

## **Μέτρηση σταθεράς χρόνου και θερμοχωρητικότητας θερμικών ηλιακών συλλεκτών**

X. Κώνστας, E. Μαθιουλάκης και B. Μπελεσιώτης

Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων - ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

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

### **Περίληψη**

Η σταθερά χρόνου και η ενεργός θερμοχωρητικότητα συνιστούν σημαντικές χαρακτηριστικές παραμέτρους των διατάξεων που καλούνται να λειτουργήσουν σε συνθήκες έντονης αλληλεπίδρασης με ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Στην περίπτωση των θερμικών ηλιακών συλλεκτών, οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη δυναμική τους συμπεριφορά και, εν τέλει, την ενεργειακή τους απόδοση.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των εν λόγω μεγεθών γίνεται, σύμφωνα με το ισχύον για την περίπτωση διεθνές πρότυπο, βασιζόμενοι στην ανάλυση της χρονικά μεταβαλλόμενης απόκρισης της διάταξης, όταν αυτή υποβάλλεται σε μια απότομη μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος μιας σειράς παραμέτρων, όπως η ταχύτητα, η χρονική αναφορά και η συνολική διάρκεια της δειγματοληψίας, καθώς και οι σταθερές χρόνου και η ακρίβεια των οργάνων μέτρησης.

Η διερεύνηση βασίζεται στην ανάλυση των πειραματικών δεδομένων από μετρήσεις πεδίου.

Απώτερος στόχος της προτεινόμενης διερεύνησης είναι η εκτίμηση της αβεβαιότητας στο τελικό αποτέλεσμα συνυπολογίζοντας όλες τις επιμέρους συνιστώσες, τόσο αυτές που σχετίζονται με τη διαδικασία μέτρησης αυτή καθαυτή, όσο και αυτές που οφείλονται στη μετρολογική ποιότητα των χρησιμοποιούμενων διατάξεων, επιτρέποντας παράλληλα τη βελτιστοποίηση της συνολικής διαδικασίας δοκιμής

*Λέξεις κλειδιά: Σταθερά χρόνου, θερμοχωρητικότητα, αβεβαιότητα μέτρησης*

### **1. Εισαγωγή**

Στα πλαίσια της διεθνούς τάσης για απεξάρτηση από τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας και στροφή στις εναλλακτικές – φιλικές προς το περιβάλλον – πηγές, η θερμική ηλιακή ενέργεια καλείται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο, ειδικά σε χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια όπως είναι η Ελλάδα και η Κύπρος.

Οι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν βασικά τμήματα θερμικών ηλιακών διατάξεων που βρίσκουν ένα ευρύ πεδίο χρήσης, τόσο στην παραγωγή θερμού νερού για οικιακή, αλλά και επαγγελματική χρήση, όσο και σε εφαρμογές όπως είναι η ηλιακή ψύξη, η ηλιακή ξήρανση και η ηλιακή αφαλάτωση.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τον προσδιορισμό δύο χαρακτηριστικών παραμέτρων του συλλέκτη, τη σταθερά χρόνου και την ενεργό θερμοχωρητικότητα, η ιδιαίτερη σημασία των οποίων έγκειται στη σημαντική επιρροή τους στη δυναμική συμπεριφορά του συλλέκτη και κατ' επέκταση

στην ενεργειακή τους απόδοση, αν αναλογιστούμε ότι ο ηλιακός συλλέκτης καλείται να λειτουργήσει σε συνθήκες έντονης αλληλεπίδρασης με ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Οι τιμές εξάλλου των παραμέτρων αυτών συνιστούν απαιτητά δεδομένα για τα λογισμικά δυναμικής προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των θερμικών ηλιακών εγκαταστάσεων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης μιας σειράς παραμέτρων στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος και, τελικά, στην εκτίμηση των αβεβαιοτήτων των προσδιοριζόμενων μεγεθών, βασιζόμενοι στην ανάλυση πειραματικών δεδομένων από μια σειρά δοκιμές πεδίου.

Απώτερος στόχος είναι, πέρα από την ποσοτική εκτίμηση των αβεβαιοτήτων, η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με πιθανές βελτιώσεις της μεθόδου διεξαγωγής της δοκιμής και, κατ' επέκταση, η πιθανή συνεισφορά στην αναθεώρηση των υπαρχόντων διεθνών προτύπων. Οι παρεμβάσεις βελτίωσης των προτύπων αφορούν κυρίως ορισμένα ασαφή σημεία, όπως είναι η χρονική στιγμή έναρξης της δοκιμής και η ταχύτητα και η διάρκεια της δειγματοληψίας.

## 2. Περιγραφή δοκιμής

Η δοκιμή για τον ποσοτικό προσδιορισμό της σταθεράς χρόνου και της ενεργού θερμοχωρητικότητας του συλλέκτη διενεργείται στο ύπαιθρο με φυσική ακτινοβολία, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12975-2 και είναι κοινή για τις δύο παραμέτρους (CEN, 2006).

Ο συλλέκτης βρίσκεται τοποθετημένος στην ειδική διάταξη, σκεπασμένος με αδιαφανές κάλυμμα ώστε να μη δέχεται ηλιακή ακτινοβολία και διαρρέεται από νερό θερμοκρασίας ίσης με αυτής του περιβάλλοντος. Με τον συλλέκτη προσανατολισμένο στον ήλιο αφαιρείται απότομα το αδιαφανές κάλυμμα και ο συλλέκτης αφήνεται έως ότου ισορροπήσει σε μια κατάσταση σταθερής λειτουργίας.

Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται οι θερμοκρασίες του νερού στην είσοδο και έξοδο του συλλέκτη, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η παροχή του νερού και η προσπίπτουσα στο επίπεδο του συλλέκτη ηλιακή ακτινοβολία.

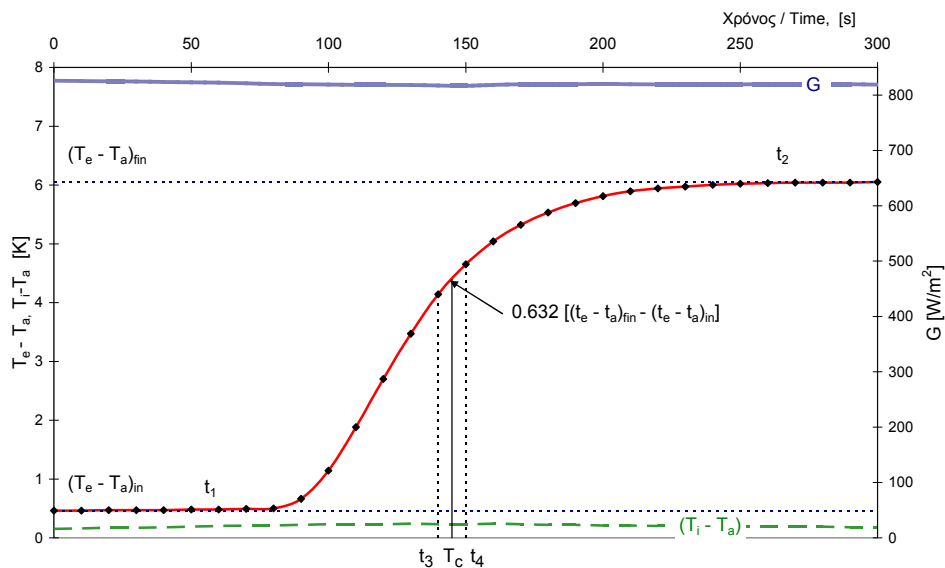
Η ενεργός θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$C = \frac{A_c \eta_0 \int_{t_1}^{t_2} G dt - \dot{m} c_f \int_{t_1}^{t_2} (T_e - T_i) dt - AU_0 \left[ \int_{t_1}^{t_2} (T_i - T_a) dt + \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} (T_e - T_i) dt \right]}{Tm_2 - Tm_1} \quad (1)$$

Ως σταθερά χρόνου  $Tc$  ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η διαφορά θερμοκρασίας  $(T_e - T_a)$  από την αρχική τιμή  $(T_e - T_a)_{in}$  στο 63.2 % της τελικής τιμής  $(T_e - T_a)_{fin}$ . Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1, λόγω του πεπερασμένου αριθμού μετρούμενων σημείων, η σταθερά χρόνου  $Tc$  βρίσκεται ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t_3$  και  $t_4$  και ο υπολογισμός της γίνεται με γραμμική παρεμβολή σύμφωνα με την εξίσωση (2):

$$Tc = t_3 + (t_4 - t_3) \frac{[0.632((T_e - T_a)_{\max} - (T_e - T_a)_{\min}) + (T_e - T_a)_{\min}] - (T_e - T_a)_{t_3}}{(T_e - T_a)_{t_4} - (T_e - T_a)_{t_3}} \quad (2)$$

Από την παρατήρηση του γραφήματος του σχήματος (1), γίνεται σαφής η ιδιαίτερη σημασία που έχει ο ακριβής προσδιορισμός της χρονικής στιγμής έναρξης και η συνολική διάρκεια της δοκιμής, παράλληλα με την αναγκαιότητα ορισμού ταχύτητας δειγματοληψίας η οποία να είναι συμβατή με τη ταχύτητα εξέλιξης του φαινομένου. Σημειώνεται ότι το πρότυπο δοκιμών δεν προβλέπει ιδιαίτερες απαιτήσεις για τις μετρήσεις αυτές, και ότι η συνήθης πρακτική όσον αφορά τον εντοπισμό της χρονικής στιγμής έναρξης της μεταβατικής κατάστασης, συνίσταται στην ανίχνευση της έναρξης ανόδου της θερμοκρασίας στην έξοδο του συλλέκτη.



**Σχήμα 1:** Γραφική παράσταση απόκρισης διάταξης ηλιακού συλλέκτη κατά τη δοκιμή

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έγιναν δοκιμές στον ίδιο ηλιακό συλλέκτη με διαφορετικές ταχύτητες δειγματοληψίας (2 s, 3 s, 4 s και 10 s). Η χρονική στιγμή έναρξης της δοκιμής, και πιο συγκεκριμένα η στιγμή αποκάλυψης του ηλιακού συλλέκτη, εντοπίστηκε με μεγάλη ακρίβεια με τη βοήθεια κατάλληλης πρόβλεψης που ενσωματώθηκε στο λογισμικό δειγματοληψίας.

Παράλληλα έγινε πειραματική διερεύνηση της ταχύτητας απόκρισης των οργάνων μέτρησης, ώστε να μελετηθεί η επίδρασή της στην ποιότητα των μετρήσεων.

### 3. Υπολογισμός αβεβαιοτήτων

Μια ιδιαιτερότητα στην ανάλυση των αβεβαιοτήτων κατά τον προσδιορισμό της ενεργού θερμοχωρητικότητας αποτελεί η εκτίμηση της αβεβαιότητας των ολοκληρωμάτων της εξίσωσης (1). Λαμβάνοντας ως παράδειγμα το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας προς τον χρόνο, παρουσιάζεται ο τρόπος εκτίμησης της αβεβαιότητας, ο οποίος εφαρμόστηκε και για τα υπόλοιπα δύο ολοκληρώματα.

Για να υπολογιστεί αριθμητικά το ολοκλήρωμα, αναλύεται σε ένα άθροισμα επιμέρους επιφανειών όπως φαίνεται στη εξίσωση (3), ακολουθώντας τη μέθοδο του τραπέζιου.

$$\int_{t_1}^{t_2} G dt = \frac{G_1 + G_2}{2} \Delta t + \dots + \frac{G_{n-1} + G_n}{2} \Delta t \quad (3)$$

Σύμφωνα με τον «Guide to Expression of Uncertainty in Measurement» η αβεβαιότητα ενός έμμεσα υπολογιζόμενου μεγέθους  $Y$ , από  $N$  μετρούμενα μεγέθη  $X_1, X_2, \dots, X_N$  τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας συνάρτησης  $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ , δίνεται από τη σχέση, γνωστή και ως νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων (ISO, 1995):

$$u_y = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2 x_i + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \right]^{0.5} \quad (4)$$

όπου:  $u(x_i, x_j)$  εκφράζει την συσχετιστικότητα των  $x_i$  και  $x_j$ .

Στην περίπτωση που τα μεγέθη  $X_1, X_2, \dots, X_N$  είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους η εξίσωση (4) παίρνει τη μορφή

$$u_y = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2 x_i \right]^{0.5} \quad (5)$$

ενώ στην περίπτωση πλήρους συσχέτισης λαμβάνει τη μορφή

$$u_y = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) u x_i \quad (6)$$

Στην περίπτωση του ολοκληρώματος της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς το χρόνο, οι τιμές της ακτινοβολίας  $G_1, G_2, \dots, G_N$  θεωρούνται ως συσχετιζόμενες μεταξύ τους, δεδομένου ότι οι μετρήσεις προέρχονται από το ίδιο όργανο μέτρησης (ISO, 1995). Παρά το ότι ο βαθμός συσχέτισης δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, η επιλογή ασφαλούς πρόβλεψης επιβάλλει την θεώρηση πλήρους συσχέτισης. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι η ταχύτητα δειγματοληψίας παραμένει σταθερή για κάθε σειρά μετρήσεων, ότι η μέτρηση του χρονικού διαστήματος  $\Delta t$  δεν χαρακτηρίζεται από αξιοσημείωτα σφάλματα και ότι η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της δοκιμής μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, η αβεβαιότητα του ολοκληρώματος υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$u_{Gdt} = (n - 1)u_G \Delta t \quad (7)$$

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία υπολογίζονται και τα άλλα δύο ολοκληρώματα, αντιμετωπίζοντας όμως τις διαφορές θερμοκρασίας όχι ως προϊόν αριθμητικής αφαίρεσης δύο διαφορετικών θερμοκρασιών, αλλά ως ένα μέγεθος μετρούμενο από ένα υποθετικό όργανο. Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα του εν λόγω μεγέθους υπολογίζεται από τον συνδυασμό των τυπικών αβεβαιοτήτων των δύο θερμομέτρων, σύμφωνα με τον νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων.

$$u_{T_i - T_a} = \sqrt{(u_{T_i})^2 + (u_{T_a})^2} \quad (8)$$

Εκτός από τις συνιστώσες αβεβαιότητας που οφείλονται στην μετρολογική ποιότητα των χρησιμοποιούμενων διατάξεων, θα πρέπει να διερευνηθεί η τυχόν ύπαρξη συνιστωσών που οφείλονται στην διαδικασία μέτρησης αυτής καθαυτής.

Τόσο για τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων της ενεργού θερμοχωρητικότητας με τη μέθοδο του τραπεζίου, όσο και για τον υπολογισμό της σταθεράς χρόνου με γραμμική παρεμβολή, έγινε η παραδοχή ότι τα εκάστοτε μετρούμενα μεγέθη συμπεριφέρονται εντός των διαστημάτων  $\Delta t$  γραμμικά. Έχοντας υπόψη ότι το διάστημα  $\Delta t$  αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας δειγματοληψίας κρίθηκε σκόπιμο η περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασής της στο τελικό αποτέλεσμα των μετρούμενων μεγεθών.

Ο πίνακας (1) παρουσιάζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών της ενεργού θερμοχωρητικότητας και της σταθεράς χρόνου, για μετρήσεις με διαφορετικές ταχύτητες δειγματοληψίας.

**Πίνακας 1 :** Ενεργός θερμοχωρητικότητα και σταθερά χρόνου

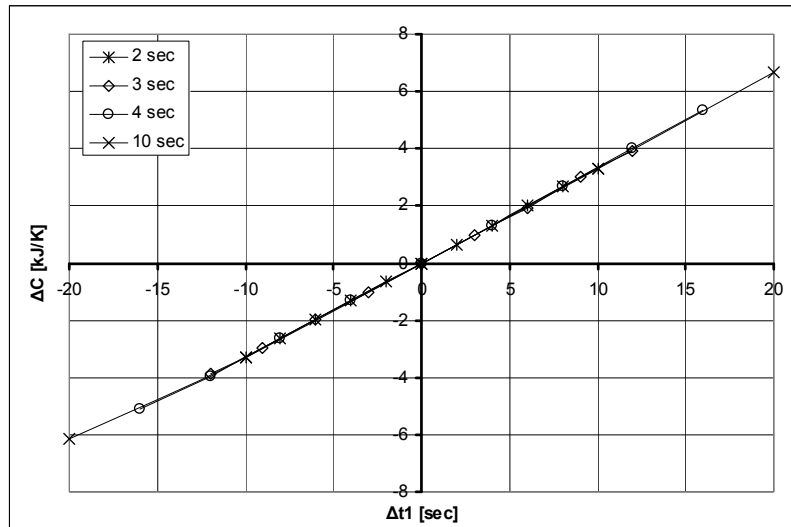
	Ταχύτητα δειγματοληψίας			
	2 sec	3 sec	4 sec	10 sec
<b>C (kJ/K)</b>	21.6	21.0	21.7	21.6
<b>Tc (sec)</b>	67.8	67.6	67.8	68.0

Όπως διαπιστώνεται από τον παραπάνω πίνακα, τα αποτελέσματα τόσο της ενεργού θερμοχωρητικότητας όσο και της σταθεράς χρόνου, δεν επηρεάζονται από την ταχύτητα δειγματοληψίας. Ωστόσο, η ταχύτητα δειγματοληψίας θα πρέπει να επιλέγεται με γνώμονα τόσο τις δυνατότητες του μετρητικού και καταγραφικού εξοπλισμού, όσο και την ταχύτητα εξέλιξης του ίδιου του φαινομένου.

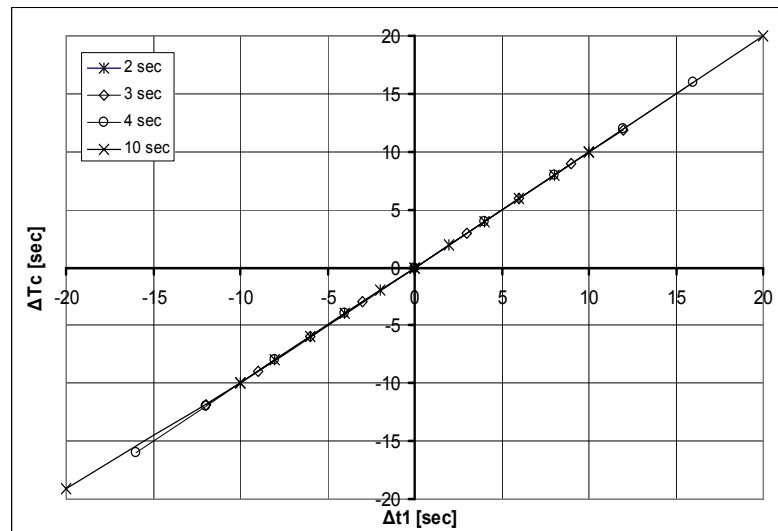
Μια πολύ σημαντική παράμετρος στη μέτρηση παραμέτρων που χαρακτηρίζουν δυναμικά φαινόμενα, και ειδικότερα φαινόμενα που εξελίσσονται ανάμεσα σε δύο καταστάσεις ισορροπίας, είναι ο σαφής προσδιορισμός των χρονικών στιγμών έναρξης και λήξης των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στους σχετικούς υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της επίδρασης στο τελικό αριθμητικό αποτέλεσμα των υπολογιζόμενων μεγεθών, μιας ενδεχόμενης απόκλισης από την πραγματική χρονική στιγμή αποκάλυψης του συλλέκτη. Η διερεύνηση βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις πεδίου, μετατοπίζοντας το θεωρούμενο ως

χρονικό σημείο έναρξης της δοκιμής  $t_l$  από το πραγματικό κατά  $\Delta t_l$ , υπολογίζοντας για το νέο σημείο έναρξης τα δύο μεγέθη και αξιολογώντας τις διαφορές που προκύπτουν.

Επειδή το χρονικό βήμα  $\Delta t_l$  είναι ανάλογο της ταχύτητας δειγματοληψίας η διαδικασία αυτή έγινε για μετρήσεις με διαφορετικές ταχύτητες δειγματοληψίας, προσπαθώντας να διαπιστώσει τυχόν συσχέτιση των δύο παραγόντων.



*Σχήμα 2: Απόκλιση στην τιμή της ενεργού θερμοχωρητικότητας ως συνάρτηση της μετατόπισης του χρονικού σημείου έναρξης της δοκιμής*



*Σχήμα 3: Απόκλιση στην τιμή της σταθεράς χρόνου ως συνάρτηση της μετατόπισης του χρονικού σημείου έναρξης της δοκιμής*

Τα σχήματα (2) και (3) παρουσιάζουν την απόκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της ενεργού θερμοχωρητικότητας  $\delta C$  και της σταθεράς χρόνου  $\delta T_c$  από τις τιμές που υπολογίστηκαν βάση της πραγματικής χρονικής αναφοράς, συναρτήσει του χρονικού διαστήματος  $\Delta t_1$ .

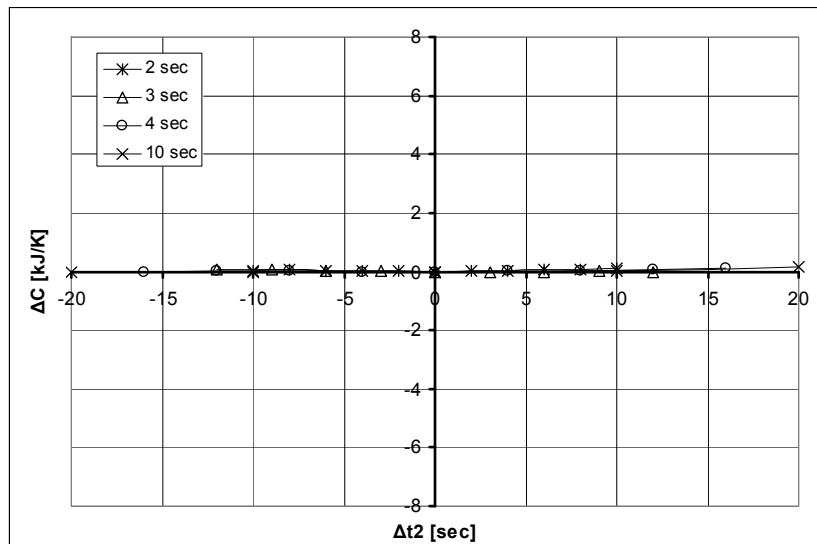
$$\delta C = C_{t_1 + \Delta t_1} - C_{t_1} \quad (9)$$

$$\delta T_c = T_{c_{t_1 + \Delta t_1}} - T_{c_{t_1}} \quad (10)$$

Όπως φαίνεται από τα σχήματα (2) και (3), η επίδραση του ασαφούς προσδιορισμού της χρονικής αναφοράς στην ποιότητα της μέτρησης και στο αριθμητικό αποτέλεσμα των μετρούμενων μεγεθών είναι σημαντική, παραμένει όμως ανεξάρτητη από την ταχύτητα δειγματοληψίας. Στην περίπτωση που η χρονική στιγμή έναρξης της δοκιμής δεν είναι γνωστή με ακρίβεια, θα πρέπει να συνυπολογιστεί μια επιπλέον συνιστώσα αβεβαιότητας. Στην πράξη, η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τη στιγμή έναρξης της δοκιμής εξαρτάται από τον διαθέσιμο εξοπλισμό και την ακολουθούμενη διαδικασία. Για το παράδειγμα που εξετάζεται εδώ, λαμβάνεται μια αβεβαιότητα στη μετατόπιση της χρονικής αναφοράς της τάξης των 10 δευτερολέπτων, τιμή που μπορεί να θεωρηθεί εύλογη με βάση τη συνήθη εργαστηριακή πρακτική.

Θεωρώντας ορθογώνια κατανομή για τα πιθανά σφάλματα στη στιγμή έναρξης των μετρήσεων, η συνιστώσα αβεβαιότητας όσον αφορά την υπολογιζόμενη τιμή της ενεργού θερμοχωρητικότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

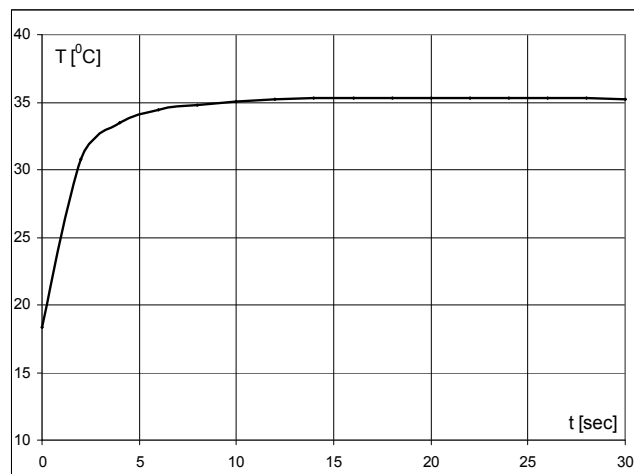
$$u_{\Delta t_1} = \frac{\delta C_{\Delta t_1}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$



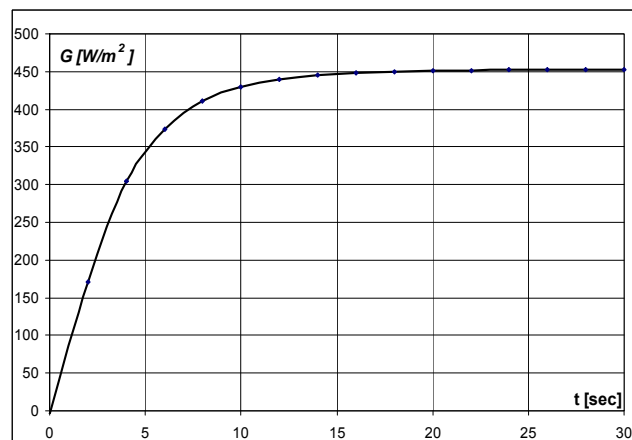
**Σχήμα 4:** Απόκλιση στην τιμή της ενεργού θερμοχωρητικότητας ως συνάρτηση της μετατόπισης του χρονικού σημείου λήξης της δοκιμής

Αναλόγως προκύπτει η συνιστώσα αβεβαιότητας η οποία οφείλεται στη μετατόπιση της στιγμής έναρξης της δοκιμής και χαρακτηρίζει την υπολογιζόμενη τιμή της σταθεράς χρόνου.

Για την περίπτωση της ενεργού θερμοχωρητικότητας, διερευνήθηκε η επίδραση του προσδιορισμού της χρονικής στιγμής λήξης της δοκιμής  $t_2$ , υπολογίζοντας τις αριθμητικές τιμές της ενεργού θερμοχωρητικότητας για χρονικές μετατοπίσεις της χρονικής στιγμής λήξης της δοκιμής κατά  $\Delta t_2$ . Η περίπτωση της σταθεράς χρόνου δεν διερευνήθηκε γιατί η υπολογιζόμενη αριθμητική τιμή της είναι ανεξάρτητη της χρονικής στιγμής λήξης της δοκιμής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα (4), η επίδραση του ασαφούς προσδιορισμού της χρονικής στιγμής λήξης της δοκιμής  $t_2$  στο αριθμητικό αποτέλεσμα της ενεργού θερμοχωρητικότητας δεν είναι σημαντική, οπότε η προκύπτουσα συνιστώσα αβεβαιότητας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και να μην συμπεριληφθεί κατά τον υπολογισμό της συνολικής τυπικής αβεβαιότητας.



Σχήμα 5: Απόκριση θερμομέτρου



Σχήμα 6: Απόκριση Πυρανομέτρου



Δύο συνήθεις εργαστηριακές πρακτικές για τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής έναρξης της δοκιμής αποτελούν, η κάλυψη του πυρανομέτρου και η αποκάλυψή του ταυτόχρονα με τον συλλέκτη, καθώς και η ανίχνευση της έναρξης ανόδου της θερμοκρασίας στην έξοδο του συλλέκτη. Για το λόγο αυτό, διερευνήθηκαν πειραματικά οι σταθερές χρόνου του θερμοστοιχείου μέτρησης της θερμοκρασίας εξόδου του συλλέκτη και του πυρανομέτρου μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα σχήματα (5) και (6) παρουσιάζουν τις καμπύλες απόκρισης των δύο οργάνων.

Μπορεί η σταθερά χρόνου του θερμοστοιχείου να είναι περίπου 2 δευτερόλεπτα, όπως προκύπτει από το σχήμα (5), η μεταβολή όμως της θερμοκρασίας εξόδου της διάταξης είναι αργή εξαιτίας των φαινομένων αδρανείας του ίδιου του συλλέκτη, γεγονός που καθιστά τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής έναρξης της δοκιμής ασαφή. Στην περίπτωση κατά την οποία, ο προσδιορισμός της χρονικής αναφοράς της δοκιμής πραγματοποιείται παρακολουθώντας τη μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του συλλέκτη, θα πρέπει κατά τον υπολογισμό της συνολικής τυπικής αβεβαιότητας της ενεργού θερμοχωρητικότητας και της σταθεράς χρόνου, να συνυπολογιστεί η συνιστώσα αβεβαιότητας που αναλογεί στην καθυστέρηση μεταξύ πραγματικής στιγμής έναρξης της δοκιμής και φαινόμενης χρονικής στιγμής έναρξης.

Παρατηρώντας το σχήμα (6) και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του ξεσκεπάσματος του πυρανομέτρου, είναι μεγαλύτερη από τα  $700 \text{ W/m}^2$ , την ελάχιστη δηλαδή επιτρεπτή ακτινοβολία για την διεξαγωγή της δοκιμής, διαπιστώνουμε ότι οι μετρούμενες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για τα πρώτα σημεία δειγματοληψίας, δε θα ανταποκρίνονται στις πραγματικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλοιώνοντας έτσι την υπολογιζόμενη αριθμητική τιμή της ενεργού θερμοχωρητικότητας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επίσης θα πρέπει να προστεθεί μία επιπλέον συνιστώσα αβεβαιότητας κατά τον υπολογισμό της συνολικής τυπικής αβεβαιότητας της ενεργού θερμοχωρητικότητας.

Τα μετρούμενα μεγέθη της παρούσας εργασίας χαρακτηρίζονται μόνο από αβεβαιότητες τύπου B. Παίρνοντας υπόψη τον μετρολογικό εξοπλισμό που είναι διαθέσιμος στο Εργαστήριο, καθώς και τις σχετικές απαιτήσεις του προτύπου, οι αβεβαιότητες αυτές παίρνουν τις τιμές οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 2 (Mathioulakis et al, 1999).

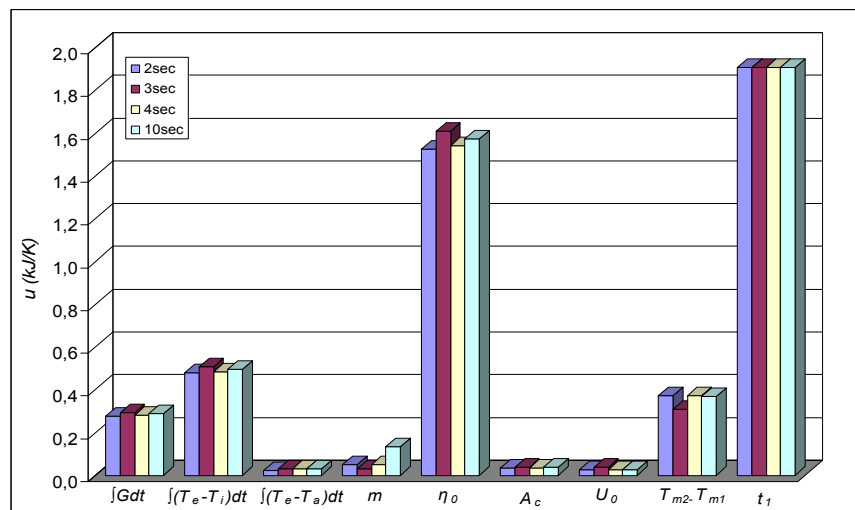
**Πίνακας 2 : Τυπικές αβεβαιότητες**

<b>Μέγεθος</b>	<b>Τυπικές αβεβαιότητες</b>
Ηλιακή ακτινοβολία	$u_G = 4 \text{ Wm}^{-2}$
Θερμοκρασία $T_e, T_i$	$u_{T_e, T_i} = 0,035 \text{ }^\circ\text{C}$
Διαφορά θερμοκρασίας $(T_e - T_i)$	$u_{T_e - T_i} = 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$
Διαφορά θερμοκρασίας $(T_i - T_a), (T_e - T_a)$	$u_{T_i - T_a} = u_{T_e - T_a} = 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$
Παροχή	$u_m = 0,006 \text{ m}^3$
Επιφάνεια συλλέκτη	$u_{A_c} = 5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Συντελεστής απόδοσης συλλέκτη $\eta_0$	$u_{\eta_0} = 0,025 \eta_0$
Συντελεστής θερμικών απωλειών συλλέκτη $U_0$	$u_{U_0} = 0,025 U_0$

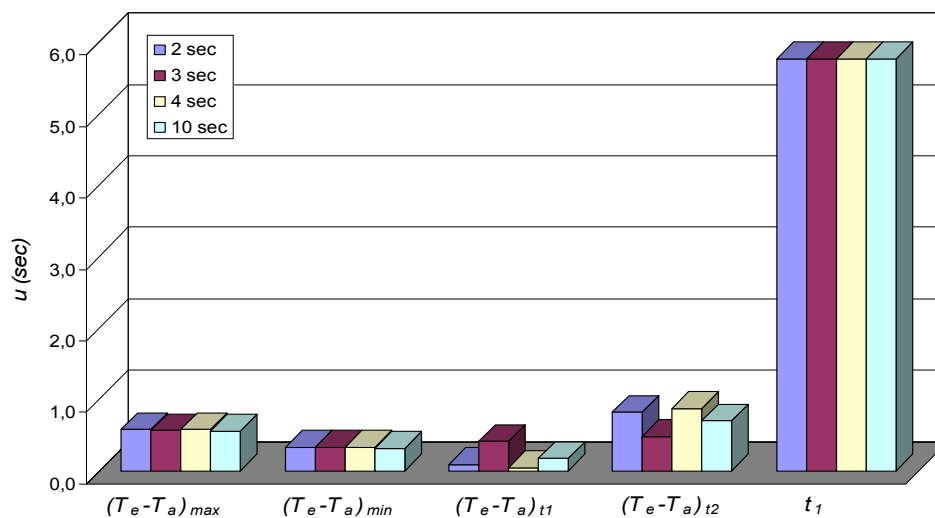
Στον πίνακα (3) παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες αριθμητικές τιμές καθώς και οι συνολικές τυπικές αβεβαιότητες της ενεργού θερμοχωρητικότητας και της σταθεράς χρόνου, ενώ στα ιστογράμματα των σχημάτων (7) και (8) παρουσιάζονται οι συνιστώσες αβεβαιότητας για τα εν λόγω μεγέθη.

**Πίνακας 3 :** Υπολογιζόμενες αριθμητικές τιμές και συνολικές τυπικές αβεβαιότητες ενεργού θερμοχωρητικότητας και σταθεράς χρόνου.

	Ταχύτητα δειγματοληψίας			
	2 sec	3 sec	4 sec	10 sec
<b>C (kJ/K)</b>	21.6	21.0	21.7	21.6
<b>u<sub>C</sub> (kJ/K)</b>	1.7	1.7	1.7	1.7
<b>T<sub>c</sub> (sec)</b>	67.8	67.6	67.8	68.0
<b>u<sub>Tc</sub> (sec)</b>	1.8	1.8	1.8	1.8



**Σχήμα 7:** Ενεργός θερμοχωρητικότητα - συνιστώσες αβεβαιότητας



**Σχήμα 8:** Σταθερά χρόνου - συνιστώσες αβεβαιότητας

#### 4. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της διερεύνηση που επιχειρήθηκε επέτρεψαν την εκτίμηση της αβεβαιότητας στα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη δυναμική συμπεριφορά ενός θερμικού ηλιακού συλλέκτη. Ποιο συγκεκριμένα, επιχειρήθηκε η αποτίμηση της συμβολής των σημαντικότερων πηγών σφάλματος στο αποτέλεσμα της μέτρησης της ενεργού θερμοχωρητικότητας και της σταθεράς χρόνου του συλλέκτη, στην προοπτική βελτίωσης της ακολουθούμενης μεθοδολογίας.

Οι υπολογιζόμενες αριθμητικές τιμές τόσο της ενεργού θερμοχωρητικότητας, όσο και της σταθεράς χρόνου του συλλέκτη, καθώς και οι τυπικές αβεβαιότητες που τις χαρακτηρίζουν, είναι πρακτικά ανεξάρτητες από την ταχύτητα δειγματοληψίας, όσο τουλάχιστον το διάστημα δειγματοληψίας παραμένει σημαντικά μικρότερο της σταθεράς χρόνου του ίδιου του συλλέκτη και δεν καθιστά ασαφή τον χρονικό προσδιορισμό της έναρξης του μεταβατικού φαινομένου

Σημαντική επίδραση στα υπολογιζόμενα αριθμητικά αποτελέσματα της ενεργού θερμοχωρητικότητας και της σταθεράς χρόνου, αποτελεί ο μη ακριβής προσδιορισμός της χρονικής στιγμής έναρξης της δοκιμής. Το γεγονός αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία, εάν λάβουμε υπ' όψη την ελλιπή αναφορά των διεθνών προτύπων, βάση των οποίων διεξάγονται οι δοκιμές, σχετικά με τον τρόπο προσδιορισμού της χρονικής αυτή αναφοράς. Ο ακριβής προσδιορισμός του χρόνου έναρξης της δοκιμής μπορεί να υλοποιηθεί λαμβάνοντας το ηλεκτρικό σήμα εξόδου από κατάλληλα επιλεγμένη διάταξη, όπως για παράδειγμα ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο χαρακτηρίζεται από σχεδόν μηδενικό χρόνο απόκρισης.

Αντιθέτως, ο μη ακριβής προσδιορισμός της στιγμής λήξης της δειγματοληψίας, ελάχιστα επηρεάζει την υπολογιζόμενη αριθμητική τιμή της ενεργού θερμοχωρητικότητας και η αντίστοιχη συνιστώσα αβεβαιότητας κατά τον υπολογισμό της συνολικής τυπικής αβεβαιότητας του μεγέθους μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και να παραληφθεί.

Καθοριστικότερος παράγοντας στη διαμόρφωση του αποτελέσματος της συνολικής τυπικής αβεβαιότητας κατά τον προσδιορισμό της ενεργού θερμοχωρητικότητας, αποτελεί η συνιστώσα αβεβαιότητας που οφείλεται στην τυπική αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τον συντελεστή απόδοσης του συλλέκτη  $\eta_0$ , κάτι το οποίο συμβαδίζει απόλυτα με τη φυσική σημασία του μεγέθους αυτού.

## Επεξηγήσεις συμβόλων

$\Delta t$	Διάστημα δειγματοληψίας	[s]
$\Delta t_1$	Μετατόπιση της στιγμής έναρξης της δοκιμής	[s]
$\Delta t_2$	Μετατόπιση της στιγμής λήξης της δοκιμής	[s]
$A_c$	Επιφάνεια παραθύρου συλλέκτη	[m <sup>2</sup> ]
$\eta_0$	Συντελεστής απόδοσης συλλέκτη	-
$G$	Ηλιακή ακτινοβολία	[W m <sup>-2</sup> ]
$\dot{m}$	Παροχή μάζας υγρού	[kgr s <sup>-1</sup> ]
$c_f$	Ειδική θερμοχωρητικότητα υγρού	[J kgr <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$T_i$	Θερμοκρασία στην είσοδο του συλλέκτη	[K]
$T_e$	Θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη	[K]
$T_a$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	[K]
$U_0$	Συντελεστής απωλειών συλλέκτη	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$T_m$	Μέση θερμοκρασία του υγρού στο συλλέκτη	[K]
$u$	Τυπική αβεβαιότητα	-
$C$	Ενεργός θερμοχωρητικότητα συλλέκτη	[J K <sup>-1</sup> ]
$T_c$	Σταθερά χρόνου συλλέκτη	[s]
$t_1$	Χρονική στιγμή έναρξης της δοκιμής	[s]
$t_2$	Χρονική στιγμή λήξης της δοκιμής	[s]

## Δείκτες

1	Έναρξη δοκιμής
2	Λήξη δοκιμής

## Βιβλιογραφία

CEN, “EN 12975-2: Thermal solar systems and components- Solar collectors- Part 2: Test methods”, CEN editions, 2006.

ISO, “Guide to Expression of Uncertainty in Measurement”, ISO Editions, Geneva, 1993.

Mathioulakis E., Voropoulos K., Belessiotis V., “Assessment of Uncertainty in solar Collector modeling and testing”, Solar Energy, Vol. 66 (1999), 337-347.