ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΤΗΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑΣ

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

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων ενός κτηρίου (U) αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για τον προσδιορισμό των θερμικών απωλειών του και κατά συνέπεια για τον προσδιορισμό της ενεργειακής του επίδοσης. Δεδομένου ότι ο εργαστηριακός προσδιορισμός του εν λόγω συντελεστή είναι πρακτικά αδύνατος για τα μη τυποποιημένα δομικά στοιχεία, η συνήθης πρακτική θέλει να υπολογίζεται θεωρητικά από τους συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των επιμέρους στρώσεων δομικών υλικών.
Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια μέθοδος μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας η οποία βασίζεται στην χρήση θερμοκάμερας. Στο πρώτο σκέλος της εργασίας αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης μεθόδου, καθώς και οι συνήθεις πρακτικές εφαρμογής της. Στο δεύτερο σκέλος παρουσιάζεται πειραματική διερεύνηση η οποία έχει ως αντικείμενο τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδικασίας μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός κατακόρυφου δομικού στοιχείου υφιστάμενου κτηρίου αποκλειστικά με την χρήση θερμοκάμερας. Η εργασία καταλήγει στη συστηματική ανάλυση των πηγών αβεβαιότητας που χαρακτηρίζουν αυτή τη μέθοδο μέτρησης, με σκοπό την αξιολόγηση όλων εκείνων των παραγόντων που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.
Απώτερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξέλιξη μιας πρακτικά εφαρμόσιμης μεθόδου μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας η οποία θα συνεισφέρει στην βελτιστοποίηση των τεχνοοικονομικών μελετών κατά την αναβάθμιση της ενεργειακής επίδοσης υφιστάμενων κτηρίων.

Λέξεις-Κλειδιά: ενεργειακή επίδοση, συντελεστής θερμοπερατότητας δομικού στοιχείου, θερμοκάμερα, αβεβαιότητα.

UNCERTAINTY IN THE MEASUREMENT OF BUILDING THERMAL TRANSMITTANCE INDEX USING A THERMAL CAMERA

G. N. Papadakos[1] and C.S. Constas
[1]Decision Support Systems Laboratory, NTUA,
Iroon Polytechneiou 9, 15780, Zografou
e-mail: gpapadakos@teemail.gr

A building elements' thermal transmittance index (known as U value) is the most essential parameter used for the estimation of its thermal losses, and subsequently of its energy performance. By the fact that a laboratory measurement on that index is practically impossible for non-standardized – non industrialized – building elements, the commonly acceptable practice uses theoretical estimations based on the calculation taking into account the thermal transmittance indexes of the particular layers of materials by which the building element is composed.
This study presents a method for measuring thermal transmittance on a practically flat building element which uses the technology of a thermal camera. In the first part of this study, the theoretical background of this method is analyzed, along with the usual practices for its application. The second part presents an experimental investigation aiming at the definition of the optimal measurement procedure for measuring the thermal transmittance index of a vertical building element on an existing building using a thermal camera as the only measuring equipment. This study concludes with the analysis on thw sources of uncertainty which characterizes this measuring method, towards the assessment of all those factors that influence significantly the final result.
Farther aim of this study is the evolution of a practically applicable thermal transmittance measurement method which will contribute to the optimization of techno economic studies as part of the upgrade procedure for existing buildings.

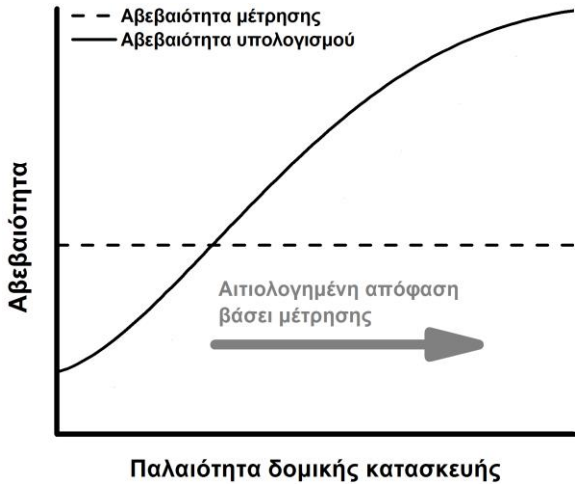
Key words: energy performance, building element thermal transmittance index, thermal camera, uncertainty.

1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η αξιολόγηση της δυνατότητας λήψης αποφάσεων σχετικά με επεμβάσεις για την αναβάθμιση κτηρίου, και ειδικότερα της θερμομονωτικής ικανότητας κελύφους υφιστάμενου κτηρίου που να βασίζονται σε μετρήσεις κατάλληλης αξιοπιστίας και οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στο πλαίσιο του σχεδιασμού και λειτουργίας έξυπνων συστημάτων ελέγχου των καταναλώσεων ενέργειας (Doukas et al, 2007, Doukas et al, 2009).

Η απόφαση σχετικά με τον βαθμό αιτιολόγησης της θερμομονωτικής αναβάθμισης του κελύφους υφιστάμενου κτηρίου, συνήθως, βασίζεται σε υπολογισμούς (ISO 6946) των οποίων η αβεβαιότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από (α) τα επίπεδα γήρανσης των δομικών υλικών και την πιθανή έλλειψη πληροφορίας σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, για προφανείς λόγους, (β) τον βαθμό της προσρόφησης υγρασίας από αυτά τα υλικά (Budaiwi & Abdou, 2013) και (γ) άλλους παράγοντες (Bjork & Enochsson, 2009), οι οποίοι όλοι αναμένεται να συνδέονται με το μέτρο της παλαιότητας της κατασκευής (βλέπε Σχήμα 1). Η αβεβαιότητα αυτή αναμένεται να είναι ελάχιστη, πλην όμως σημαντική (ISO 13790), για χρονικά σημεία που δεν απέχουν σημαντικά από το χρονικό σημείο της ολοκλήρωσης της κατασκευής, κάτι το οποίο αναμένεται να μεταβάλλεται προς το δυσμενέστερο με το πέρασμα του χρόνου.

Αντίστοιχα, οποιαδήποτε διαδικασία επί τόπου μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας αναμένεται να συνοδεύεται από αβεβαιότητα, η οποία για χρονικά σημεία αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής είναι πλέον πιθανό να είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτής που συνοδεύει έναν αντίστοιχο υπολογισμό. Η αβεβαιότητα αυτή, όμως, αναμένεται να μην μεταβάλλεται σημαντικά σε σχέση με την παλαιότητα της κατασκευής, παρά κυρίως σύμφωνα με τις συνθήκες της μέτρησης και τα χρησιμοποιούμενα συστήματα μέτρησης. Εάν, λοιπόν, η διαδικασία επί τόπου μέτρησης διενεργείται με τυποποιημένο τρόπο, διασφαλίζοντας σχετικά αποδεκτά επίπεδα αβεβαιότητας του αποτελέσματος, είναι δυνατό αυτού του τύπου η εκτίμηση του συντελεστή θερμοπερατότητας να υπερέχει σημαντικά σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που αποδίδονται από αντίστοιχους υπολογισμούς.



Σχήμα 1: Θεωρητική συσχέτιση της αβεβαιότητας των διαδικασιών μέτρησης ή υπολογισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας με την παλαιότητα της δομικής κατασκευής.

1.1 Οι διαθέσιμες εναλλακτικές μέθοδοι μέτρησης

Η μόνη τυποποιημένη διαδικασία μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας σε δομικό στοιχείο του κελύφους κτηρίου είναι αυτή με τη χρήση διάταξης θερμο-ροομέτρου (ISO 9869-1), σύμφωνα με τον τύπο:

$$U=Q/\Delta T \quad (1)$$

όπου Q είναι ο ρυθμός ροής της θερμότητας μέσω του τμήματος του κελύφους του κτηρίου και ΔT είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα σε σημεία κοντά στην εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου στο σημείο της μέτρησης. Το μέγεθος του αριθμητή μετριέται απευθείας με τη χρήση του θερμο-ροομέτρου, ενώ η διαφορά θερμοκρασίας του παρονομαστή μετριέται με τη χρήση κατάλληλα τοποθετημένων θερμομέτρων επαφής.

Προσεγγίζοντας το μέγεθος του αριθμητή της σχέσης (1) με έναν εναλλακτικό τύπο (Tzifa et al, 2014, Albatici & Tonelli, 2010):

$$U=[\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{IN}^4-T_W^4)+\alpha_c\cdot(T_{IN}-T_W)]/(T_{IN}-T_{OUT}) \quad (2)$$

όπου T_{IN} και T_{OUT} είναι η θερμοκρασία του αέρα σε κοντινή απόσταση από την εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια του μετρούμενου δομικού στοιχείου, T_W είναι η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειάς του και ε, σ, αc, είναι σταθερές γνωστές από τη βιβλιογραφία, που εκτιμά την ποσότητα της θερμικής ροής μέσω του κατακόρυφου δομικού στοιχείου ως αθροίσματος (α) του μέρους αυτής που μεταφέρεται μέσω συναγωγής και (β) του μέρους που μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας μέσω της εσωτερικής επιφάνεια του κελύφους του κτηρίου, είναι δυνατή η διεξαγωγή της ίδιας μέτρησης με τη χρήση μόνο διατάξεων μέτρησης θερμοκρασίας.

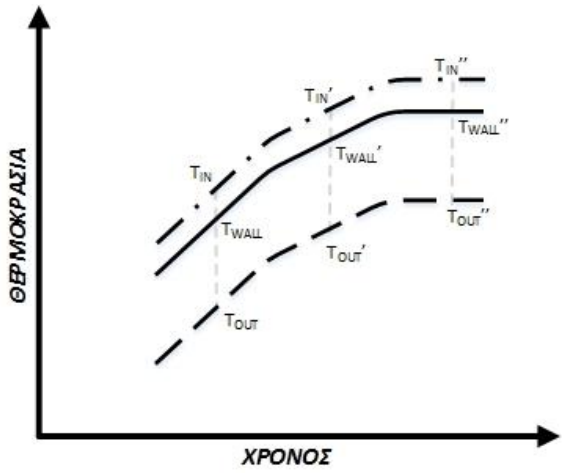
Στην πιο απλή της μορφή, αυτή η εναλλακτική διαδικασία κάνει χρήση κατάλληλα τοποθετημένων θερμομέτρων επαφής.

Σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης κατασκευαστών συσκευών θερμικής απεικόνισης (FLIR, 2007), η μέτρηση της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους του κτηρίου μπορεί να διενεργηθεί με τη χρήση τέτοιων συσκευών, εξ αποστάσεως. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας για την εξέλιξη μεθόδου η οποίο δεν έχει ακόμη τυποποιηθεί (Haralambopoulos & Paparsenos, 1998, Albatici & Tonelli, 2010, Fokaides & Kalogirou, 2011, Tzifa et al, 2014).

Α βασική αρχή ώστε η εν λόγω μέτρηση να είναι αντιπροσωπευτική του μετρούμενου μεγέθους είναι η αναλογία των τιμών των θερμοκρασιών στη σχέση (2) να είναι διαρκώς ανάλογη της πραγματικής τιμής του συντελεστή θερμοπερατότητας, έστω και αν κατά τη διάρκεια της μέτρησης η θερμική κατάσταση του μετρούμενου δομικού στοιχείου υπόκειται σε σχετικά ήπιες μεταβολές (βλέπε Σχήμα 2).

Παλαιότερα πειράματα (Tzifa et al, 2014) έδειξαν ότι η μέθοδος με τη χρήση θερμοκάμερας μπορεί να εκτελεσθεί με επίπεδα αβεβαιότητας κοντά στο 20% (συντελεστής κάλυψης k=2). Στα συμπεράσματα της εν λόγω εργασίας αναφέρεται ότι από τις σημαντικότερες πηγές αβεβαιότητας στη μέθοδο με τη χρήση θερμοκάμερας, όπως αυτή συνηθίζεται, είναι η χρήση διαφορετικών μετρητικών διατάξεων για την εκτίμηση της διαφοράς θερμοκρασίας που φαίνεται στον αριθμητή της σχέσης (2).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διενεργήθηκε πείραμα σύμφωνα με το οποίο αξιολογήθηκε η δυνατότητα βελτίωσης της επίδοσης αυτής της μέτρησης, μέσω της εφαρμογής διαδικασίας μέτρησης, ταυτόχρονα, της θερμοκρασίας του αέρα αλλά και της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου, με τη χρήση θερμοκάμερας και παθητικής βοηθητικής διάταξης – στόχου, η οποία βασίζεται σε σχετικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα που είχαν διατυπωθεί από τους Albatici & Tonelli (2010).



Σχήμα 2: Θεωρητικό διάγραμμα πιθανής κύμανσης των θερμοκρασιών που συνεισφέρουν στη μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας.

2 Διαδικασία μετρήσεων και αποτελέσματα

2.1 Η διάταξη της μέτρησης

Το πείραμα διενεργήθηκε στο κέλυφος υφιστάμενου κτηρίου για το οποίο ο συντελεστής θερμοπερατότητας, ακόμη και ως ονομαστική τιμή, είναι άγνωστος. χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμοκάμερες (FLIR, τύπου InfraCAM και τύπου b40). Για τον έλεγχο – σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε πλήθος θερμομέτρων επαφής (θερμοστοιχεία τύπου K) τοποθετημένα (α) σε απόσταση περίπου 1cm από το μετρούμενο δομικό στοιχείο (2 θερμοστοιχεία), (β) σε μικρή απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια του ίδιου δομικού στοιχείου (2 θερμοστοιχεία) και (γ) εντός της παθητικής βοηθητικής διάταξης - στόχου (3 θερμοστοιχεία).

Η παθητική βοηθητική διάταξη συνδυάζει τη χρήση κοίλου στόχου με τη χρήση υφάσματος – στόχου μαύρου χρώματος (εναλλακτικές προτάσεις από τους Albatici & Tonelli, 2010 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα με λήψη θερμικής εικόνας). Για λόγους επαλήθευσης της συμπεριφοράς του, στον πυθμένα της βοηθητικής διάταξης τοποθετήθηκαν τρία θερμοστοιχεία τύπου K. Η τελική θέση χρήσης της βοηθητικής διάταξης ήταν τέτοια ώστε η πλευρά της μέτρησης να είναι σε απόσταση 1m από την επιφάνεια του τοίχου.

Αντίστοιχα, για τη διενέργεια των μετρήσεων της θερμοκρασίας του αέρα εξωτερικά του κελύφους του κτηρίου, τα δύο θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν πολύ κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου, αντίστοιχα της εσωτερικής όπου διενεργήθηκαν μετρήσεις με τη χρήση θερμοκάμερας. Επιχειρήθηκε η προστασία των θερμοστοιχείων από τις μεταβολές στις ροές του αέρα και τη συμβολή από την ηλιακή ακτινοβολία με τη χρήση πρόχειρης προστασίας.

Η εν λόγω προστασία αποτελεί σημαντικό στοιχείο βελτιστοποίησης της διαδικασίας. Οι συνθήκες διεξαγωγής του παρόντος πειράματος ήταν δυσμενείς ως προς αυτό το στοιχείο: (α) Η κατάσταση ηλιοφάνειας εναλλασσόταν μεταξύ μέτριας συννεφιάς και πλήρους ηλιοφάνειας, ο προσανατολισμός του τοίχου όπου έγιναν οι μετρήσεις ήταν νότιος και οι ώρες των μετρήσεων περί των μεσημβρινών και (γ) έπνεαν ρεύματα αέρα μέτριας, αλλά συνεχώς μεταβαλλόμενης ταχύτητας.

2.2 Η ακολουθούμενη διαδικασία

Για να είναι ολοκληρωμένη η διαδικασία του πειράματος και πιο αντιπροσωπευτικά τα συμπεράσματα σε σχέση με την τροποποίηση στη συνήθως ακολουθούμενη διαδικασία, το πείραμα δεν διενεργήθηκε μόνο υπό στάσιμες εσωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας αέρα. Το πείραμα περιλάμβανε τρεις χρονικές περιόδους, κατά τις οποίες η διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε:

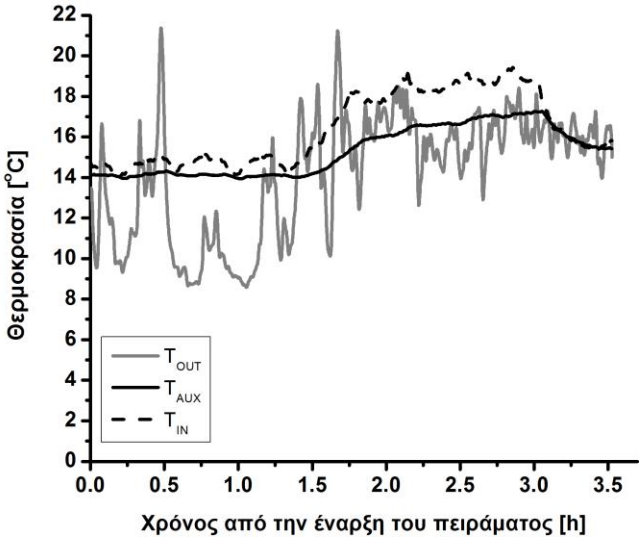
(1) χωρίς να προκληθεί καμία μεταβολή στη θερμοκρασιακή κατάσταση του εσωτερικού χώρου του κτηρίου (διάρκεια 1.5h),

(2) με πρόκληση αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα (χρήση πηγής θερμότητας – αερόθερμου σε σημείο μακριά από το σημείο μέτρησης ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από θερμά ρεύματα αέρα, διάρκεια 1.5h) και

(3) κατά τη διάρκεια ελεύθερης ψύξης του αέρα του εσωτερικού χώρου (διάρκεια 0.5h).

2.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διενεργήθηκαν μόνο με τη χρήση των θερμοστοιχείων φαίνονται στο Σχήμα 3, όπου T_{AUX} είναι η τιμή της μέτρησης στη βοηθητική διάταξη:



Σχήμα 3: Αποτελέσματα μετρήσεων με τη χρήση των θερμοστοιχείων.

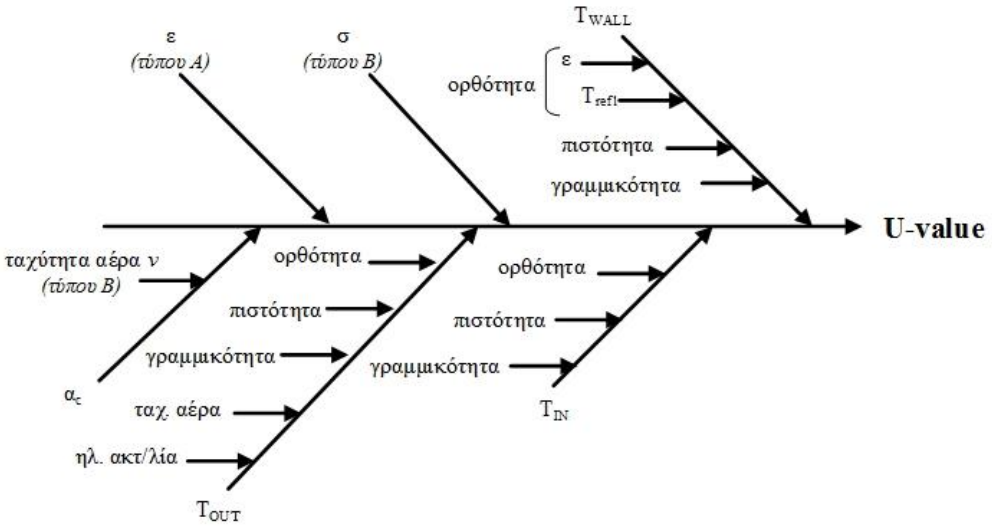
Στο εν λόγω σχήμα φαίνεται ευκρινώς η έναρξη της διαδικασίας θέρμανσης του αέρα του χώρου, κατά την οποία η αναλογία των τιμών των θερμοκρασιών διαταράχθηκε, παρ' ότι

κατά την πρώτη φάση του πειράματος διατηρούνταν στατιστικά σταθερή, με την σημείωση πως οι μετρήσεις της θερμοκρασίας στον αέρα εξωτερικά του κελύφους του κτηρίου παρουσίασαν μια αξιοσημείωτη ευ μεταβλητότητα. Αυτό συνέβη παρότι τα χρησιμοποιούμενα θερμοστοιχεία είχαν μια υποτυπώδη προστασία.

3 Ανάλυση αβεβαιότητας

3.1 Το πλήρες διάγραμμα αιτίου αποτελέσματος

Ανάλυση του συνόλου των πηγών αβεβαιότητας για τη μέτρηση που περιγράφεται στη σχέση (2) δίνεται στο Σχήμα 4:



Σχήμα 4: Το πλήρες διάγραμμα για την ανάλυση της αβεβαιότητας κατά τη διαδικασία μέτρησης συντελεστή θερμοπερατότητας τοίχου με χρήση θερμοκάμερας

3.2 Σημεία βελτίωσης της διαδικασίας και σχολιασμός

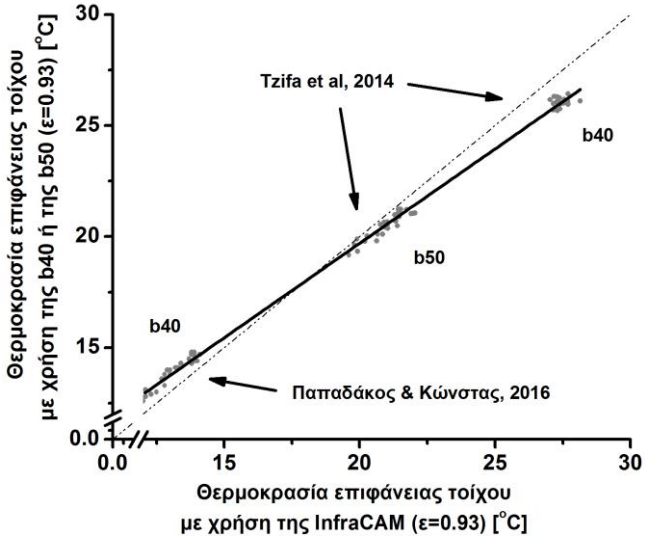
Ακολουθεί ανάλυση σχετικά με τις δυνατότητες απλοποίησης της διαδικασίας της μέτρησης, αλλά και της διαδικασίας εκτίμησης της αβεβαιότητάς της, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος της παρούσας εργασίας.

3.2.1 Συστηματικές αποκλίσεις μετρήσεων με θερμοκάμερα

Όπως έχει διαπιστωθεί και σε παλαιότερη εργασία (Tzifa et al), πολύ σημαντική παράμετρος για την αξιοπιστία της μεθόδου είναι η ορθότητα των μετρήσεων της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου με τη χρήση της θερμοκάμερας. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται επικαιροποίηση των εν λόγω ευρημάτων σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Προσαρμόζοντας καμπύλη αναδρομής σε αυτά τα αποτελέσματα προκύπτει συστηματική απόκλιση των καμπυλών βαθμονόμησης. Πιθανά αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τύπου b40 και b50 θερμοκάμερες διαθέτουν βαθμονόμηση στο εύρος από 0 έως 100°C, ενώ η τύπου InfraCAM στο εύρος από -20 έως 350°C.

Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, όλες οι μετρήσεις με τη χρήση της θερμοκάμερας τύπου InfraCAM έχουν υποστεί διόρθωση σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ευθείας

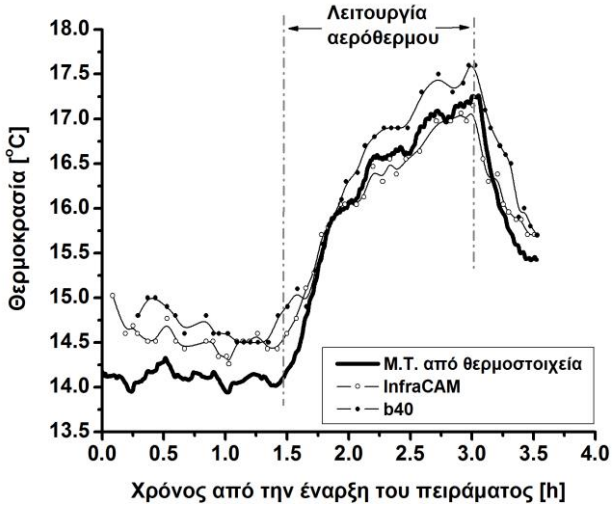
αναδρομής του Σχήματος 8, στο οποίο από 98 ζεύγη τιμών προέκυψε ευθεία με σταθερό όρο ίσο με 2.7±0.1°C και παράμετρο κλίσης (αδιάστατη) ίση με 0.850±0.008. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (Pearson r) για τη χρησιμοποιούμενη ευθεία, ως συντελεστή διόρθωσης, είναι 0.999.



Σχήμα 5: Συστηματικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα μετρήσεων με διαφορετικές θερμοκάμερες, στην παρούσα εργασία και σε παλαιότερη (Tzifa et al, 2014)

3.2.2 Βαθμονόμηση βοηθητικής διάταξης για μέτρηση θερμοκρασίας αέρα

Σημαντικός παράγοντας για τη χρήση της βοηθητικής διάταξης είναι η εκτίμηση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής ρύθμισης της παραμέτρου του συντελεστή εκπομπής *ε* στη διάταξη της θερμοκάμερας, έτσι ώστε η μέτρηση που θα λαμβάνεται στις κοίλες επιφάνειες της βοηθητικής διάταξης να είναι αντιπροσωπευτικές της θερμοκρασίας του αέρα.



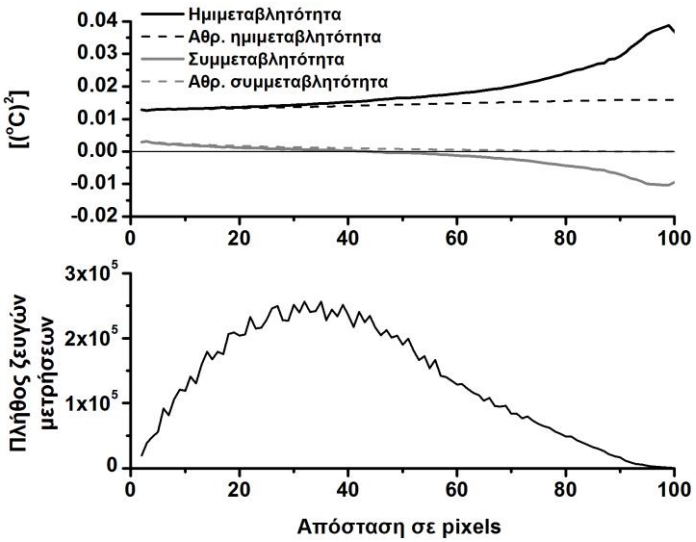
Σχήμα 6: Σύγκριση μετρήσεων θερμοκρασίας στο εσωτερικό της βοηθητικής διάταξης

Στο Σχήμα 6 συγκρίνεται το αποτέλεσμα αυτών των μετρήσεων στο πλαίσιο του πειράματος της παρούσας εργασίας (όπου οι τιμές λήφθηκαν με ρύθμιση της *ε* στην τιμή 1), με τις αντίστοιχες που λήφθηκαν με τη χρήση των θερμοστοιχείων που ήταν τοποθετημένα στον πυθμένα της βοηθητικής διάταξης. Όπως φαίνεται, η σύμπτωση των τιμών κατά αυτή τη διαδικασία επαλήθευση είναι αξιοσημείωτη, ειδικά κατά την περίοδο μεταβατικών συνθηκών. Σε κάθε περίπτωση, οι αναφερόμενες σε αυτή την παράγραφο ρυθμίσεις μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω βελτιστοποίησης της μεθόδου.

3.2.3 Αβεβαιότητα μέτρησης επιφανειακής θερμοκρασίας με χρήση θερμοκάμερας

Λαμβάνοντας θερμικές εικόνες για την εκτίμηση θερμοκρασίας (είτε στην επιφάνεια του τοίχου, ή στην ανακλαστική επιφάνεια, ή στον πυθμένα της βοηθητικής διάταξης), είναι δυνατό να ληφθεί η μέση τιμή πολλών (άνω των 10) αντίστοιχων μετρήσεων, διατεταγμένων σε κάναβο αντίστοιχων pixels.

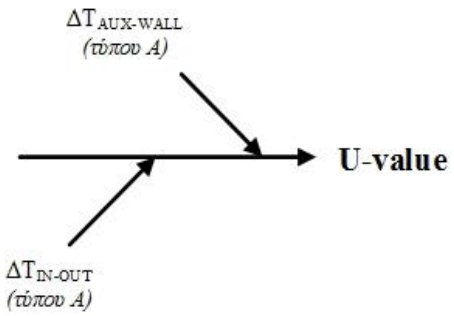
Στο Σχήμα 7 δίνεται το ημιβαριόγραμμα από μία από τις μετρήσεις με τη χρήση της θερμοκάμερας τύπου InfraCAM πάνω στην επιφάνεια του τοίχου. Προκύπτει πως λόγω της χωρικής διακύμανσης του ίδιου του μετρούμενου μεγέθους, μία αβεβαιότητα της τάξης του 0.1°C δεν μπορεί να ξεπερασθεί προς τα κάτω για μία μέτρηση θερμοκρασίας της τάξης των 14°C. Αυτό συμφωνεί με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρει ο κατασκευαστής της διάταξης και αυτό ίσως να οφείλεται κυρίως στον στατιστικό θόρυβο λόγω των ηλεκτρονικών συστημάτων της θερμοκάμερας. Σε κάθε περίπτωση, αντίστοιχη εκτίμηση μπορεί να γίνεται στην περίπτωση κάθε μέτρησης.



Σχήμα 7: Ημιβαριόγραμμα μετρήσεων θερμοκρασίας επιφάνειας ανά pixel θερμικής εικόνας

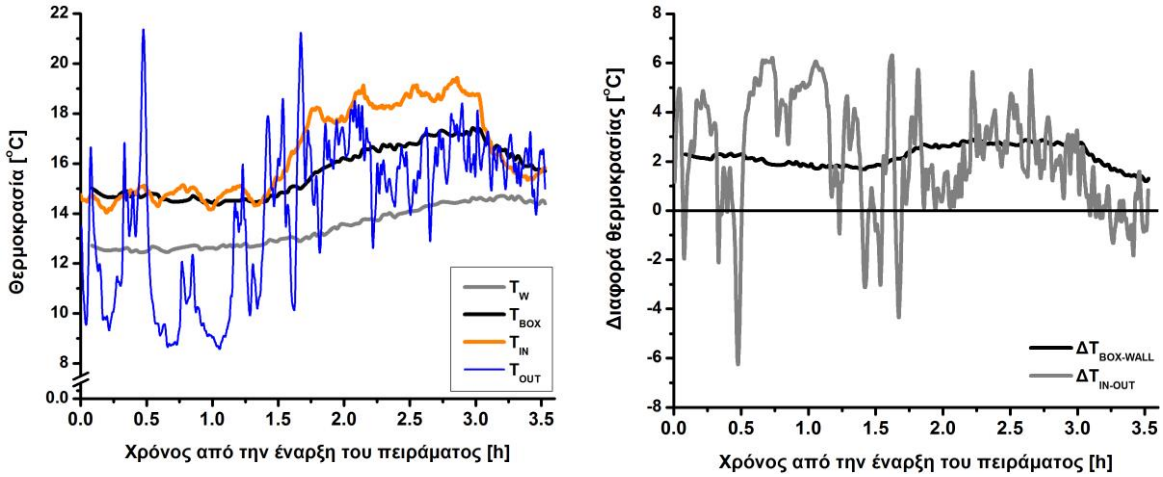
3.3 Απλοποιημένο διάγραμμα αιτίου αποτελέσματος

Κατόπιν της ανάλυσης των πιο πάνω σημείων βελτίωσης, το διάγραμμα αιτίου αποτελέσματος για την ανάλυση των πηγών αβεβαιότητας που τελικά κρίνονται σημαντικές και πρέπει να εισαχθούν στους τελικούς υπολογισμούς φαίνεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Τελικό, απλοποιημένο διάγραμμα ανάλυσης της αβεβαιότητας

Σύμφωνα με αυτή την απλοποιημένη μορφή, τα μεγέθη που έχουν τη μεγαλύτερη σημασία για την εξαγωγή του αποτελέσματος είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον και της επιφάνειας του τοίχου, μετρημένης με μία μόνο θερμογραφική απεικόνιση, όπως αναλύεται πιο πάνω, και η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον, μετρημένης έστω με θερμόμετρα επαφής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, ανεξάρτητα από το αν η μέθοδος με τα θερμόμετρα επαφής ή η μέθοδος με τη χρήση θερμοκάμερας παρουσιάζει τη βέλτιστη ορθότητα, φαίνεται πως η δεύτερη παρουσιάζει τις μικρότερες διακυμάνσεις σε σχέση με το χρόνο, πιθανά λόγω μικρότερης ευαισθησίας σε σχέση με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.



Σχήμα 9: Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το τελικό απλοποιημένο σχήμα

4 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η μεθοδολογία μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας με τη χρήση θερμοκάμερας είναι απλή, σύντομη σε χρονική διάρκεια και δεν απαιτεί ογκώδη εξοπλισμό. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της, εκφρασμένη με κριτήριο την αντίστοιχη αβεβαιότητα μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο βελτιστοποίησης.

Η χρήση της βοηθητικής διάταξης στόχου που περιγράφεται στην παρούσα εργασία κρίνεται επιτυχής. Επίσης, ο σχεδιασμός της εν λόγω διάταξης επιδέχεται περαιτέρω βελτιστοποίησης. Κρίσιμο, όμως, είναι να δημιουργηθεί, επιπλέον, μια βοηθητική διάταξη για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον, είτε αυτές διεξάγονται όπως έως τώρα με θερμόμετρα επαφής, ή με χρήση της θερμοκάμερας. Η εν λόγω βοηθητική διάταξη, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο

πλαίσιο της παρούσας εργασίας, θα πρέπει να είναι προσεκτικά επιλεγμένη για να αναιρεί τις επιδράσεις των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών.

Μετά από ολοκλήρωση της φάσης βελτιστοποίησης της εν λόγω μεθοδολογίας, αυτή θα μπορούσε να αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την υποστήριξη αποφάσεων στο πλαίσιο της αναβάθμισης της κατανάλωσης ενέργειας σε κτήρια.

Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας προτείνονται τα εξής:

(α) Επανάληψη της διαδικασίας σε πλήθος δοκιμίων (υφιστάμενων κατασκευών) έτσι ώστε να επαληθευτεί για διάφορους τύπους κατασκευών.

(β) Ταυτόχρονη χρήση, για κάποιες από τις ως άνω επαναλήψεις της μεθόδου, και διάταξης θερμο-ροομέτρου για επαλήθευση ή μη των υπολογιζόμενων ονομαστικών τιμών του συντελεστή θερμοπερατότητας για τα επιλεγμένα δοκίμια

5 Βιβλιογραφία

Albatici, R., Tonelli, A., “Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site”, Energy and Buildings, 42: 2177–2183, 2010.

Bjork, F., Enochsson., T., “Properties of Thermal Insulation Materials during Extreme Environment Changes” Construction and Building Materials 23 (6): 2189–2195, 2009.

Budaiwi, I., A. Abdou, “The Impact of Thermal Conductivity Change of Moist Fibrous Insulation on Energy Performance of Buildings under Hot-Humid Conditions” Energy and Buildings, 60: 388–399, 2013.

Doukas, H., Nychtis, C., Psarras, J., “Assessing Energy Saving Measures in Buildings through an Intelligent Decision Support Model”, Building and Environment, 44 (2): 290-298, 2009.

Doukas, H., Patlitzianas, K., Iatropoulos, K., Psarras, J., “Intelligent Building Energy Management System Using Rule Sets”, Building and Environment – The International Journal of Building Science and its Applications, 42: 3562–3569, 2007.

Ellison, S.L.R., Williams, A. (Eds), “Eurachem/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement”, Third edition, ISBN 978-0-948926-30-3, 2012.

FLIR InfraCAM SD, “User’s manual”, Publ. No. 1668299, Rev. a200, FLIR, 2007.

Fokaides, P., Kalogirou, S., “Application of Infrared Thermography for the Determination of the Overall Heat Transfer Coefficient (U-value) in Building Envelopes”, Applied Energy 88 (12): 4358–4365, 2011.

ISO 6946, “Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method”, Geneva, Switzerland, ISO, 2007.

Haralambopoulos, D., Paparsenos, G., “Assessing the Thermal Insulation of Old Buildings – The Need of In situ Spot Measurements of Thermal Resistance and Planar Infrared Thermography” Energy Conversion and Management, 39 (1–2): 65–79, 1998.

ISO 13790, “Energy Performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling”, Geneva, Switzerland, ISO, 2008.

ISO 9869-1, “Thermal Insulation – Building Elements – In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Part 1: Heat Flow Meter Method”, Geneva, Switzerland, ISO, 2014

JCGM/WG1, BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, “JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”, First edition, 2008.

JCGM/WG1, BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, “JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)”, Third edition, 2012.

Tzifa, V., Papadakos, G., Papadopoulou, A., Marinakis, V., Psarras, J., “Uncertainty and method limitationsbin a short-time measurement of the effective thermal transmittance on a building envelope using an infrared camera”, International Journal of Sustainable Energy, DOI: 10.1080/14786451.2014.982119, 2014.