



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Πειραματικός Προσδιορισμός και Αβεβαιότητα Μέτρησης  
του Συντελεστή Θερμοπερατότητας Τοίχου με Χρήση  
Θερμοκάμερας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Τζίφα Βασιλική

**Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Πειραματικός Προσδιορισμός και Αβεβαιότητα Μέτρησης του Συντελεστή Θερμοπερατότητας Τοίχου με Χρήση Θερμοκάμερας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τζίφα Βασιλική

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Ιωάννης Ψαρράς

.....

Δημήτριος Ασκούνης

.....

Βασίλειος Ασημακόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Τζίφα Βασιλική

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © ΤΖΙΦΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ , 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

---

Η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει συνεχή αύξηση με σοβαρές επιπτώσεις στην οικονομία και στην ποιότητα ζωής. Για την αντιμετώπιση αυτών των επιπτώσεων, προτεραιότητα κάθε ενεργειακής πολιτικής πρέπει να αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας.

Η μείωση των ενεργειακών απωλειών και συνακόλουθα η εξοικονόμηση ενέργειας συνδέεται άμεσα με τον προσδιορισμό της ενεργειακής ταυτότητας των κτιρίων. Ο έλεγχος της θερμικής επάρκειας ενός κτιρίου αποσκοπεί στην μείωση των απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη συμβάλλοντας αποτελεσματικά στην οικονομία.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αναλύθηκαν μέθοδοι για τον έλεγχο της θερμικής επάρκειας ενός κτιριακού κελύφους, μέσω του προσδιορισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας του. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκε ο θεωρητικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας, ο οποίος βασίζεται στη δομή και τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών και των δομικών στοιχείων όπως περιγράφεται στο ISO 6946. Στη συνέχεια, καθορίστηκαν πειραματικές μέθοδοι βασιζόμενες σε μετρητικές διατάξεις. Με βάση τα αποτελέσματα ερευνών, η μέθοδος με τη χρήση θερμοκάμερας προτείνεται ως μη καταστρεπτική, γρήγορη μέθοδος για την εκτίμηση ποσοτικών δεδομένων σχετικά με τη θερμοροή μέσω ενός κτιριακού κελύφους και, συνεπώς, σχετικά και με τα επίπεδα θερμοπερατότητας που το χαρακτηρίζουν.

Αν και η θερμοκάμερα είναι το όργανο που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την επιθεώρηση και την εκτέλεση ελέγχου των δομικών στοιχείων, η χρήση της συνεπάγεται αβεβαιότητα στις μετρήσεις. Για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας αυτής αναπτύχθηκε η κατάλληλη μεθοδολογία με βάση τις έννοιες της μετρολογίας και της στατιστικής, όπως περιγράφονται στα διεθνή Πρότυπα. Έγινε σύγκριση της θεωρητικής τιμής με την υπολογιζόμενη, όπως αυτές προκύπτουν στην περίπτωση του προσδιορισμού της θερμοπερατότητας εξωτερικής τοιχοποιίας, τμήματος κελύφους κτηρίου.

Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση μιας σειράς παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας τοιχοποιίας. Αξιολογήθηκαν οι γνωστές πρακτικές που μπορούν να ακολουθηθούν για το σκοπό αυτό και επισημάνθηκαν τα κρίσιμα σημεία των μετρητικών διαδικασιών που επηρεάζουν περισσότερο την ποιότητα του αποτελέσματος.

**Λέξεις Κλειδιά:** Θερμοκάμερα, Αντίσταση θερμοροής, Συντελεστής θερμοπερατότητας, Αβεβαιότητα Μετρήσεων



## ***ABSTRACT***

---

The consumption of energy presents continuous increase with serious consequences in the economy and the quality of life. For the confrontation of these consequences, priority of each energy policy should be the saving of energy.

The reduction of energy losses and the saving of energy is consecutively connected with the determination of energy identity of buildings. The control of thermic sufficiency of a building aims in the reduction of requirements for heating and refrigeration contributing effectively in the economy.

The scope of the present thesis is to analyze methods for the control of thermic sufficiency of building envelop by the determination of the thermal transmittance. Concretely, the calculated value, based on the structure of the element, and obtained in ISO6946, was analyzed. Furthermore, experimental methods were determined, based on provisions. Based on the results of many researches, the method with use of thermal camera is proposed as a non-destructive, fast method in order to estimate qualitative data for the thermal diffusivity of a building envelope.

Thermal camera is the most commonly used tool in order to carry out energy audits, but her use involves uncertainty in the measurements. For the determination of this uncertainty the suitable methodology was developed based on the significances of statistics as they are described in the international standards. Calculated and measured values were compared, as they result from the determination of thermal transmittance.

Finally, the effect of some factors were investigated that influence the accuracy of the measurements of thermal transmittance. The practices that can be followed for that purpose were evaluated and the critical points of processes that influence the quality of the result were pointed out.

**Keywords:** Thermal camera, Thermal resistance, Thermal transmittance, Uncertainty of measurement.





## ***ΠΡΟΛΟΓΟΣ***

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Απόφασης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της αβεβαιότητας που συνοδεύει τις μετρήσεις οι οποίες διεξάγονται με την χρήση θερμικής κάμερας και των παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων αυτών. Αναπτύχθηκε η κατάλληλη μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας και επισημάνθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής ήταν ο Καθηγητής κ. Ι. Ψαρράς, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση αυτής και την δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την διδάκτορα Αλεξάνδρα Παπαδοπούλου και τον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Παπαδάκο για την αδιάκοπη υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχαν κατά την εκπόνηση της εργασίας. Η ευστοχία των υποδείξεων τους συνέβαλε καταλυτικά στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Βαγγέλη Μαρινάκη για την βοήθεια που παρείχε στο πειραματικό τμήμα της διπλωματικής.

Καταλήγοντας, θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική μου εργασία στην οικογένεια μου, στους γονείς, στα αδέρφια μου και στους φίλους μου που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια. Η ολοκλήρωση των σπουδών μου θα ήταν ανέφικτη δίχως την υποστήριξη και υπομονή που επέδειξαν.



## ***Περιεχόμενα***

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	1
1.1 Σκοπός - Αντικείμενο .....	3
1.2 Φάσεις Εκπόνησης Διπλωματικής Εργασίας .....	4
1.3 Δομή Τεύχους Διπλωματικής Εργασίας.....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	9
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Όροι και ορισμοί .....	11
2.2.1 Θερμική αγωγή .....	11
2.2.2 Θερμική μεταφορά.....	13
2.2.3 Θερμική ακτινοβολία.....	14
2.2.4 Δομικό Υλικό.....	15
2.2.5 Θερμική αντίσταση δομικού υλικού.....	15
2.2.6 Συντελεστής θερμοδιαφυγής .....	15
2.2.7 Συντελεστής θερμικής μετάβασης.....	16
2.2.8 Θερμοπερατότητα δομικού στοιχείου.....	16
2.2.9 Μέση θερμοπερατότητα κελύφους κτιρίου .....	17
2.3 Κρισιμότητα του συντελεστή θερμοπερατότητας τοιχοποιίας.....	18
2.3.1 Κατασκευές προ του 1980 .....	19
2.3.2 Κατασκευές υπό τον κανονισμό θερμομόνωσης (1980 – 2010).....	20
2.3.3 Κατασκευές υπό τον Κ.Εν.Α.Κ. ....	23
2.3.4 Φαινόμενα υγροποίησης.....	27
2.3.5 Θερμογέφυρες.....	29
2.4 Αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας.....	31
2.5 Ενδογενείς παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας .....	32
2.6 Υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας βάσει μετρήσεων .....	34
2.6.1 Σύγκριση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών .....	35
2.6.2 Γενικά για τη θερμοροή μέσω τοιχοποιίας .....	35
2.6.3 Εξίσωση θερμικής ισορροπίας.....	36

2.6.4	Θερμοκρασία περιβάλλοντος και συντελεστής θερμοπερατότητας .....	37
2.6.5	Προσδιορισμός της $T_{amb}$ .....	37
2.6.6	Μέτρηση με θερμοροόμετρο .....	38
2.6.7	Μέθοδος με θερμοόμετρο ακριβείας .....	41
2.6.8	Μέθοδος με χρήση θερμοκάμερας.....	41
2.7	Παράγοντες του περιβάλλοντος μετρήσεως.....	44
2.7.1	Κλιματικές συνθήκες .....	44
2.7.2	Συνθήκες που επικρατούν στον χώρο των μετρήσεων και εργασίες συντήρησης .....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	.....	<b>47</b>
3.1	Εισαγωγή .....	49
3.2	Αρχές θερμογραφίας .....	49
3.2.1	Μέλαν σώμα .....	50
3.2.2	Απορρόφηση, ανάκλαση.....	51
3.3	Διαδικασίες εκτίμησης παραμέτρων ρύθμισης .....	53
3.3.1	Εκτίμηση θερμοκρασίας ανάκλασης .....	53
3.3.2	Εκτίμηση συντελεστή εκπομπής.....	55
3.3.3	Εξασθένηση του υπέρυθρου σήματος λόγω του αέρα.....	59
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	.....	<b>61</b>
4.1	Εισαγωγή .....	63
4.2	Αβεβαιότητα των μετρήσεων .....	64
4.2.1	Αβεβαιότητα τύπου A.....	64
4.2.2	Αβεβαιότητα τύπου B .....	65
4.3	Παράγοντες αβεβαιότητας στη θερμογράφιση .....	68
4.3.1	Σφάλματα μεθόδου .....	68
4.3.2	Σφάλματα κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.....	69
4.3.3	Σφάλματα από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα της θερμοκάμερας.....	70
4.4	Συνδυασμένη αβεβαιότητα θερμογράφισης.....	70
4.5	Υπολογισμός αβεβαιότητας .....	72
4.5.1	Η αβεβαιότητας της εκτίμησης του συντελεστή θερμοπερατότητας με αναλυτικό τρόπο .....	72
4.5.2	Υπολογισμός αβεβαιότητας μέτρησης συντελεστή θερμοπερατότητας με χρήση θερμοκάμερας.....	74

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> .....	79
5.1 Εισαγωγή .....	81
5.2 Όργανα μέτρησης .....	81
5.2.1 Θερμοκάμερα .....	81
5.2.2 Θερμόμετρο - Υγρασιόμετρο .....	87
5.3 Πειραματική διάταξη μετρήσεων .....	88
5.4 Συντελεστής θερμοπερατότητας εξεταζόμενης τοιχοποιίας .....	91
5.5 Διαδικασία μετρήσεων .....	94
5.5.1 Προσδιορισμός συντελεστή εκπομπής .....	94
5.5.2 Πείραμα γωνίας λήψης .....	95
5.5.3 Πειράματα προσδιορισμού συντελεστή θερμικής διαπερατότητας .....	95
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> .....	97
6.1 Αποτελέσματα μετρήσεων και σχολιασμός .....	99
6.1.1 Υπολογισμός συντελεστή εκπομπής .....	99
6.1.2 Γωνία λήψης .....	100
6.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων συντελεστή θερμοπερατότητας .....	103
6.2 Υπολογισμός θερμοπερατότητας .....	113
6.2.1 Υπολογισμός αβεβαιότητας με βάση τη μέθοδο με χρήση θερμοκάμερας ..	113
6.2.2 Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας με τη μέθοδο της μέσης τιμής	120
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b> .....	123
7.1 Συμπεράσματα .....	125
7.2 Προοπτικές .....	126



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## «Εισαγωγή»

---





## 1.1 Σκοπός - Αντικείμενο

Η κτιριακή θερμογραφία θεωρείται από τις οδηγούσες τεχνολογίες σε χώρες με παράδοση στην εξοικονόμηση ενέργειας όπως η Γερμανία και η Γαλλία. Η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει συνεχή αύξηση οδηγώντας στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής. Για τον περιορισμό της σπατάλης στον ενεργειακό τομέα πρωταρχικό ρόλο αποκτά η εξοικονόμηση ενέργειας συμβάλλοντας αποτελεσματικά στην οικονομία και στην κάλυψη των κοινωνικών αναγκών. Με την διεξαγωγή ενεργειακών επιθεωρήσεων προσδιορίζεται η ενεργειακή ταυτότητα των κτιρίων με σκοπό την μείωση των ενεργειακών απωλειών.

Η ελληνική νομοθεσία σε συνάφεια με τις οδηγίες του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου με τον νόμο 3661/2008, ο οποίος προβλέπει την έκδοση του Κανονισμού Ενεργειακής Αποδοτικότητας Κτιρίων, ορίζει την επίσημη διαδικασία ενεργειακής επιθεώρησης. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια είναι η διενέργεια ενεργειακής επιθεώρησης σ' αυτά, δηλαδή η ενεργειακή διάγνωση ή ο ενεργειακός έλεγχός τους, που παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την πιθανή ενεργειακή σπατάλη που συμβαίνει σε αυτά είτε λόγω των χαρακτηριστικών του σχεδιασμού και της κατασκευής τους ή λόγω του τρόπου χρήσης τους.

Η θερμοκάμερα είναι ένα άριστο εργαλείο για την διενέργεια ενεργειακής επιθεώρησης καθώς έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει τα σημεία στα οποία παρουσιάζεται ανομοιογένεια στη ροή θερμότητας μέσω του κτηριακού κελύφους και επομένως χρειάζονται διορθωτικές επεμβάσεις. Αν και η θερμοκάμερα είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο εργαλείο για τον ενεργειακό έλεγχο, η χρήση της συνοδεύεται από αβεβαιότητα όπως συμβαίνει σε κάθε είδους μετρήσεις.

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η επισήμανση της ανάγκης εκτίμησης της αβεβαιότητας που συνοδεύει τις μετρήσεις οι οποίες διεξάγονται με την χρήση θερμικής κάμερας και των παραγόντων που την επηρεάζουν, σαν ένα μέτρο αποδοτικότερης ενεργειακής επιθεώρησης των κτιρίων.

Η εργασία υλοποιήθηκε μέσω της διεξαγωγής σειράς μετρήσεων σε γραφείο του κτιρίου των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ με στόχο τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας της εξεταζόμενης τοιχοποιίας. Επίσης, αξιολογήθηκε η ακρίβεια της μέτρησης αυτής ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τις συνθήκες υπό τις οποίες η θερμογράφιση έχει μικρότερο ποσοστό σφαλμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επίδραση της ώρας της ημέρας και των εγγενών παραμέτρων αβεβαιότητας της διαδικασίας μέτρησης της θερμικής διαπερατότητας δομικού στοιχείου με την επανάληψη της μέτρησής του ανά τακτά χρονικά διαστήματα στο ίδιο σημείο για την διάρκεια μιας ημέρας. Παράλληλα

προσδιορίστηκε η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής της εσωτερικής επιφάνειας της εξεταζόμενης τοιχοποιίας και των μετρήσεων επιφανειακής θερμοκρασίας που έγιναν πάνω σε αυτήν με χρήση θερμοκάμερας. Κατά την εκτέλεση των μετρήσεων με σκοπό τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας εξετάστηκε και η επίδραση της θερμοκρασίας ανάκλασης και της γωνίας λήψης των θερμικών εικόνων.

## 1.2 Φάσεις Εκπόνησης Διπλωματικής Εργασίας

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μεταξύ Οκτωβρίου 2011 και Ιουλίου 2011 και η πορεία αυτής ακολούθησε τις εξής φάσεις, που παρουσιάζονται παρακάτω στο σχήμα.

**Φάση 1:** Αρχικά αναλύθηκε η έννοια του συντελεστή θερμοπερατότητας, των θεωρητικών και πρακτικών μεθόδων υπολογισμού της και παρουσιάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του

**Φάση 2:** Στη συνέχεια έγινε μελέτη για την θερμογράφηση και έγινε κατηγοριοποίηση των προβλημάτων που παρουσιάζουν οι κατασκευές και τα οποία γίνονται αντιληπτά από την θερμοκάμερα. Επίσης, μελετήθηκαν οι μέθοδοι προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων ρύθμισης της θερμογράφησης, δηλαδή του συντελεστή εκπομπής και της θερμοκρασίας ανάκλασης.

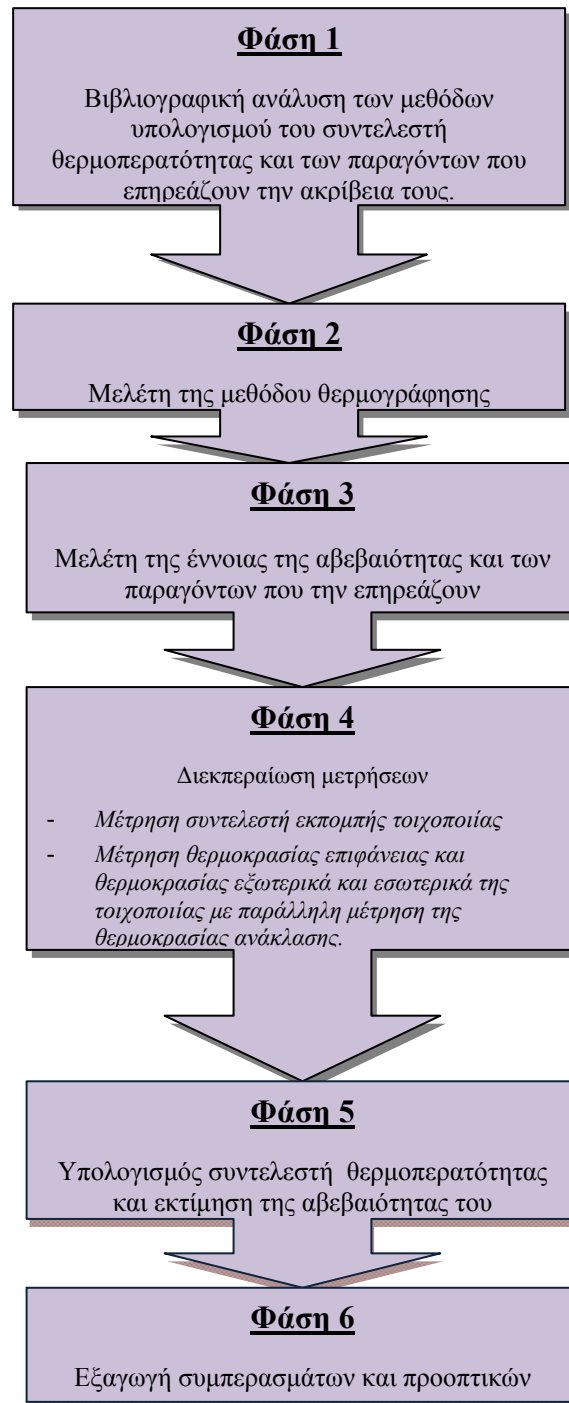
**Φάση 3:** Στη συνέχεια μελετήθηκαν οι βασικές αρχές της μετρολογίας καθώς και η εφαρμογή τους στην διεξαγωγή μετρήσεων με χρήση θερμοκάμερας στο πλαίσιο της ενεργειακής μελέτης. Αναλύθηκαν οι παράγοντες αβεβαιότητας στη θερμογράφηση καθώς και ο τρόπος υπολογισμού της αβεβαιότητας.

**Φάση 4:** Στο πλαίσιο του πρακτικού τμήματος της παρούσας εργασίας, η διεξαγωγή των μετρήσεων χωρίζεται στις ακόλουθες υποενότητες:

- Μέτρηση του συντελεστή εκπομπής την εξεταζόμενης τοιχοποιίας
- Μέτρηση θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου και της θερμοκρασίας του αέρα εσωτερικά και εξωτερικά του χώρου με ταυτόχρονη μέτρηση της θερμοκρασίας ανάκλασης πάνω στην επιφάνεια του τοίχου.

**Φάση 5:** Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω και με βάσει τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις προσδιορίστηκε η τιμή του συντελεστή εκπομπής, υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμοπερατότητας καθώς και η αβεβαιότητα που συνοδεύει τους παραπάνω υπολογισμούς.

**Φάση 6 :** Κατά την διάρκεια της τελευταίας φάσης της διπλωματικής παρατίθενται τα συμπεράσματα και εξετάζονται οι προοπτικές που αναδύονται από την παρούσα εργασία.



Σχήμα 1.1: Φάσεις ολοκλήρωσης Διπλωματικής Εργασίας

### 1.3 Δομή Τεύχους Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει την παρακάτω δομή:

Αρχικά, υπάρχει μια σύντομη περίληψη της διπλωματικής εργασίας, στην οποία παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια σημεία της. Η περίληψη αυτή παρατίθεται και στην Αγγλική γλώσσα.

Στην συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας περιεχομένων και η ευρεία περίληψη της εργασίας. Τέλος, ακολουθεί η διπλωματική εργασία, που αποτελείται από 7 κεφάλαια. Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

### **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

Πρόκειται για το παρόν κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά το θέμα της εργασίας και οι φάσεις εκπόνησης της.

### **Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι Προσδιορισμού Συντελεστή Θερμοπερατότητας σε Τοιχοποιία.**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι κύριοι θεωρητικοί και πειραματικοί μέθοδοι για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας. Η βιβλιογραφική αναφορά στις μεθόδους αυτές πραγματοποιήθηκε με στοιχεία και πληροφορίες σχετικές με τους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβειά τους.

### **Κεφάλαιο 3: Θερμογραφία και Συναφείς Παράγοντες**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία λεπτομερής ανάλυση της μεθόδου της θερμογραφίας στον κτιριακό τομέα. Αναλύονται οι αρχές που την διέπουν και παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι ρύθμισης, δηλαδή του συντελεστή εκπομπής, της θερμοκρασίας ανάκλασης και της εξασθένησης του υπέρυθρου σήματος λόγω του αέρα.

### **Κεφάλαιο 4: Μετρολογία με Θερμοκάμερα**

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται διεξοδικά η έννοια της μετρολογίας και της θεωρίας σφαλμάτων. Παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης κατά την διάρκεια της ενεργειακής επιθεώρησης καθώς και τρόπος υπολογισμού της αβεβαιότητας που συνοδεύει την θερμογράφιση.

### **Κεφάλαιο 5: Όργανα Μέτρησης και Πειραματική Διάταξη**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της μελέτης και αναλύονται τα χαρακτηριστικά του κάθε οργάνου. Περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων και γίνεται ο θεωρητικός υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας της εξεταζόμενης τοιχοποιίας και της αβεβαιότητας που την συνοδεύει.

## **Κεφάλαιο 6: Πείραμα και Αποτελέσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς και της αβεβαιότητας που συνοδεύει την τιμή του με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

## **Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προοπτικές**

Το τελευταίο κεφάλαιο αφιερώνεται στην συγκεντρωτική παρουσίαση των σημαντικότερων σημείων - συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη καθώς και στις προοπτικές που διαφαίνονται.



# ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2***

## ***«Μέθοδοι προσδιορισμού συντελεστή θερμοπερατότητας σε τοιχοποιία»***

---





## 2.1 Εισαγωγή

Η ζήτηση κατασκευών με αποδοτική χρήση της ενέργειας έχει αυξηθεί σημαντικά. Οι εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας είχαν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της σημασίας της τήρησης των καλών πρακτικών όσων αφορά τη θερμομόνωση και την αεροστεγανότητα των κτιρίων καθώς και το βαθμό απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού.

Τυχόν ατέλειες στη μόνωση και στεγανότητα σε ιδιαίτερα θερμομονωμένες και αεροστεγανές κατασκευές μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση στις ενεργειακές τους απώλειες. Οι ατέλειες στη θερμομόνωση και την αεροστεγανότητα ενός κτιρίου δεν συνεπάγεται απλώς αυξημένες δαπάνες θέρμανσης και συντήρησης αλλά, επιπλέον, δημιουργούν κακές συνθήκες διαβίωσης στους εσωτερικούς χώρους.

Ο βαθμός μόνωσης ενός κτιρίου συχνά εκφράζεται με το μέγεθος της θερμικής αντίστασης ή ενός συντελεστή διάδοσης της θερμότητας, του συντελεστή θερμοπερατότητας, για τα διάφορα μέρη του κτιρίου. Ωστόσο οι αναφερόμενες τιμές θερμικής αντίστασης σπάνια αποτελούν μέτρο των πραγματικών θερμικών απωλειών σε ένα κτίριο. Οι διαρροές αέρα από τις ενώσεις που δεν είναι αεροστεγανές και επαρκώς πληρωμένες με μονωτικό υλικό συχνά προκαλούν σημαντικές αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές σχεδιασμού.

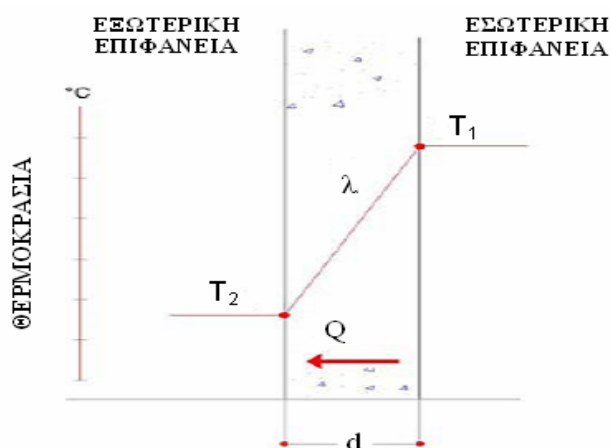
Η επαλήθευση των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής οι οποίες δηλώνονται από τους κατασκευαστές τους διενεργείται με τη βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών. Τα κατασκευασμένα κτίρια πρέπει να ελέγχονται και να επιθεωρούνται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι επιτυγχάνονται στην πραγματικότητα οι στόχοι θερμομόνωσης και αεροστεγανότητας που είχαν τεθεί για αυτά [1].

## 2.2 Όροι και ορισμοί

### 2.2.1 Θερμική αγωγή

Η θερμική αγωγή αναφέρεται σε μακροσκοπικώς ακίνητα σώματα και συνδέεται με την μετάδοση της θερμότητας σε μοριακή κλίμακα. Είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται σε ένα σώμα όταν σε αυτό υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση. Πρόκειται για μετάδοση ενέργειας από το θερμότερο σώμα στο ψυχρότερο δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.

Μετάδοση της θερμότητας με αγωγή γίνεται και στα ρευστά σώματα με παρόμοιο μηχανισμό. Η δυσκολία της μεταφοράς της θερμότητας διαμέσου των σωμάτων εξαρτάται από την αγωγιμότητα του σώματος [2].



Σχήμα 2.1: Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  (W/m\*K) είναι ο δείκτης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας των υλικών διαμέσου της μάζας του. Η μεταφορά με αγωγή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου, η οποία μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση μονωτικών υλικών.

Το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται μέσω ενός τμήματος της εξωτερικής τοιχοποιίας κτιρίου με συγκεκριμένη επιφάνεια για δεδομένο πάχος διατυπώνεται ως εξής [3]:

$$Q = (\lambda/d)*F*(T_1 - T_2)*t \quad (\text{εξίσωση 1})$$

$Q$ : η ποσότητα θερμότητας η οποία διέρχεται σε μία ώρα από την μία πλευρά ως την άλλη.

$\lambda$ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

$F$ : το εμβαδόν της επιφάνειας

$T_1$ : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

$T_2$ : η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

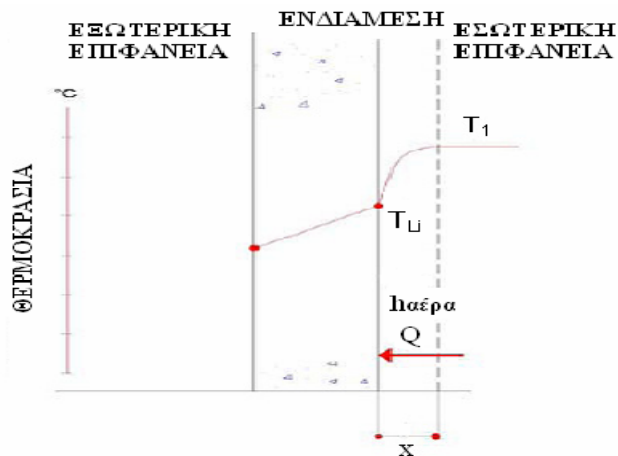
$d$ : το πάχος του υλικού

$t$ : ο χρόνος ροής της θερμότητας.

## 2.2.2 Θερμική μεταφορά

Θερμική μεταφορά είναι η μετάδοση θερμότητας από ή προς μια επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με ρευστό που την περιβάλλει. Οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας που έχουν οι δομικές μονάδες της επιφάνειας και του ρευστού.

Η θερμότητα σε ένα ρευστό μεταφέρεται και μέσω της μάζας του με την κίνησή του. Αν η κίνηση γίνεται σε φυσικό μέσο όπου υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές η κίνηση αυτή ονομάζεται θερμική διάχυση ενώ αν η κίνηση γίνεται βεβιασμένα ονομάζεται βίαιη διάχυση. Η διαφορά πυκνοτήτων διαφόρων ρευστών προκαλεί φυσική διάχυση. Αντίστοιχα η μηχανική ανάμειξη προκαλεί βεβιασμένη διάχυση.[2]



Σχήμα 2.2 : Μεταφορά θερμότητας με διάχυση

Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως εξής[3] :

$$Q = (\lambda_{\text{αέρα}} / x) * F * (T_{Li} - T_1) \quad (\text{εξίσωση 2})$$

Όπου :

Q: το ποσό της θερμότητας που διέρχεται σε μία ώρα από την επιφάνεια της κατασκευής στο περιβάλλον.

$\lambda_{\text{αέρα}}$ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα.

x: το πάχος του στρώματος αέρα στο οποίο γίνεται η διάχυση της θερμότητας.

F: το εμβαδό της επιφάνειας.

$T_{Li}$  : η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου

$T_1$ : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου.

Επειδή δεν μπορεί να προσδιοριστεί το πάχος του στρώματος στο οποίο γίνεται η διάχυση της θερμότητας, ο παράγοντας  $\lambda/x$  αντικαθίσταται με έναν διορθωτικό συντελεστή  $\alpha$  ( $W/m^2 \cdot K$ ), που ονομάζεται συντελεστής θερμικής μεταφοράς και εξαρτάται από την κινητική κατάσταση του αέρα.

Η μεταφορά της θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια κατασκευής προς το περιβάλλον ρευστό διατυπώνεται ως εξής [3] :

$$Q = \alpha_a \cdot F \cdot (T_2 - T_{La}) \cdot t \quad (\text{εξίσωση 3})$$

Q: το ποσό της θερμότητας που διέρχεται σε μία ώρα από την επιφάνεια της κατασκευής στο περιβάλλον.

F: το εμβαδό της επιφάνειας

$\alpha$ : ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς για την δεδομένη ρεολογική συμπεριφορά του περιβάλλοντος ρευστού

$T_{La}$ : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ρευστού

$T_2$ : η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της κατασκευής

t: ο χρόνος ροής της θερμότητας

### 2.2.3 Θερμική ακτινοβολία

Θερμική μετάδοση με ακτινοβολία είναι η μετάδοση θερμότητας με μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από ή προς ένα σώμα και το περιβάλλον του. Σε αντίθεση με τους άλλους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας, η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης μεταξύ σώματος και περιβάλλοντος.

Η θερμική ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό ενός σώματος μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και εξέρχεται από την επιφάνειά του σε αυτή τη μορφή. Η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι ανάλογη της επιφανειακής θερμοκρασίας του σώματος. Ο ρυθμός με τον οποίο εξέρχεται η ακτινοβολία από την επιφάνεια του σώματος εξαρτάται από το μοναδιαίο εμβαδό της. Εκτός από την εκπομπή ακτινοβολίας από μια επιφάνεια, γίνεται και πρόσπτωση ακτινοβολίας σε αυτή που παράγεται εκτός της επιφάνειας. Ένα τμήμα της ακτινοβολίας αυτής απορροφάται από το σώμα και το θερμαίνει, ένα άλλο τμήμα μπορεί να ανακλαστεί ενώ το υπόλοιπο μπορεί να διαπεράσει το σώμα (αν αυτό είναι διαφανές ή ημιδιαφανές). Η μετάδοση της θερμικής ακτινοβολίας γίνεται ευθύγραμμα και με την ταχύτητα του φωτός, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης πηγής-δέκτη.

Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα εκφράζεται από τον νόμο Stefan-Boltzmann [2]:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{εξίσωση 4})$$

$q$  : η εκπεμπόμενη ενέργεια

$\varepsilon$  : ο συντελεστής εκπομπής του υλικού

$\sigma$  : σταθερά Stefan-Boltzmann

$T$  : η απόλυτη θερμοκρασία

## 2.2.4 Δομικό Υλικό

Ως δομικό υλικό ορίζεται κάθε προϊόν το οποίο παράγεται για να ενσωματωθεί, κατά τρόπο διαρκή, σε δομικά έργα [4].

## 2.2.5 Θερμική αντίσταση δομικού υλικού

Η αντίσταση που προβάλλει μία ομογενής στρώση ενός δομικού στοιχείου στη ροή θερμότητας υπολογίζεται από το γενικό τύπο[5]:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{εξίσωση 5})$$

όπου:

$R$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] η αντίσταση που προβάλλει στη ροή θερμότητας η συγκεκριμένη στρώση,

$d$  [m] το πάχος της στρώσης,

$\lambda$  [W/(m·K)] ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της στρώσης,

## 2.2.6 Συντελεστής θερμοδιαφυγής

Ο συντελεστής θερμοδιαφυγής  $\Lambda$  δίνει την ποσότητα της θερμότητας η οποία ρέει σε μία ώρα μέσα από στρώμα υλικού που έχει επιφάνεια 1m<sup>2</sup> και πάχος  $d$  εκφρασμένο σε m, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα που βρίσκεται στην μία και στην άλλη πλευρά της κατασκευής είναι 1 βαθμός Κέλβιν και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Ο συντελεστής θερμοδιαφυγής μετράται σε W/m<sup>2</sup>K[6].

### 2.2.7 Συντελεστής θερμικής μετάβασης

Ο συντελεστής θερμικής μετάβασης  $\alpha$  δίνει την ποσότητα θερμότητας η οποία μεταβιβάζεται σε μία ώρα μεταξύ στοιχείου κατασκευής που έχει επιφάνεια  $1\text{m}^2$  και του αέρα ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με αυτό όταν μεταξύ τους υπάρχει διαφορά ενός βαθμού Κέλβιν και το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Ο συντελεστής θερμικής μετάβασης μετράται σε  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ [6].

### 2.2.8 Θερμοπερατότητα δομικού στοιχείου

Ο έλεγχος της επάρκειας της θερμομονωτικής προστασίας των κτιριακών κατασκευών επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας. Ως συντελεστής θερμοπερατότητας ορίζεται το μέγεθος που προσδιορίζει την ποσότητα της θερμότητας σε βατώρες η οποία ρέει σε μία ώρα μέσα από στρώμα υλικού που έχει επιφάνεια  $1\text{m}^2$  όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα που βρίσκεται στην μία και στην άλλη πλευρά της κατασκευής είναι ένας βαθμός Κέλβιν και το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας μετράται σε  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ [6].

Ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας γίνεται αναλυτικά με βάση την διαδικασία που ακολουθεί:

Το σύνολο των θερμικών αντιστάσεων όλων των στρώσεων ενός πολυστρωματικού δομικού στοιχείου, που αποτελείται από ομογενείς στρώσεις υλικών, ορίζει την αντίσταση θερμοδιαφυγής ( $R_{ss}$ ) και προκύπτει από το άθροισμα των επί μέρους αντιστάσεων της κάθε στρώσης κατά τη γενικευμένη σχέση[5]:

$$R_{ss} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (\text{εξίσωση } 6)$$

Η σειρά τοποθέτησης των στρώσεων ενός δομικού στοιχείου πρακτικά δεν επηρεάζει τη ροή θερμότητας μέσω αυτού, επηρεάζει όμως την αξιοποίηση της θερμοχωρητικότητάς τους. Η τοποθέτηση της θερμομονωτικής στρώσης σε θέση πλησιέστερη προς την εσωτερική ή την εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας επηρεάζει τη θερμοχωρητικότητα του δομικού στοιχείου, δηλαδή την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα στη μάζα του. Συγκεκριμένα, η τοποθέτηση της θερμομονωτικής στρώσης στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας αυξάνει τη θερμοχωρητικότητά της κατά τους χειμερινούς μήνες και τη μειώνει κατά τους καλοκαιρινούς. Το αντίστροφο συμβαίνει κατά την τοποθέτηση της θερμομονωτικής στρώσης στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας.

Η συνολική θερμική αντίσταση που προβάλλει ένα πολυστρωματικό δομικό στοιχείο, που αποτελείται από ομογενείς στρώσεις υλικών, ορίζεται από το άθροισμα των

αντιστάσεων των επί μέρους στρώσεων και των αντιστάσεων του στρώματος αέρα εκατέρωθεν των όψεών του κατά την εξίσωση[5]:

$$R_T = R_{si} + R_{ss} + R_{se} \quad (\text{εξίσωση 7})$$

όπου:

$R_T$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] η συνολική αντίσταση που προβάλλει στη ροή θερμότητας το δομικό στοιχείο,

$R_{si}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από και προς τον εσωτερικό χώρο σε σχέση με το δομικό στοιχείο,

$R_{se}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από και προς το δομικό στοιχείο σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός δομικού στοιχείου ορίζεται από τη σχέση[5]:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (\text{εξίσωση 8})$$

όπου:

$U$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου,

### 2.2.9 Μέση θερμοπερατότητα κελύφους κτιρίου

Ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας  $U_m$  όλου του κτιρίου προκύπτει από τον συνυπολογισμό των συντελεστών όλων των επιμέρους δομικών στοιχείων του περιβλήματος του θερμαινόμενου χώρου του κτιρίου κατά την ποσοστιαία αναλογία των αντίστοιχων εμβαδών τους. Στον υπολογισμό του  $U_m$  θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι γραμμικές θερμογέφυρες που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία, ιδίως στα όρια της περιμέτρου των δομικών στοιχείων.

Στη γενική του έκφραση ο υπολογισμός του  $U_m$  προκύπτει από τον τύπο[5]:

$$U_m = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot U_j \cdot b + \sum_{i=1}^k l_j \cdot \Psi_j \cdot b}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad (\text{εξίσωση 9})$$

όπου:

$U_m$  ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κελύφους όλου του κτιρίου

- $n$  το πλήθος των επιμέρους δομικών στοιχείων στο κέλυφος του κτιρίου
- $k$  το πλήθος των θερμογεφυρών που αναπτύσσονται στα εξωτερικά ή εσωτερικά όρια κάθε επιφάνειας  $F_j$  του κελύφους
- $A_j$  το εμβαδό επιφάνειας που καταλαμβάνει το κάθε δομικό στοιχείο στη συνολική επιφάνεια του κελύφους του κτιρίου
- $U_m$  ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου  $j$  του κελύφους του κτιρίου
- $l_j$  το συνολικό μήκος του κάθε τύπου θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στο περίβλημα του κτιρίου
- $\Psi_j$  ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του κάθε τύπου θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στο περίβλημα του κτιρίου
- $b$  μειωτικός συντελεστής

## 2.3 Κρισιμότητα του συντελεστή θερμοπερατότητας τοιχοποιίας

Κατά την ενεργειακή επιθεώρηση, ο ενεργειακός επιθεωρητής καλείται να εκτιμήσει τη θερμική συμπεριφορά των αδιαφανών δομικών στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη και το έτος έκδοσης της οικοδομικής άδειας του κτιρίου. Προς αυτή την κατεύθυνση κωδικοποιούνται για τον έλεγχο της ενεργειακής επιθεώρησης όλα τα κτίρια σε επιμέρους κατηγορίες, σύμφωνα με την περίοδο ανέγερσής τους, κάτι το οποίο προάγει χρήσιμη πληροφορία σε σχέση με το βαθμό της θερμομονωτικής του προστασίας.

Ειδικότερα ως προς την περίοδο έκδοσης της οικοδομικής άδειας ο διαχωρισμός γίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- 1<sup>η</sup> κατηγορία. Περιλαμβάνει τα κτίρια εκείνα, των οποίων η οικοδομική άδεια έχει εκδοθεί πριν από την εφαρμογή του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (4 Ιουλίου 1979), χρονική περίοδο κατά την οποία δεν υπήρχε καμία απαίτηση για θερμομονωτική προστασία των κτιρίων. Πρακτικά ως τυπική ημερομηνία οριοθέτησης της περιόδου αυτής ορίζεται η 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1980.
- 2<sup>η</sup> κατηγορία. Περιλαμβάνει τα κτίρια εκείνα, των οποίων η οικοδομική άδεια εκδόθηκε κατά την περίοδο 1979 – 2010, δηλαδή στο διάστημα των 30 ετών που μεσολάβησε από την ισχύ του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων μέχρι την ισχύ του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων. Σε αυτό το διάστημα όλα τα κτίρια όφειλαν να πληρούν τις απαιτήσεις του Κανονισμού Θερμομόνωσης



Κτιρίων. Πρακτικά, ως τυπικές ημερομηνίες οριοθέτησης της περιόδου ορίζονται:

- Η 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1980 ως ημερομηνία έναρξης της περιόδου
- Η 1<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2010 ως ημερομηνία λήξης της περιόδου
- 3<sup>η</sup> κατηγορία. Περιλαμβάνει τα κτίρια εκείνα, των οποίων η οικοδομική άδεια εκδόθηκε μετά την εφαρμογή του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων και τα οποία έχουν την υποχρέωση συμμόρφωσης προς τις απαιτήσεις του νέου κανονισμού. Πρακτικά ως ημερομηνία έναρξης της περιόδου αυτής ορίζεται η 1<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2010. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται και όσα κτίρια ανεγέρθηκαν πριν την εφαρμογή του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων αλλά υπέστησαν ή πρόκειται να υποστούν μετά την έναρξη της ισχύος του νέου κανονισμού ριζική ανακαίνιση. Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο άρθρο 2, παράγραφος 12 του νόμου 3661/2008 κάθε επέμβαση στο κτίριο νοείται ως ριζική ανακαίνιση όταν:
  - Το συνολικό κόστος επεμβάσεων στο κτιριακό κέλυφος και τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις υπερβαίνει το 25% της συνολικής αξίας του κτιρίου
  - Όταν η ανακαίνιση εφαρμόζεται σε ποσοστό άνω του 25% της συνολικής επιφάνειας του κτιριακού κελύφους.

Ανάλογα με την πρόνοια για θερμομονωτική προστασία του κτιρίου που έχει ληφθεί, η κάθε κατηγορία υποδιαιρέθηκε σε μικρότερες υποκατηγορίες:

- Σε κτίρια χωρίς καμία πρόνοια θερμομονωτικής προστασίας, τα οποία αναμένεται να συναντώνται μόνο στην πρώτη κατηγορία.
- Σε κτίρια με μερική ή πλημμελή θερμομονωτική προστασία, τα οποία επίσης αναμένεται να συναντώνται μόνο στην πρώτη κατηγορία.
- Σε κτίρια με πλήρη θερμομονωτική προστασία σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων ή με το Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων[5].

### 2.3.1 Κατασκευές προ του 1980

Όλες οι οικοδομές (κυρίως οι ιδιωτικές καθώς σε δημόσια κτίρια επιβάλλονταν κάποιες προδιαγραφές θερμομόνωσης) που έχουν κατασκευαστεί μέχρι και το 1979 δεν έχουν την κατάλληλη θερμομόνωση. Η έλλειψη θερμομόνωσης αυτών των κτιρίων οδηγεί στην κατανάλωση δυσανάλογων ποσοτήτων καυσίμων για θέρμανση. Σε περίπτωση ανανέωσης των κτιρίων αυτών υπάρχει η δυσκολία προσδιορισμού της θερμομονωτικής κατάστασής του καθώς τα σχέδια στην πλειονότητά τους είναι ανακριβή και η κατάσταση του εξωτερικού περιβλήματος του κτιρίου άγνωστη.

Η μόνη πιθανότητα να έχει εφαρμοστεί κάποια μορφή θερμομόνωσης επαφιόταν στην τεχνογνωσία των μηχανικών και εργοληπτών που τις ανέγειραν και στις οικονομικές δυνατότητες των ιδιοκτητών εφόσον κάποια θερμομόνωση προτεινόταν να εφαρμοστεί από τους κατασκευαστές.

Βελτίωση στη θερμομονωτική ικανότητα των κτιρίων αυτών στα οποία δεν έχουν εφαρμοστεί οι διατάξεις του κανονισμού θερμομόνωσης είναι δυνατόν να επιτευχθεί με

- αλλαγή κουφωμάτων, που θα εξασφαλίσουν μείωση των απωλειών λόγω του φυσικού αερισμού και λόγω της βελτίωσης της θερμομονωτικής ικανότητας με σύγχρονα συστήματα κουφωμάτων και
- με τοποθέτηση επιπλέον θερμομόνωσης, εσωτερικής ή εξωτερικής, στις τοιχοποιίες, στις οροφές και στις πυλωτές[6].

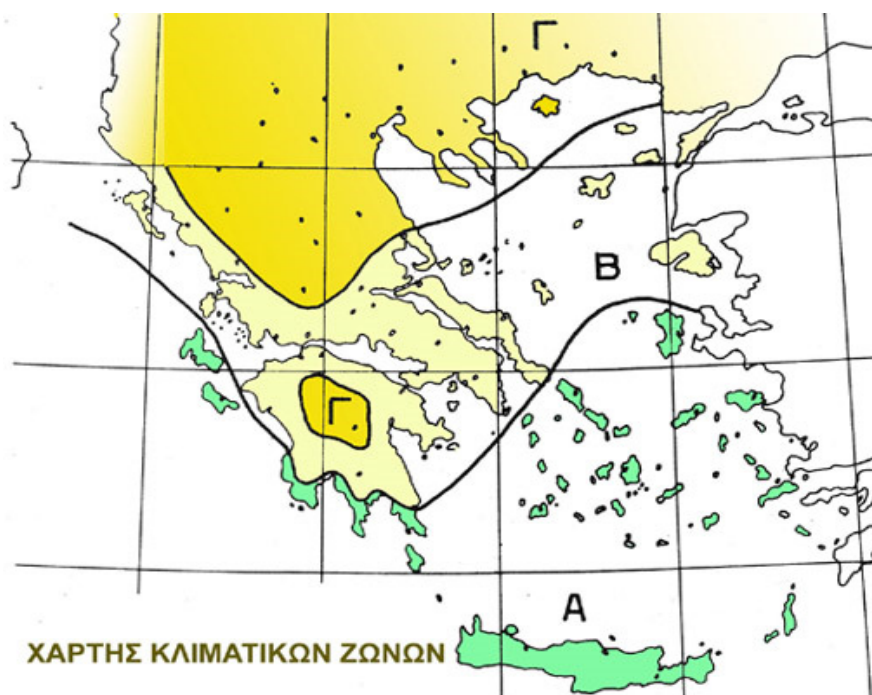
### 2.3.2 Κατασκευές υπό τον κανονισμό θερμομόνωσης (1980 – 2010)

Το πρώτο μέτρο στην Ελλάδα για εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια ήταν ο κανονισμός θερμομόνωσης κτιρίων που εγκρίθηκε το 1979 (ΦΕΚ 362Δ/1979). Ο κανονισμός αυτός πραγματεύεται τις απαιτήσεις θερμομόνωσης και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την εξασφάλιση καλής θερμομόνωσης στις κτιριακές κατασκευές.

Η καλή θερμική μόνωση διασφαλίζει:

- Υγιεινή και ευχάριστη διαμονή των ενοίκων
- Ορθολογική κατανάλωση ενέργειας για την θέρμανση και τον κλιματισμό των χώρων
- Οικονομία στις δαπάνες κατασκευής της εγκατάστασης θέρμανσης
- Μικρότερη ρύπανση του περιβάλλοντος από τα καυσαέρια.

Η Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις κλιματικές ζώνες Α, Β, Γ (αυστηρότερη από άποψη θερμομονωτικών απαιτήσεων είναι η ζώνη Γ) με κριτήριο τόσο την μέση θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα κατά τη διάρκεια του χειμώνα και, κυρίως, κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης. Όρια στο συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$  (εκφράζεται σε  $\text{kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$  ή σε  $\text{W/m}^2\text{K}$ ) του κάθε δομικού στοιχείου του κελύφους του κτιρίου τίθενται ανάλογα με την περιοχή που βρίσκεται το κτίριο.



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση κλιματικών ζωνών ελληνικής επικράτειας.

Επίσης απαιτείται τιμή μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_m$  του κτιρίου μικρότερη από εκείνον που ορίζεται ως μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας και ο οποίος προκύπτει από σχετικά διαγράμματα και είναι συνάρτηση τόσο της ζώνης όπου ανήκει η περιοχή όπου ανεγέρθηκε το κτίριο όσο και του λόγου  $F/V$ , όπου  $F$  η εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου, μέσω της οποίας μεταδίδεται η θερμότητα του κτιρίου, δια του περικλειόμενου όγκου  $V$  της κατασκευής. Όσο ο λόγος  $F/V$  αυξάνει τόσο μειώνεται η τιμή του επιτρεπόμενου μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας με οριακή τιμή η οποία παραμένει πλέον σταθερή για τιμές του λόγου  $F/V > 1$ .

Οι τιμές του επιτρεπόμενου μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις τιμές που δίνονται στους πίνακες 2.1 και 2.2[8]:

Πίνακας 2.1: Τιμές επιτρεπόμενου μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας συναρτήσει του λόγου  $F/V$ .

F/V	$U_m$ σε kcal/m <sup>2</sup> h °C			$U_m$ σε W/m <sup>2</sup> K		
	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ
≤0,2	1,335	1,015	0,807	1,553	1,180	0,938
0,3	1,245	0,955	0,760	1,448	1,111	0,884
0,4	1,160	0,987	0,715	1,349	1,043	0,831
0,5	1,092	0,845	0,675	1,270	0,983	0,785
0,6	1,030	0,795	0,635	1,198	0,924	0,738
0,7	0,985	0,750	0,600	1,145	0,872	0,698
0,8	0,947	0,717	0,575	1,101	0,834	0,669
0,9	0,927	0,695	0,550	1,078	0,808	0,640
≥1,0	0,920	0,680	0,530	1,070	0,791	0,616

Πίνακας 2.2: Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας

Στοιχεία κατασκευής	$U_{max}$ kcal/m <sup>2</sup> h °C	Επιτρεπόμενο W/m <sup>2</sup> K
1. Εξωτερικοί τοίχοι συμπεριλαμβανομένων και των στοιχείων εκ σκυροδέματος σε όλες τις ζώνες	0,6	0,7
2. Οριζόντιες επιφάνειες και οροφές αποχωρίζου- σαι θερμαινόμενο χώρο από τον ελεύθερο αέρα είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω σε όλες τις ζώνες	0,4	0,5
3. Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος ή δάπεδα υπερκείμενα κλειστού μη θερμαινόμενου υπογείου ή ημιυπόγειου χώρου		
Για την Ζώνη Α	2,6	3
Για την Ζώνη Β	1,6	1,9
Για την Ζώνη Γ	0,6	0,7
4. Διαχωριστικοί τοίχοι προς μη θερμαινόμενους κλειστούς χώρους		
Για την Ζώνη Α	2,6	3
Για την Ζώνη Β	1,6	1,9
Για την Ζώνη Γ	0,6	0,7

Αύξηση της θερμικής προστασίας των κτιρίων πέρα από τα όρια που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα επιφέρει περαιτέρω μείωση των θερμικών απωλειών. Για μεταβαλλόμενα μέτρα θερμικής προστασίας και κόστους ενέργειας, το άθροισμα των δαπανών θέρμανσης και απόσβεσης του κόστους θερμικών μονώσεων έχει ένα ελάχιστο όριο. Η θερμομόνωση που αντιστοιχεί στο όριο αυτό καλείται οικονομικώς βέλτιστη θερμομόνωση.

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης θερμομόνωσης πρέπει να δίνεται προσοχή ιδιαίτερος στους ακόλουθους παράγοντες:

- Κλιματολογικοί: θερμοκρασία αέρα εσωτερικά του κτιρίου, θέσεις κτιρίου, περίοδος θέρμανσης.
- Κατασκευαστικοί: γεωμετρικό σχήμα κτιρίου, μέγεθος παραθύρων, ποιότητα παραθύρων, μόνωση των τοίχων και των ορόφων.
- Σύστημα θέρμανσης: επιλογή συστήματος εγκατάστασης θέρμανσης και μεθόδου ρυθμίσεως.
- Οικονομικοί: κόστος ενέργειας, κόστος κατασκευής της εγκατάστασης θέρμανσης, κόστος κατασκευής του κτιρίου, κόστος εξυπηρέτησης κεφαλαίου, διάρκεια ζωής του κτιρίου.

Η ΚΥΑ 21475/4707/1988 «Μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων» αποσκοπούσε στη συμμόρφωση προς τις διατάξεις της 93/76/ΕΟΚ οδηγία του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων της 13<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1993 ώστε με τη λήψη των πλέον ενδεδειγμένων μέτρων να διασφαλίζεται η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των

κτιρίων με στόχο τη σταθεροποίηση και μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την προστασία του περιβάλλοντος.

Βασική παράμετρος της πιο πάνω απόφασης ήταν η ενεργειακή επίδοση του κτιρίου, που είναι ο βαθμός της ενεργειακής απόδοσής του κατά τη λειτουργία του για την κάλυψη σε ετήσια βάση των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση, ψύξη, αερισμό, φωτισμό, ζεστό νερό χρήσης και συσκευές επιτυγχάνοντας τις αναγκαίες συνθήκες χρήσης.

Για κάθε κτίριο νεοαναγειρόμενο ή υπάρχον επιβαλλόταν να υπάρχει το δελτίο ενεργειακής ταυτότητας (ΔΕΤΑ) που θα ήταν ειδικό έντυπο και αναπόσπαστο στοιχείο της οικοδομικής άδειας του κτιρίου στο οποίο περιγραφόταν το σύνολο των ενεργειακών χαρακτηριστικών κάθε κτιρίου. Στην περίπτωση νέου κτιρίου επιβαλλόταν η σύνταξη σύμφωνα με τον Κανονισμό Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας με βάση τον οποίο θα μελετούνταν και θα κατασκευάζονταν κάθε νέο κτίριο. Στο ίδιο έντυπο αναγραφόταν ο βαθμός της ενεργειακής απόδοσης και η ενεργειακή κατηγορία στην οποία κατατασσόταν το κτίριο.

Με βάση το έντυπο ΔΕΤΑ και την ενεργειακή πιστοποίηση το κτίριο κατατασσόταν στην αντίστοιχη κατηγορία ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με τα όρια που καθορίζονται από τον Κ.Ο.Χ.Ε.Ε. και τις ειδικές ενεργειακές αποδόσεις ανά κατηγορία. Έτσι γινόταν η ενεργειακή βαθμολόγηση κάθε κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα ο Κ.Ο.Χ.Ε.Ε. περιείχε:

- Όρους και προϋποθέσεις για τον βέλτιστο σχεδιασμό των κτιρίων και την θερμική τους προστασία. Καθορίζονταν όρια θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτιρίου ανά χρήση κτιρίων και κλιματική περιοχή για όλη τη διάρκεια του χρόνου.
- Ανώτατα επιτρεπόμενα όρια κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας με βάση τα επιτρεπτά όρια θερμικής άνεσης και εναλλαγών αέρα για κάθε χρήση του κτιρίου
- Κλιματικές ζώνες για όλη τη χώρα με βάση τις θερμοημέρες ψύξης και θέρμανσης.
- Χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής, θερμικές ιδιότητες ως κριτήρια επιλογής υλικών [9].

### **2.3.3 Κατασκευές υπό τον Κ.Εν.Α.Κ.**

Ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων διαμορφώνει το πλαίσιο αρχών και καθορίζει τους όρους και τις προϋποθέσεις βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

Σκοπός του κανονισμού ενεργειακής απόδοσης αποτελεί η μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό, φωτισμό και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με την ταυτόχρονη διασφάλιση συνθηκών άνεσης στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται μέσω του ενεργειακού αποδοτικού σχεδιασμού του κελύφους, της χρήσης ενεργειακά αποδοτικών δομικών υλικών και ηλεκτρομηχανικών εγκαταστάσεων, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Για την εφαρμογή του η ελληνική επικράτεια διαιρείται σε τέσσερις κλιματικές ζώνες με βάση τις βαθμομέρες θέρμανσης. Στον πίνακα 2.3 προσδιορίζονται οι νομοί που υπάγονται στις τέσσερις κλιματικές ζώνες (από την θερμότερη στην ψυχρότερη) και ακολουθεί σχηματική απεικόνιση των παραπάνω ζωνών.

**Πίνακας 2.3:** Νομοί ελληνικής επικράτειας ανά κλιματική ζώνη.

Κλιματική Ζώνη	Νομοί
Ζώνη Α	Ηρακλείου, Χανίων, Ρεθύμνου, Λασιθίου, Κυκλάδων, Δωδεκανήσων, Σάμου, Μεσσηνίας, Λακωνίας, Αργολίδας, Ζακύνθου, Κεφαλληνίας και Ιθάκης, Κύθηρα και νησιά Σαρωνικού(Αττικής), Αρκαδίας(πεδινή)
Ζώνη Β	Αττικής (εκτός Κυθήρων και νησιών Σαρωνικού), Κορινθίας, Ηλείας, Αχαΐας, Αιτωλοακαρνανίας, Φθιώτιδας, Φωκίδας, Βοιωτίας, Ευβοίας, Μαγνησίας, Λέσβου, Χίου, Κέρκυρας, Λευκάδας, Θεσπρωτίας, Πρέβεζας, Άρτας
Ζώνη Γ	Αρκαδίας(ορεινή), Ευρυτανίας, Ιωαννίνων, Λάρισας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Περίας, Ημαθίας, Κιλκίς, Χαλκιδικής, Σερρών (εκτός ΒΑ τμήματος), Καβάλας, Ξάνθης, Ροδόπης, Έβρου
Ζώνη Δ	Γρεβενά, Κοζάνη, Καστοριά, Φλώρινα, Σερρών(ΒΑ τμήμα), Δράμας



**Σχήμα 2.4:** Χάρτης της Ελλάδας με σημειωμένες τις κλιματικές ζώνες

Σε κάθε νομό οι περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο άνω των 500 μέτρων εντάσσονται στην επόμενη κλιματική ζώνη από εκείνη στην οποία ανήκουν σύμφωνα με τα παραπάνω.

Τα επιμέρους δομικά στοιχεία του εξεταζόμενου νέου ή ριζικά ανακαινιζόμενου κτιρίου πρέπει να πληρούν τους περιορισμούς θερμομόνωσης του πίνακα 2.4

**Πίνακας 2.4:** Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας διαφόρων δομικών στοιχείων ανά κλιματική ζώνη (πηγή : Κ.Εν.Α.Κ.)

Δομικό στοιχείο	Σύμβολο	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντ. θερμοπερατότητας [W/(m <sup>2</sup> *K)]			
		Ζώνη			
		A	B	Γ	Δ
Εξωτερική οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (οροφές)	U <sub>D</sub>	0.50	0.45	0.40	0.35
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	U <sub>W</sub>	0.60	0.50	0.45	0.40
Δάπεδα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (πilotές)	U <sub>DL</sub>	0.50	0.45	0.40	0.35
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με μη θερμαινόμενους χώρους	U <sub>WU</sub>	1.50	1.00	0.80	0.70
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με το έδαφος	U <sub>WE</sub>	1.50	1.00	0.80	0.70
Δάπεδα σε επαφή με κλειστούς μη θερμαινόμενους χώρους	U <sub>FU</sub>	1.20	0.90	0.75	0.70
Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος	U <sub>FE</sub>	1.20	0.90	0.75	0.70
Κουφώματα ανοιγμάτων	U <sub>K</sub>	3.20	3.00	2.80	2.60
Γυάλινες προσόψεις κτιρίων μη ανοιγόμενες ή μερικώς ανοιγόμενες	U <sub>GF</sub>	2.20	2.00	1.80	1.80

Η απαίτηση για θερμομονωτική προστασία των κτιριακών κατασκευών που επιβάλλει ο Κ.Εν.Α.Κ. επιβάλλει τον έλεγχο επάρκειας της θερμομονωτικής προστασίας του κτιρίου σε δύο στάδια:

Κατά το πρώτο στάδιο ελέγχεται η θερμική επάρκεια ενός εκάστου των επί μέρους δομικών στοιχείων του κτιρίου. Για να ικανοποιεί ένα δομικό στοιχείο τις απαιτήσεις θερμομονωτικής προστασίας του κανονισμού, θα πρέπει η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_{εξεταζ.}$  αυτού του δομικού στοιχείου να μην υπερβαίνει την τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_{max}$  που ορίζει ο κανονισμός, ανά κλιματική ζώνη για κάθε κατηγορία δομικών στοιχείων. Πρέπει, δηλαδή να ισχύει:

$$U_{εξεταζ.} \leq U_{max} \quad (\text{εξίσωση 10})$$

Κατά το δεύτερο στάδιο ελέγχεται η θερμική επάρκεια του συνόλου του κτιρίου. Για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του κανονισμού πρέπει η μέση τιμή

θερμοπερατότητας του εξεταζόμενου κτιρίου ( $U_m$ ) να μην υπερβαίνει τα όρια που θέτει ο κανονισμός για κάθε κτίριο ( $U_{m,max}$ ), αυτού εντασσομένου σε μια από τις κλιματικές ζώνες του ελλαδικού χώρου. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας ( $U_{m,max}$ ) υπολογίζεται λαμβανομένου υπόψη του λόγου του συνόλου της εξωτερικής περιμετρικής επιφάνειας του κτιρίου προς τον όγκο του ( $F/V$ ). Πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$U_m \leq U_{m,max} \quad (\text{εξίσωση 11})$$

Μετά τη διαδικασία επιθεώρησης, ο επιθεωρητής προσδιορίζει τα πεδία που μπορούν να βελτιωθούν, συντάσσει έκθεση Ενεργειακής Επιθεώρησης με τα αποτελέσματα της επιθεώρησης και προτάσεις βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Η έκθεση αποτελείται από το συμπληρωμένο έντυπο καταγραφής στοιχείων, περιλαμβανομένων των συστάσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Για τη σύνταξη των συστάσεων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, ο Ενεργειακός Επιθεωρητής δύναται να ανατρέχει σε κατάλογο προτεινόμενων συστάσεων, όπως καθορίζονται με σχετική TOTEE (τεχνική οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος).

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων προσδιορίζεται με βάση μεθοδολογία υπολογισμού της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Η μεθοδολογία υπολογισμού περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Τη χρήση του κτιρίου, τις επιθυμητές συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, αερισμός), τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τον αριθμό των χρηστών
- Τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής του κτιρίου (θερμοκρασία, σχετική και απόλυτη υγρασία, ταχύτητα ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία)
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους (σχήμα και μορφή κτιρίου, διαφανείς και μη επιφάνειες, σκίαστρα) σε σχέση με τον προσανατολισμό και τα χαρακτηριστικά των εσωτερικών δομικών στοιχείων
- Τα θερμικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους (θερμοπερατότητα, θερμική μάζα, απορροφητικότητα ηλιακής ακτινοβολίας, διαπερατότητα)
- Τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης θέρμανσης χώρων (τύπος συστήματος, δίκτυο διανομής, απόδοση συστημάτων)
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης ψύξης/κλιματισμού χώρων (τύπος συστημάτων, δίκτυο διανομής, απόδοση συστημάτων)
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης μηχανικού αερισμού (τύπος συστημάτων, δίκτυα διανομής, απόδοση συστημάτων)
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης φωτισμού για τα κτίρια του τριτογενή τομέα
- Τα παθητικά ηλιακά συστήματα.



Μια από τις σημαντικές απειλές στις οικοδομικές κατασκευές είναι η επιδείνωση των δομικών υλικών. Η θερμομονωτική ικανότητα ενός δομικού υλικού επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διείσδυση και την παραμονή της υγρασίας στη μάζα τους καθώς και από τις θερμογέφυρες, οι οποίες λειτουργούν επιβαρυντικά στη θερμική προστασία των κτιρίων. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι σημαντικότεροι από αυτούς τους παράγοντες [10].

### 2.3.4 Φαινόμενα υγροποίησης

Η υγρασία εκφράζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους:

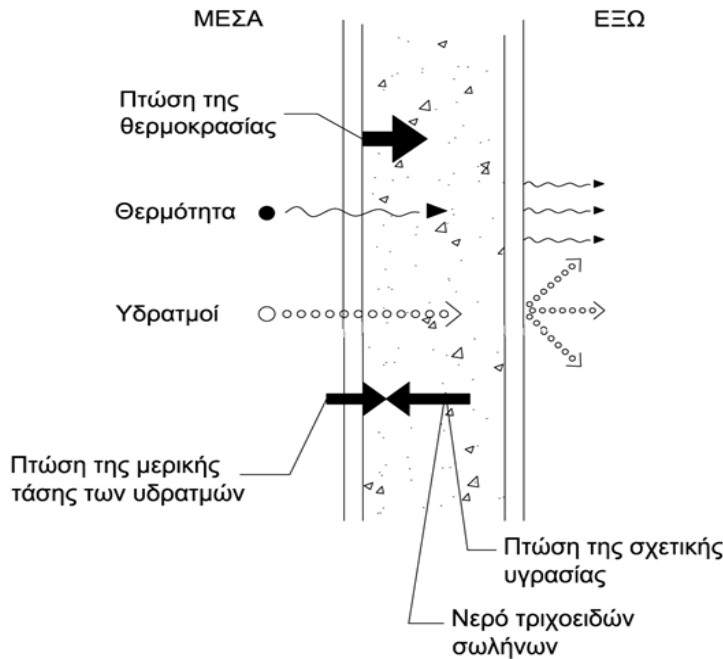
- Είτε ως σχετική υγρασία, η οποία εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό της ποσότητας νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένας ορισμένος όγκος αέρα σε ορισμένη θερμοκρασία
- Είτε ως απόλυτη τιμή, η οποία εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό κατά βάρος περιεκτικότητας υλικού σε νερό. Αυτός ο τρόπος έκφρασης χρησιμοποιείται όταν μετράται η υγρασία στο ξύλο και σε άλλα δομικά υλικά [9].

Η εμφάνιση υγρασίας στα μέλη των κατασκευών μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές ζημιές μέχρι και την καταστροφή τους μειώνοντας σημαντικά τη θερμομονωτική τους ικανότητα. Αυτό έχει ως συνέπεια να αυξηθεί το κόστος θέρμανσης και ο χώρος να γίνει ακατάλληλος για διαμονή.

Η υγρασία μέσα από τα μέλη κατασκευών μπορεί να διακινηθεί με δύο τρόπους:

- Σε μορφή νερού διαμέσου των τριχοειδών αγγείων των υλικών προς την κατεύθυνση όπου η σχετική υγρασία έχει μικρή τιμή οπότε το νερό εξατμίζεται εύκολα
- Σε μορφή υδρατμών προς την κατεύθυνση όπου η τιμή της απόλυτης υγρασίας είναι μικρότερη.

Συχνά η κατεύθυνση προς την οποία διακινούνται οι υδρατμοί είναι αντίθετη εκείνης προς την οποία κινείται το νερό μέσα στους τριχοειδείς σωλήνες. Η υγροποίηση των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια κατασκευής συμβαίνει όταν η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας των μελών της κατασκευής είναι μικρότερη από το σημείο υγροποίησης των υδρατμών του αέρα στον εσωτερικό χώρο. Ως σημείο υγροποίησης ορίζεται η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η υγροποίηση των υδρατμών του αέρα όταν αυτός ψυχθεί.



Σχήμα 2.3: Μετάδοση της θερμοκρασίας και διακίνηση της υγρασίας μέσα σε κατασκευή.

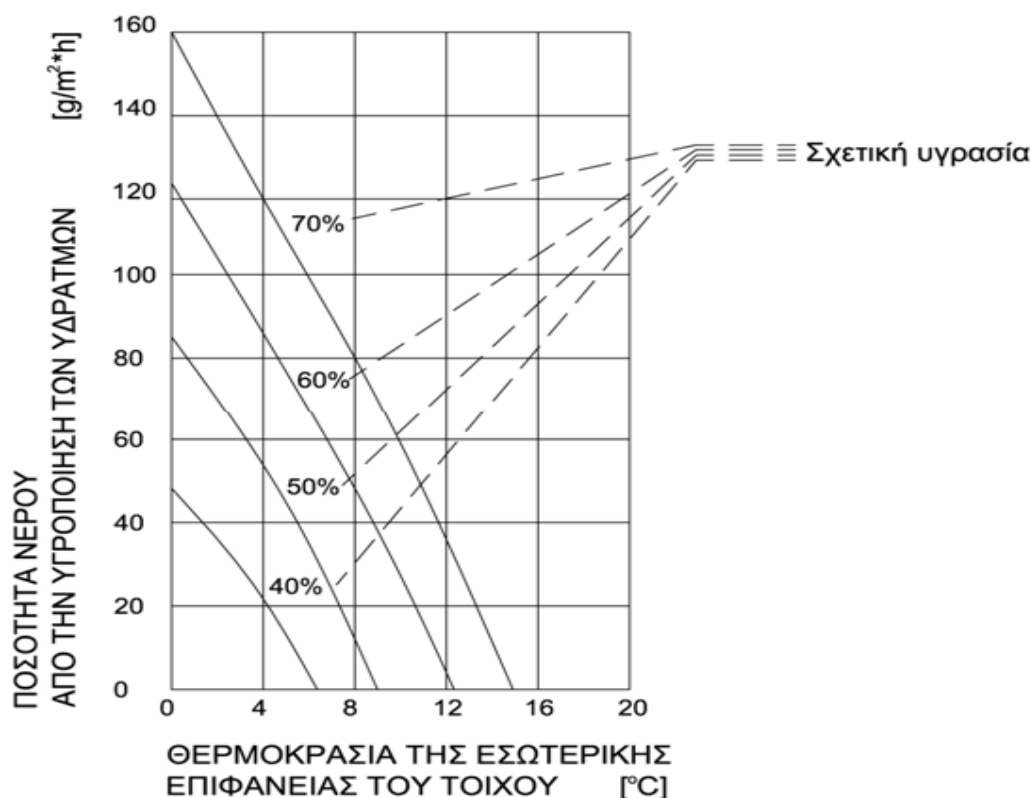
Η υγραποίηση των υδρατμών οφείλεται:

- **Σε ανεπαρκή θερμομόνωση:** Η ανεπαρκής θερμομόνωση έχει ως αποτέλεσμα να είναι χαμηλή η θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια των μελών κατασκευής. Η ελάχιστη δυνατή θερμομόνωση για να αποφευχθεί η υγραποίηση των υδρατμών υπολογίζεται είτε από τον μέγιστο συντελεστή θερμοπερατότητας είτε από την ελάχιστη αντίσταση θερμοδιαφυγής. Ο έλεγχος για την υγραποίηση των υδρατμών γίνεται με σύγκριση των μεγεθών  $1/\Lambda$  και  $U$  της κατασκευής προς τα αντίστοιχα  $(1/\Lambda)_{min}$  και  $U_{max}$ . Όταν ισχύει:

$$\left(\frac{1}{\Lambda}\right)_{min} < \left(\frac{1}{\Lambda}\right) \quad \text{ή} \quad U_{max} > U \quad (\text{εξίσωση 12})$$

δεν γίνεται υγραποίηση στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Στην αντίθετη περίπτωση γίνεται υγραποίηση στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Για να αποφευχθεί η υγραποίηση πρέπει η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας να είναι μικρότερη από την μέγιστη τιμή.

Όταν γίνεται η υγραποίηση των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής, η ποσότητα των υγραπιούμενων υδρατμών προσδιορίζεται από το παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.4:** Η ποσότητα νερού που προέρχεται από την υγρασία των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια κατασκευής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της κατασκευής και της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού χώρου όταν  $t_i=20^{\circ}\text{C}$ .

- **Θέρμανση ψυχθέντων χώρων:** Κατά την θέρμανση ψυχθέντων χώρων οι επιφάνειες των τοίχων θερμαίνονται με βραδύ ρυθμό σε σχέση με τον αέρα του χώρου με αποτέλεσμα να γίνεται υγρασία των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής για κάποιο χρονικό διάστημα.
- **Σε αυξημένη υγρασία του αέρα του χώρου:** Όταν η υγρασία του αέρα σε έναν χώρο είναι αυξημένη τότε γίνεται υγρασία των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευής [6].

### 2.3.5 Θερμογέφυρες

Ως θερμογέφυρα ορίζεται το τμήμα εκείνο του περιβλήματος του κτιρίου, στο οποίο η θερμική του αντίσταση εμφανίζεται μειωμένη συγκριτικά με τη θερμική αντίσταση στο υπόλοιπο κέλυφος και κατά συνέπεια στη θέση εκείνη η θερμική ροή είναι αυξημένη. Γι' αυτό το λόγο και οι θερμογέφυρες θεωρούνται ως τα «ασθενή» σημεία του κτιριακού κελύφους και λειτουργούν επιβαρυντικά στη θερμική του προστασία. Επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου και επιφέρουν μείωση της αίσθησης της θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του χώρου, ενώ ευνοούν την

εκδήλωση του φαινομένου της συμπύκνωσης των υδρατμών και την ανάπτυξη μυκήτων και διαφόρων μικροοργανισμών στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων.

Τη δημιουργία μιας θερμογέφυρας μπορεί να προκαλέσουν κατασκευαστικές αδυναμίες, κακοτεχνίες, αστοχίες, αμέλεια, άγνοια, και φθορές οφειλόμενες στο πέρασμα του χρόνου. Σε όλες τις περιπτώσεις κοινή συνισταμένη αναδεικνύεται η μειωμένη θερμομονωτική προστασία στη θέση εκείνη.

Σε γενικές γραμμές, η εμφάνιση μιας θερμογέφυρας μπορεί να οφείλεται:

- Σε κατασκευαστικούς λόγους που καθιστούν δυσχερή ή πρακτικά αδύνατη την πλήρη θερμομονωτική προστασία της κατασκευής
- Στη μεταβολή του πάχους των υλικών μεταξύ δύο γειτονικών θέσεων
- Στην αλλαγή της σύνθεσης των υλικών (χρήση στο περίβλημα του κτιρίου υλικών με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα) ή της διαδοχής των στρώσεων ενός φαινομενικά ενιαίου δομικού στοιχείου
- Στη διακοπή της πλήρωσης της θερμομονωτικής στρώσης σε κάποια θέση του εξωτερικού περιβλήματος
- Στη συνάντηση δύο κάθετων μεταξύ τους δομικών στοιχείων, των οποίων η πλήρης θερμομονωτική προστασία είναι δυσχερής ή πρακτικά ανέφικτη
- Στην απουσία θερμομονωτικής στρώσης ή στη μείωση του πάχους της
- Στη διαφορά μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών, όπως συμβαίνει σε δίεδρες ή τρίεδρες εξωτερικές γωνίες, στο εμβαδό της εξωτερικής επιφάνειας των οποίων αντιστοιχεί πολύ μικρότερο εμβαδό εσωτερικής επιφάνειας.

Είναι σκόπιμο οι θέσεις των θερμογεφυρών να προσδιορίζονται εξ αρχής σε ένα κτίριο, δηλαδή κατά το στάδιο της κατασκευής, έτσι ώστε να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για την κατά το δυνατό αποφυγή ή περιορισμό των επιπτώσεών του. Η εκ των υστέρων αντιμετώπισή τους είναι συχνά δυσχερής και απαιτεί πιο σύνθετες οικοδομικές εργασίες που αποθαρρύνουν την εφαρμογή τους, Άλλοτε πάλι η λανθασμένη εκτίμηση του αίτιου πρόκλησης των φθορών ή η λανθασμένη προσέγγιση του προβλήματος οδηγεί σε εσφαλμένες λύσεις που όχι μόνο δεν αντιμετωπίζουν την κατάσταση, αλλά αντίθετα, την επιδεινώνουν.

Γενικά, για την αποφυγή εμφάνισης των θερμογεφυρών σε μια κατασκευή αποτελεί η πλήρης θερμική προστασία της. Ωστόσο, πρακτικά δεν είναι εφικτή η κατασκευή ενός συμβατικού κτιρίου χωρίς τη δημιουργία θερμογεφυρών. Και αυτό όχι κατ' ανάγκη επειδή δεν θα εκπονηθεί η απαραίτητη μελέτη θερμικής προστασίας ή επειδή αυτή δεν θα εφαρμοστεί πλήρως, αλλά επειδή κάποιο σημείο ή τμήμα ενός δομικού στοιχείου λόγω της θέσης του ή του κατασκευαστικού σχήματος του περιβλήματος θα παρουσιάζει υψηλότερες θερμικές απώλειες, τις οποίες ένας συμβατικός τρόπος δόμησης δεν μπορεί να αντιμετωπίσει.

Στο ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 10211 προσδιορίζεται ο τρόπος υπολογισμού των αυξημένων θερμικών ροών στις θέσεις των θερμογεφυρών και ο συνυπολογισμός τους στο σύνολο των θερμικών απωλειών ενός κτιρίου.

Επίσης στο νέο κανονισμό για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων υπάρχει ειδική αναφορά στον εντοπισμό των θερμογεφυρών σε μια κτιριακή κατασκευή με παράθεση σειράς ενδεικτικών θέσεων εμφάνισης θερμογεφυρών και πρακτικών κατασκευαστικών λύσεων αντιμετώπισής τους.

Στη θέση μιας θερμογέφυρας το δομικό στοιχείο εμφανίζει μειωμένη θερμική προστασία με αποτέλεσμα την αύξηση των ροών θερμότητας που διέρχονται από την θέση αυτή και την εμφάνιση μιας διαφορετικής κατανομής των θερμοκρασιών στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου, συγκριτικά πάντα με τις θέσεις που δεν αποτελούν θερμογέφυρες. Αυτός είναι και ο λόγος που η εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία του δομικού στοιχείου στη θέση της θερμογέφυρας εμφανίζεται χαμηλότερη. Επηρεάζει επομένως το αίσθημα της θερμικής άνεσης στο εσωτερικό ενός χώρου, καθώς και η επιφανειακή θερμοκρασία μαζί με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα και την ταχύτητα κίνησής του στο εσωτερικό του χώρου είναι παράγοντες αποφασιστικής συμφωνίας στις ανταλλαγές θερμότητας μεταξύ ανθρώπινου σώματος και περιβάλλοντος[11].

## 2.4 Αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας

Για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας χρειάζεται ο υπολογισμός της αντιστάσεως θερμοδιαφυγής  $1/\Lambda$ . Η αντίσταση θερμοδιαφυγής υπολογίζεται από τα πάχη των στρώσεων των υλικών σε μέτρα προς τους αντίστοιχους συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας.

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (\text{εξίσωση 13})$$

Η αντίσταση θερμοπερατότητας υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντιστάσεων θερμικής μεταβάσεως προς τον αέρα και της αντίστασης θερμοδιαφυγής:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (\text{εξίσωση 14})$$

Οι συντελεστές θερμικής μετάβασης δίνονται στον πίνακα 2.5:

Πίνακας 2.5: Συντελεστές θερμικής μεταβίβασης

Α/Α	Δομικό στοιχείο	Συντελεστής θερμικής μετάβασης		Αντιστάσεις θερμικής μετάβασης	
		1/R <sub>si</sub>	1/R <sub>se</sub>	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>
		W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K	m <sup>2</sup> K/W	m <sup>2</sup> K/W
1	Εξωτερικοί τοίχοι και παράθυρα(προς εξωτερικό αέρα)	7.70	25.00	0.13	0.04
2	Τοίχος που συνορεύει με μη θερμαινόμενο χώρο	7.70	7.70	0.13	0.13
3	Τοίχος σε επαφή με το έδαφος	7.70	-	0.13	0.00
4	Στέγη, δώμα (ανερχόμενη ροή θερμότητας)	10.00	25.00	0.10	0.04
5	Οροφή που συνορεύει με μη θερμαινόμενο χώρο (ανερχόμενη ροή θερμότητας)	10.00	10.00	0.10	0.10
6	Δάπεδο πάνω από ανοικτή διάβαση (πilotή) (κατερχόμενη ροή θερμότητας)	5.88	25.00	0.17	0.04
7	Δάπεδο πάνω από μη θερμαινόμενο χώρο (κατερχόμενη ροή θερμότητας)	5.88	5.88	0.17	0.17
8	Δάπεδο σε επαφή με το έδαφος	5.88	-	0.17	0.00

## 2.5 Ενδογενείς παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας

Η θερμομονωτική ικανότητα εξαρτάται από:

- Τα υλικά των δομικών στοιχείων.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και κατά συνέπεια ο συντελεστής θερμοπερατότητας εξαρτώνται από το υλικό των δομικών στοιχείων καθώς κάθε υλικό έχει διαφορετικό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη μοριακή δομή του σώματος, έτσι μεταβάλλεται σημαντικά ανάμεσα σε σώματα διαφορετικής φάσης. Στα στερεά όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι ισχυρές, οι τιμές του συντελεστή είναι μεγάλες. Μικρότερες τιμές παίρνει στα υγρά, ενώ στα αέρια που οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι ασθενείς, παίρνει τις μικρότερες τιμές.

- **Τα πάχη των διαδοχικών στρώσεων.**

Όπως φαίνεται από τον ορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, η τιμή του είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του υλικού που έχει τοποθετηθεί στην τοιχοποιία. Διαφοροποιήσεις στο πάχος των υλικών που τοποθετούνται στην τοιχοποιία, ειδικά του θερμομονωτικού υλικού είναι δυνατόν να προκαλέσουν σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα στην θεωρητική τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας και την αντίστοιχη τιμή που ισχύει στην πραγματικότητα. Ο παράγοντας αυτός έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την επιθεώρηση παλαιών κατασκευών, ειδικά αυτών που προηγούνταν χρονικά του Κανονισμού Θερμομόνωσης.
- **Τον προσανατολισμό της επιφάνειας και της κατεύθυνσης ροής.**

Εάν η επιφάνεια είναι οριζόντια και το θερμό στοιχείο είναι πάνω από το ψυχρό, όπως η περίπτωση δαπέδου πάνω από υπόγειο το χειμώνα, ή η περίπτωση θερμαινόμενης οροφής, τότε η θερμική μεταφορά είναι μικρή. Εάν πρόκειται για ψυχρό δάπεδο, ο αέρας που ψύχεται σε επαφή με αυτό, βαραίνει και βρίσκεται ακινητοποιημένος στο δάπεδο. Εάν αντίθετα πρόκειται για θερμαινόμενη οροφή, ο αέρας θερμαινόμενος γίνεται ελαφρύτερος και ακινητοποιείται στην οροφή. Στην περίπτωση που το θερμό στοιχείο είναι πάνω από το ψυχρό, όπως στο θερμαινόμενο δάπεδο, η θερμική μεταφορά είναι μεγάλη. Στις κατακόρυφες επιφάνειες η διεύθυνση της ροής δεν παίζει σημαντικό ρόλο.[2]
- **Το μέσο με το οποίο βρίσκεται σε επαφή η επιφάνεια.**

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας αλλάζει ανάλογα με το μέσο με το οποίο βρίσκεται σε επαφή το δομικό στοιχείο. Όταν η επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με αέρα τότε ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (8). Όταν η επιφάνεια είναι σε επαφή το έδαφος ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας γίνεται με την εξίσωση 8 με την μόνη διαφορά ότι η εξωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης  $R_{se}$  μηδενίζεται καθώς δεν υπάρχει εξωτερικό στρώμα αέρα που θα προβάλλει αντίσταση στη ροή θερμότητας. Σε περίπτωση που η επιφάνεια έρχεται σε επαφή με κλειστό μη θερμαινόμενο χώρο, η ροή θερμότητας μέσω του δομικού στοιχείου που διαχωρίζει το θερμαινόμενο από τον μη θερμαινόμενο προς το εξωτερικό περιβάλλον, επηρεασμένη κατά την ποσότητα θερμότητας που απάγεται ή μεταφέρεται μέσω αερισμού στο μη θερμαινόμενο χώρο.[5].
- **Την ταχύτητα του ανέμου.**

Ο αέρας θερμοκρασίας  $T_a$  που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια θερμοκρασίας  $T_e$  ψύχεται και η θερμοκρασία του πλησιάζει αυτή της επιφάνειας οπότε οι εναλλαγές τείνουν να μειωθούν. Ο αέρας που κρύωσε αντικαθίσταται από θερμότερο αέρα. Όσο ταχύτερα γίνεται αυτή η αντικατάσταση δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αέρα, τόσο σημαντικότερες είναι οι εναλλαγές. Η κίνηση του αέρα οφείλεται στο γεγονός ότι ψύχεται. Δεδομένου ότι ο ψυχρός

αέρα είναι βαρύτερος του θερμού προκύπτει πάντοτε μια κίνηση του αέρα ανοδική ή καθοδική.

Η κίνηση του αέρα οφείλεται ακόμα και σε άλλα φαινόμενα: αερισμό των χώρων, διεισδύσεις από χαραμάδες, άνοιγμα παραθύρων, μετακίνηση ατόμων, μετάβαση κατά μήκος των θερμαντικών σωμάτων[2].

- **Την προσρόφηση της υγρασίας από τα υλικά.**

Η συμπύκνωση των υδρατμών σε κάποιο τμήμα της μάζας ενός δομικού στοιχείου προκαλεί εκτόπιση του υπάρχοντος αέρα, άρα κάνει 25 φορές πιο θερμοαγωγίμο αυτό το τμήμα του στοιχείου. Τελικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση του συντελεστή θερμοπερατότητας του στοιχείου με ανάλογες επιπτώσεις στην αύξηση των θερμικών απωλειών, την μείωση των εσωτερικών θερμοκρασιών του κτιριακού περιβλήματος.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η συμβολή του συμπυκνώματος υδρατμών στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της θερμομονωτικής στρώσης ενός δομικού στοιχείου και στο συντελεστή θερμοπερατότητάς του.[2]

## 2.6 Υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας βάσει μετρήσεων

Συχνά, η διαφορά μεταξύ της θεωρητικής τιμής του συντελεστή θερμοπερατότητας και της τιμής που προκύπτει από τις μετρήσεις είναι αρκετά μεγάλη. Γι'αυτό κρίνεται απαραίτητο να καθοριστούν απλές και αποτελεσματικές μέθοδοι για την εκτίμηση του. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας, υπό σταθερές συνθήκες, την ροή θερμότητας που μεταφέρεται μέσω ενός στοιχείου με ένα θερμοροόμετρο και τις θερμοκρασίες στις δύο πλευρές του στοιχείου.

Όμως, επειδή οι σταθερές συνθήκες είναι δύσκολο να επιτευχθούν στην πράξη, μια τέτοια μέτρηση είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Η δυσκολία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Επιβάλλοντας σταθερές συνθήκες χρησιμοποιώντας ένα θερμό και ένα ψυχρό δοχείο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στο εργαστήριο αλλά δεν είναι πρακτικό να εφαρμόζεται σε πραγματικές κατασκευές.
2. Υποθέτοντας ότι οι τιμές της θερμικής ροής και των θερμοκρασιών σε μεγάλη χρονική περίοδο δίνουν μια καλή εκτίμηση των σταθερών συνθηκών. Η μέθοδος αυτή ισχύει αν:
  - Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών και ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς είναι σταθερά παρά τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που επικρατούν στις μετρήσεις.
  - Η αλλαγή στην ποσότητα της θερμότητας που είναι αποθηκευμένη στο στοιχείο είναι αμελητέα σε σχέση με την ποσότητα της θερμότητας που



μεταφέρεται διαμέσου του στοιχείου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως αλλά μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες περιόδους μετρήσεων και να δώσει λανθασμένα αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις.

- Χρησιμοποιώντας μια δυναμική θεωρία που θα λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις της θερμικής ροής και των θερμοκρασιών στην ανάλυση των δεδομένων[12].

### 2.6.1 Σύγκριση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών

Οι τιμές που έχουν υπολογιστεί με βάση την δομή των στοιχείων μπορούν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τις μετρήσεις. Σημαντικές διαφορές (μεγαλύτερες από 20%) μεταξύ των τιμών της αντίστασης ή του συντελεστή θερμοπερατότητας που έχουν υπολογιστεί και αυτών που προκύπτουν από τις μετρήσεις μπορεί να οφείλονται σε έναν συνδυασμό των παρακάτω παραγόντων:

1. Οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιούνται μπορεί να μην είναι οι πραγματικές. Αυτό μπορεί να προκύψει από εσφαλμένη αναγνώριση των υλικών, κυρίως των θερμομονωτικών, από διαφορές μεταξύ των πραγματικών ιδιοτήτων και αυτών που λαμβάνονται υπόψη, ή από την επίδραση της υγρασίας.
2. Το ακριβές πάχος των στρώσεων, ειδικά αυτών που αποτελούνται από θερμομονωτικά υλικά δεν μετρήθηκε σωστά
3. Οι μετρήσεις της θερμικής αντίστασης και του συντελεστή θερμοπερατότητας δεν πραγματοποιήθηκαν σωστά ή έγιναν κάτω από φτωχές θερμικές συνθήκες.
4. Ο έλεγχος των υλικών και οι μετρήσεις δεν έγιναν στο ίδιο σημείο ενός ανομοιογενούς στοιχείου.
5. Οι γραμμές θερμικής ροής δεν ήταν ίσιες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και κάθετες προς το στοιχείο
6. Υπήρχαν ροές αέρα εκ μεταφοράς στο στοιχείο που επηρέασαν τις μετρήσεις αλλά δεν λήφθηκαν υπόψη στον υπολογισμό της θεωρητικής τιμής.
7. Υπάρχουν αλλαγές φάσης όπως η ψύξη και η συμπύκνωση νερού ή υγρασίας.
8. Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας δεν είναι αυτές που μετρήθηκαν[12].

### 2.6.2 Γενικά για τη θερμοροή μέσω τοιχοποιίας

Θερμότητα μεταφέρεται από ένα δομικό στοιχείο μέσω της ανταλλαγής ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας του στοιχείου και τις άλλες επιφάνειες και μέσω της μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η ποσότητα της μεταφοράς θερμότητας του περιβάλλοντος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον συντελεστή εκπομπής της εν λόγω επιφάνειας και των άλλων

επιφανειών. Στην εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου οι υπόλοιπες επιφάνειες είναι οι επιφάνειες που οριοθετούν τον χώρο και κάθε έπιπλο μέσα σε αυτό. Στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου περιλαμβάνουν του έδαφος, τον ουρανό, άλλα κτίρια, δέντρα και φράκτες.

Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η τραχύτητα της επιφάνειας και η ταχύτητα του ανέμου.

Η θερμική ροή προς και από το δείγμα επηρεάζεται από την θερμοκρασία του αέρα και του περιβάλλοντος σε κάθε πλευρά του [12].

### 2.6.3 Εξίσωση θερμικής ισορροπίας

Όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας μπορεί να προσδιοριστεί, η εξίσωση θερμικής ισορροπίας μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$q = E h_r (T_r' - T_s) + h_c (T_a - T_s) \quad (\text{εξίσωση 15})$$

όπου

$q$  είναι η πυκνότητα της θερμικής ροής στην επιφάνεια

$T_r'$  είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας

$T_a$  η θερμοκρασία του αέρα

$T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας

$h_r$  ο συντελεστής θερμικής ακτινοβολίας

$h_c$  ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς

Αυτή η εξίσωση ισχύει για θερμική ροή μέσα ή έξω από την επιφάνεια με το πρόσημο της να λαμβάνεται θετικό για θερμική ροή μέσα από την επιφάνεια. Το  $h_r$  είναι ίσο με  $4\sigma T_m^3$  όπου  $\sigma$  είναι ο συντελεστής Stefan Boltzmann και  $T_m = \frac{1}{2}(T_r' + T_s)$ . Για την περιβαλλοντική θερμοκρασία ισχύει ότι [12]:

$$q = \frac{T_{amb} - T_s}{R_s} \quad (\text{εξίσωση 16})$$

όπου  $T_{amb}$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος

$$T_{amb} = \frac{E h_r}{E h_r + h_c} T_r' + \frac{h_c}{E h_r + h_c} T_a \quad (\text{εξίσωση 17})$$

και  $R_s$  είναι η αντίσταση της επιφάνειας και δίνεται από την εξίσωση:

$$R_s = \frac{1}{Eh_r + h_c} \quad (\text{εξίσωση 18})$$

## 2.6.4 Θερμοκρασία περιβάλλοντος και συντελεστής θερμοπερατότητας

Η εξίσωση 16 κάνει χρήση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος που καθορίζει την θερμική ροή στην επιφάνεια. Υπάρχουν κάποιες δυσκολίες:

- Η  $T_{amb}$  δεν γίνεται αισθητή άμεσα
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν είναι σταθερή
- Διαφορετικές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας[12].

## 2.6.5 Προσδιορισμός της $T_{amb}$

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως ορίζεται από της εξίσωση 17 είναι μια εννοιολογική θερμοκρασία και δεν μπορεί να μετρηθεί. Μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση αν όλα τα μεγέθη είναι γνωστά, αλλά πρακτικά μόνο ο συντελεστής  $h_r$  μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια.

Μια καλή προσέγγιση για την θερμοκρασία  $T_a$  μπορεί να προσδιοριστεί από την μέτρηση με ένα θερμόμετρο, αλλά ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς  $h_c$  είναι λιγότερο ακριβής. Η τιμή που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η  $3\text{W/m}^2\text{K}$  για μεταφορά σε κάθετες επιφάνειες, αλλά μια διαφορετική τιμή είναι αναμενόμενη κοντά σε θερμαντικά σώματα ή κοντά στα παράθυρα. Υπάρχει αμφιβολία για το σημείο που θα μετρηθεί η θερμοκρασία  $T_a$ .

Το  $E$  είναι μια περίπλοκη συνάρτηση συντελεστών εκπομπής και παράγοντες, αν και σε πολλές περιπτώσεις λαμβάνει την τιμή  $0,9\text{W/m}^2\text{K}$ .

Ακόμα και αν η θερμοκρασία  $T_{amb}$  μπορεί να υπολογιστεί, η τιμή της δεν είναι σταθερή σε όλο το στοιχείο. Ένας θερμαινόμενος χώρος παρουσιάζει αποκλίσεις της θερμοκρασίας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση οπότε η τιμή της θερμοκρασίας  $T_a$  διαφέρει ανάλογα με το ύψος[12].

### 2.6.5.1 Συνθήκες μετρήσεως του συντελεστή θερμοπερατότητας

Αν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ισχύει ότι  $T_a \approx T_r$  τότε η θερμοκρασία  $T_{amb}$  δεν επηρεάζεται από τις τιμές των  $Eh_r$  και  $h_c$ , και η θερμοκρασία του αέρα. Όμως το

πρόβλημα που παραμένει είναι ότι η αντίσταση της επιφάνειας  $(Eh_r + h_c)^{-1}$ . Αυτή η παράμετρος διαφέρει στην περιοχή του εξεταζόμενου στοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι:

- Ο συντελεστής θερμοπερατότητας θα διαφέρει στην επιφάνεια του στοιχείου ακόμα και αν είναι ομοιογενές
- Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας που προκύπτει από τις μετρήσεις εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στις μετρήσεις και όχι μόνο από τις ιδιότητες των υλικών[12].

### 2.6.5.2 Εξωτερικές επιφάνειες

Όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, μια παρόμοια θεωρία μπορεί να αναπτυχθεί στις εξωτερικές επιφάνειες. Συνήθως, λόγω της ταχύτητας του ανέμου, ο συντελεστής  $h_c$  είναι μεγαλύτερος από το  $Eh_r$  οπότε η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό ορισμένες συνθήκες.

- Για συνθήκες καθαρού ουρανού, η θερμοκρασία ακτινοβολίας είναι πολύ μικρότερη από την θερμοκρασία του αέρα. Αυτό είναι σχετικό για τις οροφές.
- Η ηλιακή ακτινοβολία σε μία επιφάνεια δεν μπορεί να μετρηθεί από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας προκαλώντας σημαντικά σφάλματα στην μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας.

Τα δύο αυτά προβλήματα μπορούν να αγνοηθούν με την σκίαση της εξωτερικής επιφάνειας.

Η μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας είναι εξίσου αμφίβολη όταν η επιρροή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια είναι σημαντική, καθώς ο αισθητήρας θερμοκρασίας πρέπει να έχει τον ίδιο συντελεστή εκπομπής με τον αντίστοιχο της επιφάνειας[12].

### 2.6.6 Μέτρηση με θερμοροόμετρο

Δύο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των δεδομένων σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 9869 [12]:

- η μέθοδος μέσης τιμής (average method) που είναι απλή και
- η δυναμική μέθοδος η οποία είναι πιο περίπλοκη, δίνει ποιοτικά κριτήρια των μετρήσεων και μπορεί να μειώσει την διάρκεια δοκιμής για μεσαία και βαριά που επιβάλλονται σε μεταβλητές εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες.

### 2.6.6.1 Μέθοδος μέσης τιμής

Αυτή η μέθοδος υποθέτει πως η αγωγιμότητα και η μεταφορά μπορούν να υπολογιστούν διαιρώντας την πυκνότητα της θερμικής ροής προς την θερμοκρασιακή διαφορά. Αν ο δείκτης  $j$  προσδιορίζει τις μεμονωμένες διαδοχικές μετρήσεις, τότε η εκτίμηση της αντίστασης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (\text{εξίσωση 20})$$

Η θερμική αγωγιμότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Lambda = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})} \quad (\text{εξίσωση 21})$$

Και ο συντελεστής θερμοπερατότητας από τον τύπο:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (\text{εξίσωση 22})$$

Αν η εκτίμηση υπολογίζεται μετά από κάθε μέτρηση, τότε παρατηρείται σύγκλιση σε μία ασυμπτωτική τιμή. Αυτή η ασυμπτωτική τιμή είναι κοντά στην αληθινή αν ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

1. Η θερμότητα που περιέχει το στοιχείο είναι η ίδια στην αρχή και στο τέλος των μετρήσεων (ίδιες θερμοκρασίες και ίδια πυκνότητα υγρασίας).
2. Το θερμοροόμετρο δεν βρίσκεται εκτεθειμένο σε ηλιακή ακτινοβολία. Πρέπει να σημειωθεί ότι προκύπτουν λανθασμένα αποτελέσματα όταν η εξωτερική επιφάνεια είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία. Στις μετρήσεις της αντίστασης και της θερμικής αγωγιμότητας, το αποτέλεσμα θα είναι διαφορετικό σε σχέση με επιφάνεια που δεν εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος στις μετρήσεις του συντελεστή θερμοπερατότητας δεν περιέχει την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου.
3. Η θερμική αγωγιμότητα του στοιχείου είναι σταθερή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Για ελαφριά στοιχεία, τα οποία έχουν θερμοχωρητικότητα μικρότερη από  $20\text{kJ/m}^2\text{K}$  οι μετρήσεις είναι προτιμότερο να γίνονται κατά τη διάρκεια της νύχτας για την αποφυγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις μπορούν να σταματήσουν αν τα αποτελέσματα μετά από τρεις νύχτες δεν διαφέρουν περισσότερο από  $\pm 5\%$ .

Για πιο βαριά στοιχεία, τα οποία έχουν θερμοχωρητικότητα μεγαλύτερη από  $20\text{kJ/m}^2\text{K}$ , οι μετρήσεις γίνονται για χρονικό διάστημα πολλαπλάσιο των 24 ωρών. Οι μετρήσεις μπορούν να σταματήσουν όταν ικανοποιηθούν οι ακόλουθες συνθήκες:

- Το χρονικό διάστημα υπερβαίνει τις 72 ώρες
- Η τιμή της αντίστασης R που υπολογίζεται στο τέλος των μετρήσεων δεν διαφέρει περισσότερο από  $\pm 5\%$  από την τιμή που είχε μετρηθεί 24 ώρες πριν.
- Η τιμή της αντίστασης R που προκύπτει από την ανάλυση των δεδομένων από την πρώτη χρονική περίοδο δεν διαφέρει περισσότερο από  $\pm 5\%$  από τα δεδομένα της τελευταίας περιόδου μετρήσεων.
- Όταν η αλλαγή της θερμότητας που είναι αποθηκευμένη στο στοιχείο είναι πάνω από 5% από την θερμότητα που περνά διαμέσου του τοίχου στην τελευταία χρονική περίοδο[12].

#### 2.6.6.2 Ακρίβεια μέτρησης συντελεστή θερμοπερατότητας με χρήση θερμοροομέτρου

Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από:

1. Την ακρίβεια της βαθμονόμησης του θερμοροομέτρου και των αισθητήρων θερμοκρασίας. Το σφάλμα είναι περίπου 5% αν αυτά τα όργανα είναι βαθμονομημένα καλά.
2. Την ακρίβεια του συστήματος καταγραφής στοιχείων
3. Τυχαίες αλλαγές που προκαλούνται από μικρές διαφορές μεταξύ των αισθητήρων και της επιφάνειας. Η απόκλιση αυτή είναι περίπου 5% της τιμής αν οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι προσεκτικά. Αυτή η συμβολή στο συνολικό σφάλμα μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας αρκετά θερμοροόμετρα.
4. Τα λειτουργικά σφάλματα των θερμοροομέτρων οφείλονται στην τροποποίηση των ισοθερμικών που προκαλούνται από την παρουσία των θερμοροομέτρων. Αν τα λειτουργικά αυτά σφάλματα είχαν εκτιμηθεί από μια κατάλληλη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, και είχε εφαρμοστεί διόρθωση, η υπόλοιπη αβεβαιότητα είναι περίπου 2% με 3%.
5. Σφάλματα που προκαλούνται από την διακύμανση της θερμοκρασίας και της θερμικής ροής. Αυτά τα σφάλματα είναι σημαντικά αλλά μπορούν να μειωθούν σε λιγότερο από  $\pm 10\%$  από την τιμή που έχει μετρηθεί. Η συμβολή τους μπορεί να μειωθεί καταγράφοντας δεδομένα κατά τη διάρκεια μιας μακράς χρονικής περιόδου, μειώνοντας τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο ελάχιστο και χρησιμοποιώντας δυναμική ερμηνεία μεθόδων.
6. Διακυμάνσεις θερμοκρασίας και διαφορές μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος για μετρήσεις του συντελεστή θερμοπερατότητας.

Αν δεν συναντηθούν οι παραπάνω συνθήκες, οι μετρήσεις παραμένουν έγκυρες, αλλά με μια σχετικά μεγαλύτερη αβεβαιότητα

Η πιθανότητα να προκύψουν μεγάλα σφάλματα μπορεί να αυξηθεί όταν:

1. Οι θερμοκρασίες (κυρίως η εσωτερική) έχουν μεγάλες διακυμάνσεις (πριν ή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων) σε σύγκριση με την διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλευρών του στοιχείου.
2. Το στοιχείο είναι βαρύ και η χρονική διάρκεια των μετρήσεων είναι μικρή.
3. Το στοιχείο είναι εκτεθειμένο σε ηλιακή ακτινοβολία ή σε άλλες θερμικές επιρροές.
4. Δεν έχει εκτιμηθεί το λειτουργικό σφάλμα του θερμοροομέτρου (το οποίο μπορεί να φτάνει το 30% σε ορισμένες συνθήκες)

Η ακρίβεια των μετρήσεων του συντελεστή θερμοπερατότητας εξαρτάται από τον καθορισμό των θερμοκρασιών του περιβάλλοντος που έχουν υιοθετηθεί για τον συντελεστή θερμοπερατότητας και τις μετρήσεις τους[12].

### 2.6.7 Μέθοδος με θερμόμετρο ακριβείας

Η μέθοδος αυτή είναι προσεγγιστική και το αποτέλεσμα είναι ενδεικτικό της θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου.

Με θερμόμετρο ακριβείας μετράμε τις θερμοκρασίες αέρα εσωτερικά και εξωτερικά του δομικού στοιχείου. Για τις θερμοκρασίες της επιφάνειας καθώς και εσωτερικά του δομικού στοιχείου παίρνουμε μετρήσεις σε διάφορα ύψη από το δάπεδο και βγάζουμε μέσο όρο.

Η ροή θερμότητας δίνεται από τη σχέση[2]:

$$q = \frac{T_i - T_1}{R_i} = \frac{T_i - T_a}{R_{o\lambda}} = \alpha(T_i - T_a) \quad (\text{εξίσωση 23})$$

Οπότε ο συντελεστής θερμοπερατότητας προκύπτει:

$$U = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{T_i - T_1}{T_i - T_a} \quad (\text{εξίσωση 24})$$

### 2.6.8 Μέθοδος με χρήση θερμοκάμερας

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN15203 προσδιορίζει και περιγράφει αναλυτικά μεθόδους για τον υπολογισμό της θερμικής μεταφοράς του κελύφους του κτιρίου δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στη μέθοδο με θερμοροόμετρο. Η μέθοδος αυτή όμως είναι αργή ενώ τα αποτελέσματά της εξαρτώνται από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες και την συμπεριφορά των χρηστών κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Η μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας με θερμογραφικές τεχνικές παρόλο που δεν έχει ερευνηθεί πλήρως ακόμα, χρησιμοποιείται για περίπου 30 χρόνια στον κατασκευαστικό τομέα. Σύμφωνα με το Ιταλικό Πρότυπο UNI

9252:1988 η μέθοδος αναφέρεται ως ένας ποιοτικός τρόπος έρευνας και ανάλυσης των θερμικών ατελειών ενός κτιρίου. Αν και έχουν γίνει έρευνες όπου αναλύονται οι δυνατότητες και τα όρια της μεθόδου αυτής, πάντα θεωρείται ως ποιοτική και όχι ποσοτική μέθοδος ανάλυσης των θερμικών απωλειών. Ο κύριος περιορισμός είναι η δυσκολία μέτρησης ορισμένων παραμέτρων όπως ο επιφανειακός συντελεστής εκπομπής και η σωστή ερμηνεία του συντελεστή θερμικής μεταφοράς σε εξωτερικούς τοίχους.

Η μέτρηση με υπέρυθρη θερμογραφία είναι πιο γρήγορη σε σχέση με τη μέθοδο χρήσης θερμοροομέτρου και μπορεί να επαναληφθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα σε περίπτωση που χρειάζεται επανέλεγχος των αποτελεσμάτων προηγούμενων μετρήσεων.

Η θερμική μεταφορά ενός τοίχου δίνεται από την αναλογία της συνολικής θερμότητας που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου όπως φαίνεται στις ακόλουθες σχέσεις:

$$P = \frac{Q}{t} \quad (\text{εξίσωση 25})$$

$$U = \frac{P}{T_{in}-T_{out}} \quad (\text{εξίσωση 26})$$

Η θερμική ισχύς  $P$  που οφείλεται στην θερμότητα που μεταφέρεται από την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου προς το περιβάλλον περιγράφεται μέσω των εννοιών της θερμικής αγωγής, θερμικής μεταφοράς και ακτινοβολίας. Η συνεισφορά της θερμικής αγωγής μπορεί να αγνοηθεί.

Σύμφωνα με τον νόμο των Stefan-Boltzmann για την ακτινοβολία μέλανος σώματος ισχύει:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{εξίσωση 27})$$

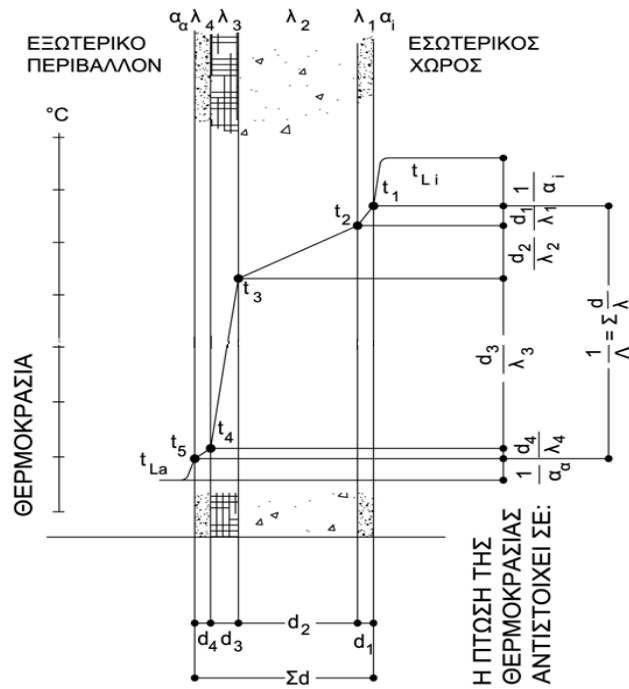
Όπου  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής υλικού,  $\sigma$  η σταθερά Stefan Boltzmann και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία.

Το ποσό της θερμικής ροής λόγω θερμικής μεταφοράς εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του αέρα και δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \alpha_c (T_s - T_{air}) \quad (\text{εξίσωση 28})$$

Όπου  $\alpha_c$  είναι ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς της επιφάνειας,  $T_{air}$  είναι η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος που βρίσκεται σε επαφή με το δομικό στοιχείο και  $T_s$  είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου.





Σχήμα 2.5: Μετάδοση της θερμότητας μέσα από σύνθετα μέλη κατασκευής.

Η θερμική ισχύς  $P$  είναι ίση με το άθροισμα της θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και της θερμότητας λόγω θερμικής μεταφοράς και δίνεται από το τύπο:

$$P = 5.67\varepsilon \left( \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right) + a_c(T_i - T_{out}) \quad (\text{εξίσωση 29})$$

Όπου  $P$  είναι η θερμική ισχύς που εκλύεται από το δομικό στοιχείο,  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής,  $T_i$  η θερμοκρασία της επιφάνειας,  $T_{out}$  η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος που βρίσκεται σε επαφή με το δομικό στοιχείο και  $a_c$  ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς.

Οπότε ο συντελεστής θερμοπερατότητας προκύπτει:

$$U = \frac{5.67\varepsilon \left( \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right) + a_c(T_i - T_{out})}{T_{int} - T_{out}} \quad (\text{εξίσωση 30})$$

Όλοι οι παράμετροι μπορούν να μετρηθούν με την ίδια θερμοκάμερα για την αποφυγή συστηματικών σφαλμάτων.

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν στην περίπτωση που οι μετρήσεις γίνονται στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου. Όταν οι μετρήσεις γίνονται στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου, τότε η θερμική ισχύς παίρνει την μορφή:

$$P = 5.67\varepsilon \left( \left( \frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 \right) + a_c(T_{in} - T_i) \quad (\text{εξίσωση 31})$$

Όπου  $T_{in}$  είναι η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και  $T_i$  είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας.

Αντίστοιχα, ο συντελεστής θερμοπερατότητας προκύπτει[13]:

$$U = \frac{5.67\varepsilon\left(\left(\frac{T_{in}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_i}{100}\right)^4\right) + \alpha_c(T_{in} - T_i)}{T_{int} - T_{out}} \quad (\text{εξίσωση 32})$$

## 2.7 Παράγοντες του περιβάλλοντος μετρήσεως

### 2.7.1 Κλιματικές συνθήκες

Η επιφανειακή θερμοκρασία εξαρτάται από την ροή θερμότητας μεταξύ της τοιχοποιίας και του περιβάλλοντος λόγω ακτινοβολίας και θερμικής μεταφοράς. Κατά την διάρκεια της νύχτας η τοιχοποιία ανταλλάσσει ακτινοβολία με τον ουρανό, το έδαφος και το περιβάλλον ανάλογα με τις ιδιότητες της επιφάνειας του τοίχου και των τοπικών κλιματολογικών συνθηκών. Η ροή θερμότητας λόγω θερμικής μεταφοράς εξαρτάται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου.

- Καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων για τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια πρέπει να υπάρχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασιών ανάμεσα στο εσωτερικό της κατασκευής και το περιβάλλον. Ο ιδανικότερος χρόνος μέτρησης είναι το χειμώνα με ελάχιστη ή καθόλου ηλιοφάνεια. Μετρήσεις κάτω από δυνατή ηλιοφάνεια είναι δυσχερείς μιας και το ποσοστό των ανακλάσεων είναι πολύ υψηλό και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με αποτέλεσμα αυτό που μετράται να μην είναι αυτό που πραγματικά εκπέμπεται από το σώμα.

Αντίστοιχα μετρήσεις κάτω από ισχυρή ψύξη οδηγούν σε εσφαλμένη εκτίμηση της θερμοκρασιακής κατάστασης του σώματος λόγω της βεβιασμένης ψύξης του. Για ταχύτητες ανέμου μέχρι 8 m/s χρησιμοποιείται ένας συντελεστής διόρθωσης ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με τη μετρούμενη υπερθέρμανση δίνει την υπερθέρμανση χωρίς άνεμο

- Τυπικές κλιματικές συνθήκες και κυρίως η εμφάνιση υγρασίας μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές ζημιές μέχρι και καταστροφή των δομικών υλικών μειώνοντας σε σημαντικό βαθμό την θερμομονωτική τους ικανότητα. Η κίνηση του νερού μέσω των τριχοειδών αγγείων και η διαφορετική θερμική του συμπεριφορά λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητάς του έχει σαν συνέπεια θερμοκρασιακές διαφορές στην επιφάνεια της κατασκευής. Το φαινόμενο της επιφανειακής συμπύκνωσης είναι συχνό στην περίπτωση κτιρίων με μεγάλη θερμομόνωση τα οποία βρίσκονται σε υγρό κλίμα καθώς προκαλείται μείωση της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου κατά τη διάρκεια της νύχτας ή μέχρι το σημείο υγροποίησης. Η επιφανειακή θερμοκρασία εξαρτάται από την

ροή θερμότητας μεταξύ της τοιχοποιίας και του περιβάλλοντος λόγω ακτινοβολίας και θερμικής μετάδοσης. Κατά την διάρκεια της νύχτας

### **2.7.2. Συνθήκες που επικρατούν στον χώρο των μετρήσεων και εργασίες συντήρησης**

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο πρέπει να είναι 10-15°C. Είναι καλύτερα οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα να γίνονται τη νύχτα ή νωρίς το πρωί ή κατά την διάρκεια μιας συννεφιασμένης μέρας όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εξεταζόμενου αντικειμένου και του περιβάλλοντος του είναι η μεγαλύτερη όποτε και αυξάνονται οι εκπεμπόμενες ροές με αποτέλεσμα οι χρωματικές διαφοροποιήσεις στο θερμογράφημα να είναι πιο ευκρινείς. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σταθερή θέρμανση των κτιρίων ώστε να υπάρχει θερμική ισορροπία για αρκετό χρονικό διάστημα.

Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού η εξωτερική επιφάνεια έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία . Συνεπώς η θερμογράφηση πρέπει να γίνεται νωρίς το απόγευμα όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού τοίχου είναι πιο υψηλή. Τα κτίρια πρέπει να ψύχονται σταθερά και σε περίπτωση νυχτερινής λήψης είναι απαραίτητη η ύπαρξη καθαρού ουρανού για να μην αντανακλάται η υπέρυθη ακτινοβολία στα σύννεφα[13].



# ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3***

## ***«Θερμογραφία και Συναφείς Παράγοντες»***

---



### 3.1 Εισαγωγή

Η θερμογραφία είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος με την οποία ανιχνεύουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που εμφανίζονται σε υλικά και εφαρμογές και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή τους. Σκοπό έχει την πρόληψη και την έγκυρη επιδιόρθωση ενός προβλήματος. Οι υπέρυθρες τεχνικές χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών της μηχανολογίας, ηλεκτρολογίας, ιατρικής.

Εντός κάποιων περιορισμών, η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται εξ αποστάσεως, έχει σχετικά χαμηλό κόστος και έχει την δυνατότητα ποιοτικής και ποσοτικής πληροφόρησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό και τον καθορισμό του μεγέθους ενός μεγάλου εύρους ατελειών, σφαλμάτων, διαρροών σε διάφορα αντικείμενα και εφαρμογές.

Κάθε μη καταστρεπτική μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι :

- Γρήγορη επιθεώρηση μεγάλων επιφανειών
- Επιθεώρηση χωρίς επαφή
- Ασφάλεια του προσωπικού καθώς δεν υπάρχει επιβλαβής ακτινοβολία
- Τα αποτελέσματα είναι σχετικά εύκολο να μελετηθούν δεδομένου ότι οι εικόνες μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία για να εξαχθούν περισσότερες πληροφορίες
- Ευρεία έκταση εφαρμογών

Τα μειονεκτήματα της είναι :

- Δυσκολία απόκτησης μιας γρήγορης ομοιόμορφης και ιδιαίτερα ενεργητικής θερμικής διέγερσης πάνω σε μια μεγάλη επιφάνεια.
- Επίδραση των θερμικών απωλειών (εκ μεταφοράς, ακτινοβολίας ) που συνήθως προκαλούν ψεύτικες μεταβολές θερμοκρασίας και έχουν επιπτώσεις στην αξιοπιστία της μέτρησης
- Δυνατότητα επιθεώρησης ενός περιορισμένου πάχους υλικού κάτω από την επιφάνεια

### 3.2 Αρχές Θερμογραφίας

Παρατυπίες στις θερμικές ιδιότητες των υλικών που αποτελούν το εξωτερικό κέλυφος ενός κτιρίου έχουν ως αποτέλεσμα διαφορές θερμοκρασίας στην επιφάνεια του

κτιρίου. Η διακύμανση στη θερμοκρασία της επιφάνειας επηρεάζεται από την ροή αέρα μέσω της κατασκευής. Η κατανομή της επιφανειακής θερμοκρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση θερμικών παρατυπιών, όπως ατέλειες στη μόνωση, υγρασία, διαρροές αέρα στα στοιχεία που αποτελούν την εξωτερική επιφάνεια του κελύφους.

Η θερμογραφία είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας σε ένα σημείο του κελύφους. Η θερμογραφία γίνεται με ένα σύστημα ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας το οποίο παράγει εικόνα που βασίζεται στην ακτινοβολία της θερμοκρασίας. Η θερμική ακτινοβολία εξαρτάται από τη θερμοκρασία της επιφάνειας, μετατρέπεται από το σύστημα ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας σε εικόνα που απεικονίζει την σχετική ένταση της θερμικής ακτινοβολίας από διαφορετικά μέρη της επιφάνειας. Η ένταση της ακτινοβολίας είναι μια συνάρτηση της επιφανειακής θερμοκρασίας, των χαρακτηριστικών της επιφάνειας και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ερμηνεία των θερμικών εικόνων[14].

### 3.2.1 Μέλαν σώμα

Μέλαν σώμα καλείται οποιοδήποτε σώμα που όταν λειτουργεί σαν πομπός εκπέμπει σε κάθε θερμοκρασία τη μέγιστη δυνατή ποσότητα θερμικής ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος. Όταν λειτουργεί σαν δέκτης θερμικής ακτινοβολίας απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία χωρίς να επιτρέπει ανάκλαση ή μεταφορά μέσω της μάζας του. Στην πράξη το απολύτως μέλαν σώμα δεν υπάρχει αλλά υπάρχουν σώματα που προσεγγίζουν την συμπεριφορά του. Συνεπώς μπορούμε να συσχετίσουμε την συμπεριφορά του υλικού που εξετάζεται με αυτή του μέλανος σώματος σε παρόμοιες περιπτώσεις. Το μέλαν σώμα εκπέμπει την μέγιστη δυνατή ποσότητα ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην απόλυτη θερμοκρασία του, ενώ απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό. Σύμφωνα με τον νόμο των Stefan-Boltzmann ο ρυθμός που ακτινοβολεί ενέργεια ένα μέλαν σώμα είναι ανάλογος της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του.

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{εξίσωση 33})$$

Όπου  $E_b$  είναι η ακτινοβολούμενη θερμοροή ανά μονάδα επιφανείας ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T_a$  και  $\sigma$  είναι η λεγόμενη σταθερά Stefan-Boltzmann και ισούται με  $56,7 \cdot 10^{-12} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$ . [2]

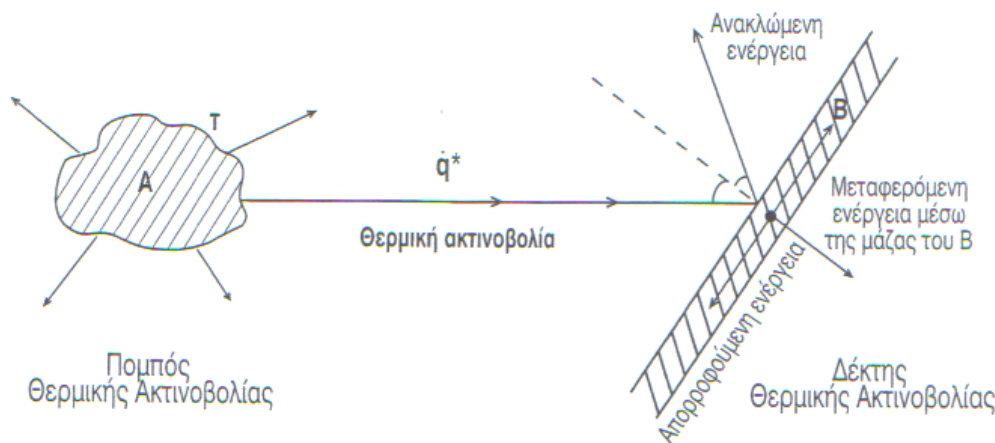


### 3.2.2 Απορρόφηση, ανάκλαση

Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία αδιαφανή επιφάνεια μπορεί να ανακλαστεί ή να απορροφηθεί από αυτή. Αν  $q'$  είναι η θερμική ισχύς που δέχεται ο δέκτης B του παρακάτω σχήματος τότε  $aq'$  απορροφούνται από το B και ανεβάζουν την θερμοκρασία του,  $\tau q'$  μεταφέρονται μέσω της μάζας του και  $\rho q'$  ανακλώνται. Οπότε προφανώς ισχύει:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (\text{εξίσωση 34})$$

Οι συντελεστές  $\alpha$ ,  $\tau$ ,  $\rho$  λέγονται συντελεστές απορρόφησης, μεταβίβασης και ανάκλασης του δέκτη B και παίρνουν τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ .



Σχήμα 3.1 : Απορρόφηση και ανάκλαση θερμικής ακτινοβολίας

Στα στερεά σώματα, η ανακλαστικότητα και η απορροφητικότητα μιας επιφάνειας εξαρτώνται από τη διαμόρφωση της επιφάνειας. Η ανακλαστικότητα λείων επιφανειών πλησιάζει προς τη μονάδα, ενώ η απορροφητικότητα τους είναι μειωμένη. Αντίθετα, τραχιές επιφάνειες εμφανίζουν υψηλή απορροφητικότητα και χαμηλή ανακλαστικότητα.

Η απορροφούμενη ακτινοβολία από το σώμα B μετατρέπεται σε θερμότητα και ανεβάζει την επιφανειακή θερμοκρασία του. Πολλά στερεά σώματα απορροφούν ακτινοβολία σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα. Σε ηλεκτρικούς αγωγούς η προσπίπτουσα ακτινοβολία πριν απορροφηθεί τελείως διεισδύει σε πάχος  $1\mu\text{m}$ . Στους μονωτές διεισδύει μέχρι  $2\text{mm}$ .

Για τις περισσότερες επιφάνειες η απορρόφηση εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και από τη θερμοκρασία του πομπού. Ο συντελεστής απορρόφησης  $\alpha$  ενός σώματος ορίζεται από το πηλίκιο:

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha(\lambda', T) q_\lambda d\lambda'}{\int_0^\infty q_\lambda d\lambda'} \quad (\text{εξίσωση 35})$$

Όπου  $q_l$  είναι η εκπεμπόμενη από ένα σώμα Α θερμοκρασίας  $T_0$  ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda'$  που δέχεται το σώμα Β.

$\alpha(\lambda', T)$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης του σώματος Β που βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T$ .

Σύμφωνα με το άρθρο 9 του Κ.Εν.Α.Κ. για το κτίριο αναφοράς η απορροφητικότητα των εξωτερικών του επιφανειών λαμβάνεται ίση με :

- 0,4 για τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία
- 0,4 για τα δώματα
- 0,6 για επικλινείς στέγες[2]

Στην περίπτωση αγωγών του ηλεκτρισμού, οι συντελεστές απορρόφησης και εκπομπής είναι φθίνουσες συναρτήσεις του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, σε αντίθεση με μονωτές και ημιαγωγούς. Σε λείες μεταλλικές επιφάνειες ο συντελεστής απορρόφησης είναι συνάρτηση των θερμοκρασιών πομπού και δέκτη:

$$\alpha = K\sqrt{T * T_0} \quad (\text{εξίσωση 36})$$

Όπου  $K$  είναι σταθερά

$T, T_0$  είναι οι θερμοκρασίες επιφάνειας δέκτη και πομπού αντίστοιχα.

Για μονωτές και ημιαγωγούς, ο συντελεστής απορρόφησης ισούται με τον συντελεστή εκπομπής, αναγόμενο στη θερμοκρασία του πομπού  $T_0$ :

$$\alpha = \varepsilon(T_0) \quad (\text{εξίσωση 37})$$

Το γυαλί επιτρέπει την μεταβίβαση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά είναι αδιαφανές στη συνήθων θερμοκρασιών θερμική ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται στο ότι το γυαλί είναι διαφανές σε ακτινοβολία μικρών μηκών κύματος (αντίστροφη αναλογία με τη θερμοκρασία) και αδιαφανές σε ακτινοβολία μηκών κύματος.

Τα υγρά σώματα σε λεπτές στιβάδες παρουσιάζουν μικρό συντελεστή απορρόφησης  $\alpha$  και μεγάλο συντελεστή μεταβίβασης  $\tau$ . Οι τιμές των  $\alpha$  και  $\tau$  εξαρτώνται από το πάχος, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τη δομή του υγρού. Στιβάδες μετρίου πάχους υγρών και στερεών παρουσιάζουν  $\tau = 0$ .

Για την απορρόφηση ακτινοβολίας από λεπτές στιβάδες νερού δεχόμαστε προσεγγιστικά  $\tau = 0$ .

Τα αέρια χημικά σώματα κατά πλειοψηφία είναι διαφανή στη θερμική ακτινοβολία:

$$\varepsilon = \alpha = 0, \quad \rho = 0, \quad \tau = 1$$

Τα πολυατομικά αέρια, οι ατμοί και τα μίγματά τους απορροφούν και εκπέμπουν ακτινοβολία ορισμένων μηκών κύματος. Οι συντελεστές απορρόφησης και εκπομπής

των αερίων είναι συνάρτηση της μερικής πίεσης  $P$ , της θερμοκρασίας και του πάχους τους  $S[2]$ :

$$\alpha = \alpha(T, P, S) \quad (\text{εξίσωση 38})$$

### 3.3 Διαδικασίες εκτίμησης παραμέτρων ρύθμισης

Οι κάμερες υπέρυθρων μετρούν και απεικονίζουν την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο. Το γεγονός ότι η ακτινοβολία αυτή είναι συνάρτηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του αντικειμένου επιτρέπει στην κάμερα να υπολογίζει και να εμφανίζει την εν λόγω θερμοκρασία

Ωστόσο η ακτινοβολία που μετράται από την κάμερα δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του αντικειμένου αλλά είναι συνάρτηση και του συντελεστή εκπομπής. Ακτινοβολία εκπέμπεται και από τον περιβάλλοντα χώρο και ανακλάται πάνω στο αντικείμενο. Η ακτινοβολία από το αντικείμενο και η ανακλώμενη ακτινοβολία επηρεάζονται επίσης και από την απορρόφηση της ατμόσφαιρας.

Συνεπώς, για να μετρηθεί επακριβώς η θερμοκρασία του αντικειμένου θα πρέπει να γίνει αντιστάθμιση των επιπτώσεων μιας σειράς από διαφορετικές πηγές ακτινοβολίας. Αυτό γίνεται αυτόματα από την θερμοκάμερα. Ωστόσο θα πρέπει να εισαχθούν οι ακόλουθες παράμετροι του αντικειμένου στην θερμοκάμερα[1]:

- Συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου
- Φαινόμενη θερμοκρασία ανάκλασης
- Απόσταση του αντικειμένου από την θερμοκάμερα
- Σχετική υγρασία
- Θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

#### 3.3.1 Εκτίμηση θερμοκρασίας ανάκλασης

Μία παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια της θερμογράφησης είναι η φαινόμενη θερμοκρασία ανάκλασης η οποία αντισταθμίζει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που ανακλάται πάνω στο αντικείμενο και καταλήγει στην θερμοκάμερα. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM, E 1862 – 97 (2002) υπάρχουν δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό της ανακλώμενης θερμοκρασίας πάνω σε δοκίμιο, η Μέθοδος της ανακλαστικής επιφάνειας και η Άμεση Μέθοδος[15].

### 3.3.1.1. Μέθοδος της ανακλαστικής επιφάνειας

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E 1862-97 η μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας ανάκλασης με τη μέθοδο της ανακλαστικής επιφάνειας περιγράφεται ως εξής:

1. Αρχικά ρυθμίζεται ο συντελεστή εκπομπής στην θερμοκάμερα στην τιμή 1,00.
2. Τοποθετείται η θερμοκάμερα στη συσκευή στήριξης στην επιθυμητή τοποθεσία και απόσταση από το δοκίμιο.
3. Στη συνέχεια η κάμερα κατευθύνεται προς το δοκίμιο εστιάζοντας στο τμήμα του δοκιμίου όπου είναι να μετρηθεί η ανακλώμενη θερμοκρασία.
4. Τοποθετείται η ανακλαστική επιφάνεια της υπέρυθρης ακτινοβολίας μπροστά στο δοκίμιο και σε θέση παράλληλη με αυτό διατηρώντας μια ασφαλή απόσταση εργασίας από οποιοδήποτε θερμαινόμενο, ηλεκτροδοτούμενο ή οποιονδήποτε άλλον επικίνδυνο στόχο.
5. Χωρίς να μετακινηθεί η συσκευή απεικόνισης, και χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη λειτουργία ανάλυσης εικόνας από κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας (όπως θερμοκρασία σημείου, θερμοκρασία πάνω σε ευθεία γραμμή ή ισοθερμοκρασιακή καμπύλη), μετράται και καταχωρείται η φαινόμενη επιφανειακή θερμοκρασία της ανακλαστικής επιφάνειας που δίνεται από το λογισμικό της συσκευής της κάμερας, δηλαδή η ανακλώμενη θερμοκρασία.
6. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 5 για τουλάχιστον τρεις φορές και υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία για να προκύψει η μέση ανακλώμενη θερμοκρασία.[3]

### 3.3.1.2. Άμεση Μέθοδος

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E 1862-97 η άμεση μέθοδος για την μέτρηση της θερμοκρασίας ανάκλασης περιγράφεται ως εξής[15]:

1. Ρυθμίζεται ο συντελεστής εκπομπής στο χειριστήριο της κάμερα στην τιμή 1,00.
2. Η κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας τοποθετείται στη συσκευή στήριξης στην επιθυμητή τοποθεσία και απόσταση από το δοκίμιο.
3. Στη συνέχεια κατευθύνεται προς το δοκίμιο εστιάζοντας στο τμήμα του όπου θα μετρηθεί η θερμοκρασία ανάκλασης.
4. Υπολογίζεται η γωνία ανάκλασης και η γωνία πρόσπτωσης.
5. Αφαιρείται η συσκευή απεικόνισης από το τρίποδο και τοποθετείται κατά τέτοιο τρόπο που να σημαδεύει από το δοκίμιο προς την κατεύθυνση της γωνίας ανάκλασης. Χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη λειτουργία ανάλυσης εικόνας από κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας (όπως θερμοκρασία σημείου, θερμοκρασία πάνω σε ευθεία γραμμή ή ισοθερμοκρασιακή καμπύλη), μετράται και καταχωρείται η φαινόμενη επιφανειακή θερμοκρασία της ανακλαστικής επιφάνειας που δίνεται

από το λογισμικό της συσκευής της κάμερας. Αυτή είναι η θερμοκρασία ανάκλασης πάνω σε αυτό το δοκίμιο.

6. Εάν η επιφάνεια του δοκιμίου είναι μία διαχυτική ανακλαστική επιφάνεια, η κάμερα κατευθύνεται προς ποικίλες κατευθύνσεις εντός  $45^\circ$  εκατέρωθεν της γωνίας πρόσπτωσης και υπολογίζεται τη μέση τιμή των αναφερόμενων θερμοκρασιών. Αυτή η μέση τιμή είναι η θερμοκρασία ανάκλασης πάνω σε αυτό το δοκίμιο.
7. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 για τουλάχιστον τρεις φορές και υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία για να προκύψει η μέση θερμοκρασία ανάκλασης.[14]

### 3.3.2 Εκτίμηση συντελεστή εκπομπής

Ο συντελεστής εκπομπής είναι ο λόγος της ακτινοβολίας ενός σώματος σε μία δοσμένη θερμοκρασία προς την ακτινοβολία ενός σώματος που απορροφά όλη την ακτινοβολία στην ίδια θερμοκρασία και κυμαίνεται μεταξύ 0 ( για έναν τέλειο ανακλαστήρα ) και 1 ( για έναν τέλειο εκπομπό, το μέλαν σώμα). Ο συντελεστής εκπομπής ενός σώματος ορίζεται:

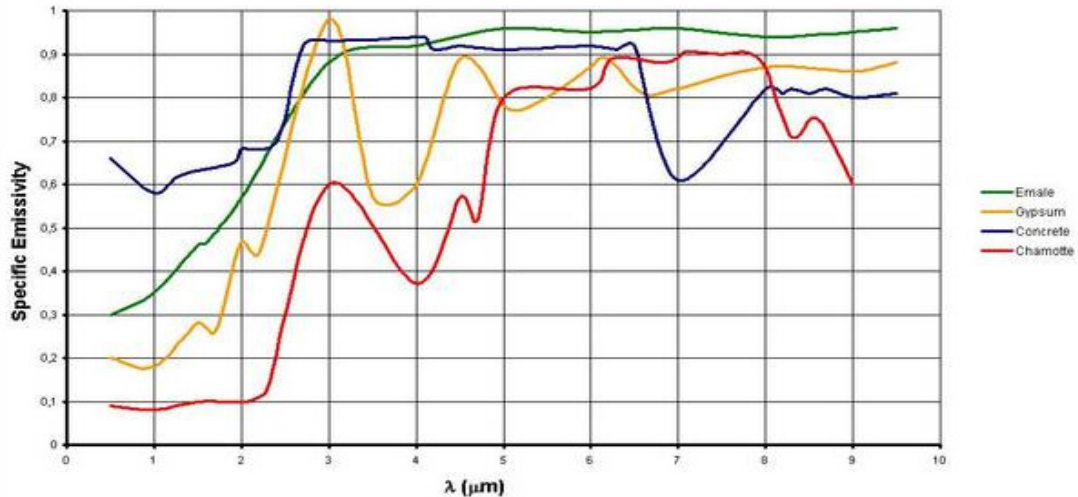
$$\varepsilon = \frac{q(T)}{q_0(T)} = \frac{\int_0^\infty q_\lambda(T)d\lambda}{\int_0^\infty q_{0\lambda}(T)d\lambda} \quad (\text{εξίσωση 39})$$

Όπου  $q(T)$  η ανά μονάδα επιφάνειας πομπού εκπεμπόμενη εκπεμπόμενη ολική ακτινοβολία ισχύς και  $q_0(T_0)$  η αντίστοιχη μαύρου σώματος.

Ο συντελεστής εκπομπής  $\varepsilon$  ενός σώματος εξαρτάται από τη φύση, τη διαμόρφωση και τη θερμοκρασία της επιφάνειας εκπομπής, από την οξείδωση της επιφάνειας, τον βαθμό πόλωσης της επιφάνειας και το μήκος κύματος.

Στα μεταλλικά σώματα η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τον συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon$ , ενώ στα μη μεταλλικά σώματα τον μειώνει.

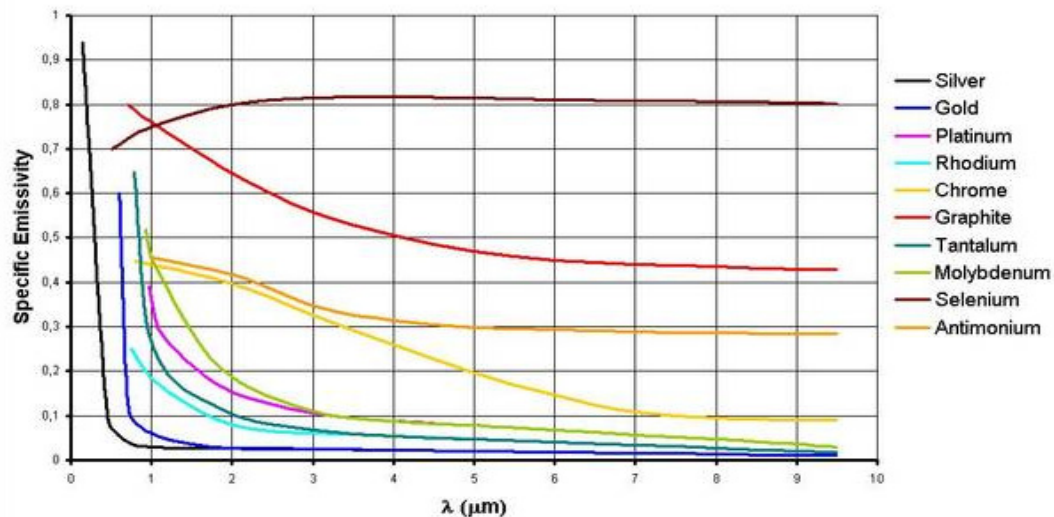
Λείες και στιλπνές επιφάνειες παρουσιάζουν μικρότερες τιμές  $\varepsilon$  από μη λείες ή οξειδωμένες. Έτσι, οι ικανότητες εκπομπής των στιλβωμένων μετάλλων κυμαίνονται στο διάστημα 0,03 ως 0,08, ενώ των οξειδωμένων μετάλλων στο 0,60 ως 0,85. Πυρίμαχα, αμέταλλα ξύλα, δομικά υλικά έχουν τιμές στο διάστημα 0,65 ως 0,95.



Σχήμα 3.3: Γραφική παράσταση μεταβολής συντελεστή εκπομπής σε σχέση με το μήκος κύματος για τα μη μεταλλικά υλικά: σμάλτο, γύψο, μπετόν, πυρίμαχος άργιλος.

Πηγή: L. Walther, D. Gerber "Infrarotmeßtechnik", Verlag Technik, Berlin 1983

Αντίθετα τα μέταλλα έχουν γενικά χαμηλό συντελεστή εκπομπής ο οποίος είναι σημαντικά εξαρτημένος από τις ιδιότητες της επιφάνειας και μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος. Έτσι απαιτείται μεγάλη προσοχή ως προς το μήκος κύματος στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Συνήθως επιλέγεται το μικρότερο δυνατό όπου εξασφαλίζεται ο μεγαλύτερος συντελεστής εκπομπής ενώ παράλληλα ελαττώνεται και το σφάλμα στην μέτρηση που διεξάγεται.



Σχήμα 3.4 :Γραφική παράσταση μεταβολής συντελεστή εκπομπής σε σχέση με το μήκος κύματος για τα μέταλλα: ασήμι, χρυσός, λευκόχρυσος, ρόδιο, χρώμιο, γραφίτης, ταντάλιο, μόλυβδος, σελήνιο, αντιμόνιο αντίστοιχα.

Πηγή: L. Walther, D. Gerber "Infrarotmeßtechnik", Verlag Technik, Berlin 1983

Στα μη μεταλλικά αντικείμενα η θερμογράφηση είναι εύκολη λόγω του υψηλού συντελεστή εκπομπής των υλικών, σε αντίθεση με τα μεταλλικά και γυάλινα αντικείμενα[2].

Η τιμή του συντελεστή εκπομπής κάθε υλικού είναι καθορισμένη και μπορεί εύκολα να βρεθεί, επειδή όμως οι συνθήκες μέτρησης δεν είναι ιδανικές η τιμή αυτή πρέπει να επαληθευτεί. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1933-99a (Reapproved 2005) υπάρχουν δύο μέθοδοι για την μέτρηση του συντελεστή εκπομπής μιας επιφάνειας, η μέθοδος με το θερμόμετρο επαφής και η μέθοδος με το θερμόμετρο εξ αποστάσεως. Για τις δύο αυτές μεθόδους χρησιμοποιείται η ακόλουθη διάταξη μετρήσεων :

- Κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας με ενσωματωμένο υπολογιστή όπου υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των τιμών της θερμοκρασίας ανάκλασης και συντελεστή εκπομπής
- Συσκευή στήριξης της θερμοκάμερας
- Φυσικό ή τεχνητό τρόπο θέρμανσης ή ψύξης του δοκιμίου σε θερμοκρασία τουλάχιστον 20°C πάνω ή κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Ένα βαθμονομημένο θερμόμετρο επαφής για την μέθοδο με τη χρήση θερμομέτρου επαφής
- Ένα υλικό επίστρωσης της ελεγχόμενης επιφάνειας με γνωστό συντελεστή εκπομπής σε θερμοκρασία κοντινή σε αυτή του δοκιμίου και στην ίδια περιοχή συχνοτήτων φάσματος με αυτήν της κάμερας.

### 3.3.2.1. Μέθοδος με τη χρήση θερμομέτρου επαφής

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1933-99a (Reapproved 2005) η μέτρηση του συντελεστή εκπομπής με τη χρήση θερμομέτρου επαφής ορίζεται ως εξής[16]:

1. Η κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας τοποθετείται στο τρίποδο ή στη συσκευή στήριξης στην επιθυμητή τοποθεσία και απόσταση από το δοκίμιο.
2. Στη συνέχεια κατευθύνεται προς το δοκίμιο και εστιάζουμε πάνω στο τμήμα του όπου θα μετρηθεί ο συντελεστής εκπομπής.
3. Χρησιμοποιείται μια κατάλληλη λειτουργία ανάλυσης εικόνας από κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας (όπως θερμοκρασία σημείου, θερμοκρασία πάνω σε ευθεία γραμμή ή ισοθερμοκρασιακή καμπύλη) για να εκτιμηθεί και να αντισταθμιστεί το σφάλμα από την θερμοκρασία ανάκλασης η οποία προσπίπτει στο δοκίμιο.
4. Με το θερμόμετρο επαφής προσμετράται η θερμοκρασία του σημείου ή της περιοχής που μόλις μετρήθηκε στο βήμα 3. Η μέτρηση αυτή αποθηκεύεται.
5. Χωρίς να μετακινηθεί η συσκευή απεικόνισης, ρυθμίζεται η τιμή του συντελεστή εκπομπής στο χειριστήριο της κάμερας μέχρι του σημείου όπου ο υπολογιστής της κάμερας δείχνει την ίδια θερμοκρασία που καταγράφηκε στο βήμα 4. Η τιμή του συντελεστή εκπομπής που είναι ρυθμισμένη εκείνη τη στιγμή είναι η

μετρούμενη για αυτό το δοκίμιο, για αυτή τη θερμοκρασία και την περιοχή συχνοτήτων του φάσματος.

6. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 5 για τουλάχιστον τρεις φορές και υπολογίζεται ένας μέσος συντελεστής εκπομπής.[15]

### 3.3.2.2 Μέθοδος με τη χρήση θερμομέτρου εξ αποστάσεως

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1933-99a (Reapproved 2005) η μέτρηση του συντελεστή εκπομπής με τη χρήση θερμομέτρου εξ αποστάσεως ορίζεται ως εξής[16]:

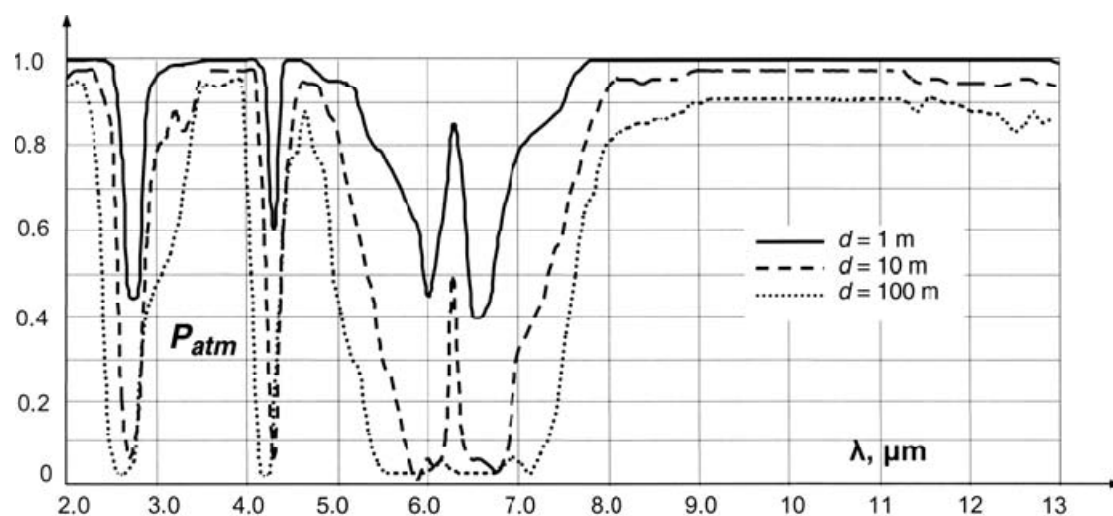
1. Αρχικά η κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας τοποθετείται στο τρίποδο ή στη συσκευή στήριξης στην επιθυμητή τοποθεσία και απόσταση από το δοκίμιο.
2. Στη συνέχεια κατευθύνεται προς το δοκίμιο εστιάζοντας πάνω στο τμήμα του όπου θα μετρηθεί ο συντελεστής εκπομπής.
3. Χρησιμοποιείται μια κατάλληλη λειτουργία ανάλυσης εικόνας από κάμερα υπέρυθρης ακτινοβολίας (όπως θερμοκρασία σημείου, θερμοκρασία πάνω σε ευθεία γραμμή ή ισοθερμοκρασιακή καμπύλη) για να εκτιμηθεί και να αντισταθμιστεί το σφάλμα από την ανακλώμενη θερμοκρασία η οποία προσπίπτει στο δοκίμιο.
4. Εφαρμόζεται το υλικό διαφοροποίησης της επιφάνειας πάνω ή ακριβώς δίπλα στο τμήμα του δοκιμίου όπου είναι να μετρηθεί ο συντελεστής εκπομπής. Το υλικό διαφοροποίησης της επιφάνειας θα πρέπει να είναι στεγνό και σε καλή επαφή με το δοκίμιο
5. Εισάγεται η γνωστή τιμή του συντελεστή εκπομπής του υλικού διαφοροποίησης της επιφάνειας στον υπολογιστή της κάμερας στη ρύθμιση που ζητά την εισαγωγή της τιμής του συντελεστή εκπομπής του απεικονιζόμενου αντικειμένου. Ο συντελεστής εκπομπής συμβολίζεται συχνά με το ελληνικό γράμμα έψιλον.
6. Με την κάμερα λαμβάνεται μέτρηση της θερμοκρασίας του υλικού επίστρωσης. Η μέτρηση αυτή αποθηκεύεται.
7. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του προγράμματος FLIR Quickreport μεταβάλλεται η τιμή του συντελεστή εκπομπής μέχρι του σημείου όπου η θερμοκρασία του τμήματος που βρίσκεται δίπλα από το υλικό επίστρωσης να εξισωθεί με την θερμοκρασία που καταγράφηκε στο βήμα 6. Η τιμή του συντελεστή εκπομπής που είναι ρυθμισμένη εκείνη τη στιγμή είναι η μετρούμενη για αυτό το δοκίμιο, για αυτή τη θερμοκρασία και την περιοχή συχνοτήτων του φάσματος.
8. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 1 έως 7 για τουλάχιστον τρεις φορές και υπολογίζουμε έναν μέσο συντελεστή εκπομπής.
9. Αντισταθμίζουμε το σφάλμα λόγω του συντελεστή εκπομπής εισάγοντας την υπολογισμένη μέση τιμή του στην κατάλληλη ρύθμιση του χειριστηρίου της κάμερας. [15]



### 3.3.3 Εξασθένηση του υπέρυθρου σήματος λόγω του αέρα

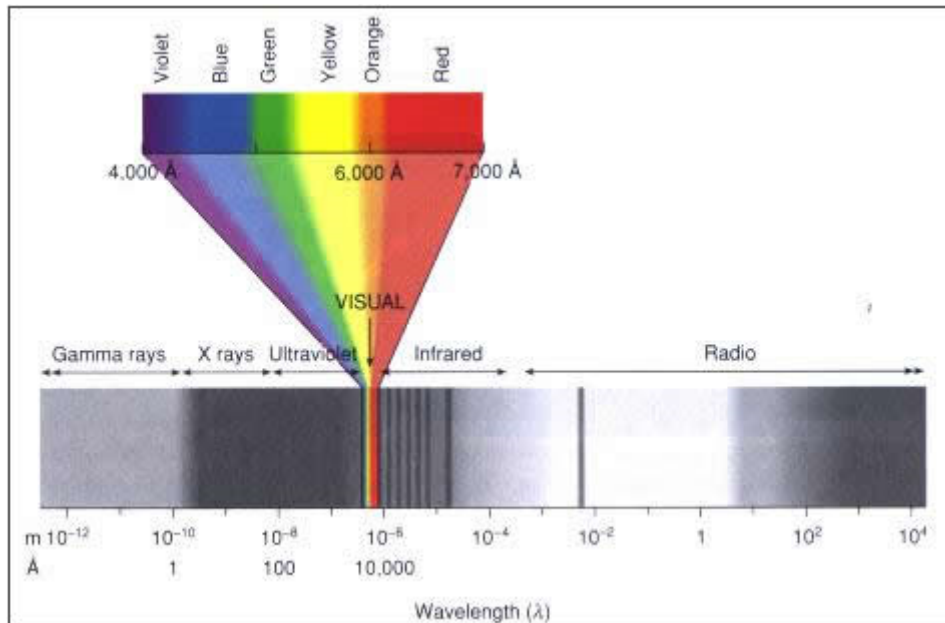
Εφόσον η υπέρυθρη θερμογραφία είναι διεργασία «μη επαφής», η υπέρυθρη ακτινοβολία μεταδίδεται σε κάποια απόσταση ανάμεσα στην μετρητική διάταξη και το εξεταζόμενο αντικείμενο. Συνεπώς το μέσο διάδοσης επιδρά στο αποτέλεσμα της μέτρησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μέσο διάδοσης είναι ο αέρας με ορισμένες εξαιρέσεις. Στον αέρα υπάρχουν συστατικά όπως υδρατμοί και διοξείδιο του άνθρακα τα οποία επηρεάζουν την διαπερατότητά του από την υπέρυθρη ακτινοβολία.

Ο βαθμός διαπερατότητας σχετίζεται με το μήκος κύματος. Ενώ η διαπερατότητα στην περιοχή 8-14 $\mu\text{m}$  (μεγάλα μήκη κύματος) παραμένει σταθερά υψηλή για μεγάλες αποστάσεις, στην περιοχή 3-5 $\mu\text{m}$  (μεσαία μήκη κύματος) παρατηρείται απόσβεση σε μερικές δεκάδες μέτρα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή φασματικής διαπερατότητας του αέρα σε σχέση με το μήκος κύματος και επισημαίνονται οι τρεις περιοχές όπου η ατμοσφαιρική απορρόφηση δεν είναι σημαντική. Η περιοχή I αντιστοιχεί σε πολύ μικρά μήκη κύματος, η περιοχή II αντιστοιχεί στα μικρά μήκη κύματος 3-5 $\mu\text{m}$  και η περιοχή III αντιστοιχεί στα μεγάλα μήκη κύματος 8-14 $\mu\text{m}$ . [17]



Σχήμα 3.5:Κατανομή φασματικής διαπερατότητας αέρα σε σχέση με το μήκος κύματος για διαφορετικές τιμές απόστασης θερμοκάμερας-εξεταζόμενο αντικείμενο.

Η θερμογραφία αξιοποιεί την ζώνη υπέρυθρων του φάσματος. Στην πλευρά των μικρότερων μηκών κύματος το σύνορο της ζώνης των υπέρυθρων βρίσκεται στο όριο του ορατού φάσματος. Στην πλευρά των μεγαλύτερων μηκών κύματος η ζώνη των υπέρυθρων συγχωνεύεται με τα μήκη κύματος της ζώνης μικροκυμάτων.



Σχήμα 3.6: Φάσμα ακτινοβολίας.

Η ζώνη των υπέρυθρων συχνά υποδιαιρείται σε τέσσερις μικρότερες ζώνες:

- Την ζώνη εγγύς υπέρυθρων με μήκη κύματος  $0,75 - 3\mu\text{m}$
- Την ζώνη των μέσων υπέρυθρων με μήκη κύματος  $3 - 6\mu\text{m}$
- Την ζώνη των άπω υπέρυθρων με μήκη κύματος  $6 - 15\mu\text{m}$
- Την ζώνη των απωτάτων υπέρυθρων με μήκη κύματος  $15 - 100\mu\text{m}$

Οι υπέρυθροι ανιχνευτές λειτουργούν στις ζώνες μέγιστης δυνατής μεταφοράς. Υπάρχουν δύο ζώνες υπέρυθρων όπου η μεταφορά μεγιστοποιείται, οπότε δύο τύποι υπέρυθρων ανιχνευτών διακρίνονται πιο συχνά: [1,17]

- Οι ανιχνευτές μικρού μήκους κύματος που λειτουργούν σε μήκη  $2-5\mu\text{m}$
- Οι ανιχνευτές μεγάλου μήκους κύματος που λειτουργούν στο διάστημα  $8-14\mu\text{m}$ .

# ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4***

## ***«Μετρολογία με Θερμοκάμερα»***

---



## 4.1 Εισαγωγή

Κάθε μέτρηση ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει εκτελεστεί υπόκειται σε σφάλματα. Στο παρελθόν δεν γίνονταν προσπάθειες για την αναζήτηση του τρόπου διασφάλισης της ποιότητας μιας μέτρησης. Τις τελευταίες δεκαετίες όμως έγινε επιτακτική η ανάγκη για έναν έγκυρο τρόπο μέτρησης της ποιότητας της μέτρησης, μέσω μιας τυποποιημένης εκτίμησης του πραγματικού σφάλματός της, δηλαδή της αβεβαιότητας της μέτρησης.

Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μιας αληθινής τιμής του μετρούμενου μεγέθους, η οποία δεν είναι δυνατόν να είναι γνωστή. Το σφάλμα συνεπώς είναι μια μη προσδιορίσιμη έννοια. Απόλυτο σφάλμα μίας μέτρησης ορίζεται η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής  $\hat{y}$  και της πραγματικής τιμής  $y$

$$\Delta y = \hat{y} - y \quad (\text{εξίσωση 40})$$

Ενώ το σχετικό σφάλμα δίνεται από την σχέση

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} \quad (\text{εξίσωση 41})$$

Η αβεβαιότητα αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των μετρήσεων. Σε αντίθεση με τον μη προσδιορίσιμο χαρακτήρα του σφάλματος η αβεβαιότητα προσδιορίζει το εύρος τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης τιμής μέσα στο οποίο βρίσκεται η αληθινή τιμή του μετρούμενου μεγέθους με συγκεκριμένη πιθανότητα.

Σύμφωνα με τις οδηγίες που προτείνονται από την Διεθνή Επιτροπή Μέτρων και Σταθμών (CIPM, International Committee for Weights and Measures) και περιγράφονται στον οδηγό του ISO Guide to the expression of uncertainty in measurements, η αβεβαιότητα συνδέεται σαν παράμετρος με το αποτέλεσμα της μέτρησης και χαρακτηρίζει την διασπορά των τιμών που θα μπορούσε να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος.

Πέρα από την πιθανότερη τιμή, η οποία συνήθως εκφράζεται μέσω της μέσης τιμής πολλαπλών μετρήσεων, απαιτείται και η γνώση της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  των πιθανών τιμών αλλά και το είδος της κατανομής ώστε να προσδιοριστεί η τυπική αβεβαιότητα και το διάστημα μέσα στο οποίο περιέχεται η ορθή τιμή για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης.[17,18,19]

## 4.2 Αβεβαιότητα των μετρήσεων

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης σε καμία περίπτωση δεν περιορίζεται στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους καθώς η τιμή αυτή χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί ως διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή με ένα ορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης, οπότε ονομάζεται διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty).

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται από πολλές συνιστώσες που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους. Η αβεβαιότητα τύπου A η οποία προσδιορίζεται με στατιστικό τρόπο και οι αβεβαιότητες τύπου B που υπολογίζονται με άλλα μέσα.

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας μίας μέτρησης τεκμηριώνεται στην πιο πρόσφατη οδηγία του Διεθνούς Γραφείου Μέτρων και Σταθμών (BIPM) και στην οδηγία του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης ISO: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements [18,19].

### 4.2.1 Αβεβαιότητα τύπου A

Η αβεβαιότητα τύπου A υπολογίζεται βάσει των καθιερωμένων στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων (τουλάχιστον 10) και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων της μέτρησης. Η πραγματική κατανομή των τιμών είναι σπάνια γνωστή με ακρίβεια οπότε για λόγους στατιστικούς και πρακτικούς προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Η καλύτερη εκτίμηση της τιμής μιας μεταβλητής  $q$  που υπόκειται σε τυχαίες μεταβολές και για την οποία έχουν γίνει  $n$  ανεξάρτητες μετρήσεις  $q_k$  κάτω από τις ίδιες συνθήκες μέτρησης είναι ο αριθμητικός μέσος :

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (\text{εξίσωση 42})$$

Η διασπορά των τιμών της κατανομής σειράς των μετρήσεων χαρακτηρίζεται από την σχέση :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (\text{εξίσωση 43})$$

Η τυπική αβεβαιότητα τύπου A της μέσης τιμής είναι :

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{εξίσωση 44})$$

Όπου  $n$  ο αριθμός των μετρήσεων. [17]

## 4.2.2 Αβεβαιότητα τύπου B

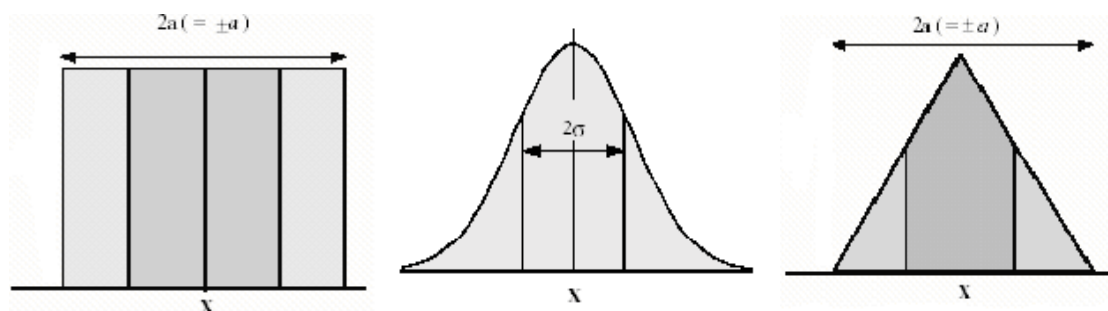
Η εκτίμηση της αβεβαιότητας τύπου B βασίζεται στις διαθέσιμες πληροφορίες και την εμπειρία χρησιμοποιώντας συνήθως :

- Τις προδιαγραφές του κατασκευαστή
- Την πείρα και την γενική γνώση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των υλικών
- Δεδομένα από πιστοποιητικά βαθμονόμησης
- Αβεβαιότητες από εγχειρίδια
- Προηγούμενα δεδομένα μέτρησης

Επομένως, η εκτίμηση της αβεβαιότητας τύπου B βασίζεται στην εμπειρία και την γενική γνώση. Πρέπει να τονιστεί όμως ότι είναι το ίδιο αξιόπιστη με την εκτίμηση της αβεβαιότητας τύπου A ειδικά όταν ο αριθμός των στατιστικά ανεξάρτητων παρατηρήσεων είναι μικρός.

Υποθέτουμε πως στο διάστημα μεταξύ  $\alpha$  και  $\alpha_+$  βρίσκεται με μεγάλη πιθανότητα η τιμή  $x_i$  της μέτρησης. Για να υπολογίζουμε την αβεβαιότητα τύπου B της μέτρησης πρέπει να είναι γνωστή η κατανομή της  $x_i$ . Οι πιθανές κατανομές είναι τρεις :

- Κανονική κατανομή
- Τριγωνική κατανομή
- Ορθογωνική κατανομή



Σχήμα 4.1 :Πιθανές μεταβολές μεταβλητής  $x_i$ : 1.ορθογωνική, 2.κανονική, 3.τριγωνική.

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας B διακρίνουμε τια παρακάτω περιπτώσεις:

1. Αν η εκτίμηση  $x_i$  λαμβάνεται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, το πιστοποιητικό βαθμονόμησης, εγχειρίδια ή κάποια άλλη πηγή και η αβεβαιότητά του αναφέρεται πως είναι πολλαπλάσιο της τυπικής απόκλισης τότε η αβεβαιότητα προκύπτει από την διαίρεση της αναφερόμενης τιμής της προς τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα.
2. Η αβεβαιότητα της  $x_i$  δεν είναι απαραίτητο να εκφράζεται σαν πολλαπλάσιο της τυπικής απόκλισης. Κάποιες φορές δίνεται με ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης, συνήθως 90%, 95%, 99%. Υποθέτοντας ότι η κατανομή της

μεταβλητής  $x_i$  είναι κανονική τότε η αβεβαιότητά της υπολογίζεται από την διαίρεση της δοσμένης αβεβαιότητας προς τον κατάλληλο συντελεστή για την κανονική κατανομή. Η τιμή του συντελεστή αυτού είναι 1,64 για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%, 1,96 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και 2,58 για επίπεδο εμπιστοσύνης 99%.

3. Στην περίπτωση που με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες υπάρχει 50% πιθανότητα η μεταβλητή  $x_i$  να βρίσκεται μεταξύ των ορίων του διαστήματος  $a_-$  ως  $a_+$  και υποθέτοντας κανονική κατανομή των μεταβλητών τότε η καλύτερη εκτίμηση της μεταβλητής  $x_i$  βρίσκεται στο μέσο του διαστήματος  $\alpha = \frac{\alpha_+ - \alpha_-}{2}$  και η αβεβαιότητα είναι  $u(x_i) = 1.48 * a$  καθώς για κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\mu$  και τυπική απόκλιση  $\sigma$  το διάστημα  $\mu \pm \sigma / 1,48$  καλύπτει το 50% της κατανομής.
4. Όταν υπάρχει πιθανότητα 67% η μεταβλητή  $x_i$  να βρίσκεται στο διάστημα  $a_-$  ως  $a_+$  και υποθέτοντας κανονική κατανομή τότε η αβεβαιότητα είναι  $u(x_i) = a$  καθώς για κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\mu$  και τυπική απόκλιση  $\sigma$  το διάστημα  $\mu \pm \sigma$  καλύπτει το 68,3% της κατανομής.
5. Στην περίπτωση που οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την εκτίμηση της μεταβλητής  $x_i$  είναι μόνο το ανώτερο και το κατώτερο όριο  $a_+$  και  $a_-$  αντίστοιχα και η πιθανότητα να βρίσκεται η μεταβλητή εντός αυτών των ορίων είναι 1 τότε η καλύτερη εκτίμηση της μεταβλητής  $x_i$  βρίσκεται στο μέσο του διαστήματος  $\alpha = \frac{\alpha_+ - \alpha_-}{2}$  με αβεβαιότητα

a.  $u^2(x_i) = \frac{(\alpha_+ - \alpha_-)^2}{12}$  για την ομοιόμορφη κατανομή και

b.  $u^2(x_i) = \frac{(\alpha_+ - \alpha_-)^2}{24}$  για την τριγωνική κατανομή.

Αν η διαφορά μεταξύ των δύο ορίων είναι  $2a$  τότε η αβεβαιότητα προκύπτει  $u(x_i) = \frac{a^2}{3}$  και  $u(x_i) = \frac{a^2}{6}$  αντίστοιχα.

6. Όταν τα όρια  $a_+$  και  $a_-$  δεν είναι συμμετρικά ως προς την καλύτερη εκτίμηση της μεταβλητής  $x_i$ , δηλαδή όταν η μορφή τους είναι  $a_+ = x_i - b_+$  και  $a_- = x_i - b_-$  με  $b_+ \neq b_-$  τότε η κατανομή της μεταβλητής δεν μπορεί να είναι κανονική. Επειδή δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για την επιλογή της κατανομής και κάθε μοντέλο οδηγεί σε διαφορετική έκφραση της αβεβαιότητας, η πιο απλή έκφραση είναι

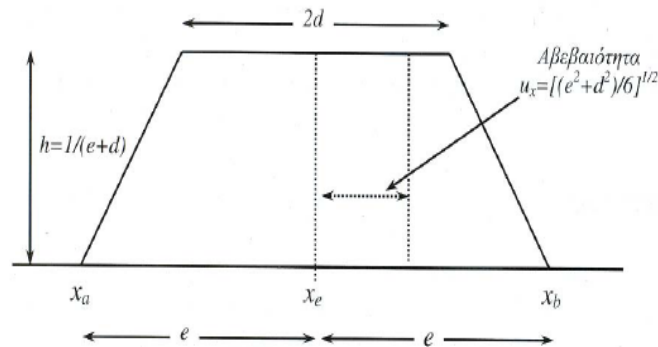
$$u(x_i)^2 = \frac{(b_+ + b_-)^2}{12} = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}$$

που αντιστοιχεί στην ορθογωνική κατανομή.

7. Επειδή δεν υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις πιθανές τιμές της μεταβλητής  $x_i$  η υπόθεση ότι η πιθανότητα να πάρει μια οποιαδήποτε τιμή στο διάστημα  $a_-$  ως  $a_+$  είναι ίδια δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να πάρει τιμές οι οποίες βρίσκονται κοντά στα όρια παρά στο μέσο του διαστήματος. Οπότε η συμμετρική ορθογωνική κατανομή



αντικαθίσταται από την τραπεζοειδή κατανομή με μήκος μεγάλης και μικρής βάσης  $2\alpha$  και  $2\beta$  αντίστοιχα, με  $0 \leq \beta \leq 1$ .



Σχήμα 4.2 : Τραπεζοειδής κατανομή

Δεδομένης της συμμετρίας η αναμενόμενη τιμή είναι στο μέσο και προκύπτει από τη σχέση :

$$x_i = \frac{(\alpha_+ + \alpha_-)}{2} \quad (\text{εξίσωση 45})$$

με διασπορά

$$u^2(x_i) = \frac{a^2(1+\beta^2)}{6} \quad (\text{εξίσωση 46})$$

Η οποία γίνεται τριγωνική για  $\beta=0$  και ορθογωνική για  $\beta \rightarrow 1$ .

Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα είναι η αβεβαιότητα που προκύπτει από τον συνδυασμό των επιμέρους τυπικών αβεβαιοτήτων, και δίνεται από τον τύπο:

$$u(y)^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u(x_i)^2 \quad (\text{εξίσωση 47})$$

Η διευρυμένη αβεβαιότητα χρησιμοποιείται συνήθως για να καλύψει τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών της μέτρησης και εκφράζει ένα μεγαλύτερο διάστημα από τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα στο οποίο η τιμή του μετρούμενου μεγέθους έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να υπάρξει. Υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη συνδυασμένη αβεβαιότητα με ένα συντελεστή κάλυψης του οποίου η τιμή εξαρτάται από το επίπεδο εμπιστοσύνης που επιθυμούμε [18].

## 4.3 Παράγοντες αβεβαιότητας στη θερμογράφηση

Τα πιθανά σφάλματα κατά την μέτρηση της θερμοκρασίας με την θερμοκάμερα μπορούν να διαχωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες[17]:

- Σφάλματα μεθόδου
- Σφάλματα κατά την βαθμονόμηση
- Σφάλματα που προέρχονται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα της θερμοκάμερας.

### 4.3.1 Σφάλματα μεθόδου

Υπό πραγματικές συνθήκες τα σφάλματα μεθόδου προκύπτουν από [17]:

- Εσφαλμένη εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  της επιφάνειας
- Εσφαλμένη μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος  $T_{ατμ}$ , της υγρασίας του περιβάλλοντος  $\omega$  και της θερμοκρασίας ανάκλασης  $T_{av}$
- Επίδραση της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος η οποία φτάνει στην θερμοκάμερα.
- Εσωτερικά σφάλματα θερμοκάμερας

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των αντικειμένων με διαφορετικό συντελεστή εκπομπής στην επιφάνεια της οποίας η θερμοκρασία μετράται, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του σφάλματος εκτίμησης του συντελεστή εκπομπής στο τελικό αποτέλεσμα. Ο συντελεστής εκπομπής ενός αντικειμένου καθορίζεται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία, το υλικό από το οποίο αποτελείται, τον βαθμό πόλωσης της επιφάνειας του και από την γωνία από την οποία λαμβάνονται οι μετρήσεις. Όπως διαπιστώνεται, πλήρης εξάλειψη του σφάλματος μέτρησης του συντελεστή εκπομπής είναι αδύνατη.

Η επίδραση της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος μεγαλώνει όσο ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία της επιφάνειας. Πρόσθετα σφάλματα προκύπτουν από την ηλιακή ακτινοβολία. Ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μέλαν σώμα με πολύ υψηλή θερμοκρασία. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο προσπίπτει στην επιφάνεια εξαρτάται από την μέρα, την ώρα της μέτρησης καθώς και από τις καιρικές συνθήκες. Ο προσδιορισμός της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ακρίβεια των μετρήσεων δεν είναι εύκολος. Συνήθως αυτή η ακτινοβολία δυσχεραίνει τις μετρήσεις, ειδικά όταν η επιφάνεια αντανάκλα την ακτινοβολία από τον ουρανό, τα γειτονικά κτίρια και το έδαφος. Η επίδραση της περιβαλλοντικής ακτινοβολίας στις μετρήσεις μπορεί να

περιοριστεί με την εισαγωγή της τιμής της θερμοκρασίας ανάκλασης στο χειριστήριο της θερμοκάμερας. Και αυτή η τιμή συνοδεύεται από ένα διάστημα αβεβαιότητας.

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας στην ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να αμεληθεί όταν η απόσταση μεταξύ θερμοκάμερας και επιφάνειας είναι μικρή. Όταν όμως μετράται η θερμοκρασία ενός αντικειμένου που απέχει αρκετά μέτρα η ακτινοβολία αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη, ειδικά όταν οι μεταβλητές  $\epsilon$ ,  $T_0$ ,  $T_{\text{ατμ}}$ ,  $\omega$ ,  $d$  είναι συσχετισμένες μεταξύ τους.[16].

### 4.3.2 Σφάλματα κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης

Η δεύτερη πηγή πιθανών σφαλμάτων προκύπτει κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης:

- Περιορισμένη ακρίβεια προτύπων αναφοράς και περιορισμένος αριθμός σημείων βαθμονόμησης
- Απόκλιση της εσωτερικής ακτινοβολίας των οπτικών συστατικών και φίλτρων της θερμοκάμερας κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης και των μετρήσεων
- Εσφαλμένη εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, παράληψη της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος και περιορισμένη ανάλυση θερμοκρασίας της θερμοκάμερας.

Η θερμοκάμερα ως τελικό προϊόν στέλνεται από τον κατασκευαστή στο εργαστήριο βαθμονόμησης όπου υποβάλλεται σε έναν αριθμό δοκιμών. Το πιστοποιητικό βαθμονόμησης που συνοδεύει το κάθε μέλος που περνά αυτή την διαδικασία περιλαμβάνει:

- Το όνομα του εργαστηρίου
- Τον σειριακό αριθμό της θερμοκάμερας
- Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης
- Τα πρότυπα που καθορίζουν την διαδικασία της βαθμονόμησης
- Περίοδος ισχύος του πιστοποιητικού

Τα τεχνικά δεδομένα κάθε θερμοκάμερας και κατά συνέπεια η ακρίβεια μέτρησης της προέκυψαν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες εργαστηρίου με αποτέλεσμα η ακρίβεια να είναι πολύ χειρότερη σε μετρήσεις υπό πραγματικές συνθήκες.

### 4.3.3 Σφάλματα από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα της θερμοκάμερας

Μία ακόμα πηγή σφαλμάτων είναι τα ηλεκτρονικά κυκλώματα της θερμοκάμερας. Αυτά τα σφάλματα προκύπτουν από τα ακόλουθα φαινόμενα[17]:

- Εσωτερικό θόρυβο
- Διακύμανση στην τιμή του κέρδους του ενισχυτή
- Περιορισμένο εύρος ζώνης ανιχνευτή.

## 4.4 Συνδυασμένη αβεβαιότητα θερμογράφησης

Η συνδυασμένη αβεβαιότητα  $u_c$  της θερμοκρασίας της επιφάνειας μπορεί να οριστεί ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των αβεβαιοτήτων του συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon$  της επιφάνειας, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος  $T_{ατμ}$ , της θερμοκρασίας ανάκλασης  $T_{αν}$ , της υγρασίας του περιβάλλοντος  $\omega$ , της ατμοσφαιρικής μεταφοράς  $\tau$  και της εσωτερικής αβεβαιότητας της θερμοκάμερας  $u_{in}$ [20]:

$$u_c(T_{out}) = \sqrt{u_\varepsilon^2 + u_\tau^2 + u_{T_{περ}}^2 + u_{T_{αν}}^2 + u_\omega^2 + u_{in}^2} \quad (\text{εξίσωση 48})$$

Για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας του συντελεστή εκπομπής, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, της θερμοκρασίας ανάκλασης και της σχετικής υγρασίας πρέπει να είναι γνωστά τα όρια μέσα στα οποία βρίσκεται η τιμή τους.

Εκτός από τα όρια μέσα στα οποία βρίσκονται οι τιμές των μεταβλητών αυτών και συνήθως μπορούν να προσδιορισθούν, πρέπει να είναι γνωστός ο τύπος της κατανομής τους. Εκτός της περίπτωσης που μπορούμε να κάνουμε μια τύπου A εκτίμηση της αβεβαιότητας για αυτούς τους παράγοντες υποθέτουμε ότι η κατανομή των μεταβλητών είναι τριγωνική, οπότε οι αβεβαιότητες προσδιορίζονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$u(\varepsilon) = \frac{\Delta\varepsilon}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 49})$$

$$u(T_{περ}) = \frac{\Delta T_{περ}}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 50})$$

$$u(\tau) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 51})$$

$$u(T_{αν}) = \frac{\Delta T_{αν}}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 52})$$

$$u(\omega) = \frac{\Delta\omega}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 53})$$

Η εσωτερική αβεβαιότητα της θερμοκάμερας δίνεται από τον τύπο:

$$u_{int} = \sqrt{u_{ME}^2 + u_{NGE}^2 + u_{DTR}^2 + u_{TS}^2 + u_{RE}^2 + u_{MU}^2} \quad (\text{εξίσωση 54})$$

$$\text{Όπου } u_{ME} = \frac{ME}{\sqrt{12}}, u_{NTR} = NGE, u_{DTR} = \frac{DTR}{\sqrt{12}}, u_{TS} = \frac{TS}{\sqrt{12}}, u_{RE} = \frac{RE}{\sqrt{12}}, u_{MU} = \frac{MU}{\sqrt{12}},$$

Το ελάχιστο σφάλμα ME ορίζεται ως ένα εύρος τιμών γύρω από την τιμή της θερμοκρασίας που μετράται με την θερμοκάμερα μέσα στο οποίο βρίσκεται και η πραγματική θερμοκρασία της όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε συνθήκες ίδιες με αυτές που επικρατούν κατά την διάρκεια εργαστηριακού ελέγχου της θερμοκάμερας. Οι συνθήκες αυτές υπάρχουν όταν η επιφάνεια που εξετάζεται είναι μέλαν σώμα, η απόσταση μεταξύ της θερμοκάμερας και της επιφάνειας είναι μικρή και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος βρίσκεται στο διάστημα 20°C-30°C.

Ως NGE ορίζεται η τυπική απόκλιση της διασποράς της μετρούμενης θερμοκρασίας λόγω του θορύβου που υπάρχει στο σύστημα.

Η θερμοκρασία ανάλυσης DTR είναι η ελάχιστη διαφορά δύο θερμοκρασιακών επιπέδων που μπορούν να διακριθούν λόγω της περιορισμένης ανάλυσης των ψηφιακών καναλιών της θερμοκάμερας.

Η θερμοκρασιακή σταθερότητα TS ορίζεται ως ένα εύρος όπου βρίσκονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν σε διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Ως RE ορίζεται το εύρος μέσα στο οποίο βρίσκονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων οι οποίες επαναλήφθηκαν σε ιδανικές συνθήκες εργαστηρίου.

Η ομοιομορφία των μετρήσεων MU είναι το εύρος στο οποίο βρίσκονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν όταν το εξεταζόμενο αντικείμενο τοποθετήθηκε σε διαφορετικές θέσεις μέσα στο οπτικό πεδίο της θερμοκάμερας.

Η χωρική ανάλυση των μετρήσεων MSR είναι η ελάχιστη γωνιακή διάσταση του εξεταζόμενου αντικειμένου όπου δεν υφίσταται η επίδραση του μεγέθους του αντικειμένου στο αποτέλεσμα της μέτρησης. Δηλαδή, αν το γωνιακό μέγεθος του αντικειμένου είναι μεγαλύτερο από το MSR τότε η μετρούμενη θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται.

Οι πρώτες έξι παράμετροι παρέχουν πληροφορίες για το εύρος τιμών γύρω από την μετρούμενη θερμοκρασία μέσα στο οποίο βρίσκεται η πραγματική θερμοκρασία λόγω των ακόλουθων πηγών σφαλμάτων:

- Θόρυβος στο αναλογικό κανάλι της θερμοκάμερας
- Περιορισμένη ανάλυση του ψηφιακού καναλιού της θερμοκάμερας
- Μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος
- Μεταβολές των παραμέτρων της θερμοκάμερας σε σχέση με το χρόνο

- Μεταβολές των παραμέτρων της θερμοκάμερας σε σχέση με το οπτικό της πεδίο

Η τελευταία παράμετρος παρέχει πληροφορίες για το ελάχιστο μέγεθος του αντικειμένου που εξετάζεται.[19]

## 4.5 Υπολογισμός αβεβαιότητας

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της αβεβαιότητας για μετρητικές διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

### 4.5.1 Η αβεβαιότητας της εκτίμησης του συντελεστή θερμοπερατότητας με αναλυτικό τρόπο.

Ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας με τον αναλυτικό τρόπο δεν προκύπτει με βάση κάποια μέτρηση. Όμως, όπως οποιαδήποτε εκτίμηση, συνοδεύεται και αυτός από ένα διάστημα αβεβαιότητας. Πιο κάτω περιγράφεται η μέθοδος εκτίμησης της αβεβαιότητας κατά τον υπολογισμό του συντελεστή με το τυπολόγιο που παρατίθεται στην ΤΟΤΕΕ «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων» .

#### 4.5.1.1 Υπολογισμός αβεβαιότητας συντελεστή θερμικής αντίστασης

Η αβεβαιότητα που συνοδεύει τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης εξαρτάται από:

- Την αβεβαιότητα που προκύπτει από την μέτρηση του πάχους των υλικών των στρώσεων. Η τυπική αβεβαιότητα θεωρώντας τριγωνική κατανομή δίνεται από τον τύπο:

$$u(d_i) = \frac{\alpha}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 55})$$

Με συντελεστή ευαισθησίας  $c_{d_i}$  που προκύπτει από την μερική παράγωγο της θερμικής αντίστασης προς το πάχος του κάθε υλικού:

$$c_{d_i} = \frac{\partial R_i}{\partial d_i} = \frac{1}{\lambda_i} \quad (\text{εξίσωση 56})$$

- Την αβεβαιότητα που προκύπτει από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Θεωρώντας τριγωνική κατανομή τη τιμή αυτή είναι:

$$u(\lambda_i) = \frac{\alpha}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 57})$$

Με συντελεστή ευαισθησίας:

$$c_{\lambda_i} = \frac{\partial R_i}{\partial \lambda_i} = -\frac{d_i}{\lambda_i^2} \quad (\text{εξίσωση 58})$$

Οπότε η αβεβαιότητα που συνοδεύει την τιμή της αντίστασης είναι:

$$u(R_i)^2 = (c_{d_3} \cdot u_{d_3})^2 + (c_{\lambda_3} \cdot u_{\lambda_3})^2 \quad (\text{εξίσωση 59})$$

#### 4.5.1.2 Υπολογισμός αβεβαιότητας αντίστασης θερμοδιαφυγής

Η αντίσταση θερμοδιαφυγής προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων της κάθε στρώσης. Η αβεβαιότητά της θα προκύψει από το διανυσματικό άθροισμα των τετραγώνων των επιμέρους αβεβαιοτήτων των αντιστάσεων, δηλαδή:

$$u_{R_{ss}}^2 = u_{R_1}^2 + u_{R_2}^2 + \dots + u_{R_n}^2 \quad (\text{εξίσωση 60})$$

#### 4.5.1.3 Υπολογισμός αβεβαιότητας θερμικής αντίστασης

Η ακρίβεια υπολογισμού της θερμικής αντίστασης εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Από την αβεβαιότητα της αντίστασης θερμικής μετάβασης  $R_i$  που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο. Θεωρώντας τριγωνική κατανομή η τιμή της αβεβαιότητας της είναι :

$$u(R_{si}) = \frac{\alpha}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 61})$$

- Από την αβεβαιότητα της αντίστασης θερμικής μετάβασης  $R_\alpha$  που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση θερμότητας από τον εξωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο. Θεωρώντας τριγωνική κατανομή η τιμή της αβεβαιότητας της είναι :

$$u(R_{se}) = \frac{\alpha}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 62})$$

- Από την τιμή της αβεβαιότητας της αντίστασης θερμοδιαφυγής που υπολογίστηκε παραπάνω.

Οπότε η αβεβαιότητα της συνολικής θερμικής αντίστασης είναι:

$$u_{R_T}^2 = u_{R_{si}}^2 + u_{R_{ss}}^2 + u_{R_{se}}^2 \quad (\text{εξίσωση 63})$$

#### 4.5.1.4 Υπολογισμός αβεβαιότητας συντελεστή θερμοπερατότητας

Η τιμή της αβεβαιότητας του συντελεστή θερμοπερατότητας εξαρτάται από την αβεβαιότητα της συνολικής θερμικής αντίστασης μιας και ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι το αντίστροφο της θερμικής αντίστασης:

$$u_{u_{value}}^2 = (c_{R_T} \cdot u_{R_T})^2 = \left(-\frac{1}{R_T^2} u_{R_T}\right)^2 \quad (\text{εξίσωση 64})$$

Ο συντελεστής ευαισθησίας  $c_{R_T}$  υπολογίζεται από την μερική παράγωγο του συντελεστή θερμοπερατότητας ως προς την αντίσταση  $R_T$ .

Για 95% αβεβαιότητα του συντελεστή θερμοπερατότητας η τελική αβεβαιότητα προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του  $u_{u_{value}}$  με τον συντελεστή 2.

#### 4.5.2 Υπολογισμός αβεβαιότητας μέτρησης συντελεστή θερμοπερατότητας με χρήση θερμοκάμερας

Ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας με χρήση μετρήσεων με θερμοκάμερα εμπλέκει πολλούς παράγοντες.

##### 4.5.2.1 Μέτρηση συντελεστή εκπομπής

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής πραγματοποιείται ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων. Η καλύτερη εκτίμηση του είναι η μέση τιμή των μετρήσεων.

Η τυπική αβεβαιότητα τύπου A του συντελεστή εκπομπής δίνεται από τον τύπο:

$$u_\varepsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{εξίσωση 65})$$



#### 4.5.2.2 Μέτρησης ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας

Η αβεβαιότητα που συνοδεύει την μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα εξαρτάται από:

- Την ακρίβεια οργάνου με το οποίο γίνεται η μέτρηση. Κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης των οργάνων που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις, της θερμοκάμερας και του θερμομέτρου-υγρασιομέτρου, προκύπτει η ακρίβεια τους. Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή η αβεβαιότητα που προκύπτει λόγω της ακρίβειας των οργάνων είναι:

$$u_{acc} = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (\text{εξίσωση 66})$$

- Την διακριτική ικανότητα των οργάνων, η οποία λαμβάνεται από το εγχειρίδιο που συνοδεύει κάθε όργανο και το οποίο περιγράφει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει την διακριτική ικανότητα των οργάνων είναι:

$$u_{res} = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (\text{εξίσωση 67})$$

- Την αβεβαιότητα λόγω της κύμανσης της θερμοκρασίας και της επίδρασης του χρόνου. Στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$  όπου γίνονται οι μετρήσεις, η διαφορά της θερμοκρασίας ήταν  $\Delta T$ . Η τυπική αβεβαιότητα που προκύπτει από την επίδραση του χρόνου δίνεται από τον τύπο:

$$u_{time} = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 68})$$

όπου μπορεί να ληφθεί ότι  $a = \pm 30 \text{sec}$ .

Παρακολουθώντας τη μεταβολή της θερμοκρασίας για ένα διάστημα 2 ωρών, δηλαδή 120min ο συντελεστής ευαισθησίας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$c_{time} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{εξίσωση 69})$$

Με διανυσματικό άθροισμα των παραπάνω παραγόντων, η αβεβαιότητα της μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα δίνεται από τον τύπο:

$$(u_{T_{air}})^2 = (u_{acc})^2 + (u_{res})^2 + (c_{time} \cdot u_{time})^2 \quad (\text{εξίσωση 70})$$

#### 4.5.2.3 Μέτρησης θερμοκρασίας ανάκλασης

Η θερμοκρασία ανάκλασης προκύπτει από την ερμηνεία και επεξεργασία των θερμογραφημάτων που λαμβάνονται κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Η τιμή της προκύπτει από τον μέσο όρο των θερμοκρασιών των σημείων της επιφάνειας ανάκλασης, οπότε η τύπου A τυπική αβεβαιότητά της δίνεται από τον τύπο:

$$u_{R_{TtypeA}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{εξίσωση 71})$$

Η ακρίβεια της μέτρησης της θερμοκρασίας ανάκλασης επηρεάζεται και από την γωνία λήψης των θερμογραφημάτων. Όσο μεταβάλλεται η γωνία λήψης κατά  $\Delta\phi$ , μεταβάλλεται και η θερμοκρασία που μετράται (κατά  $\Delta T$ ). Οπότε η τυπική αβεβαιότητα της μέτρησης λόγω της επίδρασης της γωνίας λήψης υπολογίζεται για τριγωνική κατανομή ως εξής:

$$u_{\phi} = \frac{\alpha}{\sqrt{6}} \quad (\text{εξίσωση 72})$$

Με συντελεστή ευαισθησίας:

$$c_{\phi} = \frac{\Delta T_R}{\Delta\phi} \quad (\text{εξίσωση 73})$$

Συνεπώς, η αβεβαιότητα μέτρησης της θερμοκρασίας ανάκλασης δίνεται από τον τύπο:

$$u(R_T)^2 = (u_{R_{TtypeA}})^2 + (c_{\phi} \cdot u_{\phi})^2 \quad (\text{εξίσωση 74})$$

#### 4.5.2.4 Μέτρηση επιφανειακής θερμοκρασίας με θερμοκάμερα

Η τιμή της επιφανειακής θερμοκρασίας ισούται με τον μέσο όρο μιας σειράς μετρήσεων θερμοκρασίας των σημείων της επιφάνειας της τοιχοποιίας. Η συνακόλουθη τυπική αβεβαιότητα τύπου A δίνεται από τον τύπο:

$$u_{TtypeA} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{εξίσωση 75})$$

Επειδή αυτή η τύπου A παράμετρος αβεβαιότητας χαρακτηρίζει μέτρηση με θερμοκάμερα, στην παραπάνω αβεβαιότητα προστίθεται διανυσματικά η παράμετρος της αβεβαιότητας της μέτρησης επιφανειακής θερμοκρασίας με τη θερμοκάμερα:

$$u_c(T) = \sqrt{u_{\varepsilon}^2 + u_{\tau}^2 + u_{T_{\pi\epsilon\rho}}^2 + u_{T_{\alpha\nu}}^2 + u_{\omega}^2 + u_{in}^2} \quad (\text{εξίσωση 76})$$

Οπότε η συνολική αβεβαιότητα μέτρησης της επιφανειακής θερμοκρασίας είναι:

$$u(T)^2 = (u_{TtypeA})^2 + (u_c(T))^2 \quad (\text{εξίσωση 77})$$

#### 4.5.2.5 Αβεβαιότητα μέτρησης συντελεστή θερμοπερατότητας

Έχοντας υπολογίσει την αβεβαιότητα του συντελεστή εκπομπής, της θερμοκρασίας ανάκλασης, της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου και της θερμοκρασίας του εξωτερικού χώρου η αβεβαιότητα της μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας δίνεται από τον τύπο:

$$u(u_{value})^2 = (c_{T_{in}} \cdot u_{T_{in}})^2 + (c_{\varepsilon} \cdot u_{\varepsilon})^2 + (c_{T_{out}} \cdot u_{T_{out}})^2 + (c_{T_i} \cdot u_{T_i})^2 + (c_{\alpha_i} \cdot u_{\alpha_i})^2 \quad (\text{εξίσωση 78})$$

Όπου οι συντελεστές ευαισθησίας  $c_{T_{in}}$ ,  $c_{\varepsilon}$ ,  $c_{T_{out}}$ ,  $c_{T_i}$  και  $c_{\alpha_i}$  δίνονται από την μερική παράγωγο του συντελεστή θερμοπερατότητας προς την αντίστοιχη παράμετρο.

$$c_{T_{in}} = \frac{\partial U}{\partial T_{in}} = \frac{(\alpha_i + 4 \cdot \varepsilon \cdot 5,67 \left(\frac{T_{in}}{100}\right)^3) \cdot (T_{in} - T_{out}) - (\alpha_i (T_{in} - T_i) + \left(\frac{T_{in}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_i}{100}\right)^4) \cdot 5,67 \cdot \varepsilon}{(T_{in} - T_{out})^2} \quad (\text{εξίσωση 79})$$

$$c_{T_{out}} = \frac{\partial U}{\partial T_{out}} = \frac{5,67 \varepsilon \left(\left(\frac{T_{in}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_i}{100}\right)^4\right) + \alpha_i (T_{in} - T_i)}{(T_{in} - T_{out})^2} \quad (\text{εξίσωση 80})$$

$$c_{T_i} = \frac{\partial U}{\partial T_i} = \frac{-\alpha_i - 4 \cdot \left(\frac{T_i}{100}\right)^3 \cdot 5,67 \cdot \varepsilon}{T_{in} - T_{out}} \quad (\text{εξίσωση 81})$$

$$c_{\varepsilon} = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon} = \frac{5,67 \cdot \left(\frac{T_{in}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_i}{100}\right)^4}{T_{in} - T_{out}} \quad (\text{εξίσωση 82})$$

$$c_{\alpha_i} = \frac{\partial U}{\partial \alpha_i} = \frac{T_{in} - T_i}{T_{in} - T_{out}} \quad (\text{εξίσωση 83})$$

#### 4.5.2.6 Αβεβαιότητα μέτρησης συντελεστή θερμοπερατότητας με βάση τη μέθοδο της μέσης τιμής.

Στη περίπτωση μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας με τη μέθοδο της μέσης τιμής, κάθε μέτρηση εκφράζεται ως συνάρτηση του αθροίσματος των προηγούμενων μετρήσεων. Οπότε ο συντελεστής θερμοπερατότητας κάθε μέτρησης  $n$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_{j-1} + q_n}{\sum_{j=1}^n \Delta T_{n-1} + \Delta T_n} \quad (\text{εξίσωση 84})$$

Υπολογίζοντας την αβεβαιότητα τόσο της θερμοροής όσο και της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, η αβεβαιότητα του συντελεστή θερμοπερατότητας προκύπτει:

$$u(u_{value})^2 = (c_{\Sigma q} \cdot u_{\Sigma q})^2 + (c_q \cdot u_q)^2 + (c_{\Sigma \Delta T} \cdot u_{\Sigma \Delta T})^2 + (c_{\Delta T} \cdot u_{\Delta T})^2 \quad (\text{εξίσωση 85})$$

Όπου ο συντελεστής ευαισθησίας του αθροίσματος των θερμοροών δίνεται από τον τύπο:

$$c_{\Sigma q} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \Delta T_{n-1} + \Delta T_n} \quad (\text{εξίσωση 86})$$

Ο συντελεστής ευαισθησίας της θερμοροής είναι:

$$c_q = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \Delta T_{n-1} + \Delta T_n} \quad (\text{εξίσωση 87})$$

Και οι συντελεστές ευαισθησίας του αθροίσματος της διαφοράς θερμοκρασίας και της διαφοράς θερμοκρασίας δίνονται από τις εξισώσεις (88) και (89):

$$c_{\Sigma \Delta T} = -\frac{\sum_{j=1}^n q_{j-1} + q_n}{\left(\sum_{j=1}^n \Delta T_{n-1} + \Delta T_n\right)^2} \quad (\text{εξίσωση 88})$$

$$c_{\Delta T} = -\frac{\sum_{j=1}^n q_{j-1} + q_n}{\left(\sum_{j=1}^n \Delta T_{n-1} + \Delta T_n\right)^2} \quad (\text{εξίσωση 89})$$

# ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5***

## ***«Όργανα Μέτρησης και Πειραματική Διάταξη»***

---



## 5.1 Εισαγωγή

Για την μελέτη της αβεβαιότητας των μετρήσεων που γίνονται με την βοήθεια της θερμοκάμερας κατά την διάρκεια της ενεργειακής επιθεώρησης λήφθηκαν κάποιες μετρήσεις διαφορετικών παραμέτρων από ειδικό εξοπλισμό.

Η εκτίμηση των παραμέτρων αυτών γίνεται με βάση μετρητικές μεθόδους. Για κάθε υπό εκτίμηση παράμετρο επιλέγεται μία κατάλληλη μετρητική μέθοδος η οποία περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μετρήσεις του ίδιου ή διαφορετικών φυσικών μεγεθών.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων αυτών καθώς και οι μετρήσεις που έγιναν. Παράλληλα γίνεται και ο θεωρητικός υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας ώστε να εξαχθούν σε επόμενα κεφάλαια συμπεράσματα για την ακρίβεια μέτρησής του.

Όσον αφορά τον εξοπλισμό, αυτός αποτελείται από την θερμοκάμερα η οποία χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της θερμοκρασίας της εξεταζόμενης τοιχοποιίας και το θερμόμετρο - υγρασιόμετρο το οποίο μετρούσε κάθε φορά τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούσαν μέσα και έξω από το χώρο των μετρήσεων. Σαν συνεργοί για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν μία μαύρη ταινία με γνωστό συντελεστή εκπομπής και μία επιφάνεια ανάκλασης η οποία ήταν κατασκευασμένη από αλουμινόχαρτο.

## 5.2 Όργανα μέτρησης

Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν συνδέθηκαν με ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων.

### 5.2.1 Θερμοκάμερα

Η κάμερα υπέρυθρων είναι μια συσκευή που σχηματίζει εικόνα χρησιμοποιώντας υπέρυθρη ακτινοβολία και λειτουργεί σε μήκη κύματος της τάξης των 14  $\mu\text{m}$ . Όλα τα αντικείμενα εκπέμπουν μία συγκεκριμένη ποσότητα υπέρυθρης ακτινοβολίας ανάλογα με την επιφανειακή θερμοκρασία τους. Η θερμοκάμερα ανιχνεύει αυτή την ακτινοβολία με τον ίδιο τρόπο που το κάνει μια συνηθισμένη κάμερα με την ορατή ακτινοβολία, με την διαφορά ότι η κάμερα ορατής ακτινοβολίας λειτουργεί σε μήκη κύματος 450-750nm.

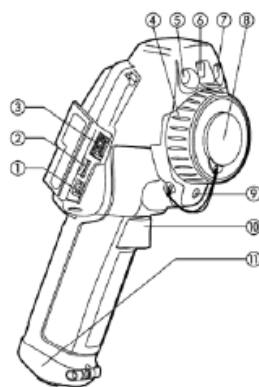


**Σχήμα 5.1** :Θερμοκάμερα FLIR b50 η οποία χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων

Η θερμοκάμερα FLIR b50 είναι η μία από τις συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Είναι μια θερμοκάμερα υπέρυθρων με βάρος μόλις 600 g και σκόπευση με λείζερ. Ο ενσωματωμένος φωτισμός LED που διαθέτει επιτρέπει την εργασία ακόμα και σε σκοτάδι. Διαθέτει ανάλυση υπέρυθρης φωτογραφίας 140 x 140 pixels και ψηφιακή κάμερα 1536 x 1536 pixels. Οι μπαταρίες λιθίου που περιέχει επιτρέπουν την εργασία έως και 5 ώρες χωρίς διακοπή για φόρτιση. Η τριπλή λειτουργία (υπέρυθρη, ψηφιακή και εικόνα μέσα σε εικόνα για καλύτερη αντίληψη του χώρου) συμβάλλει στην παραγωγή επαγγελματικών ραδιομετρικών φωτογραφιών JPEG. Παρέχει την δυνατότητα αντιγραφής δεδομένων σε USB ενώ παράλληλα το λογισμικό FLIR QuickReport™ επιτρέπει την περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία των φωτογραφιών στον υπολογιστή. Διαθέτει κατάλογο 21 γλωσσών καθώς και συναγερμό μόνωσης και συναγερμό σημείου δρόσου. Ο συναγερμός μόνωσης ενεργοποιείται όταν το επίπεδο μόνωσης πέφτει κάτω από μια καθορισμένη τιμή διαρροής θερμότητας μέσω ενός τοίχου με αποτέλεσμα να εντοπίζονται τα σημεία ανεπαρκούς μόνωσης. Ο συναγερμός σημείου δρόσου εντοπίζει περιοχές με επικινδυνότητα σχηματισμού συμπυκνώματος υδρατμού που πιθανώς υποδεικνύει ατέλεια στην κατασκευή.

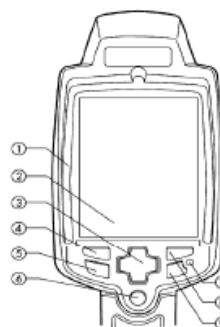
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι βασικές λειτουργίες της συγκεκριμένης θερμοκάμερας [5]:



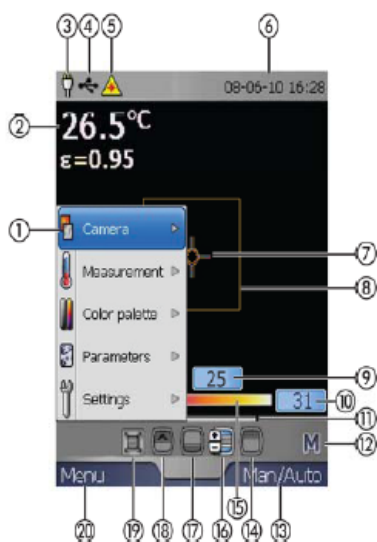


1. υποδοχή σύνδεσης USB mini-B (για τη σύνδεση της κάμερας με υπολογιστή)
2. κάρτα μνήμης MicroSD™.
3. υποδοχή σύνδεσης USB A (για τη σύνδεση μιας συσκευής κάρτας μνήμης (memory stick) USB ή άλλης συσκευής USB με την κάμερα)
4. δακτύλιος εστίασης πάνω στο φακό υπερέυθρων
5. λυχνία ψηφιακής κάμερας
6. ψηφιακή κάμερα
7. λυχνία ψηφιακής κάμερας
8. καπάκι φακού
9. δείκτης λέιζερ
10. προγραμματιζόμενο πλήκτρο για την αποθήκευση εικόνας
11. κάλυμμα για τη υποδοχή της μπαταρίας, συμπεριλαμβανομένου του κουμπιού απασφάλισης.

1. Προστατευτικό ελαστικό πλαίσιο
2. Οθόνη LCD
3. Κουμπιά κατεύθυνσης
4. Αριστερό κουμπί επιλογής
5. Κουμπί κάμερας/αρχειοθέτησης
6. Κουμπί για την ενεργοποίηση του δείκτη λέιζερ.
7. Ενδεικτική λυχνία λειτουργίας.
8. Δεξιά κουμπί επιλογής
9. Κουμπί On/Off.



Σχήμα 5.2 :Βασικές λειτουργίες θερμοκάμερας

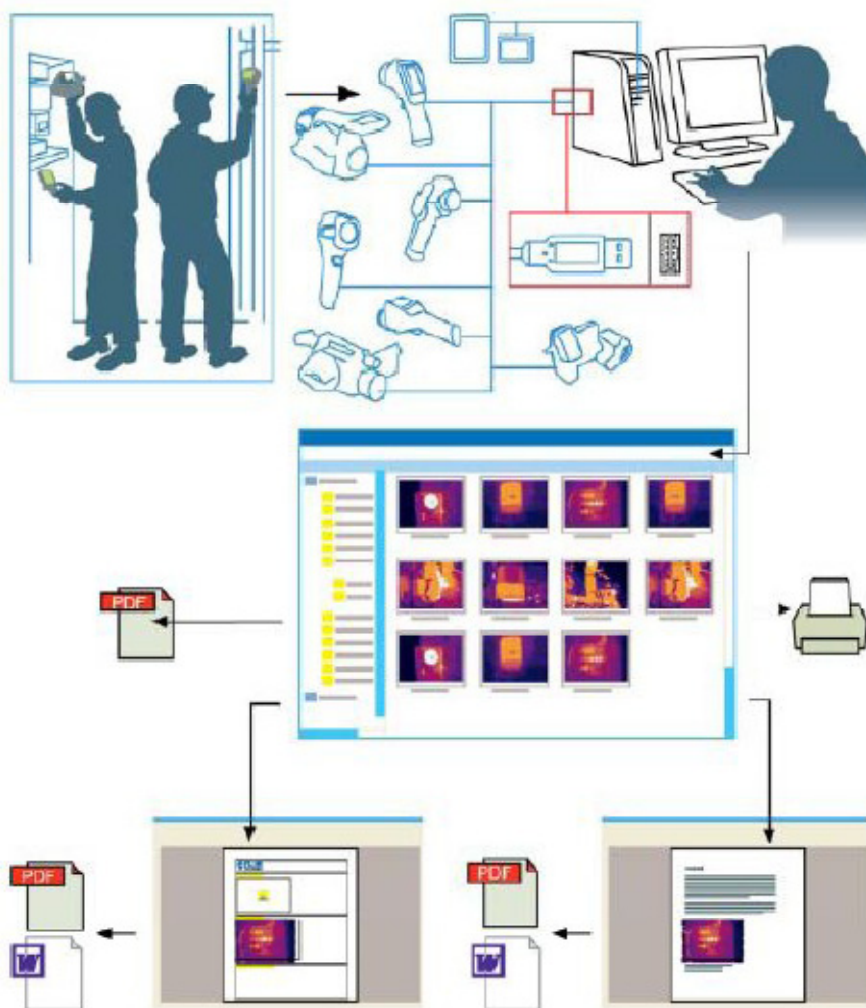


1. Σύστημα μενού.
2. Πίνακας αποτελεσμάτων μέτρησης (συντελεστής εκπομπής)
3. Ενδεικτική λυχνία λειτουργίας
4. Ενδειξη USB
5. Ενδειξη δείκτη λέιζερ
6. Ημερομηνία & ώρα.
7. Σημείο μέτρησης
8. Περιοχή μέτρησης
9. Τιμή ορίου για μια ισόθερμη στην θερμοκρασιακή κλίμακα
10. Τιμή ορίου για τη θερμοκρασιακή κλίμακα
11. Ενδειξη εύρους θερμοκρασιών
12. Ενδειξη για αυτόματο ή χειροκίνητο τρόπο λειτουργίας
13. Τρέχουσα λειτουργία για το δεξιά κουμπί επιλογής
14. Εργαλείο τροποποίησης της μέγιστης θερμοκρασίας.
15. Κλίμακα θερμοκρασίας
16. Εργαλείο τροποποίησης της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας ταυτόχρονα
17. Εργαλείο τροποποίησης της ελάχιστης θερμοκρασίας.
18. Εργαλείο ρύθμισης ισόθερμης
19. Εργαλείο αλλαγής μεγέθους της περιοχής εικόνας σε εικόνα
20. Τρέχουσα λειτουργία για το αριστερό κουμπί επιλογής

Σχήμα 5.3 :Σύνολο στοιχείων οθόνης της θερμοκάμερας.

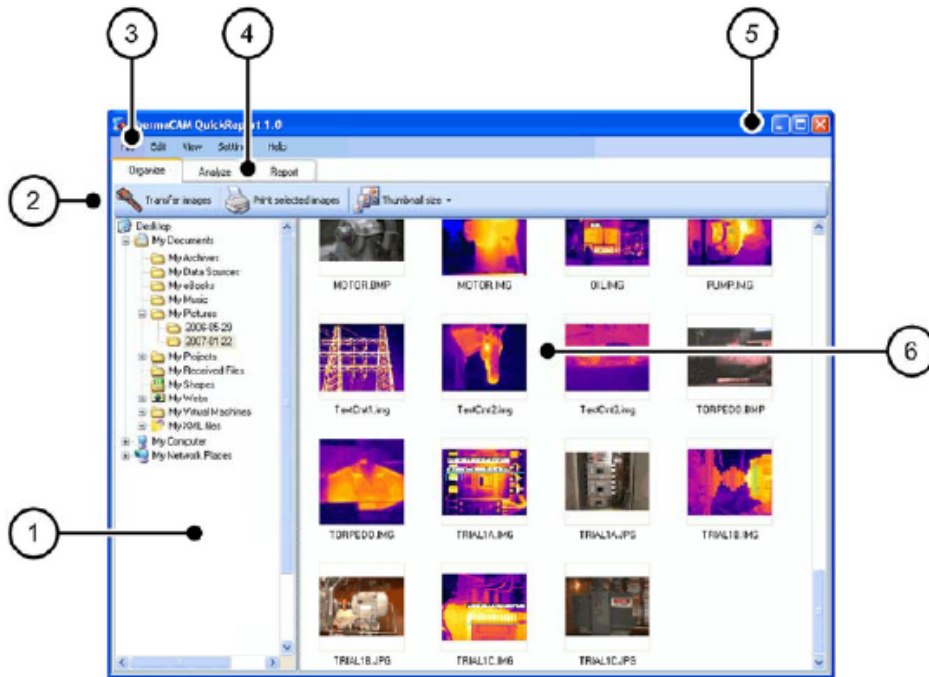
Τα στοιχεία που συλλέγονται από την θερμοκάμερα επεξεργάζονται με ειδικό λογισμικό ανάλυσης για την εξαγωγή των συμπερασμάτων. Οι θερμογραφίες που

έχουν ληφθεί κατά την διάρκεια των μετρήσεων μπορούν να μεταφερθούν σε υπολογιστή όπου επεξεργάζονται με το ειδικό λογισμικό και στην συνέχεια μπορούν να εκτυπωθούν. Μέσω αυτού του λογισμικού ανάλυσης κάθε pixel της υπέρυθρης εικόνας αντιστοιχίζεται σε μία τιμή θερμοκρασίας η οποία αναγράφεται στο excel. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα βήματα που ακολουθούνται για την επεξεργασία της εικόνας από την θερμοκάμερα:



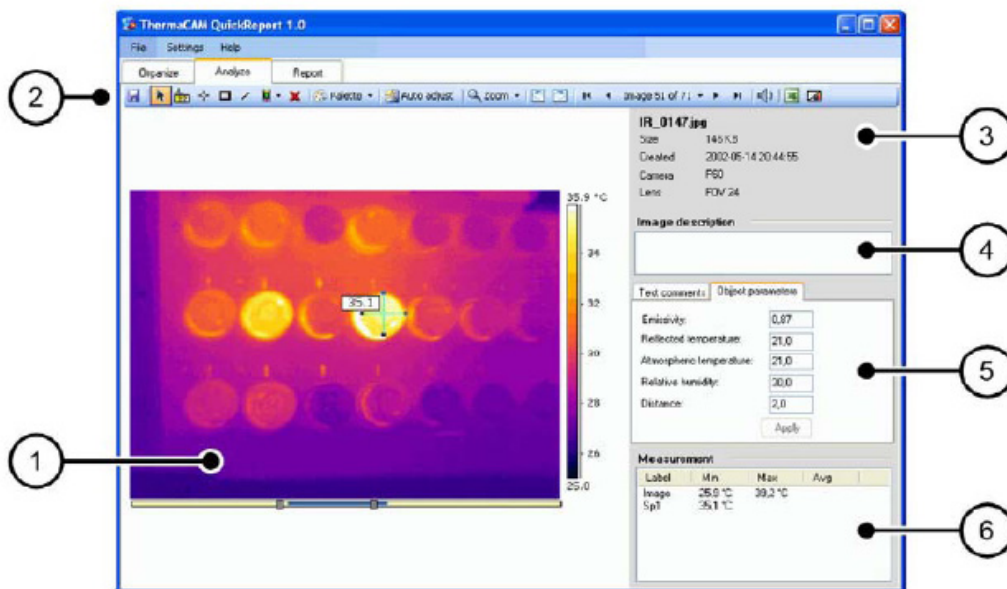
Σχήμα 5.4 :Ροή εργασίας

Η καρτέλα οργάνωσης και ανάλυσης της λογιστικής εφαρμογής είναι αντίστοιχα :



- |  |   |
|--|---|
| 1 Υποπαράθυρο δενδρικής δομής φακέλων                                  | 4 Καρτέλες Οργάνωσης, Ανάλυσης, Έκθεσης                             |
| 2 Μεταφορά εικόνων, Εκτύπωση επιλεγμένων εικόνων, Μέγεθος μικρογραφιών | 5 Κουμπιά ελαχιστοποίησης, μεγιστοποίησης και κλεισίματος παραθύρου |
| 3 Γραμμή μενού   | 6 Υποπαράθυρο εικόνων   |

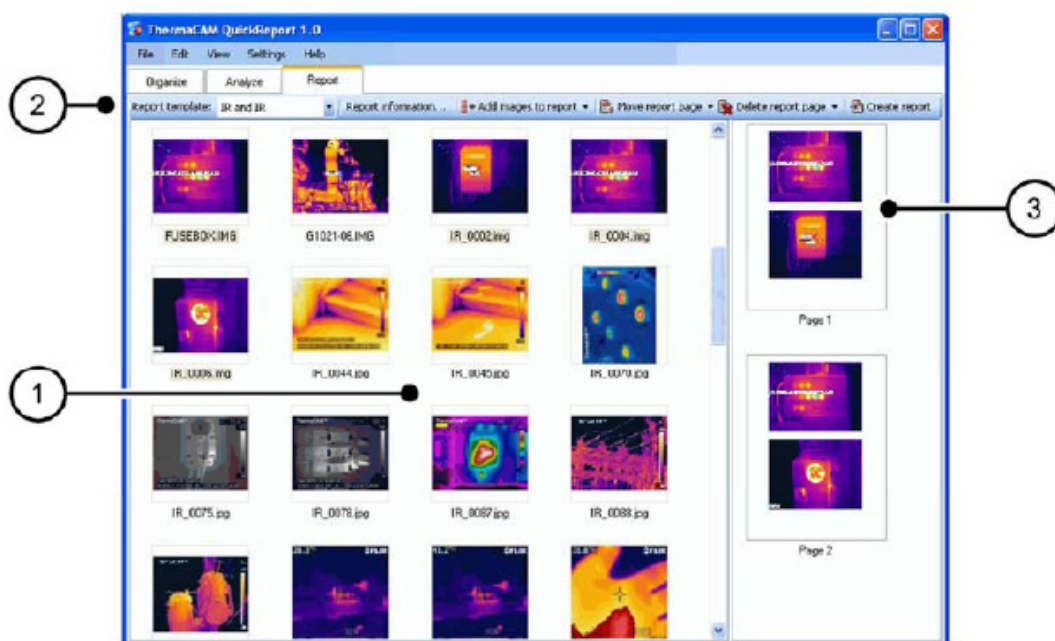
Σχήμα 5.5 :Καρτέλα οργάνωσης



- |  |  |
|--|--|
| 1 Υπέρυθρη εικόνα με εργαλεία μέτρησης | 4 Πλαίσιο κειμένου Περιγραφή εικόνας               |
| 2 Γραμμή εργαλείων εικόνας             | 5 Καρτέλα Σχόλια & Καρτέλα Παράμετροι αντικειμένου |
| 3 Πληροφορίες εικόνας από την κάμερα   | 6 Πίνακας αποτελεσμάτων μέτρησης                   |

Σχήμα 5.6 :Καρτέλα ανάλυσης

Ενώ η καρτέλα έκθεσης είναι :



- 1 Υποπαράθυρο εικόνων
- 2 Πρότυπο έκθεσης, Πληροφορίες έκθεσης, Προσθήκη εικόνων σε έκθεση, Μετακίνηση σελίδας έκθεσης, Διαγραφή σελίδας έκθεσης, Σύνταξη έκθεσης
- 3 Υποπαράθυρο προεπισκόπησης έκθεσης

Σχήμα 5.7 :Καρτέλα έκθεσης

Με την βοήθεια της θερμοκάμερας μπορούμε να εντοπίσουμε :

- θερμικές γέφυρες και διαφυγές θερμού αέρα μέσα από την κατασκευή
- αγωγούς, όπου οι συνθήκες που πρέπει να υπάρχουν είναι η ροή ζεστού ή ψυχρού υγρού ή αέρα στους αγωγούς
- διαφορετικά υλικά πίσω από ενιαία επιφάνεια (π.χ. ξύλο, πέτρα ή σκυρόδεμα κάτω από μια ενιαία επιχρισμένη επιφάνεια), εσωτερικές ανωμαλίες, κενά ή ρωγμές σε επιφάνειες (π.χ. σε καταστρώματα γερανών) και υγρασίας στα υλικά. Για την πραγματοποίηση αυτών των διαδικασιών πρέπει ο ουρανός να είναι καθαρός, η ηλιακή ακτινοβολία να είναι έντονη, οι άνεμοι να είναι ασθενείς και η θερμοκρασία του εδάφους να είναι πάνω από 0 . Κατά την νυχτερινή θερμογράφιση δεν θα πρέπει να υπάρχουν σύννεφα καθώς αντανακλούν την υπέρυθη ακτινοβολία. Η θερμογράφιση πρέπει να γίνεται όταν ο ρυθμός μεταβολής της θέρμανσης ή της ψύξης είναι μεγάλος δηλαδή είτε νωρίς το πρωί είτε αμέσως μετά την δύση του ήλιου. Η επιφάνεια των υλικών πρέπει να είναι καθαρή από χαλαρά υλικά και να μην έχουν νερό, πάγο ή χιόνι. Οι υγρές επιφάνειες πρέπει να στεγνώσουν επί τουλάχιστον ένα εικοσιτετράωρο εκτός από τις περιπτώσεις ανίχνευσης νερού μέσα στα υλικά.

Οι ιδανικές συνθήκες για τις παραπάνω διαδικασίες είναι :

- ελάχιστη ή καθόλου ηλιοφάνεια
- αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας σε ένα κτίριο για αρκετό χρονικό διάστημα
- ύπαρξη μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών ανάμεσα στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο του κτιρίου [1]

## 5.2.2 Θερμόμετρο - Υγρασιόμετρο

Χρησιμοποιήθηκε για την καταμέτρηση και καταγραφή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα. Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RTR-53A οι προδιαγραφές του οποίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα[21]:

**Πίνακας 5.1:**Βασικά χαρακτηριστικά θερμομέτρου - υγρασιόμετρου RTR-53A.

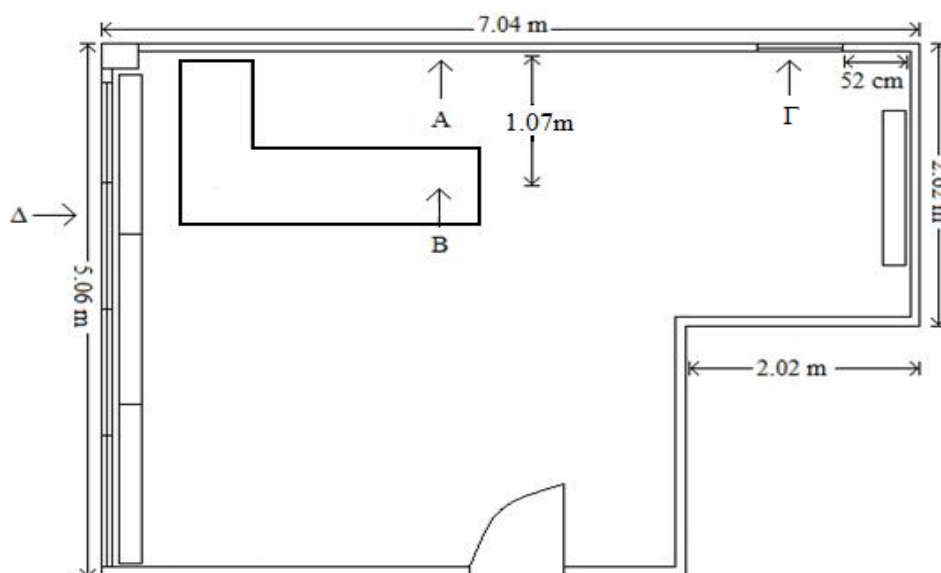
Μετρούμενα μεγέθη	Θερμοκρασία	Υγρασία
Κανάλια μετρήσεων	1	1
Εύρος λειτουργίας	0 έως 55°C	10 έως 95%
Διακριτική ικανότητα προβαλλόμενης μέτρησης	0.1°C	1%
Ακρίβεια μέτρησης	±0.3°C	±5%
Χρόνος δειγματοληψίας	1,2,5,10,15,20,30 δευτερόλεπτα 1,2,5,10,15,20,30,60 λεπτά	
Χωρητικότητα μνήμης καταγραφών	8000 readings * 2 κανάλια	
Μπαταρία	Λιθίου LS14250(SAFT) ή AC Adaptor	
Μέγιστη απόσταση μετάδοσης δεδομένων	100 μέτρα	
Διαστάσεις	Y62*47*19 mm	
Βάρος	56gr	



Σχήμα 5.8 : Υγρασιόμετρο RTR-53A

### 5.3 Πειραματική διάταξη μετρήσεων

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων επιλέχθηκε γραφείο στο ισόγειο του παλαιού κτιρίου Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Η κάτοψη του γραφείου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 5.9 :Κάτοψη γραφείου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

Οι μετρήσεις έγιναν στο σημείο Α του εξωτερικού τοίχου μήκους 7,04m ο οποίος έχει ένα παράθυρο μήκους 1,09m.

Η βασική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων αποτελούταν από:

- δύο θερμοκάμερες (Flir b50 και Infracam) οι οποίες ήταν τοποθετημένες στο σημείο Β σε απόσταση 1,7 μέτρων από το σημείο Α με την βοήθεια των οποίων λαμβάνονταν τα θερμογραφήματα τα οποία στην συνέχεια επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος FlirQuickreport ώστε να προκύψει η θερμοκρασία της εξεταζόμενης τοιχοποιίας
- δύο υγρασιόμετρα RTR-53A τα οποία μετρούσαν την θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος μέσα στο γραφείο αλλά και έξω από αυτό. Το ένα υγρασιόμετρο ήταν τοποθετημένο στο σημείο Β για την μέτρηση των εσωτερικών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας, ενώ το δεύτερο υγρασιόμετρο τοποθετήθηκε έξω από το παράθυρο στο σημείο Δ για την μέτρηση των εξωτερικών συνθηκών.



**Σχήμα 5.10:** Θερμοκάμερα και θερμόμετρο – υγρασιόμετρο.

- Μία επιφάνεια ανάκλασης κατασκευασμένη από αλουμινόχαρτο η οποία τοποθετήθηκε στο σημείο Α του τοίχου για την διεξαγωγή των πειραμάτων μέτρησης της θερμοκρασίας ανάκλασης καθώς και της γωνίας λήψης. Για την κατασκευή της χρησιμοποιήθηκε αλουμινόχαρτο το οποίο αρχικά τσαλακώθηκε. Στην συνέχεια ισιώθηκε και κολλήθηκε πάνω σε ένα κομμάτι χαρτόνι του ίδιου μεγέθους.



**Σχήμα 5.11:** Ανακλαστική επιφάνεια

- Μία μαύρη ταινία με συντελεστή εκπομπής 0,97 η οποία τοποθετήθηκε στο σημείο A της εξεταζόμενης τοιχοποιίας και χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του συντελεστή εκπομπής.



**Σχήμα 5.12:** Μαύρη ταινία που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής.

- Δύο αερόθερμα ισχύος 2000W τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος προσδιορισμού του συντελεστή εκπομπής για να αυξήσουν την θερμοκρασία της ταινίας κατά 20°C όπως ορίζει το πρότυπο.

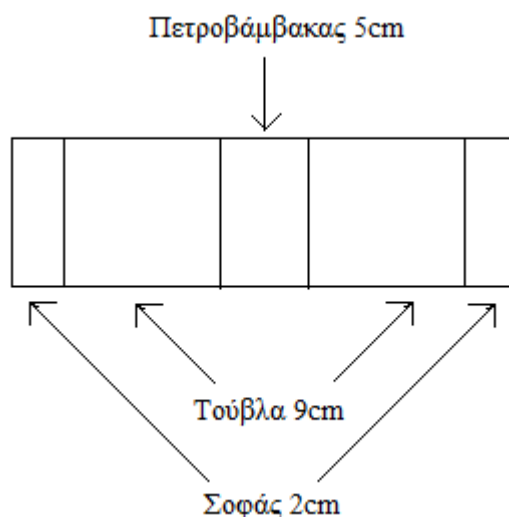




Σχήμα 5.13: Αερόθερμο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του προσδιορισμού του συντελεστή εκπομπής.

## 5.4 Συντελεστής θερμοπερατότητας εξεταζόμενης τοιχοποιίας

Για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας σε πρώτη φάση υπολογίστηκαν οι συντελεστές θερμοδιαφυγής  $1/\Lambda$  κάθε δομικού στοιχείου. Ο εξεταζόμενος τοίχος είναι διπλός δρομικός, χτισμένος από οπτόπλιθο, με ενδιάμεση θερμομόνωση, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.14: Υλικά εξεταζόμενης τοιχοποιίας

Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τα αποτελέσματα για κάθε θερμική αντίσταση  $d/\lambda$  σε  $m^2K/W$ .

**Πίνακας 5.2 :**Θερμικές αντιστάσεις d/λ στρώσεων εξεταζόμενης τοιχοποιίας

Στρώσεις δομικού υλικού	d (m)	λ	d/λ
επίχρησμα εσωτερικό ασβεστοκονίαμα	0.02	0.87	0.02
οπτοπλινθοδομή με διάτρητες οπτοπλίνθους	0.09	0.45	0.20
πετροβάμβακας	0.05	0.04	1.43
οπτοπλινθοδομή με διάτρητες οπτοπλίνθους	0.09	0.45	0.20
επίχρησμα εξωτερικό ασβεστοκονίαμα	0.02	0.87	0.02

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε για τον θεωρητικό προσδιορισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας, η αντίσταση θερμοδιαφυγής προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων d/λ. Κατά συνέπεια η αντίσταση θερμοδιαφυγής του συγκεκριμένου τοίχου προκύπτει ίση με 1,875m<sup>2</sup>K/W. Από τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

**Πίνακας 5.3 :** Αντιστάσεις θερμικής μετάβασης και αντίσταση θερμοδιαφυγής εξεταζόμενης τοιχοποιίας.

Αντίσταση θερμικής μετάβασης (εσωτερικά)	R <sub>i</sub>	m <sup>2</sup> K/W	0.13
Αντίσταση θερμοδιαφυγής	1/Λ	m <sup>2</sup> K/W	1.875
Αντίσταση θερμικής μετάβασης (εξωτερικά)	R <sub>e</sub>	m <sup>2</sup> K/W	0.04

Οι ζητούμενες τιμές για τις αντιστάσεις θερμικής μετάβασης λήφθηκαν από την τεχνική οδηγία του Τ.Ε.Ε. ο οποίος παρατίθεται παρακάτω:

**Πίνακας 5.4:** Αντιστάσεις Θερμικής Μετάβασης (m<sup>2</sup>K/W)

Αντιστάσεις Θερμικής Μετάβασης m <sup>2</sup> K/W	α <sub>i</sub> (εσωτερ.)	α <sub>e</sub> (εξωτερ.)
Εξωτερικοί τοίχοι και παράθυρα	0,13	0,04
Στέγες, δώματα (ανερχόμενη ροή θερμότητας)	0,12	0,04
Τοίχος, οροφή που συνορεύει με μή θερμαινόμενο χώρο	0,12	0,12
Τοίχος σε επαφή με το έδαφος	0,12	0,00
Δάπεδο επάνω από μή θερμαινόμενο χώρο (κατερχόμενη ροή)	0,17	0,17
Δάπεδο σε επαφή με το έδαφος	0,17	0,00
Δάπεδο επάνω από ανοικτή διάβαση	0,17	0,04

Επομένως προκύπτει πως η συνολική θερμική αντίσταση προκύπτει ως το άθροισμα των αντιστάσεων θερμικής μετάβασης και της αντίστασης θερμοδιαφυγής και είναι ίση με R<sub>T</sub>=2,045 m<sup>2</sup>K/W οπότε ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι U=0,5W/m<sup>2</sup>K.

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας που συνοδεύει τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας λαμβάνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Το πάχος του κάθε υλικού κυμαίνεται μέσα στα όρια  $\alpha = \pm 0,002\text{m}$ . Επειδή το πάχος των υλικών της εξεταζόμενης τοιχοποιίας έχει προσδιοριστεί με προσέγγιση, το πάχος του θερμομονωτικού υλικού είναι δυνατό να έχει μεγαλύτερο εύρος τιμών, μέχρι και  $\alpha = \pm 0,02\text{m}$ , ειδικά στην περίπτωση που δεν διατίθενται, πλέον, τα παραστατικά από την προμήθεια των υλικών για την κατασκευή.
2. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κάθε υλικού κυμαίνεται μέσα στα όρια  $\alpha = \pm 0,05 \text{ W/mK}$ . Αν η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας δίνεται σε μορφή διαστήματος τιμών τότε διαιρείται το μισό του διαστήματος με τον συντελεστή κάλυψης  $k$ . θεωρώντας ότι η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ακολουθεί κανονική κατανομή ο συντελεστής κάλυψης παίρνει την τιμή  $k=1,96$ .
3. Η τιμή της αντίστασης  $R_{si}$  κυμαίνεται μέσα στα όρια  $\alpha = \pm 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$
4. Η τιμή της αντίστασης  $R_{se}$  κυμαίνεται μέσα στα όρια  $\alpha = \pm 0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Στους πίνακες 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται αντίστοιχα η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας και της αβεβαιότητας του για διάφορα πιθανά θερμομονωτικά υλικά και για εύρος πάχους των θερμομονωτικών υλικών  $\alpha = \pm 0,002\text{m}$  και  $\alpha = \pm 0,02\text{m}$ .

**Πίνακας 5.5:** συντελεστής θερμικής διαπερατότητας εξεταζόμενης τοιχοποιίας για διάφορα είδη μονωτικών υλικών

<b>ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>R_i</math></b>	<b><math>1/\Lambda</math></b>	<b><math>R_T</math></b>	<b>U</b>
<b>A. Ανόργανης προέλευσης</b>					
1. Περλίτης	0.070	0.714	1.160	1.330	0.75
2. Μονωτικά με συνθετικό τη γύψο	0.210	0.238	0.684	0.854	1.17
3. Αφρώδες γυαλί	0.040-0,052	1.250	1.696	1.866	0.54
4. Υαλοβάμβακας	0.035-0,041	1.429	1.875	2.045	0.50
5. Πετροβάμβακας	0.035-0,041	1.429	1.875	2.045	0.50
<b>B. Οργανικής προέλευσης</b>					
1. Φελλός					
1.1 Σκληρά πλακίδια από φελλό	0.065	0.769	1.215	1.385	0.72
1.2 Φύλλα και πλάκες από φελλό	0.042-0,046	1.190	1.636	1.806	0.55
2. Τύρφη					
2.1 σε ξηρή κατάσταση	0.200	0.250	0.696	0.866	1.15
2.2 σε υγρή κατάσταση	0.500	0.100	0.546	0.716	1.40
3. Πλάκες ξυλόμαλλου	0.090	0.555	1.002	1.172	0.85
4. Διογκωμένη πολυστερίνη					
4.1 σε κόκκους	0.045	1.111	1.557	1.727	0.58
4.2 σε πλάκες	0.035	1.429	1.875	2.045	0.50
4.3 με γραφίτη σε πλάκες	0.031	1.613	2.059	2.229	0.45
5. Αφρώδης εξυλασμένη πολυστερίνη	0.033	1.515	1.961	2.131	0.47
6. Διογκωμένη πολυουρεθάνη	0.023	2.174	2.62	2.79	0.36

**Πίνακας 5.6:** Υπολογισμός αβεβαιότητας συντελεστή θερμοπερατότητας για  $\alpha=0,002$  και  $\alpha=0,02$ .

Θερμομονωτικό υλικό	Συντελεστής θερμοπερατότητας [W/m <sup>2</sup> K]	
	$\alpha=0.002$	$\alpha=0.02$
Πετροβάμβακας	0,50±0,03	0,5±0,1
Διογκωμένη πολυστερίνη		
1.σε κόκκους	0,58±0,04	0,6±0,1
2.σε πλάκες	0,50±0,03	0,5±0,1
3. σε πλάκες με γραφίτη	0,45±0,02	0,4±0,1
Αφρώδης εξυλασμένη πολυστερίνη	0,47±0,02	0,5±0,1
Διογκωμένη πολουρεθάνη	0,36±0,04	0,4±0,1

## 5.5 Διαδικασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

- πείραμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής
- πείραμα για την μέτρηση της θερμοκρασίας ανάκλασης για διάφορες γωνίες λήψεων
- πείραμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας

### 5.5.1 Προσδιορισμός συντελεστή εκπομπής

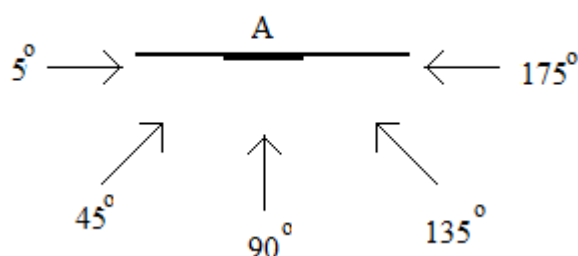
Για την διεξαγωγή των πειραμάτων για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής χρησιμοποιήθηκαν οι δύο θερμοκάμερες, ένα υγρασιόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος, μια μαύρη ταινία με συντελεστή εκπομπής  $\epsilon=0,97$  καθώς και δύο αερόθερμα ισχύος 2000W για την θέρμανση της ταινίας.

**Πείραμα 1 :** Το 1<sup>ο</sup> πείραμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής πραγματοποιήθηκε στις 21 Δεκεμβρίου 2010, στις 11:00 το πρωί.

**Πείραμα 2 :** Το 2<sup>ο</sup> πείραμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής πραγματοποιήθηκε στις 10 Μαρτίου 2011, στις 11:00 το πρωί. Η θερμοκρασία στον εσωτερικό χώρο ήταν 24,8°C και διατηρήθηκε σταθερή σε όλη την διάρκεια του πειράματος.

### 5.5.2 Πείραμα γωνίας λήψης

Η μέτρηση της θερμοκρασίας ανάκλασης πραγματοποιήθηκε στις 10 Μαρτίου 2011 στις 11:00 το πρωί. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι δύο θερμοκάμερες, το θερμόμετρο-υγρασιόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος και μια ανακλαστική επιφάνεια. Η ανακλαστική επιφάνεια τοποθετήθηκε στο σημείο A όπου γίνονται οι μετρήσεις και στη συνέχεια με την βοήθεια των δύο θερμοκαμερών λήφθηκαν θερμογραφήματα για γωνίες λήψης  $5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $175^\circ$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 5.15 : Διαφορετικές θέσεις λήψης για μέτρηση θερμοκρασίας ανάκλασης

### 5.5.3 Πειράματα προσδιορισμού συντελεστή θερμικής διαπερατότητας

**1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων:** Η πρώτη διεξαγωγή των μετρήσεων για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας έγινε στις 4 Φεβρουαρίου 2011. Η θερμοκρασία του εξωτερικού χώρου ήταν μικρότερη από  $8^\circ\text{C}$  ενώ η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου ήταν κοντά στους  $22^\circ\text{C}$  και διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή. Η ημέρα αυτή επιλέχθηκε κατάλληλα ώστε να μην υπάρχουν οι δυσμενείς επιδράσεις της βροχής η οποία επηρεάζει την θερμοκρασία του αντικειμένου στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις. Τα φωτιστικά σώματα στον χώρο όπου διεξάγονταν οι μετρήσεις δεν λειτουργούσαν ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα. Στις 16:20 τα φωτιστικά σώματα του διπλανού γραφείου τέθηκαν σε λειτουργία ενώ στις 17:00 έκλεισε η θέρμανση. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 09:35 το πρωί και τελείωσαν στις 19:00 το βράδυ.

**2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων:** Η δεύτερη και τελική διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στις 3 Ιουνίου 2011. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 09:35 το πρωί και τελείωσαν στις 14:00 το μεσημέρι. Η θερμοκρασία του εξωτερικού χώρου κυμαινόταν ανάμεσα στους  $25^\circ\text{C}$  με  $27^\circ\text{C}$  ενώ η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου

είχε απόκλιση από την αντίστοιχη του εξωτερικού το πολύ έναν βαθμό καθώς δεν υπήρχε κλιματισμός. Το θερμόμετρο-υγρασιόμετρο που κατέγραφε την θερμοκρασία και την υγρασία του εξωτερικού χώρου τοποθετήθηκε στο σημείο Γ του σχήματος καθώς στο Δ που τοποθετούνταν στις προηγούμενες μετρήσεις υπήρχε η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιοφάνεια και η συννεφιά εναλλάσσονταν διαρκώς ενώ στον χώρο όπου διεξάγονταν οι μετρήσεις δεν λειτουργούσαν τα φωτιστικά ούτε τα κλιματιστικά σώματα.

# ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6***

## ***«Πείραμα και Αποτελέσματα»***

---

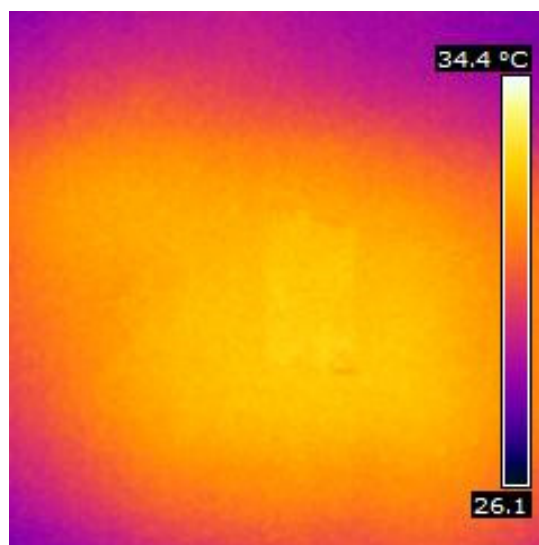




## 6.1 Αποτελέσματα μετρήσεων και σχολιασμός

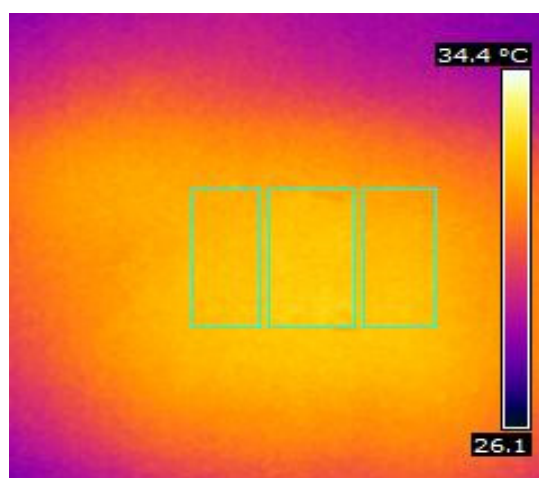
### 6.1.1 Υπολογισμός συντελεστή εκπομπής

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής που περιγράφηκαν παραπάνω λήφθηκαν θερμογραφήματα της μαύρης ταινίας που χρησιμοποιήθηκε και με την βοήθεια του προγράμματος FlirQuickreport υπολογίστηκε η θερμοκρασία της για συντελεστή εκπομπής 0,97.



**Σχήμα 6.1:** Θερμογράφημα μαύρης ταινίας κατά τη διάρκεια του προσδιορισμού του συντελεστή εκπομπής

Στη συνέχεια επιλέχθηκε μια περιοχή δεξιά και μια αριστερά της μαύρης ταινίας και καταγράφηκε ο συντελεστής εκπομπής στον οποίο οι 2 περιοχές είχαν την ίδια θερμοκρασία με την θερμοκρασία της μαύρης ταινίας.



**Σχήμα 6.2:** Υπολογισμός συντελεστή εκπομπής με το πρόγραμμα Flirb50.

Με βάση τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή εκπομπής υπολογίστηκε ο μέσος συντελεστής εκπομπής ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στους επόμενους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό της θερμοπερατότητας. Από τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας βρέθηκε η τύπου Α αβεβαιότητα μέτρησης του συντελεστή εκπομπής.

Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

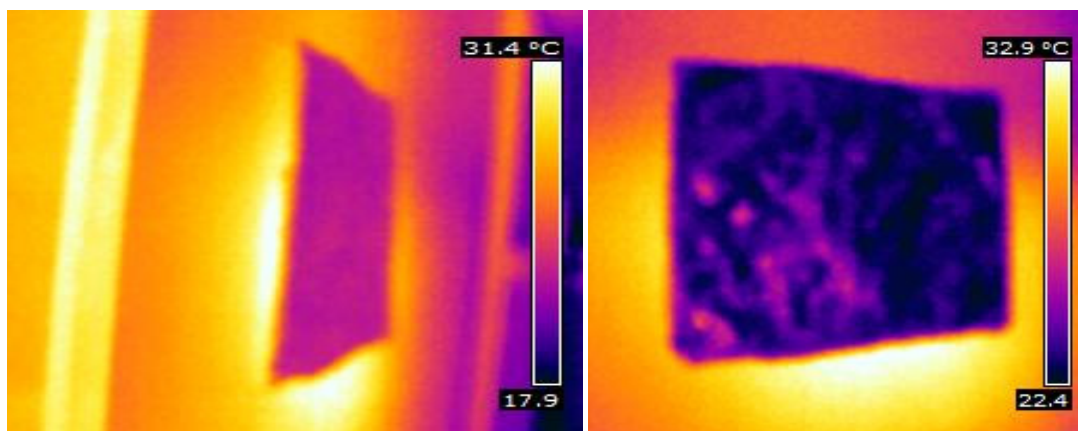
**Πίνακας 6.1:** Αποτελέσματα υπολογισμών για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής

A/A	Θερμοκρασία ταινίας	Θερμοκρασία δεξιά	Θερμοκρασία αριστερά	Συντελεστής εκπομπής
1	38.6	38.6	38.8	0.97
2	38.1	38.1	38.4	0.97
3	37.8	37.8	38	0.97
4	37.3	37.2	37.4	0.96
5	36.8	36.7	36.9	0.96
6	33	32.9	32.9	0.94
7	32.8	32.7	32.7	0.94
8	33	32.7	32.8	0.93
9	32.8	32.5	32.5	0.93
10	32.9	32.6	32.7	0.92
<b>Μέση τιμή</b>				<b>0.95±0,01</b>

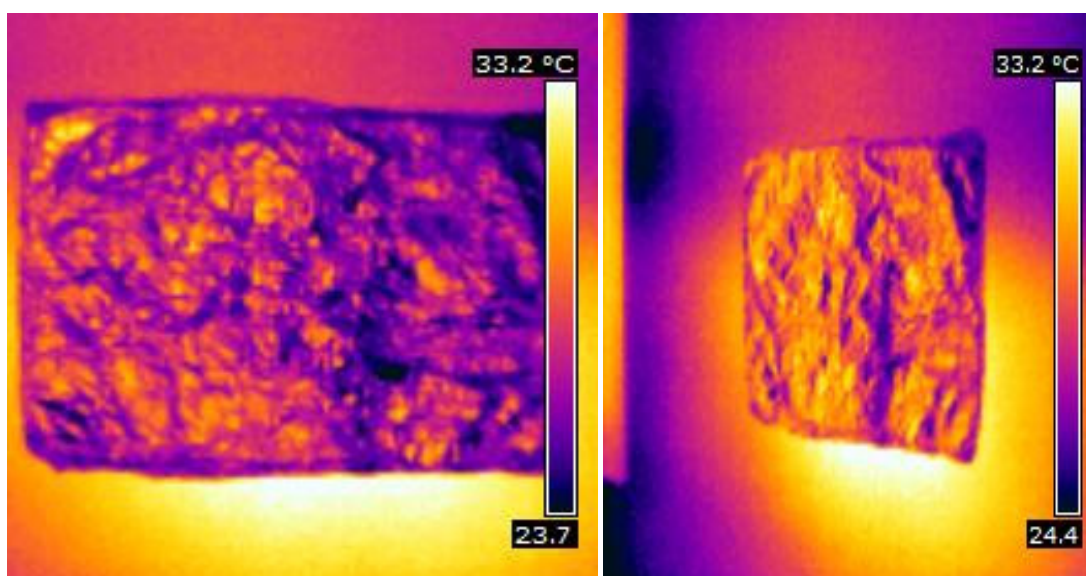
Η τιμή του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 6.1, είναι υψηλή και προσεγγίζει την τιμή του συντελεστή εκπομπής της ταινίας που χρησιμοποιήθηκε για τον πειραματικό προσδιορισμό του. Κατά τη θέρμανση της ταινίας σε θερμοκρασία 20°C πάνω από τη θερμοκρασία του αέρα, στα θερμογραφήματα που λήφθηκαν από το πείραμα, η θερμοκρασία της ταινίας δεν διέφερε από τη θερμοκρασία της επιφάνειας λόγω της υψηλής τιμής του συντελεστή εκπομπής της με αποτέλεσμα η ταινία να μην διαχωρίζεται εύκολα από την επιφάνεια, και ο συντελεστής εκπομπής να είναι ίδιος με αυτός της ταινίας. Όσο έπεφτε η θερμοκρασία, η μαύρη ταινία γινόταν σταδιακά πιο ευκρινής με αποτέλεσμα η τιμή του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας να μειώνεται μέχρι τον τελικό προσδιορισμό της μέσης τιμής.

### 6.1.2 Γωνία λήψης

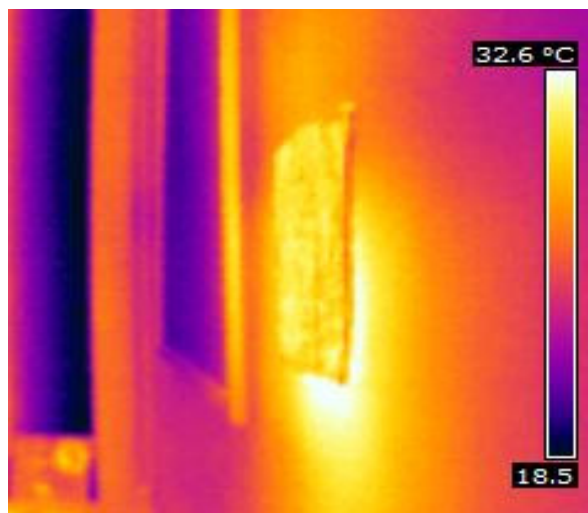
Κατά την διεξαγωγή του πειράματος για τον προσδιορισμό της επίδρασης της γωνίας από την οποία λαμβάνονταν τα θερμογραφήματα στον υπολογισμό της θερμοκρασίας ανάκλασης, λήφθηκαν θερμογραφήματα για γωνίες 5<sup>0</sup>, 45<sup>0</sup>, 90<sup>0</sup>, 135<sup>0</sup> και 175<sup>0</sup>.



**Σχήμα 6.3:** Θερμογραφήματα απεικόνισης ανακλαστικής επιφάνειας για  $\varphi = 5^\circ$  και  $\varphi = 45^\circ$  αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.4:** Θερμογραφήματα απεικόνισης ανακλαστικής επιφάνειας για  $\varphi = 90^\circ$  και  $\varphi = 135^\circ$  αντίστοιχα

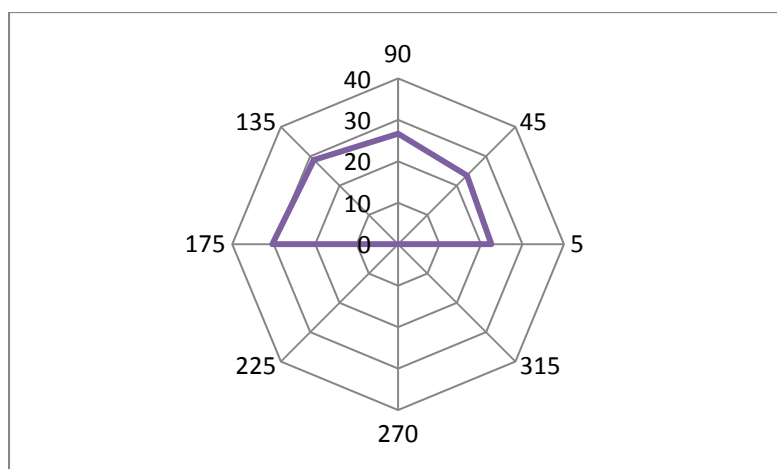


Σχήμα 6.5: Θερμογράφημα απεικόνισης ανακλαστικής επιφάνειας για  $\varphi = 175^\circ$

Στη συνέχεια τα θερμογραφήματα αυτά υποβλήθηκαν σε επεξεργασία στον υπολογιστή με το πρόγραμμα FlirQuickreport για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας ανάκλασης. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα καθώς και στο αντίστοιχο διάγραμμα όπου φαίνεται η σχέση γωνίας λήψης και θερμοκρασίας.

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα μετρήσεων γωνίας λήψης

Γωνία λήψης	Θερμοκρασία
5	22.47
45	23.47
90	26.67
135	28.76
175	30.33



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα απεικόνισης θερμοκρασίας - γωνίας λήψης

Η θερμική κάμερα αντιλαμβάνεται κάθε ακτινοβολία που εισέρχεται στο φακό της, όχι μόνο εκείνη που εκπέμπεται από το αντικείμενο του οποίου μετράται η θερμοκρασία αλλά και εκείνη που προέρχεται από άλλες πηγές και ανακλάται πάνω στο αντικείμενο. Όταν το αντικείμενο αυτό έχει συντελεστή εκπομπής σχεδόν  $\epsilon=0$ , όπως στο συγκεκριμένο πείραμα, τότε η θερμική κάμερα μετρά μόνο την ακτινοβολία που προέρχεται από τις ανακλάσεις. Όταν η μέτρηση γίνεται υπό γωνία, η ακτινοβολία η οποία φτάνει στην θερμοκάμερα προέρχεται από την συμμετρική ως προς την κάθετο στην επιφάνεια γωνία. Για οξείες γωνίες η ακτινοβολία που φτάνει στην θερμική κάμερα και επομένως η θερμοκρασία η οποία μετράται είναι μικρότερη από την αντίστοιχη που μετράται σε γωνία  $90^\circ$  καθώς, όπως φαίνεται από τα θερμογραφήματα των σχημάτων 6.3, 6.4 και 6.5, η επιφάνεια του αντικειμένου είναι μικρότερη. Συνεπώς, όσο η γωνία παρατήρησης της επιφάνειας πλησιάζει την κάθετο προς την επιφάνεια, η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις για γωνίες μικρότερες των  $90^\circ$ . Για γωνίες μεγαλύτερες των  $90^\circ$  εκτός από την ακτινοβολία που προέρχεται από πηγές ανάκλασης μέσα στο χώρο των μετρήσεων υπάρχει επιπρόσθετη ακτινοβολία από τον ήλιο λόγω του παραθύρου που υπάρχει στον τοίχο αριστερά της επιφάνειας μετρήσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα.5.9. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία να αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία και να πλησιάζει τις  $180^\circ$ .

### 6.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων συντελεστή θερμοπερατότητας

#### 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Σε πρώτη φάση συλλέχθηκαν η θερμοκρασία και υγρασία του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου όπως είχαν καταγραφεί από τα δύο θερμομέτρα - υγρασιόμετρα.

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας που συνοδεύει την τιμή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας λήφθηκαν οι εξής παραδοχές:

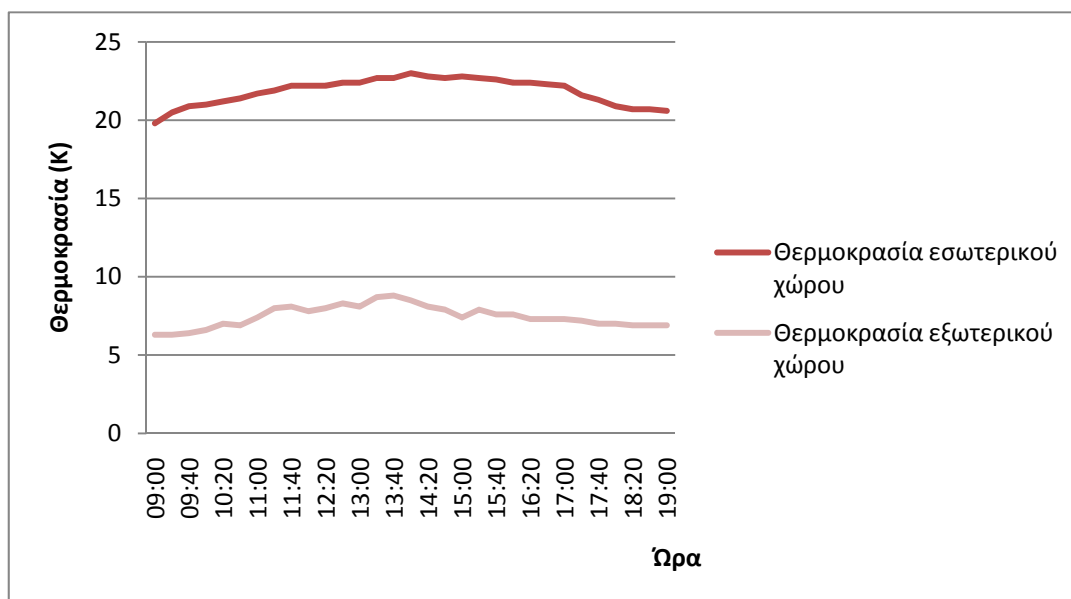
1. Η ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας του εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, όπως ορίζεται από το εγχειρίδιο χρήσης του θερμομέτρου-υγρασιόμετρου, είναι  $\alpha=\pm 0,3^\circ\text{C}$ . Η ακρίβεια για την μέτρηση της υγρασίας είναι  $\alpha=\pm 5\%$ .
2. Η διακριτική ικανότητα της του θερμομέτρου-υγρασιόμετρου για την μέτρηση της θερμοκρασίας είναι  $0,1^\circ\text{C}$  και για την υγρασία είναι 1%.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές αυτές:

**Πίνακας 6.3:**Θερμοκρασία και υγρασία μέσα και έξω από τον χώρο των μετρήσεων

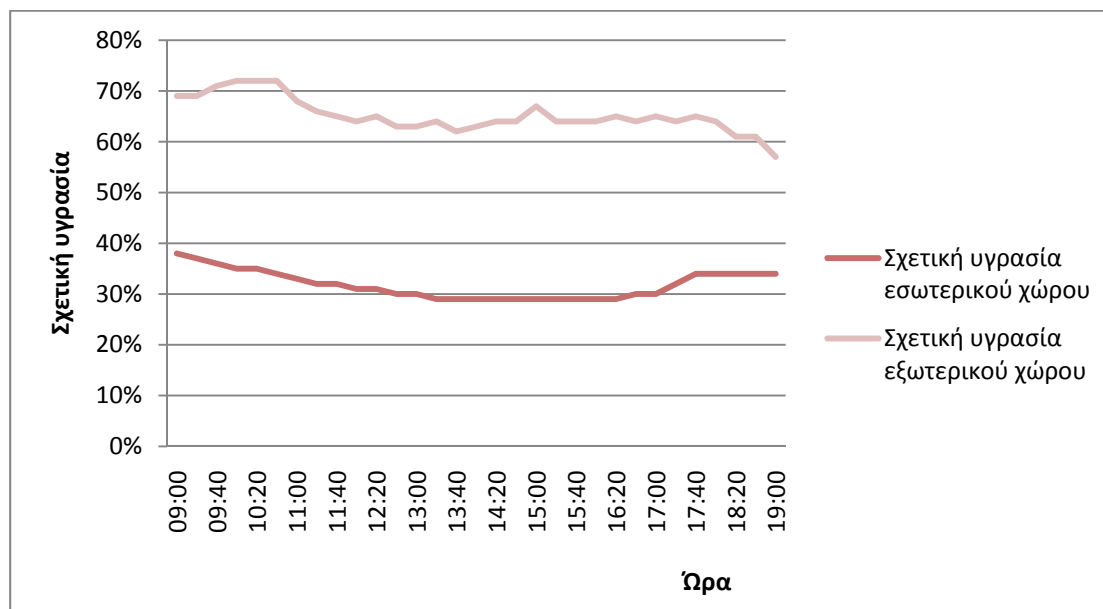
Α/Α	ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ ΕΝΤΟΣ		ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ ΕΚΤΟΣ	
		ΘΕΡΜ/ΣΙΑ [°C]	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ [%]	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ [°C]	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ [%]
1	09:00	19.8±0.2	38±3	6.3±0.2	69±3
2	09:20	20.5±0.2	37±3	6.3±0.2	69±3
3	09:40	20.9±0.2	36±3	6.4±0.2	71±3
4	10:00	21±0.2	35±3	6.6±0.2	72±3
5	10:20	21.2±0.2	35±3	7±0.2	72±3
6	10:40	21.4±0.2	34±3	6.9±0.2	72±3
7	11:00	21.7±0.2	33±3	7.4±0.2	68±3
8	11:20	21.9±0.2	32±3	8±0.2	66±3
9	11:40	22.2±0.2	32±3	8.1±0.2	65±3
10	12:00	22.2±0.2	31±3	7.8±0.2	64±3
11	12:20	22.2±0.2	31±3	8±0.2	65±3
12	12:40	22.4±0.2	30±3	8.3±0.2	63±3
13	13:00	22.4±0.2	30±3	8.1±0.2	63±3
14	13:20	22.7±0.2	29±3	8.7±0.2	64±3
15	13:40	22.7±0.2	29±3	8.8±0.2	62±3
16	14:00	23±0.2	29±3	8.5±0.2	63±3
17	14:20	22.8±0.2	29±3	8.1±0.2	64±3
18	14:40	22.7±0.2	29±3	7.9±0.2	64±3
19	15:00	22.8±0.2	29±3	7.4±0.2	67±3
20	15:20	22.7±0.2	29±3	7.9±0.2	64±3
21	15:40	22.6±0.2	29±3	7.6±0.2	64±3
22	16:00	22.4±0.2	29±3	7.6±0.2	64±3
23	16:20	22.4±0.2	29±3	7.3±0.2	65±3
24	16:40	22.3±0.2	30±3	7.3±0.2	64±3
25	17:00	22.2±0.2	30±3	7.3±0.2	65±3
26	17:20	21.6±0.2	32±3	7.2±0.2	64±3
27	17:40	21.3±0.2	34±3	7±0.2	65±3
28	18:00	20.9±0.2	34±3	7±0.2	64±3
29	18:20	20.7±0.2	34±3	6.9±0.2	61±3
30	18:40	20.7±0.2	34±3	6.9±0.2	61±3
31	19:00	20.6±0.2	34±3	6.9±0.2	57±3

Η γραφική απεικόνιση των παραπάνω τιμών της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου παρουσιάζεται στα παρακάτω γραφήματα:



**Σχήμα 6.7:** Διάγραμμα απεικόνισης θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια της 1<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6.7, τόσο η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου όσο και η θερμοκρασία του εξωτερικού χώρου δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στις τιμές τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, με εξαίρεση τις μεσημεριανές ώρες όπου παρατηρείται αύξηση της τάξεως του 2-3<sup>0</sup>C η οποία είναι αναμενόμενη. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου είναι μονίμως πάνω από τους 14<sup>0</sup>C η οποία είναι επιθυμητή για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας.



**Σχήμα 6.8:** Διάγραμμα απεικόνισης σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου για την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Από τα θερμογραφήματα που λήφθηκαν από τις δύο θερμοκάμερες υπολογίστηκε η θερμοκρασία ανάκλασης ρυθμίζοντας κάθε φορά στις παραμέτρους την τιμή του συντελεστή εκπομπής που υπολογίστηκε προηγουμένως και την θερμοκρασία και υγρασία του χώρου όπως αυτές μετρήθηκαν από τα θερμομόμετρα - υγρασιόμετρα. Έχοντας υπολογίσει την θερμοκρασία ανάκλασης προσδιορίστηκε η θερμοκρασία του σημείου A του τοίχου όπως είχε καταγραφεί από τις θερμοκάμερες, ρυθμίζοντας στο πρόγραμμα όπου επεξεργάστηκαν τα θερμογραφήματα ως:

- τιμή του συντελεστή εκπομπής την τιμή 0,95 η οποία υπολογίστηκε προηγουμένως με βάση τις μετρήσεις που προέκυψαν από το πείραμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκπομπής
- εσωτερικές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας αυτές που καταγράφηκαν από το εσωτερικό θερμομόμετρο - υγρασιόμετρο
- τιμή της θερμοκρασίας ανάκλασης αυτή που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας ανάκλασης επαναλαμβάνονταν κάθε μία ώρα ενώ οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας κάθε 20 λεπτά. Επομένως κάθε μία μέτρηση της θερμοκρασίας ανάκλασης αντιστοιχεί σε τρεις επαναλήψεις της θερμοκρασίας επιφάνειας, δηλαδή την αμέσως προηγούμενη και την αμέσως επόμενη. Για παράδειγμα η θερμοκρασία ανάκλασης η οποία μετρήθηκε στις 12:00 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας επιφάνειας στην μέτρηση που έγινε στις 12:00 αλλά και στην αμέσως προηγούμενη και αμέσως επόμενη μέτρηση, δηλαδή για την μέτρηση στις 11:40 και στις 12:20. Αντίστοιχα η θερμοκρασία ανάκλασης που μετρήθηκε στις 13:00 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας στις μετρήσεις που έγιναν στις 12:40, στις 13:00 και στις 13:20.

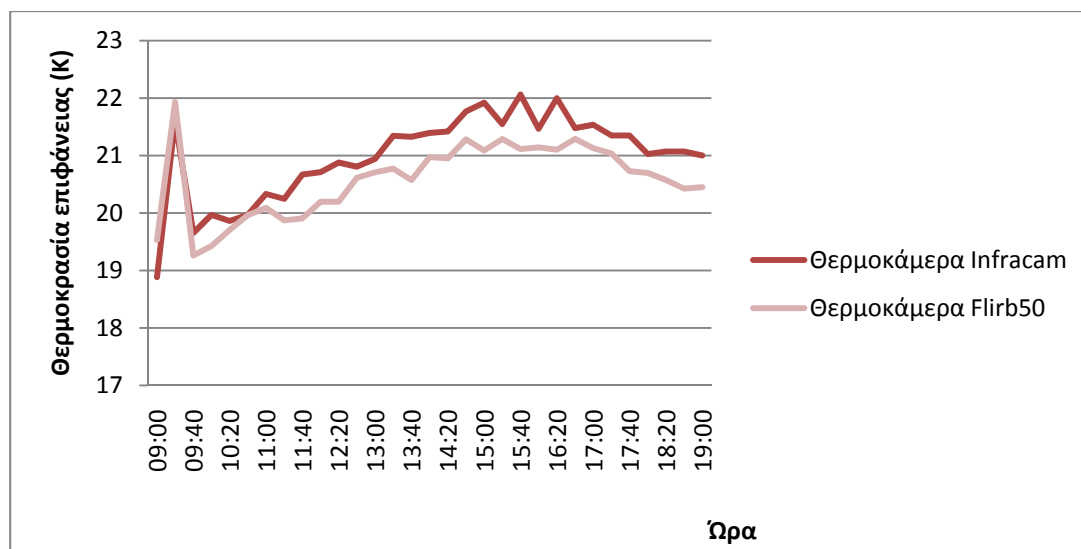
Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:



**Πίνακας 6.4:** Θερμοκρασία ανάκλασης και θερμοκρασία επιφάνειας κατά την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Α/Α	ΩΡΑ	Θερμοκάμερα Infracam		Θερμοκάμερα Flirb50	
		Θερμοκρασία ανάκλασης [°C]	Θερμοκρασία επιφάνειας [°C]	Θερμοκρασία ανάκλασης [°C]	Θερμοκρασία επιφάνειας [°C]
1	09:00	21.9±0.1	18.9±0.3	22.5±0.1	19.5±0.3
2	09:20		21.6±0.3		21.9±0.3
3	09:40	21.7±0.1	19.7±0.3	22.1±0.1	19.3±0.4
4	10:00		19.9±0.3		19.4±0.4
5	10:20		19.9±0.3		19.7±0.4
6	10:40	22.7±0.1	19.9±0.3	22.2±0.1	19.9±0.4
7	11:00		20.3±0.3		20.1±0.4
8	11:20		20.2±0.3		19.9±0.4
9	11:40	22.4±0.2	20.7±0.3	22.9±0.2	19.9±0.4
10	12:00		20.7±0.3		20.2±0.4
11	12:20		20.9±0.3		20.2±0.4
12	12:40	22.7±0.1	20.8±0.3	22.8±0.1	20.6±0.4
13	13:00		20.9±0.3		20.7±0.4
14	13:20		21.3±0.3		20.8±0.4
15	13:40	24.07±0.1	21.3±0.3	23.4±0.1	20.6±0.4
16	14:00		21.4±0.3		20.9±0.4
17	14:20		21.4±0.3		20.9±0.4
18	14:40	22.9±0.1	21.8±0.3	23.2±0.1	21.3±0.4
19	15:00		21.9±0.3		21.1±0.4
20	15:20		21.5±0.3		21.3±0.4
21	15:40	22.6±0.1	22.06±0.3	22.8±0.1	21.1±0.4
22	16:00		21.5±0.3		21.1±0.4
23	16:20		21.9±0.3		21.1±0.4
24	16:40	23.5±0.1	21.5±0.3	22.8±0.1	21.3±0.4
25	17:00		21.5±0.3		21.1±0.4
26	17:20		21.4±0.3		21.1±0.4
27	17:40	21.2±0.1	21.3±0.3	21.8±0.1	20.7±0.4
28	18:00		21.0±0.3		20.7±0.4
29	18:20	22.8±0.1	21.1±0.3	22.5±0.1	20.6±0.4
30	18:40	22.4±0.1	21.1±0.3	22.1±0.1	20.4±0.4
31	19:00		21.0±0.3		20.4±0.4

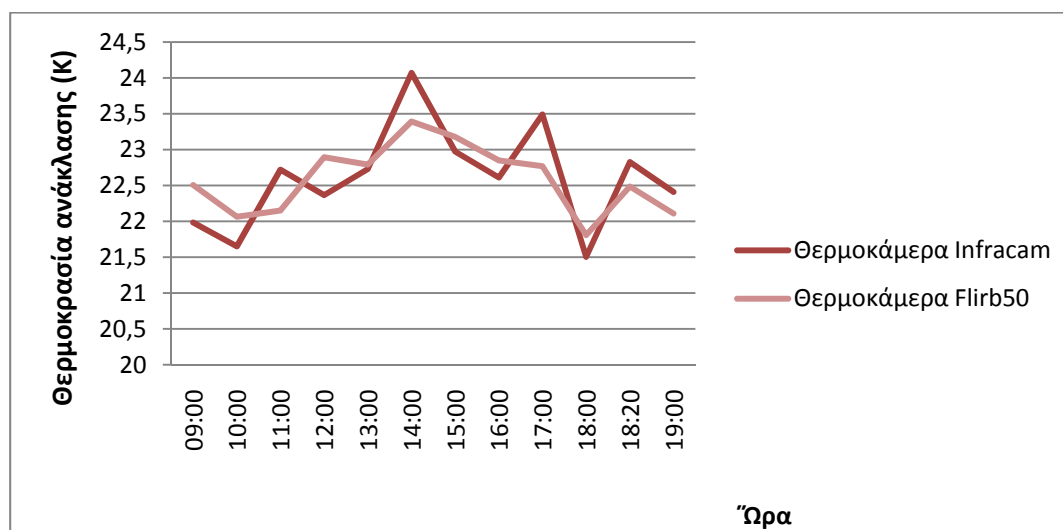
Στα ακόλουθα δύο διαγράμματα εικονίζονται η διακύμανση της θερμοκρασίας της επιφάνειας και της θερμοκρασίας ανάκλασης αντίστοιχα όπως την μέτρησαν οι δύο θερμοκάμερες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων:



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφάνειας για την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Όπως προέκυψε από την επεξεργασία των θερμογραφημάτων, η θερμοκρασία της επιφάνειας παρουσιάζει μια απότομη αύξηση και ακολούθως μια απότομη πτώση κατά το χρονικό διάστημα 09:00 – 09:40 καθώς τα θερμαντικά σώματα είχαν μόλις τεθεί σε λειτουργία και δεν είχε επέλθει θερμική ισορροπία. Από τις 10:00 η θερμοκρασία της επιφάνειας αυξάνεται σταδιακά μέχρι τις 17:00 όπου τα θερμαντικά σώματα τίθενται εκτός λειτουργίας οπότε και η θερμοκρασία της επιφάνειας παρουσιάζει σταδιακή πτώση.

Οι δύο θερμοκάμερες δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά τόσο στην τιμή της θερμοκρασίας της επιφάνειας, όπου η απόκλιση είναι κάτω από  $1^{\circ}\text{C}$ , όσο και στην τιμή της αβεβαιότητας της, όπου η διαφορά είναι σταθερά 0,1. Αν και η τιμή των μετρήσεων δεν διαφέρει πολύ στις δύο θερμοκάμερες, τα αποτελέσματα των υπολογισμών της αβεβαιότητας δείχνουν πως η θερμοκάμερα Infracam μετρά με μεγαλύτερη ακρίβεια την θερμοκρασία της επιφάνειας από την Flirb50.



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα απεικόνισης θερμοκρασίας ανάκλασης 1<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων

Σε κάθε πείραμα μέτρησης της θερμοκρασίας ανάκλασης ενός αντικειμένου, η ακτινοβολία η οποία φτάνει στην θερμική κάμερα προέρχεται την ανάκλαση της ακτινοβολίας που προέρχεται από πηγές που υπάρχουν στον χώρο των μετρήσεων. Επειδή, όμως, οι θερμοκάμερες με τις οποίες γινόταν η μέτρηση δεν ήταν στερεωμένες σε βάση, στην θερμική κάμερα έφτανε πρόσθετη ακτινοβολία η οποία προέρχεται από τον τεχνικό θερμογράφησης και η οποία ανακλάται πάνω στο αντικείμενο, καθώς η διεύθυνση λήψης των θερμογραφήματων ήταν κάθετη στην επιφάνεια. Οι θερμοκρασίες ανάκλασης όπως την μέτρησαν οι δύο θερμοκάμερες δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Όποια διαφορά στις μετρήσεις τους προέρχεται από τη βαθμονόμησή τους.

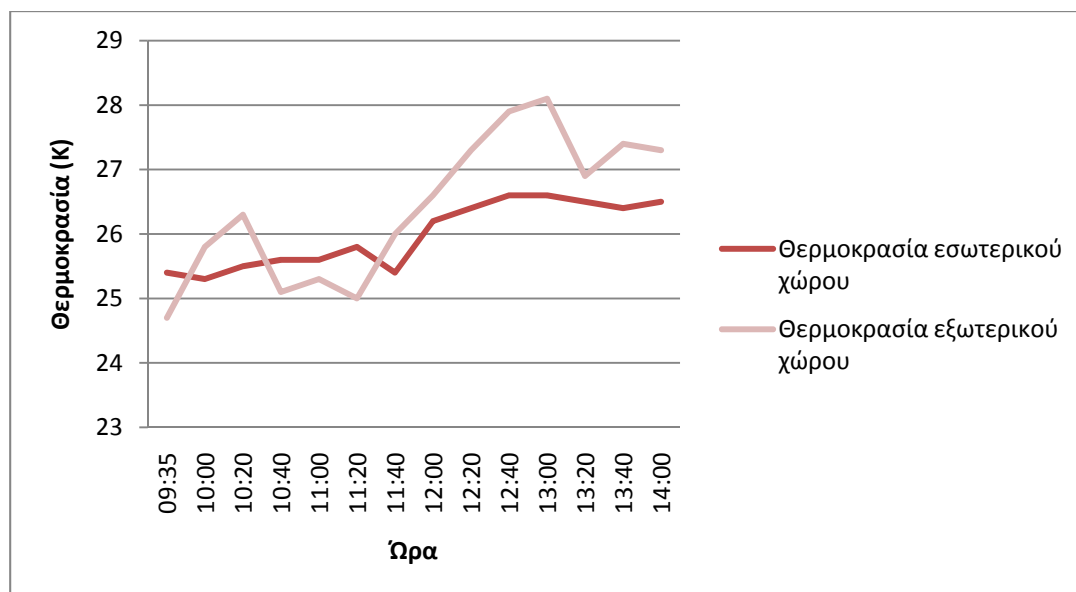
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6.10, Η θερμοκρασία ανάκλασης παρουσιάζει μικρή αύξηση κατά τις μεσημεριανές ώρες καθώς η ηλιακή ακτινοβολία η οποία έφτανε στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου ήταν μειωμένη λόγω της συννεφιάς.

## **2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων**

Οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούσαν στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο καταγράφηκαν από τα θερμόμετρα - υγρασιόμετρα και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα και στα διαγράμματα:

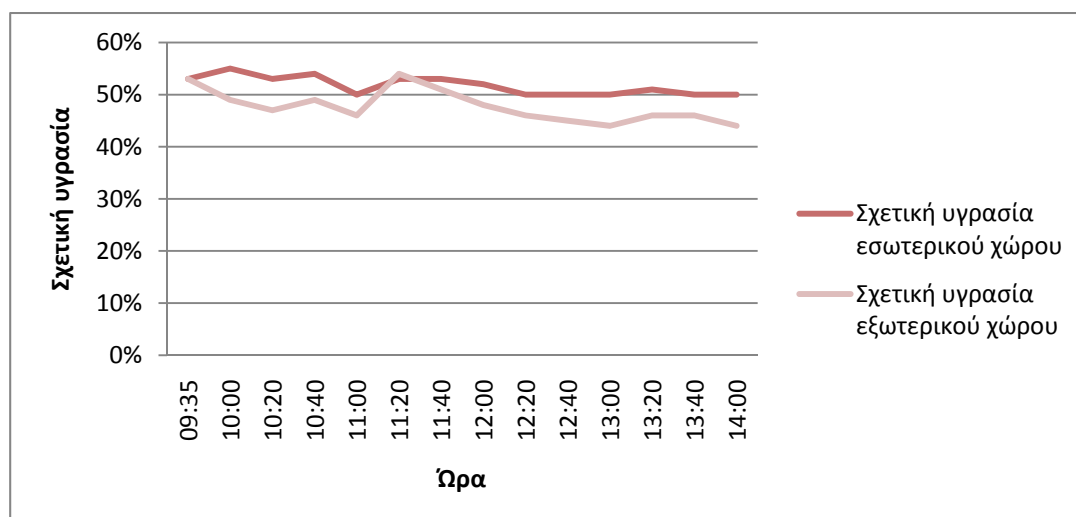
**Πίνακας 6.5:** Θερμοκρασία και σχετικής υγρασία του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου για την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Α/Α	ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ ΕΝΤΟΣ		ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ ΕΚΤΟΣ	
		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ
1	09:35	25.4±0.2	53±3	24.7±0.2	53±3
2	10:00	25.3±0.2	55±3	25.8±0.2	49±3
3	10:20	25.5±0.2	53±3	26.3±0.2	47±3
4	10:40	25.6±0.2	54±3	25.1±0.2	49±3
5	11:00	25.6±0.2	50±3	25.3±0.2	46±3
6	11:20	25.8±0.2	53±3	25±0.2	54±3
7	11:40	25.4±0.2	53±3	26±0.2	51±3
8	12:00	26.2±0.2	52±3	26.6±0.2	48±3
9	12:20	26.4±0.2	50±3	27.3±0.2	46±3
10	12:40	26.6±0.2	50±3	27.9±0.2	45±3
11	13:00	26.6±0.2	50±3	28.1±0.2	44±3
12	13:20	26.5±0.2	51±3	26.9±0.2	46±3
13	13:40	26.4±0.2	50±3	27.4±0.2	46±3
14	14:00	26.5±0.2	50±3	27.3±0.2	44±3



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα απεικόνισης θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Κατά την διεξαγωγή της δεύτερης σειράς μετρήσεων, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου είναι αρκετά μικρή, σε ελάχιστες μετρήσεις ξεπερνά τον  $1^{\circ}\text{C}$ , ενώ σε πολλές περιπτώσεις η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του εξωτερικού χώρου. Αυτό το γεγονός δυσχεραίνει τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας, καθώς η επιθυμητή διαφορά θερμοκρασίας είναι  $10^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$ . Αυτό οφείλεται στην έλλειψη κλιματισμού που απαιτείται κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων με θερμική κάμερα την θερινή περίοδο ώστε να δημιουργηθούν οι επιθυμητές εσωτερικές συνθήκες.



Σχήμα 6.12: Διάγραμμα απεικόνισης σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

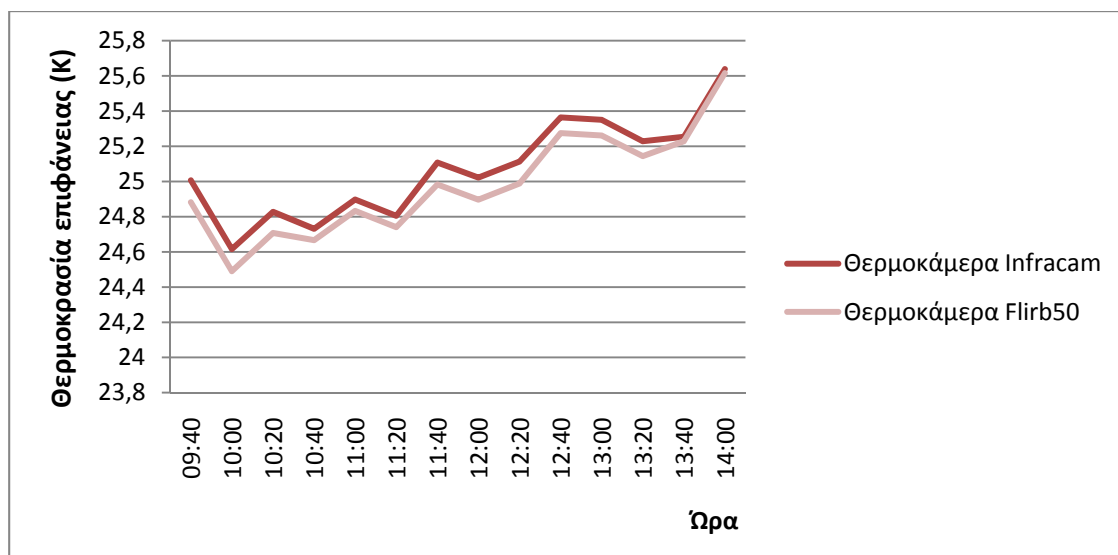
Όπως και στην πρώτη σειρά μετρήσεων έτσι και στην δεύτερη λήφθηκαν θερμογραφήματα για την θερμοκρασία ανάκλασης και την θερμοκρασία του σημείου Α της εσωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Μετά από επεξεργασία των θερμογραφημάτων στον υπολογιστή προέκυψαν οι τιμές της θερμοκρασίας ανάκλασης ρυθμίζοντας ως συντελεστή εκπομπής αυτόν που προέκυψε από την ανάλυση του αντίστοιχου πειράματος και ως εσωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας αυτές που καταγράφηκαν από το υγρασιόμετρο. Στη συνέχεια οι τιμές της θερμοκρασίας ανάκλασης χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Η κάθε τιμή της θερμοκρασίας ανάκλασης χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας στην αμέσως προηγούμενη και αμέσως επόμενη μέτρηση, δηλαδή η ανακλώμενη θερμοκρασία που μετρήθηκε στις 13:00 θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας στις μετρήσεις που έγιναν στις 12:40, στις 13:00 και στις 13:20.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 6.6:** Θερμοκρασία ανάκλασης και επιφάνειας για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Α/Α	ΩΡΑ	Θερμοκάμερα Infracam		Θερμοκάμερα Flirb50	
		Θερμοκρασία ανάκλασης [°C]	Θερμοκρασία επιφάνειας [°C]	Θερμοκρασία ανάκλασης [°C]	Θερμοκρασία επιφάνειας [°C]
1	09:35	25.8±0.1	25.0±0.1	28.1±0.1	24.9±0.1
2	10:00		24.6±0.1		24.5±0.1
3	10:20		24.8±0.1		24.7±0.1
4	10:40	25.9±0.1	24.7±0.1	27.1±0.1	24.7±0.1
5	11:00		24.9±0.1		24.8±0.1
6	11:20		24.8±0.1		24.7±0.1
7	11:40	26.2±0.1	25.1±0.1	28.5±0.1	24.9±0.1
8	12:00		25.1±0.1		24.9±0.1
9	12:20		25.1±0.1		24.9±0.1
10	12:40	26.5±0.1	25.4±0.1	28.1±0.1	25.3±0.1
11	13:00		25.4±0.1		25.3±0.1
12	13:20		25.2±0.1		25.1±0.1
13	13:40	26.3±0.1	25.3±0.1	26.7±0.1	25.2±0.1
14	14:00		25.6±0.1		25.6±0.1

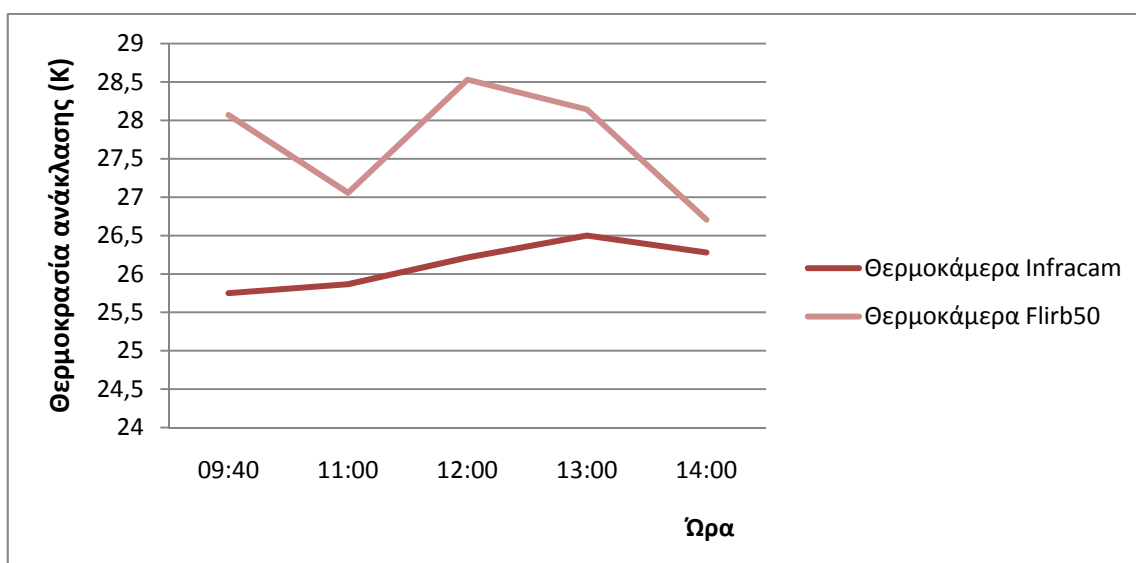
Στα ακόλουθα δύο διαγράμματα εικονίζονται η διακύμανση της θερμοκρασίας της επιφάνειας και της θερμοκρασίας ανάκλασης αντίστοιχα όπως την μέτρησαν οι δύο θερμοκάμερες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων:



Σχήμα 6.13: Διάγραμμα απεικόνισης θερμοκρασίας επιφάνειας για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Η θερμοκρασία της επιφάνειας κατά τη δεύτερη σειρά μετρήσεων παρουσιάζει μικρή ανοδική τάση, απολύτως δικαιολογημένη από την αύξηση της θερμοκρασίας του εξωτερικού χώρου και της ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ηλιακή ακτινοβολία στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου απορροφάται από τον τοίχο αυξάνοντας την θερμοκρασία του. Σαν αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου, θερμότητα άγεται διαμέσου του τοίχου.

Οι δύο θερμοκάμερες παρουσιάζουν μικρή διαφορά στην μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου, περίπου  $0,1^{\circ}\text{C}$ , σε σχέση με την μέτρηση της θερμοκρασίας επιφάνειας του τοίχου στην πρώτη σειρά μετρήσεων. Αυτό οφείλεται στην χρησιμοποίηση της θερμοκάμερας Flirb40 αντί της Flirb50.



Σχήμα 6.14: Διάγραμμα απεικόνισης θερμοκρασίας ανάκλασης για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6.14, η τιμή της θερμοκρασίας ανάκλασης διαφέρει για κάθε θερμοκάμερα. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο λήψης των θερμογραφήμάτων. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η θερμοκάμερα Infracam ήταν στερεωμένη σε βάση με αποτέλεσμα η ακτινοβολία η οποία έφτανε στην θερμοκάμερα να προέρχεται μόνο από ανακλάσεις ακτινοβολίας που εκπεμπόταν από τον περιβάλλοντα χώρο. Αντίθετα, η ακτινοβολία η οποία έφτανε στην θερμοκάμερα Flirb40 περιείχε και την ακτινοβολία που προερχόταν από τον τεχνικό θερμογράφησης με αποτέλεσμα η θερμοκρασία ανάκλασης που μετρήθηκε με την θερμοκάμερα Flirb40 να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που μετρήθηκε με την θερμοκάμερα Infracam.

## 6.2 Υπολογισμός θερμοπερατότητας

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας η τιμή του είναι ίση με την αναλογία της θερμικής ισχύος προς την διαφορά της εσωτερικής θερμοκρασίας από την εξωτερική. Για τον προσδιορισμό του όπως φαίνεται από την εξίσωση 32 πρέπει να είναι γνωστές η θερμοκρασία της επιφάνειας, η θερμοκρασία ανάκλασης και η θερμοκρασία μέσα στον χώρο των μετρήσεων αλλά και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, οι οποίες υπολογίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας του συντελεστή θερμοπερατότητας λαμβάνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Η ακρίβεια μέτρησης της θερμοκάμερας είναι  $\pm 2\%$ . Η εσωτερική αβεβαιότητά της  $u_{in}$  θεωρείται αντίστοιχη με την αναφερόμενη ακρίβειά της.
2. Η αβεβαιότητα της ατμοσφαιρικής μεταφοράς  $u(\tau)$  θεωρείται αμελητέα αφού οι μετρήσεις έγιναν σε εσωτερικό χώρο.

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας κάθε μέτρησης καθώς και της αβεβαιότητας που συνοδεύει την τιμή του παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες:

### 6.2.1 Υπολογισμός αβεβαιότητας με βάση τη μέθοδο με χρήση θερμοκάμερας.

#### 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Ο υπολογισμός της θερμοροής και του συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς και οι τιμές της αβεβαιότητάς τους όπως υπολογίστηκαν από τα δεδομένα της 1<sup>ης</sup> σειράς

μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 6.7. Για την εξαγωγή τους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μέτρησης της επιφανειακής θερμοκρασίας με χρήση θερμοκάμερας. Στη συνέχεια, βρέθηκε η μέση τιμή κάθε μεγέθους και υπολογίστηκε η τύπου Α αβεβαιότητά τους.

**Πίνακας 6.7:** Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας για την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

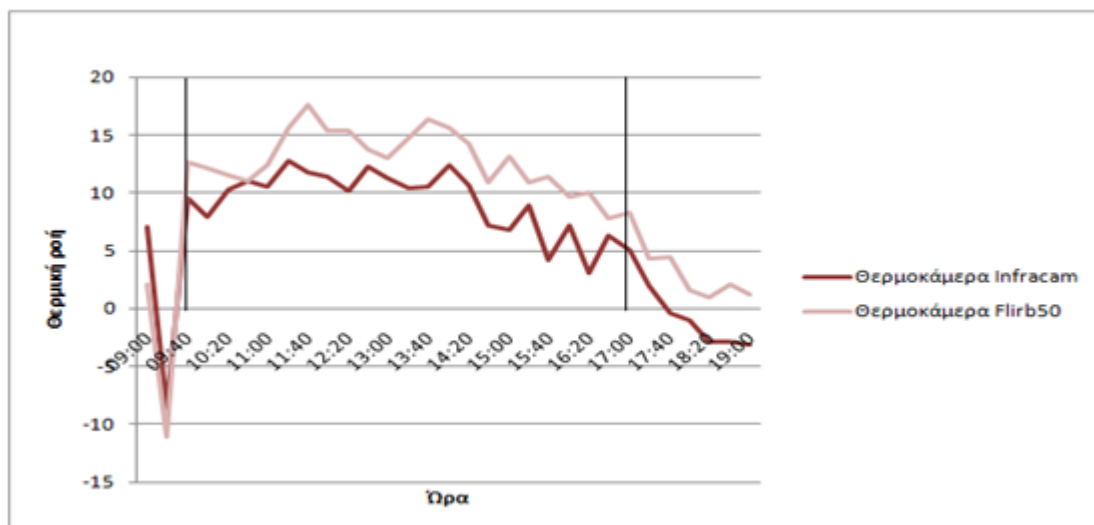
Α/Α	ΩΡΑ	Θερμοκάμερα 1			Θερμοκάμερα 2		
		Q	ΔΤ	Uvalue	q	ΔΤ	Uvalue
1	09:40	9±3	14.5±0.3	0.7±0.4	13±4	14.5±0.3	0.9±0.6
2	10:00	8±3	14.4±0.3	0.6±0.4	12±4	14.4±0.3	0.8±0.5
3	10:20	10±3	14.2±0.3	0.7±0.4	12±4	14.2±0.3	0.8±0.7
4	10:40	11±3	14.5±0.3	0.8±0.4	11±4	14.5±0.3	0.8±0.7
5	11:00	10±3	14.3±0.3	0.7±0.4	12±4	14.3±0.3	0.9±0.7
6	11:20	13±3	13.9±0.3	0.9±0.4	16±4	13.9±0.3	1.1±0.7
7	11:40	12±3	14.1±0.3	0.8±0.4	18±4	14.1±0.3	1.2±0.7
8	12:00	11±3	14.4±0.3	0.8±0.4	15±4	14.4±0.3	1.1±0.8
9	12:20	10±3	14.2±0.3	0.7±0.4	15±4	14.2±0.3	1.1±0.8
10	12:40	12±3	14.1±0.3	0.9±0.4	14±4	14.1±0.3	0.9±0.8
11	13:00	11±3	14.3±0.3	0.8±0.4	13±4	14.3±0.3	0.9±0.8
12	13:20	10±3	14±0.3	0.7±0.4	15±4	14±0.3	1.1±0.8
13	13:40	11±3	13.9±0.3	0.8±0.4	16±4	13.9±0.3	1.2±0.8
14	14:00	12±3	14.5±0.3	0.9±0.4	16±4	14.5±0.3	1.1±0.8
15	14:20	11±3	14.7±0.3	0.7±0.4	14±4	14.7±0.3	0.9±0.7
16	14:40	7±3	14.8±0.3	0.5±0.4	11±4	14.8±0.3	0.7±0.7
17	15:00	7±3	15.4±0.3	0.4±0.4	13±4	15.4±0.3	0.9±0.7
18	15:20	9±3	14.8±0.3	0.6±0.4	11±4	14.8±0.3	0.7±0.7
19	15:40	4±3	15±0.3	0.3±0.4	11±4	15±0.3	0.8±0.7
20	16:00	7±3	14.8±0.3	0.5±0.4	10±4	14.8±0.3	0.7±0.7
21	16:20	3±3	15.1±0.3	0.2±0.4	10±4	15.1±0.3	0.7±0.7
22	16:40	6±3	15±0.3	0.4±0.4	8±4	15±0.3	0.5±0.7
23	17:00	5±3	14.9±0.3	0.3±0.4	8±4	14.9±0.3	0.6±0.7
		9.2±0,6	14.51±0.09	0.63±0.05	12.8±0.4	14.51±0.09	0.88±0.04

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας διαφέρει σημαντικά σε κάθε θερμοκάμερα. Αυτό οφείλεται στην βαθμονόμησή τους, δηλαδή στην εκτίμηση των εσωτερικών σφαλμάτων της κάθε θερμοκάμερας από εργαστηριακές μετρήσεις που γίνονται με την θερμοκάμερα ή στα ηλεκτρονικά της μέρη, και οφείλονται σε ατέλειες στην κατασκευή τους και στην απορρύθμισή τους με την πάροδο του χρόνου, καθώς και στην εκτίμηση της εσωτερικής ακρίβειας κάθε θερμοκάμερας.

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται η σύγκριση της θερμοροής, της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού αέρα καθώς και του συντελεστή

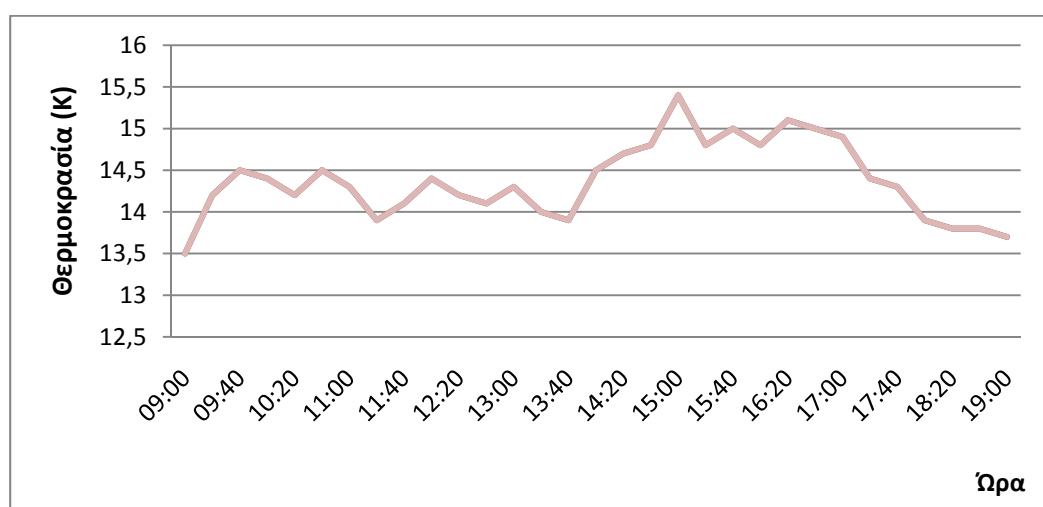


θερμοπερατότητας όπως υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις των δύο θερμοκαμερών.



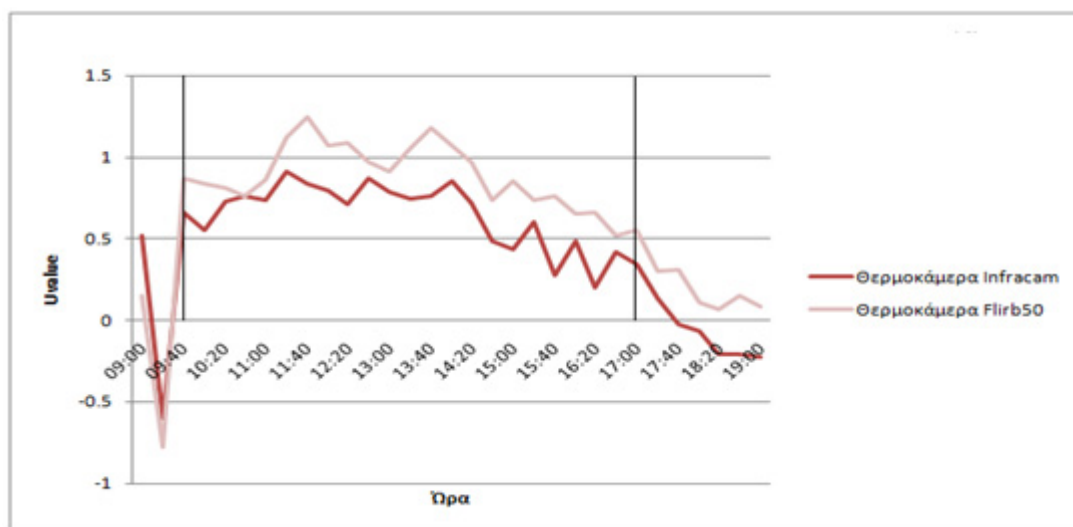
Σχήμα 6.15: Διάγραμμα θερμικής ροής για την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6.15, η θερμική ροή η οποία υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα της πρώτης σειράς μετρήσεων, για τις δύο πρώτες πρωινές μετρήσεις παρουσιάζει απότομη μείωση λόγω της απουσίας θερμικής ισορροπίας στον εσωτερικό χώρο και σημαντική σταδιακή πτώση μετά τις 17:00 όπου και τέθηκε εκτός λειτουργίας η θέρμανση του χώρου. Στις ενδιάμεσες μετρήσεις, η θερμική ροή αυξάνεται σταδιακά από τις 10:00 ως τις 14:00, ενώ μετά παρατηρείται σταδιακή μείωση της τιμής της. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας, η οποία για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ήταν μεγαλύτερη από την αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου, οδηγώντας σε σταδιακή μείωση της διαφοράς  $T_{in}-T_i$  και συνακόλουθα της θερμικής ροής.



Σχήμα 6.16: Διάγραμμα διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου κατά την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Η διαφορά της θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, όπως φαίνεται από το σχήμα 6.16 είναι μεταξύ των 13.5 – 15.5, γεγονός που ευνοεί την μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας.



Σχήμα 6.17: Συντελεστής θερμοπερατότητας για την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας για την πρώτη σειρά μετρήσεων παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με την θερμική ροή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας εξαρτάται από την τιμή της θερμικής ροής διαμέσου του τοίχου και από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο, η οποία όμως δεν παρουσιάζει σημαντική διακύμανση κατά την διάρκεια της ημέρας. Οπότε για τις δύο πρώτες μετρήσεις καθώς και για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά τις 17:00 παρουσιάζει σημαντική πτώση λόγω της μη ύπαρξης θερμικής ισορροπίας στο χώρο των μετρήσεων. Ενώ στο χρονικό διάστημα 10:00 έως 14:40 η τιμή του δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές, μετά τις 14:40 ως τις 17:00 παρατηρείται σταδιακή πτώση λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της επιφάνειας.

Η διαφορά της τιμής του συντελεστή θερμοπερατότητας όπως την μέτρησαν οι δύο θερμοκάμερες είναι σημαντική. Για την θερμοκάμερα Infracam η μέση τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας είναι  $0.63 \pm 0.05$ , η οποία είναι κατά 26% υψηλότερη από την αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Για την θερμοκάμερα Flirb50 η μέση τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας είναι  $0.88 \pm 0.04$  η οποία είναι 76% υψηλότερη από την αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Οι αποκλίσεις στην μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας και της θερμοκρασίας ανάκλασης μεταξύ των δύο θερμοκαμερών είναι μικρές αλλά επηρέασαν σημαντικά την τελική τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας. Διαφοροποίηση μεταξύ της τιμής του συντελεστή θερμοπερατότητας που προέκυψε από τα δεδομένα των μετρήσεων και της αντίστοιχης θεωρητικής τιμής οφείλεται κυρίως από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και το πάχος των στρώσεων του δομικού στοιχείου, των οποίων η τιμή

δεν είναι γνωστή με ακρίβεια, καθώς και από την αβεβαιότητα της μέτρησης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

## 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Ο υπολογισμός της θερμοροής, της διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου και του συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς και οι τιμές της αβεβαιότητάς τους όπως υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα της 2<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 6.9:

**Πίνακας 6.9:** Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

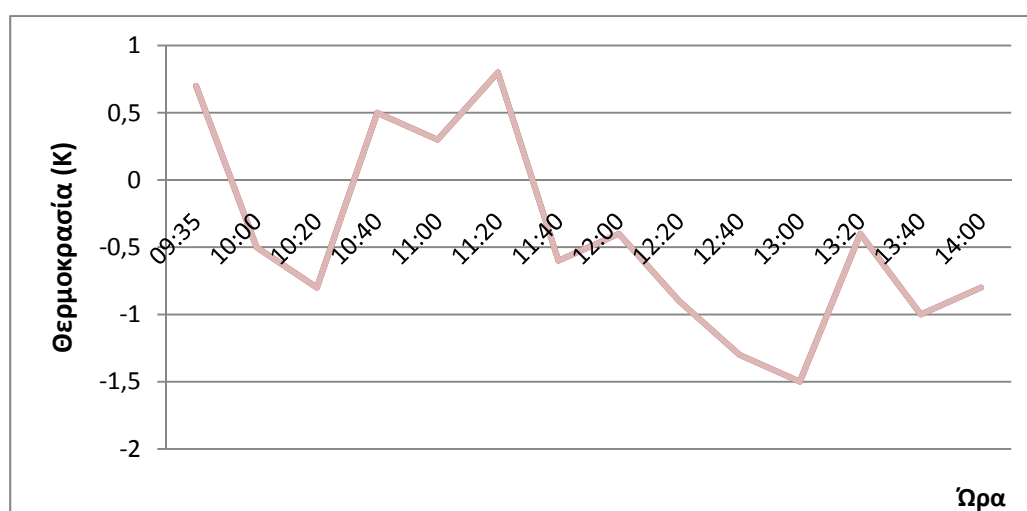
Α/Α	ΩΡΑ	Θερμοκάμερα Infracam			Θερμοκάμερα Flirb50		
		q	ΔΤ	Uvalue	q	ΔΤ	Uvalue
1	09:35	3±2	0.7±0.3	4±4	4±3	0.7±0.3	6±7
2	10:00	5±2	-0.5±0.3	-11±17	6±3	-0.5±0.3	-12±21
3	10:20	5±2	-0.8±0.3	-7±8	6±3	-0.8±0.3	-8±10
4	10:40	7±2	0.5±0.3	13±12	7±3	0.5±0.3	14±15
5	11:00	5±2	0.3±0.3	18±28	6±3	0.3±0.3	20±34
6	11:20	8±2	0.8±0.3	10±5	8±3	0.8±0.3	10±7
7	11:40	2±2	-0.6±0.3	-4±8	3±3	-0.6±0.3	-5±12
8	12:00	9±2	-0.4±0.3	-23±38	10±3	-0.4±0.3	-25±43
9	12:20	10±2	-0.9±0.3	-11±10	11±3	-0.9±0.3	-12±11
10	12:40	10±2	-1.3±0.3	-7±5	10±3	-1.3±0.3	-8±6
11	13:00	10±2	-1.5±0.3	-6±4	10±3	-1.5±0.3	-7±5
12	13:20	10±2	-0.4±0.3	-24±41	10±3	-0.4±0.3	-26±44
13	13:40	9±2	-1±0.3	-9±7	9±3	-1±0.3	-9±9
14	14:00	7±2	-0.8±0.3	-8±9	7±3	-0.8±0.3	-8±10
		7.1±0.7	-0.4±0.2	-4±3	7.7±0.7	-0.4±0.2	-5±4

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται η σύγκριση της θερμοροής, της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού αέρα καθώς και του συντελεστή θερμοπερατότητας όπως υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις των δύο θερμοκαμερών.



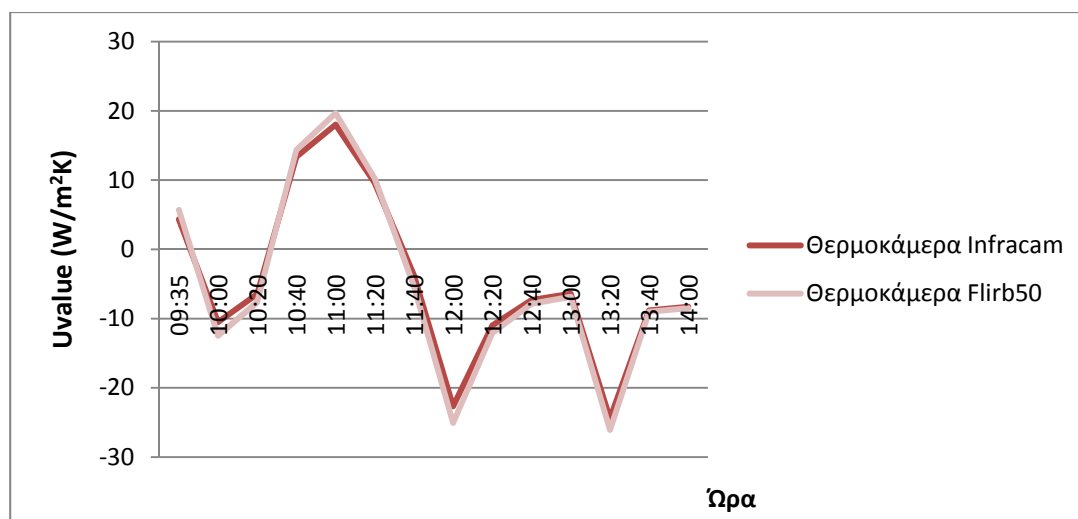
Σχήμα 6.18: Διάγραμμα απεικόνισης θερμικής ροής για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Η τιμή της θερμικής ροής η οποία υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα της δεύτερης σειράς μετρήσεων παρουσιάζει μια σταδιακή αύξηση λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 11:40 όπου η τιμή της θερμοκρασίας της επιφάνειας αυξήθηκε σημαντικά χωρίς την ανάλογη αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου με αποτέλεσμα την απότομη μείωση της θερμικής ροής. Οι δύο θερμοκάμερες δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση στην μέτρηση της θερμικής ροής, γεγονός που οφείλεται στις μικρές αποκλίσεις κατά την μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου.



Σχήμα 6.19: Διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, η οποία είναι μικρότερη από  $1^{\circ}\text{C}$ , καθώς και η συνεχής αλλαγή του προσήμου της διαφοράς θερμοκρασίας καθιστούν δύσκολη την ακριβή μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας. Για να υπάρχει ροή θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας πρέπει να είναι  $10^{\circ}\text{C}$ -  $15^{\circ}\text{C}$ , όπου οι εκπεμπόμενες ροές είναι αυξημένες με αποτέλεσμα οι χρωματικές διαφοροποιήσεις στο θερμογράφημα να είναι πιο ευκρινείς.



Σχήμα 6.20: Συντελεστής θερμοπερατότητας για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων.

Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας, επηρεασμένη σημαντικά από την μη επιθυμητή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, δεν είναι οι αναμενόμενες. Η μικρή διαφορά θερμοκρασίας του περιβάλλοντος οδήγησε σε αρκετά μεγάλες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας, καθώς η σχέση τους είναι αντιστρόφως ανάλογη, που σε ορισμένες μετρήσεις φτάνουν στα  $20\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  καθιστώντας τον παράγοντα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου πολύ καθοριστικό για την μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας. Οι διαφορές στις τιμές των μετρήσεων ανάμεσα στις δύο θερμοκάμερες είναι πολύ μικρές, ενώ σε ορισμένες μετρήσεις είναι μηδενικές όπως ήταν αναμενόμενο από τις μικρές αποκλίσεις τους κατά την μέτρηση της θερμικής ροής.

## 6.2.2 Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας με τη μέθοδο της μέσης τιμής

### 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Όπως έχει αναλυθεί, ο συντελεστής θερμοπερατότητας με βάση τη μέθοδο της μέσης τιμής εκφράζεται ως ένα πηλίκο δύο αθροισμάτων, του αθροίσματος των θερμοροών και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου.

Ο υπολογισμός της θερμοροής και του συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς και οι τιμές της αβεβαιότητάς τους όπως υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα της 1<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 6.8.

**Πίνακας 6.8:** Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας για την 1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων με τη μέθοδο μέσης τιμής.

A/A	ΩΡΑ	Θερμοκάμερα 1			Θερμοκάμερα 2		
		q	ΔΤ	Uvalue	q	ΔΤ	Uvalue
1	09:40	9±1	14.5±0.3	0.62±0.04	12±1	14.5±0.3	0.8±0.2
2	10:00	17±1	28.9±0.3	0.59±0.08	24±2	28.9±0.3	0.8±0.1
3	10:20	28±2	43.1±0.3	0.65±0.07	36±2	43.1±0.3	0.8±0.1
4	10:40	39±2	57.6±0.3	0.68±0.07	47±2	57.6±0.3	0.82±0.09
5	11:00	49±2	71.9±0.3	0.68±0.06	59±3	71.9±0.3	0.82±0.08
6	11:20	62±3	85.8±0.3	0.72±0.06	75±3	85.8±0.3	0.87±0.07
7	11:40	74±3	99.9±0.3	0.74±0.05	92±3	99.9±0.3	0.92±0.07
8	12:00	85±3	114.3±0.3	0.74±0.05	108±4	114.3±0.3	0.95±0.07
9	12:20	95±3	128.5±0.3	0.74±0.05	124±4	128.5±0.3	0.96±0.07
10	12:40	107±3	142.6±0.3	0.75±0.05	138±4	142.6±0.3	0.97±0.06
11	13:00	119±4	156.9±0.3	0.76±0.05	151±4	156.9±0.3	0.96±0.06
12	13:20	129±4	170.9±0.3	0.75±0.05	165±4	170.9±0.3	0.96±0.05
13	13:40	140±4	184.8±0.3	0.76±0.05	181±5	184.8±0.3	0.98±0.05
14	14:00	152±4	199.3±0.4	0.76±0.04	197±5	199.3±0.4	0.99±0.04
15	14:20	163±4	214±0.4	0.76±0.04	212±5	214±0.4	0.99±0.04
16	14:40	170±5	228.8±0.4	0.74±0.04	222±5	228.8±0.4	0.97±0.04
17	15:00	176±5	244.2±0.4	0.72±0.04	236±5	244.2±0.4	0.97±0.04
18	15:20	185±5	259±0.4	0.71±0.04	247±5	259±0.4	0.95±0.04
19	15:40	189±5	274±0.4	0.69±0.04	258±5	274±0.4	0.94±0.04
20	16:00	197±5	288.8±0.4	0.68±0.04	267±5	288.8±0.4	0.92±0.03
21	16:20	200±5	303.9±0.4	0.66±0.04	277±6	303.9±0.4	0.91±0.04
22	16:40	206±5	318.9±0.4	0.65±0.03	285±6	318.9±0.4	0.89±0.04
23	17:00	211±5	333.8±0.4	0.63±0.03	294±6	333.8±0.4	0.88±0.04

Η απόκλιση της τιμής του συντελεστή θερμοπερατότητας όπως αυτή μετρήθηκε από τις δύο παραπάνω μεθόδους είναι αμελητέα, καθώς οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας και για τις δύο θερμοκάμερες συμπίπτουν και στις δύο μεθόδους. Η μόνη διαφορά που παρουσιάζεται, εντοπίζεται στην τιμή της αβεβαιότητας όπου για την μέθοδο της μέσης τιμής είναι κατά 0.01 μικρότερη από την αντίστοιχη της μεθόδου μέτρησης με θερμοκάμερα.

## 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Ο υπολογισμός της θερμοροής και του συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς και οι τιμές της αβεβαιότητάς τους όπως υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα της 2<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 6.10.

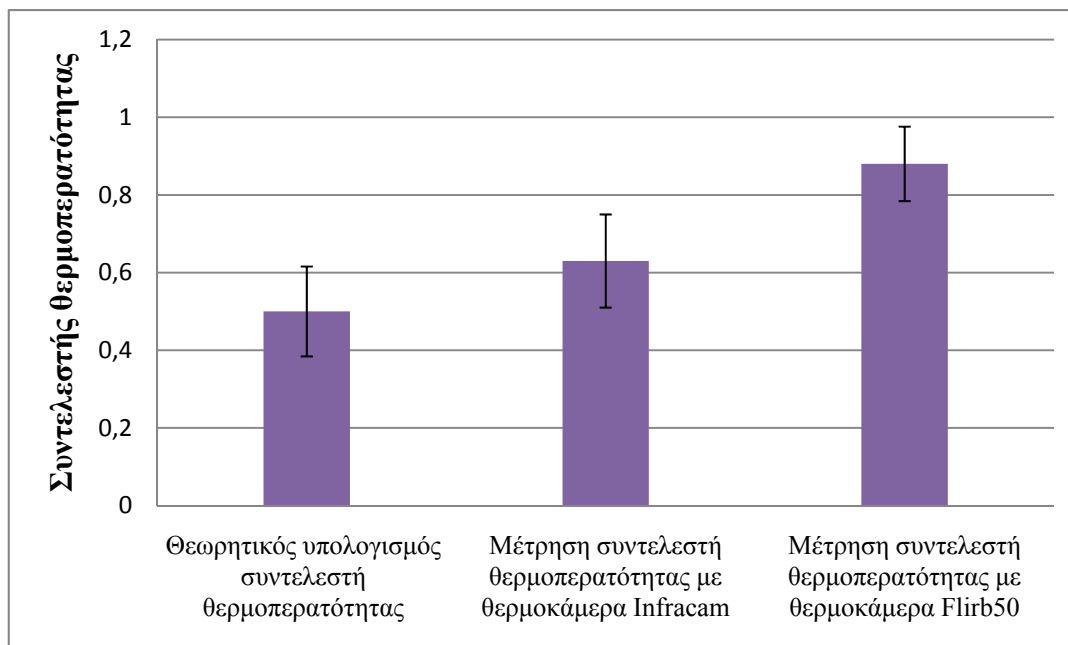
**Πίνακας 6.10:** Υπολογισμός συντελεστή θερμοπερατότητας μεθόδου μέσης τιμής για την 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Α/Α	ΩΡΑ	Θερμοκάμερα Infracam			Θερμοκάμερα Flirb50		
		q	ΔT	Uvalue	q	ΔT	Uvalue
1	09:35	3±1	0.7±0.05	4±3	4±1	0.7±0.05	5.71±8
2	10:00	8±2	0.2±0.07	40±88	10±2	0.2±0.07	50±18
3	10:20	1±2	-0.6±0.09	2±19	16±2	-0.6±0.09	26±147
4	10:40	20±2	-0.1±0.1	200±88	23±2	-0.1±0.1	230±74
5	11:00	25±2	0.2±0.1	125±289	29±2	0.2±0.1	145±474
6	11:20	33±3	1±0.1	33±16	37±2	1±0.1	37±44
7	11:40	35±3	0.4±0.1	87.5±101	41±3	0.4±0.1	102.5±39
8	12:00	44±3	0.01±0.1	4400±0.03	51±3	0.01±0.1	5100±530
9	12:20	54±3	-0.9±0.15	-60±33	62±3	-0.9±0.15	-68±132
10	12:40	63±3	-2.2±0.2	28±7	72±3	-2.2±0.2	33±6
11	13:00	73±4	-3.7±0.2	19±3	82±4	-3.7±0.2	22±4
12	13:20	83±4	-4.1±0.2	-20±2	93±4	-4.1±0.2	-22±3
13	13:40	92±4	-5.1±0.2	-18±2	102±4	-5.1±0.2	-20±3
14	14:00	99±4	-5.9±0.2	-17±1	108±4	-5.9±0.2	-18±1

Στην δεύτερη σειρά μετρήσεων, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο της μέσης τιμής είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε στον πίνακα 6.9. Αυτό οφείλεται στην συνεχή εναλλαγή του προσήμου της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα στην μέθοδο της μέσης τιμής το άθροισμα της διαφοράς θερμοκρασίας να είναι πολύ μικρό σε σχέση με την θερμική ροή οδηγώντας σε μεγάλο συντελεστή θερμοπερατότητας.

## Σύγκριση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του υπολογισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς και την μέτρησή του κατά την πρώτη σειρά μετρήσεων της οποίας τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα:



**Σχήμα 6.21:** Σύγκριση θεωρητικής και μετρούμενης τιμής του συντελεστή θερμοπερατότητας της εξεταζόμενης τοιχοποιίας και της αβεβαιότητας της κατά την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 6.21, η τιμή που προέκυψε από την μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας με την θερμοκάμερα Infracam προσεγγίζει αρκετά την τιμή που προέκυψε από τον θεωρητικό υπολογισμό του εντός των ορίων του σφάλματος. Αντίθετα, η τιμή που προκύπτει από την μέτρηση με την θερμοκάμερα Flirb50 δεν προσεγγίζει την θεωρητική τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας ούτε την τιμή που προέκυψε από την μέτρησή του με την θερμοκάμερα Infracam καθιστώντας τον παράγοντα της βαθμονόμησης των οργάνων σημαντική πηγή αβεβαιότητας που επιδρά καθοριστικά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



# ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7***

## ***«Συμπεράσματα - Προοπτικές»***

---



## 7.1 Συμπεράσματα

Ο υπολογισμός και η μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός τοίχου είναι μία αβέβαιη διαδικασία. Με την ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας προσδιορισμού της αβεβαιότητας που συνοδεύει την τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας μπορούν να αξιολογηθούν οι μέθοδοι μέτρησης και υπολογισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας και να διερευνηθεί η επίδραση μιας σειράς παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η σημασία των προϋποθέσεων που περιγράφονται για την εκτέλεση του πειράματος επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η ύπαρξη μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας, κοντά στους  $10^{\circ}\text{C}$ - $15^{\circ}\text{C}$ , επιτρέπει τη δημιουργία ικανοποιητικής θερμικής ροής από το εσωτερικό στο εξωτερικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια του χειμώνα και το αντίθετο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού για τη μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία και τη διατήρηση της θερμοκρασιακής αυτής διαφοράς για το χρονικό διάστημα που διαρκούν οι μετρήσεις είναι η κατάλληλη θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα και ο κλιματισμός κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου εξασφαλίζοντας στάσιμη θερμοκρασιακή κατάσταση στον χώρο όπου διεξάγονται οι μετρήσεις.
- Η εσφαλμένη εκτίμηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των δομικών στρώσεων και ιδιαίτερα της τιμής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας καθώς και η δυσκολία αναγνώρισης των υλικών τους, ιδιαίτερα των θερμομονωτικών, μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβή υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας της εν λόγω τοιχοποιίας. Σφάλμα μπορεί να προκύψει και από την λάθος εκτίμηση του πάχους των στρώσεων των δομικών στοιχείων.
- Ο κυριότερος παράγοντας εμφάνισης αβεβαιότητας στον μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου. Η μεταβολή της τιμής της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου, επηρεάζει την τιμή του μετρούμενου συντελεστή θερμοπερατότητας μιας και ο προσδιορισμός του εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας επιφάνειας απαιτείται η γνώση μιας σειράς παραγόντων, όπως ο συντελεστής εκπομπής, η θερμοκρασία ανάκλασης, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, των οποίων ο υπολογισμός εμπεριέχει ένα ποσοστό αβεβαιότητας. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η βαθμονόμηση της θερμοκάμερας η οποία να αποτελέσει πηγή συστηματικής απόκλισης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Οι συστηματικές αποκλίσεις στις μετρήσεις μεταξύ οργάνων με διαφορετική βαθμονόμηση ακόμα

και αν είναι μικρές οδηγούν σε σημαντικές αποκλίσεις στον τελικό υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας.

- Επίσης, σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της αβεβαιότητας της μεθόδου διαδραματίζει η μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Η ακρίβεια καθώς και η διακριτική ικανότητα των οργάνων μέτρησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος αποτελούν πηγές αβεβαιότητας και τις καθιστούν κύριους παράγοντες για την ακρίβεια του υπολογισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας.

## 7.2 Προοπτικές

Για να προκύψουν πιο αξιόπιστα συμπεράσματα αλλά και για να ερευνηθούν περισσότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων του συντελεστή θερμοπερατότητας προτείνονται οι ακόλουθες μελλοντικές ενέργειες:

1. Διεξαγωγή των μετρήσεων κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου για να προκύψουν πιο αξιόπιστα συμπεράσματα ως προς την επίδραση του παράγοντα της ώρας της ημέρας. Όπως φάνηκε από τις μετρήσεις, ο παράγοντας αυτός είναι καθοριστικός. Έτσι, μετρήσεις όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εξεταζόμενου αντικειμένου και του περιβάλλοντος είναι μεγάλη έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπεμπόμενων ροών. Μετρήσεις υπό αυτές τις συνθήκες μπορούν να γίνουν τη νύχτα ή το πρωί κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού γίνονται νωρίς το απόγευμα.
2. Η διεξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τους παράγοντες αβεβαιότητας που σχετίζονται με την εποχή του χρόνου, όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της θερινής περιόδου είναι δυνατό να εξασφαλισθούν με απλά μέσα.
3. Διεξαγωγή των μετρήσεων σε τοίχο με απόλυτα γνωστές θερμοφυσικές ιδιότητες. Ένας σημαντικός παράγοντας αβεβαιότητας είναι η μη σωστή γνώση των υλικών από τα οποία αποτελούνται οι στρώσεις των δομικών υλικών του τοίχου καθώς και η μη ακριβής μέτρηση του πάχους τους, ιδιαίτερα των θερμομονωτικών υλικών. Η αβεβαιότητα του θεωρητικού υπολογισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας σε τοίχο του οποίου τα υλικά από τα οποία αποτελείται καθώς και το πάχος τους είναι γνωστά από μελέτες, τιμολόγια αγοράς υλικών ή φωτογραφίες μπορεί να είναι πολύ μικρή. Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει μια αξιόπιστη βάση αξιολόγησης της μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας με τις μεθόδους που αναλύθηκαν σε αυτή την εργασία.

4. Χρησιμοποίηση ακριβέστερων τρόπων μέτρησης της θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος και, αν είναι δυνατόν, άμεσα συγκρίσιμων με τις μετρήσεις που προκύπτουν από τη χρήση θερμοκάμερας.
5. Μέτρηση του συντελεστή θερμοπερατότητας σε διαφορετικούς τοίχους. Η διαφορετική δομή και οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται κάθε τοίχος οδηγεί σε διαφορετική τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας και της αβεβαιότητάς του καθώς οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων δεν επιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε κάθε τοίχο. Η επανάληψη του ίδιου πειράματος σε διαφορετικά δοκίμια ικανού πλήθους, μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αξιοπιστία των συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια της μεθόδου μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας τοιχοποιίας με τη χρήση θερμοκάμερας



## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

- [1] Flir systems, Εγχειρίδιο χρήστη για θερμοκάμερα FLIR b40/b50/b60, FLIR i40/i50/i60
- [2] Μετάδοση θερμότητας θερμομόνωση, Σ.Ι. Καρέκος, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2001
- [3] Αιμ. Κορωνάιος, Γ.-Φοίβος Σαργεντής, «Θερμογραφία», Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών, Τεύχος 2, Αθήνα 2003.
- [4] Οδηγία 89/106/ΕΟΚ «Προϊόντα δομικών έργων»
- [5] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2010), “Θερμοφυσικές Ιδιότητες Δομικών Υλικών και Έλεγχος της Θερμομονωτικής Επάρκειας των Κτιρίων”, Α΄ έκδοση, Αθήνα, Ιούνιος 2010.
- [6] Αιμ. Κορωνάιος, Γ.-Φοίβος Σαργεντής, «Τεχνικά υλικά», Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών, Τεύχος 2, Αθήνα 2005.
- [7] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2010), “Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων και την Έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης”, Α΄ έκδοση, Αθήνα, Ιούνιος 2010.
- [8] Προεδρικό Διάταγμα της 1.6/4.7.1979 (ΦΕΚ362 Δ΄) «Περί της εγκρίσεως κανονισμού δια την θερμομόνωση των κτιρίων».
- [9] Κοινή Υπουργική Απόφαση 21475/4707 «Περιορισμός των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με τον καθορισμό μέτρων και όρων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων».
- [10] Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων
- [11] ΕΛΟΤ EN 10211-1 «Θερμικές γέφυρες σε κτιριακές κατασκευές.-Ποές θερμότητας και επιφανειακές θερμοκρασίες».
- [12] ISO 9869:1994 «Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance».
- [13] On site evaluation of U-value of opaque building elements: a new methodology, Rossano Albatici, Arnaldo M. Tonelli
- [14] ISO 6781 «Thermal insulation-Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes-Infrared method».
- [15] ASTM E1862-97(Reapproved 2002), Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers.
- [16] ASTM E1933-99a(Reapproved 2005), Standard Test Method for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.
- [17] Infrared Thermography: Errors and Uncertainties, Waldemar Minkina, Sebastian Dudzik.

- [18] JCGM 140:2009, Evaluation of Measurement Data –An Introduction to the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” and related documents, First Edition, July 2009.
- [19] JCGM 200:2008, International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM).
- [20] Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 standars, Krzysztof Chrzanowski.
- [21] Wireless thermo detector RTR-53A, User’s manual.