



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

ΡΗΓΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ ΔΙΟΝΥΣΙΑ (επιβλέπουσα)

ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

ΤΣΟΥΤΣΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017

Ευχαριστίες,

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, που σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέποντα καθηγήτρια της διπλωματικής εργασίας Κολοκοτσά Διονυσία για την πολύτιμη καθοδήγηση και άριστη συνεργασία που είχαμε.

Στη συνέχεια τον υποψήφιο διδάκτορα Γομπάκη Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθειά του στην εκπόνηση της εργασίας.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω και στους καθηγητές Θεοχάρη Τσούτσο και Μιχάλη Λαζαρίδη που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την καθολική στήριξη όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και τους φίλους μου Αντώνη και Νίκο για τον σημαντικό ρόλο που έπαιξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ενεργειακές επιθεωρήσεις και ο έλεγχος της ενεργειακής απόδοσης έχουν γίνει όλο και πιο επιτακτικοί για να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας στα υπάρχοντα κτίρια. Παράλληλα, οι ευρωπαϊκές οδηγίες επιβάλλουν ολοένα και αυστηρότερους περιορισμούς στις απώλειες ενέργειας των κτιρίων. Σ' αυτό το πλαίσιο η αξιολόγηση της θερμικής διαπερατότητας (U-Value) των δομικών στοιχείων του κτιρίου είναι ένα αποφασιστικό βήμα για την ενεργειακή διάγνωση, προκειμένου να επιτευχθούν, στη συνέχεια, αποτελεσματικές παρεμβάσεις για την βελτίωσή της. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν μετρήσεις του συντελεστή θερμοπερατότητας σε εξωτερικούς τοίχους και παράθυρα στο κτίριο K1 του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν ένα καταγραφικό δεδομένων, δυο αισθητήρες θερμοκρασίας και ένας αισθητήρας ροής θερμότητας. Στη συνέχεια τα πειραματικά δεδομένα εισήχθησαν στην προσομοίωση του κτιρίου, η οποία έχει βασιστεί στη μελέτη θερμομόνωσης του. Έγιναν συγκρίσεις των πειραματικών μετρήσεων με τα δεδομένα της προσομοίωσης και έπειτα υπολογίστηκαν οι νέες ενεργειακές καταναλώσεις σε θέρμανση και ψύξη. Τέλος, υπολογίστηκε το ποσοστό μεταβολής των ενεργειακών αναγκών σε σχέση με το αρχικό κτίριο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι πειραματικές μετρήσεις προσεγγίζουν μερικώς τα θεωρητικά υπολογισμένα U-Value της προσομοίωσης για τους τοίχους κάτι που δεν συμβαίνει καθόλου με τα παράθυρα.

ABSTRACT

Energy audits and check of energy performances are more and more urgent for achieving energy saving in existing buildings. At the same time, European directives are imposing ever stricter restrictions on energy losses in buildings. In this context, the assessment of the thermal permeability (U-Value) of building components is a decisive step for energy diagnosis, in order to achieve effective interventions to improve it. In this diploma thesis measurements of the coefficient of thermal transmittance in external walls and windows were made in the building K1 of the Department of Environmental Engineering of the Technical University of Crete. A data logger, two temperature sensors and one heat flow sensor were used for the measurements. Then the experimental data were introduced into the building's simulation, which was based on its thermal insulation study. Comparisons of experimental measurements with the simulation data, and then the new energy consumptions calculated in heating and cooling. Finally, the rate of change in energy needs was calculated in relation to the original building. The results show that the experimental measurements are close to the theoretically calculated U-Value of the simulation for the walls which is not the case with windows.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Περιεχόμενα.....	5
Περιεχόμενα εικόνων.....	7
Περιεχόμενα διαγραμμάτων.....	8
Περιεχόμενα πινάκων.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	11
2.1. Βασικές έννοιες.....	11
2.1.1. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας και ο ρόλος του.....	11
2.1.2. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	13
2.1.3. Συντελεστής θερμικής αντίστασης.....	13
2.1.4. Θερμοχωρητικότητα.....	13
2.1.5. Συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας.....	13
2.2. Τεχνικές μέτρησης U-Value.....	14
2.2.1. Μέθοδος ροής θερμότητας.....	14
2.2.2. Θερμογραφία.....	15
2.2.3. Πολλαπλές μετρήσεις θερμοκρασίας.....	15
2.2.4. Πίνακες.....	16
2.3. Μέτρηση έναντι υπολογισμός U-Value.....	16
2.4. Σύγκριση ροής θερμότητας - Πολλαπλών μετρήσεων θερμοκρασίας.....	17
2.5. Ακρίβεια μετρήσεων.....	18
2.6.1. Θερμικό ισοζύγιο ενός κτιρίου.....	19
2.6.2. Ο ρόλος του ενεργειακού σχεδιασμού.....	20
2.6.3. Ενεργειακός σχεδιασμός σε υφιστάμενα κτίρια.....	21
2.7. Κτίριο.....	22
2.8. Όργανο μέτρησης.....	23
2.9. Λογισμικό.....	24
3. Πειραματικό μέρος.....	25
3.1. Μετρήσεις.....	25
3.2. Μετρήσεις οργάνου.....	27
3.3. Προσομοίωση.....	28

3.4. Αποτελέσματα	35
3.4.1. Αποτελέσματα μετρήσεων.....	35
3.4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	44
3.5. Σφάλματα πειραματικής διαδικασίας.....	46
4. Συμπεράσματα.....	47
5. Προτάσεις μελλοντικής έρευνας.....	49
Βιβλιογραφία - Πηγές.....	50

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Συμπεριφορά U-Value.....	12
Εικόνα 2: Θερμικές απώλειες ενός κτιρίου σε μια χειμωνιάτικη μέρα.....	14
Εικόνα 3: Θερμογραφία.....	15
Εικόνα 4: Μέθοδος ροής θερμότητας.....	17
Εικόνα 5: Κτίριο K1.....	22
Εικόνα 6: Απεικόνιση του οργάνου μέτρησης.....	23
Εικόνα 7: gSKIN U-Value Kit-2615c.....	23
Εικόνα 8: Μέτρηση τοίχου - 2ος όροφος.....	25
Εικόνα 9: Μέτρηση τοίχου - 2ος όροφος.....	25
Εικόνα 10: Μέτρηση τοίχου - K2A8.....	25
Εικόνα 11: Μέτρηση τοίχου - K2A8.....	25
Εικόνα 12: Μέτρηση τοίχου - K2109.....	26
Εικόνα 13: Μέτρηση τζαμιού - K2A8.....	26
Εικόνα 14: Μέτρηση τζαμιού - K2A8.....	26
Εικόνα 15 : Μέτρηση τζαμιού - Εργαστήριο.....	26
Εικόνα 16: Αισθητήρας ροής θερμότητας και εσωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας.....	27
Εικόνα 17: Εξωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας.....	27
Εικόνα 18-Εικόνα 19: Κτίριο K1 σε περιβάλλον Sketch up με τις θερμικές ζώνες.....	29
Εικόνα 20: Αλλαγή πάχους υλικού για 2ο όροφο - Openstudio.....	34
Εικόνα 21: Αλλαγή πάχους υλικού για 1ο όροφο - Openstudio.....	34
Εικόνα 25: Αλλαγή πάχους υλικού για παράθυρα - Openstudio.....	34

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο δεύτερου ορόφου.....	36
Διάγραμμα 2: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο εργαστηρίου...	37
Διάγραμμα 3: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο γραφείου K2109.....	38
Διάγραμμα 4: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο γραφείου K2A8.....	39
Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα μέτρησης για το τζάμι εργαστηρίου.....	40
Διάγραμμα 6: Αποτελέσματα μέτρησης για το τζάμι γραφείου K2108.....	41
Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα μέτρησης για το τζάμι γραφείου K2A8.....	42

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Στοιχεία μετρήσεων.....	26
Πίνακας 2: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά εξωτερικών τοίχων και παραθύρων.....	31
Πίνακας 3: Αρχικά χαρακτηριστικά των υλικών τοίχων.....	32
Πίνακας 4: Αρχικά χαρακτηριστικά των υλικών παραθύρων.....	33
Πίνακας 5: Αποτελέσματα μετρήσεων οργάνου.....	35
Πίνακας 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης για θέρμανση και ψύξη....	43
Πίνακας 7: Ποσοστά μεταβολής θέρμανσης και ψύξης.....	44

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κτίρια αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% της βασικής ενεργειακής κατανάλωσης στις περισσότερες χώρες αλλά και στην Ευρώπη. Κάθε χρόνο καταναλώνονται σε κτίρια περίπου 3100 TWh ^[1]. Ένα μεγάλο μέρος αυτής της ενεργειακής χρήσης οφείλεται στη θέρμανση και ψύξη, το οποίο σημαίνει ότι τα καλύτερα μονωμένα κτίρια μπορούν να έχουν ένα τεράστιο αντίκτυπο στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Με τη θερμομονωτική προστασία των δομικών στοιχείων των κτιριακών κατασκευών επιδιώκεται ο περιορισμός στο ελάχιστο δυνατό των ανταλλαγών θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και η επίτευξη ενός ευχάριστου εσωκλίματος στο εσωτερικό των κτιρίων με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, κατά μεν τη χειμερινή (ψυχρή) περίοδο περιορίζονται οι θερμικές απώλειες προς το εξωτερικό περιβάλλον, κατά δε τη θερινή (θερμή) περίοδο περιορίζεται η υπερθέρμανση λόγω θερμικών προσόδων από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα όμως με τη θερμομονωτική προστασία των κτιρίων ελαχιστοποιείται και ο κίνδυνος εκδήλωσης του φαινομένου της επιφανειακής συμπύκνωσης των υδρατμών (δρόσου) και προστατεύονται οι κατασκευές από φαινόμενα υγρασίας του εσωτερικού χώρου. Σε γενικότερο επίπεδο περιορίζει την απαίτηση για κατανάλωση ενέργειας και κατά συνέπεια μειώνει την κατανάλωση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων και τη ρύπανση του περιβάλλοντος από την παραγωγή αέριων ρύπων. Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος των σημερινών κτιρίων έχουν κατασκευαστεί πριν το 1980 με χαμηλά πρότυπα μονώσεων υπάρχει δυνατότητα μεγάλης βελτίωσης σε αυτό το τομέα. Τα χαμηλά πρότυπα μονώσεων οδηγούν σε μεγάλες σπατάλες ενέργειας και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, μεγάλες δαπάνες για τους ιδιοκτήτες ή τους ενοίκους των κτιρίων. Για να μειωθούν οι δαπάνες απαιτείται η βελτίωση της μόνωσης των κτιρίων μέσω ανακαίνισης ή εκσυγχρονισμού. Εξαιτίας της μεγάλης προοπτικής που έχει η εξοικονόμηση ενέργειας, η αγορά της μετασκευής μεγαλώνει με αποτέλεσμα να προσφέρονται ποικίλες ελκυστικές λύσεις. Παρ'όλα αυτά, μέχρι και σήμερα, οι βελτιώσεις που γίνονται δεν βασίζονται σε ποσοτικά μονωτικά δεδομένα (π.χ U-Value) ολόκληρων κτιρίων αφού αυτά υπάρχουν μόνο για μεμονωμένα δομικά στοιχεία. Η απουσία τους δυσχεραίνει τον προσδιορισμό των υφιστάμενων συνθηκών, την αιτιολόγηση των επενδύσεων και την επικύρωση των βελτιώσεων. Ως εκ τούτου υπάρχει μεγάλη ανάγκη να μετρηθούν τα U-Value των κτιρίων έτσι ώστε να αποκτηθούν αξιόπιστα, ακριβή και ενημερωμένα δεδομένα.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1.1. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας και ο ρόλος του

Ως συντελεστής θερμοπερατότητας ορίζεται το μέγεθος που προσδιορίζει την ποσότητα της θερμότητας σε βατώρες η οποία ρέει σε μια ώρα μέσα από ένα στρώμα υλικού που έχει επιφάνεια 1m^2 όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα που βρίσκεται στην μία και στην άλλη πλευρά της κατασκευής είναι ένας βαθμός Κελβιν (Kelvin) και το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την επιφάνεια της κατασκευής, το πάχος και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ των οικοδομικών υλικών. Μονάδα μέτρησής του είναι τα $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα μόνωσης ενός υλικού ή ενός δομικού στοιχείου (εικόνα 1).

Ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας γίνεται αναλυτικά με βάση τη παρακάτω διαδικασία:

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 επιμέρους αντιστάσεων της κάθε στρώσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$R_{ss} = \sum_{i=1}^n Ri \quad (1)$$

Η σειρά τοποθέτησης των στρώσεων ενός δομικού στοιχείου πρακτικά δεν επηρεάζει τη ροή θερμότητας μέσω αυτού, επηρεάζει όμως την αξιοποίηση της θερμοχωρητικότητας τους. Η τοποθέτηση της θερμομονωτικής στρώσης σε θέση πλησιέστερη προς την εσωτερική ή 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 επιμέρους στρώσεων και των αντιστάσεων του στρώματος αέρος εκατέρωθεν των όψεων κατά την εξίσωση:

$$R_T = R_{si} + R_{ss} + R_{se} \quad (2)$$

όπου:

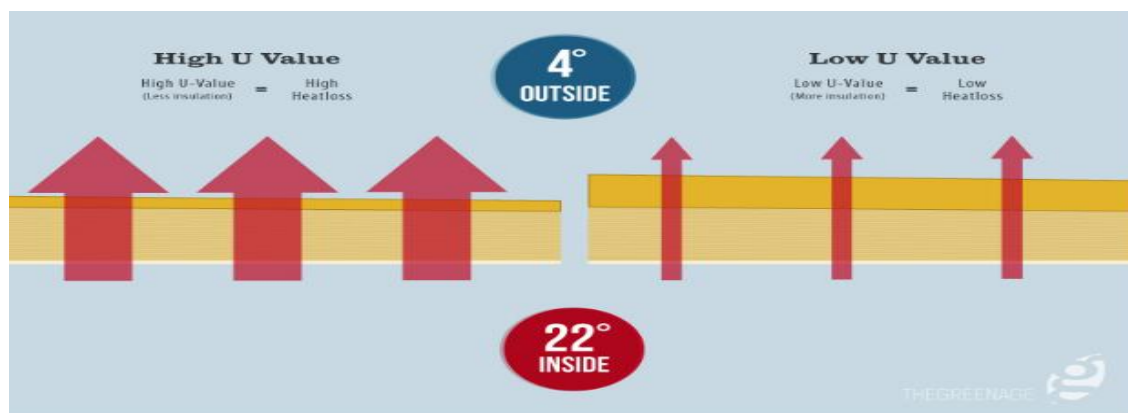
R_T [W/m²K] η συνολική αντίσταση που προβάλλει στη ροή θερμότητας το δομικό στοιχείο

R_{si} [W/m²K] 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/m²K] 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 :

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (3)$$



Εικόνα 1 - Συμπεριφορά U-Value

Μερικοί άλλοι βασικοί συντελεστές που σχετίζονται με τη θερμομόνωση ενός κτιρίου είναι:

2.1.2 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ):

Είναι η ποσότητα θερμότητας(σε Watt) που περνά από τις απέναντι πλευρές ενός υλικού, πάχους ενός μέτρου, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών αυτών είναι ίση με ένα βαθμό Κέλβιν (1°K). Μετριέται σε $\text{W/m}^*\text{K}$ και επηρεάζεται από τη φύση του ίδιου υλικού, τη δομή του, τη θερμοκρασία, την υγρασία και την πίεση. Η θερμική αγωγιμότητα είναι υψηλή στα υλικά τα οποία αποκαλούνται θερμικά αγωγιμα, όπως είναι τα μέταλλα και είναι χαμηλή στα υλικά που αποκαλούνται θερμομονωτικά. Συνεπώς όσο μικρότερος είναι ο συγκεκριμένος συντελεστής ενός υλικού τόσο καλύτερη θερμομόνωση έχει.

2.1.3. Συντελεστής θερμικής αντίστασης (R):

Είναι το αντίστροφο του συντελεστή θερμοπερατότητας. Μετρά δηλαδή με πόση δυσκολία (αντίσταση των μετρούμενων στοιχείων) περνά η θερμότητα, διαμέσου ενός υλικού ή στρώσεων υλικών(σύστημα) με διαφορά θερμοκρασίας στις δύο πλευρές του ίση με ένα βαθμό Κέλβιν (K). Ο συντελεστής R μετριέται σε $\text{m}^2*\text{K/W}$ και μαθηματικά εκφράζεται με τον τύπο $R=d/\lambda$ όπου d το πάχος του υλικού και λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής R ενός υλικού, τόσο καλύτερη θερμομόνωση έχει.

2.1.4.Θερμοχωρητικότητα (C):

Είναι η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύει ένα δομικό στοιχείο ενός χώρου που θερμαίνεται (ή κλιματίζεται) όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών του είναι πάντα ίση με 1°C .

2.1.5 Συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας (ϵ):

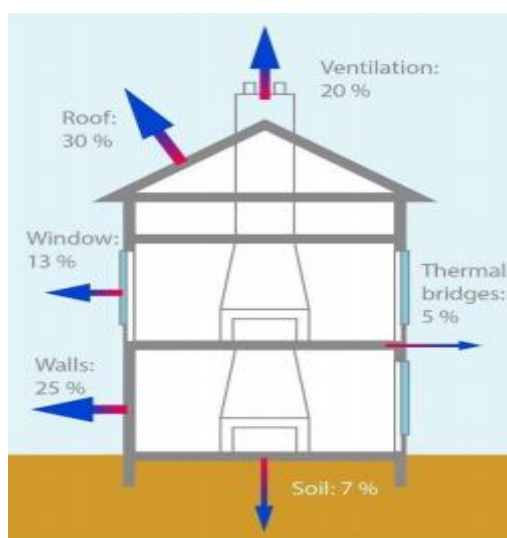
Είναι η αναλογία εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας ενός σώματος προς την θερμική ακτινοβολία μελανούς σώματος (τιμές από 0 έως 1).

2.2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ U-VALUE

2.2.1. Μέθοδος ροής θερμότητας (Heat Flux Method):

Ροή θερμότητας μέσω ενός υλικού προκαλείται μόλις υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των αντίθετων πλευρών του. Η θερμότητα ρέει από το θερμότερο προς το ψυχρότερο μέρος. Η μέθοδος χρησιμοποιεί το φαινόμενο αυτό και μετρά άμεσα τη ροή θερμότητας καθώς και τις θερμές και ψυχρές θερμοκρασίες. Με αυτά τα δεδομένα είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή U-Value οποιουδήποτε δομικού υλικού επί τόπου. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα ροής θερμότητας και δύο αισθητήρες θερμοκρασίας. Είναι η μοναδική μέθοδος που παρέχει αξιόπιστες ποσοτικές in-situ πληροφορίες για ένα κτίριο.

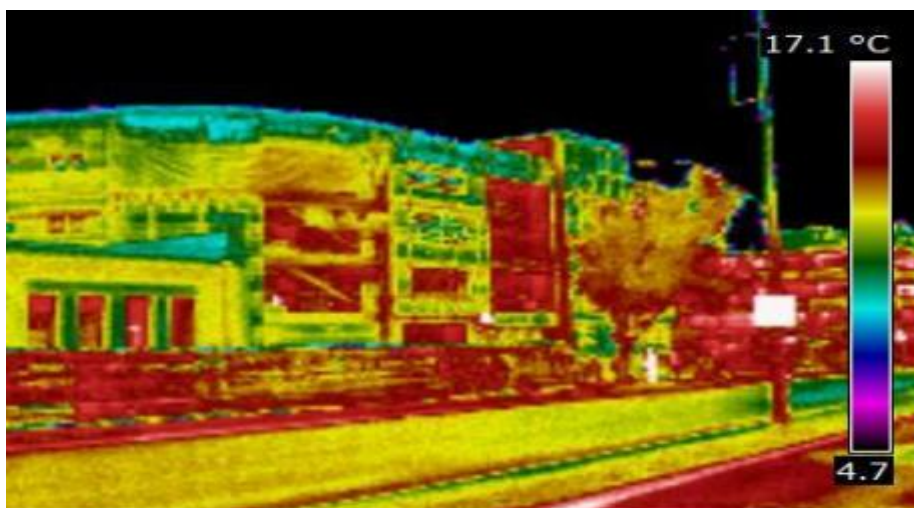
Ο ρόλος του αισθητήρα ροής θερμότητας: Ένα κτίριο είναι ένα σύνθετο θερμικό σύστημα. Η θερμική ενέργεια εισέρχεται στο κτίριο μέσω του συστήματος θέρμανσης και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ενέργεια διαρρέει προς τα έξω μέσω της οροφής, των τοίχων(εικόνα 2), των παραθύρων και άλλων θερμικών γεφυρών όπως μπαλκόνια, στο έδαφος και μέσω ανταλλαγής με τον περιβάλλοντα αέρα. Για την πλήρη κατανόηση του θερμικού συστήματος και για την βελτιστοποίηση του(για παράδειγμα μείωση του κόστους θέρμανσης, απαιτούνται ακριβή δεδομένα. Αυτά παρέχονται από τον αισθητήρα ροής θερμότητας ο οποίος μπορεί να υπολογίσει, μεταξύ άλλων, τον συντελεστή θερμοπερατότητας και να αξιολογήσει πόσο καλά μονωμένο είναι ένα κτίριο.



Εικόνα 2 - Θερμικές απώλειες ενός κτιρίου σε μια χειμωνιάτικη μέρα

2.2.2. Θερμογραφία (Thermography):

Η τεχνική αυτή παρουσιάζει τη θερμική ακτινοβολία ενός αντικειμένου και παράγει μια εικόνα η οποία εμφανίζει σημεία με υψηλότερη και χαμηλότερη ακτινοβολία (εικόνα 3). Βοηθάει στην κατανόηση της συνολικής ποιότητας ενός κτιρίου και εντοπίζει θερμικές γέφυρες και τμήματα με ανομοιογενή μόνωση. Ωστόσο δεν παράγει ποσοτικά δεδομένα (π.χ U-Value σε $W/m^2 \cdot K$) που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ερμηνεύσουν τη ποιότητα της μόνωσης. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για προσεγγιστική εύρεση του συντελεστή θερμοπερατότητας.



Εικόνα 3 - Θερμογραφία

2.2.3. Πολλαπλές μετρήσεις θερμοκρασίας (Multiple Temperature Measurements):

Η τεχνική αυτή βασίζεται σε τρεις ή περισσότερες μετρήσεις εσωτερικά και εξωτερικά από ένα στοιχείο οικοδόμησης. Συγχρονίζοντας αυτές τις μετρήσεις μπορεί κανείς να υπολογίσει έμμεσα τη ροή θερμότητας και από αυτήν την πληροφορία να εξάγει το U-Value ενός κτιριακού στοιχείου. Αν και αυτή η μέθοδος παράγει ποσοτικά δεδομένα απαιτείται μια ελάχιστη διαφοράς θερμοκρασίας 10 °C μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού για να λειτουργήσει, το οποίο συμβαίνει πολύ σπάνια. Επιπλέον οι εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες πρέπει να είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της μέτρησης, ενώ δεν επιτρέπεται η ηλιακή ακτινοβολία. Οι

παραπάνω απαιτήσεις καθιστούν πολύ δύσκολο την απόκτηση αξιόπιστων δεδομένων.

2.2.4. Εμπειρικός υπολογισμός βάσει πινάκων (Table Look-up):

Βασίζεται σε σύνθετες βάσεις δεδομένων που περιέχουν τους συντελεστές θερμοπερατότητας των γενικών στοιχείων οικοδόμησης και διατάσσονται ανάλογα το υλικό στοιχείων και το έτος κατασκευής. Μέσω αυτών, ο συντελεστής υπολογίζεται προσεγγιστικά με την προσθήκη όλων των υλικών που περιλαμβάνονται μέσα στο συγκεκριμένο στοιχείο. Αν και η μέθοδος αυτή είναι πολύ απλή και γρήγορη έχει το μειονέκτημα ότι ο συντελεστής θερμοπερατότητας δεν είναι ακριβής αλλά προσεγγιστικός.

2.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΑΝΤΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ U-VALUE

Τα κτίρια δεν έχουν γίνει μόνο, όλο και περισσότερο αποδοτικά με την πάροδο του χρόνου, αλλά επίσης, η τεκμηρίωση των δεδομένων για τα κατασκευαστικά τους στοιχεία και υλικά έχει βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό. Σ' αυτό το πλαίσιο υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για πολλά κτίρια που κατασκευάστηκαν τις τελευταίες δεκαετίες οι οποίες επιτρέπουν έναν ακριβή θεωρητικό υπολογισμό των θερμικών ιδιοτήτων όπως το U-Value. Το πρόβλημα με αυτούς τους υπολογισμούς είναι ότι οι τιμές στην πράξη μπορεί να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Ορισμένοι τύποι μόνωσης αφρού, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στα πρώτα μονωμένα κτίρια, τείνουν να αλλοιώνονται εξαιτίας της διείσδυσης της υγρασίας. Επιπλέον, η τιμή U-Value των νεότερων κτιρίων που έχουν μονωθεί με ορυκτοβάμβακα μπορεί να είναι χειρότερη στην πραγματικότητα λόγω βλάβης, αύξησης της υγρασίας ή κακών μεθόδων εγκατάστασης. Ύστερα από πολλές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για μεγάλο χρονικό διάστημα επιβεβαιώθηκε ότι η τιμή U-Value ήταν έως και διπλάσια από τη θεωρητική τιμή. Αυτό, ήταν δύσκολο να εξηγηθεί ακόμα και από τους ειδικούς, οι οποίοι δώσανε διάφορες εκδοχές όπως για παράδειγμα την υγρασία, ή αστοχίες κατά την εγκατάσταση. Συνοψίζοντας, τα παραπάνω υποδεικνύουν ότι, το να βασίζεται κανείς στα χαρακτηριστικά του κτιρίου θα του δώσει λανθασμένη αντίληψη της θερμικής απόδοσης και του κόστους θέρμανσής του.

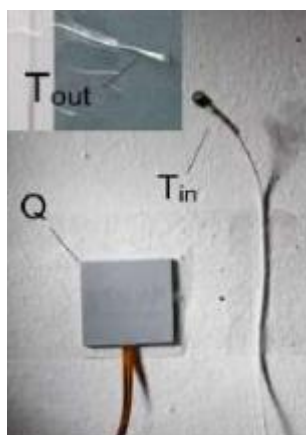
2.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ -ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.

Αν και οι δύο μέθοδοι παρέχουν στο χρήστη μια in-situ U-value, υπάρχει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη μετρήσεων, ειδικά όσον αφορά την ποιότητα και την ακρίβεια.

Η διαφορά στις δύο μεθόδους μπορεί να εξηγηθεί εξετάζοντας τον παρακάτω τύπο μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας:

$$U = \frac{Q}{T_{in} - T_{out}} \quad [4]$$

όπου T_{in} και T_{out} είναι η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin αντίστοιχα και Q η αντίστοιχη ροή θερμότητας μέσω του τοίχου. Η διαφορά εντοπίζεται στον τρόπο που η ροή θερμότητας προσδιορίζεται. Με τη μέθοδο ροής θερμότητας (εικόνα 4), η ροή θερμότητας (Q) μετριέται μέσω ενός αισθητήρα ο οποίος είναι προσκολλημένος στον τοίχο. Η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία μετρώνται από δύο αισθητήρες θερμοκρασίας. Συνεπώς όλοι οι παράμετροι που απαιτούνται για τον υπολογισμό του u-value προσδιορίζονται άμεσα.



Εικόνα 4 - Μέθοδος ροής θερμότητας (εξοπλισμός)

Με τη μέθοδο πολλαπλών μετρήσεων θερμοκρασίας η ροή θερμότητας προσεγγίζεται με τη μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας και της

θερμοκρασίας του τοίχου υποθέτοντας ένα σταθερό όριο θερμικής αντίστασης μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας τοίχων και του εσωτερικού αέρα και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = \frac{T_{in} - T_{wall}}{Rs_i} \quad [5]$$

όπου T_{in} είναι η εσωτερική θερμοκρασία, T_{wall} η εσωτερική θερμοκρασία του τοίχου και Rs_i το όριο θερμικής αντίστασης μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας τοίχων και του εσωτερικού αέρα. Για τον υπολογισμό του T_{wall} απαιτείται ένας αισθητήρας θερμοκρασίας. Το Rs_i δεν μετράται αλλά προέρχεται από προτεινόμενες τιμές για την οικοδόμηση στοιχείων. Τυπική τιμή που χρησιμοποιείται συχνά είναι $0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Επειδή όμως αυτή η τιμή είναι μια εκτίμηση μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την πραγματική in-situ value.

Συνοψίζοντας η μέθοδος ροής θερμότητας παρέχει στο χρήστη ένα u-value το οποίο βασίζεται σε τρεις παραμέτρους που μετρώνται επί τόπου. Με αυτό το τρόπο απεικονίζει όλες τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής μέτρησης. Αντίθετα η μέθοδος των πολλαπλών μετρήσεων θερμοκρασίας στηρίζεται εν μέρη σε εκτιμώμενες τιμές.

2.5. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Μέγεθος θερμοκρασιακής διαφοράς: όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο πιο ακριβής είναι η μέτρηση.
- Καιρικές συνθήκες: ο νεφελώδης καιρός είναι ευνοϊκότερος από ηλιοφάνεια.
- Διάρκεια παρακολούθησης: όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο πιο ακριβής είναι η μέτρηση.
- Όσο περισσότερα είναι τα σημεία δοκιμής τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια καθώς και ο περιορισμός των λαθών.

2.6.1 ΘΕΡΜΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Η ραγδαία οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων χρόνων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργειακών αναγκών. Απόρροια της ανάπτυξης είναι η συνεχής βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, και συνεπώς, η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για την λειτουργία των κτιρίων. Η αύξηση είναι τόσο ποσοτική, καθώς καταναλώνουμε περισσότερη ενέργεια σε απόλυτο μέγεθος, όσο και ποιοτική, επειδή χρησιμοποιούμε όλο και περισσότερο τον ηλεκτρισμό για την θέρμανση/ψύξη των κτιρίων μας.

Για να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στο κτίριο παρέχεται θέρμανση ή ψύξη. Όσο μικρότερη είναι η συνεισφορά της θέρμανσης ή ψύξης για την εξισορρόπηση του θερμικού ισοζυγίου και την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης, τόσο οικονομικότερη είναι η λειτουργία του κτιρίου.

Ως θερμικό ισοζύγιο ενός κτιρίου ορίζεται το άθροισμα όλων των θερμικών ροών από και προς ένα κτίριο. Οι θερμικές ροές αναφέρονται σε θερμικά κέρδη και θερμικές απώλειες που οφείλονται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Το θερμικό ισοζύγιο ενός κτιρίου δίνεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$QI + QS \pm QC \pm QV \pm QM - QE = 0 \quad [6]$$

όπου:

QI: η θερμότητα που αποδίδεται από τους ενοίκους, τις διάφορες συσκευές και τον φωτισμό

QS: το θερμικό κέρδος από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο

QC: οι θερμικές απώλειες ή τα κέρδη με αγωγιμότητα από το κέλυφος του κτιρίου

QV: οι θερμικές απώλειες ή τα κέρδη από τον αερισμό

QM: οι θερμαντικές ή ψυκτικές ανάγκες του χώρου

QE: οι θερμικές απώλειες από την εξάτμιση

Θα πρέπει να τονιστεί ότι στον υπολογισμό του θερμικού ισοζυγίου δεν λαμβάνεται υπόψη η διαθέσιμη στον θερμαινόμενο χώρο θερμική μάζα, η οποία επηρεάζει όχι μόνο την χρονική και στον χώρο κατανομή της θερμοκρασίας, αλλά έμμεσα και την τελική κατανάλωση ενέργειας για την διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας.

2.6.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός των κτιρίων πρέπει να γίνεται βάση αρχών και προδιαγραφών ώστε αφενός να εξοικονομούν ενέργεια για τη θέρμανση και τη ψύξη τους και αφετέρου να εκμεταλλεύονται τις ήπιες μορφές ενέργειας, για την κάλυψη του θερμικού και ψυκτικού τους φορτίου, στοχεύοντας στη μικρότερη δυνατή επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Ο όρος **ενεργειακός σχεδιασμός** ή **βιοκλιματικός σχεδιασμός** ή **ηλιακή αρχιτεκτονική** αναφέρεται στο σχεδιασμό που ανταποκρίνεται στις κλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντος όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, κλπ. με τέτοιο τρόπο ώστε το κτιριακό κέλυφος να τις τροποποιεί και να δημιουργείται ένα εσώκλιμα, το οποίο θα παρέχει με τις μικρότερη δυνατή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη, τις βέλτιστες συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης για τους χρήστες.

Ειδικότερα, κατά την χειμερινή περίοδο ο ενεργειακός σχεδιασμός αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών αγωγιμότητας, αερισμού και εξάτμισης, επιτρέποντας μόνο τον απαραίτητο για λόγους υγιεινής αερισμό και στην αύξηση των θερμικών κερδών από την ηλιακή ακτινοβολία, ούτως ώστε να ελαττωθούν οι δαπάνες για την παροχή θέρμανσης. Αντίστοιχα κατά την θερινή περίοδο ο ενεργειακός σχεδιασμός στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των θερμικών κερδών από την ηλιακή ακτινοβολία και στη βελτιστοποίηση των μεθόδων φυσικού δροσισμού ώστε να μετριάσει, όσο είναι δυνατόν, την παρεχόμενη ψύξη από τον μηχανολογικό εξοπλισμό.

2.6.3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΚΤΙΡΙΑ

Κυρίαρχο στοιχείο του βιοκλιματικού σχεδιασμού ενός κτιρίου είναι η εξισορρόπηση του θερμικού ισοζυγίου του χώρου, δηλαδή η εξισορρόπηση των θερμικών κερδών και των θερμικών απωλειών του. Όταν τα θερμικά κέρδη δεν επαρκούν για να καλύψουν τις θερμικές απώλειες του κτιρίου τον χειμώνα, προσάγεται στους εσωτερικούς χώρους θερμότητα, ώστε να καλυφθεί η διαφορά στο ισοζύγιο. Αντίστοιχα το καλοκαίρι παρέχεται ψύξη.

Κατά τη διαδικασία βελτίωσης των υφιστάμενων κτιρίων οι δυνατότητες οικοδομικής παρέμβασης στο κτιριακό αφορούν:

- Στη μείωση των θερμικών απωλειών αγωγιμότητας από τα δομικά στοιχεία με την προσθήκη αναδρομικής θερμομόνωσης στα συμπαγή στοιχεία και την βελτίωση ή αντικατάσταση των κουφωμάτων με στόχο τα νέα κουφώματα να διαθέτουν καλύτερο συντελεστή θερμοπερατότητας.
- Στη μείωση των θερμικών απωλειών αερισμού με τη δημιουργία ανεμοφρακτών, τη βελτίωση της αεροστεγανότητας των ανοιγμάτων και την μείωση των οπών-οδών διαφυγής της θερμότητας.
- Στην εφαρμογή νυκτερινής κινητής θερμομόνωσης στα ανοίγματα(π.χ. φύλλα ασφαλείας) ώστε να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες το βράδυ, όπου και εμφανίζονται τα 2/3 περίπου των θερμικών απωλειών του 24ωρου.
- Στην αύξηση των θερμικών κερδών από τον ήλιο κατά την χειμερινή περίοδο με την αύξηση των νότιων ανοιγμάτων, την προσθήκη παθητικών συστημάτων ή και την χρήση ανακλαστικών επιφανειών.
- Στην μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην θερινή περίοδο με την πρόβλεψη της κατάλληλης ηλιοπροστασίας.
- Στην αύξηση του φυσικού αερισμού-δροσισμού, με τη σωστή χρήση των ανοιγμάτων για τα οποία πιθανώς να χρειαστούν νέα κουφώματα με τα κατάλληλα ανοιγόμενα τμήματα.
- Στην κατάλληλη διαμόρφωση του άμεσα περιβάλλοντα χώρου, με στόχο την αντιμετώπιση του ανέμου, ανάλογα με την εποχή, και κατά συνέπεια την μείωση των θερμικών απωλειών ή την αύξηση του φυσικού δροσισμού(π.χ. δενδροφύτευση-φράγμα χειμερινού ψυχρού ανέμου για το χειμώνα ή δενδροφύτευση που οδηγεί τους δροσερούς ανέμους προς το κτίριο για το καλοκαίρι).

2.7. ΚΤΙΡΙΟ

Το κτίριο που έγιναν οι μετρήσεις είναι το κτίριο με κωδικό K1 του Πολυτεχνείου Κρήτης (Εικόνα 5), στο οποίο στεγάζεται από το 1997 μέρος των εγκαταστάσεων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του ιδρύματος. Οι διαστάσεις του κτιρίου είναι 86,4 m (μήκος), 15,2 m (πλάτος) και 12,0 m (ύψος), ενώ περιλαμβάνει 2032,21 m² κλιματιζόμενων χώρων και 1135,43 m² μη κλιματιζόμενων χώρων. Έχει τρεις ορόφους, καθένας εκ των οποίων χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη με ένα μεγάλο αίθριο με θόλο στην πάνω του πλευρά. Στο ισόγειο του κτιρίου στεγάζονται 14 εργαστήρια, 3 γραφεία, 2 μηχανολογικοί χώροι, ασανσέρ, σκάλες επικοινωνίας με τον πρώτο όροφο και τουαλέτες. Στον πρώτο όροφο υπάρχουν 17 γραφεία, η αίθουσα συνεδριάσεων του τμήματος, 2 μηχανολογικοί χώροι, ασανσέρ, σκάλες για την πρόσβαση στους υπόλοιπους ορόφους, τουαλέτες και ένα δωμάτιο που χρησιμοποιείται ως κουζίνα. Ο δεύτερος όροφος περιλαμβάνει κυρίως χώρους με μηχανολογικό εξοπλισμό, ενώ μέρος του ορόφου χρησιμοποιείται ως εργαστηριακός και βοηθητικός χώρος. Οι ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου καλύπτονται από το δημόσιο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έχει προαναφερθεί, το κτίριο θα χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της προσομοίωσης, αφού θα γίνουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά των υλικών των εξωτερικών τοίχων του δευτέρου και πρώτου ορόφου και στα παράθυρα πρώτου ορόφου.



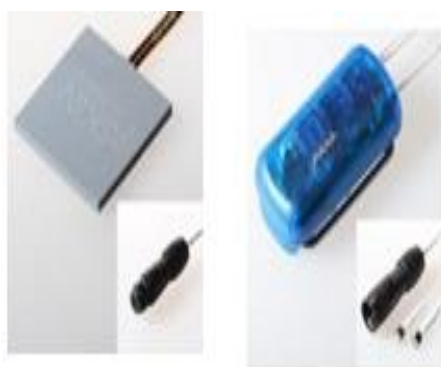
Εικόνα 5 - Κτίριο K1

2.8. ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

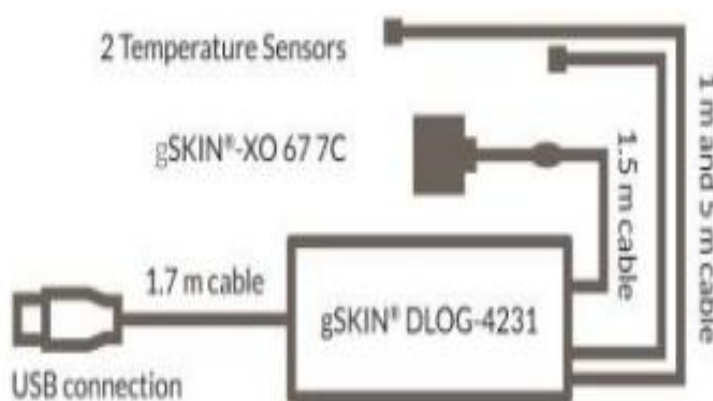
Για τις μετρήσεις του συντελεστή θερμοπερατότητας των τοίχων και παραθύρων του κτιρίου K1 χρησιμοποιήθηκε το gSKIN U-Value Kit-2615c της εταιρίας greenTEG (εικόνα 6). Αποτελείται από έναν αισθητήρα ροής θερμότητας, δύο αισθητήρες θερμοκρασίας και ένα καταγραφικό δεδομένων το οποίο μπορεί να συνδεθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω USB (εικόνα 7). Ο αισθητήρας ροής θερμότητας έχει εύρος από -300 έως 300 W/m² ενώ οι αισθητήρες θερμοκρασίας για τον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο έχουν εύρος -10 έως 46°C με απόκλιση ±5 °C και -55 έως 125 °C με απόκλιση ±2 °C αντίστοιχα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του U-Value Kit είναι τα παρακάτω:

- Μετρά πόση θερμότητα(σε Watt) ρέει μέσω ενός τετραγωνικού μέτρου ενός τοίχου ή τζαμιού
- Είναι η μοναδική μέθοδος που δίνει αξιόπιστες ποσοτικές in-situ πληροφορίες για ένα κτίριο
- Η τεχνική αυτή είναι τυποποιημένη στο πρότυπο ISO 9869 και πληροί όλες τις προϋποθέσεις του
- Εύκολη επεξεργασία των μετρήσεων
- Οι μετρήσεις μπορούν να ξεκινήσουν από 5°C θερμοκρασιακή διαφορά



Εικόνα 6 - Όργανο μέτρησης, gSKIN U-Value Kit-2615c



Εικόνα 7 - Απεικόνιση του οργάνου μέτρησης

2.9 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Για την λήψη των μετρήσεων μέσω του gSKIN U-Value Kit-2615c χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη εφαρμογή της εταιρίας GreenTEG. Η τελευταία, μας έδωσε επίσης τα διαγράμματα που απεικόνιζαν τις μεταβολές των τιμών καθ'όλη τη διάρκεια της μέτρησης καθώς και τα δεδομένα που προέκυψαν. Τα δεδομένα αυτά, τα επεξεργαστήκαμε στο πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων Microsoft Excel, κατασκευάσαμε τα διαγράμματα και μέσω αυτού έγιναν όλοι οι υπολογισμοί που απαιτούνταν. Επίσης στο Microsoft Excel κατασκευάστηκαν οι πίνακες που περιέχονται στην εργασία. Όσον αφορά την προσομοίωση χρησιμοποιούνται τα προγράμματα Sketch up (έκδοση Make του έτους 2016) EnergyPlus (έκδοση 8.4.0) και OpenStudio (έκδοση 1.13.0). Το πρόγραμμα SketchUp είναι ένα πρόγραμμα σχεδιασμού και μοντελοποίησης χώρων και κτιρίων σε 2 ή 3 διαστάσεις. Χρησιμοποιείται στην εργασία για να υπάρχει μια οπτική εικόνα του κτιρίου στο οποίο γίνεται η προσομοίωση. (κτίριο K1 του Πολυτεχνείου Κρήτης). Το EnergyPlus είναι ένα λογισμικό που βοηθά στη μοντελοποίηση και προσομοίωση των απαιτήσεων και καταναλώσεων ενός κτιρίου σε ενέργεια και νερό αφού πραγματοποιεί όλους τους υπολογισμούς για τα σχετικά φορτία. Στην περίπτωση μας, χρησιμοποιείται για να γίνουν οι υπολογισμοί των φορτίων για τη θέρμανση και τη ψύξη με τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών να απεικονίζονται στο OpenStudio. Ο ρόλος του OpenStudio είναι να συνδέσει τα δύο προαναφερθέντα προγράμματα (SketchUp και EnergyPlus) και μέσω αυτού να γίνουν οι αλλαγές που θέλουμε να κάνουμε κατά την προσομοίωση μας. Αφού πραγματοποιήσουμε τις αλλαγές στο OpenStudio γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για τα φορτία στο EnergyPlus, τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται πάνω στο κτίριο στο Sketchup και εμφανίζονται στο Openstudio.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

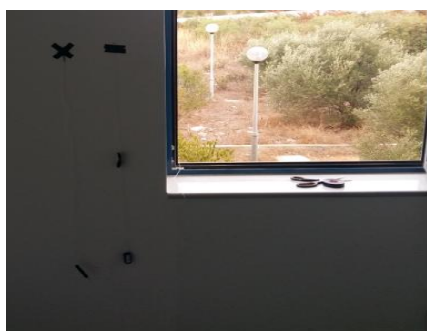
Αν και αναφέρθηκε προηγουμένως ότι οι μετρήσεις έγιναν στο κτίριο K1, αυτό ισχύει μόνο θεωρητικά. Συγκεκριμένα οι μετρήσεις έγιναν στο κτίριο K2, για πρακτικούς λόγους, το οποίο είναι ένα πιστό αντίγραφο (κατασκευαστικά) του κτιρίου K1. Επειδή τα κτίρια είναι ακριβώς ίδια έχει συνταχθεί μελέτη θερμομόνωσης μόνο για το κτίριο K1, αφού ήταν το πρώτο (χρονικά) που κατασκευάστηκε. Πάνω σε αυτή τη μελέτη στηρίχθηκε η μοντελοποίηση-προσομοίωση του κτιρίου K1. Οι μετρήσεις που έγιναν για τον τοίχο πραγματοποιήθηκαν στον δεύτερο όροφο(μηχανοστάσιο), στο εργαστήριο δομημένου περιβάλλοντος και διαχείρισης ενέργειας, στο γραφείο K2.109 (κολόνα) και στο γραφείο K2.A8. Όσον αφορά τα παράθυρα μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο δομημένου περιβάλλοντος και διαχείρισης ενέργειας, στο γραφείο K2.108 και στο γραφείο K2.A8 (πίνακας 1).



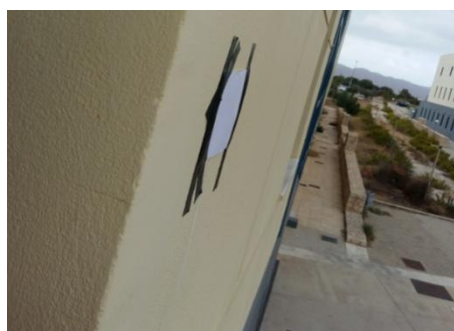
Εικόνα 8 - Μέτρηση τοίχου-2ος όροφος



Εικόνα 9 - Μέτρηση τοίχου-2ος όροφος



Εικόνα 10 - Μέτρηση τοίχου - K2A8



Εικόνα 11 - Μέτρηση τοίχου - K2A8



Εικόνα 12 - Μέτρηση τοίχου - K2109



Εικόνα 13 - Μέτρηση τζαμιού - K2A8



Εικόνα 14 - Μέτρηση τζαμιού - K2A8



Εικόνα 15 - Μέτρηση τζαμιού - Εργαστήριο

Σε όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε προστατευτικό κάλυμμα έτσι ώστε να προστατεύονται τα όργανα μέτρησης από την ηλιακή ακτινοβολία αλλά και την πιθανότητα βροχόπτωσης.

Πίνακας 1 - Στοιχεία μετρήσεων

A/A	Επιφάνεια	Τοποθεσία	Ημερομηνία έναρξης	Ημερομηνία τερματισμού
1	Τοίχος	2ος όροφος	22-9-2016	26-9-2016
2	Τοίχος	Εργαστήριο	29-9-2016	3-10-2016
3	Τοίχος	K2109	3-10-2016	6-10-2016
4	Τοίχος	K2A8	18-10-2016	21-10-2016
5	Τζάμι	Εργαστήριο	4-11-2016	11-11-2016
6	Τζάμι	K2108	17-12-2016	16-2-2017
7	Τζάμι	K2A8	29-11-2016	2-12-2016

3.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΟΡΓΑΝΟΥ

Για τις μετρήσεις του συντελεστή θερμοπεραρότητας χρησιμοποιήσαμε, όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, το όργανο U-Value Kit-2615c. Η διαδικασία που ακολουθείται για να γίνουν οι μετρήσεις αυτές περιγράφεται παρακάτω:

- 1) Τοποθετούμε τον αισθητήρα ροής θερμότητας και τον αισθητήρα θερμοκρασίας στον τοίχο ή το τζάμι με τη βοήθεια μονωτικής ταινίας (εικόνα 16). Στην άλλη πλευρά του τοίχου ή τζαμιού τοποθετούμε τον δεύτερο αισθητήρα θερμοκρασίας(εικόνα 17).
- 2) Συνδέουμε όλους τους αισθητήρες στο καταγραφικό δεδομένων, το οποίο συνδέεται μέσω USB στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- 3) Ανοίγουμε την εφαρμογή GreenTEG μέσω της οποίας γίνονται οι μετρήσεις του συντελεστή θερμοπερατότητας.
- 4) Στο μενού που θα εμφανιστεί διαλέγουμε την επιλογή Real time Measurement, έτσι ώστε, να εξασφαλίσουμε ότι όλοι οι αισθητήρες λειτουργούν κανονικά και δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα.
- 5) Επιστρέφουμε στο βασικό μενού, επιλέγουμε την εντολή Start logging και αφού πατήσουμε στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται "Start Measurement" η μέτρηση ξεκινάει.
- 6) Μετά το πέρας 72 ωρών σταματάμε την μέτρηση με την εντολή "Stop Measurement" και στη συνέχεια πατάμε "Read Record". Εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο με τα αποτελέσματα της μέτρησης. Από εκεί παίρνουμε το συντελεστή θερμοπερατότητας ο οποίος υπολογίζεται αυτόματα και μας δίνεται η τιμή του.
- 7) Για να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα της μέτρησης μας επιλέγουμε από το μενού file την επιλογή export data έτσι ώστε να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα υπό μορφή αναφοράς σε αρχείο επέκτασης .csv, το οποίο θα ανοίξουμε αργότερα στο πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων Microsoft Excel για να κατασκευάσουμε το διάγραμμα κάθε μέτρησης.



Εικόνα 16 - Αισθητήρας ροής θερμότητας και εσωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας

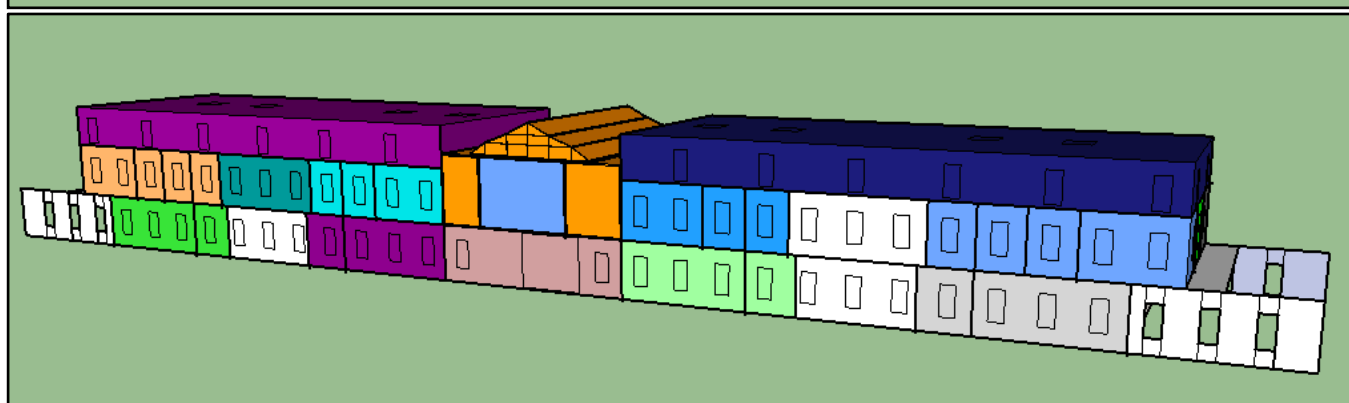
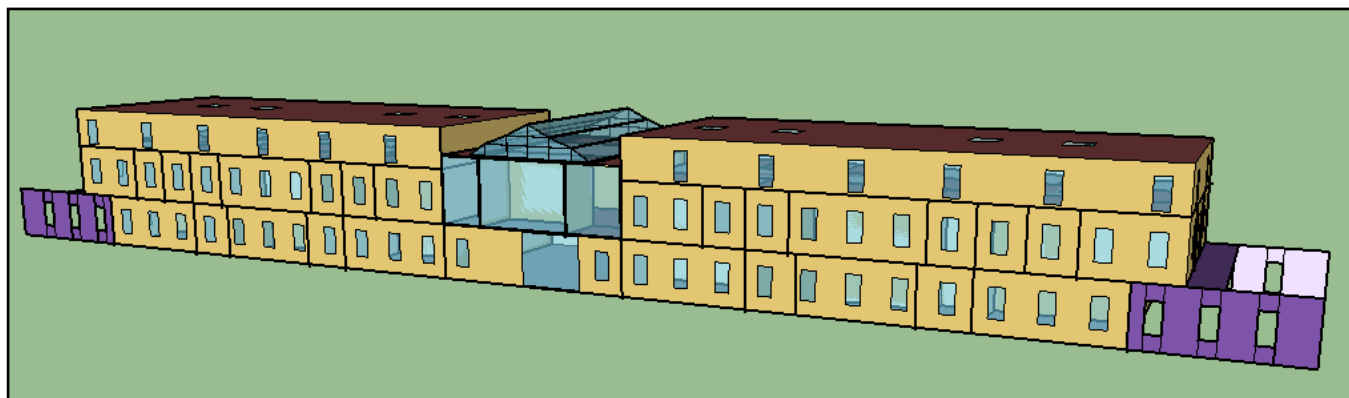


Εικόνα 17 - Εξωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας

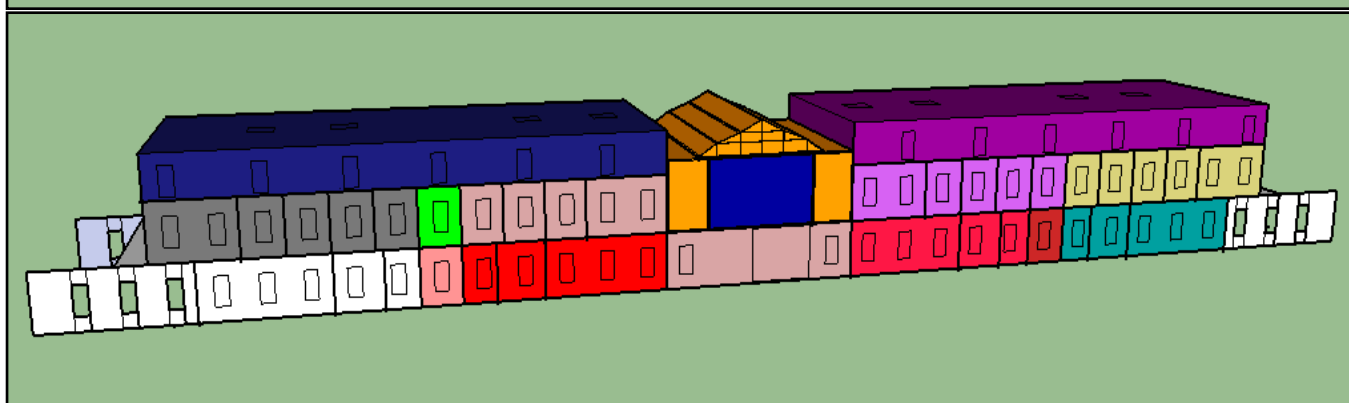
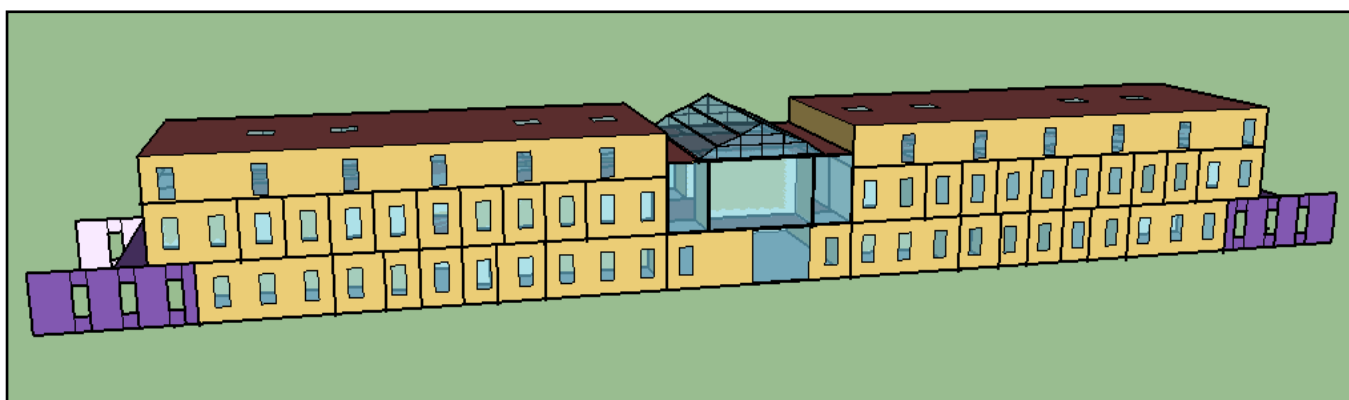
3.3.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η μοντελοποίηση του κτιρίου K1 που μελετάμε έχει γίνει με τη βοήθεια των προγραμμάτων Sketch Up και OpenStudio, ενώ οι υπολογισμοί γίνονται μέσω του προγράμματος Energy Plus. Το κτίριο έχει χωριστεί σε 30 θερμικές ζώνες (thermal zones) για την καλύτερη και ορθότερη προσέγγιση των ενεργειακών απαιτήσεων και καταναλώσεων. Ο διαχωρισμός έχει γίνει βάσει διαφόρων κριτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, τα κριτήρια αυτά είναι κυρίως ο προσανατολισμός του κάθε χώρου στο κτίριο (βορράς, νότος κλπ.), η θέση του (όροφος κλπ.) και η λειτουργία του (εργαστήριο, γραφείο κλπ.). Στο ισόγειο του κτηρίου έχουμε 13 θερμικές ζώνες (ζώνες 1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 18, 19, 20, 21, 22 και 23), στον πρώτο όροφο 14 (ζώνες 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 17, 24, 25, 26, 27, 28 και 29) και στο δεύτερο όροφο 2 (ζώνες 13 και 30), ενώ μια θερμική ζώνη (η ζώνη 16) εκτείνεται από τον πρώτο έως και το δεύτερο όροφο και περιλαμβάνει το θόλο που υπάρχει στο κέντρο του κτιρίου. Οι θερμικές ζώνες διακρίνονται και στο πρόγραμμα Sketch Up (Εικόνες 18 και 19), με διαφορετικό χρώμα η κάθε μία, ενώ στο OpenStudio φαίνονται τα στοιχεία κάθε ζώνης ξεχωριστά.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει τα μετεωρολογικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής, της περιοχής των Χανίων στην περίπτωση μας. Αυτά λαμβάνονται από το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη Σούδα (γεωγρ. πλάτος: 35°52'88'', γεωγρ. μήκος: 24°14'54'', υψόμετρο: 147,64 m) και ανήκει στο δίκτυο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.). Αφορούν το έτος 2005 και είναι σε ωριαία βάση.



Εικόνες 18 (πάνω) & 19 (κάτω) - Κτήριο Κ1 σε περιβάλλον SketchUp με τις θερμικές ζώνες



Σε ό,τι αφορά τα χαρακτηριστικά του κτιρίου, αυτά διακρίνονται σε κατασκευαστικά και λειτουργικά. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά αφορούν τα υλικά και τον τρόπο κατασκευής των διαφόρων δομικών στοιχείων των επιμέρους κατασκευών του κτιρίου (τοίχοι, παράθυρα κλπ.). Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά έχουν να κάνουν με τη χρήση του κάθε χώρου (δηλαδή αν ο χώρος αυτός λειτουργεί ως γραφείο, εργαστήριο κλπ., τότε λειτουργεί, τι εξοπλισμό περιέχει κλπ.). Τα χαρακτηριστικά αυτά (κατασκευαστικά και λειτουργικά) καθορίζουν επί της ουσίας τις ενεργειακές ανάγκες, άρα και τις καταναλώσεις ενέργειας που θα έχουμε κατά τη λειτουργία του κτιρίου, και αποτελούν την υπάρχουσα κατάσταση του κτιρίου.

Για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα τους χώρους που περιλαμβάνει κάθε όροφος. Οι χώροι αυτοί περιλαμβάνουν γραφεία, εργαστήρια, μια αίθουσα συνεδριάσεων, τουαλέτες, διαδρόμους, σκάλες και μηχανολογικούς χώρους. Το ωράριο των εργαστηρίων και των γραφείων (αλλά και των υπόλοιπων χώρων πάνω – κάτω) θεωρείται ότι είναι 8:00 – 20:00 από τη Δευτέρα έως την Παρασκευή, αν και κάποια μπορεί να μην τηρούν επακριβώς αυτό το ωράριο. Τα σαββατοκύριακα και τις αργίες το κτίριο παραμένει κλειστό. Το ανθρώπινο δυναμικό που απασχολείται στο κτίριο αποτελείται από καθηγητές, βοηθούς εργαστηρίων, φοιτητές και επισκέπτες. Η δραστηριότητα των εργαζόμενων θεωρείται ως ελαφριά καθιστική εργασία κυρίως σε υπολογιστή. Η συνολική παραγόμενη θερμότητα που παράγει κάθε άνθρωπος εκτελώντας την παραπάνω δραστηριότητα είναι 120 W (τα αισθητά κέρδη που αποδίδει είναι 75 W και τα λανθάνοντα 45 W). Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός του κτιρίου περιλαμβάνει εξοπλισμό γραφείων με συνολική ισχύ 250 W, εργαστηριακό εξοπλισμό συνολικής ισχύος 250 W και απαγωγούς (στα εργαστήρια) ισχύος 880 W. Ειδικότερα, για τους λαμπτήρες μπορούμε να πούμε ότι έχουν ισχύ 18 W και λειτουργούν συνήθως το πρωί (8:00 – 11:00) και το απόγευμα (16:00 – 20:00), ενώ οι υπολογιστές είναι ισχύος 400 W και θεωρείται ότι είναι ανοιχτοί όλες τις ώρες λειτουργίας των χώρων, με τον αριθμό τους να ποικίλλει ανάλογα με τους εργαζόμενους σε κάθε ζώνη. Το σύστημα θέρμανσης – ψύξης του κτιρίου χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό και αποτελείται από αντλίες θερμότητας τύπου VRV (της εταιρίας Hitachi), εγκατεστημένες στο δεύτερο όροφο. Ο θερμοστάτης έχει οριστεί για τη θέρμανση στους 19 °C και για την ψύξη στους 26 °C.

Όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, μας ενδιαφέρουν μόνο αυτά του εξωτερικού τοίχου του δεύτερου και του πρώτου ορόφου καθώς και τα παράθυρα του πρώτου ορόφου αφού εκεί πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και θα γίνουν οι όποιες αλλαγές. Από το πρόγραμμα Openstudio μπορούμε να δούμε από τι αποτελείται κάθε τμήμα του κτιρίου. Ο εξωτερικός τοίχος του δεύτερου ορόφου αποτελείται από μια τσιμεντοσανίδα, μια στρώση αέρα και δύο φύλλα γυψοσανίδας, όπου το κάθε ένα έχει πάχος 18 χιλιοστά. Το U-Value στην αρχική κατάσταση του κτιρίου είναι $2,846 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Αντίστοιχα ο εξωτερικός τοίχος του πρώτου ορόφου αποτελείται από μια τσιμεντοσανίδα, μια στρώση αέρα, ένα φύλλο γυψοσανίδας με πάχος 18 χιλιοστά, μονωτικό υλικό πάχους 50 χιλιοστών και άλλο ένα φύλλο γυψοσανίδας με πάχος 18 χιλιοστά. Το U-Value στην αρχική κατάσταση του κτιρίου είναι $0,637 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Το παράθυρο αποτελείται από δύο τζάμια με ένα στρώμα αέρα ενδιάμεσα. Το U-Value στην αρχική κατάσταση του κτιρίου είναι $2,725 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (Πίνακας 2).

Πίνακας 2 - Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά εξωτερικού τοίχων και παραθύρων

Τμήμα του κτιρίου	Ονομασία στρώματος	Περιεχόμενα στρώματος (από έξω προς τα μέσα)	Περιγραφή στρώματος	Αρχικό U-Value ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
Εξωτερικός τοίχος 2ου ορόφου	EksoterikosTixos2osOrofos	PROJECT CEMENT BOARD PROJECT Wall air space resistance PROJECT 18mm gypsum board PROJECT 18mm gypsum board	τσιμεντοσανίδα εξωτερικά, κατόπιν αέρας και διπλή γυψοσανίδα	2,846
Εξωτερικοί τοίχοι 1ου ορόφου	EksoterikosTixos1osOrofos	PROJECT CEMENT BOARD PROJECT Wall air space resistance PROJECT 18mm gypsum board PROJECT 50mm insulation board PROJECT 18mm gypsum board	τσιμεντοσανίδα εξωτερικά, κατόπιν αέρας και διπλή γυψοσανίδα με μονωτικό υλικό ενδιάμεσα	0,637
Παράθυρα 1ου ορόφου	Window	PROJECT Clear 3mm 000 Air 13mm PROJECT Clear 3mm	Τζάμι εξωτερικά, αέρας και τζάμι	2,725

Στον πίνακα 3 περιγράφονται αναλυτικά οι τιμές των χαρακτηριστικών του κάθε υλικού για τους εξωτερικούς τοίχους:

Πίνακας 3 - Αρχικά χαρακτηριστικά των υλικών τοίχων

Υλικά	Project cement board	Project Wall air space resistance	Project 18mm gypsum board	Project 50mm insulation board
Τραχύτητα (Roughness)	Rough	—	MediumSmooth	MediumRough
Πάχος (Thickness) (m)	0,03	—	0,018	0,05
Αγωγιμότητα (Conductivity) (W/m*K)	0,35	—	0,42	0,041
Πυκνότητα (Density) (kg/m ³)	1200	—	1150	100
Ειδική θερμότητα (Specific Heat) (J/kg*k)	1000	—	1000	840
Θερμική απορρόφηση (Thermal Absorbance)	0,9	—	0,9	0,9
Ηλιακή απορρόφηση (Solar Absorptance)	0,7	—	0,7	0,7
Οπτική απορρόφηση (Visible Absorptance)	0,7	—	0,7	0,7
Θερμική αντίσταση (Thermal Resistance) (m ² *K/W)	—	0,18	—	—

Στον πίνακα 4 περιγράφονται οι τιμές των χαρακτηριστικών του κάθε υλικού για τα παράθυρα:

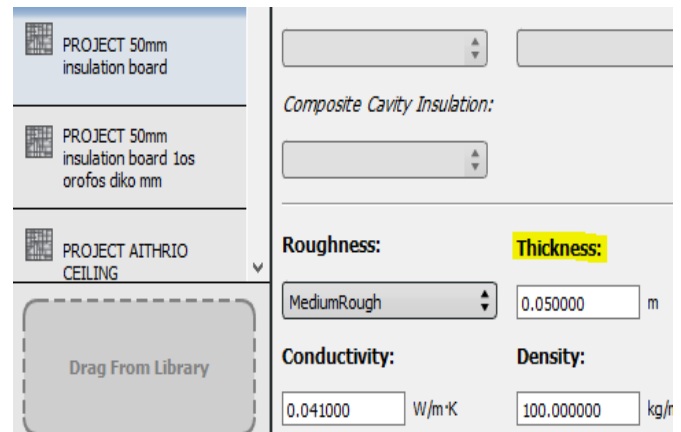
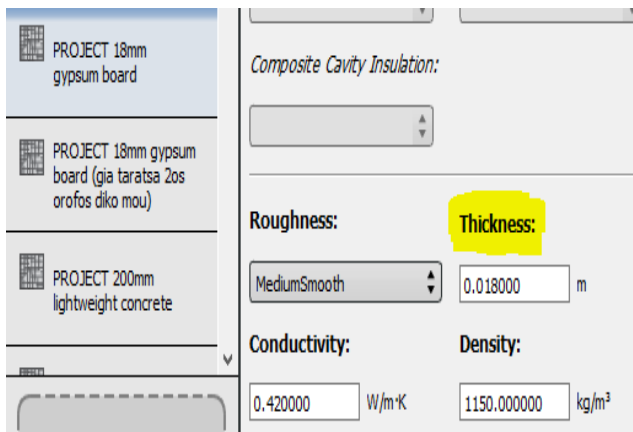
Πίνακας 4 - Αρχικά χαρακτηριστικά των υλικών παραθύρων

Υλικά	Project Clear 3mm	000 Air 13mm
Πάχος (Thickness) (m)	0,003	0,012700
Αγωγιμότητα (Conductivity) (W/m*K)	1,000	—

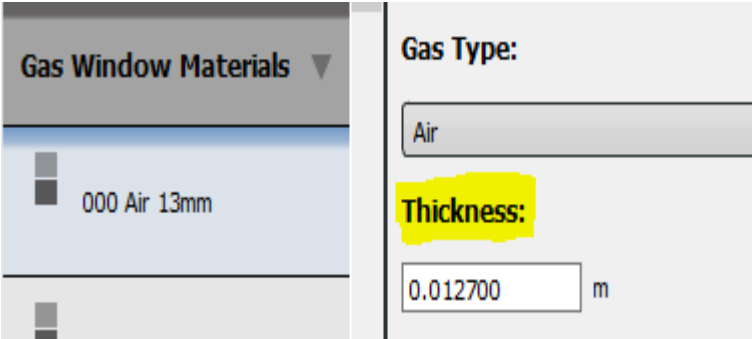
Η διαδικασία της προσομοίωσης γίνεται στο OpenStudio, με τους υπολογισμούς να λαμβάνουν χώρα στο EnergyPlus. Τα βήματά της περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- I. Στο Openstudio, ανοίγουμε το αρχείο που περιέχει μοντελοποιημένο το κτίριο K1 και στην καρτέλα Site μέσω της επιλογής *Change Weather File*, φορτώνουμε το αρχείο καιρού με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Σούδας Χανίων. Το αρχείο του κτιρίου περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία για τα αρχικά κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του.
- II.
 - a) Για τον τοίχο του δεύτερου ορόφου: Μέσα στην καρτέλα *Constructions* και στο παράθυρο *Materials*, βρίσκουμε το υλικό *Project 18mm gypsum board* στο οποίο πρέπει να αλλάξουμε το πάχος του (thickness) (εικόνα 20) για να έχουμε μεταβολή του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-Value).
 - b) Για τον τοίχο του πρώτου ορόφου: Μέσα στην καρτέλα *Constructions* και στο παράθυρο *Materials*, βρίσκουμε το υλικό *Project 50mm Insulation board* στο οποίο πρέπει να αλλάξουμε το πάχος του (thickness) (εικόνα 21) για να έχουμε μεταβολή του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-Value).
 - c) Για τα παράθυρα, μέσα στην καρτέλα *Constructions* και στο παράθυρο *Materials*, βρίσκουμε το υλικό *000 Air 13mm* στο οποίο πρέπει να αλλάξουμε το πάχος του (thickness) (εικόνα 22) για να έχουμε μεταβολή του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-Value).

- III. Στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των υλικών τα οποία περιγράφηκαν στον Πίνακα 2 και 3 δεν κάνουμε καμία αλλαγή.
- IV. Αλλάζουμε λοιπόν το πάχος του εκάστοτε υλικού που εξετάζουμε και τρέχουμε την προσομοίωση (*Run Simulation*). Μετά από μερικά λεπτά λαμβάνουμε τα αποτελέσματα μέσα από την καρτέλα *Results Summary*. Τα αποτελέσματα επιμερίζονται σε *Energypius Results* και *Openstudio Results*. Από τα μεν πρώτα λαμβάνουμε τη νέα τιμή U-Value ενώ από τα δεύτερα τις ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις σε θέρμανση και ψύξη. Οι προσομοιώσεις τελειώνουν όταν έχουμε ίδια τιμή U-Value με αυτές που προέκυψαν στις μετρήσεις, οι οποίες θα παρουσιαστούν στα αποτελέσματα.



Εικόνα 20 - Αλλαγή πάχους υλικού για 2ο όροφο - Openstudio Εικόνα 21 - Αλλαγή πάχους υλικού για 1ο όροφο - Openstudio



Εικόνα 22 - Αλλαγή πάχους υλικού για παράθυρα - Openstudio

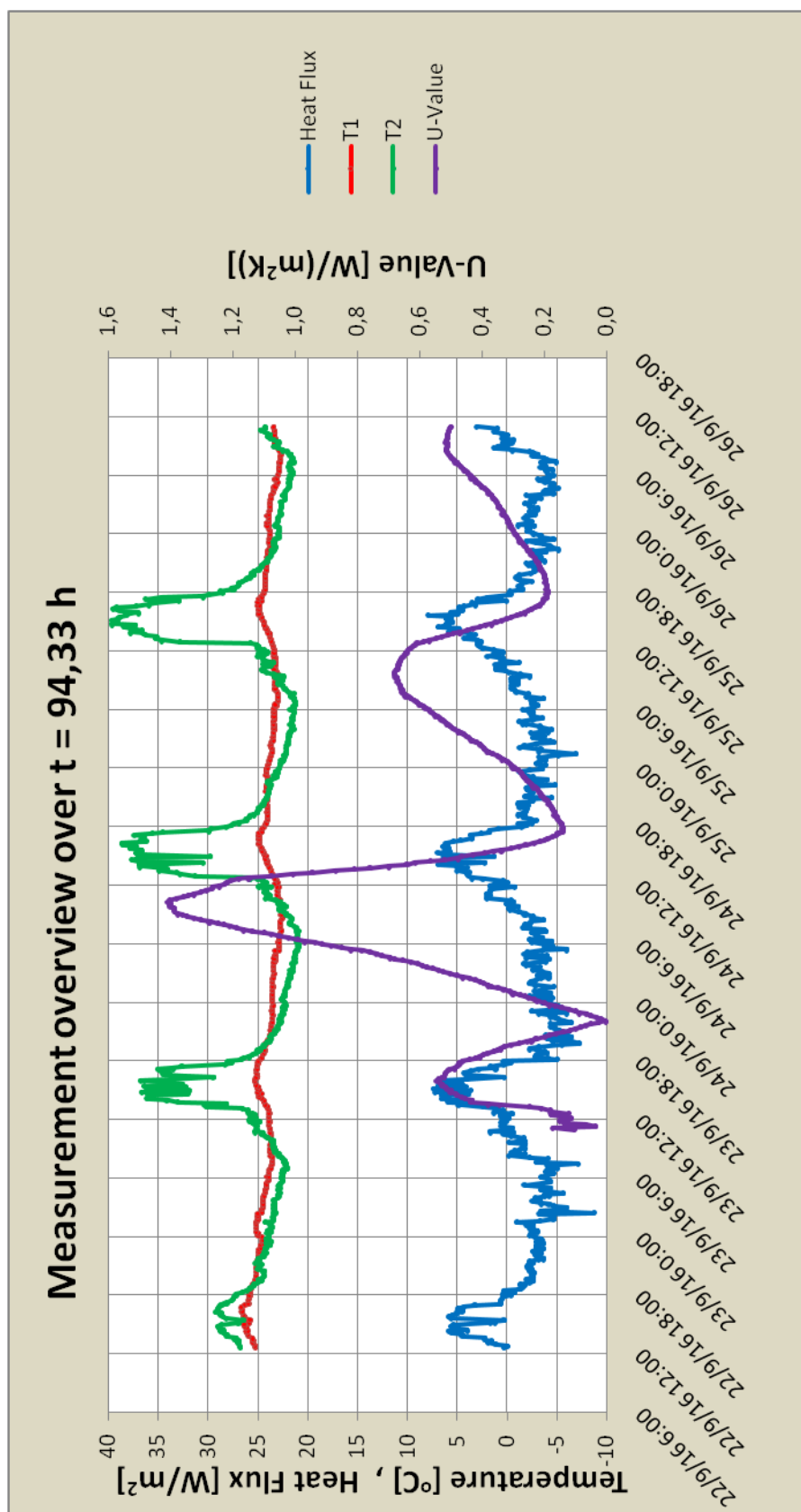
3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.4.1. Αποτελέσματα μετρήσεων

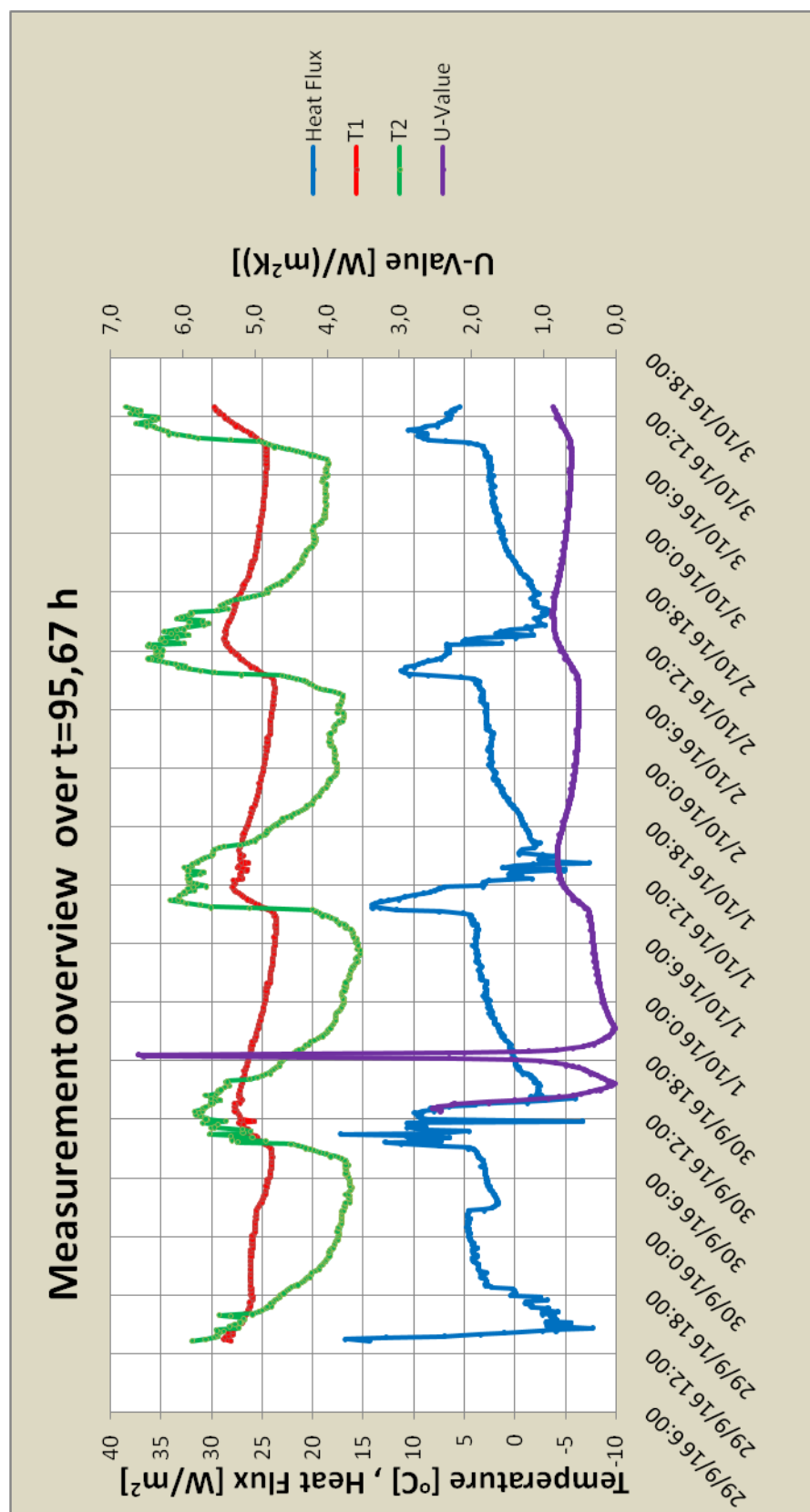
Αφού λάβουμε τα αποτελέσματα που μας δίνει το U-value kit (πίνακας 5), τα επεξεργαζόμαστε με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel και κατασκευάζουμε τη γραφική παράσταση για κάθε μέτρηση. Κάθε διάγραμμα περιέχει τη διακύμανση των παραμέτρων ροή θερμότητας (Heat Flux), συντελεστής θερμοπερατότητας (U-Value), εσωτερική θερμοκρασία (T1) και εξωτερική θερμοκρασία (T2) καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης.

Πίνακας 5 - Αποτελέσματα μετρήσεων οργάνου

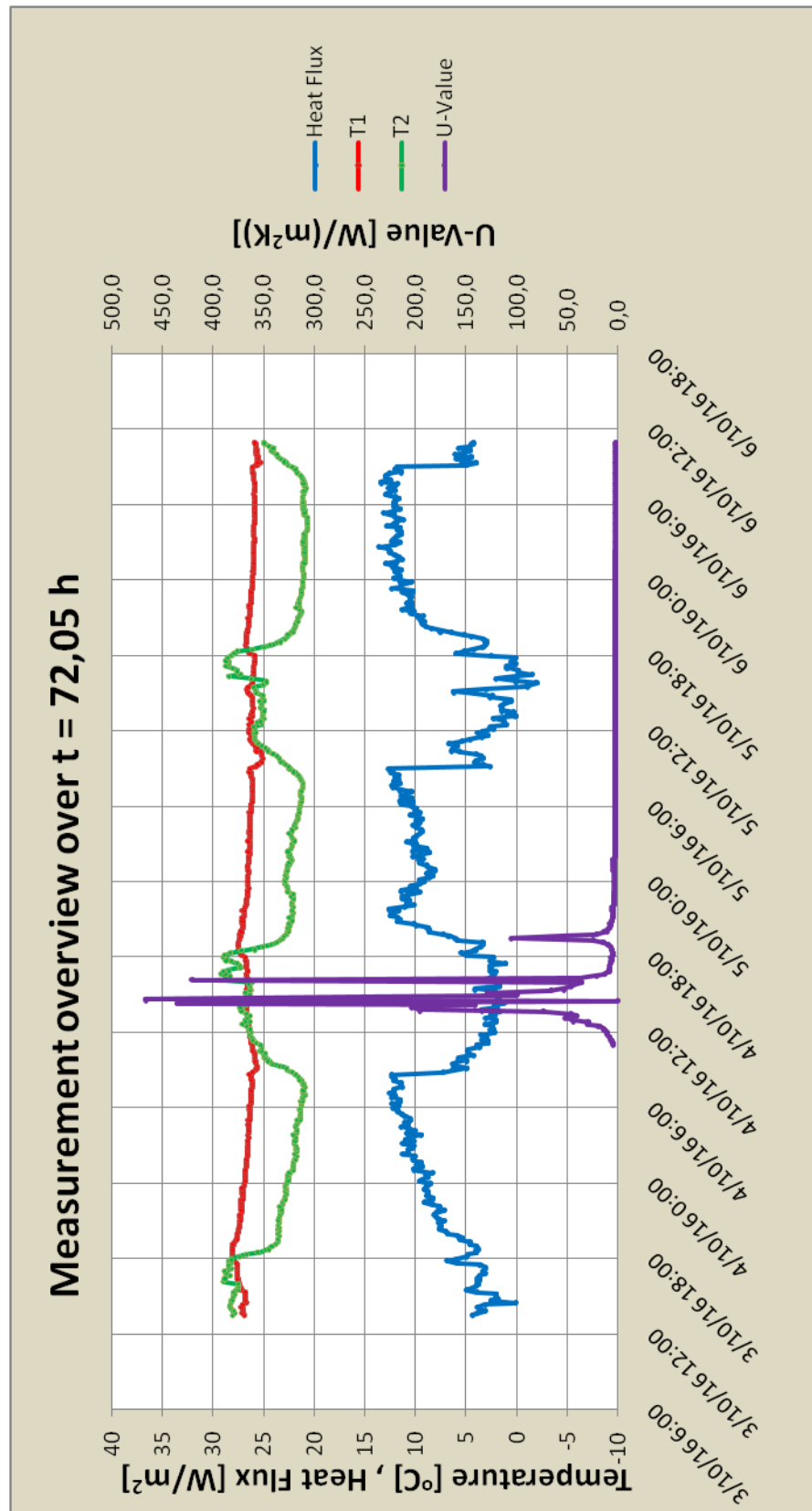
A/A	Επιφάνεια	Heat Flux (W/m ²)	T1 (°C)	T2 (°C)	U-Value (W/m ² K)
1	Τοίχος (2ος όροφος)	-1,1	24,0	25,4	0,50
2	Τοίχος εργαστηρίου (1ος όροφος)	2,5	25,8	22,7	0,87
3	Τοίχος K2109 (1ος όροφος)	7,4	26,5	23,6	2,61
4	Τοίχος K2A8 (1ος όροφος)	-2,9	24,8	20,1	0,62
5	Τζάμι εργαστηρίου (1ος όροφος)	11,6	17,5	15,0	4,74
6	Τζάμι K2108 (1ος όροφος)	12,6	14,2	10,9	3,87
7	Τζάμι K2A8 (1ος όροφος)	4,16	24,4	23,4	4,16



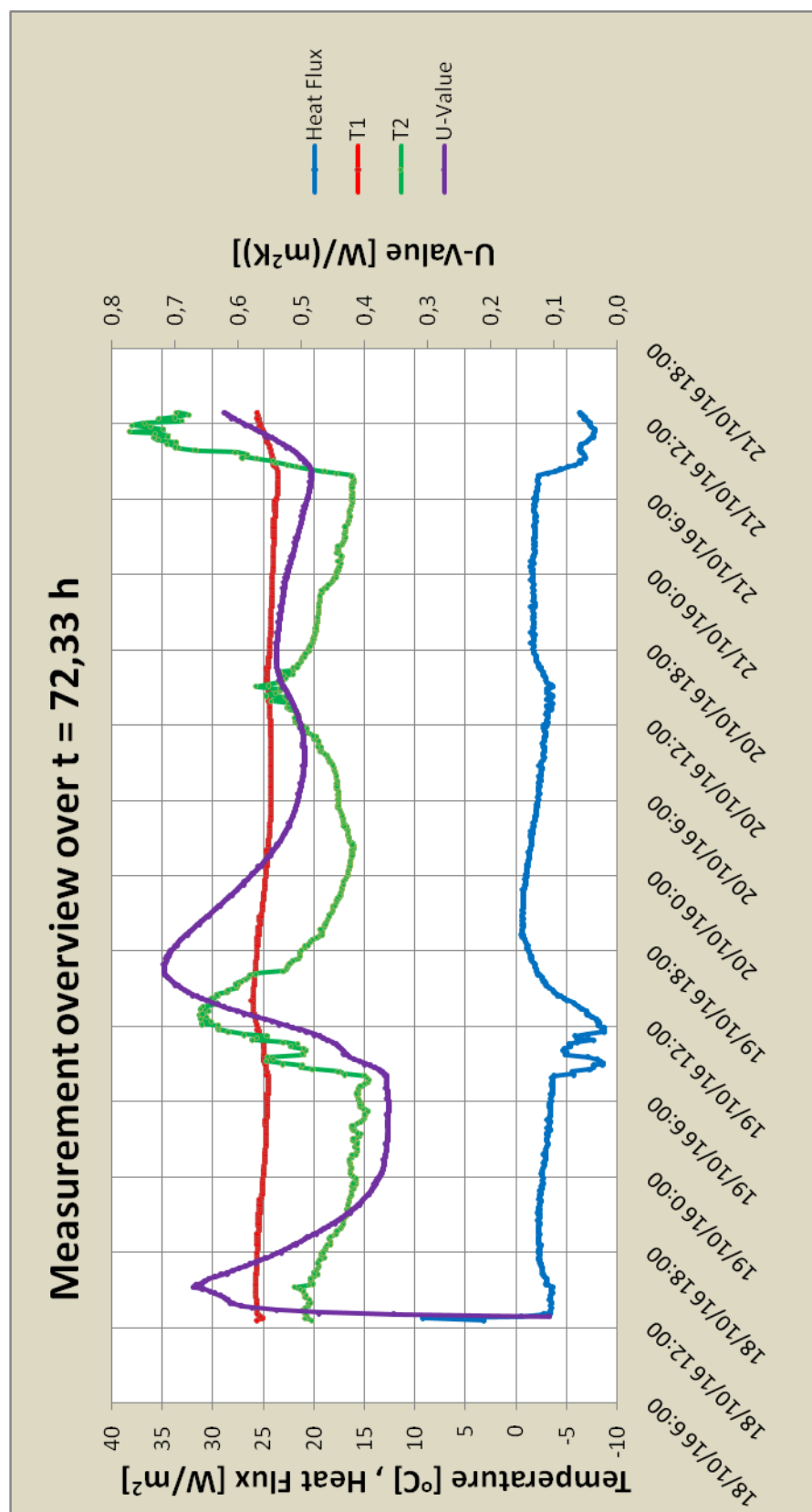
Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο δευτέρου ορόφου



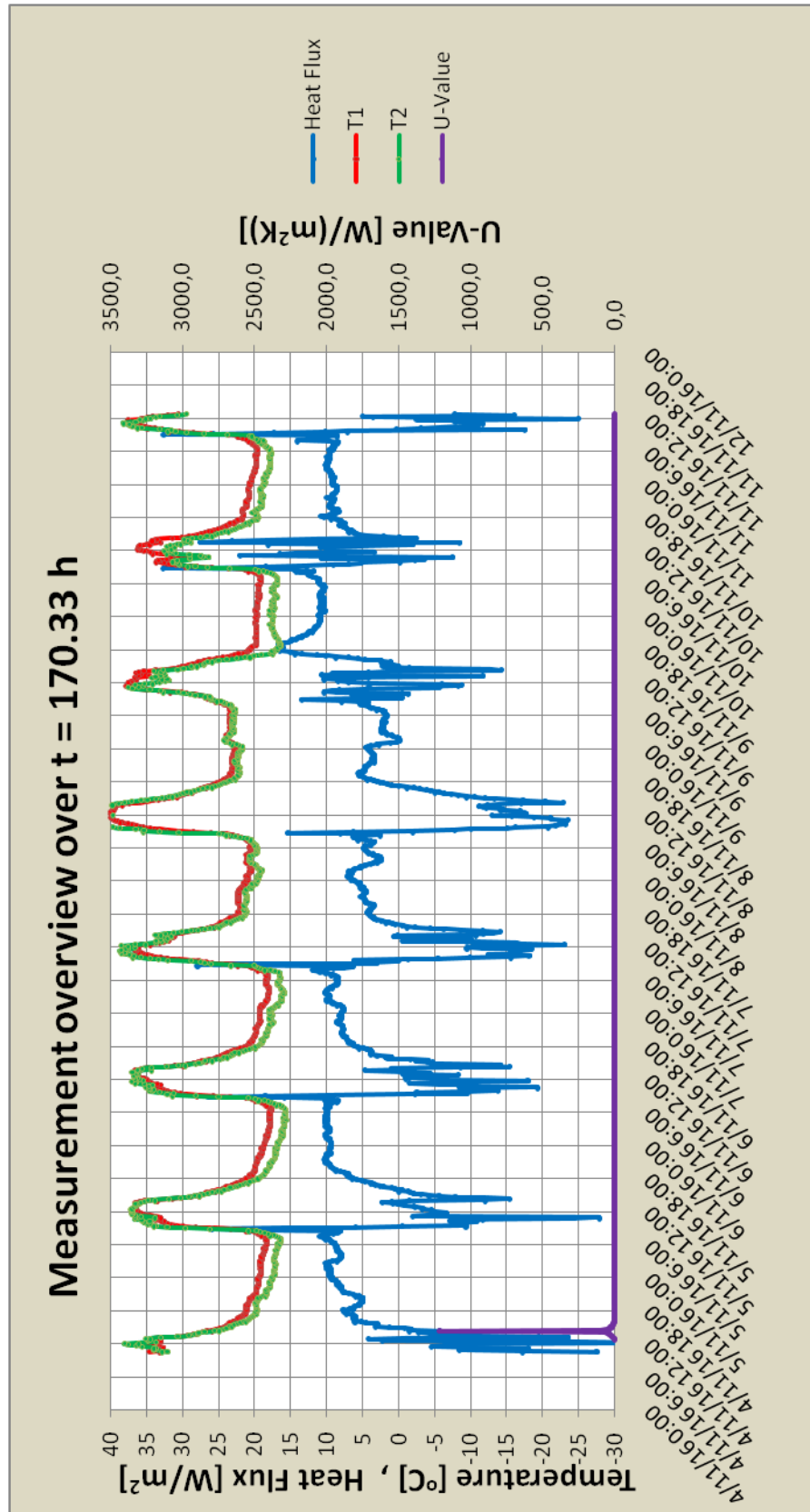
Διάγραμμα 2: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο εργαστηρίου



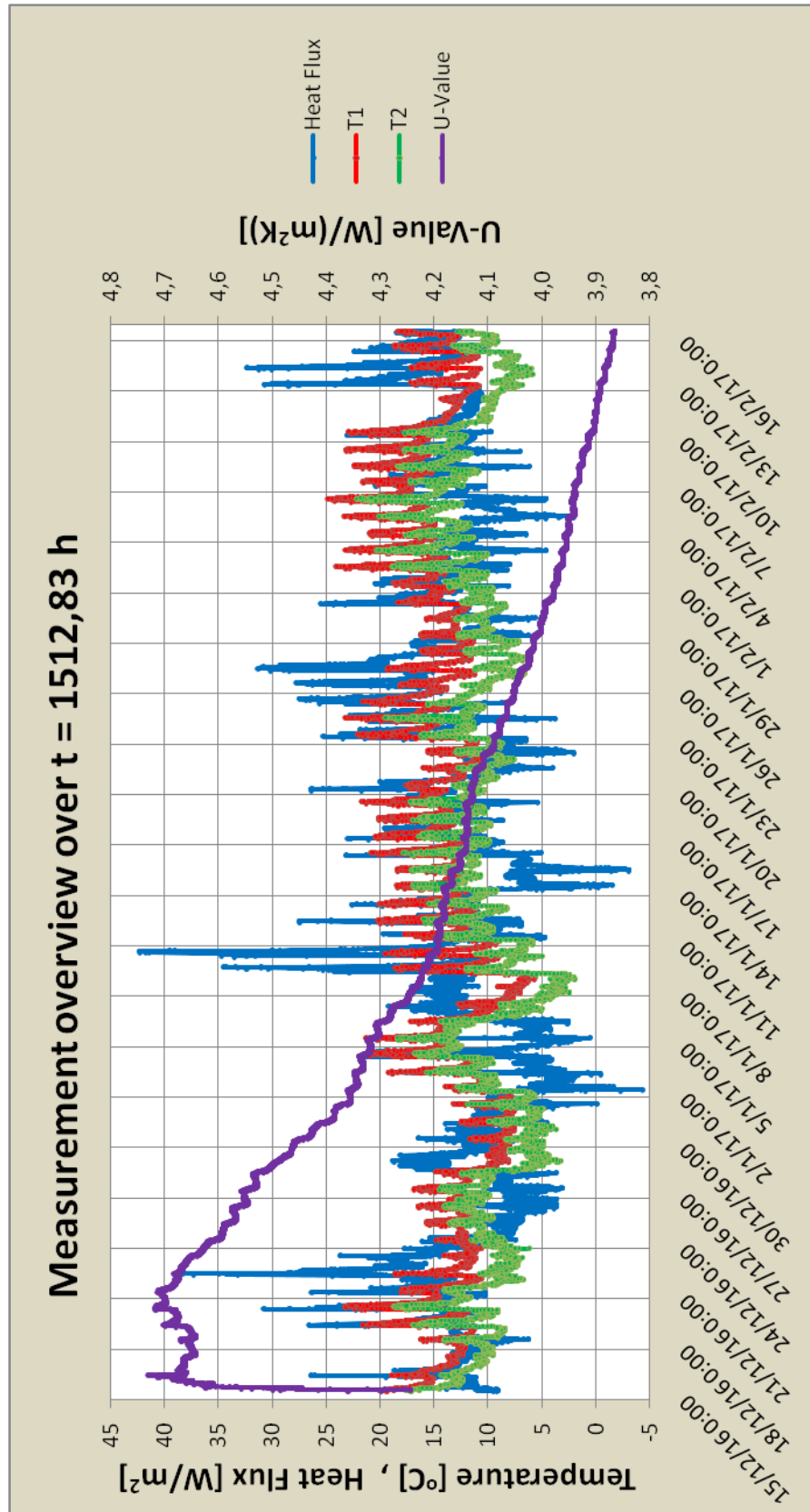
Διάγραμμα 3: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο γραφείου K2109



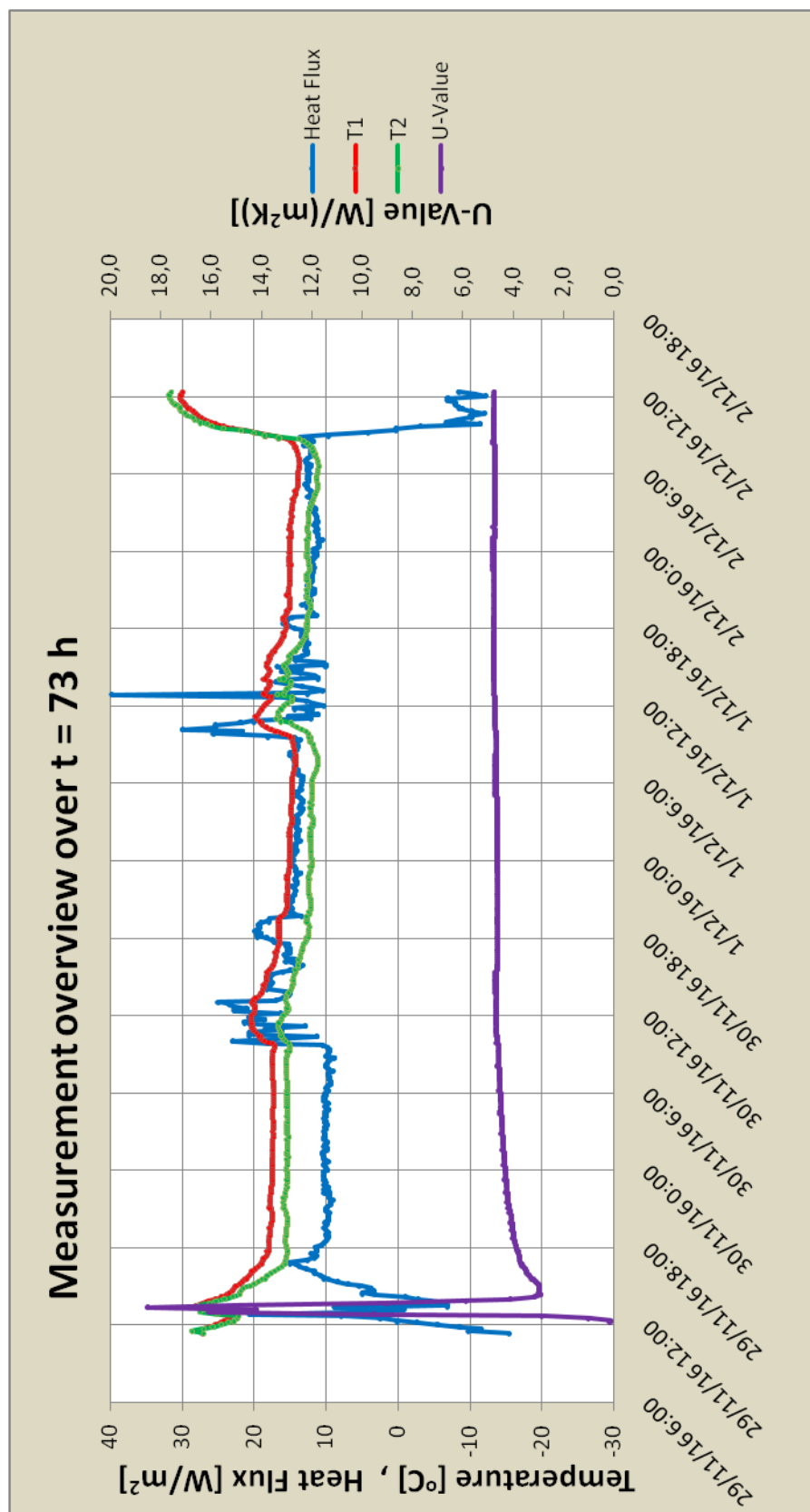
Διάγραμμα 4: Αποτελέσματα μέτρησης για τον τοίχο γραφείου K2A8



Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα μέτρησης για το τζάμι εργαστηρίου



Διάγραμμα 6: Αποτελέσματα μέτρησης για το τζάμι γραφείου K2108



Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα μέτρησης για το τζάμι γραφείου Κ2Α8

Στο πρώτο γράφημα, για τον τοίχο του δεύτερου ορόφου παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά στην εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία στην αρχή της μέτρησης. Οι τιμές του U-Value τείνουν να αυξάνονται τις νυχτερινές από τις 12 τα μεσάνυχτα έως το 12 το μεσημέρι.

Στο δεύτερο γράφημα, για τον τοίχο του εργαστηρίου παρατηρούμε ότι υπάρχει οριακή θερμοκρασιακή διαφορά 5°C στις θερμοκρασίες στην αρχή της μέτρησης. Τις πρώτες ώρες δεν υπάρχει σαφής ένδειξη για το U-Value αλλά στη συνέχεια παρουσιάζει ανοδική πορεία.

Στο τρίτο γράφημα, για τον τοίχο γραφείου K2109 και πάλι δεν υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά στους αισθητήρες θερμοκρασίες. Επιπλέον το U-Value παρουσιάζει μια μη ομαλή διακύμανση στην αρχή και μετά σταθεροποιείται.

Στο τέταρτο γράφημα, στο τοίχο γραφείου K2A8 υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά 5°C το οποίο ευνοεί μια καλή μέτρηση. Το U-Value έχει μεγάλη διακύμανση τις δύο πρώτες μέρες ενώ στη συνέχεια έχουμε μια σχετική σταθεροποίηση.

Στο πέμπτο γράφημα οι θερμοκρασίες παρουσιάζουν πανομοιότυπη μεταβολή, ενώ δεν μπορούμε να βγάλουμε σαφές συμπέρασμα για τη μεταβολή του συντελεστή θερμοπερατότητας.

Στο έκτο γράφημα, στο τζάμι γραφείου K2108 όπου η μέτρηση είχε πολύ μεγάλη διάρκεια παρατηρούμε μια σταδιακή μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας.

Τέλος, στο γράφημα του γραφείου K2A8 η θερμοκρασιακή διαφορά T1 και T2 είναι πολύ μικρή ενώ το U-Value παρουσιάζει μια σταθερή πορεία κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

3.4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η προσομοίωση, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, έχει ως στόχο την εύρεση των νέων ενεργειακών καταναλώσεων σε θέρμανση και ψύξη μετά την αλλαγή του συντελεστή θερμοπερατότητας. Για να γίνει αυτό πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο πάχος του υλικού, το οποίο θα δώσει στα αποτελέσματα τον επιθυμητό συντελεστή θερμοπερατότητας βάσει των μετρήσεων που κάναμε. Ειδικότερα, οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν για τον εξωτερικό τοίχο του δεύτερου ορόφου αφορούν το υλικό *PROJECT 18mm gypsum board*, για τον εξωτερικό τοίχο του πρώτου ορόφου αφορούν το υλικό *PROJECT 50mm insulation board* ενώ για τα παράθυρα του πρώτου ορόφου αφορούν το υλικό *000 Air 13mm*. Μετά από αρκετές δοκιμές καταλήξαμε στον επιθυμητό συντελεστή θερμοπερατότητας (Πίνακας 6) και καταγράφηκαν οι ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις σε θέρμανση (Heating) και ψύξη (Cooling). Οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου στην αρχική του κατάσταση είναι για θέρμανση 190503 KWh ή 93 KWh/m² ενώ για ψύξη 334670 KWh ή 165 KWh/m².

Πίνακας 6 - Αποτελέσματα προσομοίωσης για θέρμανση και ψύξη

Επιφάνεια	Αρχικό U-Value (W/m ² K)	U-value (W/m ² K)	Πάχος (m)	Θέρμανση (kWh)	Θέρμανση (kWh/m ²)	Ψύξη (kWh)	Ψύξη (kWh/m ²)
Τοίχος (2ος όροφος)	2,846	0,50	0,36	150325	74	291936	143
Τοίχος εργαστηρίου (1ος όροφος)	0,637	0,87	0,032	192033	94	335447	165
Τοίχος K2109 (1ος όροφος)	0,637	2,61	0,0013	199914	98	340128	167
Τοίχος K2A8 (1ος όροφος)	0,637	0,62	0,053	190317	94	334578	164
Τζάμι εργαστηρίου (1ος όροφος)	2,725	4,16	0,002	201853	99	321557	158
Τζάμι K2108 (1ος όροφος)	2,725	3,87	0,0027	199825	98	323814	159
Τζάμι K2A8 (1ος όροφος)	2,725	4,74	0,001	205964	101	317106	156

Στη συνέχεια έχοντας τις νέες τιμές σε θέρμανση και ψύξη υπολογίστηκε το ποσοστό μεταβολής τους σε σύγκριση με το αρχικό-μοντελοποιημένο κτίριο (πίνακας 7).

Πίνακας 7: Ποσοστά μεταβολής θέρμανσης και ψύξης

A/A	Επιφάνεια	Δ Heating (%)	Δ Cooling (%)
1	Τοίχος (2ος όροφος)	-21,1	-12,8
2	Τοίχος εργαστηρίου (1ος όροφος)	0,8	0,2
3	Τοίχος K2109 (1ος όροφος)	4,9	1,6
4	Τοίχος K2A8 (1ος όροφος)	-0,1	-0,1
5	Τζάμι εργαστηρίου (1ος όροφος)	5,9	-3,9
6	Τζάμι K2108 (1ος όροφος)	4,9	-3,2
7	Τζάμι K2A8 (1ος όροφος)	8,1	-5,2

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των τοίχων που μετρήσαμε προσεγγίζει κατά πολύ τις τιμές της προσομοίωσης. Εξαιρέση αποτελεί η μέτρηση στο γραφείο K2109, που όμως, όπως έχουμε αναφέρει έγινε σε κολόνα συνεπώς δικαιολογείται η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας αφού στις κολόνες υπάρχουν θερμικές απώλειες. Αντίθετα, στα τζάμια σε όλες τις μετρήσεις οι πειραματικές μετρήσεις έχουν μεγαλύτερη τιμή. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέτρηση στο τζάμι του γραφείου K2108 η οποία και κράτησε δύο μήνες. Συγκρίνοντάς την με τις μετρήσεις των άλλων τζαμιών ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι πιο χαμηλός.

Παρατηρούμε επίσης ότι όσο μειώνεται το πάχος του υλικού αυξάνεται η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας ενώ αντίθετα όσο αυξάνεται το πάχος του μειώνεται η τιμή του.

Εξετάζοντας τις ενεργειακές καταναλώσεις διαπιστώνουμε ότι στον εξωτερικό τοίχο του δεύτερου ορόφου και στον εξωτερικό τοίχο του γραφείου K2A8 η απαίτηση για θέρμανση και ψύξη μειώθηκε. Αυτό οφείλεται στο ότι μειώθηκε το U-Value σε σχέση με το αρχικό, συνεπώς, βελτιώθηκε η ποιότητα μόνωσης. Αντίθετα στο τοίχο του εργαστηρίου και του γραφείου K2109 είχαμε αύξηση του U-Value σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη αύξηση των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη το οποίο είναι φυσιολογικό αφού η ποιότητα μόνωσης έχει χειροτερέψει. Όσον αφορά τα τζάμια τα πράγματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα. Ειδικότερα, ενώ παρατηρούμε ότι σε όλες τις μετρήσεις το U-Value είναι μεγαλύτερο από το αρχικό, οι ενεργειακές καταναλώσεις παρουσιάζουν αντίθετες μεταβολές. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ανάγκη για θέρμανση έχει αυξηθεί το οποίο είναι αναμενόμενο αφού η ποιότητα μόνωσης είναι χειρότερη. Θα περιμέναμε αντίστοιχη αύξηση στη μεταβολή της ψύξης κάτι όμως που δεν συμβαίνει, αφού σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπάρχει μείωση της ανάγκης για ψύξη.

3.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Όπως κάθε πειραματική μέτρηση υπόκειται σε πειραματικά σφάλματα έτσι και στην παρούσα εργασία υπάρχουν σφάλματα τα οποία όμως δεν επηρεάζουν, σε βαθμό τέτοιο, που να απαιτούν κάποια ιδιαίτερα μέτρα. Συγκεκριμένα, κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων σε κάποια σημεία δεν ήταν δυνατή θερμοκρασιακή διαφορά 5°C στους αισθητήρες θερμοκρασίας. Επιπλέον παρόλο που λήφθηκαν μέτρα για την προστασία των οργάνων, από την ηλιακή ακτινοβολία και την βροχή, όταν απαιτούνται τουλάχιστον 72 ώρες μέτρησης δεν μπορεί να υπάρχει 100% βεβαιότητα για το αποτέλεσμα όσο καλή προστασία κι αν υπάρχει. Τέλος η ακρίβεια των οργάνων και η ακρίβεια των υπολογισμών ίσως έχουν επηρεάσει αλλά σε πολύ μικρό βαθμό τα αποτελέσματα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η μέθοδος ροής θερμότητας αποτελεί μια πολύ χρήσιμη τεχνική για τον υπολογισμό των συντελεστών θερμοπερατότητας ενός δομικού στοιχείου. Σίγουρα όμως παρουσιάζει και κάποιες αδυναμίες ως μέθοδος. Το γεγονός ότι οι πειραματικές μετρήσεις απαιτούν τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα αποδεικνύει την εξαιρετική δυσκολία σωστής μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας, αλλά και τη συνολική δυσκολία του πειράματος. Αυτό είναι εμφανές και στα αποτελέσματα, όπου, αν και για τους τοίχους οι τιμές του U-value προσεγγίζουν κάπως τις τιμές της προσομοίωσης, στα παράθυρα οι σχετικές τιμές απέχουν κατά πολύ. Δυστυχώς, η δυσκολία αυτή έχει αντίκτυπο και στην εξαγωγή συμπερασμάτων, η οποία δεν υποβοηθείται από το γενικότερο πλαίσιο των μετρήσεων και της πειραματικής διαδικασίας.

Στην πλειοψηφία των μετρήσεων, η επιθυμητή αρχική θερμοκρασιακή διαφορά των 5 βαθμών Κελσίου δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί, κάτι που οφείλεται στις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν την περίοδο των πειραματικών μας μετρήσεων. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι, αφού ο κατασκευαστής του οργάνου προτείνει αυτή τη διαφορά, η οποία δεν έχει επιτευχθεί σε όλες τις μετρήσεις μας, αυτό πιθανότατα είναι κάτι που επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματα της έρευνας.

Σημαντικό ρόλο στη σωστή εκτίμηση του συντελεστή θερμοπερατότητας παίζει η μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου. Οι μετεωρολογικές συνθήκες, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζουν την τιμή των μετρούμενων επιφανειακών θερμοκρασιών (τόσο των εσωτερικών, όσο και των εξωτερικών), κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο και στον προσδιορισμό του ζητούμενου συντελεστή θερμοπερατότητας, αφού αυτός εξαρτάται άμεσα από τις θερμοκρασίες.

Το πάχος του υλικού είναι καθοριστικό στη μεταβολή του συντελεστή θερμοπερατότητας, αφού, όπως προέκυψε και από την επεξεργασία των μετρήσεων στο Openstudio, όσο μειώνεται το πάχος του εκάστοτε υλικού αυξάνεται η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας και το αντίστροφο. Συνεπώς, θα μπορούσε να θεωρήσει κανείς ότι αυξάνοντας το πάχος του υλικού θα πετύχουμε τον επιθυμητό συντελεστή. Αυτό πρακτικά ισχύει σε πολύ μικρό βαθμό όμως, αφού αν γίνει μεγάλη αύξηση προκύπτουν λειτουργικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα αύξηση του όγκου του μελετώμενου δομικού στοιχείου.

Ο μέγιστος συντελεστής θερμοπερατότητας, σύμφωνα με τον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης κτιρίων (ΚΕΝΑΚ) και το άρθρο 8 (Ελάχιστες προδιαγραφές), για εξωτερικό τοίχο στην Α΄ Κλιματική Ζώνη (στην οποία περιέχεται η περιοχή μελέτης μας) είναι $0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$, ενώ για τα παράθυρα $3,20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Οι μετρήσεις μας, εκτός από τον εξωτερικό τοίχο του δεύτερου ορόφου και του γραφείου K2A8, ξεπερνούν τα όρια. Από το γεγονός αυτό, διαπιστώνουμε ότι κατά πάσα πιθανότητα υπάρχει φθορά της θερμομόνωσης του κτιρίου (σημαντική σε κάποιες περιπτώσεις), η οποία προφανώς οφείλεται στην έκθεση του κτιρίου επί χρόνια στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι η χρονική διάρκεια της εκάστοτε πειραματικής μέτρησης επηρεάζει και αυτή σε ένα βαθμό το αποτέλεσμα. Αυτό προκύπτει κυρίως από τη μέτρηση που έγινε για το παράθυρο του γραφείου K2.108. Αυτή η μέτρηση, σε αντίθεση με όλες τις υπόλοιπες που διήρκεσαν λίγο παραπάνω από 3 ημέρες, είχε συνολική διάρκεια 62 ημερών, κάτι που έγινε επειδή οι αρχικές μετρήσεις για τον υπολογισμό του U-value στα παράθυρα δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι, αποφασίστηκε η παράταση της μέτρησης σε ένα από αυτά, ώστε να δούμε αν θα υπάρξει βελτίωσή τους, κάτι που έγινε (έως ενός σημείου βέβαια), αφού τα αποτελέσματά μας για αυτό το παράθυρο ήταν αρκετά πλησιέστερα στα επιθυμητά.

5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή μελλοντικών ερευνών πάνω στο ίδιο θέμα. Συγκεκριμένα μπορεί να μετρηθεί ο συντελεστής θερμοπερατότητας και σε άλλους τοίχους του κτιρίου. Η διαφορετική δομή και οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται κάθε τοίχος οδηγεί σε διαφορετική τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας καθώς οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων δεν επιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε κάθε τοίχο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για περαιτέρω εξέταση παρουσιάζουν τα τζάμια αφού τα αποτελέσματα που είχαμε στη διαφορά θέρμανσης και ψύξης με το αρχικό κτίριο δεν ήταν τα αναμενόμενα. Συνεπώς καλό θα ήταν να γίνουν νέες μετρήσεις, ίσως και με κάποιο άλλο όργανο μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας ή με κάποια άλλη από τις υπάρχουσες μεθόδους. Βέβαια δεν πρέπει να αποκλειστεί η πιθανότητα να έχει γίνει κάποιο λάθος κατά τη μοντελοποίηση του κτιρίου. Επίσης μπορούν να γίνουν ταυτόχρονες μετρήσεις σε σημεία του κτιρίου με πολλούς αισθητήρες ροής θερμότητας για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέλος, προτείνεται να γίνουν μετρήσεις σε άλλη εποχή του χρόνου έτσι ώστε να γίνουν συγκρίσεις στα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

Άρθρα - Δημοσιεύσεις

Aste, N., Angelotti, A., Buzzetti, M., 2009. *The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated building*. Energy and Buildings 41 1181-1187

Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., Alfano, F., Dell' Isola, M., 2015. *U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings*. Energy and Buildings 104, 108-121

Gasper, K., Casals, M., Gangolells, M., 2016. *A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value*. Energy and Buildings 130 592-599

Guattari, C., Evangelisti, L., Gori, P., Asdrubali, F., 2017 *Influence of internal heat sources on thermal resistance evaluation through the heat flow meter method*. Energy and Buildings 135 187-200

Li, Y., Rezgui, Y., 2017. *A novel concept to measure envelope thermal transmittance and air infiltration using a combined simulation and experimental approach*. Energy and Buildings 140, 380-387

Meng, X., Yan, B., Gao, Y., Wang, J., Zhang, W., Long, E., 2015 *Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method*. Energy and buildings 86 754-765

Scarpa, M., Ruggeri, P., Peron, F., Celebrin, M., De Bei, M., 2017. *New Measurement Procedure for U-value Assessment via Heat Flow Meter*. Energy Procedia 113, 174-181

Tejedor, B., Casals, M., Gangolells, M., Roca, X., 2017. *Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades*. Energy and Buildings 151, 187-197

Τζίφα, Β., Πειραματικός προσδιορισμός και αβεβαιότητα μέτρησης του συντελεστή θερμοπερατότητας τοίχου με χρήση θερμοκάμερας, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011

Διαδίκτυο

http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/greenTEG-White-Paper_U-value-measurement_HFM-vs-TBM.pdf

https://www.greenteg.com/Heat_Flux_Sensor/

<https://www.greenteg.com/u-value-measurement/>

http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/ETH-Z%C3%BCrich_ARCH_ApplicationNote_gSKIN_ISO-conform-measurement-case.pdf

http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/gSKIN_Applicationnote_Buildingphysics_v2.8.pdf

<http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/gSKIN-U-Value-KIT-Overview.pdf>

https://www.greenteg.com/template/userfiles/files/gSKIN_Application-Note_U-Value_CaseStudy_1.7.pdf

<http://u-value.greenteg.com/wp-content/uploads/2015/10/Measurement-vs.-Calculation.pdf>

<https://www.bre.co.uk/filelibrary/In-situ-measurement-of-thermal-resistance-and-thermal-transmittance-FINAL.pdf>

<https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-a-u-value-heat-loss-thermal-mass-and-online-calculators-explained>

http://www.psem.gr/public/images/pdf/parousiasi_thermografias.pdf

https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_transmittance

http://library.tee.gr/digital/kma/kma_m1429/kma_m1429_axarli_basic.pdf

<https://pdfs.semanticscholar.org/bddf/f4668a99cb950e72ba632ec64820182d42de.pdf>

<http://www.self-build.co.uk/what-are-u-values>

<https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/U-values>

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/547/1/012016/pdf>

<https://www.thegreenage.co.uk/article/thermal-conductivity-r-values-and-u-values-simplified/>

https://www.exeley.com/exeley/journals/j_sustainable_architecture_civil_engineering/16/3/pdf/10.5755_j01.sace.16.3.15442.pdf

[http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/0/5CD5AD9C18E8A18AC22575AD002CC9BF/\\$file/%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%B1%CF%83%CE%B7%20%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3_%20%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%20%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CF%80%CE%B5%CF%81%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BF%CF%87_2015.pdf](http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/0/5CD5AD9C18E8A18AC22575AD002CC9BF/$file/%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%B1%CF%83%CE%B7%20%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3_%20%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%20%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CF%80%CE%B5%CF%81%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BF%CF%87_2015.pdf)

<https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/GT8E116/%CE%98%CE%95%CE%A1%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%95%CE%A3%20%CE%94%CE%9F%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%99%CE%B4%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B5%CF%82%20-%20%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1.pdf>

http://library.tee.gr/digital/m2414/m2414_androutsopoulos.pdf

[http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/A651CCEAD394C4F9C2257377002198A4/\\$file/P\\$%20odigos%20thermomonosisis%20ktirion_Oct2007.pdf](http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/A651CCEAD394C4F9C2257377002198A4/$file/P$%20odigos%20thermomonosisis%20ktirion_Oct2007.pdf)