

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΘΕΡΜΟΔΟΧΕΙΩΝ

Σ. Μπαμπαλής, Χ. Κόνστας, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης
Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
15310 Αγ. Παρασκευή Αττικής
e-mail: sbabilis@ipta.demokritos.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται θεωρητική και πειραματική διερεύνηση των δύο προτυποποιημένων μεθόδων προσδιορισμού των θερμικών απωλειών έμμεσα θερμαινόμενων κλειστών δοχείων αποθήκευσης θερμότητας (συντελεστής θερμικών απωλειών και στατικές θερμικές απώλειες-standing heat losses), συγκρίνοντας τα άμεσα αποτελέσματα των δύο μεθόδων καθώς και τα αποτελέσματα από την μετατροπή αυτών από τη μια μέθοδο στην άλλη. Επιχειρείται, για κάθε μία από τις μεθόδους, μετά από συστηματική ανάλυση των αβεβαιοτήτων, εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τα αποτελέσματά τους με σκοπό την αξιολόγηση όλων εκείνων των παραγόντων που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, γεγονός που επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη σύγκριση των δύο μεθόδων. Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά αποτελέσματα από δύο τυπικές δεξαμενές διαφορετικών χωρητικότητας, με διαφορετική διαμόρφωση (μία οριζόντια και μία κατακόρυφη) που δοκιμάστηκαν σε εσωτερικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα απέδειξαν την καλύτερη εκτίμηση της τιμής των παραμέτρων θερμικών απωλειών στο θερμοδοχείο οριζόντιας διαμόρφωσης από τα αντίστοιχα μεγέθη για το θερμοδοχείο κατακόρυφης διαμόρφωσης γεγονός που μπορεί να αποδοθεί τόσο στην διαμόρφωση των θερμοδοχείων όσο και στην μέθοδο δοκιμών.

Λέξεις κλειδιά: Συντελεστής θερμικών απωλειών, standing heat losses, αβεβαιότητα, σύγκριση μεθόδων δοκιμών

Abstract

In the present work a theoretical and experimental investigation of the two standardized methods for the evaluation of the thermal heat loss parameters (heat loss coefficient and standing heat losses) in indirectly heated unvented (closed) storage water heaters, was carried out. The investigation has been executed by comparing the outcomes of both testing procedures as well as of those obtained from the transformation of parameter values of one method to the other. For each one of the methods a systematic assessment of the uncertainty of all those parameters affecting the final heat loss values was performed, allowing thus to determine the uncertainty figures and therefore a more precise and complete evaluation of the results obtained. Data from two common storage vessels tested indoors and having different configuration (horizontal and vertical), was used. The comparison of the uncertainty obtained convince of a better estimation of the heat loss parameters for the horizontal storage than those of the one having vertical configuration, for reasons that could be attributed to the different configurations as well as to the testing procedures.

Keywords: Heat loss coefficient, standing heat losses, uncertainty, testing methods comparison.

1. Εισαγωγή

Με δεδομένη την διαρκώς εντεινόμενη επιδίωξη για απαγκίστρωση από τα συμβατικά καύσιμα, η αποθήκευση θερμότητας διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κρίσιμο χαρακτηριστικό αποδοτικότητας των διατάξεων αποθήκευσης θερμότητας, αποτελεί ο προσδιορισμός της τιμής των θερμικών απωλειών, ο προσδιορισμός των οποίων οφείλει να πραγματοποιείται σύμφωνα με τα αντίστοιχα διεθνή πρότυπα.

Τα πρότυπα αυτά περιγράφουν δύο διαφορετικές μεθόδους δοκιμών οι οποίες προέκυψαν από την διαφορετική κατασκευαστική προσέγγιση. Η πρώτη αφορά τα έμμεσα θερμαινόμενα θερμοδοχεία και βασίζεται στην μέτρηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του περιεχόμενου νερού σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό επίπεδο (Πρότυπο *ΕΛΟΤ EN 12897 «Water supply – Specification for indirectly heated unvented (closed) storage water heaters»*). Η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται σε θερμοδοχεία θερμικών ηλιακών συστημάτων και βασίζεται στην μέτρηση της πτώσης της θερμοκρασίας του περιεχόμενου στο θερμοδοχείο νερού κατά τη διάρκεια της νύχτας, συναρτήσει κλιματολογικών παραμέτρων (Πρότυπο *ΕΛΟΤ EN 12976-2 «Thermal solar systems and components – Factory made systems – Part 2: Test methods»*). Ο όρος «standing heat loss» ο οποίος εκφράζει τις θερμικές απώλειες ανά 24ωρο αποδίδεται στην Ελληνική με τον όρο «στατικές θερμικές απώλειες» αν και δεν αποδίδει απόλυτα το νόημα του αγγλικού όρου.

Δεδομένου ότι και οι δύο μέθοδοι δοκιμών απευθύνονται στο ίδιο προϊόν, τίθεται το θέμα της αξιοπιστίας και της συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων, ως προϋπόθεση για την αποδοχή τους από τους μελλοντικούς χρήστες, ειδικότερα στα πλαίσια της εφαρμογής συστημάτων πιστοποίησης ενεργειακών επιδόσεων.

2. Μέθοδοι δοκιμών

Στην συνέχεια περιγράφονται οι δύο πειραματικές μέθοδοι προσδιορισμού των θερμικών απωλειών.

2.1 Η μέθοδος των στατικών θερμικών απωλειών (standing heat losses) [1]

Οι στατικές απώλειες είναι πρακτικά οι θερμικές απώλειες που καταγράφονται για το συγκεκριμένο θερμοδοχείο επί ένα 24ωρο. Η δοκιμή προσδιορισμού των απωλειών πραγματοποιείται κάνοντας χρήση του ενσωματωμένου στο δοχείο θερμοαντικειμένου στοιχείου (ηλεκτρική αντίσταση), καταγράφοντας την ενέργεια που πρέπει να προσδώσουμε στο νερό έτσι ώστε η θερμοκρασία αυτού στο επάνω μέρος του δοχείου να παραμένει σταθερή. Εάν στο δοχείο δεν υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση τότε λαμβάνεται μέριμνα ώστε να τοποθετηθεί σε κατάλληλο σημείο.

Η θερμοκρασία στο επάνω μέρος του δοχείου καταγράφεται με θερμομέτρο τύπου Pt100 ευρισκόμενο εντός κυαθίου κατάλληλα προσαρμοσμένου στο επάνω μέρος αυτού - το θερμοστοιχείο αυτό είναι διαφορετικό από αυτό στην έξοδο του νερού. Η ηλεκτρική αντίσταση ενεργοποιείται, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού ελεγκτή, έτσι ώστε η θερμοκρασία στο πάνω μέρος της δεξαμενής (αισθητήριο T_2) να διατηρείται

σταθερή και ίση με 65 ± 2 °C. Χρησιμοποιώντας όργανο μέτρησης ηλεκτρικής ισχύος στο κύκλωμα τροφοδοσίας της ηλεκτρικής αντίστασης καταγράφεται η ηλεκτρική κατανάλωση E , σε [kWh] για διαδοχικά 24ωρα, μετά από μια αρχική περίοδο σταθεροποίησης 24 ωρών. Η τιμή της ηλεκτρικής κατανάλωσης θεωρείται σταθερή όταν οι διαδοχικές 24ωρες καταγραφές είναι σταθερές, με απόκλιση $\pm 2\%$. Σε περίπτωση μεγαλύτερων αποκλίσεων λαμβάνεται ο μέσος όρος επτά διαδοχικών 24ωρων καταγραφών.

Οι θερμικές απώλειες δεξαμενής Q_{st} , σε [kWh] ανά 24ωρο, υπολογίζονται, σύμφωνα με τις προβλέψεις του προτύπου, από τη σχέση:

$$Q_{st} = E \times \left(\frac{45}{T_2(av) - T_a} \right) \quad (1)$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και $T_2(av)$ η μέση θερμοκρασία που καταγράφεται από το θερμοστοιχείο στο επάνω μέρος της δεξαμενής.

2.2 Η μέθοδος του συντελεστή θερμικών απωλειών [2, 3]

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών, U_{st} , προσδιορίζεται καταγράφοντας την πτώση της θερμοκρασίας του νερού του δοχείου, το οποίο αφήνεται σε ηρεμία επί ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το νερό εντός του δοχείου θερμαίνεται σε θερμοκρασία πάνω από 70 °C με οποιονδήποτε τρόπο (ηλιακή θέρμανση ή ηλεκτρική αντίσταση). Η θερμοκρασία του νερού εντός του δοχείου ομογενοποιείται, συνήθως με ανακυκλοφορία, και καταγράφεται η αρχική θερμοκρασία, T_i , ενώ στην συνέχεια το δοχείο αφήνεται σε ηρεμία επί ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα Δt (συνήθως 12 ώρες) καταγράφοντας την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a . Με το πέρασμα του χρονικού διαστήματος Δt η θερμοκρασία του νερού ομογενοποιείται εκ νέου και καταγράφεται η τελική θερμοκρασία αυτού, T_f . Το διεθνές πρότυπο θεσπίζει ως κριτήριο αποδοχής ομογενοποίησης την σταθερότητα της θερμοκρασίας στην έξοδο του υπό δοκιμή δοχείου κατά 1 °C για διάστημα 15 λεπτών και οι θερμοκρασίες T_i , T_f προκύπτουν από τον μέσο όρο των μετρούμενων τιμών κατά το χρονικό διάστημα αυτό.

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών U_{st} , σε [W/K], υπολογίζεται, σύμφωνα με τις προβλέψεις του προτύπου, από την σχέση:

$$U_{st} = \frac{\rho w \times Cp w \times Vs}{\Delta t} \times \ln \left[\frac{T_i - T_a}{T_f - T_a} \right] \quad (2)$$

όπου T_a είναι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ενώ Vs ο όγκος του θερμοδοχείου. Δεδομένου ότι τόσο η πυκνότητα, ρw , όσο και η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, $Cp w$, είναι μεγέθη εξαρτώμενα από την θερμοκρασία, ο υπολογισμός της αριθμητικής τους τιμής πραγματοποιήθηκε στην μέση θερμοκρασία, T_{sm} , στην οποία βρέθηκε το νερό του θερμοδοχείου κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις και συντελεστές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία [4].

$$\rho w(Tsm) = D_0 + \sum_{i=1}^8 D_i (Tsm)^i \quad (3)$$

$$C_{pw}(Tsm) = C_0 + \sum_{i=1}^8 C_i (Tsm)^i \quad (4)$$

3. Υπολογισμός Αβεβαιοτήτων

Δεδομένου ότι και στις δύο μεθόδους δοκιμών ο ζητούμενος συντελεστής προκύπτει έμμεσα από τον υπολογισμό μετρούμενων μεγεθών, η αβεβαιότητα του τελικού μεγέθους βασίζεται στον νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων. Σύμφωνα με τον νόμο αυτό, η αβεβαιότητα ενός μεγέθους Y το οποίο υπολογίσθηκε από τις τιμές x_i μετρούμενων μεγεθών δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$u_c^2(Y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{df}{dx_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (5)$$

όπου f η συνάρτηση η οποία συνδέει το μέγεθος Y με τα μετρούμενα μεγέθη x_i [5].

Η αβεβαιότητα των μετρούμενων μεγεθών x_i προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών αβεβαιότητας τύπου A και B.

$$u(x_i) = \sqrt{u_A(x_i)^2 + u_B(x_i)^2} \quad (6)$$

όπου $u_A(x_i)$ η στατιστική αβεβαιότητα λόγω επαναλαμβανόμενων μετρήσεων η οποία δίνεται από τη σχέση

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

με τον μέσο όρο της τιμής να προκύπτει από την σχέση:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{i,j}}{n} \quad (8)$$

Ως συνιστώσες αβεβαιότητας τύπου B λαμβάνονται, σύμφωνα με τον «*Guide to the expression of uncertainty in measurements*» (GUM), όλες εκείνες οι πηγές σφάλματος οι οποίες δύνανται να επιδράσουν στην μέτρηση. Στην παρούσα εργασία ως συνιστώσα αβεβαιότητας τύπου B λαμβάνεται υπόψη μόνο η αβεβαιότητα του οργάνου μέτρησης όπως αυτή προκύπτει από το πιστοποιητικό διακρίβωσής του.

Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός αβεβαιοτήτων που παρουσιάζεται στη συνέχεια αφορά μόνο την αβεβαιότητα που σχετίζεται με την μετρολογική ποιότητα του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Δεν περιλαμβάνει κατά συνέπεια τις πιθανές επιπτώσεις από σφάλματα που σχετίζονται με την καταλληλότητα των μεγεθών που επιλέγονται ως πρωτογενή μεγέθη από το ίδιο το πρότυπο. Αυτό αφορά κατά κύριο λόγο, τη μέθοδο των στατικών θερμικών απωλειών, όπου η επιλογή της

θερμοκρασίας T_2 ως αντιπροσωπευτικής της μέσης θερμοκρασίας της δεξαμενής μπορεί να τεθεί υπό αμφισβήτηση.

3.1 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων στον υπολογισμό των στατικών θερμικών απωλειών

Για τον υπολογισμό της τιμής των στατικών απωλειών τα μετρούμενα μεγέθη είναι η θερμοκρασία στο άνω μέρος του δοχείου T_2 , η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας E .

Από τη σχέση (1) με χρήση της σχέσης (5) προκύπτει ότι η αβεβαιότητα του συντελεστή στατικών απωλειών δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$u^2(Q_{st}) = C_1^2 u^2(E) + C_2^2 u^2(T_2) + C_3^2 u^2(T_a) \quad (9)$$

με τους συντελεστές βαρύτητας να δίνονται παρακάτω:

$$C_1 = \frac{dQ_{st}}{dE} = \frac{45}{(T_2 - T_a)}, \quad C_2 = \frac{dQ_{st}}{dT_2} = -\frac{E \times 45}{(T_2 - T_a)^2}, \quad C_3 = \frac{dQ_{st}}{dT_a} = \frac{E \times 45}{(T_2 - T_a)^2}$$

3.2 Υπολογισμός Αβεβαιοτήτων συντελεστή θερμικών απωλειών

Για τον υπολογισμό της αριθμητικής τιμής του συντελεστή θερμικών απωλειών τα μετρούμενα μεγέθη είναι ο όγκος του δοχείου, η αρχική και τελική θερμοκρασία του νερού στο δοχείο και η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ενδιάμεσα υπολογίζονται οι αριθμητικές τιμές της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του νερού σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην παράγραφο 2.2.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2) και (5) η αβεβαιότητα της αριθμητικής τιμής του συντελεστή θερμικών απωλειών, U_{st} , δίνεται από την σχέση:

$$u^2(U_{st}) = C_1^2 u^2(\rho w) + C_2^2 u^2(Cpw) + C_3^2 u^2(Vs) + C_4^2 u^2(Ti) + C_5^2 u^2(Tf) + C_6^2 u^2(Ta) \quad (10)$$

με τους συντελεστές βαρύτητας να δίνονται παρακάτω:

$$C_1 = \frac{dU_{st}}{d\rho w} = \frac{Cpw \times Vs}{\Delta t} \times \ln \left[\frac{Ti - Ta}{Tf - Ta} \right], \quad C_2 = \frac{dU_{st}}{dCpw} = \frac{\rho w \times Vs}{\Delta t} \times \ln \left[\frac{Ti - Ta}{Tf - Ta} \right],$$

$$C_3 = \frac{dU_{st}}{dVs} = \frac{\rho w \times Cpw}{\Delta t} \times \ln \left[\frac{Ti - Ta}{Tf - Ta} \right], \quad C_4 = \frac{dU_{st}}{dTi} = \frac{\rho w \times Cpw \times Vs}{\Delta t \times (Ti - Ta)},$$

$$C_5 = \frac{dU_{st}}{dT_f} = -\frac{\rho w \times Cpw \times Vs}{\Delta t \times (Tf - Ta)}, \quad C_6 = \frac{dU_{st}}{dT_a} = \frac{\rho w \times Cpw \times Vs}{\Delta t} \times \left[\frac{Tf - Ti}{(Ti - Ta) \times (Ta - Tf)} \right]$$

Δεδομένου ότι η μέτρηση του χρονικού διαστήματος Δt πραγματοποιείται με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή η αβεβαιότητα της εν λόγω μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αμελητέα.

4. Διερεύνηση

Η διερεύνηση διεξήχθη σε δύο θερμοδοχεία στα οποία διενεργήθηκαν και οι δύο δοκιμές σε εσωτερικό ελεγχόμενο χώρο – για να διασφαλισθεί η σταθερότητα και ομοιομορφία των περιβαλλοντικών συνθηκών – με διαφορετικές διαμορφώσεις – οριζόντια και κατακόρυφη – και με διαφορετικούς μεταξύ τους όγκους – 144 l και 273 l. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμοδοχείων καθώς και τα αποτελέσματα από τις δοκιμές περιγράφονται παρακάτω.

Θερμοδοχείο A

Όγκος 144 l, διάμετρος κυλίνδρου 65 mm, ύψος 1.32 mm, εξωτερική μόνωση 50 mm με αφρό πολουρεθάνης, οριζόντιας διαμόρφωσης

Θερμοδοχείο B

Όγκος 273.5 l, διάμετρος κυλίνδρου 60 mm, ύψος 1.93 mm, εξωτερική μόνωση 65 mm με αφρό πολουρεθάνης, κατακόρυφης διαμόρφωσης

4.1 Προσδιορισμός των στατικών θερμικών απωλειών

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων και η επίδρασή τους στον συνολικό υπολογισμό της αβεβαιότητας.

Πίνακας 1

Παράμετρος	Θερμοδοχείο A		Θερμοδοχείο B	
	Τιμή	u	Τιμή	u
T_2 [°C]	64.78	0.04	65.27	0.04
T_a [°C]	20.93	0.06	20.21	0.06
E [kWh/d]	2.17	0.02	2.03	0.02

Και κατά συνέπεια από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει ότι οι στατικές θερμικές απώλειες του Θερμοδοχείου A, Q_{st} , ανέρχονται σε 2.22[kWh] ανά 24ωρο, με αβεβαιότητα $u(Q_{st}) = \pm 0.02$ [kWh/d] και σχετική αβεβαιότητα 1.01%. Για το

Θερμοδοχείο B, οι στατικές θερμικές απώλειες, Q_{St} , ανέρχονται σε 2.03[kWh] ανά 24ωρο, με αβεβαιότητα $u(Q_{St}) = \pm 0.02$ [kWh/d] και σχετική αβεβαιότητα 1.01%.

4.2 Υπολογισμός συντελεστή θερμικών απωλειών

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων και η επίδρασή τους στον συνολικό υπολογισμό της αβεβαιότητας.

Οι τιμές της πυκνότητας και ειδικής θερμοχωρητικότητας υπολογίζονται με προσεγγιστικές πολυωνυμικές σχέσεις και για τον λόγο αυτό η αβεβαιότητα του προσδιορισμού της τιμής τους θεωρείται αμελητέα. Τα όργανα μέτρησης (θερμόμετρα, ροόμετρο) είναι διακριβωμένα σε όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται.

Πίνακας 2

Παράμετρος	Θερμοδοχείο A		Θερμοδοχείο B	
	Τιμή	<i>u</i>	Τιμή	<i>u</i>
V_s [l]	144	0.83	273.5	1.58
T_i [°C]	70.02	0.05	70.36	0.04
T_f [°C]	60.43	0.05	63.27	0.04
T_{sm} [°C]	65.23	0.04	66.82	0.03
T_a [°C]	20.65	0.05	21.13	0.06
Δt [s]	61800	0	70440	0
ρ_w [kg/l]	0.98	0	0.98	0
C_{pw} [J/kg K]	4185.98	0	4186.83	0

Κατά συνέπεια από τις σχέσεις (3) και (4) προκύπτει ότι ο συντελεστής θερμικών απωλειών του Θερμοδοχείου A, U_{st} , ανέρχεται σε 2.06 [W/K], με αβεβαιότητα $u(U_{st}) = \pm 0.02$ [W/K] και η σχετική αβεβαιότητα 0.97 %. Για το Θερμοδοχείο B προκύπτει ότι ο συντελεστής θερμικών απωλειών, U_{st} , ανέρχεται σε 2.47 [W/K], με αβεβαιότητα $u(U_{st}) = \pm 0.03$ [W/K] και η σχετική αβεβαιότητα 1.07 %.

5. Σύγκριση μεθόδων

Οι δύο συντελεστές που παρουσιάστηκαν παραπάνω αφορούν το ίδιο φυσικό μέγεθος, αν και επιχειρούν να το εκφράσουν με διαφορετικό τρόπο. Για να αξιολογηθεί η μεταξύ τους συγκρισιμότητα, είναι απαραίτητη η εύρεση κατάλληλων σχέσεων αναγωγής τους σε μια κοινή βάση σύγκρισης.

Θεωρώντας γνωστό τον συντελεστή θερμικών απωλειών U_{st} ενός θερμοδοχείου και με δεδομένες τις θερμοκρασίες στο άνω μέρος του δοχείου T_2 (περίπου 65 °C) και περιβάλλοντος T_a (περίπου 20 °C) υπολογίζονται οι απώλειες, Q_{st} , στο νερό του δοχείου έπειτα από παραμονή σε ηρεμία εικοσιτεσσέρων ωρών, Δt , σύμφωνα με την εξίσωση

$$Q_{st} = U_{st} \times \Delta t \times (T_f - T_i) \quad (11)$$

Αντιστρόφως θεωρώντας ως γνωστή την αριθμητική τιμή των στατικών απωλειών, Q_{st} , ενός θερμοδοχείου είναι δυνατόν να υπολογισθεί ο συντελεστής θερμικών απωλειών του δοχείου, U_{st} , από την κατωτέρω σχέση (12):

$$U_{st} = 1000 \times Q_{st} / \Delta t \times (T_f - T_i) \quad (12)$$

Όπου T_i η αρχική και T_f η τελική θερμοκρασία.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετατροπών του κάθε συντελεστή για τα δύο θερμοδοχεία Α και Β που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 3

Θερμοδοχείο	U_{st} [W/K]	$U_{st} (\leftarrow Q_{st})$ [W/K]	ΔU_{st} [%]	Q_{st} [kWh/d]	$Q_{st} (\leftarrow U_{st})$ [kWh/d]	ΔQ_{st} [%]
A (οριζ.)	2.06	2.12	-2.6	2.23	2.17	-2.6
B (καθ.)	2.47	1.87	31.6	2.03	2.67	31.6

Στον παραπάνω Πίνακα 3 ο συμβολισμός $U_{st} (\leftarrow Q_{st})$ σημαίνει ότι η τιμή της παραμέτρου U_{st} προκύπτει από την γνωστή τιμή της παραμέτρου Q_{st} . Το αντίστοιχο και για το $Q_{st} (\leftarrow U_{st})$ όπου η τιμή του Q_{st} προκύπτει από την γνωστή τιμή της παραμέτρου U_{st} .

6. Συμπεράσματα

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων αφ' ενός του παραπάνω Πίνακα 3 και αφ' ετέρου των Πινάκων 1 και 2 είναι δυνατόν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται μεταξύ των άμεσα μετρημένων και των εκ μετατροπής υπολογισθέντων μεγεθών είναι, κυρίως στην περίπτωση της κατακόρυφης δεξαμενής, σημαντικές και κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αβεβαιότητες των ίδιων των μεθόδων δοκιμών. Τα αίτια θα πρέπει να αναζητηθούν στην ίδια την μέθοδο και τις διαδικασίες δοκιμών, δεδομένου ότι η κάθε μέθοδος θέτει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τις συνθήκες δοκιμής καθώς και διαφορετικούς στόχους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στο οριζόντιο διάταξης δοχείο (δοχείο Α) οι αποκλίσεις που προκύπτουν από τις μετατροπές είναι σαφώς μικρότερες από τις αποκλίσεις που προκύπτουν από αυτές του δοχείου κατακόρυφης διάταξης (δοχείο Β). Το αποτέλεσμα αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο οριζόντιο δοχείο τα φαινόμενα διαστρωμάτωσης είναι σαφώς πολύ μικρότερα και, κατά συνέπεια, η θερμοκρασία η οποία καταγράφεται στο ανώτερο σημείο του δοχείου είναι πλησιέστερη και αντιπροσωπευτικότερη της μέσης θερμοκρασίας του δοχείου.

Αντίθετα, ένα διαστρωματωμένο θερμοδοχείο παρουσιάζει διαφορετικές απώλειες στα διάφορα ύψη, φαινόμενο που γίνεται πιο έντονο όσο ο λόγος ύψους προς διάμετρο της δεξαμενής μεγαλώνει. Το μειονέκτημα αυτό θα μπορούσε να αρθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν την διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας του νερού εντός του θερμοδοχείου τοποθετώντας αισθητήρια μέτρησης της θερμοκρασίας στα διάφορα ύψη αυτής.

7. Βιβλιογραφία

- [1] ΕΛΟΤ EN 12897:2006, «Υδρευση – Προδιαγραφή για έμμεσα θερμαινόμενα (κλειστά) δοχεία αποθήκευσης – Θέρμανσης νερού χωρίς εξαερισμό».
- [2] EN 12976-02:2006, «Θερμικά ηλιακά συστήματα και εξαρτήματα αυτών – Συστήματα κατασκευασμένα στο εργοστάσιο – Μέρος 2^ο : Μέθοδοι δοκιμής».
- [3] ISO 9459-2:1995, «Solar heating – Domestic water heating systems – Part 2 : Outdoor test methods for system performance prediction of solar-only systems».
- [4] VDI Heat Atlas, Springer Verlag.
- [5] ISO (1995), «Guide to the expression of uncertainty in measurements», ISO ed., Switzerland.