

ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΛΑΒΗΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Ε. Μαθιουλάκης, Χ. Κώνστας και Β. Μπελεσιώτης

Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων - ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

15310 Αγ. Παρασκευή Αττικής, e-mail: math@ipta.demokritos.gr

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των μετρολογικών επιδόσεων του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος, κατά τις δοκιμές ενεργειακού χαρακτηρισμού θερμικών ηλιακών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, επιχειρείται η εκτίμηση της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την πρόβλεψη της αναμενόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής, στη βάση των μετρολογικών χαρακτηριστικών του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Λόγω του μη-αναλυτικού, μη-γραμμικού αλγοριθμικού χαρακτήρα του εφαρμοζόμενου μοντέλου μέτρησης, αξιοποιούνται οι τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo, με τρόπο που να εκτιμάται το αποτέλεσμα από τη διάχυση της στοχαστικής πληροφορίας από τα πρωτογενή δεδομένα στα τελικά αποτελέσματα. Η προτεινόμενη ανάλυση αβεβαιοτήτων επιτρέπει τη ρεαλιστική αποτίμηση της ποιότητας του τελικού αποτελέσματος των δοκιμών ενεργειακού χαρακτηρισμού, ειδικότερα στα πλαίσια εφαρμογής των συστημάτων πιστοποίησης των ενεργειακών επιδόσεων.

Η εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης σε ένα τυπικό οικιακό ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού, το οποίο δοκιμάστηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου EN 12976-2, οδήγησε σε μια συνολική διευρυμένη αβεβαιότητα στις τιμές της αναμενόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής της τάξης του 6%.

Abstract

The scope of present work is the investigation of the influence of the metrological performance of the measuring devices on the quality of the final result, throughout the testing for the energy characterization of solar thermal systems. More specifically, the analysis aims to estimate the uncertainty characterizing the prediction of the expected annual energy output, on the basis of the metrological characteristics of the relevant equipment. Due to the non-analytic, non-linear algorithmic character of the implemented measurement model, the exploitation of the Monte-Carlo simulation techniques is preferred. Implementation of these techniques is performed in a way which allows the estimation of the impact of the propagation of stochastic information, from the initial experimental data to the final result. The proposed uncertainty analysis allows the realistic assessment of the quality of the final result of energy characterization testing, with specific application on the certification systems of energy performance.

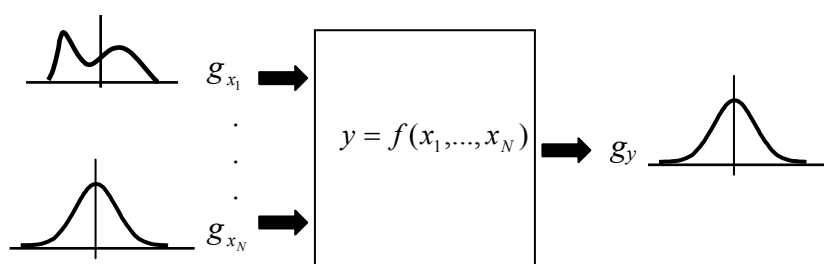
The implementation of the proposed approach on a typical solar domestic hot water system, which has been tested according to the requirements of standard EN12976-2, has resulted to an expanded uncertainty for the expected annual output on the order of 6%.

Λέξεις κλειδιά: Ενεργειακή απολαβή, αβεβαιότητα, Monte-Carlo

1. Εισαγωγή

Η αναμενόμενη ενεργειακή απολαβή αποτελεί τον σημαντικότερο από τους δείκτες απόδοσης που χρησιμοποιούνται για τον ενεργειακό χαρακτηρισμό των συστημάτων εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γενικά, και των θερμικών ηλιακών συστημάτων ειδικότερα. Η διαρκώς αυξανόμενη διεύθυνση των σχημάτων ενεργειακής πιστοποίησης, η σύνδεση του προσδοκώμενου ενεργειακού οφέλους με τις κάθε είδους επιδοτήσεις και, γενικότερα, η ζήτηση από την πλευρά των υποψήφιων χρηστών για αξιόπιστα στοιχεία αποδοτικότητας των εναλλακτικών ενεργειακών τεχνολογιών, καθιστά αναγκαία την εκτίμηση της αβεβαιότητας που συνοδεύει τα αποτελέσματα των δοκιμών απόδοσης και προσδίδει ιδιαίτερη σημασία στην ποιότητα αυτής της εκτίμησης.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των ενεργειακών επιδόσεων ενός θερμικού ηλιακού συστήματος γίνεται σύμφωνα με τα ισχύοντα διεθνή πρότυπα, στη βάση των αποτελεσμάτων μιας σειράς σεναρίων πειραματικών μετρήσεων ενεργειακών μεγεθών και κλιματολογικών παραμέτρων (CEN 2006). Η αξιοποίηση των δεδομένων των μετρήσεων για τον υπολογισμό της προβλεπόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής εμπλέκει υπολογισμούς σε διάφορα στάδια, χωρίς να είναι δυνατή η ρητή διατύπωση ενός συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου μέτρησης το οποίο να συνδέσει τα πρωτογενή πειραματικά δεδομένα με το υπολογιζόμενο αποτέλεσμα. Η απουσία ενός τέτοιου μοντέλου συνεπάγεται ορισμένες δυσκολίες στην εκτίμηση της αβεβαιότητας στο τελικό ενεργειακό αποτέλεσμα, στο βαθμό που καθιστά αδύνατη την υιοθέτηση της συμβατικής προσέγγισης της διάχυσης των σφαλμάτων, όπως αυτή περιγράφεται στον Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 2008). Υπενθυμίζεται ότι, σύμφωνα με την προσέγγιση του Νόμου Διάχυσης των Σφαλμάτων (Law of Error Propagation), η στοχαστική πληροφορία σχετικά με τα πρωτογενή πειραματικά δεδομένα συνοψίζεται στη μέση τους τιμή και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση. Η πληροφορία αυτή διαχέεται μέσω ενός αναπτύγματος 1ης τάξεως του μοντέλου μέτρησης, επιτρέποντας τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης (αβεβαιότητας) στο τελικό Μετρούμενο μέγεθος. Παρά την ευκολία εφαρμογής της, η προσέγγιση αυτή υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς, ειδικότερα στις περιπτώσεις έντονα μη γραμμικών μοντέλων, μη ικανοποίησης των απαιτήσεων ισχύος του Central Limit Theorem ή ακόμα αδυναμίας προσδιορισμού των συντελεστών ευαισθησίας λόγω πολυπλοκότητας του μοντέλου μέτρησης που χρησιμοποιείται (GUM S1 2008). Ο τελευταίος αυτός περιορισμός ισχύει και για την περίπτωση του υπολογισμού της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής που εξετάζεται εδώ, λόγω της αδυναμίας διατύπωσης συγκεκριμένων εξισώσεων.



Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση της προσέγγισης Monte Carlo

Οι αδυναμίες αυτές, σε συνδυασμό με την ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος που είναι σήμερα διαθέσιμη στα εργαστήρια, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην διαρκώς διευρυνόμενη χρήση μιας εναλλακτικής προσέγγισης, αποκαλούμενης και Διάχυσης των Κατανομών (Propagation of Distributions). Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην προσομοίωση Monte Carlo και έγινε πρόσφατα αντικείμενο της πρώτης συμπλήρωσης του (GUM S1 2008, Cox et al. 2006). Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής, για ένα

μοντέλο μέτρησης $y = f(x_1, \dots, x_M)$ που συνδέει το αποτέλεσμα y με τις πρωτογενείς τιμές x_1, \dots, x_M των M μεταβλητών X_1, \dots, X_M , συνίσταται στα ακόλουθα βήματα:

- Η πληροφορία που σχετίζεται με μια πειραματική τιμή x_i μιας ποσότητας X_i κωδικοποιείται από μια κατανομή πιθανοτήτων (Probability Distribution Function, PDF) g_{x_i} , η καλύτερη εκτίμηση της είναι η τιμή x_i και η τυπική της απόκλιση είναι η αντίστοιχη τυπική αβεβαιότητα. Η κατανομή g_{x_i} συνάγεται είτε από τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, είτε προκύπτει στη βάση της αρχής της Μέγιστης Εντροπίας (Principle of Maximum Entropy, Lira 2009).
- Χρησιμοποιείται κατάλληλος αλγόριθμος για την παραγωγή, για κάθε πρωτογενή τιμή x_i , ενός μεγάλου αριθμού N τιμών $x_{i,j}$, $j=1, \dots, N$, οι στατιστικές ιδιότητες των οποίων προσεγγίζουν αυτές της αντίστοιχης g_{x_i} .
- Εφαρμόζεται η διαδικασία μέτρησης N φορές, για κάθε ένα από τους N συνδυασμούς $x_{1,j}, \dots, x_{M,j}$, $j=1, \dots, N$. Παράγονται έτσι N τιμές y_j , $j=1, \dots, N$ του αποτελέσματος (σχήμα 1) οι οποίες επιτρέπουν την διαμόρφωση μιας εικόνας για την κατανομή πιθανοτήτων g_y που ακολουθεί το αποτέλεσμα.
- Υπολογίζονται η μέση τιμή \tilde{y} και η τυπική απόκλιση $u(\tilde{y})$, ως εκτιμήσεις της τιμής του Y και της τυπικής αβεβαιότητας που το χαρακτηρίζει:

$$\tilde{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (1)$$

$$u(\tilde{y}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y})^2} \quad (2)$$

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των μετρολογικών επιδόσεων του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος που αφορά την πρόβλεψη της ετήσιας ενεργειακής απολαβής. Λόγω του μη-γραμμικού αλγοριθμικού χαρακτήρα του εφαρμοζόμενου μοντέλου μέτρησης, αξιοποιούνται οι τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo, με τρόπο που να εκτιμάται το αποτέλεσμα από τη διάχυση της στοχαστικής πληροφορίας από τα πρωτογενή δεδομένα στα τελικά αποτελέσματα.

Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης επιλέχθηκε μια τυπική δοκιμή ενός αντιπροσωπευτικού οικιακού θερμικού ηλιακού συστήματος, με επιφάνεια συλλέκτη 3.76 m² και όγκο δεξαμενής 191 lt, το οποίο δοκιμάστηκε στο εργαστήριο. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα διακριβωμένα όργανα και ακολουθήθηκαν αυστηρά οι διαδικασίες που προβλέπονται από το Πρότυπο EN 12976-2. Παρά το ότι τα συγκεκριμένα ποσοτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν κατά κύριο λόγο το συγκεκριμένο ηλιακό σύστημα, τα συμπεράσματα έχουν γενικότερη ισχύ, τόσο στο επίπεδο της μεθοδολογικής προσέγγισης, όσο και σε αυτό της τάξης μεγέθους των εκτιμήσεων που αφορούν την αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα της προβλεπόμενης ενεργειακής απολαβής.

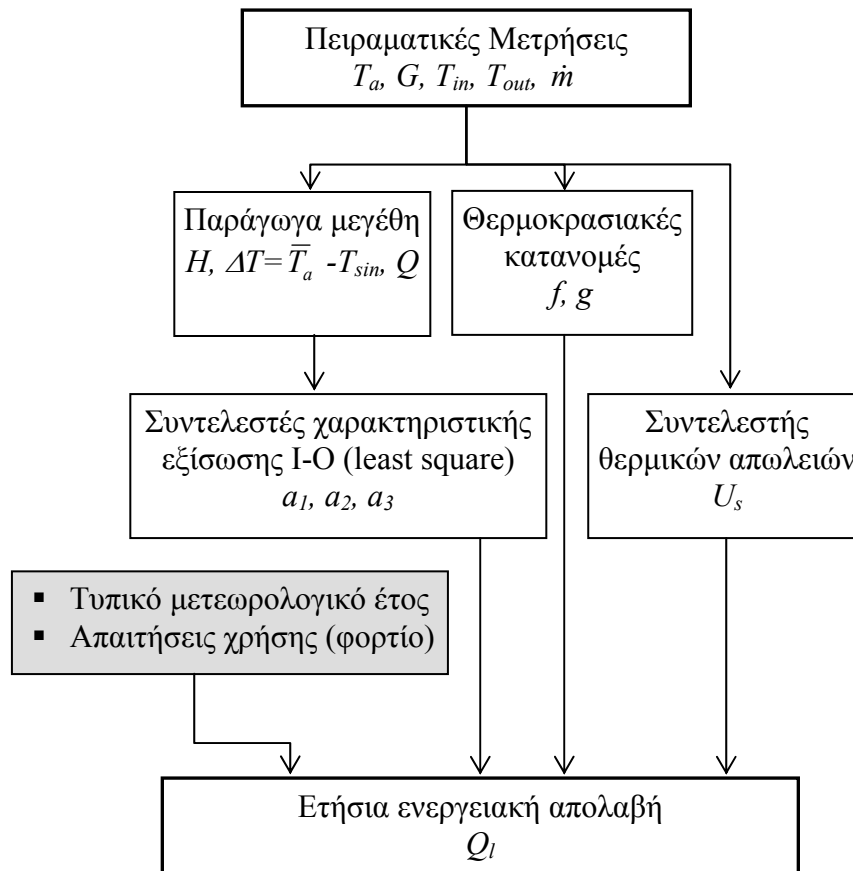
2. Η μέθοδος δοκιμών και το Μοντέλο Μέτρησης

Το Πρότυπο EN 12976-2 προβλέπει δύο μεθόδους δοκιμής της απόδοσης των θερμικών ηλιακών συστημάτων, την DST και την CSTG, βασισμένες σε 2 διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης της

ενεργειακής τους συμπεριφοράς (Καλούλης 2009, Belessiotis et al. 2010, ISO 1995). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η μέθοδος CSTG, η φιλοσοφία όμως που υιοθετείται μπορεί να εφαρμοστεί, μετά από κατάλληλες τροποποιήσεις και στην περίπτωση της μεθόδου DST. Σύμφωνα με τη μέθοδο CSTG, η θερμική ενέργεια Q που συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας στην δεξαμενή ενός θερμικού ηλιακού συστήματος, συνδέεται με την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία H που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη, με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος \bar{T}_a και με τη θερμοκρασία T_{si} της δεξαμενής στην αρχή της ημέρας μέσω της χαρακτηριστικής εξίσωσης του συστήματος (CEN 2006, ISO 1995):

$$Q = a_1 H + a_2 (\bar{T}_a - T_{sin}) + a_3 \quad (3)$$

Η εκτίμηση της προβλεπόμενης ενεργειακής απολαβής γίνεται σε δύο στάδια, όπως προβλέπεται από το ισχύον διεθνές πρότυπο EN 12976-2 (Σχήμα 2). Στο πρώτο στάδιο, αυτό των δοκιμών, υλοποιούνται συγκεκριμένα πειραματικά σενάρια με σκοπό τον προσδιορισμό ορισμένων βασικών ενεργειακών χαρακτηριστικών του ηλιακού συστήματος, όπως είναι οι συντελεστές a_1 , a_2 και a_3 της χαρακτηριστικής του εξίσωσης, ο συντελεστής U_s θερμικών απωλειών της δεξαμενής, καθώς και τις αδιάστατες καμπύλες ανάμειξης, f και g , οι οποίες χαρακτηρίζουν την κατανομή θερμοκρασίας της μη ομογενοποιημένης και της ομογενοποιημένης δεξαμενής αντίστοιχα.



Σχήμα 2: Ροή ενεργειών για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής

Οι συντελεστές a_1 , a_2 και a_3 της χαρακτηριστικής εξίσωσης προσδιορίζονται με τη μέθοδο των πολυπαραγοντικών ελαχίστων τετραγώνων στη βάση μιας σειράς ημερήσιων δοκιμών κατά τις οποίες το σύστημα ξεκινάει τη λειτουργία του το πρωί με την ηλιακή δεξαμενή σε μια γνωστή αρχική θερμοκρασία, για να επανέλθει το βράδυ στην ίδια αρχική κατάσταση αφού πρώτα απομαστευτεί η θερμική ενέργεια Q που συσσωρεύτηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η ενέργεια H υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση της στιγμιαίας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας G για όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η ωφέλιμη ημερήσια ενεργειακή απολαβή Q υπολογίζεται με ολοκλήρωση, από την παροχή απομάστευσης m του νερού στην έξοδο της δεξαμενής και τις θερμοκρασίες T_{in} και T_{out} στην είσοδο και την έξοδο του απομαστευόμενου νερού αντίστοιχα:

$$Q = \int m C_p (T_{out} - T_{in}) dt \quad (4)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικών απωλειών U_s , η δεξαμενή θερμαίνεται αρχικά σε μια ομοιόμορφη θερμοκρασία T_i και αφήνεται στη συνέχεια σε ηρεμία για ένα χρονικό διάστημα Δt_u περίπου 12 ωρών. Στο τέλος του χρονικού αυτού διαστήματος η δεξαμενή ομοιογενοποιείται και μετράται η τελική της θερμοκρασία T_f . Γνωρίζοντας την θερμοχωρητικότητα της δεξαμενής $m_s C_p$ και τη μέση περιβάλλοντος \bar{T}_a κατά τη διάρκεια της δοκιμής, υπολογίζεται ο συντελεστής απωλειών από τη σχέση:

$$U_s = \frac{m_s C_p}{\Delta t_u} \ln \frac{T_i - \bar{T}_a}{T_f - \bar{T}_a} \quad (5)$$

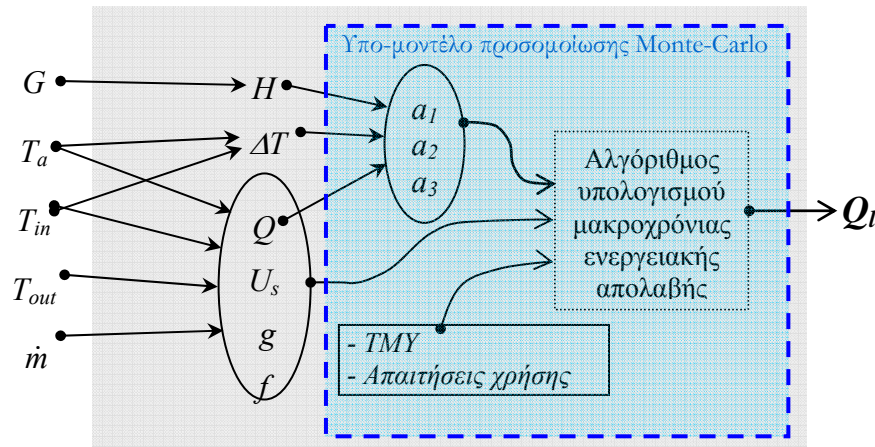
Σημειώνεται ότι οι θερμοκρασίες T_o και T_f μετρώνται από τα αισθητήρια που είναι τοποθετημένα στην είσοδο και την έξοδο της δεξαμενής, όπως άλλωστε και οι αδιάστατες κατανομές θερμοκρασίας f και g .

Στη δεύτερη φάση, αυτή του υπολογισμού της αναμενόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής, τα ενεργειακά χαρακτηριστικά που ταυτοποιήθηκαν με τη βοήθεια των δοκιμών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής σε συνθήκες που προσδιορίζονται από τα τυπικά μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής στην οποία προβλέπεται να εγκατασταθεί το σύστημα (Typical Meteorological Year), για ορισμένα συμβατικά καθορισμένα προφίλ χρήσης. Ο υπολογισμός βασίζεται σε μια σαφώς καθορισμένη (από το Πρότυπο) διαδικασία, η οποία, ακολουθεί τα παρακάτω βήματα, και για τις 365 ημέρες του χρόνου:

- I. Αξιολογεί την εξίσωση (3) και τα μετεωρολογικά δεδομένα του Τυπικού Έτους για να υπολογίσει την ενέργεια που αναμένεται να έχει συσσωρευτεί στην ηλιακή δεξαμενή στο τέλος της ημέρας, παίρνοντας υπόψη τη διαθέσιμη ενέργεια στην αρχή της ημέρας.
- II. Υπολογίζει την εναπομείνουσα ενέργεια στη δεξαμενή στο τέλος της ημέρας, μετά από την αφαίρεση της συμβατικά καθορισμένης θερμικής ενέργειας που χρησιμοποιείται από τη χρήση.
- III. Υπολογίζει την ενέργεια που θα βρεθεί διαθέσιμη στην αρχή της επόμενης ημέρας, συνυπολογίζοντας τις θερμικές απώλειες κατά τη διάρκεια της νύχτας.
- IV. Επανέρχεται στο βήμα I, συνεχίζοντας με την επόμενη ημέρα, μέχρι το τέλος του έτους.

Είναι σαφές ότι η όλη διαδικασία εμπλέκει μιας σειράς από διακριτές ενέργειες, οι οποίες συνιστούν μεν το μοντέλο μέτρησης, είναι όμως αδύνατον να τεθούν υπό τη μορφή μιας ή περισσότερων εξισώσεων. Τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιεί το μοντέλο μέτρησης είναι οι θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a , οι θερμοκρασίες στην είσοδο και την έξοδο της δεξαμενής T_{in} και T_{out} αντίστοιχα, η παροχή του νερού m στην έξοδο της ηλιακής δεξαμενής και, τέλος, η στιγμιαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G . Από αυτά

υπολογίζονται τα παράγωγα μεγέθη της ολικής ημερήσιας ηλιακής ενέργειας στην επιφανεί των συλλεκτών, H , της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της αρχικής θερμοκρασίας της δεξαμενής, $\Delta T = \bar{T}_a - T_{sim}$, της ημερήσιας ενεργειακής απολαβής, Q , του συντελεστή θερμικών απωλειών U_s και των θερμοκρασιακών κατανομών f και g . Από τα παράγωγα αυτά μεγέθη υπολογίζεται το τελικό ζητούμενο που είναι η αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή απολαβή Q_I (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Συσχέτιση αποτελέσματος με πρωτογενείς μετρήσεις (μοντέλο μέτρησης)

3. Πηγές αβεβαιότητας και επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα

3.1. Παραδοχές και υποθέσεις εργασίας

Για λόγους που σχετίζονται με τη δυνατότητα γενίκευσης των συμπερασμάτων της παρούσας διερεύνησης, γίνεται η υπόθεση ότι, όσον αφορά την αβεβαιότητα στις πρωτογενείς πειραματικές μετρήσεις, ικανοποιούνται οι σχετικές απαιτήσεις του Προτύπου. Τονίζεται όμως ότι στην περίπτωση που ένα εργαστήριο επιτυγχάνει καλύτερες μετρολογικές επιδόσεις, έχει τη δυνατότητα επανεκτίμησης των αβεβαιοτήτων. Τονίζεται επίσης ότι ο χειρισμός των αβεβαιοτήτων που εκτίθεται στη συνέχεια θεωρεί ότι ικανοποιούνται αυστηρά οι απαιτήσεις της μεθόδου δοκιμών, όπως αυτές περιγράφονται στο αντίστοιχο πρότυπο. Ενδεχόμενες αποκλίσεις από την μέθοδο μπορούν να εισάγουν επιπλέον συνιστώσες αβεβαιότητας οι οποίες πρέπει να εκτιμώνται κατά περίπτωση.

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης των αβεβαιοτήτων, υπολογίζονται αρχικά οι αβεβαιότητες στα ενδιάμεσα μεγέθη H , ΔT , Q και U_s . Από εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, προέκυψε ότι η συνεισφορά της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τα αδιάστατα προφίλ f και g είναι αμελητέα συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες πηγές αβεβαιότητας και μπορεί να παραληφθεί. Από τη στιγμή που έχει σχηματισθεί μια στοχαστική εικόνα για τα ενδιάμεσα μεγέθη, αξιοποιείται η τεχνική προσομοίωσης Monte-Carlo με σκοπό να αποκτηθεί μια αντίστοιχη στοχαστική εικόνα για την αναμενόμενη ενεργειακή απολαβή.

3.2. Υπολογισμός αβεβαιοτήτων στις τιμές των ενδιάμεσων μεγεθών

3.2.1. Αβεβαιότητα στη μέση τιμή της θερμοκρασίας και της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT

Ε. Μαθιουλάκης, Χ. Κώνστας, Β. Μπελεσιώτης (ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»)

Αβεβαιότητα μετρήσεων και ποιότητα αποτελέσματος εκτιμώμενης ενεργειακής απολαβής θερμικών ηλιακών συστημάτων

4ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου - Αθήνα, 3&4 Φεβρουαρίου 2012

-Σελ. 6 -

Έστω οι μετρήσεις θερμοκρασίας T_1, T_2, \dots, T_n . Η μέση θερμοκρασία \bar{T} υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο, ο οποίος συνιστά και το μοντέλο μέτρησης:

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n} \quad (6)$$

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στην τιμή της μέσης θερμοκρασίας \bar{T} , πρέπει να παρθεί υπόψη η ύπαρξη πιθανών συσχετίσεων μεταξύ των τιμών που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ, σύμφωνα και με τη συνήθη μετρολογική πρακτική σε συναφείς περιπτώσεις, γίνεται η επιλογή της μεγαλύτερης αβεβαιότητας (worst case) με τα σφάλματα στις τιμές που συλλέχθηκαν θεωρούνται πλήρως εξαρτημένα μεταξύ τους, λόγω του ότι οι επιμέρους τιμές μετρήθηκαν από το ίδιο όργανο. Υποθέτοντας ότι η αβεβαιότητα είναι η ίδια για όλα τα σημεία μέτρησης και ίση με u_T , από την εφαρμογή του νόμου διάχυσης των σφαλμάτων προκύπτει ότι:

$$u_{\bar{T}}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial T}{\partial T_i} u_{T_i} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial T}{\partial T_i} \frac{\partial T}{\partial T_j} u_{T_i} u_{T_j} = \frac{1}{n^2} \left(\sum_{i=1}^n u_{T_i} \right)^2 = u_T \quad (7)$$

3.2.2. Αβεβαιότητα στο ημερήσιο ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας H

Έστω οι μετρήσεις ακτινοβολίας G_1, G_2, \dots, G_{n+1} , οι οποίες χωρίζονται από ένα σταθερό χρονικό βήμα dt και πραγματοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος $\Delta t = n \times dt$. Δεδομένης της αργής μεταβολής της ακτινοβολίας σε σχέση με την ταχύτητα δειγματοληψίας, θεωρείται ότι οι τιμές που καταγράφονται αποτυπώνουν πιστά την μεταβολή του φυσικού μεγέθους. Κατά συνέπεια, η ημερήσια ηλιακή ενέργεια H μπορεί να υπολογιστεί από τη ακόλουθη σχέση, η οποία αντιστοιχεί και στο μοντέλο μέτρησης:

$$H = dt \sum_{i=1}^n G_i \quad (8)$$

Και στην περίπτωση αυτή, για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στην τιμή του H πρέπει να παρθεί υπόψη ο βαθμός correlation μεταξύ των τιμών που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρόμοια με προηγουμένως, εάν οι τιμές αυτές, G_1, G_2, \dots, G_{n+1} , θεωρηθούν πλήρως εξαρτημένες μεταξύ τους (worst case), θεωρώντας ότι το χρονικό βήμα dt γνωστό με αμελητέα αβεβαιότητα, από την εφαρμογή του νόμου διάχυσης των σφαλμάτων προκύπτει ότι:

$$u_H = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial G_i} u_{G_i} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial H}{\partial G_i} \frac{\partial H}{\partial G_j} u_{T_i} u_{T_j}} = \sqrt{(dt)^2 \left(\sum_{i=1}^n u_{G_i} \right)^2} = \Delta t u_G \quad (9)$$

3.2.3. Αβεβαιότητα στην τιμή της ενεργειακής απολαβής Q

Έστω Q η θερμική ενέργεια η οποία αφαιρείται από την δεξαμενή στο τέλος μιας ημέρας δοκιμών, υπολογιζόμενη από τις n μετρούμενες τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας στην είσοδο και την έξοδο του

θερμικού ηλιακού συστήματος και της παροχής \dot{m} του ρευστού, για χρονικό διάστημα $\delta = \sum dt$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = \int \rho C_p \dot{m} (T_{out} - T_{in}) dt = \rho C_p \delta \sum_{i=1}^n \dot{m} (T_{out} - T_{in}) \quad (10)$$

Με δεδομένο ότι οι αβεβαιότητες στις τιμές της πυκνότητας, της ειδικής θερμοχωρητικότητας και του χρονικού βήματος dt μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, υιοθετώντας και εδώ την επιλογή της πλήρους συσχέτισης μεταξύ σφαλμάτων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, προκύπτει ότι:

$$u_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial (T_{out} - T_{in})} u_{T_{out} - T_{in}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} u_{\dot{m}} \right)^2} = \rho C_p \delta \sqrt{\dot{m} u_{T_{out} - T_{in}} + (T_{out} - T_{in}) u_{\dot{m}}} \quad (11)$$

3.2.4. Αβεβαιότητα στην τιμή του συντελεστή απωλειών U_s

Ο συντελεστής απώλεια υπολογίζεται από την σχέση (5), εφαρμόζοντας τον νόμο διάχυσης των σφαλμάτων, θεωρώντας αμελητέες τις αβεβαιότητες στις τιμές της θερμοχωρητικότητας και του χρόνου:

$$u_{U_s} = \frac{m C_p}{\Delta t_u} \sqrt{\left(\frac{u_{T_i}}{T_i - \bar{T}_a} \right)^2 + \left(\frac{u_{T_f}}{T_f - \bar{T}_a} \right)^2 + \left(\frac{u_{\bar{T}_a}}{T_f - \bar{T}_a} - \frac{u_{\bar{T}_a}}{T_i - \bar{T}_a} \right)^2} \quad (12)$$

3.3. Υπολογισμός της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής και της συνιστώσας αβεβαιότητας που οφείλεται στα σφάλματα των αισθητήρων

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο σχετικά πολύπλοκος, μη αλγεβρικός υπολογισμός της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής, καθιστά την λύση της προσομοίωσης Monte-Carlo ως μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική επιλογή. Η υλοποίηση στην πράξη της προσέγγισης αυτής ακολουθεί τα παρακάτω βήματα (σχήμα 3):

- I. Ως αποτέλεσμα της εκτέλεσης των πειραματικών σεναρίων που περιλαμβάνει η δοκιμή του συστήματος, είναι διαθέσιμες οι ημερήσιες τιμές των μεγεθών H , ΔT και Q , μία τιμή για τον συντελεστή U_s , καθώς και οι αντίστοιχες τυπικές τους αβεβαιότητες.
- II. Για κάθε μία από τις παραπάνω τιμές παράγεται ένας μεγάλος αριθμός τυχαίων τιμών ($N=10^6$ στην περίπτωση αυτή), οι στατιστικές ιδιότητες των οποίων (είδος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση κατανομής πιθανοτήτων) ταυτίζονται με τα μετρολογικά χαρακτηριστικά της αρχικής τιμής. Ως γεννήτρια τυχαίων αριθμών χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Mersenne Twiste (Matsumoto et al. 1998), ενώ θεωρήθηκε ότι όλα τα μεγέθη ακολουθούν κανονική κατανομή.
- III. Για κάθε συνδυασμό ημερήσιων τιμών των H , ΔT και Q υπολογίζεται, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, οι συντελεστές της χαρακτηριστικής εξίσωσης του συστήματος, παράγοντας έτσι N σετ τιμών των συντελεστών a_1 , a_2 και a_3 .
- IV. Κάθε σετ τιμών των συντελεστών a_1 , a_2 και a_3 συνδυάζεται με μία τιμή του συντελεστή U_s και εφαρμόζεται η διαδικασία υπολογισμού της αναμενόμενης ετήσιας απολαβής, παίρνοντας υπόψη και τα τυπικά μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης και το επιλεγμένο προφίλ χρήσης.

- V. Από τις $N=10^6$ τιμές της ενεργειακής απολαβής που παράγονται, υπολογίζεται η μέση τιμή Q_L και η τυπική της απόκλιση $u_{Q_L}^{meas}$, ως εκτίμηση της τυπικής αβεβαιότητας της μέσης τιμής.

Τονίζεται ότι η ποσότητα $u_{Q_L}^{meas}$, λόγω της μεθοδολογίας υπολογισμού της, αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα αβεβαιότητας η οποία οφείλεται αποκλειστικά σε ενδεχόμενα σφάλματα των αισθητήρων.

3.4. Καταλληλότητα μοντέλου και αβεβαιότητα

Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο Πρόσπτωσης - Απολαβής συσχετίζει την ημερήσια απολαβή Q_L με την ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια H και την διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = T_a - T_{sin}$. Το μοντέλο αυτό, όπως άλλωστε κάθε μοντέλο αυτού του τύπου, είναι σε κάποιο βαθμό προσεγγιστικό και, παρά το ότι περιγράφει ικανοποιητικά την ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος, είναι σαφές ότι η χρήση του εισάγει ένα πιθανό σφάλμα το οποίο επηρεάζει δυνητικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Το σφάλμα αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με τα σφάλματα των μετρήσεων και πρέπει να συνυπολογίζεται κατά τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων που χαρακτηρίζει τις μετέπειτα προβλέψεις του μοντέλου.

Η συνιστώσα αβεβαιότητας που οφείλεται στις ατέλειες του μοντέλου σχετίζεται με το κατά πόσο το μοντέλο είναι ικανό να εξηγήσει τα πειραματικά δεδομένα. Στην περίπτωση του μοντέλου Πρόσπτωσης-Απολαβής, επιδιώκεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή της εξίσωσης (1), με τρόπο που να περιγράφει με τη καλύτερη δυνατή προσέγγιση τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν την ημερήσια ενεργειακή απόδοση του ηλιακού συστήματος. Σε πρώτη προσέγγιση, είναι δυνατό να εκτιμηθεί ποσοτικά η καταλληλότητα του μοντέλου από το τυπικό σφάλμα πρόβλεψης (standard estimation error) της γραμμικής προσαρμογής, όταν επιχειρείται η εύρεση των συντελεστών a_1 , a_2 και a_3 με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

$$\sigma_Q = \left[\frac{1}{d-3} \sum_{i=1}^{i=d} (Q_i - (a_1 H_i + a_2 \Delta T_i + a_3))^2 \right]^{0.5} \quad (13)$$

όπου Q_i , H_i και ΔT_i είναι οι τιμές που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των d ημερών δοκιμής τους συστήματος και a_1 , a_2 και a_3 οι τιμές των συντελεστών που προέκυψαν από την διαδικασία της γραμμικής προσαρμογής με τη βοήθεια των ελαχίστων τετραγώνων.

Ωστόσο, μπορεί να υποστηριχθεί με βεβαιότητα ότι το τυπικό σφάλμα πρόβλεψης εκφράζει ποσοτικά τις ατέλειες του μοντέλου, μόνο στις περιπτώσεις εκείνες που οι πειραματικές παρατηρήσεις είναι απαλλαγμένες από σφάλματα. Στις περιπτώσεις ύπαρξης πειραματικών σφαλμάτων, το τυπικό σφάλμα είναι πιθανό να αποτυπώνει τόσο τις ατέλειες του μοντέλου, όσο και τις ατέλειες των οργάνων παρατήρησης. Από την άποψη αυτή, σε περιπτώσεις σαν και αυτή που εξετάζεται εδώ, όπου η γραμμική προσαρμογή επαναλαμβάνεται σε κάθε μία από τις από προσομοιώσεις Monte-Carlo, με διαφορετικό κάθε φορά τυπικό σφάλμα πρόβλεψης, η εξέταση της μεταβλητότητας του τυπικού σφάλματος μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Εάν το τυπικό σφάλμα αυτό παραμένει πρακτικά σταθερό από προσομοίωση σε προσομοίωση, τότε συμπεραίνεται αβίαστα ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή το τυπικό σφάλμα μεταβάλλεται με την τυχαία μεταβολή των συντελεστών, σημαίνει ότι οφείλεται, εν μέρει τουλάχιστον, στα σφάλματα μέτρησης. Η αδυναμία διαχωρισμού των δύο πηγών σφάλματος (ατέλειες μοντέλου και ατέλειες αισθητήρων) επιβάλλει ως ασφαλέστερη προσέγγιση (worst case) την θεώρηση μιας ανεξάρτητης συνιστώσας τυπικής αβεβαιότητας, αντιπροσωπευτικής της αδυναμίας του μοντέλου να εξηγήσει τις εμπειρικές παρατηρήσεις. Στην περίπτωση της

επαναλαμβανόμενης προσομοίωσης Monte-Carlo, η συνιστώσα αυτή εκλαμβάνεται εύλογα ως ίση με την μέση τιμή των τυπικών σφαλμάτων που καταγράφονται κατά τις N προσομοιώσεις.

4. Αριθμητική εφαρμογή

Η προσέγγιση που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, εφαρμόστηκε στην περίπτωση ενός τυπικού θερμοσιφωνικού οικιακού ηλιακού συστήματος, με επιφάνεια παραθύρου συλλέκτη $A_c=3.76 \text{ m}^2$ και όγκο ηλιακής δεξαμενής $V_s=191 \text{ lt}$. Το σύστημα δοκιμάστηκε εφαρμόζοντας αυστηρά τις απαιτήσεις του προτύπου, όσον αφορά τις διαδικασίες δοκιμών και τη μετρολογική ποιότητα των διακριβωμένων αισθητηρίων που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν καταρχήν το συγκεκριμένο σύστημα. Από πλήθος διερευνητικών υπολογισμών που έγιναν σε άλλα τυπικά συστήματα, προέκυψε ωστόσο ότι τα ποσοτικά αποτελέσματα που σχετίζονται με την τελική εκτιμώμενη αβεβαιότητα, είναι αντιπροσωπευτικά των επιδόσεων της ίδιας της μεθόδου και δεν μεταβάλλονται αξιοσημείωτα από σύστημα σε σύστημα, υπό την προϋπόθεση της αυστηρής τήρησης των απαιτήσεων του προτύπου. Από την άποψη αυτή, η εκτιμώμενη αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα της ενεργειακής απολαβής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας γενικός δείκτης ποιότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Η μετρολογική ποιότητα των διατάξεων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, όντας συμβατές με τις απαιτήσεις του προτύπου, μπορούν να διατυπωθούν με όρους τυπικής αβεβαιότητας ως ακολούθως:

- Για την θερμοκρασία του ρευστού και τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος: $u_T = u_{T_{out}-T_{in}} = 0.6 \text{ K}$.
- Για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος: $u_{T_a} = 0.29 \text{ K}$.
- Για την παροχή του θερμικού φορέα: $u_{\dot{m}} = 0.58 \%$.
- Για τη στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία (με χρήση first class pyranometer): $u_G = 2.5 \%$

Σημειώνεται ότι οι απαιτήσεις ποιότητας των μετρήσεων διατυπώνονται στα ισχύοντα διεθνή πρότυπα με όρους ακρίβειας (accuracy). Στις περιπτώσεις αυτές, ο υπολογισμός της τυπικής αβεβαιότητας u_A μιας ποσότητας A (standard uncertainty) βασίζεται στη θεώρηση ορθογώνιας κατανομής πιθανοτήτων, συσχετίζοντάς την με την αντίστοιχη ακρίβεια a_A μέσω της σχέσης:

$$u_A = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

Ειδικά για την μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας το διεθνές πρότυπο δεν κάνει καμία ποσοτική αναφορά στην ορθότητα του οργάνου μέτρησης, αλλά παραπέμπει στη διεθνή πρακτική κατηγοριοποίησης των πυρανομέτρων, θέτοντας την απαίτηση το όργανο να ανήκει στην κατηγορία first Class ή καλύτερη από αυτήν. Σύμφωνα με τις συστάσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας (WMO), η εφικτή διευρυμένη αβεβαιότητα ενός πυρανομέτρου first Class κατά τη μέτρηση της ημερήσιας ακτινοβολίας, για διάστημα εμπιστοσύνης 95% βρίσκεται στο 5 % και, επομένως, η αντίστοιχη τυπική αβεβαιότητα είναι της τάξης του 2.5 % (WMO 2008).

Από το σύνολο των πειραματικών δεδομένων επιλέχθηκαν 25 ημερήσιες τιμές των H , $\square T$ και Q , με κριτήριο την συμμόρφωσή τους με τις απαιτήσεις του προτύπου, ειδικότερα όσον αφορά την ισορροπία μεταξύ ημερών χαμηλής και ημερών υψηλής ηλιοφάνειας. Με βάσεις τα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3, υπολογίστηκαν οι τιμές των ενδιάμεσων μεγεθών, καθώς και οι τυπικές αβεβαιότητες που

Ε. Μαθιουλάκης, Χ. Κώνστας, Β. Μπελεσιώτης (ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»)

Αβεβαιότητα μετρήσεων και ποιότητα αποτελέσματος εκτιμώμενης ενεργειακής απολαβής θερμικών ηλιακών συστημάτων

4ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου - Αθήνα, 3&4 Φεβρουαρίου 2012

-Σελ. 10 -

χαρακτηρίζουν τις τιμές αυτές (Πίνακας 1). Ο συντελεστής θερμικών απωλειών της δεξαμενής U_s υπολογίστηκε ίσος με 2.10 W/K, με τυπική αβεβαιότητα 0.04 W/K.

Πίνακας 1: Τιμές ενδιάμεσων μεγεθών και αντίστοιχες τυπικές αβεβαιότητες

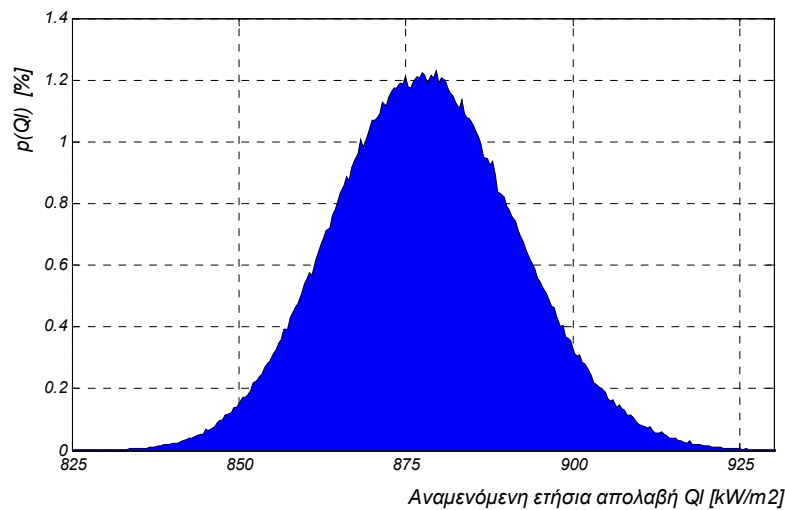
No Ημέρας	Q [MJ]	u_Q [MJ]	ΔT [K]	$u_{\Delta T}$ [K]	H [MJ]	u_H [MJ]
1	37.2	0.29	-7.5	0.29	23.2	0.58
2	35.7	0.28	-6.6	0.29	22.0	0.55
3	30.0	0.25	-6.7	0.29	18.5	0.46
4	34.9	0.28	-3.5	0.29	20.5	0.51
5	30.1	0.26	2.2	0.29	16.6	0.42
6	24.2	0.23	0.0	0.29	13.3	0.33
7	23.0	0.22	-1.6	0.29	12.9	0.32
8	33.1	0.27	0.1	0.29	18.1	0.45
9	22.7	0.22	-1.5	0.29	12.7	0.32
10	21.9	0.21	-2.7	0.29	12.1	0.30
11	26.8	0.24	-4.3	0.29	16.1	0.40
12	28.6	0.25	-3.2	0.29	16.6	0.42
13	32.7	0.27	-3.5	0.29	18.9	0.47
14	25.9	0.23	-4.2	0.29	15.0	0.38
15	21.8	0.21	-5.7	0.29	12.7	0.32
16	16.9	0.19	-2.4	0.29	9.8	0.24
17	27.6	0.24	0.1	0.29	15.5	0.39
18	18.7	0.20	2.0	0.29	10.1	0.25
19	16.1	0.19	0.0	0.29	8.7	0.22
20	25.0	0.23	-0.3	0.29	14.0	0.35
21	25.0	0.23	-2.0	0.29	13.9	0.35
22	26.7	0.24	-6.6	0.29	16.8	0.42
23	23.0	0.22	-8.6	0.29	15.0	0.38
24	30.8	0.26	-2.9	0.29	18.0	0.45
25	30.1	0.26	-1.6	0.29	17.4	0.44

Η προβλεπόμενη ετήσια ενεργειακή απολαβή Q_l υπολογίστηκε για διάφορα προφίλ χρήσης τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ποσότητα του ζεστού νερού χρήσης που απομαστεύεται σε ημερήσια

βάση. Σύμφωνα με το πρότυπο, ο υπολογισμός της προβλεπόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής Q_L γίνονται για απομάστευση του ζεστού νερού χρήσης στο τέλος της ημέρας σε θερμοκρασία ίση με 45°C. Ο υπολογισμός επαναλήφθηκε για διάφορους όγκους ημερήσιας κατανάλωσης νερού, από ένα έως τρεις φορές τον όγκο της δεξαμενής, ποσότητα που αντιστοιχεί πρακτικά σε πλήρη απομάστευση της συλλεγόμενης από το σύστημα ηλιακής ενέργειας.

Για την εκτίμηση της τιμής του Q_L και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την τιμή αυτή, για ένα δεδομένο προφίλ χρήσης και για την περιοχή της Αθήνας, εφαρμόστηκε η προσέγγιση Monte-Carlo, σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στην ενότητα 3.2. Έγιναν 10^6 προσομοιώσεις, παίρνοντας ως αφετηρία τα πειραματικά δεδομένα του Πίνακα 1, θεωρώντας ότι η υφιστάμενη πληροφορία σχετικά με τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενεργειακής απολαβής εκφράζεται ικανοποιητικά από κατανομές πιθανοτήτων οι οποίες έχουν ως καλύτερη εκτίμηση την μετρούμενη τιμή και ως τυπική απόκλιση την τυπική αβεβαιότητα των μετρήσεων. Από τις προσομοιώσεις προκύπτουν 10^6 τιμές για την αναμενόμενη ενεργειακή απολαβή Q_L , η στατιστική επεξεργασία των οποίων οδηγεί στον υπολογισμό της μέσης (πιθανότερης) τιμής, καθώς και της τυπικής τους απόκλισης, ως εκτιμητή της τυπικής αβεβαιότητας.

Στο σχήμα 4 φαίνεται μία χαρακτηριστική κατανομή πιθανοτήτων για απομάστευση ίση με το τριπλάσιο του όγκου της ηλιακής δεξαμενής, ενώ στον Πίνακα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα για όλα τα προφίλ χρήσης, μαζί με τη συνιστώσα αβεβαιότητας, $u_{Q_L,exp}$, που οφείλεται στα σφάλματα των διατάξεων μέτρησης, υπολογιζόμενη.



Σχήμα 4: Κατανομή πιθανοτήτων Q_L για απομάστευση ίση με το τριπλάσιο του όγκου της δεξαμενής

Πίνακας 2: Τιμές της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής Q_L και αβεβαιότητες που οφείλονται στα σφάλματα των αισθητήρων για διάφορους τιμές του όγκου απομάστευσης V_d .

Όγκος απομάστευσης V_d	$3 V_s$	$2.5 V_s$	$2 V_s$	$1.5 V_s$	V_s
Q_L [kWh/m ²]	875	850	776	657	474
$u_{Q_L,exp}$ [kWh/m ²] ([%])	14 (1.6%)	13 (1.5%)	11 (1.4%)	9 (1.4%)	6 (1.3%)

Η συνιστώσα αβεβαιότητας $u_{Q_i,m}$ η οποία σχετίζεται με την καταλληλότητα του μοντέλου, υπολογιζόμενη σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στην ενότητα 3.4 για απομάστευση τριών όγκων δεξαμενής, εκτιμήθηκε ότι είναι ίση $0.24 \text{ kWh/m}^2\text{day}$ και, κατά συνέπεια, σε ετήσια βάση $u_{Q_i,m}=23 \text{ kWh/m}^2$ ή περίπου 2.6% επί της αναμενόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής.

Υπενθυμίζεται ότι κατά τον υπολογισμό της μακροχρόνιας ενεργειακής απολαβής χρησιμοποιούνται επίσης τυπικά θερμοκρασία προφίλ του νερού μέσα στην ηλιακή δεξαμενή, τα οποία προκύπτουν από τις μετρήσεις θερμοκρασίας κατά την απομάστευση. Στο βαθμό που τα θερμοκρασιακά αυτά προφίλ υπολογίζονται από πειραματικά δεδομένα, είναι λογικό να αναμένεται η ύπαρξη μιας επιπλέον συνιστώσας αβεβαιότητας. Ωστόσο, από κατάλληλη παραμετρική διερεύνηση προέκυψε ότι η συνιστώσα αυτή είναι της τάξης του 0.2% και, κατά συνέπεια, μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα σε σχέση με τις υπόλοιπες συνιστώσες.

Η συνολική τυπική αβεβαιότητα στις τιμές της ετήσιας ενεργειακής απολαβής υπολογίζεται συνδυάζοντας τις επιμέρους συνιστώσες. Η κάλυψη όλου του εύρους χρήσης του συστήματος, επιτάσσει ο υπολογισμός αυτός να γίνει για τη λιγότερο ευνοϊκή περίπτωση της απομάστευσης τριών όγκων, δηλαδή $u_{Q_i} = \sqrt{(u_{Q_i,exp})^2 + (u_{Q_i,m})^2} = 27 \text{ kWh/m}^2$ ή περίπου 3% ή 6% ως διευρυμένη αβεβαιότητα για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, με συντελεστή κάλυψης $k=2$.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η τελική αβεβαιότητα επηρεάζεται κυρίως από το κατά πόσο το μοντέλο είναι ικανό να εξηγήσει τα πειραματικά αποτελέσματα και λιγότερο από την μετρολογική στάθμη των χρησιμοποιούμενων οργάνων μέτρησης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι παραπάνω υπολογισμοί επαναλήφθηκαν και για άλλες περιοχές (διαφορετικά τυπικά μετεωρολογικά έτη), με τα ποσοτικά αποτελέσματα να παραμένουν σε γενικές γραμμές τα ίδια.

5. Συμπεράσματα

Η εκτίμηση της αβεβαιότητας στις τιμές της αναμενόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής ενός θερμικού ηλιακού συστήματος, όπως αυτή προκύπτει από δοκιμές απόδοσης, συνιστά κρίσιμη πληροφορία τόσο για τον καταναλωτή, όσο και για τα σχήματα πιστοποίησης. Η δυσκολία εκτίμησης της αβεβαιότητας αυτής εντοπίζεται στον μη-αλγεβρικό χαρακτήρα της όλης διαδικασίας υπολογισμού της ενεργειακής απολαβής, ο οποίος καθιστά αδύνατη την εφαρμογή των συμβατικών μεθόδων που βασίζονται στη διάχυση των σφαλμάτων μέσω μιας γραμμικής προσέγγισης του μοντέλου μέτρησης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υιοθετήθηκε μια μεικτή προσέγγιση, βασισμένη τόσο σε συμβατικές τεχνικές, όσο και σε αυτές που αξιοποιούν τη διάχυση των κατανομών. Αρχικά εκτιμήθηκαν οι αβεβαιότητες στα ενδιάμεσα μεγέθη τα οποία εμπλέκονται στο μοντέλο μέτρησης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η συνιστώσα αβεβαιότητας που οφείλεται στις ατέλειες των διατάξεων μέτρησης, αξιοποιώντας τις δυνατότητες που προσφέρει η προσομοίωση Monte Carlo. Εκτιμήθηκε επίσης η συνιστώσα αβεβαιότητας η οποία μπορεί εύλογα να αποδοθεί στις ατέλειες του μοντέλου περιγραφής της ημερήσιας ενεργειακής συμπεριφοράς του ηλιακού συστήματος.

Από την εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης σε ένα τυπικό θερμικό ηλιακό σύστημα, προκύπτει ότι η συμβολή των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με την ποιότητα του μετρητικού εξοπλισμού στη συνολική αβεβαιότητα είναι σχετικά μικρή, ενώ περισσότερο σημαντική φαίνεται να είναι η συμβολή των αβεβαιοτήτων που μπορούν να αποδοθούν στην αδυναμία του μοντέλου να περιγράψει επακριβώς την ενεργειακή συμπεριφορά του ηλιακού συστήματος. Η συνολική διευρυμένη αβεβαιότητα στον αποτέλεσμα της αναμενόμενης ετήσιας ενεργειακής απολαβής για την περιοχή της Αθήνας εκτιμήθηκε ότι είναι της τάξης του 6%. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι χαρακτηρίζει την ίδια τη μέθοδο

και ότι έχει γενικότερη ισχύ, π.χ. για άλλες περιοχές ή και για άλλα ηλιακά συστήματα, υπό την προϋπόθεση της αυστηρής τήρησης των απαιτήσεων της μεθόδου δοκιμών, όπως αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο EN 12976-2.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Καλούδης Ε., Καούρης Ι. Γ., Μαθιουλάκης Ε. και Μπελεσιώτης Β., “Σύγκριση της Δυναμικής Μεθόδου και της Input-Output σε ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού”, 9ο Εθνικό Συνέδριο για τις ΑΠΕ, Μάρτιος 2009, Κύπρος.

Belessiotis V., Mathioulakis E., Papanicolaou E., “Theoretical formulation and experimental validation of the input-output modeling approach for large solar thermal systems”, Solar Energy 84, p.p. 245–255, 2010.

CEN, “European Standard EN12976-2: Thermal Solar Systems and Components - Factory Made Systems – Part 2: Test Methods”, 2010, CEN Ed..

Cox, M.G. Siebert B.R.L., “The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty”, Metrologia 43, p.p. S178–S188, 2006.

GUM, “BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, <http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM 100 2008 E.pdf>.

GUM S1, “BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML 2008 Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the ‘Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement’ - Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method”, <http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM1012008E.pdf>.

ISO, “ISO 9459-2, Solar heating - Domestic water heating systems - Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems”, 1995, ISO Ed.

Lira I., Elster C, Wöger W. and Cox M.G., “Derivation of an output PDF from Bayes’ theorem and the principle of maximum entropy”, in "Advanced Mathematical & Computational Tools in Metrology VIII", Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences vol. 78, eds. F. Pavese, M. Bär, J.M. Linares, C. Perruchet, N.F. Zhang, 213-218, 2009, World Scientific New Jersey.

Matsumoto M. and Nishimura T., “Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator”, ACM Trans. Model. Comput. Simul. 8, pp. 3-30, 1998.

WMO, “Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (7th Edition)”, Geneva, 2008, WMO Ed.