ΕΝΙΣΧΥΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΡΟΟΜΕΤΡΟΥ

Γ. Παπαδάκος[1], Χ. Κώνστας[1], Α. Παπαδοπούλου[1] και Χ. Δούκας[1]
[1]Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, Σχολή ΗΜΜΥ ΕΜΠ,
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου
e-mail: gpapadakos@teemail.gr

Η μέτρηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας σε δομικό στοιχείο με τη χρήση θερμορροομέτρου, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Διεθνές Πρότυπο ISO 9869-1:2014 “Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method” είναι αρκετά πολύπλοκη, απαιτώντας αυξημένους πόρους για την εφαρμογή της. Με ελάχιστη διάρκεια τριών ημερών, σχετικά υψηλό κόστος της μετρητικής διάταξης, περιορισμούς σχετικά με την εποχή της μέτρησης, η οικονομική αποδοτικότητα της μεθόδου εκτιμάται πολύ χαμηλή για την αποτελεσματική εφαρμογή της. Ενδεχόμενη συντόμευση της διάρκειας της μέτρησης με διατήρηση ενός αποδεκτού επιπέδου αβεβαιότητας θα καθιστούσε τη μέτρηση περισσότερο ελκυστική και ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων στα χέρια των αναλυτών για την ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων. Είναι όμως αυτό εφικτό; Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζουμε αναλύσεις με τη χρήση διαγράμματος αυτοσυσχέτισης σε κατάλληλα σχεδιασμένες μετρήσεις, που αναδεικνύουν τις δυνατότητες μείωσης της διάρκειας της μέτρησης. Ο στόχος της μείωσης της διάρκειας της μέτρησης φέρνει στο προσκήνιο τις παραμέτρους αβεβαιότητας λόγω σφάλματος ορισμού κατά τη χρήση θερμορροομέτρου και της επακόλουθης αστάθειας των αποτελεσμάτων, τις οποίες προσπαθεί να καταπολεμήσει το πρωτόκολλο της ISO μεθόδου. Στην παρούσα εργασία έγινε διερεύνηση των δυνατοτήτων ελαχιστοποίησης αυτής της αβεβαιότητας μέσω της αξιολόγησης του κινδύνου για σφάλμα ορισμού στην περίπτωση σύντομης διαδικασίας μέτρησης. Τα πειράματα που διενεργήθηκαν οδήγησαν στην διατύπωση ενός νέου, συγκεκριμένου κατευθυντήριου πλαισίου μέτρησης για τη διαδικασία σύντομης μέτρησης, με έμφαση στα χαρακτηριστικά της απαιτούμενης χρονοσειράς, όπως αυτά επιβάλλονται από το αποτέλεσμα του διαγράμματος αυτοσυσχέτισης. Επανάληψη αυτού του νέου πλαισίου μέτρησης σε πολλούς διαφορετικούς τύπους δομικών στοιχείων μπορεί να επιφέρει περαιτέρω βελτίωση.

Λέξεις-Κλειδιά: Θερμορροόμετρο, θερμική διαπερατότητα, χρονοσειρά μέτρησης, διάγραμμα αυτοσυσχέτισης, σφάλμα ορισμού, αμερόληπτη μέτρηση

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THERMAL TRANSMITTANCE INDEX MEASUREMENT METHOD FOR BUILDINGS ELEMENTS USING A HEAT FLOW METER

G. Papadakos[1], C. Konstas[1], A. Papadopoulou[1] and H. Doukas[1]
[1]Decision Support Systems Laboratory, NTUA,
Iroon Polytechneiou 9, 15780, Zografou
e-mail: gpapadakos@teemail.gr

Measuring the thermal transmittance index on a building element using a heat flow meter (HFM), according to the procedure described in International Standard ISO 9869-1: 2014 "Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method "is quite complicated, requiring increased resources in order to implement. Due to a minimum measurement duration of three days, a relatively high meter cost, the limitations for the season in which the measurement should be performed, the cost-effectiveness for the effective implementation of the method is estimated to be too low. A possible shortening of the measurement duration, while maintaining an acceptable level of uncertainty, would make this measurement procedure more attractive and a powerful decision support tool in hands of analysts for buildings' energy upgrade. But is this feasible? In the present study we provide analysis in use of a autocorrelation diagram for properly designed measurements, revealing the possibility for reducing the duration of the measurement. The aim for measurement duration shortening confronts the uncertainty parameters attributed to definitional error of using a heat flow meter and the consequent instability of the results, which the ISO method protocol tries to reduce. In this study, we investigated the possibilities of minimizing this uncertainty by assessing the risk of a definitional error in the case of a short measurement procedure. The experiments carried out led to the drafting of a new, rigorous measuring framework for a short measurement procedure, emphasizing into the characteristics of the required time series, as these are imposed by the result of the autocorrelation diagram. Repeating this new measurement framework in many different types of building elements may provide further optimization.

Key words: Heat flow meter, thermal transmittance, measurement time series, autocorrelation diagram, definitional error, unbiased measurement

---

Γ. Παπαδάκος, Χ. Κώνστας, Α. Παπαδοπούλου και Χ. Δούκας, Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, Σχολή ΗΜΜΥ ΕΜΠ
«Ενισχύοντας την αποδοτικότητα της μεθόδου μέτρησης του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας δομικού στοιχείου με χρήση θερμορροομέτρου»

7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018

1 Εισαγωγή

Η διαρκώς εντεινόμενη προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης για ενεργειακή αναβάθμιση του υφισταμένου κτιριακού δυναμικού έχει αναδείξει την θερμομόνωση του κτιριακού κελύφους ως μια από τις σημαντικότερες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Βασική παράμετρο στη διαστασιολόγηση της θερμομονωτικής αναβάθμισης ενός δομικού στοιχείου αποτελεί η ποσοτική εκτίμηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U, δεδομένου ότι καθορίζει το απαιτούμενο πάχος του θερμομονωτικού υλικού που θα πρέπει να προστεθεί, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τελική τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας. Ουσιαστικά ο προσδιορισμός του υφιστάμενου συντελεστή θερμικής διαπερατότητας επιδρά άμεσα στην οικονομική αποδοτικότητα και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, παράμετροι οι οποίες διαδραματίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στις δράσεις ενεργειακής αναβάθμισης.

Η συνήθης πρακτική είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας που χαρακτηρίζει το κέλυφος μιας υφιστάμενης κατασκευής (κτηρίου) να εκτιμάται μέσω υπολογισμού (ISO 6946: 2017 & ΤΟΤΕΕ 20701: 2010). Η αδυναμία γνώσης για τον πραγματικό τρόπο κατασκευής του δομικού στοιχείου έχει ως αποτέλεσμα η υπολογιζόμενη τιμή του συντελεστή να συνοδεύεται από υψηλά ποσοστά αβεβαιότητας, τα οποία αυξάνουν τον κίνδυνο μη επίτευξης των στόχων εξοικονόμησης ενέργειας από τις επεμβάσεις για θερμομονωτική αναβάθμιση των κτηρίων.

Είναι σαφές ότι μια μέθοδος επιτόπιας μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας με αποδεκτά επίπεδα αβεβαιότητας θα υποστήριζε σημαντικά τη διαδικασία λήψης απόφασης θερμομονωτικής αναβάθμισης ενός κτιρίου. Όπως έχει ήδη υποστηριχθεί σε παλαιότερες εργασίες, η κρισιμότητα της μέτρησης του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας αυξάνεται με την παλαιότητα κατασκευής του κτιρίου (Παπαδάκος & Κώνστας 2016, Tzifa et al 2017).

1.1 Η μεθοδολογία του ISO 9869-1

Η μοναδική τυποποιημένη μεθοδολογία για τη μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός δομικού στοιχείου αφορά τη χρήση Θερμοροομέτρου (βλέπε 0). Σύμφωνα με αυτό το διεθνές πρότυπο, ο συντελεστής θερμοπερατότητας U (W/(m^{2}K)) του δομικού στοιχείου προκύπτει από την εξίσωση:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i}{\sum_{i=1}^{n} (T_i - T_e)} \qquad (1)$$

όπου: $\boldsymbol{q}$ η μετρούμενη με το θερμοροόμετρο πυκνότητα ροής θερμότητας σε W/m^2 , $\boldsymbol{T_i}$, $\boldsymbol{T_e}$ η θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του κτιρίου, αντίστοιχα, σε K και **n** είναι το πλήθος των διαδοχικών μετρήσεων με τη χρήση των αισθητηρίων που διαθέτει η διάταξη του θερμοροομέτρου και οι οποίες καταχωρούνται στη μνήμη της διάταξης.

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη στάσιμων συνθηκών (steady state) και ελάχιστη χρονική διάρκεια μέτρησης τριών ημερών. Πρακτικά η ύπαρξη στάσιμων συνθηκών για ένα τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα είναι δύσκολο να επιτευχθεί, ειδικά σε συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν στην Ελλάδα, οπότε η δυνατότητα διεξαγωγής της

Γ. Παπαδάκος, Χ. Κώνστας, Α. Παπαδοπούλου και Χ. Δούκας, Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, Σχολή ΗΜΜΥ ΕΜΠ

μέτρησης περιορίζεται σε ορισμένα τμήματα του χειμώνα ή του καλοκαιριού. Παράγοντες όπως η διακοπτόμενη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης, η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στο μετρούμενο δομικό στοιχείο και η έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον μέσα στη διάρκεια μιας ημέρας, επιδρούν αποσταθεροποιητικά στη διαδικασία μέτρησης και επηρεάζουν αρνητικά, ποιοτικά και ποσοτικά στο αποτέλεσμα.

Το γεγονός αυτό επεκτείνει την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης, η οποία συχνά μπορεί να απαιτηθεί να είναι μεγαλύτερη των 3 ημερών, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την οικονομική αποδοτικότητα της μεθόδου και συνεπώς την αποτελεσματική εφαρμογή της. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία επιχειρείται η διερεύνηση των δυνατοτήτων συντόμευσης της διαδικασίας μέτρησης.

2 Πειραματική διαδικασία

2.1 Η μέτρηση

Η μέτρηση το πλαίσιο της παρούσας εργασία πραγματοποιήθηκε για ένα κατακόρυφο δομικό στοιχείο του εξωτερικού κελύφους κτηρίου με νότιο προσανατολισμό, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Άνοιξης Αττικής και για το οποίο ήταν γνωστές όλες οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες (Τούντα 2016). Συγκεκριμένα ο εν λόγω τοίχος αποτελείται από διπλή οπτοπλινθοδομή με πλήρωση θερμομονωτικού υλικού στο διάκενο και επιπρόσθετη εξωτερική θερμομόνωση. Παράλληλα με τη διεξαγωγή των μετρήσεων, ο συντελεστής θερμοπερατότητας εκτιμήθηκε και με υπολογισμό, σύμφωνα με Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΟΤΕΕ 20701-2: 2010) ως 0,24 W/m^2K.

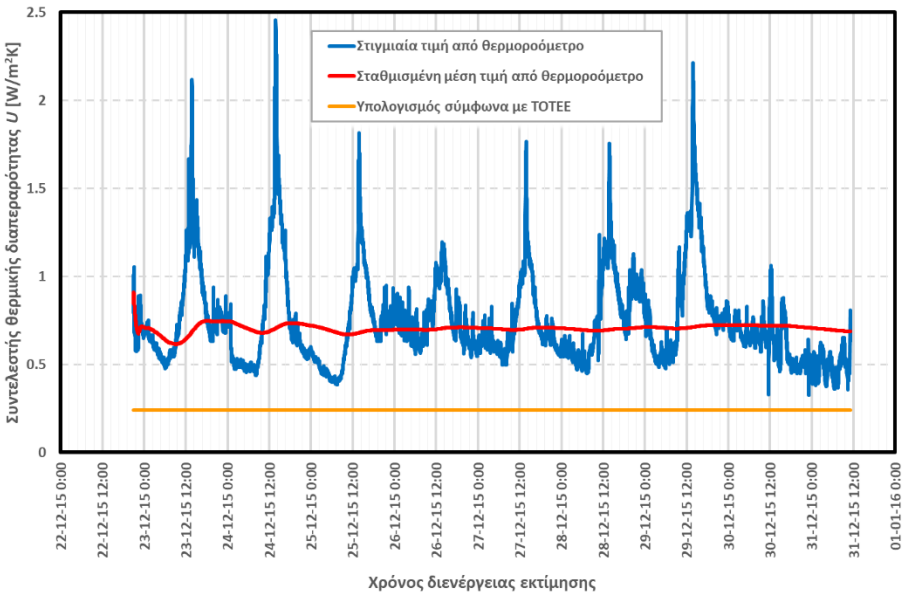
Προκειμένου να διασφαλίσει μια ικανοποιητική διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον και να αποφευχθεί το ενδεχόμενο αντιστροφής της θερμικής ροής, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του μηνός Δεκεμβρίου για διάστημα 8 ημερών. Για τους παραπάνω λόγους η θέρμανση του κτηρίου παρέμενε σε συνεχή λειτουργία για όλο το χρονικό διάστημα της διερεύνησης.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ένα σύστημα της εταιρίας greenTEG, αποτελούμενο από διακριβωμένο θερμορροόμετρο για τη μέτρηση της θερμικής ροής, αισθητήρια θερμοκρασίας τύπου Pt100 για τη μέτρηση των θερμοκρασιών του αέρα περιβάλλοντος και μονάδα καταγραφής δεδομένων. Η συχνότητα των μετρήσεων ορίσθηκε σε μία ανά λεπτό. Ο προσδιορισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας πραγματοποιήθηκε με χρήση κατάλληλου λογισμικού της ιδίας εταιρίας, σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παράγραφο 7.1 του διεθνούς προτύπου ISO 9869-1 (average method).

2.2 Αποτελέσματα και ανάλυση

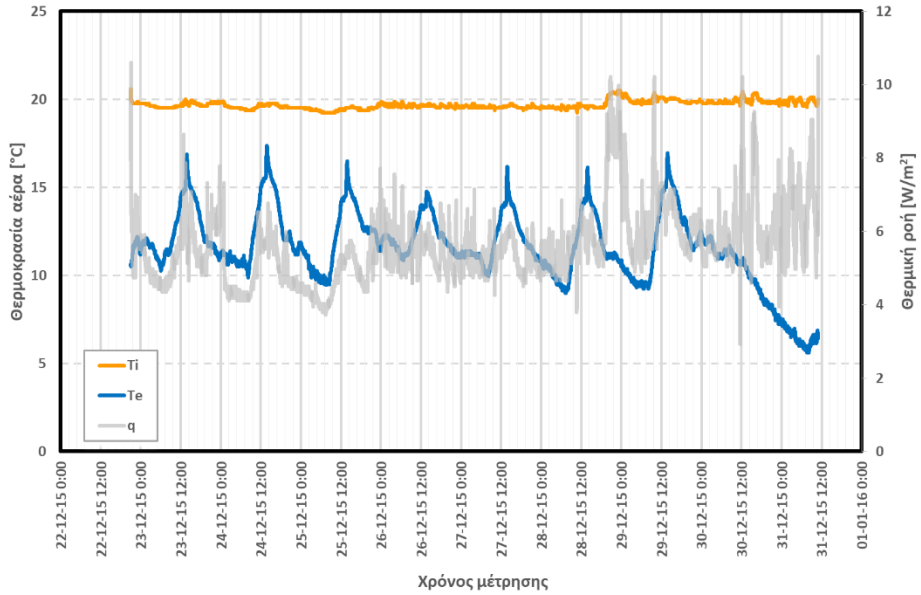
Από την επεξεργασία της χρονοσειράς των μετρήσεων για το διάστημα των 8 ημερών, σύμφωνα με την παράγραφο 7.1 του προτύπου ISO 9869-1, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας εκτιμήθηκε σε 0,68 W/m^2K, τιμή η οποία είναι κατά πολύ υψηλότερη από αυτήν που προέκυψε μετά από εφαρμογή της διαδικασίας υπολογισμού. Προκειμένου να διερευνηθεί η μεταβλητότητα του συντελεστή θερμοπερατότητας κατά το χρονικό διάστημα των μετρήσεων, υπολογίστηκε ο στιγμιαίος συντελεστής θερμοπερατότητας

σύμφωνα με την εξίσωση (1) λαμβάνοντας υπόψη τις στιγμιαίες τιμές των μετρούμενων μεγεθών q, T_i, T_e, (n=1). Διαπιστώθηκε μια έντονη διακύμανση του εν λόγω συντελεστή στη διάρκεια της ημέρας (σχήμα 1) γεγονός το οποίο αποτελεί ένδειξη για την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Ειδικά οι στιγμιαίες τιμές για το U τιμές που αποδίδονται από το μετρητικό σύστημα κατά τις ώρες του μεσημεριού ανέρχονται σε πολύ υψηλά επίπεδα, δείχνοντας την παρουσία σημαντικού σφάλματος ορισμού του μετρούμενου μεγέθους θέτοντας σε κίνδυνο την αμεροληψία του αποτελέσματος της μέτρησης που προκύπτει από το σύνολο της χρονοσειράς.



Σχήμα 1: Συντελεστής θερμοπερατότητας U με διαφορετικές προσεγγίσεις εκτίμησης.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές των μετρήσεων για τα τρία μεγέθη q, T_i, T_e.

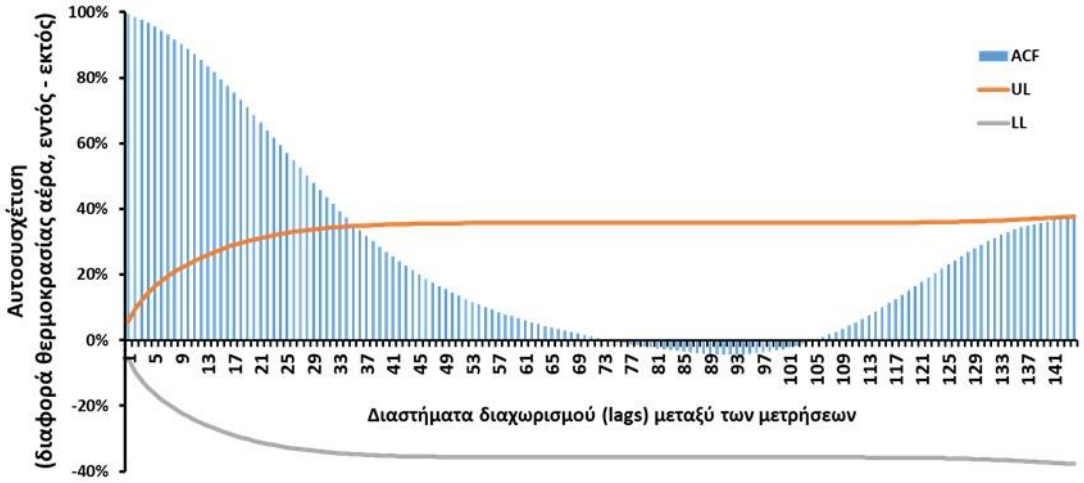


Σχήμα 2: Μετρήσεις θερμικής ροής και θερμοκρασίας.

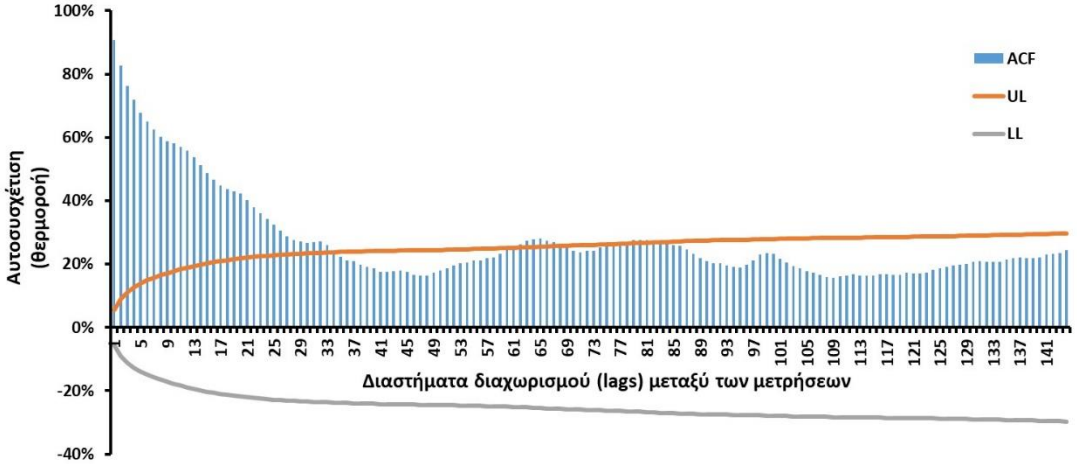
Με τη χρήση του πρόσθετου προγράμματος NumXL για τα υπολογιστικά φύλλα excel δημιουργήθηκε το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης (Wei 2006) με βάση τη χρονοσειρά των μετρήσεων, όπου για λόγους ευκολίας της επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε τμήμα της χρονοσειράς των μετρήσεων, επιλέγοντας σύνολα τιμών για τις q, T_i, T_e που απείχαν δέκα λεπτά μεταξύ τους.

Τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης για τα μεγέθη q, $\Delta T=T_i-T_e$ και $U_{στιγμιαίο}$ φαίνονται στα σχήματα 3 έως 5. Το μήκος του οριζόντιου άξονα αντιστοιχεί σε μέγιστο διάστημα διαχωρισμού μετρήσεων ίσο με τη διάρκεια μιας ημέρας (144 lags * 10min = 1 ημέρα). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το μέγεθος της αυτοσυσχέτισης εκφρασμένο σε κλίμακα επί τοις εκατό.

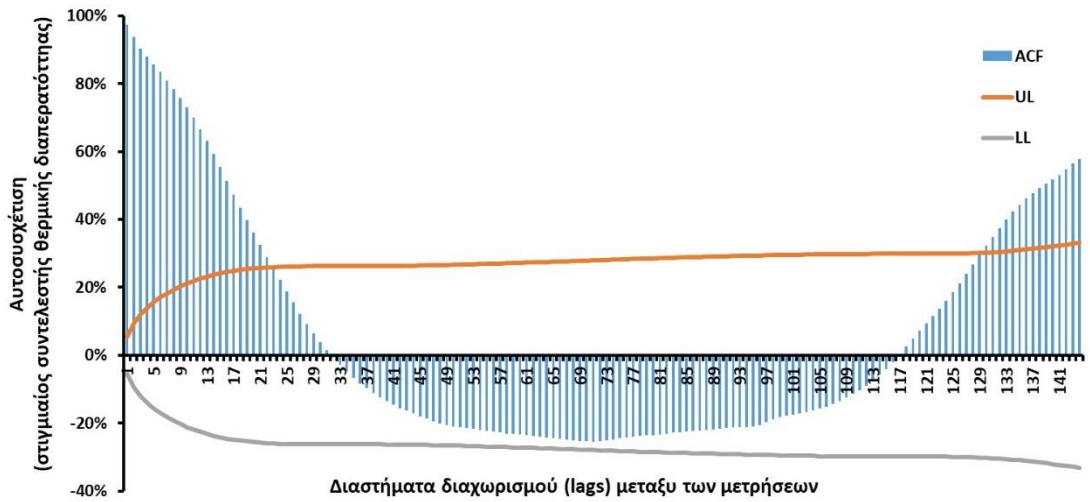
Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύονται ακόμη και αν ληφθεί μικρότερο μέρος των μετρήσεων από τη χρονοσειρά (εξετάστηκε ενδεικτικά η εικόνα των διαγραμμάτων αυτοσυσχέτισης στην περίπτωση χρήσης των μετρήσεων με απόσταση μεταξύ τους 15 λεπτών και τριάντα λεπτών).



Σχήμα 3: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης για τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα, εντός - εκτός.

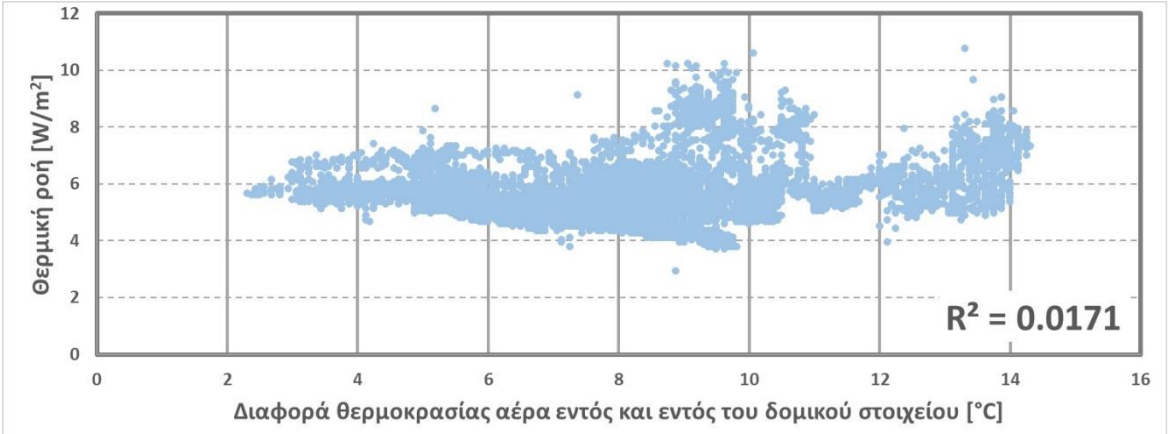


Σχήμα 4: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης για τη θερμοροή.



Σχήμα 5: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης για τη στιγμιαία εκτίμηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας.

Από την εικόνα που δείχνουν τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης φαίνεται ξεκάθαρα η περιοδική συμπεριφορά σε επίπεδο ημέρας, ειδικά για το μέγεθος της διαφοράς θερμοκρασίας του αέρα εντός και εκτός του δομικού στοιχείου όπου έγινε η μέτρηση. Προφανώς, αυτό είναι το κρίσιμο στοιχείο της μέτρησης που καθορίζει την ποιότητα του αποτελέσματος για τον συντελεστή U, ενώ στην πράξη το κρίσιμο μέγεθος στο πλαίσιο της αξιολόγησης του κελύφους του κτηρίου θα έπρεπε να είναι το μέγεθος της θερμοροής. Από το σχήμα 5 φαίνεται πως το μέγεθος της θερμοροής δεν παρουσιάζει περιοδικότητα 24ώρου, κάτι το οποίο είναι αξιοσημείωτο, όπως αναλύεται και πιο κάτω.



Σχήμα 6: Βαθμός συσχέτισης των αποτελεσμάτων ταυτόχρονων μετρήσεων για τη θερμική ροή και τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα εντός και εκτός του δομικού στοιχείου

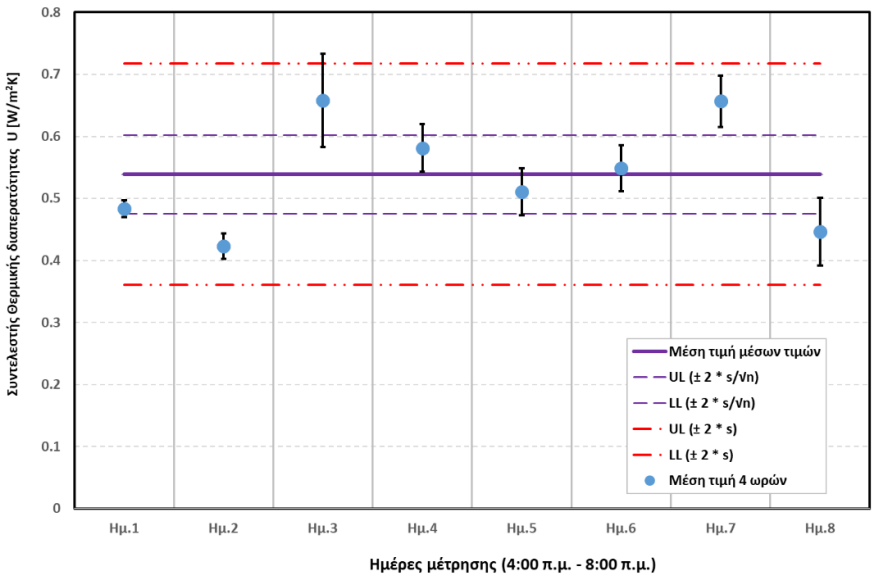
Θεωρητικά, η ιδανική μέτρηση για το κέλυφος ενός κτηρίου θα ήταν αυτή που θα αποτύπωνε αυτό το μέγεθος για κάθε τετραγωνικό εκατοστό του κελύφους, δίνοντας τη δυνατότητα εκτίμησης του συνόλου της θερμικής ροής που συμβαίνει μέσω του κελύφους του κτηρίου, ενώ το μέγεθος της διαφοράς θερμοκρασίας θα έπρεπε να διαδραματίζει το ρόλο συμπληρωματικής παραμέτρου για τη γενίκευση των συμπερασμάτων από αυτή τη (υποθετική) μέτρηση. Δεδομένου ότι αυτού του τύπου η μέτρηση δεν είναι δυνατή,

επιλέγεται η παραμετροποίηση της ποιότητας της αντίστασης του κελύφους στη θερμική ροή μέσω του υπολογισμού του συντελεστή U, ο οποίος όμως φαίνεται πως δεν είναι σταθερός για δεδομένο δομικό στοιχείο, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά από το σχήμα 1. Ακόμη περισσότερο καθώς όπως φαίνεται στο σχήμα 6, το μέγεθος της θερμοροής δεν συσχετίζεται στατιστικά με αυτό της διαφοράς θερμοκρασίας αέρα εντός και εκτός του δομικού στοιχείου.

Επίσης, τα διαγράμματα αυτοσυσχέτισης υποδεικνύουν πως δεν είναι δυνατή η διενέργεια σύντομων μετρήσεων σύμφωνα με τη μέθοδο μέσης τιμής (average method) του Προτύπου ISO 9869-1. Η τιμή της αυτοσυσχέτισης για το μέγεθος του συντελεστή U φαίνεται πως είναι στατιστικά σημαντική για μετρήσεις που απέχουν μεταξύ τους έως και περίπου 4 ώρες (η αυτοσυσχέτιση φαίνεται να είναι εντός των ορίων σημαντικότητας από το επίπεδο των 24 μηκών διαστήματος διαχωρισμού των μετρήσεων).

Με βάση το παραπάνω, διενεργήθηκε νέα εκτίμηση του συντελεστή U με χρήση της μέσης τιμής των μετρήσεων που συλλέχθηκαν σε διαστήματα μήκους τεσσάρων ωρών και συγκεκριμένα στις πρώτες πρωινές ώρες, από 4:00 έως 8:00. Η επιλογή του εν λόγω διαστήματος δεν ήταν τυχαία καθώς παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Κατά τις βραδινές ώρες αναμένεται να είναι ελάχιστη η επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων, μεταξύ των οποίων η κυριότερη είναι αυτή της επίδρασης του μεσημεριανού ηλιασμού της εξωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου.
- Οι βραδινές ώρες προσφέρονται για εφαρμογή περαιτέρω ευνοϊκών συνθηκών μέτρησης, καθώς είναι εύκολο να εφαρμοστούν οι σχετικές οδηγίες από τον ιδιοκτήτη του κτηρίου, δηλαδή να τεθεί σε λειτουργία το σύστημα θέρμανσης (ή ψύξης, ανάλογα με την εποχή της μέτρησης) και να τηρηθούν κλειστά τα κουφώματα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.
- Η συγκεκριμένη περίοδος της ημέρας φαίνεται πως παρουσιάζει μια σχετική στασιμότητα στη χρονοσειρά των τιμών του στιγμιαίου συντελεστή $U_{στιγμιαίο}$.



Σχήμα 7: Εκτιμήσεις του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας με χρήση του θερμοροομετρου κατά το διάστημα 4:00 π.μ. έως 8:00 π.μ.

Η διασπορά του αποτελέσματος για τις μετρήσεις διάρκειας 4 ωρών που παρουσιάζονται στο σχήμα 6 προκύπτουν από την τυπική απόκλιση των αντίστοιχων μετρήσεων διάρκειας ενός λεπτού. Σημειώνεται πως σε αυτή την περίπτωση η χρήση του γνωστού τύπου $s/\sqrt{n}$ (JCGM 100: 2008), όπου s η τυπική απόκλιση και n το πλήθος των μετρήσεων (n=4*60=240 σε αυτή την περίπτωση) θα ήταν λάθος, καθώς δεν θα συνυπολογιζόταν το πολύ σημαντικό στοιχείο της αυτοσυσχέτισης των 240 μετρήσεων μεταξύ τους.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και η μέση τιμή των μέσων τιμών των διαστημάτων 4 ωρών. Φαίνεται πως αυτή η τιμή είναι αντιπροσωπευτική των επιμέρους μετρήσεων των διαστημάτων 4:00 έως 8:00. Όμως, ο υπολογισμός με τον γνωστό τύπο $s/\sqrt{n}$ φαίνεται να μην είναι αντιπροσωπευτικός της διασποράς του πραγματικού αποτελέσματος. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε παράγοντες όπως η χρονική διακύμανση του ίδιου του συντελεστή U λόγω της επίδρασης της σχετικής υγρασίας (Kontoleon & Giarma 2016) ή ακόμη και σε εγγενείς τυχαίους παράγοντες που απαιτείται η διερεύνηση μεγάλου πλήθους παραμέτρων ώστε να εξηγηθούν.

Φαίνεται πως σε περίπτωση μελλοντικής εφαρμογής της προτεινόμενης διαδικασίας, η αβεβαιότητα του αποτελέσματος για μια μέτρηση που θα διαρκέσει 4 ώρες, από τις 4:00 έως τις 8:00 θα συνοδεύεται από μια τυπική αβεβαιότητα της τάξης του 17%. Ενώ η τιμή αυτή είναι σχετικά μεγάλη, δεν πρέπει να αγνοείται πως είναι πολύ πιθανό να οφείλεται σε εγγενείς παράγοντες. Σε περίπτωση που επαληθευτεί ο εγγενής χαρακτήρας αυτού του επιπέδου αβεβαιότητας, θα πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη ότι θα ισχύει σε κάθε περίπτωση και όταν η τιμή του συντελεστή U θα προκύπτει μέσω υπολογισμού, πλέον των άλλων παραγόντων αβεβαιότητας.

3 Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα σημεία της μελέτης παρουσιάζονται ως ακολούθως:

- Η μέτρηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U κατακόρυφου δομικού στοιχείου στο κέλυφος κτηρίου με χρήση θερμοροομέτρου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα περίπου 4 ωρών, κατά προτίμηση στις πρώτες πρωινές ώρες. Το αποτέλεσμα δεν απαιτείται να προκύπτει από τον τύπο της σταθμισμένης μέσης τιμής, όπως αυτός διατυπώνεται στο Διεθνές Πρότυπο ISO 9869-1. Αρκεί η εκτίμηση της μέσης τιμής των μετρήσεων και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης ως μέτρου διασποράς του αποτελέσματος.
- Είναι πιθανό το αποτέλεσμα της μέτρησης διάρκειας 4 ωρών κατά τις πρώτες πρωινές ώρες να είναι πλέον αμερόληπτο σε σχέση με το αποτέλεσμα της σταθμισμένης μέσης τιμής από τη χρονοσειρά των, κατ' ελάχιστο, 72 ωρών που προτείνει το Διεθνές Πρότυπο 9869-1, στην οποία συνεισφέρουν και οι μετρήσεις της περιόδου γύρω από το μεσημέρι. Αυτό θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω με μεγάλο πλήθος σχετικών μετρήσεων.
- Για την επιτυχή ολοκλήρωση της μέτρησης απαιτείται αυστηρή τήρηση κανόνων για σχετικό πρωτόκολλο, όπως ότι κατά τη διάρκεια της μέτρησης και για αρκετές ώρες πριν από αυτή, στο κτήριο θα πρέπει να λειτουργεί σύστημα θέρμανσης ή ψύξης (ανάλογα με την εποχή του χρόνου) και όλα τα ανοίγματα του κελύφους να

διατηρούνται κλειστά, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ροή θερμότητας μέσω του δομικού στοιχείου σύμφωνα με τον ορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U.

- Στην περίπτωση εκτίμησης με βάση μία πρωινή μέτρηση 4 ωρών, το επίπεδο της τυπικής αβεβαιότητας για το αποτέλεσμα εκτιμάται σε περίπου 17%, όμως απαιτούνται πολλαπλά πειράματα για επαληθευτεί η γενικότητα αυτής της εκτίμησης. Όμως, η επανάληψη αυτής της ίδιας διαδικασίας, για πολλαπλές πρωινές μετρήσεις 4 ωρών πάνω στο ίδιο δομικό στοιχείο μπορεί να οδηγήσει σε περεταίρω μείωση αυτών των επιπέδων αβεβαιότητας.

Η επανάληψη αυτού του νέου πλαισίου μέτρησης σε πολλούς διαφορετικούς τύπους δομικών στοιχείων μπορεί να επιφέρει περαιτέρω βελτίωση τόσο στο κατευθυντήριο πλαίσιο της μέτρησης όσο και σε περισσότερο ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με το ανεκτό επίπεδο αβεβαιότητας.

4 Βιβλιογραφία

Παπαδάκος Γ.Ν. και Κώνστας Χ.Σ.: *«Αβεβαιότητα της μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας κτηρίου με χρήση θερμοκάμερας»*, 6ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 13-14 Μαΐου 2016, Αθήνα.

ΤΟΤΕΕ 20701-2: 2010 *«Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων»*.

Τούντα Τ., *«Υποστήριξη της λήψης αποφάσεων για επεμβάσεις στο κέλυφος κτηρίου σύμφωνα με τυποποιημένες διαδικασίες μετρήσεων»*, Μεταπτυχιακή εργασία, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας», Επιβλέπων Χ. Δούκας, Επίκουρος Καθ. ΕΜΠ, Ιούλιος 2016.

ISO 6946: 2017, *"Building components and building elements -- Thermal resistance and thermal transmittance -- Calculation methods"*.

ISO 9869-1: 2014, *"Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method"*.

JCGM 100: 2008, "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections)", Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 2008.

Kontoleon K.J., Giarma C., *"Dynamic thermal response of building material layers in aspect of their moisture content"*, Applied Energy, 170, 76–91, 2016.

Tzifa V., Papadakos G., Papadopoulou A., Marinakis V., Psarras J., *"Uncertainty and method limitations in a short-time measurement of the effective thermal transmittance on a building envelope using an infrared camera"*, Journal of Sustainable Energy, 36 (1), pp 28-46, 2017 (Published online: 21 Nov 2014).

Wei, William W.S., Time-series analysis: Univariate and Multivariate methods, 2nd edition, Pearson Education Inc, ISBN 0321322169, 2006.