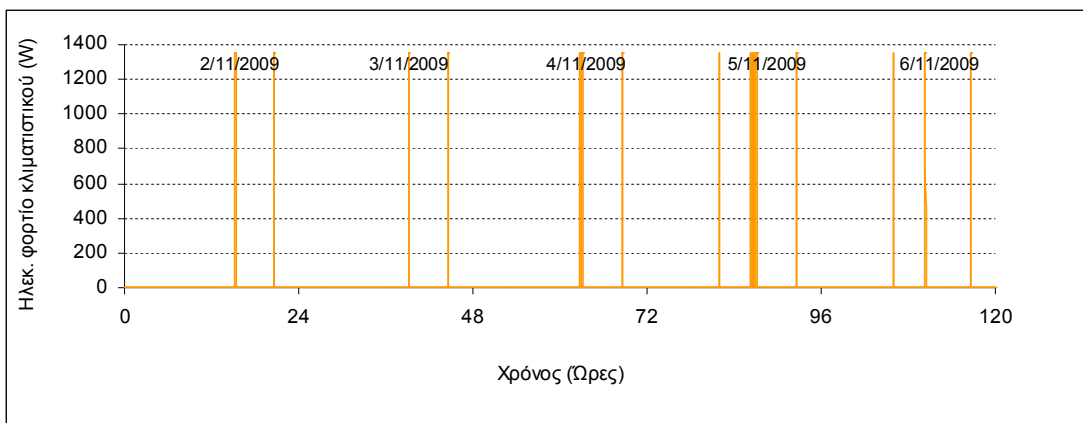
Στην εικόνα (5.7.4) φαίνεται η πρόβλεψη θερμοκρασίας στο δωμάτιο όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό.





Εικόνα 5.7.4: Θερμοκρασία δωματίου όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό

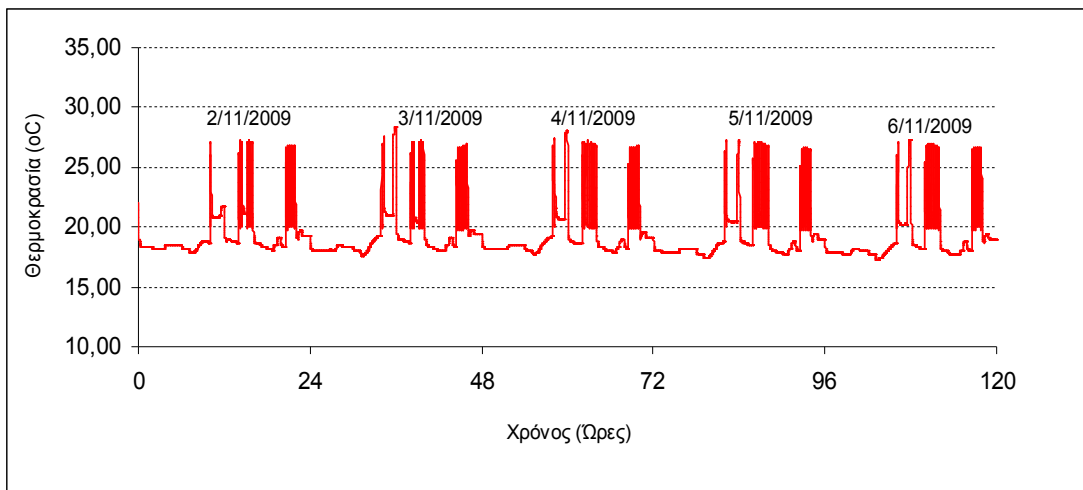
Στην εικόνα (5.7.5) φαίνεται το ηλεκτρικό φορτίο του κλιματιστικού όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό όλη την ημέρα.



Εικόνα 5.7.5: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό

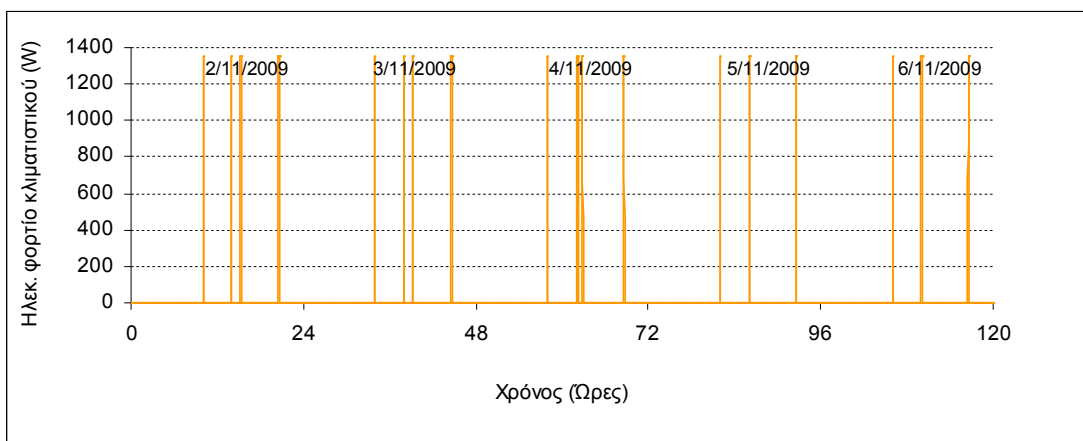
Η θερμοκρασία του δωματίου όταν το ρολό είναι κλειστό υπολογίζεται από την εξίσωση (5.21) του θερμοδυναμικού μοντέλου, για  $\dot{Q}_{\text{ΗΛΙΟΥ}}$  σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας (4.5.2) μόνο όταν ο χρήστης βρίσκεται στο δωμάτιο,  $\dot{Q}_{\text{ΑΝΘΡΩΠΩΝ}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{ΣΥΣΚΕΥΩΝ}}$  όπως στην εικόνα (5.7.1) και  $\dot{Q}_{\text{ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟΥ}}$  από την εξίσωση (5.26).

Στην εικόνα (5.7.6) φαίνεται η πρόβλεψη θερμοκρασίας στο δωμάτιο όταν το ρολό είναι κλειστό κατά την απουσία του χρήστη.



Εικόνα 5.7.6: Θερμοκρασία δωματίου όταν το ρολό είναι κλειστό

Στην εικόνα (5.7.7) φαίνεται το ηλεκτρικό φορτίο του κλιματιστικού όταν το ρολό είναι κλειστό κατά την απουσία του χρήστη.



Εικόνα 5.7.7: Ηλεκτρικό φορτίο κλιματιστικού όταν το ρολό είναι κλειστό

Με τη συνολική ενεργειακή διαχείριση του κλιματιστικού, μέσω του ελέγχου του από τους αισθητήρες και τον έλεγχο των ρολών, εξοικονομούνται 460Wh.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### 6. Το μοντέλο μπαταριών

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το μοντέλο μπαταριών και παρουσιάζεται η λειτουργία του. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το KiBaM (Kinetic Battery Model) μέσω του οποίου υπολογίζεται το επίπεδο φόρτισης (State Of Charge) των μπαταριών.

#### 6.1 Περιγραφή του μοντέλου μπαταριών

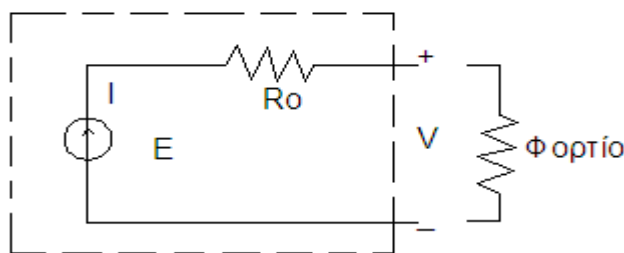
Στο μοντέλο μπαταριών (KiBaM) η μπαταρία παρουσιάζεται σαν μια πηγή τάσης με εσωτερική αντίσταση ( $R_o$ ) και με εσωτερική τάση ( $E$ ) που μεταβάλλεται ανάλογα με το SOC, όπως φαίνεται στην εικόνα (6.1.1). Οι παραδοχές που κάνει το μοντέλο KiBaM είναι οι εξής:

- 1) Η εσωτερική αντίσταση θεωρείται σταθερή και δεν αλλάζει τιμή κατά τη φόρτιση ή την εκφόρτιση της μπαταρίας.
- 2) Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή κατά τη λειτουργία των μπαταριών. Η χωρητικότητα των μπαταριών μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Αυτό όμως προϋποθέτει την ανάπτυξη ενός θερμοδυναμικού μοντέλου, ώστε να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία του χώρου όπου βρίσκονται οι μπαταρίες.
- 3) Η χωρητικότητα δε μεταβάλλεται από τους κύκλους φόρτισης - εκφόρτισης.

Η τάση των ακροδεκτών της μπαταρίας ( $V$ ) δίνεται στη περίπτωση της εκφόρτισης από την εξίσωση (6.1) και στη περίπτωση της φόρτισης από την εξίσωση (6.2). [15] , [16]

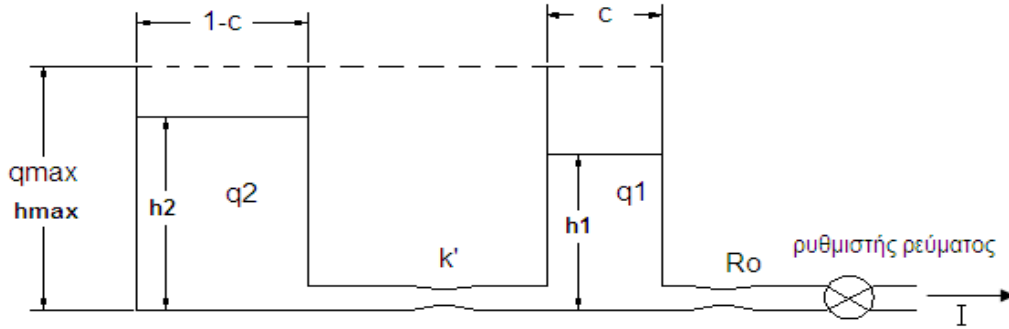
$$V = E - I \cdot R_o \quad (6.1)$$

$$V = E + I \cdot R_o \quad (6.2)$$



Εικόνα 6.1.1: Γραφική απεικόνιση μοντέλου μπαταριών

Η πηγή τάσης μοντελοποιείται σαν δύο δοχεία, όπως φαίνεται στην εικόνα (6.1.2), χωρισμένα με μία αγωγιμότητα ( $k'$ ). Ο ρυθμιστής ρεύματος μεταξύ μπαταρίας και φορτίου, δείχνει ότι το ρεύμα ( $I$ ) που ρέει προς το φορτίο είναι σταθερό, ανεξάρτητα από το τι γίνεται στο εσωτερικό της μπαταρίας. [15]



Εικόνα 6.1.2: Γραφική απεικόνιση μοντέλου μπαταριών

Στο πρώτο δοχείο υπάρχει φορτίο ( $q_1$ ) που είναι άμεσα διαθέσιμο προς κατανάλωση, ενώ στο δεύτερο δοχείο το φορτίο ( $q_2$ ) είναι δεσμευμένο μέσα στους χημικούς δεσμούς. Για το συνολικό φορτίο της μπαταρίας ισχύει η εξίσωση (6.3).

$$q = q_1 + q_2 \quad (6.3)$$

Στο μοντέλο οι ροές ιόντων που συμβαίνουν στις χημικές αντιδράσεις αναπαριστώνται σαν ροές μεταξύ των δοχείων και άρα σαν μεταβολή των όγκων των δοχείων. Τα δοχεία έχουν μοναδιαίο βάθος, διαφορετικά ύψη και πλάτη όπως φαίνεται στην εικόνα (6.1.2). [15] Επομένως για το φορτίο  $q_1$  προκύπτει η εξίσωση (6.4), ενώ για το  $q_2$  την εξίσωση (6.5).

$$q_1 = V_1 = h_1 \cdot c \quad (6.4)$$

$$q_2 = V_2 = h_2 \cdot (1-c) \quad (6.5)$$

Η αγωγιμότητα αντιπροσωπεύει το σταθερό ρυθμό με τον οποίο συμβαίνει η χημική αντίδραση και απελευθερώνεται το δεσμευμένο φορτίο. Ο ρυθμός με τον οποίο το δεσμευμένο φορτίο  $q_2$  γίνεται διαθέσιμο είναι ανάλογος της διαφοράς των υψών των δύο δοχείων και δίνεται από την εξίσωση (6.6).

$$\frac{dq_2}{dt} = k' \cdot (h_1 - h_2) \quad (6.6)$$

Ο ρυθμός με τον οποίο το  $q_1$  μεταβάλλεται δίνεται από την εξίσωση (6.7). [15]

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k' \cdot (h_1 - h_2) \quad (6.7)$$

Στις εξισώσεις (6.6), (6.7) τα  $h_1$ ,  $h_2$  αντικαθίστανται από τις εξισώσεις (6.4), (6.5) και τίθεται  $k = k' / c \cdot (1-c)$ . Οι διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν επιλύονται με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Laplace και προκύπτει η εξίσωση (6.8) για το  $q_1$  και η εξίσωση (6.9) για το  $q_2$ .

$$q_1 = q_{1,o} \cdot e^{-k \cdot t} + \frac{(q_o \cdot k \cdot c - I)(1 - e^{-k \cdot t})}{k} - \frac{I \cdot c(k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot t})}{k} \quad (6.8)$$

$$q_2 = q_{2,o} \cdot e^{-k \cdot t} + q_o(1-c)(1-e^{-k \cdot t}) - \frac{I(1-c)(k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot t})}{k} \quad (6.9)$$

όπου,

$q_{1,o}$ ,  $q_{2,o}$ : οι αρχικές ποσότητες διαθέσιμου και δεσμευμένου φορτίου αντίστοιχα.

$q_o$ : το αρχικό φορτίο της μπαταρίας που ισούται με το άθροισμα των  $q_{1,o}$ ,  $q_{2,o}$ .

$I$ : το ρεύμα που ρέει από τη μπαταρία στο φορτίο (καταναλώσεις).

$t$ : η χρονική διάρκεια που ρέει το ρεύμα.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $c$ ,  $k$ ,  $q_{\max}$  του μοντέλου χρησιμοποιούνται δεδομένα εκφόρτισης των μπαταριών που δίνει ο κατασκευαστής, αλλά και δεδομένα από το πρότυπο DIN 40736, που αυτές ακολουθούν. Τα δεδομένα φαίνονται στο πίνακα (6.1.1).

| Χρόνος εκφόρτισης (ώρες) | Χωρητικότητα (Ah) |
|--------------------------|-------------------|
| 1 (πρότυπο)              | 132,5             |
| 3 (πρότυπο)              | 187,15            |
| 5 (πρότυπο)              | 215               |
| 10 (πρότυπο)             | 250               |
| 120 (κατασκευαστής)      | 375               |

Πίνακας 6.1.1 : Δεδομένα εκφόρτισης των μπαταριών

Έστω ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη τότε ισχύουν οι ισότητες  $h_{1,\max} = h_{2,\max} = h_{\max}$  και  $q_o = q_{\max} = h_{\max} \cdot [15]$  Οπότε από την εξίσωση (6.4) για το  $q_{1,o}$  προκύπτει η εξίσωση (6.10).

$$q_{1,o} = q_{\max} \cdot c \quad (6.10)$$

Με αντικατάσταση της (6.10) στην (6.8) προκύπτει η εξίσωση (6.11).

$$q_1 = q_{\max} \cdot c - \frac{I(1-e^{-k \cdot t})(1-c)}{k} - I \cdot c \cdot t \quad (6.11)$$

Το ρεύμα εκφόρτισης υπολογίζεται από την εξίσωση (6.12), η οποία προκύπτει από την εξίσωση (6.11) για  $q_1=0$ .

$$I_{T=t} = \frac{q_{\max} \cdot c \cdot k}{(1-e^{-k \cdot t})(1-c) + k \cdot c \cdot t} \quad (6.12)$$

Για την εύρεση των παραμέτρων  $c, k$  χρησιμοποιούνται λόγοι χωρητικοτήτων γρήγορης εκφόρτισης προς αργής εκφόρτισης.[15] Για διαφορετικά ρεύματα εκφόρτισης προκύπτει ο λόγος της εξίσωσης (6.13).

$$F_{t_1, t_2} = \frac{q_{T=t_1}}{q_{T=t_2}} = \frac{I_{T=t_1} \cdot t_1}{I_{T=t_2} \cdot t_2}, \quad t_1 < t_2 \quad (6.13)$$

όπου,

$I_{T=t_1}$ ,  $I_{T=t_2}$ : ρεύματα εκφόρτισης

$t_1$ : ο χρόνος που κάνει το  $q_1$  να μηδενιστεί για  $I_{T=t_1}$

$t_2$  : ο χρόνος που κάνει το  $q_1$  να μηδενιστεί για  $I_{T=t_2}$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (6.12) στην εξίσωση (6.13) προκύπτει η εξίσωση (6.14).

$$F_{t_1,t_2} = \frac{(1-e^{-k \cdot t_2})(1-c) + k \cdot c \cdot t_2}{t_2((1-e^{-k \cdot t_2})(1-c) + k \cdot c)} \quad (6.14)$$

Η εξίσωση (6.14) λύνεται ως προς  $c$  και προκύπτει η εξίσωση (6.15).

$$c = \frac{F_{t_1,t_2}(1-e^{-k \cdot t_1})t_2 - (1-e^{-k \cdot t_2})t_1}{F_{t_1,t_2}(1-e^{-k \cdot t_1})t_2 - (1-e^{-k \cdot t_2})t_1 - k \cdot F_{t_1,t_2} + k \cdot t_1 \cdot t_2} = c_1(k) \quad (6.15)$$

Για ρεύματα εκφόρτισης  $I_{T=t_3}$  και  $I_{T=t_2}$  με χρόνους εκφόρτισης  $t_3$  και  $t_2$  αντίστοιχα, προκύπτει ένας άλλος λόγος χωρητικοτήτων  $F_{t_3,t_2}$  και η εξίσωση (6.16) για το  $c$ .

$$c = \frac{F_{t_3,t_2}(1-e^{-k \cdot t_3})t_2 - (1-e^{-k \cdot t_2})t_3}{F_{t_3,t_2}(1-e^{-k \cdot t_3})t_2 - (1-e^{-k \cdot t_2})t_3 - k \cdot F_{t_3,t_2} + k \cdot t_3 \cdot t_2} = c_2(k) \quad (6.16)$$

Επειδή οι εξισώσεις (6.15) και (6.16) είναι ίσες θα ισχύει η εξίσωση (6.17).

$$c_1(k) = c_2(k) \Rightarrow c_1(k) - c_2(k) = 0 \quad (6.17)$$

Για την επίλυση της (6.17) χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδο της τέμνουσας (παράρτημα Β) και βρίσκουμε τις παραμέτρους  $c, k$ .

Το  $q_{\max}$  υπολογίζεται από την εξίσωση (6.12), για σχετικά αργό ρυθμό εκφόρτισης.[15] Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο χρόνο εκφόρτισης των 10 ωρών, για τον οποίο προέκυψε ρεύμα εκφόρτισης 25A, σύμφωνα με το πίνακα (6.1.1).

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $c, k$  χρησιμοποιούνται διαφορετικοί λόγοι χωρητικοτήτων και προκύπτουν οι τιμές που φαίνονται στο πίνακα (6.1.2).

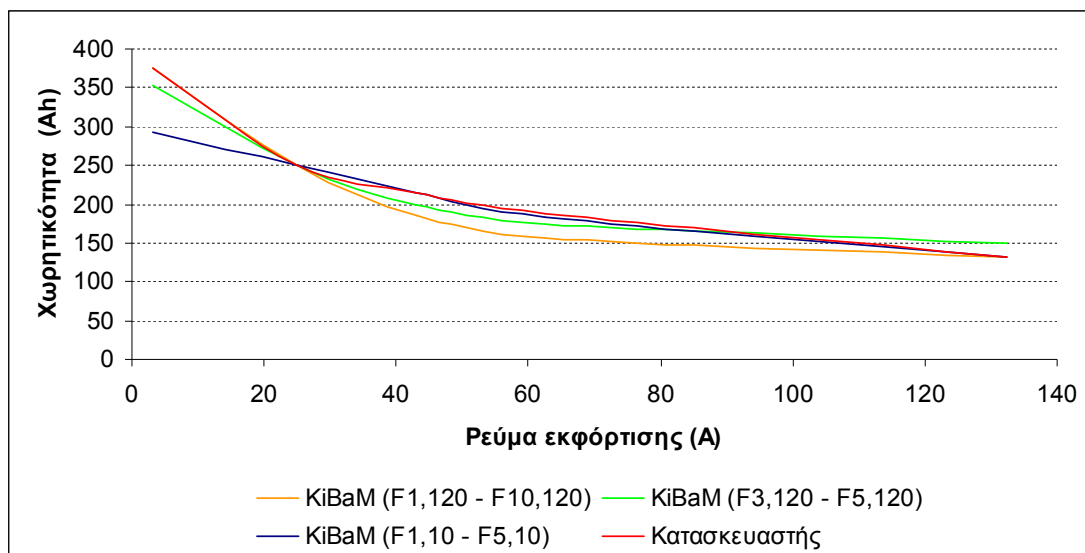
| Λόγοι<br>χωρητικοτήτων   | c     | k     | $q_{\max}$ |
|--------------------------|-------|-------|------------|
| $F_{1,120} - F_{10,120}$ | 0,294 | 0,412 | 393        |
| $F_{3,120} - F_{5,120}$  | 0,358 | 0,371 | 368        |
| $F_{1,10} - F_{5,10}$    | 0,333 | 1,016 | 299,3      |

Πίνακας 6.1.2 : Τιμές παραμέτρων του μοντέλου μπαταριών

Για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων κατασκευάζονται καμπύλες, χωρητικότητας-ρεύματος εκφόρτισης και συγκρίνονται με τη καμπύλη του κατασκευαστή, όπως φαίνεται στην εικόνα (6.1.3). Στα διαγράμματα της εικόνας (6.1.3) παρατηρείται ότι οι καμπύλες  $F_{1,120} - F_{10,120}$  και  $F_{3,120} - F_{5,120}$  συγκλίνουν με τη καμπύλη του

κατασκευαστή όταν το ρεύμα εκφόρτισης είναι πολύ μικρό, ενώ αποκλίνουν σε μεγαλύτερα ρεύματα.

Οι τιμές των παραμέτρων που επιλέγονται προκύπτουν για  $F_{1,10} - F_{5,10}$ , αφού η καμπύλη που δίνουν ταυτίζεται σχεδόν μ' αυτή του κατασκευαστή. Η καμπύλη  $F_{1,10} - F_{5,10}$  αποκλίνει όταν το ρεύμα εκφόρτισης είναι πολύ μικρό αυτό όμως δεν μας επηρεάζει, αφού συνήθως έχουμε μεγάλα φορτία να εξυπηρετήσουμε, όπως είναι το κλιματιστικό.



Εικόνα 6.1.3: Καμπύλες Χωρητικότητας – Ρεύματος Εκφόρτισης των μπαταριών για διάφορες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου

### Εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας ( $R_0$ )

Για την εύρεση της εσωτερικής αντίστασης των μπαταριών γίνονται μετρήσεις τάσης και ρεύματος στο εργαστήριο. Στη συνέχεια κατασκευάζεται μια V- I χαρακτηριστική και με τη βοήθεια των ελαχίστων τετραγώνων (παράρτημα Α) υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη ενότητα (7.1).

### Η τάση των μπαταριών

Η τάση των μπαταριών υπολογίζεται κατά την εκφόρτιση βάσει της εξίσωσης (6.1), θεωρώντας σταθερή  $R_0$  και εσωτερική τάση  $E$  που δίνεται από την εξίσωση (6.18). [16]

$$E = E_0 - A \cdot X - \frac{C \cdot X}{(D - X)} \quad (6.18)$$

όπου

$E_0$ : η εσωτερική τάση της μπαταρίας σε πλήρη φόρτιση.

$D$ : παράμετρος του μοντέλου με τιμή κοντά στη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας ( $q_{max}$ ).

$A, C$ : παράμετροι του μοντέλου.

$X$ : κανονικοποιημένο φορτίο που αφαιρείται από τη μπαταρία και δίνεται από την εξίσωση (6.19).

$$X = q_{out} \frac{q_{max}}{q_o(I)} \quad (6.19)$$

όπου,

$q_{out}$ : φορτίο που αφαιρείται από τη μπαταρία και δίνεται από την εξίσωση (6.20).

$$q_{out} = \int I \cdot t \quad (6.20)$$

$q_{max}$ : μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας

$q_o(I)$ : μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας βάσει του ρεύματος εκφόρτισης  $I$  και υπολογίζεται από τη καμπύλη  $F_{1,10} - F_{5,10}$  της εικόνας (6.1.3).

Η τάση των μπαταριών υπολογίζεται κατά την φόρτιση βάσει της εξίσωσης (6.2), θεωρώντας σταθερή  $R_o$  και εσωτερική τάση  $E$  που δίνεται από την εξίσωση (6.21).

$$E = E_0 + A \cdot X + \frac{C \cdot X}{(D - X)} \quad (6.21)$$

όπου,

$E_0$ : η εσωτερική τάση της μπαταρίας σε πλήρη εκφόρτιση.

$X$ : κανονικοποιημένο φορτίο που προστίθεται στη μπαταρία και δίνεται από την εξίσωση (6.22).

$$X = q_{in} \cdot \frac{q_{max}}{q_o(I)} \quad (6.22)$$

$q_{in}$ : φορτίο που προστίθεται στη μπαταρία και δίνεται όπως και το  $q_{out}$  από την εξίσωση (6.20).

$D$ : παράμετρος του μοντέλου με τιμή κοντά στη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας ( $q_{max}$ ).

$A, C$ : παράμετροι του μοντέλου.

$q_{max}$ : μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας.

$q_o(I)$ : μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας βάσει του ρεύματος εκφόρτισης  $I$  και υπολογίζεται από τη καμπύλη  $F_{1,10} - F_{5,10}$  της εικόνας (6.1.3).

Για την εύρεση των παραμέτρων  $E_0$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $D$  γίνονται μετρήσεις  $V - I$  στο εργαστήριο και χρησιμοποιείται η μη γραμμική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (παράρτημα Γ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη ενότητα (7.1).

## 6.2 Λειτουργία του μοντέλου μπαταριών

Από τη προηγούμενη ενότητα (6.1) επιλέχθηκαν οι εξής τιμές παραμέτρων:  $c = 0,333$ ,  $k = 1,016$  και  $q_{max} = 299,3$  Ah.

Το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών δίνεται από την εξίσωση (6.23).

$$SOC = \frac{q}{q_{max}} \cdot (\%) \quad (6.23)$$



Το επίπεδο φόρτισης του διαθέσιμου φορτίου δίνεται από την εξίσωση (6.24).

$$Q_1 = \frac{q_1}{q_{1,\max}} \cdot (\%) \quad (6.24)$$

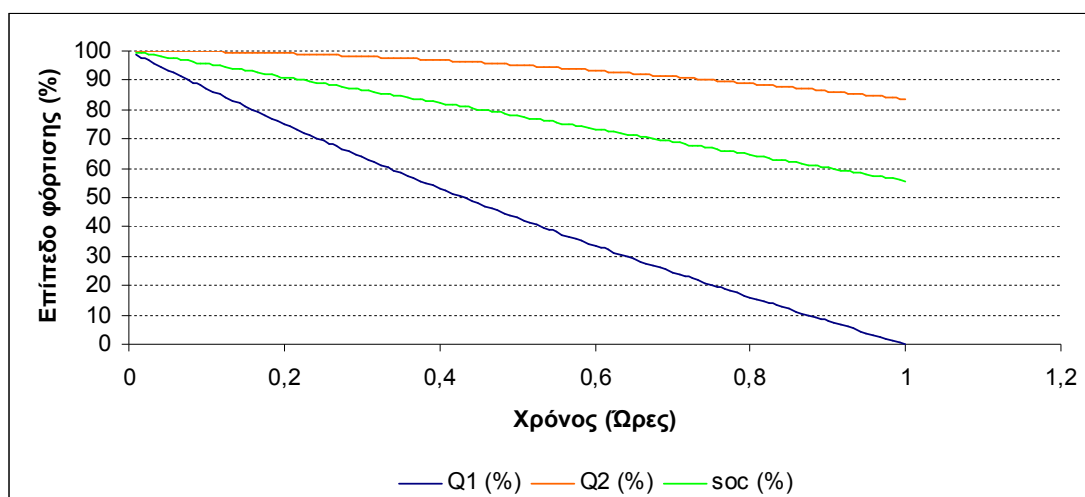
Από την εξίσωση (6.4), για  $h_{1,\max} = h_{\max} = q_{\max}$ , προκύπτει  $q_{1,\max} = q_{\max} \cdot c = 99,67 \text{ Ah}$ .

Το επίπεδο φόρτισης του δεσμευμένου φορτίου δίνεται από την εξίσωση (6.25).

$$Q_2 = \frac{q_2}{q_{2,\max}} \cdot (\%) \quad (6.25)$$

Από την εξίσωση (6.5), για  $h_{2,\max} = h_{\max} = q_{\max}$ , προκύπτει  $q_{2,\max} = q_{\max} \cdot (1 - c) = 199,3 \text{ Ah}$ .

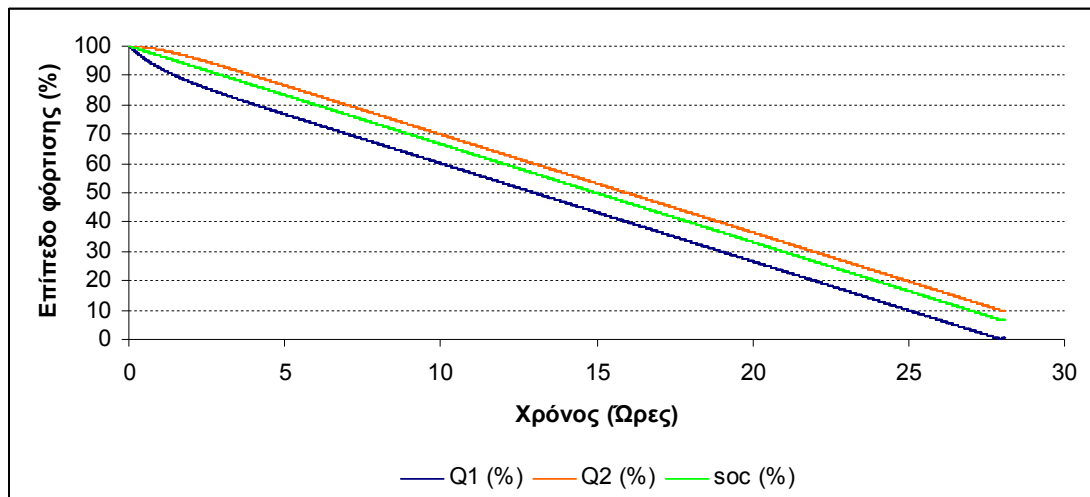
Στη συνέχεια γίνονται ορισμένες προσομοιώσεις για να δούμε τη συμπεριφορά των τριών επιπέδων φόρτισης.



Εικόνα 6.2.1: Επίπεδο φόρτισης του διαθέσιμου, του δεσμευμένου και του συνολικού φορτίου των μπαταριών για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα 132,5A

Με σταθερό ρεύμα 132,5A γίνεται μία εκφόρτιση και προκύπτουν τα διαγράμματα της εικόνας (6.2.1). Μετά από μία ώρα εκφόρτισης στα 132,5A παρατηρείται ότι το διαθέσιμο φορτίο  $q_1$  μηδενίζεται, όπως ήταν αναμενόμενο βάσει του προτύπου που ακολουθεί η μπαταρία. Η μπαταρία δε μπορεί πλέον να εξυπηρετήσει το φορτίο παρόλο που το  $q_2$  είναι πάνω από 80% και το SOC πάνω από 55%. Αυτό συμβαίνει γιατί το  $q_2$  είναι αποθηκευμένο στους χημικούς δεσμούς και δεν μπορεί να απελευθερωθεί.

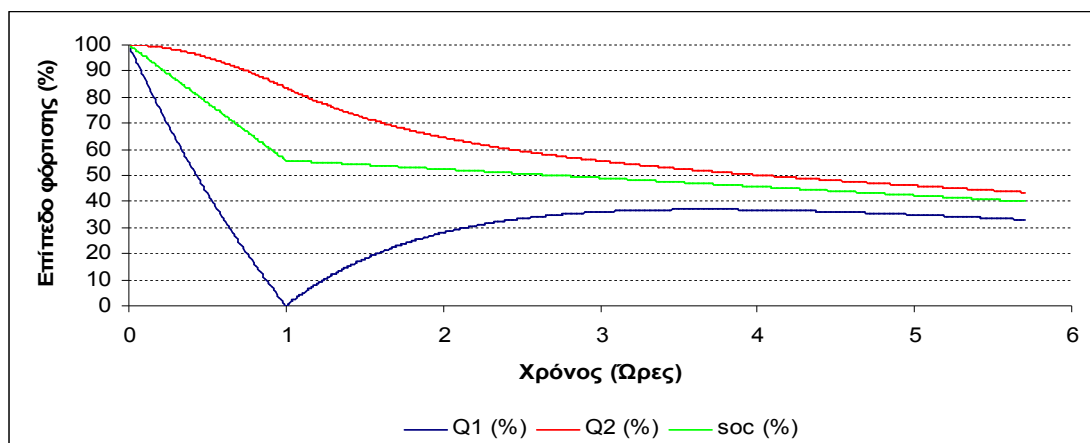
Όσο αναφορά το SOC δεν πρέπει να πέσει κάτω από 40%, αφού στις μπαταρίες OpZs επιτρέπεται βάθος εκφόρτισης έως 60%. [17]



Εικόνα 6.2.2: Επίπεδο φόρτισης του διαθέσιμου, του δεσμευμένου και του συνολικού φορτίου των μπαταριών για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα 10A

Με σταθερό ρεύμα 10A γίνεται μία εκφόρτιση και προκύπτουν τα διαγράμματα της εικόνας (6.2.2). Έπειτα από 28 ώρες παρατηρείται ότι το  $q_1$  μηδενίζεται, ενώ το SOC πέφτει κάτω από το 10%. Θα έπρεπε όμως να είχαμε σταματήσει την εκφόρτιση της μπαταρίας όταν το SOC βρισκόταν στο 40% παρόλο που μπορούσαμε να εξυπηρετήσουμε το φορτίο, ώστε να μην καταστρέψουμε τη μπαταρία.

Στη συνέχεια γίνεται μία εκφόρτιση, αρχικά με ρεύμα 132,5A για μία ώρα μέχρι να μηδενιστεί το  $q_1$  και μετά με 10A. Όπως φαίνεται και στην εικόνα (6.2.3) παρόλο που μηδενίζεται το  $q_1$  η μπαταρία μπορεί να συνεχίσει να εξυπηρετεί ένα μικρότερο φορτίο τροφοδοτώντας το από το  $q_2$ . Έτσι έχουμε σταδιακά, την αύξηση του  $q_1$  και τη μείωση του  $q_2$ . Η εκφόρτιση σταματάει όταν το SOC φτάσει στο 40%.



Εικόνα 6.2.3: Επίπεδο φόρτισης του διαθέσιμου, του δεσμευμένου και του συνολικού φορτίου των μπαταριών για εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα αρχικά 132,5A και στη συνέχεια 10A

Από τις προσομοιώσεις συμπεραίνουμε ότι εκτός από το SOC, πρέπει να παρακολουθείται και το διαθέσιμο φορτίο των μπαταριών, ώστε να γνωρίζουμε αν μπορούν να εξυπηρετήσουν το φορτίο.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### 7. Μετρήσεις στο εργαστήριο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό μερικών παραμέτρων του μοντέλου μπαταριών, αλλά και τον προσδιορισμό των αποδόσεων των συστημάτων που αποτελούν το μικροδίκτυο. Τα συστήματα αυτά είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ο αντιστροφέας φωτοβολταϊκών και ο αντιστροφέας μπαταριών (Sunny Island).

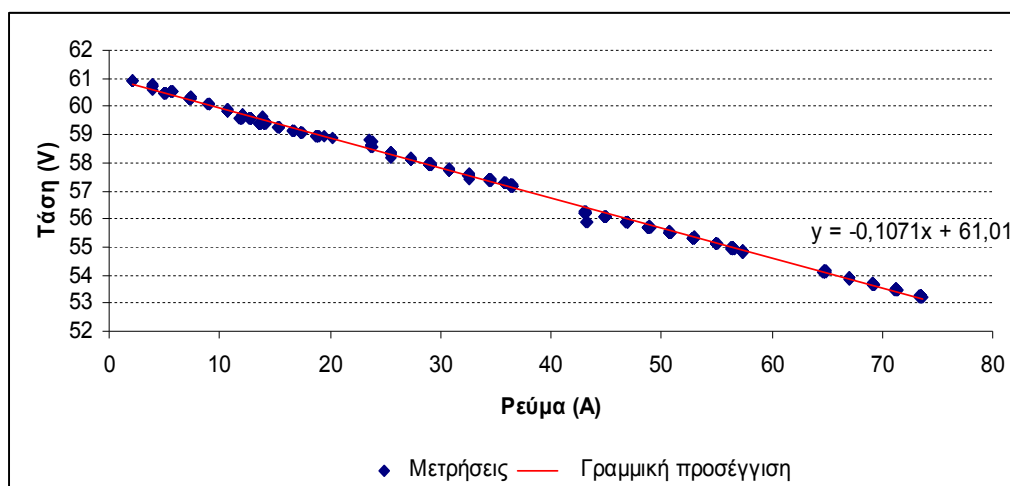
#### 7.1 Υπολογισμός παραμέτρων του μοντέλου μπαταριών

Στο εργαστήριο υπάρχουν 30 μπαταρίες των 2V και 250Ah της εταιρίας Ergon, συνδεδεμένες σε σειρά. [18] Οι παράμετροι του μοντέλου μπαταριών που χρειάζεται να υπολογιστούν είναι η εσωτερική αντίσταση των μπαταριών  $R_0$  και οι παράμετροι  $E_0$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $D$  των εξισώσεων (6.18) και (6.21), που δίνουν την εσωτερική τάση των μπαταριών κατά την εκφόρτιση και τη φόρτιση αντίστοιχα.

##### Εσωτερική αντίσταση των μπαταριών ( $R_0$ )

Για την εύρεση της εσωτερικής αντίστασης οι μπαταρίες εκφορτίστηκαν με φορτία που κρατούσαν σύντομο χρονικό διάστημα, ώστε η εσωτερική τάση των μπαταριών να παραμένει αμετάβλητη. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος μετρήθηκαν η τάση και το ρεύμα που φαίνονται στην εικόνα (7.1.1).[15]

Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (παράρτημα Α) υπολογίστηκε η τιμή της συνολικής αντίστασης των μπαταριών  $R_{ολικό} = 0,1071 \Omega$ .



Εικόνα 7.1.1: Καμπύλη  $V - I$  για την εύρεση της εσωτερικής αντίστασης  $R_0$  της μπαταρίας

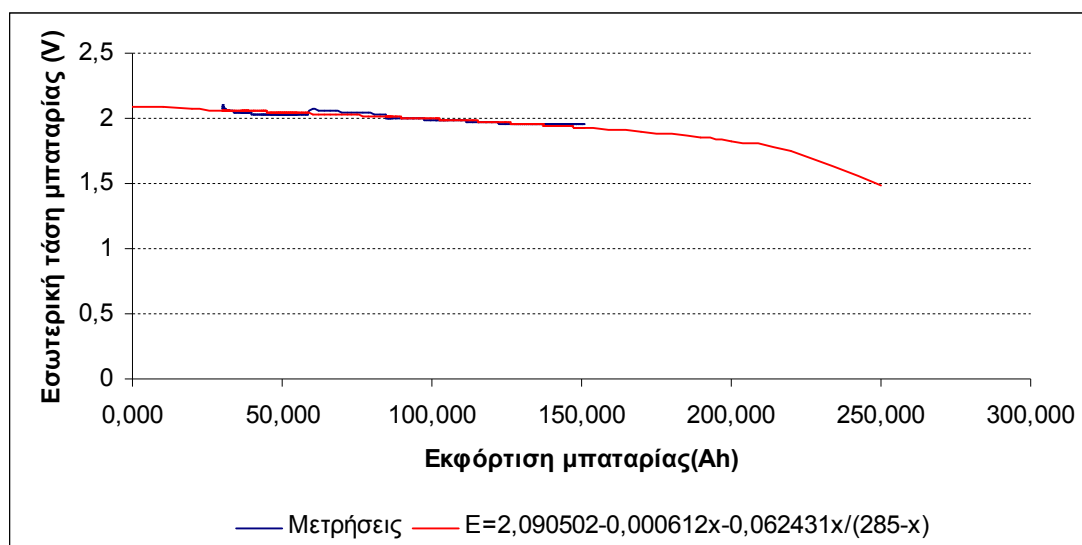
##### Εσωτερική τάση των μπαταριών κατά την εκφόρτιση

Για την εύρεση των παραμέτρων  $E_0$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $D$  της εξίσωσης (6.18) οι μπαταρίες εκφορτίστηκαν με ένα προφίλ φορτίου, αντιπροσωπευτικό του δωματίου και μετρήθηκαν η τάση (V) και το ρεύμα (I). Βάσει των μετρήσεων  $V$ ,  $I$ , της  $R_0$  και της εξίσωσης (6.1) υπολογίστηκε η εσωτερική τάση (E) των μπαταριών κατά την

εκφόρτιση και από την εξίσωση (6.19) το κανονικοποιημένο φορτίο ( $X$ ) που αφαιρέθηκε από τη μπαταρία. Με τη μη γραμμική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (παράρτημα Γ) υπολογίστηκαν οι παράμετροι, οπότε προέκυψε η εξίσωση (7.1), που δίνει την εσωτερική τάση της μπαταρίας ( $E$ ) κατά την εκφόρτιση.

$$E = 2,090502 - 0,000612 \cdot X - \frac{0,062431 \cdot X}{(285 - X)} \quad (7.1)$$

Οι μετρήσεις που πήραμε καθώς και το διάγραμμα της εξίσωσης (7.1) φαίνονται στην εικόνα (7.1.2)



Εικόνα 7.1.2: Εσωτερική τάση της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση

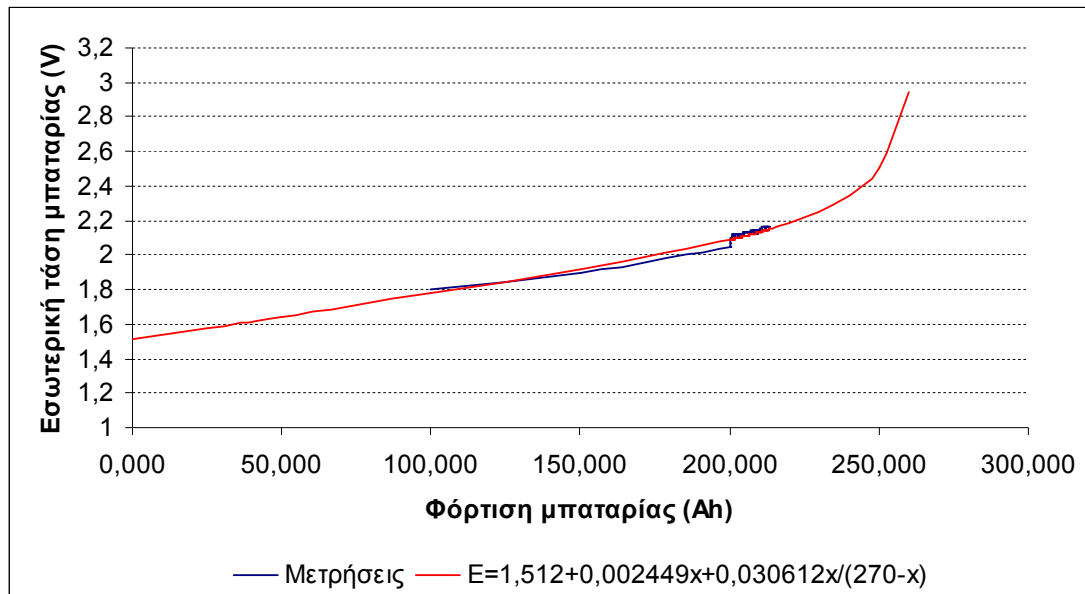
Στην εικόνα (7.1.2) παρατηρείται ότι δεν πήραμε μετρήσεις για πλήρη εκφόρτιση της μπαταρίας. Παρόλα αυτά η εξίσωση (7.1) προσεγγίζει αρκετά καλά τις μετρήσεις. Μεταξύ της εξίσωσης (7.1) και των μετρήσεων προκύπτει ένας μέσος όρος σχετικού σφάλματος 0,623%.

### Εσωτερική τάση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση

Για την εύρεση των παραμέτρων  $E_0$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $D$  της εξίσωσης (6.21) οι μπαταρίες φορτίστηκαν από τη φ/β γεννήτρια του εργαστηρίου και μετρήθηκαν η τάση ( $V$ ) και το ρεύμα ( $I$ ). Βάσει των μετρήσεων  $V$ ,  $I$ , της  $R_0$  και της εξίσωσης (6.2) υπολογίστηκε η εσωτερική τάση ( $E$ ) των μπαταριών κατά τη φόρτιση και από το τύπο (6.22) το κανονικοποιημένο φορτίο ( $X$ ) που προστέθηκε στη μπαταρία. Με τη μη γραμμική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (παράρτημα Γ) υπολογίστηκαν οι παράμετροι και προέκυψε η εξίσωση (7.2), που δίνει την εσωτερική τάση της μπαταρίας ( $E$ ) κατά τη φόρτιση.

$$E = 1,512 + 0,002449 \cdot X + \frac{0,030612 \cdot X}{(270 - X)} \quad (7.2)$$

Οι μετρήσεις που πήραμε καθώς και το διάγραμμα της εξίσωσης (7.2) φαίνονται στην εικόνα (7.1.3)



Εικόνα 7.1.3: Εσωτερική τάση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση

Στην εικόνα (7.1.3) φαίνεται ότι δεν πήραμε μετρήσεις ξεκινώντας από μηδενική φόρτιση, αλλά ούτε φτάσαμε σε πλήρης φόρτιση. Παρόλα αυτά η εξίσωση (7.2) προσεγγίζει αρκετά καλά τις μετρήσεις. Μεταξύ της εξίσωσής (7.2) και των μετρήσεων προκύπτει ένας μέσος όρος σχετικού σφάλματος 0,8%.

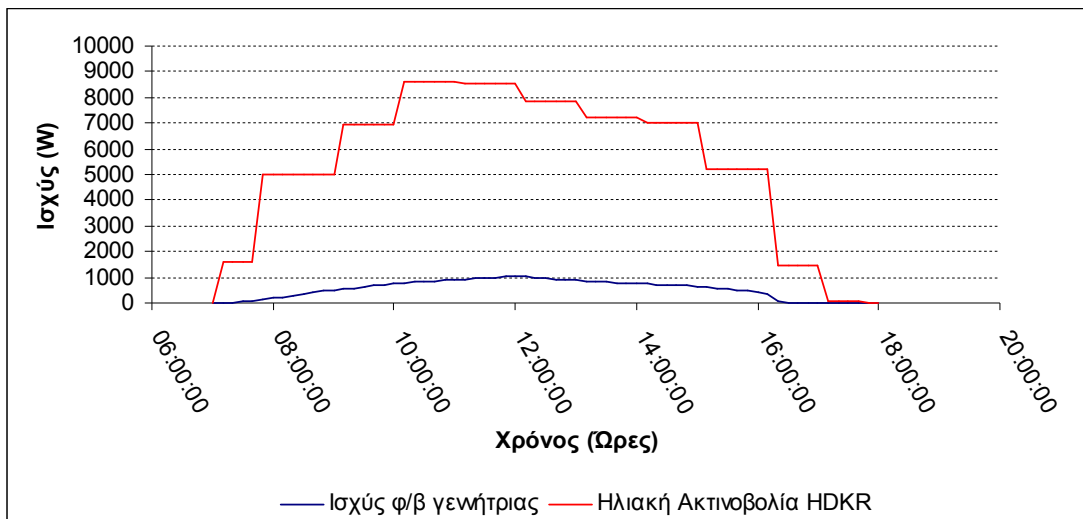
## 7.2 Απόδοση φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια του εργαστηρίου αποτελείται από 11 πάνελ της εταιρίας Isofoton. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φ/β πάνελ φαίνονται στο πίνακα (7.2.1). [19]

| Isofoton 110 Wp       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| Τύπος                 | Μονοκρυσταλλικό |
| Ονομαστική ισχύς      | 110 Wp          |
| Τάση λειτουργίας      | 17,4 V          |
| Ρεύμα λειτουργίας     | 6,32 A          |
| Τάση βραχυκύκλωσης    | 21,6 V          |
| Ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης | 6,76            |
| Απόδοση               | 12,9%           |

Πίνακας 7.2.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελ της Isofoton

Στο εργαστήριο μετρήθηκαν η τάση και το ρεύμα της φ/β γεννήτριας στις 3/11/09, οπότε προέκυψε το διάγραμμα ισχύος που φαίνεται στην εικόνα (7.2.1). Η ισχύς της φ/β γεννήτριας περιείχε και τις απώλειες της καλωδίωσης, αφού μετρήσαμε τάση και ρεύμα στην είσοδο του φ/β αντιστροφέα.

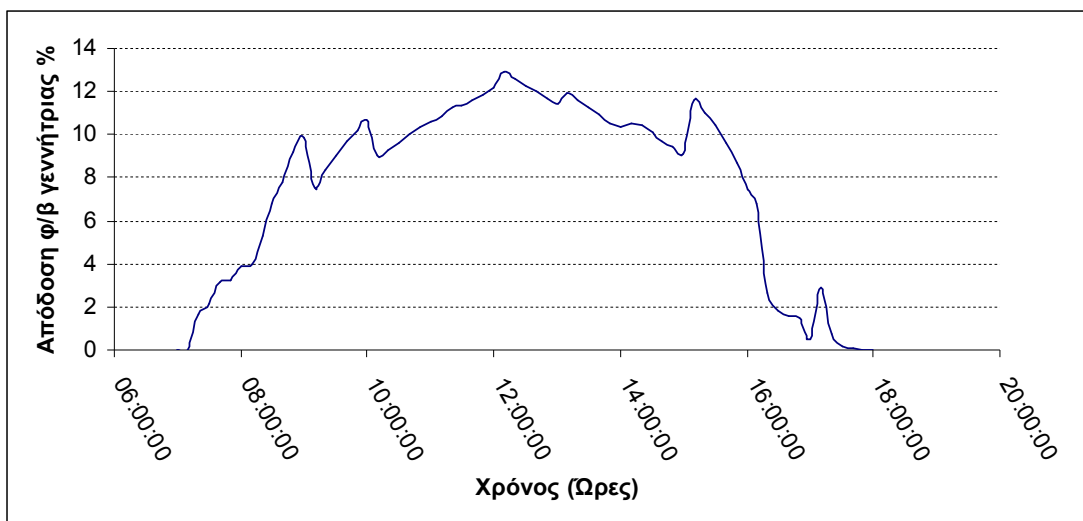


Εικόνα 7.2.1: Σύγκριση της ισχύος της φ/β γεννήτριας με την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτήν

Η απόδοση της φ/β γεννήτριας δίνεται από την εξίσωση (7.3). Η ηλιακή ακτινοβολία της εξίσωσης (7.3), είναι αυτή που προσπίπτει στα πάνελ, υπολογίζεται με το μοντέλο HDKR και φαίνεται στην εικόνα (7.2.1).

$$n_{\phi/\beta \text{ γεννήτρια}} = \frac{\text{ισχύς } \phi/\beta \text{ γεννήτριας}}{\text{ηλιακή ακτινοβολία}} (\%) \quad (7.3)$$

Στην εικόνα (7.2.2) φαίνεται η απόδοση της φ/β γεννήτριας, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις της εικόνας (7.2.1) και της εξίσωσης (7.3).



Εικόνα 7.2.2: Απόδοση φ/β γεννήτριας κατά τη διάρκεια της ημέρας

Θα έπρεπε να εξετάσουμε την απόδοση ενός φ/β πάνελ βάσει της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' αυτό, αλλά και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, καθώς είναι οι δύο παράγοντες που το επηρεάζουν περισσότερο. Η μέση απόδοση της φ/β γεννήτριας στις 3/11/09 είναι μια καλή προσέγγιση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλο το πενήμηρο που εξετάζεται. Η μέση απόδοση της φ/β γεννήτριας, όπως προκύπτει από την εικόνα (7.2.2), είναι 9,9%.

### 7.3 Απόδοση φωτοβολταϊκού αντιστροφέα

Ο φ/β αντιστροφέας του εργαστηρίου είναι ο “Sunny Boy 1100” της SMA, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στο πίνακα (7.3.1). [20]

| Sunny Boy 1100               |        |
|------------------------------|--------|
| Μέγιστη ισχύς εισόδου (DC)   | 1210 W |
| Μέγιστη τάση (DC)            | 400 V  |
| Μέγιστη ισχύς εξόδου (AC)    | 1100 W |
| Ονομαστική ισχύς εξόδου (AC) | 1000 W |
| Απόδοση                      | 93%    |

Πίνακας 7.3.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του φ/β αντιστροφέα

Για τον υπολογισμό της απόδοσης του φ/β αντιστροφέα μετρήθηκαν η τάση και το ρεύμα στη είσοδό του και η ενεργός ισχύς στην έξοδό του. Βάσει των μετρήσεων προέκυψε η καμπύλη της εικόνας (7.3.1), που δείχνει την απόδοση του φ/β αντιστροφέα συναρτήσει του επιπέδου λειτουργίας του. Η απόδοση του φ/β αντιστροφέα δίνεται από την εξίσωση (7.4), ενώ το επίπεδο λειτουργίας από την εξίσωση (7.5).

$$n_{\phi/\beta \text{ αντιστροφέα}} = \frac{\text{ισχύς εξόδου (AC)}}{\text{ισχύς εισόδου (DC)}} (\%) \quad (7.4)$$

$$\text{Επίπεδο λειτουργίας} = \frac{\text{ισχύς εισόδου}}{\text{μέγιστη ισχύς εισόδου}} (\%) \quad (7.5)$$

Στη συνέχεια η καμπύλη χωρίστηκε σε δύο μέρη, ανάλογα το επίπεδο λειτουργίας, και έγινε η προσέγγιση τους με πολυώνυμα 3<sup>ου</sup> βαθμού (παράρτημα Α). Για επίπεδο λειτουργίας μεταξύ 1,5% και 4% προέκυψε η εξίσωση (7.6) και για επίπεδο λειτουργίας μεγαλύτερο από 4% η εξίσωση (7.7).

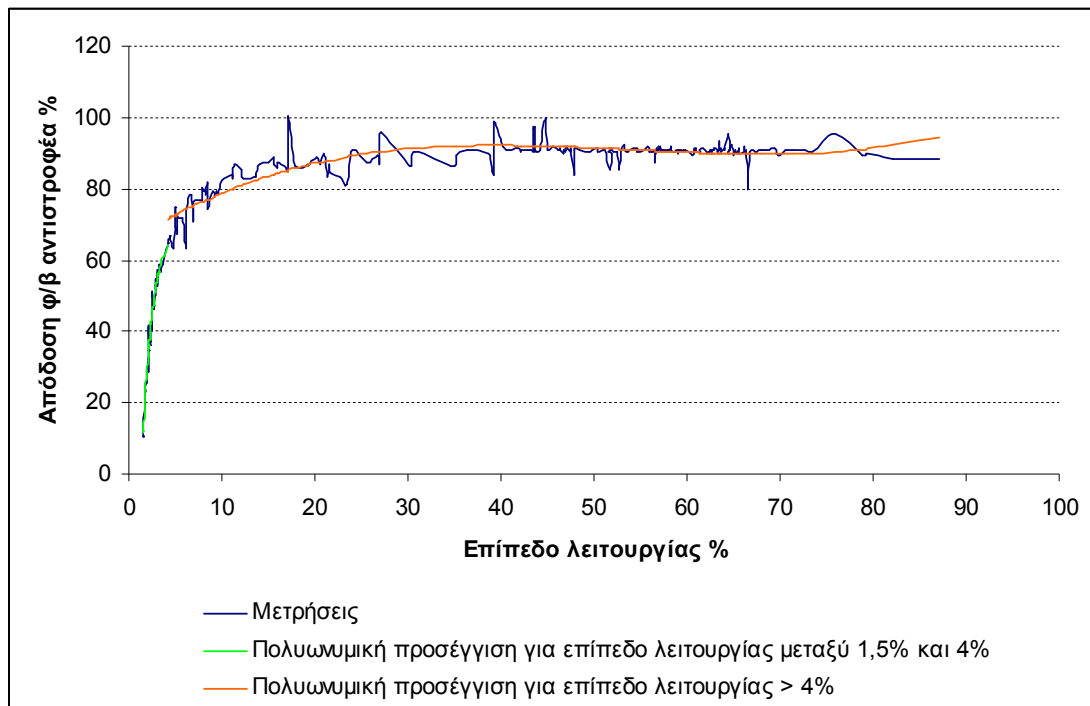
$$n_{\phi/\beta \text{ αντιστροφέα}} = -110,67937 + 115,73897 \cdot x - 26,87391 \cdot x^2 + 2,19583 \cdot x^3 \quad (7.6)$$

Ο μέσος όρος σχετικού σφάλματος για την εξίσωση (7.6) σε σχέση με τις μετρήσεις είναι 4,65%.

$$n_{\phi/\beta \text{ αντιστροφέα}} = 64,82852 + 1,70883 \cdot x - 0,03408 \cdot x^2 + 0,000211 \cdot x^3 \quad (7.7)$$

Ο μέσος όρος σχετικού σφάλματος για την εξίσωση (7.7) σε σχέση με τις μετρήσεις είναι 2,153%.

Οι πολυωνυμικές προσεγγίσεις φαίνονται στην εικόνα (7.3.1).



Εικόνα 7.3.1: Απόδοση φ/β αντιστροφέα συναρτήσει του επιπέδου λειτουργίας του

## 7.4 Απόδοση αντιστροφέα μπαταριών

Ο αντιστροφέας μπαταριών του εργαστηρίου είναι ο “Sunny Island 4500” της SMA, ο οποίος λειτουργεί άλλοτε ως αντιστροφέας και άλλοτε ως ανορθωτής ανάλογα με το αν εκφορτίζει ή φορτίζει τις μπαταρίες αντίστοιχα. Μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στο πίνακα (7.4.1). [20]

| Sunny Island 4500  |                      |
|--|----------------------|
| Λειτουργία ως αντιστροφέας                                 |                      |
| Ονομαστική τάση εξόδου                                     | 230 V                |
| Συχνότητα  | 50 Hz                |
| Ονομαστική ισχύς εξόδου (AC) στους 25°C / 45°C             | 3700 / 3300 W        |
| Μέγιστη ισχύς εξόδου στους 25°C για διάστημα 30/5/1 λεπτών | 4500 / 5200 / 6000 W |
| Απόδοση  | 91%                  |

Πίνακας 7.4.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα μπαταριών

### Λειτουργία αντιστροφέα

Για τον υπολογισμό της απόδοσης του “Sunny Island” σε λειτουργία αντιστροφέα μετρήθηκαν η τάση και το ρεύμα στη πλευρά των μπαταριών (είσοδος - DC) και η ενεργός ισχύς στην πλευρά του δικτύου (έξοδος - AC). Βάσει των μετρήσεων προέκυψε η καμπύλη της εικόνας (7.4.1), που δείχνει την απόδοση του αντιστροφέα συναρτήσει του επιπέδου λειτουργίας του. Η απόδοση του “Sunny Island” δίνεται από την εξίσωση (7.8), ενώ το επίπεδο λειτουργίας δίνεται από την εξίσωση (7.9).



$$n_{\text{αντιστροφέα μπαταριών}} = \frac{\text{ισχύς εξόδου}}{\text{ισχύς εισόδου}} (\%) \quad (7.8)$$

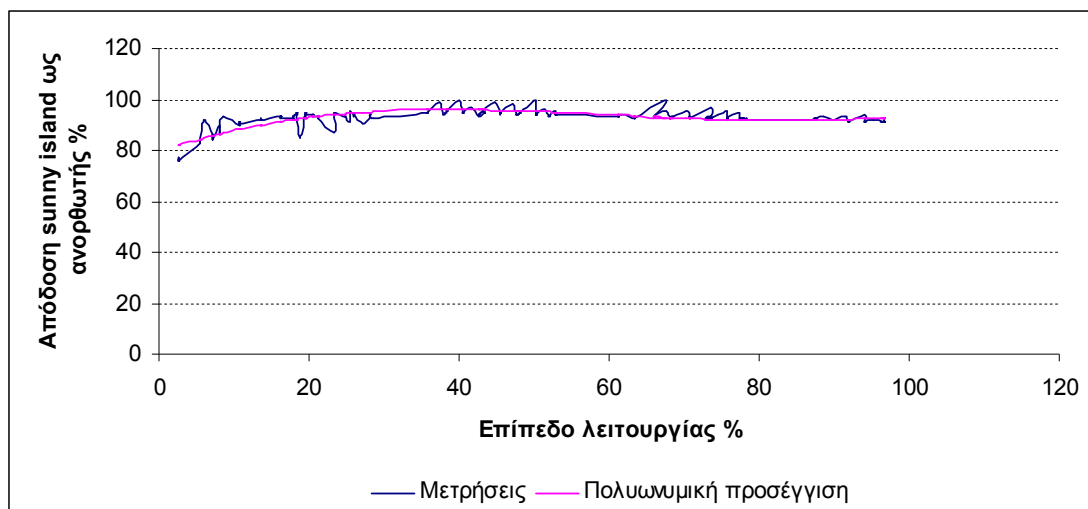
$$\text{Επίπεδο λειτουργίας} = \frac{\text{ισχύς (AC)}}{\text{ονομαστική ισχύς (AC)}} (\%) \quad (7.9)$$

Στη συνέχεια έγινε προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης με πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού (παράρτημα Α) και προέκυψε η εξίσωση (7.10).

$$n_{\text{s\_island\_αντιστροφέας}} = 79,76002 + 0,97751 \cdot x - 0,018276 \cdot x^2 + 9,98 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 \quad (7.10)$$

Ο μέσος όρος σχετικού σφάλματος για την εξίσωση (7.10) σε σχέση με τις μετρήσεις είναι 1,362%.

Η πολυωνυμική προσέγγιση της απόδοσης του “Sunny Island”, σε λειτουργία αντιστροφέα φαίνεται στην εικόνα (7.4.1).



Εικόνα 7.4.1: Απόδοση sunny island ως αντιστροφέας συναρτήσεως του επιπέδου λειτουργίας του

### Λειτουργία ανορθωτή

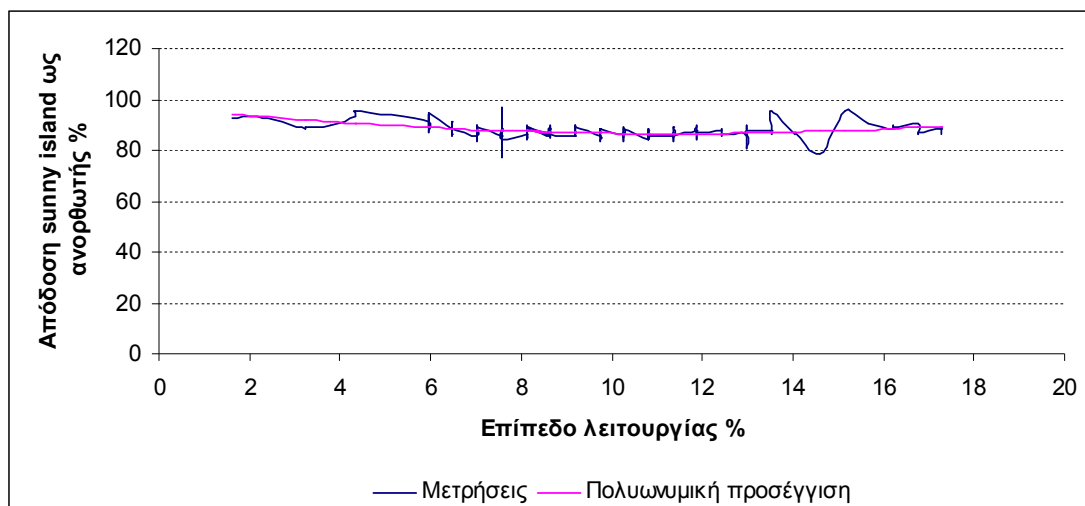
Στη λειτουργία ως ανορθωτής μετρήθηκαν η τάση και το ρεύμα στη πλευρά των μπαταριών (έξοδος - DC) και η ενεργός ισχύς στην πλευρά του δικτύου (είσοδος - AC). Από τις μετρήσεις προέκυψε η εικόνα (7.4.2), που δείχνει την απόδοση του αντιστροφέα συναρτήσεως του επιπέδου λειτουργίας του. Η απόδοση δίνεται από την εξίσωση (7.8) με τη διαφορά ότι ως είσοδο έχουμε τη πλευρά του δικτύου και ως έξοδο τη πλευρά των μπαταριών. Για το επίπεδο λειτουργίας ισχύει η εξίσωση (7.9).

Στη συνέχεια έγινε προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης με πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού (παράρτημα Α) και προέκυψε η εξίσωση (7.11).

$$n_{\text{s\_island\_ανορθωτής}} = 96,94547 - 1,87173 \cdot x + 0,087998 \cdot x^2 - 0,003184 \cdot x^3 \quad (7.11)$$

Ο μέσος όρος σχετικού σφάλματος για την εξίσωση (7.11) σε σχέση με τις μετρήσεις είναι 2,01%.

Η πολυωνυμική προσέγγιση της απόδοσης του “Sunny Island”, σε λειτουργία ανορθωτή φαίνεται στην εικόνα (7.4.2).



Εικόνα 7.4.2: Απόδοση sunny island ως ανορθωτής συναρτήσει του επιπέδου λειτουργίας του

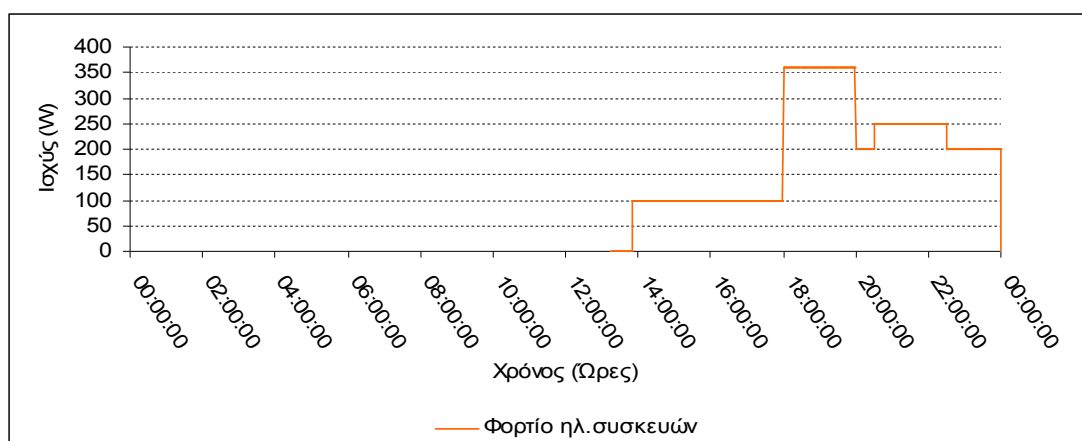
## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>

### 8. Προσομοιώσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος και παρουσιάζονται οι δείκτες αξιολόγησής του. Μέσω προσομοιώσεων, παρατηρείται η επίδραση της ενεργειακής διαχείρισης του φορτίου στη συμπεριφορά του συστήματος. Τέλος αναλύεται το οικονομικό όφελος από την εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το αρχικό κόστος του εξοπλισμού KNX/EIB , για την ενεργειακή διαχείριση του φορτίου.

#### 8.1 Διαστασιολόγηση

Το συνολικό φορτίο ισούται με 2310Wh και χωρίζεται στο φορτίο των ηλεκτρικών συσκευών, που φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας (8.1.1) και στο φορτίο του κλιματιστικού που ισούται με το μέγιστο χρόνο λειτουργίας του (12 λεπτά) κατά τη χειροκίνητη χρήση.



Εικόνα 8.1.1: Φορτία ηλεκτρικών συσκευών

Επειδή η κατανάλωση του φορτίου γίνεται κυρίως τις βραδινές ώρες θα έχουμε τα στάδια, παραγωγή, αποθήκευση την ημέρα και κατανάλωση το βράδυ.

Με απόδοση φ/β αντιστροφέα 90%, απόδοση “ sunny Island” κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση 90% , η ενέργεια που θα πρέπει να παράγεται από τη φ/β γεννήτρια είναι  $(2310/0,9^3) = 3165 \text{ Wh}$ . Αν η φ/β γεννήτρια λειτουργεί 3,6 ώρες στην ονομαστική ισχύ, τότε θα είναι  $(3165/3,6) \approx 879 \text{ Wp}$ . Επομένως επιλέγονται 8 πάνελ 110Wp της εταιρίας Isofoton, οπότε η φ/β γεννήτρια θα έχει συνολική ισχύ **880Wp** και ο φ/β αντιστροφέας “sunny boy 1100” της εταιρίας SMA.

Έστω ότι όλο το φορτίο καταναλώνεται το βράδυ, άρα αποθηκεύεται την ημέρα και απαιτούνται 2 ημέρες εφεδρείας. Αν διατίθενται 30 μπαταρίες των 2V με βάθος εκφόρτισης 60% , τότε οι μπαταρίες θα είναι :

$$\frac{2310 \cdot 3}{0,9 \cdot 0,6 \cdot 60} \approx 215 \text{ Ah} .$$

Επομένως επιλέγονται μπαταρίες OpZs 250Ah της εταιρίας Ergon.

Η ισχύς του κλιματιστικού είναι 1350W και η μέγιστη ισχύς από την ταυτόχρονη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών 360W. Άρα το μέγιστο φορτίο που εμφανίζεται είναι 1710W. Γι' αυτό επιλέγεται μια ντιζελογεννήτρια 1,8 kVA, έτσι ώστε να εξυπηρετεί το μέγιστο φορτίο που μπορεί να εμφανισθεί στο υβριδικό, και ο αντιστροφέας μπαταριών “sunny Island 4500” της εταιρίας SMA.

Στις μπαταρίες πρέπει να παραμένει το φορτίο μιας μέρας, ώστε να εξυπηρετηθεί το σύστημα σε κάποια έκτακτη περίπτωση (π.χ όταν χαλάσει η ντιζελογεννήτρια). Επομένως η ντιζελογεννήτρια θα λειτουργεί όταν το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών πέσει κάτω από 65%.

## 8.2 Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος

Οι δείκτες αξιολόγησης είναι: το ηλιακό κέρδος, η απόδοση του φ/β συστήματος, η απόδοση αναφοράς, η τελική απόδοση του υβριδικού συστήματος και η συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

### 1) Ηλιακό κέρδος

Ο δείκτης ηλιακό κέρδος (solar fraction) είναι ο πιο σημαντικός, μας πληροφορεί για το ποσοστό του φορτίου που εξυπηρετήθηκε από τα φωτοβολταϊκά και δίνεται από την εξίσωση (8.1). [17]

$$F_{sol} = \frac{E_{PV,USE}}{E_{tot}} \cdot \% \quad (8.1)$$

όπου,

$E_{PV,USE}$ : είναι η ενέργεια των φωτοβολταϊκών που καταναλώθηκε από το φορτίο(KWh/day).

$E_{tot}$ : είναι η συνολική ενέργεια που κατανάλωσε το φορτίου (KWh/day).

Διαφορετικά ο δείκτης του ηλιακού κέρδους ορίζεται στην πλευρά της παραγωγής, όπως φαίνεται στο τύπο (8.2). Δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συγκρίνεται με τη συνολική παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα.

$$F_{sol} = \frac{E_{PV,AC}}{E_{PV,AC} + E_{GEN} + E_{BAT\_ΕΦΕΔΡΕΙΑ}} \cdot \% \quad (8.2)$$

όπου,

$E_{PV,AC}$ : είναι η ενέργεια που παρήχθη από το φωτοβολταϊκό σύστημα (φ/β - αντιστροφέας) (KWh/day).

$E_{GEN}$ : είναι η ενέργεια που έδωσε η ντιζελογεννήτρια στο φορτίο (KWh/day).

$E_{BAT\_ΕΦΕΔΡΕΙΑ}$ : είναι η ενέργεια που πήγε στο φορτίο από τη μπαταρία, η οποία όμως παράχθηκε από τη φ/β γεννήτρια προηγούμενη μέρα.

## 2) Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος

Η απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος (array yield) αναφέρεται στις ώρες που λειτούργησαν τα φωτοβολταϊκά στην ονομαστική τους ισχύ και δίνεται από την εξίσωση (8.3). [21]

$$Y_A = \frac{E_{PV,AC}}{P_{nominal}} \quad (8.3)$$

όπου,

$P_{nominal}$ : είναι η μέγιστη ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας (KWp).

## 3) Απόδοση αναφοράς

Η απόδοση αναφοράς (reference yield) συγκρίνει την ακτινοβολία που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά με την ακτινοβολία αναφοράς, οπότε μας πληροφορεί πόσες ώρες είχαμε την ακτινοβολία αναφοράς και δίνεται από την εξίσωση (8.4). [21]

$$Y_R = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad (8.4)$$

όπου,

$H_i$ : είναι η ημερήσια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά ανά  $m^2$  (KWh/ $m^2$  day) και την υπολογίζουμε από το μοντέλο HDKR.

$G_{STC}$ : είναι η ακτινοβολία αναφοράς και ισούται με 1000 W/ $m^2$ .

## 4) Τελική απόδοση

Η τελική απόδοση (final yield) υπολογίζει τις ώρες που πρέπει να λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά στην ονομαστική ισχύ τους, ώστε να ικανοποιήσουν το φορτίο και δίνεται από την εξίσωση (8.5). [21]

$$Y_F = \frac{E_{PV,USE}}{P_{nominal}} \quad (8.5)$$

## 5) Συνολική συμπεριφορά συστήματος – Performance Ratio

Η συνολική συμπεριφορά του συστήματος (performance ratio) μας πληροφορεί για το αν αξιοποιήσαμε με το καλύτερο τρόπο την ενέργεια του ήλιου για να εξυπηρετήσουμε το φορτίο μας και δίνεται από το τύπο (8.6). [21]

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \cdot \% \quad (8.6)$$

## 8.3 Διαδικασία προσομοιώσεων

Για να δούμε τη συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος, ως προς την ενεργειακή διαχείριση του φορτίου του κλιματιστικού, γίνονται προσομοιώσεις με τη βοήθεια των μοντέλων που αναπτύχθηκαν και των αποδόσεων που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Η διαδικασία της προσομοίωσης περιγράφεται παρακάτω:

Γνωρίζοντας την ακτινοβολία που προσπίπτει στη φ/β γεννήτρια από την εικόνα (4.6.1) για την αντίστοιχη επιφάνεια των φ/β πάνελ, την απόδοση της φ/β γεννήτριας 9,9% και την απόδοση του φ/β αντιστροφέα από τις εξισώσεις (7.6) και (7.7), βρίσκουμε τη παραγωγή του φ/β συστήματος.

Ένα μέρος της παραγωγής πηγαίνει στο φορτίο, αυτό που περισσεύει φορτίζει τις μπαταρίες και ένα ποσοστό 3% γίνεται απώλειες στις καλωδιώσεις.

Κατά τη φόρτιση χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (6.8), (6.9), (6.1) και (7.2) του μοντέλου μπαταριών, την απόδοση του “Sunny Island” από την εξίσωση (7.11) και θεωρώντας 3% απώλειες στη καλωδίωση, βρίσκουμε το φορτίο που προστίθεται στις μπαταρίες και άρα το SOC των μπαταριών από την εξίσωση (6.23).

Αν δεν υπάρχει φορτίο ή οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες τότε η παραγόμενη ενέργεια μένει αδιάθετη κι έτσι προκύπτει περίσσεια ενέργειας.

Από το μοντέλο μπαταριών προκύπτει ότι η μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών είναι 299Ah. Έτσι η προσομοίωση ξεκινάει με τη μπαταρία να έχει εκφορτίσει το φορτίο μιας μέρας, περίπου 44Ah και άρα SOC 85%. Ενώ η ντιζελογεννήτρια ενεργοποιείται όταν η μπαταρία έχει εκφορτίσει το φορτίο δύο ημερών, δηλαδή 88Ah και άρα SOC 70%.

Αν υπάρχει φορτίο και η μπαταρία έχει SOC μικρότερο από 70% ή το διαθέσιμο φορτίο της  $q_1$  δε μπορεί να εξυπηρετήσει τη ζήτηση, τότε λειτουργεί η ντιζελογεννήτρια.

Όταν υπάρχει παραγωγή αλλά δε φτάνει να καλύψει το φορτίο ή δεν υπάρχει καθόλου παραγωγή, τότε την επιπλέον ή όλη τη ζήτηση την εξυπηρετούν οι μπαταρίες, εφόσον έχουν SOC μεγαλύτερο από 70% και αρκετό διαθέσιμο φορτίο  $q_1$ .

Κατά την εκφόρτιση χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (6.8), (6.9), (6.2) και (7.1) του μοντέλου μπαταριών, την απόδοση του “Sunny Island” από την εξίσωση (7.10) και θεωρώντας 3% απώλειες στη καλωδίωση, βρίσκουμε το φορτίο που αφαιρείται από τις μπαταρίες και άρα το SOC των μπαταριών από την εξίσωση (6.23).

Τέλος για κάθε μέρα υπολογίζουμε τους δείκτες αξιολόγησης του συστήματος όπως περιγράφονται στην ενότητα (8.2).

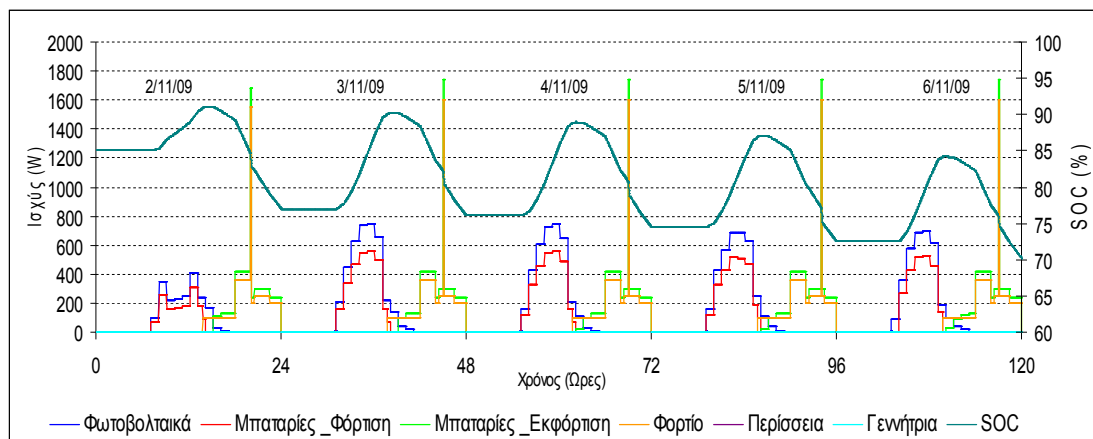
## 8.4 Επίδραση της ενεργειακής διαχείρισης του κλιματιστικού στο υβριδικό σύστημα

### 8.4.1 Σύγκριση της χειροκίνητης λειτουργίας του κλιματιστικού με τον έλεγχο του από αισθητήρες KNX/EIB

Με φ/β γεννήτρια 880Wp, μπαταρίες 250Ah και ντιζελογεννήτρια 1,8 KW γίνονται προσομοιώσεις για το πρώτο σενάριο, δηλαδή για χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού και για έλεγχο αυτού μέσω των αισθητήρων KNX/EIB. Το φορτίο των ηλεκτρικών συσκευών παραμένει το ίδιο όπως στην εικόνα (8.1.1) για όλο το πενήθμερο, το φορτίο όμως του κλιματιστικού αλλάζει.

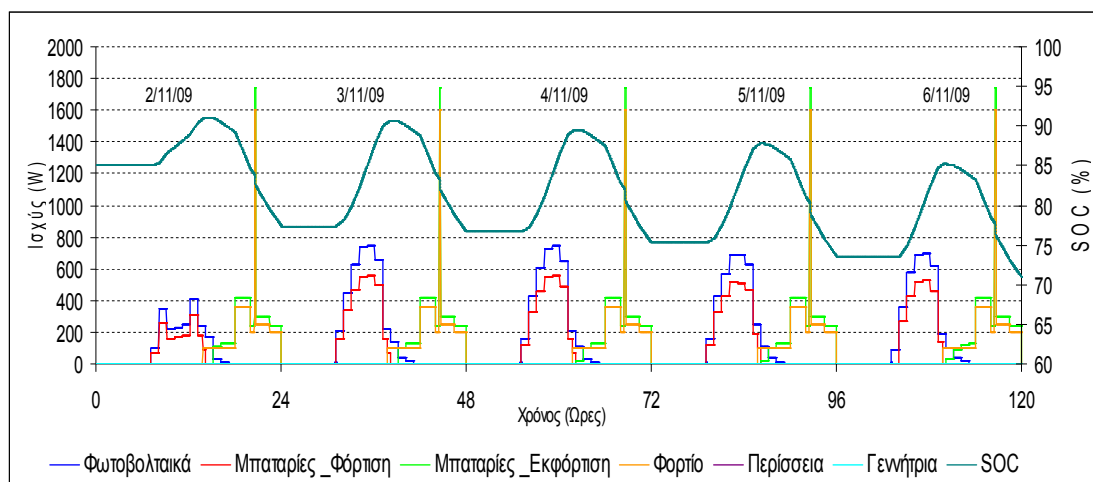
Κατά τη χειροκίνητη λειτουργία το φορτίο του κλιματιστικού δίνεται από το διάγραμμα της εικόνας (5.6.1), ενώ κατά τον έλεγχο του από τους αισθητήρες δίνεται από το διάγραμμα της εικόνας (5.6.2).

Στην εικόνα (8.4.1) παρουσιάζεται η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος κατά τη χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού.



Εικόνα 8.4.1: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού

Στην εικόνα (8.4.2) παρουσιάζεται η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος κατά τον έλεγχο του κλιματιστικού, μέσω των αισθητήρων θερμοκρασίας και παρουσίας ανθρώπου KNX/EIB.



Εικόνα 8.4.2: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB

Στο πίνακα (8.4.1) φαίνονται οι δείκτες αξιολόγησης του συστήματος κατά τη χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού.

| Δείκτες     | 2/11/09 | 3/11/09 | 4/11/09 | 5/11/09 | 6/11/09 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Fsol</b> | 57,94%  | 100,00% | 100,00% | 98,40%  | 94,40%  |
| <b>PR</b>   | 53,58%  | 51,11%  | 50,64%  | 50,79%  | 49,40%  |
| <b>SOC</b>  | 76,97%  | 76,03%  | 74,47%  | 72,50%  | 70,02%  |
| <b>Ya</b>   | 1,97    | 3,87    | 3,71    | 3,60    | 3,40    |
| <b>Yr</b>   | 2,92    | 5,63    | 5,40    | 5,22    | 4,95    |
| <b>Yf</b>   | 1,56    | 2,65    | 2,67    | 2,65    | 2,44    |

Πίνακας 8.4.1: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού

Στο πίνακα (8.4.2) φαίνονται οι δείκτες αξιολόγησης του συστήματος κατά τον έλεγχο του κλιματιστικού από τους αισθητήρες KNX/EIB.

| Δείκτες     | 2/11/09 | 3/11/09 | 4/11/09 | 5/11/09 | 6/11/09 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Fsol</b> | 59,44%  | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 93,29%  |
| <b>PR</b>   | 53,28%  | 51,14%  | 50,67%  | 43,20%  | 49,60%  |
| <b>SOC</b>  | 77,41%  | 76,64%  | 75,25%  | 73,55%  | 71%     |
| <b>Ya</b>   | 1,97    | 3,87    | 3,71    | 3,60    | 3,40    |
| <b>Yr</b>   | 2,92    | 5,63    | 5,40    | 5,22    | 4,95    |
| <b>Yf</b>   | 1,55    | 2,61    | 2,63    | 2,63    | 2,45    |

Πίνακας 8.4.2: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων KNX/EIB

Από τους πίνακες (8.4.1) και (8.4.2) παρατηρείται ότι με τον έλεγχο του κλιματιστικού από τους αισθητήρες έχουμε καλύτερη κάλυψη του φορτίου από τη φ/β γεννήτρια, αφού το Fsol είναι μεγαλύτερο όλες τις μέρες εκτός από τη τελευταία, ενώ το SOC στο τέλος του πενθημέρου είναι μεγαλύτερο κατά 1%.

Στο πίνακα (8.4.3) φαίνεται η παραγωγή ενέργειας από τη φ/β γεννήτρια, η παραγωγή από τη ντιζελογεννήτρια και το φορτίο για το πρώτο σενάριο.

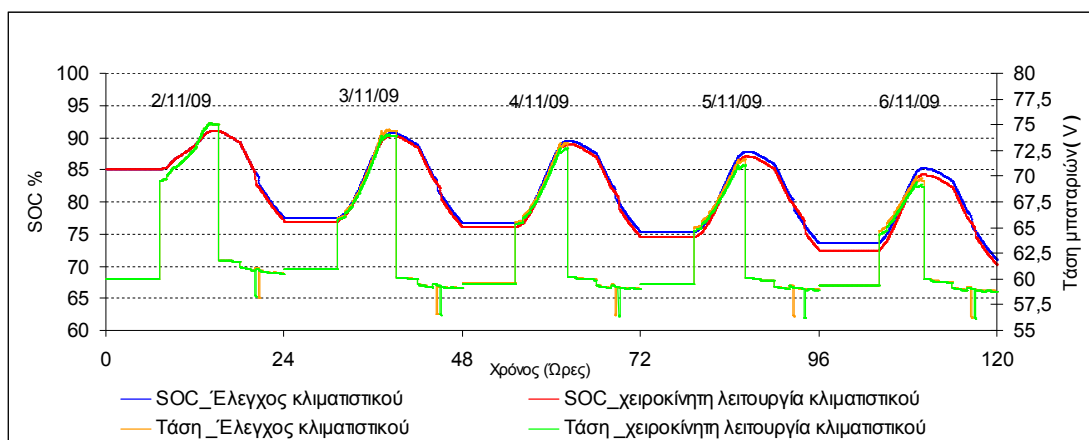
|  | 2/11/09 | 3/11/09 | 4/11/09 | 5/11/09 | 6/11/09 | Σύνολο   |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| <b>Παραγωγή φ/β (Wh)</b>                     | 1985,56 | 3834,48 | 3680,99 | 3553,18 | 3370,20 | 16424,41 |
| <i>Χειροκίνητη λειτουργία κλιματιστικού</i>  |         |         |         |         |         |          |
| <b>Φορτίο (Wh)</b>                           | 2301,43 | 2266,18 | 2283,81 | 2301,43 | 2213,31 | 11366,17 |
| <b>Γεννήτρια (Wh)</b>                        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        |
| <i>Έλεγχος κλιματιστικού μέσω αισθητήρων</i> |         |         |         |         |         |          |
| <b>Φορτίο (Wh)</b>                           | 2230,93 | 2230,93 | 2248,56 | 2248,56 | 2248,56 | 11207,54 |
| <b>Γεννήτρια (Wh)</b>                        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        |

Πίνακας 8.4.3: Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού στο σενάριο Α

Η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται στο υβριδικό σύστημα με τον έλεγχο του κλιματιστικού είναι 1% στο SOC ή **180Wh**.



Στην εικόνα (8.4.3) παρουσιάζεται η τάση και το SOC των μπαταριών κατά τις προσομοιώσεις του συστήματος για χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού και για έλεγχο του κλιματιστικού από τους αισθητήρες.



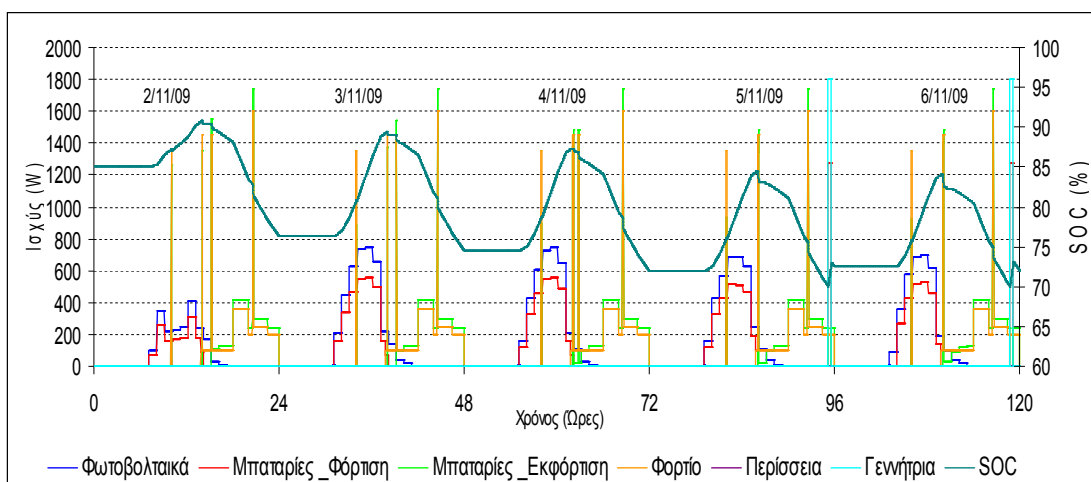
Εικόνα 8.4.3: SOC και τάση μπαταριών κατά τις προσομοιώσεις για χειροκίνητη λειτουργία του κλιματιστικού και για έλεγχο του κλιματιστικού μέσω αισθητήρων

#### 8.4.2 Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο φορτίο του κλιματιστικού

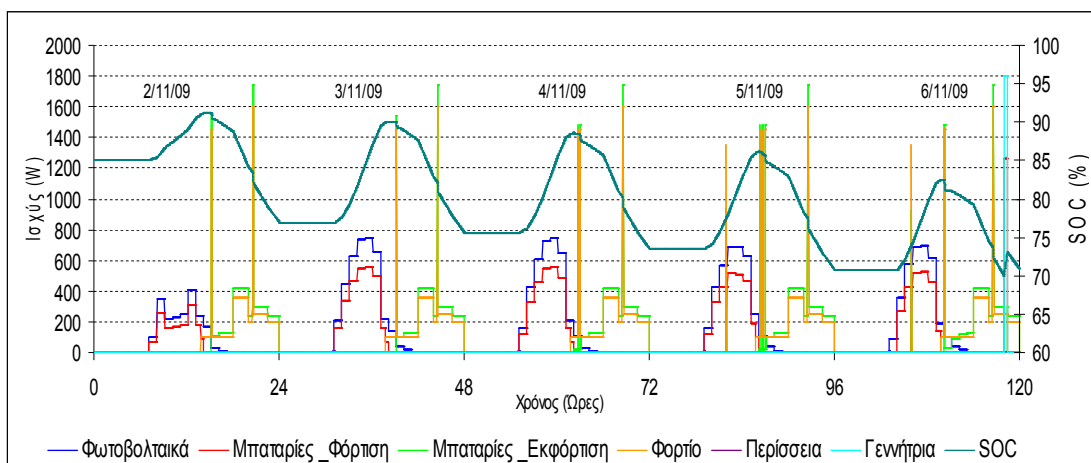
Στη ενότητα αυτή γίνονται προσομοιώσεις για το δεύτερο σενάριο, δηλαδή όταν απουσιάζει ο χρήστης το ρολό της μπαλκονόπορτας είναι κλειστό, και όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό, οπότε η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο δωμάτιο όλη την ημέρα. Κατά τις προσομοιώσεις κρατείται η ίδια αρχική διαστασιολόγηση, ο έλεγχος του κλιματιστικού από τους αισθητήρες KNX/EIB και το ηλεκτρικό φορτίο συσκευών της εικόνας (8.1.1).

Όταν το ρολό παραμένει κλειστό κατά την απουσία του χρήστη το φορτίο του κλιματιστικού δίνεται από την εικόνα (5.7.7). Ενώ όταν το ρολό παραμένει ανοιχτό όλη τη διάρκεια της ημέρας το φορτίο του κλιματιστικού δίνεται από την εικόνα (5.7.5). Στο δεύτερο σενάριο υπάρχει και έλεγχος του φωτισμού, δεν προέκυψε όμως επιπλέον φορτίο.

Στην εικόνα (8.4.4) παρουσιάζεται η προσομοίωση με το ρολό κλειστό κατά την απουσία του χρήστη. Ενώ στην εικόνα (8.4.5) παρουσιάζεται η προσομοίωση με το ρολό ανοιχτό κατά τη διάρκεια της μέρας.



Εικόνα 8.4.4: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με το ρολό κλειστό κατά την απουσία του χρήστη



Εικόνα 8.4.5: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με το ρολό ανοιχτό κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Στο πίνακα (8.4.4) φαίνονται οι δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με το ρολό κλειστό κατά την απουσία του χρήστη. Ενώ στο πίνακα (8.4.5) φαίνονται οι δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με το ρολό ανοιχτό όλη τη διάρκεια της ημέρας.

| Δείκτες     | 2/11/09 | 3/11/09 | 4/11/09 | 5/11/09 | 6/11/09 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Fsol</b> | 55,49%  | 100,00% | 95,60%  | 80,34%  | 78,91%  |
| <b>PR</b>   | 54,06%  | 51,01%  | 51,28%  | 43,44%  | 49,35%  |
| <b>SOC</b>  | 76,27%  | 74,48%  | 71,91%  | 72,50%  | 71,98%  |
| <b>Ya</b>   | 1,97    | 3,87    | 3,71    | 3,60    | 3,40    |
| <b>Yr</b>   | 2,92    | 5,63    | 5,40    | 5,22    | 4,95    |
| <b>Yf</b>   | 1,58    | 2,84    | 2,77    | 2,28    | 2,25    |

Πίνακας 8.4.4: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με το ρολό κλειστό κατά την απουσία του χρήστη

| Δείκτες     | 2/11/09 | 3/11/09 | 4/11/09 | 5/11/09 | 6/11/09 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Fsol</b> | 57,57%  | 100,00% | 98,82%  | 93,97%  | 78,91%  |
| <b>PR</b>   | 53,64%  | 51,06%  | 50,75%  | 51,47%  | 49,69%  |
| <b>SOC</b>  | 76,94%  | 75,60%  | 73,52%  | 70,75%  | 70,84%  |
| <b>Ya</b>   | 1,97    | 3,87    | 3,71    | 3,60    | 3,40    |
| <b>Yr</b>   | 2,92    | 5,63    | 5,40    | 5,22    | 4,95    |
| <b>Yf</b>   | 1,56    | 2,72    | 2,74    | 2,69    | 2,17    |

Πίνακας 8.4.5: Δείκτες αξιολόγησης του συστήματος με το ρολό ανοιχτό όλη τη διάρκεια της ημέρας

Από τους πίνακες (8.4.3) και (8.4.4) παρατηρείται ότι με το ρολό ανοιχτό έχουμε καλύτερη κάλυψη του φορτίο από τη φ/β γεννήτρια, το Fsol είναι μεγαλύτερο όλες τις μέρες, ενώ η ντιζελογεννήτρια ενεργοποιείται τη τελευταία μόνο ημέρα. Αντίθετα όταν το ρολό είναι κλειστό κατά την απουσία του χρήστη το υβριδικό αναγκάζεται τις δύο τελευταίες ημέρες να χρησιμοποιήσει τη ντιζελογεννήτρια για να εξυπηρετήσει το φορτίο. Το SOC στο τέλος του πενημέρου είναι μεγαλύτερο κατά 1% όταν το ρολό είναι κλειστό.

Με ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης της ενέργειας το υβριδικό σύστημα ανταποκρίνεται καλύτερα στις μεταβολές του προφίλ των καταναλώσεων.

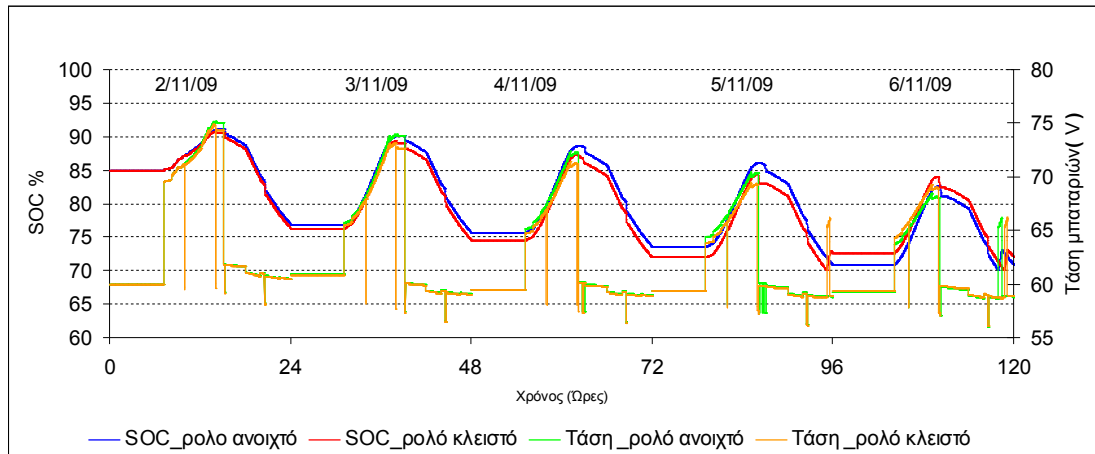
Στο πίνακα (8.4.6) φαίνεται η παραγωγή ενέργειας από τη φ/β γεννήτρια, η παραγωγή από τη ντιζελογεννήτρια και το φορτίο για το δεύτερο σενάριο.

|   | 2/11/09 | 3/11/09 | 4/11/09 | 5/11/09 | 6/11/09 | Σύνολο   |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| <b>Παραγωγή φ/β (Wh)</b>                        | 1985,56 | 3834,48 | 3680,99 | 3553,18 | 3370,20 | 16424,41 |
| <i>Ρολό κλειστό κατά την απουσία του χρήστη</i> |         |         |         |         |         |          |
| <b>Φορτίο (Wh)</b>                              | 2424,81 | 2424,81 | 2477,68 | 2512,93 | 2530,56 | 12370,79 |
| <b>Γεννήτρια (Wh)</b>                           | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 775,50  | 799,00  | 1574,50  |
| <i>Ρολό ανοιχτό όλη τη διάρκεια της ημέρας</i>  |         |         |         |         |         |          |
| <b>Φορτίο(Wh)</b>                               | 2319,06 | 2319,06 | 2371,93 | 2442,43 | 2460,06 | 11912,54 |
| <b>Γεννήτρια (Wh)</b>                           | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 799,00  | 799,00   |

Πίνακας 8.4.6: Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού στο σενάριο B

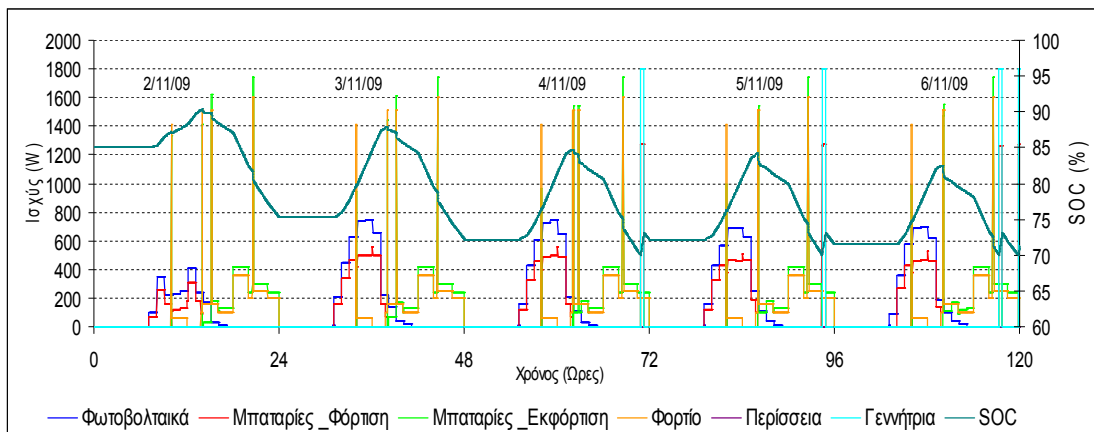
Η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται στο υβριδικό σύστημα με το ρολό ανοιχτό είναι 775,5Wh από τη ντιζελογεννήτρια μείον 1% από το SOC, αφού με το ρολό κλειστό η τελευταία μέρα έχει μεγαλύτερο SOC. Η συνολική εξοικονόμηση ισούται με **600Wh**.

Στην εικόνα (8.4.6) παρουσιάζεται το SOC και η τάση των μπαταριών κατά τις προσομοιώσεις του συστήματος όταν το ρολό είναι ανοιχτό και όταν το ρολό είναι κλειστό.



Εικόνα 8.4.6: SOC και τάση μπαταριών κατά τις προσομοιώσεις για ανοιχτό και κλειστό ρολό

Αν το ολοκληρωμένο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης δεν έκανε έλεγχο του φωτισμού και ο χρήστης άναβε τα φώτα του δωματίου χωρίς ουσιαστικά να χρειάζεται, τότε θα προέκυπτε επιπλέον φορτίο. Η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με το επιπλέον φορτίο φωτισμού και το ρολό κλειστό, φαίνεται στην εικόνα (8.4.7).



Εικόνα 8.4.7: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με το επιπλέον φορτίο φωτισμού και το ρολό κλειστό

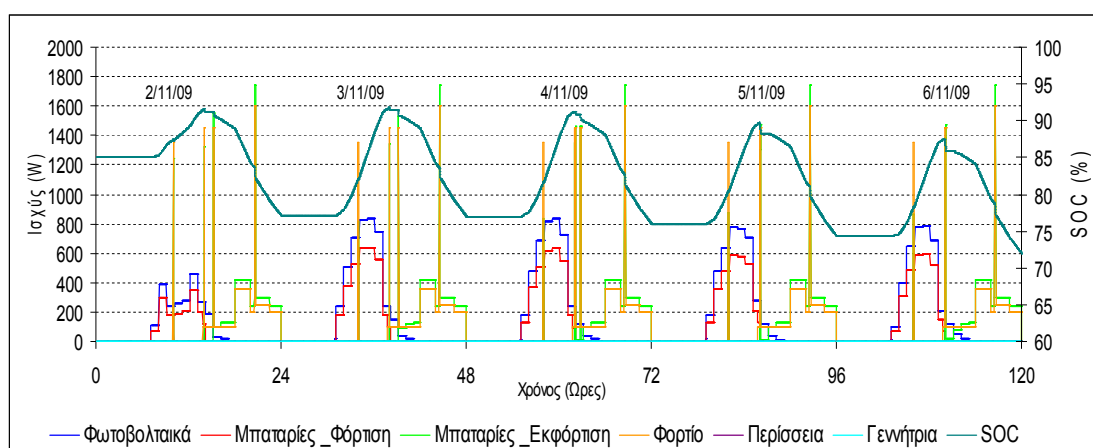
Στο πίνακα (8.4.7) φαίνεται η παραγωγή ενέργειας από τη φ/β γεννήτρια, η παραγωγή από τη ντιζελογεννήτρια και το φορτίο για το επιπλέον φορτίο φωτισμού.

|                          | 2/11/09  | 3/11/09 | 4/11/09 | 5/11/09 | 6/11/09 | Σύνολο   |
|--------------------------|--|---------|---------|---------|---------|----------|
| <b>Παραγωγή φ/β (Wh)</b> | 1985,56  | 3834,48 | 3680,99 | 3553,18 | 3370,20 | 16424,41 |
|                          | <i>Ρολό κλειστό και επιπλέον φορτίο φωτισμού</i> |         |         |         |         |          |
| <b>Φορτίο (Wh)</b>       | 2666,86  | 2666,86 | 2719,73 | 2754,98 | 2772,61 | 13581,04 |
| <b>Γεννήτρια (Wh)</b>    | 0,00   | 0,00    | 799,00  | 799,00  | 1104,50 | 2702,50  |

Πίνακας 8.4.7: Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού με το επιπλέον φορτίο και το ρολό κλειστό

Από την σύγκριση των πινάκων (8.4.6) και (8.4.7) παρατηρείται ότι με το επιπλέον φορτίο φωτισμού η ντιζελογεννήτρια παράγει επιπλέον 1128Wh.

Αν ο χρήστης κάνει από μόνος του εξοικονόμηση ενέργειας όσο αναφορά το κλιματιστικό και το φωτισμό, τότε το ηλεκτρικό φορτίο του δωματίου, όταν το ρολό είναι κλειστό, μπορεί να αντιμετωπιστεί και με αύξηση της φ/β γεννήτριας. Επιλέγεται μια γεννήτρια 990Wr, από 880Wr που ήταν πριν και γίνεται η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος που φαίνεται στην εικόνα (8.4.8).



Εικόνα 8.4.8: Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με φ/β γεννήτρια 990Wr και το ρολό κλειστό

Από την σύγκριση των εικόνων (8.4.4) και (8.4.8) παρατηρείται ότι με την αύξηση της φ/β γεννήτριας δεν χρειάζεται η λειτουργία της γεννήτριας για να καλυφθεί το φορτίο.

## 8.5 Το κόστος και τα οικονομικά οφέλη της ενεργειακής διαχείρισης

Για το πραγματικό σενάριο, όπου γίνεται μόνο ο έλεγχος του κλιματιστικού με τους αισθητήρες KNX/EIB, χρειάζονται τα υλικά του πίνακα (8.5.1). Το κτίριο διαθέτει 4 δωμάτια, γι' αυτό το κόστος ορισμένων υλικών επιμερίζεται και στα υπόλοιπα δωμάτια πέραν αυτού που εξετάζεται.

| Υλικά                   | Κόστος / δωμάτιο (€) |
|-------------------------|----------------------|
| Τροφοδοτικό             | 230/4                |
| Αισθητήρας παρουσίας    | 134                  |
| Αισθητήρας θερμοκρασίας | 230                  |
| Μονάδα ρελέ             | 305/4                |
| <b>Συνολικό κόστος</b>  | <b>500</b>           |

Πίνακας 8.5.1: Υλικά KNX/EIB για τον έλεγχο του κλιματιστικού με αισθητήρες

Αν το πενθήμερο με το πρώτο σενάριο, θεωρηθεί τυπικό για όλο το χρόνο, τότε η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται σε μια χρονιά λειτουργίας του συστήματος είναι  $0,180\text{KWh}/\text{πενθήμερο} \times 73 \text{ πενθήμερα} = 13,14 \text{ KWh}$ . Μια γεννήτρια χρειάζεται  $0,562 \text{ lit}$  πετρελαίου για τη παραγωγή μιας KWh. Με τιμή πετρελαίου στο  $1,45\text{€/lit}$  εξοικονομούνται  $10,7 \text{ €}$  το χρόνο. Η απόσβεση του κόστους των υλικών γίνεται μετά από 47 χρόνια.

Για το δεύτερο σενάριο, όπου πέραν του ελέγχου του κλιματιστικού γίνεται έλεγχος του ρολού της μπαλκονόπορτας και έλεγχος του φωτισμού χρειάζονται επιπλέον υλικά που φαίνονται στο πίνακα (8.5.2).

| Υλικά                  | Κόστος / δωμάτιο (€) |
|------------------------|----------------------|
| Αισθητήρας κίνησης     | 134                  |
| Μονάδα ελέγχου ρολών   | 334/4                |
| Μπουτόν ρολών          | 100                  |
| Μονάδα ελέγχου ρολών   | 675/4                |
| Διακόπτης φωτισμού     | 72                   |
| <b>Συνολικό κόστος</b> | <b>560</b>           |

Πίνακας 8.5.2: Υλικά KNX/EIB για τον έλεγχο του ρολού της μπαλκονόπορτας και του φωτισμού

Αν το πενθήμερο με το υποθετικό σενάριο, θεωρηθεί τυπικό για όλο το χρόνο, τότε η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται σε μια χρονιά λειτουργίας του συστήματος είναι  $0,6\text{KWh}/\text{πενθήμερο} \times 73 \text{ πενθήμερα} = 43,8 \text{ KWh}$ , ενώ το χρηματικό ποσό που εξοικονομείται είναι  $35,7 \text{ €}$  το χρόνο. Το συνολικό κόστος των υλικών είναι  $1060 \text{ €}$  και η απόσβεση του γίνεται μετά από 29 χρόνια.

Η απόσβεση του ολοκληρωμένου συστήματος ενεργειακής διαχείρισης, που ελέγχει το κλιματιστικό, το ρολό της μπαλκονόπορτας και το φωτισμό γίνεται πιο γρήγορα απ' ό,τι όταν ελέγχουμε μόνο το κλιματιστικό. Τα τελευταία χρόνια έχουν παρατηρηθεί μεταβολές στη τιμή του πετρελαίου από 5 έως 10 λεπτά του ευρώ μέσα στην ίδια χρονιά. Σ' αυτή τη περίπτωση η απόσβεση του συστήματος ενεργειακής διαχείρισης θα γίνει σε 21 με 18 χρόνια αντίστοιχα.

Λόγω του επιπλέον φορτίου φωτισμού η ντιζελογεννήτρια προσφέρει επιπλέον  $1128\text{Wh}$  το πενθήμερο. Το συνολικό κόστος από την επιπλέον λειτουργία της γεννήτριας είναι  $67 \text{ €}$  το χρόνο.

Αν το κόστος των φωτοβολταϊκών είναι  $1500 \text{ €}$  το  $1\text{kW}$ , τότε αν γίνει αύξηση της φ/β γεννήτριας το επιπλέον κόστος για το υβριδικό σύστημα είναι  $165 \text{ €}$ , έναντι  $1060 \text{ €}$  που κοστίζει το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης.

## Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>

### 9. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

#### Συμπεράσματα

1. Το μοντέλο ακτινοβολίας HDKR αναδεικνύεται σημαντικό τόσο στη θερμοδυναμική μελέτη του δωματίου, αλλά και στον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Επειδή όμως είναι ωριαίο δεν έχουμε μεγάλη ακρίβεια.

2. Το θερμοδυναμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε δε λαμβάνει υπόψη του την αποθήκευση ενέργειας στους τοίχους με αποτέλεσμα η πρόβλεψη της θερμοκρασίας να είναι χρονικά μετατοπισμένη σε σχέση με τη θερμοκρασία που μετρήθηκε στο δωμάτιο. Παρ' όλα αυτά όμως βοήθησε να υπολογιστεί το φορτίο του κλιματιστικού κατά την ενεργειακή διαχείριση και να βρεθεί η εξοικονόμηση ενέργειας που γίνεται στα δύο σενάρια.

3. Με το μοντέλο χωρητικότητας των μπαταριών υπολογίζεται το επίπεδο φόρτισης και η τάση των μπαταριών, βασικά στοιχεία για τις προσομοιώσεις του υβριδικού συστήματος. Το φορτίο εξυπηρετείται ανάλογα με το SOC, αλλιώς γίνεται η ενεργοποίηση της ντιζελογεννήτριας. Κατά τη φόρτιση ή την εκφόρτιση η τάση των μπαταριών μεταβάλλεται, οπότε σημαντική είναι και η συμβολή της τάσης. Για την εύρεση των εξισώσεων της εσωτερικής τάσης των μπαταριών κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση έγιναν μετρήσεις στο εργαστήριο. Κατά τις μετρήσεις οι μπαταρίες δεν εκφορτίστηκαν, ούτε φορτίστηκαν πλήρως με αποτέλεσμα να μην αποτυπωθεί όλη η καμπύλη της τάσης συναρτήσε του φορτίου που αφαιρείται ή προστίθεται αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά οι εξισώσεις προσεγγίζουν αρκετά καλά τις μετρήσεις.

4. Με μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο βρέθηκε για κάθε αντιστροφέα μια καμπύλη απόδοσης συναρτήσε του επιπέδου λειτουργίας του. Στον φ/β αντιστροφέα εξετάστηκε επίπεδο λειτουργίας από 1,5% έως 88%. Στον "Sunny Island" εξετάστηκε επίπεδο λειτουργίας από 1,6% έως 18% και από 2,7% έως 96%, στη λειτουργία ως ανορθωτής και αντιστροφέας αντίστοιχα. Στη φ/β γεννήτρια βρέθηκε μια μέση απόδοση 9,9%. Τέλος θεωρήθηκαν απώλειες στη καλωδίωση 3%.

5. Η συνολική απόδοση (PR) του υβριδικού συστήματος, τις μέρες με καλή ηλιοφάνεια, είναι κοντά στο 50% και για τα δύο σενάρια. Αυτό συμβαίνει γιατί το φορτίο καταναλώνεται κυρίως το βράδυ με αποτέλεσμα να έχουμε πολλές απώλειες ενέργειας κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση των μπαταριών. Ενώ στο δεύτερο σενάριο που αναγκάζεται να χρησιμοποιήσει τη ντιζελογεννήτρια η συνολική απόδοση πέφτει κάτω από 50%.

6. Η εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει στο υβριδικό σύστημα είναι μεγαλύτερη και στα δύο σενάρια, έναντι της ενεργειακής διαχείρισης του φορτίου. Αυτό συμβαίνει γιατί στο υβριδικό έχουμε και την εξοικονόμηση από τις διάφορες απώλειες.

7. Η εξοικονόμηση ενέργειας στο πρώτο σενάριο είναι 180Wh, που σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί και μόνος του να εξοικονομήσει ενέργεια. Στο δεύτερο όμως σενάριο με το ολοκληρωμένο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης η εξοικονόμηση είναι 600Wh και το υβριδικό σύστημα ανταποκρίνεται καλύτερα στις μεταβολές του φορτίου. Η εξοικονόμηση ενέργειας και στις δύο περιπτώσεις θα ήταν πολύ μεγαλύτερη αν εξετάζονταν ένα μεγαλύτερο κτίριο, όπως συγκρότημα γραφείων ή μια δημόσια υπηρεσία.

8. Η απόσβεση της επένδυσης στο δεύτερο σενάριο γίνεται σε 29 χρόνια. Αν η τιμή του πετρελαίου είναι συνεχώς ανοδική τότε συμφέρει το χρήστη να επενδύσει στην ολοκληρωμένη ενεργειακή διαχείριση του σπιτιού.

9. Αντί του ολοκληρωμένου συστήματος ενεργειακής διαχείρισης μπορεί να γίνει αύξηση της φ/β γεννήτριας με πολύ μικρότερο κόστος. Αυτό όμως προϋποθέτει ο χρήστης θα κάνει εξοικονόμηση ενέργειας μόνος του, ότι υπάρχει χώρος για τα επιπλέον πάνελ και ότι δε γίνονται μεταβολές στο φορτίο.

## **Μελλοντική εργασία**

1. Το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας HDKR είναι ευρέως γνωστό και χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές. Πρέπει όμως να συγκριθεί και με άλλα μοντέλα ώστε να δούμε τις διαφορές και να πάρουμε μεγαλύτερη ακρίβεια.

2. Το θερμοδυναμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε δεν λαμβάνει υπόψη του την αποθήκευση θερμότητας στους τοίχους. Η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου θα μας έδινε μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς τη χρονική στιγμή που χρειάζεται να θερμάνουμε το δωμάτιο και καλύτερη εικόνα για την εξοικονόμηση ενέργειας στο δωμάτιο. Επίσης θα είχε ενδιαφέρον να συγκριθούν διαφορετικά συστήματα θέρμανσης και να επιλεγθεί για το δωμάτιο το πιο αποδοτικό.

3. Το μοντέλο μπαταριών απαιτεί αρκετές μετρήσεις στο εργαστήριο. Για την αποφυγή της καταπόνησης των μπαταριών έγιναν μόνο όσες χρειάστηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου στο δωμάτιο. Ενδιαφέρον θα είχε οι μετρήσεις αυτές να γίνουν για διάφορα φορτία, ώστε να δούμε καλύτερα τη συμπεριφορά του μοντέλου, αλλά και να συγκριθεί με άλλα μοντέλα μπαταριών.

4. Οι μετρήσεις που έγιναν για την εξαγωγή των αποδόσεων των φωτοβολταϊκών πάνελ και των αντιστροφών δε βασίστηκε σε κάποιο πρότυπο. Θα πρέπει λοιπόν να γίνουν μετρήσεις για όλα τα επίπεδα λειτουργίας με πιστοποιημένα όργανα.

5. Η ολοκληρωμένη διαχείριση ενέργειας φαίνεται ότι έχει πάρα πολλά πλεονεκτήματα όσο αναφορά την εξοικονόμηση ενέργειας. Γι' αυτό πρέπει εκτός από τη θέρμανση να μελετηθεί και η ψύξη, ενώ δε θα πρέπει να γίνεται απλά άνοιγμα ή κλείσιμο του φωτισμού, αλλά να ρυθμίζεται ανάλογα με τη φωτεινότητα (dimming).

6. Σημαντική θα ήταν και η μελέτη ενός μικροδικτύου, όπου αντί της γεννήτριας χρησιμοποιεί τη Δ.Ε.Η. Αλλά και η μελέτη ενός παθητικού κτιρίου, όπου δεν υπάρχει ούτε γεννήτρια ούτε Δ.Ε.Η. Και οι δύο περιπτώσεις μπορούν να μελετηθούν σε συνδυασμό με ένα μελλοντικό χρηματιστήριο ενέργειας.



## Παραρτήματα

### A. Μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για γραμμικά συστήματα

Έστω το γραμμικό σύστημα  $A \cdot x = b$  διαστάσεων  $m \times n$  με  $m \gg n$ . Το σύστημα αυτό είναι συνήθως αδύνατο οπότε θα δίνεται από την εξίσωση (A.1). [22]

$$A \cdot x = b + \varepsilon(x) \quad (\text{A.1})$$

όπου  $\varepsilon(x)$  είναι το σφάλμα.

Αν ισχύει μία από τις παρακάτω προτάσεις:

- Ο πίνακας  $A^T A$  είναι θετικά ορισμένος
- Ο πίνακας  $A^T A$  είναι ομαλός
- Οι στήλες του  $A$  είναι γραμμικά ανεξάρτητες, οπότε  $m \geq n$

τότε υπάρχει μοναδικό σημείο  $x$  που ελαχιστοποιεί το σφάλμα και είναι η λύση του συστήματος δίνεται από την εξίσωση (A.2). [21]

$$A^T \cdot A \cdot \bar{x} = A^T \cdot b \quad (\text{A.2})$$

#### Εφαρμογή

Έστω ότι θέλουμε να βρούμε τη συνάρτηση που περιγράφει δύο μετρούμενα μεγέθη  $x, y$ . Αν προσεγγίσουμε τη συνάρτηση πολυωνυμικά τότε θα δίνεται από την εξίσωση (A.3). [22]

$$f(x) = \sum_{j=1}^n c_j \cdot f_j(x) \quad (\text{A.3})$$

Το πρόβλημα είναι να προσδιορίσουμε τους συντελεστές  $c_j$  έτσι ώστε να οι τιμές  $f(x_i)$  να απέχουν το ελάχιστο δυνατό σφάλμα από τα  $y_i$ . Οπότε από την εξίσωση (A.3) προκύπτει το σύστημα της εξίσωσης (A.4).

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^n c_j \cdot f_j(x_i) = y_i + \varepsilon_i \quad (\text{A.4})$$

Στη παρούσα διπλωματική κάνουμε προσέγγιση με πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού οπότε η συνάρτηση θα δίνεται από την εξίσωση (A.5).

$$f(x) = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 \quad (\text{A.5})$$

Από τις εξισώσεις (A.4) και (A.5) για τις μετρήσεις που θα πάρουμε θα προκύψει το σύστημα της εξίσωσης (A.6).

$$\begin{aligned}
c_0 + c_1 \cdot x_i + c_2 \cdot x_i^2 + c_3 \cdot x_i^3 &= y_i + \varepsilon_i \\
&\vdots \\
c_0 + c_1 \cdot x_m + c_2 \cdot x_m^2 + c_3 \cdot x_m^3 &= y_m + \varepsilon_m
\end{aligned}
\Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_m & x_m^2 & x_m^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Το σύστημα της εξίσωσης (A.6) γράφεται για συντομία όπως δείχνει η εξίσωση (A.7).

$$A \cdot \bar{c} = y + \varepsilon \quad (\text{A.7})$$

Ψάχνουμε τους συντελεστές  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_3$ , που ελαχιστοποιούν το σφάλμα  $\varepsilon$ . Από τις εξισώσεις (A.2) και (A.7) προκύπτει το σύστημα της εξίσωσης (A.8) που με την επίλυσή του βρίσκουμε τους συντελεστές του πολυωνύμου.

$$\bar{c} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot y \quad (\text{A.8})$$

## B. Αριθμητική μέθοδος της τέμνουσας

Στη μέθοδο της τέμνουσας για την εύρεση μιας ρίζας της εξίσωσης της μορφής  $f(x)=0$  φτιάχνουμε μια ακολουθία  $x_k$  που δίνεται από την εξίσωση (B.1). [22]

$$x_{k+1} = x_k - f(x_k) \frac{x_k - x_{k-1}}{f(x_k) - f(x_{k-1})} \quad (\text{B.1})$$

με  $x_0, x_1$  δοθέντα

### Εφαρμογή

Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της τέμνουσας στο κεφάλαιο 6 για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $c, k$  των μπαταριών. Η εξίσωση μας είναι η  $f(x) = c_1(k) - c_2(k)$  οπότε θα έχουμε την ακολουθία της εξίσωσης (B.2).

$$k_{n+1} = k_n - [c_1(k_n) - c_2(k_n)] \frac{k_n - k_{n-1}}{[c_1(k_n) - c_2(k_n)] - [c_1(k_{n-1}) - c_2(k_{n-1})]} \quad (\text{B.2})$$

Τα  $c_1(k)$ ,  $c_2(k)$  δίνονται από τις εξισώσεις (6.15) και (6.16) αντίστοιχα.

Ξεκινάμε την επαναληπτική μέθοδο με  $k_0 = 0,01$  και  $k_1 = 0,5$ .

## Γ. Μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για μη γραμμικά συστήματα

Θεωρούμε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων (Γ.1). [22]

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \\ f_m(x_1, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad \text{ή διανυσματικά } f(x) = 0 \quad (\Gamma.1)$$

Έστω ότι έχουμε μια πρώτη εκτίμηση  $x^0$  για το  $x$  που προσεγγίζει τη λύση της εξίσωσης. Γραμμικοποιούμε κάθε εξίσωση του συστήματος γύρω από το  $x^0$  σύμφωνα με το τύπο του Taylor και παίρνουμε την εξίσωση (Γ.2). [21]

$$f_i(x^0 + \Delta x) \approx f_i(x^0) + \nabla f_i(x^0)^T \cdot \Delta x = 0, \quad i = 1, \dots, n \Rightarrow$$

$$\nabla f_i(x^0)^T \cdot \Delta x = -f_i(x^0) \Rightarrow$$

$$A \cdot \Delta x = b \quad (\Gamma.2)$$

όπου

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x=x^0}, \quad b = \begin{bmatrix} -f_1 \\ \vdots \\ -f_m \end{bmatrix}_{x=x^0}$$

Η εκτίμηση  $\Delta x^0$  της διόρθωσης  $\Delta x$ , γίνεται μετά με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων λύνοντας το σύστημα των κανονικών εξισώσεων (Γ.4). [22]

$$A^T \cdot A \cdot \Delta x^0 = A^T \cdot b \Rightarrow \Delta x^0 = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot b \quad (\Gamma.4)$$

Η νέα βελτιωμένη εκτίμηση  $x^1$  του  $x$  δίνεται από την εξίσωση (Γ.5).

$$x^1 = x^0 + \Delta x^0 \quad (\Gamma.5)$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το  $\Delta x$  να γίνει πάρα πολύ μικρό.

### Εφαρμογή

Στη παρούσα διπλωματική έχουμε γενικά τη μη γραμμική εξίσωση (Γ.6).

$$E = E_0 + A \cdot X + \frac{C \cdot X}{(D - X)} \quad (\Gamma.6)$$

Από τις εξισώσεις (Γ.1) και (Γ.6) προκύπτει η εξίσωση (Γ.7).

$$f(x) = -E + E_0 + A \cdot x + \frac{C \cdot x}{(D-x)} = 0, \text{ με } x=X \quad (\Gamma.7)$$

Από την εξίσωση (Γ.7) προκύπτουν οι εξής μερικές παράγωγοι:

$$\text{i) } \frac{\partial f(x)}{\partial E_0} = 1, \quad \text{ii) } \frac{\partial f(x)}{\partial A} = x, \quad \text{iii) } \frac{\partial f(x)}{\partial C} = \frac{x}{(D-x)}, \quad \text{iv) } \frac{\partial f(x)}{\partial D} = -\frac{C \cdot x}{(D-x)^2}$$

Η εξίσωση (Γ.2) βάσει των μερικών παραγώγων παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (Γ.8).

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \frac{x_1}{(D-x_1)} & -\frac{C \cdot x_1}{(D-x_1)^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_m & \frac{x_m}{(D-x_m)} & -\frac{C \cdot x_m}{(D-x_m)^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_0 \\ A \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(x_1) \\ \vdots \\ -f(x_m) \end{bmatrix} \quad (\Gamma.8)$$

Βάσει των μετρήσεων  $V$ ,  $I$  που παίρνουμε, της  $R_0$  και της εξίσωσης (6.2) υπολογίζουμε την εσωτερική τάση ( $E_i$ ) της μπαταρίας κατά τη φόρτιση και από το τύπο (6.22) το κανονικοποιημένο φορτίο που προστίθεται στη μπαταρία ( $x_i$ ). Γνωρίζοντας τα  $E_i$ , τα  $x_i$  και θέτοντας αρχικές τιμές στους συντελεστές  $x^0 = [E_0, A, C, D]^T$  υπολογίζουμε τα  $f(x_i)$ .

Βάσει της εξίσωσης (Γ.8) υπολογίζουμε από την εξίσωση (Γ.4) το  $\Delta x^0$ . Από την εξίσωση (Γ.5) βρίσκουμε τη νέα εκτίμηση  $x^1$  και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι το  $\Delta x$  να γίνει πάρα πολύ μικρό.

Στη φόρτιση έχουμε αρχικό διάνυσμα  $x^0 = [1,5, 0,003, 0,031, 300]^T$ .

Στην εκφόρτιση έχουμε αρχικό διάνυσμα  $x^0 = [2, -0,0005, -0,06, 300]^T$ .

## Δ. Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών

Πίνακας Δ1: Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με μεταγωγή

|   | $h$ (W/m <sup>2</sup> ·K) |
|---|---------------------------|
| Επιφάνεια εσωτερικού χώρου ( $h_{in}$ ) <sup>1</sup>  | 7,7                       |
| Επιφάνεια εξωτερικού χώρου ( $h_{out}$ ) <sup>1</sup> | 25                        |

<sup>1</sup> Αναφορά [23]

Πίνακας Δ2: Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών

| Υλικό                                       | Θερμική Αγωγιμότητα $k$ (W/m·K) | Ειδική Θερμότητα $c$ (Joule/Kg·K) | Πυκνότητα $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> ) |
|---|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα <sup>1</sup> (Σοβάς) | 0,87                            | -                                 | -                                     |
| Τούβλο <sup>1</sup>                         | 0,72                            | -                                 | -                                     |
| Ξύλο <sup>1</sup>                           | 0,14                            | -                                 | -                                     |
| Γυαλί (Μονό τζάμι) <sup>1</sup>             | 1                               | -                                 | -                                     |
| Σκυρόδεμα τύπου B120 <sup>1</sup> (Μπετό)   | 1,51                            | -                                 | -                                     |
| Τσιμεντοκονίαμα <sup>1</sup> (Τσιμέντο)     | 1,4                             | -                                 | -                                     |
| Μωσαϊκό <sup>1</sup>                        | 1,2                             | -                                 | -                                     |
| Αέρας (25°C) <sup>2</sup>                   | 0,025                           | 718                               | 1,1614                                |

<sup>1</sup> Αναφορά [23]

<sup>2</sup> Αναφορά [12]

## Βιβλιογραφία

- [1] **KNX Association:** [Ηλεκτρονικό] [www.knx.org](http://www.knx.org)
- [2] **Golden A/S:** [Ηλεκτρονικό] [www.gma.gr](http://www.gma.gr)
- [3] **CAN in Automation (cia):** [Ηλεκτρονικό] [www.can-cia.org](http://www.can-cia.org)
- [4] **3S – Software:** [Ηλεκτρονικό] [www.3s-software.com](http://www.3s-software.com)
- [5] **ISET:** [Ηλεκτρονικό] [www.iset.uni-kassel.com](http://www.iset.uni-kassel.com)
- [6] **Modbus organization:** [Ηλεκτρονικό] [www.modbus.org](http://www.modbus.org)
- [7] **DEIF:** [Ηλεκτρονικό] [www.deif.com](http://www.deif.com)
- [8] **LabVIEW basic I:** Development course manual. USA: National Instruments, 2007
- [9] **LabVIEW basic II:** Development course manual. USA: National Instruments, 2007
- [10] **ABB:** [Ηλεκτρονικό] [www.abb.com](http://www.abb.com)
- [11] **J.A. Duffie, W.A. Beckmann:** Solar Engineering of Thermal Processes 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons. U.S.A. 1991
- [12] **M.J. Moran, H.N. Shapiro:** Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons. U.S.A. 2006
- [13] **Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine:** Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons.
- [14] **Carrier technical data:** High-Temperature Air-to-Water Heat Pumps with Integrated Hydronic Module . 61AF014-019.
- [15] **J.F. Manwell, J.G. McGowan:** Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Systems. University of Massachusetts. Solar Energy Vol. 50. U.S.A. 1993
- [16] **J.F. Manwell, J.G. McGowan:** Extension of the Kinetic Battery Model for Wind/Hybrid Power Systems. U.S.A. 1994
- [17] **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems:** Photovoltaic Systems. Freiburg. 1995
- [18] **Ergon :** [Ηλεκτρονικό] [www.ergonbatteries.gr](http://www.ergonbatteries.gr)
- [19] **Isofoton:** [Ηλεκτρονικό] [www.isofoton.com](http://www.isofoton.com)
- [20] **SMA Hellas:** [Ηλεκτρονικό] [www.sma-hellas.com](http://www.sma-hellas.com)
- [21] **Tawatchai Suannakum :** Mini-Grid System for Rural Electrification in the Great Mekong Sub Regional Countries. Kassel University press. Germany. 2007
- [22] **Α. Μπακόπουλος, Ι. Χρυσοβέργης:** Εισαγωγή στην αριθμητική ανάλυση. Συμεών. Αθήνα. 1999
- [23] **T.O.T.E.E:** θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων Α' έκδοση. T.E.E. Αθήνα. 2010