ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ
& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

ΑΤΣΟΝΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΜΑΡΙΑ ΦΟΥΝΤΗ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τη σημερινή εποχή, η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια είναι επιτακτική ανάγκη προσφέροντας οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Ο κυριότερος τρόπος βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους ενός κτιρίου είναι η τοποθέτηση θερμομόνωσης στην τοιχοποιία, ενώ σημαντικό ρόλο στη θερμική της συμπεριφορά παίζει η θερμοχωρητικότητα. Η παρούσα εργασία αποτελείται από τρεις ενότητες. Η πρώτη ενότητα αποτελεί μία βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους παράγοντες που βελτιώνουν την εξοικονόμηση ενέργειας στο κτιριακό κέλυφος. Στη δεύτερη, αναλύεται η θεωρητική και πειραματική προσέγγιση στη μελέτη του συντελεστή θερμοπερατότητας κτηριακών κελυφών. Το τρίτο μέρος εξετάζει το ρόλο της θερμικής μάζας του κελύφους στην συνολική θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση εστιάζει κυρίως στο βασικότερο παράγοντα της ενεργειακής βελτίωσης μιας τοιχοποιίας που είναι η αύξηση της θερμομονωτικής ικανότητας της τοιχοποιίας μέσω διαφόρων θερμομονωτικών υλικών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η θέση τοποθέτησής τους στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Ένας δεύτερος παράγοντας είναι η θερμοχωρητικότητα του κελύφους, με την οποία μειώνονται οι διακυμάνσεις των εσωτερικών θερμοκρασιών και παρατείνονται οι μέγιστες θερμοκρασίες. Με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιριακών κελυφών, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει δύο οδηγίες τα βασικά σημεία των οποίων εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται εκτενής μελέτη του θεωρητικού και πειραματικού προσδιορισμού της θερμομονωτικής ικανότητας ενός κελύφους μέσω του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, U-value. Ο συντελεστής U-value προσδιορίζεται θεωρητικά από το πρότυπο ISO 6946 και πειραματικά από τα πρότυπα ISO 9869 και ASTM C 1155. Για τον πειραματικό προσδιορισμό απαιτούνται επιτόπιες μετρήσεις επιφανειακής εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας του κελύφους και της ροής θερμότητας που το διαπερνά. Η επιλογή του κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού και των αισθητήρων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της πειραματικής διαδικασίας.

Στην παρούσα διπλωματική έγιναν μετρήσεις με διάφορους εξοπλισμούς με στόχο την αξιολόγησή τους. Οι μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για στον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή U-value, σύμφωνα με τα παραπάνω πρότυπα, είναι η Μέθοδος Μέσης Τιμής, η Αθροιστική Τεχνική, η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων και η Δυναμική Μέθοδος. Κάθε μια από αυτές απαιτεί την ικανοποίηση συγκεκριμένων συνθηκών και ορίζει τα δικά τους κριτήρια σύγκλισης. Οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της θερμοπερατότητας του κελύφους χρησιμοποιούν είτε τους μέσους όρους των μετρήσεων επιφανειακής θερμοκρασιακής διαφοράς και θερμοροής, είτε επιλύουν τη διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή βάζοντας ως οριακές συνθήκες τις μετρήσεις της εσωτερικής και εξωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και συγκρίνοντας τις θεωρητικές τιμές ροής θερμότητας με τις πειραματικές προσδιορίζουν του συντελεστή. Για την παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάστηκαν

υπολογιστικοί κώδικές στο λογισμικό MATLAB με σκοπό την επεξεργασία των μετρήσεων σύμφωνα με κάθε μεθοδολογία.

Οι τοιχοποιίες που μελετήθηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή U-value, είναι η τοιχοποιία ενός πειραματικού οικίσκου από ξηρά δόμηση, θερμομόνωση και διάκενο αέρα, μια λιθόκτιστη και μία ξυλόπηκτη τοιχοποιία. Υπολογίζοντας για κάθε τοιχοποιία ξεχωριστά το θεωρητικό συντελεστή U-value και περιγράφοντας τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου σημείου μέτρησης και του τρόπου εγκατάστασης των αισθητήρων, γίνεται στη συνέχεια η ανάλυση των μετρήσεων και ο προσδιορισμός του συντελεστή με κάθε μέθοδο, με σκοπό την αξιολόγηση των μεθόδων και των πειραματικών διατάξεων. Έτσι παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά κάθε μεθοδολογίας ως προς τις απαιτήσεις, την αξιοπιστία, την ταχύτητα και την ευκολία στη χρήση τους.

Στην τρίτη ενότητα της διπλωματικής γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς δύο κτιρίων με διαφορετική θερμική μάζα. Εγκαθιστώντας στα κτίρια αυτά αισθητήρες σε διάφορα σημεία, μετρώντας κυρίως θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα και επιφανειακές εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες της τοιχοποιίας παρατηρείται η θερμική υστέρηση στις διάφορες τοιχοποιίες, ο ρόλος που παίζουν τα ανοίγματα στις απώλειες/κέρδη των κτιρίων κατά τη διάρκεια της ημέρας και τέλος τα χαρακτηριστικά που προσφέρει η θερμοχωρητικότητα του κελύφους στη συνολική θερμική συμπεριφορά του κτιρίου.

ABSTRACT

Nowadays, the energy saving in the buildings is of high importance, offering financial and environmental benefits. The main way for the improvement of the thermal behavior of the building envelope is the installation of insulation in masonry, while the heat capacity plays a significant role in the thermal behavior of masonry. This thesis consists of three sections. The first unit is a literature review on the factors that improve energy efficiency in the building envelope. At the second one, the theoretical and experimental approach for the study of the thermal transmittance coefficient of building envelope is analyzed. Finally, the third part examines the importance of the thermal mass of the wall in the total thermal behavior of a building.

The literature review focuses on the most important factor of energy improvement of a wall that is the increase of its insulating capacity of masonry by different materials. Special attention should be paid in their location within the wall. Another factor is the heat capacity of the building envelope, which reduces the variations of indoor temperatures and extends the maximum temperatures. In order to improve the energy efficiency of building envelope, the European Union has published two directives.

In the second part of the thesis, an extensive study of the theoretical and experimental calculation of the thermal insulation capacity of building envelope via thermal transmittance coefficient (U-value) is presented. The U-value coefficient is determined theoretically by the standard ISO 6946 and experimentally by ISO 9869 and ASTM C 1155. For the experimental determination in-situ measurements of surface internal and external temperature and heat flux are required. The choice of the appropriate measuring equipment and sensors requires special attention and is an important part of the experimental procedure.

The methods for the experimental determination of the U-value coefficient according to the above standards is the Average Method, the Summation Technique, the Sum of Least Squares Technique and the Dynamic Method. Each of them requires specific conditions and defines their own criteria for convergence. The methods for determining the transmittance of building envelope either use the average values of the measurements of the surface temperature difference and heat flux, or solve the differential equation of heat transfer by conduction. In the latter case the boundary conditions are the internal and external surface temperature. The theoretical heat flux is compared with the corresponding experimental, in order to determine the U-value coefficient. In this thesis, a computational code was built in MATLAB software in order to evaluate the measurements according to each methodology.

The masonries that were studied for the experimental determination of the U-value coefficient are the masonry of an experimental shed from dry construction, insulation and air gap, a stone and a timber frame wall. Firstly, the theoretical U-value coefficient is estimated for each masonry and the procedure of the selection of the appropriate measurement point and the development modalities of sensors is described. Afterwards, the measurements are analyzed and the U-value coefficient is determined by every method in order to evaluate the methods and the experimental devices. Hence, the characteristics of each methodology regarding special requirements, reliability, speed and ease of use are presented.

In the third part of this thesis, a comparative evaluation of the thermal behavior between two buildings with different thermal mass is performed. Several sensors were installed in various spots in the buildings to measure indoor air temperature, surface temperature inside and outside the wall, thermal delay, the effect of the openings on the thermal losses/gains of the buildings and finally the contribution of heat capacity of building envelope to the characterization of the overall thermal behavior of the building.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κ. Μαρία Φούντη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της θερμικής συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους στο πλαίσιο της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστίες στον υποψ. Διδάκτορα κ. Ιωάννη Μανδηλαρά για τις συμβουλές και την καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Λέκτορα του Ε.Μ.Π. κ Ελευθερία Τσακανίκα για την συνεργασία επί των μετρήσεων στο αρχοντικό των Μπενιζέλων, καθώς επίσης και τον καθηγητή Γεώργιο Πουλάκο της σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, για την παραχώρηση της μετρητικής διάταξης μέτρησης θερμοπερατότητας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. κ Γεώργιο Ζαννή, τον υποψ. Διδάκτορα κ. Εμμ. Μαλλιωτάκη, την διπλ. Αλ Φάντελ Μαγδαληνή και τον Χαράλαμπο Μαυράκη για την πολύτιμη βοήθειά τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο1ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....1

Κεφάλαιο 2ο - ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΚΑΙ ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ

2.1. ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ.....3
2.2. ΘΕΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....8
2.3. ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....10
2.4. ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ.....16

Κεφάλαιο 3ο - ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....19
3.1.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ.....19
3.1.2. ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΟΥ 'Κ' ΤΟΥ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (HUKSEFLUX).....23
3.1.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ THERMISTOR,.....24
3.1.4. NTC THERMISTOR ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ BETATHERM.....26
3.2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....28
3.2.1. ΘΕΡΜΟΡΟΟΜΕΤΡΑ ΤΟΥ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (HUKSEFLUX).....30
3.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....34
3.4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....37
3.5. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....38
3.5.1. Η ΣΥΣΚΕΥΗ AGILENT 34972A.....38
3.5.1.1. ΚΑΡΤΑ 34908A.....39
3.5.1.2. ΠΟΛΥΜΕΤΡΟ (Digital Multimeter Module-DMM).....40
3.5.2. Η ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ CR1000.....43
3.5.2.1. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ LoggerNet 3.4.1.....46

Κεφάλαιο 4ο - ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

4.1. ΘΕΩΡΙΑ.....49
4.1.1. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ.....49
4.1.2. ΜΟΝΙΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ.....50
4.1.3. ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....51
4.1.4. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....54
4.1.5. ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....56
4.1.6. ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ.....57

4.1.7. ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ.....57
4.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....58
4.3. ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....61
4.3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ κατά ISO 9869.....61
4.3.2. ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ κατά ASTM C 1155.....65
4.3.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ κατά ASTM C 1155.....68
4.3.4. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ κατά ISO 9869.....69

Κεφάλαιο 5ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

5.1. ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....75
5.1.1. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ HUKSEFLUX (TRSYS01).....75
5.1.2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΡΟΟΜΕΤΡΑ ΤΗΣ OMEGA, THERMISTOR ΤΗΣ BETATHERM ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΗ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ AGILENT (OMEGA/BETATH.....76
5.1.3. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΡΟΟΜΕΤΡΑ ΤΗΣ HUKSEFLUX, THERMISTOR ΤΗΣ BETATHERM ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΗ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ AGILENT (HUKSEFLUX/BETATHERM).....76
5.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (Uvalue) ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ.....77
5.2.1. ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ (MOCK UP).....77
5.2.1.1. ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ (MOCK UP)...78
5.2.1.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ 79
5.2.1.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....85
5.2.1.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....86
5.2.1.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....89
5.2.1.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....127
5.2.2. ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ.....131
5.2.2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.....131
5.2.2.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....132
5.2.2.3. ΕΠΙΛΟΓΗ. ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....135
5.2.2.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....137
5.2.2.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....138
5.2.2.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....160
5.2.3. ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ.....163

5.2.3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.....163
5.2.3.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....164
5.2.3.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....166
5.2.3.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....168
5.2.3.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....168
5.2.3.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....179

5.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....181

Κεφάλαιο 6ο - ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΑΖΑ

6.1. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ (MOCK UP).....185
6.1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΟΥ.....186
6.1.2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....191
6.1.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....194

6.2. ΑΡΧΟΝΤΙΚΟ ΤΩΝ ΜΠΕΝΙΖΕΛΩΝ.....199
6.2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΟΥ.....199
6.2.2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....207
6.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....208

6.3. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΥΟ ΚΤΙΡΙΑ.....219

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....221

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....223

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....237

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαρκώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας αλλά και η επιδείνωση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία και η επίλυσή τους έχει γίνει επιτακτική ανάγκη σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι προσπάθειες συγκλίνουν στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα από συμβατικά καύσιμα, με άμεση συνέπεια τον περιορισμό των ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα και κυρίως των αερίων που συμβάλλουν στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η ορθολογική χρήση ενέργειας δίνει τη δυνατότητα να εξοικονομηθεί ενέργεια σε όλους τους τομείς, χωρίς να μειωθεί, κατ' ανάγκη, το επίπεδο διαβίωσης. Εκμεταλλευόμενοι νέα συστήματα, τεχνολογίες, υλικά και της Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας μπορούν να επιτευχθούν οι δύο στόχοι, δηλαδή η μείωση της κατανάλωσης των συμβατικών καυσίμων και η προστασία του περιβάλλοντος.

Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια αντιπροσωπεύει περίπου το 35% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Απ' αυτό στη θέρμανση των κτηρίων αντιστοιχεί πάνω από το μισό της συνολικής κατανάλωσης. Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα αντιπροσωπεύει πάνω από το 30% του συνόλου, λίγο πιο κάτω από τη βιομηχανία. Η σημασία του περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια φαίνεται από το γεγονός ότι περίπου το 45% των συνολικών εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από τα κτίρια **[1]**. Επίσης με τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, η αυξανόμενη χρήση κλιματιστικών επιδεινώνει τα φορτία αιχμής και το κόστος λειτουργίας των κτιρίων.

Αν διακρίνει κανείς την κατανάλωση των κτιρίων ανάλογα με την ηλικία και τα κτιριοδομικά τους χαρακτηριστικά, αυτά που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ποσοτικά και ποιοτικά είναι τα νεότερα. Το 89% της ενέργειας καταναλώνεται για τη θέρμανση και το κλιματισμό των κτιρίων, το 7% για το φωτισμό και όλες οι υπόλοιπες ανάγκες απορροφούν συνολικά 4% **[2]**. Η ανισόρροπη αυτή κατανομή οφείλεται κυρίως στην έλλειψη θερμικής προστασίας των κτιρίων που οδηγεί σε δυσανάλογα μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, προκειμένου να επιτευχθούν ικανοποιητικές συνθήκες θερμικής άνεσης, καθώς επίσης και στο χαμηλό επίπεδο εξοπλισμού.

Η εισαγωγή της θερμομόνωσης είχε σημαντική θετική επίδραση στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων που κατασκευάστηκαν την τελευταία εικοσαετία. Εξετάζοντας, όμως, το εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο και τη διαχρονική μεταβολή του, διαπιστώνουμε ότι η κατανάλωση ενέργειας για την εξυπηρέτηση κτιρίων αυξάνεται με έντονο ρυθμό. Το 1980 τα κτίρια απορροφούσαν το 22% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, ποσοστό που ως το 1994 είχε αυξηθεί στο 30.9% **[2]**.

Ως κυριότεροι λόγοι αυτής της εξέλιξης μπορούν να αναφερθούν:

α) Η μεγάλη πλειοψηφία των μη θερμομονωμένων κτιρίων που κατασκευάστηκαν πριν το 1980 και που απαιτούν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας για να εξασφαλίσουν, με τα σημερινά επίπεδα, τις αποδεκτές συνθήκες άνεσης.

β) Η συνεχής αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, των συστημάτων και συσκευών που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια.

γ) Η ολοένα ισχυρότερη απαίτηση για βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης και εργασίας, ιδίως σε ότι αφορά τη θερμική άνεση το θέρος, που σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους των συσκευών, οδήγησε στην εγκατάσταση πάνω από 750.000 κλιματιστικών συσκευών τα τελευταία 5 χρόνια.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή πειραματικών μεθόδων για τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους. Συγκεκριμένα η εργασία αποτελείται από δύο κύρια μέρη. Στο πρώτο μέρος μελετάται ο πειραματικός προσδιορισμός του πιο χαρακτηριστικού συντελεστή για την θερμική συμπεριφορά του κελύφους, του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, ή συντελεστή U-value. Εγκαταστάθηκαν μετρητικές διατάξεις για επιτόπιες μετρήσεις ροής θερμότητας και επιφανειακής εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας σε τρεις διαφορετικές τοιχοποιίες: στην τοιχοποιία ενός πειραματικού οικίσκου με γυψοσανίδες, μόνωση και ενδιάμεσο διάκενο αέρα, σε μία λιθόκτιστη και σε μία ξυλόπηκτη τοιχοποιία. Οι μετρήσεις επεξεργάσθηκαν και αναλύθηκαν με τέσσερις διαφορετικές μεθοδολογίες, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO και ASTM.

Στο δεύτερο μέρος εγκαταστάθηκαν μετρητικές διατάξεις σε δύο κτίρια με χαρακτηριστική διαφορά θερμικής μάζας, τον πειραματικό οικίσκο του εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και σε ένα μεταβυζαντινό αρχοντικό Αθηναϊκό σπίτι στην Πλάκα της Αθήνας. Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται οι μετρήσεις οι οποίες είχαν ληφθεί μέχρι τη συγγραφή της. Από αυτές προκύπτουν αρκετές παρατηρήσεις για τη θερμική τους συμπεριφορά, όμως για ολοκληρωμένα συμπεράσματα θα πρέπει να συνεχιστούν οι μετρήσεις και για τους επόμενους μήνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{ο}

ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΚΑΙ ΕΥΡΩΠΑΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ

2.1. ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ

Θερμομόνωση ενός δομικού στοιχείου ονομάζεται το σύνολο τω μεθόδων και των υλικών, που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ροής θερμότητας μεταξύ των χώρων εκατέρωθεν του στοιχείου. Η επιτυχής θερμομόνωση εξασφαλίζει τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας, U, του δομικού στοιχείου, δηλαδή περιορίζει τη ροή θερμότητας διαμέσου του στοιχείου.

Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από μία συγκεκριμένη τιμή της αντίστασης θερμοδιαφυγής R_o, τα θερμομονωτικά υλικά έχουν μεγάλες τιμές. Η μονωτική δράση των υλικών αυτών οφείλεται στις εγκλωβισμένες ποσότητες αέρος στους πόρους του υλικού. Όλα τα πορώδη υλικά εμφανίζουν θερμομονωτική ικανότητα, που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο περισσότερους και μικρότερους πόρους διαθέτουν. Η μονωτική αυτή ικανότητα διατηρείται εφόσον τα υλικά είναι ξηρά και οι πόροι τους γεμίζουν με αέρα και όχι με νερό, επειδή η θερμότητα στο νερό μεταδίδεται 25 φορές ευκολότερα από τον αέρα. Αυτό σημαίνει ότι τα μονωτικά υλικά πρέπει να φυλάσσονται και να τοποθετούνται ξηρά.

Όταν το κέλυφος ενός κτιρίου θερμομονωθεί, αυξάνεται η θερμική αντίσταση του κτιρίου. Θεωρητικά η ροή θερμότητας μπορεί να μηδενισθεί αυξάνοντας το πάχος του θερμομονωτικού υλικού, δεδομένου ότι η θερμική αντίσταση είναι το πηλίκο του πάχους του προς το συντελεστή αγωγιμότητας του υλικού. Αυτό σημαίνει αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων, δηλαδή κόστος χώρου και αύξηση της ποσότητας του μονωτικού υλικού, δηλαδή κόστος υλικού. Σε κεντρικές κτιριακές εγκαταστάσεις το συνολικό πάχος των τοιχωμάτων έχει τεράστια οικονομική σημασία, γιατί το κόστος του διατιθέμενου ωφέλιμου εμβαδού είναι πολύ υψηλό. Στις περιπτώσεις αυτές επιλέγονται ισχυρά μονωτικά υλικά μεγάλου κόστους. Όταν το πρόβλημα του χώρου δεν είναι βασικό αναζητείται ο αποδεκτός συσχετισμός κόστους κατασκευής και εξοικονόμησης ενέργειας. Πρέπει να τονισθεί ότι τα ενεργειακά κέρδη από την τοποθέτηση της θερμομόνωσης, δεν είναι ευθέως ανάλογα με το πάχος του μονωτικού υλικού, καθώς μετά από κάποια τιμή η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ασήμαντη.

Η αύξηση της θερμομονωτικής ικανότητας του κτιριακού κελύφους περιλαμβάνει επεμβάσεις α) στους εξωτερικούς τοίχους, β) στο δώμα, γ) στο δάπεδο εφ' όσον συνορεύει με μη θερμαινόμενους χώρους ή με τον εξωτερικό αέρα και δ) σε

εσωτερικούς τοίχους, που συνορεύουν με μη θερμαινόμενους χώρους. Η σωστή θερμομόνωση ενός κτιρίου έχει ως αποτέλεσμα:

1. Τη μεγαλύτερη θερμική άνεση στο εσωτερικό του κτιρίου.
2. Τη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της επιφανειακής συμπύκνωσης των υδρατμών καθώς εμφανίζει θερμογέφυρες.
3. Την αύξηση του κατασκευαστικού κόστους κατά 4% περίπου.
4. Τη μείωση των λειτουργικών εξόδων του κτιρίου, επειδή περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.
5. Τη διατήρηση των θερμικών ηλιακών κερδών επί μεγάλο χρονικό διάστημα στο εσωτερικό του κτιρίου.

Όσα κτίρια κατασκευάστηκαν πριν από τις ενεργειακές κρίσεις του 1970, μελετήθηκαν στο δομικό τους μέρος με στόχο τη μείωση του αρχικού κόστους κατασκευής, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κόστος λειτουργίας, αποτελώντας ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενεργειακής σπατάλης **[3]**. Από την άλλη υπάρχουν και μελετητές παρασυρόμενοι από την ιδέα της εξοικονόμησης ενέργειας που αυξάνουν υπερβολικά το κόστος κατασκευής των κτηρίων.

Κατά την κατασκευή του κελύφους υπάρχουν σημεία ή επιφάνειες στις οποίες η θερμική αντίσταση είναι μικρότερη από τις υπόλοιπες επιφάνειες και αποτελούν σημαντική πηγή θερμικών απωλειών. Οι περιοχές αυτές ορίζονται ως θερμογέφυρες και εμφανίζονται δε κατεξοχήν στην διεπιφάνεια δύο διαφορετικών δομικών στοιχείων ή δύο ίδιων δομικών στοιχείων διαφορετικού πάχους, σε συνδέσεις εξωτερικών δομικών στοιχείων και πλευρικά γύρω από ανοίγματα. Οι θερμικές γέφυρες χαρακτηρίζονται από την πολυδιάστατη μεταφορά θερμότητας και για το λόγο αυτό δεν μπορούν να προσδιοριστούν από μονοδιάστατα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων. Δημιουργούνται σε σημεία ένωσης παραθύρων, σε σημεία συμβολής δοκών και υποστυλωμάτων χωρίς ή με ανεπαρκή θερμομόνωση με θερμομονωμένα τοιχία του κτιρίου.

Σχήμα 2.1 - Πολυκατοικία με προβληματική μόνωση

Τα συχνότερα σημεία εμφάνισης θερμογεφυρών είναι:

- Δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα (π.χ. δοκάρια σκελετού, οριζόντιες ή κάθετες κολόνες, τοιχία κλπ).
- Σε ασυνέχειες της θερμομόνωσης λόγω κακής εφαρμογής αλλά και σε αρμούς πλακιδίων, πλακών κλπ.
- Εκεί που δημιουργούνται γωνίες ανάμεσα σε τοιχία καθώς και ανάμεσα σε τοίχο και οροφή.
- Στις περιοχές γύρω από τα εξωτερικά κουφώματα (παράθυρα, πόρτες κλπ)
- Στο σενάζ των τοιχίων και στα πρέκια των ανοιγμάτων και των θυρών
- Στα σημεία που δεν προβλέφθηκε θερμοδιακοπή της συνέχειας των δομικών στοιχείων με εξωτερικά, όπως για παράδειγμα τα μπαλκόνια και οι ταράτσες.
- Εκεί που δεν μπορεί να επιτευχθεί κατά την κατασκευή η ομαλή συνέχεια της θερμομόνωσης του κτιρίου, όπως στα σημεία επαφής τούβλων και οπλισμένου σκυροδέματος (μπετόν).

Στις σημερινές κατασκευές συναντάται συνηθέστερα η σύνθετη τοιχοποιία πολλαπλών στρώσεων, όπου κάθε στρώση έχει δικά της φυσικά χαρακτηριστικά. Στις κατασκευές αυτές, σημαντική δεν είναι μόνο η επιλογή των διαφόρων στρώσεων, αλλά κυρίως η σωστή διάταξη μέσα στην τοιχοποιία. Ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους, το πάχος τους, τη χρήση και τις απαιτήσεις των χώρων που περικλείουν, οι εξωτερικοί τοίχοι θερμομονώνονται με πέντε τρόπους. Κάθε τρόπος παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, οπότε η τελική επιλογή πρέπει να γίνει με κριτήρια τις ειδικές λειτουργικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις του κτιρίου.

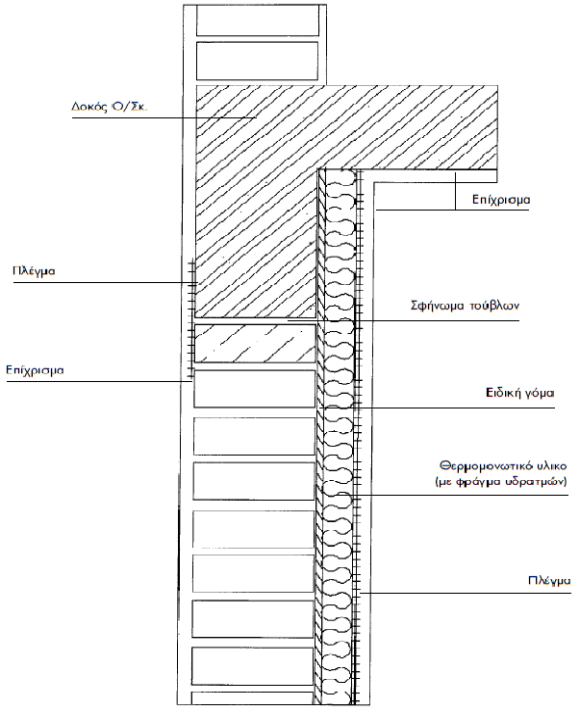
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ

Το μονωτικό υλικό τοποθετείται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου και προστατεύεται από φράγμα υδρατμών και κάποιο στερεό δομικό υλικό (π.χ. γυψοσανίδα) που λειτουργεί όπως και το επίχρισμα. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται σε χώρους με περιοδική χρήση (π.χ. κινηματογράφους, εκκλησίες) και απαίτηση γρήγορης θέρμανσης. Τα πλεονεκτήματα της εσωτερικής μόνωσης είναι:

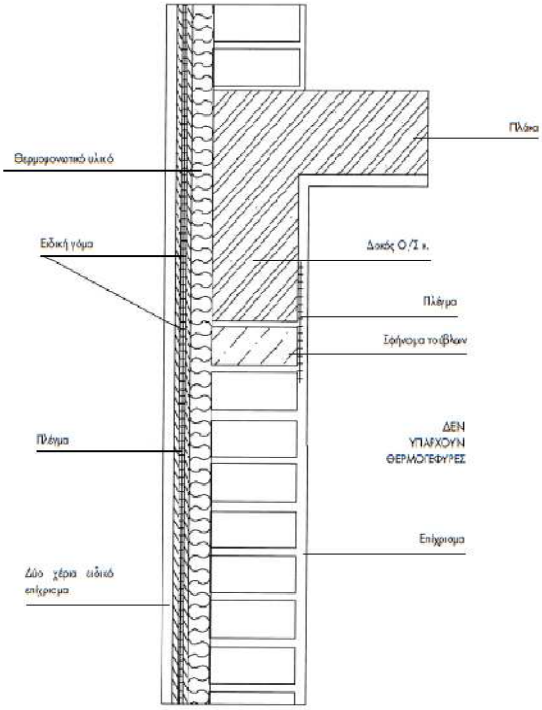
- γρήγορη θέρμανση του χώρου,
- περιορισμένος χρόνος κατασκευής,
- δεν απαιτείται ιδιαίτερη προστασία του μονωτικού υλικού από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες,
- απλή κατασκευή και
- οικονομικότερος τρόπος θερμομόνωσης.

Από την άλλη, τα μειονεκτήματα είναι:

- μειώνεται ο ωφέλιμος χώρος,
- η θερμοχωρητικότητα του τοίχου μένει ανεκμετάλλευτη και ο χώρος ψύχεται πολύ σύντομά,
- υπάρχει κίνδυνος επιφανειακής συμπύκνωσης των υδρατμών επειδή δεν λύνεται το πρόβλημα των θερμογεφυρών
- υπάρχει έλλειψη προστασία των δομικών στοιχείων από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, με πιθανή εμφάνιση ρηγματώσεων και εισροή νερού της βροχής,
- υπάρχουν δυσκολίες στη διευθέτηση των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων.



Σχήμα 2.2 - Εσωτερική θερμομόνωση τοίχου με μονωτικό υλικό με φράγμα υδρατμών **[4]**



Σχήμα 2.3 - Εξωτερική θερμομόνωση τοίχου με μονωτικό υλικό**[4]**

ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ

Το μονωτικό υλικό τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά του τοίχου και προστατεύεται από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες (επένδυση φύλλων αλουμινίου, ασβεστοτσιμέντο κλπ). Η εσωτερική πλευρά του τοίχου φέρει επίχρισμα. Τα πλεονεκτήματα της εξωτερικής μόνωσης είναι:

- η θερμοχωρητικότητα του τοίχου είναι εκμεταλλεύσιμη και ο χώρος ψύχεται με αργό ρυθμό,
- εξασφαλίζεται η κάλυψη των θερμογεφυρών, ιδιαίτερα στις πλάκες, τα δοκάρια και τις κολώνες,
- κατά την τοποθέτηση δεν παρεμποδίζεται η λειτουργία των εσωτερικών χώρων

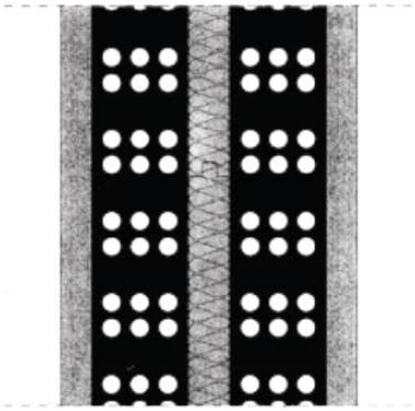
- το κέλυφος προστατεύεται από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες
- αρκετές φορές το φράγμα υδρατμών δεν είναι απαραίτητο

Αντίστοιχα τα μειονεκτήματα αυτού του είδους της μόνωσης είναι:

- Απαιτείται ειδική προστασία του μονωτικού υλικού από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες
- Το μεγαλύτερο κόστος απ' όλους τους τρόπους θερμομόνωσης
- Αργή θέρμανση του χώρου
- Δύσκολη εφαρμογή όταν οι τοίχοι έχουν πολλές αρχιτεκτονικές προεξοχές

ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Το μονωτικό υλικό τοποθετείται στο ενδιάμεσο κενό ενός διπλού τοίχου που εσωτερικά και εξωτερικά φέρει επίχρισμα. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται συχνά στη χώρα μας και οικονομικά βρίσκεται μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής θερμομόνωσης. Μια συνηθέστερη παραλλαγή του τρόπου αυτού είναι να προβλεφθεί στρώμα αέρα, ελάχιστου πάχους 2cm, δίπλα στο μονωτικό υλικό, που βρίσκεται στο ενδιάμεσο κενό του διπλού τοίχου. Για να είναι αποδοτικότερη η θερμομόνωση θα πρέπει το μονωτικό υλικό να τοποθετηθεί δίπλα στον εσωτερικό τοίχο.



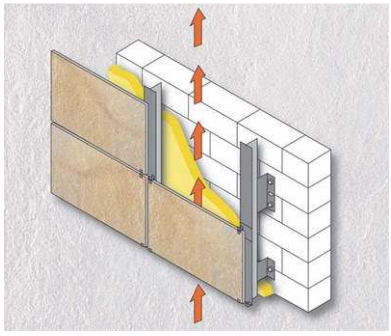
Σχήμα 2.4 - Θερμομόνωση τοιχοποιίας στο διάκενο μεταξύ των δύο τοίχων**[4]**

ΤΟΙΧΟΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΤΟΥΒΛΑ

Ο τοίχος κτίζεται με θερμομονωτικά τούβλα, τα οποία έχουν χαμηλό συντελεστή αγωγιμότητας k και με τον τρόπο κατασκευής, το σχήμα και τις διαστάσεις τους εξασφαλίζουν τον απαιτούμενο συντελεστή θερμοπερατότητας στο τοίχωμα. Στις δύο πλευρές του τοίχου επιβάλλεται η σωστή κατασκευή των επιχρισμάτων, που εξασφαλίζουν την προστασία των θερμομονωτικών τούβλων από την υγρασία **[3]**.

ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΤΟΙΧΟΥ

Στην εξωτερική πλευρά του τοίχου τοποθετείται μονωτικό υλικό και στερεώνεται με ανοξείδωτα καρφιά. Σε απόσταση δύο έως τέσσερα εκατοστά από αυτό αναρτάται οπλισμένη τσιμεντόπλακα, στο κάτω μέρος της οποίας υπάρχουν θυρίδες εξαερισμού. Έτσι, στο κενό που υπάρχει κυκλοφορεί ο αέρας με φυσικό ελκυσμό (φαινόμενο καμινάδας) μπροστά από το θερμομονωτικό υλικό με αποτέλεσμα να απομακρύνονται τόσο η θερμότητα όσο και η υγρασία και να εξασφαλίζεται ένα υψηλό επίπεδο θερμικής άνεσης. Τέλος, η εξωτερική πλευρά της τσιμεντόπλακας καλύπτεται με κανονικό επίχρισμα (σοβάς). Ο τρόπος αυτός έχει όλα τα πλεονεκτήματα της εξωτερικής θερμομόνωσης, αλλά παράλληλα παρέχει καθολική προστασία της τοιχοποιίας από την υγρασία **[3]**.



Σχήμα 2.5 - Αεριζόμενη τοιχοποιία

Τα υλικά προστασίας από τη θερμότητα και το ψύχος έχουν βέβαια την ικανότητα να εμποδίζουν την απώλεια θερμότητας και τη διείσδυση του ψύχους, δεν έχουν όμως την ικανότητα αποταμιεύσεως της θερμότητας. Αυτό οφείλεται στη μικρή μάζα των υλικών αυτών. Η αποθήκευση θερμότητας είναι σημαντική για τη ρύθμιση του θερμικού ισοζυγίου.

2.2. ΘΕΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Θερμοχωρητικότητα ενός υλικού ή ενός δομικού στοιχείου, ονομάζεται η ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα, που δέχεται από το περιβάλλον, μέσα στη μάζα του και να την αποδίδει βαθμιαία με σημαντική χρονική υστέρηση. Η θερμοχωρητικότητα είναι ανάλογη της μάζας ή της πυκνότητας και της ειδικής θερμότητας του υλικού. Το υλικό με τη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα είναι το νερό, ενώ αυτό με τη μικρότερη, ο αέρας.

Ο ρυθμός με τον οποίο ένα δομικό υλικό στοιχείο απορροφά ή αποβάλλει θερμότητα ονομάζεται θερμική αδράνεια και εξαρτάται από το πάχος και τη θερμοχωρητικότητα του στοιχείου.

Όλα τα δομικά υλικά απορροφούν και αποθηκεύουν θερμότητα καθώς θερμαίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προσπίπτει στο κέλυφος του κτιρίου. Ένα μέρος της ακτινοβολίας αυτής ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται

σε θερμότητα και απορροφάται από τα δομικά στοιχεία του κτιρίου (τοίχοι, δάπεδο, οροφή). Σημαντική ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας περνά στο εσωτερικό του κτιρίου από τα ανοίγματα και θερμαίνει τον αέρα, ο οποίος στη συνέχεια με μετάβαση μεταδίδει τη θερμότητα στα δομικά στοιχεία και τα διάφορα αντικείμενα.

Η αποθήκευση και επαναπόδοση της θερμότητας των δομικών στοιχείων οφείλεται στη ροή θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο περιβάλλον. Η διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας που επαναλαμβάνεται κάθε εικοσιτετράωρο, αλλά με διαφορετική ένταση στη διάρκεια των εποχών ενός έτους, προκαλεί μια περιοδική ροή θερμότητας. Έτσι, την ημέρα, που εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική, έχουμε ροή θερμότητας από το περιβάλλον προς το κτίριο, ενώ τη νύχτα, που η εσωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική η ροή θερμότητας αντιστρέφεται.

Η περιοδική ροή θερμότητας χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους, τη χρονική υστέρηση τ και το συντελεστή μείωσης θερμοκρασίας μ_t.

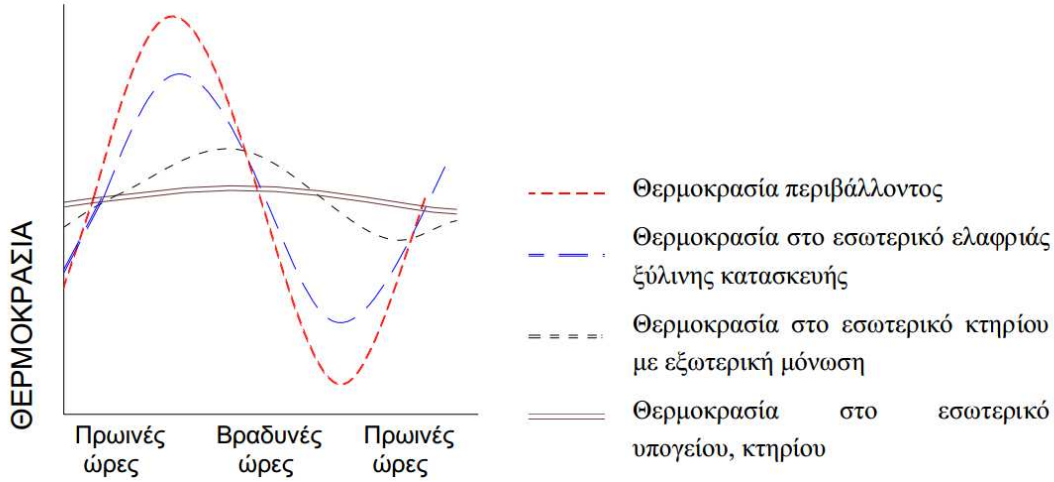
ΧΡΟΝΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ

Η χρονική υστέρηση προσδιορίζει τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από τη στιγμή της μέγιστης εξωτερικής θερμοκρασίας, μέχρι τη στιγμή της μέγιστης επιφανειακής εσωτερικής θερμοκρασίας του τοιχώματος και συνήθως εκφράζεται σε ώρες **[3]**. Η χρονική υστέρηση τ είναι ένα μέγεθος με μεγάλη σημασία, που εξαρτάται από τη θερμοχωρητικότητα και το συντελεστή αγωγιμότητας του δομικού στοιχείου και χαρακτηρίζει τη θερμική αδράνεια της κατασκευής. Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα και ο μικρός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξασφαλίζουν μεγάλη χρονική υστέρηση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μεγάλα ποσά θερμότητας αποθηκεύονται στη μάζα του δομικού στοιχείου και μεταδίδονται με αργό ρυθμό προς το εσωτερικό του κτηρίου. Καθυστερεί, δηλαδή, η άνοδος της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου, μέχρις ότου η εξωτερική θερμοκρασία αρχίσει να μειώνεται. Τότε όμως το κτήριο μπορεί να αποβάλλει το επιπλέον θερμικό φορτίο με φυσικό αερισμό και ακτινοβολία προς το περιβάλλον. Έτσι κατά τη διάρκεια του χειμώνα η αποθηκευμένη θερμότητα αποδίδεται στο εσωτερικό του κτηρίου αργά το απόγευμα ή το βράδυ, όταν χρειάζεται περισσότερο, ενώ το καλοκαίρι αποδίδεται τις βραδινές ώρες που γίνεται χρήση του φυσικού αερισμού. Ακόμη όμως και στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται σύστημα κλιματισμού, το μέγιστο ψυκτικό φορτίο δεν συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη ζήτηση ενέργειας (πρόβλημα υπερφόρτωσης ηλεκτρικού δικτύου), επειδή καθυστερεί σημαντικά ο χρόνος που παρουσιάζεται η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Ο συντελεστής μείωσης θερμοκρασίας είναι το πηλίκο της μέγιστης επιφανειακής εσωτερικής θερμοκρασίας του τοιχώματος προς τη μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία και αυξάνεται όσο βελτιώνεται η θερμομόνωση του κτιρίου **[3]**.

Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η συμπεριφορά τριών κτιρίων διαφορετικής θερμικής μάζας στην ίδια κατανομή θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμική μάζα τόσο μειώνονται οι διακυμάνσεις, αλλά και παρατείνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.6 - Συμπεριφορά τριών κτιρίων διαφορετικής θερμικής μάζας

Από όσα αναπτύχθηκαν ανωτέρω προκύπτει ότι η χρήση υλικών μεγάλης θερμοχωρητικότητας έχει τεράστια σημασία για τη σωστή λειτουργία του κτιρίου, που παίζει το ρόλο του θερμοσυσσωρευτή. Το καλοκαίρι απορροφά την επιπλέον θερμότητα και μειώνει την εσωτερική θερμοκρασία, αποδίδοντας σταδιακά τη θερμότητα σε περιόδους κατά τις οποίες οι εξωτερικές συνθήκες είναι ευνοϊκότερες για φυσικό αερισμό και για την απόρριψή της στο περιβάλλον. Το χειμώνα αποθηκεύει τη θερμότητα του ήλιου, αλλά και από άλλες εσωτερικές πηγές και την αποδίδει τη νύχτα διατηρώντας, έτσι ζεστό τον εσωτερικό χώρο.

2.3. ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Υπάρχουν διάφορα υλικά μόνωσης, η κατάταξη των διάφορων διαθέσιμων υλικών στη βάση της χημικής σύστασής τους και της φυσικής τους διαμόρφωσης παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.7.

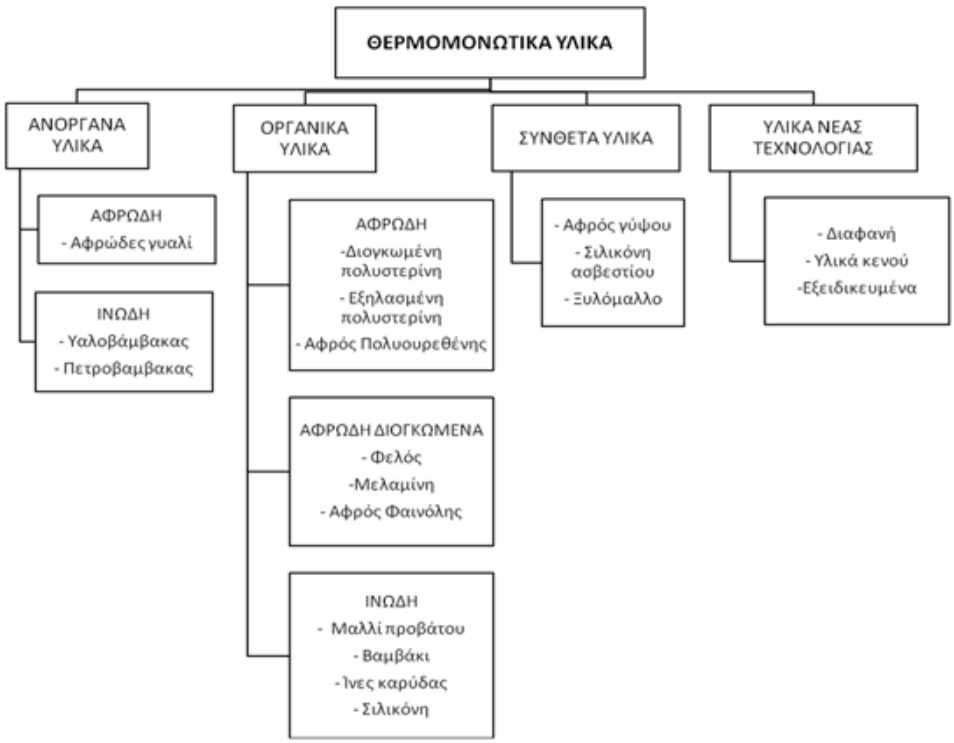
Τα υλικά μόνωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

α) βάσει των θερμοφυσικών τους ιδιοτήτων, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ, αλλά και σε ιδιότητες όπως η πυραντοχή, η αντοχή στη διαβροχή (υδατοαπορρόφηση) και η αντίσταση στη διάχυση υδρατμών

β) βάσει των μηχανικών τους ιδιοτήτων, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στην αντοχή στη θλίψη και, για εφαρμογές συστημάτων εξωτερικής θερμομόνωσης, στην αντοχή στη σκέδαση

γ) βάσει των ηχομονωτικών τους ιδιοτήτων

δ) βάσει της περιβαλλοντικής τους απόδοσης.



Σχήμα 2.7 - Κατάταξη των θερμομονωτικών υλικών

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΝ 13162 **[5]** για τα θερμομονωτικά υλικά, ένα υλικό πρέπει να διαθέτει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ μικρότερο του 0.06 W/mK.

Τα σύγχρονα θερμομονωτικά υλικά έχουν λ που κυμαίνεται από 0.028 έως 0.045, ενώ υπάρχουν και τα εξειδικευμένα υλικά νέας γενιάς (vacuum gel insulation materials) που αγγίζουν λ της τάξης του 0.005. Ωστόσο η εφαρμογή τους είναι ακόμη περιορισμένη καθώς υπάρχουν δυσκολίες εφαρμογής που πρέπει να ξεπεραστούν

Ενδιαφέρον έχει να παρατηρήσει κανείς ότι στην κεντροευρωπαϊκή αγορά θερμομονωτικών υλικών για τα κτίρια κυριαρχούν τα ανόργανα ινώδη υλικά (υαλοβάμβακας και πετροβάμβακας καλύπτουν περίπου το 55%) με τα οργανικά αφρώδη (διογκωμένη και εξηλασμένη πολυστερίνη, λιγότερο η πολυουρεθάνη) να έπονται καλύπτοντας το 35% της αγοράς, ενώ το εναπομένον 10% καλύπτεται από υλικά όπως το ξυλόμαλλο, ο φελλός και το αφρώδες γυαλί **[6]**.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 εμφανίστηκαν στην αγορά νέες κατηγορίες υλικών, όπως τα διαφανή θερμομονωτικά υλικά και τα οργανικά ινώδη υλικά από οικολογική πρώτη ύλη, όπως το μαλλί προβάτων, οι ίνες διαφόρων φυτών ή και το

τριφύλλι. Και οι δύο κατηγορίες παραμένουν στο περιθώριο της αγοράς, παρά το ενδιαφέρον που παρουσιάζουν, κυρίως εξαιτίας του υψηλού τους κόστους.

Λαμβάνοντας υπόψη την ποικιλία των διαθέσιμων στην ελληνική αγορά υλικών, είναι σαφής η κυριαρχία των δύο βασικών κατηγοριών, των αφρωδών οργανικών και ινωδών ανοργάνων. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των πιο διαδομένων υλικών παρατίθενται στον Πίνακα 2.1α και 2.1β.

Πίνακας 2.1α - Χαρακτηριστικά θερμομονωτικών υλικών που συναντώνται στην ελληνική αγορά

Υλικό	Αφρώδη Υλικά		
	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Εξηλασμένη Πολυστερίνη	Αφρός Πολυουρεθάνης
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	0.030-0.045	0.030-0.038	0.028-0.040
Πυραντοχή	F - E	E	F (PRI E)
Αντοχή σε συμπίεση	Μέχρι 250	Μέχρι 500	Μέχρι 500
Υδατοαπορρόφηση	Μέχρι 3%	Μέχρι 3%	Μέχρι 3%
Θερμοκρασίες εφαρμογής	-50 έως 75 ^{o}C	-50 έως 75 ^{o}C	-150 έως 120 ^{o}C
Αντίσταση στη διάχυση υδρατμών	10 - 20	50 - 80	N.A.

Πίνακας 2.1β - Χαρακτηριστικά θερμομονωτικών υλικών που συναντώνται στην ελληνική αγορά

Υλικό	Ινώδη όργανα			Αφρώδη ανόργανα
	Πετροβάμβακας	Υαλοβάμβακας	Ξυλόμαλλο	Αφρώδες γυαλί
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	0.032 - 0.045	0.033 - 0.040	0.070 - 0.090	0.035 - 0.040
Πυραντοχή	A1	A1	B1	A1
Αντοχή σε συμπίεση	Μέχρι 250	Μέχρι 200	Μέχρι 500	Μέχρι 700
Υδατοαπορρόφηση	Μέχρι 3 kg/m^3	Μέχρι 3 kg/m^3	-	Μέχρι 1%
Θερμοκρασίες εφαρμογής	-20 έως 1000 ^{o}C	-20 έως 350 ^{o}C	-50 έως 300 ^{o}C	800^{o}C
Αντίσταση στη διάχυση υδρατμών	1 - 3	1 - 3	2 -5	700

Εκτός από τις διαφορές στις «παραδοσιακές» ιδιότητες υπάρχει και η διάσταση της φιλικότητας των υλικών προς το περιβάλλον, που μπορεί να εκφραστεί με διάφορους δείκτες, όπως η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του υλικού και η εμπεριεχόμενη ενέργεια, εκπομπές αερίων ρύπων κατά την παραγωγή των προϊόντων, η πιθανή χρήση ανακυκλωμένων υλικών, η τοξικότητα, κτλ. Η ανάλυση κύκλου ζωής, αλλά και ολοκληρωμένες μέθοδοι περιβαλλοντικής αξιολόγησης των θερμομονωτικών λύσεων αποτελούν χρήσιμα εργαλεία στην κατεύθυνση αυτή, η οποία θα πρέπει να συνεκτιμάται κατά την επιλογή των θερμομονωτικών υλικών, αλλά και των υπολοίπων δομικών υλικών.

Επιγραμματικά, και σε σχέση με τα υλικά που κυριαρχούν στην ελληνική αγορά, μπορεί κανείς να επισημάνει τα ακόλουθα σημεία:

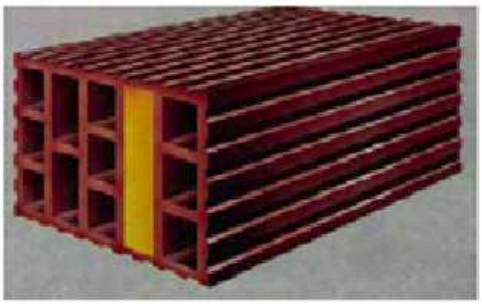
Τα οργανικά αφρώδη υλικά έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Έχουν χαμηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, είναι ελαφρύτερα και έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη.
- Κυριαρχούν στην ελληνική αγορά, καλύπτοντας περίπου το 80% της ζήτησης.
- Έχουν μεγαλύτερη εμπεριεχόμενη ενέργεια, η οποία όμως μπορεί σχετικά εύκολα να ανακτηθεί, εφόσον εφαρμοστούν σχήματα επιλεκτικής αποδόμησης στο τέλος της ζωής του κτιρίου.

Τα ανόργανα ινώδη υλικά έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Έχουν αξιόλογες ηχομονωτικές ιδιότητες και είναι πρακτικά άκαυστα
- Καλύπτουν περίπου το 20% της ζήτησης της εγχώριας αγοράς
- Έχουν μικρότερη εμπεριεχόμενη ενέργεια και είναι πιο εύκολη η διαχείρισή τους ως απορρίμματα στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους,

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει σε υλικά όπως τα θερμομονωτικά τούβλα, τα θερμομονωτικά επιχρίσματα και τα θερμομονωτικά ελαφροσκυροδέματα. Πρόκειται για υλικά που, ειδικά σε νεόδμητα κτίρια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή, συνεισφέροντας στη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων **[6]**. Με τα αυστηρότερα όρια που θέτει πλέον ο ΚΕΝΑΚ, η χρήση τους πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με την εφαρμογή των θερμομονωτικών υλικών.



Σχήμα 2.8 - Θερμομονωτικό τούβλο με μόνωση πολυουρεθάνης

Συνοψίζοντας, υπάρχει αναγκαιότητα χρήσης του κατάλληλου υλικού ανάλογα με το δομικό στοιχείο και την κατασκευαστική λύση, ώστε να διασφαλίζονται η αποτελεσματική θερμική προστασία των κτιρίων, ορθή λειτουργία του κτιρίου συνολικά, η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την υγεία, αλλά και το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων απαιτούνται η συνεχής ενημέρωση των μελετητών, αφού οι τεχνολογικές εξελίξεις είναι ταχύτατες, και η πιστοποίηση των υλικών μέσα από κοινοποιημένους φορείς, σύμφωνα με την ισχύουσα ευρωπαϊκή νομοθεσία. Η παράβλεψη αυτών των δύο παραγόντων οδηγεί είτε σε εσφαλμένες λύσεις, που μεσοπρόθεσμα οδηγούν σε αστοχίες της κατασκευής, είτε στη χρήση υλικών που να είναι ακριβά, ακόμη κι όπου αυτό δεν είναι αναγκαίο.

Το αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης είναι η αύξηση του, ήδη υψηλού, κόστους κατασκευής, ή, ακόμη χειρότερα, η εξαιτίας του υψηλού κόστους θεώρηση της θερμομόνωσης ως περιττής δαπάνης.

ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ - PCM

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η θερμοχωρητικότητα των δομικών υλικών είναι ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων. Για την ταξινόμηση των υλικών με κριτήριο τον μηχανισμό αποθήκευσης ενέργειας στο εσωτερικό τους, δημιουργούνται δύο μεγάλες κατηγορίες :

- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους
- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά τους αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης.

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία PCMs (**P**hase **C**hange **M**aterials). Ως υποψήφια PCMs θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν μεταξύ στερεής και υγρής φάσης, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μια φάση σε άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια κατάσταση κατά την αλλαγή φάσης δεν ενδιαφέρουν λόγω των πρακτικών δυσκολιών που παρουσιάζει η μεγάλη αλλαγή της πυκνότητας αλλά και της ίδιας της φύσης των αερίων. Το ιδανικό PCM θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξης σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση υπόψυξης, να είναι χημικά σταθερό, φτηνό στην παραγωγή του, να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό και εύφλεκτο. Τα υλικά που έχουν μελετηθεί τα τελευταία 40 χρόνια είναι τα ένυδρα άλατα, οι παραφίνες, τα λιπαρά οξέα και εύτηκτα μίγματα οργανικών και μη οργανικών συστατικών **[7]**.

Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας στην πέτρα είχε παρατηρηθεί από τους αρχαίους χρόνους και αξιοποιηθεί στη κατασκευή των κατοικιών. Η χρήση όμως υλικών που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα παρουσιάζει διάφορα προβλήματα με κυριότερα την υπερβολική ποσότητα του υλικού που απαιτείται και τις ανεπιθύμητες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου.

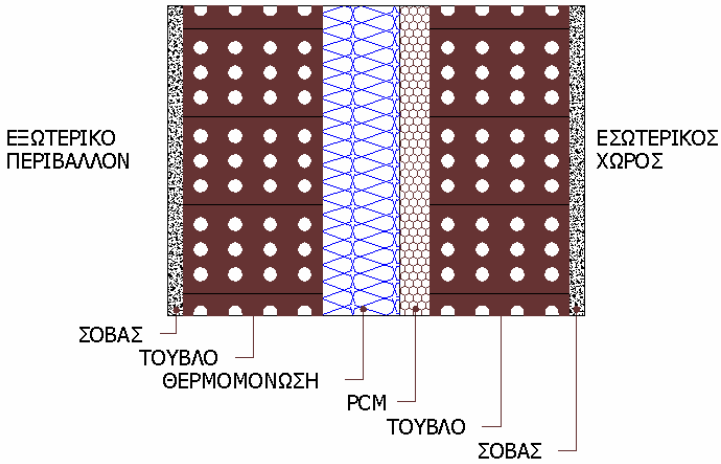
Τα δομικά υλικά από τα οποία χρησιμοποιούνται στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σε ολόκληρο το εύρος των θερμοκρασιών χρήσης τους. Ομοίως συμπεριφέρονται και τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Αντίθετα με αυτή τη προσέγγιση μόνωσης των κτιρίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υλικά που θα αποθήκευαν τη θερμότητα που εισέρχεται στο κτίριο από το κέλυφος (περίοδος θέρους) ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία των χώρων ή να αποθηκεύουν τη θερμότητα που προσπίπτει στο κτίριο με μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ώστε μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας (περίοδος χειμώνα).

Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μεγίστων ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης σε ώρες εκτός των περιόδων μέγιστης ζήτησης του συστήματος διανομής ενέργειας ή η εξομάλυνση της καμπύλης ενεργειακής απαίτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την εικοσιτετράωρη λειτουργία της. Οι έρευνες που έχουν γίνει και γίνονται καθώς και οι εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί αποδεικνύουν ότι δομικά υλικά τα οποία έχουν εμποτιστεί με PCM ή δομικές κατασκευές που εμπεριέχουν PCM, μπορούν να αποθηκεύσουν 5 – 14 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά **[7]**.

Η εφαρμογή τους στις κτιριακές εγκαταστάσεις μπορεί να γίνει είτε με χρήση των PCMs αυτούσια ως στρώμα υλικού μέσα στην τοιχοποιία ή σαν συστατικό σύνθετου υλικού με κύριο συστατικό το γύψο ή το τσιμέντο (π.χ. γυψοσανίδα με πρόσθετο συστατικό το PCM ή σοβάς με PCM). Η χρήση των PCMs σε συνδυασμό με γυψοσανίδα συνήθως γίνεται σε αναλογία 20-30% PCM κατά βάρος. Ειδικά όταν χρησιμοποιούνται οργανικά PCMs η ενσωμάτωση τους σε υλικά με υψηλό δείκτη πυραντίστασης εξασφαλίζει εν μέρη τη μη ανάφλεξη των PCMs σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η ενσωμάτωση των PCMs σε υλικά όπως ο γύψος ή το τσιμέντο εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμη και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και τη μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα του περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με την κατηγορία του υλικού (λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση του PCM σε προστατευτικό κάλυμμα πριν την ενσωμάτωσή τους σε δομικό υλικό. Για την κατηγορία των παραφινών πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει τη συμβατότητά τους με το γύψο, καθώς και με το τσιμέντο και γι’ αυτό το λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμποτισμένα με παραφίνες **[7]**.

Το πλέον προσιτό δείγμα χρήσης των PCMs, ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους, είναι η εφαρμογή τους στην τοιχοποιία. Κατά την περίοδο του θέρους η θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον εισέρχεται στο κέλυφος του κτιρίου διαπερνόντας τα στρώματα του σοβά και του τούβλου και αντιμετωπίζει τη θερμική αντίσταση της μόνωσης. Στη κοινή κατασκευή τοιχοποιίας όσο ποσό θερμότητας διαπεράσει το στρώμα της μόνωσης θα εισέλθει στο χώρο μέσο των στρωμάτων του τούβλου και του σοβά. Στην περίπτωση της ενισχυμένης τοιχοποιίας με PCM το επιπλέον ποσό θερμότητας αποθηκεύεται στο υλικό και δεν περνά προς τον εσωτερικό χώρο.

Κατά την περίοδο του χειμώνα ο αέρας του εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Σ' αυτή την περίπτωση η θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο διαπερνά τα στρώματα του σοβά και του τούβλου και εγκλωβίζεται στο PCM μην αφήνοντας να διαφύγει θερμότητα προς το περιβάλλον. Στη συμβατική περίπτωση όσο ποσό θερμότητας διαφεύγει από το στρώμα της μόνωσης καταλήγει στο περιβάλλον.



Σχήμα 2.9 - Διάταξη ενσωμάτωσης PCM σε τοιχοποιία που θα κατασκευάστει στο εργαστήριο Κλιματισμού Ε.Μ.Π. **[7]**

2.4. ΕΥΡΩΠΑΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ

Στο πλαίσιο της προστασίας του περιβάλλοντος και της εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και ζεστό νερό χρήσης στον οικιακό και τριτογενή κτιριακό τομέα, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εξέδωσαν την οδηγία 2002/91/ΕΚ της 16ης Δεκεμβρίου 2002 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων **[8]**, και στη συνέχεια αναδιατυπώθηκε με την οδηγία 2010/31/ΕΕ της 19ης Μαΐου 2010 **[9]**. Με τις οδηγίες αυτές επιχειρείται να δοθεί σημαντική ώθηση τόσο των νέων, όσο και των υφιστάμενων κτιρίων, γεγονός που σηματοδοτεί τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζεται η αρχιτεκτονική και η οικοδομική πρακτική μέχρι σήμερα.

Οι οδηγίες εντάσσονται στο πλαίσιο των πρωτοβουλιών της Κοινότητας σχετικά με την αλλαγή του κλίματος (υποχρεώσεις βάσει του Πρωτοκόλλου του Κιότο) και την ασφάλεια του εφοδιασμού (Πράσινη Βίβλος για την ασφάλεια του εφοδιασμού). Αφενός, η Κοινότητα εξαρτάται με αυξανόμενο ρυθμό από εξωτερικές πηγές ενέργειας και, αφετέρου, αυξάνονται οι εκπομπές αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η Κοινότητα έχει πολύ περιορισμένη δυνατότητα να μεταστρέψει τον ενεργειακό εφοδιασμό, αλλά μπορεί να επηρεάσει τη ζήτηση. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, αποτελεί επομένως μία από τις πιθανές λύσεις γι' αυτά τα δύο προβλήματα.

Η κατανάλωση ενέργειας για τις υπηρεσίες που σχετίζονται με τα κτίρια αντιπροσωπεύει σχεδόν το ένα τρίτο της ενεργειακής κατανάλωσης της Ευρωπαϊκής

Ένωσης. Η Επιτροπή θεωρεί ότι, με την ανάληψη πρωτοβουλιών στον τομέα αυτό, μπορεί να υπάρξει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, γεγονός που θα συμβάλει στην επίτευξη των στόχων σχετικά με την αλλαγή του κλίματος και την ασφάλεια του εφοδιασμού. Χρειάζεται να θεσπισθούν μέτρα σε κοινοτικό επίπεδο, ώστε να αντιμετωπισθούν αυτές οι προκλήσεις κοινοτικού χαρακτήρα **[10]**.

Παρότι υπάρχει πράγματι οδηγία σχετικά με την ενεργειακή πιστοποίηση των κτιρίων (οδηγία 93/76/ΕΟΚ, η οποία καταργήθηκε με την οδηγία 2006/32/ΕΚ), η οδηγία αυτή εκδόθηκε σε διαφορετικό πολιτικό πλαίσιο, πριν από τη σύναψη της συμφωνίας του Κιότο και πριν διατυπωθούν αμφιβολίες αναφορικά με την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης **[11]**.

Στόχος των οδηγιών είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων εντός της Κοινότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις εξωτερικές κλιματολογικές και τοπικές συνθήκες, καθώς και τις κλιματικές απαιτήσεις των εσωτερικών χωρών και τη σχέση κόστους /οφέλους. Οι στόχοι τις οδηγίας είναι:

- η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, δηλαδή τη μείωση της ποσότητας ενέργειας που καταναλώνεται για θέρμανση, ψύξη, εξαερισμό, φωτισμό και παροχή ζεστού νερού χρήσης ενός κτιρίου.
- η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως της ηλιακής, για τη θέρμανση, ψύξη, φυσικό φωτισμό και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.
- ο περιορισμός των εκπομπών ρύπων (π.χ. CO_2) που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, προκειμένου να εξασφαλισθεί η προστασία του περιβάλλοντος.
- η χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, τα οποία δεν απαιτούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας για την παραγωγή τους και δεν εκπέμπουν τοξικές ουσίες στον κύκλο ζωής τους.
- η σύγκλιση των κτιριακών προτύπων προς αυτά των κρατών - μελών, που έχουν ήδη υψηλά επίπεδα απαιτήσεων.

Οι οδηγίες θεσπίζουν απαιτήσεις που αφορούν:

- το γενικό πλαίσιο για μια κοινή μεθοδολογία υπολογισμού της ολοκληρωμένης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων
- την εφαρμογή ελαχίστων απαιτήσεων για την ενεργειακή απόδοση των νέων κτιρίων
- την εφαρμογή ελαχίστων απαιτήσεων για την ενεργειακή απόδοση μεγάλων υφιστάμενων κτιρίων στα οποία γίνεται μεγάλης κλίμακας ανακαίνιση
- την ενεργειακή πιστοποίηση των κτιρίων
- την τακτική επιθεώρηση των λεβήτων και των εγκαταστάσεων κλιματισμού κτιρίων και, επί πλέον, μια αξιολόγηση των εγκαταστάσεων θέρμανσης των οποίων οι λέβητες είναι παλαιότεροι των 15 ετών.

Η κοινή μεθοδολογία υπολογισμού θα πρέπει να περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ενεργειακή απόδοση, και όχι πλέον μόνον την ποιότητα της μόνωσης του κτιρίου. Στην εν λόγω ολοκληρωμένη προσέγγιση θα πρέπει να συνυπολογίζονται παράγοντες όπως οι εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης, οι εγκαταστάσεις φωτισμού, η θέση και ο προσανατολισμός του κτιρίου, η ανάκτηση θερμότητας κ.λπ.

Η ενεργειακή πιστοποίηση γίνεται με τον επιτόπου έλεγχο της ενεργειακής επίδοσης του κτιρίου κατά τη λειτουργία του. Καταγράφονται, δηλαδή, οι πραγματικές καταναλώσεις ενέργειας του κτιρίου, οι παράγοντες που τις επηρεάζουν και οι δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Τα αποτελέσματα της ενεργειακής πιστοποίησης καταγράφονται σε ένα ειδικό έντυπο, που ονομάζεται Δελτίο Ενεργειακής Ταυτότητας Κτιρίου (ΔΕΤΑ), από το οποίο προκύπτει η οριστική κατάταξη του κτιρίου στην αντίστοιχη κατηγορία ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης. Το ΔΕΤΑ θεωρείται απαραίτητο και αναπόσπαστο στοιχείο της οικοδομικής άδειας κάθε κτιρίου και χωρίς αυτό, είναι αδύνατη η ολοκλήρωση οποιασδήποτε δικαιοπραξίας (πώληση, ενοικίαση, μεταβίβαση κλπ) που αφορά το κτίριο. Τέλος το ΔΕΤΑ, το οποίο έχει ισχύ το πολύ 10 χρόνια, περιλαμβάνει συστάσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με το κόστος και επιτρέπει στους καταναλωτές να αξιολογήσουν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

Τα κράτη μέλη μεριμνούν ώστε η πιστοποίηση των κτιρίων, η σύνταξη των ΔΕΤΑ και η επιθεώρηση των λεβήτων και των συστημάτων κλιματισμού, να διεξάγονται με ανεξάρτητο τρόπο από ειδικευμένους ή/και διαπιστευμένους επιστήμονες, τους ενεργειακούς επιθεωρητές, είτε αυτοί είναι ελεύθεροι επαγγελματίες είτε είναι υπάλληλοι δημοσίων ή ιδιωτικών οργανισμών.

Κεφάλαιο 3^{ο}

ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα είδη των μετρήσεων που λαμβάνουν χώρα στις πειραματικές διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι αρχές λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων για τις μετρήσεις θερμοκρασίας, ροής θερμότητας, υγρασίας και μετεωρολογικών δεδομένων καθώς επίσης και για τα συστήματα συλλογής και καταγραφής των μετρήσεων.

3.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Δύο φυσικά φαινόμενα αποτελούν τη βάση της αρχής λειτουργίας των κυριοτέρων τύπων μεταλλακτών θερμοκρασίας:

- Η παραγωγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ζεύγος αγωγών από διαφορετικά μέταλλα
- Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης αγωγών και ημιαγωγών συναρτήσει της θερμοκρασίας

Έτσι, σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας, διακρίνονται οι κυριότεροι τύποι αισθητήρων θερμοκρασίας:

- το θερμοστοιχείο
- το thermistor

Η επιλογή του κατάλληλου είδους αισθητήρα καθορίζεται από τις απαιτήσεις ακριβείας και το εύρος των μετρήσεων. Κάθε είδος αισθητήρα έχει ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας, ακρίβεια και κόστος. Ο Πίνακας 3.1 συγκεντρώνει μερικά τυπικά χαρακτηριστικά για κάθε τύπο αισθητήρα.

Πίνακας 3.1 - Βασικά χαρακτηριστικά θερμοστοιχείων και thermistor

Παράμετρος	**Θερμοστοιχείο**	**Thermistor**
Θερμοκρασιακό Εύρος	-210^{o}C έως 1820^{o}C	-80^{o}C έως 150^{o}C
Μετρούμενο μέγεθος	Τάση	Αντίσταση
Ευαισθησία	6μV/^{o}C με 60μV/^{o}C	~ 400Ω/^{o}C
Ακρίβεια αισθητήρα	0.5^{o}C με 5^{o}C	0.1^{o}C με 1^{o}C
Κόστος σε U.S.$	1$ / ft	10$ με 100$
Αντοχή	Στιβαρό	Εύθραυστο

3.1.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

Παρά την αυξανόμενη ποικιλία αισθητήρων θερμοκρασίας, τα θερμοστοιχεία παραμένουν οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες για την μέτρηση της

θερμοκρασίας, εξαιτίας της προσαρμοστικότητας, της απλότητας και της ευκολίας στη χρήση τους.

Θερμοστοιχείο (ή θερμοζεύγος) είναι κάθε ζεύγος, ηλεκτρικά αγώγιμων και θερμοηλεκτρικά ανόμοιων υλικών συνδεδεμένων σε μία διεπαφή. Η αρχή λειτουργίας των θερμοστοιχείων στηρίζεται στο φαινόμενο Seebeck (1821), σύμφωνα με το οποίο:

Αν δύο μεταλλικοί αγωγοί, οπωσδήποτε διαφορετικών υλικών, έλθουν σε επαφή, τότε στα άκρα τους αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη. Η ηλεκτρεγερτική αυτή δύναμη, οφείλει την ύπαρξή της σε καθαρά θερμικά αίτια και το μέγεθός της εξαρτάται από το είδος των υλικών των δύο μεταλλικών αγωγών και από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο σημείο επαφής τους.

Η πιο πάνω παρατήρηση του Seebeck φέρει και την ονομασία θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, ενώ η παραγόμενη ΗΕΔ ονομάζεται και θερμοηλεκτρική τάση **[12]**. Η συνάρτηση που δίνει την παραγόμενη τάση συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι ένα πολυώνυμο, της μορφής:

$$V(T) = \sum_{i=0}^{n} d_i T^i \qquad (3.1)$$

όπου οι συντελεστές d_i εξαρτώνται από τον τύπο του θερμοστοιχείου και το εύρος της θερμοκρασίας μέτρησης. Ο συντελεστής d_i μειώνεται αυξανομένου του i, πρακτικά το πλήθος n των συντελεστών είναι περίπου 10.

Είναι προφανές ότι εάν μετρηθεί αυτή η τάση που παράγεται από ζεύγος διαφορετικών μεταλλικών αγωγών, τότε θα μπορεί να προσδιορισθεί η θερμοκρασία στη διεπαφή των αγωγών χρησιμοποιώντας την αντίστροφή συνάρτηση του παραπάνω πολυωνύμου. Έτσι το πολυώνυμο που δίνει τη θερμοκρασία συναρτήσει της ηλεκτρικής τάσης είναι ένα πολυώνυμο της μορφής :

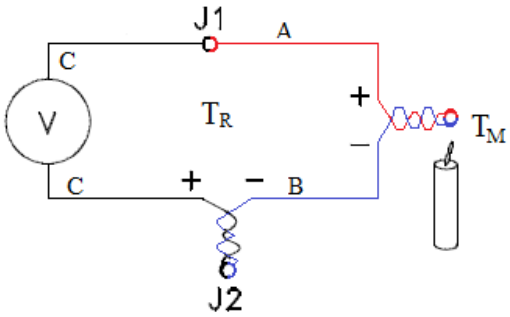
$$T(V) = c_0 + c_1 V + c_2 V^2 + \ldots + c_i V^i \qquad (3.2)$$

όπου οι συντελεστές c_0, c_1, c_2, ..., c_i είναι σταθερές που εξαρτώνται από το εύρος της θερμοκρασίας μέτρησης και όσο ο δείκτης i αυξάνεται η σταθερά c_i μειώνεται ραγδαία. Πρακτικά ο δείκτης i κυμαίνεται από 0 έως το πολύ 9, ανάλογα με τον τύπο του θερμοστοιχείου. Το σφάλμα αποκοπής θα κυμαίνεται γύρω στο $\pm 0.04\,^{o}\mathrm{C}$.

Για να μετρηθεί όμως η θερμοηλεκτρική τάση, η οποία παράγεται στο σημείο επαφής των δύο μεταλλικών αγωγών, θα πρέπει να συνδεθεί ένα βολτόμετρο, σχηματίζοντας ένα θερμοηλεκτρικό κύκλωμα. Για την ανάλυση ενός θερμοηλεκτρικού κυκλώματος έχουν διατυπωθεί οι εξής κανόνες:

- Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται από θερμοηλεκτρικό κύκλωμα προκύπτει ως το αλγεβρικό άθροισμα των επί μέρους θερμοηλεκτρικών τάσεων, των αναπτυσσόμενων στα σημεία επαφής των αγωγών που συγκροτούν το κύκλωμα.

– Αν όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τότε η αναπτυσσόμενη, από το θερμοηλεκτρικό κύκλωμα, ΗΕΔ έχει τιμή ίση με μηδέν.



Σχήμα 3.1 - Θερμοηλεκτρικό κύκλωμα

Σύμφωνα με τα πιο πάνω, η ένδειξη του βολτομέτρου $\overline{V}$ στο κύκλωμα του Σχήματος 3.1 θα ισούται:

$$V = (V_{AB})_{T_M} + (V_A)_{T_R} + (V_B)_{T_R} \qquad (3.3)$$

όπου

T_M η θερμοκρασία στο σημείο μετρήσεως, όπου τοποθετείται η επαφή των δύο αγωγών, Α και Β, του θερμοστοιχείου και ονομάζεται θερμοκρασία μετρήσεως.

T_R η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται και οι δύο επαφές των αγωγών του θερμοστοιχείου με τους αγωγούς του μοναδικού τρίτου μετάλλου (C), με τους οποίους το θερμοστοιχείο συνδέεται με το όργανο μετρήσεως. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία αναφοράς.

Αν υποτεθεί ότι η ίδια θερμοκρασία T_R που επικρατεί στο σημείο αναφοράς, επικρατεί και στο σημείο μετρήσεως, δηλαδή όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία T_R, τότε θα ισχύει:

$$V = (V_{AB})_{T_R} + (V_A)_{T_R} + (V_B)_{T_R} = 0 \qquad (3.4)$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$V = (V_{AB})_{T_M} - (V_{AB})_{T_R} \qquad (3.5)$$

Δηλαδή, η ένδειξη του βολτομέτρου ισούται με την διαφορά των θερμοηλεκτρικών τάσεων, που παράγονται από το ζεύγος των αγωγών του θερμοστοιχείου, που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες του σημείου μετρήσεως και του σημείου αναφοράς. Αυτό ισχύει μόνο όταν και οι δύο αγωγοί του θερμοστοιχείου συνδέονται με την μετρητική διάταξη με ένα μόνο είδος μεταλλικού αγωγού και όταν και οι δύο επαφές του αγωγού συνδέσεως με τους δύο αγωγούς του θερμοστοιχείου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τη θερμοκρασία αναφοράς T_R.

Το πολυώνυμο V(T) επιτρέπει την αναγωγή θερμοκρασιών σε ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις Seebeck και αντιστρόφως, ανάλογα με το είδος του θερμοστοιχείου που χρησιμοποιείται. Οι συντελεστές του πολυωνύμου δίνονται συνήθως υπό μορφή πινάκων, για τα διάφορα είδη θερμοστοιχείων. Οι πίνακες αυτοί συνήθως δίνουν την ηλεκτρεγερτική δύναμη στο σημείο μετρήσεως με βάση ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη στο σημείο αναφοράς είναι 0V, όταν η θερμοκρασία είναι 0°C, αλλά η τιμή αυτή είναι αυθαίρετη. Ως εκ τούτου, η μέτρηση και η μετατροπή γίνεται με βάση τη Σχέση 3.6, εφόσον η επαφή αναφοράς διατηρείται τεχνητά στη θερμοκρασία των 0°C, δηλαδή σε περιβάλλον τηκόμενου πάγου (ice point).:

$$V(T) = d_0 + d_1 T + d_2 T^2 + \ldots \text{ , } d_0=0 \qquad (3.6)$$

Παλαιότερα, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και σήμερα, οι επαφές αναφοράς διατηρούνται πράγματι μέσα σε θερμικά μονωμένο δοχείο όπου τήκεται πάγος. Με την ανάπτυξη των ημιαγωγών έχουν κατασκευασθεί «ηλεκτρονικά σημεία πάγου» οι οποίες είναι πολύ μικρές σε μέγεθος μονάδες που συγκροτούνται από ένα τρανζίστορ ευαίσθητο στις μεταβολές της θερμοκρασίας και αντισταθμίζει την ηλεκτρεγερτική δύναμη του σημείου αναφοράς, που πλέον βρίσκεται ελεύθερο στο περιβάλλον.

Το αντίστροφο πολυώνυμο T(V) για συγκεκριμένο ζεύγος θερμοστοιχείου είναι σε διάφορα όρια θερμοκρασιών πρακτικά μία σταθερά k. Ο Πίνακας 3.2 παρέχει μερικά χρήσιμα στοιχεία για τους διαφόρους τύπους θερμοστοιχείων, καθώς και μία ενδεικτική τιμή της σταθεράς k, στην περιοχή 0-100°C. Επίσης δίνεται και το πρόσημο του δυναμικού των δυο μεταλλικών αγωγών του θερμοστοιχείου καθώς θα πρέπει να συνδέεται ο αγωγός του θερμοστοιχείου που παρέχει το θετικό δυναμικό (+) προς το θετικό ακροδέκτη του συνεχούς ρεύματος βολτομέτρου.

Πίνακας 3.2 - Βασικά στοιχεία διαφόρων τύπων θερμοστοιχείων

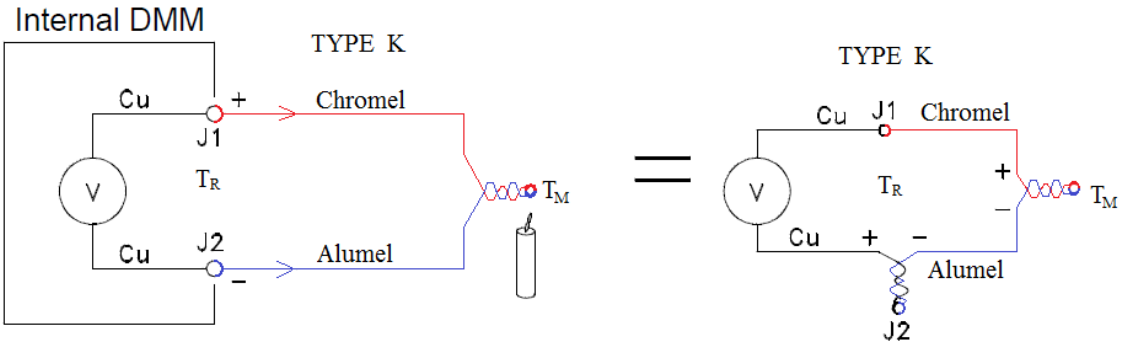
Τύπος	**Υλικά Αγωγών**	**Εμπορική Ονομασία**	**Περιοχή Λειτουργίας**	**Σφάλμα αισθητήρα**	**k μV/°C (0-100°C)**	**Παρατηρήσεις**
J	Fe(+) / Cu(55%), Ni(45%)(-)	Iron - Constantan	-210-1200°C	± 1.1-2.2°C	52.7	Κατάλληλο για χρήση αναγωγικό περιβάλλον
K	Ni(90%),Cr(10%)(+)/Ni(95%) ,Al(2%),Mn(2%),Si(1%)(-)	Chromel - Alumel	-200-1370°C	± 1.1-2.2°C	41.0	Κατάλληλο για χρήση σε καθαρό οξειδωτικό περιβάλλον
T	Cu (+) / Cu(55%),Ni(45%)(-)	Copper - Constantan	-270-400°C	± 0.5-1.0°C	42.8	Κατάλληλο για χρήση σε ελαφρά αναγωγικό και οξειδωτικό περιβάλλον Χαμηλές θερμοκρασίες
E	Ni(90%),Cr(10%)(+) / Cu(56%), Ni(45%)(-)	Chromel - Constantan	-270-1000°C	± 1.0-1.7°C	63.2	Κατάλληλο για χρήση σε κενό ή σε αδρανή περιβάλλον
R	Pt(87%),Rh(13%)(+) / Pt(-)	Platinum 13% rhodiuom-Platinum	-50-1767°C	± 0.6-1.5°C	6.5	Παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση
S	Pt(90%),Rh(10%)(+) / Pt(-)	Platinum 10% rhodiuom-Platinum	-50-1767°C	± 0.6-1.5°C	6.4	Παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση
B	Pt(70%), Rh(30%) (+) / Pt(94%),RH(6%)(-)	Platinum 30% rhodiuom-Platinum 6% rhodium	100-1600°C	± 0.5°C	~ 0.4	Παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση

3.1.2. ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΟΥ 'Κ' ΤΟΥ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (HUKSEFLUX)

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι τύπου Κ. Δηλαδή ο ένας αγωγός (θετικός) κάθε θερμοστοιχείου είναι από νικελιοχρωμιούχου κράμα (Ni(90%) και Cr(10%)) και δεύτερος (αρνητικός) από νικελιοαργιλλιούχο κράμα (Ni(95%), Al(2%), Mn(2%), Si(1%)). Ένα από τα περιεχόμενα μέταλλα του θερμοστοιχείου είναι το νικέλιο, το οποίο είναι μαγνητικό.

Γενικά, τα θερμοστοιχεία αυτού του είδους είναι τα πιο συνηθισμένα με ευαισθησία περίπου 41μV/°C. Είναι πολύ φθηνά και είναι διαθέσιμα μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων σε περιοχή λειτουργίας -200 έως 1370°C.

Σχήμα 3.2 - Θερμοστοιχείο τύπου Κ της εταιρείας Hukseflux



Σχήμα 3.3 - Θερμοηλεκτρικό κύκλωμα θερμοστοιχείων τύπου Κ

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι ανά δύο αντιστοιχισμένα, αυτό σημαίνει ότι είναι κατασκευασμένα από το ίδιο αρχικό καλώδιο και ελεγμένα για την ομοιόμορφη απόδοση ώστε η ακρίβεια στη θερμοκρασιακή διαφορά δύο αντιστοιχισμένων θερμοστοιχείων να είναι καλύτερη από την ακρίβεια στη μέτρηση απόλυτης θερμοκρασίας, γύρω στο ±0.1°C.

Το ζευγάρι των θερμοστοιχείων του πρώτου συστήματος μετρητικών είναι συνδεδεμένο με καλώδιο 10 μέτρων, ενώ το άλλο με 20 μέτρων, επιτρέποντας έτσι τη συλλογή δεδομένων για τη μέτρηση της θερμικής αντίστασης μιας τοιχοποιίας από δύο απομακρυσμένα σημεία.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμοστοιχείων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

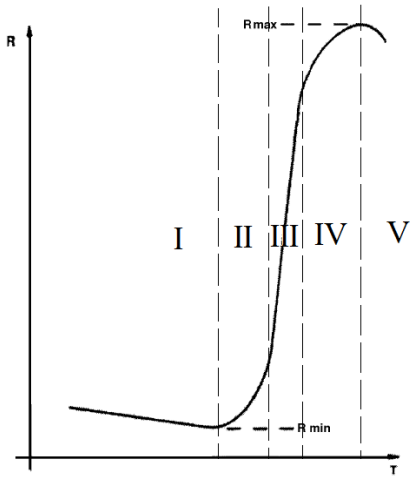
Πίνακας 3.3 - Τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμοστοιχείων της Hukseflux

Παράμετρος	**Μονάδα**	**Τιμή**
Περιοχή λειτουργίας	°C	-30 έως 80°C
Ακρίβεια σε απόλυτη θερμοκρασία	°C	±2
Ακρίβεια σε θερμοκρασιακή διαφορά	°C	±0.1
Ευαισθησία	μV/°C	41

3.1.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ THERMISTOR

Το thermistor είναι ένα στοιχείο του οποίου η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Σε αντίθεση όμως με άλλους αισθητήρες με την ίδια ιδιότητα, όπως τα θερμόμετρα αντιστάσεως RTD, τα thermistor αποτελούνται από ημιαγωγούς κεραμικού υλικού (π.χ. οξείδιο μαγγανίου, νικελίου, κοβαλτίου κ.λπ.). Τα thermistor έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία από τα θερμοστοιχεία ή τα RTDs και αυτό τα κάνει ιδανικά για μετρήσεις με πολύ μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας. Τα thermistor είναι εντελώς μη-γραμμικά σε υψηλές θερμοκρασίες και η καλύτερη περιοχή λειτουργίας τους είναι κάτω από 100 °C. Ανάλογα με το είδος του υλικού ένα thermistor μπορεί να έχει είτε αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας, δηλαδή η αντίστασή του να μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (negative temperature coefficient - NTC), είτε θετικό συντελεστή θερμοκρασίας (positive temperature coefficient - PTC).

Υπάρχουν δύο ειδών thermistor τύπου PTC: τα thermistor τύπου διακόπτη και τα thermistor πυριτίου. Τα thermistor PTC τύπου διακόπτη αποτελούνται από ενώσεις βαρίου, μολύβδου, στροντίου και τιτανίου. Το Σχήμα 3.4 δείχνει ποιοτικά τη σχέση της αντίστασης με τη θερμοκρασία για αυτού του τύπου τα thermistor.



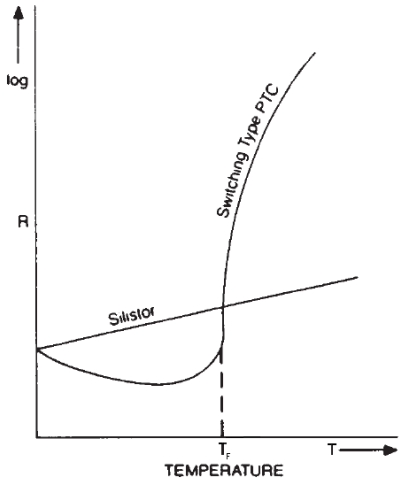
Σχήμα 3.4 - Σχέση αντίστασης - θερμοκρασίας για PTC thermistor τύπου διακόπτη

Σε χαμηλές θερμοκρασίες κάτω από 0°C μέχρι την R_{min} (περιοχή I), η τιμή της αντίστασης είναι μικρή παρουσιάζοντας ένα μικρό αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας

της τάξης του -1% $°C^{-1}$. Με την αύξηση της θερμοκρασίας (περιοχή II), ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης γίνεται θετικός και η αντίσταση αυξάνεται. Στο όριο ή στην θερμοκρασία διακοπής (περιοχή III), ο ρυθμός αύξησης της αντίστασης αυξάνεται ραγδαία και η χαρακτηριστική καμπύλη PTC γίνεται πολύ απότομη. Στην περιοχή διακοπής, ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης μπορεί να φτάσει και 100% $°C^{-1}$ παρουσιάζοντας υψηλή αντίσταση στη διάταξη. Σε θερμοκρασίες πέρα από την περιοχή διακοπής (περιοχή IV), η αντίσταση φτάνει μια μέγιστη τιμή πέραν της οποίας ο συντελεστής θερμοκρασίας γίνεται και πάλι αρνητικός (περιοχή V). Η θερμοκρασία διακοπής για τα thermistor ποικίλει μεταξύ 80°C και 240°C μεταβάλλοντας τη χημική σύνθεση των κεραμικών. Τυπικές εφαρμογές αυτών του είδους των thermistor PTC είναι για προστασία υπερθέρμανσης, για περιορισμό του ηλεκτρικού ρεύματος και για αυτο-ρυθμιζόμενη θέρμανση. Ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης για μια διάταξη που το χρησιμοποιεί ως θερμαντικό στοιχείο είναι συνήθως 25% $°C^{-1}$, για θερμοκρασία διακοπής 240 °C.

Τα PTC thermistor πυριτίου, μερικές φορές αναφέρονται και ως silistors, στηρίζονται στο μεγαλύτερο μέρος στις προσμείξεις πυριτίου, παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική σχέση αντίστασης-θερμοκρασίας με συντελεστή θερμοκρασίας περίπου 0.7 με 0.8 % $°C^{-1}$, αλλά μπορεί επίσης να παρουσιάζουν και μια περιοχή αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας, για θερμοκρασίες άνω των 150°C. Οι πιο συνήθεις εφαρμογές αυτών των thermistor είναι σε διατάξεις αντιστάθμισης των ημιαγωγών και σε κυκλώματα **[13]**.

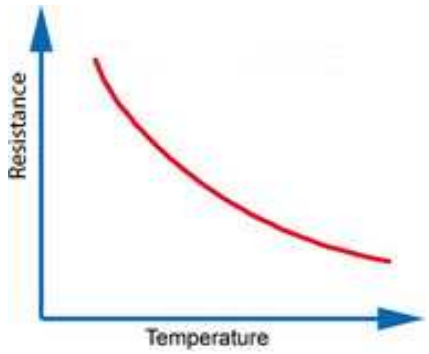
Στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα του σχήματος 3.5 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της αντίστασης των thermistor PTC τύπου διακόπτη και πυριτίου με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.5 - Σχέση αντίστασης-θερμοκρασίας σε thermistor PTC τύπου διακόπτη και πυριτίου

Τα thermistor τύπου NTC περιέχουν οξείδια μετάλλων, όπως οξείδια χρωμίου, κοβαλτίου, χαλκού, σιδήρου, μαγνησίου, νικελίου και τιτανίου. Αυτοί οι αισθητήρες παρουσιάζουν μια μονότονη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης με αύξηση της

θερμοκρασίας. Η χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης-θερμοκρασίας των NTC thermistor είναι μη γραμμική, όμως ο λογάριθμος της αντίστασης ενός NTC thermistor είναι περίπου γραμμική συνάρτηση της αντίστροφης απόλυτης θερμοκρασίας. Εξαιτίας αυτής της μη γραμμικότητας της εξάρτησης της αντίστασης με τη θερμοκρασία, ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης ενός NTC thermistor, αλλάζει με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται ο συντελεστής θερμοκρασίας σε 25°C τυπικά είναι της τάξης των -3 με -5% $°C^{-1}$. Η κλίση β, της χαρακτηριστικής του λογαρίθμου της αντίστασης με την αντίστροφη της απόλυτης θερμοκρασίας (logR-1/T) είναι σχετικά σταθερή. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται μια τυπική χαρακτηριστική ενός NTC thermistor.



Σχήμα 3.6 - Σχέση αντίστασης-θερμοκρασίας σε thermistor NTC

Οι εφαρμογές που συναντώνται τα NTC thermistor περιλαμβάνουν μετρήσεις θερμοκρασίας και συστήματα ελέγχου και αντιστάθμισης.

Για την μέτρηση της θερμοκρασία από ένα thermistor, είναι απαραίτητη η αναγωγή της μετρούμενης αντίστασης σε θερμοκρασία. Μια πιο ακριβείς διαδικασία από την περίπου γραμμική εξάρτηση του λογαρίθμου της αντίστασης με την αντίστροφή της απόλυτης θερμοκρασίας, έχει προταθεί από τους Steinhart και Hart χρησιμοποιώντας την εξής σχέση:

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln R + c \cdot (\ln R)^3 \qquad (3.7)$$

όπου T η θερμοκρασία σε Kelvin και R η μετρούμενη τιμή της αντίστασης των thermistors σε Ω. Οι συντελεστές a,b και c είναι χαρακτηριστικοί για κάθε thermistor.

Η γραφική απεικόνιση της σχέσης της αντίστασης με τη θερμοκρασία, σύμφωνα με την εξίσωση Steinhart και Hart, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.

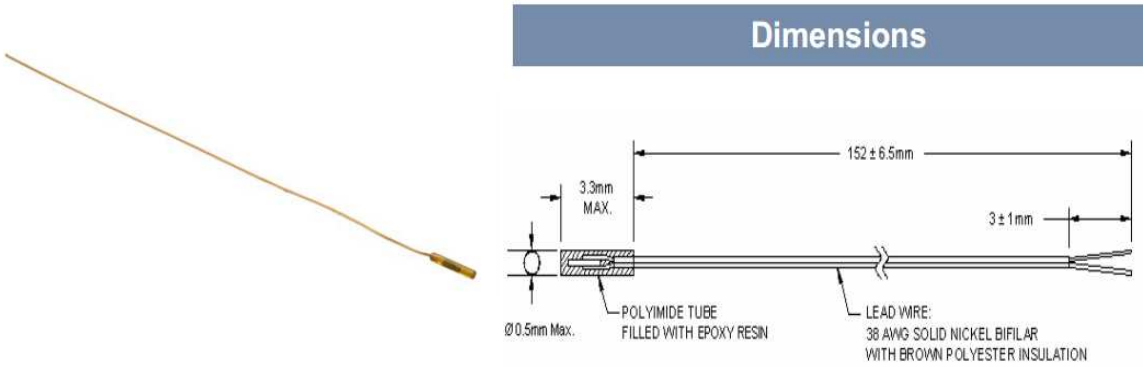
3.1.4. NTC THERMISTOR ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ BETATHERM

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν επίσης οι αισθητήρες thermistor τύπου NTC. Τα thermistors κατασκευάζονται από την εταιρεία Betatherm

και ο τύπος τους είναι Polyimide Micro BetaCHIP Probes (MCD), (10k3MCD1). Στους 25^{o}C η ονομαστική αντίσταση του αισθητήρα είναι 10kΩ.
Το μικρό μέγεθος του αισθητήρα συμβάλλει στην:

- ταχεία απόκριση στις μεταβολές θερμοκρασίας
- εύκολη ενσωμάτωση στα σημεία μέτρησης με μικρή διάμετρο στην άκρη του.

Ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά το χειρισμό του λόγω της μικρής μηχανικής του αντοχής.



Σχήμα 3.7 - Thermistor NTC της εταιρείας Betatherm

Τα thermistors είναι συγκολλημένα με 38 AWG αγωγό με μόνωση πολυεστέρα και τοποθετημένα σε ένα σωλήνα πολυϊμιδίου με θερμικά αγώγιμη εποξική ρητίνη.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4:

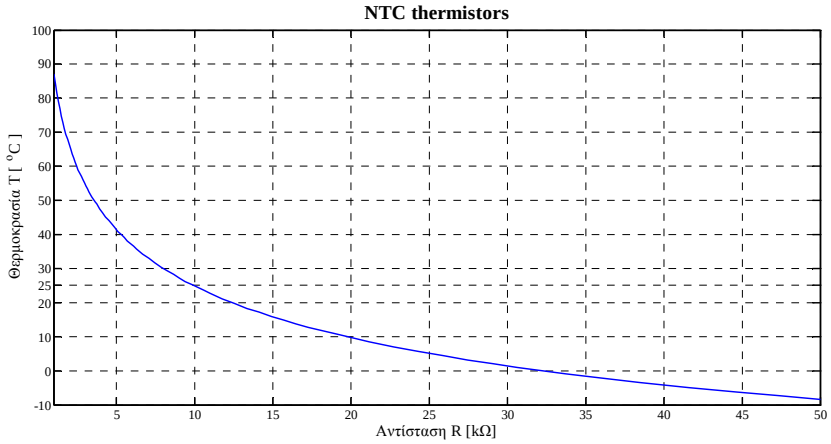
Πίνακας 3.4 - Τεχνικά χαρακτηριστικά των thermistor της εταιρείας Betatherm

Παράμετρος	**Μονάδα**	**Τιμή**
Ονομαστική αντίσταση στους 25 °C	kΩ	10kΩ για 10k3MCD1
Ανοχή θερμοκρασίας στους 25 °C	°C	±0.2
Χρόνος απόκρισης (σε υγρό):	ms	200
Θερμικές απώλειες σε συνθήκες άπνοιας στους 25 °C	mW/°C	0.3
Θερμοκρασιακό εύρος	°C	-40ºC έως +125ºC

Ο υπολογισμός των συντελεστών a, b και c της εξίσωσης Steinhart and Hart για κάθε thermistor που έγινε είτε με εργαστηριακή βαθμονόμηση, είτε με χρήση πινάκων που διατίθενται από τον κατασκευαστή.

Για την εργαστηριακή βαθμονόμηση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Κάθε thermistor βυθίζεται μέσα στην ξηρή δεξαμενή σταθερής θερμοκρασίας FLUK9142 η οποία ρυθμίζεται να αλλάζει ανά 10 λεπτά θερμοκρασία από τους 0^{o}C έως τους 60^{o}C, ανά 5^{o}C. Κάθε φορά που σταθεροποιείται η θερμοκρασία στη δεξαμενή μετράται η αντίσταση κάθε θερμοστοιχείου από τη μονάδα λήψης δεδομένων Agilent και καταγράφεται. Στη συνέχεια έχοντας όλα τα ζεύγη τιμών (R,T) από το κάθε thermistor χαράσσεται η καμπύλη αντίστασης-θερμοκρασίας και κατόπιν προσεγγίζεται από την εξίσωση Steinhart and Hart υπολογίζοντας τους συντελεστές a,b και c της εξίσωσης για το καθένα.

Η γραφική παράσταση της εξίσωσης Steinhart and Hart για ένα thermistor 10k3MCD1, δείχνεται στο γράφημα του Σχήματος 3.8:



Σχήμα 3.8 - Γραφική απεικόνιση της εξίσωσης Steinhart and Hart

Από τη γραφική παράσταση παρατηρείται η ιδιότητα των NTC thermistor να αυξάνεται η αντίσταση με πτώση της θερμοκρασίας. Επίσης είναι εμφανές ότι η τιμή των 25 °C αντιστοιχεί σε αντίσταση 10kΩ, κάτι που προλέγεται από τον τύπο του thermistor (10k3MCD1).

3.2.ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι περισσότερες από τις μεθόδους για μέτρηση θερμοροής βασίζονται σε μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας ή πολύ κοντά στην επιφάνεια ενός υλικού. Συνήθως, αυτό συνεπάγεται τοποθέτηση του αισθητήρα ροής θερμότητας είτε μέσα στο υλικό, είτε στην επιφάνειά του, με στόχο βέβαια την ελαχιστοποίηση της διαταραχής που προκαλεί ο αισθητήρας.

Η ροή θερμότητας στην επιφάνεια του υλικού μπορεί να βρεθεί αν καθοριστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας στη θέση αυτή. Επειδή είναι δύσκολο να τοποθετηθούν αισθητήρες θερμοκρασίας, με την απαιτούμενη ακρίβεια, στο εσωτερικό του υλικού, οι αισθητήρες ροής θερμότητας τοποθετούνται είτε στην επιφάνεια του υλικού, είτε σε μια τρύπα στο υλικό.

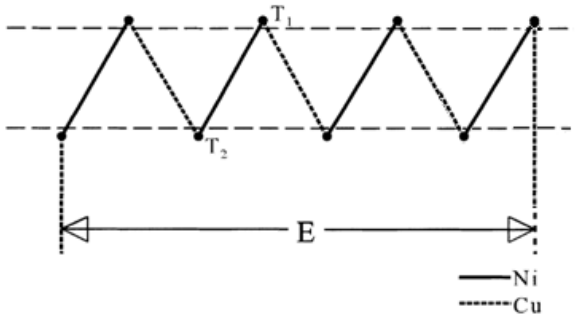
Η μονοδιάστατη ροή θερμότητας κάθετη στην επιφάνεια του υλικού, για μόνιμες συνθήκες, υπολογίζεται από την Σχέση 3.8 .

$$q = \frac{\lambda}{\delta}\left(T_1 - T_2\right) \tag{3.8}$$

όπου η θερμική αγωγιμότητα λ και το πάχος του δ του κάθε αισθητήρα δεν είναι γνωστά με επαρκή ακρίβεια. Για το λόγο αυτόν απαιτείται βαθμονόμηση των αισθητήρων.

Ένα επιπλέον στρώμα μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του υλικού που πιθανόν να απαιτείται για τη στερέωσή του (όπως κάποια κόλλα, ή πάστα) προσθέτει μία επιπλέον θερμική αντίσταση και αυξάνει της θερμικές διαταραχές. Συνήθως όμως τόσο τα υλικά του αισθητήρα ,όσο και το υλικό συγκράτησής του είναι από θερμοαγώγιμα υλικά θεωρώντας την επιπλέον θερμική αντίσταση αμελητέα.

Αν και η διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να μετρηθεί με οποιαδήποτε μέθοδο, συνήθως χρησιμοποιούνται θερμοστοιχεία. Τα θερμοστοιχεία έχουν το πλεονέκτημα να παράγουν τη δική τους τάση εξόδου που αντιστοιχεί στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων. Κατά συνέπεια, αυτά μπορούν να συνδεθούν σε σειρά δημιουργώντας μία συστοιχία θερμοστοιχείων (thermopile) ενισχύοντας την έξοδο από μία δεδομένη διαφορά δυναμικού. Τα περισσότερα από τα ζεύγη των αγωγών (π.χ. χαλκός - νικέλιο) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα στελέχη της συστοιχίας, αλλά η έξοδος θα πρέπει να είναι από το ίδιο υλικό, έτσι ώστε να μην δημιουργείται πρόσθετος κόμβος.



Σχήμα 3.9 - Συστοιχία θερμοστοιχείων για τη μέτρηση θερμοκρασιακής διαφοράς

Η τάση που παράγεται στην έξοδο, Ε, είναι:

$$E = NS_T (T_1 - T_2) \tag{3.9}$$

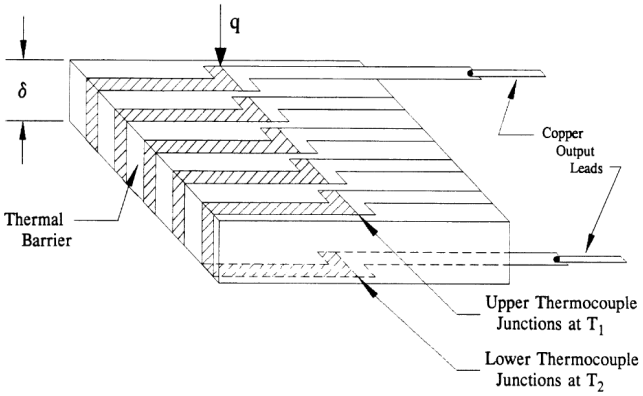
όπου Ν το πλήθος των κόμβων των κόμβων των θερμοστοιχείων ανά ζεύγη και S_T η σταθερά Seebeck ή η θερμοηλεκτρική ευαισθησία του υλικού εκφρασμένη σε V/°C. Η αντίστοιχη ευαισθησία του αισθητήρα είναι:

$$S = \frac{E}{q} = \frac{NS_T \delta}{\lambda} \tag{3.10}$$

Αν και η ευαισθησία του αισθητήρα καθορίζεται από την άμεση βαθμονόμησή του, από το τελευταίο μέρος της εξίσωσης (3.10) καθορίζονται οι συνέπειες κάθε παραμέτρου, κατά τον σχεδιασμό.

Ένας επιτυχημένος σχεδιασμός χρησιμοποιώντας μια συστοιχία θερμοστοιχείων περιγράφεται από τους Ortolano και Hines και κατασκευάζεται από την εταιρεία Rdf Corp **[13]**. Λεπτά τμήματα δύο ειδών μεταλλικών φύλλων τυλίγονται εναλλάξ γύρω από ένα λεπτό πλαστικό φύλλο (Kapton) και συγκολλώντας τις άκρες και των δύο πλευρών, σχηματίζονται οι κόμβοι των θερμοστοιχείων. Συμπεριλαμβάνεται ένα ξεχωριστό θερμοστοιχείο για να παρέχει τη θερμοκρασία του αισθητήρα. Οι εύκαμπτοι

αισθητήρες λεπτού-φύλλου έχουν πάχος 75μm μέχρι 400μm και μπορούν να κολληθούν σε διαφόρων μορφών επιφάνειες, για θερμοκρασίες όμως κάτω των 250°C και για θερμορροές μικρότερες από 100kW/m^2. Οι αισθητήρες αυτοί καλύπτουν πολλές βιομηχανικές και ερευνητικές εφαρμογές. Η απόκριση μπορεί να είναι μέχρι και τα 20ms, αλλά αν η συχνότητα της διαταραχής δεν είναι μικρότερη από μερικά Hz, τα μεταβαλλόμενα σήματα μπορούν να εξασθενίσουν.



Σχήμα 3.10 - Συστοιχία θερμοστοιχείων αισθητήρα ροής θερμότητας

Ένας παρόμοιος σχεδιασμός χρησιμοποιεί συγκολλημένο σύρμα για τη δημιουργία της συστοιχίας των θερμοστοιχείων μέσα σε ένα αισθητήρα πάχους 1mm, δίνοντας μεγαλύτερη ευαισθησία στη θερμοροή, αλλά μεγάλη θερμική αντίσταση **[13]**. Οι χρονικές σταθερές είναι τις τάξης του 1s και το θερμοκρασιακό όριο είναι 300°C.

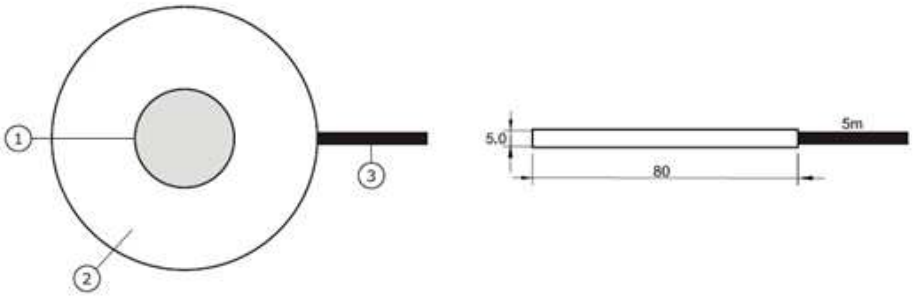
3.2.1. ΘΕΡΜΟΡΟΟΜΕΤΡΑ ΤΟΥ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (HUKSEFLUX)

Στις μετρητικές διατάξεις χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες ροής θερμότητας **HFP01** και **HFP03** της εταιρείας Hukseflux και ο αισθητήρας **HFS-4** της εταιρείας Omega.

- **Αισθητήρας HFP01 της Hukseflux**

Ο αισθητήρας HFP01 είναι ειδικά σχεδιασμένος για μέτρηση πυκνότητας ροής θερμότητας μέσα από το αντικείμενο στο οποίο έχει ενσωματωθεί και είναι ο πιο δημοφιλές αισθητήρας για μέτρηση ροής θερμότητας τόσο διαμέσου ενός κτιριακού κελύφους, όσο και διαμέσου του εδάφους. Ο αισθητήρας του HFP01 αποτελείται από μία συστοιχία θερμοστοιχείων που μετρούν τη θερμοκρασιακή διαφορά διαμέσου του σύνθετου κεραμο-πλαστικού υλικού του αισθητήρα. Ενεργώντας εντελώς παθητικά, ο αισθητήρας παράγει στην έξοδο μία μικρή τάση ανάλογη της τοπικής ροής θερμότητας.

Σχήμα 3.11 - Αισθητήρας HFP01 της Hukseflux



Σχήμα 3.12 - Διαστάσεις του αισθητήρα HFP01*: (1) περιοχή αισθητήρα, (2) σύνθετο κεραμο-πλαστικό υλικό και (3) καλώδιο. Όλες οι διαστάσεις σε mm.*

Η χρήση του HFP01 είναι εύκολη, αφού για την ανάγνωση της εξόδου, το μόνο που χρειάζεται είναι βολτόμετρο ακριβείας, που λειτουργεί στην περιοχή των μVolt. Για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας η τάση θα πρέπει να διαιρεθεί από την ευαισθησία, η οποία είναι σταθερή για το καθένα. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ευαισθησία 63.5 μV/Wm^2 και 63.6 μV/Wm^2.

Ο HFP01 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής αντίστασης του κτιριακού κελύφους σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 9869, ASTM C 1046 / C 1155 **[14,15,16]**.

Η βαθμονόμηση γίνεται στο National Physical Laboratory (NPL) του Ηνωμένου Βασιλείου, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 8302 και ASTM C177 **[17,18]**.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5 - Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα θερμοροής HFP01

Παράμετρος	**Μονάδα**	**Τιμή**
Ευαισθησία	μV/Wm^2	63.5
Ονομαστική αντίσταση	Ω	2
Θερμοκρασιακό εύρος	°C	-30 έως +70°C
Θερμική αντίσταση αισθητήρα	Km^2/W	<6.25·10^{-3}
Περιοχή λειτουργίας	W/m^2	-2000 έως +2000
Αναμενόμενη τυπική ακρίβεια σε τοιχοποιία (για 12 ώρες)		±5%

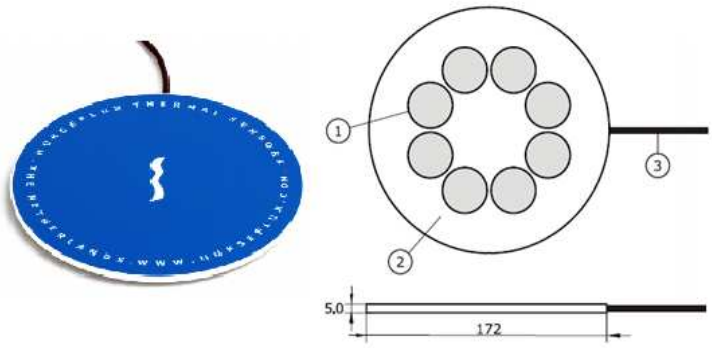
Η θερμική αντίσταση του αισθητήρα είναι μικρότερη από 0.00625 Km^2/W και γι' αυτό το λόγο μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης της κάθε τοιχοποιίας.

- **Αισθητήρας HFP03 της Hukseflux**

Ο αισθητήρας HFP03 είναι ένας εξαιρετικά ευαίσθητος αισθητήρας για μέτρηση ροής θερμότητας δια μέσω του εδάφους ή της τοιχοποιίας. Η θερμική του αντίσταση παραμένει πολύ μικρή εξαιτίας του σύνθετου κεραμο-πλαστικού υλικού του.

Ο HFP03 χρησιμεύει για τη μέτρηση της θερμότητας που ρέει μέσα στο αντικείμενο στο οποίο έχει ενσωματωθεί ή επί το οποίο έχει τοποθετηθεί. Έχει κατασκευαστεί ειδικά για εφαρμογές ανίχνευσης μικρών θερμορροών, της τάξης κάτω των $10W/m^2$, όπως για γεωθερμικές εφαρμογές.

Ο πραγματικός αισθητήρας αποτελείται οχτώ συστοιχίες θερμοστοιχείων που είναι τοποθετημένα περιμετρικά γύρω από το κέντρο του αισθητήρα και μετρούν τη θερμοκρασιακή διαφορά στο κεραμικο-πλαστικό σώμα, και όπως στην περίπτωση του HFP01, ενεργούν εντελώς παθητικά και παράγουν στην έξοδό του μια μικρή τάση ανάλογη με την τοπική ροή θερμότητας που διαπερνά τον καθένα. Η τάσεις από την κάθε συστυχία συνθέτονται και δίνουν την τελική θερμοροή.



Σχήμα 3.13 - Ο αισθητήρας HFP03 και οι διαστάσεις του*: (1) περιοχή αισθητήρα, (2) σύνθετο κεραμο-πλαστικό υλικό και (3) καλώδιο. Όλες οι διαστάσεις σε mm.*

Συνεπώς, και αυτός ο αισθητήρας έχει εύκολη χρήση και το μόνο που είναι αναγκαίο για την ανάγνωση της μέτρησης είναι ένα ακριβές βολτόμετρο με εύρος λειτουργίας στην περιοχή των μVolt. Για τον υπολογισμό της θερμοροής θα πρέπει η τάση να διαιρεθεί με την σταθερά βαθμονόμησης του οργάνου, μία σταθερά που διατίθεται με κάθε επιμέρους όργανο.

Η βαθμονόμηση γίνεται στο National Physical Laboratory (NPL) του Ηνωμένου Βασιλείου, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 8302 και ASTM C177 **[17,18]**.
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του HFP03 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6:

Πίνακας 3.6 - Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα θερμοροής HFP03

Παράμετρος	**Μονάδα**	**Τιμή**
Ευαισθησία	$\mu V/Wm^2$	499.5
Ονομαστική αντίσταση	Ω	18
Θερμοκρασιακό εύρος	°C	-30 έως +70°C
Θερμική αντίσταση αισθητήρα	Km^2/W	$<6.25\cdot10^{-3}$
Περιοχή λειτουργίας	W/m^2	-2000 έως +2000
Αναμενόμενη τυπική ακρίβεια σε τοιχοποιία (για 12 ώρες)		±5%

Ο HFP03 παρουσιάζει πάρα πολλές ομοιότητες με τον HFP01 με κυριότερες διαφορές στις διαστάσεις και στην ευαισθησία.
Όπως και στον HFP01, η θερμική αντίσταση του αισθητήρα HFP03 είναι πολύ μικρή, γι' αυτό κατά τον υπολογισμό των θερμικών αντιστάσεων των κτιριακών κελυφών μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

- **Αισθητήρας HFS-4 της Omega**

Ο αισθητήρας ροής θερμότητας που επίσης χρησιμοποιήθηκε είναι ο HFS-4 της εταιρείας Omega, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για την ακριβή μέτρηση της ροής θερμότητας διαμέσου ενός οποιοδήποτε υλικού που εκφράζεται σε W/m^2 και καταδεικνύουν επίσης τη φορά της ροής (εισερχόμενη ή εξερχόμενη ενέργεια).

Σχήμα 3.14 - Αισθητήρας HFS-4 της Omega

Οι εγκατεστημένοι αισθητήρες είναι τύπου λεπτού φιλμ και προσκολλώνται στην εξεταζόμενη επίπεδη ή κυρτή επιφάνεια. Οι αισθητήρες διατίθενται με ή χωρίς ενιαίο θερμοστοιχείο για διακριτές μετρήσεις θερμοκρασίας και είναι διαθέσιμοι σε δύο διαφορετικά εύροι ευαισθησίας.

Το κύριο μέρος του αισθητήρα είναι μία συστοιχία θερμοστοιχίων. Σε ένα λεπτό φύλλο Kapton (γνωστών θερμικών χαρακτηριστικών) είναι τοποθετημένα εκατέρωθεν πάνω από 200 θερμοστοιχεία. Δεδομένου ότι η θερμοροή είναι ευθέως ανάλογη με τη θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του λεπτού φύλλου, η ακριβής τιμή της πυκνότητας ροής θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας αυτή τη διαφορά.

Το παραγόμενο φυσικό μέγεθος είναι τάση η οποία είναι ευθέως ανάλογη της ροής θερμότητας η οποία διαβάζεται από ένα βολτόμετρο το οποίο είναι συνδεδεμένο στον αισθητήρα.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων ροής θερμότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7 - Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα θερμοροής HFS-4

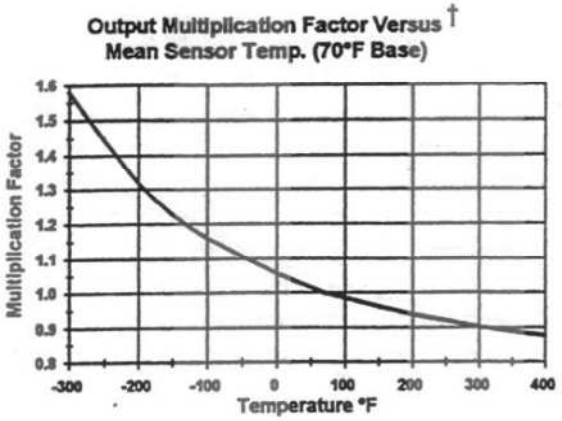
Παράμετρος	**Μονάδα**	**Τιμή**
Μέγιστο όριο θερμοκρασίας	°C	150
Αριθμός συνδέσεων		200+
Χρόνος απόκρισης (σε υγρό):	ms	200
Μέγιστη ανοχή σε θερμοροή	kW/m^2	95
Συντελεστής ευαισθησίας	$\mu V/Wm^2$	1.6 /1.7
Θερμική αντίσταση	$°C/W/m^2$	0.00176
Θερμοχωρητικότητα	$J/m^{2o}C$	205
Πάχος	mm	0.178

Η μετατροπή της τάσης του αισθητήρα σε ροή θερμότητας γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$q = \frac{V}{k} a \qquad (3.11)$$

όπου q η ροή θερμότητας σε W/m^2,V η τάση εξόδου από τον αισθητήρα σε Volt, k η σταθερά του εκάστοτε θερμορροόμετρου όπως τη δίνει η εταιρεία omega και α ένας συντελεστής θερμοκρασίας.

Οι σταθερές k για τον αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε είναι $k=1.8\mu V/(W/m^2)$, ενώ για τον συντελεστή α, ο κατασκευαστής δίνει σε μορφή καμπύλης το συντελεστή θερμοκρασίας συναρτήσει της θερμοκρασίας στην οποία βρίσκεται ο αισθητήρας, Σχήμα 3.15. Για τους 21 ^oC (70°F) ο συντελεστής είναι ίσος με τη μονάδα, ενώ στους 38 ^oC (100°F) είναι περίπου 0.8.



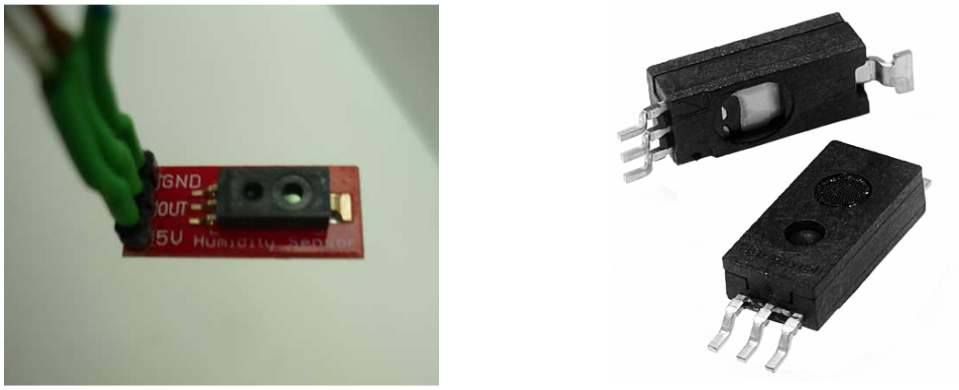
Σχήμα 3.15 - Συντελεστής α συναρτήσει της μέσης θερμοκρασίας του αισθητήρα HFS-4

3.3.ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Τα όργανα τα οποία μετρούν την πυκνότητα ή την πίεση του αέρα ενός εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου, γενικά μετρούν είτε τη σχετική υγρασία, είτε τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα. Η πίεση του υδρατμού πάνω από την επιφάνεια του υγρού νερού, όταν ο ατμός βρίσκεται σε ισορροπία με το νερό (κατάσταση κορεσμού), είναι η κορεσμένη πίεση του υδρατμού. Η κορεσμένη τάση ατμών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση, στη θερμοκρασία βρασμού του νερού. Η σχετική υγρασία είναι ο λόγος της πίεσης των υδρατμών του αέρα προς την πίεση των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία αυτή και συνήθως είναι εκφρασμένη σε ποσοστό επί τις 100. Η σχετική υγρασία είναι μια πολύ σημαντική μετεωρολογική μεταβλητή και η γνώση της χρησιμοποιείται στις καιρικές προγνώσεις, στην μοντελοποίηση των κλιματικών φαινομένων, καθώς επίσης επηρεάζει τη μετάδοση του φωτός στην ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία του σημείου δρόσου είναι μία ένδειξη της πιθανότητας σχηματισμού ομίχλης και μπορεί να εκτιμηθεί το ύψος των νεφών.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι μέτρησης της υγρασίας στον αέρα. Η περισσότερο συχνή είναι η μέθοδος της χωρητικότητας ενός λεπτού πολυμερούς φύλλου. Το πολυμερές τοποθετείται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια διαπερατά στην υγρασία. Οι υδρατμοί από τον αέρα διαχέονται στο πολυμερές με αποτέλεσμα να αλλάζει η διηλεκτρική σταθερά του και έτσι και η χωρητικότητα. Η χωρητικότητα μπορεί να μετρηθεί σε σύγκριση με τη χωρητικότητα ενός σταθερού προτύπου αναφοράς. Η μετρούμενη τιμή της χωρητικότητας είναι ανάλογη με τη σχετική υγρασία (σύμφωνα με κατάλληλη βαθμονόμηση). Τα μετρητικά όργανα χρησιμοποιώντας αυτούς τους αισθητήρες χωρητικότητας μπορούν να μετρήσουν τη σχετική υγρασία μεταξύ 0 και 100% για θερμοκρασίες περίπου από -40°C έως 60°C με ακρίβεια περίπου ±2% της σχετικής υγρασίας. Αυτοί οι αισθητήρες είναι χαμηλού κόστους και μπορούν να κατασκευαστούν σε πολύ μικρές διαστάσεις και να ενσωματωθούν σε κυκλώματα πάνω σε πλακέτα πυριτίου. Συνήθως τα μετρητικά όργανα υγρασίας μετρούν επίσης και τη θερμοκρασία ξεχωριστά. Τα κυκλώματα που μετρούν σχετική υγρασία χρησιμοποιώντας τη χωρητικότητα ένας λεπτού πολυμερούς παράγουν ως έξοδο ένα ηλεκτρικό σήμα (συχνά μεταξύ 0 και 5V), κάτι που είναι κατάλληλο για τη μεταφορά της μέτρησης **[13]**.

Στις πειραματικές διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί αισθητήρες υγρασίας τύπου **HIH-4030** της εταιρίας **Honeywell**. Για τη λειτουργία των αισθητήρων απαιτείται τροφοδοσία με συνεχή τάση 5 V. Το παραγόμενο μέγεθος είναι τάση με την οποία υπολογίζεται η σχετική υγρασία (RH %)**.** Η συσχέτιση της σχετικής υγρασίας με την τάση εξόδου του αισθητήρα είναι σχεδόν γραμμική.



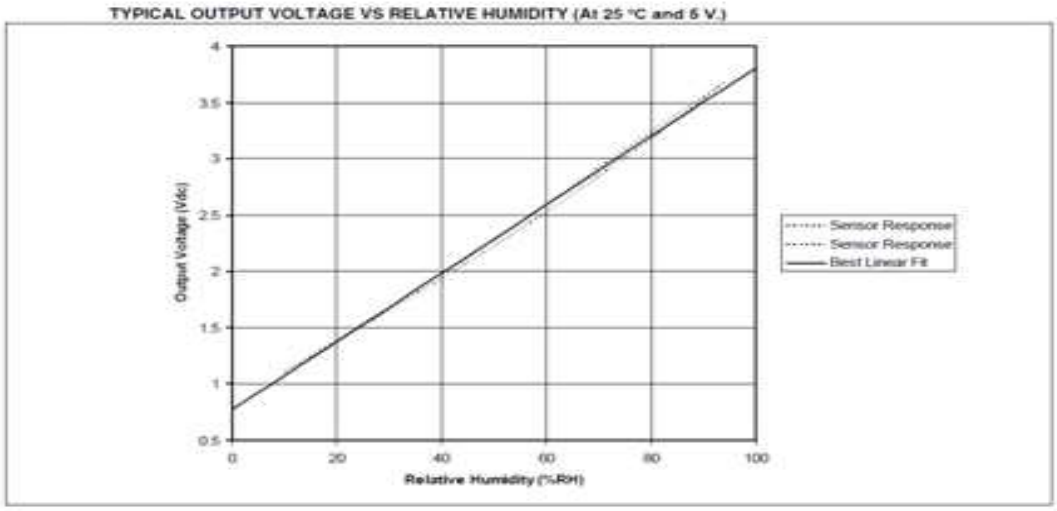
Σχήμα 3.16 - Αισθητήρας υγρασίας HIH-4030 της Honeywell

Στους 25°C για τροφοδότηση τάσης V_{supply} οι σχέσεις που συνδέουν την τάση εξόδου V_{out} του αισθητήρα με τη πραγματική σχετική υγρασία RH_{real} και τη θερμοκρασία T, είναι:

$$V_{out} = V_{\sup ply} \cdot \left(0.0062\left(RH_{sensor}\right) + 0.16\right) \tag{3.12}$$

$$RH_{real} = \frac{\left(RH_{sensor}\right)}{1.0546 - 0.00216 \cdot T}, \text{ όπου T σε °C} \tag{3.13}$$

Στο γράφημα του Σχήματος 3.17 παρουσιάζεται η συσχέτιση της σχετικής υγρασίας RH% με την τάση εξόδου V_{out}.



Σχήμα 3.17 - Τάση εξόδου αισθητήρα συναρτήσει της σχετικής υγρασίας

Η πολυστρωματική κατασκευή του αισθητήρα παρέχει εξαιρετική αντοχή στους περισσότερους κινδύνους στις εφαρμογές, όπως συμπύκνωση, σκόνη, ρύποι, λάδια και κοινές περιβαλλοντικές χημικές ουσίες.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8

Πίνακας 3.8 - Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα υγρασίας HIH-4030

Παράμετρος	**Μονάδα**	**Τιμή**
Τάση τροφοδοσίας	Vdc	4 - 5.8
Ένταση ρεύματος τροφοδοσίας	μA	200 – 500
Εύρος μέτρησης	% RH	0…100
Ακρίβεια στους 25°C	% RH	±3.5
Υστέρηση	-	3%
Επαναληψιμότητα	-	±0.5%
Χρόνος απόκρισης σε συνθήκες άπνοιας	s	5
Σταθερότητα ανά έτος (σε 50% RH)	-	±0.5%

Μερικά ακόμη από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα είναι:

- Εξωτερικό περίβλημα του αισθητήρα από χυτό πλαστικό
- Βελτιωμένης ακρίβειας
- Χαμηλό ενεργειακό σχεδιασμό
- Γρήγορος χρόνος απόκρισης
- Χημικά ανθεκτικός

Οι διαστάσεις του αισθητήρα είναι 4.25x8.65x3.19 mm ο οποίος τοποθετείται σε μία πλακέτα 19.63x8.25 mm. Η μέτρηση της υγρασίας παίρνεται από την μικρή κυκλική οπή του περιβλήματος του αισθητήρα, διαμέτρου περίπου 1.5mm.

Ο αισθητήρας είναι ευαίσθητος στο φως, γι' αυτό χρησιμοποιείται είτε σε εσωτερικό και σκιασμένο χώρο, είτε σε κατάλληλα σχεδιασμένο μετεωρολογικό σταθμό δημιουργώντας μια ασπίδα από το έντονο φως.

3.4.ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για τη λήψη των μετεωρολογικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός PortLog, ο οποίος στέλνει τα δεδομένα ασύρματα. Η ενεργειακή αυτονομία του σταθμού εξασφαλίζεται μέσω φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το μεγάλο ηλιακό πάνελ των 3W και η 4AH σφραγισμένη μπαταρία μολύβδου οξέος, εξασφαλίζουν την αξιόπιστη λειτουργία στις πιο σκληρές συνθήκες. Τα δεδομένα που παρέχει ο μετεωρολογικός σταθμός είναι τα εξής:

- Θερμοκρασία
- Ατμοσφαιρική πίεση
- Σχετική Υγρασία
- Κατεύθυνση ανέμου
- Ταχύτητα ανέμου
- Μέγιστη ταχύτητα αέρα
- Σημείο δρόσου
- Ημερήσια βροχόπτωση
- Ηλιακή ακτινοβολία

Σχήμα 3.17 - Μετεωρολογικός σταθμός PortLog

Τα δεδομένα μεταφέρονται από το σταθμό στο δέκτη μέσω ραδιοσυχνοτήτων. Ο δέκτης (ή μονάδα επικοινωνίας) είναι τοποθετημένος μέσα στο κτίριο και επικοινωνεί με το σύστημα συλλογής δεδομένων (DAS) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο RS232. Η διασύνδεση του μετεωρολογικού με το συστημα συλλογής δεδομένων πραγματοποιείται με τη μονάδα MK2 η οποία διαθέτει 32k RAM για την καταγραφή των δεδομένων και υποστηρίζεται με μπαταρία σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτροδότησης.

Η μνήμη μπορεί να αποθηκεύει δεδομένα για πάνω από 9 μήνες για ωριαίο ρυθμό καταγραφής. Ο χρόνος δειγματοληψίας μπορεί να ρυθμιστεί και κάτω από ένα λεπτό από το χρήστη, ενώ για εφαρμογές με παρατεταμένη καταγραφή δεδομένων, η μνήμη μπορεί να αναβαθμιστεί.

Η καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου περιλαμβάνει τη μέγιστη και τη μέση ταχύτητα για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, ενώ οι τιμές για όλα τα υπόλοιπα μεγέθη είναι στιγμιαίες τιμές.

Τα δεδομένα εξόδου είναι σε μορφή κειμένου οριοθετημένο με κόμματα (CVS). Το αρχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το Microsoft Excel για την προβολή, την γραφική απεικόνιση και τη διαχείριση των δεδομένων.

Η PortLog διαθέτει ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τον αισθητήρα κατεύθυνσης του ανέμου, όπου παρέχει διακριτική ικανότητα μίας μοίρας χωρίς νεκρή ζώνη. Ο αισθητήρας ταχύτητας του ανέμου διαθέτει θήκη των ρουλεμάν, η οποία προσφέρει εξαιρετική διάρκεια ζωής και χαμηλό όριο εκκίνησης.

Το βαρόμετρο ακριβείας καταγράφει απόλυτη ατμοσφαιρική πίεση, αλλά μπορεί να διορθωθεί συναρτήσει του υψομέτρου. Οι διορθώσεις γίνονται με τη χρήση του παρεχόμενου λογισμικού.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σταθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9:

Πίνακας 3.9 - Τεχνικά χαρακτηριστικά μετεωρολογικού σταθμού PortLog

Μέτρηση	**Εύρος**	**Ακρίβεια**
Θερμοκρασία	-54 - 65°C	±0.25°C
Ατμοσφαιρική πίεση	300 - 1100mbar	±0.5mbar
Σχετική Υγρασία	0 - 100%	±2%
Κατεύθυνση Ανέμου	0 - 360^{o}	±3^{o}
Ταχύτητα Ανέμου	0 - 67 m/sec	±2% του εύρους μέτρησης
Σημείο Δρόσου	-40 - 43°C	±1°C
Ημερήσια Βροχόπτωση	unlimited	±2%
Ηλιακή Ακτινοβολία	0 - 2000 W/m^{2}	±3%

3.5. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στις μετρητικές διατάξεις που εγκαταστάθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δύο συσκευές καταγραφής και συλλογής των δεδομένων: η συσκευή Agilent 34972A και η συσκευή CR1000 της Campbell Scientific. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται αναλυτικά οι δύο αυτές συσκευές.

3.5.1. Η ΣΥΣΚΕΥΗ AGILENT 34972A

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία μιας μετρητικής διάταξης είναι η συσκευή λήψης και καταγραφής των δεδομένων (DAQ). Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι η Agilent 34972A.

Σχήμα 3.18 - Συσκευή συλλογής δεδομένων Agilent 34972A

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της συσκευής από τα οποία κρίθηκε η επιλογή της είναι τα εξής:

Αξιοπιστία: Είναι αξιόπιστη και στιβαρή συσκευή και συνδυάζει χαρακτηριστικά λήψης και καταγραφής, ενώ με την μη πτητική μνήμη που διαθέτει μπορεί να διατηρεί τα δεδομένα αποθηκευμένα ακόμη και κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος.

Μνήμη: Η δυνατότητα αποθήκευσης είναι έως και 50000 time-stamped readings και μπορεί να επεκταθεί με τη χρήση εξωτερικής μνήμης, όπως USB flash, συνδεδεμένη σε μια θύρα USB

Επικοινωνία: Η σύνδεση της συσκευής μπορεί να γίνει είτε με τοπικό δίκτυο (LAN), είτε σειριακά (USB). Για απομακρυσμένη επικοινωνία είναι δυνατή η ανάκτηση, ο προγραμματισμός καταχώρησης των δεδομένων καθώς και η αντιμετώπιση προβλημάτων κατά την καταγραφή των δεδομένων.

Διαμόρφωση της αποθήκευσης δεδομένων: Τα δεδομένα καταγράφονται σε ένα αρχείο κειμένου, οριοθετημένα με κόμματα, τυπώνοντας την ημερομηνία και την ώρα για κάθε σάρωση δεδομένων.

Ευελιξία: Άμεση μέτρηση θερμοστοιχείων, thermistor, RTDs, τάσης DC, τάσης AC, αντίστασης, συνεχούς ρεύματος DC, εναλλασσόμενου ρεύματος AC, συχνότητας και περιόδου.

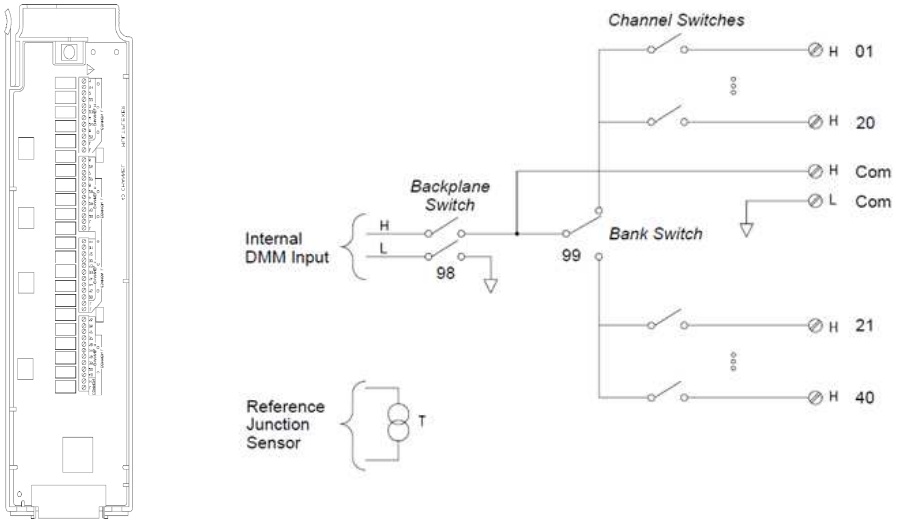
3.5.1.1. ΚΑΡΤΑ 34908A

Η κάρτα που χρησιμοποιήθηκε για τη διασύνδεση των αισθητήρων είναι η 34908A 40-Channel Single-Ended Multiplexer

Η συγκεκριμένη κάρτα χρησιμοποιείται για εφαρμογές με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας με απαίτηση ενός καλωδίου εισόδου με κοινή γείωση. Κάθε στιγμή μόνο ένα ρελέ είναι συνδεδεμένο. Η κάρτα παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- περιέχει 40 εναλλασσόμενα κανάλια των 300V ενιαίας κατάληξης (single-ended, κοινής γείωσης)
- ενσωματωμένη επαφή αναφοράς για θερμοστοιχεία
- ταχύτητα εναλλαγής καναλιών μέχρι και 60 κανάλια το δευτερόλεπτο

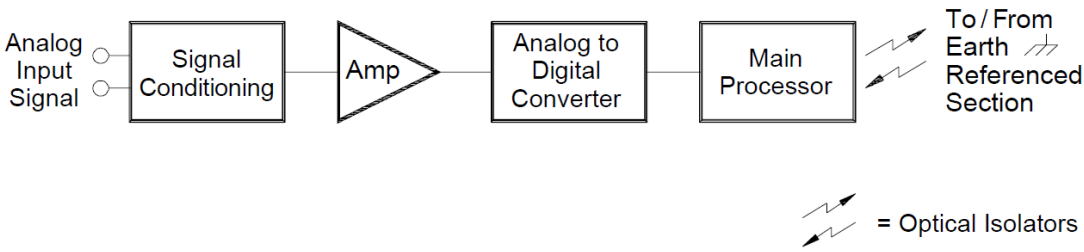
Η κάρτα είναι χωρισμένη σε δύο συστοιχίες των 20 καναλιών η καθεμία. Όλα τα κανάλια εναλλάσσουν μόνο την υψηλή τάση (HI), έχοντας την χαμηλή (LO) κοινή. Έχει μια ενσωματωμένη επαφή αναφοράς των θερμοστοιχείων για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων εξαιτίας της θερμοκρασιακής κλίσης στις μετρήσεις των θερμοστοιχείων.



Σχήμα 3.19 - Η κάρτα 34908A και το κύκλωμα των καναλιών της

3.5.1.2. ΠΟΛΥΜΕΤΡΟ (Digital Multimeter Module-DMM)

Το εσωτερικό ψηφιακό πολύμετρο (Digital Multimeter Module - DMM) παρέχει μια γενική είσοδο front-end για μέτρηση διαφόρων τύπων αισθητήρων, χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετης εξωτερικής διαμόρφωσης του σήματος. Το πολύμετρο (DMM) περιλαμβάνει διαμόρφωση, ενίσχυση (ή εξασθένιση) και μια υψηλής ανάλυσης μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (έως και 22-bits). Ένα απλουστευμένο διάγραμμα του εσωτερικού πολύμετρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20



Σχήμα 3.20 - Διάγραμμα του εσωτερικού ψηφιακού πολυμέτρου

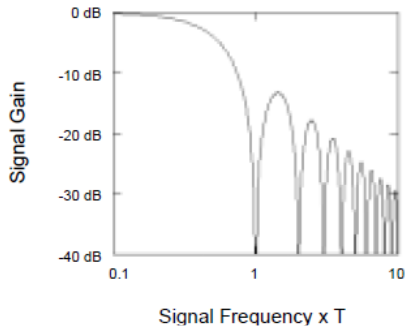
Το συγκεκριμένο πολύμετρο μπορεί άμεσα να μετρήσει τις τιμές των παρακάτω μεγεθών:

- Θερμοκρασία (θερμοστοιχεία, RTD, thermistor)
- Τάση (dc και ac μέχρι και 300V)
- Αντίσταση (διπλό και τετραπλό καλώδιο μέχρι και 100MΩ)
- Ένταση ρεύματος (dc και ac μέχρι και 1A)
- Συχνότητα και περίοδο (μέχρι και 300kHz)

Ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό του εσωτερικού αναλογο-ψηφιακού μετατροπέα (A/D) είναι η ικανότητά του να απορρίπτει τα ψευδή σήματα. Η ενσωματωμένη τεχνική απορρίπτει τον θόρυβο που οφείλεται στη γραμμή ισχύος και παρουσιάζεται στα DC

σήματα της εισόδου. Αυτό ονομάζεται απόρριψη κανονικής λειτουργίας (normal mode rejection-NMR). Η απόρριψη κανονικής λειτουργίας του θορύβου επιτυγχάνεται από το εσωτερικό πολύμετρο DMM με υπολογισμό του μέσου όρου της εισόδου ολοκληρώνοντάς την κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης χρονικής περιόδου. Η χρονική αυτή περίοδος ορίζεται σε ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου του εναλλασσόμενου ρεύματος της τροφοδοσίας (PLC) ώστε να μηδενίζεται το σφάλμα που εισάγεται από το κύκλωμα της τροφοδοσίας του πολυμέτρου. Για καλύτερη ανάλυση και για αυξημένη απόρριψη του θορύβου, επιλέγεται μεγαλύτερος χρόνος ολοκλήρωσης.

Το γράφημα του Σχήματος 3.21 δείχνει την εξασθένιση των εναλλασσόμενων σημάτων μετρούμενων σε συνεχή τάση συναρτήσει του χρόνου ολοκλήρωσης. Σημειώνεται ότι οι συχνότητες των σημάτων σε πολλαπλάσια του 1/T παρουσιάζουν υψηλή εξασθένιση.



Σχήμα 3.21 - Εξασθένηση σήματος συναρτήσει του χρόνου ολοκλήρωσης

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Μία μέτρηση από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας είναι μια μέτρηση είτε τάσης μετατρεπόμενη σε μια ισοδύναμη θερμοκρασία από το ίδιο το όργανο, όταν δηλαδή χρησιμοποιείται θερμοστοιχείο, είτε αντίστασης όταν ο αισθητήρας είναι thermistor. Η μαθηματική μετατροπή είναι βασισμένη σε συγκεκριμένες ιδιότητες των διάφορων αισθητήρων. Η ακρίβεια της μαθηματικής μετατροπής (μη συμπεριλαμβανομένης της ακρίβειας του οργάνου) για κάθε είδος αισθητήρα παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10 - Ακρίβεια μετατροπής για αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας

Αισθητήρας	**Ακρίβεια μετατροπής**
Θερμοστοιχείο	$0.05^{o}C$
RTD	$0.02^{o}C$
Thermistor	$0.05^{o}C$

Γενικά, η μεγαλύτερη πηγή σφάλματος στις μετρήσεις είναι το σφάλμα από το αισθητήριο.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα θερμοστοιχεία, όπως αναλύθηκε σε παραπάνω ενότητα, μετρούν την θερμοκρασία ενός σημείου παράγοντας μια θερμοηλεκτρική τάση που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μετριέται με τη βοήθεια ενός πολυμέτρου. Οι ρουτίνες μετατροπής των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιούνται από τη συσκευή Agilent 34970A είναι συμβατές με τη Διεθνή Κλίμακα Θερμοκρασίας (International Temperature Scale of 1990, ITS-90).

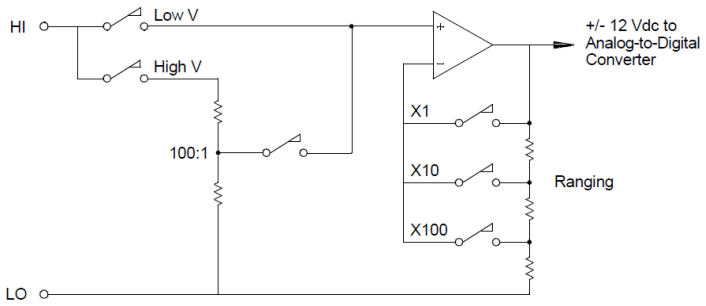
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ THERMISTOR

Ένα thermistor είναι κατασκευασμένο από υλικά τα οποία δεν έχουν γραμμική μεταβολή της αντίστασής τους με την θερμοκρασία. Το εσωτερικό πολύμετρο DMM μετρά την αντίσταση του thermistor, υπολογίζοντας την τάση μεταξύ των ακροδεκτών εφαρμόζοντας μια σταθερή και γνωστή ένταση ρεύματος.

Εξαιτίας της υψηλής τους αντίστασης, τα thermistors μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας μια μέθοδο διπλού καλωδίου. Το εσωτερικό DMM υποστηρίζει 2.2kΩ, 5kΩ και 10kΩ thermistors. Οι ρουτίνες μετατροπής των thermistors που χρησιμοποιούνται από τη συσκευή Agilent 34970A είναι συμβατές με τη Διεθνή Κλίμακα Θερμοκρασίας (International Temperature Scale of 1990, ITS-90).

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ DC

Η συσκευή Agilent 34970A διαθέτει βαθμίδα επεξεργασίας του σήματος πριν τον αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα. Η μονάδα αυτή ενισχύει τα σήματα εισόδου δίνοντας τη δυνατότητα μέτρησης σημάτων σε διάφορα εύρη.



Σχήμα 3.22 - Κύκλωμα ενίσχυσης σημάτων εισόδου

Για τάσεις εισόδου μικρότερες των 12Vdc ο διακόπτης χαμηλής τάσης (Low V) είναι κλειστός και εφαρμόζει το σήμα εισόδου απευθείας στην είσοδο του ενισχυτή. Για υψηλότερες τάσεις, ο διακόπτης υψηλής τάσης (High V) είναι κλειστός και το σήμα εξασθενεί κατά 100:1 πριν εφαρμοστεί στην είσοδο του ενισχυτή. Το κέρδος του ενισχυτή εισόδου έχει ορισθεί σε μια από τις τρεις τιμές ×1, ×10 ή ×100, με σκοπό να εξάγει το σήμα στην περιοχή ±12Vdc για τον αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα.

Για τις τάσεις σε χαμηλότερη περιοχή, η αντίσταση της εισόδου του εσωτερικού πολυμέτρου DMM είναι ουσιαστικά ο ενισχυτής εισόδου. Ο ενισχυτής εισόδου χρησιμοποιεί ένα ρεύμα χαμηλής πόλωσης (μικρότερο από 50pA) δίνοντας στην είσοδο μία αντίσταση μεγαλύτερη των 10GΩ. Σε περιοχές εισόδου μεταξύ 100V και 300V, η αντίσταση εισόδου καθορίζεται από τη συνολική αντίσταση του 100:1 διαιρέτη. Είναι επίσης δυνατόν να ρυθμιστεί η αντίσταση εισόδου σε 10MΩ με κλείσιμο του High V διακόπτη.

Κατά την μέτρηση της συνεχούς τάσης DC, τα σφάλματα που παρουσιάζονται προέρχονται από διάφορες πηγές.

- Απόρριψη κοινού σήματος, λόγω της πεπερασμένης αντίστασης και χωρητικότητας μεταξύ του ακροδέκτη χαμηλής τάσης και της γείωσης.
- Δημιουργία θορύβου από διαρροή ρεύματος, όταν οι εναπομένουσες χωρητικότητες στο μετασχηματιστή του οργάνου προκαλούν μικρές ροές ρεύματος από τον ακροδέκτη χαμηλής τάσης στη γείωση, με συχνότητα ίση με τη συχνότητα ισχύος.
- Δημιουργία σφαλμάτων εξαιτίας εισαγωγής αντίστασης, όταν η αντίσταση της διάταξης υπό δοκιμή είναι ένα αξιόλογο ποσοστό της αντίστασης της εισόδου.
- Δημιουργία σφαλμάτων εξαιτίας εισαγωγής ρεύματος χαμηλής πόλωσης που υφίσταται στα κυκλώματα εισόδου του πολυμέτρου DMM και το πρόβλημα γίνεται πιο εμφανές σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα χαρακτηριστικά του πολυμέτρου για την ακρίβεια διαφόρων μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11 - Χαρακτηριστικά του πολυμέτρου

Μέτρηση	**Περιοχή μέτρησης**	**Ακρίβεια (1 Έτος, 23°C ± 5°C)**
Συνεχούς τάσης DC	100.0000mV	0.0050+0.0040
Αντίστασης	100.0000kΩ	0.010+0.004
Συνεχούς ρεύματος	10.00000mA	0.050+0.020
Θερμοστοιχείου (Type K)	-100°C έως 1200°C	1.0°C
Thermistor	10k	0.08°C

3.5.2. Η ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ CR1000

Η μονάδα μέτρησης και ελέγχου (Measurement and Control Unit) η οποία καταγράφει και αποθηκεύει τα δεδομένα στη μετρητική διάταξη της Hukseflux είναι η CR1000 της Campbell Scientific. Το καταγραφικό CR1000 χρησιμοποιείται ευρύτερα και μπορεί να αξιοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων και ελέγχου. Είναι αρκετά αξιόπιστο και ανθεκτικό για ακραίες συνθήκες. Επίσης είναι αυτοδύναμο για μετρήσεις σε απομακρυσμένα σημεία. Η αυξημένη μνήμη και τα περισσότερα κανάλια το καθιστούν ισχυρό ανάμεσα στα άλλα καταγραφικά τύπου CR10X της εταιρείας.

Σχήμα 3.23 - Η μονάδα μέτρησης και ελέγχου CR1000

Είναι ιδανικό σε εφαρμογές σε μετρήσεις μετεωρολογικών δεδομένων, προφίλ του ανέμου, ποιότητα του νερού και του αέρα, υγρασία εδάφους, γεωργία, υδατοκαλλιέργεια κλπ.

Συνδέεται σειριακά με τους αισθητήρες και τις συσκευές μέσω θυρών εισόδου/εξόδου. Οι επιλογές στην επικοινωνία το κάνουν ιδανικό για τη συλλογή και αποθήκευση των δεδομένων από απομακρυσμένες περιοχές. Διαθέτει μνήμη 4MB με δυνατότητα επέκτασής της. Επίσης είναι συμβατό σε επεκτάσεις περιφερειακών καναλιών επιτρέποντας στην επέκταση ολόκληρου του συστήματος. Η εφεδρική μπαταρία και το ρολόι εξασφαλίζουν ότι τα δεδομένα θα καταγράφονται την ακριβή ώρα σε περίπτωση που το καταγραφικό είναι αποσυνδεδεμένο για μεγάλο χρονικό διάστημα από την κύρια παροχή του ρεύματος.

Η MCU χρειάζεται παροχή συνεχούς ρεύματος χαμηλής ενεργειακής καταναλώσεως 12V, ενώ όταν η τάση πέσει κάτω των 9.6V η μονάδα αναστέλλει τη λειτουργία της, μειώνοντας την πιθανότητα ανακριβών μετρήσεων.

Τα ηλεκτρονικά είναι θωρακισμένα και προστατευμένα από ανοξείδωτο χαλύβδινο κουτί. Τα καλώδια εισέρχονται στο κουτί από αεροστεγείς οπές εξασφαλίζοντας την ασφάλεια της μονάδας σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12 - Τα χαρακτηριστικά της μονάδας CR1000

Παράμετρος	**Τιμή**
Μέγιστη συχνότητα σάρωσης	100 Hz
Μετρητές Παλμών	2
Μνήμη	4 MB
Απαιτήσεις Τάσης Τροφοδοσίας	9.6 έως 16 Vdc
Ακρίβεια αναλογικής τάσης	±0.06% of reading + offset
Αναλογική διακριτική ικανότητα	1.0μV
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-25° έως +50 °C
Διαστάσεις	23.9×10.2×6.1 cm
Βάρος	1.0 kg

Η μονάδα αυτή είναι συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω σειριακού καλωδίου που καταλήγει σε θύρα USB, και με τη βοήθεια του λογισμικού

LoggerNet 3.4.1 της Campbell Scientific, καταγράφει και αποθηκεύει τα δεδομένα καθώς επίσης επιτρέπει τον επί τόπου έλεγχο της μονάδας.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η διακριτική ικανότητα της τάξης των μίκρο-Volt, αλλά και η δυνατότητα μετρήσεων τάσεως χαμηλού θορύβου της CR1000, είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που την κάνει κατάλληλη σε μετρήσεις θερμοστοιχείων. Όπως περιγράφηκε ανωτέρω, για μετρήσεις θερμοκρασίας από θερμοστοιχεία, είναι απαραίτητη η μέτρηση της τάσης που επικρατεί μεταξύ των αγωγών στο σημείο διεπαφής, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διαφορά των άκρων των αγωγών. Έτσι για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας στο άκρο των θερμοστοιχείων θα πρέπει να είναι γνωστή η θερμοκρασία επαφής των άκρων των αγωγών με την συσκευή μέτρησης τάσης, δηλαδή τη θερμοκρασία αναφοράς. Γνωρίζοντας αυτή τη θερμοκρασία καθορίζεται μία διαφορά δυναμικού αντιστάθμισης, αντίστοιχη στη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας αναφοράς και τους 0°C. Αυτή η αντισταθμισμένη τάση λαμβάνεται για τον υπολογισμό της απόλυτης θερμοκρασίας.

Το σφάλμα στη μέτρηση θερμοκρασίας από θερμοστοιχείο οφείλεται στα σφάλματα στη μέτρηση της θερμοκρασίας αναφοράς, στη μετατροπή της θερμοκρασίας σε τάση με τη χρήση του πολυωνύμου που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1.1, του σφάλματος του ίδιου του θερμοστοιχείου, την ακρίβεια της μέτρησης της τάσης και του σφάλματος της μετατροπής της τάσης σε θερμοκρασία από το αντίστοιχο πολυώνυμο.

Ο Πίνακας 3.13 παρουσιάζει τα επί μέρους σφάλματα για τη μέτρηση θερμοκρασίας από ένα θερμοστοιχείο τύπου K, από το καταγραφικό CR1000. Τα στοιχεία αυτά περιορίζονται στην βαθμονόμηση του θερμοστοιχείου και όχι στα σφάλματα κατά την εγκατάσταση του αισθητήρα στο περιβάλλον που γίνεται η μέτρηση.

Πίνακας 3.13 - Σφάλματα της μονάδας για μέτρηση από ένα θερμοστοιχείο τύπου K

Σφάλμα	**Τιμή**
Ακρίβεια μέτρησης τάσης θερμοστοιχείου	±2.5mV
Μετατροπή τάσης σε θερμοκρασία	±0.01°C
Θόρυβος στην μέτρηση τάσης	±0.005°C (±2.5mV)
Αντιστοίχησης θερμοκρασίας αναφοράς	±0.01°C

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ

Η μονάδα CR1000 διαθέτει 8 διαφορικά (DF) ή 16 κοινής γείωσης (SE) κανάλια για την μέτρηση της τάσης. Σχετικά με τις μετρήσεις τάσης DF καθορίζεται η μέση τιμή της υψηλής και χαμηλής τάσης.

Η μονάδα διαθέτει έναν διαφορικό ενισχυτή για την επεξεργασία της διαφοράς των τάσεων εισόδου, αλλά και την απόρριψη κοινότροπων σημάτων εφόσον είναι μέσα στο εύρος των ±5000mV. Ο ενισχυτής δεν μπορεί να απορρίψει σήματα εκτός του εύρους αυτού, ενώ σήματα που υπερβαίνουν τα ±16V, θα καταστρέψουν το κύκλωμα της μονάδας.

3.5.2.1. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ LoggerNet 3.4.1

Η μονάδα CR1000 χειρίστηκε με τη χρήση του λογισμικού LoggerNet 3.4.1 της Campbell Scientific, το οποίο ήταν εγκατεστημένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΦΙΣΜΙΚΟΥ

Το LoggerNet είναι μία εφαρμογή λογισμικού που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εγκαταστήσει, να ρυθμίσει και να ανακτήσει δεδομένα από ένα δίκτυο καταγραφέων δεδομένων της Campbell Scientific. Το λογισμικό αυτό υποστηρίζει την επικοινωνία και τη συλλογή των δεδομένων από καταγραφείς τύπου CR10X και διαφόρων άλλων της ίδιας εταιρείας.

Το λογισμικό LoggerNet είναι γραμμένο χρησιμοποιώντας προηγμένη "client-server" αρχιτεκτονική. Ο διακομιστής του λογισμικού λειτουργεί χειρίζοντας όλους τους καταγραφείς που επικοινωνεί και φροντίζει την αποθήκευση των δεδομένων παρέχοντας πληροφορίες για τη διαχείριση του δικτύου των καταγραφέων.

Ένα σημαντικό όφελος της σχεδίασης του λογισμικού είναι ότι οι βοηθητικές εφαρμογές μπορούν να λειτουργήσουν σε οποιοδήποτε υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος στον κύριο υπολογιστή με μια TCP/IP σύνδεση, όπως LAN,WAN ή Internet.

Ένα επιπλέον όφελος είναι η αποδοτικότητα η οποία αποκτάται όταν αρκετές συσκευές μπορούν ταυτόχρονα να ζητήσουν και να λάβουν πληροφορίες από το διακομιστή του λογισμικού.

Σχήμα 3.24 - Το λογότυπο και το μενού εργασίας του λογισμικού LoggerNet 3.4.1

ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Κατά τη διάρκεια των ρυθμίσεων του EZSetup του LoggerNet ο καταγραφέας δεδομένων ονομάζεται CR1000, όπου είναι ο τύπος της MCU και επιλέγεται η άμεση σύνδεσή του με τον υπολογιστή, η οποία πραγματοποιείται μέσω μίας RS-232 θύρας του καταγραφέα συνδεδεμένη με τη σειριακή θύρα του υπολογιστή. Στη συνέχεια, επιλέγεται η θύρα COM που είναι συνδεδεμένη η συσκευή και εισάγεται ο ρυθμός baud ίσος με 115200bps χωρίς την απαίτηση επιπλέον χρόνου ανταπόκρισης με το καταγραφέα και κωδικού ασφαλείας. Κατόπιν, γίνεται μια δοκιμή επικοινωνίας του υπολογιστή με τη συσκευή και εάν αυτή είναι επιτυχής, συγχρονίζεται η ημερομηνία και η ώρα της συσκευής με αυτή του υπολογιστή. Ακολούθως, επιλέγεται το πρόγραμμα TRSYS01 v0601.CR1 για την συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων.

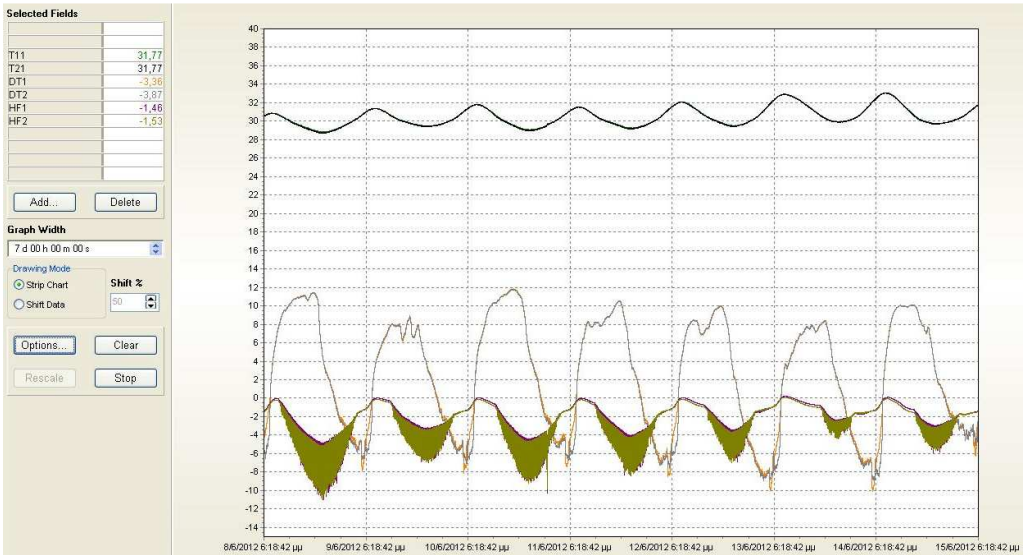
Ρυθμίζεται ο χρόνος δειγματοληψίας 200ms, δηλαδή ανά 200ms λαμβάνεται μία μέτρηση από τον κάθε αισθητήρα και το πρόγραμμα υπολογίζει τους μέσους όρους για κάθε μέτρηση ανά 10 λεπτά και ανά 24 ώρες. Η καταγραφή των δεδομένων θα γίνεται από τα αρχεία CR1000_HF_10min.dat, CR1000_HF_24h.dat, CR1000_Public.dat, CR1000_Status.dat, τα οποία ζητούνται να αποθηκευτούν μέσα στο φάκελο του LoggerNet του σκληρού δίσκου του υπολογιστή και να προσαρτώνται σε αυτά συνεχώς τα νέα δεδομένα από τις μετρήσεις. Στη συνέχεια, επιλέγεται η δυνατότητα της προγραμματισμένης συλλογής των δεδομένων, ορίζοντας την ημέρα και την ώρα έναρξης της πρώτης αποθήκευσης και στη συνέχεια ρυθμίζεται να λαμβάνει και να αποθηκεύει τα δεδομένα ανά 12 ώρες. Για λόγους ασφαλείας, σε περίπτωση αποτυχίας κάποιας προγραμματισμένης συλλογής, όπως για παράδειγμα εξαιτίας κάποιας διακοπής ρεύματος, ορίζεται επανάληψη της προσπάθειας συλλογής των δεδομένων μετά από 5 λεπτά για 5 φορές. Εάν και οι 5 φορές αποτύχουν ορίζεται η δευτερεύουσα προσπάθεια συλλογής των δεδομένων μετά από μιάμιση ώρα. Ένα παράδειγμα του αρχείου αποθήκευσης των δεδομένων, το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί και στο Excel παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.25

TOA5	CR1000	CR1000	2521	CR1000.Std.05	CPU:TRSYS01 V0603.CR1	15608	HF_10min				
TIMESTAMP	RECORD	PTemp	E_HF1	E_HF2	HF1_Avg	T11_Avg	DT1_Avg	HF2_Avg	T21_Avg	DT2_Avg	
TS	RN	deg C	uV/(W/m^2)	uV/(W/m^2)	W/m^2	deg C	deg C	W/m^2	deg C	deg C	
		Smp	Smp	Smp	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	
7-12-2006 14:10	0	25,95	60	60,7	-1,019	24,67	-0,273	NAN	25,8	0,962	
7-12-2006 14:20	1	26,04	60	60,7	-2,881	24,73	0,126	-8,78	25,93	1,15	
7-12-2006 14:30	2	26,13	60	60,7	-6,244	24,84	0,392	-8,67	25,99	1,349	
7-12-2006 14:40	3	26,16	60	60,7	-6,19	24,87	0,481	-8,65	26	1,412	
7-12-2006 14:50	4	26,19	60	60,7	-4,696	24,9	0,398	-8,22	26,01	1,324	
7-12-2006 15:00	5	26,19	60	60,7	-5,614	24,91	0,399	-6,781	25,93	1,251	
7-12-2006 15:10	6	26,19	60	60,7	-5,368	24,89	0,405	-5,885	25,82	1,154	
7-12-2006 15:20	7	26,16	60	60,7	-4,422	24,87	0,338	-5,108	25,71	1,017	
7-12-2006 15:30	8	26,1	60	60,7	-6,127	24,83	0,445	-4,566	25,6	1,026	
7-12-2006 15:40	9	26,01	60	60,7	-5,998	24,76	0,48	-4,259	25,46	1,001	
7-12-2006 15:50	10	25,95	60	60,7	-4,157	24,69	0,398	-3,987	25,33	0,864	
7-12-2006 16:00	11	25,89	60	60,7	-5,139	24,66	0,428	-4,524	25,27	0,884	
7-12-2006 16:10	12	25,83	60	60,7	-4,165	24,65	0,417	-5,494	25,29	0,922	
7-12-2006 16:20	13	25,79	60	60,7	-3,21	24,68	0,349	-6,155	25,35	0,846	

Σχήμα 3.25 - Παράδειγμα αρχείου αποθήκευσης από τη μονάδα CR1000

Η MCU διαβάζει τις τάσεις από τον κάθε αισθητήρα. Για τα θερμοστοιχεία κάνει από μόνη της την μετατροπή από τάση σε θερμοκρασία, ενώ για τους αισθητήρες ροής θερμότητας χρειάζεται να ρυθμιστεί ο συντελεστής ευαισθησίας για κάθε

αισθητήρα από το λογισμικό. Τέλος για την real time γραφική απεικόνιση των μετρήσεων επιλέγεται η εντολή διασύνδεσης από το λογισμικό.



Σχήμα 3.26 - Απεικόνιση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται κάποια στοιχεία θεωρίας για την μετάδοση θερμότητας διαμέσου των υλικών και στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι μεθοδολογίες υπολογισμού του πιο χαρακτηριστικού συντελεστή για τη θερμική συμπεριφορά μιας τοιχοποιίας, του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, U-value. Οι μεθοδολογίες αυτές αναφέρονται τόσο στον θεωρητικό προσδιορισμό αυτού του συντελεστή, όσο και στον πειραματικό προσδιορισμό του από επιτόπιες μετρήσεις ροής θερμότητας και επιφανειακής εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας .

4.1.ΘΕΩΡΙΑ

4.1.1. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ

Η θερμότητα διαμέσου του κτιριακού κελύφους μεταφέρεται κυρίως με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή, συχνά καλείται και διάχυση, οφείλεται κυρίως στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Στα στερεά, η αγωγιμότητα οφείλεται στον συνδυασμό των δονήσεων των μορίων σε ένα πλέγμα και τη μεταφορά ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, ενώ στα υγρά και στα αέρια η μετάδοση οφείλεται στις συγκρούσεις και στη διάχυση των μορίων κατά τη διάρκεια της τυχαίας κίνησής τους.

Το ποσό της θερμότητας με αγωγή που διαπερνά ένα μέσο εξαρτάται από τη γεωμετρία, το πάχος και το υλικό του μέσου, καθώς επίσης και από τη θερμοκρασιακή διαφορά στα τοιχώματα του μέσου.

Εξετάζεται σε ένα επίπεδο, στερεό και ομογενές σώμα η κατανομή της θερμοκρασίας T(x,t) η οποία εξαρτάται από το χρόνο t και μεταβάλλεται κατά μήκος του άξονα-x. Η διάχυση της θερμότητας στο σώμα εκφράζεται ως μεταβατικό μονοδιάστατο φαινόμενο από την εξίσωση Fourier (1822) για καρτεσιανές συντεταγμένες :

$$q_{cond} = -k\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \qquad (4.1)$$

Η θερμότητα η οποία μεταφέρεται με αγωγή (διαχέεται) στο σώμα παράλληλα προς τον άξονα x, στη μονάδα του χρόνου και της κάθετης επιφάνειας στον άξονα x, είναι η πυκνότητα παροχής θερμότητας ή θερμοροή q ή q_x και προκύπτει σε W/m^2 ή

kJ/m^{2}h. Στην εξίσωση (4.1) το μέγεθος $\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$ είναι η κλίση της θερμοκρασίας σε ένα διάγραμμα T-x στη θέση x. Η εξίσωση Fourier δείχνει ότι το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή σε μία δεδομένη κατεύθυνση (άξονας x) είναι ανάλογο με την κλίση της θερμοκρασίας προς την κατεύθυνση αυτή. Η θερμότητα διαχέεται προς την κατεύθυνση στην οποία η θερμοκρασία ελαττώνεται και η κλίση της θερμοκρασίας γίνεται αρνητική όταν μειώνεται η θερμοκρασία με την αύξηση της απόστασης x. Το αρνητικό πρόσημο - (πλην) στην εξίσωση εμφανίζεται διότι οι ποσότητες T και x μεταβάλλονται αντίστροφα, δηλαδή όσο αυξάνεται η απόσταση x από το επίπεδο της υψηλής θερμοκρασίας, τόσο ελαττώνεται η θερμοκρασία και εξασφαλίζει ότι η θερμοροή σε θετική κατεύθυνση x είναι μία θετική ποσότητα. Ο παράγοντας k είναι η ειδική θερμική αγωγιμότητα του υλικού σε W/mK, δηλαδή το μέγεθος που χαρακτηρίζει την ικανότητα του υλικού στην αγωγή θερμότητας και εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος. Το μέγεθος αυτό είναι αρκετά σημαντικό και αναλύεται στην παράγραφο 4.1.3.

Η μελέτη μεταφοράς θερμότητας στις τοιχοποιίες, συνήθως θεωρείται ως ένα μονοδιάστατο πρόβλημα εξαιτίας του μικρού πάχους σε σχέση με τις διαστάσεις του ύψους και του πλάτους της τοιχοποιίας. Η υπόθεση αυτή είναι αρκετά αληθής για την αγωγή θερμότητας στο κέντρο ενός τοίχου, μακριά από πόρτες, παράθυρα και παράπλευρους τοίχους, που δημιουργούν πλευρικές ροές θερμότητας. Η κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται μόνο από την κατεύθυνση x, δηλαδή την κατεύθυνση του πάχους της τοιχοποιίας.

Ως εκ τούτου, η ροή θερμότητας διαπερνά ένα τοίχο κάθετα και είτε μεταφέρεται στην ίδια διεύθυνση, είτε αποθηκεύεται στα υλικά της τοιχοποιίας. Έτσι ο ισολογισμός ενέργειας κατά την αγωγή θερμότητας εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{pmatrix}\text{Ροή θερμότητας}\\ \text{που εισέρχεται στην}\\ \text{τοιχοποιία}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{Ροή θερμότητας}\\ \text{που εξέρχεται από}\\ \text{την τοιχοποιία}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Μεταβολή της}\\ \text{αποθηκευμένης}\\ \text{ενέργειας}\\ \text{στην τοιχοποιία}\end{pmatrix}$$

$$\text{ή} \qquad \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{storage} = \frac{dE_{wall}}{dt} \qquad (4.2)$$

4.1.2. ΜΟΝΙΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ

Στη μόνιμη μεταφορά θερμότητας σε μία τοιχοποιία, το ποσό της θερμότητας το οποίο είναι αποθηκευμένο στο κέλυφος είναι σταθερό και δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Δηλαδή η χρονική παράγωγος της ενέργειας που αποθηκεύεται είναι μηδέν, $\frac{\mathrm{dE_{wall}}}{\mathrm{dt}} = 0$. Συνεπώς, το δεύτερο μέλος της εξίσωσης της ενεργειακής ισορροπίας μηδενίζεται και γίνεται:

$$\begin{pmatrix}\text{Ροή θερμότητας}\\ \text{που εισέρχεται στην}\\ \text{τοιχοποιία}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{Ροή θερμότητας}\\ \text{που εξέρχεται από}\\ \text{την τοιχοποιία}\end{pmatrix} = 0$$

ή $$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = 0$$

Άρα το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στο κέλυφος πρέπει να είναι ίσο με το ποσό ενέργειας που εξέρχεται από αυτό, ή διαφορετικά ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας που μεταφέρεται διαμέσου της τοιχοποιίας πρέπει να είναι σταθερός.

Ένα παράδειγμα μόνιμης μεταφοράς θερμότητας είναι η περίπτωση κατά την οποία τόσο ο εσωτερικός χώρος μιας τοιχοποιίας, όσο και ο εξωτερικός, διατηρούνται σε σταθερές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό στην πράξη γίνεται μόνο σε πειραματικές διατάξεις και δεν ισχύει σε περιπτώσεις μελέτης κτιρίου.

Θεωρώντας μία επίπεδη τοιχοποιία πάχους L με μέση θερμική αγωγιμότητα k και οι δύο επιφάνειες του κελύφους παραμένουν σταθερές στις θερμοκρασίες T_1 και T_2. Για μονοδιάστατη και μόνιμη μεταφορά θερμότητας με αγωγή, η κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοίχου εξαρτάται μόνο από την κατεύθυνση x, άρα η κατανομή της εκφράζεται από μια συνάρτηση T(x). Έτσι η εξίσωση Fourier για την αγωγή του τοίχου εκφράζεται ως:

$$Q_{wall} = -kA\frac{dT}{dx} \qquad (4.3)$$

όπου η θερμότητας Q_{wall} που διαπερνά την τοιχοποιία επιφάνειας A είναι σταθερή, άρα η χωρική παράγωγος της κατανομής της θερμοκρασίας, $\frac{dT}{dx}$, μεταβάλλεται γραμμικά με τον άξονα x. Δηλαδή η κατανομή της θερμοκρασίας στον τοίχο για σταθερές συνθήκες είναι μια ευθεία γραμμή.

Διαχωρίζοντας τις μεταβλητές στην προηγούμενη εξίσωση και ολοκληρώνοντας σε όλο το πάχος του τοίχου, προκύπτει:

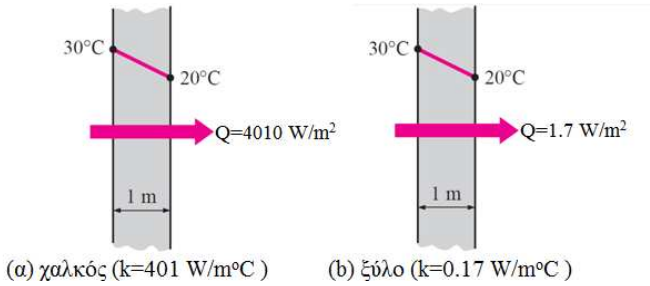
$$\int_{x=0}^{L} Q_{wall}\,dx = -\int_{T=T_1}^{T_2} kA\,dT \Rightarrow Q_{wall} = kA\frac{T_1 - T_2}{L} \qquad (4.4)$$

Από την παραπάνω εξίσωση είναι ξεκάθαρο ότι το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται διαμέσου μιας τοιχοποιίας είναι ανάλογο με τη μέση θερμική αγωγιμότητα, την επιφάνεια της τοιχοποιίας και την θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών, αλλά αντιστρόφως ανάλογη του πάχους.

4.1.3. ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η ειδική θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού μπορεί να οριστεί ως το ποσό της θερμότητας που διαχέεται διαμέσου μιας μονάδας επιφάνειας του υλικού ανά μονάδα

θερμοκρασιακής διαφοράς ανηγμένης στο πάχος. Ο συντελεστής αγωγιμότητας εκφράζει την ικανότητα του υλικού στην διάχυση θερμότητας διαμέσου αυτού, έχει μονάδες W/mK και συνήθως συμβολίζεται είτε με k, είτε με λ . Ένα υλικό που έχει μεγάλη τιμή θερμικής αγωγιμότητας χαρακτηρίζεται ως καλός αγωγός της θερμότητας, ενώ ένα υλικό με χαμηλή τιμή χαρακτηρίζεται ως κακός αγωγός ή μονωτής. Για παράδειγμα ο χαλκός σε θερμοκρασία δωματίου έχει συντελεστή ειδικής αγωγιμότητας 401 W/m K και είναι καλός αγωγός της θερμότητας, ενώ το ξύλο στην ίδια θερμοκρασία έχει συντελεστή 0.17 W/m K και είναι κακός αγωγός.



Σχήμα 4.1 - Ορισμός ειδικής θερμικής αγωγιμότητας α) στο χαλκό, b) στο ξύλο **[19]**

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1 η θερμική αγωγιμότητα των υλικών κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Ο συντελεστής για τα αέρια διαφέρει από τον αντίστοιχο του χαλκού κατά 4 τάξεις μεγέθους. Παρατηρείται ότι τα καθαρά κρύσταλλα και τα μέταλλα έχουν την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, ενώ τα αέρια και τα μονωτικά υλικά μικρότερο.

Πίνακας 4.1 - Θερμικές αγωγιμότητες ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου

Υλικό	**Συντελεστής αγωγιμότητας k [W/m°C]**	**Υλικό**	**Συντελεστής αγωγιμότητας k [W/m°C]**
Διαμάντι	2300	Τούβλο	0.72
Ασήμι	429	Νερό	0.607
Χαλκός	401	Ανθρώπινο δέρμα	0.37
Χρυσός	317	Ξύλο (δρυς)	0.17
Αλουμίνιο	237	Μαλακό λάστιχο	0.13
Σίδηρος	80.2	Ίνες γυαλιού	0.043
Υδράργυρος	8.54	Αέρας (g)	0.026
Γυαλί	0.78	Ουρεθάνη	0.026

Ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν αυτές οι διακυμάνσεις για την θερμική αγωγιμότητα μεταξύ των υλικών βρίσκεται στην μικροσκοπική δομή των υλικών αυτών, δηλαδή στην διάταξη και την κίνηση των μικροσωματιδίων τους (μόρια ή άτομα).

Η θερμοκρασία είναι ένα μέγεθος της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων αυτών σε ένα υλικό. Στα υγρά ή στα αέρια η κινητική ενέργεια των μορίων οφείλεται στην τυχαία μεταφορική κίνηση των μορίων, στις δονήσεις και στην περιστροφική τους κίνηση. Όταν δύο μόρια έχουν διαφορετική κινητική ενέργεια (άρα και διαφορετικές

θερμοκρασίες) συγκρούονται και μέρος του μορίου με την υψηλότερη ενέργεια (μεγαλύτερη θερμοκρασία) μεταφέρεται στο μόριο με την χαμηλότερη ενέργεια (μικρότερη θερμοκρασία) όπως ακριβώς συμβαίνει στην κρούση δύο ελαστικών σφαιρών ίδιας μάζας με διαφορετικές ταχύτητες όπου ένα μέρος της κινητικής ενέργειας της ταχύτερης σφαίρας μεταφέρεται στην βραδύτερη αυξάνοντας την ταχύτητά της. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία των μορίων, τόσο ταχύτερα κινούνται και τόσο περισσότερες συγκρούσεις συμβαίνουν έχοντας καλύτερη μεταφορά θερμότητας.

Τόσο η κινηματική θεωρία των αερίων που το προβλέπει, όσο και τα πειράματα που το επιβεβαιώνουν, η θερμική αγωγιμότητα των αερίων είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας Τ και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της μοριακής μάζας Μ. Γι' αυτό η θερμική αγωγιμότητα του Ηλίου (He) με M_{He}=4 είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του αέρα με M_{air}=29 και του αργού με M_{Ar}=40 στην ίδια θερμοκρασία **[19]**.

Ο μηχανισμός της διάχυσης θερμότητας για τα υγρά είναι περίπλοκός καθώς εξαιτίας της πυκνής διάταξης των μορίων τους, ασκούν πιο ισχυρή διαμοριακή δύναμη. Η θερμική αγωγιμότητα των υγρών συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των στερεών και των αερίων. Για μια ουσία, η θερμική αγωγιμότητα είναι συνήθως υψηλότερη όταν η ουσία είναι σε στερεή φάση και χαμηλότερη στην αέρια φάση. Σε αντίθεση με τα αέρια η θερμική αγωγιμότητα των περισσότερων υγρών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας με μια αξιοσημείωτη εξαίρεση, αυτή του νερού. Υγρά μέταλλα, όπως ο υδράργυρος και το νάτριο, έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι κατάλληλα σε εφαρμογές όπου είναι επιθυμητή η μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός υγρού, όπως σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

Στα στερεά η αγωγιμότητα οφείλεται σε δύο λόγους: στα πλεγματικά παλμικά κύματα που προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των μορίων τα οποία είναι τοποθετημένα σε σχετικά σταθερές θέσεις με ένα περιοδικό τρόπο, το ονομαζόμενο πλέγμα, και στην ενέργεια που μεταφέρεται δια μέσου της ελεύθερης ροής των ηλεκτρονίων στο στερεό. Η θερμική αγωγιμότητα ενός στερεού λαμβάνεται προσθέτοντας τις συνιστώσες του πλέγματος και των ηλεκτρονίων.

Η εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από την θερμοκρασία προκαλεί σημαντική πολυπλοκότητα στην ανάλυση της αγωγιμότητας ενός σώματος, γι' αυτό το λόγο είναι κοινή πρακτική, όταν οι θερμοκρασιακές διαφορές δεν είναι αρκετά μεγάλες, να υπολογίζεται η θερμική αγωγιμότητα k σε μια μέση τιμή της θερμοκρασίας και να αντιμετωπίζεται ως ένα σταθερό μέγεθος στους υπολογισμούς.

Στην ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, ένα υλικό συνήθως θεωρείται ισοτροπικό, δηλαδή έχει ομοιόμορφες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις. Αυτή η υπόθεση είναι ρεαλιστική για τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στις τοιχοποιίες.

4.1.4. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Αν η εξίσωση (4.4) για την μόνιμη μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε επίπεδη τοιχοποιία, γραφτεί στη μορφή:

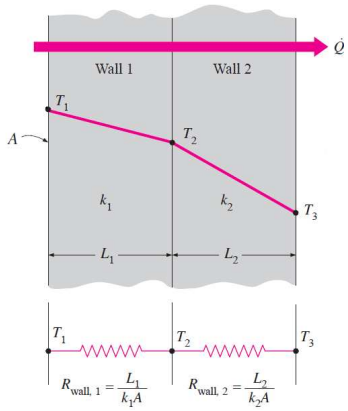
$q_{wall} = \frac{T_1 - T_2}{R_{wall}}$, όπου $R_{wall} = \frac{L}{k}$ [m^2K/W] είναι η θερμική αντίσταση της τοιχοποιίας στην αγωγή θερμότητας ή απλά η αντίσταση αγωγιμότητας του τοίχου, ενώ q η ροή θερμότητας, ή θερμοροή, που διαπερνά την τοιχοποιία ίση με $q_{wall} = \frac{Q_{wall}}{A}$ σε W/m^2. Είναι φανερό ότι η θερμική αντίσταση ενός μέσου εξαρτάται από τη γεωμετρία και της θερμικές ιδιότητες του μέσου.

Αντίστοιχα ορίζονται και οι θερμικές αντιστάσεις στην περίπτωση της μετάδοσης της θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Με σκοπό την γενική έκφραση $Q = \frac{\Delta T}{R}$ έχοντας τις ίδιες μονάδες [m^2K/W], προκύπτουν $R_{conv} = \frac{1}{hA_s}$ και $R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_s}$, όπου $h_{rad} = \varepsilon\sigma\left(T_s^2 + T_{surr}^2\right)\left(T_s + T_{surr}\right)$,όπου ε ο συντελεστής εκπομπής του σώματος, σ η σταθερά του μέλανος σώματος ή σταθερά Boltzmann ίση με $\sigma=5.6697\cdot10^{-8} W/m^2K^4$ και οι θερμοκρασίες T_s, T_{surr} σε Kelvin, του σώματος και του περιβάλλοντος χώρου, αντίστοιχα.

Στην πράξη οι τοιχοποιίες αποτελούνται από πολλά παράλληλα ομογενή στρώματα διαφόρων υλικών. Η θερμική αντίσταση των σύνθετων αυτών τοίχων προσδιορίζεται απλά θεωρώντας τις θερμικές αντιστάσεις των επί μέρους στρωμάτων συνδεδεμένες σε σειρά κατά το ηλεκτρικό ανάλογο των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Έτσι η συνολική θερμική αντίσταση ενός σύνθετου τοίχου υπολογίζεται διαιρώντας τη θερμοκρασιακή διαφορά των δύο τελευταίων επιπέδων με την πυκνότητα ροής θερμότητας q που διαπερνά ολόκληρο τον τοίχο, δηλαδή για επίπεδο δύο στρωμάτων θα είναι:

$$q = \frac{T_1 - T_3}{R_{total}} \tag{4.5}$$

$$\text{όπου} \quad R_{total} = R_{wall,1} + R_{wall,2} = \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \tag{4.6}$$



Σχήμα 4.2 - Δίκτυο θερμικών αντιστάσεων μεταφοράς θερμότητας με αγωγή διαμέσου επίπεδης τοιχοποιίας δύο στρωμάτων **[19]**

Γενικά για ένα σώμα αποτελούμενο από n παράλληλα στρώματα, η ισοδύναμη θερμική αντίσταση θα είναι:

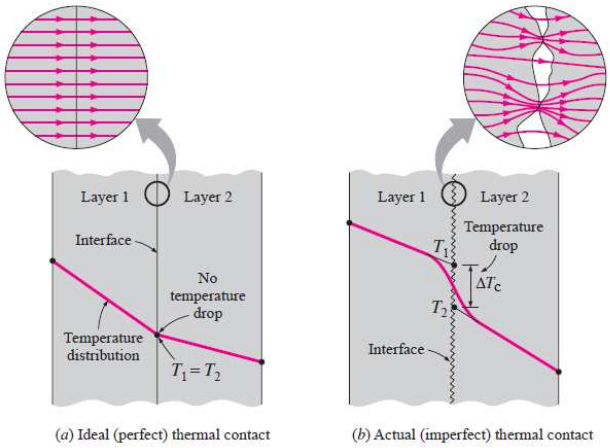
$$R_{total} = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{k_i} \qquad (4.7)$$

Για τα σύνθετα επίπεδα σώματα, εμφανίζεται μια επιπλέον θερμική αντίσταση, η θερμική αντίσταση επαφής, που οφείλεται στο γεγονός ότι δεν επιτυγχάνεται τέλεια επαφή μεταξύ των στρωμάτων. Η θερμική αντίσταση επαφής εξαρτάται από την τραχύτητα των επιφανειών, από την πίεση υπό την οποία είναι εκτεθειμένες οι οριακές επιφάνειες των δύο σωμάτων, από το είδος του ρευστού το οποίο διεισδύει ανάμεσά τους και από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Στην κοινή επιφάνεια ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι σύνθετος: στα σημεία επαφής εμφανίζεται αγωγή ενώ δια του ρευστού η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή αλλά και με ακτινοβολία.

Αν q είναι η θερμοροή και ΔT_c η πτώση της θερμοκρασίας στην κοινή επιφάνεια, η θερμική αντίσταση επαφής R_c υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_c = \frac{\Delta T_c}{q} \qquad (4.8)$$

Εάν η επαφή μεταξύ των δύο σωμάτων είναι τέλεια, η αντίσταση επαφής σχεδόν μηδενίζεται και δεν εμφανίζεται πτώση θερμοκρασίας ΔT_c, κάτο το οποίο φαίνεται και στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 - Κατανομή θερμοκρασίας και γραμμών ροής θερμότητας μεταξύ δύο στρωμάτων σε περίπτωση α) ιδανικής και b) πραγματικής θερμικής επαφής [19]

Η θερμική αντίσταση επαφής ελαττώνεται με την αύξηση της πίεσης που ασκείται στα δύο σώματα υπό συνθήκες κενού. Επίσης επηρεάζεται από το είδος του ρευστού το οποίο διεισδύει μεταξύ των σωμάτων, ένα συνεκτικό ρευστό μειώνει σημαντικά τη θερμική αντίσταση επαφής.

Στις τοιχοποιίες το διάκενο που σχηματίζεται κατά την ένωση των στρώσεων των δομικών υλικών γεμίζει από αέρα και κατά συνέπεια η επιφάνεια διεπαφής λειτουργεί σαν μόνωση λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα.

4.1.5. ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Στις περισσότερες εφαρμογές, η μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός μέσου, είναι βολικό να εκφραστεί σύμφωνα με το νόμο του Newton ως εξής:

$$\dot{Q} = UA\Delta T \Rightarrow U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T} \text{ ή } U = \frac{q}{\Delta T} \qquad (4.9)$$

όπου U ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ο συντελεστής θερμοπερατότητας (U-value).

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7345, ο συντελεστής διαπερατότητας ενός δομικού στοιχείου (U-value) ορίζεται ως το ποσό της ροής θερμότητας σε μόνιμες συνθήκες, διαιρεμένο με την επιφάνεια και τη θερμοκρασιακή διαφορά αέρα ανάμεσα στις πλευρές του δομικού στοιχείου **[20]**.

Αρκετές φορές, στη βιβλιογραφία, ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας ενός δομικού στοιχείου προσδιορίζεται με τη θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών και όχι του αέρα. Στην παρούσα διπλωματική ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας υπολογίζεται από τη θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών της κάθε τοιχοποιίας.

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (4.8) και (4.9) , προκύπτει:

$$U = \frac{1}{R_{total}} \qquad (4.10)$$

Ως εκ τούτου ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας είναι ίσος με το αντίστροφο της συνολικής θερμικής αντίστασης και οι μονάδες στις οποίες εκφράζεται η θερμική διαπερατότητα ενός μέσου είναι [W/m^2K].

Με αυτή την έκφραση, για τον υπολογισμό της θερμικής διαπερατότητας ενός κτιριακού κελύφους αρκεί να είναι γνωστή η πυκνότητα ροής θερμότητας που εισέρχεται ή εξέρχεται από την τοιχοποιία και η επιφανειακή θερμοκρασιακή διαφορά της τοιχοποιίας.

4.1.6. ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ

Πρακτικά, το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας σε ένα τοίχο είναι μη μόνιμο. Η τοιχοποιία εξετάζεται ως ένα επίπεδο σώμα μεγάλων διαστάσεων πλάτους και ύψους αλλά σχετικά μικρού πάχους με ομοιόμορφες θερμοκρασίες και στις δύο επιφάνειες. Ως εκ τούτου το πρόβλημα είναι μονοδιάστατο χωρίς επιπλέον πηγή θερμότητας. Επίσης εξαιτίας τις μικρής διακύμανσης των θερμοκρασιών (περίπου 15 ^oC) οι φυσικές ιδιότητες της τοιχοποιίας είναι πρακτικά σταθερές. Έτσι η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή υπό αυτές τις συνθήκες έχει τη μορφή:

$$\frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{για} \quad 0 \le x \le L \ \text{ με L το πάχος της τοιχοποιίας}$$

Ο συντελεστής α είναι ο συντελεστής διάχυσης ή η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα της τοιχοποιίας και είναι ίσος με $a = \frac{k}{\rho C_p}$ και εμφανίζεται σε όλα τα προβλήματα μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή.

4.1.7. ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ

Η θερμική διάχυση (ή θερμοκρασιακή αγωγιμότητα) είναι μια ιδιότητα του υλικού του σώματος, από την τιμή της οποίας εξαρτάται ο απαιτούμενος χρόνος για την μεταβολή της θερμοκρασίας στο σώμα. Ο συντελεστής θερμικής διάχυσης α, εκφράζει το πόσο γρήγορα διαχέεται η θερμότητα δια μέσου ενός υλικού και ορίζεται ως:

$$\alpha = \frac{Θερμική\ αγωγιμότητα}{Αποθήκευση\ θερμότητας} = \frac{k}{\rho C_p}\ (m^2/sec)$$

Ο παράγοντας ρC_p που βρίσκεται στον παρανομαστή της σχέσης ορισμού της θερμικής διάχυσης, συναντάται συχνά στα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, και καλείται θερμοχωρητικότητα του υλικού. Η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p εκφράζει την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας ενός μέσου, με μονάδες J/kgK, ενώ πολλαπλασιαζόμενη με την πυκνότητα ρ προκύπτει η θερμοχωρητικότητα του

μέσου, εκφράζοντας την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου και έχει μονάδες J/m^3K.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα k εκφράζει το πόσο καλός αγωγός της θερμότητας είναι το υλικό του μέσου, ενώ η θερμοχωρητικότητα ρC_p το πόσο μεγάλο ποσό θερμότητας μπορεί να αποθηκεύσει. Συνεπώς η θερμική διάχυση είναι ο λόγος της θερμότητας που άγεται από μια μονάδα όγκου του υλικού προς τη θερμότητα που αποθηκεύεται. Όσο μεγαλύτερη θερμική διάχυση έχει ένα υλικό, τόσο γρηγορότερα διαδίδεται η θερμότητα στο μέσο. Μικρή θερμική διάχυση σημαίνει ότι η θερμότητα κυρίως απορροφάται από το υλικό, και μικρότερη άγεται περεταίρω. Η θερμική διάχυση για κοινά υλικά, στους 20 ^oC δίνεται στον Πίνακα 4.2. Όπως παρατηρείται, η θερμική διάχυση κυμαίνεται από $\alpha=0.14\cdot10^{-6}$ m^2/s για το νερό έως $149\cdot10^{-6}$ m^2/s στο ασήμι.

Πίνακας 4.2 - Θερμικές διαχύσεις ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου

Υλικό	**Θερμική Διάχυση [m^2/s]**	**Υλικό**	**Θερμική Διάχυση [m^2/s]]**
Ασήμι	$146\cdot10^{-6}$	Τσιμέντο	$0.75\cdot10^{-6}$
Χρυσός	$127\cdot10^{-6}$	Τούβλο	$0.52\cdot10^{-6}$
Χαλκός	$113\cdot10^{-6}$	Σκληρό έδαφος (ξηρό)	$0.52\cdot10^{-6}$
Αλουμίνιο	$97.5\cdot10^{-6}$	Γυαλί	$0.34\cdot10^{-6}$
Σίδηρος	$22.8\cdot10^{-6}$	Υαλοβάμβακας	$0.23\cdot10^{-6}$
Υδράργυρος	$4.7\cdot10^{-6}$	Νερό	$0.14\cdot10^{-6}$
Μάρμαρο	$1.2\cdot10^{-6}$	Βοδινό κρέας	$0.14\cdot10^{-6}$
Πάγος	$1.2\cdot10^{-6}$	Ξύλο (δρυς)	$0.13\cdot10^{-6}$

4.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Ο θεωρητικός υπολογισμός της θερμικής αντίστασης και της θερμικής διαπερατότητας ενός κτιριακού κελύφους γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 - *"Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method"* **[21]**.

Οι αρχές της υπολογιστικής μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της θερμικής αντίστασης κάθε θερμικά ομογενούς στοιχείου της τοιχοποιίας και ο συνδυασμός αυτών με σκοπό τον προσδιορισμό της συνολικής θερμικής αντίστασης του κελύφους, συμπεριλαμβανομένων και των επιφανειακών αντιστάσεων όπου είναι απαραίτητες.

Η θερμική αντίσταση ενός ομογενούς στρώματος μιας τοιχοποιίας υπολογίζεται αν είναι γνωστή η θερμική αγωγιμότητα του υλικού του στρώματος και το πάχος του, από τη σχέση:

$$R = \frac{d}{k} \tag{4.11}$$

όπου d το πάχος του στρώματος και k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού η οποία είτε υπολογίζεται πειραματικά, είτε λαμβάνεται από πίνακες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος d, ίσως είναι διαφορετικό από το ονομαστικό πάχος, κυρίως λόγω συμπίεσης των δομικών υλικών στην τοιχοποιία.

Η τιμή της θερμικής αντίστασης που χρησιμοποιείται σε ενδιάμεσους υπολογισμούς πρέπει να υπολογίζεται με τουλάχιστον 3 δεκαδικά ψηφία.

Όταν η τοιχοποιία περιλαμβάνει στρώμα αέρα, το οποίο:

- οριοθετείται από δύο παράλληλα επίπεδα, κάθετα στην ροή θερμότητας, με συντελεστή εκπομπής χαμηλότερο από 0.8
- έχει πάχος (στην κατεύθυνση της ροής θερμότητας) μικρότερο από το 10% των άλλων διαστάσεων και δεν είναι μεγαλύτερο από 0.3m
- δεν υπάρχουν εναλλαγές του αέρα με το εσωτερικό περιβάλλον

η θερμική αντίσταση του στρώματος αέρα προσδιορίζεται από το Clause 5.3, Table 2 του προτύπου ανάλογα με το αν το στρώμα είναι καλώς, ελαφρώς ή καθόλου αεριζόμενο.

Αν το στρώμα αέρα δεν ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις, τότε η θερμική αντίσταση του στρώματος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, σύμφωνα με το Annex B.2 του προτύπου:

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} \tag{4.12}$$

όπου h_r ο συντελεστής ακτινοβολίας οποίος είναι ίσος με $h_r = E \cdot h_{ro}$

με h_{ro} ο συντελεστής ακτινοβολίας μέλαν σώματος και E ο συντελεστής εκπομπής μεταξύ των επιφανειών:

$$E = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \tag{4.13}$$

και ε_1, ε_2 οι συντελεστές εκπομπής των επιφανειών στο διάκενο

και h_a είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας/συναγωγιμότητας του διακένου, ο οποίος για οριζόντια ροή θερμότητας είναι ο μεγαλύτερος από τις τιμές 1.25 W/m^2K και $0.0025/d$ W/m^2K, με d το πάχος του διακένου **[21]**.

Η συνολική θερμική αντίσταση μιας τοιχοποιίας n ομογενών, στρωμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \ldots + R_n + R_{se} \tag{4.14}$$

όπου R_{si} και R_{se} η εσωτερική και εξωτερική επιφανειακή αντίσταση, οι οποίες λαμβάνονται από το Clause 5.2 Table 1 του προτύπου ISO 6946 σε σχέση με την κατεύθυνση της ροής θερμότητας και $R_1,R_2...R_n$ οι θερμικές αντιστάσεις των αντίστοιχων στρωμάτων του τοίχου.

Όταν ζητείται ο προσδιορισμός της θερμικής αντίστασης μιας τοιχοποιίας και αυτός γίνεται χρησιμοποιώντας τις επιφανειακές θερμοκρασιακές διαφορές των δύο επιφανειών, οι επιφανειακές θερμικές αντιστάσεις παραλείπονται και η συνολική θερμική αντίσταση θα είναι:

$$R_{Wall} = R_1 + R_2 + ... + R_n \tag{4.15}$$

Τέλος η θερμική διαπερατότητα του κελύφους δίνεται από τη σχέση:

$$U_T = \frac{1}{R_T} \text{ ή } U_{Wall} = \frac{1}{R_{Wall}} \tag{4.16}$$

ανάλογα τον ορισμό της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας που χρησιμοποιείται.

Η θερμική διαπερατότητα που λαμβάνεται από αυτή τη διαδικασία θα πρέπει να διορθώνεται για την αποφυγή των επιπτώσεων σε περιπτώσεις:

- δημιουργίας κενών αέρος στη μόνωση
- μηχανικές συνδέσεις που διαπερνούν τη μόνωση
- καθίζηση σε ανεστραμμένες οροφές

Η διορθωμένη θερμική διαπερατότητα λαμβάνεται προσθέτοντας τον όρο διόρθωσης ΔU:

$$U_{cor} = U + \Delta U \tag{4.17}$$

όπου ο όρος ΔU, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \tag{4.18}$$

όπου ΔU_g η διόρθωση για τα κενά αέρα, ΔU_g η διόρθωση για της μηχανικές συνδέσεις και ΔU_g η διόρθωση για τις ανεστραμμένες οροφές.

Για τις επιμέρους διορθώσεις, ισχύουν:

$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_I}{R_T} \right)^2$, όπου ο παράγοντας ΔU'' λαμβάνεται από τον πίνακα Table D.1 του Annex D του προτύπου ISO 6946 και R_I η θερμική αντίσταση του στρώματος που περιέχει κενά αέρα.

$\Delta U_f = a \lambda_f n_f A_f$, όπου α ένας συντελεστής ο οποίος λαμβάνεται από πίνακα, λ_f η θερμική αγωγιμότητα της μηχανικής σύνδεσης, n_f το πλήθος των μηχανικών

συνδέσεων ανά τετραγωνικό μέτρο και A_f η επιφάνεια των μηχανικών συνέσεων.

Δεν εφαρμόζεται διόρθωση στις ακόλουθες περιστάσεις:

- όταν ο τοίχος συνδέεται μέσω κενής κοιλότητας
- όταν ο τοίχος συνδέεται μεταξύ λιθόκτιστου στρώματος και ξύλου με καρφιά
- όταν η θερμική αγωγιμότητα των μηχανικών συνδέσεων είναι μικρότερη από 1 W/mK

Αν η θερμική διαπερατότητα παρουσιάζεται ως τελικό αποτέλεσμα, θα πρέπει να στρογγυλοποιείται στα δύο σημαντικά ψηφία και να παρέχονται όλες οι πληροφορίες των δεδομένων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της **[21]**.

4.3.ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Από τη μελέτη των προτύπων ISO 9869 **[14]** και ASTM C 1155-95 (2007) **[16]** για τους τύπους των κτιριακών κελυφών που μελετήθηκαν, περιγράφονται τέσσερις διαδικασίες μέτρησης της θερμικής αντίστασης και θερμοπερατότητας από επιτόπιες μετρήσεις επιφανειακών θερμοκρασιών και ροών θερμότητας. Αυτές είναι: η μέθοδος μέσης τιμής (average method) κατά ISO 9869, αθροιστική τεχνική (summation technique) κατά ASTM C 1155, η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων κατά ASTM (sum of least squares technique) και η δυναμική μέθοδος κατά ISO (dynamic analysis method). Οι τεχνικές αυτές περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες. Γενικά στη βιβλιογραφία έχουν αναλυθεί και άλλες τεχνικές όπως η πολλαπλή ανάλυση παλινδρόμησης, η ανάλυση Fourier και το ψηφιακό φιλτράρισμα **[16-Note 7]**. Σε κάθε περίπτωση η θερμική διαπερατότητα, U_{wall} που προσδιορίζεται, αναφέρεται σε θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών του κελύφους και όχι του αέρα περιβάλλοντος.

4.3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ κατά ISO 9869:1994

Η μέθοδος της μέσης τιμής (average method) είναι η πιο απλή μέθοδος προσδιορισμού της θερμικής αντίστασης ενός κτιριακού κελύφους και αναλύεται από το πρότυπο ISO 9869. Η υπολογιστική αυτή μέθοδος διαχειρίζεται ένα σύνολο δεδομένων θερμορροών και επιφανειακών θερμοκρασιακών διαφορών στο χρόνο. Η σύγκλιση επιταχύνεται όταν η θερμοκρασία στην εξωτερική πλευρά είναι σταθερά μεγαλύτερη ή μικρότερη από την εσωτερική. Όταν το τελευταίο από τα παραπάνω δεν ικανοποιείται, η τεχνική υπολογισμού παρατείνεται επειδή οι αρνητικές τιμές ΔΤ και q αντισταθμίζουν τη συσσώρευση θετικών τιμών αυτών των μεταβλητών. Λόγω του ότι

αυτή η διαδικασία δεν διαχειρίζεται την θερμική αποθήκευση, η τεχνική αυτή είναι ευαίσθητη στην ύπαρξη μιας σταδιακής αύξησης ή μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς, όπως για παράδειγμα μεταβολές χαμηλής συχνότητας, ειδικά για πολύ βαριές κατασκευές.

Αυτή η μέθοδος υποθέτει ότι η θερμική αγωγιμότητα ή διαπερατότητα ενός μέσου μπορεί να ληφθεί διαιρώντας τη μέση θερμοροή με τη μέση θερμοκρασιακή διαφορά, παίρνοντας τους μέσους όρους για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Αν ο δείκτης j απαριθμεί κάθε μέτρηση, η εκτίμηση της θερμικής αντίστασης λαμβάνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left(Tsi_j - Tse_j \right)}{\sum_{j=1}^{n} \left(q_j \right)} \tag{4.19}$$

και αντίστοιχα η εκτίμηση της θερμικής διαπερατότητας θα είναι:

$$U_{Wall} = \frac{1}{R} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left(q_j \right)}{\sum_{j=1}^{n} \left(Tsi_j - Tse_j \right)} \tag{4.20}$$

Καθώς κάθε εκτίμηση υπολογίζεται μετά από κάθε μέτρηση, παρατηρείται μια σύγκλιση σε μια τιμή. Αυτή η τιμή είναι κοντά στην πραγματική εφόσον:

- Το θερμικό περιεχόμενο του κελύφους είναι το ίδιο τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, δηλαδή ίδια κατανομή θερμοκρασίας και υγρασίας.
- Οι αισθητήρες ροής θερμότητας δεν είναι τοποθετημένοι στο εξωτερικό τοίχωμα του κτιρίου και έτσι αποφεύγεται η έκθεσή τους στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και έχουν τοποθετηθεί σύμφωνα με τα πρότυπα. Ο συντελεστής εκπομπής του αισθητήρα επιφανειακής θερμοκρασίας είναι γενικά διαφορετικός από το συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας του τοίχου με αποτέλεσμα να δίνουν εσφαλμένες τιμές θερμοκρασίας.
- Η θερμική αγωγιμότητα του κελύφους είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ

Για ελαφρές κατασκευές, όπου η θερμοχωρητικότητα των δομικών υλικών ανά μονάδα επιφάνειας είναι μικρότερη από 20kJ/m^{2}K, η ανάλυση γίνεται με δεδομένα τα οποία έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας, δηλαδή μία ώρα μετά τη δύση του ηλίου μέχρι την ανατολή του. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν οι συνέπειες της ηλιακής ακτινοβολίας. Η πειραματική διαδικασία μπορεί να σταματήσει όταν τα

αποτελέσματα μετά από τρεις συνεχόμενες νύχτες για τις οποίες η τιμή της θερμικής διαπερατότητας στην οποία συγκλίνει η μέθοδος, δεν διαφέρει περισσότερο από ±5%, αλλιώς η πειραματική διαδικασία θα πρέπει να συνεχιστεί.

Για βαριές κατασκευές, όπου η θερμοχωρητικότητα των δομικών υλικών ανά μονάδα επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από 20kJ/m^{2}K η ανάλυση διεξάγεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου η οποία είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών.

Η πειραματική διαδικασία τελειώνει όταν πληρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- η διάρκειά της υπερβαίνει τις 72 ώρες (3 ημέρες)
- η τιμή της θερμικής αντίστασης που λαμβάνεται στο τέλος, δεν αποκλίνει περισσότερο από ±5% από την τιμή που έχει ληφθεί 24 ώρες πριν
- η τιμή της θερμικής αντίστασης που λαμβάνεται μετά από την ανάλυση των δεδομένων της πρώτης περιόδου (τα 2/3 της συνολικής διάρκειας) δεν αποκλίνει περισσότερο από ±5% από την τιμή που έχει ληφθεί από τα δεδομένα της τελευταίας περιόδου με την ίδια διάρκεια (2/3 της συνολικής)
- εάν η αλλαγή στην αποθηκευμένη θερμότητα στον τοίχο είναι περισσότερο από 5% της θερμότητας που διαπερνά τον τοίχο καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η δυναμική μέθοδος.

ΔΙΟΡΘΩΣΗ

Ο αισθητήρας ροής θερμότητας προσθέτει ένα επιπλέον επίπεδο στις μετρήσεις η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αν το επίπεδο αυτό είναι απείρως μεγάλο και λεπτό, η διόρθωση είναι αμελητέα. Αν όμως το επίπεδο, είναι μεν μεγάλο αλλά πεπερασμένου πάχους, τότε η διόρθωση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αν είναι γνωστή (R_{HFM}) η θερμική αντίσταση του αισθητήρα. Για τη μονοδιάστατη διόρθωση υπάρχουν τρείς περιπτώσεις:

- Αν η μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας της τοιχοποιίας λαμβάνεται κάτω από τον αισθητήρα, τότε δεν χρειάζεται διόρθωση.
- Αν η μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας της τοιχοποιίας λαμβάνεται δίπλα από τον αισθητήρα, τότε η θερμική αντίσταση διορθώνεται ως εξής:

$$R_{cor} = \frac{\delta T}{q} - R_{HFM} \qquad (4.21)$$

- Αν γίνεται μέτρηση θερμικής διαπερατότητας U_T χρησιμοποιώντας θερμοκρασίες αέρα και οι αισθητήρες είναι μεγάλοι τότε η διόρθωση έχει ως εξής:

$$U_T = \frac{q}{\delta T - R_{HFM}\, q} \qquad (4.22)$$

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από:

- Την ακρίβεια βαθμονόμησης των αισθητήρων ροής θερμότητας και θερμοκρασίας. Το σφάλμα είναι περίπου 5% αν οι αισθητήρες είναι καλά βαθμονομημένοι.
- Την ακρίβεια του συστήματος λήψης δεδομένων.
- Τα τυχαία σφάλματα εξαιτίας των ελαφρών διαφορών στη θερμική επαφή μεταξύ αισθητήρων και επιφανειών. Είναι περίπου 5% της μέσης τιμής, αν οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι προσεκτικά. Η συνεισφορά στο τελικό σφάλμα μειώνεται με την τοποθέτηση αρκετών αισθητήρων.
- Το σφάλμα λειτουργίας του αισθητήρα ροής θερμότητας εξαιτίας της διαταραχής των ισοθερμοκρασιακών στην επιφάνεια της τοιχοποιίας από την παρουσία των αισθητήρων. Το σφάλμα αυτό είναι ανάλογο του λόγου του πάχους του αισθητήρα προς το πάχος του κελύφους. Αν το σφάλμα αυτό εκτιμηθεί και εφαρμοσθεί κάποια διόρθωση, η εναπομένουσα αβεβαιότητα είναι μεταξύ 2% και 3% για λεπτές τοιχοποιίες.
- Τα σφάλματα εξαιτίας των διακυμάνσεων των θερμοκρασιών και των θερμοροών με την πάροδο του χρόνου. Η συνεισφορά αυτή μειώνεται με την καταγραφή δεδομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα και μειώνοντας τις διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας στο ελάχιστο ή χρησιμοποιώντας τη δυναμική μέθοδο.
- Για μετρήσεις διαπερατότητας U_T χρησιμοποιώντας θερμοκρασίες αέρα, τα σφάλματα εξαιτίας των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων μέσα στο χώρο και των διαφορών μεταξύ θερμοκρασίας αέρα και θερμοκρασίας ακτινοβολούμενων επιφανειών.

Αν ληφθούν υπόψη οι παραπάνω συνθήκες, η συνολική αβεβαιότητα αναμένεται μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων και του αριθμητικού αθροίσματος των επί μέρους σφαλμάτων, με επικρατέστερη την τιμή του πρώτου.

Αν οι συνθήκες αυτές δεν πληρούνται, η πειραματική διαδικασία συνεχίζει να είναι έγκυρη όσον αφορά το πρότυπο, υπό την προϋπόθεση ότι υπολογίζεται μεγαλύτερη αβεβαιότητα σύμφωνα με τις περιστάσεις της μέτρησης.

Η πιθανότητα επικράτησης μεγάλου σφάλματος αυξάνεται όταν:

- Η θερμοκρασίες (πρακτικά οι εσωτερικές) παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις σε σχέση με την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο πλευρών του κελύφους.
- Η τοιχοποιία είναι βαριά και η διάρκεια της μέτρησης μικρή
- Η τοιχοποιία υποβάλλεται σε ηλιακή ακτινοβολία ή άλλα θερμικά φορτία.
- Το σφάλμα των αισθητήρων ροής θερμότητας λόγω του πεπερασμένου πάχους τους, δεν εκτιμάται, καθώς μπορεί να φθάσει μέχρι και 30% σε ορισμένες περιστάσεις

Η ακρίβεια των μετρήσεων της διαπερατότητας U_T χρησιμοποιώντας θερμοκρασίες αέρα, εξαρτάται από τον καθορισμό των θερμοκρασιών του περιβάλλοντος για τις μετρήσεις.

4.3.2. ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ κατά ASTM C 1155-95 (2007)

Η υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας με την τεχνική της άθροισης (Summation Technique) κατά ASTM, δεν αναμένεται να έχει μεγάλες διαφορές με την μέθοδο της μέσης τιμής κατά ISO, καθώς και εδώ η υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής αντίστασης είναι το πηλίκο της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς των επιφανειών προς τη μέση θερμοροή που μετριέται. Οι διαφορές των δύο μεθόδων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι κατά τον έλεγχο σύγκλισης και την ανάλυση σφάλματος.

Πιο αναλυτικά, για κάθε χρονικό διάστημα, ξεκινώντας από την αρχή των μετρήσεων έως την τελευταία μέτρηση N, η εκτιμώμενη θερμική αντίσταση R_e υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_e = \frac{\sum_{k=1}^{N} \Delta T_{sk}}{\sum_{k=1}^{N} q_k} \qquad (4.23)$$

όπου R_e η εκτιμώμενη θερμική αντίσταση, ΔT_k και q_k η θερμοκρασιακή διαφορά και η θερμοροή αντίστοιχα, για τη χρονική στιγμή k.

Η εξίσωση (4.23) εφαρμόζεται στην περίπτωση όπου η ροή θερμότητας μεταξύ των δύο επιφανειών είναι κάθετη, ενώ σε περίπτωση ύπαρξης πλευρικής ροής η παραπάνω εξίσωση θα χρειαζότανε βελτίωση.

ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Για τις μέσες και ελαφρές κατασκευές, υπολογίζεται μια εκτιμώμενη μέση θερμοκρασία της τοιχοποιίας, στην οποία αναφέρεται η θερμική αντίσταση που υπολογίζεται, χρησιμοποιώντας τους σταθμισμένους μέσους όρους από την εξής σχέση:

$$T_e = \frac{\sum_{k=1}^{N} \Delta T_k \cdot \left(T_{isk} - \frac{1}{2} \Delta T_k \right)}{\sum_{k=1}^{N} \Delta T_k} \qquad (4.24)$$

ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η πειραματική διαδικασία πρέπει να διαρκέσει ένα ή περισσότερα πολλαπλάσια των 24 ωρών. Για την τεχνική αυτή επιλέγεται ένα χαρακτηριστικό χρονικό διάστημα n για τον έλεγχο της σύγκλισης, εξετάζοντας την διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης θερμικής αντίστασης την τρέχουσα χρονική στιγμή με την αντίστοιχη τιμή n ώρες νωρίτερα. Μια χαρακτηριστική τιμή του n είναι 12h, ενώ η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 6 και 48 ωρών και η χρήση του είναι ως εξής: Μετά από μια χρονική περίοδο n ωρών, ξεκινά ο υπολογισμός του παράγοντα σύγκλισης:

$$CR_n = \frac{R_e(t) - R_e(t-n)}{R_e(t)} \tag{4.25}$$

Η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται αποκλειστικά για αυτή τη μέθοδο.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ

Αρχικά καθορίζεται η χρονική περίοδος στην οποία η τιμή CR_n θα πρέπει να παραμένει κάτω από μια επιλεγμένη τιμή. Η περίοδος αυτή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τρεις φορές μεγαλύτερη του χρονικού διαστήματος n, δηλαδή τουλάχιστον 3·n ώρες. Απαιτείται $CR_n<0.10$. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η τιμή της εκτιμώμενης θερμικής αντίστασης R_e από αυτό το χρονικό διάστημα, για τον καθορισμό της θερμικής αντίστασης του κελύφους του κτιρίου και τέλος απεικονίζεται σε διάγραμμα η τιμή της εκτιμώμενης θερμικής αντίστασης σε συνάρτηση με το χρόνο, για την επιβεβαίωση ότι η καμπύλη συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή.

ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Για την εκτίμηση του συντελεστή μεταβολής της θερμικής αντίστασης R_e συλλέγονται αρκετά δεδομένα ώστε η επανάληψη του ελέγχου της σύγκλισης να γίνει τουλάχιστον δύο παραπάνω φορές, κάθε φορά ξεκινώντας από το σημείο όπου έχει συγκλίνει το προηγούμενο πακέτο δεδομένων, έτσι ώστε να ληφθούν τουλάχιστον τρεις ανεξάρτητες τιμές για την θερμική αντίσταση. Υπολογίζεται έτσι ο συντελεστής μεταβολής ($V(R_e)$) σύμφωνα με τη σχέση:

$$V(R_e) = \frac{s(R_e)}{mean(R_e)} \times 100\% \tag{4.26}$$

όπου $s(R_e)$ η τυπική απόκλιση υπολογίζεται με N-1 βαθμούς ελευθερίας και N το πλήθος των εκτιμώμενων τιμών R_e ($N \geq 3$).

Εάν η τιμή του συντελεστή μεταβολής $V(R_e)$ είναι μικρότερη από 10%, χρησιμοποιείται η μέση τιμή των N εκτιμώμενων R_e για τον προσδιορισμό της θερμικής

αντίστασης της τοιχοποιίας. Εάν $V(R_e) > 10\%$, η υπολογιστική μέθοδος δεν παρέχει μια αποδεκτή τιμή R_e για τη θερμική αντίσταση για το πακέτο δεδομένων που αναλύθηκε.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Η ακρίβεια της υπολογιστικής διαδικασίας σύμφωνα με το πρότυπο, εξαρτάται από:

- Την ακρίβεια των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιούνται
- Την κατασκευή της τοιχοποιίας που μετράται
- Την επιλογή των σημείων τοποθέτησης των αισθητήρων
- Την υπολογιστική διαδικασία που χρησιμοποιείται
- Το είδος των δεδομένων που λαμβάνονται

Στις περισσότερες περιπτώσεις μετρήσεων θερμικών ιδιοτήτων, υπάρχει σημαντικό πειραματικό σφάλμα, το οποίο προσδίδει ένα συντελεστή διακύμανσης της τάξης του 10% για την μέθοδο αυτή.

Η τεχνική αυτή δείχνει να είναι επαναλήψιμη, δηλαδή για δεδομένα της ίδιας χρονοσειράς με διαφορετικούς χρόνους εκκίνησης, δίνουν ίδια θερμική αντίσταση. Αισθητήρες τοποθετημένοι ο ένας δίπλα στον άλλο δίνουν ίδιο αποτέλεσμα ±5%, για διαφορετικά κτίρια της ίδια κατασκευής. Τα αποτελέσματα επαληθεύονται και σε κελύφη με διανοίξεις, που ήταν στο 10% των υπολογισμών της ASHRAE **[16]**.

Ο υπολογισμός της ακρίβειας αυτής της μεθόδου μπορεί να ελεγθεί παίρνοντας ανεξάρτητες τιμές για την εκτίμηση της θερμικής αντίστασης που έχουν πλήρη σύγκλιση καθορίζοντας τη διακύμανση σύμφωνα με την εξίσωση (4.26). Γενικά αν τα κριτήρια σύγκλισης που περιγράφθηκαν ικανοποιούνται, η θερμοκρασιακή διαφορά ΔΤ, θα είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τα τυχαία σφάλματα των αισθητήρων θερμότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η διακύμανση της θερμικής διαπερατότητας U, για την αθροιστική μέθοδο (summation technique) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V(U) = \frac{M \cdot s^2(q)}{\left[\sum_{k=1}^{M} \Delta T_k\right]^2} \qquad (4.27)$$

όπου M το πλήθος των μετρήσεων και $s^2(q)$ η διακύμανση της ροής θερμότητας q, ενώ η διακύμανση της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔΤ είναι αμελητέα.

Η αθροιστική μέθοδος (summation technique), δεν έχει σημαντική πηγή σφάλματος, στο βαθμό που τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι αμερόληπτα και η πλευρική ροή θερμότητας δεν είναι σημαντική, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι τα κριτήρια σύγκλισης έχουν επιτευχθεί.

4.3.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ κατά ASTM C 1155-95 (2007)

Η συγκεκριμένη μέθοδος, όπως περιγράφεται από το πρότυπο ASTM C1155, αξιοποιεί την αριθμητική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το φαινόμενο της μονοδιάστατης μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε ένα ομογενές στρώμα με οριακές συνθήκες μετρούμενες τιμές θερμοκρασίας και ροής θερμότητας.

Σε ένα ομογενές κέλυφος που διέπεται από μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας με αγωγή, η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο, επιτρέποντας μεταβλητές θερμικές ιδιότητες μεταβλητές ως προς τη θερμοκρασία είναι η εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_s \frac{\partial T}{\partial x}\right) = \left(\rho C_p\right)_s \frac{\partial T}{\partial t} \text{ με } q = -k_s \frac{\partial T}{\partial x} \tag{4.28}$$

Στη συγκεκριμένη μέθοδο το κάθε κτιριακό κέλυφος, στο οποίο προσδιορίζεται η θερμική αντίσταση, θεωρείται ως ένα ισοδύναμο ομογενές και μονοστρωματικό κέλυφος ίσου πάχους, το οποίο παρουσιάζει την ίδια θερμική συμπεριφορά με το πραγματικό. Ως εκ τούτου το θεωρητικό αυτό κέλυφος θα έχει τον ίδιο συντελεστή θερμοπερατότητας με τον πραγματικό. Συνεπώς εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση αγωγής θερμότητας στο θεωρητικό αυτό κέλυφος, προσδιορίζεται ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας U_{wall} της πραγματικής τοιχοποιίας.

Θεωρείται επίσης ότι η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας της κάθε τοιχοποιίας συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι αμελητέα. Κατόπιν τούτου, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \left(\rho C_p\right)_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{ή αλλιώς}$$
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \left(\frac{\rho C_p}{k}\right)_s \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \underline{\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}} \tag{4.29}$$

όπου α η θερμική διάχυση του κελύφους και είναι ίση με

$$a = \left(\frac{k}{\rho C_p}\right)_s \tag{4.30}$$

Με βάση την εξίσωση (4.29) για διάφορες τιμές των θερμικών ιδιοτήτων k, ρ και C_p υπολογίζονται οι θεωρητικές τιμές των θερμοκρασιών και των θερμοροών. Κατόπιν οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις μετρούμενες σε κάθε κόμβο που υπάρχουν μετρήσεις, δημιουργώντας έτσι ένα σταθμισμένο άθροισμα τετραγώνων Γ:

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\left(Y_{mi} - T_{mi}\right)^2 \cdot W_{Tm} + \sum_{i=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}\left(F_{ni} - q_{ni}\right)^2 \cdot W_{qn} \tag{4.31}$$

όπου T_{mi} και q_{ni} οι μετρούμενες τιμές θερμοκρασίας και θερμοροής τη χρονική στιγμή i στον κόμβο m και n, αντίστοιχα, ενώ Y_{mi} και F_{ni} οι αντίστοιχες υπολογιζόμενες από την επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης. Οι συντελεστές W_{Tm} και W_{qn} είναι συντελεστές

βαρύτητας της προσαρμογής των καμπυλών της θεωρητικής θερμοκρασίας κάθε κόμβου και της θερμοροής αντίστοιχα.

ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων ελέγχει την προσαρμογή των μετρήσεων για το πόσο καλά το θεωρητικό μοντέλο ταιριάζει με τα πειραματικά δεδομένα. Είναι επιθυμητό να λαμβάνονται αρκετές μετρήσεις. Η συλλογή των δεδομένων σε κάθε περίπτωση είναι αρκετά μεγάλη ώστε η αβεβαιότητα στην τιμή της θερμικής αντίστασης ή της αγωγιμότητας παραμένει στο 10% σε ένα επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Από την προσαρμογή της καμπύλης της θεωρητικής θερμοροής με την αντίστοιχη καμπύλη των πειραματικών μετρήσεων προσδιορίζεται η σύγκλιση και η επάρκεια των δεδομένων.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Όπως και αθροιστική τεχνική, η ακρίβεια της υπολογιστικής διαδικασίας εξαρτάται από διαφόρους παράγοντες. Στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων το αναμενόμενο συνολικό σφάλμα είναι περίπου 6%.

Σε αυτή τη μέθοδο δεν υπάρχει σημαντική πηγή σφάλματος, στο βαθμό που τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι αμερόληπτα και η πλευρική ροή θερμότητας δεν είναι σημαντική. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την ποιότητα της προσαρμογής των θεωρητικών καμπυλών από τις πειραματικές.

4.3.4. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ κατά ISO 9869:1994

Η δυναμική ανάλυση (dynamic method) είναι μια περίπλοκη μεθοδολογία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των σταθερών ιδιοτήτων του κτιριακού κελύφους από μετρήσεις θερμορροών όταν λαμβάνουν χώρα μεγάλες διακυμάνσεις στις θερμορροές και τις θερμοκρασίες.

Το δομικό στοιχείο αντιπροσωπεύεται στο μοντέλο από την θερμική αγωγιμότητα Λ και αρκετές χρονικές σταθερές τ. Οι άγνωστες αυτοί παράμετροι ($\Lambda,\tau_1,\tau_2,\tau_3,...$) θα υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις θερμοκρασιών και ροών θερμότητας. Για το σκοπό αυτό, δημιουργείται ένα σύστημα εξισώσεων. Ο βασικός αλγόριθμος είναι ο εξής:

Από τα μετρητικά δεδομένα λαμβάνονται N σύνολα δεδομένων, για την ροή θερμότητας (q_i) και τις εσωτερικές και εξωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες (T_{Ii} , T_{Ei}) του κελύφους μετρούμενα κατά τις χρονικές στιγμές t_i (όπου ο δείκτης i κυμαίνεται μεταξύ 1 και N).

Η θερμοροή (q_i) την χρονική στιγμή t_i είναι μία συνάρτηση των θερμοκρασιών εκείνη τη χρονική στιγμή και όλων των προηγούμενων χρονικών στιγμών. Έτσι η θερμοροή μπορεί να γραφτεί:

$$q_i = \Lambda(T_{Ii} - T_{Ei}) + K_1\dot{T}_{Ii} + K_2\dot{T}_{Ei} + \sum_n P_n \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ij}(1-\beta_n)\beta_n(i-j) + \sum_n Q_n \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ej}(1-\beta_n)\beta_n(i-j) \quad (4.32)$$

όπου $\dot{T}_I$ η χρονική παράγωγος της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι:

$$\dot{T}_{Ii} = \frac{(T_{Ii} - T_{Ii-1})}{\Delta t} \quad (4.33)$$

Αντίστοιχα ορίζεται και η χρονική παράγωγος της εξωτερικής θερμοκρασίας $\dot{T}_E$.

Οι συντελεστές K_1, K_2, P_n και Q_n είναι δυναμικά χαρακτηριστικά του κελύφους χωρίς φυσική σημασία και εξαρτώνται από τη χρονική σταθερά τ_n.

Οι μεταβλητές β_n είναι εκθετικές συναρτήσεις της χρονικής σταθεράς τ_n:

$$\beta_n = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_n}\right) \quad (4.34)$$

Ο δείκτης του αθροίσματος n καλύπτει θεωρητικά όλες τις χρονικές σταθερές. Όμως αυτές οι χρονικές σταθερές τ_n, μειώνονται ραγδαία όσο αυξάνεται η μεταβλητή β_n. Ως εκ τούτου μόνο μερικές χρονικές σταθερές τ_n, πρακτικά από μία μέχρι τρεις, είναι αναγκαίες για την πλήρη περιγραφή της σχέσης μεταξύ των q_i,T_I και T_E.

Γι' αυτό το λόγο είναι αρκετές m=3 χρονικές σταθερές (τ_1, τ_2, τ_3) και η εξίσωση (4.32) θα περιέχει 2m+3, δηλαδή 9 άγνωστες παραμέτρους τις εξής:

$$\Lambda,\ K_1,\ K_2,\ P_1,\ Q_1,\ P_2,\ Q_2,\ P_3 \text{ και } Q_3.$$

Γράφοντας την εξίσωση (4.32) εννέα (2m+3) φορές για εννέα set δεδομένων για διάφορες χρονικές στιγμές, τότε δημιουργείται ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων το οποίο μπορεί να λυθεί καθορίζοντας αυτές τις παραμέτρους και ιδιαίτερα το συντελεστή Λ που αντιστοιχεί στη θερμική διαπερατότητα του κτιριακού κελύφους.

Για την ολοκλήρωση του αντίστοιχου δείκτη j του αθροίσματος της εξίσωσης απαιτείται ο καθορισμός του αριθμού p των συμπληρωματικών sets.

Τελικά, με σκοπό την εξάλειψη των στοχαστικών μεταβλητών, απαιτούνται περισσότερες μετρήσεις δεδομένων, οδηγώντας σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, με παραπάνω εξισώσεις από αγνώστους, το οποίο μπορεί να λυθεί με την κλασική προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων.

Έτσι το set των τουλάχιστον εννέα (2m+3) εξισώσεων που δημιουργείται μπορεί να γραφτεί σε μητρωική μορφή ως:

$$\vec{q} = [X]\vec{Z} \quad (4.35)$$

όπου

$\vec{q}$ είναι το διάνυσμα των M στοιχείων των δεδομένων θερμορροών q_i. Το πλήθος των M τιμών του πίνακα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 9 και το i κυμαίνεται από N-M+1 έως N.

$\vec{Z}$ είναι ένα διάνυσμα των 9 (2m+3) άγνωστων παραμέτρων της παραπάνω εξίσωσης

[X] είναι ένας ορθογώνιος πίνακας με M γραμμές (από i=N-M+1 έως N) και 9 (2m+3) στήλες. Τα στοιχεία του πίνακα για την κάθε γραμμή i είναι:

$$X_{i,1} = T_{Ii} - T_{E_i}$$

$$X_{i,2} = \dot{T}_I = \frac{(T_{Ii} - T_{Ii-1})}{\Delta t} \qquad X_{i,3} = \dot{T}_E = \frac{(T_{Ei} - T_{Ei-1})}{\Delta t}$$

$$X_{1,4} = \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ij}(1-\beta_1)\beta_1(i-j) \qquad X_{1,5} = \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ej}(1-\beta_1)\beta_1(i-j) \tag{4.36}$$

$$X_{1,6} = \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ij}(1-\beta_2)\beta_2(i-j) \qquad X_{1,7} = \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ej}(1-\beta_2)\beta_2(i-j)$$

$$X_{1,8} = \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ij}(1-\beta_3)\beta_3(i-j) \qquad X_{1,9} = \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{Ej}(1-\beta_3)\beta_3(i-j)$$

Για το δείκτη j πάνω από τα αθροίσματα, θα πρέπει ο αριθμός p να είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε το υπόλοιπο άθροισμα από το j=i-p στο μηδέν να είναι αμελητέο. Το πλήθος των συνολικών μετρήσεων N πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το άθροισμα του πλήθους των εξισώσεων M και του αριθμού των συμπληρωματικών p. Πρακτικά p=N-M, με επαρκές πλήθος N δεδομένων.

Το κάθε σύστημα εξισώσεων δίνει μια εκτίμηση του διανύσματος $\vec{Z}_{est}$ από την σχέση:

$$\vec{Z}_{est} = \left[(X)'(X) \right]^{-1} (X)' \vec{q} \tag{4.37}$$

όπου [X]' είναι ο αντίστροφος πίνακας του [X].

Πρακτικά οι χρονικές σταθερές τ_n είναι άγνωστες. Αυτές βρίσκονται αναζητώντας την καλύτερη εκτίμηση του διανύσματος $\vec{Z}$ για διάφορες τιμές των χρονικών σταθερών.

Αρχικά επιλέγεται η σταθερή αναλογία r ανάμεσα στις χρονικές στιγμές. Η αναλογία αυτή συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 3 και 10 με τέτοιο τρόπο ώστε:

$$\tau_1 = r\tau_2 = r^2\tau_3 \tag{4.38}$$

Στη συνέχεια επιλέγεται το πλήθος των εξισώσεων M που θα υπάρχουν στο σύστημα. Το πλήθος αυτό πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των αγνώστων (2m+3), αλλά μικρότερο από το συνολικό πλήθος των δεδομένων N. Συνήθως 15 με 40 εξισώσεις είναι αρκετές, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 30 με 100 δεδομένα.

Κατόπιν εκλέγεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των χρονικών σταθερών. Για το λόγο της περιορισμένης ακρίβειας του υπολογιστή, δεν υπάρχει νόημα για χειρισμό

της χρονικής σταθεράς μικρότερης από Δt/10, ενώ από την άλλη πλευρά χρειάζονται p=N-M δεδομένα για την ολοκλήρωση. Αυτή η διαδικασία δεν τερματίζεται αν η χρονική σταθερά είναι μεγαλύτερη από p·Δt. Έτσι είναι καλύτερο η μέγιστη χρονική σταθερά τ_1 να κυμαίνεται μεταξύ: $\frac{\Delta t}{10} \langle \tau_1 \langle p \frac{\Delta t}{2}$

Έτσι επιλέγοντας μία αναλογία r και μία τιμή για τη μέγιστη χρονική σταθερά από τα διαστήματα που προαναφέρθηκαν, κατασκευάζεται ο ορθογώνιος πίνακας [X] και στη συνέχεια από τη σχέση (4.37) υπολογίζεται μία εκτίμηση για τον πίνακα των αγνώστων, το μητρώο Z_{est}. Κατόπιν υπολογίζεται μια εκτίμηση για κάθε θερμοροή q_i, και δημιουργείται ο πίνακας $\vec{q}_{est}$ από τη σχέση:

$$\vec{q}_{est} = [X] \cdot \vec{Z}_{est} \tag{4.39}$$

Για κάθε εκτίμηση $\vec{q}_{est}$ υπολογίζεται το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ των εκτιμημένων θερμορροών q_{est_i} και των αντίστοιχων μετρούμενων q_i:

$$S^2 = (\vec{q} - \vec{q}_{est})^2 = \sum (q_i - q_{est_i})^2 \tag{4.40}$$

Η διαδικασία αυτή γίνεται για διάφορες τιμές, τόσο της χρονικής σταθεράς τ_1 όσο και της αναλογίας r βρίσκοντας αρκετές εκτιμήσεις του πίνακα $\vec{q}$.

Η καλύτερη εκτίμηση του διανύσματος των αγνώστων αντιστοιχεί στο συνδυασμό χρονικής σταθεράς τ_1 και αναλογίας r για τον οποίο προκύπτει το μικρότερο άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών. Το πρώτο στοιχείο του πίνακα αυτού, Z_1 είναι η καλύτερη εκτίμηση της αγωγιμότητας του κτιριακού κελύφους.

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

Μια επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων είναι η εξής: εάν η μέγιστη χρονική σταθερά τ_1 που βρέθηκε για την καλύτερη εκτίμηση του πίνακα $\vec{Z}$, είναι ίση ή μεγαλύτερη της μέγιστης δυνατής τιμής $p\frac{\Delta t}{2}$, τότε το πλήθος των εξισώσεων ή των μετρήσεων δεν είναι αρκετό για να δώσει αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων χρειάζεται να διασφαλισθεί από κάποια κριτήρια όταν μία μοναδική μέτρηση έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της θερμοχωρητικότητας του κελύφους. Αυτά θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε, αν ικανοποιούνται, για μια δεδομένη και μοναδική μέτρηση, να υπάρχει καλή αξιοπιστία (π.χ. 90% πιθανότητα) ότι το αποτέλεσμα θα είναι αρκετά κοντά στην πραγματική τιμή (π.χ. μέσα στο ±10%).

Σε αυτή την περίπτωση, το μοναδικό κριτήριο είναι η διάρκεια των μετρήσεων η οποία πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Θα προέκυπταν καλύτερα αποτελέσματα εάν το εξεταζόμενο πρόβλημα ήταν ψευδομόνιμο. Επίσης αν ήταν μικρή η περίοδος των μετρήσεων, τότε εξαιτίας της έντονης διακύμανσης των θερμοκρασιών κατά την

περίοδο πριν την έναρξη των μετρήσεων, το τελικό αποτέλεσμα θα ήταν εσφαλμένο, αφού η διάρκεια των μετρήσεων δεν είναι αρκετή για να λάβει υπόψη τις προηγούμενες θερμοκρασίες.

Μόνο ένα κριτήριο υπάρχει στην περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης. Το διάστημα της αξιοπιστίας για την εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας που περιγράφτηκε παραπάνω είναι:

$$I = \sqrt{\frac{S^2 \cdot Y(1,1)}{M-2m-4}} F\left(P, M-2m-5\right) \qquad (4.41)$$

όπου

S^2 το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών που βρέθηκε από την εξίσωση (4.40)

Y(1,1) είναι το πρώτο στοιχείο του ανεστραμένου πίνακα Y, που βρίσκεται από την εξίσωση: $[Y] = [(X)'(X)]^{-1}$

M το πλήθος των εξισώσεων του συστήματος

m το πλήθος των χρονικών σταθερών

F το επίπεδο σημαντικότητας της κατανομής t-Student, όπου P η πιθανότητα και M-2m-5 ο βαθμός ελευθερίας.

Αν το διάστημα αξιοπιστίας για P=0.9 είναι μικρότερο από, για παράδειγμα**,** 5% της αγωγιμότητας, η υπολογιζόμενη τιμή της αγωγιμότητας είναι γενικά πολύ κοντά στην πραγματική τιμή. Για δεδομένες μετρήσεις όσο μικρότερο είναι το διάστημα αξιοπιστίας, τόσο πιο στενή είναι η κατανομή των αποτελεσμάτων για αρκετές μετρήσεις.

Όμως το κριτήριο αυτό δεν είναι επαρκές, δεδομένης της μεγάλης κατανομής, για μικρές περιόδους μετρήσεων και η μέση τιμή πιθανόν να είναι εσφαλμένη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

5.1.ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας των διαφόρων κτιριακών κελυφών που μελετήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μετρητικές διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω για τους αισθητήρες από τους οποίους αποτελούνται καθώς επίσης και για το σύστημα λήψης και καταγραφής των δεδομένων.

5.1.1. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ HUKSEFLUX (TRSYS01)

Η μετρητική διάταξη TRSYS01 της Hukseflux χρησιμοποιείται για την ανάλυση της θερμικής αντίστασης και της θερμικής διαπερατότητας του κτιριακού κελύφους αποτελούμενη από δύο ανεξάρτητα συστήματα (το SYS_1 και το SYS_2) ταυτόχρονης επιτόπιας μέτρησης ροής θερμότητας και θερμοκρασίας. Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες θερμοροής, αρχικά τύπου HFP01 της Hukseflux και στη συνέχεια τύπου HFP03, της ίδιας εταιρείας και δύο ζευγάρια αντιστοιχισμένων θερμοστοιχείων τύπου Κ για μετρήσεις θερμοκρασιακής διαφοράς. Ως αντιστοιχισμένο ζεύγος θερμοστοιχείων θεωρούνται δύο θερμοστοιχεία τα οποία είναι βαθμονομημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα μέτρησης της διαφοράς θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες συνδέονται στο καταγραφικό CR1000 για την λήψη και καταγραφή των μετρήσεων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων και της μονάδας μέτρησης και ελέγχου περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Το μετρητικό αυτό σύστημα αποτελείται από ηλεκτρονικά υψηλής ακριβείας με ακρίβεια μέτρησης ±1μV. Η αναμενόμενη ακρίβεια μέτρησης της θερμικής αντίστασης σε βέλτιστες συνθήκες σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι 7%.

Σχήμα 5.1 - Η μετρητική διάταξη TRSYS01 της Hukseflux

5.1.2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΡΟΟΜΕΤΡΑ ΤΗΣ OMEGA, THERMISTOR ΤΗΣ BETATHERM ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΗ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ AGILENT (OMEGA/BETATHERM)

Η μετρητική διάταξη OMEGA/BETATHERM χρησιμοποιείται για μετρήσεις θερμικής αντίστασης και διαπερατότητας κτιριακής τοιχοποιίας. Η συγκεκριμένη μετρητική διάταξη χρησιμοποιεί αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου thermistor 10kMCD1 της εταιρείας BETATHERM για μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας της τοιχοποιίας και αισθητήρες ροής θερμότητας HFS-4 της εταιρείας Omega. Οι αισθητήρες συνδέονται στη συσκευή Agilent 34972A για την λήψη, την καταγραφή και την αποθήκευση των δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας των αισθητήρων και της συσκευής Agilent έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Σχήμα 5.2 - Οι αισθητήρες και το σύστημα συλλογής των δεδομένων της διάταξης OMEGA/BETATHERM

Η συσκευή Agilent, ρυθμίστηκε στην ανάγνωση των θερμοκρασιών από τα thermistor για 10 PLC και της θερμοροής για 200 PLC. Ο ρυθμός δειγματοληψίας της μετρητικής διάταξης, ρυθμίστηκε να είναι ίσος με 1min.

5.1.3. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΡΟΟΜΕΤΡΑ ΤΗΣ HUKSEFLUX, THERMISTOR ΤΗΣ BETATHERM ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΗ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ AGILENT (HUKSEFLUX/BETATHERM)

Το μετρητικό σύστημα HUKSEFLUX/BETATHERM χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης και διαπερατότητας μιας τοιχοποιίας. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί αισθητήρες θερμοκρασίας thermistor 10kMCD1 της εταιρείας BETATHERM για μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας και τους αισθητήρες ροής θερμότητας HFP01 και HFP03 της Hukseflux. Οι αισθητήρες συνδέονται στη συσκευή λήψης και αποθήκευσης των δεδομένων Agilent 34972A. Τα χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας των αισθητήρων και της συσκευής Agilent έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Σχήμα 5.3 - Οι αισθητήρες και το σύστημα συλλογής των δεδομένων της διάταξης HUKSEFLUX/BETATHERM

Ο ρυθμός δειγματοληψίας της μετρητικής διάταξης, ρυθμίστηκε από τη συσκευή Agilent να είναι ίσος με 1min, ενώ η ανάγνωση των τιμών των thermistor γίνεται για 10 PLC, και για τη θερμοροή για 200 PLC.

5.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (U-value) ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ

Οι μετρήσεις για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας έγιναν σε τριών ειδών τοιχοποιίες, στην τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου (mock up) του εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του ΕΜΠ, σε ανακατασκευασμένη και διατηρούμενη λιθόκτιστη τοιχοποιία σε αθηναϊκό αρχοντικό κτίριο και σε ξυλόπηκτη τοιχοποιίας στο ίδιο κτίριο. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιγραφές, οι εγκαταστάσεις των μετρητικών, οι μετρήσεις, τα πειραματικά αποτελέσματα για κάθε μια από τις παραπάνω τοιχοποιίες και τέλος μια αξιολόγηση των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν.

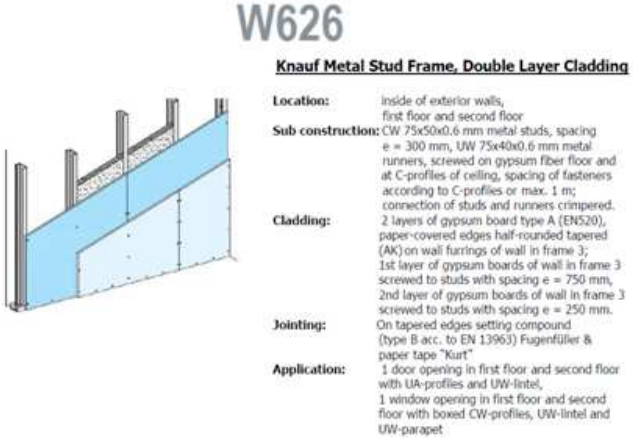
5.2.1. ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ (MOCK UP)

Η συγκεκριμένη τοιχοποιία βρίσκεται στον πειραματικό οικίσκο του εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του ΕΜΠ και έχει κατασκευασθεί από την εταιρεία Knauf για μελέτη ολόκληρου του κτιρίου από το εργαστήριο. Το χαρακτηριστικό της τοιχοποιίας είναι ότι περιλαμβάνει μια στρώση εξωτερικής μόνωσης και υπάρχει κλειστό διάκενο αέρα στο εσωτερικό της, μειώνοντας τη ροή θερμότητας προς την τοιχοποιία.

5.2.1.1. ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ (MOCK UP)

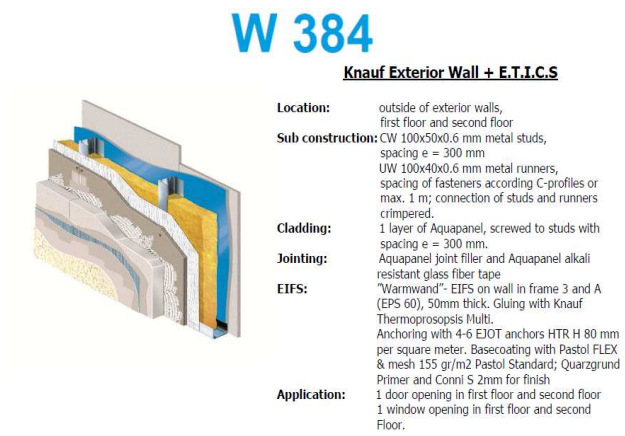
Η τοιχοποιία είναι κατασκευής της εταιρείας Knauf και διακρίνεται σε δύο ανεξάρτητα τμήματα, το εσωτερικό και το εξωτερικό, τα οποία χωρίζονται από κλειστό διάκενο αέρα περίπου 215mm. Κατά την περιγραφή της τοιχοποιίας χρησιμοποιούνται σε παρένθεση η κωδική ονομασία των εξαρτημάτων και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν από την Knauf για την κατασκευή της. Η ονοματολογία και η επεξήγηση αυτών δίνεται στο Παράρτημα Α.

Το εσωτερικό τμήμα (Σχήμα 5.4 - Knauf W 626) εδράζεται πάνω σε κατακόρυφους ορθοστάτες (Knauf CW) διαστάσεων 75x50x0.6 cm σε απόσταση 400mm μεταξύ τους και οριζόντιους στρωτήρες (Knauf UW) διαστάσεων 75x40x0.6 cm. Η τοιχοποιία αποτελείται από δύο στρώσεις γυψοσανίδων τύπου Α (Knaf GKB), με ακμές τύπου ΑΚ οι οποίες αρμολογούνται με συνδετικό κονίαμα (Knauf Fugenfuller) και επιπλέον χρήση χαρτοταινίας αρμού.



Σχήμα 5.4 - Τομή εσωτερικής επιφάνειας της εξωτερικής τοιχοποιίας

Το εξωτερικό τμήμα της τοιχοποιίας (Σχήμα 5.5 - Knauf W 384) εδράζεται πάνω στον ίδιο μεταλλικό σκελετό που προαναφέρθηκε. Επάνω στους ορθοστάτες στηρίζεται με κοχλίωση μία στρώση τσιμεντοσανίδας (Knauf AQUAPANEL OUTDOOR) πάχους 12.5 mm. Στις ενώσεις και στα σημεία στήριξης χρησιμοποιείται υλικό αρμολόγησης τσιμεντοειδούς βάσης (Knauf AQUAPANEL Joint Filler) και αντιαλκαλική ταινία αρμών. Στην επιφάνεια των πανέλων επικολλούνται οι μονωτικές πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης (Knauf THERMOPROSOPSIS) με κατάλληλο υλικό επικόλλησης (Knauf SM 700 Multi). Οι μονωτικές πλάκες είναι κατασκευασμένες από διογκωμένη πολυστερίνη τύπου EPS 60 πάχους 48.6mm. Τέλος η εξωτερική πλευρά ενισχύεται με εξωτερικό αντιαλκαλικό πλέγμα ενίσχυσης, μία στρώση συμπολυμερές και υδατοδιαλυτό αστάρι εξωτερικής χρήσης (Knauf Betocoat Primer Elast) πάχους 2mm και τέλος 3mm διακοσμητικό επίχρισμα.



Σχήμα 5.5 - Τομή εξωτερικού τμήματος της τοιχοποιίας

5.2.1.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ

Ο θεωρητικός υπολογισμός της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας έγινε με βάση το πρότυπο ISO 6946. Η τοιχοποιία αποτελείται από παράλληλα στρώματα θερμικά ομογενών υλικών γνωστού πάχους και θερμικών αγωγιμοτήτων. Τα πάχη των στρωμάτων περιγράφθηκαν ανωτέρω, ενώ η θερμική αγωγιμότητα κάθε υλικού λαμβάνεται είτε από πίνακες που διαθέτει η εταιρεία, είτε από πειραματικές τιμές που έχουν προσδιορισθεί στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και στο εργαστήριο Μέτρησης Θερμικών Ιδιοτήτων Δομικών Υλικών της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Οι ιδιότητες των υλικών του επιχρίσματος και του ασταριού λαμβάνονται από το πρότυπο FprEN 1745 **[22]** από τον πίνακα Table A.12 - Mortar (Mansory mortar and rendering mortar) για πυκνότητα κονιάματος 1600 kg/m^3. Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού EPS, η οποία είναι καθοριστική στον θεωρητικό υπολογισμό του συντελεστή U-value της τοιχοποιίας, προσδιορίσθηκε πειραματικά για διάφορες θερμοκρασίες.

Πίνακας 5.1 - Ιδιότητες υλικών τοιχοποιίας του πειραματικού οικίσκου

	Στρώση	**Πάχος d (mm)**	**Θερμική Αγωγιμότητα k (W/mK)**	**Πυκνότητα ρ (kg/m^3)**	**Θερμοχωρητικότητα C_p (J/kgK)**
Εσωτερικό Τμήμα W626	Γυψοσανίδα στρώση 1	12.5	0.183	810	950
	Γυψοσανίδα στρώση 2	12.5	0.183	810	950
Διάκενο Αέρα		215	-	1.1	1200
Εξωτερικό Τμήμα W384	Τσιμεντοσανίδα	12.5	0.36	1150	879
	EPS 60	48.6	0.0355 Στους 10°C	14	1450
			0.0369 Στους 20°C		
			0.0383 Στους 30°C		
	Συμπολυμερές & Αστάρι	2.1	0.61	1600	1000
	Διακοσμητικό Επίχρισμα	2.8	0.61	1600	1000

Από τις προδιαγραφές της εταιρείας λαμβάνεται υπόψη ότι οι δύο γυψοσανίδες τύπου Α του εσωτερικού τμήματος του τοίχου και η μια στρώση τσιμεντοσανίδας της εξωτερικής πλευράς συνδέονται με 20 κοχλίες ανά m^2, ενώ η θερμομόνωση EPS 60 με 2 κοχλίες ανά m^2. Οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ατσάλινοι με συντελεστή αγωγιμότητας k_f = 20 W/mK, και διαμέτρου σπειρώματος 4.3mm.

Επίσης κατά την τοποθέτηση των πλακών EPS, διαστάσεων 1×0.60 m, με το υλικό αρμολόγησης δημιουργείται ένας αρμός πάχους 1.65mm και πλάτους 3.4mm γύρω από κάθε πλάκα, ενώ στο διάκενο μεταξύ των πλακών εγκλωβίζεται αέρας, του οποίου η θερμική αντίσταση υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 **[21]**. Επίσης, ανά τέσσερις πλάκες EPS, υπάρχει πλαστικός σύνδεσμος ενσωματωμένος στην τοιχοποιία με ένα κοχλία. Το διάκενο αυτό αντιστοιχεί περίπου στο 1% της συνολικής επιφάνειας της τοιχοποιίας δημιουργώντας θερμογέφυρα. Το ποσοστό αυτό προκύπτει από την αναλογία επιφανειών πλάκας μόνωσης και αρμού.

Η θερμική αντίσταση του εσωτερικού τμήματος της τοιχοποιίας θα είναι ίση με το άθροισμα των θερμικών αντιστάσεων των επί μέρους στρώσεων, έχοντας υποστεί οι στρώσεις της γυψοσανίδας την απαραίτητη διόρθωση εξαιτίας των κοχλιών συνδέσεων και των αρμών. Οι πλάκες των γυψοσανίδων έχουν διαστάσεις 1200×2500×12.5 mm και ενώνονται μεταξύ τους, κάθετα με κοχλίες και παραπλεύρως με συνδετικό κονίαμα και επιπλέον χρήση χαρτοταινίας αρμού. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή U-value θεωρείται ότι το κονίαμα και η χαρτοταινία αρμού έχει παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά με την γυψοσανίδα και δεν αποτελεί περιοχή θερμογέφυρας. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται η θερμική αντίσταση κάθε στρώσης.

Πίνακας 5.2 - Θερμική αντίσταση του εσωτερικού τμήματος της τοιχοποιίας

Εσωτερικό Τμήμα	**Θερμική αντίσταση R(m^2K/W)**	**Θερμική Διαπερατότητα U (W/m^2K)**	**Διόρθωση συνδέσμων ΔU_f (W/m^2K)**	**Διορθωμένη θερμική διαπερατότητα U_{cor} (W/m^2K)**	**Διορθωμένη θερμική αντίσταση R_{cor} (m^2K/W)**
Γυψοσανίδα τύπου Α (στρώση 1)	0.06831	14.64	0.03	14.67	0.06814
Γυψοσανίδα τύπου Α (στρώση 2)	0.06831	14.64	0.03	14.67	0.06814
Συνολική θερμική αντίσταση εσωτερικής επιφάνειας R_{in}					0.13629

Ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης του διακένου έγινε σύμφωνα με το Annex B.2 του προτύπου ISO 6946 **[21]**, που αφορά στρώματα αέρα των οποίων το μήκος και το πλάτος είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερα του πάχους. Στη συγκεκριμένη τοιχοποιία το μήκος του στρώματος αέρα είναι 3.65m, το πλάτος 2.68m και το πάχος 0.215m, συνεπώς το διάκενο της τοιχοποιίας ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2 και από την εξίσωση (4.12), για το διάκενου της τοιχοποιίας προκύπτουν:

- οι συντελεστές εκπομπής των επιφανειών του διακένου ε_1=0.94 και ε_2=0.94 και ο συντελεστής εκπομπής μεταξύ των επιφανειών E=0.8868.
- ο συντελεστής ακτινοβολίας μέλαν σώματος είναι ίσος με h_{ro}=5.499 W/m^2K (για T=16.6 ^oC) και ο συντελεστής ακτινοβολίας h_r=4.877 W/m^2K.
- ο συντελεστής συναγωγιμότητας του διακένου προκύπτει h_a=1.250 W/m^2K

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, η θερμική αντίσταση του διακένου θα είναι ίση με

$$R_{cav} = \frac{1}{h_a + h_r} = 0.16322 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης του εξωτερικού τμήματος της τοιχοποιίας χωρίζεται σε δύο περιοχές, την περιοχή με τη θερμομόνωση, η οποία αποτελεί το 99% της συνολικής επιφάνειας, και την περιοχή των αρμών της θερμομόνωσης για το υπόλοιπο 1%.

Στην πρώτη περιοχή ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης γίνεται κατά τα γνωστά από το πρότυπο ISO 6946, λαμβάνοντας υπόψη και της απαραίτητες διορθώσεις για τις μηχανικές συνδέσεις που διαπερνούν κάθε στρώμα.

Η δεύτερη περιοχή, είναι περιοχή θερμογέφυρας, όπου οι διάφορες στρώσεις μένουν ως έχουν, με τη διαφορά ότι αντί για τη θερμομόνωση υπάρχει κενό αέρα. Η θερμική αντίσταση του κενού υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 από τη σχέση:

$$R_g = \frac{1}{h_a + 0.5E \cdot h_{ro}\left(1+\sqrt{1+\frac{d^2}{b^2}}-\frac{d}{b}\right)} \qquad (5.1)$$

όπου d=46.95mm το πάχος του κενού, το οποίο είναι λίγο μικρότερο από το πάχος των πλακών EPS εξαιτίας του υλικού αρμολόγησης που έχει εισχωρήσει και b=3.4mm το πλάτος του.

Επίσης στη θερμική αντίσταση αυτού του στρώματος γίνεται διόρθωση εξαιτίας των μηχανικών συνδέσεων, καθώς κάθε μονωτική πλάκα, εκτός από τους δύο κοχλίες στην επιφάνεια, στηρίζεται και σε τέσσερεις κοχλίες, μία σε κάθε γωνία, που συγκρατούν με πλαστικούς συνδέσμους κάθε πλάκα με τη γειτονική της. Συνεπώς, σε κάθε αρμό αντιστοιχεί ένας κοχλίας.

Η συνολική θερμική αντίσταση της εξωτερικής πλευράς της τοιχοποιίας προκύπτει από το άθροισμα των γινομένων της θερμικής αντίστασης κάθε περιοχή με το ποσοστό στη συνολική επιφάνεια για την οποία αντιστοιχεί.

Πίνακας 5.3 - Υπολογισμοί θερμικής αντίστασης του εξωτερικού τμήματος

W384	**Στρώση**		**Θερμική αντίσταση R (m^2K/W)**	**Θερμική Διαπερατότητα U (W/m^2K)**	**Διόρθωση συνδέσμων ΔU_f (W/m^2K)**	**Διορθωμένη θερμική διαπερατότητα U_{cor} (W/m^2K)**	**Διορθωμένη θερμική αντίσταση R_{cor} (m^2K/W)**
Περιοχή μόνωσης 99%	Aquapanel outdoor		0.03472	28.80	0.03	28.83	0.03468
	EPS 60	Στους 10°C	1.36901	0.73	0	0.73	1.36251
		Στους 20°C	1.31707	0.76	0	0.76	1.31105
		Στους 30°C	1.26893	0.79	0	0.79	1.26334
	Συμπολυμερές&Αστάρι		0.00344	290.48	-	290.48	0.00344
	Διακοσμητικό Επίχρισμα		0.00456	217.86	-	217.86	0.00456
Περιοχή αρμού 1%	Aquapanel outdoor		0.03472	28.80	0.03	28.83	0.03468
	Υλικό Αρμολόγησης		0.00271	369.70	-	369.70	0.00271
	Κενό Αέρα		0.26480	3.78	0	3.780	0.26468
	Συμπολυμερές&Αστάρι		0.00344	290.48	-	290.48	0.00344
	Διακοσμητικό Επίχρισμα		0.00459	217.86	-	217.86	0.00459

Συνολική θερμική αντίσταση εξωτερικής επιφάνειας R_{ext} $R_{ext} = \frac{A_{EPS}}{A_{tot}} R_{ext}^{EPS} + \frac{A_{joint}}{A_{tot}} R_{ext}^{joint}$	**1.40523** m^2K/W για τους 10°C
	1.37124 m^2K/W για τους 20°C
	1.32400 m^2K/W για τους 30°C

Τέλος η συνολική θερμική αντίσταση της τοιχοποιίας είναι το άθροισμα των τριών αντιστάσεων που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Στο άθροισμα δεν περιλαμβάνονται οι θερμικές αντιστάσεις επιφανειών της τοιχοποιίας καθώς υπολογίζεται η θερμική αντίσταση του τοίχου από επιφάνεια σε επιφάνεια. Ως εκ τούτου:

$$R_T = R_{in} + R_{cav} + R_{ex} \qquad (5.2)$$

Για κάθε θερμοκρασία προκύπτουν οι εξής θερμικές αντιστάσεις:

$R_{10\,^{o}C} = 1.72170 \quad m^2 K / W$

$R_{20\,^{o}C} = 1.67075 \quad m^2 K / W$

$R_{30\,^{o}C} = 1.62352 \quad m^2 K / W$

Οπότε ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας, ανάλογα με τη θερμοκρασία, θα είναι:

$$U_{10^{o}} = \frac{1}{R_{10\,^{o}C}} = 0.58\, W / m^2 K$$

$$U_{20^{o}} = \frac{1}{R_{20\,^{o}C}} = 0.60\, W / m^2 K$$

$$U_{30^{o}} = \frac{1}{R_{30\,^{o}C}} = 0.62\, W / m^2 K$$

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (U-VALUE)

Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πιθανόν να προκαλούν απόκλιση στα παραπάνω αποτελέσματα από τον πραγματικό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του κελύφους.

Αρχικά, κατά το μεγαλύτερο μέρος της τοιχοποιίας υπάρχει διάκενο αέρα, το οποίο μπορεί από τους κατασκευαστές να θεωρείται κλειστό, υπάρχουν όμως, για κατασκευαστικούς λόγους, μικρές χαραμάδες στις οποίες ο αέρας διεισδύει από το διάκενο στον εσωτερικό χώρο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει εναλλαγή θερμότητας από το διάκενο της τοιχοποιίας στον εσωτερικό χώρο, μέσω συναγωγής και επίσης υπάρχουν συνεχείς εναλλαγές αέρα, κάνοντας τον θεωρητικό υπολογισμό του συντελεστή U-value πιο περίπλοκο. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν στοιχεία για να προσδιορισθούν τα ακριβή σημεία και η ποσότητα αέρα που εναλλάσσεται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Κατά τον θεωρητικό προσδιορισμό του συντελεστή U-value, το εξωτερικό τμήμα της τοιχοποιία θεωρήθηκε ότι αποτελείται από δύο περιοχές, την περιοχή της μόνωσης (περίπου 99%) και την περιοχή του αρμού (περίπου 1%) και στη συνέχεια η θερμική αντίσταση του συγκεκριμένου τμήματος υπολογίστηκε ως το σταθμισμένο άθροισμα αυτών. Η διαδικασία αυτή πιθανόν να μην είναι η πιο ακριβής, όπως επίσης και τα ποσοστά των περιοχών, όμως θεωρήθηκε μια καλή προσέγγιση για τον θεωρητικό προσδιορισμό του συντελεστή.

Επίσης, κατά τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, δε λήφθηκαν υπόψη οι θερμικές αντιστάσεις επαφής των στρωμάτων, κάτι για το οποίο αναλύθηκε στην ενότητα (4.1.3). Είναι αδύνατον να προσδιορισθεί τόσο η τραχύτητα των ενδιάμεσων επιφανειών, όσο και οι συνθήκες κατά τις οποίες συνδέονται οι διάφορες στρώσεις της τοιχοποιίας. Σε κάθε περίπτωση τέτοιου είδους αντιστάσεις είναι συνήθως μικρές και λαμβάνονται υπόψιν κυρίως στον υπολογισμό της συνολικής θερμικής αντίστασης υλικών με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.

Ακόμη, οι θερμικές ιδιότητες των υλικών είτε προσδιορίσθηκαν από πίνακες εκτιμώντας κυρίως την πυκνότητά τους, είτε μετρήθηκαν στο εργαστήριο, όπως έγινε για τη μόνωση EPS, εισάγουν ένα σφάλμα στο αποτέλεσμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα αποτελέσματα των πειραματικών προσδιορισμών των θερμικών αγωγιμοτήτων της μόνωσης και της γυψοσανίδας υπήρχαν μικρές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές της κατασκευάστριας εταιρείας. Θεωρήθηκε σωστό να χρησιμοποιηθούν οι πειραματικές τιμές.

Οι τιμές που αφορούν τα πάχη των στρωμάτων της τοιχοποιίας, είτε εκτιμήθηκαν με βάση τις προδιαγραφές κατασκευής της, είτε μετρήθηκαν από ένα συγκεκριμένο τμήμα της τοιχοποιίας. Συνεπώς, οι τιμές αυτές εισάγουν κάποια αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος, για την συγκράτηση των στρώσεων κάθε τμήματος της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικοί ορθοστάτες και στρωτήρες, οι οποίοι εξαιτίας της μεγάλης θερμικής τους αγωγιμότητας εισάγουν μια συσσώρευση ροής θερμότητας γύρω από τις περιοχές αυτών, δημιουργώντας μία ανισοκατανομή της ροής θερμότητας στα ενδιάμεσα στρώματα της τοιχοποιίας. Έτσι η παραδοχή των ομοιόμορφων κάθετων στρώσεων σε όλη την επιφάνεια της τοιχοποιίας δεν είναι ακριβής και πιθανόν σε ορισμένα σημεία της τοιχοποιίας να αλλάζει ο συντελεστής U-value καθώς και η μονοδιάστατη υπόθεση μετάδοσης θερμότητας.

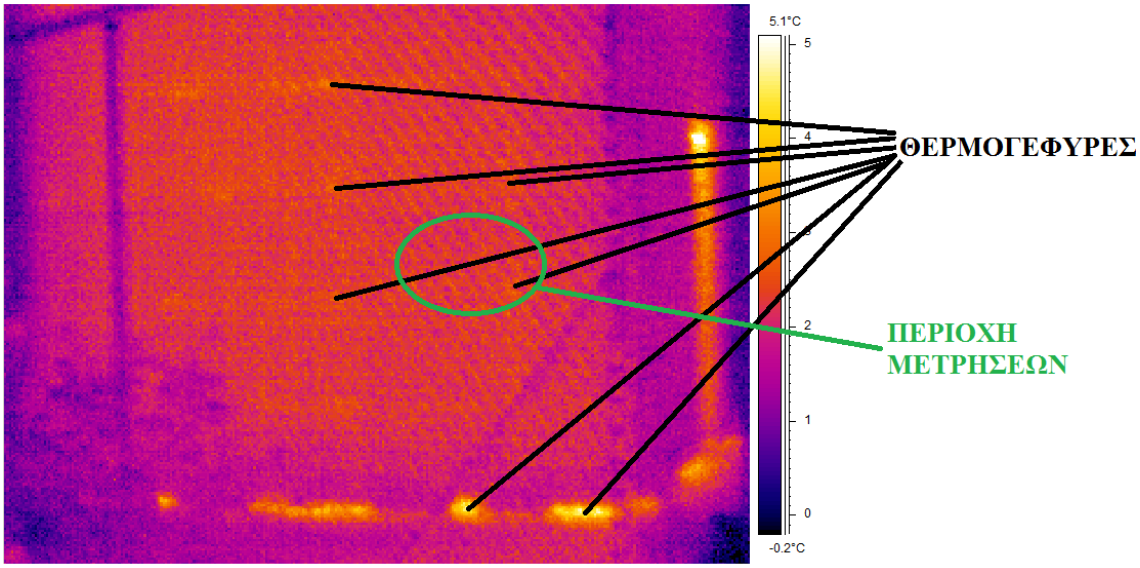
Όλοι οι παραπάνω παράγοντες αβεβαιότητας για τον θεωρητικό υπολογισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας εισάγουν ένα σφάλμα σε καθένα από τα παραπάνω αποτελέσματα.

5.2.1.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η επιλογή των ακριβών σημείων μέτρησης στην τοιχοποιία έγινε με γνώμονα τις υποδείξεις που ορίζουν οι κανονισμοί ISO 9869, ASTM C 1046 και ASTM C 1155 **[14,15,16]**. Αρχικά επιλέγεται ο τοίχος με προσανατολισμό το Βορρά για την αποφυγή της έκθεσης των θερμοστοιχείων μέτρησης της επιφανειακής εξωτερικής θερμοκρασίας στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Κατόπιν επιλέγονται οι ακριβείς θέσεις των μετρήσεων, οι οποίες θα πρέπει να παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η ροή θερμότητας στην περιοχή μέτρησης να είναι μονοδιάστατη και κάθετη στην επιφάνεια της τοιχοποιίας. Το κέντρο της τοιχοποιίας είναι μια ιδανική θέση καθώς είναι μια θέση μακριά από γύρω τοίχους και ανοίγματα.
- Θα πρέπει να αποφευχθούν τυχόν θερμογέφυρες και διάφορες θερμικές ανωμαλίες στα σημεία μέτρησης, κάτι το οποίο μπορεί να καθορισθεί με τη χρήση θερμοκάμερας.

Η επιλογή της κατάλληλης θέσης ανιχνεύεται με τη χρήση θερμοκάμερας έτσι ώστε να βρεθεί ένα σημείο αντιπροσωπευτικό της τοιχοποιίας, το οποίο θα πρέπει να παρουσιάζει τα παραπάνω χαρακτηριστικά.



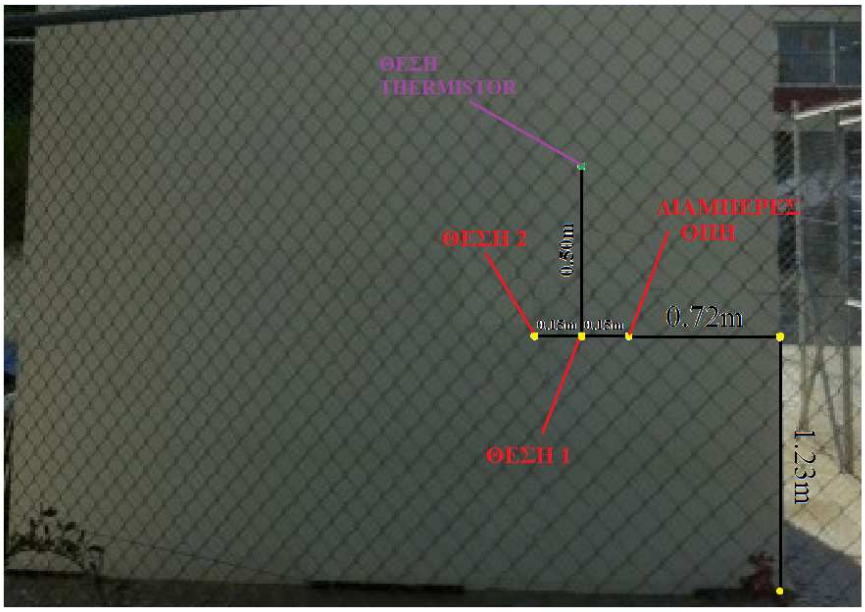
Σχήμα 5.6 - Θερμογράφημα τοιχοποιίας πειραματικού οικίσκου

Από το θερμογράφημα του Σχήματος 5.6 εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα: Στο σημείο επαφής της εξεταζόμενης τοιχοποιίας με το δάπεδο υπάρχουν θερμογέφυρες που δημιουργούνται από το μεταλλικό σκελετό του κτιρίου, κάτι το οποίο είναι εμφανές ακόμα και στην φωτογραφία του τοίχου στο Σχήμα 5.7.

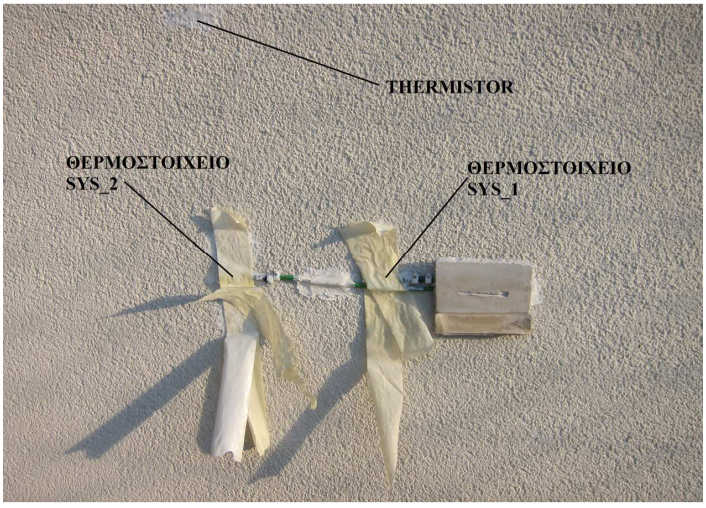
Επίσης οι αρμοί που σχηματίζονται μεταξύ των μονωτικών πλακών, όπως επίσης και οι σύνδεσμοι συγκράτησης στις τέσσερις γωνίες κάθε πλάκας δημιουργούν θερμογέφυρες, κάτι για το οποίο προβλέφθηκε κατά τον θεωρητικό προσδιορισμό του συντελεστή U-value και είναι εμφανείς στο θερμογράφημα.

Γενικά όμως υπάρχουν στην τοιχοποιία μεγάλες περιοχές οι οποίες είναι θερμικά ομοιόμορφες και έγινε η προσπάθεια προσέγγισης αυτών των περιοχών και να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις σε αυτές τις περιοχές.

Λόγω του περιορισμένου χώρου, δεν ήταν δυνατόν να αποφευχθεί το συρματόπλεγμα περίφραξης του κτιρίου από τη λήψη τόσο του θερμογραφήματος όσο και της φωτογραφίας, είναι όμως ευδιάκριτη η παρουσία του αλλά δεν εμποδίζει την εξαγωγή συμπεράσματος για την τοιχοποιία.



Σχήμα 5.7 - Η τοιχοποιία του οικίσκου και η ακριβής θέση των αισθητήρων



Σχήμα 5.8 - Οι εγκατεστημένοι εξωτερικοί αισθητήρες μέτρησης επιφανειακής θερμοκρασίας

5.2.1.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας της συγκεκριμένης τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητες μετρητικές διατάξεις, η διάταξη TRSYS01 της Hukseflux και η διάταξη OMEGA/BETATHERM, που

περιγράφθηκαν στην ενότητα 5.1.1 και 5.1.2 αντίστοιχα. Οι δύο διατάξεις τοποθετήθηκαν στην ίδια περιοχή της τοιχοποιίας για να υπάρξει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αφού επιλέχθηκε η περιοχή των μετρήσεων στη συνέχεια έγινε η εγκατάσταση των αισθητήρων των μετρητικών διατάξεων σύμφωνα τις υποδείξεις που ορίζουν οι κανονισμοί ISO 9869, ASTM C 1046 και ASTM C 1155.

ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ TRSYS01

Η εγκατάσταση της μετρητικής διάταξης TRSYS01 πραγματοποιήθηκε με την εξής διαδικασία:

Με σκοπό το πέρασμα των εξωτερικών θερμοστοιχείων, ανοίχτηκε μία διαμπερές οπή στην τοιχοποιία στο ίδιο ύψος με τα σημεία τοποθέτησης (1.23m από το δάπεδο και 0.40m από τη δυτική τοιχοποιία). Στη συνέχεια τοποθετήθηκε στην επιφάνεια της εξωτερικής τοιχοποιίας το θερμοστοιχείο του πρώτου συστήματος (SYS_1) σε απόσταση 0.15m από την οπή (ΘΕΣΗ 1, Σχήμα 5.7) με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο η επιφανειακή θερμοκρασία του κελύφους και όχι η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Αυτό έγινε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά, αφαιρέθηκε τμήμα του επιχρίσματος της εξωτερικής τοιχοποιίας βάθους 1.5 με 2.5 mm και στη συνέχεια απλώθηκε αρκετή θερμοαγώγιμη πάστα τόσο στην περιοχή του τοίχου, όσο και σε όλη την επιφάνεια της άκρης του θερμοστοιχείου. Τέλος τοποθετήθηκε το θερμοστοιχείο στην επιφάνεια του τοίχου και κατόπιν συγκρατήθηκε με χαρτοταινία σε μια προσπάθεια προσέγγισης των συνθηκών εκπομπής και απορρόφησης της ακτινοβολίας μεταξύ της τοιχοποιίας και του αισθητήρα.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε με την ίδια διαδικασία και το θερμοστοιχείο του δεύτερου συστήματος (SYS_2) σε απόσταση 0.15m από το πρώτο (ΘΕΣΗ 2, Σχήμα 5.7). Κατόπιν η οπή κλείστηκε με σιλικόνη για αποφυγή θερμικών απωλειών και διείσδυσης αέρα.

Τα εσωτερικά θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν ακριβώς πίσω από τα αντίστοιχα σημεία, δηλαδή το πρώτο στα 0.15m από την οπή και το δεύτερο στα 0.30m από την οπή με την ίδια διαδικασία. Στην αρχή αφαιρέθηκε ένα μικρό κομμάτι της επιφάνεια της εσωτερικής γυψοσανίδας, απλώθηκε η θερμοαγώγιμη πάστα σε αισθητήρα και τοιχοποιία και τέλος τα θερμοστοιχεία συγκρατήθηκαν με χαρτοταινία στον εσωτερικό τοίχο.

Οι αισθητήρες θερμοροής HFP01 τοποθετήθηκαν μερικά εκατοστά κάτω από τα αντίστοιχα σημεία μέτρησης της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας την ίδια θερμοαγώγιμη πάστα και απλώνοντάς την καλά σε όλη την επιφάνεια επαφής του αισθητήρα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο αισθητήρας στην

τοιχοποιία πιέζοντας δυνατά για να καλυφθούν τυχόν κενά αέρα μεταξύ αισθητήρα και τοιχοποιίας.

Η αντικατάσταση των παραπάνω αισθητηρίων ροής θερμότητας με τα HFP03 έγινε με τον ίδιο τρόπο στα ίδια σημεία χρησιμοποιώντας θερμοαγώγιμη πάστα

Σχήμα 5.9 - Η εγκατάσταση της διάταξης TRSYS01 με τους αισθητήρες HFP01 (αριστερά) και τους HFP03 (δεξιά)

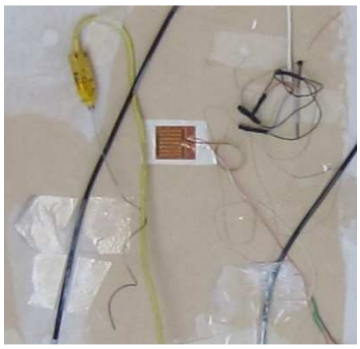
ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ OMEGA/BETATHERM

Το σημείο τοποθέτησης των αισθητήρων της μετρητικής διάταξης OMEGA/BETATHERM, είναι λίγα εκατοστά πάνω από τους αισθητήρες της TRSYS01. Πιο συγκεκριμένα τα thermistor εγκαταστάθηκαν 50cm πάνω από τα θερμοστοιχεία του μετρητικού της Hukseflux (Σχήματα 5.7 και 5.8) και ο αισθητήρας ροής θερμότητας στο μέσο, 25cm πάνω από τα θερμοστοιχεία.

Τα thermistor τοποθετήθηκαν σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία: Το εξωτερικό thermistor στερεώθηκε στην άκρη ενός λεπτού σύρματος, μήκους λίγων εκατοστών μεγαλύτερο του πάχους της τοιχοποιίας. Ένα δεύτερο thermistor στερεώθηκε πάνω στο ίδιο σύρμα, με τρόπο ώστε η μύτη του να απέχει μερικά εκατοστά από το σύρμα και η θέση του να αντιστοιχεί στο μέσο του διακένου αέρα της τοιχοποιίας, περίπου 17cm από την άκρη που στερεώθηκε το εξωτερικό thermistor. Στη συνέχεια, στο σημείο τοποθέτησης των τριών θερμοστοιχείων, ανοίχτηκε στην τοιχοποιία μία διαμπερής οπή από την οποία πέρασε το σύρμα με τα δύο thermistor. Από την εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας λαμβάνεται το thermistor και τοποθετείται η μύτη του στην επιφάνεια της τοιχοποιίας. Το σημείο που τοποθετήθηκε καλύπτεται με σιλικόνη στο χρώμα της εξωτερικής επιφάνειας, σφραγίζοντας ταυτόχρονα και τη μικρή οπή. Το thermistor του διακένου αέρα βρίσκεται στο μέσον του διακένου και η μύτη είναι σε τέτοια θέση ώστε να μετράει τη θερμοκρασία του αέρα και το σύρμα να μην επηρεάζει τη μέτρηση. Η άλλη άκρη του σύρματος συγκρατείται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου με σιλικόνη, κλείνοντας παράλληλα και την οπή που δημιουργήθηκε.

Ο αισθητήρας ροής θερμότητας της Omega τοποθετήθηκε στην εσωτερική πλευρά της τοιχοποιίας 25cm κάτω από το thermistor. Μια κολλητική ταινία διπλής όψεως εφαρμόστηκε μεταξύ του λεπτού φύλλου του αισθητήρα και της τοιχοποιίας και

πιέστηκε δυνατά ο αισθητήρας για να καλυφθούν τυχόν κενά αέρα μεταξύ αισθητήρα και τοιχοποιίας λόγω της ταινίας (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 - Η εγκατάσταση της διάταξης OMEGA/BETATHERM και ο αισθητήρας του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου

5.2.1.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

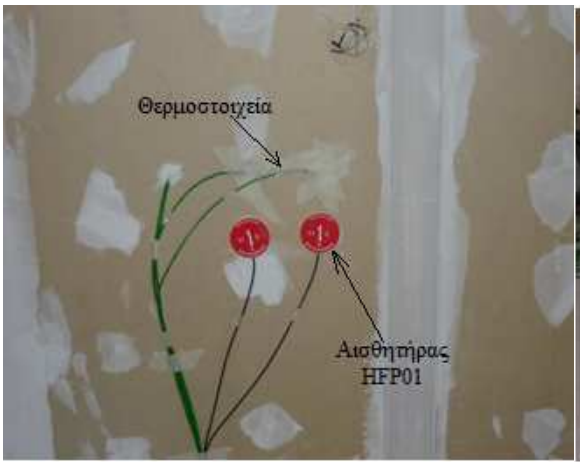
TRSYS01

Οι μετρήσεις με το μετρητικό σύστημα TRSYS01 στην συγκεκριμένη τοιχοποιία που περιγράφθηκε, χωρίζονται σε 3 set μετρήσεων ανάλογα με τον έλεγχο ή όχι της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου για την επίτευξή όσο το δυνατόν μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών και ανάλογα με τη χρήση του αισθητήρα HFP01 ή του HFP03. Σε κάθε περίπτωση το μετρητικό TRSYS01 παρέχει αποτελέσματα από την ταυτόχρονη μέτρηση των δυο συστημάτων SYS_1 και SYS_2, ενώ στη συνέχεια οι μετρήσεις που επεξεργάζονται είναι οι μέσοι όροι των μετρήσεων ανά 10 λεπτά, για την αποφυγή των έντονων διακυμάνσεων.

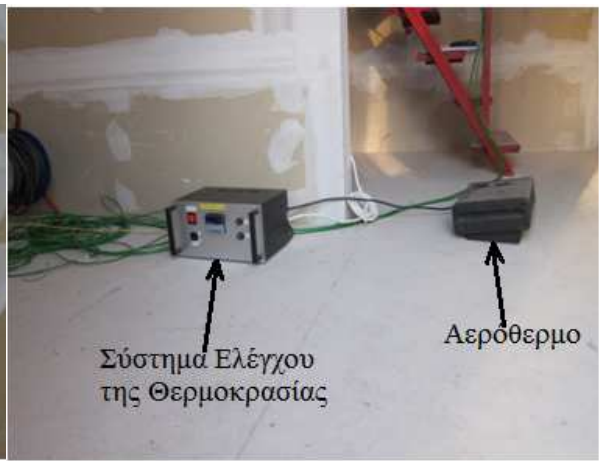
- **Χρήση αισθητήρα θερμοροής HFP01 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας (ΣΕΘ)**

Το πρώτο set μετρήσεων διήρκησε 19 ημέρες και ξεκίνησε από την Τετάρτη 11 Απριλίου 2012 στις 18:00 μέχρι τη Δευτέρα 30 Απριλίου 2012 στις 18:00 χρησιμοποιώντας τους αισθητήρες ροής θερμότητας HFP01. Σε αυτή την περίπτωση, εξαιτίας των χαμηλών εξωτερικών θερμοκρασιών, επιλέχθηκε να ελέγχεται η εσωτερική θερμοκρασία με εγκατάσταση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας (ΣΕΘ), συνδεδεμένο με ένα αερόθερμο στο χώρο που περικλείει την τοιχοποιία, ώστε να τίθεται σε λειτουργία όσο η εσωτερική θερμοκρασία στην περιοχή κοντά στα σημεία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων έπεφτε κάτω από τους 22°C. Η έναρξη λειτουργίας του αερόθερμού έγινε το πρωί της Τετάρτης 11 Απριλίου 2012, έτσι ώστε την ώρα όπου ξεκίνησε η λήψη των μετρήσεων να έχει επέλθει μια θερμοκρασιακή ισορροπία στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας. Επίσης το αερόθερμο τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθεί, όσο το δυνατόν, η έντονη κυκλοφορία αέρα στην περιοχή

των αισθητήρων και να μειωθεί η μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή στο σημείο των αισθητήρων.

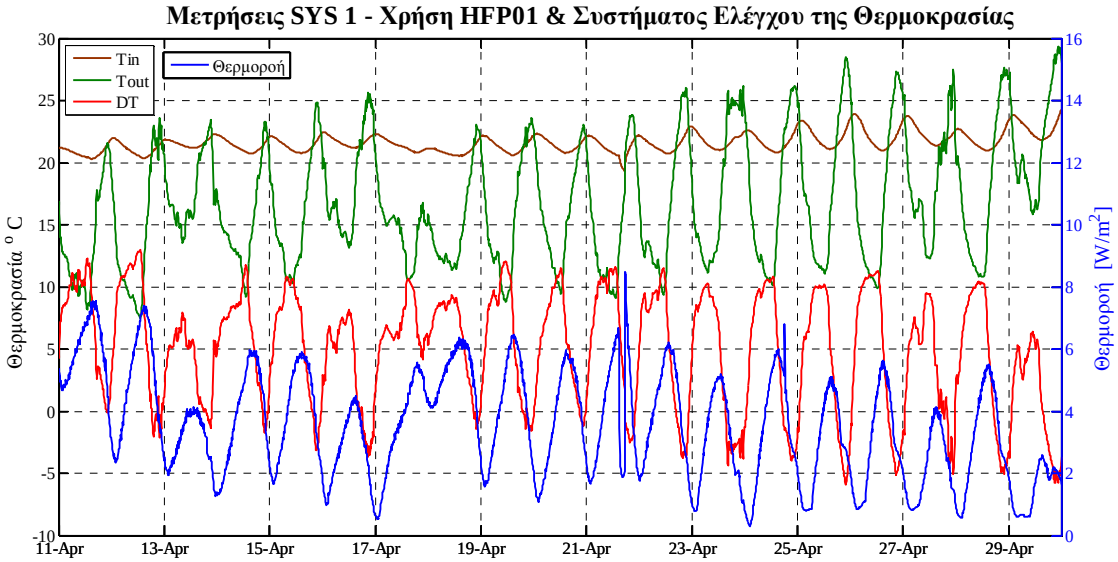


Σχήμα 5.11 - Η μετρητική διάταξη

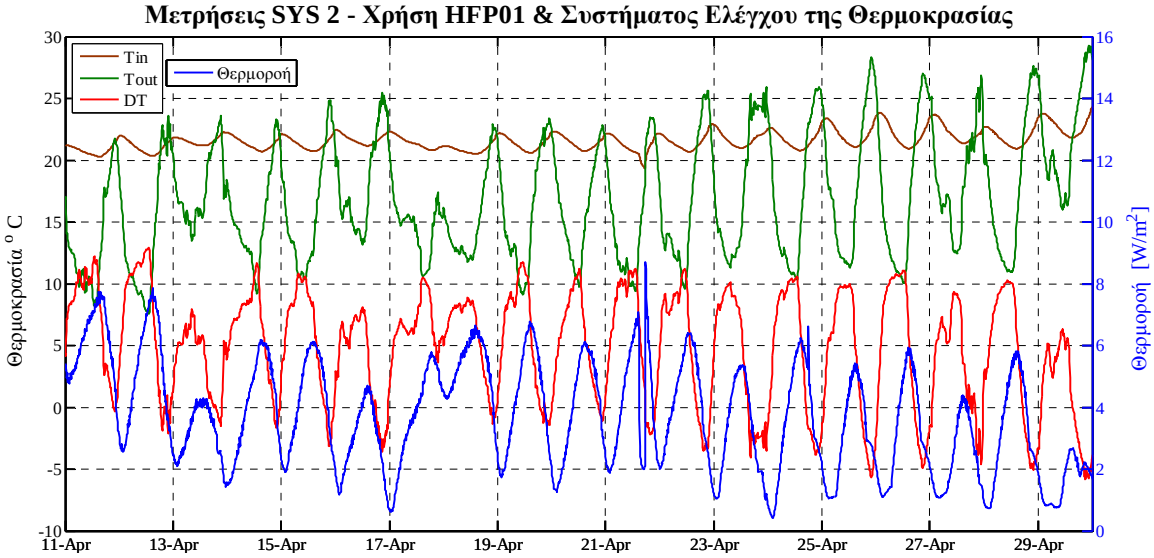


Σχήμα 5.12 - Το σύστημα θερμοκρασιακού ελέγχου

Στα γραφήματα των Σχημάτων 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται η μεταβολές των θερμοκρασιών στις επιφάνειες της τοιχοποιίας καθώς επίσης και η ροή θερμότητας με την πάροδο του χρόνου όπως τα κατέγραψε το TRSYS01 για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι θερμοκρασίες T_{in}, T_{out} και ΔT απεικονίζονται με καφέ, πράσινο και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα με y-αξονα στα αριστερά, ενώ η θερμοροή με μπλε χρώμα και y-άξονα στα δεξιά.



Σχήμα 5.13 - Οι μετρήσεις της διάταξης για το SYS_1 κάνοντας χρήση του αισθητήρα θερμοροής HFP01 και του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου



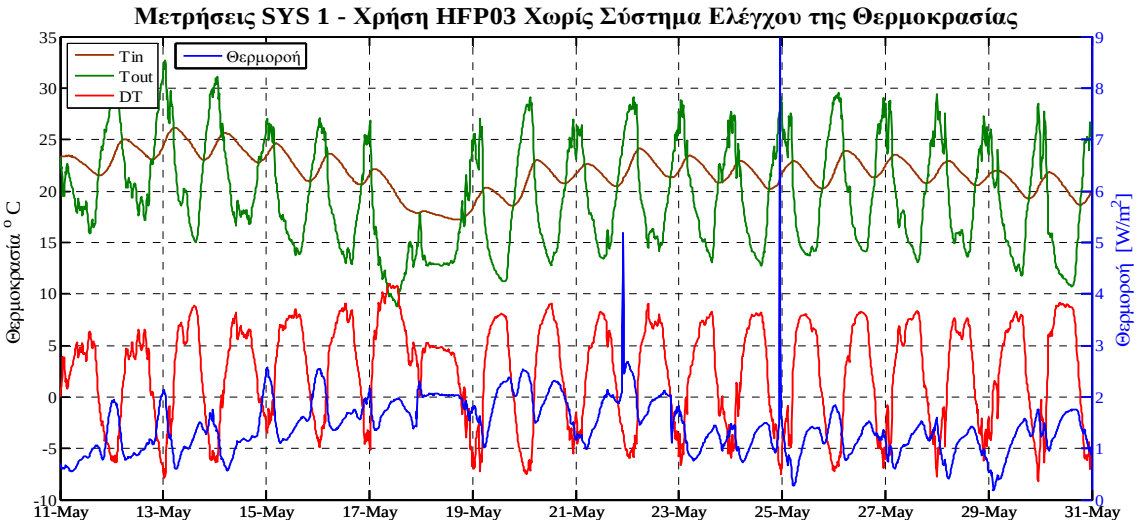
Σχήμα 5.14 - Οι μετρήσεις της διάταξης για το SYS_2 κάνοντας χρήση του αισθητήρα θερμοροής HFP01 και του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου

Από τα γραφήματα παρατηρούνται μικρές διακυμάνσεις στην εσωτερική θερμοκρασία, κάτι για το οποίο είχε προβλεφθεί με το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας, με μέση θερμοκρασία 21.6°C. Η μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας ΔΤ έχει μεγαλύτερες διακυμάνσεις με μέση διαφορά θερμοκρασίας 5.7°C. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά θα μπορούσε να ήταν μεγαλύτερη αν η εσωτερική θερμοκρασία ρυθμιζόταν υψηλότερη των 22^{o}C.

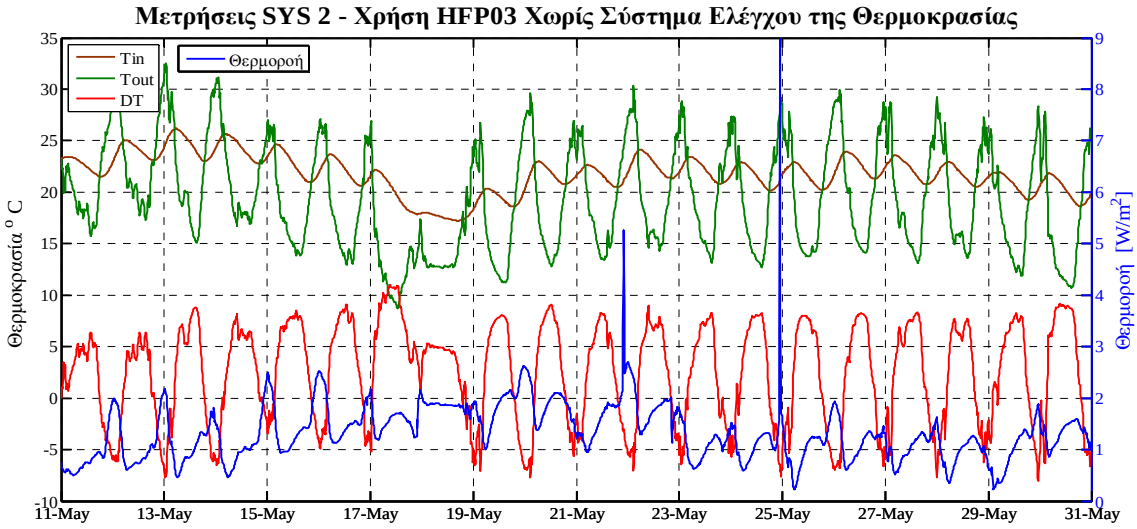
Επίσης είναι εμφανές μια πτώση της εσωτερικής θερμοκρασίας λίγων λεπτών, κατά το μεσημέρι της 22ης Απριλίου καθώς επίσης και μια διαταραχή της θερμοροής εκείνη τη στιγμή. Αυτό συνέβη εξαιτίας μιας διακοπής ρεύματος που είχε ως αποτέλεσμα την ολιγόλεπτη απενεργοποίηση του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας και γι αυτό το λόγω, κατά την ενεργοποίησή του μετά τη διακοπή, παρουσιάζεται μία διαταραχή της ροής θερμότητας καθώς ενεργοποιήθηκε το αερόθερμο και υπήρξε μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή στην τοιχοποιία.

- **Χρήση αισθητήρα θερμοροής HFP03 ΧΩΡΙΣ Σύστημα Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας (ΣΕΘ)**

Το δεύτερο set μετρήσεων διήρκησε 20 ημέρες και ξεκίνησε την Παρασκευή 11 Μαΐου 2012 στις 15:00 και τελείωσε την Πέμπτη 31 Μαΐου 2012 επίσης στις 15:00. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας HFP03 και οι εσωτερικές θερμοκρασίες εξαρτώνται μόνο από τις καιρικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα γραφήματα των Σχημάτων 5.15 και 5.16.



Σχήμα 5.15 - Οι μετρήσεις της διάταξης για το SYS_1 κάνοντας χρήση του αισθητήρα θερμοροής HFP03



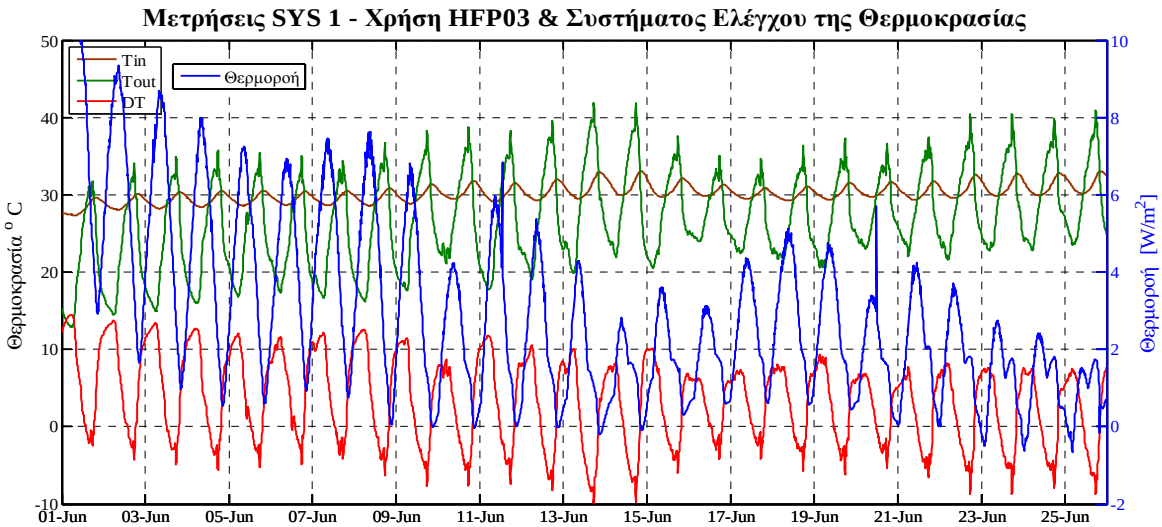
Σχήμα 5.16 - Οι μετρήσεις της διάταξης για το SYS_1 κάνοντας χρήση του αισθητήρα θερμοροής HFP03

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μια σχετικά μεγάλη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας, ενώ οι διακυμάνσεις στη ροή θερμότητα έχουν μειωθεί. Από την άλλη, οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασιακή διαφορά δεν έχουν αλλάξει αισθητά (από -7 στους 11 °C) σε σχέση με τη χρήση του συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας, με μέση θερμοκρασιακή διαφορά στους 4.9°C.

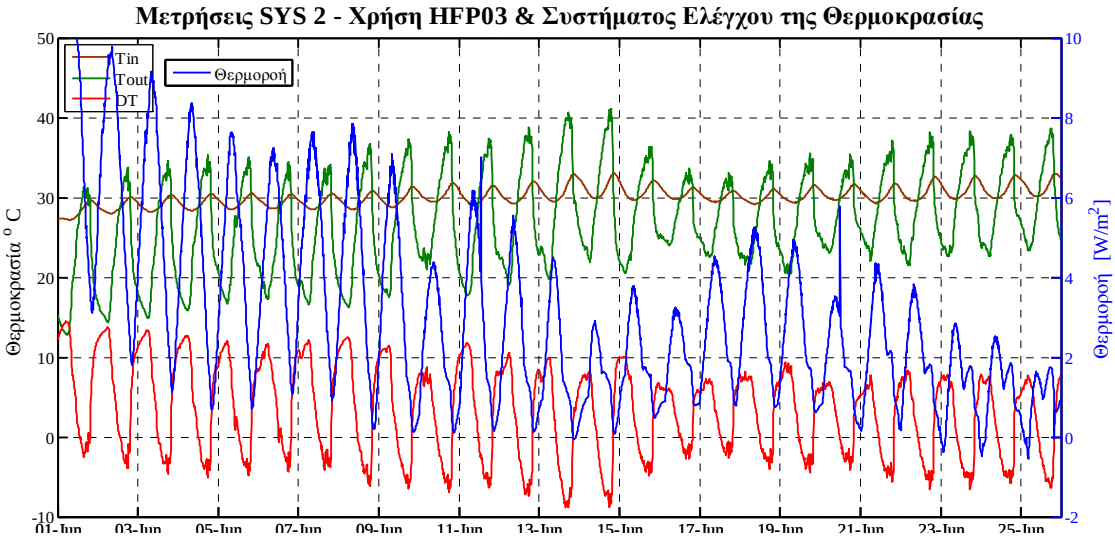
- **Χρήση αισθητήρα θερμοροής HFP03 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας (ΣΕΘ)**

Το τρίτο set μετρήσεων διήρκησε 26 ημέρες και ξεκίνησε το Παρασκευή 1 Ιουνίου 2012 στις 00:00 και τελείωσε στις 26 Ιουνίου στις 00:00. Σε αυτή την

περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας HFP03 και έγινε έλεγχος της εσωτερικής θερμοκρασίας με χρήση της συσκευής ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας (ΣΕΘ) συνδεδεμένο με αερόθερμο, ώστε να τίθεται σε λειτουργία όσο η εσωτερική θερμοκρασία στην περιοχή κοντά στα σημεία τοποθέτησης των θερμοστοιχείων πέφτει κάτω από τους 30°C. Η έναρξη λειτουργίας του αερόθερμού έγινε το απόγευμα της Πέμπτης 31 Μαΐου 2012, έτσι ώστε να έχει επέλθει μια θερμοκρασιακή ισορροπία στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας και αποκατάσταση της έντονης κυκλοφορίας αέρα την ώρα έναρξης των μετρήσεων. Το αερόθερμο τοποθετήθηκε στην ίδια θέση με την προηγούμενη χρήση ώστε να αποφευχθεί η έντονη κυκλοφορία αέρα στην περιοχή των αισθητήρων. Τα γραφήματα των σχημάτων 5.17 και 5.18 παρουσιάζουν τις μετρήσεις του συγκεκριμένου set μετρήσεων.



Σχήμα 5.17 - Οι μετρήσεις της διάταξης για το SYS_1 κάνοντας χρήση του αισθητήρα θερμοροής HFP03 και του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου



Σχήμα 5.18 - Οι μετρήσεις της διάταξης για το SYS_2 κάνοντας χρήση του αισθητήρα θερμοροής HFP03 και του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου

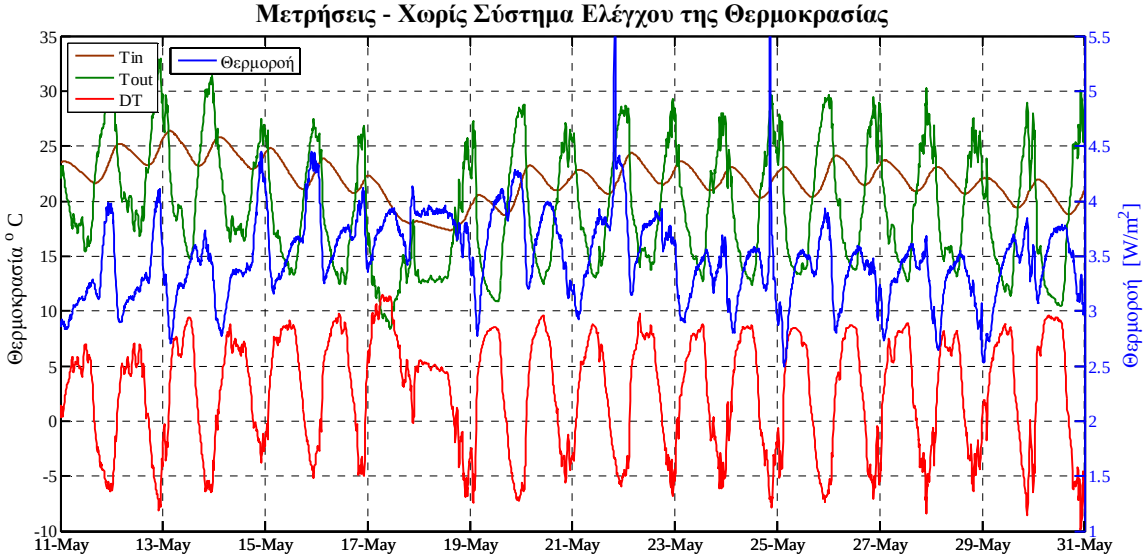
Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μείωση της διακύμανσης της εσωτερική θερμοκρασίας και αύξηση στη διακύμανση της ροής θερμότητας, εξαιτίας τόσο της διαφοράς θερμοκρασίας, όσο και της χρήσης του αερόθερμου στο σύστημα ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η θερμοκρασιακή διαφορά φτάνει έως τους 12°C και με μέση τιμή στους 5.7°C. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά θα μπορούσε να ήταν μεγαλύτερη αν η εσωτερική θερμοκρασία ρυθμιζόταν υψηλότερη των 30°C ή αν οι εξωτερικές θερμοκρασίες ήταν χαμηλότερες, όπως αν ήταν χειμώνας.

OMEGA/BETATHERM

Οι μετρήσεις με τη μετρητική διάταξη OMEGA/BETATHERM, για την συγκεκριμένη τοιχοποιία, χωρίζονται σε δύο set μετρήσεων, ανάλογα με τη χρήση ή όχι του συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η διάταξη αυτή κατέγραφε μετρήσεις ταυτόχρονα με το μετρητικό TRSYS01. Το μετρητικό κατέγραφε με συχνότητα δειγματοληψίας 1 min, όμως για την αποφυγή των έντονων διακυμάνσεων επεξεργάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων ανά 10min και μία ώρα.

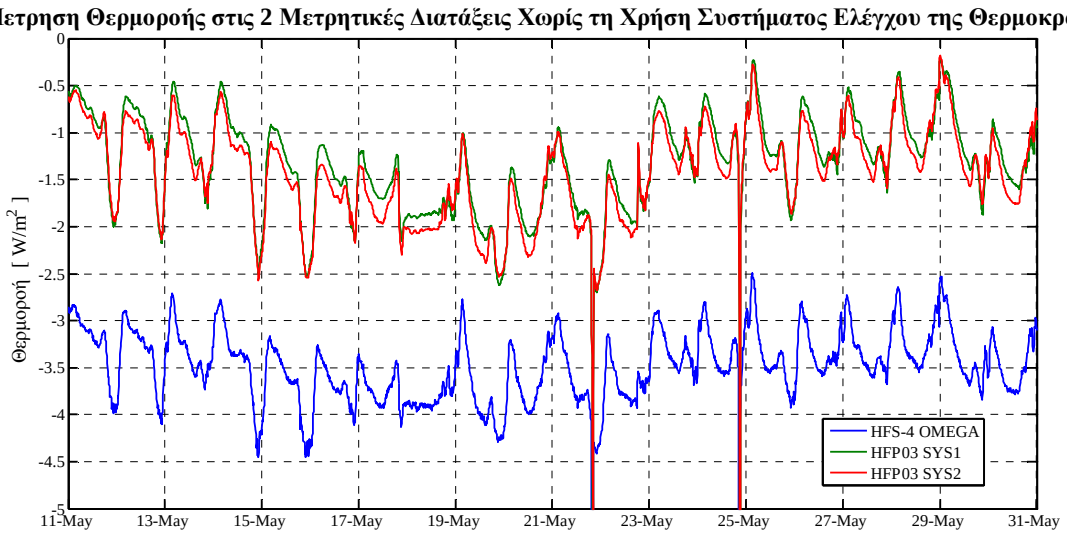
- **Χωρίς τη χρήση Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Το πρώτο set μετρήσεων της συγκεκριμένης μετρητικής διάταξης διήρκησε 21 ημέρες και ξεκίνησε από την Παρασκευή 11 Μαΐου 2012 στις 17:00 και τελείωσε την Πέμπτη 31 Μαΐου επίσης στις 17:00. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο σύστημα ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας και τόσο οι εξωτερικές, όσο και οι εσωτερικές θερμοκρασίες εξαρτώνται αποκλειστικά από τις καιρικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα:



Σχήμα 5.19 - Οι μετρήσεις της διάταξης OMEGA/BETATHERM χωρίς τη χρήση του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται η μεγάλη διακύμανση που ήδη είχε παρατηρηθεί για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα με τη διάταξη TRSYS01. Αν συγκριθούν οι μετρήσεις των δύο μετρητικών διατάξεων (Σχήματα 5.15-5.16 και Σχήμα 5.19) παρατηρείται ότι ενώ οι θερμοκρασίες συμβαδίζουν καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, οι μετρήσεις ροής θερμότητας παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις.



Σχήμα 5.20 - Μέτρηση της ροής θερμότητας από τους αισθητήρες HFP03 και HFS-4 των διατάξεων TRSYS01 και OMEGA/BETATHERM κατά την περίοδο 11-31 Μαΐου

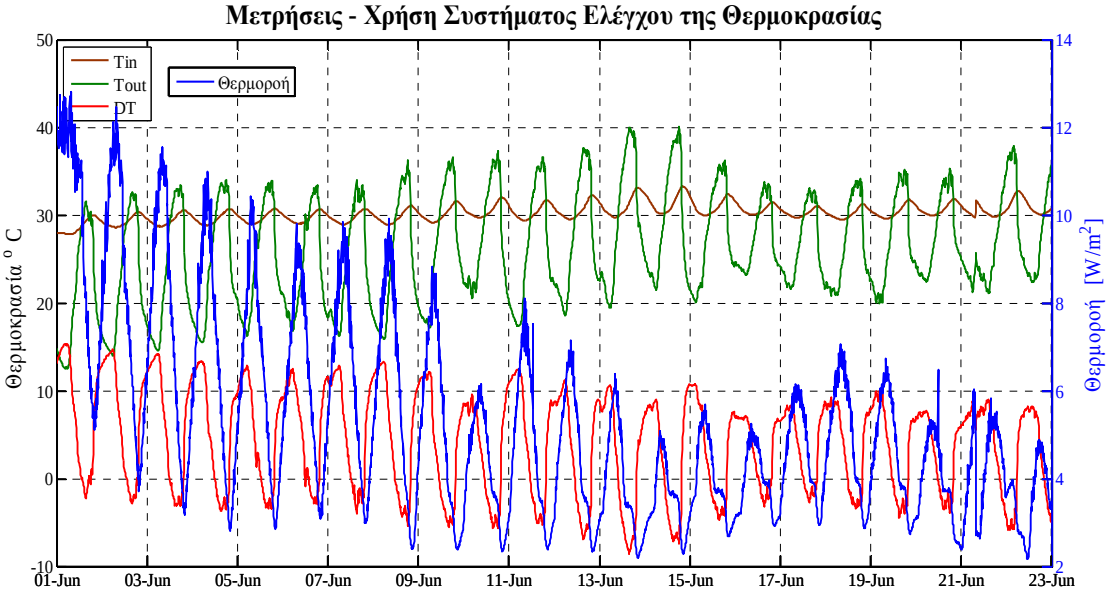
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 5.20 οι μετρήσεις της θερμοροής από τη διάταξη OMEGA/BETATHERM είναι πάντα περίπου 2.1 W/m^2 μικρότερες από της αντίστοιχες μετρήσεις των δύο συστημάτων της διάταξης TRSYS01. Δείχνει δηλαδή η καμπύλη για τον αισθητήρα HFS-4 να είναι μετατοπισμένη κατά 2.1 W/m^2 κάτω από τις αντίστοιχες καμπύλες των HFP03. Από την άλλη, η μέτρηση της ροής θερμότητας στο SYS_1 της TRSYS01, είτε ταυτίζεται, είτε είναι κατά περίπου 0.1 W/m^2 μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του SYS_2.

Η διαφορά στις μετρήσεις των δύο διατάξεων πιθανόν να οφείλεται στη μη σωστή βαθμονόμηση του μετρητικού HFS-4 της Omega για μετρήσεις ροής θερμότητας σε τοιχοποιίες, όταν αυτό τοποθετείται στην επιφάνεια της τοιχοποιίας. Όπως είχε αναφερθεί στα χαρακτηριστικά του οργάνου στο κεφάλαιο 3, ο αισθητήρας αυτός είναι ιδανικός για μετρήσεις ροής θερμότητας διαμέσου ενός υλικού, συνεπώς η βαθμονόμηση σε συνθήκες συναγωγής πιθανόν να διαφέρει.

- **Χρήση Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

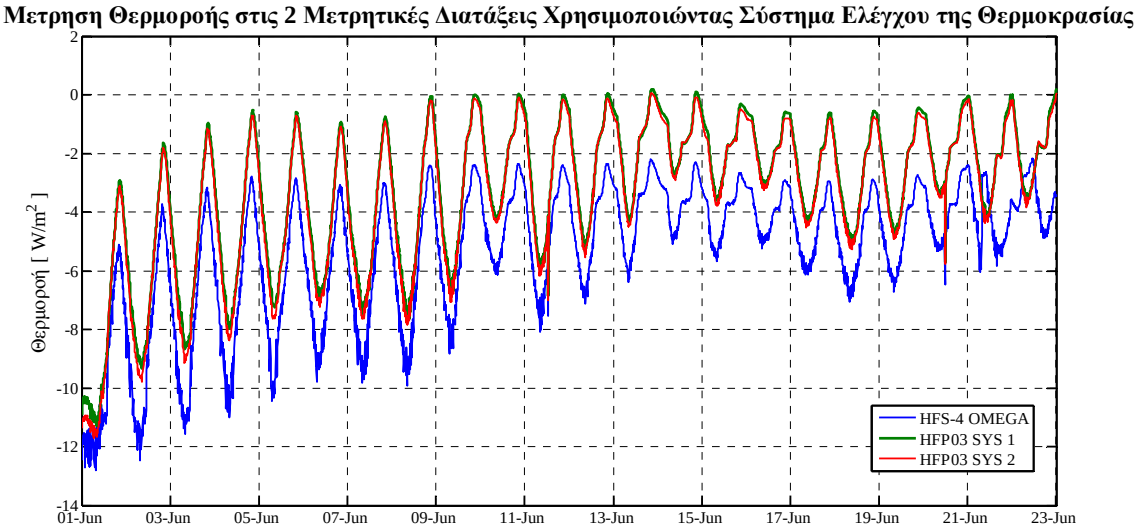
Το δεύτερο set μετρήσεων της συγκεκριμένης μετρητικής διάταξης διήρκησε 23 ημέρες και ξεκίνησε από την Παρασκευή 1 Ιουνίου 2012 στις 00:00 και τελείωσε το Σάββατο 23 Ιουνίου 2012 επίσης στις 00:00. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας, το οποίο εικονίζεται στο Σχήμα (5.12). Η θερμοκρασία ρυθμίστηκε στους 30^{o}C, και το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία από το απόγευμα της προηγούμενης ημέρας της έναρξης των μετρήσεων. Οι μετρήσεις

αυτές καταγράφηκαν την ίδια χρονική περίοδο με τη μετρητική διάταξη TRSYS01. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τη διάταξη OMEGA/BETATHERM παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 5.21 - Οι μετρήσεις της διάταξης OMEGA/BETATHERM κάνοντας χρήση του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου

Σε αυτή την περίπτωση οι διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας έχουν μειωθεί και δείχνουν να αυξάνονται μόνο τις μέρες που η εξωτερική θερμοκρασία φτάνει και τους 40°C. Επίσης ιδικά τις πρώτες και τις τελευταίες ημέρες η θερμοκρασιακή διαφορά φαίνεται να έχει μία σταθερή διακύμανση. Όπως και στο προηγούμενο set μετρήσεων της συγκεκριμένης μετρητικής διάταξης, η σύγκριση των μετρήσεων των δύο διατάξεων της ίδιας χρονικής περιόδου (Σχήματα 5.17-5.18 και Σχήμα 5.21), δείχνει ότι οι μεν θερμοκρασίες δεν έχουν διαφορές μεταξύ τους, οι δε ροές θερμότητας παρουσιάζουν επίσης αισθητές διαφορές, κάτι που γίνεται εμφανές στο Σχήμα (5.22).



Σχήμα 5.22 - Μέτρηση της ροής θερμότητας από τους αισθητήρες HFP03 και HFS-4 των διατάξεων TRSYS01 και OMEGA/BETATHERM κατά την περίοδο 01-23 Ιουνίου

Η παρατήρηση της διαφοράς των μετρήσεων ροής θερμότητας συνεχίζεται και σε αυτή την περίπτωση που γίνεται χρήση του συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η μέση διαφορά μεταξύ των καμπυλών της διάταξης TRSYS01, που δείχνουν να ταυτίζονται, και της διάταξης OMEGA/BETATHERM είναι περίπου 2 W/m^2, περίπου όσο δηλαδή και στην περίπτωση που δεν έγινε έλεγχος της εσωτερικής θερμοκρασίας. Αυτό, δείχνει να επιβεβαιώνει την υπόθεση της λανθασμένης βαθμονόμησης του αισθητήρα HFS-4, που αναφέρθηκε παραπάνω.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όλες οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν σύμφωνα με τις τέσσερεις τεχνικές οι οποίες περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3 για τον πειραματικό προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας και στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου για κάθε μία από τις πέντε παραπάνω περιπτώσεις.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ κατά ISO

Η Μέθοδος Μέσης Τιμής (Average Method), σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9869, μπορεί να εφαρμοστεί για τις επί τόπου μετρήσεις των διατάξεων TRSYS01 και OMEGA/BETATHERM για την τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου καθώς πληρούνται οι προϋποθέσεις για την τοιχοποιία και την εγκατάσταση των αισθητήρων, για να υπάρξει σύγκλιση της υπολογιζόμενης τιμής με την πραγματική. Σε κάθε περίπτωση η υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής αντίστασης θα είναι ίση με το πηλίκο της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς των επιφανειών της τοιχοποιίας με τη μέση θερμοροή που την διαπερνά και η θερμική διαπερατότητα θα είναι ίση με το αντίστροφό της θερμικής αντίστασης.

Στην υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής αντίστασης λαμβάνεται υπόψη η τιμή της θερμικής αντίστασης του αισθητήρα ροής θερμότητας. Για τη διάταξη TRSYS01, τόσο στην περίπτωση των αισθητήρων ροής θερμότητας HFP01, όσο και των HFP03 γίνεται η διόρθωση

$$R_{cor} = \frac{\delta T}{q} - R_{HFM} \qquad (5.3)$$

όπου και στις δύο αυτές περιπτώσεις οι τιμή της θερμικής αντίστασης του αισθητήρα είναι γνωστή και ίση με $R_{HFM}= 6.25 \cdot 10^{-3}$ Km^2/W.

Στη μετρητική διάταξη της OMEGA/BETATHERM, επειδή το πάχος του αισθητήρα ροής θερμότητας της OMEGA είναι πολύ μικρό, δε γίνεται διόρθωση.

Για τον έλεγχο των κριτηρίων σύγκλισης, αρχικά προσδιορίζεται η θερμοχωρητικότητα των δομικών υλικών της τοιχοποιίας ανά μονάδα επιφάνειας, ώστε να προσδιορισθεί το είδος της τοιχοποιίας. Η εξεταζόμενη τοιχοποιία ανήκει στις

βαριές κατασκευές καθώς η θερμοχωρητικότητα είναι περίπου ίση με 45.4kJ/m^{2}K, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο από 20kJ/m^{2}K, που είναι το όριο ελαφριάς - βαριάς κατασκευής. Έτσι η περίοδος ανάλυσης είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των 24ωρών, όπως ορίζεται από το πρότυπο, δηλαδή η κάθε πειραματική διαδικασία των εξεταζόμενων μετρήσεων τελειώνουν την ίδια ώρα με την έναρξή τους.

Για τον έλεγχο σύγκλισης της υπολογιζόμενης τιμής, λήφθηκαν υπόψη και τα δύο κριτήρια που ορίζονται. Για να υπάρχει σύγκλιση των μετρήσεων στην υπολογιζόμενη τιμή θα πρέπει, πρώτον η τελική τιμή να μην διαφέρει παραπάνω από το 5% της αντίστοιχης τιμής μιας μέρας πριν τον τερματισμό των μετρήσεων (κριτήριο s_1) και δεύτερο, η τιμή που προκύπτει μετά την ανάλυση των πρώτων 66% των μετρήσεων (πρώτη περίοδος) να μην ξεπερνά το 5% της τιμής που λαμβάνεται μετά από την ανάλυση των τελευταίων 66% των μετρήσεων (τελευταία περίοδος, κριτήριο s_2).

Σε όλες τις περιπτώσεις, οι μετρήσεις διήρκησαν παραπάνω από 72 ώρες.

Τέλος έγινε μια προσέγγιση της συνολικής αποθηκευόμενης ενέργειας στον τοίχο και της συνολικής θερμότητας που τον διαπέρασε καθ' όλη τη διάρκεια της κάθε μέτρησης, ώστε να προβλεφθεί η ανάγκη εφαρμογής της δυναμικής μεθόδου ή όχι. Σε κάθε περίπτωση για την τοιχοποιία αυτή κρίθηκε αναγκαία και η εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου. Η μεθοδολογία της εξέτασης αυτής της συνθήκης αναλύεται στο Παράρτημα Β.

Το σφάλμα των μετρήσεων θεωρήθηκε σε κάθε περίπτωση ίσο με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους σφαλμάτων που ορίζονται από το πρότυπο **[14]**. Πιο συγκεκριμένα:

$$s(U) = \sqrt{[s(sensor)]^2 + [s(DataLogger)]^2 + [s(condact)]^2 + [s(oper)]^2 + [s(time\ \text{var})]^2 + [s(Tem\ \text{var})]^2} \qquad (5.4)$$

όπου

s(sensor), το σφάλμα των αισθητήρων, το οποίο είναι ίσο με το τετραγωνικό άθροισμα των σφαλμάτων των θερμοστοιχείων και των θερμορροόμετρων, δηλαδή $s(sensor) = \sqrt{[s(HFP)]^2 + [s(TemK)]^2}$

με s(TemK)=0.1% , καθώς χρησιμοποιείται η διαφορά θερμοκρασίας και όχι οι απόλυτες θερμοκρασίες, ενώ για το σφάλμα των αισθητήρων θερμοροής τόσο για την χρήση των HFP01 και των HFP03 όσο και των OMEGA θα είναι s(HFP)=5%. Δηλαδή, $s(sensor) = \left(\sqrt{5^2 + 0.1^2}\right)\% \approx 5\%$

s(DataLogger), το σφάλμα του συστήματος λήψης και αποθήκευσης των δεδομένων, ίσο με 0.06% για το CR1000 της διάταξης TRSYS01 και 0.05% για το Agilent της OMEGA/BETATHERM.

s(contact), το σφάλμα των τυχαίων μεταβολών λόγω της θερμικής αντίστασης επαφής των αισθητήρων και των επιφανειών, ίσο με 5%

s(oper), το λειτουργικό σφάλμα το οποίο λαμβάνεται ίσο με 2% για τη μετρητική διάταξη TRSYS01, εξαιτίας της σχετικά μεγάλης αναλογίας πάχους αισθητήρα - πάχους τοιχοποιίας, ενώ για τη διάταξη OMEGA/BETATHERM το σφάλμα αυτό είναι αμελητέο.

s(timevar), το σφάλμα που οφείλεται στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας και θερμοροής με το χρόνο. Το σφάλμα αυτό μειώνεται με την αύξηση της χρονικής περιόδου των μετρήσεων και τη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Έτσι, λαμβάνεται ίσο με 8%, στις περιπτώσεις που γίνεται χρήση του συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας και 9% στις περιπτώσεις που δε γίνεται. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ιδανικά σε μόνιμες συνθήκες και για το λόγο αυτό, επειδή τα θερμοκρασιακά πεδία στις περιπτώσεις χρήσης του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας προσεγγίζουν τα μόνιμα πεδία, επιλέχθηκε μικρότερο σφάλμα από τις μετρήσεις που δεν έγινε χρήση του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση οι μετρήσεις διήρκησαν για αρκετά παραπάνω μέρες από τις προτεινόμενες (τουλάχιστον 3 μέρες), γι' αυτό οι τιμές των σφαλμάτων λήφθηκαν μικρότερες από 10%, που προτείνει ως ενδεικτική τιμή το πρότυπο.

Στις περιπτώσεις χρήσης της μετρητικής διάταξης TRSYS01 και του συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας το συνολικό σφάλμα θα είναι ίσο με:

$$s(U) = \sqrt{5^2 + 0.06^2 + 5^2 + 2^2 + 8^2} = 10.86\%$$

Ενώ για την ίδια μετρητική διάταξη, χωρίς τη χρήση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας:

$$s(U) = \sqrt{5^2 + 0.06^2 + 5^2 + 2^2 + 9^2} = 11.62\%$$

Στις περιπτώσεις χρήσης της μετρητικής διάταξης OMEGA/BETATHERM και του συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας το συνολικό σφάλμα θα είναι ίσο με:

$$s(U) = \sqrt{5^2 + 0.05^2 + 5^2 + 8^2} = 10.67\%$$

Ενώ για την ίδια μετρητική διάταξη, χωρίς τη χρήση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας:

$$s(U) = \sqrt{5^2 + 0.05^2 + 5^2 + 9^2} = 11.45\%$$

Σε κάθε περίπτωση η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται για τις μετρήσεις ενός χρονικού διαστήματος οι οποίες υπακούουν στις συνθήκες που ορίζονται από το πρότυπο ISO 9869. Δηλαδή επιλέγεται ένα χρονικό διάστημα ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών, το οποίο είναι μεγαλύτερο ή ίσο των 3 ημερών, τέτοιο ώστε η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας, να είναι μικρή σε σχέση με τη θερμοκρασιακή διαφορά. Αυτό γίνεται με σκοπό να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες για αυτή τη μέθοδο, που είναι ένα, όσο το δυνατόν, μόνιμο ή ψευδομόνιμο πεδίο

θερμοκρασιακών μεταβολών **[14]**. Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέγονται οι μετρήσεις των χρονικών διαστημάτων:

- Από 20/04/2012 στις 00:00 έως 25/04/2012 στις 00:00
- Από 21/05/2012 στις 00:00 έως 29/05/2012 στις 00:00
- Από 03/06/2012 στις 00:00 έως 08/06/2012 στις 00:00

Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας και του ελέγχου σύγκλισης της μεθόδου έγιναν με χρήση του λογισμικού MATLAB. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα.

TRSYS01

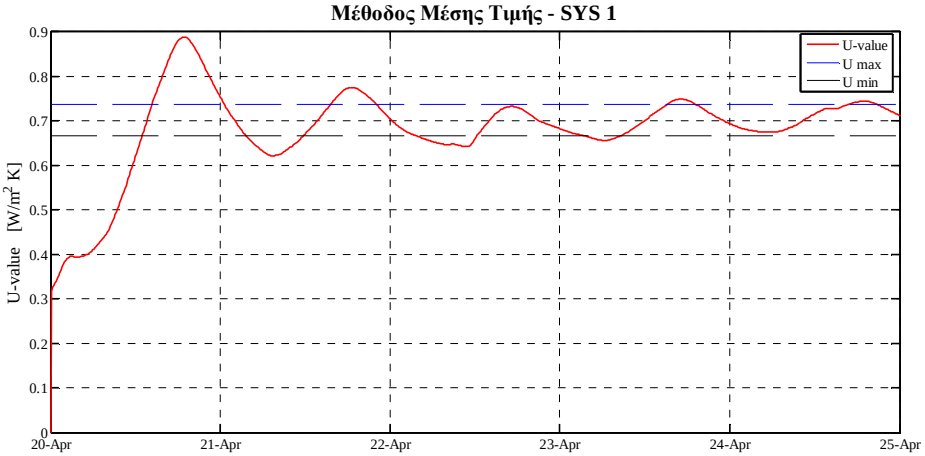
- **Χρήση HFP01 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω για το διάστημα των μετρήσεων που επιλέχθηκε, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.4.

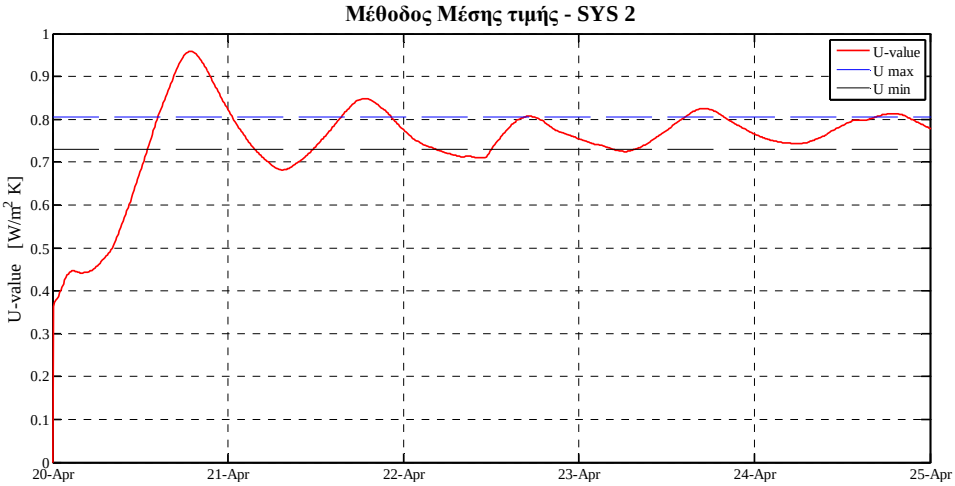
Πίνακας 5.4 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής για Χρήση HFP01 και ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10.86%]*	s_1 *[%]*	s_2 *[%]*	*Συμπέρασμα*
20/04/2012 00:00	25/04/2012 00:00	**SYS_1**	**0.70**	**± 0.07**	1.01	3.01	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ
		SYS_2	**0.77**	**± 0.08**	0.20	2.01	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζεται σε διάγραμμα η υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 5.23 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής για το SYS_1



Σχήμα 5.24 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής για το SYS_2

Και στα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι από την πρώτη κιόλας ημέρα η υπολογιζόμενη τιμή ταλαντεύεται γύρω από την τελική τιμή.

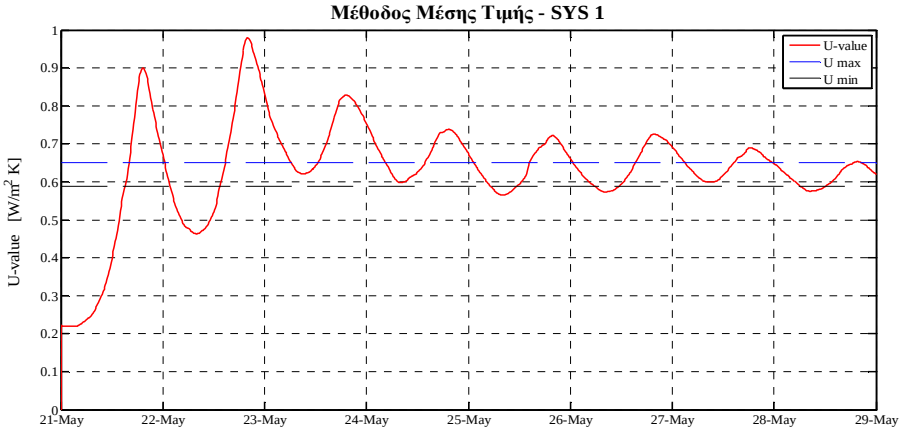
- **Χρήση HFP03 χωρίς Σύστημα Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω για το διάστημα των μετρήσεων που επιλέχθηκε, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.5.

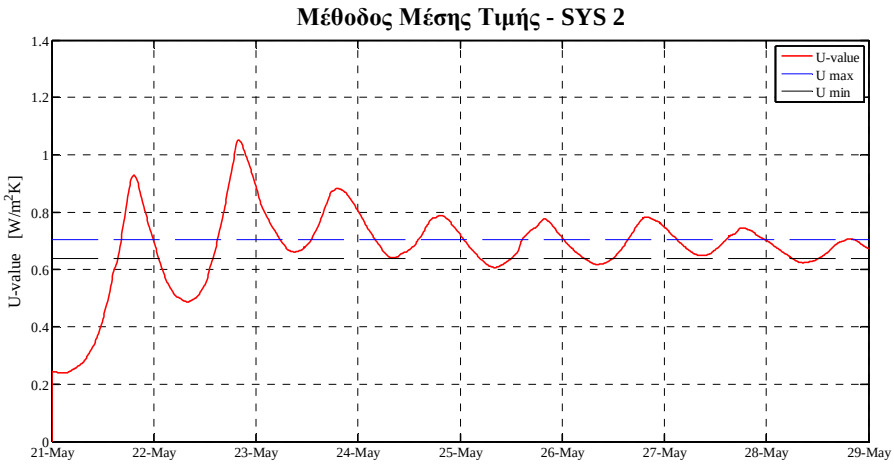
Πίνακας 5.5 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής για Χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value [W/m²K]*	Σφάλμα [11.62%]	s_1 [%]	s_2 [%]	*Συμπέρασμα*
21/05/2012 00:00	29/05/2012 00:00	**SYS_1**	**0.62**	**± 0.07**	4.35	4.06	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ
		SYS_2	**0.67**	**± 0.08**	4.32	2.35	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.24 και 5.25 παρουσιάζεται η υπολογιζόμενη τιμή του συντελεστή U-value κατά το χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε, σύμφωνα με τη μέθοδο μέσης τιμής.



Σχήμα 5.25 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής για το SYS_1



Σχήμα 5.26 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής για το SYS_2

Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής ξεκινά να ταλαντεύεται γύρω από την τελική τιμή μετά από περίπου 4 ημέρες.

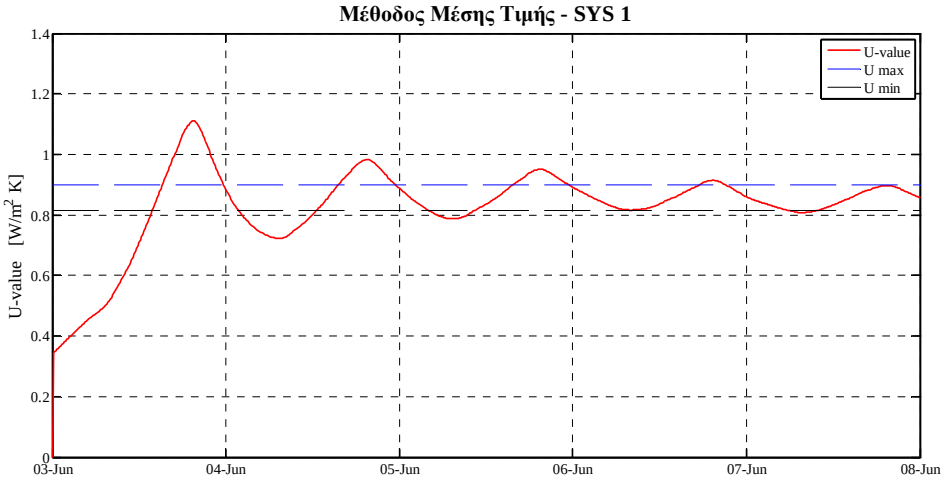
- **Χρήση HFP03 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω για το διάστημα των μετρήσεων που επιλέχθηκε, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.6.

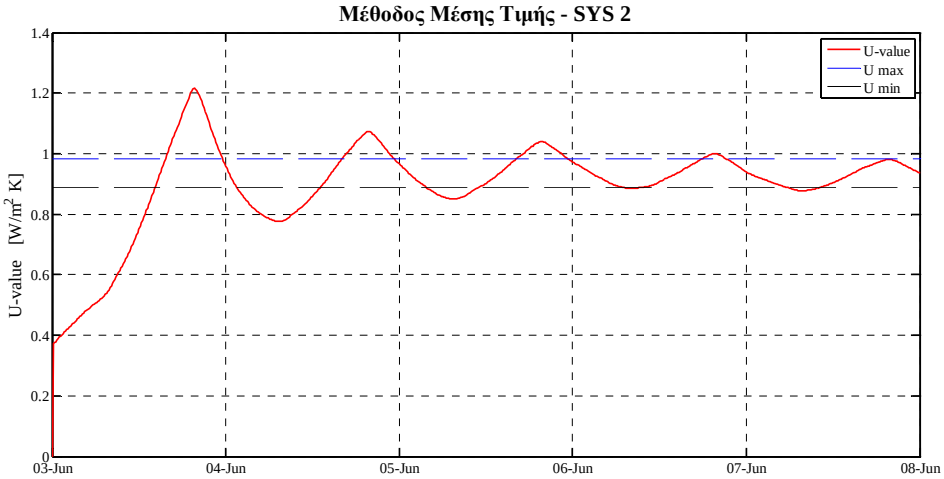
Πίνακας 5.6 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής για Χρήση HFP03 και ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value [W/m²K]*	Σφάλμα [10.86%]	s_1 [%]	s_2 [%]	*Συμπέρασμα*
03/06/2012 00:00	08/06/2012 00:00	**SYS_1**	**0.86**	**± 0.09**	0.38	1.83	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ
		SYS_2	**0.94**	**± 0.10**	0.43	3.57	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της υπολογιζόμενης θερμικής διαπερατότητας κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των μετρήσεων.



Σχήμα 5.27 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής για το SYS_1



Σχήμα 5.28 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής για το SYS_2

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση που γινόταν και πάλι χρήση του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας η υπολογιζόμενη τιμή ταλαντεύεται από την πρώτη κιόλας ημέρα.

OMEGA/BETATHERM

Ως χαρακτηριστική χρονική περίοδος για την επεξεργασία των μετρήσεων κατά τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, επιλέγονται οι ίδιες περίοδοι με τα αντίστοιχα set μετρήσεων της διάταξης TRSYS01, καθώς πληρούν τις προϋποθέσεις που καθορίζονται από το πρότυπο ISO 9869.

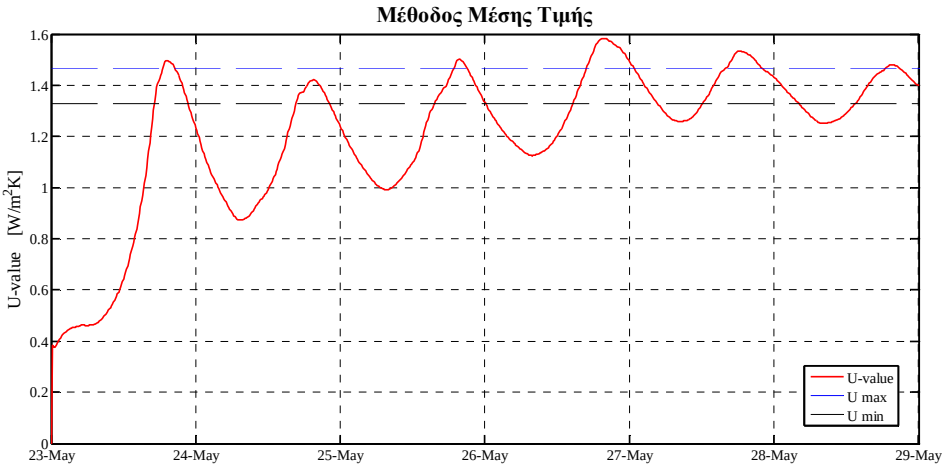
- **Χωρίς τη χρήση Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τη διαδικασία για το διάστημα των μετρήσεων που επιλέχθηκε, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα του Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής χωρίς ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**		**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	Σφάλμα [11.45%]	s_1 [%]	s_2 [%]	*Συμπέρασμα*
23/05/2012 00:00	29/05/2012 00:00	**1.40**	**± 0.16**	2.37	1.44	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Στο Σχήμα 5.29 παρουσιάζεται το διάγραμμα της θερμικής διαπερατότητας με το χρόνο, κατά την επεξεργασία αυτής της μεθόδου.



Σχήμα 5.29 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής

Όπως και στην περίπτωση που δεν υπήρχε σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας, το σύστημα αργεί να προσεγγίσει την τελική τιμή.

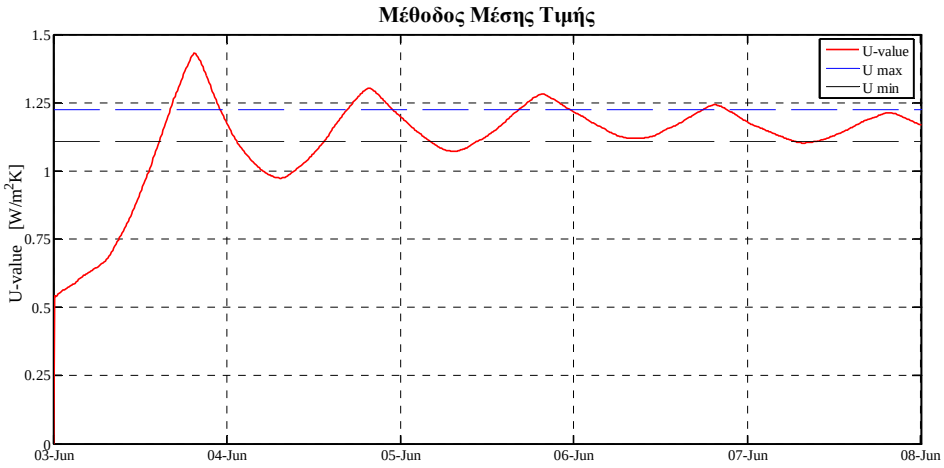
- **Χρήση Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία όπως περιγράφηκε, για το διάστημα των μετρήσεων που επιλέχθηκε, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα του Πίνακα 5.8

Πίνακας 5.8 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής με χρήση ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**		**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	Σφάλμα [10.67%]	s_1 [%]	s_2 [%]	*Συμπέρασμα*
03/06/2012 00:00	08/06/2012 00:00	**1.17**	**± 0.12**	1.02	3.24	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Στο Σχήμα 5.30 απεικονίζεται η υπολογιζόμενη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας κατά την εφαρμογή της μεθόδου της μέσης τιμής:



Σχήμα 5.30 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής

Όπως σε κάθε περίπτωση χρήσης του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας, η τελική τιμή προσεγγίζεται από την πρώτη κιόλας ημέρα, ταλαντεύοντας γύρω από αυτή.

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ κατά ASTM

Η εφαρμογή της μεθόδου είναι εφικτή για μετρήσεις που διαρκούν ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών και η ροή θερμότητας είναι κάθετη στην επιφάνεια της τοιχοποιίας. Η τιμή που προκύπτει από το πηλίκο της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς προς τη μέση θερμοροή είναι η εκτιμώμενη θερμική αντίσταση, ενώ η θερμική διαπερατότητα θα είναι ίση με το αντίστροφο της θερμικής αντίστασης. Η εκτιμώμενη τιμή δεν θα υποστεί καμία διόρθωση.

Για τον υπολογισμό του παράγοντα CR_n, το χαρακτηριστικό χρονικό διάστημα n λαμβάνεται ίσο με τη τιμή n=9h. Σύμφωνα με το πρότυπο, η τιμή αυτή θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6 και 48 ωρών, αλλά με σκοπό το διαμερισμό τον χρονικών τμημάτων των μετρήσεων επιλέχθηκε μικρή τιμή για επίσης μικρό χρονικό διάστημα ελέγχου της σύγκλισης **[16]**. Ο έλεγχος σύγκλισης γίνεται για $3 \cdot n$ ώρες, δηλαδή για 27 ώρες.

Από την ανάλυση σφάλματος στην αντίστοιχη ενότητα του ίδιου κεφαλαίου, διαπιστώθηκε ότι το πειραματικό σφάλμα για την εκτίμηση της θερμικής διαπερατότητας μια τοιχοποιίας με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι 10% **[16]**. Έτσι σε κάθε περίπτωση, το σφάλμα της συγκεκριμένης μεθόδου θα είναι ίσο με 10%.

Η εκτίμηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας γίνεται υπολογίζοντας την μέση τιμή των συντελεστών U-value που προκύπτουν από κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα στο οποίο ικανοποιείται η σύγκλιση. Τα χρονικά διαστήματα πρέπει να είναι τουλάχιστον τρία και διαρκούν ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών. Τέλος κάθε χρονικό διάστημα ξεκινά εκεί που σταμάτησε η σύγκλιση του προηγούμενου.

Έτσι, η μέση τιμή θα είναι

$$\overline{U} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_i \tag{5.5}$$

και ο συντελεστής μεταβολής

$$V(U) = \frac{s(U)}{\overline{U}} \times 100\,\% \tag{5.6}$$

όπου s(U) η τυπική απόκλιση υπολογιζόμενη με N-1 βαθμούς ελευθερίας, ίση με

$$s(U) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(U_i - \overline{U}\right)^2}{\left(N-1\right)}} \tag{5.7}$$

Ακόμη για τη μέση θερμοκρασία εκτιμάται η μέση τιμή των επί μέρους,

$$Tm = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Tm_i \tag{5.8}$$

Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας και του ελέγχου σύγκλισης της μεθόδου έγιναν με χρήση του υπολογιστικού πακέτου MATLAB. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα:

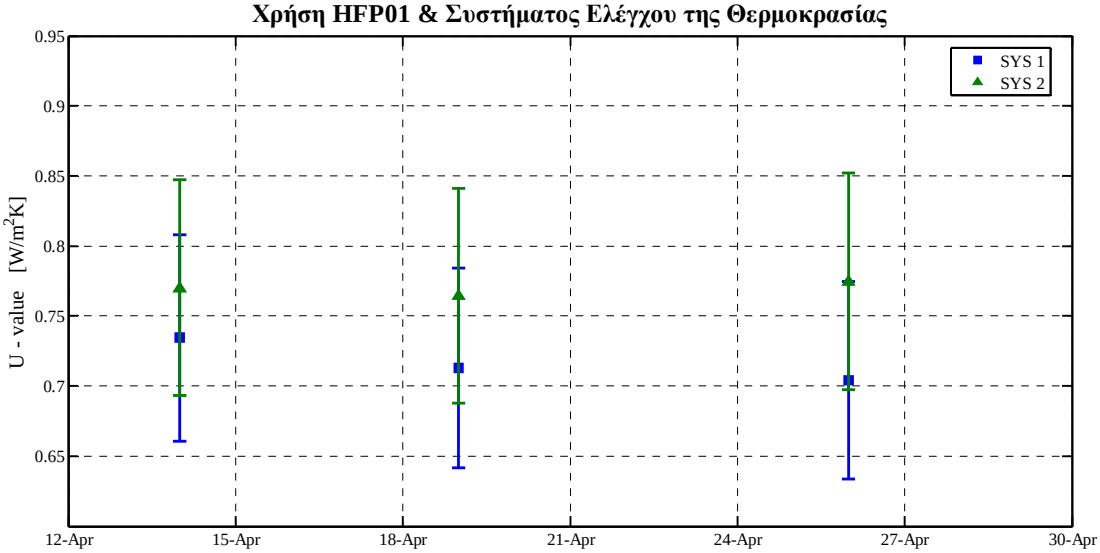
TRSYS01

- **Χρήση HFP01 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας (ΣΕΘ)**

Για το συγκεκριμένο set μετρήσεων είναι δυνατός ο επιμερισμός τριών (N=3) επί μέρους χρονικών διαστημάτων, από τα οποία κάθε φορά υπολογίζεται μια τιμή του συντελεστή διαπερατότητας.

Πίνακας 5.9 - Αποτελέσματα σε κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [10%]*	*Μέση θερμοκρασία* T_m *[°C]*
11/04/2012 18:00	15/04/2012 18:00	SYS_1	0.73	±0.07	16.6
		SYS_2	0.77	±0.08	16.6
15/04/2012 18:00	21/04/2012 18:00	SYS_1	0.71	±0.07	17.1
		SYS_2	0.76	±0.08	17.2
21/04/2012 18:00	29/04/2012 18:00	SYS_1	0.70	±0.07	16.2
		SYS_2	0.77	±0.08	16.4



Σχήμα 5.31 Διασπορά των αποτελεσμάτων των επί μέρους διαστημάτων

Η εκτιμώμενη τιμή για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για αυτό το set μετρήσεων είναι η μέση τιμή αυτών. Δηλαδή:

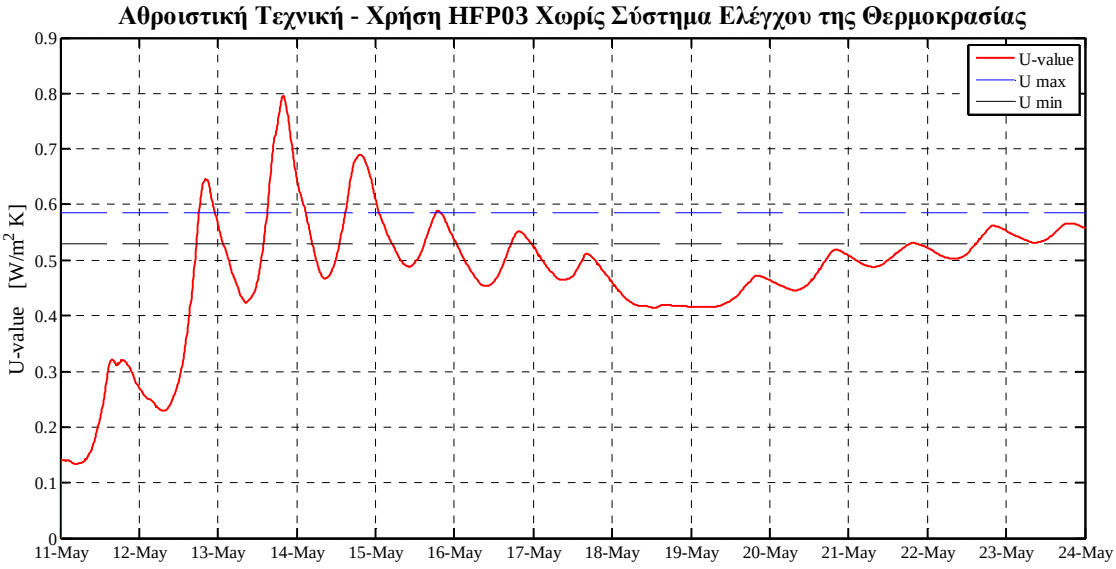
Για το SYS_1 προκύπτει $U_{SYS_1} = 0.72\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U_{SYS_1}) = 2.17\%$ και μέση θερμοκρασία $Tm_{SYS_1} = 16.7\ °C$

και για το SYS_2 $U_{SYS_2} = 0.77\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U_{SYS_2}) = 0.65\%$ και μέση θερμοκρασία $Tm_{SYS_2} = 16.7\,°C$.

Εφόσον και στα δύο συστήματα ο συντελεστής μεταβολής είναι μικρότερος από 10%, τότε η εκτίμηση του συντελεστή U-value με τη μέση τιμή είναι **αποδεκτή**.

- **Χρήση HFP03 χωρίς Σύστημα Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας (ΣΕΘ)**

Η τεχνική της άθροισης κατά το πρότυπο ASTM C 1155-95, **δεν μπορεί να εφαρμοσθεί** σε αυτή την περίπτωση καθώς το συγκεκριμένο set μετρήσεων δεν είναι δυνατό να επιμερισθεί σε τουλάχιστον τρία τμήματα, ακόμα και με το πιο ασθενές κριτήριο σύγκλισης της μεθόδου, δηλαδή ακόμα και για εκλογή του δείκτη n=6h **[16]**. Χαρακτηριστικά οι εκτιμήσεις του συντελεστή διαπερατότητας από το μοναδικό τμήμα που υπάρχει σύγκληση είναι για το SYS_1 $U_{SYS_1} = 0.55\ W/m^2K$ και για το SYS_2 $U_{SYS_2} = 0.60\ W/m^2K$. Το Σχήμα 5.32 παρουσιάζει την εκτίμηση του συντελεστή U-value και για τα δύο συστήματα.



Σχήμα 5.32 - Συντελεστής U-value για το μοναδικό διάστημα που υπάρχει σύγκλιση

Είναι χαρακτηριστικό ότι η διάρκεια των μετρήσεων για να συγκλίνει το πρώτο τμήμα είναι 13 ημέρες. Επίσης παρατηρείται μια αλλαγή στο σημείο σύγκλισης μεταξύ 18 και 20 Μαΐου. Αν συγκριθεί το διάγραμμα του Σχήματος 5.29 με τα Σχήματα 5.15 και 5.16 των αντίστοιχων μετρήσεων, φαίνεται ότι στο διάστημα αυτό υπάρχει μια ραγδαία μείωση της εξωτερικής θερμοκρασίας και κατά συνέπεια και της εσωτερικής, αφού δεν υπάρχει σύστημα ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας. Το διάστημα αυτό δεν ευνοεί καθόλου την εφαρμογή τόσο της αθροιστικής τεχνικής, όσο και της μεθόδου της μέσης τιμής, καθώς όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4, επειδή οι τεχνικές αυτές που

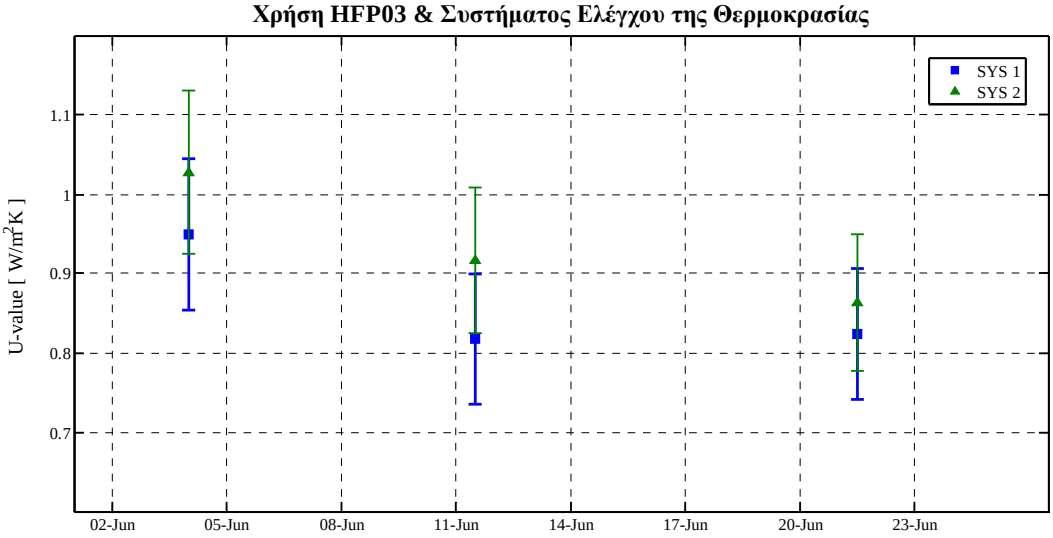
δεν διαχειρίζονται την θερμική αποθήκευση, είναι ευαίσθητες σε σταδιακές αλλαγές των θερμοκρασιών.

- **Χρήση HFP03 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας (ΣΕΘ)**

Για το συγκεκριμένο set μετρήσεων είναι δυνατός ο επιμερισμός τριών (N=3) επί μέρους χρονικών διαστημάτων, από τα οποία κάθε φορά υπολογίζεται μια τιμή του συντελεστή διαπερατότητας.

Πίνακας 5.10 - Αποτελέσματα σε κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10%]*	*Μέση θερμοκρασία T_m [°C]*
01/06/2012 0:00	06/06/2012 0:00	SYS_1	0.95	± 0.09	22.7
		SYS_2	1.03	± 0.10	22.3
6/06/2012 0:00	16/06/2012 0:00	SYS_1	0.82	± 0.08	22.9
		SYS_2	0.92	± 0.09	22.1
16/06/2012 0:00	26/06/2012 0:00	SYS_1	0.82	± 0.08	24.7
		SYS_2	0.86	± 0.09	24.9



Σχήμα 5.33 Διασπορά των αποτελεσμάτων των επί μέρους διαστημάτων

Η εκτιμώμενη τιμή για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για αυτό

το set μετρήσεων είναι η μέση τιμή αυτών. Δηλαδή:

Για το SYS_1 προκύπτει $U_{SYS_1} = 0.86\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U_{SYS_1}) = 8.59\%$ και μέση θερμοκρασία $Tm_{SYS_1} = 23.4\,°C$

και για το SYS_2 $U_{SYS_2} = 0.94\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U_{SYS_2}) = 8.96\%$ και μέση θερμοκρασία $Tm_{SYS_2} = 23.1°C$.

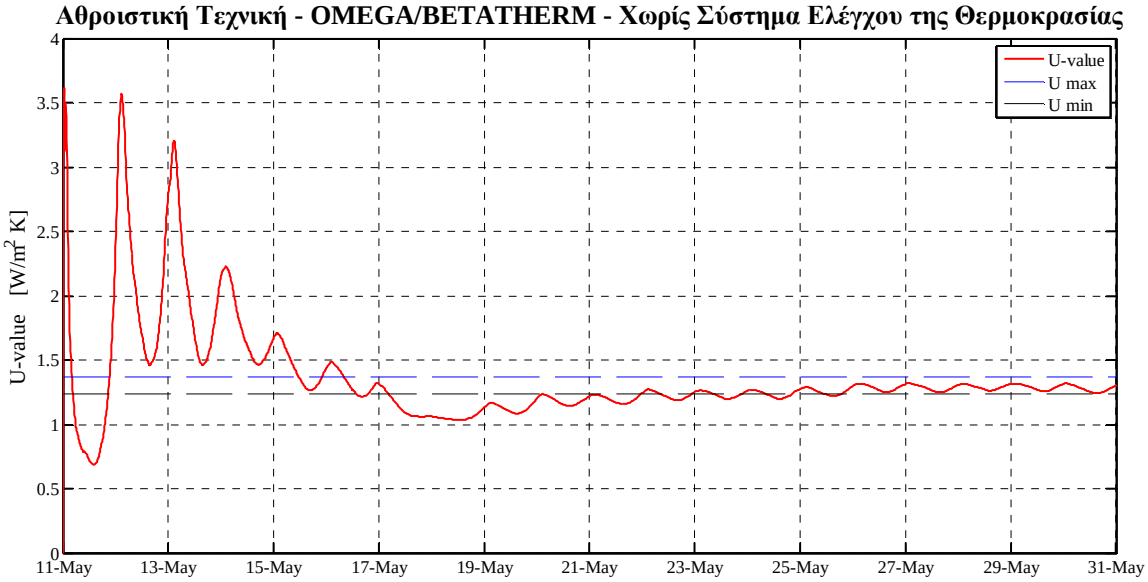
Εφόσον και στα δύο συστήματα ο συντελεστής μεταβολής είναι μικρότερος από 10%, τότε η εκτίμηση του συντελεστή U-value με τη μέση τιμή είναι **αποδεκτή**.

OMEGA/BETATHERM

- **Χωρίς τη χρήση Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Για το συγκεκριμένο set μετρήσεων είναι δυνατός μόνο ο επιμερισμός δύο χρονικών διαστημάτων στα οποία, ανεξάρτητα μεταξύ τους, υπάρχει σύγκλιση της μεθόδου. Συνεπώς σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1155-95, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου, αφού χρειάζονται τουλάχιστον τρία χρονικά διαστήματα **[16]**. Ακόμη και με μείωση του διαστήματος ελέγχου της σύγκλισης, δεν είναι δυνατός ο παραπάνω επιμερισμός. Ενδεικτικά οι δύο τιμές του συντελεστή διαπερατότητας από τα διαστήματα αυτά είναι: $U_1 = 1.13\ W/m^2K$ και $U_2 = 1.50\ W/m^2K$.

Το διάγραμμα του συντελεστή U-value που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου σε ολόκληρη τη χρονική περίοδο των μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.34



Σχήμα 5.34 - Εφαρμογή της εξίσωσης (4.23) σε όλο το διάστημα των μετρήσεων

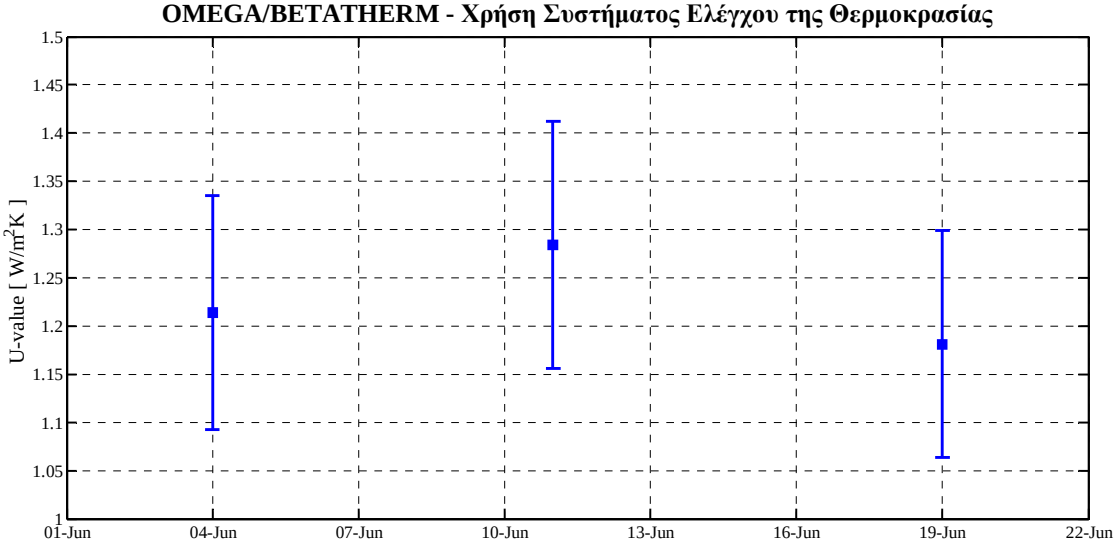
Η μορφή της καμπύλης έχει ομοιότητες με την αντίστοιχη καμπύλη για τη διάταξη TRSYS01 (Σχήμα 5.29) , όπου για την ίδια χρονική περίοδο επίσης δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου. Επίσης υπάρχει και στις δύο διατάξεις η χαρακτηριστική πτώση του σημείου σύγκλισης του συντελεστή μεταξύ 18 και 20 Μαΐου, όταν έπεσε απότομα η εξωτερική θερμοκρασία.

- **Χρήση Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Για το συγκεκριμένο set μετρήσεων είναι δυνατός ο επιμερισμός της χρονικής περιόδους σε τρία (N=3) διαστήματα, τα οποία ανεξάρτητα μεταξύ τους η τιμή του συντελεστή διαπερατότητας συγκλίνει.

Πίνακας 5.11 - Αποτελέσματα σε κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**		
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10%]*	*Μέση θερμοκρασία T_m [°C]*
01/06/2012 0:00	06/06/2012 0:00	1.21	0.12	22.7
06/06/2012 0:00	16/06/2012 0:00	1.28	0.13	22.8
16/06/2012 0:00	26/06/2012 0:00	1.18	0.12	25.8



Σχήμα 5.35 - Διασπορά των αποτελεσμάτων των επί μέρους διαστημάτων

Η εκτιμώμενη τιμή για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, σύμφωνα με το πρότυπο, για αυτό το set μετρήσεων είναι η μέση τιμή αυτών. Δηλαδή:

Προκύπτει $U = 1.23\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U) = 4.28\%$ και μέση θερμοκρασία $Tm = 23.8\ °C$

Εφόσον, ο συντελεστής μεταβολής είναι μικρότερος από 10%, τότε η εκτίμηση του συντελεστή U-value με τη μέση τιμή είναι **αποδεκτή**.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ κατά ASTM C 1155-95 (2007)

Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Square) χρησιμοποιεί την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης για τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή, με σκοπό τον προσδιορισμό των θερμικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας. Πιο συγκεκριμένα, αναζητείται η θερμική αγωγιμότητα k και η θερμοχωρητικότητα $\rho \cdot C_p$ της τοιχοποιίας που μελετάται, πάχους L=305.9mm. Στη συνέχεια από τη θερμική αγωγιμότητα k και το πάχος L υπολογίζεται η θερμική αντίσταση και ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας.

Σύμφωνα με το θεωρητικό υπολογισμό της θερμικής διαπερατότητας, η ισοδύναμη θεωρητική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας είναι ίση με $k = U \cdot L \approx 0.183\, W/mK$ Το διάστημα για το οποίο εκτιμήθηκε ότι κυμαίνεται η θερμική αγωγιμότητα του τοίχου είναι [0.1,0.5] και από το διάστημα αυτό λαμβάνονται Nk=201 ισαπέχουσες τιμές. Η εκτίμηση αυτού του διαστήματος έγινε αναζητώντας αρχικά την θερμική αγωγιμότητα σε μεγαλύτερο διάστημα.

Αντίστοιχα το διάστημα για το οποίο κυμαίνεται η πυκνότητα θα είναι [50,250] για τη μετρητική διάταξη TRSYS01 και [250,450] για την OMEGA/BETATHERM λαμβάνοντας Nρ=21 ισαπέχουσες τιμές. Ενώ για η θερμοχωρητικότητα εκτιμάται να κυμαίνεται στο διάστημα [1000,1400] για την TRSYS01 και [1200,1600] για την OMEGA/BETATHERM λαμβάνοντας Nc =41 ισαπέχουσες τιμές. Ο διαχωρισμός αυτός στα διαστήματα της πυκνότητας και της θερμοχωρητικότητας ανάλογα με τη μετρητική διάταξη γίνεται εξαιτίας της διαφοράς της θερμοροής που μετριέται μεταξύ των αισθητήρων της HUKSEFLUX και της OMEGA. Σε κάθε περίπτωση η πυκνότητα των διαστημάτων παραμένει η ίδια.

Είναι προφανές ότι το μέγεθος το οποίο είναι το πιο κρίσιμο για τον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης είναι η θερμική αγωγιμότητα k, γι αυτό και η το πλήθος των διαφορετικών τιμών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της πυκνότητας και της θερμοχωρητικότητας. Επίσης δεν προσδιορίζεται η ακριβής τιμή των μεγεθών ρ και C_p, αλλά το γινόμενό τους το οποίο ανά μονάδα επιφανείας είχε εκτιμηθεί ανωτέρω 45.4kJ/m^{2}K, δηλαδή περίπου 148kJ/m^{3}K.

Επίσης για την επίλυση της εξίσωσης, ο χώρος, ο οποίος είναι το πάχος της τοιχοποιίας, χωρίζεται σε NW=50 κόμβους, κάτι το οποίο βρέθηκε από την ανεξαρτησία του χωρικού πλέγματος (Παράρτημα Γ). Από την άλλη, το χρονικό βήμα είναι ίσο με dt=10min, διάστημα το οποίο καθορίστηκε από την ανεξαρτησία του χρονικού πλέγματος (Παράρτημα Γ).

Σε κάθε περίπτωση η διάρκεια συλλογής των δεδομένων είναι πολύ μεγάλη ώστε το πειραματικό σφάλμα για την εκτίμηση της θερμικής διαπερατότητας σε αυτή τη μέθοδο είναι 6%, σε κάθε set μετρήσεων με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Τέλος για την εκτίμηση της ποιότητας της προσαρμογής των θεωρητικών και πειραματικών καμπυλών θερμοκρασίας και ροής θερμότητας χρησιμοποιείται ένα

ανηγμένο σφάλμα. Στην περίπτωση της προσαρμογής των καμπυλών της θερμοκρασίας, θα είναι ίσο με το πηλίκο του αθροίσματος των σχετικών σφαλμάτων κάθε θεωρητικής τιμής της εσωτερικής θερμοκρασίας προς το πλήθος των μετρήσεων.

$$\sigma_{Tin} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{Tin_{pred\,i} - Tin_{meas\,i}}{Tin_{meas\,i}} \right|}{N} \cdot 100\% \qquad (5.9)$$

Ενώ στην περίπτωση της προσαρμογής των καμπυλών της ροής θερμότητας θα είναι ίσο με το πηλίκο του αθροίσματος των σχετικών σφαλμάτων κάθε θεωρητικής τιμής της ροής θερμότητας προς το πλήθος των μετρήσεων.

$$\sigma_{Tin} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{HF_{pred\,i} - HF_{meas\,i}}{HF_{meas\,i}} \right|}{N} \cdot 100\% \qquad (5.10)$$

Σε πολλές περιπτώσεις στις οποίες υπάρχουν μετρήσεις ροής θερμότητας όπου παίρνουν την τιμή μηδέν, το ανηγμένο αυτό σφάλμα δεν ορίζεται, αλλά ένα μέγεθος εκτίμησης της ποιότητας των καμπυλών για την προσαρμογή τους θα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{HF} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(HF_{pred\,i} - HF_{meas\,i} \right)^2}}{N} \qquad (5.11)$$

Στις περιπτώσεις αυτές θα αναφέρεται ότι η εκτίμηση της ποιότητας προσαρμογής των καμπυλών έγινε χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση. Τα δύο αυτά ανηγμένα σφάλματα είναι δύο μεγέθη με τα οποία μπορεί να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα του αποτελέσματος καθώς επίσης είναι και ένα μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ τους.

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης και η εύρεση των βέλτιστων τιμών k και $\rho \cdot C_p$ για τις οποίες προκύπτει η βέλτιστη προσαρμογή της εσωτερικής θερμοκρασίας, έχοντας ως οριακές συνθήκες τη μετρούμενη εξωτερική θερμοκρασία και τη ροή θερμότητας, έγινε σε κώδικα στο MATLAB, ο οποίος περιγράφεται και αναλύεται στο Παράρτημα Γ. Τα αποτελέσματα δεν αλλάζουν αισθητά αν επιλεγεί η προσαρμογή της θερμοροής και χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες ως οριακές συνθήκες. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση.

TRSYS01

- **Χρήση HFP01 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

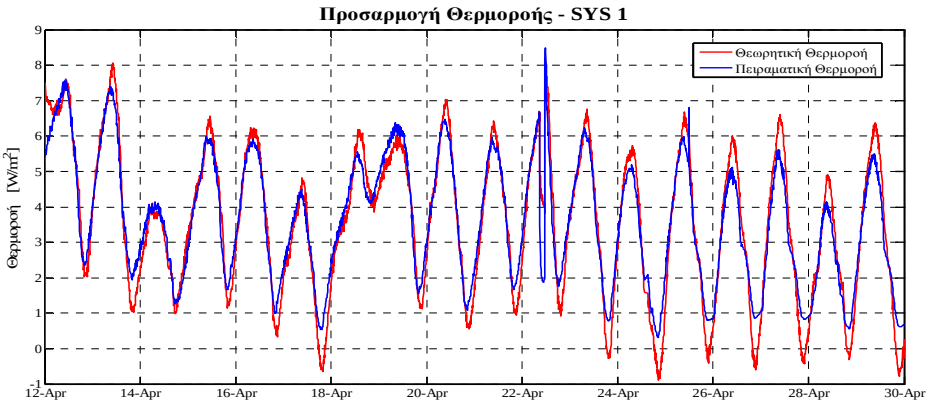
Εφαρμόζοντας τα παραπάνω για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, λήφθηκαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων για Χρήση HFP01 & ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**				**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} [%]	σ_{HF} [%]
12/04/2012 00:00	30/04/2012 00:00	**SYS_1**	**0.69**	**± 0.04**	215.9	0.46	21.58
		SYS_2	**0.74**	**± 0.04**	222.4	0.45	21.50

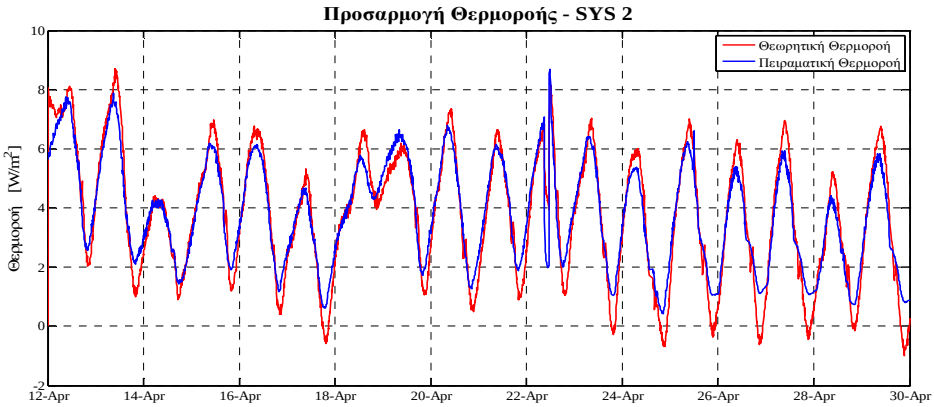
Στα σχήματα 5.36 έως 5.39 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των καμπυλών της προβλεπόμενης και πειραματικής εσωτερικής θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας, για το SYS_1 και για το SYS_2.

Σχήμα 5.36 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας για χρήση HFP01& ΣΕΘ, SYS_1



Σχήμα 5.37 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP01& ΣΕΘ, SYS_1

Σχήμα 5.38 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας για χρήση HFP01& ΣΕΘ, SYS_2



Σχήμα 5.39 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP01& ΣΕΘ, SYS_2

Και στα δύο συστήματα, παρατηρείται μια αρκετά καλή προσαρμογή στις καμπύλες της εσωτερικής θερμοκρασίας σε σχέση με τις αντίστοιχες της ροής θερμότητας, κάτι για το οποίο φαίνεται τόσο οπτικά, όσο και από τη διαφορά στην τάξη μεγέθους των ανηγμένων σφαλμάτων σ_{Tin} και σ_{HF}. Οι διαφορές των καπυλών στα δύο συστήματα δεν γίνονται οπτικά αντιληπτές και τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνονται όμοια. Σημειώνεται ότι η διαταραχή τόσο της θερμοροής όσο και της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά το μεσημέρι της 22ης Απριλίου γίνεται αντιληπτή από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης καθώς ακολουθείται και από τις θεωρητικές τιμές.

- **Χρήση HFP03 χωρίς Σύστημα Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

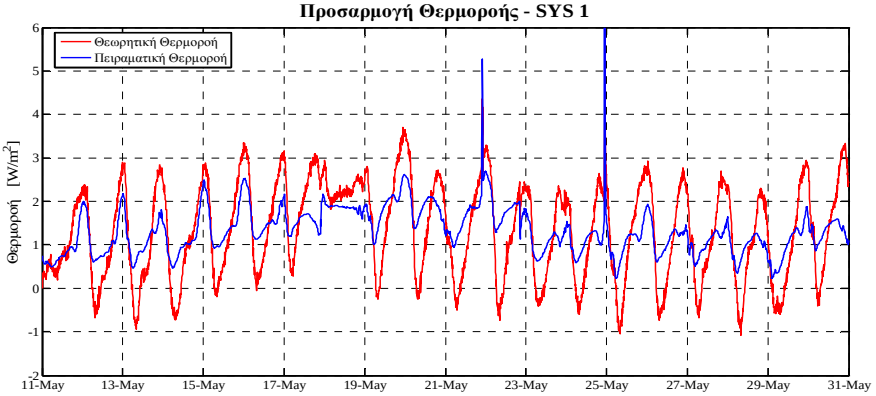
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για όλες τις μετρήσεις που καταγράφηκαν για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, βρέθηκαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων για Χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**				**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} [%]	σ_{HF} [%]
11/05/2012 15:00	31/05/2012 15:00	**SYS_1**	**0.57**	**± 0.03**	234.6	0.24	58.74
		SYS_2	**0.63**	**± 0.04**	254.4	0.24	63.83

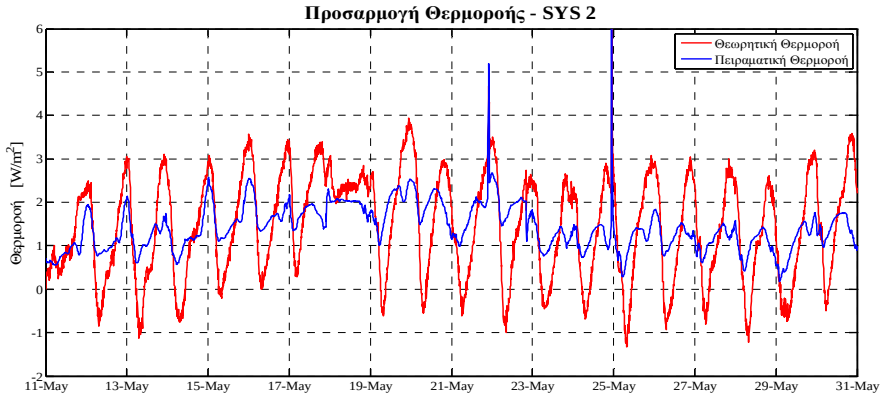
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, έγινε επίλυση της μεθόδου και ανεύρεση των βέλτιστων θερμικών ιδιοτήτων τόσο με στόχο τη βέλτιστη προσαρμογή της ροής θερμότητας όσο και της θερμοκρασίας, όπως στο προηγούμενο set. Τα αποτελέσματα ήταν ίδια και η προσαρμογή των καμπυλών δεν άλλαξε αισθητά. Στα Σχήματα 5.40 έως 5.43 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προσαρμογής των καμπυλών της προβλεπόμενης και πειραματικής εσωτερικής θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας για το SYS_1 και για το SYS_2.

Σχήμα 5.40 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας για χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ, SYS_1



Σχήμα 5.41 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ, SYS_1

Σχήμα 5.42 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας για χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ, SYS_2



Σχήμα 5.43 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ, SYS_2

Και για τα δύο συστήματα παρατηρείται αρκετά καλή προσαρμογή των καμπυλών για την εσωτερική θερμοκρασία, αντίθετα στην περίπτωση της ροής θερμότητας η εκτίμηση των θεωρητικών τιμών της θερμοροής είναι εσφαλμένη, κάτι το οποίο είναι εμφανές τόσο από το διάγραμμα, όσο και από το ανηγμένο σφάλμα σ_{HF}. Το πρόβλημα αυτό πιθανόν να οφείλεται στην μη χρήση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας και στη μεγάλη αλλαγή της εσωτερικής θερμοκρασίας. Για τα συγκεκριμένα αποτελέσματα υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα εξαιτίας της εσφαλμένης προσαρμογής της ροής θερμότητας.

- **Χρήση HFP03 και Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων βρέθηκαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.14.

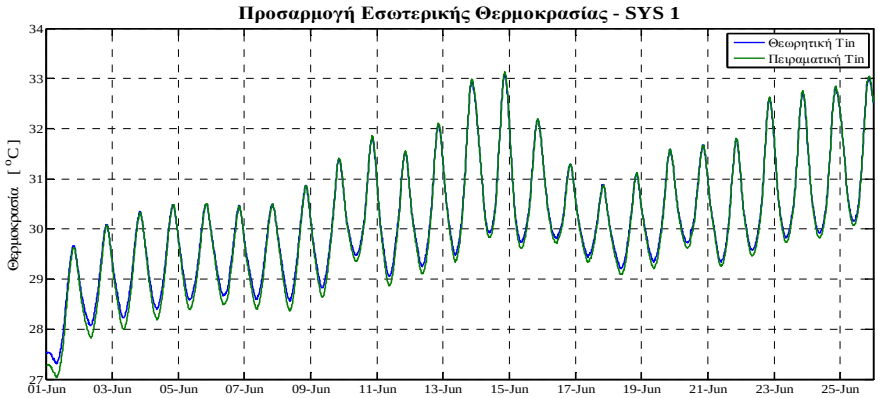
Πίνακας 5.14-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων για Χρήση HFP03 & ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**				**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} [%]	σ_{HF} $[W/m^2K]$
01/06/2012 00:00	26/06/2012 00:00	**SYS_1**	**0.82**	**± 0.05**	276.0	0.26	0.0168
		SYS_2	**0.89**	**± 0.05**	294.0	0.99	0.0218

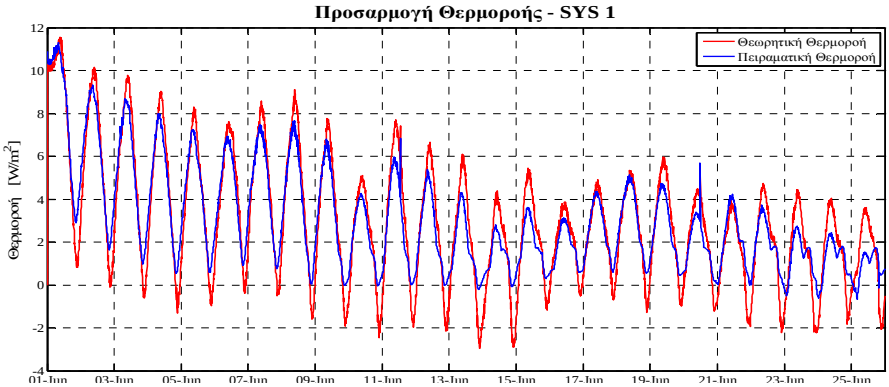
Η εκτίμηση για την προσαρμογή της ροής θερμότητας είναι υπολογισμένα με βάση την εξίσωση (5.11), δηλαδή $\sigma_{HF} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(HF_{pred\,i} - HF_{meas\,i}\right)^2}}{N}$

επειδή δεν είναι δυνατή η χρήση της εξίσωσης (5.10), λόγω του γεγονότος ότι σε αυτή το set μετρήσεων, υπάρχουν πειραματικές τιμές ροής θερμότητας ίσης με το μηδέν. Έτσι δεν είναι εφικτή η σύγκριση του αριθμού σ_{HF} αυτής της περίπτωσης με τους αντίστοιχους στις προηγούμενες, καθώς πρόκυπτε για διαφορετικές εκτιμήσεις, κάτι το οποίο είναι εμφανές και από τη διαφορά στην τάξη μεγέθους των αριθμών.

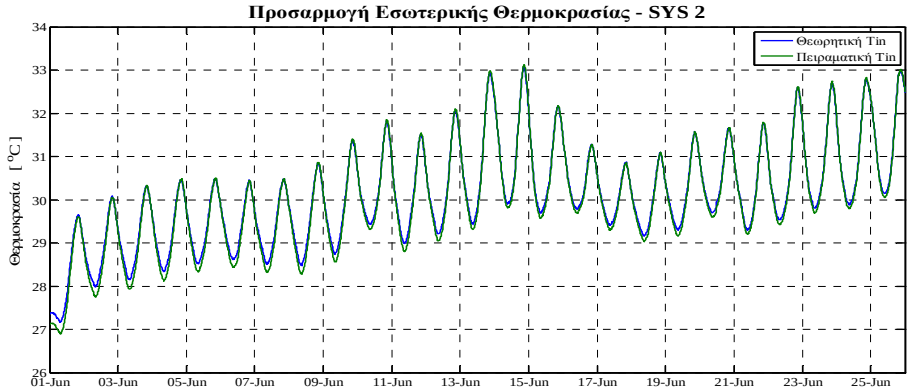
Στα Σχήματα 5.44 έως 5.47 παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα προσαρμογής των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής για τα δύο συστήματα.



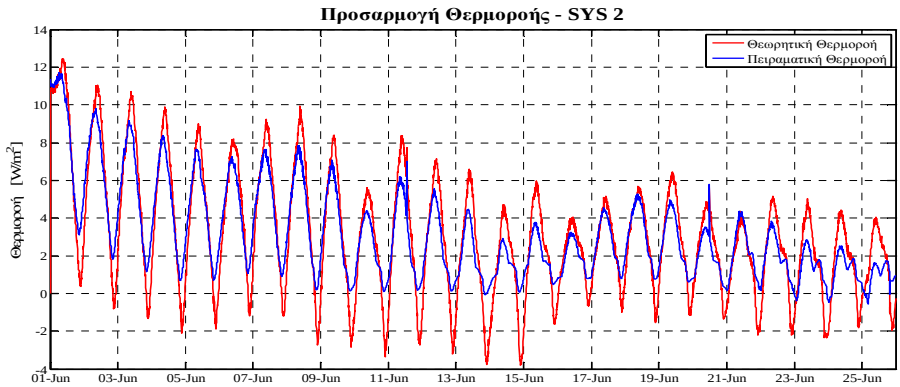
Σχήμα 5.44 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας για χρήση HFP03 & ΣΕΘ, SYS_1



Σχήμα 5.45 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP03 & ΣΕΘ, SYS_1



Σχήμα 5.46 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας για χρήση HFP03 & ΣΕΘ, SYS_2



Σχήμα 5.47 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP03 & ΣΕΘ, SYS_2

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μια αρκετά καλή προσαρμογή των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και για τα δύο συστήματα. Από την άλλη, η προσαρμογή της ροής θερμότητας είναι μεν πολύ καλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση που δεν γινόταν χρήση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας, αλλά όπως και στην περίπτωση που πάλι υπήρχε έλεγχος της θερμοκρασίας, η μέθοδος προβλέπει μεγαλύτερα μέγιστα και μικρότερα ελάχιστα από τα αντίστοιχα πειραματικά. Σε αυτή την περίπτωση όμως η διαφορά αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

OMEGA/BETATHERM

- **Χωρίς τη χρήση Συστήματος Ελέγχου της εσωτερικής Θερμοκρασίας**

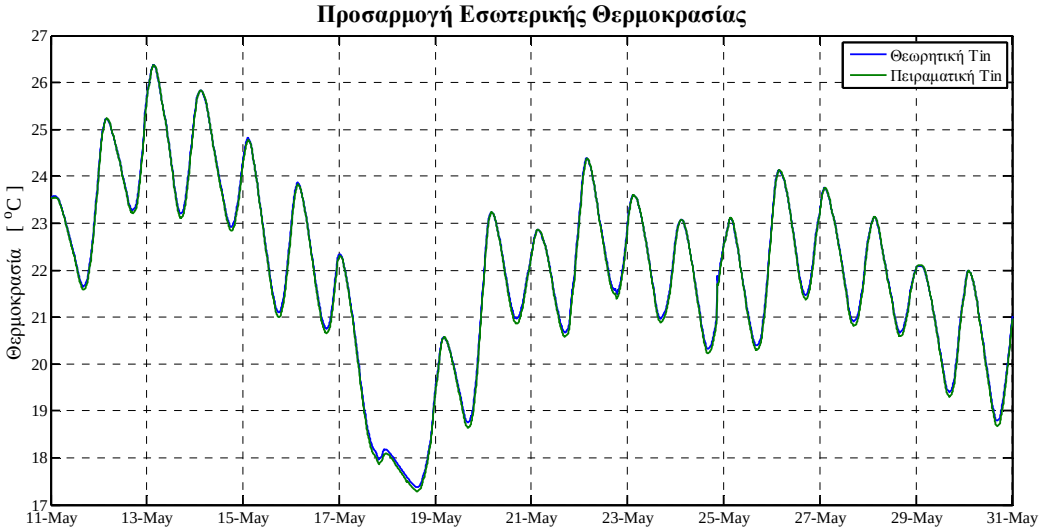
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, βρέθηκαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.15.

Πίνακας 5.15-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων χωρίς τη Χρήση ΣΕΘ

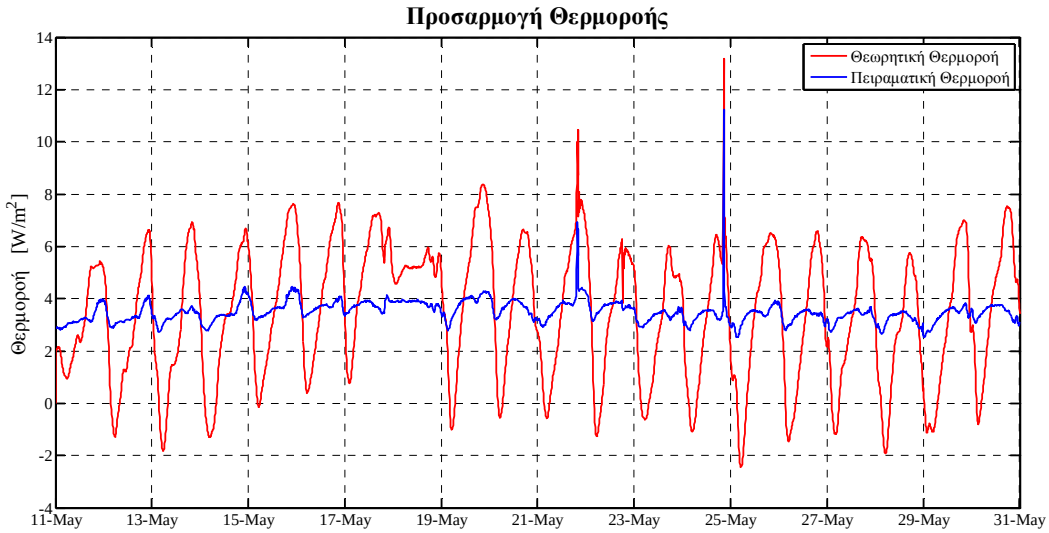
Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} *[%]*	σ_{HF} *[%]*
11/05/2012 17:00	31/05/2012 17:00	**1.31**	**± 0.08**	530.4	0.27	58.60

Η εκτίμηση της ποιότητας της προσαρμογής των καμπυλών έγινε κάνοντας χρήση των εξισώσεων (5.9) και (5.10), όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση της διάταξης TRSYS01 (Πίνακας 5.12). Έτσι μπορεί να γίνει η σύγκριση των ανηγμένων σφαλμάτων, όπου πράγματι τα σφάλματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

Στα Σχήματα 5.48 και 5.49 παρουσιάζονται οι καμπύλες προσαρμογής της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής που προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων:



Σχήμα 5.48- Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας χωρίς τη χρήση ΣΕΘ



Σχήμα 5.49 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής χωρίς τη χρήση ΣΕΘ

Από τα διαγράμματα παρατηρείται μια καλή προσαρμογή της καμπύλης της εσωτερικής θερμοκρασίας, αλλά η προσαρμογή της θερμοροής είναι εσφαλμένη. Το πρόβλημα αυτό προέκυψε και στην αντίστοιχη περίπτωση της διάταξης TRSYS01, γι' αυτό πιθανόν να οφείλεται στις συνθήκες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας. Στη περίπτωση της OMEGA/BETATHERM υπάρχει μεγάλη διαφορα και στις εκτιμήσεις για το U-value και τη θερμοχωρητικότητα, που εκτιμήθηκε σχεδόν διπλάσια από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις της διάταξης TRSYS01. Αυτό οφείλεται στις λανθασμένες μετρήσεις ροής θερμότητας από τους αισθητήρες HFS-4 της OMEGA.

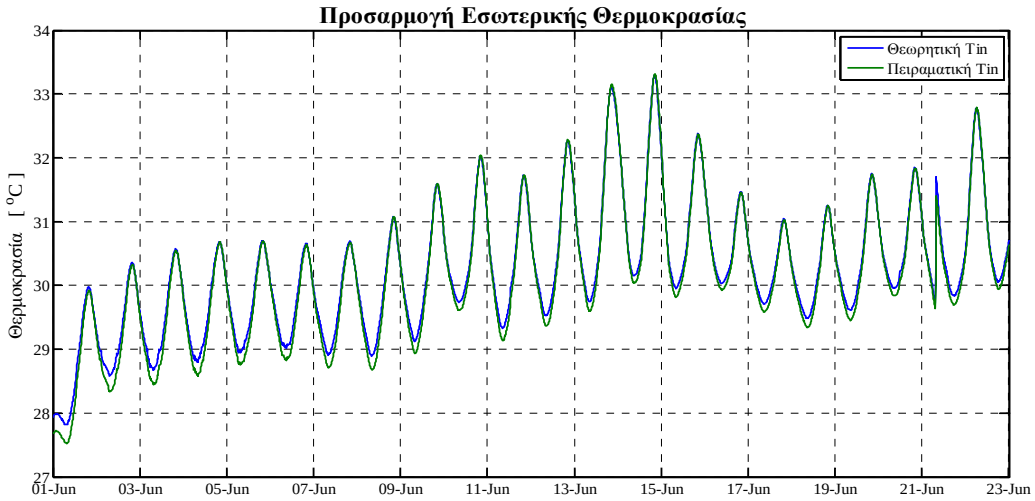
- **Χρήση Συστήματος Ελέγχου της Εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, εξάγονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.16.

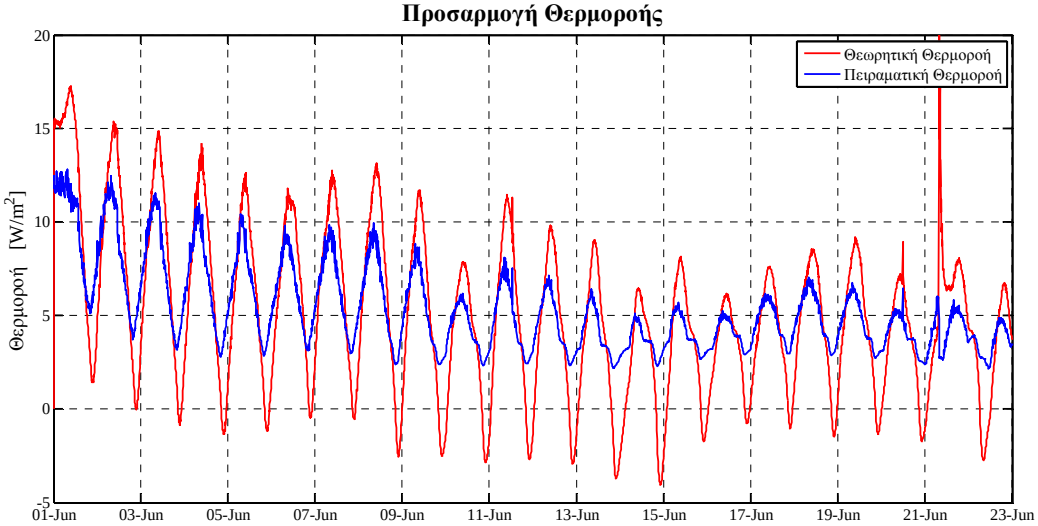
Πίνακας 5.16-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων με τη Χρήση ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} [%]	σ_{HF} [%]
01/06/2012 00:00	23/06/2012 00:00	**1.15**	**± 0.07**	427.0	0. 32	50.81

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.50 και 5.51 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής, όπως προέκυψαν από την ανάλυση της μεθόδου.



Σχήμα 5.50- Προσαρμογή καμπύλης θερμοκρασίας με τη χρήση ΣΕΘ



Σχήμα 5.51 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής με τη χρήση ΣΕΘ

Στο διάγραμμα της εσωτερικής θερμοκρασίας παρατηρείται μια καλή προσαρμογή, παρουσιάζοντας και πάλι το πρόβλημα το οποίο είχε διαπιστωθεί και στα αντίστοιχα διαγράμματα της διάταξης TRSYS01, δηλαδή την μη καλή προσέγγιση των ελαχίστων τιμών της θερμοκρασίας. Το διάγραμμα της θερμοροής έχει καλύτερη προσαρμογή από την περίπτωση μη χρήσης του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας, χωρίς όμως η προσαρμογή να είναι καλή, καθώς η ανάλυση προβλέπει υψηλότερες μέγιστες τιμές και χαμηλότερες ελάχιστες σε σχέση με τις μετρήσεις.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ κατά ISO 9869:1994

Η διαδικασία εκτίμησης της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας με τη δυναμική μέθοδο, περιγράφεται στην ενότητα 4.3.4. Η δυναμική μέθοδο στηρίζεται στον προσδιορισμό της ροής θερμότητας κάθε χρονικής στιγμής συναρτήσει των θερμοκρασιών των επιφανειών της τοιχοποιίας, εκείνης της χρονικής στιγμής και p χρονικών στιγμών νωρίτερα. Ο αριθμός p των εξισώσεων αυτών, εξαρτάται από την κατασκευή της τοιχοποιίας και το χρόνο υστέρησής της. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9869 η χρονική σταθερά τ που προκύπτει θα πρέπει να είναι μικρότερη από το γινόμενο p·Δt, όπου Δt το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων **[14]**. Σε αυτή την περίπτωση επεξεργάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων ανά μία ώρα, οπότε Δt=3600sec, καθώς όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Δ δίνει καλύτερα αοπτελέσματα. Μια εκτίμηση της θερμικής χρονικής σταθεράς γίνεται από τη σχέση του προτύπου ASTM C 1046 **[15]**:

$$\tau = \frac{a_k}{\pi^2}\left(\sum_{n=1}^{N} g_n \cdot d_n\right) \qquad (5.12)$$

όπου $a_n = \frac{C_n \rho_n}{k_n}$ ο συντελεστής διάχυσης για κάθε στρώμα n της τοιχοποιίας και $g_n = \sqrt{\frac{a_n}{a_k}}$. Με το δείκτη k αναφέρεται σε ένα αυθαίρετο στρώμα επιλεγμένο από κανονικοποίηση.

Από τα παραπάνω η χρονική σταθερά για την τοιχοποιία στον πειραματικό οικίσκο εκτιμάται περίπου στα 12000sec (3.3hr), κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα (Σχήματα 5.13 έως 5.18) που παρουσιάζεται η διαφορά φάσης της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας.

Έτσι εκλέγεται ο αριθμός p ίσος με $p = \frac{1.8\tau}{\Delta t} = 6$, πλήθος το οποίο προτείνεται και από τη βιβλιογραφία για μεσαίου τύπου τοιχοποιίες, όπως αυτή του πειραματικού οικίσκου. **[23]**.

Στη συνέχεια η χρονική σταθερά τ_1 θα κυμαίνεται στο διάστημα $\frac{\Delta t}{10} \langle \tau_1 \langle p\frac{\Delta t}{2}$ κ δηλαδή $360 < \tau_1 < 10800$ αι ο λόγος r μεταξύ 3 και 10, όπως ορίζεται από το πρότυπο **[14]**. Τα παραπάνω διαστήματα χωρίζονται σε Nr=2088 και Nτ=71 κόμβους αντίστοιχα, για την εκτίμηση του βέλτιστου συνδυασμού τ_1 και r.

Για κάθε ζεύγος τ_1 και r δημιουργούνται οι πίνακες της εξίσωσης (4.35), όπου επιλύεται και βρίσκεται μια εκτίμηση των ροών θερμότητας και στη συνέχεια, οι εκτιμώμενες αυτές τιμές συγκρίνονται με τις πειραματικές μέσω του αθροίσματος της διαφοράς των τετραγώνων τους. Το μικρότερο άθροισμα s^2 αντιστοιχεί στη λύση, όπου

το πρώτο στοιχείο του πίνακα Z, είναι η εκτίμηση της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας.

Όπως και στην περίπτωση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, έτσι και στην περίπτωση της δυναμικής μεθόδου, χρησιμοποιείται το σφάλμα σ_{HF} το οποίο εκφράζει την προσαρμογή των εκτιμώμενων τιμών της ροής θερμότητας από τη δυναμική μέθοδο με τις πειραματικές τιμές. Για την αποφυγή των δυσκολιών που υπήρχαν στις περιπτώσεις των μετρήσεων με μηδενική τιμή ροή θερμότητας, το σφάλμα αυτό ορίζεται ως το πηλίκο της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς των πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών προς το πλήθος των εξισώσεων M, χωρίς όμως να μπορεί να γίνει σύγκριση των σφαλμάτων των διαφόρων περιπτώσεων. Έτσι,

$$\sigma_{HF} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{M} \left(q_i - q_{est\,i}\right)^2}}{M} \qquad (5.13)$$

Η μέθοδος επιλύθηκε σύμφωνα με τα παραπάνω και τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 4.3.4 σε κώδικά στο MATLAB. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση για την τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου. Επίσης για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση αυτών με άλλες μεθόδους παρατίθενται και τα διαγράμματα προσαρμογής των καμπυλών ροής θερμότητας.

TRSYS01

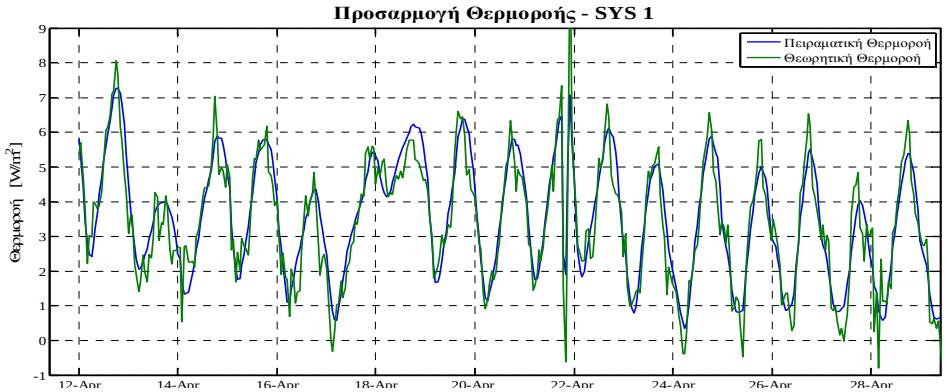
- **Χρήση HFP01 και Συστήματος Ελέγχου της Εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τα όσα περιγράφηκαν ανωτέρω, εφαρμόζεται η δυναμική μέθοδος στο συγκεκριμένο set μετρήσεων, εξάγοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.17.

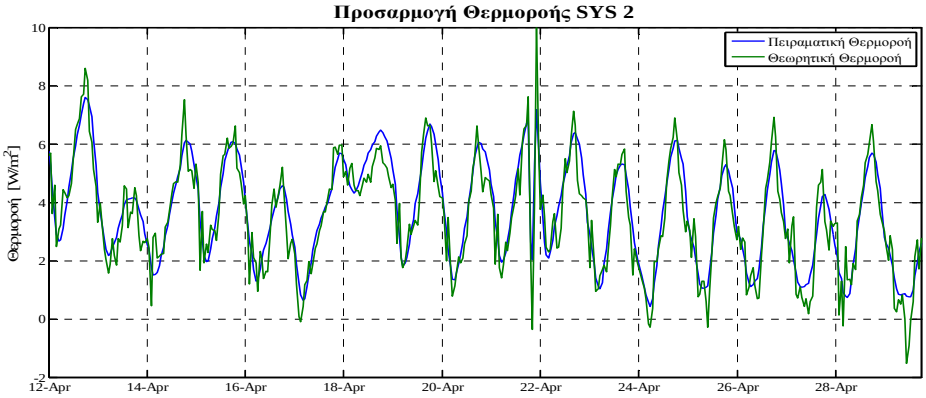
Πίνακας 5.17-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου για Χρήση HFP01 και ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**					**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	r	σ_{HF} $[W/m^2]$
12/04/2012 08:00	30/04/2012 08:00	**SYS_1**	**0.67**	**± 0.07**	1134.0	5.4	0.0331
		SYS_2	**0.72**	**± 0.07**	9781.6	3.3	0.0347

Στα Σχήματα 5.52 και 5.53 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των καμπυλών των εκτιμώμενων τιμών της ροής θερμότητας με τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών τιμών για τα SYS_1 και SYS_2.



Σχήμα 5.52 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP01 & ΣΕΘ, SYS_1



Σχήμα 5.53 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP01 & ΣΕΘ, SYS_2

Παρατηρείται ότι γενικά η εκτιμώμενη καμπύλη ακολουθεί την πειραματική και οι προσαρμογές είναι καλές, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό όσο στα αντίστοιχα διαγράμματα στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αξίζει να σημειωθεί ότι και εδώ η διαταραχή της ροής θερμότητας το μεσημέρι της 22ης Απριλίου γίνεται αντιληπτή και ακολουθείται από τις εκτιμώμενες τιμές.

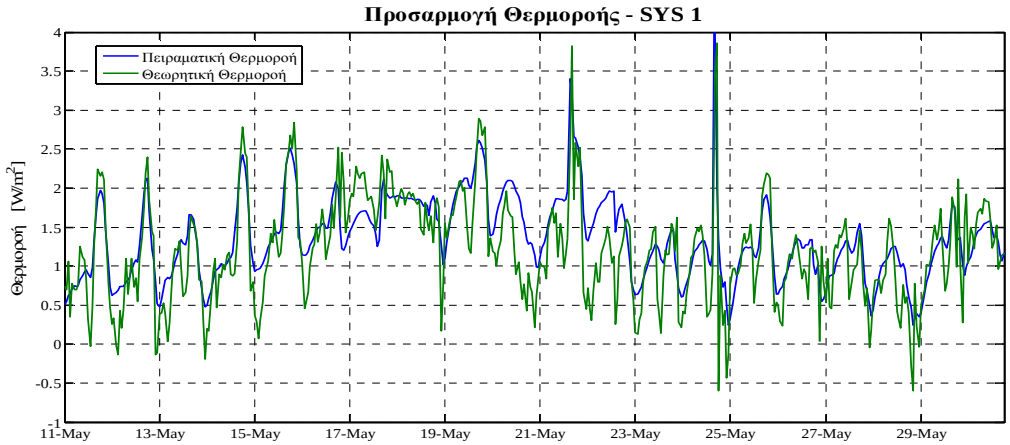
- **Χρήση HFP03 χωρίς Σύστημα Ελέγχου της Εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Χρησιμοποιώντας της δυναμική μέθοδο για αυτό το set μετρήσεων προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.18.

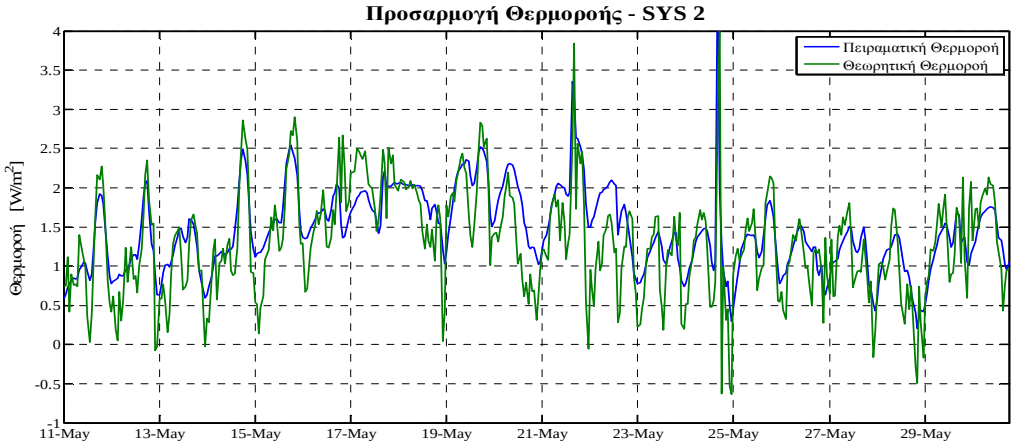
Πίνακας 5.18-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου για Χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**					**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	*r*	σ_{HF} *[W/m²]*
01/06/2012 00:30	26/06/2012 00:30	**SYS_1**	**0.51**	**± 0.05**	1360.5	8.6	0.0198
		SYS_2	**0.57**	**± 0.06**	6738.1	7.8	0.0203

Στα Σχήματα 5.54 και 5.55 παρουσιάζονται οι καμπύλες προσαρμογής της ροής θερμότητας για τα SYS_1 και SYS_2, όπως προέκυψαν από την ανάλυση της μεθόδου.



Σχήμα 5.54 - Προσαρμογή καμπύλης θερμορροής για χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ, SYS_1



Σχήμα 5.55 - Προσαρμογή καμπύλης θερμορροής για χρήση HFP03 χωρίς ΣΕΘ, SYS_2

Σε αυτό το set μετρήσεων η προσαρμογή της καμπύλης της ροής θερμότητας δεν είναι καλή, όμως είναι καλύτερη από αυτή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Αυτό οφείλεται στις σχετικά μικρές διακυμάνσεις της ροής θερμότητας, κάτι το οποίο είναι προϋπόθεση για τη σωστή χρήση της μεθόδου. Παρόλα αυτά, σε πολλά σημεία η εκτιμώμενη καμπύλη φαίνεται να ακολουθεί την πειραματική, ακόμα και σε κάποιες διαταραχές, όπως αυτή στις 25 Μαΐου.

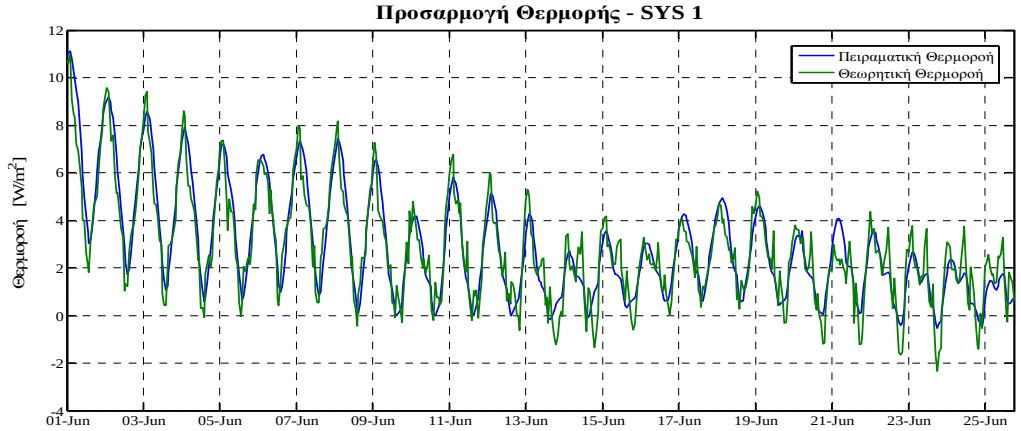
- **Χρήση HFP03 και Συστήματος Ελέγχου της Εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τη δυναμική μέθοδο για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, βρέθηκαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.19

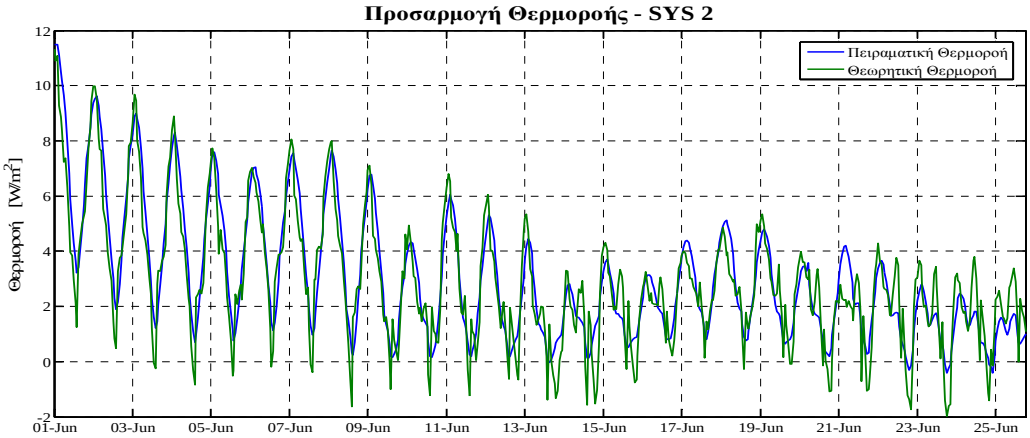
Πίνακας 5.19-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου για Χρήση HFP03 και ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**					**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*Σύστημα*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	r	σ_{HF} $[W/m^2]$
01/06/2012 00:00	26/06/2012 00:00	**SYS_1**	**0.79**	**± 0.08**	5337.4	8.9	0.0344
		SYS_2	**0.85**	**± 0.08**	2701.1	5.7	0.0389

Στα Σχήματα 5.56 και 5.57 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προσαρμογής της ροής θερμότητας για τα δύο συστήματα SYS_1 και SYS_2.



Σχήμα 5.56 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP03 και ΣΕΘ, SYS_1



Σχήμα 5.57 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής για χρήση HFP03 και ΣΕΘ, SYS_2

Παρατηρείται μια αρκετά καλή προσαρμογή των καμπυλών κυρίως στο πρώτο δεκαήμερο των μετρήσεων όπου οι διακυμάνσεις είναι αρκετά μεγάλες. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η δυναμική ανάλυση απαιτεί μεγάλες διακυμάνσεις σε όλα τα μετρούμενα μεγέθη. Στη συνέχεια, όπου οι διακυμάνσεις μειώνονται, η προσαρμογή δεν είναι τόσο καλή.

OMEGA/BETATHERM

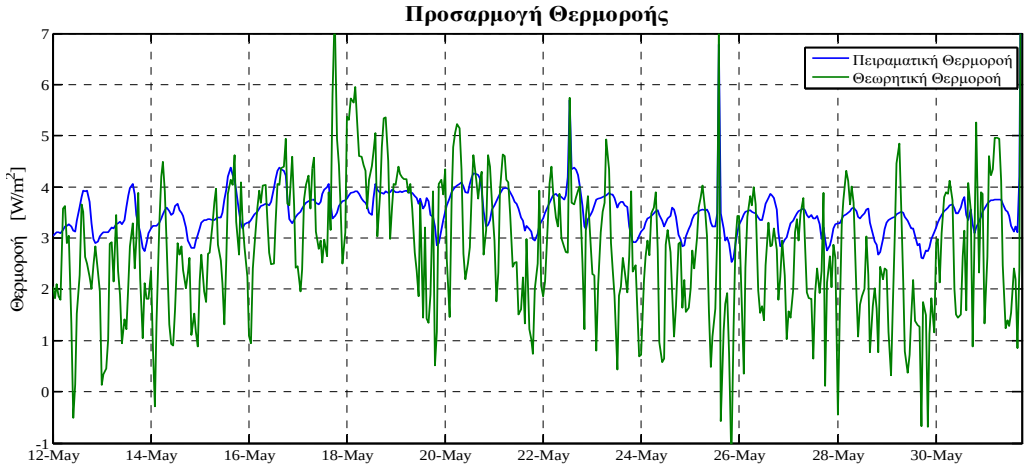
- **Χωρίς τη χρήση Συστήματος Ελέγχου της Εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Εφαρμόζοντας τη δυναμική μέθοδο για τις συγκεκριμένες μετρήσεις, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.20.

Πίνακας 5.20-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου χωρίς τη χρήση ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτιμήσεις**				**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	*r*	σ_{HF} *[W/m²]*
11/05/2012 18:00	31/05/2012 18:00	**1.05**	**± 0.11**	8600.3	9.4	0.0660

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.58 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θερμοροής για τη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως προέκυψε από την ανάλυση της δυναμικής μεθόδου.



Σχήμα 5.58 - Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής χωρίς τη χρήση ΣΕΘ

Η προσαρμογή της θεωρητική καμπύλης ροής θερμότητας στην πειραματική δεν είναι αποδεκτή. Η θεωρητική καμπύλη παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και σε πολλά σημεία δεν ακολουθεί την πειραματική. Αυτό πιθανόν να οφείλεται τόσο στις εσφαλμένες μετρήσεις ροής θερμότητας από τους αισθητήρες HFS-4, όσο και από την έλλειψη του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι οι προσαρμογές στις περιπτώσεις όπου δεν ελέγχεται η θερμοκρασία δεν είναι καλές, εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων της ροής θερμότητας όπου είναι αναγκαίες γι αυτή τη μέθοδο.

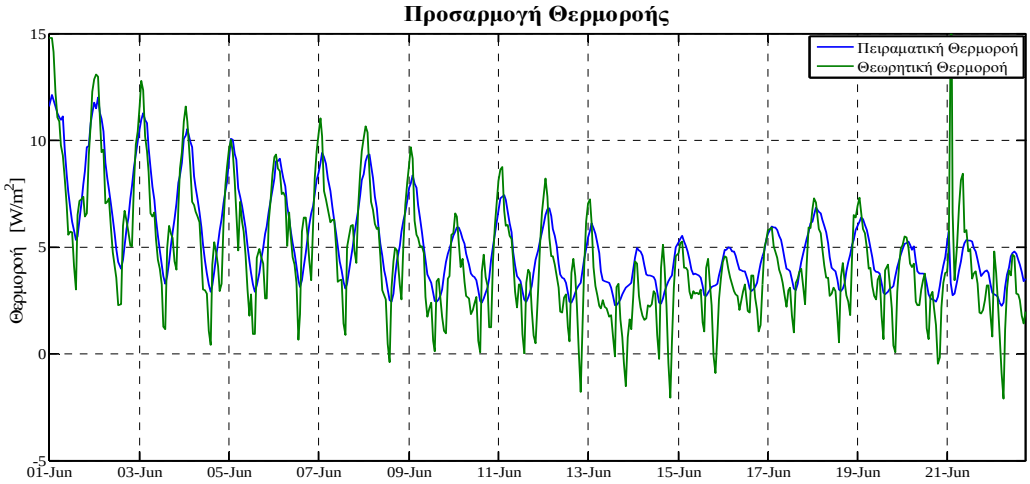
- **Χρήση Συστήματος Ελέγχου της Εσωτερικής Θερμοκρασίας**

Χρησιμοποιώντας την δυναμική μέθοδο, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, εξάγονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.21.

Πίνακας 5.21-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου με τη χρήση ΣΕΘ

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτιμήσεις**				**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	*r*	σ_{HF} $[W/m^2]$
01/06/2012 00:00	23/06/2012 00:00	**1.05**	**± 0.10**	1081.6	6.7	0.0791

Στο Σχήμα 5.59 παρουσιάζεται η προσαρμογή της ροής θερμότητας, σύμφωνα με τη δυναμική μέθοδο:



Σχήμα 5.59- Προσαρμογή καμπύλης θερμοροής με τη χρήση ΣΕΘ

Στα αποτελέσματα της δυναμικής μεθόδου για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, παρατηρείται βελτίωση της προσαρμογής των καμπυλών ροής θερμότητας, παρά τη χρήση εσφαλμένων μετρήσεων θερμοροής. Γίνεται σαφές ότι η σε κάθε περίπτωση χρήση του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας είναι ευνοϊκή για τη προσαρμογή των καμπυλών και άρα το αποτέλεσμα είναι πιο αξιόπιστο.

5.2.1.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

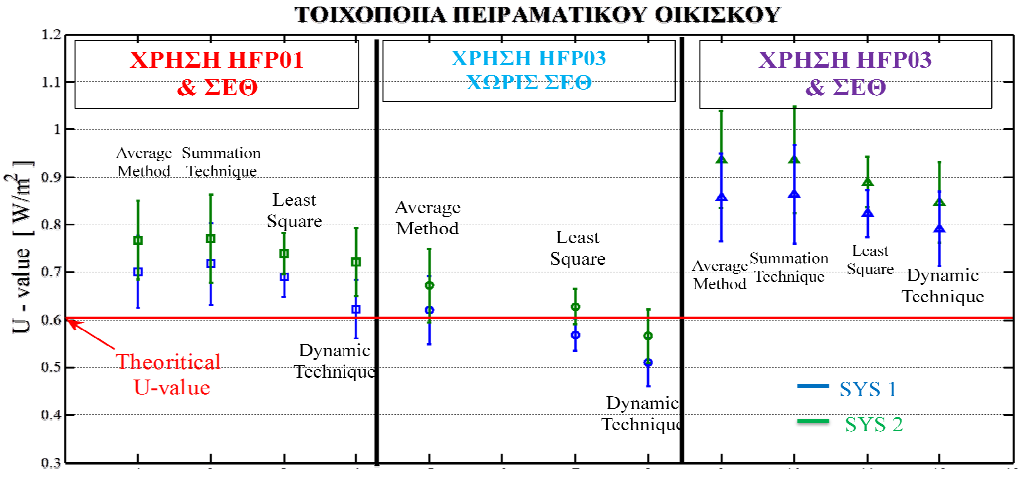
Για την τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου εγκαταστάθηκαν δύο μετρητικές διατάξεις, η TRSYS01 και η OMEGA/BETATHERM, όπου η πρώτη αποτελούταν από δύο συστήματα, το SYS_1 και το SYS_2, χρησιμοποιώντας δύο αισθητήρες ροής θερμότητας, ο HFP01 και ο HFP03. Επίσης οι μετρήσεις διεξάγονταν είτε κάνοντας χρήση συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας, είτε όχι. Οι μετρήσεις επεξεργάσθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό του συντελεστή της θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας, εφαρμόζοντας τέσσερις μεθόδους, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 9869 και ASTM C1155. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον συντελεστή U-value για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.22.

Πίνακας 5.22 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την τοιχοποιία του οικίσκου

ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ (MOCK UP)								
U-value (W/m^2K)	TRSYS01						OMEGA / BETATHERM	
	HFP01 & ΣΕΘ		HFP03 χωρίς ΣΕΘ		HFP03 & ΣΕΘ		ΣΕΘ	Χωρίς ΣΕΘ
	SYS_1	SYS_2	SYS_1	SYS_2	SYS_1	SYS_2		
Μέση θερμοκρασία [°C]	16.7	16.7	15.9	15.8	23.4	23.1	23.8	15.7
Average Method	0.70	0.77	0.62	0.67	0.86	0.94	1.17	1.40
Summation Technique	0.72	0.77	-	-	0.86	0.94	1.23	-
Least Square	0.69	0.74	0.57	0.63	0.82	0.89	1.15	1.31
Dynamic Method	0.62	0.72	0.51	0.57	0.79	0.85	1.05	1.05

Όπως παρατηρείται στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, οι συντελεστές θερμικής διαπερατότητας για την τοιχοποιία από τη μετρητική διάταξη OMEGA/BETATHERM, είναι απαράδεκτα μεγαλύτεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους συντελεστές της διάταξης TRSYS01. Αυτό οφείλεται στις λανθασμένες μετρήσεις του αισθητήρα HFS-4, της OMEGA, κάτι το οποίο παρουσιάστηκε και στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.20 και 5.21, όπου οι μετρήσεις της θερμοροής κατά τον αισθητήρα HFS-4 ήταν πάντα περίπου κατά $2W/m^2$ μικρότερές από τις αντίστοιχες του HFP03. Αν στις μετρήσεις του HFS-4 προστεθεί η παραπάνω διαφορά, τα αποτελέσματα των δύο μετρητικών είναι αρκετά κοντά, κάτι το οποίο όμως δεν μπορεί να γίνει αυθαίρετα. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της διάταξης OMEGA/BETATHERM **απορρίπτονται**.

Στο Σχήμα 5.60 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα της μετρητικής διάταξης TRSYS01 με τα αντίστοιχα σφάλματά τους.



Σχήμα 5.60 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διάταξης TRSYS01 για τον οικίσκο

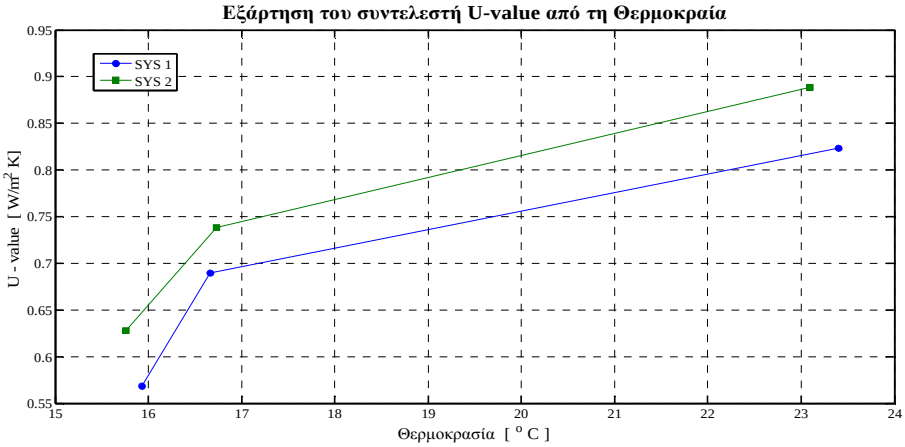
Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα του Σχήματος 5.60 παρατηρείται ότι όλα τα αποτελέσματα του SYS_2 της διάταξης TRSYS01 είναι πάντα μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του SYS_1. Αυτό σημαίνει ότι πιθανόν το σημείο τοποθέτησης του SYS_2 στην τοιχοποιία είτε είναι πάνω, είτε πολύ κοντά σε περιοχή θερμογέφυρας. Ο κυριότερος παράγοντας δημιουργίας θερμογέφυρας στην τοιχοποιία είναι ο αρμός που σχηματίζεται μεταξύ των θερμομονωτικών πλακών κατά την τοποθέτησή τους, κάτι το οποίο φάνηκε και στο θερμογράφημα του Σχήματος 5.6. Μια άλλη αιτία εμφάνισης θερμογέφυρας είναι η ένωση των γυψοσανίδων του εσωτερικού τμήματος της τοιχοποιίας με χρήση συνδετικού κονιάματος και χαρτοταινίας αρμού. Τέλος, μια άλλη αιτία εμφάνισης μεγαλύτερου συντελεστή U-value στο SYS_2 από το SYS_1 είναι η περίπτωση οι δύο αισθητήρες θερμοροής HFP01 και HFP03 που τοποθετήθηκαν στη θέση SYS_2 να δίνουν συστηματικά μεγαλύτερη τιμή θερμοροής από τους αντίστοιχους στη θέση SYS_1. Η πιθανότητα να συμβαίνει αυτό είναι μικρή, αλλά μπορεί να εξακριβωθεί με περεταίρω μετρήσεις και εναλλαγές των αισθητήρων.

Είναι εμφανές ότι σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου παρουσιάζουν μια συστηματική διαφορά μεταξύ τους. Δηλαδή η μέθοδος μέσης τιμής και η αθροιστική τεχνική βγάζουν πολύ κοντινά αποτελέσματα μεταξύ τους, στη συνέχεια η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων βγάζει λίγο μικρότερη και τέλος από τη δυναμική μέθοδο προκύπτει μια ακόμη μικρότερη τιμή για το αποτέλεσμα. Αυτό είναι ένα δείγμα αξιοπιστίας για τις τέσσερις μεθόδους.

Επίσης, για κάθε περίπτωση ξεχωριστά και παίρνοντας τα αποτελέσματα με την περιοχή του σφάλματος, παρατηρείται ότι το αποτέλεσμα κάθε μεθόδου δεν παρεκκλίνει από την περιοχή σφαλμάτων των άλλων. Συνεπώς όλα τα αποτελέσματα κυμαίνονται στην ίδια περιοχή και είναι αποδεκτά.

Ως πιο αξιόπιστη μέθοδος, κρίνεται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, κάτι το οποίο δέχεται και το πρότυπο ASTM **[16]**, συγκρινόμενη με την αθροιστική τεχνική, τόσο εξαιτίας του μικρότερου σφάλματος, όσο και για το γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στις συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνονται οι μετρήσεις παρά μόνο τη μονοδιάστατη ροή που είναι αναγκαία και για τις δύο. Σε αντίθεση, η αξιοπιστία του αποτελέσματος των υπόλοιπων μεθόδων εξαρτάται από τις συνθήκες, οι οποίες απαιτούν όσο το δυνατόν μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά χωρίς μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και ψεύδο-μόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο. Αυτό αποδεικνύεται και από την αθροιστική τεχνική η οποία δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί στην περίπτωση που δεν έγινε χρήση του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5.22 των αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται μια ελαφρά συσχέτιση της θερμοκρασίας με το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας. Για να γίνει εμφανές αυτό, κατασκευάστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.61, λαμβάνοντας κάθε φορά ως ενδεικτική πειραματική τιμή το αποτέλεσμα της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.61 - Συσχέτιση συντελεστή U-value και θερμοκρασίας

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, όσο αυξάνει η θερμοκρασία τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής U-value. Όπως υπολογίστηκε και στην ενότητα 5.2.1.2, η θεωρητική τιμή του συντελεστή διαπερατότητας αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και αυτό οφείλεται στην αύξηση του συντελεστή αγωγιμότητας της μόνωσης EPS με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όμως η συμπεριφορά της τοιχοποιίας στις διάφορες εναλλαγές της θερμοκρασίας και γενικότερα σε διάφορες συνθήκες, εξαρτάται κατά πολύ από τη συμπεριφορά του αέρα στο διάκενο. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για κατασκευαστικούς λόγους είναι αδύνατον να μην υπάρχουν εναλλαγές αέρα με τον εσωτερικό χώρο, συνεπώς με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά κυρίως με τη χρήση του αερόθερμου του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου, υπήρχε μια κινητικότητα του αέρα του διακένου λόγω της εξαναγκασμένης και ελεύθερης συναγωγής από το αερόθερμου. Έτσι η συμπεριφορά της τοιχοποιίας άλλαξε και αυτό φαίνεται από τη μεγάλη διαφορά U-value στις περιπτώσεις όπου λειτουργούσε το σύστημα ελέγχου στους 30^{o}C με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση που δεν λειτουργούσε.

Συγκρινόμενα τα πειραματικά αποτελέσματα με το θεωρητικό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας που υπολογίστηκε στην ενότητα 5.2.1.2, παρατηρείται ότι η θεωρητική μέση τιμή U=0.60 W/m^{2}K προσεγγίζεται μόνο από τη δεύτερη περίπτωση, όταν δηλαδή δεν χρησιμοποιείται σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας με πειραματικές τιμές των δύο συστημάτων, από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, U_{SYS_1}=0.57W/m^{2}K και U_{SYS_2}=0.63W/m^{2}K. Για τις υπόλοιπες μεθόδους μόνο το αποτέλεσμα της πρώτης περίπτωσης (χρήση αισθητήρα HFP01 και συστήματος θερμοκρασιακό ελέγχου) του SYS_2 από τη δυναμική μέθοδο προσεγγίζει τη θεωρητική αυτή τιμή. Το γεγονός ότι στις άλλες δύο περιπτώσεις η πειραματική τιμή του συντελεστή U-value είναι μεγαλύτερη από τη θεωρητική πιθανόν να οφείλεται στη συμπεριφορά του αέρα του διακένου της τοιχοποιίας στην κυκλοφορία του εσωτερικού αέρα, καθώς και στις δύο περιπτώσεις έγινε χρήση του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου. Για να αποδεχθεί αυτό θα πρέπει να γίνουν επιπλέον μετρήσεις στην τοιχοποιία, τόσο σε διαφορετικά σημεία όσο και κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, και κυρίως τους χειμερινούς μήνες όπου γενικά συνίσταται να γίνονται τέτοιου είδους μετρήσεις.

5.2.2. ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Η λιθόκτιστη τοιχοποιία στην οποία έγιναν οι επιτόπιες μετρήσεις ροής θερμότητας και επιφανειακής θερμοκρασίας, ανήκει στο παλαιό αρχοντικό κτίριο της οικίας των Μπενιζέλων, στην Πλάκα της Αθήνας. Η συγκεκριμένη τοιχοποιία χρονολογείται τον 16ο αιώνα **[24]** και η πειραματική μελέτη τέτοιου είδους είναι αρκετά σπάνια, ίσως και μοναδική. Χαρακτηριστικό της τοιχοποιίας είναι η πολύ βαριά λιθόκτιστη κατασκευή πάχους 60cm.

5.2.2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

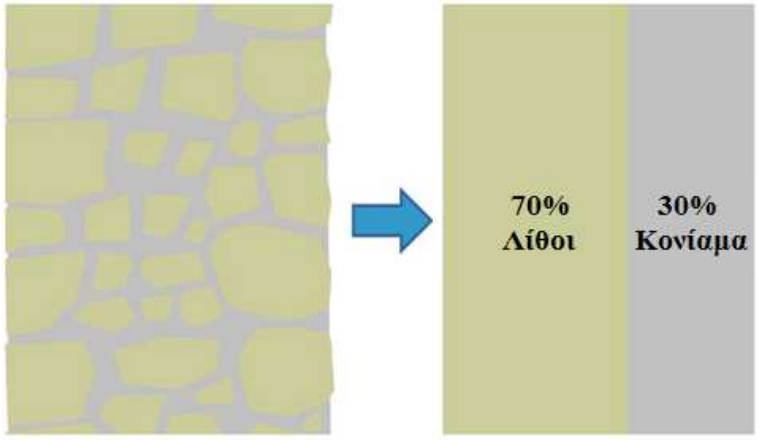
Η τοιχοποιία αποτελείται από δύο τμήματα, το ανακατασκευασμένο και το διατηρούμενο. Το ανακατασκευασμένο τμήμα αποτελείται από αργόλιθους ασβεστολιθικής φύσεως, είτε προερχόμενοι από την κατάρρευση του αντίστοιχου τμήματος της παλαιάς τοιχοποιίας, είτε χρησιμοποιώντας νέους λίθους με αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Ως κονίαμα χρησιμοποιείται προαναμεμιγμένο ασβεστοτσιμεντοκονίαμα δομής που πληρεί το πρότυπο EN-998-2. Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται είναι λευκό. Τέλος έχει γίνει αρμολόγημα βάθους 3 έως 5cm, από προαναμεμιγμένο κονίαμα χωρίς τσιμέντο, αποτελούμενο από φυσική υδραυλική άσβεστο, ποζολανικό μετακαολίνη και ανθρακικές άμμους, τύπου ALBARIA ALLETAMENTO. Η αναλογία των λίθων ως προς το υπόλοιπο κονίαμα (ασβεστοτσιμεντοκονίαμα και αρμολόγημα) για αυτού του είδους την τοιχοποιία, κυμαίνεται από 60% έως 80% και δεν είναι σταθερό το ποσοστό αυτό, καθώς το σχήμα και το μέγεθος των λίθων είναι πολυποίκιλο. Το πάχος της τοιχοποιίας είναι περίπου 60cm **[25]**.

Το διατηρούμενο τμήμα είναι κατασκευασμένο επίσης από αργόλιθους ασβεστολιθικής φύσεως με συνδετικό κονίαμα αργιλόχωμα. Για την ενίσχυση της τοιχοποιίας, στο 14% περίπου του συνολικού όγκου της τοιχοποιίας, έχουν διαπεραστεί λεπτόρρευστα υδραυλικά προαναμεμιγμένα ενέματα ποζολανικής βάσεως, χωρίς τσιμέντο, χρώματος ανοιχτού καστανού, τύπου ALBARIA INEZIONE. Στους αρμούς μεταξύ των λίθων υπάρχει αρμολόγημα βάθους περίπου 3 έως 5cm από το ίδιο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα αντίστοιχα αρμολογήματα των ανακατασκευασμένων τμημάτων, τύπου ALBARIA ALLETAMENTO. Το ποσοστό των λίθων σε σχέση με το υπόλοιπο κονίαμα (αργιλόχωμα, ένεμα και αρμολόγημα), κυμαίνεται στα ίδια ποσοστά με το ανακατασκευασμένο τμήμα, δηλαδή από 60% έως 80%, αφού οι περισσότεροι λίθοι έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Το πάχος της τοιχοποιίας είναι περίπου 60cm **[25]**.

Σχήμα 5.62 - Η εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας, αριστερά η διατηρούμενη και δεξιά η ανακατασκευασμένη

5.2.2.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (U-value)

Ο θεωρητικός υπολογισμός του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για παραδοσιακές λιθόκτιστες τοιχοποιίες είναι αρκετά δύσκολος με αρκετούς παράγοντες αβεβαιότητας. Για την προσέγγιση του συντελεστή U-value συνηθίζεται η προσομοίωση της λιθόκτιστης τοιχοποιίας σε μια θεωρητική τοιχοποιία ίδιου πάχους η οποία αποτελείται από ένα ομοιόμορφο στρώμα λίθων ίδιου ποσοστού με την πραγματική τοιχοποιίας και ένα άλλο παράλληλο και ομοιόμορφο στρώμα κονιάματος (Σχήμα 5.63) **[26]**. Για τη συγκεκριμένη τοιχοποιίας ο συντελεστής U-value υπολογίζεται με ένα μέσο ποσοστό λίθων και κονιάματος 70% και 30% αντίστοιχα.



Σχήμα 5.63 - Προσομοίωση λιθόκτιστης τοιχοποιίας

Το στρώμα των λίθων αποτελείται από αργόλιθους ασβεστολιθικής φύσεως. Λαμβάνοντας ένα δείγμα από τους λίθους που χρησιμοποιήθηκαν μετρήθηκε η πυκνότητα ίση με 2250kg/m^3 και οι θερμικές ιδιότητες των λίθων εκτιμήθηκαν από τον πίνακα Α.11 για πολύ σκληρό ασβεστόλιθο του προτύπου FprEN 1745 **[22]**. Το πάχος του στρώματος των λίθων είναι ίσο με το 70% του συνολικού πάχους, δηλαδή $L_{λίθων}$=0.42m, ενώ το υπόλοιπο 30% αποτελεί το στρώμα του κονιάματος το οποίο έχει πάχος $L_{κονιάματος}$=0.18m.

Για το θεωρητικό υπολογισμό του συντελεστή U-value της ανακατασκευασμένης τοιχοποιίας το στρώμα του κονιάματος αποτελείται από ασβεστοτσιμεντοκονίαμα λευκού χρώματος (25% του συνολικού πάχους) και από αρμολόγημα (5%). Οι ιδιότητες του ασβεστοτσιμεντοκονιάματος λαμβάνονται από σχετικούς πίνακες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος **[27]** και του υλικού του αρμολογήματος λαμβάνονται από τον πίνακα Α.12 του προτύπου FprEN 1745 **[22]**, για πυκνότητα περίπου 1800kg/m^3.

Για το θεωρητικό υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της διατηρούμενης τοιχοποιίας, το στρώμα των λίθων μένει ως έχει, το στρώμα του κονιάματος όμως αποτελείται από ένεμα (14% ολόκληρης της τοιχοποιίας), αρμολόγημα (5%) και αργιλόχωμα (11%). Οι ιδιότητες του ενέματος λαμβάνονται από τον πίνακα Α.12 του προτύπου FprEN 1745 **[22]**, θεωρώντας πυκνότητα ίση με 1600kg/m^3 και του αργιλοχώματος από πίνακες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος **[27]**.

Πίνακας 5.23 - Ιδιότητες υλικών λιθόκτιστων τοιχοποιιών

Υλικό	**Θερμική Αγωγιμότητα k (W/mK)**	**Πυκνότητα ρ (kg/m^3)**	**Θερμοχωρητικότητα C$_p$ (J/kgK)**
Ασβεστόλιθος	2.30	2250	1000
Αργιλόχωμα	1.50	1200-1800	1670-2500
Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	1.00	1900	1000
Αρμολόγημα	0.82	1800	1000
Ένεμα	0.61	1600	1000

Για την ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, η θερμική αντίσταση κάθε στρώσης υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 **[21]** και όσα περιγράφηκαν αναλυτικά στην ενότητα 4.2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.24.

Πίνακας 5.24 - Θερμική αντίσταση σε κάθε στρώση της ανακατασκευασμένης τοιχοποιίας

	Υλικό	**Πάχος d (m)**	**Θερμική αντίσταση R (m^{2}K/W)**
Στρώση Λίθων	Ασβεστόλιθος	0.420	0.18261
Στρώση κονιάματος	Ασβεστοτσιμεντο κονίαμα	0.150	0.15000
	Αρμολόγημα	0.030	0.03658

Η συνολική θερμική αντίσταση της ανακατασκευασμένης τοιχοποιίας (NEW) ισούται με το άθροισμα των επιμέρους:

$$R_{NEW} = R_{λίθων} + R_{ασβ/μα} + R_{αρμολ} = 0.36919 \ \text{m}^2\text{K/W}$$

Έτσι ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας θα είναι:

$$U_{NEW} = \frac{1}{R_{NEW}} = 2.71 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Για τη διατηρούμενη τοιχοποιία, η θερμική αντίσταση κάθε στρώσης υπολογίζεται σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο, ISO 6946 **[21]**, και την ενότητα 4.2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.25.

Πίνακας 5.25 - Θερμική αντίσταση σε κάθε στρώση της διατηρούμενης τοιχοποιίας

	Υλικό	**Πάχος d (m)**	**Θερμική αντίσταση R (m^2K/W)**
Στρώση Λίθων	Ασβεστόλιθος	0.420	0.18261
Στρώση κονιάματος	Αργιλόχωμα	0.066	0.04400
	Ένεμα	0.084	0.13770
	Αρμολόγημα	0.030	0.03659

Η συνολική θερμική αντίσταση της διατηρούμενης τοιχοποιίας (OLD) ισούται με το άθροισμα των επιμέρους:

$$R_{OLD} = R_{λίθων} + R_{αργιλόχωμα} + R_{ένεμα} + R_{αρμολ} = 0.40090 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Έτσι ο συντελεστής U-value της τοιχοποιίας θα είναι:

$$U_{OLD} = \frac{1}{R_{OLD}} = 2.49 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Φαίνεται η παλαιά τοιχοποιία να έχει μικρότερο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, όμως η διαφορά είναι μικρή για να βγει κάποιο συμπέρασμα, καθώς υπάρχει αρκετά μεγάλη αβεβαιότητα για τον υπολογισμό αυτό.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ

Η αβεβαιότητα των παραπάνω αποτελεσμάτων είναι αρκετά μεγάλη καθώς, όπως αναφέρθηκε, τέτοιου είδους τοιχοποιίες είναι αρκετά ανομοιόμορφες.

Για τον υπολογισμό η τοιχοποιία προσομοιάστηκε με μια ισοδύναμη τοιχοποιία δύο στρώσεων, κάτι το οποίο δεν είναι ακριβές και εισάγει σφάλματα.

Επίσης, τόσο τα ποσοστά λίθων και κονιάματος, όσο και τα επί μέρους ποσοστά των συστατικών του κονιάματος διαφέρουν από σημείο σε σημείο. Για το πρώτο ποσοστό, έγινε μια μέση εκτίμηση με βάση παρόμοιες τοιχοποιίες και το μέγεθος των λίθων, ενώ το ποσοστό των επί μέρους εκτιμήθηκε εμπειρικά.

Ακόμη, οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν διαφέρουν κατά πολύ ο ένας με τον άλλο, τόσο στο σχήμα όσο και στις ιδιότητες. Ο προσδιορισμός των θερμικών

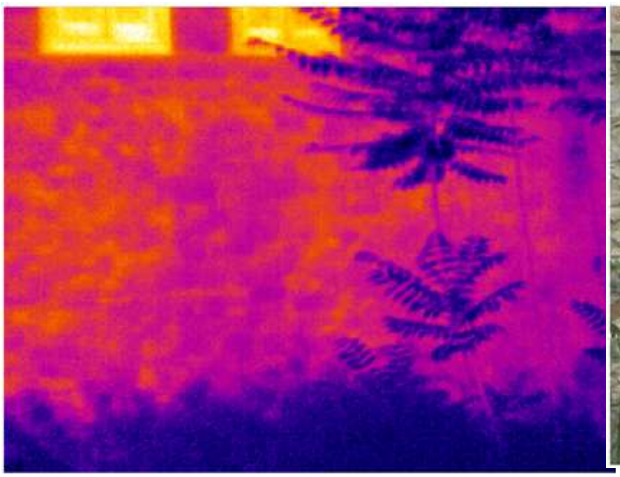
χαρακτηριστικών τους έγινε λαμβάνοντας ένα δείγμα, υποθέτοντας ότι οι υπόλοιποι λίθοι έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, το οποίο πιθανόν να μην είναι αληθές, αλλά θεωρείται μία καλή προσέγγιση της πραγματικότητας.

Τέλος, οι ιδιότητες των συστατικών των κονιαμάτων λήφθηκαν από πίνακες ίδιων ή παρόμοιων υλικών με βάση, κατά κύριο λόγο την πυκνότητά τους. Στις συγκεκριμένες τοιχοποιίες δεν επιτρέπονταν επέμβαση σε αυτές, συνεπώς δεν υπήρχε η δυνατότητα λήψης ενός δείγματος του κονιάματος. Ως εκ τούτου, οι ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν μπορεί να μην είναι αληθείς, αλλά εκτιμάται ότι προσεγγίζουν τις πραγματικές.

5.2.2.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η επιλογή των σημείων μετρήσεων, καθώς επίσης και ο τρόπος τοποθέτησης των αισθητήρων, έγινε με βάση τα πρότυπα ISO 9869, ASTM C 1046 και ASTM C 1155 **[14,15,16]** αλλά και τη περιορισμένη δυνατότητα επέμβασης στην τοιχοποιία, εξαιτίας της ιστορικής και πολιτιστικής σημασίας του κτιρίου. Για την άμεση σύγκριση και μελέτη των αποτελεσμάτων της θερμικής διαπερατότητας της διατηρούμενης και της ανακατασκευασμένης πέτρινης τοιχοποιίας, τα σημεία μέτρησης επιλέγονται τόσο σε κοινό προσανατολισμό όσο και σε κοντινή απόσταση. Στη συνέχεια η ακριβής θέση των αισθητηρίων επιλέγεται με σκοπό η ροή θερμότητας, στην περιοχή αυτή, να είναι κάθετη και μονοδιάστατη. Παράλληλα, με τη χρήση θερμοκάμερας αποφεύγονται τυχόν θερμογέφυρες και άλλες θερμικές ανωμαλίες στην περιοχή. Ως εκ τούτου, οι αισθητήρες τοποθετούνται σε κεντρικά σημεία του τοίχου, μακριά από παράπλευρες τοιχοποιίες, την οροφή ή το δάπεδο.

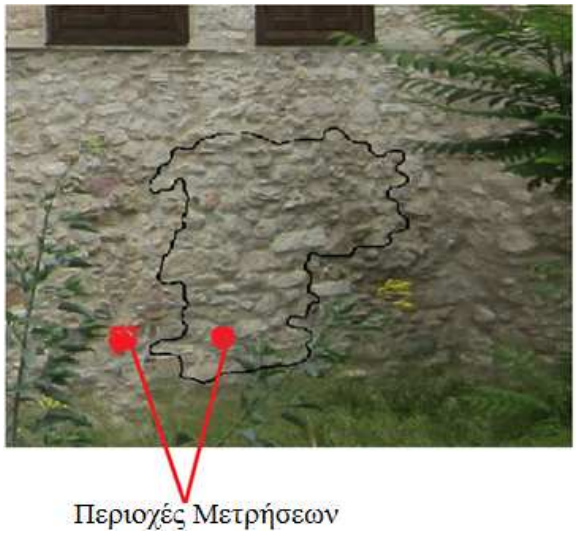
Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 5.64 από το θερμογράφημα, η τοιχοποιία δεν είναι θερμικά ομοιογενής και αυτό οφείλεται στην εξάρτηση της επιφανειακής θερμοκρασίας από το χρώμα και το είδος της πέτρας καθώς επίσης και από το συνδετικό κονίαμα. Στην πραγματική φωτογραφία της τοιχοποιίας το ανακατασκευασμένο (νέο) τμήμα είναι αυτό που φαίνεται μέσα στο όριο του περιγράμματος.



Σχήμα 5.64 - Θερμογράφημα λιθόκτιστης τοιχοποιίας

Σχήμα 5.65 - Φωτογραφία τοιχοποιίας από την εξωτερική πλευρά. Στο περίγραμμα το ανακατασκευασμένο τμήμα

Κατόπιν επιλέγεται η περιοχή των μετρήσεων να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη η κατανομή της θερμοκρασίας, αλλά και να αντιστοιχεί περίπου στο κέντρο της εσωτερικής τοιχοποιίας, ώστε να αποφευχθούν τυχόν θερμογέφυρες από παράπλευρους τοίχους, το δάπεδο ή την οροφή. Οι περιοχές μετρήσεων από την εξωτερική πλευρά φαίνονται στο Σχήμα 5.66. Οι περιοχές μετρήσεων είναι αρκετά ψηλά από το έδαφος, περίπου 1m, κάτι το οποίο δεν είναι εμφανές από τη φωτογραφία λόγω της πυκνής βλάστησης και η απόσταση μεταξύ τους είναι 76cm.



Σχήμα 5.66 - Περιοχές μετρήσεων στην τοιχοποιία

Από το θερμογράφημα φαίνεται ότι η ανακατασκευασμένη λιθόχτιστη τοιχοποιία (δεξιά) παρουσιάζει μια μέση επιφανειακή θερμοκρασία υψηλότερη από την παλαιά.

Από την επεξεργασία των θερμογραφημάτων και την αντιστοίχησή τους με της φωτογραφίες, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα σημεία πάνω στους λίθους είναι αντιπροσωπευτικά της περιοχής της τοιχοποιίας. Για το λόγο αυτό οι αισθητήρες επιλέγονται να τοποθετηθούνε πάνω στους λίθους.

5.2.2.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για τον προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας της συγκεκριμένης τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη HUKSEFLUX/BETATHERM η οποία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 5.1.3. Η διάταξη αυτή τοποθετήθηκε, τόσο στο ανακατασκευασμένο, όσο και στο διατηρούμενο τμήμα της λιθόκτιστης τοιχοποιίας, στις περιοχές όπου δείχνει το Σχήμα 5.66. Αφού επιλέχθηκε η περιοχή των μετρήσεων στη συνέχεια έγινε η εγκατάσταση των αισθητήρων των μετρητικών διατάξεων σύμφωνα τις υποδείξεις που ορίζουν οι κανονισμοί ISO 9869, ASTM C 1046 και ASTM C 1155 **[14,15,16]**.

Τα εσωτερικά thermistor τοποθετούνται περίπου στο κέντρο της τοιχοποιίας, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, και επιπλέον κοντά στο κέντρο ενός, όσο το δυνατόν επίπεδου λίθου, σε ύψος 1.50m από το δάπεδο. Στο συγκεκριμένο κτίριο δεν επιτρεπόταν η επέμβαση στην τοιχοποιία με σκοπό την εισχώρηση των thermistor μερικά mm στο εσωτερικού του τοίχου. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται θερμοαγώγιμη πάστα ώστε η άκρη του thermistor να προσεγγίζει τη θερμοκρασία της επιφάνειας της πέτρας. Αφού στερεωθεί η άκρη του thermistor στην πέτρα με τη βοήθεια της πάστας, στη συνέχεια ο αισθητήρας συγκρατείται με χαρτοταινία.

Τα εξωτερικά thermistor τοποθετούνται κατά την ίδια διαδικασία, σε θέση ώστε τα δύο αντίστοιχα σημεία να ανήκουν στην ίδια κάθετη του επιπέδου του τοίχου και επιλέγοντας λίθο με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Τα εξωτερικά thermistor πρέπει να είναι ανθεκτικά στη βροχή και αυτό επιτυγχάνεται με επιπλέον χρήση θερμοαγώγιμης εποξειδικής ρητίνης και χαρτοταινίας.

Οι αισθητήρες ροής θερμότητας τοποθετούνται πάνω στον ίδιο λίθο που τοποθετήθηκαν τα thermistor, απλώνοντας αρκετή θερμοαγώγιμη πάστα τόσο στον αισθητήρα, όσο και στο λίθο. Στη συνέχεια πιέζεται δυνατά ώστε να καλυφθούν τυχόν κενά αέρα μεταξύ λίθου και αισθητήρα από την πάστα. Τέλος ο αισθητήρας συγκρατείται με χαρτοταινία.

Σχήμα 5.67 - Οι αισθητήρες τοποθετημένοι στην τοιχοποιία, διακρίνονται οι αισθητήρες HFP01

5.2.2.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

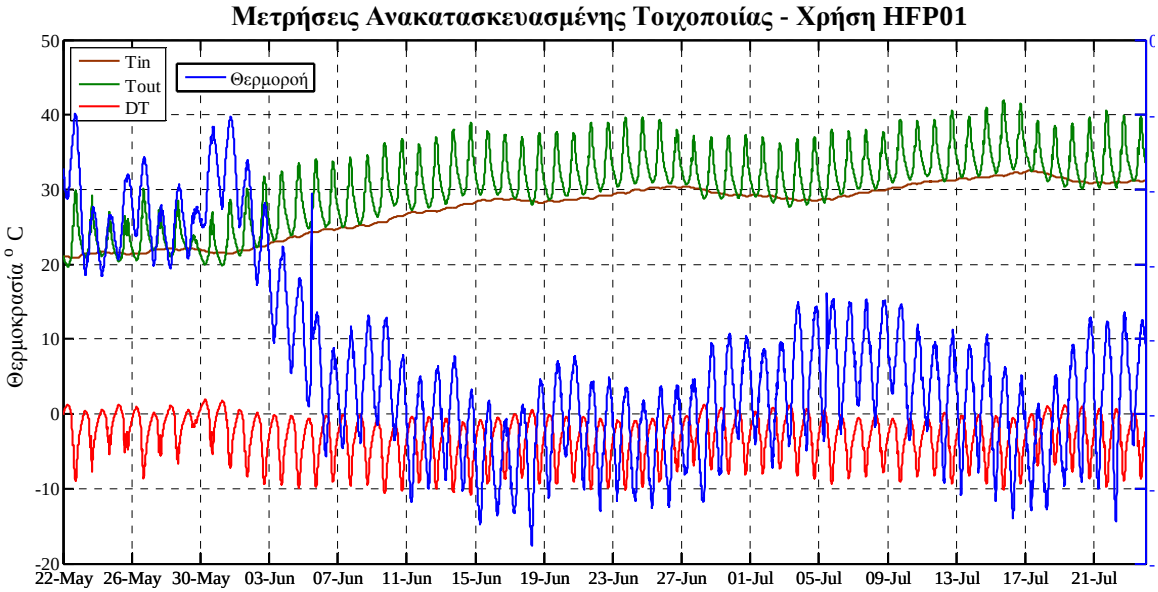
Οι μετρήσεις χωρίζονται σε δύο set ανάλογα με την τοιχοποιία, σε ανακατασκευασμένο και διατηρούμενο τμήμα της λιθόκτιστης τοιχοποιίας, και για την ανακατασκευασμένη σε άλλα δύο, ανάλογα με τον αισθητήρα ροής θερμότητας που χρησιμοποιείται.

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Για τη μέτρηση του συντελεστή της θερμικής διαπερατότητας U-value της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε η μετρητική διάταξη HUKSEFLUX/BETATHERM χρησιμοποιώντας για τους πρώτους δύο μήνες τον αισθητήρας ροής θερμότητας HFP01 και για τον επόμενο ενάμιση τον αισθητήρα HFP03. Έτσι οι μετρήσεις χωρίζονται σε δύο set, ανάλογα με τον αισθητήρα θερμοροής που χρησιμοποιείται.

- **Χρήση του αισθητήρα HFP01**

Το συγκεκριμένο set μετρήσεων διαρκεί 63 ημέρες, από την Τρίτη 22 Μαΐου 2012 στις 00:05 έως την Τρίτη 24 Ιουλίου 2012 στις 00:05 , χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα HFP01. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της επιφανειακής θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας στην τοιχοποιία παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.68, όπου οι θερμοκρασίες Tin,Tout και ΔT παρουσιάζονται με καφέ, πράσινο και κόκκινο χρώμα στον αριστερό y-άξονα, ενώ η θερμοροή με μπλε στο δεξιό y-άξονα.

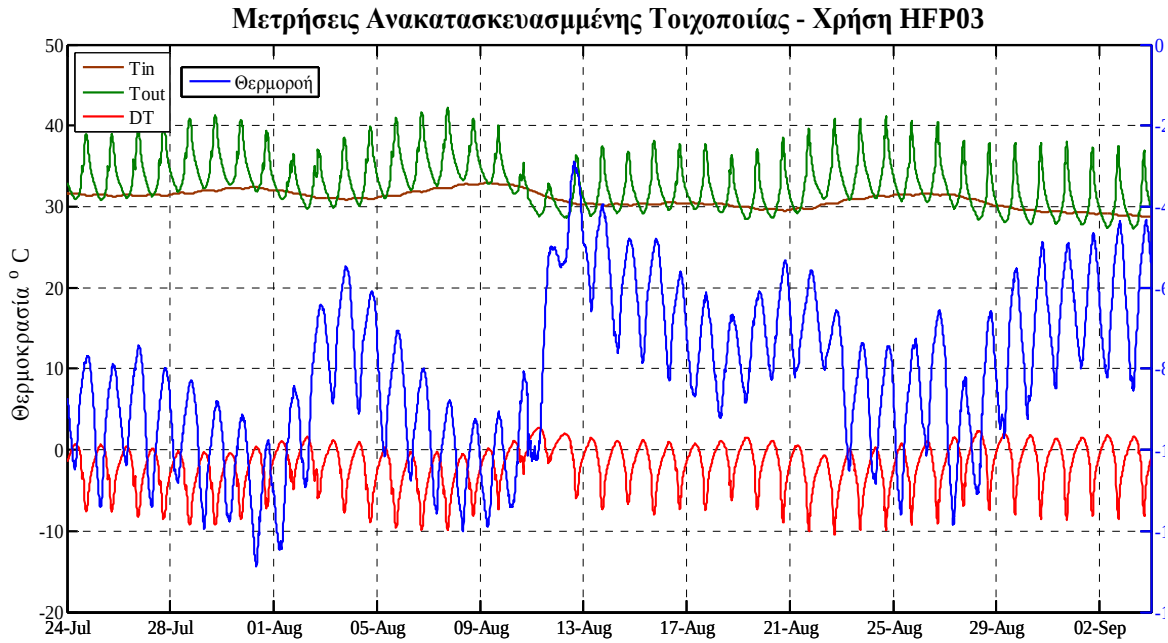


Σχήμα 5.68 - Οι μετρήσεις για την ανακατασκευασμένη τοιχοποιία χρησιμοποιώντας HFP01

Στις μετρήσεις παρατηρείται μια πολύ μικρή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας, η οποία αυξάνεται με πολύ αργό ρυθμό. Επίσης την 1η Ιουνίου παρατηρείται αύξηση της απόλυτης τιμής της μέσης ροής θερμότητας, μέχρι την 6η Ιουνίου που δείχνει να σταθεροποιείται σε μία άλλη μέση τιμή. Γενικά η μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοροής είναι μικρή, περίπου $3W/m^2$. Επίσης η θερμοκρασιακή διαφορά έχει σχεδόν πάντα αρνητικό πρόσημο, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η εσωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας της τοιχοποιίας είναι σχεδόν πάντα χαμηλότερη από την εξωτερική, για την ίδια στιγμή. Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά είναι 3.2^oC.

- **Χρήση του αισθητήρα HFP03**

Το συγκεκριμένο set μετρήσεων διαρκεί 43 ημέρες, από την Τετάρτη 24 Ιουλίου 2012 στις 23:59 έως την Τετάρτη 5 Σεπτεμβρίου 2012 στις 23:59, χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα HFP03 στο ίδιο σημείο όπου βρισκόταν ο HFP01. Οι μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας στην τοιχοποιία παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 5.69, διατηρώντας τον ίδιο χρωματισμό.

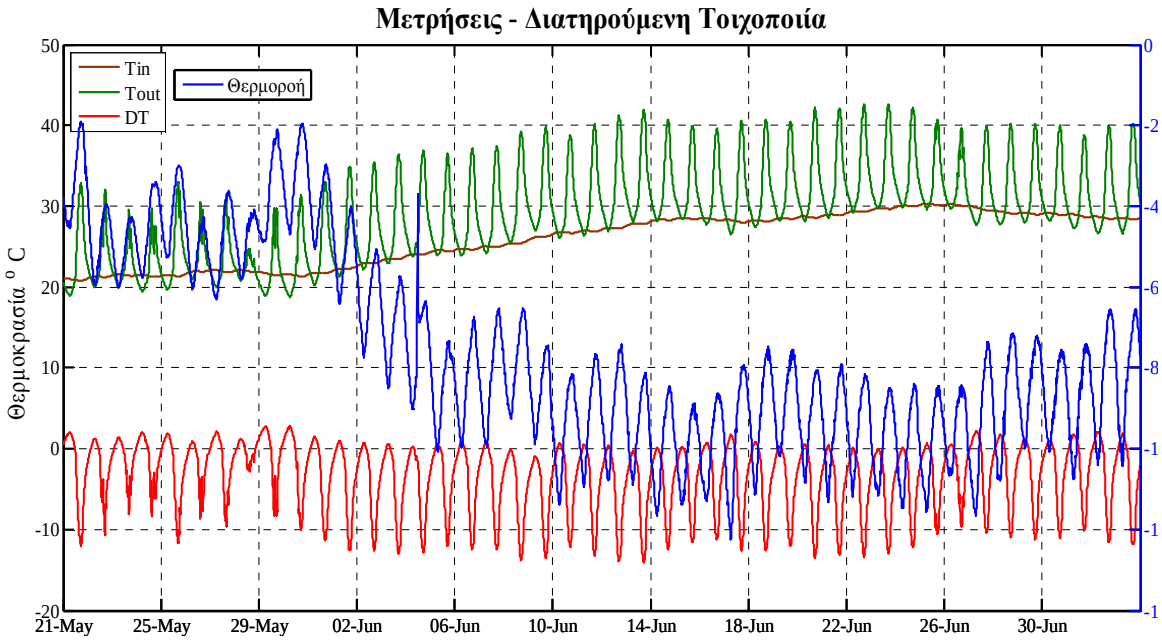


Σχήμα 5.69 - Οι μετρήσεις για την ανακατασκευασμένη τοιχοποιία χρησιμοποιώντας HFP03

Σε αυτές τις μετρήσεις παρατηρείται μια αλλαγή της μέσης ροής θερμότητας στη 1 Αυγούστου και στις 11 Αυγούστου. Οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοροής είναι σχετικά μικρές. Επίσης η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας είναι σχεδόν σταθερή, κάτι το οποίο είναι χαρακτηριστικό των λιθόκτιστων κτιρίων. Επίσης η θερμοκρασιακή διαφορά συνεχίζει να έχει σχεδόν πάντα σταθερό πρόσημο, με μέση διαφορά θερμοκρασίας περίπου 2.5^oC.

ΔΙΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Για τη μέτρηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της διατηρούμενης τοιχοποιίας, χρησιμοποιήθηκε η μετρητική διάταξη HUKSEFLUX/BETATHERM χρησιμοποιώντας για τη μέτρηση των επιφανειακών θερμοκρασιών thermistor και για τη ροή θερμότητας που διαπερνά την τοιχοποιία τον αισθητήρα HFP01 της HUKSEFLUX. Οι μετρήσεις διήρκησαν 63 ημέρες, από την Δευτέρα 21 Μαΐου 2012 στις 23:59 έως την Τετάρτη 4 Ιουλίου 2012 στις 23:57. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των θερμοκρασιών και της ροής θερμότητας παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.70.



Σχήμα 5.70 - Οι μετρήσεις για την διατηρούμενη τοιχοποιία

Στις μετρήσεις παρατηρείται μια πτώση της μέσης τιμής της ροής θερμότητας γύρω στην 1η Ιουνίου. Η θερμοροή παρουσιάζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις. Επίσης η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, έχοντας ως αποτέλεσμα τη θερμοκρασιακή διαφορά να έχει σχεδόν πάντα σταθερό πρόσημο με μέση τιμή 3.8^{o}C.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν σύμφωνα με τις τέσσερεις μεθόδους οι οποίες περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3 με σκοπό τον πειραματικό προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας της διατηρούμενης και ανακατασκευασμένης λιθόκτιστης τοιχοποιίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου.

Μέθοδος Μέσης Τιμής κατά ISO

Η Μέθοδος Μέσης Τιμής, κατά το πρότυπο ISO 9869, μπορεί να εφαρμοσθεί στις παραπάνω μετρήσεις της διάταξης HUKSEFLUX/BETATHERM για την ανακατασκευασμένη και διατηρούμενη λιθόκτιστη τοιχοποιία, εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις για την τοιχοποιία, την εγκατάσταση των μετρητικών και τη διάρκεια των μετρήσεων. Η υπολογιζόμενη μέση τιμή της θερμικής αντίστασης που προκύπτει, θα είναι ίση με το πηλίκο του μέσου όρου της θερμοκρασιακής διαφοράς προς τη μέση τιμή της ροής θερμότητας που διαπέρνα την τοιχοποιία. Στην υπολογιζόμενη τιμή της αντίστασης λαμβάνεται υπόψη η θερμική αντίσταση του αισθητήρα της θερμοροής R_{HFM}, και γι αυτό γίνεται η διόρθωση

$$R_{cor} = \frac{\delta T}{q} - R_{HFM} \qquad (5.14)$$

όπου R_{HFM}= $6.25 \cdot 10^{-3}$ Km^2/W, για τους αισθητήρες HFP01 και HFP03 που χρησιμοποιούνται.

Η συγκεκριμένη τοιχοποιία είναι βαριά κατασκευή με θερμοχωρητικότητα μεγαλύτερη από $20kJ/m^2K$. Έτσι η περίοδος ανάλυσης είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των 24ωρών, όπως ορίζεται από το πρότυπο.

Για τον έλεγχο της σύγκλισης της υπολογιζόμενης τιμής χρησιμοποιούνται τα δύο κριτήρια s_1 και s_2 που ορίστηκαν παραπάνω, στη μέτρηση της διαπερατότητας της τοιχοποιίας του πειραματικού οικίσκου. Έγινε επίσης μια προσέγγιση της συνολικής αποθηκευόμενης ενέργειας στον τοίχο και της συνολικής θερμότητα που διαπέρασε καθ' όλη τη διάρκεια της κάθε μέτρησης, ώστε να προβλεφθεί η ανάγκη εφαρμογής της δυναμικής μεθόδου ή όχι. Σε κάθε περίπτωση για την τοιχοποιία αυτή κρίθηκε αναγκαία και η εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου. Η μεθοδολογία της εξέτασης αυτής της συνθήκης αναλύεται στο Παράρτημα Β.

Το σφάλμα των μετρήσεων θεωρήθηκε ίσο με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους σφαλμάτων που ορίζονται από το πρότυπο. Πιο συγκεκριμένα:

$$s(U) = \sqrt{[s(sensor)]^2 + [s(DataLogger)]^2 + [s(condact)]^2 + [s(oper)]^2 + [s(time\ \text{var})]^2 + [s(Tem\ \text{var})]^2} \qquad (5.15)$$

όπου

s(sensor), το σφάλμα των αισθητήρων, το οποίο είναι ίσο με 5%, όσο δηλαδή και το σφάλμα του αισθητήρα ροής θερμότητας, καθώς το σφάλμα του thermistor θεωρείται αμελητέο.

s(DataLogger), το σφάλμα του συστήματος λήψης και αποθήκευσης των δεδομένων, ίσο με 0.05% για το σύστημα Agilent της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.

s(contact), το σφάλμα των τυχαίων μεταβολών λόγω της επαφής των αισθητήρων και των επιφανειών, ίσο με 10%, εξαιτίας της τραχείας επιφάνειας των λίθων όπου τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες.

s(oper), το λειτουργικό σφάλμα το οποίο λαμβάνεται ίσο με 1%, εξαιτίας της αναλογίας πάχους αισθητήρα - πάχους τοιχοποιίας.

s(timevar), το σφάλμα που οφείλεται στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας και θερμοροής με το χρόνο, το οποίο μειώνεται με την αύξηση της διάρκειας των μετρήσεων και αυξάνεται με της διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας. Επειδή τόσο οι διακυμάνσεις στη λιθόκτιστη τοιχοποιία είναι αρκετά μικρές, όσο και η διάρκεια των μετρήσεων, σε κάθε περίπτωση, είναι μεγάλη, το σφάλμα λαμβάνεται ίσο με 3%.

Επομένως το σφάλμα θα είναι ίσο με

$$s(U) = \sqrt{5^2 + 0.05^2 + 10^2 + 1^2 + 3^2} = 11.62\%$$

Για την επεξεργασία των μετρήσεων επιλέγεται ένα χρονικό διάστημα, ακέραιο πολλαπλάσιο των 24ωρών, το οποίο ικανοποιεί της συνθήκες που έχουν περιγραφεί στην ενότητα 4.3.1. Έτσι για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας της ανακατασκευασμένης τοιχοποιίας, επιλέγονται οι μετρήσεις των χρονικών διαστημάτων:

- Χρήση του αισθητήρα HFP01:
  Από 02/07/2012 στις 13:00 έως 13/07/2012 στις 13:00
- Χρήση του αισθητήρα HFP03:
  Από 24/07/2012 στις 14:00 έως 01/08/2012 στις 14:00

Ενώ για την διατηρούμενη τοιχοποιία επιλέγεται το χρονικό διάστημα:

- Από 16/06/2012 στις 13:00 έως 23/06/2012 στις 13:00

Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας και του ελέγχου σύγκλισης της μεθόδου έγιναν με χρήση του λογισμικού MATLAB. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα.

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

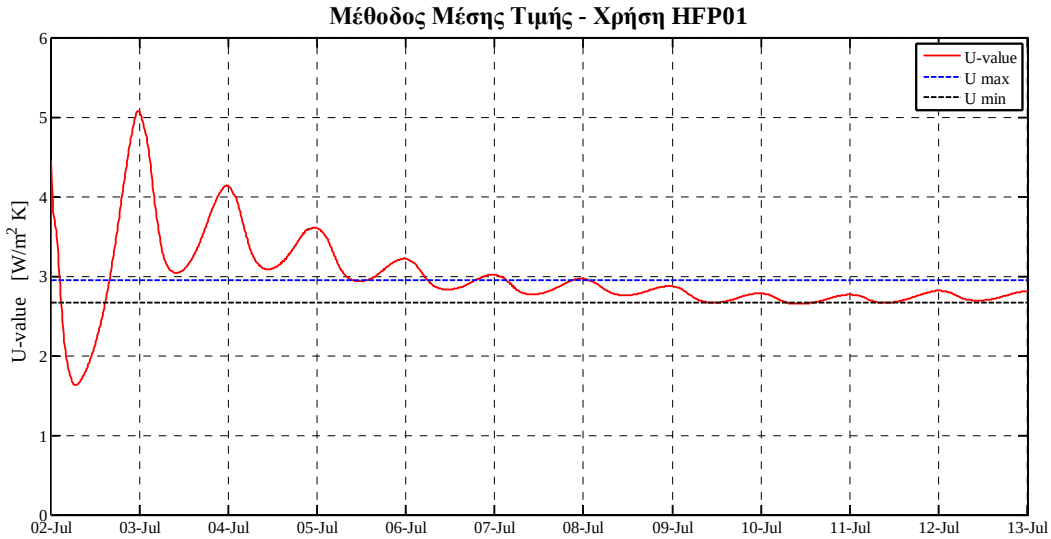
- **Χρήση του αισθητήρα HFP01**

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο μέσης τιμής, σύμφωνα με τα παραπάνω, για το διάστημα το οποίο επιλέχθηκε, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.26.

Πίνακας 5.26 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής χρησιμοποιώντας HFP01

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**		**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	Σφάλμα [11.62%]	s_1 [%]	s_2 [%]	*Συμπέρασμα*
02/07/2012 13:00	13/07/2012 13:00	**2.81**	**± 0.33**	0.21	1.56	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Στο Σχήμα 5.71 παρουσιάζεται η υπολογιζόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρείται ότι η υπολογιζόμενη τιμή του συντελεστή της θερμικής διαπερατότητας, φτάνει γύρω από την τελική τιμή μετά από τέσσερις περίπου ημέρες. Στη συνέχεια η σύγκλιση είναι αρκετά γρήγορη, κάτι το οποίο φαίνεται και από τις τιμές των κριτηρίων s_1 και s_2.



Σχήμα 5.71 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής χρησιμοποιώντας HFP01

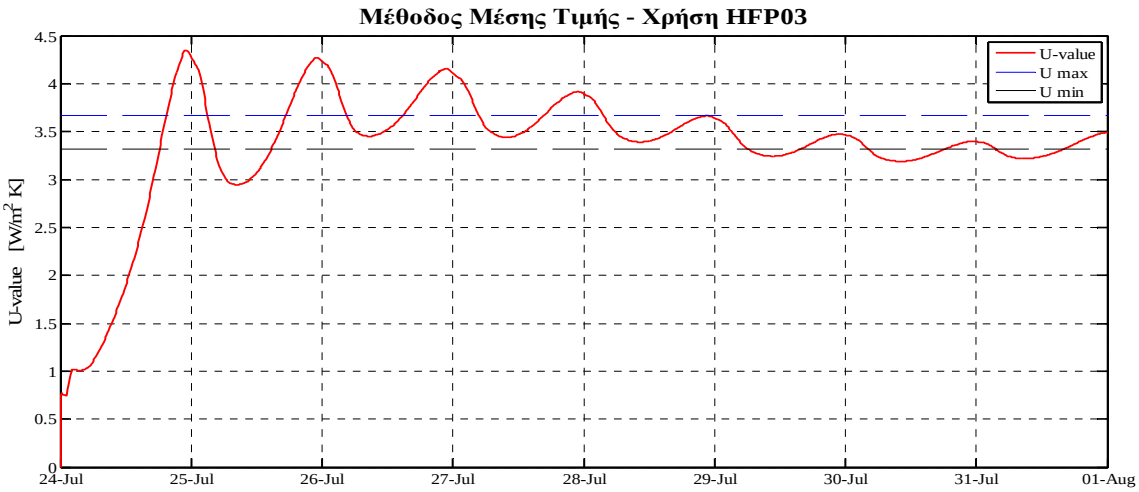
- **Χρήση του αισθητήρα HFP03**

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη περίπτωση και το χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μέσης τιμής:

Πίνακας 5.27 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής χρησιμοποιώντας HFP03

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**		**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	Σφάλμα [11.62%]	s_1 [%]	s_2 [%]	*Συμπέρασμα*
24/07/2012 14:00	01/08/2012 14:00	**3.49**	**± 0.41**	2.78	3.87	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Στο Σχήμα 5.72 παρουσιάζεται η υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής διαπερατότητας κατά την ανάλυση των μετρήσεων για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε. Παρατηρείται ότι η τελική τιμή διαμορφώνεται μετά το πέρας τεσσάρων ημερών.



Σχήμα 5.72 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής χρησιμοποιώντας HFP03

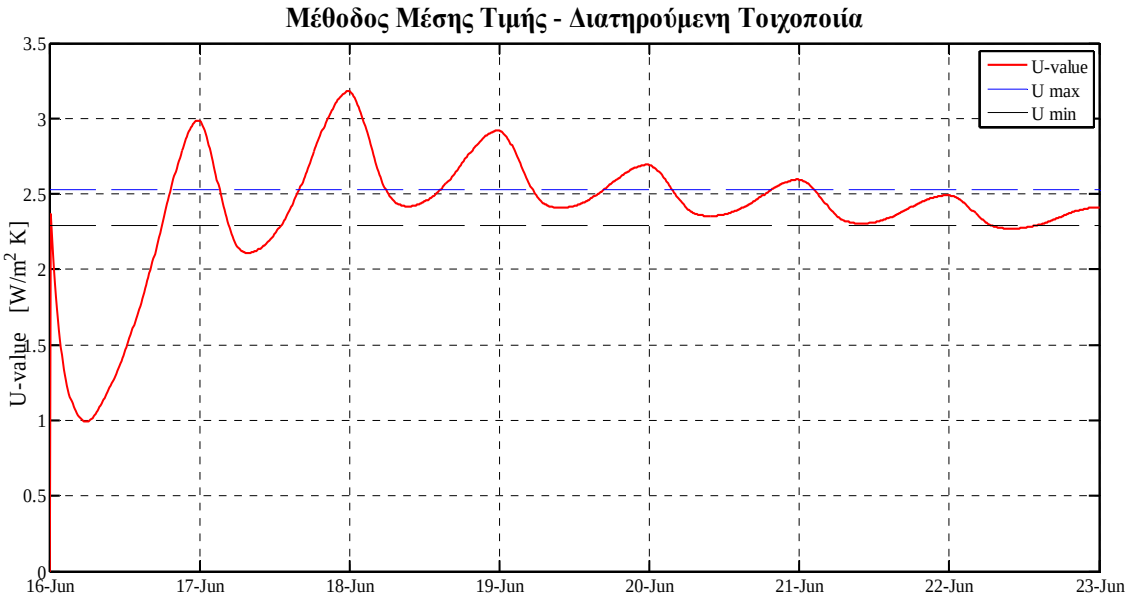
ΔΙΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Για το χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε γι' αυτό το set μετρήσεων, εφαρμόζεται η μέθοδος μέσης τιμής και προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.28.

Πίνακας 5.28 - Αποτελέσματα Μεθόδου Μέσης Τιμής διατηρούμενης τοιχοποιίας

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**		**Κριτήρια Σύγκλισης**		
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	Σφάλμα [11.62%]	s_1 [%]	s_2 [%]	*Συμπέρασμα*
16/06/2012 13:00	23/06/2012 13:00	**2.41**	**± 0.28**	3.25	1.48	ΣΥΓΚΛΙΝΕΙ

Στο Σχήμα 5.73 παρουσιάζεται το διάγραμμα της υπολογιζόμενης τιμής του συντελεστή U-value, κατά την ανάλυση της μεθόδου. Παρατηρείται μια αλλαγή στη σύγκλιση κατά τη τρίτη μέρα και στη συνέχεια με μικρά εύρη ταλαντώσεων συγκλίνει προς την τελική τιμή.



Σχήμα 5.73 - Συντελεστής U-value από τη Μέθοδο Μέσης Τιμής διατηρούμενης τοιχοποιίας

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ κατά ASTM

Η εκτιμώμενη τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, U-value, προκύπτει από τη μέση τιμή των συντελεστών που εκτιμώνται από κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα στο οποίο συγκλίνει. Τα χρονικά διαστήματα πρέπει να είναι τουλάχιστον τρία και να διαρκούν ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών. Σε κάθε επί μέρους διάστημα προκύπτει ο συντελεστής U-value ως το πηλίκο της μέσης θερμοροής προς τη μέση θερμοκρασιακή διαφορά, χωρίς να υποστεί κάποια διόρθωση.

Για τον υπολογισμό του παράγοντα CR_n, το χαρακτηριστικό χρονικό διάστημα n να παίρνεται ίσο με τη τιμή n=12h, όπου σύμφωνα με το πρότυπο, η τιμή αυτή θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6 και 48 ωρών. Ο έλεγχος σύγκλισης γίνεται για $4 \cdot n$ ώρες, δηλαδή για 2 ημέρες.

Από την ανάλυση σφάλματος διαπιστώθηκε ότι το πειραματικό σφάλμα για την εκτίμηση της θερμικής διαπερατότητας μια τοιχοποιίας με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι 10% **[16]**.

Έτσι, για ο εκτιμώμενος συντελεστής θα είναι η μέση τιμή των επί μέρους:

$$\overline{U} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_i \qquad (5.16)$$

ο συντελεστής μεταβολής

$$V(U) = \frac{s(U)}{\overline{U}} \times 100\% \quad (5.17)$$

όπου s(U) η τυπική απόκλιση υπολογιζόμενη με N-1 βαθμούς ελευθερίας ίση με

$$s(U) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(U_i - \overline{U}\right)^2}{(N-1)}} \quad (5.16)$$

Η μέση θερμοκρασία, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM, δε μπορεί να εκτιμηθεί από το γνωστό τύπο για βαριές κατασκευές.

Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας και του ελέγχου σύγκλισης της μεθόδου έγιναν στη MATLAB. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα:

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

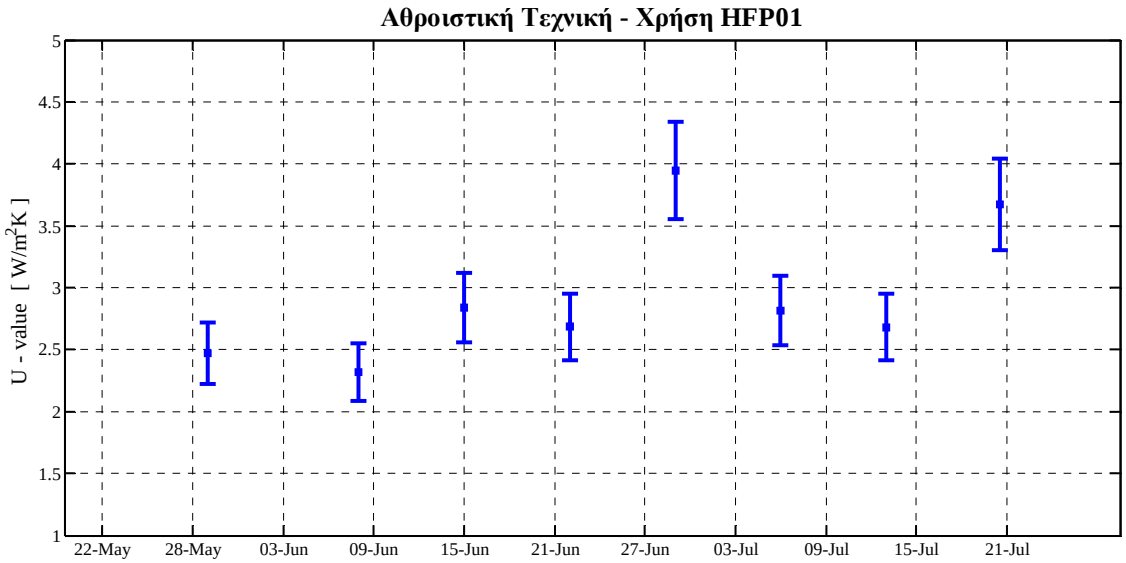
- **Χρήση του αισθητήρα HFP01**

Για το συγκεκριμένο set μετρήσεων είναι δυνατός ο επιμερισμός σε οχτώ (N=8) επί μέρους χρονικά διαστήματα, από τα οποία κάθε φορά υπολογίζεται μία τιμή του συντελεστή διαπερατότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.29.

Πίνακας 5.29 - Αποτελέσματα σε κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**	
Από	Έως	U-value [W/m^{2}K]	Σφάλμα [10%]
22/05/2012	04/06/2012	2.47	± 0.25
04/06/2012	11/06/2012	2.32	± 0.23
11/06/2012	18/06/2012	2.84	± 0.28
18/06/2012	25/06/2012	2.68	± 0.27
25/06/2012	02/07/2012	3.95	± 0.40
02/07/2012	09/07/2012	2.82	± 0.28
09/07/2012	16/07/2012	2.68	± 0.27
16/07/2012	24/07/2012	3.68	± 0.37

Στο Σχήμα 5.74 παρουσιάζεται η διασπορά των τιμών των επί μέρους διαστημάτων



Σχήμα 5.74 - Διασπορά αποτελεσμάτων των επί μέρους χρονικών διαστημάτων, χρήση HFP01

Η εκτιμώμενη τιμή για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U-value γι' αυτό το set μετρήσεων είναι η μέση τιμή αυτών. Δηλαδή:

$U = 2.93\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U) = 19.62\%$

Επειδή ο συντελεστής μεταβολής είναι μεγαλύτερος από 10%, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1155, η εκτιμώμενη τιμή του συντελεστή U-value **δεν είναι αποδεκτή**. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.74, η διασπορά των τιμών στα επί μέρους διαστήματα είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται κυρίως στις τιμές που προκύπτουν από το 5ο και 8ο κατά σειρά χρονικό διάστημα, οι οποίες ξεφεύγουν αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αν αμεληθούν οι δύο αυτές τιμές, τότε η εκτιμώμενη τιμή θα ήταν $U = 2.64\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U) = 7.67\%$, μικρότερη από 10%, κάνοντας την τιμή αυτή αποδεκτή.

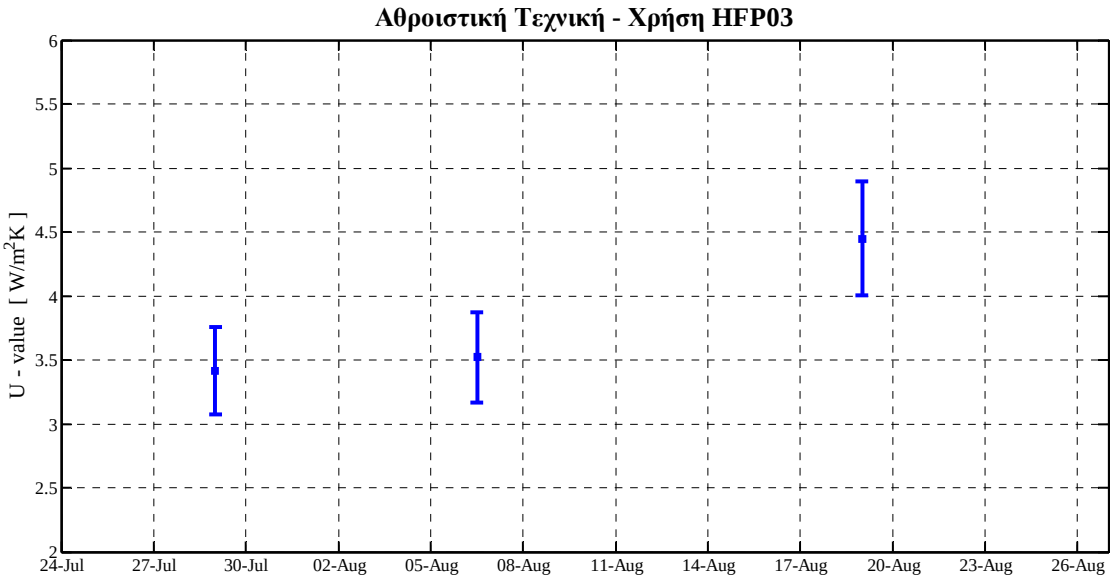
- **Χρήση του αισθητήρα HFP03**

Το συγκεκριμένο set μετρήσεων είναι δυνατόν να επιμερισθεί σε τρία διαδοχικά διαστήματα (N=3). Υπολογίζοντας σε καθένα από αυτά μια εκτίμηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, προκύπτει ο Πίνακας 5.30.

Πίνακας 5.30 - Αποτελέσματα σε κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**	
Από	Έως	U-value [W/m^{2}K]	Σφάλμα [10%]
24/07/2012	01/08/2012	3.41	± 0.34
01/08/2012	10/08/2012	3.52	± 0.35
10/08/2012	26/08/2012	4.45	± 0.45

Στο Σχήμα 5.75 παρουσιάζεται η διασπορά των αποτελεσμάτων των επί μέρους διαστημάτων



Σχήμα 5.75 - Διασπορά αποτελεσμάτων των επί μέρους χρονικών διαστημάτων, χρήση HFP03

Η εκτιμώμενη τιμή για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U-value γι' αυτό το set μετρήσεων είναι η μέση τιμή αυτών. Δηλαδή:

$U = 3.79 \ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U) = 14.98\%$

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι κι εδώ ο συντελεστής μεταβολής προκύπτει μεγαλύτερος από 10%, συνεπώς σύμφωνα με το πρότυπο η παραπάνω εκτίμηση για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας **δεν είναι αποδεκτή**.

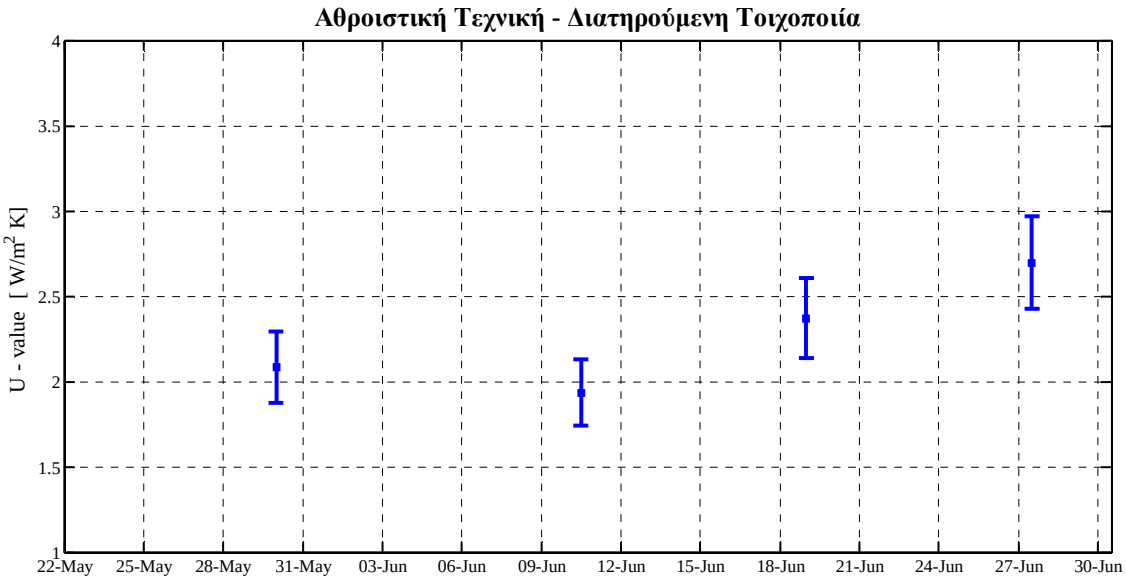
ΔΙΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Οι μετρήσεις για τη διατηρούμενη τοιχοποιία είναι δυνατόν να επιμερισθούν σε τέσσερα (N=4) χρονικά διαστήματα, καθένα από τα οποία εκτιμάται μια τιμή για τον συντελεστή U-value. Έτσι προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.31.

Πίνακας 5.31 - Αποτελέσματα σε κάθε επί μέρους χρονικό διάστημα

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**	
Από	Έως	U-value [W/m^{2}K]	Σφάλμα [10%]
22/05/2012	05/06/2012	2.08	± 0.21
05/06/2012	14/06/2012	1.94	± 0.19
14/06/2012	22/06/2012	2.37	± 0.24
22/06/2012	01/07/2012	2.70	± 0.27

Στο Σχήμα 5.76 παρουσιάζεται η διασπορά των τιμών των αποτελεσμάτων των επί μέρους διαστημάτων για τη διατηρούμενη τοιχοποιία.



Σχήμα 5.76 - Διασπορά αποτελεσμάτων των επί μέρους διαστημάτων διατηρούμενης τοιχοποιίας

Η εκτιμώμενη τιμή για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U-value γι' αυτό το set μετρήσεων είναι η μέση τιμή αυτών. Δηλαδή:

$U = 2.27\ W/m^2K$ με συντελεστή μεταβολής $V(U) = 14.79\%$

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι κι εδώ ο συντελεστής μεταβολής προκύπτει μεγαλύτερος από 10%, συνεπώς σύμφωνα με το πρότυπο η παραπάνω εκτίμηση για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της διατηρούμενης τοιχοποιίας **δεν είναι αποδεκτή**.

Η μέθοδος της αθροιστικής τεχνικής κατά το πρότυπο ASTM δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί στις μετρήσεις για τις πέτρινες τοιχοποιίες. Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής μεταβολής προκύπτει μεγαλύτερος από 10%, συνεπώς δεν ήταν ποτέ αποδεκτή η εκτιμώμενη τιμή. Σε καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις έγιναν αρκετές δοκιμές με διαφορετικό χρονικό διάστημα σύγκλισης n και ελέγχου σύγκλισης. Σε όλες τις δοκιμές, τόσο οι εκτιμήσεις, όσο και οι συντελεστές μεταβολής, δεν είχαν σημαντικές διαφορές από αυτές που παρουσιάστηκαν (για n=12h και 4 περιόδους ελέγχου σύγκλισης). Συνεπώς το πρόβλημα της μεγάλης διασποράς των εκτιμώμενων τιμών στα επί μέρους διαστήματα οφείλεται στη βαριά κατασκευή της τοιχοποιίας και στη μεγάλη θερμική μάζα αυτής. Οι βαριές τοιχοποιίες έχουν μια περίεργη συμπεριφορά εξαιτίας της μεγάλης χρονικής υστέρησης που παρουσιάζουν, καθώς αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας στη μάζα τους και την αποδίδουν μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι με τη μέθοδο της αθροιστικής τεχνικής, που δεν υπεισέρχεται ο παράγοντας της θερμοχωρητικότητας, δεν είναι δυνατή η εξαγωγή αποδεκτών αποτελεσμάτων.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ κατά ASTM C 1155-95 (2007)

Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Square) προσδιορίζει τα θερμικά χαρακτηριστικά της λιθόκτιστης τοιχοποιίας επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση για τη μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Πιο συγκεκριμένα, προσεγγίζεται η θερμική αγωγιμότητα k και η θερμοχωρητικότητα $\rho \cdot C_p$ της τοιχοποιίας που μελετάται πάχους L=600mm. Στη συνέχεια από τη θερμική αγωγιμότητα k και το πάχος L υπολογίζεται η θερμική αντίσταση και ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας.

Σύμφωνα με το θεωρητικό υπολογισμό της θερμικής διαπερατότητας, η ισοδύναμη θεωρητική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας είναι ίση με $k = U \cdot L \approx 1.63$ W/mK, για την ανακατασκευασμένη τοιχοποιία και $k = U \cdot L \approx 1.50$ W/mK για τη διατηρούμενη. Το διάστημα για το οποίο εκτιμήθηκε ότι κυμαίνεται η θερμική αγωγιμότητα του τοίχου είναι [1.0,3.0] και από το διάστημα αυτό λαμβάνονται Nk=201 ισαπέχουσες τιμές. Η εκτίμηση αυτού του διαστήματος έγινε αναζητώντας αρχικά την θερμική αγωγιμότητα σε μεγαλύτερο διάστημα.

Αντίστοιχα το διάστημα για το οποίο κυμαίνεται η πυκνότητα θα είναι [1500,2000] και λαμβάνονται Nρ=26 ισαπέχουσες τιμές. Ενώ για η θερμοχωρητικότητα εκτιμάται να κυμαίνεται στο διάστημα [1000,1800] λαμβάνοντας Nc =41 ισαπέχουσες τιμές.

Για την επίλυση της εξίσωσης ο χώρος, που είναι το πάχος της τοιχοποιίας, χωρίζεται σε NW=50 κόμβους. Σύμφωνα με την ανεξαρτησία του πλέγματος και διατηρώντας το λόγο $\frac{L}{\Delta x}$ σταθερό με αυτό στην περίπτωση της τοιχοποιίας του πειραματικού οικίσκου, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν NW=100 κόμβοι, αλλά εξαιτίας του μεγάλου υπολογιστικού κόστους χρησιμοποιήθηκαν 50 κόμβοι, αφού παρατηρήθηκε ότι ούτε τα αποτελέσματα στα θερμικά χαρακτηριστικά αλλάζουν, ούτε και η προσαρμογές των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής.

Από την άλλη, το χρονικό βήμα λαμβάνεται ίσο με dt=600sec, καθώς έχει δειχθεί ότι είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι των μετρήσεων ανά 10 λεπτά (παράρτημα Γ).

Σε κάθε περίπτωση, η διάρκεια συλλογής των δεδομένων είναι πάρα πολύ μεγάλη ώστε το πειραματικό σφάλμα για την εκτίμηση της θερμικής διαπερατότητας είναι 6%, με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, για κάθε set μετρήσεων.

Όπως και προηγουμένως, έτσι και γι' αυτήν την τοιχοποιία χρησιμοποιούνται τα ανηγμένα σφάλματα για την προσαρμογή των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής, σ_{HF} και σ_{Tin} αντίστοιχα, όπως ορίσθηκαν ανωτέρω και από τις εξισώσεις (5.9) και (5.10).

Σε κάθε περίπτωση οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μέθοδο ξεκινούν και τελειώνουν την ίδια ώρα, συμπληρώνοντας ακέραιο πολλαπλάσιο 24ωρών.

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης και η εύρεση των βέλτιστων τιμών των θερμικών χαρακτηριστικών της κάθε τοιχοποιίας, για τις οποίες υπάρχει βέλτιστη προσαρμογή της καμπύλης της εσωτερικής θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα δεν θα άλλαζαν ακόμα και αν επιλεγόταν η προσαρμογή της ροής θερμότητας. Η επίλυση της μεθόδου έγινε σε κώδικα στο MATLAB όπου περιγράφεται στο Παράρτημα Γ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση.

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

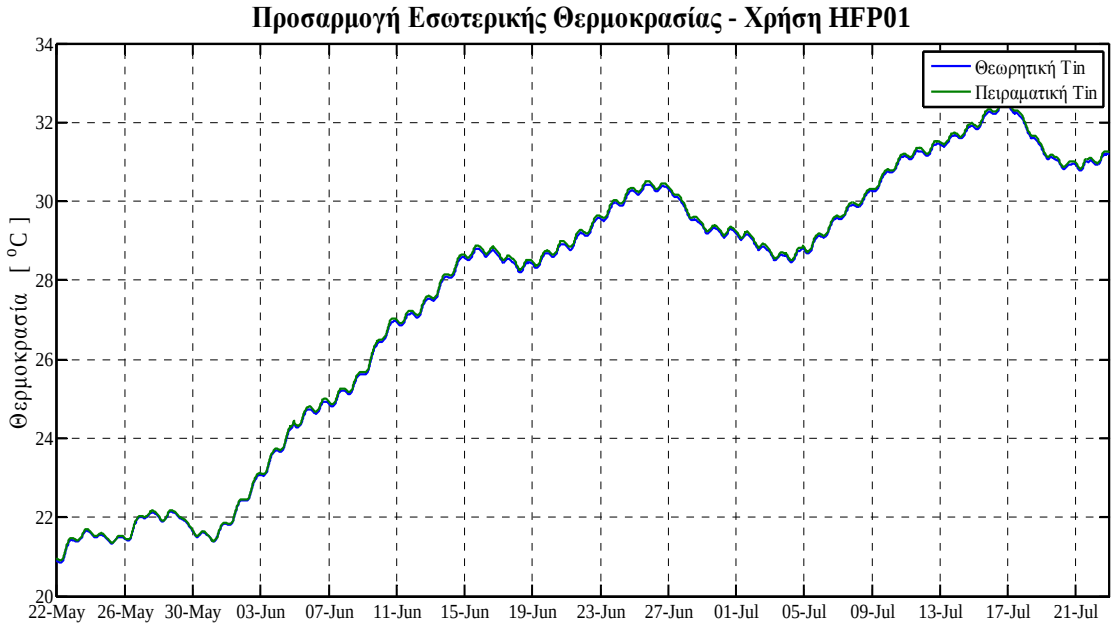
- **Χρήση του αισθητήρα HFP01**

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σύμφωνα με τα παραπάνω για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.32.

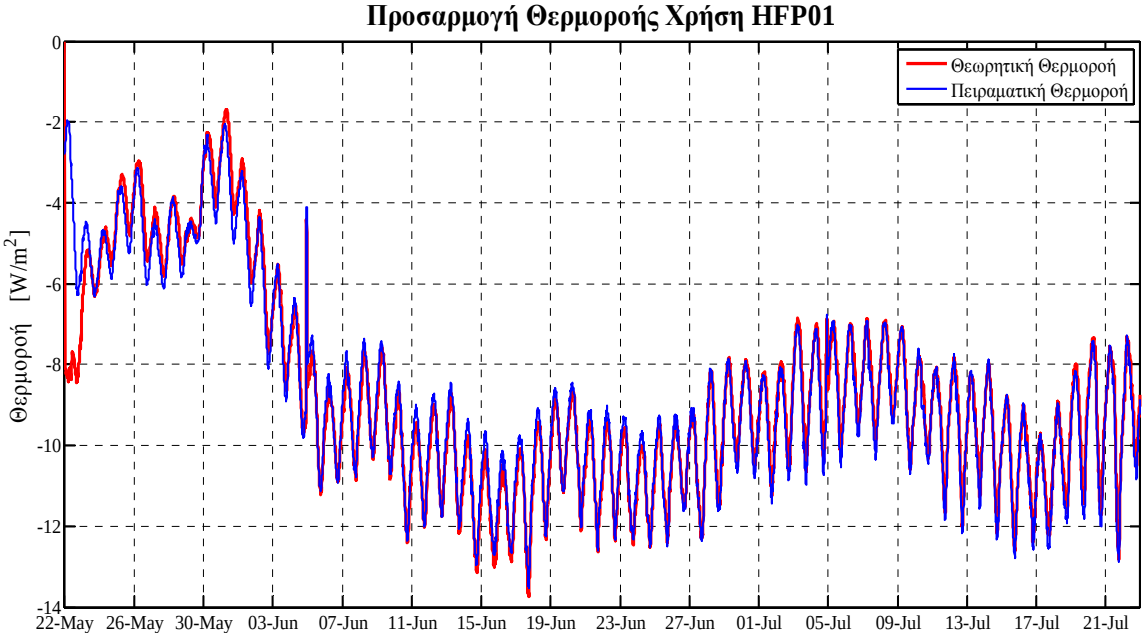
Πίνακας 5.32-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων για χρήση HFP01

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} *[%]*	σ_{HF} *[%]*
22/05/2012 13:00	23/07/2012 13:00	**3.27**	**± 0.20**	2142.0	0.19	2.94

Στα Σχήματα 5.77 και 5.78 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας.



Σχήμα 5.77 - Προσαρμογή θερμοκρασίας στην ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, χρήση HFP01



Σχήμα 5.78 - Προσαρμογή θερμοροής στην ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, χρήση HFP01

Από τα αποτελέσματα της μεθόδου για το συγκεκριμένο set μετρήσεων παρατηρείται μια πάρα πολύ καλή προσαρμογή τόσο για την εσωτερική θερμοκρασία, όσο και για τη θερμοροή, κάτι το οποίο φαίνεται τόσο οπτικά όσο και από τα ανηγμένα σφάλματα. Στις καμπύλες της ροής θερμότητας παρατηρείται μια μικρή καθυστέρηση περίπου δύο ημερών ώστε να ξεκινούν να συμβαδίζουν. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στην υπόθεση των αρχικών θερμοκρασιών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, κάτι το οποίο δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα, αφού έχει προβλεφθεί να μην λαμβάνονται υπ' όψιν οι πρώτες μέρες.

- **Χρήση του αισθητήρα HFP03**

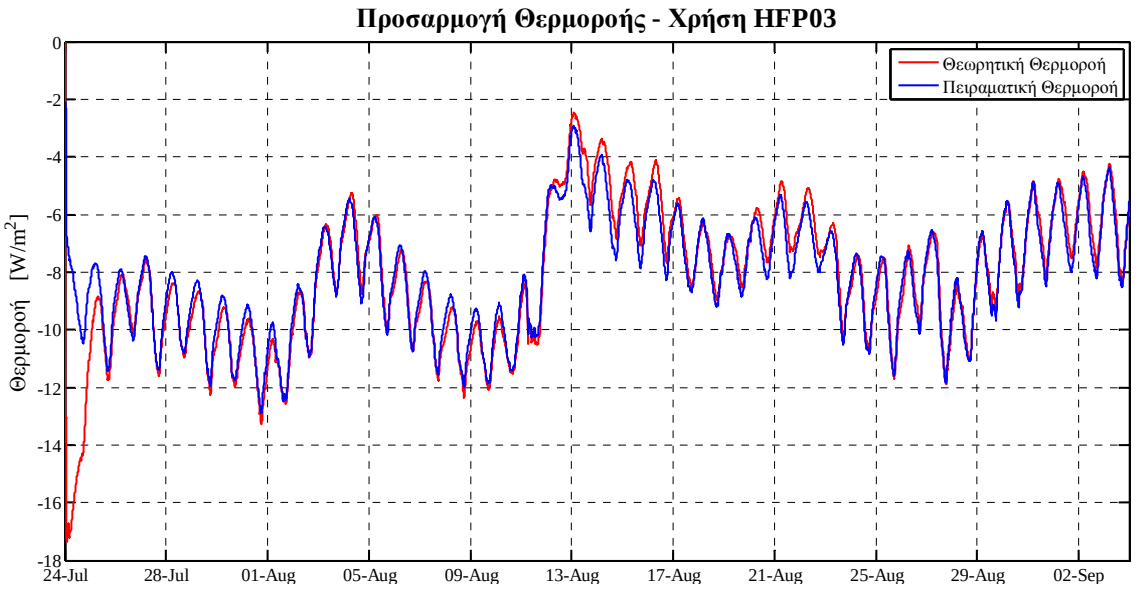
Στον Πίνακα 5.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

Πίνακας 5.33-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων για χρήση HFP03

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} [%]	σ_{HF} [%]
24/07/2012 14:00	04/09/2012 14:00	3.78	± 0.23	2525.6	0.13	4.46

Στη Σχήματα 5.79 και 5.80 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προσαρμογής των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής, όπως προέκυψαν από την ανάλυση της μεθόδου:

Σχήμα 5.79 - Προσαρμογή θερμοκρασίας στην ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, χρήση HFP03



Σχήμα 5.80 - Προσαρμογή θερμοροής στην ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, χρήση HFP03

Στα διαγράμματα παρατηρείται μια πολύ καλή προσαρμογή και στα δύο μεγέθη, κυρίως βέβαια στην εσωτερική θερμοκρασία. Για τη θερμοροή υπάρχει και πάλι μια μικρή καθυστέρηση 2 περίπου ημερών μέχρις ότου η θεωρητική καμπύλη να ακολουθήσει την αντίστοιχη πειραματική. Παρατηρώντας προσεκτικά το διάγραμμα της θερμοροής, σε ορισμένες ημέρες, φαίνεται να υπάρχει μία διαφορά φάσης λίγων ωρών μεταξύ των δύο καμπυλών, κάτι το οποίο οφείλεται σε πιθανόν εσφαλμένες τιμές στα μεγέθη ρ και C_p. Για το λόγο αυτό ίσως χρειαζόταν ένα μεγαλύτερο πλήθος κόμβων για τα μεγέθη αυτά, κάτι το οποίο θα απαιτούσε περισσότερο υπολογιστικό χρόνο. Η παρατήρηση αυτή είχε προβλεφθεί βάζοντας περισσότερους κόμβους στην αγωγιμότητα k και δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας.

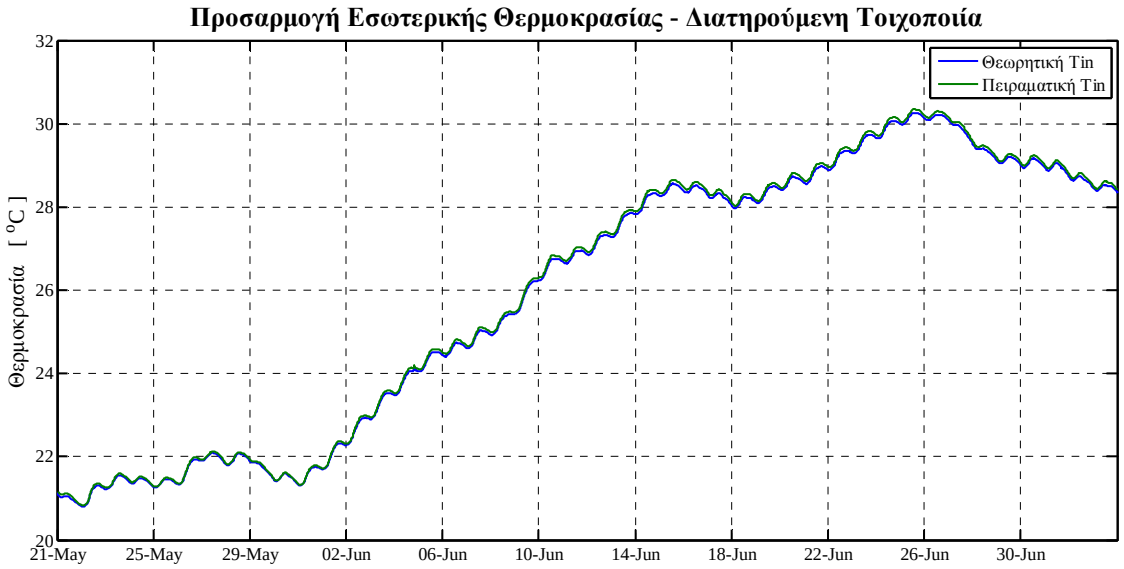
ΔΙΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Στον Πίνακα 5.34 παρατίθενται τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

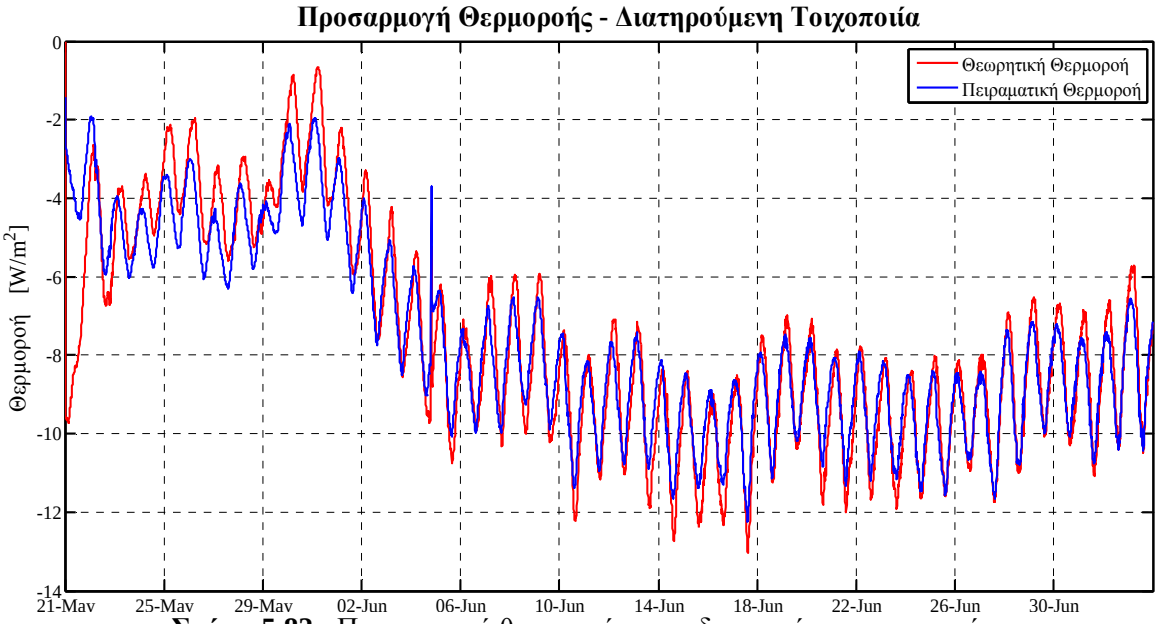
Πίνακας 5.34-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων διατηρούμενης τοιχοποιίας

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} [%]	σ_{HF} [%]
21/05/2012 16:00	04/07/2012 16:00	**2.65**	**± 0.16**	1960.8	0.21	8.67

Στα Σχήματα 5.81 και 5.82 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προσαρμογής που βρέθηκαν από την ανάλυση αυτή:



Σχήμα 5.81 - Προσαρμογή θερμοκρασίας στη διατηρούμενη τοιχοποιία



Σχήμα 5.82 - Προσαρμογή θερμοροής στην διατηρούμενη τοιχοποιία

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 5.81 και 5.82 παρατηρούμε πολύ καλές προσαρμογές σε εσωτερική θερμοκρασία και ροή θερμότητας. Για το τελευταίο, τα αποτελέσματα της επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης προβλέπουν ένα πεδίο θερμοροής με μεγαλύτερα μέγιστα και μικρότερα ελάχιστα. Επίσης παρατηρείται η ίδια μεγάλη καθυστέρηση, μιάμιση με δύο ημερών, που παρατηρήθηκε και στην ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, για να φτάσει η θεωρητική καμπύλη την πειραματική, κάτι το οποίο είχε προβλεφθεί και δεν επηρέασε το τελικό αποτέλεσμα.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ κατά ISO 9869:1994

Η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας με τη δυναμική μέθοδο, περιγράφεται στην ενότητα 4.3.4. Η μέθοδος προσδιορίζει τη ροή θερμότητας κάθε χρονικής στιγμής σε συνάρτηση με τις επιφανειακές θερμοκρασίες της τοιχοποιίας εκείνης της χρονικής στιγμής και p χρονικών στιγμών νωρίτερα. Ο αριθμός των εξισώσεων p εξαρτάται από τη χρονική σταθερά τ της τοιχοποιίας. Έτσι ο αριθμός p εκτιμάται, όπως και σε προηγούμενη τοιχοποιία από τη σχέση $p = \frac{1.8\tau}{\Delta t}$, καθώς η σταθερά τ θα πρέπει να είναι μικρότερη από το γινόμενο p·Δt. Η χρονική σταθερά τ, για διάφορες τοιχοποιίες εκτιμάται από την εξίσωση (512). Έτσι θεωρώντας ότι οι λιθόκτιστες τοιχοποιίες είναι μονοστρωματικές με θερμικά χαρακτηριστικά k, ρ και C_p όπως προέκυψαν στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, η χρονική σταθερά εκτιμάται περίπου 68000sec (18.9hr). Επίσης στη δυναμική μέθοδο χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι των μετρήσεων ανά μία ώρα, συνεπώς Δt=3600sec. Έτσι προκύπτει ότι το πλήθος των εξισώσεων p θα είναι ίσος με $p = \frac{1.8\tau}{\Delta t} = 36$.

Στη συνέχεια η χρονική σταθερά τ_1 θα κυμαίνεται στο διάστημα $\frac{\Delta t}{10} \langle \tau_1 \langle p\frac{\Delta t}{2}$,δηλαδή $360 < \tau_1 < 64800$,ενώ ο λόγος r μεταξύ των τιμών 3 και 13. Εδώ, το διάστημα του λόγου r είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο για τον πειραματικό οικίσκο και αυτό που προτείνει το πρότυπο (3 έως 10), επειδή κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η βέλτιστη τιμή του λόγου έπαιρνε μεγάλες τιμές, πιθανόν εξαιτίας της πολύ βαριάς λιθόκτιστης τοιχοποιίας. Τα παραπάνω διαστήματα χωρίζονται σε Nτ=3223 και Nr=101 κόμβους αντίστοιχα, για την εκτίμηση του βέλτιστου συνδυασμού τ_1 και r.

Όπως σε κάθε περίπτωση εκτίμησης και σύγκρισης μιας θεωρητικής τιμής για ένα μέγεθος με την αντίστοιχη πειραματική εισάγεται ένα ανηγμένο σφάλμα, έτσι και σε αυτή τη μέθοδο εισάγεται το ανηγμένο σφάλμα σ_{HF} το οποίο εκφράζει την προσαρμογή των εκτιμώμενων τιμών της ροής θερμότητας από τη δυναμική μέθοδο με τις πειραματικές τιμές. Το σφάλμα αυτό ορίζεται από τη σχέση (5.13).

Η μέθοδος επιλύθηκε σε κώδικά στο MATLAB, βρίσκοντας τις βέλτιστες τιμές τ_1 και r, για τις οποίες ελαχιστοποιείται το άθροισμα της εξίσωσης (4.40) απ' όπου θα προκύψει ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας και η θεωρητική τιμή ροής θερμότητας. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για την ανακατασκευασμένη και τη διατηρούμενη λιθόκτιστη τοιχοποιία.

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

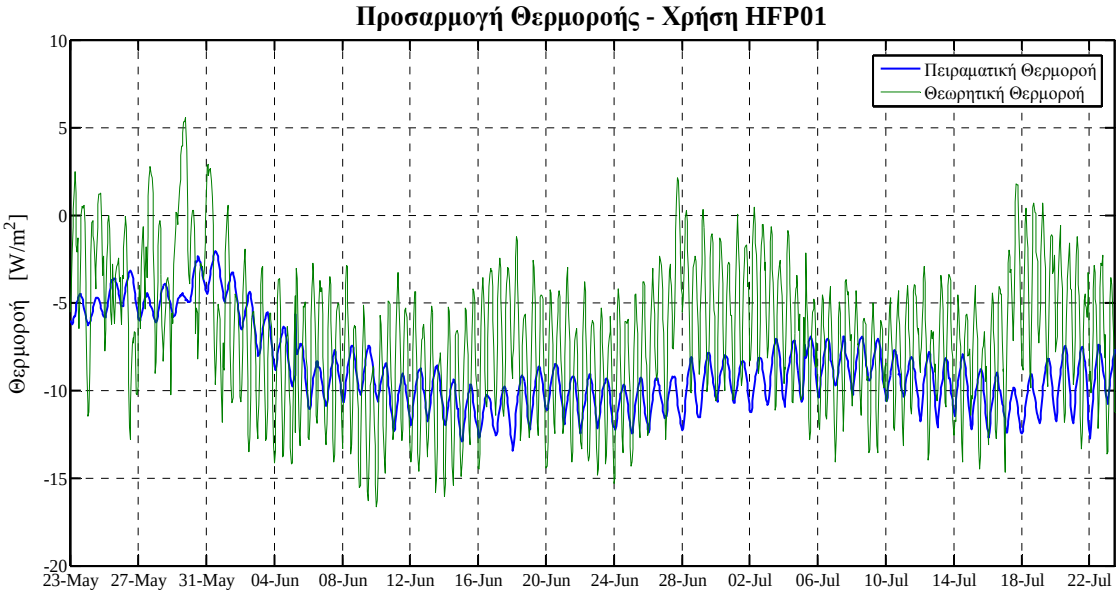
- **Χρήση του αισθητήρα HFP01**

Εφαρμόζοντας τη δυναμική μέθοδο, σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν ανωτέρω, για το συγκεκριμένο set μετρήσεων, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.35.

Πίνακας 5.35-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου για χρήση HFP01

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτιμήσεις**				**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	*r*	σ_{HF} *[W/m²]*
21/05/2012 18:00	23/07/2012 18:00	**2.17**	**± 0.22**	59540	4.8	0.1162

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.83 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητική καμπύλης της θερμοροής στην αντίστοιχη πειραματική.



Σχήμα 5.83 - Προσαρμογή θερμοροής στην ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, χρήση HFP01

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 5.83, η προσαρμογή των καμπυλών δεν είναι καθόλου καλή. Η διακύμανση της θεωρητικής ροής θερμότητας είναι πολύ μεγαλύτερη από την πειραματική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δυναμική μέθοδος απαιτεί μεγάλες διακυμάνσεις σε θερμοκρασίες και ροή θερμότητας, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην περίπτωση αυτή. Ακόμη απαιτείται ένα ψευδο-μόνιμο πεδίο, κάτι που όπως είναι φανερό από το Σχήμα 5.68, δεν συμβαίνει εξαιτίας της απότομης αλλαγής της μέσης τιμής της ροής θερμότητας. Αυτό δικαιολογεί και την μεγάλη διαφορά στο αποτέλεσμα του συντελεστή U-value, σε σχέση με το αντίστοιχο

αποτέλεσμα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, διαφορά 40.5%. Συνεπώς το αποτέλεσμα δεν μπορεί να γίνει δεκτό και η χρειάζεται επιπλέον εμβάθυνση στη συγκεκριμένη μεθοδολογία για αυτού του τύπου τις τοιχοποιίες.

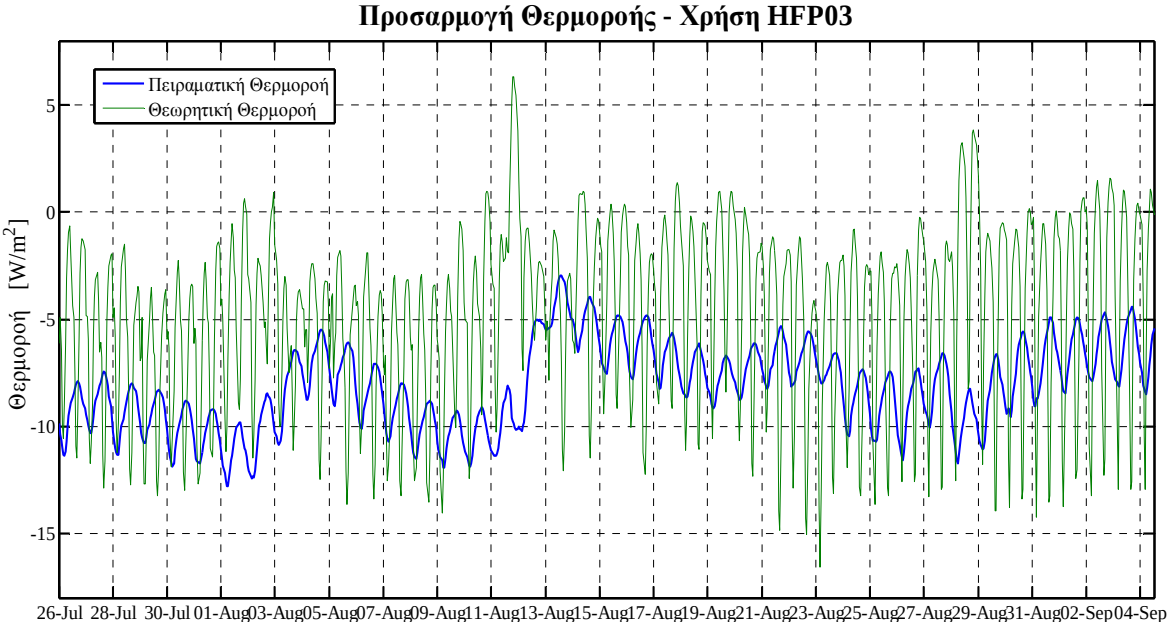
- **Χρήση του αισθητήρα HFP03**

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα από τη δυναμική μέθοδο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.36-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου για χρήση HFP03

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτιμήσεις**				**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	r	σ_{HF} $[W/m^2]$
24/07/2012 14:30	04/09/2012 14:30	**2.30**	**± 0.23**	7380	6.6	0.1776

Η προσαρμογή των καμπυλών της θερμοροής που προέκυψαν από την ανάλυση της δυναμικής μεθόδου, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.84.



Σχήμα 5.83 - Προσαρμογή θερμοροής στην ανακατασκευασμένη τοιχοποιία, χρήση HFP03

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, (χρήση του αισθητήρα HFP01), η προσαρμογή των καμπυλών της θερμοροής δεν είναι η αποδεκτή. Η θεωρητική καμπύλη παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη περίπτωση και είναι μία ένδειξη ότι το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας δεν είναι ακριβή. Οι λόγοι είναι οι ίδιοι με την προηγούμενη περίπτωση. Η διαφορά με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων είναι 48.6%. Έτσι το αποτέλεσμα της δυναμικής μεθόδου **δεν γίνεται αποδεκτό**.

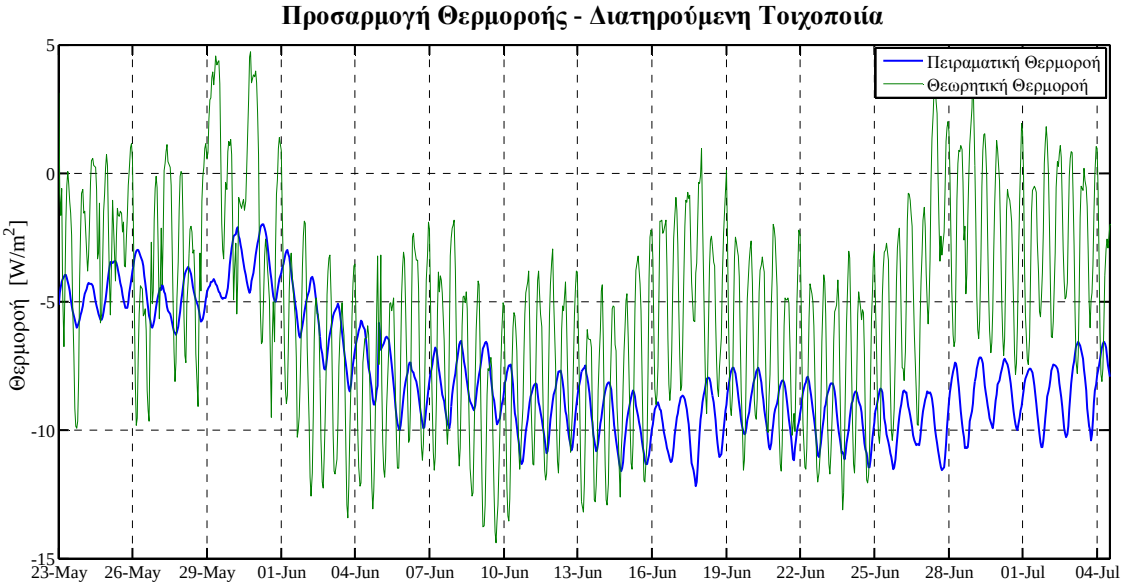
ΔΙΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Στον Πίνακα 5.37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της δυναμικής μεθόδου για τις συγκεκριμένες μετρήσεις:

Πίνακας 5.37-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου διατηρούμενης τοιχοποιίας

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτιμήσεις**				**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	*r*	σ_{HF} *[W/m²]*
22/05/2012 00:00	05/07/2012 00:00	**1.29**	**± 0.13**	6400	12.8	0.1496

Στο Σχήμα 5.84 παρουσιάζεται το διάγραμμα προσαρμογής των καμπυλών της ροής θερμότητας, όπως προέκυψε από την ανάλυση της δυναμικής μεθόδου των μετρήσεων.



Σχήμα 5.84 - Προσαρμογή θερμοροής στην διατηρούμενη τοιχοποιία

Όπως φαίνεται τόσο από το διάγραμμα όσο και από το ανηγμένο σφάλμα, η προσαρμογή των καμπυλών από αυτή την ανάλυση δεν είναι καθόλου καλή, όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, της ανακατασκευασμένης τοιχοποιίας. Η διαφορά του αποτελέσματος του συντελεστή U-value σε σχέση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι 69.0%. Η θεωρητική καμπύλη παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις όπου σε πολλά σημεία απομακρύνεται αρκετά από την πειραματική. Αυτό σημαίνει ότι η δυναμική μέθοδος δεν έδωσε αποδεκτά αποτελέσματα εξαιτίας των μικρών διακυμάνσεων της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η μέθοδος αυτή θέτει ως απαραίτητη προϋπόθεση την ύπαρξη μεγάλων διακυμάνσεων σε ροή θερμότητας και θερμοκρασιών, αλλά και ένα ψευδο-μόνιμο πεδίο θερμοροής, κάτι που δεν υπήρχαν ούτε σε αυτή την περίπτωση. Για το λόγο αυτό το αποτέλεσμα **δεν γίνεται αποδεκτό**. Να σημειωθεί ότι έγιναν επιπλέον δοκιμές, σε όλες τις περιπτώσεις, αλλάζοντας τον

αριθμό των εξισώσεων p, τα αποτελέσματα και οι προσαρμογές των καμπυλών δεν βελτιώθηκαν.

5.2.2.6. **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Μετρήσεις για λιθόκτιστη τοιχοποιία έγιναν σε δύο ειδών τοιχοποιίες, σε μία διατηρούμενη τοιχοποιία του 16ου αιώνα και σε μία ανακατασκευασμένη. Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η HUKSEFLUX/BETATHERM. Για την ανακατασκευασμένη τοιχοποιία λήφθηκαν δύο set μετρήσεων, ένα με τον αισθητήρα θερμοροής HFP01 και ένα με τον HFP03, ενώ για τη διατηρούμενη ένα set με τον αισθητήρα HFP01. Για τις συγκεκριμένες τοιχοποιίες δεν ήταν δυνατή η χρήση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις επεξεργάσθηκαν σύμφωνα με τις μεθόδους που προτείνουν τα πρότυπα ISO και ASTM και τα αποτελέσματα όπου προέκυψαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.38.

Πίνακας 5.38 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την λιθόκτιστη τοιχοποιία

ΛΙΘΟΚΤΙΣΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ - ΑΡΧΟΝΤΙΚΟ ΜΠΕΝΙΖΕΛΩΝ			
U-value (W/m^2K)	**ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗ (NEW)**		**ΔΙΑΤΗΡΟΥΜΕΝΗ (OLD)**
	HFP01	**HFP03**	
Average Method	2.81	3.49	2.41
Summation Technique	-	-	-
Least Square	3.27	3.78	2.65
Dynamic Method	2.17	2.30	1.29

Όπως παρατηρήθηκε στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.82, 5.83 και 5.84 για την προσαρμογή των καμπυλών της θερμοροής από την ανάλυση της δυναμικής μεθόδου για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, τα αποτελέσματα που προκύπτουν δε μπορούν να γίνουν αποδεκτά εξαιτίας των μικρών διακυμάνσεων της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας όπου για τη μέθοδο αυτή είναι απαραίτητη. Επίσης η μέθοδος προϋποθέτει μεγάλες διακυμάνσεις και στη ροή θερμότητας, καθώς επίσης και ένα ψευδο-μόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο. Αυτό δικαιολογεί και τη μεγάλη διαφορά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των άλλων μεθόδων. Θα χρειαστεί να γίνει περεταίρω ανάλυση αυτής της μεθοδολογίας για αυτού του είδους τις τοιχοποιίες.

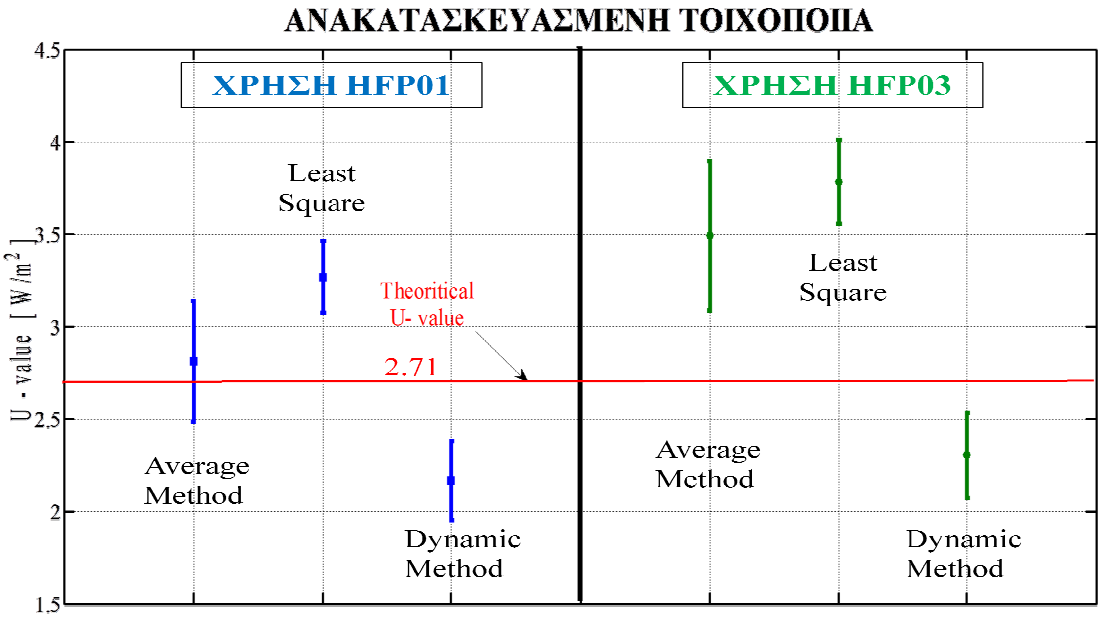
Επίσης, είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι η αθροιστική τεχνική του προτύπου ASTM, δεν μπορεί να δώσει επιθυμητό αποτέλεσμα εξαιτίας της μεγάλης διασποράς των συντελεστών U-value που προκύπτουν από τα επί μέρους χρονικά διαστήματα κάθε περίπτωσης. Αυτό σημαίνει ότι σε τοιχοποιίες μεγάλης θερμικής μάζας η τεχνική αυτή δεν λειτουργεί πιθανόν εξαιτίας της μεγάλης θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται και αποβάλλεται μετά από αρκετό χρονικό διάστημα. Έτσι η συμπεριφορά της τοιχοποιίας είναι διαφορετική σε κάθε χρονική περίοδο, ανάλογα με τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον. Βέβαια, για να ειπωθεί αυτό με βεβαιότητα θα πρέπει να γίνουν επιπλέον μετρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια του

έτους, τόσο στις ίδιες τοιχοποιίες, όσο και σε διαφορετικές με παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά. Η τεχνική αυτή δε λαμβάνει υπ' όψιν της τη θερμική μάζα της τοιχοποιίας και αυτός είναι ένας σημαντικό λόγος που δυσκολεύεται να εφαρμοσθεί σε βαριές τοιχοποιίες.

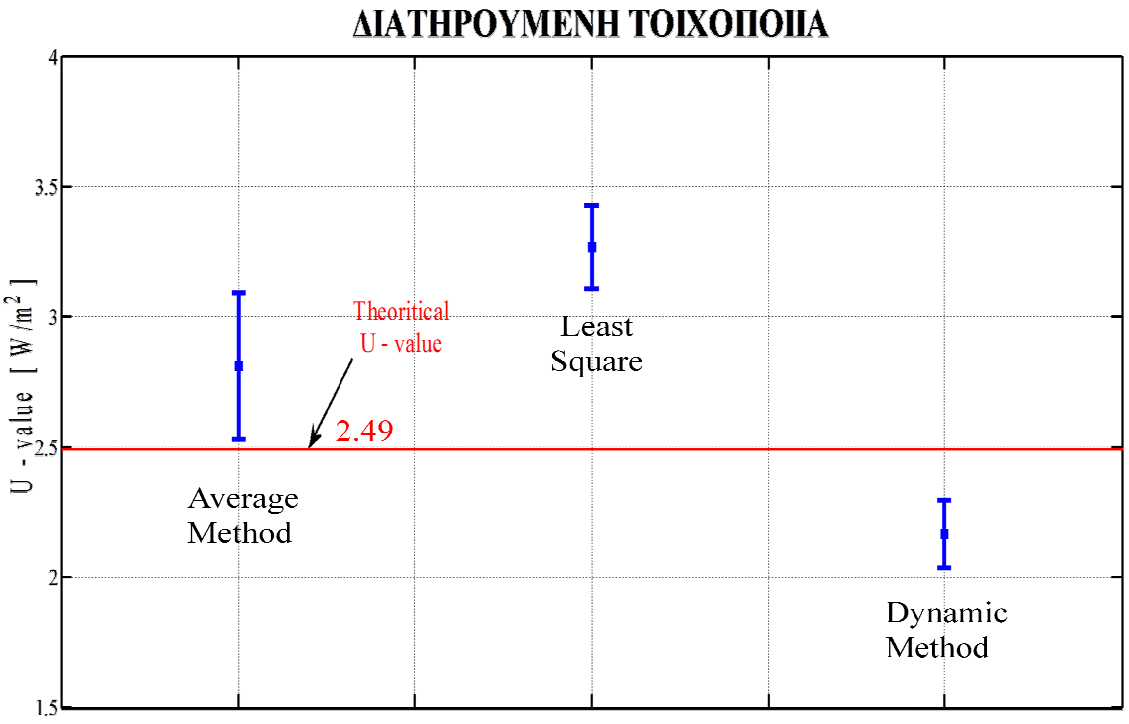
Για τα αποτελέσματα της Μεθόδου της Μέσης Τιμής κατά ISO, παρατηρήθηκε ότι απαιτούνταν μεγάλο χρονικό διάστημα (από 7 έως 11 ημέρες) για να επιτευχθεί η σύγκλιση, όπως δείχνουν και τα διαγράμματα των Σχημάτων 5.71, 5.72 και 5.73. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην πολύ βαριά κατασκευή και στην αποθηκευμένη ενέργεια η οποία αποδίδεται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων κρίνονται αρκετά αξιόπιστα, καθώς παρουσιάζεται μια πολύ καλή προσαρμογή των καμπυλών, τόσο της εσωτερικής θερμοκρασίας, όσο και της ροής θερμότητας (ειδικά στη διατηρούμενη τοιχοποιία). Εδώ πιθανόν το αποτέλεσμα να ευνοήθηκε από τη μεγάλη διάρκεια των μετρήσεων, αλλά και από τις πολύ μικρές διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Στα Σχήματα 5.85 και 5.86 παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα σφάλματά τους, για κάθε τοιχοποιία.



Σχήμα 5.85 - Συγκντρωτικά αποτελέσματα για την ανακατασκευασμένη τοιχοποιία



Σχήμα 5.86 - Συγκντρωτικά αποτελέσματα για τη διατηρούμενη τοιχοποιία

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι τα μόνο τα αποτελέσματα της μεθόδου της μέσης τιμής προσεγγίζουν τη θεωρητική τιμή που υπολογίστηκε στην ενότητα 5.2.2.2. Από αυτό όμως δε μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα για τις μεθόδους καθώς, όπως αναφέρθηκε στη σχετική ενότητα, η τιμή των θεωρητικών συντελεστών U-value είναι ενδεικτική με πολλούς παράγοντες αβεβαιότητας. Όμως, όπως φαίνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα, η ανακατασκευασμένη τοιχοποιία δείχνει να έχει μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας από τη διατηρούμενη, κάτι για το οποίο είχε προβλεφθεί και κατά τον προσδιορισμό των θεωρητικών συντελεστών θερμικής διαπερατότητας των τοιχοποιιών. Ωστόσο για να βγει ένα τέτοιο συμπέρασμα με βεβαιότητα θα πρέπει να συνεχιστούν οι μετρήσεις τόσο στα ίδια σημεία κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους, όσο και σε άλλα σημεία της τοιχοποιίας.

Ακόμη τα αποτελέσματα των μεθόδων της μέσης τιμής και των ελαχίστων τετραγώνων φαίνεται να έχουν διαφορές, όμως όπως δείχνει και το διάγραμμα οι διαφορές αυτές δεν είναι μεγάλες, καθώς οι περιοχές των ορίων των σφαλμάτων είτε εμπεριέχονται, είτε είναι κοντά η μία με την άλλη.

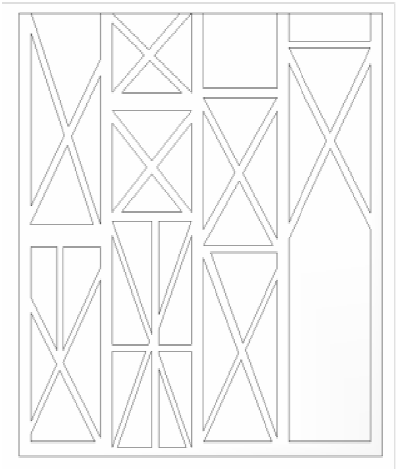
Τέλος, οι συντελεστές που προέκυψαν για την ανακατασκευασμένη τοιχοποιία για τις δύο περιπτώσεις, χρήση HFP01 και HFP03, φαίνεται να έχουν μια μικρή διαφορά μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται είτε στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, είτε σε σφάλματα κατά την τοποθέτηση των αισθητήρων. Είναι δηλαδή πολύ πιθανό κατά την τοποθέτηση κυρίως των αισθητήρων HFP03, τα οποία έχουν μεγάλη διάμετρο, να εγκλωβίστηκε αέρας μεταξύ αισθητήρα και λίθου. Η επιφάνεια της τοιχοποιίας είναι πολύ τραχιά εξαιτίας των ακατέργαστων λίθων και πιθανόν το σφάλμα από αυτή την τοποθέτηση να είναι μεγαλύτερο από αυτό που προβλέφθηκε.

5.2.3. ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

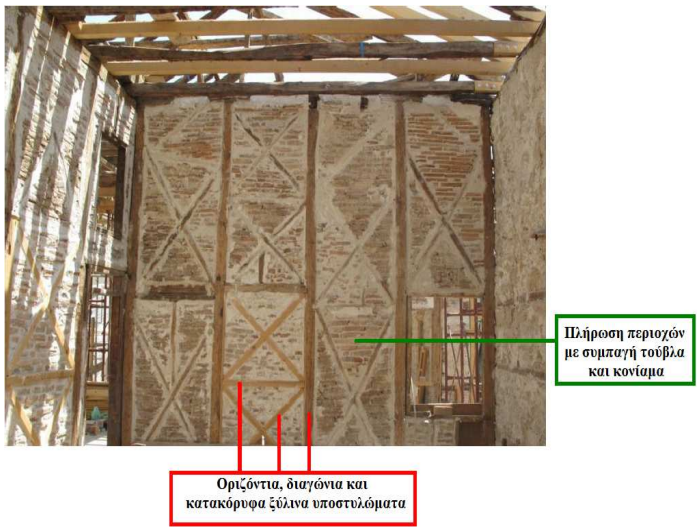
Η ξυλόπηκτη τοιχοποιία στην οποία έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας βρίσκεται στο ίδιο κτίριο με αυτές των λιθόκτιστων τοιχοποιιών, αναλύθηκαν στην ενότητα 5.2.2. Η συγκεκριμένη τοιχοποιία ανακατασκευάστηκε πρόσφατα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρωτότυπου κτιρίου. Χαρακτηριστικό της τοιχοποιίας είναι οι δύο περιοχές από τις οποίες αποτελείται, η περιοχή του ξύλου και η περιοχή των οπτόπλινθων.

5.2.3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Η ξυλόπηκτη τοιχοποιία έχει κατασκευαστεί από πυκνά κατακόρυφα ξύλινα υποστυλώματα, διατομής 14×14 cm, σε απόσταση 1.60m, και από οριζόντιους και διαγώνιους ξύλινούς δοκούς μικρότερης διατομής, 6×12 cm τα οποία συνδέονται με τα υποστυλώματα με τη βοήθεια εντορμιών και γυφτόκαρφων. Τα κενά μεταξύ των ξύλων πληρούνται από συμπαγείς οπτόπλινθους διαστάσεων 25×14×4.5 cm χρησιμοποιώντας ασβεστοκονίαμα και συνδετικό επίχρισμα στο μεγαλύτερο ποσοστό ALBARIA Struttura. Στη συνέχεια, τόσο η εσωτερική, όσο και η εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας, καλύπτεται από διαπνέον επίχρισμα, πάχους 3.5 έως 5 cm, κατά της υγρασίας 4 στρώσεων, τύπου ALBARIA SP2 με υδραυλική άσβεστο χωρίς τσιμέντο. Όλα τα επιχρίσματα περιέχουν ίνες προπυλενίου. Επιπλέον, στα επιχρίσματα ενσωματώθηκε ένα ανοξείδωτο πλέγμα, τύπου catnic (mipeco), καρφωμένο κάθε 20 με 30 cm στα ξύλινα στοιχεία του πλαισίου και περιστασιακά στο κονίαμα του τοίχου.



Σχήμα 5.87 - Το σχέδιο της περιοχής των ξύλινων δοκών



Σχήμα 5.88 - Η ξυλόπηκτη τοιχοποιία χωρίς το επίχρισμα

5.2.3.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Ο θεωρητικός υπολογισμός της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 **[21]**, χωρίζοντας το κέλυφος σε δύο περιοχές: την περιοχή των οπτόπλινθων και στην περιοχή των ξύλινων δοκών. Η πρώτη περιοχή αντιστοιχεί περίπου στο 80% της συνολικής τοιχοποιίας και αποτελείται από τρία στρώματα: το στρώμα με τους συμπαγείς οπτόπλινθους και του κονιάματος, πάχους 14cm, και δύο στρώματα επιχρίσματος, πάχους 4cm το καθένα, εκατέρωθεν του πρώτου. Η δεύτερη περιοχή, αντιστοιχεί στο υπόλοιπο 20% του κελύφους και αποτελείται επίσης από τρία στρώματα: το στρώμα του ξύλου, πάχους 14cm, και δύο στρώματα επιχρίσματος, με πάχος 4cm το καθένα, εκατέρωθεν του πρώτου.

Οι οπτόπλινθοι που χρησιμοποιούνται είναι συμπαγείς και χρησιμοποιείται συνδετικό κονίαμα Albaria Struttura. Οι ιδιότητες των οπτόπλινθων συμπεριλαμβανομένου και του κονιάματος λαμβάνονται από πίνακα του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδους (ΤΟΤΕΕ) **[27]** για πυκνότητα 1500kg/m^3. Οι ξύλινοι δοκοί είναι από πεύκο και τα θερμικά χαρακτηριστικά τους λαμβάνονται από τον ίδιο πίνακα. Τέλος το επίχρισμα που χρησιμοποιείται είναι το Albaria SP2, με ιδιότητες που λήφθηκαν επίσης από τον πίνακα του Τ.Ε.Ε., θεωρώντας ότι έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το ασβεστοκονίαμα. Στον Πίνακα 5.39 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών αυτών.

Πίνακας 5.39 - Ιδιότητες υλικών ξυλόπηκτης τοιχοποιίας

	Θερμική Αγωγιμότητα k (W/m^{o}C)	**Πυκνότητα ρ (kg/m^3)**	**Θερμοχωρητικότητα C_p (J/kgK)**
Οπτόπλινθοι & Κονίαμα	0.60	1500	1000
Ξύλινοι Δοκοί (Πεύκο)	0.14	600	1600
Επίχρισμα Albaria SP2	0.87	1800	1000

Ο προσδιορισμός του θεωρητικού συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας γίνεται για κάθε μια από τις παραπάνω περιοχές, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 **[21]** και όσα περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2 θεωρώντας κάθε στρώση ομοιόμορφη. Τα αποτελέσματα για κάθε στρώση της περιοχής των οπτόπλινθων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.40.

Πίνακας 5.40 - Θερμική αντίσταση κάθε στρώσης της περιοχής των οπτόπλινθων

Υλικό Στρώσης	**Πάχος d (m)**	**Θερμική αντίσταση R (m^{2}K/W)**
Επίχρισμα	0.040	0.04598
Οπτόπλινθοι & Κονίαμα	0.140	0.23333
Επίχρισμα	0.040	0.04598

Η θερμική αντίσταση της περιοχής των οπτόπλινθων ισούται με το άθροισμα των επιμέρους στρώσεων:

$$R_{οπτόπλινθοι} = R_{επίχρισμα} + R_{οπτόπλινθοι} + R_{επίχρισμα} = 0.32529 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Έτσι ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας της περιοχής αυτής είναι:

$$U_{οπτόπλινθοι} = \frac{1}{R_{οπτόπλινθοι}} = 3.07 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης της περιοχής των ξύλινων δοκών. Τα αποτελέσματα για την περιοχή αυτή παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.41.

Πίνακας 5.41 - Θερμική αντίσταση κάθε στρώσης της περιοχής των ξύλινων δοκών

	Υλικό Στρώσης	**Πάχος d (m)**	**Θερμική αντίσταση R (m^2K/W)**
Περιοχή Ξύλινων Δοκών	Επίχρισμα	0.040	0.04598
	Ξύλινοι δοκοί	0.140	1.00000
	Επίχρισμα	0.040	0.04598

Η θερμική αντίσταση της συγκεκριμένης περιοχής είναι το άθροισμα των στρώσεων που την αποτελούν:

$$R_{δοκοι} = R_{επίχρισμα} + R_{δοκοι} + R_{επίχρισμα} = 1.09195 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Έτσι ο συντελεστής U-value της περιοχής θα είναι ίσος με:

$$U_{δοκοι} = \frac{1}{R_{δοκοι}} = 0.92 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ως συνολική θερμική αντίσταση ολόκληρης της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας μπορεί να εκτιμηθεί ως το σταθμισμένο άθροισμα των επί μέρους περιοχών. Η στάθμιση γίνεται με βάση το ποσοστό της κάθε περιοχής που καταλαμβάνει σε ολόκληρη την τοιχοποιία.

$$R_{ξυλόπηκτη} = 80\% R_{οπτόπλινθοι} + 20\% R_{δοκοί} = 0.47862 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Συνεπώς ο θεωρητικός συντελεστής U-value της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας θα είναι:

$$U_{ξυλόπηκτης} = \frac{1}{R_{ξυλόπηκτης}} = 2.09 \text{ W/m}^2\text{K}$$

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ

Ο προσδιορισμός του συντελεστή U-value της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας περιέχει κάποιους παράγοντες αβεβαιότητας για το αποτέλεσμα. Αρχικά, το ποσοστό των περιοχών των οπτόπλινθων και των ξύλινων δοκών, διαφέρει από σημείο σε σημείο πάνω στην τοιχοποιία. Έτσι η εκλογή του ποσοστού 80% - 20%, είναι ενδεικτική και κατά προσέγγιση από φωτογραφίες που τραβήχτηκαν κατά την κατασκευή.

Επίσης η εξαγωγή του συντελεστή για ολόκληρη την τοιχοποιία, ως το σταθμισμένο άθροισμα αυτών των περιοχών, πιθανόν να μην είναι η πιο ακριβής διαδικασία, αλλά θεωρήθηκε μια καλή προσέγγιση για την περιγραφή της.

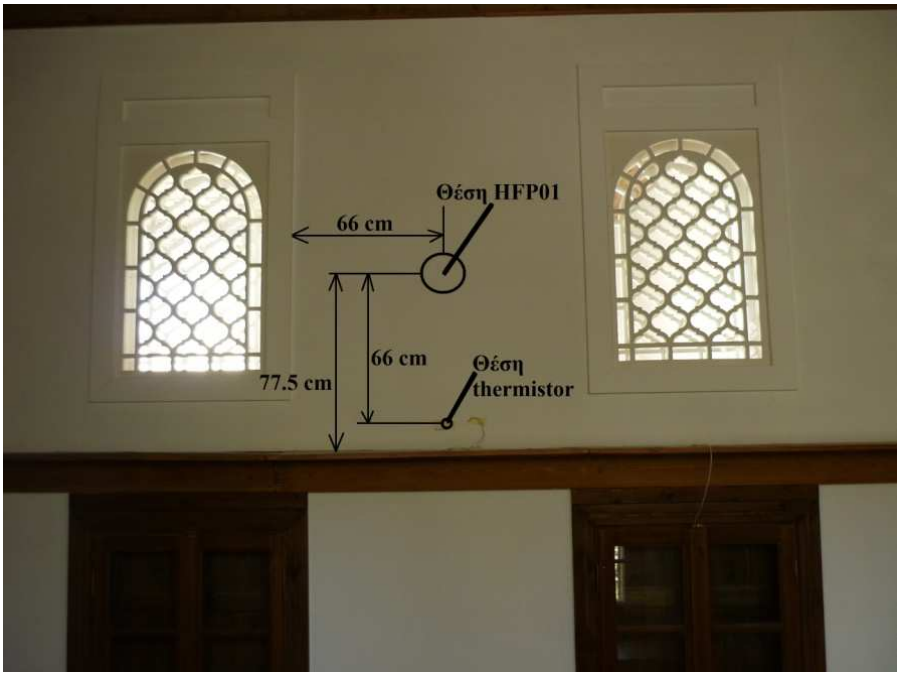
Τέλος η εκλογή των θερμικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών από τους πίνακες πιθανόν να διαφέρει από την πραγματική, καθώς δεν ήταν δυνατή η δειγματοληψία των υλικών αυτών και περεταίρω μελέτη στο εργαστήριο.

5.2.3.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η επιλογή του σημείου των μετρήσεων έγινε με σκοπό την αποφυγή θερμογεφυρών από παράπλευρες επιφάνειες αλλά και της περιορισμένης δυνατότητας επέμβασης πάνω στην τοιχοποιία. Για τη βόρεια τοιχοποιία, επιλέχθηκε ένα σημείο μακριά από το δάπεδο και την οροφή, αλλά εξαιτίας των πολλών ανοιγμάτων της τοιχοποιίας αποφασίστηκε το σημείο να είναι στο μέσον μεταξύ δύο παραθύρων. Έτσι αποφεύγονται οι παράπλευρες ροές θερμότητας από το δάπεδο και την οροφή αλλά και οι περιοχές θερμογέφυρας από τα παράθυρα. Ως εκ τούτου δε μπορούσε να γίνει σαφές αν η περιοχή του σημείου τοποθέτησης αντιστοιχούσε σε περιοχή οπτόπλινθων ή περιοχή ξύλινων δοκών. Όμως, από φωτογραφίες κατά την κατασκευή της τοιχοποιίας το πιθανότερο είναι το σημείο μέτρησης να είναι είτε ολόκληρο, είτε μέρος αυτού σε περιοχή δοκαριού.

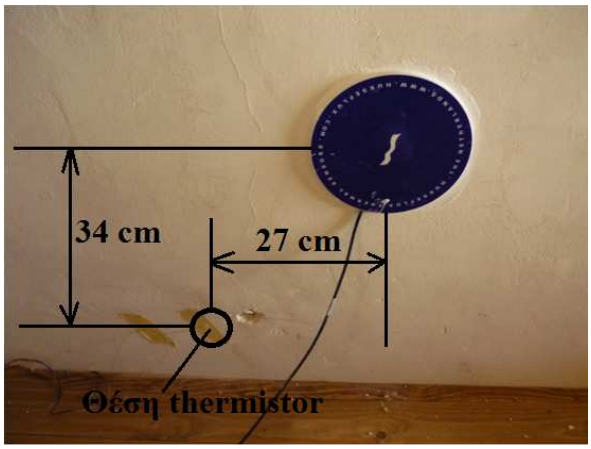
Σχήμα 5.89 - Περιοχή μετρήσεων στη Βόρεια ξυλόπηκτη τοιχοποιία

Η ακριβής θέση των αισθητήρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.90.



Σχήμα 5.90 - Ακριβής θέση των αισθητήρων της Βόρειας ξυλόπηκτης τοιχοποιίας

Για η δυτική τοιχοποιία παρότι υπήρξαν κι εδώ παράθυρα, δεν παρουσίαζε τους περιορισμούς των φεγγιτών, έτσι η περιοχή μέτρησης είναι 65cm πάνω από τα παράθυρα. Με την ίδια λογική, αποφεύγοντας της παράπλευρες ροές θερμότητας από οροφή και δάπεδο, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν περίπου στο μέσον της τοιχοποιίας, 2.65m από το δάπεδο και 2.20m από την παράπλευρη βόρεια τοιχοποιία. Η ακριβής θέση παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.91.



Σχήμα 5.91 - Ακριβής θέση αισθητήρων Δυτικής ξυλόπηκτης τοιχοποιίας

Πρέπει να αναφερθεί ότι δεν ήταν εφικτή η λήψη θερμογραφημάτων για τις συγκεκριμένες τοιχοποιίες και υπάρχει πιθανότητα τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων να είναι περιοχές θερμογεφυρών, κυρίως εάν οι περιοχές των ξύλινων δοκών δημιουργούν θερμογέφυρες.

5.2.3.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για τον προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας της συγκεκριμένης τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη HUKSEFLUX/BETATHERM η οποία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 5.1.3. Αφού επιλέχθηκε η περιοχή των μετρήσεων στη συνέχεια έγινε η εγκατάσταση των αισθητήρων των μετρητικών διατάξεων σύμφωνα τις υποδείξεις που ορίζουν οι κανονισμοί ISO 9869, ASTM C 1046 και ASTM C 1155 αλλά και του περιορισμένης δυνατότητας επεμβάσεων στην τοιχοποιία.

Τα thermistor που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα 10kMCD1 της εταιρείας BETATHERM και εγκαταστάθηκαν στο σημείο που ορίσθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τα εσωτερικά και τα εξωτερικά thermistor είναι σε σημεία τα οποία βρίσκονται στην ίδια ευθεία, κάθετη της τοιχοποιίας. Κατά την εγκατάστασή τους απλώθηκε αρκετή θερμοαγώγιμη πάστα τόσο στην άκρη του thermistor, όσο και στο σημείο της τοιχοποιίας. Στη συνέχεια κάθε thermistor συγκρατήθηκε με μια χαρτοταινία.

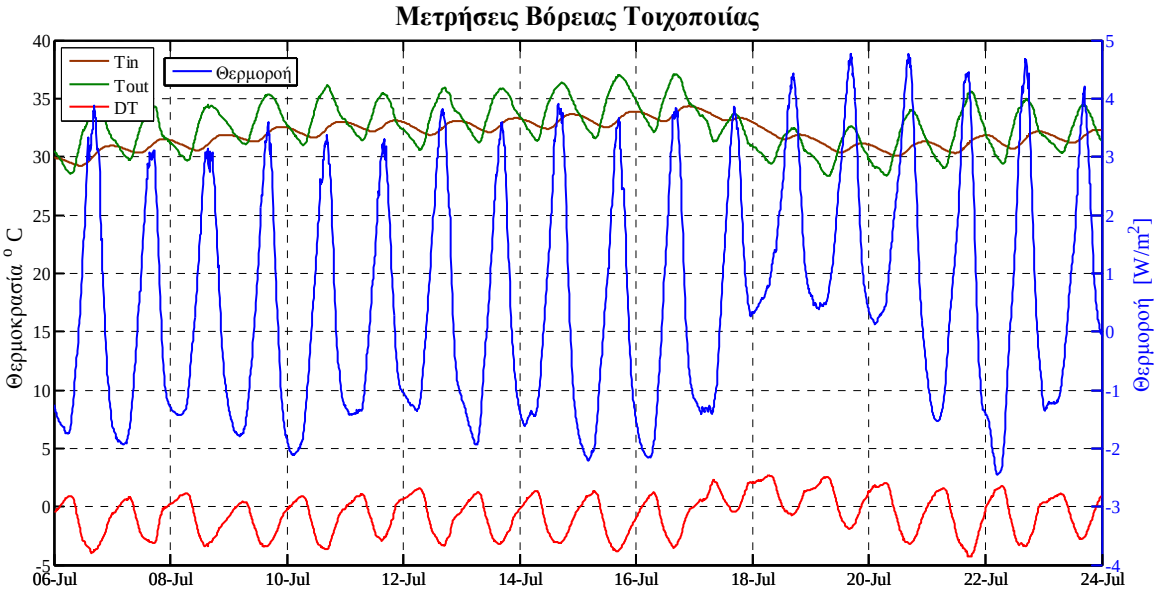
Στη βόρεια τοιχοποιία εγκαταστάθηκε ο αισθητήρας ροής θερμότητας HFP01 της Hukseflux και στη δυτική ο HFP03 της ίδιας εταιρείας. Για την τοποθέτησή τους χρησιμοποιήθηκε θερμοαγώγιμη πάστα η οποία απλώθηκε σε όλη την επιφάνεια των αισθητήρων. Κατόπιν οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο σημείο της τοιχοποιίας που είχε ορισθεί, πιέζοντάς τους δυνατά, έτσι ώστε να καλυφθούν τυχόν κενά αέρα μεταξύ και του αισθητήρα και της τοιχοποιίας.

5.2.3.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι μετρήσεις χωρίζονται σε δύο set ανάλογα με τον προσανατολισμό της τοιχοποιίας, στη βόρεια και στη δυτική τοιχοποιία.

ΒΟΡΕΙΑ ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

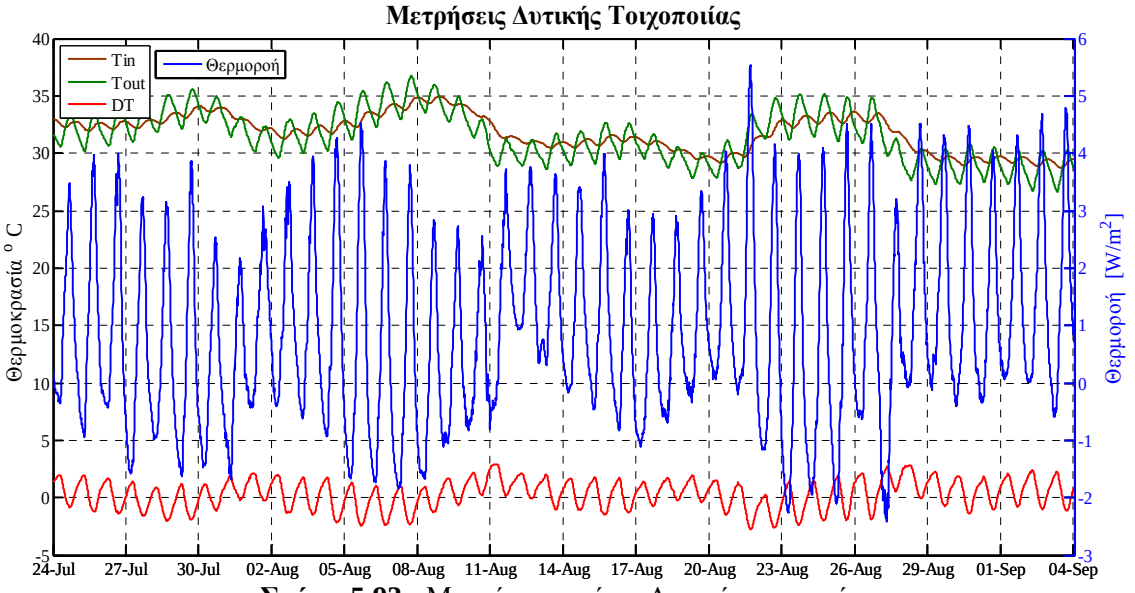
Οι μετρήσεις σε αυτή την τοιχοποιία διήρκησαν 18 ημέρες, από την Παρασκευή 6 Ιουλίου 2012 στις 00:00 έως την Τρίτη 24 Ιουλίου επίσης στις 00:00. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.92. Στις μετρήσεις παρατηρείται μια μεγάλη διακύμανση τόσο στην εσωτερική, όσο και στην εξωτερική θερμοκρασία, χωρίς να είναι κάποια από αυτές σταθερά μεγαλύτερη ή μικρότερη από την άλλη. Αυτό συνεπάγεται ότι η θερμοροή κατά τη διάρκεια του 24ώρου παίρνει και θετικές και αρνητικές τιμές, κάτι το οποίο κάνει την επεξεργασία των μετρήσεων για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας αρκετά δύσκολη. Η θερμοκρασιακή διαφορά έχει διακυμάνσεις από 2.5^{o}C έως -4^{o}C με μέση τιμή 1.5^{o}C, η οποία θεωρείται αρκετά μικρή.



Σχήμα 5.92 - Μετρήσεις από τη Βόρεια τοιχοποιία

ΔΥΤΙΚΗ ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Οι μετρήσεις στη δυτική ξυλόπηκτη τοιχοποιία διήρκησαν 43 ημέρες, από την Τρίτη 24 Ιουλίου έως την Τρίτη 4 Σεπτεμβρίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 5.93



Σχήμα 5.93 - Μετρήσεις από τη Δυτική τοιχοποιία

Στις μετρήσεις του Σχήματος 5.93 παρατηρείται και πάλι η μεγάλη διακύμανση των θερμοκρασιών, χωρίς κάποια να είναι σταθερά μεγαλύτερη ή μικρότερη από την άλλη. Για πολλές ημέρες μάλιστα η θερμοκρασιακή διαφορά ταλαντεύεται γύρω από τους 0^{o}C, έχοντας ως αποτέλεσμα τη συνεχή αλλαγή φοράς της ροής θερμότητας. Η

θερμοκρασιακή διαφορά κυμαίνεται από τους 2.7°C έως τους -2.5°C με μέση απόλυτη τιμή 1.1°C

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όλες οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν με τις τέσσερις μεθόδους που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3 για τον πειραματικό προσδιορισμό της θερμικής διαπερατότητας της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από κάθε μέθοδο.

Μέθοδος Μέσης Τιμής κατά ISO

Η μέθοδος μέσης τιμής, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9869, επεξεργάζεται τις μετρήσεις από ένα χρονικό διάστημα στο οποίο ικανοποιούνται οι απαραίτητες συνθήκες που ορίζονται από το πρότυπο και έχουν αναλυθεί τόσο στην ενότητα 4.3.1. όσο και κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στις προηγούμενες τοιχοποιίες. Έτσι ο συντελεστής U-value προκύπτει το αντίστροφο της θερμικής αντίστασης, η οποία θα είναι ίση με πηλίκο της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς των επιφανειών της τοιχοποιίας με τη μέση θερμοροή που την διαπερνά. Η υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής αντίστασης θα πρέπει να υποστεί τη διόρθωση που οφείλεται στην αντίσταση του αισθητήρα ροής θερμότητας ($R_{HFP}= 6.25\cdot 10^{-3}$ Km^2/W), σύμφωνα με τη σχέση (5.3).

Η εξεταζόμενη τοιχοποιία ανήκει στις βαριές κατασκευές, συνεπώς ο έλεγχος της σύγκλισης θα γίνει με βάση τα κριτήρια s_1 και s_2, που έχουν αναλυθεί παραπάνω.

Στη συνέχεια αναζητείται ένα χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 72 ωρών, για κάθε set μετρήσεων στο οποίο ικανοποιούνται τα δύο κριτήρια σύγκλισης. Στις προηγούμενες περιπτώσεις, τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα προσέγγιζαν ένα ψευδομόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο με μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Για τις υπάρχουσες μετρήσεις, δεν είναι δυνατόν να βρεθεί ένα τέτοιο χρονικό διάστημα τόσο στη βόρεια όσο και στη νότια τοιχοποιία. Συνεπώς η μέθοδος της μέσης τιμής κατά το πρότυπο ISO, **δεν μπορεί να εφαρμοσθεί** στις συγκεκριμένες περιπτώσεις. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα θα πρέπει να εγκατασταθεί ένα σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας, δημιουργώντας μια ικανοποιητική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των επιφανειών του κελύφους.

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ κατά ASTM

Σύμφωνα με την αθροιστική τεχνική κατά το πρότυπο ASTM, ο συντελεστής της θερμικής διαπερατότητας από ένα σύνολο επιτόπιων μετρήσεων υπολογίζεται από τη μέση τιμή των συντελεστών που προκύπτουν από επί μέρους χρονικά διαστήματα. Σε καθένα από αυτά τα χρονικά διαστήματα ο συντελεστής U-value υπολογίζεται από το πηλίκο της μέσης θερμοροής που διαπερνά την τοιχοποιία προς τη μέση

θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών αυτής. Τα χρονικά διαστήματα θα πρέπει να διαρκούν ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών και να ικανοποιούν τον έλεγχο σύγκλισης. Το διάστημα n του παράγοντα της σύγκλισης CR_n κυμαίνεται από 6 έως 48 ώρες, και ο έλεγχος σύγκλισης γίνεται για τουλάχιστον $3 \cdot n$ ώρες.

Για τη συγκεκριμένη τοιχοποιία, βάζοντας ακόμη και το ελάχιστο δυνατό κριτήριο σύγκλισης (n=6 ώρες και έλεγχος για 3·n ώρες), δεν βρέθηκε παραπάνω από ένα χρονικό διάστημα στο οποίο να ικανοποιείται. Αυτό συμβαίνει γιατί οι βέλτιστες συνθήκες για την εφαρμογή της αθροιστικής τεχνικής, όπως και η μέθοδος μέσης τιμής, είναι οι μόνιμες συνθήκες. Στις δεδομένες μετρήσεις της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας τόσο οι διακυμάνσεις της εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας είναι πολύ μεγάλες, όσο και ότι καμία από αυτές δεν είναι σταθερά μεγαλύτερη από την άλλη. Συνεπώς η αθροιστική τεχνική **δεν εφαρμόζεται** για τις δεδομένες μετρήσεις. Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό θα πρέπει είτε να εγκατασταθεί σύστημα ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας, είτε να δοκιμασθούν μετρήσεις και κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Το γεγονός ότι τόσο η μέθοδος της μέσης τιμής, όσο και η αθροιστική τεχνική δεν εφαρμόστηκαν σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις ήταν αναμενόμενο καθώς έχει διαπιστωθεί ότι όταν η μέση θερμοκρασιακή διαφορά είναι μικρότερη των 5^oC, οι τεχνικές αυτοί δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν **[23]**.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ κατά ASTM C 1155-95 (2007)

Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται τα θερμικά χαρακτηριστικά της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση αγωγής τη θερμότητας. Συγκεκριμένα βρίσκεται η θερμική αγωγιμότητα, με την οποία στη συνέχεια διαιρώντας με το πάχος της τοιχοποιίας, L=220m, προσδιορίζεται ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας. Επίσης γίνεται και μία εκτίμηση της θερμοχωρητικότητας $\rho \cdot C_p$.

Σύμφωνα με το θεωρητικό υπολογισμό της θερμικής διαπερατότητας, η ισοδύναμη θεωρητική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας είναι ίση με $k = U \cdot L \approx 0.68\, W/mK$, αν το σημείο μετρήσεων βρίσκεται στην περιοχή των οπτόπλινθων και $k = U \cdot L \approx 0.20\, W/mK$ αν βρίσκεται στην περιοχή των δοκών. Για να συμπεριληφθεί κάθε περίπτωση, το διάστημα για το οποίο εκτιμήθηκε ότι κυμαίνεται η θερμική αγωγιμότητα του τοίχου είναι [0.1 , 1.0] και από το διάστημα αυτό λαμβάνονται Nk=101 ισαπέχουσες τιμές. Βέβαια αρχικά έγιναν δοκιμές σε μεγαλύτερα διαστήματα πριν ορισθεί το παραπάνω.

Αντίστοιχα το διάστημα για το οποίο κυμαίνεται η πυκνότητα θα είναι [600,2000] και λαμβάνονται Nρ=71 ισαπέχουσες τιμές. Ενώ για η θερμοχωρητικότητα εκτιμάται να κυμαίνεται στο διάστημα [800,1700] λαμβάνοντας Nc =91 ισαπέχουσες τιμές.

Για την επίλυση της εξίσωσης ο χώρος που είναι το πάχος της τοιχοποιίας, χωρίζεται σε NW=50 κόμβους. Από την άλλη, το χρονικό βήμα είναι ίσο με 10 λεπτά καθώς είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι των μετρήσεων ανά 10 λεπτά, δηλαδή dt=10min ή dt=600sec (Παράρτημα Γ).

Το πειραματικό σφάλμα για την εκτίμηση της θερμικής διαπερατότητας είναι 6%, με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%., όπως και για τις προηγούμενες περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται ξεκινούν και τελειώνουν την ίδια ώρα σχηματίζοντας ένα χρονικό διάστημα ακέραιο πολλαπλάσιο των 24 ωρών.

Η εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων έγινε σε κώδικα στο MATLAB, ο οποίος περιγράφεται στο Παράρτημα Γ, προσδιορίζοντας τις βέλτιστες τιμές ρ, C_p και k, για τα οποία ελαχιστοποιείται προκύπτουν καλύτερες προσαρμογές ροής θερμότητας και εσωτερικής θερμοκρασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε τοιχοποιία.

ΒΟΡΕΙΑ ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Οι μετρήσεις γι αυτήν την τοιχοποιία επεξεργάσθηκαν σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω για τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, με τη διαφορά ότι η αναζήτηση των βέλτιστων θερμικών ιδιοτήτων έγινε με βάση την καλύτερη προσαρμογή των καμπυλών ροής θερμότητας και όχι της εσωτερικής θερμοκρασίας, όπως σε πολλές από τις προηγούμενες εφαρμογές. Αυτό έγινε καθώς παρατηρήθηκε ότι στις δοκιμές όπου η αναζήτηση των ιδιοτήτων γινόταν με βάση την εσωτερική θερμοκρασία η προσαρμογή των καμπυλών της θερμοροής δεν ήταν αποδεκτές. Με την αλλαγή αυτή το πρόβλημα δε λύθηκε, απλά βελτιώθηκαν οι προσαρμογές. Στον Πίνακα 5.41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου:

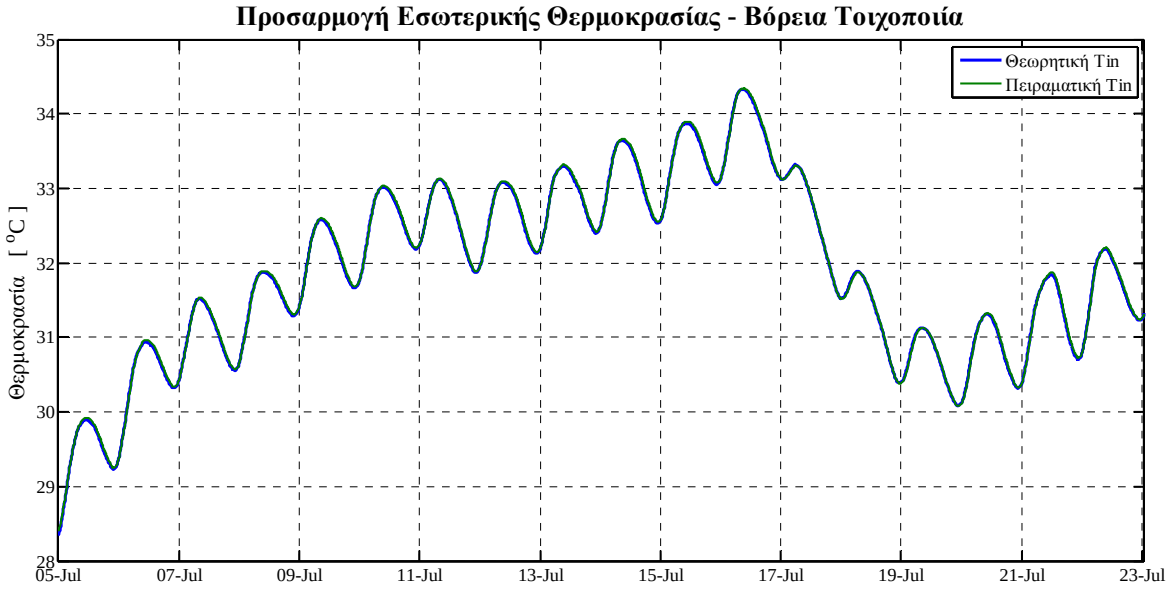
Πίνακας 5.41-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων για τη Βόρεια τοιχοποιία

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} [%]	σ_{HF} $[W/m^2K]$
05/07/2012 13:00	23/07/2012 13:00	**1.07**	**± 0.06**	787.2	0.06	0.0273

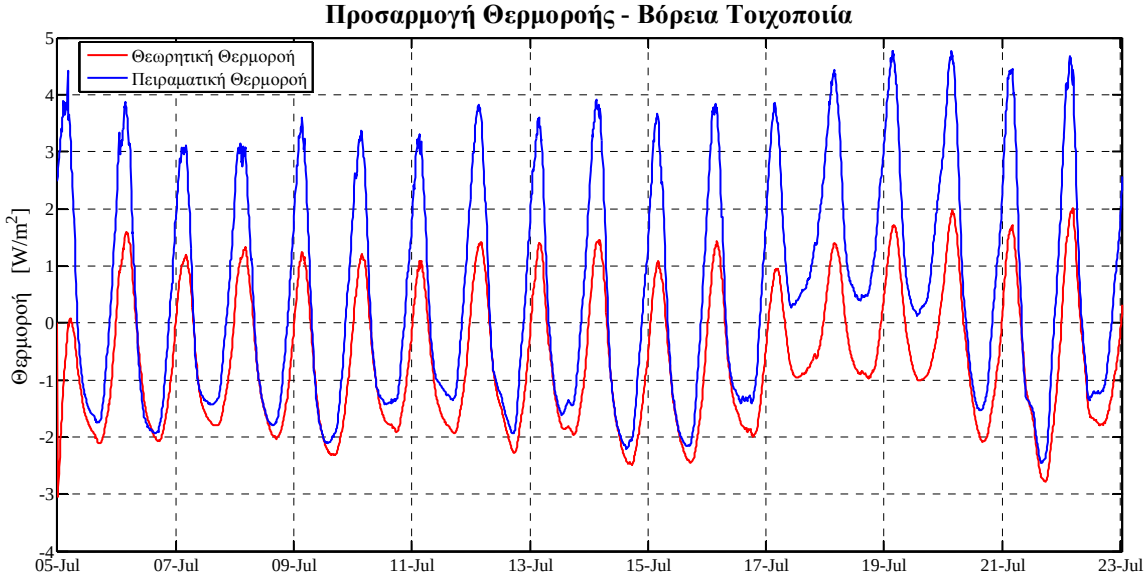
Το σφάλμα για την προσαρμογή της ροής θερμότητας είναι υπολογισμένο με βάση τη σχέση $\sigma_{HF} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(HF_{pred\,i} - HF_{meas\,i} \right)^2}}{N}$

επειδή δεν είναι δυνατή η χρήση της σχέσης (5.10), λόγω του γεγονότος ότι σε αυτό το set μετρήσεων, υπάρχουν πολλές μηδενικές πειραματικές τιμές ροής θερμότητας.

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.94 και 5.95 παρουσιάζεται η προσαρμογή της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.



Σχήμα 5.94 - Προσαρμογή της θερμοκρασίας για τη Βόρεια τοιχοποιία



Σχήμα 5.95 - Προσαρμογή της θερμοροής για τη Βόρεια τοιχοποιία

Η προσαρμογή των καμπυλών της θερμοκρασίας είναι πάρα πολύ καλή, παρά το γεγονός ότι η αναζήτηση έγινε με βάση την προσαρμογή των καμπυλών θερμοροής. Από την άλλη η προσαρμογή για τη ροή θερμότητας εξακολουθεί να μην είναι αποδεκτή. Ενώ, η μέθοδος προβλέπει τα ελάχιστα, υπάρχει μια υποεκτίμηση των μεγίστων θερμοροών. Επίσης σε ορισμένα σημεία υπάρχει και μια διαφορά φάσης λίγων ωρών, των δύο καμπυλών, πράγμα για το οποίο σημαίνει ότι πιθανόν το γινόμενο

$\rho \cdot C_p$ όπου βρέθηκε να μην είναι το σωστό. Το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα πιθανόν να οφείλεται σε πιθανή μη μονοδιάστατη ροή θερμότητας. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.3.3., το σημείο τοποθέτησης για τη βόρεια τοιχοποιία πιθανόν να βρίσκεται σε περιοχή ξύλινων δοκών, η οποία είναι μικρού πλάτους, δημιουργώντας πιθανόν θερμογέφυρα. Ένα θερμογράφημα του σημείου θα ήταν αναγκαίο για την εξακρίβωση αυτής της υπόθεσης.

ΔΥΤΙΚΗ ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Στον Πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για τις μετρήσεις στη δυτική ξυλόπηκτη τοιχοποιία. Η ανάλυση της μεθόδου έγινε όπως σε προηγούμενες τοιχοποιίες, με την αναζήτηση των θερμικών ιδιοτήτων με βάση την βέλτιστη προσαρμογή των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Πίνακας 5.42-Αποτελέσματα Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων για τη Δυτική τοιχοποιία

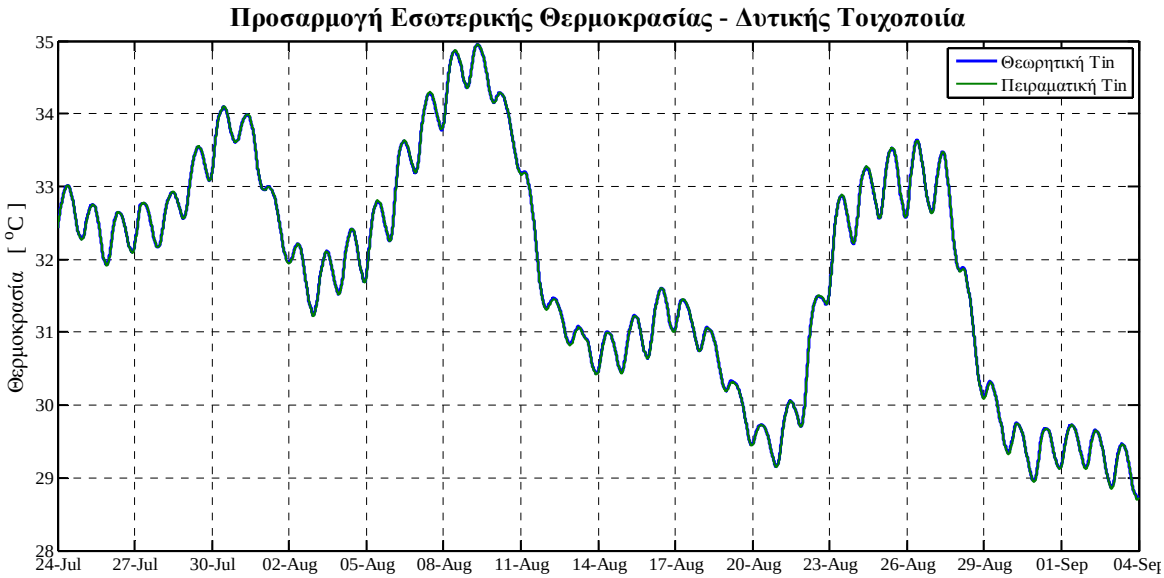
Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτίμηση**			**Προσαρμογή Καμπυλών**	
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [6%]*	$\rho \cdot C_p$ $[kJ/m^3K]$	σ_{Tin} *[%]*	σ_{HF} *[%]*
24/07/2012 14:00	04/09/2012 14:00	**3.03**	**± 0.18**	1963	0.03	0.0076

Όπως και προηγουμένως, το ανηγμένο σφάλμα για την προσαρμογή της ροής θερμότητας είναι υπολογισμένο με βάση τη σχέση

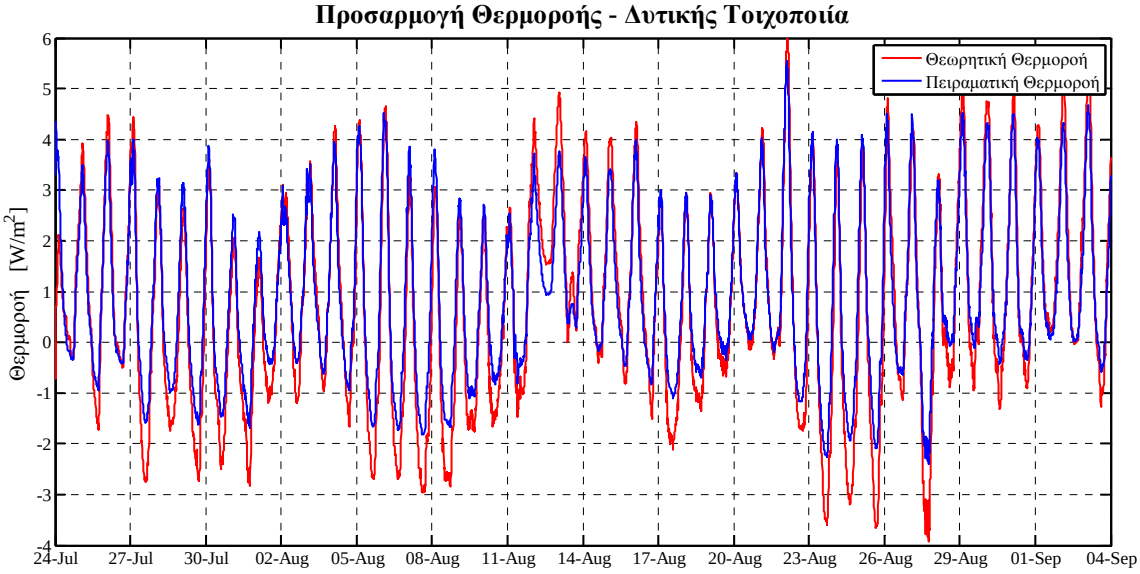
$$\sigma_{HF} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(HF_{pred\ i} - HF_{meas\ i} \right)^2}}{N}$$

επειδή δεν είναι δυνατή η χρήση της σχέσης (5.10), για το λόγο ότι πολλές πειραματικές μετρήσεις θερμοροής είχαν την τιμή μηδέν.

Στα Σχήματα 5.96 και 5.97 παρουσιάζονται τα διαγράμματα προσαρμογής της εσωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοροής.



Σχήμα 5.96 - Προσαρμογή της θερμοκρασίας για τη Δυτική τοιχοποιία



Σχήμα 5.97 - Προσαρμογή της θερμοροής για τη Δυτική τοιχοποιία

Η προσαρμογή των καμπυλών της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας είναι αρκετά καλή. Συγκεκριμένα για τη θερμοροή η μέθοδος δείχνει να προβλέπει τα μέγιστα και να υπερεκτιμά τα ελάχιστα κατά 1 - 1.5 W/m^2 . Σε αντίθεση με τη βόρεια τοιχοποιία, στη δυτική, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων φαίνεται να δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ κατά ISO 9869:1994

Η διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή U-value της τοιχοποιίας με τη δυναμική μέθοδο, όπως περιγράφεται στην ενότητα (4.3.4) ,παρουσίασε αρκετές ιδιαιτερότητες και για τους δύο προσανατολισμούς της ξυλόπηκτης τοιχοποιίας. Τα αποτελέσματα δεν κρίνονται αξιόπιστα παρά την καλή προσαρμογή των καμπυλών, καθώς δεν υπάρχει ανεξαρτησία του αποτελέσματος στις διάφορες μεταβλητές της μεθόδου.

Αναλυτικά, η μέθοδος προσδιορίζει το πεδίο ροής θερμότητας σε συνάρτηση με τις επιφανειακές θερμοκρασίες της τοιχοποιίας εκείνης της χρονικής στιγμής και p χρονικών στιγμών νωρίτερα. Για την περίπτωση της βόρειας τοιχοποιίας, καθώς δεν ήταν γνωστό αν η θέση των μετρήσεων αντιστοιχούσε σε περιοχή ξύλινων δοκών ή οπτόπλινθων, η εκλογή του αριθμού των εξισώσεων p έγινε με δοκιμές με σκοπό τη βέλτιστη εκτίμηση της καμπύλης της ροής θερμότητας ως προς τις πειραματικές μετρήσεις. Έτσι διαπιστώθηκε ότι και για τις δύο τοιχοποιίες το αποτέλεσμα άλλαζε αρκετά με μία μικρή αλλαγή του αριθμού p, κάτι για το οποίο δεν γινόταν στις αναλύσεις της ίδιας μεθόδου των προηγούμενων τοιχοποιιών. Παίρνοντας διάφορες τιμές για τον αριθμό p, διαπιστώθηκε ότι για p=216, για την βόρεια τοιχοποιία υπήρξε η καλύτερη προσαρμογή των καμπυλών ροής θερμότητας. Στη δυτική τοιχοποιία παρατηρήθηκε η ίδια εξάρτηση των αποτελεσμάτων, αλλά σε μικρότερο βαθμό, έτσι επιλέχθηκε ο αριθμός p=50. Για αυτούς τους αριθμούς συνεχίστηκε η ανάλυση της μεθόδου.

Η χρονική σταθερά τ_1 θα κυμαίνεται στο διάστημα $\frac{\Delta t}{10} \langle \tau_1 \langle p \frac{\Delta t}{2}$,δηλαδή $360 < \tau_1 < 388800$,για τη βόρεια τοιχοποιία και $360 < \tau_1 < 90000$ για τη δυτική, ενώ ο λόγος r μεταξύ των τιμών 3 και 13. Για την εκτίμηση του βέλτιστου συνδυασμού τ_1 και r, τα διαστήματα αυτά χωρίζονται σε Nτ=19441 για τη βόρεια και Nτ=4483 για τη δυτική τοιχοποιία και Nr=101 κόμβους αντίστοιχα, για την εκτίμηση του βέλτιστου συνδυασμού τ_1 και r.

Όπως σε κάθε περίπτωση εκτίμησης και σύγκρισης της θεωρητικής τιμής που προκύπτει από την ανάλυση μιας μεθόδου με την αντίστοιχη πειραματική εισάγεται ένα σφάλμα, έτσι και σε αυτή τη μέθοδο εισάγεται το σφάλμα σ_{HF} το οποίο εκφράζει την προσαρμογή των εκτιμώμενων τιμών της ροής θερμότητας από τη δυναμική μέθοδο με τις πειραματικές τιμές. Το σφάλμα αυτό ορίζεται από τη σχέση (5.13).

Η μέθοδος επιλύθηκε σε κώδικά στο MATLAB, βρίσκοντας τις βέλτιστες τιμές τ_1 και r, για τις οποίες ελαχιστοποιείται το άθροισμα της εξίσωσης (4.40) απ' όπου θα προκύπτει ο συντελεστής U-value και η θεωρητική τιμή ροής θερμότητας. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τη βόρεια και δυτική ξυλόπηκτη τοιχοποιία.

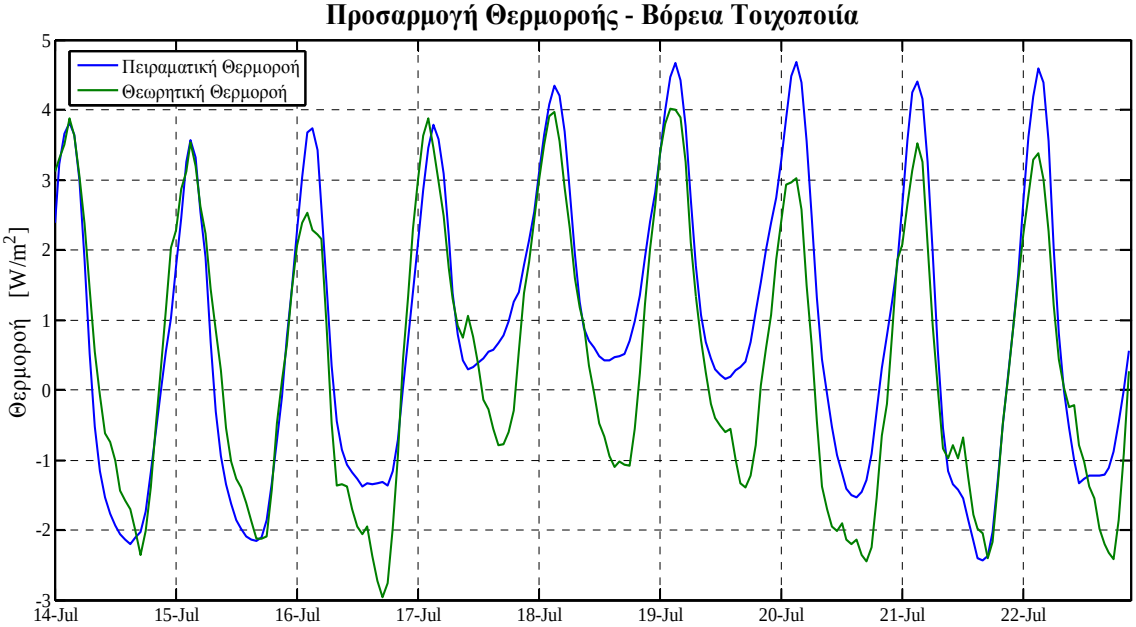
ΒΟΡΕΙΑ ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Τα αποτελέσματα της δυναμικής μεθόδου για τη βόρεια τοιχοποιία δεν είναι αποδεκτά εξαιτίας της μεγάλης εξάρτησης των αποτελεσμάτων με τον αριθμό των εξισώσεων p. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για p=216, όπου σημειώθηκε μια αρκετά καλή προσαρμογή της καμπύλης της ροής θερμότητας

Πίνακας 5.43-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου για τη Βόρεια ξυλόπηκτη τοιχοποιία

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτιμήσεις**				**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*U-value [W/m²K]*	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	*r*	σ_{HF} *[W/m²]*
05/07/2012 13:00	24/07/2012 13:00	**0.56**	**± 0.06**	316850	6.3	0.0597

Στο Σχήμα 5.98 παρουσιάζεται η προσαρμογή της καμπύλης της θερμοροής.



Σχήμα 5.98 - Προσαρμογή θερμοροής της Βόρειας ξυλόπηκτης τοιχοποιίας

Η προσαρμογή των καμπυλών είναι γενικά καλή, αλλά το αποτέλεσμα του συντελεστή U-value είναι απαράδεκτα μικρό. Η μικρή περιοχή πρόβλεψης της ροής θερμότητας οφείλεται τόσο από το γεγονός των 20 ημερών μετρήσεων, όσο και από το μεγάλο αριθμό εξισώσεων p. Επίσης κατά τις διάφορες δοκιμές του αριθμού p, προέκυψαν ακόμη και αρνητικοί συντελεστές! Αυτό είναι μία ένδειξη πως η μέθοδος αυτή δεν λειτουργεί για αυτές τις μετρήσεις και χρειάζεται περαιτέρω μελέτη για τέτοιου είδους τοιχοποιίες.

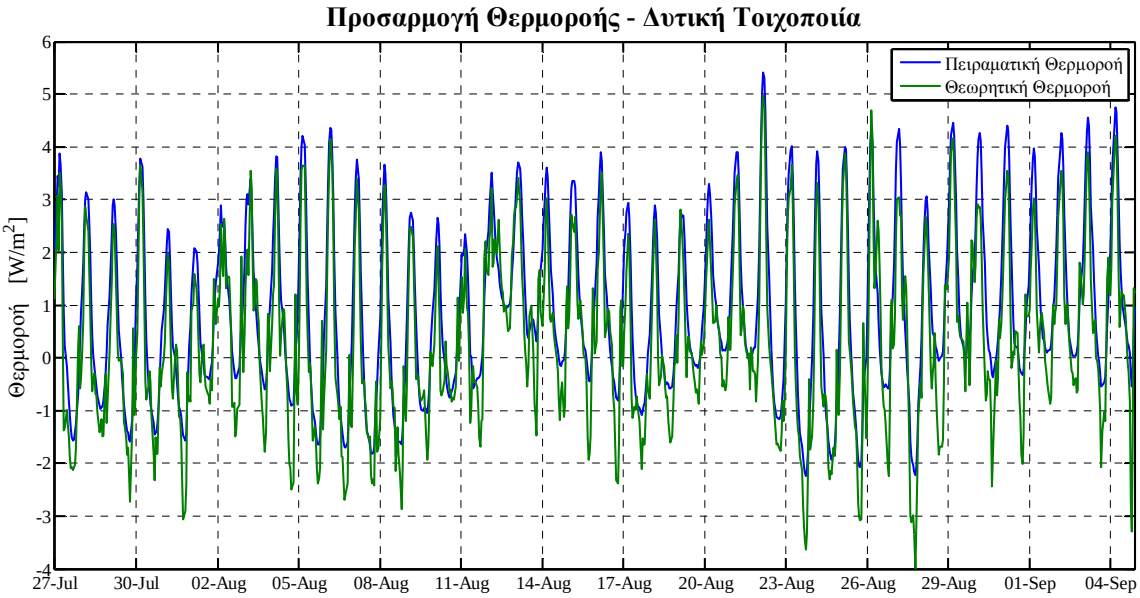
ΔΥΤΙΚΗ ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

Για τις μετρήσεις της δυτικής τοιχοποιίας εφαρμόσθηκε η δυναμική μέθοδος, όπως περιγράφηκε ανωτέρω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.44.

Πίνακας 5.44-Αποτελέσματα Δυναμικής Μεθόδου για τη Δυτική ξυλόπηκτη τοιχοποιία

Διάρκεια Μετρήσεων		**Εκτιμήσεις**				**Προσαρμογή Καμπύλης**
Από	*Έως*	*U-value* $[W/m^2K]$	*Σφάλμα [10%]*	τ_1	*r*	σ_{HF} $[W/m^2]$
25/07/2012 10:00	05/09/2012 10:00	**1.53**	**± 0.15**	80880	3.7	0.0270

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.99 παρουσιάζεται η προσαρμογή των καμπυλών ροής θερμότητας.



Σχήμα 5.99 - Προσαρμογή θερμοροής της Δυτικής ξυλόπηκτης τοιχοποιία

Από το διάγραμμα παρατηρείται γενικά καλή προσαρμογή, αλλά υπάρχει υπερεκτίμηση των ελαχίστων 1 με 2 W/m^2, κάτι το οποίο παρατηρήθηκε και στη προσαρμογή των καμπυλών της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Φαίνεται όμως είτε από το γεγονός της κατά πολύ μεγαλύτερης διάρκειας των μετρήσεων, είτε, πιθανόν, από το καλύτερο σημείο μέτρησης, ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί καλύτερα στη δυτική τοιχοποιία από τη βόρεια. Επίσης μια σημαντική προϋπόθεση της δυναμικής μεθόδου είναι η ύπαρξη μεγάλων διακυμάνσεων σε ροή θερμότητας και σε θερμοκρασίες, όπου πράγματι στις μετρήσεις των ξυλόπηκτων τοιχοποιιών υπήρχαν, γι αυτό και προέκυψαν και στις δύο περιπτώσεις πολύ καλές προσαρμογές.

5.2.3.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

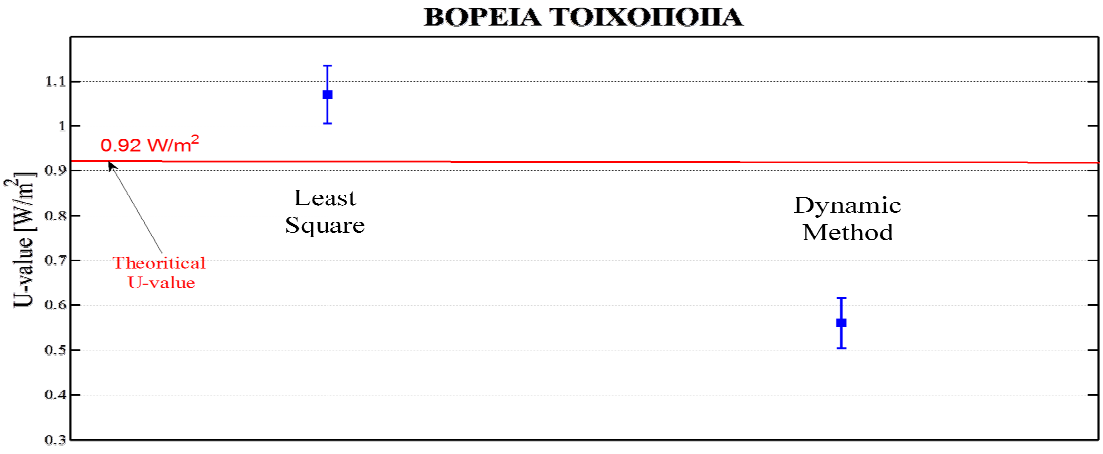
Μετρήσεις σε ξυλόπηκτο κέλυφος έγιναν σε δύο τοιχοποιίες του ίδιου κτιρίου αλλά διαφορετικού προσανατολισμού, μία βόρεια και μία δυτική. Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η HUKSEFLUX/BETATHERM. Για τη μελέτη των συγκεκριμένων τοιχοποιιών δεν ήταν δυνατή η εγκατάσταση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας αλλά και η λήψη θερμογραφημάτων. Οι μετρήσεις για τη βόρεια τοιχοποιία διήρκησαν 20 ημέρες, ενώ για τη δυτική ενάμιση μήνα και επεξεργάσθηκαν σύμφωνα με τις τεχνικές και τις μεθόδους των προτύπων ISO και ASTM, που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων μεθόδων, για κάθε προσανατολισμό, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.45.

Πίνακας 5.45 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ξυλόπηκτης τοιχοποιίας

ΞΥΛΟΠΗΚΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ - ΑΡΧΟΝΤΙΚΟ ΜΠΕΝΙΖΕΛΩΝ		
U-value (W/m^2K)	**ΒΟΡΕΙΑ**	**ΔΥΤΙΚΗ**
	HFP01	**HFP03**
Average Method - ISO	-	-
Summation Technique - ASTM	-	-
Least Square - ASTM	1.07	3.03
Dynamic Method - ISO	0.56	1.53

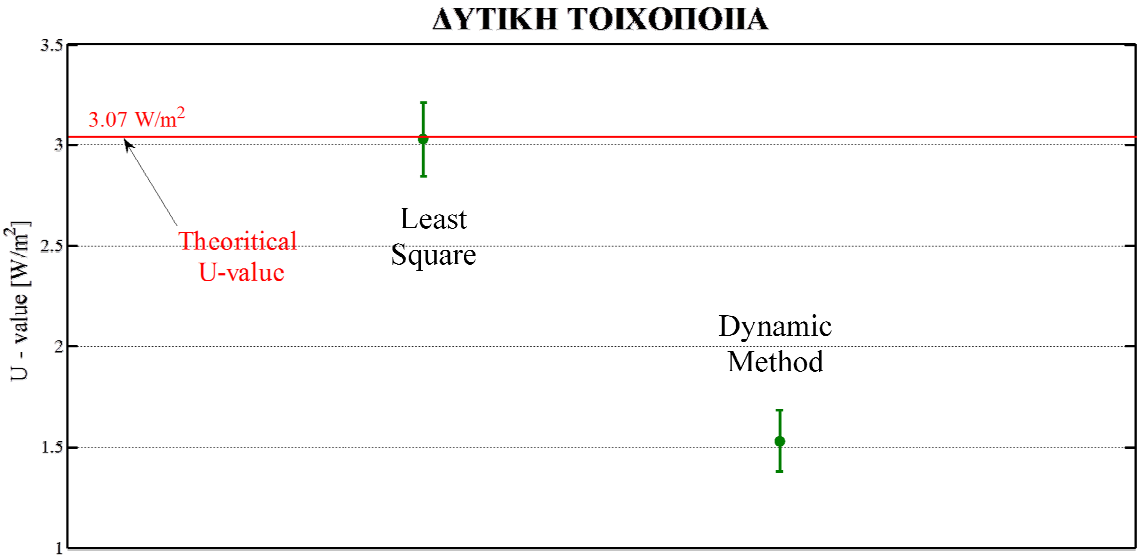
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, Σχήματα 5.92 και 5.93, παρουσιάζουν αρκετές εναλλαγές της φοράς της ροής θερμότητας και στις δύο τοιχοποιίες. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει πάντα μια επιφάνεια η οποία να έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από την άλλη, δημιουργώντας ένα εντελώς μη μόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο με τη θερμοκρασιακή διαφορά να παίρνει χαμηλές τιμές. Αυτή είναι η κύρια αιτία όπου οι μέθοδος μέσης τιμής και η αθροιστική τεχνική δεν μπορούσαν να βγάλουν αποτέλεσμα, κάτι για το οποίο προβλέπεται και από τα αντίστοιχα πρότυπα ISO και ASTM **[14,16]** και άλλες δημοσιεύσεις **[23]**.

Τα Σχήματα 5.100 και 5.101 παρουσιάζουν όλα τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα σφάλματά τους, για κάθε προσανατολισμό.



Σχήμα 5.100 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Βόρειας τοιχοποιίας

Επίσης συγκεκριμένα η βόρεια τοιχοποιία παρουσίασε ιδιαιτερότητες και στις άλλες δύο μεθόδους, καθώς στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, παρά την καλή προσαρμογή της εσωτερικής θερμοκρασίας, η προσαρμογή των καμπυλών της ροής θερμότητας δεν ήταν καλή. Έτσι με βάση και το Σχήμα 5.89 ολόκληρη ή μέρος της περιοχής των μετρήσεων πιθανόν να είναι περιοχή ξύλου, πράγμα για το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει μονοδιάστατη ροή θερμότητας, αναιρώντας έτσι την προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για μονοδιάστατη ροή στην τοιχοποιία. Στην περίπτωση κατά την οποία η περιοχή μετρήσεων της βόρειας τοιχοποιίας αντιστοιχεί στην περιοχή των ξύλινων δοκαριών, τότε ο προσδιορισμός του συντελεστή U-value από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, U_{North}=1.07W/m^2, κοντά στον θεωρητικό συντελεστή, ο οποίος είναι $U_{δοκών}$=0.92W/m^2 (σφάλμα 16.3%). Για την εξακρίβωση του συμπεράσματος ότι όντως η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων λειτουργεί σωστά ακόμα και στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να γίνουν επιπλέον μετρήσεις και σε άλλες εποχές, καθώς επίσης και μετρήσεις σε σημεία όπου είναι βέβαιο ότι πρόκειται για περιοχή ξύλου.



Σχήμα 5.101 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Δυτικής τοιχοποιίας

Αντιθέτως, στη δυτική τοιχοποιία η προσαρμογή της θερμοροής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι αποδεκτή, παρά το γεγονός ότι υπάρχει υπερεκτίμηση των ελαχίστων. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ούτε κι εδώ είναι βέβαιη η περιοχή στην οποία αντιστοιχούν οι μετρήσεις, από το αποτέλεσμα της μεθόδου για το συντελεστή U-value, το πιθανότερο όμως είναι να βρίσκεται σε περιοχή οπτόπλινθων. Η τιμή αυτή, U_{West}=3.03W/m^2, είναι πάρα πολύ κοντά στην αντίστοιχη θεωρητική τιμή, $U_{οπτο}$=3.07W /m^2, (σφάλμα 1.3%) δείχνοντας έτσι ότι η μέθοδος αυτή είναι αρκετά αξιόπιστη σε αυτή την περίπτωση.

Τα αποτελέσματα της δυναμικής μεθόδου παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες. Η μέθοδος σύμφωνα με το πρότυπο έχει ως ιδανικές συνθήκες, την ύπαρξη μιας επιφάνειας της τοιχοποιίας σταθερά υψηλότερης θερμοκρασίας από την άλλη, δίνοντας μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Αυτό δεν συνέβη για τις μετρήσεις των δύο

τοιχοποιιών και ίσως είναι η αιτία όπου τα αποτελέσματα της μεθόδου παρεκκλίνουν αρκετά από τα αντίστοιχα της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και τα θεωρητικά. Ωστόσο όμως θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι καμπύλες προσαρμογής της ροής θερμότητας σε κάθε περίπτωση είναι γενικά καλές. Συγκεκριμένα για τη βόρεια τοιχοποιία παρατηρήθηκε μεγάλη εξάρτηση του αποτελέσματος με τον αριθμό των εξισώσεων p, ενώ για τη δυτική τοιχοποιία η εξάρτηση αυτή δεν ήταν τόσο έντονη. Για τους παραπάνω λόγους τα αποτελέσματα της δυναμικής μεθόδου απορρίπτονται και είναι ανάγκη να γίνει περισσότερη μελέτη όλων των παραμέτρων της μεθόδου για κάθε τοιχοποιία, αλλά και συγκεκριμένα για τις βαριές τοιχοποιίες.

5.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική έγινε πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας (U-value) από επιτόπιες μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας και ροής θερμότητας σε τρία είδη τοιχοποιιών. Οι μετρήσεις επεξεργάσθηκαν σύμφωνα με τις μεθόδους και τις τεχνικές που ορίζονται από τα πρότυπα ISO 9869 και ASTM C 1155. Οι μέθοδοι αυτές ήταν η μέθοδος μέσης τιμής κατά ISO, η αθροιστική τεχνική κατά ASTM, η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων κατά ASTM και η δυναμική μέθοδος κατά ISO. Παρακάτω ακολουθούν, αναλυτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν για κάθε μέθοδο.

Η μέθοδος μέσης τιμής κατά ISO (Average Method) έδωσε αποτελέσματα για τη τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου και τη λιθόκτιστη, αλλά όχι για τη ξυλόπηκτη τοιχοποιία. Η μέθοδος αυτή ευνοείται από τις μικρές διακυμάνσεις των θερμοκρασιών, από ένα μόνιμο ή ψευδομόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο και σχεδόν απαιτεί μία μέση θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών της τοιχοποιίας άνω των 5^{o}C με τη μία επιφάνεια σταθερά θερμότερη από την άλλη. Απαιτείται η εύρεση ενός χρονικού διαστήματος, μεγαλύτερο των 72 ωρών, από τις συνολικές μετρήσεις, στο οποίο να ικανοποιούνται αυτές οι συνθήκες. Η αναζήτηση ενός τέτοιου διαστήματος δεν είναι πάντα εύκολη, καθώς εξαρτάται πολύ από τις εξωτερικές συνθήκες, την τοιχοποιία και τη χρήση ή όχι συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας. Όταν όμως βρεθεί αυτό το χρονικό διάστημα, ικανοποιούνται γρήγορα τα κριτήρια σύγκλισης που ορίζει το πρότυπο. Ωστόσο ακόμη και όταν αυτό βρεθεί, δε σημαίνει ότι είναι και το μοναδικό. Στην περίπτωση των λιθόκτιστων τοιχοποιιών βρέθηκαν αρκετά τέτοια διαστήματα, τα οποία έδιναν αποτελέσματα με σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, ενώ στην τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου, γενικά οι διαφορές δεν ήταν μεγάλες. Στα αποτελέσματα επιλέχθηκε το διάστημα το οποίο ικανοποιεί καλύτερα τα κριτήρια σύγκλισης. Επίσης επειδή η μέθοδος δεν διαχειρίζεται τη θερμοχωρητικότητα, είναι ευαίσθητη σε σταδιακές αλλαγές των θερμοκρασιών. Τέλος η μέθοδος αυτή, σε σχέση με τις υπόλοιπες, δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του σφάλματος της τελικής τιμής,

κάτι για το οποίο δεν κάνουν οι άλλες μέθοδοι, που απλώς δίνουν μια εκτίμηση του σφάλματος.

Η αθροιστική τεχνική κατά ASTM (Summation Technique) εφαρμόσθηκε μόνο στην τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου, και μάλιστα μόνο όταν γινόταν χρήση συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις είτε δεν ήταν δυνατός ο επιμερισμός των μετρήσεων σε τουλάχιστον 3 διαστήματα τα οποία να ικανοποιούν τα κριτήρια σύγκλισης (περίπτωση τοιχοποιίας πειραματικού οικίσκου χωρίς έλεγχο της θερμοκρασίας και ξυλόπηκτες τοιχοποιίες), είτε ο συντελεστής μεταβολής που προέκυπτε ήταν μεγαλύτερος του 10% και η διασπορά αυτή ήταν απαγορευτική για την εξαγωγή αποτελέσματος από αυτή την τεχνική (περίπτωση λιθόκτιστων τοιχοποιιών). Έτσι παρατηρείται ότι η τεχνική αυτή για να εφαρμοσθεί χρειάζονται να ικανοποιούνται κάποιες συνθήκες που κάνουν δύσκολη την εφαρμογή της, όπως η μέση θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών της τοιχοποιίας να είναι άνω των 5^{o}C, όπως και στην περίπτωση της μεθόδου της μέσης τιμής. Όταν όμως εφαρμόσθηκε τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά και πολύ κοντά σε αυτά της μεθόδους της μέσης τιμής. Γενικά στη βιβλιογραφία η αθροιστική τεχνική μαζί με τη μέθοδο της μέσης τιμής χρησιμοποιούνται πολύ συχνά καθώς είναι υπολογιστικά εύκολες και γρήγορες σε σχέση με τις άλλες δύο.

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων κρίνεται ως η πιο αξιόπιστη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε. Σε κάθε περίπτωση έδωσε αποτελέσματα χωρίς να υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί στη διάρκεια και τις συνθήκες των μετρήσεων. Τις περισσότερες φορές επιλέχθηκε οι μετρήσεις ροής θερμότητας να χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες, καθώς μια μικρή αλλαγή στη ροή θερμότητας επηρεάζει ελάχιστα την εσωτερική θερμοκρασία. Η μέθοδος έδωσε πάντα πολύ καλές προσαρμογές για την εσωτερική θερμοκρασία, ενώ για τη θερμοροή υπήρχαν μόνο δύο περιπτώσεις που οι προσαρμογές δεν ήταν αποδεκτές. Οι περιπτώσεις που η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι συζητήσιμη, εξαιτίας της μη αποδεκτής προσαρμογής των καμπυλών ροής θερμότητας είναι στην περίπτωση του πειραματικού οικίσκου όπου δεν έγινε χρήση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας και στη βόρεια ξυλόπηκτη τοιχοποιία. Στην πρώτη περίπτωση πιθανόν να χρειαζόταν θερμοκρασιακός έλεγχος, ενώ στη δεύτερη πιθανόν να μην υπήρχε μονοδιάστατη ροή θερμότητας. Αντίθετα, στις μετρήσεις των λιθόκτιστων τοιχοποιιών υπήρξαν πάρα πολύ καλές προσαρμογές και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά αξιόπιστα. Αυτό ίσως οφείλεται τόσο στη μεγάλη διάρκεια των μετρήσεων, όσο και στις μικρές διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας. Τέλος η μέθοδος αυτή, σύμφωνα με τα πρότυπα, έχει το μικρότερο σφάλμα, αλλά υστερεί στην υπολογιστική ισχύ, καθώς αν επιλεχθούν πυκνά διαστήματα για τις ιδιότητες k,ρ και C_p, και υπάρχουν αρκετά δεδομένα μπορεί να διαρκέσει ακόμα και ένα 24ώρο! Στη βιβλιογραφία δεν απαντάται τόσο συχνά όσο οι δύο προηγούμενες.

Η δυναμική μέθοδος κατά ISO (Dynamic Method) έδινε αποτελέσματα που πολλές φορές απέκλιναν από τα αντίστοιχα των άλλων μεθόδων. Η μέθοδος αυτή απαιτεί μεγάλες διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες και στη ροή θερμότητας, ενώ στις περιπτώσεις όπου ικανοποιούταν αυτή η απαίτηση έδινε αποδεκτά αποτελέσματα.

Αντίθετα όταν δεν ικανοποιούταν [πειραματικός οικίσκος χωρίς τη χρήση συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας (μικρές διακυμάνσεις σε ροή θερμότητας) και στις λιθοδομές (μικρές διακυμάνσεις σε εσωτερική θερμοκρασία)] δεν έδινε αποδεκτά αποτελέσματα. Επίσης σε κάθε περίπτωση το αποτέλεσμα δεν ήταν πλήρως ανεξάρτητο από τους παραμέτρους p, r και τ_1 γι αυτό και τα αποτελέσματα δεν γίνονται πλήρως αποδεκτά και χρειάζεται να γίνει περεταίρω μελέτη της μεθόδου. Επίσης είναι μία μέθοδος αυξημένου υπολογιστικού χρόνου, όπου η ταχύτητα εξαρτάται από το πλήθος των μετρήσεων και των παραμέτρων r και τ_1 που εξετάζονται. Τέλος δεν χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία κάτι που έκανε δύσκολη τη μελέτη της.

Ως γενικά συμπεράσματα κατά τη πειραματική μελέτη προκύπτουν ότι τα αποτελέσματα γίνονται πιο αξιόπιστα έχοντας γρηγορότερη και ευκολότερη σύγκλιση, μικρό συντελεστή μεταβολής και καλύτερες προσαρμογές καμπυλών όταν γίνεται χρήση του συστήματος θερμοκρασιακού ελέγχου. Θα ήταν όμως ιδανική η χρήση ενός τέτοιου συστήματος που δεν θα γινόταν μεταφορά της θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή επηρεάζοντας επιπλέον τις μετρήσεις ροής θερμότητας, όπως έκανε η χρήση του αερόθερμου, όποτε αυτό λειτουργούσε. Αντί αυτού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια ηλεκτρική αντίσταση.

Η ιδανική περίοδος για τέτοιου είδους μετρήσεις είναι ο χειμώνας, καθώς μπορεί εύκολα να ελεγχθεί η εσωτερική θερμοκρασία και να είναι σταθερά υψηλότερη από την εξωτερική. Η παρούσα διπλωματική διεξάγει κατά τη θερινή περίοδο και δεν ήταν δυνατό να συμβεί αυτό.

Επιπλέον είναι καθοριστική η χρήση του θερμογραφήματος της τοιχοποιίας πριν την εγκατάσταση των αισθητήρων. Έτσι αποφεύγονται οι περιοχές των θερμογεφυρών ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ύπαρξης μη μονοδιάστατης ροής στην περιοχή των μετρήσεων, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για όλες τις μεθοδολογίες προσδιορισμού του συντελεστή U-value.

Επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια των μετρήσεων τόσο πιο αξιόπιστα αποτελέσματα που προκύπτουν κάνοντας ευκολότερη τη χρήση κάποιων μεθόδων.

Γενικά παρατηρήθηκε ότι όταν όλες οι τεχνικές υπολογισμού του συντελεστή U-value εφαρμόζονται, υπήρχαν κοντινά αποτελέσματα, καθώς επίσης υπήρχε και μία συσχέτιση μεταξύ τους. Αυτό είναι ένα δείγμα σωστής εφαρμογής των μεθοδολογιών που προτείνουν τα πρότυπα.

Δεν δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τους αντίστοιχους θεωρητικούς συντελεστές U-value, αν και σε πολλές περιπτώσεις οι συντελεστές ήταν πολύ κοντά, καθώς υπάρχουν αβεβαιότητες κατά το θεωρητικό προσδιορισμό τους, ενώ συγκεκριμένα για την τοιχοποιία του πειραματικού οικίσκου η συμπεριφορά του διακένου αέρα στις διάφορες συνθήκες δεν ήταν πλήρως καθορισμένη.

Γενικά, ο προσδιορισμός του συντελεστή της θερμικής διαπερατότητας ενός κτιριακού κελύφους από επιτόπιες μετρήσεις επιφανειακών θερμοκρασιών και ροής θερμότητας έχει αρκετά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αρχικά, αν η ιδανική περίοδος για τη λήψη των μετρήσεων είναι ο χειμώνας, ώστε να είναι εύκολη η ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας και μιας σχετικά μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς. Αν το σημείο μέτρησης της τοιχοποιίας είναι κατάλληλο και πληρούνται οι συνθήκες μονοδιάστατης ροής, ο προσδιορισμός του U-value γίνεται όλο και πιο εύκολος. Δεν απαιτείται μεγάλος εξοπλισμός για την απόκτηση των δεδομένων, καθώς μόνο τρεις αισθητήρες για κάθε σημείο αρκούν. Τέλος με τον προσδιορισμό του συντελεστή U-value μπορεί να καταλάβει κανείς τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά μιας τοιχοποιίας, για να επιλεχθεί ή όχι η βελτίωσή της τοποθετώντας κάποιο επιπλέον στρώμα μόνωσης.

Από την άλλη, για την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος θα πρέπει η διάρκεια των μετρήσεων γενικά πρέπει να είναι μεγάλη, όπως επίσης και τα σημεία μέτρησης στην τοιχοποιία αρκετά. Επίσης ανάλογα με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται, είναι αναγκαία η κάλυψη κάποιων συνθηκών, ορισμένοι από αυτοί είναι αυστηροί. Τέλος, στην εγκατάσταση των αισθητήρων πολλές φορές απαιτείται επέμβαση στην τοιχοποιία, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό και θέλει ιδιαίτερη προσοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΑΖΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αξιολόγηση των μετρήσεων που λήφθηκαν σε δύο διαφορετικά κτίρια, με χαρακτηριστική διαφορά στη τους θερμική μάζα, στον πειραματικό οικίσκο (Mock up) και στο αρχοντικό των Μπενιζέλων. Οι μετρήσεις μέχρι την συγγραφή της διπλωματικής δεν ήταν αρκετές για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων, προκύπτουν όμως ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις για την περαιτέρω μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς των δύο κτιρίων.

6.1. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΚΟΥ (MOCK UP)

Ο πειραματικός οικίσκος (Mock up) βρίσκεται στην περιοχή Ζωγράφου Αττικής, Πολυτεχνειούπολη και ανήκει στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Είναι κατασκευασμένος από την εταιρεία Knauf με σύγχρονα υλικά και νέες τεχνικές. Το κτίριο είναι αποτελείται από δύο επίπεδα, το ισόγειο και τον όροφο, που επικοινωνούν μεταξύ τους με εσωτερική μεταλλική σκάλα.

Σχήμα 6.1 - Ο πειραματικός οικίσκους (Mock up)

6.1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Περιγραφή γεωμετρίας

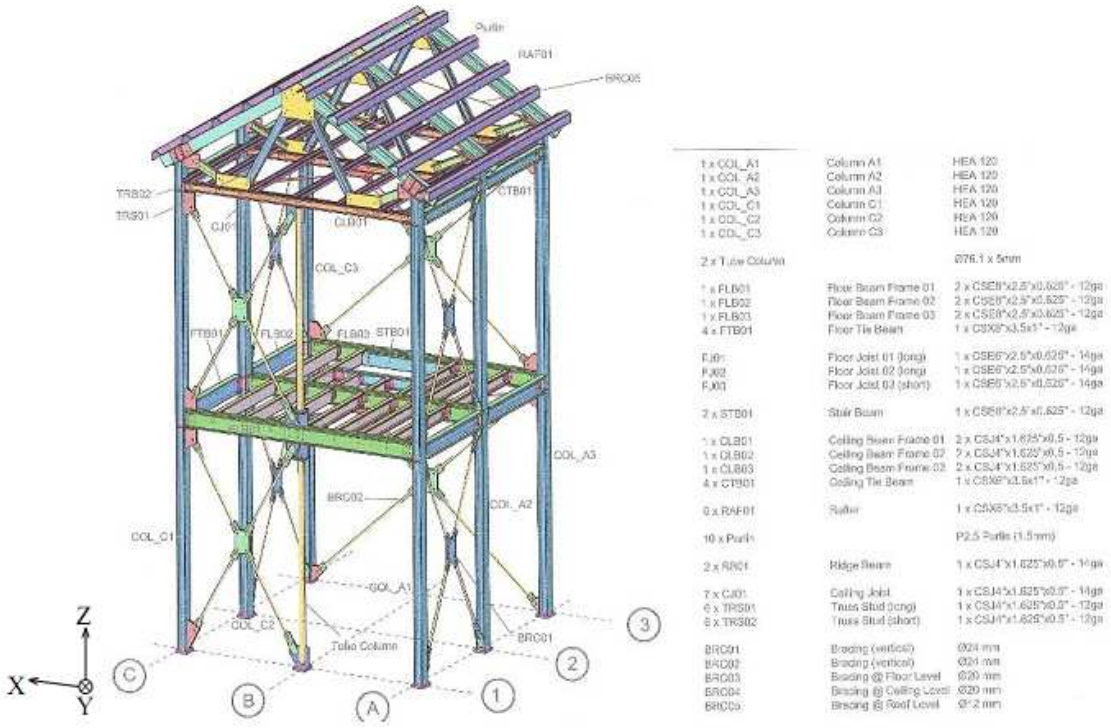
Το κτίριο είναι τετραγωνικής βάσης διαστάσεων 3.65×3.65 m και ύψους 7.53m. Διαθέτει δίρριχτη κεραμοσκεπή ύψους 1.57m (μετρημένο από τη βάση της), πλάτους βάσης 4.23m και κλίσης 31^{o}. Η κεραμοσκεπή εξέχει της κατασκευής κατά 0.29m σχηματίζοντας κορωνίδα. Οι όψεις του κτιρίου δεν διαθέτουν κανένα είδος σκιάστρου και χαρακτηρίζονται από χαμηλό συντελεστή απορροφητικότητας εξαιτίας των ανοιχτόχρωμων επιχρισμάτων.

Ο προσανατολισμός του κτιρίου ευνοεί την χρήση νότιων ανοιγμάτων για την μέγιστη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ποσότητος φυσικού φωτός, ενώ αποφεύγονται και οι σημαντικές απώλειες θερμότητας του βόρειου προσανατολισμού. Η νότια όψη διαθέτει δύο εκ των τριών ανοιγμάτων του κτιρίου, διαστάσεων 2.15×0.84 m στον πρώτο όροφο και 1.18×0.84 m στο ισόγειο. Παράλληλα, στη δυτική όψη έχει τοποθετηθεί ένα άνοιγμα διαστάσεων 1.18×0.83 m στον πρώτο όροφο, καθώς και η εξωτερική θύρα διαστάσεων 2.19×0.83 m.

Περιγραφή μεταλλικού σκελετού

Η διαμόρφωση του οικίσκου είναι μια πλήρους κλίμακας, διώροφη δομή που αποτελείται από χαλύβδινο φέροντα οργανισμό, ο οποίος αφορά υποστυλώματα, δοκάρια, δάπεδο, οροφή και σκελετό στέγης. Η επένδυση του κτιρίου γίνεται με ξηρά δόμηση. Η κατασκευή αποτελείται από τρία χαλύβδινα πλαίσια, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με οριζόντιες δοκούς σύνδεσης, τις τεγίδες στη στέγη και τις διαδοκίδες στο πρώτο επίπεδο. Επιπρόσθετη στήριξη επιτυγχάνεται μέσω διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας και στα δύο επίπεδα. Οι κολώνες και οι σύνδεσμοι κατασκευάζονται στην Ευρώπη από χάλυβα θερμής έλασης (HRS), ενώ το υπόλοιπο σύστημα αποτελείται από λεπτά τοιχώματα χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης (CFS), τα οποία κατασκευάζονται στις ΗΠΑ. Τα τμήματα θερμής έλασης είναι κατασκευασμένα από χάλυβα S235, ενώ τα τμήματα ψυχρής διαμόρφωσης από χάλυβα A570 βαθμού 33. Το ύψος του φέροντος οργανισμού του κτιρίου είναι 7.20m, με ύψος ορόφου 2.90m και ύψος στέγης 1.40m.

Στο οριζόντιο επίπεδο, οι διαστάσεις του κτιρίου είναι 3.40×3.40 m^2. Τα υποστυλώματα είναι κατασκευασμένες από έξι τμήματα HEA120 και από δύο κυλινδρικής διατομής Φ 76.1×5 mm. Το δάπεδο είναι κατασκευασμένο από δοκούς CSE 8"×2.5"×0.625", συνδέσμους CSX 8"×3.5"×1" και διαδοκίδες CSE 6"×2.5"×0.625". Η οροφή είναι κατασκευασμένη από δοκούς CSJ 4"×1.625"×0.5", συνδέσμους CSX 6"×3.5"×1" και δοκούς στήριξης CSJ 4"×1.625"×0.5". Τα ζευκτά από τα οποία είναι κατασκευασμένη η κεκλιμένη οροφή αποτελούνται από δοκούς στήριξης CSJ 4"×1.625"×0.5", και κεκλιμένες δοκούς βάσης CSX 6"×3.5"×1" πάνω στις οποίες έχουν βιδωθεί οι τεγίδες P2.5. Οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας της τοιχοποιίας, διατομής Φ24mm, είναι τοποθετημένοι τόσο κατά τη διαμήκη (X), όσο και κατά την εγκάρσια (Y) κατεύθυνση. Πρόσθετοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας διατομής Φ20mm βρίσκεται στο δάπεδο του ορόφου και στην οριζόντια οροφή, αντίστοιχα.



1 x COL_A1	Column A1	HEA 120
1 x COL_A2	Column A2	HEA 120
1 x COL_A3	Column A3	HEA 120
1 x COL_C1	Column C1	HEA 120
1 x COL_C2	Column C2	HEA 120
1 x COL_C3	Column C3	HEA 120
2 x Tube Column		Ø76.1 x 5mm
1 x FLB01	Floor Beam Frame 01	2 x CSE8"x2.5"x0.625" - 12ga
1 x FLB02	Floor Beam Frame 02	2 x CSE8"x2.5"x0.625" - 12ga
1 x FLB03	Floor Beam Frame 03	2 x CSE8"x2.5"x0.625" - 12ga
4 x FTB01	Floor Tie Beam	1 x CSX8"x3.5x1" - 12ga
FJ01	Floor Joist 01 (long)	1 x CSE6"x2.5"x0.625" - 14ga
FJ02	Floor Joist 02 (long)	1 x CSE6"x2.5"x0.625" - 14ga
FJ03	Floor Joist 03 (short)	1 x CSE6"x2.5"x0.625" - 14ga
2 x STB01	Stair Beam	1 x CSE8"x2.5"x0.625" - 12ga
1 x CLB01	Ceiling Beam Frame 01	2 x CSJ4"x1.625"x0.5 - 12ga
1 x CLB02	Ceiling Beam Frame 02	2 x CSJ4"x1.625"x0.5 - 12ga
1 x CLB03	Ceiling Beam Frame 03	2 x CSJ4"x1.625"x0.5 - 12ga
4 x CTB01	Ceiling Tie Beam	1 x CSX8"x3.5x1" - 12ga
6 x RAF01	Purlin	1 x CSX8"x3.5x1" - 12ga
10 x Purlin		P2.5 Purlin (1.5 mm)
2 x RR01	Ridge Beam	1 x CSJ4"x1.625"x0.5" - 14ga
7 x CJ01	Ceiling Joist	1 x CSJ4"x1.625"x0.5" - 14ga
6 x TRS01	Truss Stud (long)	1 x CSJ4"x1.625"x0.5" - 12ga
8 x TRS02	Truss Stud (short)	1 x CSJ4"x1.625"x0.5" - 12ga
BRC01	Bracing (vertical)	Ø24 mm
BRC02	Bracing (vertical)	Ø24 mm
BRC03	Bracing @ Floor Level	Ø20 mm
BRC04	Bracing @ Ceiling Level	Ø20 mm
BRC05	Bracing @ Roof Level	Ø12 mm

Σχήμα 6.2 - Σκαρίφημα του μεταλλικού σκελετού του κτιρίου και υπόμνημα με τα επιμέρους στοιχεία από τα οποία αποτελείται

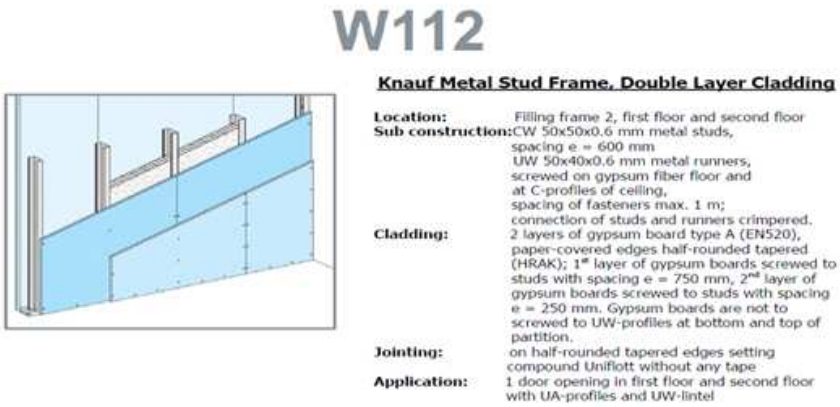
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Κατά την περιγραφή της τοιχοποιίας χρησιμοποιείται η κωδική ονομασία των εξαρτημάτων και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν από την Knauf για την κατασκευή της. Η ονοματολογία και η επεξήγηση αυτών δίνεται στο Παράρτημα Α.

Εξωτερική και εσωτερική τοιχοποιία

Η **εξωτερική τοιχοποιία** είναι η τοιχοποιία που περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα (5.2.1.1).

Η **εσωτερική τοιχοποιία** του κτιρίου τύπου W112 είναι κατασκευασμένη από γαλβανισμένους μεταλλικούς κάθετους ορθοστάτες CW διαστάσεων 50×50×0.6 mm στοιχισμένους σε απόσταση 600mm μεταξύ τους. Οι ορθοστάτες πλαισιώνονται από οριζόντιους γαλβανισμένους μεταλλικούς στρωτήρες UW διαστάσεων 50×40×0.6 mm. Οι στρωτήρες στηρίζονται με κοχλίωση επάνω στην επιφάνεια του πατώματος και στην οροφή. Μετά την κατασκευή του σκελετού βιδώνονται σε κάθε πλευρά δύο στρώσεις γυψοσανίδας επάνω στους κάθετους ορθοστάτες. Από τη μία πλευρά οι γυψοσανίδες Α με ακμές τύπου HRAK στοκάρονται με Uniflot χωρίς ταινία, ενώ από την άλλη πλευρά οι γυψοσανίδες τύπου Α με ακμές τύπου AK, στοκάρονται με Fugenfuller με επιπλέον χρήση χαρτοταινίας αρμού Kurt. Η κατασκευή περιλαμβάνει και στους δύο ορόφους άνοιγμα πόρτας με UA-profiles και UW-lintel.



Σχήμα 6.3 - Τομή εσωτερικής τοιχοποιίας

Στέγη

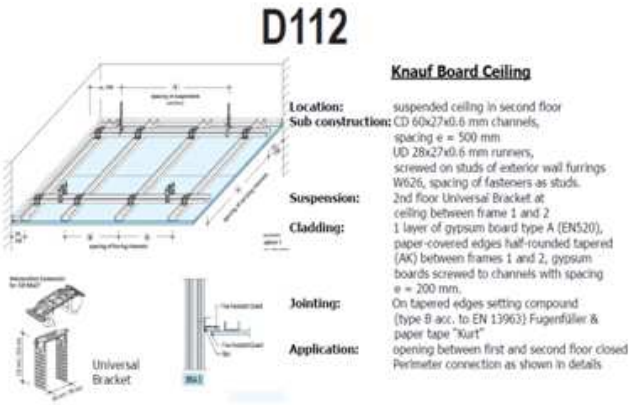
Η στέγη του κτιρίου αποτελείται από ξύλινη δίρριχτη κεραμοσκεπή στο εσωτερικό της οποίας έχει τοποθετηθεί διογκωμένη πολυστερίνη EPS 150 πάχους 60mm. Η γωνία κλίσης της στέγης είναι 31^{o} και εξέχει της κατακόρυφης περιμετρικής επιφάνειας σχηματίζοντας κορωνίδα πάχους 290mm για την αποφυγή αποστράγγισης των ομβρίων υδάτων επάνω στην επιφάνεια της τοιχοποιίας. Η κατασκευή της οροφής περιλαμβάνει τρία παράλληλα μεταλλικά ζευκτά σχηματίζοντας σχάρα πάνω στην οποία εδράζονται 10 μεταλλικές τεγίδες P2.5 (1.5mm) μορφής ωμέγα. Τα ζευκτά συνδέονται ανά δύο με αντιανέμια BRC05 (Ø2mm) για την εξασφάλιση από ανατροπή λόγω πιέσεως ανέμου καθώς και τη σταθεροποίηση και τη σύνδεση της όλης κατασκευής της στέγης. Επάνω στις τεγίδες βιδώνεται το πέτσωμα από OSB πάχους 22mm. Πάνω από το OSB έχει τοποθετηθεί πισσόχαρτο για υγρομόνωση. Η κεραμοσκεπή ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση της διογκωμένης πολυστερίνης EPS 150 πάχους 60mm ενδιάμεσα της οποίας τοποθετούνται καδρόνια για τη στήριξη των κεραμιδιών.

Σχήμα 6.4 - Ο σκελετός της κεραμοσκεπής.

Σχήμα 6.5 - Η πραγματική εικόνα της κεραμοσκεπής

Η κεραμοσκεπή διαχωρίζεται από τον πρώτο όροφο μέσω οριζόντιας οροφής. Η οροφή αποτελείται από το βασικό μεταλλικό σκελετό όπως και στην τοιχοποιία, ήτοι από προφίλ CD 60×27×0.6 τοποθετημένα ανά 500mm και οριζόντια περιμετρικά τύπου

UD 28×27×0.6 βιδωμένα στους ορθοστάτες του εξωτερικού τοίχου W626. Στο κάτω μέρος της οροφής προσαρτώνται δύο στρώσεις γυψοσανίδων πάχους 12.5mm.



Σχήμα 6.6 - Κατασκευή οροφής πρώτου ορόφου

Δάπεδο ισογείου

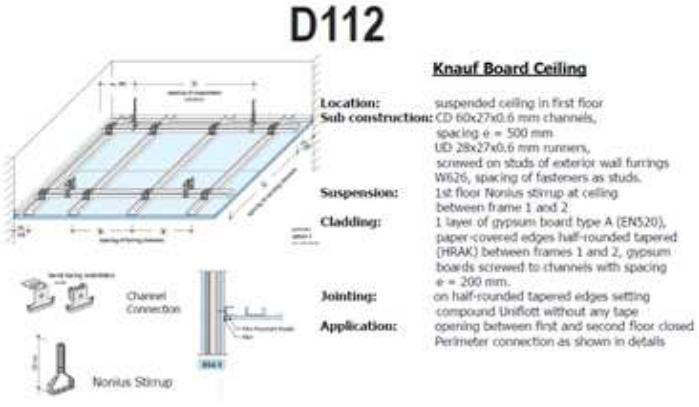
Το δάπεδο του κτιρίου αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 300mm και μία στρώση διογκωμένης πολυστερίνης EPS 200 πάχους 55mm. Άνωθεν της πολυστερίνης έχουν τοποθετηθεί δύο στρώσεις VIDIFLOOR πάχους 10mm.

Δάπεδο πρώτου ορόφου

Το δάπεδο στον όροφο είναι κατασκευασμένο με Knauf Integral, σύστημα Gifafloor πάχους 32mm. Το σύστημα προσκολλάται και βιδώνεται πάνω στις μεταλλικές δοκίδες του πατώματος μορφής Π.

Οροφή ισογείου

Η οροφή του ισογείου αποτελείται από το βασικό μεταλλικό σκελετό όπως και στην τοιχοποιία, ήτοι από προφίλ CD60×27×0.6 τοποθετημένα ανά 500mm και οριζόντια περιμετρικά τύπου UD 28×27×0.6 βιδωμένα στους ορθοστάτες του εξωτερικού τοίχου W626. Στο κάτω μέρος της οροφής προσαρτάται μία στρώση γυψοσανίδας πάχους 12.5mm η οποία συγκρατείται μέσω αναρτήσεων Nonius.



Σχήμα 6.7 - Κατασκευή οροφής ισογείου

Ανοίγματα

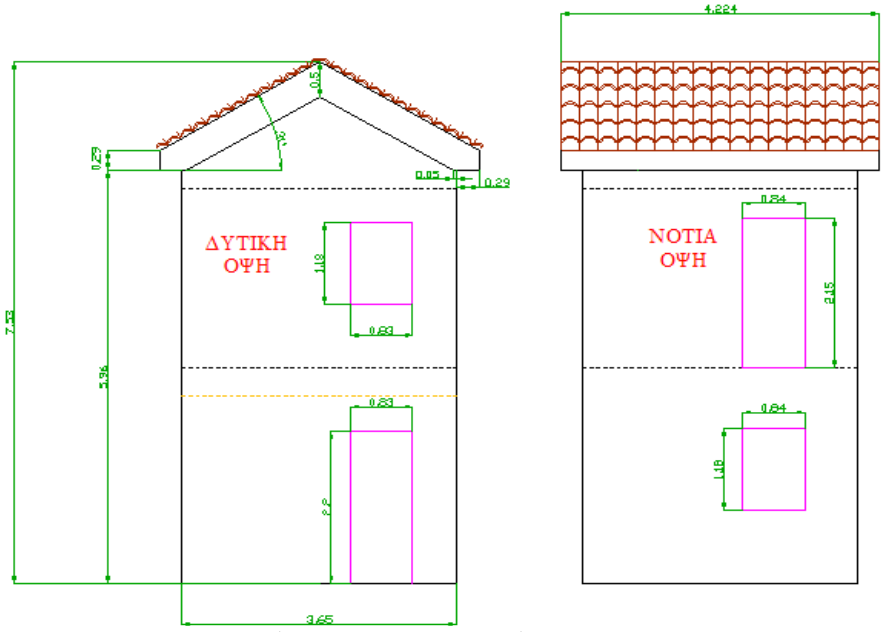
Τα εξωτερικά κουφώματα του κτιρίου είναι ανοιγοανακλινόμενα, από διατομές PVC, κατασκευασμένα σύμφωνα με τις σύγχρονες τεχνικές προδιαγραφές. Τα πλαίσια με θερμοδιακοπή έξι θαλάμων καθώς και η τριπλή υάλωση εξασφαλίζουν την απαραίτητη αεροστεγανότητα (κατηγορίας 4), ηχομόνωση, θερμομόνωση, μεγάλη διάρκεια ζωής και λειτουργικότητα.

- Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του πλαισίου U_f=0.91W/m^{2}K
- Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα U_g=1.7W/m^{2}K
- Ο συντελεστής διαπερατότητας ηλιακής ακτινοβολίας g_w=38.0%

Σχήμα 6.8 - Εσωτερική άποψη ανοιγμάτων

Σχήμα 6.9 - Εξωτερική άποψη ανοιγμάτων

Τέλος, το κτίριο διαθέτει εξωτερική πόρτα κατασκευασμένη από συνθετικό PVC, χαμηλού συντελεστή θερμοπερατότητας, U_g=0.8 W//m^{2}K, πλαίσιο 5 αεροστεγών θαλάμων με U_f=1.5 W//m^{2}K στιβαρής διατομής χάλυβα και με αντιδιαβρωτική προστασία. Ο τελικός θερμικός συντελεστής της πόρτας είναι U- value=1.00W//m^{2}K.



Σχήμα 6.10 - Διαστάσεις κτιρίου, Δυτική και Νότια όψη

Ιδιότητες υλικών

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του κτιρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 - Ιδιότητες Υλικών

		Πάχος (mm)	**Πυκνότητα (kg/m^3)**	**Συντελεστής διάχυσης υδρατμών**	**Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (W/mK) κατά DIN 4108**	**Θερμοχωρητικότητα (J/kgK)**	**Βάρος (kg/m^2)**
Aquapanel Outdoor		12.5	~ 1150	19	0.36	879	~ 16
Gifafloor FHB		32	1500	30/50	0.44	> 1000	~ 10
Vidifloor		2×10		21	0.29		24
EPS	**60**	50	13 - 15	20 - 40	0.039	1450	
	150	60	20 - 22	30 - 70	0.035	1450	
	200	55	25 - 28	40 - 100	0.034	1450	
Γυψοσανίδα Type A		12.5	≥ 8.5	Ξηρή: 10 Υγρή: 4	0.21		

6.1.2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από thermistor 10kMCD1 της εταιρίας Betatherm και αισθητήρες υγρασίας τύπου HIH-4030 της Honeywell. Οι αισθητήρες συνδέονται στη συσκευή Agilent 34972A για τη λήψη, την καταγραφή και την αποθήκευση των δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας των αισθητήρων και της συσκευής Agilent έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Η συσκευή Agilent, ρυθμίστηκε στην ανάγνωση των θερμοκρασιών από τα thermistor και της υγρασίας για 10 PLC, με συχνότητα δειγματοληψίας 1 min.

Τα σημεία που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι:

- Τοιχοποιία. Σε όλους τους τοίχους έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες κατά τον εγκάρσιο άξονα της τοιχοποιίας. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη μέτρηση της θερμοκρασίας στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια, με σκοπό τη γνώση της ολικής θερμοβαθμίδας κατά το πάχος του τοίχου, καθώς και στο εσωτερικό μέρος, ώστε να φαίνεται η θερμοβαθμίδα στο διάκενο αέρα.

- Εσωτερικοί χώροι. Σε τρεις από τους τέσσερις χώρους μετράται η θερμοκρασία χώρου με thermistors σε απόσταση 180cm από το έδαφος.

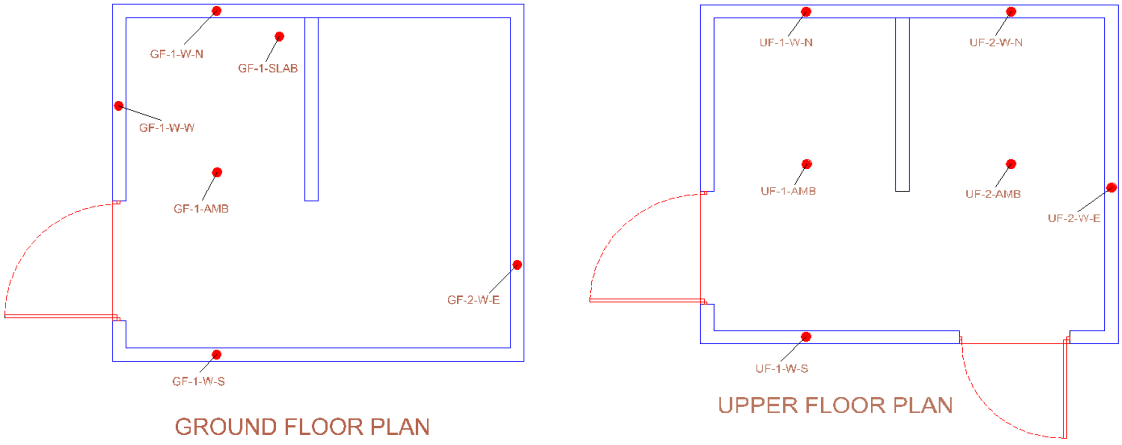
- Δάπεδο. Στο δάπεδο του ισογείου στο χώρο GF1 τοποθετήθηκε thermistor μεταξύ της μόνωσης EPS 200 και του τσιμέντου.

Οι αισθητήρες υγρασίας έχουν τοποθετηθεί σε δυο σημεία στον οικίσκο, ένας στο ισόγειο και ένας στον πρώτο όροφο.

Τα thermistor εγκαταστάθηκαν στις τοιχοποιίες σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα (5.2.1.4) για τη μετρητική διάταξη OMEGA/BETATHERM

Τα thermistor και οι αισθητήρες υγρασίας για τις μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα των χώρων κρέμονται από την οροφή κάθε χώρου με σύρμα, σε απόσταση 1.80cm από το δάπεδο.

Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η ακριβή θέση όλων των thermistor στους δύο ορόφους του κτιρίου.



Σχήμα 6.11 - Ακριβής θέση thermistor στο κτίριο

Η ονοματολογία των αισθητήρων έχει γίνει με την εξής κωδικοποίηση:

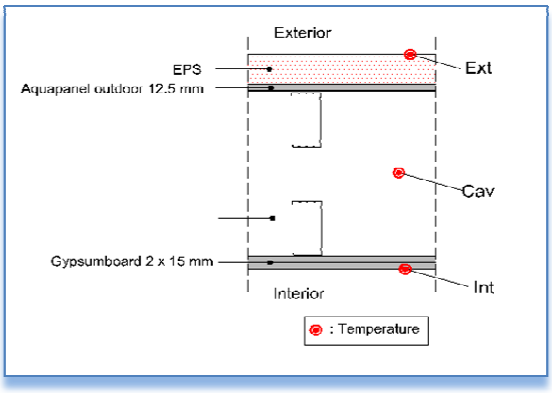
ΧΩΡΟΣ-ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ-ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ-ΣΗΜΕΙΟ

Η ονοματοδοσία είναι παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2.

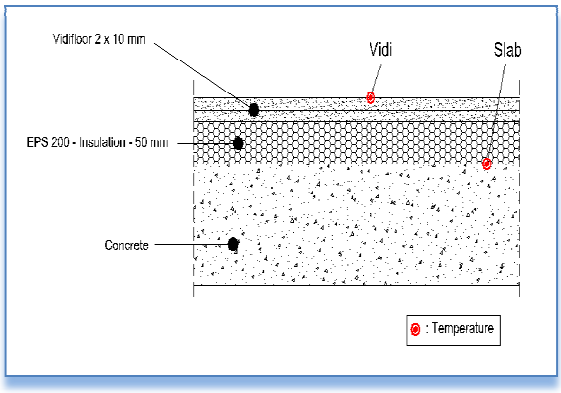
Πίνακας 6.2 - Ονοματοδοσία αισθητήρων

ΧΩΡΟΣ		**ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ**		**ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ**		**ΣΗΜΕΙΟ**	
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ
GROUND FLOOR 1	GF1	WALL	W	NORTH	N	Εξωτερική επιφάνεια	Ext
GROUND FLOOR 2	GF2	CEILING	C	EAST	E	Εσωτερική επιφάνεια	Int
UPPER FLOOR 1	UF1	FLOOR	F	SOUTH	S	Εσωτερικό κενό	Cav
UPPER FLOOR 2	UF2			WEST	W		

Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η τομή της τοιχοποιίας και η ακριβής θέση των thermistor σε αυτή. Στα οχτώ σημεία του κελύφους όπου μετράται εσωτερική και εξωτερική επιφανειακή θερμοκρασία της τοιχοποιίας και θερμοκρασία του διακένου, η διάταξη είναι η ίδια. Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η τομή του δαπέδου και η θέση των θερμοστοιχείων:

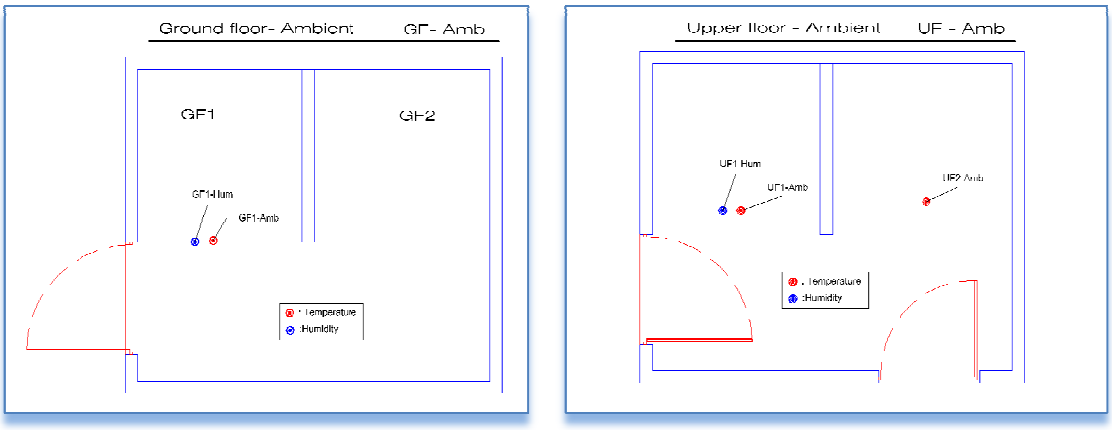


Σχήμα 6.12 - Τομή τοιχοποιίας στο σημείο μέτρησης



Σχήμα 6.13 - Ακριβής θέση thermistor στο δάπεδο

Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται η θέση των thermistor και υγρασιομέτρων που μετρούν τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα του χώρου.

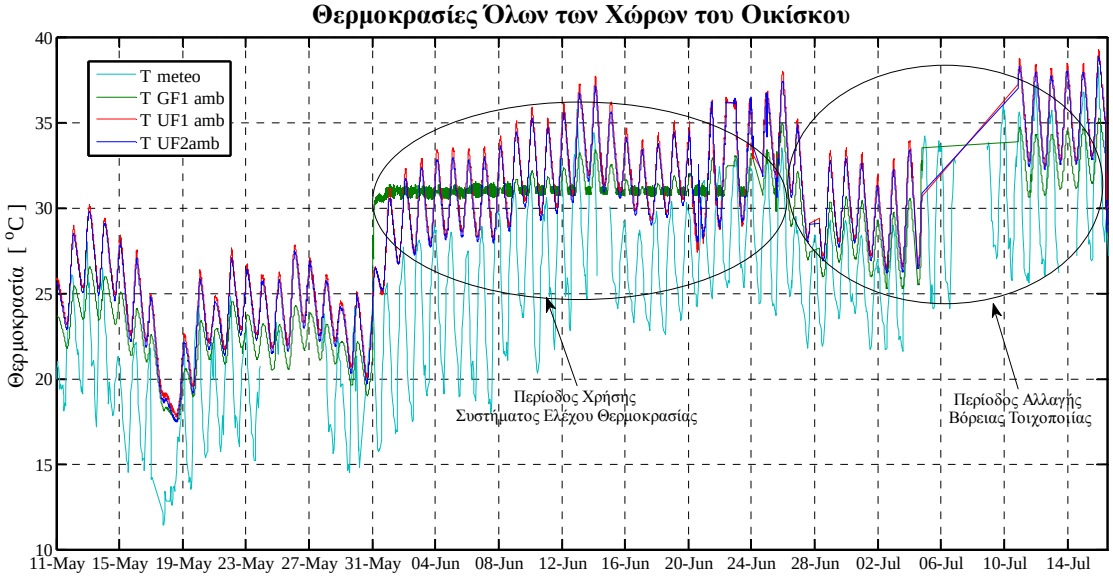


Σχήμα 6.14 - Θέση αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα στο ισόγειο και τον όροφο

6.1.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τον πειραματικό οικίσκο. Οι μετρήσεις διήρκησαν από τα μέσα Μαΐου μέχρι τα μέσα Ιουλίου. Όμως εξαιτίας των πειραματικών διαδικασιών για τον προσδιορισμό του συντελεστή της θερμικής διαπερατότητας του κελύφους (Κεφάλαιο 5), το μήνα Ιούνιο έγινε χρήση συστήματος ελέγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας στο χώρο GF1 με σκοπό να μην μειωθεί η θερμοκρασία κάτω από τους 30°C. Συνεπώς εκείνες της ημέρες δεν μπορεί να γίνει ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους του κτιρίου. Κατόπιν, το διάστημα μεταξύ τις 24 Ιουνίου μέχρι και τα μέσα Ιουλίου ξεκίνησαν οι διαδικασίες αλλαγής ολόκληρης της βόρειας τοιχοποιίας, συνεπώς το κέλυφος του κτιρίου δεν ήταν καθορισμένο. Ως εκ τούτου, για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του πειραματικού οικίσκου είναι σωστό να ληφθούν υπ' όψιν μόνο οι μετρήσεις κατά το διάστημα 12 Μαΐου με 31 Μαΐου. Το διάστημα αυτό είναι πολύ μικρό για ολοκληρωμένα συμπεράσματα, προκύπτουν όμως αρκετές ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις.

Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες όλων των χώρων του πειραματικού οικίσκου κατά τη διάρκεια όλων των μετρήσεων.

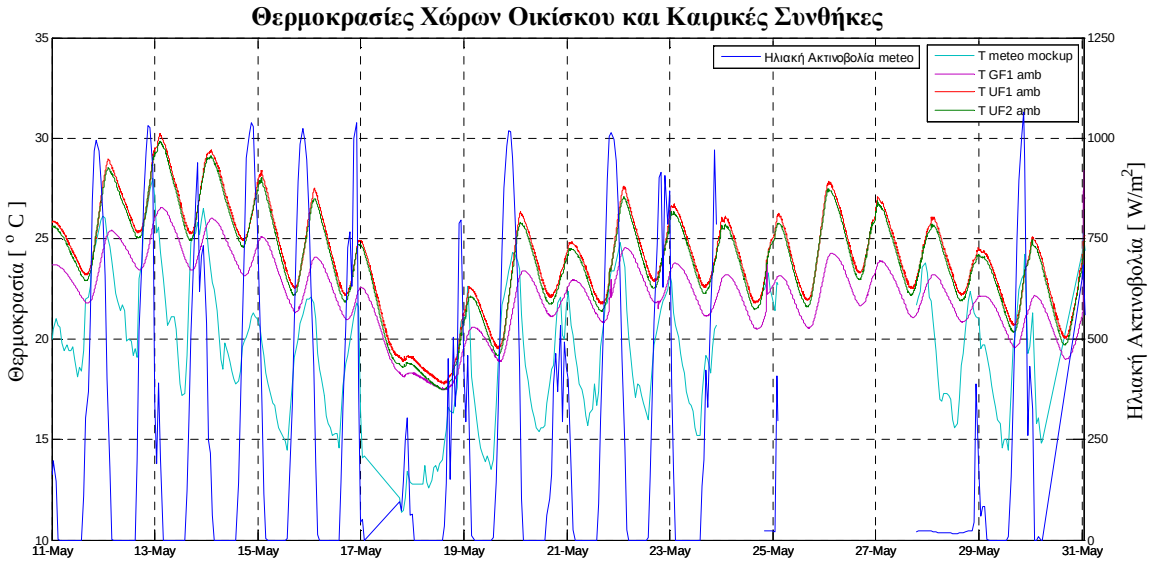


Σχήμα 6.15 - Θερμοκρασίες των χώρων του οικίσκου σε ολόκληρη την περίοδο μέτρησης

Παρατηρείται η περίοδος χρήσης του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας, όπου η θερμοκρασία του χώρου GF1 (πράσινο χρώμα στο Σχήμα 6.15) δεν πέφτει κάτω από τους 30°C επηρεάζοντας και τις θερμοκρασίες των χώρων του ορόφου, οι οποίες αυξήθηκαν ραγδαία και δεν πέφτουν κάτω από τους 27°C. Επίσης κατά τις αρχές του Ιουλίου υπάρχει απώλεια μετρήσεων εξαιτίας της αλλαγής της τοιχοποιίας, ενώ απώλειες στις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού υπάρχουν διάσπαρτες καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, χωρίς να είναι καθοριστικές για τα συμπεράσματα.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν, οι μετρήσεις αναλύονται μόνο για το διάστημα 12 Μαΐου με 31 Μαΐου. Το διάγραμμα του Σχήματος 6.15 για αυτή την

περίοδο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.16, μαζί με την ηλιακή ακτινοβολία που μετρήθηκε από το μετεωρολογικό σταθμό. Οι θερμοκρασίες διαβάζονται στον αριστερό y-άξονα, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία (μπλε χρώμα) στο δεξιό.

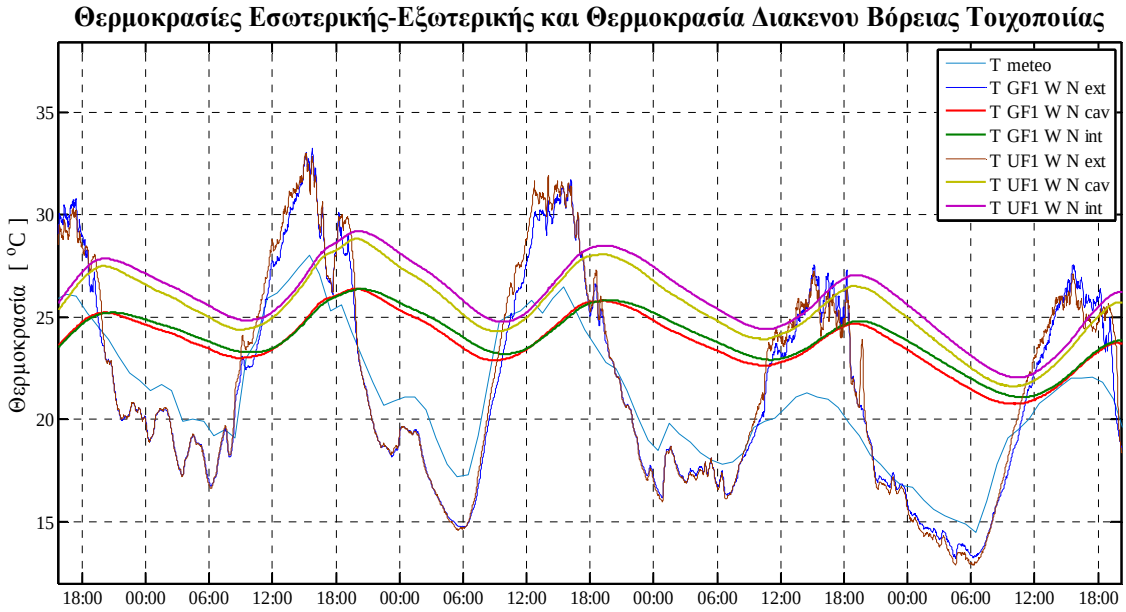


Σχήμα 6.16 - Θερμοκρασίες χώρων και θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία περιβάλλοντος

Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία των δωματίων του ορόφου είναι πάντα μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του ισογείου και μάλιστα την ημέρα να παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά περίπου 3^{o}C και τη νύχτα η ελάχιστη, περίπου 1^{o}C. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μεγάλο άνοιγμα της νότιας όψης του ορόφου, καθώς κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο χώρος θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ τη νύχτα όπου οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι χαμηλές, στον όροφο υπάρχουν μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας, λόγω της οροφής και του υψηλότερου συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του ανοίγματος σε σχέση με το ισόγειο και την πόρτα. Οι απώλειες/κέρδη από τα δύο μικρά ανοίγματα σε όροφο και ισόγειο θεωρούνται οι ίδιες, καθώς είναι ίδιων διαστάσεων και υλικών. Μια απόδειξη αυτού, είναι τις ημέρες χωρίς μεγάλη ηλιοφάνεια (18 και 21 Μαΐου), όπου η διαφορά των θερμοκρασιών την ημέρα έχει μειωθεί στο ελάχιστο. Η διαφορά αυτή στο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας οδηγεί σε διαφορές στις διακυμάνσεις μεταξύ των θερμοκρασιών ορόφου και ισογείου.

Επίσης οι χώροι των δωματίων του ορόφου έχουν σχεδόν πάντα την ίδια θερμοκρασία, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο, καθώς το χώρισμα των δυο δωματίων δεν είναι μεγάλο.

Στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των βορείων τοιχοποιιών του ισογείου και του ορόφου, στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια, καθώς επίσης και η θερμοκρασία του διακένου σε αυτές.



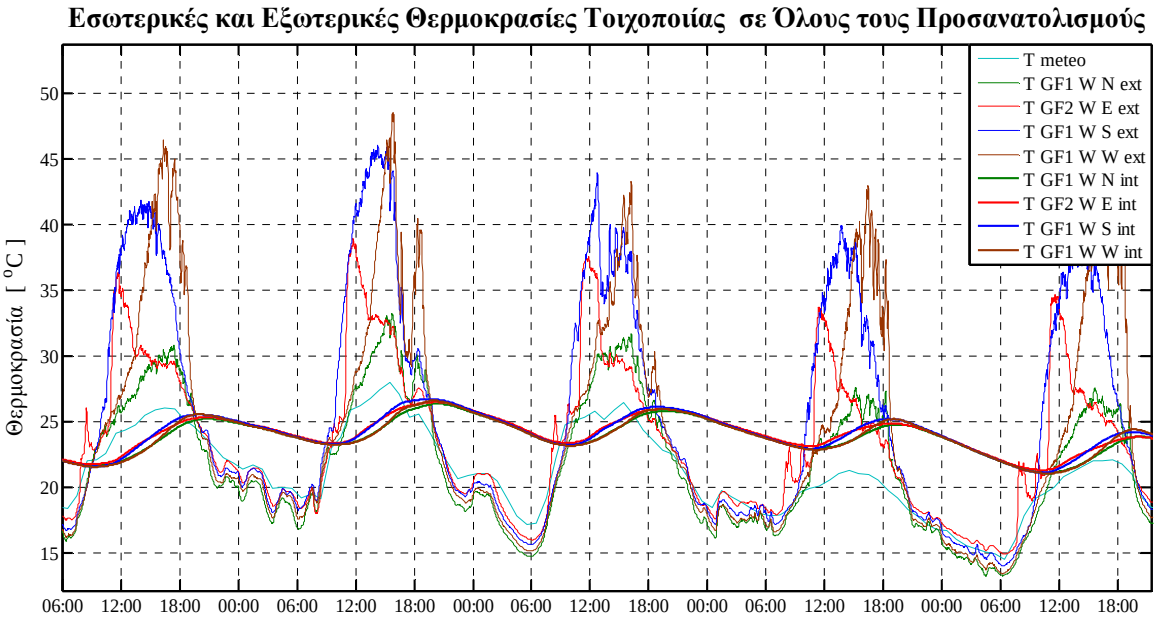
Σχήμα 6.17 - Θερμοκρασίες στην τομή των βορείων τοιχοποιιών του ορόφου και του ισογείου

Παρατηρείται ότι τα δύο διάκενα έχουν σταθερά χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία της επιφάνειας των τοιχοποιιών, δείγμα ότι τα διάκενα είναι κλειστά και ο αέρας του διακένου της τοιχοποιίας του ισογείου δεν επικοινωνεί με τον αέρα του διακένου του ορόφου.

Επίσης οι εξωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες ταυτίζονται κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή δεν εξαρτάται το ύψος από την επιφανειακή θερμοκρασία της τοιχοποιίας. Ακόμη παρουσιάζουν μέγιστα και ελάχιστα την ίδια στιγμή με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα.

Τέλος η τοιχοποιία παρουσιάζει μια θερμική υστέρηση περίπου 3-4 ωρών, καθώς το μέγιστο της εσωτερικής τοιχοποιίας (περίπου στις 19:00) συμβαίνει τρεις με τέσσερις ώρες μετά το μέγιστο της εξωτερικής (περίπου στις 15:30-16:00). Έτσι μπορεί να επιβεβαιωθεί το αποτέλεσμα είχε προκύψει στην ενότητα 5.2.1.5, από την εξίσωση (5.12), δηλαδή 3.3hr.

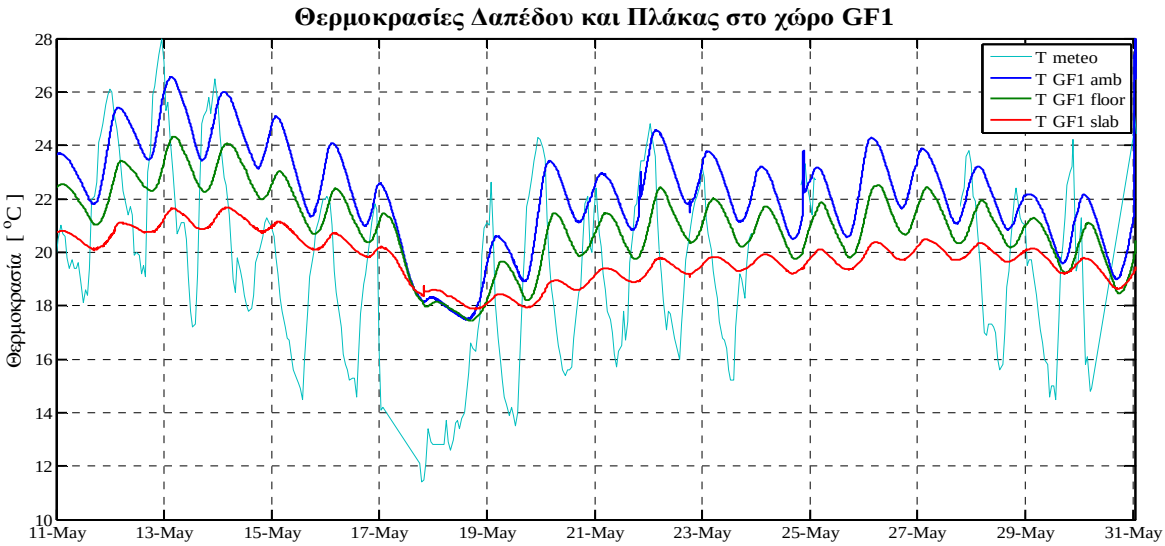
Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζονται οι εσωτερικές και εξωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες των τοιχοποιιών όλων των προσανατολισμών του ισογείου.



Σχήμα 6.18 - Εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες όλων των προσανατολισμών των τοιχοποιιών του ισογείου

Παρατηρείται ότι οι εξωτερικές θερμοκρασίες παρουσιάζουν ταυτόχρονα την ελάχιστη τιμή τους, ενώ οι μέγιστη παρουσιάζεται ανάλογα με τον προσανατολισμό της: η ανατολική στις 12:00, η νότια περίπου στις 14:00, η δυτική περίπου στις 16:30 και η βόρεια στις 15:00, ταυτόχρονα με την θερμοκρασία του αέρα. Η διαφορά στην ώρα οφείλεται στη θέση του ήλιου και στον προσανατολισμό. Όμως παρατηρείται ότι νότια και δυτική έχουν τα μεγαλύτερα μέγιστα, στη συνέχεια η ανατολική και τέλος η βόρεια έχει τα μικρότερα μέγιστα. Σε αυτό επηρεάζει και ο σκιασμός από τα γύρω δέντρα στη βορεια και ανατολική πλευρα. Από την άλλη οι εσωτερικές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μικρές διαφορές, μέσα στα όρια του μετρητικού σφάλματος.

Στο Σχήμα 6.19 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του πατώματος και της πλάκας του ισογείου.

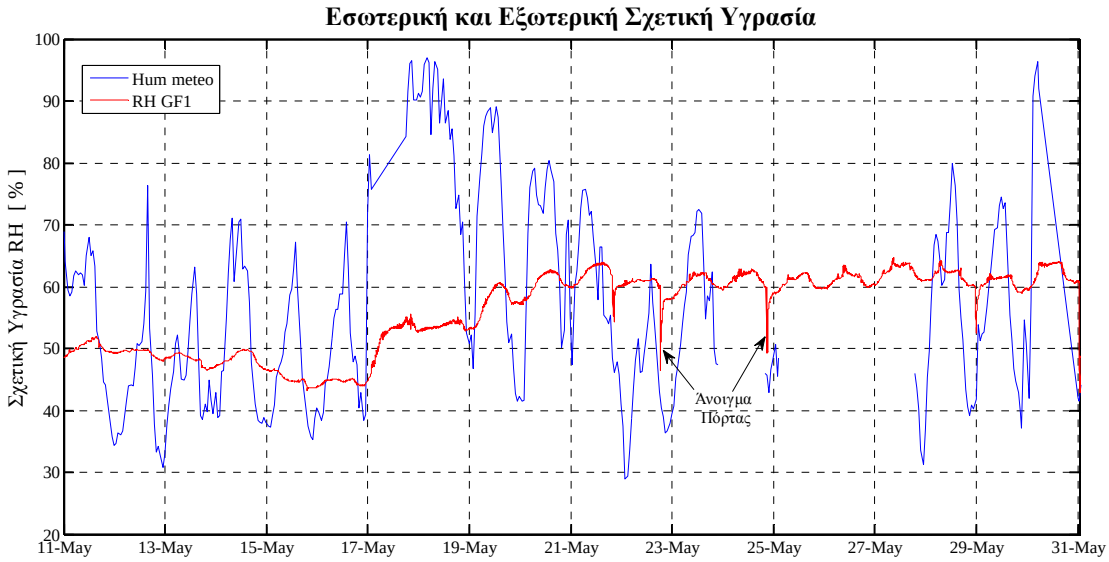


Σχήμα 6.19 - Θερμοκρασίες Πατώματος στο ισόγειο

Παρατηρείται ότι η θερμοακρασία της πλάκας (κάτω από τη θερμομόνωση) είναι συνεχώς μικρότερη από τη θερμοκρασία του δαπέδου, εκτός από την ημέρα που η εξωτερική θερμοκρασία πέφτει ραγδαία. Εδώ φαίνεται η λειτουργία της μόνωσης, κατά τις ημέρες όπου η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι υψηλότερη του δαπέδου, η θερμότητα μεταφέρεται από τον αέρα στο δάπεδο και στη συνέχεια στην πλάκα διαμέσου της μόνωσης η οποία την εμποδίζει και υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά.

Επίσης οι διακυμάνσεις της πλάκας είναι πολύ μικρότερες από τις διακυμάνσεις του δαπέδου εξαιτίας της μεγάλης θερμικής μάζας της πλάκας (τσιμέντου).

Στο Σχήμα 6.20 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του κτιρίου στην υγρασία.



Σχήμα 6.20 - Σχετική υγρασία εξωτερικού αέρα και ισογείου

Η εσωτερική υγρασία του οικίσκου παρουσιάζει πολύ μικρές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, έτσι φαίνεται να υπάρχει ελάχιστη διείσδυση αέρα στο χώρο. Η διείσδυση αέρα είναι εμφανής τις ημέρες λήψης των δεδομένων όπου ανοίχτηκε η πόρτα και η υγρασία μειώθηκε.

Επίσης από την ημέρα αλλαγής του καιρού, όπου αυξήθηκε η υγρασία του εξωτερικού αέρα, η εσωτερική υγρασία αυξήθηκε ραγδαία μέσα σε τέσσερις ημέρες από 45% στην τιμή 62%.

6.2. ΑΡΧΟΝΤΙΚΟ ΤΩΝ ΜΠΕΝΙΖΕΛΩΝ

Το Αθηναϊκό Αρχοντικό των Μπενιζέλων στην οδό Αδριανού 96, είναι η παλαιότερη σωζόμενη οικία της Αθήνας και ανήκει στην Ιερά Αρχιεπισκοπή Αθηνών. Αποτελεί ένα σημαντικό μνημείο της Μεταβυζαντινής περιόδου (16ος με 17ος αιώνας) και είναι ένα τυπικό δείγμα αστικής αρχιτεκτονικής της εποχής **[24]**. Το κτίριο άνηκε στην οικογένεια των Μπενιζέλων, αριστοκρατική οικογένεια ευγενών του Βυζαντίου και προγόνων της Αγίας Φιλοθέης. Σήμερα, μετά την ανακατασκευή του προορίζεται για μουσείο.

Σχήμα 6.21 - Βόρεια όψη του κτιρίου

Σχήμα 6.22 - Νότια όψη του κτιρίου

6.2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το κτίριο αποτελείται από δύο στάθμες, το ισόγειο και τον όροφο. Το ισόγειο έχει ένα τμήμα του κλειστό και ένα τοξωτό προστώο. Το κλειστό τμήμα είναι χωρισμένο σε τρία δωμάτια, το δεξιό (GR), με δυτικό προσανατολισμό, το κεντρικό (GM) και το αριστερό, με ανατολικό προσανατολισμό (GL). Ο όροφος είναι ξυλόστεγος με το μπροστινό του τμήμα να είναι ανοιχτό (χαγιάτι) και το πίσω να αποτελείται από δύο δωμάτια, ένα στα αριστερά, το ανατολικό, (UL) και ένα δεξιά, το δυτικό, (UR). Στο μέσον αυτών υπάρχει σαχνισί (UM).

Σχήμα 6.23 - Προστώο ισογείου

Σχήμα 6.24 - Κάτοψη ισογείου και ονοματοδοσία χώρων

Τα δωμάτια του ισογείου έχουν ύψος 3.3m. Το αριστερό δωμάτιο, ανατολικό, (GL) έχει εσωτερικές διαστάσεις 8.37×4.37 m και χωρίζεται σε τρεις χώρους με δύο εγκάρσια εσωτερικά λιθόκτιστα τόξα πάχους 38cm. Η νότια, η δυτική και η βόρεια τοιχοποιία είναι λιθόκτιστες πάχους 60cm, 60cm και 55cm αντίστοιχα, με διατηρούμενα και ανακατασκευασμένα τμήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.24 όπου με άσπρο τα ανακατασκευασμένα και μπλε ή ροζ τα διατηρούμενα. Η αναλυτική περιγραφή των τοίχων αυτών έχει γίνει στην ενότητα (5.2.2.1). Όλες οι λιθόκτιστες τοιχοποιίες φέρουν σε πολλές σειρές καθ' ύψος ξυλοδεσίες (Σχήμα 6.25). Η ανατολική τοιχοποιία (πράσινη στο Σχήμα 6.24) είναι κατασκευασμένη από μπατικό διάτρητο τούβλο πάχους 20cm και επιχρισμένη, τόσο εσωτερικά, όσο και εξωτερικά, τεσσάρων στρώσεων τύπου ALBARIA SP2, το οποίο είναι ένα διαπνέον επίχρισμα κατά της υγρασίας (Σχήμα 6.27). Ο βόρειος τοίχος έχει ένα άνοιγμα διαστάσεων 102×144 cm, (Σχήμα 6.26) το οποίο εφάπτεται με το δάπεδο και είναι καλυμμένο με Plexiglass. Τα κενά μεταξύ τοιχοποιίας και υαλοπίνακα καλύφθηκαν με αφρολέξ. Επίσης στη μέση του βόρειου τοίχου υπάρχει είσοδος με ξύλινη πόρτα. Τέλος ο εσωτερικός δυτικός τοίχος παρουσιάζει μια κοιλότητα στο πάνω μισό και στο κέντρο του (Σχήμα 6.28).

Σχήμα 6.25 - Βόρεια τοιχοποιία του χώρου GL. Είναι εμφανή τα ύψη των ξυλοδεσιών

Σχήμα 6.26 - Άνοιγμα βόρειας τοιχοποιίας του χώρου GL

Σχήμα 6.27 - Ανατολική τοιχοποιία του χώρου GL

Σχήμα 6.28 - Δυτική τοιχοποιία του χώρου GL

Το κεντρικό δωμάτιο (GM), εσωτερικών διαστάσεων 4.07×4.53 m αποτελείται από ένα χώρο, όπου οι εξωτερικές τοιχοποιίες είναι η βόρεια, πάχους 55cm και η νότια, πάχους 60cm, και οι εσωτερικές (δυτική και ανατολική) έχουν πάχους 60cm. Όλες οι τοιχοποιίες είναι λιθόκτιστες αποτελούμενες από ανακατασκευασμένα και διατηρούμενα τμήματα (Σχήμα 6.24). Στο χώρο δεν υπάρχει κάποιο εξωτερικό άνοιγμα, εκτός από τη ξύλινης είσοδο στη βόρεια τοιχοποιία, στην πλευρά που εφάπτεται με το δυτικό τοίχο. Ο δυτικός τοίχος, μεταξύ κεντρικού και δεξιού δωματίου, έχει ένα διαμπερές άνοιγμα διαστάσεων 45×90 cm το οποίο κλείστηκε με αφρολέξ (Σχήμα 6.30).

Το δεξιό δωμάτιο (GR), το δυτικό, εσωτερικών διαστάσεων 6.57×4.59 m, χωρίζεται σε δύο χώρους με ένα εγκάρσιο εσωτερικό τόξο πάχους 38cm. Η νότια, η βόρια και η δυτική τοιχοποιία του δωματίου, είναι οι εξωτερικές πάχους 60cm, 55cm και 60cm αντίστοιχα, ενώ ο ανατολικός τοίχος έχει πάχος 60cm και είναι εσωτερικός διαχωρίζοντας το αριστερό και το κεντρικό δωμάτιο. Όλες οι τοιχοποιίες είναι λιθόκτιστες, κάποια τμήματα των οποίου είναι διατηρούμενα και κάποια ανακατασκευασμένα (Σχήμα 6.24). Ο δυτικός τοίχος παρουσιάζει μία κοιλότητα, στο κέντρο της οποίας έχει ένα υαλοπίνακα, το πλαίσιο του οποίου δεν εφαρμόζει καλά στην τοιχοποιία και τα κενά καλύφθηκαν με αφρολέξ (Σχήμα 6.29). Παρόμοια κοιλότητα παρουσιάζει και ο ανατολικός τοίχος στο κέντρο του, ενώ στην πλευρά που εφάπτεται με το βόρειο τοίχο υπάρχει το άνοιγμα που περιγράφηκε παραπάνω (Σχήμα 6.30). Στη βόρεια όψη υπάρχει είσοδος με ξύλινη πόρτα.

Σχήμα 6.29 - Δυτική τοιχοποιία του χώρου GR

Σχήμα 6.30 - Ανατολική τοιχοποιία του χώρου GR

Σχήμα 6.31 - Νότια τοιχοποιία του χώρου GR. Είναι εμφανή τα σημεία ξυλοδεσιάς και το όριο μεταξύ διατηρούμενης και ανακατασκευασμένης τοιχοποιίας

Η οροφή του ισογείου αποτελείται από δοκούς πλάτους 19cm και διατομής 10×15 cm και από σανίδωμα πάχους 3cm από πεύκο (Σχήμα 6.32). Το σανίδωμα αποτελεί το δάπεδο του ορόφου. Το δάπεδο του κλειστού τμήματος του ισογείου είναι από πατημένο χώμα και κουρασάνι (Σχήμα 6.34), ενώ εξωτερικά είναι πλακόστρωτο στη βόρεια όψη και ακάλυπτος χώρος στη νότια.

Σχήμα 6.32 - Οροφή χώρων ισογείου

Σχήμα 6.33 - Πάτωμα χώρων ισογείου

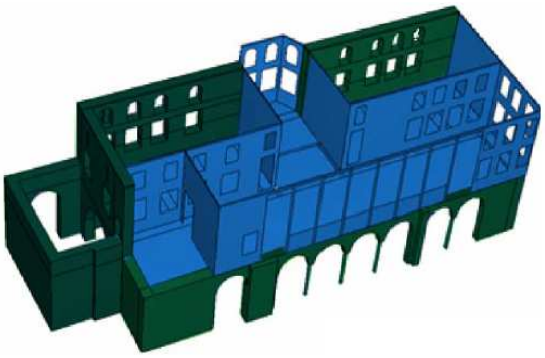
Πόρτες ισογείου

Σχήμα 6.34 - Πόρτα ισογείου

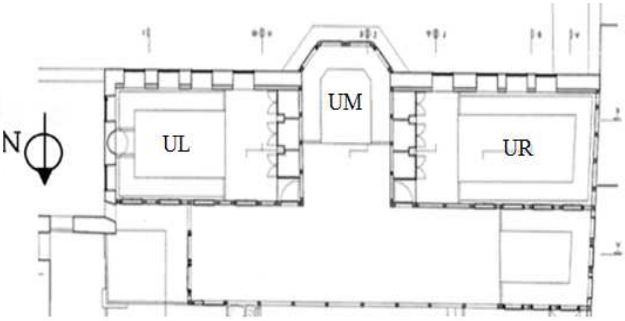
Τα τρία δωμάτια του ισογείου έχουν από μία πόρτα στην εξωτερική πλευρά του πάχους της τοιχοποιία κατασκευασμένη από ξύλο σουηδικού πεύκου, διαστάσεων 96×224 cm και πάχους 2cm. Εξαιτίας της ανώμαλης επιφάνειας του δαπέδου σε κάθε πόρτα υπάρχει χαραμάδα 2-3.5 cm .

Τα δωμάτια του ορόφου έχουν ύψος 4m. Οι τοιχοποιίες του ορόφου είναι ξυλόπηκτες στο σύνολό τους με εξαίρεση το νότιο και τον ανατολικό προσανατολισμό που είναι από λιθοδομή.

Σχήμα 6.35 - Το ανοιχτό τμήμα του ορόφου



Σχήμα 6.36 - Μοντέλο κτιρίου. Με πράσινο παρουσιάζονται οι λιθόκτιστοι και με μπλε οι ξυλόπηκτες τοιχοποιίες **[24]**



Σχήμα 6.37 - Κάτοψη ορόφου και ονοματοδοσία χώρων

Στο αριστερό δωμάτιο (UL) του ορόφου, το ανατολικό, εσωτερικών διαστάσεων 8.68×4.41 m, η νότια και η ανατολική τοιχοποιία, πάχους 60cm, είναι λιθόκτιστες τμήματα των οποίων είναι ανακατασκευασμένα από τους ίδιους λίθους και τα υπόλοιπα τμήματα είναι διατηρούμενα (Σχήμα 6.36). Η περιγραφή των τμημάτων της κάθε τοιχοποιίας περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 5.2.2.1, με τη διαφορά ότι επιπρόσθετα στην εσωτερική πλευρά των τοίχων υπάρχει διαπνέον επίχρισμα κατά της υγρασίας, 4 στρώσεων, τύπου ALBARIA SP2 με υδραυλική άσβεστο χωρίς τσιμέντο. Υπάρχουν επίσης ζώνες ξυλοδεσιών από δρυ στην έδραση του πατώματος, στην στέψη των τοίχων, στην ποδιά και το πρέκι των παραθύρων καθώς επίσης και σε ενδιάμεση θέση μεταξύ της ποδιάς και των πρεκιών. Η διατομή ξύλων είναι 7×16 cm. Ο νότιος τοίχος έχει τέσσερα παράθυρα και τρεις φεγγίτες πάνω από τα τρία πρώτα παράθυρα (Σχήμα 6.38). Ο ανατολικός τοίχος έχει στο κέντρο του τζάκι και από ένα παράθυρο κι ένα φεγγίτη, δεξιά και αριστερά (Σχήμα 6.39). Η καμινάδα του τζακιού, διαμέτρου περίπου 1m, έμεινε ανοιχτή για τους πρώτους δύο μήνες της μελέτης και στη συνέχεια κλείστηκε με αφρολέξ. Η βόρεια και δυτική τοιχοποιία είναι ξυλόπηκτες (Σχήμα 6.36), πάχους 22cm, όπως ακριβώς περιγράφηκε στην ενότητα 5.2.3.1. Στη βόρεια τοιχοποιία

και στη δυτική πλευρά, βρίσκεται η είσοδος του δωματίου. Επίσης υπάρχουν τέσσερα παράθυρα και πέντε φεγγίτες, τέσσερις πάνω από κάθε παράθυρο και ένας πάνω από την πόρτα Η δυτική τοιχοποιία έχει ένα παράθυρο χωρίς φεγγίτη. Το δάπεδο του δωματίου είναι ανισοεπίπεδο. Περίπου το ένα τρίτο του δαπέδου του δωματίου είναι το σανίδωμα του ορόφου του ισογείου, και στον υπόλοιπο χώρο υπάρχει σκαλοπάτι ύψους 19.5cm και πάτωμα κατασκευασμένο από τα ίδια σανίδια.

Σχήμα 6.38 - Νότια τοιχοποιία του χώρου UL. Είναι εμφανείς οι θέσεις των ξυλοδεσιών

Σχήμα 6.39 - Ανατολική τοιχοποιία του χώρου UL

Το δεξί δωμάτιο, το δυτικό, (UR) εσωτερικών διαστάσεων 9.23×4.41 m είναι ακριβώς όπως και το αριστερό, με τη διαφορά ότι μόνο η νότια τοιχοποιία είναι λιθόκτιστη (Σχήμα 6.36), τμηματικά ανακατασκευασμένη και διατηρούμενη, με ίδιο πλήθος παραθύρων και φεγγιτών ενώ όλες οι υπόλοιπες είναι ξυλόπηκτες. Η δυτική τοιχοποιία δεν έχει τζάκι, αλλά υπάρχουν τρία παράθυρα και πάνω από αυτά τρεις φεγγίτες. Η βόρεια τοιχοποιία έχει την είσοδο από την ανατολική της πλευρά και έχει τέσσερα παράθυρα και πέντε φεγγίτες (Σχήμα 6.41), όπως ακριβώς και η βόρεια τοιχοποιία του ανατολικού δωματίου. Τέλος η ανατολική τοιχοποιία έχει μόνο ένα παράθυρο.

Σχήμα 6.40 - Ο εσωτερικός χώρος του UR. Στα δεξιά η Νότια τοιχοποιία

Σχήμα 6.41 - Η ανατολική και η βόρεια τοιχοποιία του χώρου UR, εξωτερικά

Το σαχνισί (UM) βρίσκεται στο κέντρο του ορόφου και έχει διαστάσεις 4.19×3.81 m. Ο τοίχος του είναι ξυλόπηκτος (Σχήμα 6.36) κατασκευασμένος από κατακόρυφα ξύλα διατομής 12×12 cm, από πεύκο, χωρίς πλήρωση και από οριζόντια και διαγώνια ξύλα μικρότερης διατομής 6×12 cm. Υπάρχουν πηχάκα κόντρα-πλακέ και στις δύο παρειές πάχους 2cm και ανοξείδωτο πλέγμα τύπου cantic. Τέλος υπάρχει διαπνέον επίχρισμα κατά της υγρασίας, περίπου 2.5cm, για την εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια, τεσσάρων στρώσεων, τύπου ALBARIA SP2 με υδραυλική άσβεστο χωρίς τσιμέντο. Στο επίχρισμα προστέθηκαν και ίνες πολυπροπυλενίου. Έχει τρία παράθυρα και τρεις φεγγίτες στη νότια πλευρά (Σχήμα 6.42) και από ένα παράθυρο και φεγγίτη στις δύο παράπλευρες επιφάνειες.

Σχήμα 6.42 - Το σαχνισί από τη νότια πλευρά του κτιρίου

Σχήμα 6.43 - Το σαχνισί από τη βόρεια πλευρά του κτιρίου

Η στέγη αποτελείται από δοκούς οροφής διαστάσεων 8×12 cm τοποθετημένους ανά 45cm και πάνω από αυτούς κόντρα-πλακέ πάχους 20mm και οροφή πάχους 20mm. Πάνω από τα κόντρα-πλακέ και μόνο πάνω από τους κλειστούς χώρους, δηλαδή τα δύο δωμάτια του ορόφου, υπάρχει θερμομόνωση DOW, εξηλασμένη πολυστερίνη XPS 5cm. Στη συνέχεια υπάρχουν κεκλιμένες δοκοί στέγης ανά 45cm, διατομής 8×12 cm και σανίδι πάχους 3cm από πεύκο. Τέλος τοποθετήθηκε διαπνέουσα μεμβράνη στέγης και στη συνέχεια καρφωτά βυζαντινά κεραμίδια.

Σχήμα 6.44 - Φωτογραφία κατά την κατασκευή της στέγης

Σχήμα 6.45 - Η οροφή του ορόφου

Όλα τα κουφώματα των ανοιγμάτων και οι ντουλάπες που βρίσκονται στο δυτικό και ανατολικό δωμάτιο του ορόφου είναι από ξυλεία σουηδικού πεύκου και κόντρα-πλακέ.

Ανοίγματα Ορόφου

Πόρτες

Σχήμα 6.46 - Πόρτα ορόφου

Οι πόρτες των δωματίων του ορόφου είναι κατασκευασμένοι από σουηδικό πεύκο, διαστάσεων 84.5×183.5 cm και πάχους 2cm. Οι πόρτες εφαρμόζουν καλά με το δάπεδο και δεν υπάρχουν μεγάλες χαραμάδες

Παράθυρα

Σχήμα 6.47 - Παράθυρο ορόφου

Τα παράθυρα τα οποία χρησιμοποιούνται στα δωμάτια του ορόφου είναι όμοια διαστάσεων 79×119 cm. Στην εσωτερική πλευρά υπάρχει δίφυλλο απλό τζάμι και στην εξωτερική πλευρά ξύλινα παραθυρόφυλλα από σουηδικό πεύκο.

Γύψινοι Φεγγίτες

Σχήμα 6.48 - Γύψινοι φεγγίτες

Οι περισσότεροι φεγγίτες που χρησιμοποιούνται στον όροφο είναι κατασκευασμένοι από μείγμα λευκού τσιμέντου και γύψου και παρουσιάζουν καμάρα σε τετραγωνικό πλαίσιο, διαστάσεων περίπου 70×103 cm. Τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική πλευρά του φεγγίτη υπάρχει Plexiglass και μπροστά από αυτό υπάρχει σχέδιο από το ίδιο μείγμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 6.48.

Ξύλινοι Φεγγίτες

Σχήμα 6.49 - Ξύλινοι φεγγίτες

Στα δωμάτια του ορόφου υπάρχουν επίσης δύο ξύλινοι τετραγωνικοί φεγγίτες πάνω από κάθε πόρτα, διαστάσεων 69.5×102 cm. Σε αυτούς τους φεγγίτες υπάρχει ένα μονό τζάμι και τετραγωνικά σχέδια όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.49.

6.2.2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το κτίριο αποτελείται από αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας, thermistor, της εταιρείας Betatherm, αισθητήρες ροής θερμότητας τύπου HFP01 και HFP03 της Hukseflux και αισθητήρες υγρασίας τύπου HIH-4030 της Honeywell. Όλοι οι αισθητήρες συνδέονται στη συσκευή λήψης και αποθήκευσης των δεδομένων Agilent 34972A, η οποία συνδέθηκε σε UPS με σκοπό την αποφυγή απώλειας μετρήσεων σε περίπτωση διακοπής του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας κάθε αισθητήρα έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 3. Το σύστημα λήψης τοποθετήθηκε στο αριστερό δωμάτιο του ισογείου (GL).

Η συσκευή Agilent, ρυθμίστηκε για την ανάγνωση των θερμοκρασιών από τα thermistor για 10 PLC, της υγρασίας επίσης για 10 PLC και της ροής θερμότητας για 200 PLC. Τέλος η συχνότητα δειγματοληψίας θα είναι 1min.

Σχήμα 6.50 - Το σύστημα λήψης και καταγραφής των δεδομένων

Αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε ολόκληρο το κτίριο, αλλά επιλέχθηκε να εγκατασταθούν οι περισσότεροι στην ανατολική πλευρά του κτιρίου, στα δωμάτια GL και UL. Πιο αναλυτικά τα σημεία τοποθέτησης των thermistor είναι:

- Τοιχοποιία. Στις περισσότερες τοιχοποιίες του κτιρίου έχουν τοποθετηθεί thermistor, με σκοπό τη μέτρηση της επιφανειακής θερμοκρασίας των τοίχων. Σε 10 σημεία, 5 στο ισόγειο και 5 στον όροφο, υπάρχουν thermistor στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας, που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο. Σε μία θέση μόνο, στον ανατολικό τοίχο του αριστερού δωματίου του ισογείου, υπάρχει αισθητήρας μόνο από την εσωτερική πλευρά, καθώς δεν υπήρχε πρόσβαση στην εξωτερική πλευρά. Στο δυτικό τοίχο του ίδιου δωματίου (εσωτερικός) υπάρχουν thermistor και από τις δύο πλευρές (GL και GM).
- Εσωτερικοί χώροι. Στους χώρους, GL, GR, UL και UR τοποθετήθηκαν thermistors, συγκρατημένα από τις οροφές και σε απόσταση περίπου 2m από το δάπεδο, με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας αέρος των παραπάνω δωματίων.

- Εξωτερικοί χώροι. Στη βορινή πλευρά του δωματίου GL και στο μέσο της απόστασης του βορινού τοίχου και της άκρης του προστώου τοποθετήθηκε thermistor συγκρατημένο σε μεταλλικό έλασμα, για να εμποδιστεί τυχόν άνεμος να το παρασύρει, και σε απόσταση 30cm από την οροφή. Επίσης στο κέντρο του ορόφου (περιοχή UM) τοποθετήθηκε thermistor συγκρατημένο από τον πολυέλαιο, και σε απόσταση περίπου 2.5m από το δάπεδο. Οι θέσεις τόσο του πρώτου όσο και του δεύτερου thermistor είναι τέτοιες ώστε να σκιάζονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και έτσι να αποφεύγεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία.
- Δάπεδο. Στο δάπεδο του αριστερού δωματίου του ισογείου (GL) θάφτηκε σε βάθος περίπου 8cm thermistor με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας του χώματος του δαπέδου. Επίσης στο δάπεδο του αριστερού δωματίου του ορόφου (UL), τοποθετήθηκε πάνω σε σανίδι thermistor, για την μέτρηση της θερμοκρασίας του πατώματος του ορόφου.
- Οροφή. Στην οροφή του αριστερού δωματίου του ισογείου (GL) και κάτω ακριβώς από το σημείο μέτρησης του δαπέδου της οροφής και στην κάτω πλευρά του σανιδιού, τοποθετήθηκε thermistor για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της οροφής του ισογείου. Επίσης στο ταβάνι του αριστερού δωματίου της οροφής έχει εγκατασταθεί ένα thermistor.

Έχουν τοποθετηθεί δύο αισθητήρες υγρασίας μέσα στο κτίριο, ένας στο αριστερό δωμάτιο του ισογείου και ένας στο αντίστοιχο του ορόφου, στις θέση όπου μετράται η θερμοκρασία αέρος των χώρων.

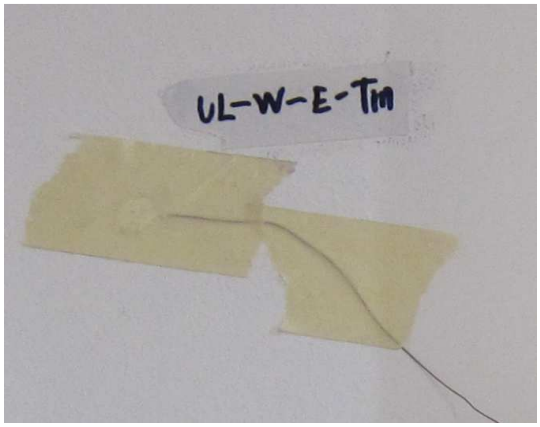
Στη νότια πλευρά του σπιτιού κάτω από το σαχνισί έχει εγκατασταθεί μικρός μετεωρολογικός σταθμός μέτρησης της εξωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας. Ο σταθμός αποτελείται από ένα thermistor της Betatherm για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και ένα υγρασιόμετρο τύπου HIH-4030 της Honeywell για την υγρασία του αέρα περιβάλλοντος. Ο μετεωρολογικός είναι προστατευμένος από τις διάφορες ακτινοβολίες με μεταλλικούς δίσκους, με σκοπό την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα αλλά και την προστασία του αισθητήρα της υγρασίας από το έντονο φως. Στο Σχήμα 6.51 φαίνεται η διάταξη του σταθμού.

Σχήμα 6.51 - Ο μετεωρολογικός σταθμός

Επίσης έχει τοποθετηθεί στο ανακατασκευασμένο τμήμα της νότιας τοιχοποιίας για ενάμιση μήνα ο αισθητήρας ροής θερμότητας HFP01 και στη συνέχεια αντικαταστάθηκε με τον HFP03. Ακόμη στο διατηρούμενο τμήμα της ίδιας τοιχοποιίας υπήρξε για ενάμιση μήνα αισθητήρας HFP01. Για περίπου 20 ημέρες τοποθετήθηκε ο ίδιος αισθητήρας στο βόρειο τοίχο του αριστερού δωματίου του ορόφου. Τέλος στο δυτικό τοίχο του ίδιου δωματίου εγκαταστάθηκε 2 μήνες μετά την έναρξη των μετρήσεων ο αισθητήρας HFP03.

Όλοι τα thermistor και οι αισθητήρες θερμοροής που τοποθετήθηκαν πάνω σε λιθόκτιστή τοιχοποιία του ισογείου εγκαταστάθηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 5.2.2.4, ενώ οι αισθητήρες πάνω σε ξυλόπηκτες ή επιχρισμένες τοιχοποιίες σύμφωνα με την περιγραφή της ενότητας 5.2.3.4.

Σχήμα 6.52 - Thermistor πάνω σε λίθο



Σχήμα 6.53 - Thermistor πάνω σε επίχρισμα

Η ονοματολογία των αισθητήρων έχει γίνει με την εξής κωδικοποίηση:

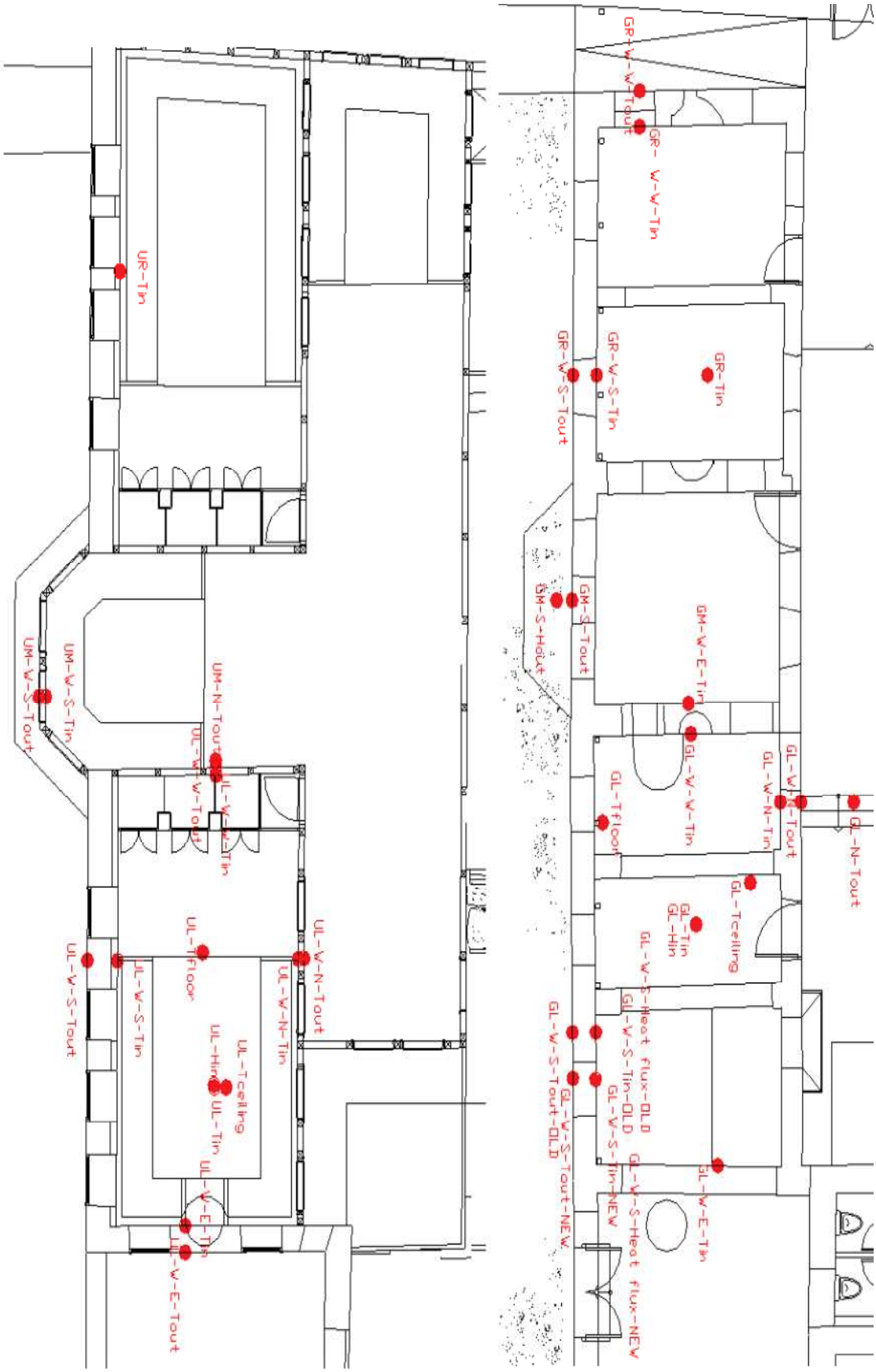
ΔΩΜΑΤΙΟ-ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ-ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ-ΣΗΜΕΙΟ

Η ονοματοδοσία βασίζεται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3 - Ονοματοδοσία αισθητήρων

ΔΩΜΑΤΙΟ		**ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ**		**ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ**		**ΣΗΜΕΙΟ**	
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΝΟΜΑ
LEFT GROUND	GL	WALL	W	NORTH	N	Εξωτερική Θερμοκρασία	T_{out}
MIDDLE GROUND	GM	CEILING	Ceiling	EAST	E	Εσωτερική Θερμοκρασία	T_{in}
RIGHT GROUND	GR	FLOOR	Floor	SOUTH	S	Εξωτερική Υγρασία	H_{out}
LEFT UPPER	UL			WEST	W	Εσωτερική Υγρασία	H_{in}
MIDDLE UPPER	UM					Θερμοροή Heat flux	HF
RIGHT UPPER	UR						

Στο Σχήμα 6.54 παρουσιάζεται ακριβώς η θέση κάθε αισθητήρα στο κτίριο:

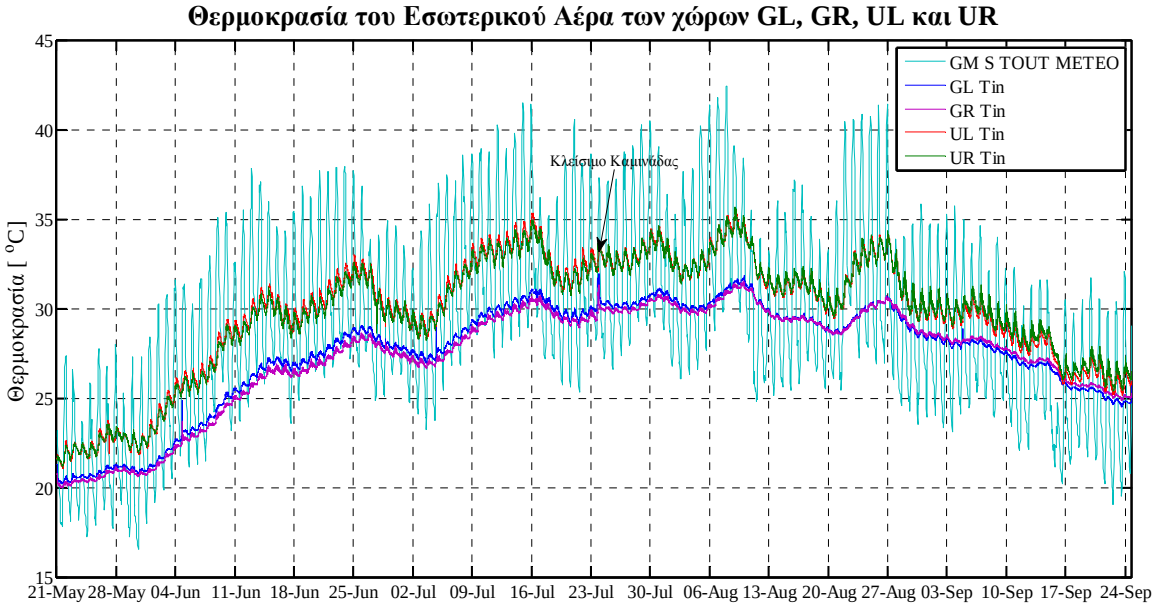


Σχήμα 6.53 - Θέση κάθε αισθητήρα στο κτίριο

6.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι μετρήσεις των αισθητήρων που εγκαταστάθηκαν στο κτίριο. Οι μετρήσεις διήρκησαν τέσσερις μήνες, από τη Δευτέρα 21 Μαΐου 2012 μέχρι την Τρίτη 25 Σεπτεμβρίου 2012.

Στο Σχήμα 6.54 παρουσιάζεται η θερμοκρασία των τεσσάρων δωματίων όπου υπήρχε thermistor μέτρησης της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του χώρου σε σύγκριση με την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, όπως καταγράφηκε από το μετεωρολογικό σταθμό.



Σχήμα 6.54 - Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα των χώρων καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων

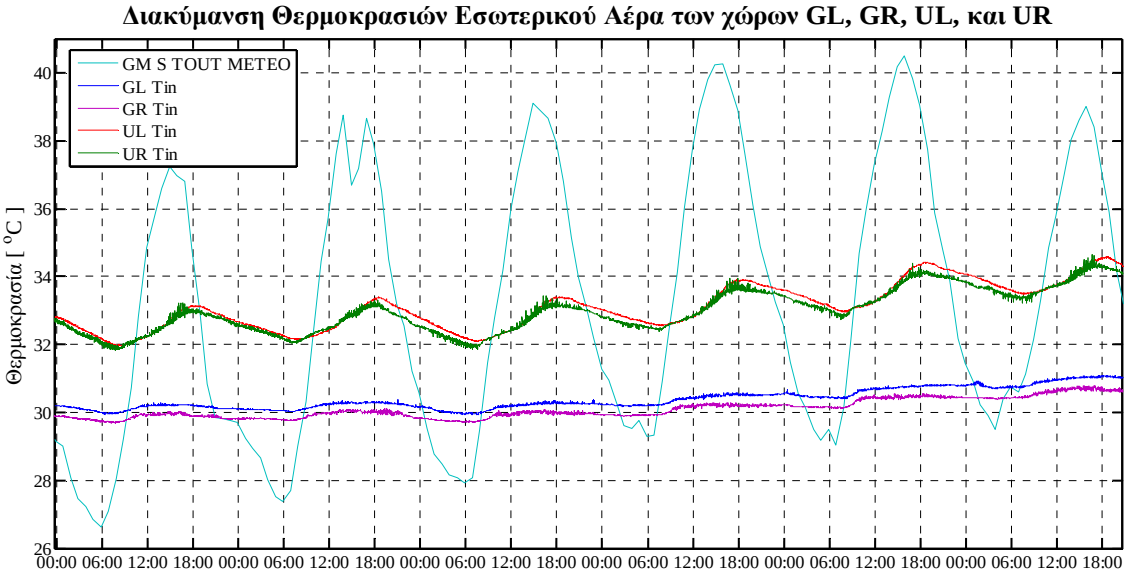
Παρατηρείται ότι τα δωμάτια του ισογείου (GL και GR) τα οποία αποτελούνται μόνο από λιθοδομές είναι πιο δροσερά από τα δωμάτια του ορόφου τα οποία είναι κατασκευασμένα τόσο από λιθοδομές όσο και από ξυλόπηκτες τοιχοποιίες. Η μέση διαφορά μεταξύ τους είναι περίπου 2.4^{o}C, ενώ στις μέρες με υψηλή εξωτερική θερμοκρασία η διαφορά φτάνει ακόμα και τους 4.6^{o}C. Η μεγάλη αυτή θερμοκρασιακή διαφορά οφείλεται στις διαφορετικές τοιχοποιίες (μεγαλύτερη θερμική μάζα τα δωμάτια του ισογείου) και στο γεγονός ότι τα δωμάτια του ορόφου έχουν περισσότερες απώλειες-κέρδη κυρίως εξαιτίας των πολλών ανοιγμάτων και της οροφής. Η διαφορά αυτή μειώνεται στα τέλη Αυγούστου όπου πέφτει η εξωτερική θερμοκρασία. Στο διάστημα αυτό, η θερμοκρασία των δωματίων του ορόφου μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό απ' ότι στο ισόγειο κι αυτό εξαιτίας του γεγονότος ότι η βαριά λιθόκτιστη τοιχοποιία συνεχίζει να αποδίδει τη θερμότητα που αποθήκευε κατά τις θερμές ημέρες.

Από την έναρξη των μετρήσεων (21 Μαΐου) μέχρι περίπου τα μέσα Αυγούστου η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του δωματίου GL είναι υψηλότερη από αυτή του GR κατά περίπου 0.5^{o}C. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στον ανατολικό τοίχο μικρότερης θερμικής μάζας από τους υπόλοιπους και στο μεγαλύτερο άνοιγμα του GL. Επίσης

μεγάλο ρόλο παίζει και η σκίαση από τα γειτονικά κτίρια, κάτι για το οποίο δεν έχει προβλεφτεί ένας τρόπος να εξεταστεί αυτό το ενδεχόμενο. Στη συνέχεια, οι θερμοκρασίες αντιστρέφονται.

Στα δωμάτια του ορόφου παρατηρείται ότι μέχρι τις 24 Ιουλίου η θερμοκρασία στο χώρο UL είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία στο UR. Από εκείνη τη μέρα μέχρι και τις αρχές του Σεπτέμβρη οι θερμοκρασίες πρακτικά ταυτίζονται. Εκείνη την ημέρα τοποθετήθηκε αφρολέξ στην καμινάδα του τζακιού στο δωμάτιο UL, υποδεικνύοντας ότι η καμινάδα είναι μια σημαντική πηγή θερμικών απωλειών-κερδών.

Μια επίσης σημαντική διαφορά των καμπυλών της θερμοκρασίας στα τέσσερα δωμάτια είναι η διακύμανση. Η λεπτομέρεια αυτή φαίνεται καθαρά στο διάγραμμα του Σχήματος 6.55.

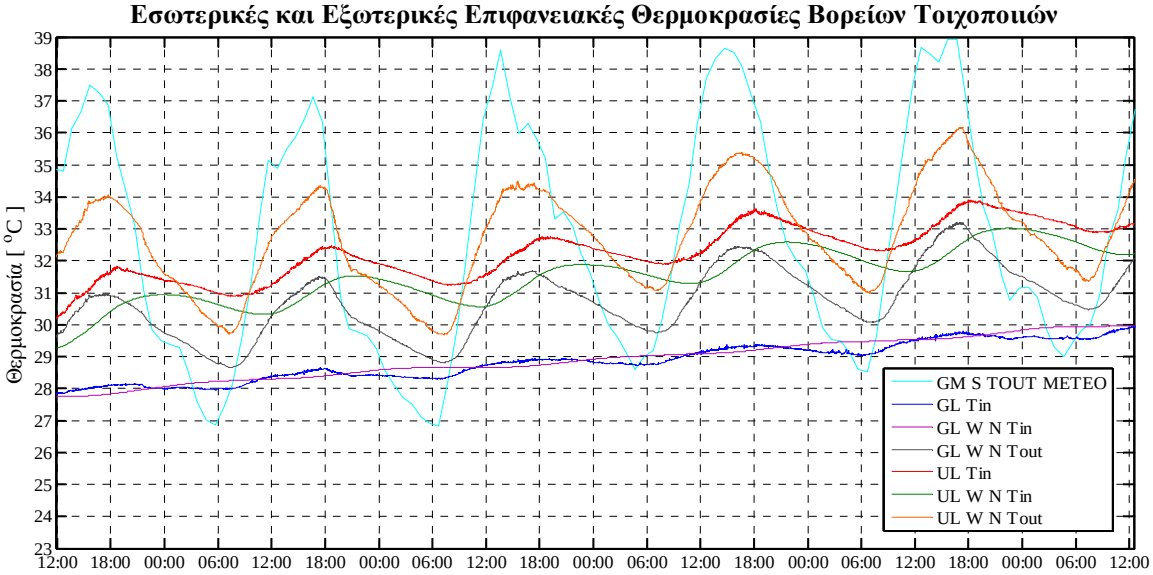


Σχήμα 6.55 - Διακύμανση θερμοκρασιών εσωτερικού αέρα

Είναι εμφανές ότι τα δωμάτια του ισογείου παρουσιάζουν ελάχιστη διακύμανση, με τη θερμοκρασία να είναι σχεδόν σταθερή. Αντίθετα η θερμοκρασία των δωματίων του ορόφου παρουσιάζει μια διακύμανση περίπου 1.8°C ημερησίως. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη θερμική μάζα των τοιχοποιιών κάθε δωματίου. Οι τοιχοποιίες στα δωμάτια GL και GR αποθηκεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας την ημέρα την οποία αποδίδοντάς την το βράδυ παρέχει στο χώρο μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Αντίθετα οι τοιχοποιίες των δωματίων του ορόφου δεν έχουν τόση θερμική μάζα όση αυτές του ισογείου και σε συνδυασμό με τα πολλά ανοίγματα, η θερμότητα που αποδίδεται από αυτές δεν επαρκεί για την πλήρη ομαλοποίηση της θερμοκρασίας.

Μια άλλη παρατήρηση είναι ότι η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα για όλα τα δωμάτια περίπου στις 18:00, δηλαδή 3 ώρες μετά την μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία (αυτό γίνεται ξεκάθαρο εάν μειωθεί το εύρος τους άξονα της θερμοκρασίας στο Σχήμα 6.55).

Στο Σχήμα 6.56 παρουσιάζονται οι εσωτερικές και οι εξωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες των βόρειων τοιχοποιών του κτιρίου, η τοιχοποιία στο GL είναι λιθόκτιστη, ενώ στο UL ξυλόπηκτη.



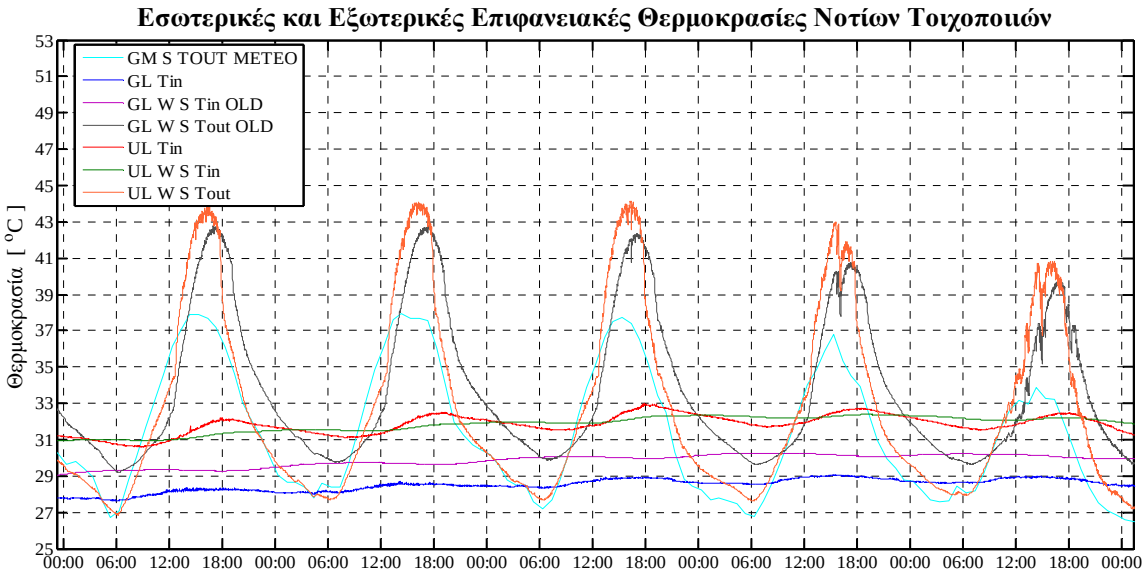
Σχήμα 6.56 - Επιφανειακές θερμοκρασίες Βορείων τοιχοποιών διαφορετικής θερμικής μάζας

Στο Σχήμα 6.56 παρατηρείται η μεγάλη διαφορά στις διακυμάνσεις των θερμοκρασιών της τοιχοποιίας του ισογείου και του ορόφου. Η εσωτερική επιφάνεια της λιθόκτιστης τοιχοποιίας φαίνεται να είναι σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η αντίστοιχη ξυλόπηκτη παρουσιάζει μια διακύμανση περίπου 1.5°C ημερησίως. Για τις εξωτερικές επιφάνειες, η λιθόκτιστη παρουσιάζει διακύμανση 2.5 με 3°C, ενώ η ξυλόπηκτη 4 έως 5°C ημερησίως. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διαφορά θερμικής μάζας των δύο τοιχοποιιών, όπου τις βραδινές ώρες στη λιθόκτιστη αποδίδεται η θερμότητα και δεν πέφτει πολύ η θερμοκρασία της.

Επίσης οι εξωτερικές θερμοκρασίες των δύο τοιχοποιιών παρουσιάζουν μέγιστο ταυτόχρονα (17:00 με 18:00), ενώ για τις εσωτερικές, η λιθόκτιστη τις πρωινές ώρες (περίπου στις 06:00) και η ξυλόπηκτη τις βραδινές ώρες (21:00 με 00:00). Η θερμική αυτή υστέρηση της λιθόκτιστης είναι άλλο ένα χαρακτηριστικό της διαφοράς στη θερμική μάζα των δύο τοιχοποιιών.

Τέλος η εσωτερική θερμοκρασία της ξυλόπηκτης είναι σταθερά πιο δροσερή κατά 1 με 0.5°C από τη θερμοκρασία του χώρου UL, ενώ οι θερμοκρασίες εσωτερικής τοιχοποιίας και αέρα στο ισόγειο εναλλάσσονται, εξαιτίας της χρονικής υστέρησης που παρατηρήθηκε.

Στο Σχήμα 6.57 παρουσιάζεται οι θερμοκρασίες των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών των λιθόκτιστων νότιων τοιχοποιιών



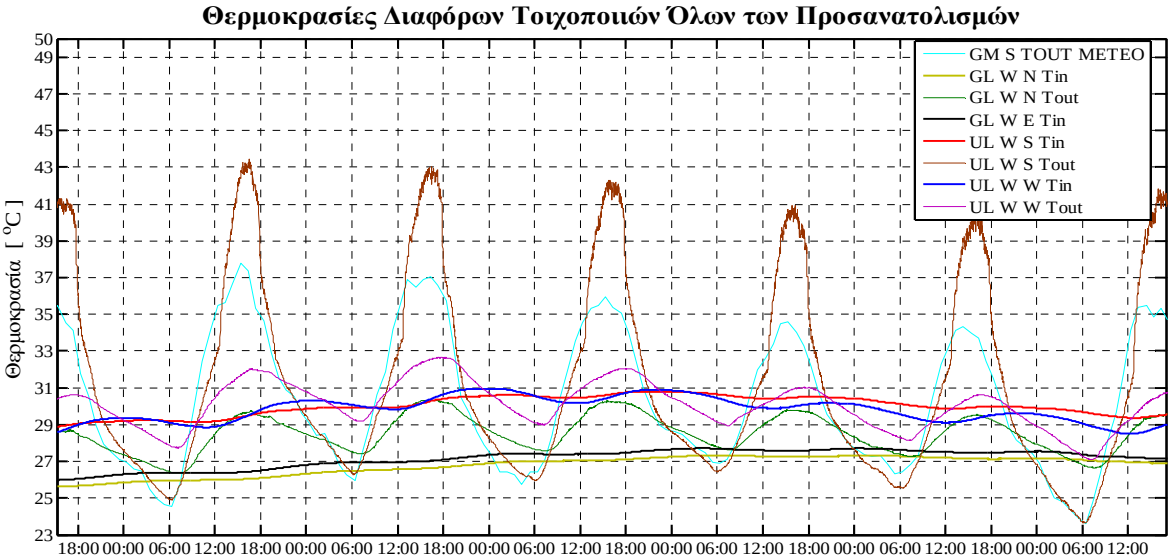
Σχήμα 6.57 - Επιφανειακές θερμοκρασίες Νότιων λιθόκτιστων τοιχοποιιών

Παρατηρείται ότι η εσωτερική θερμοκρασία της τοιχοποιίας του ορόφου παρουσιάζει ελάχιστη διακύμανση, όπως και η τοιχοποιία του ισογείου. Αυτό σημαίνει ότι η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας της τοιχοποιίας του ορόφου επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη θερμική μάζα της τοιχοποιίας και λιγότερο από τη θερμοκρασία του χώρου. Σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του Σχήματος 6.56 επιβεβαιώνεται ότι λιθόκτιστες τοιχοποιίες παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις στην εσωτερική θερμοκρασία ανεξάρτητα στο χώρο στον οποίο βρίσκονται, εξαιτίας της μεγάλης θερμικής μάζας.

Σε αυτή την περίπτωση, οι εξωτερικές θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν μέγιστο ταυτόχρονα, η τοιχοποιία του ορόφου στις 16:00 και του ισογείου στις 17:00. Από την άλλη τα μέγιστα των εσωτερικών θερμοκρασιών επίσης δεν συμπίπτουν μεταξύ τους, η τοιχοποιία του ορόφου δεν είναι ξεκάθαρο πότε παρουσιάζει μέγιστο, αλλά του ισογείου, παρουσιάζει μέγιστο περίπου στις 10:00. Για την τοιχοποιία του ισογείου παρατηρείται μια χρονική υστέρηση περίπου 17 ωρών, ενώ στον όροφο περίπου 13 ωρών. Το αποτέλεσμα τις υστέρησης για τη λιθόκτιστη του ισογείου δεν διαφέρει πολύ από αυτό που βρέθηκε στο κεφάλαιο 5, ενότητα 5.2.2.5 (18.9hr).

Οι μέγιστες επιφανειακές εξωτερικές θερμοκρασίες ξεπερνούν κατά 5 έως 6°C τις μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα. Αυτό οφείλεται στην επιφάνεια, το χρώμα και το είδος του λίθου όπου τοποθετήθηκαν τα thermistors, στην ακτινοβολία που δέχονται τα thermistors των τοιχοποιιών, αλλά και στη διαφορά ύψους, κάτι που φαίνεται στη σύγκριση μεταξύ των θερμοκρασιών του ισογείου και του ορόφου.

Στο Σχήμα 6.58 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες διαφόρων ειδών τοιχοποιιών σε όλους τους προσανατολισμούς. Η βόρεια τοιχοποιία είναι λιθόκτιστη, η ανατολική είναι από οπτόπλινθους, η νότια λιθόκτιστη με επίχρισμα και η δυτική ξυλόπηκτη.



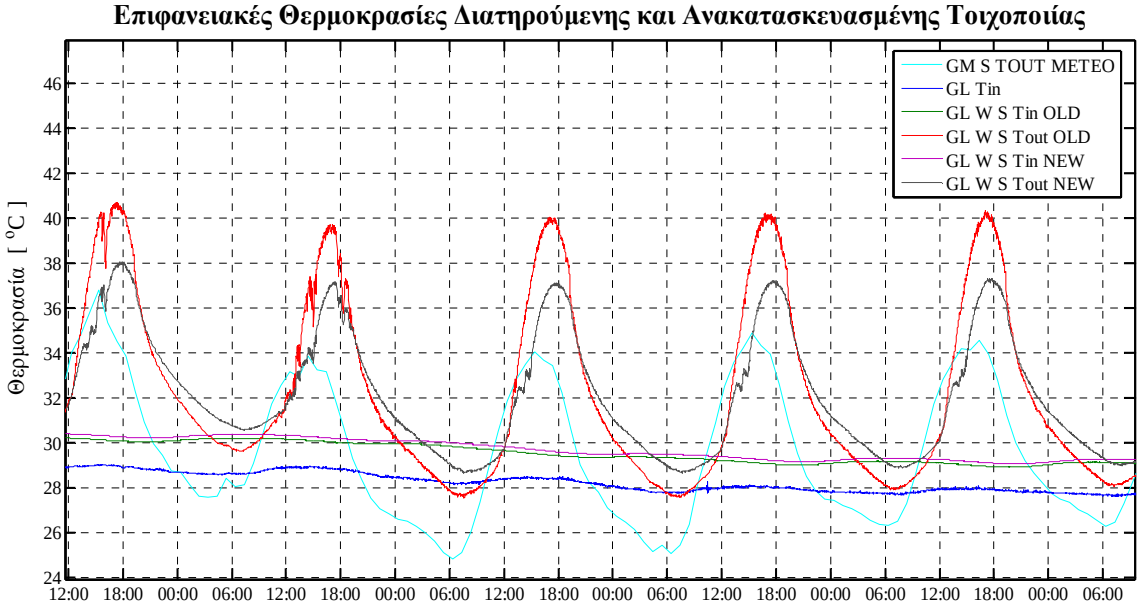
Σχήμα 6.58 - Επιφανειακές θερμοκρασίες διαφορετικών τοιχοποιιών όλων σε κάθε προσανατολισμό

Παρατηρείται ότι η εσωτερική θερμοκρασία της ανατολικής τοιχοποιίας (από οπτόπλινθους) παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με τη βόρεια (λιθόκτιστη) με τη διαφορά ότι πάντα είναι θερμότερη κατά 0.5^{o}C παρουσιάζοντας την ίδια διακύμανση.

Η εσωτερική θερμοκρασία της δυτικής (ξυλόπηκτης) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διακύμανση από όλες τις εσωτερικές θερμοκρασίες καθώς επίσης έχει μια θερμική υστέρηση περίπου 6 ωρών, περίπου όση είχε παρατηρηθεί και στην ξυλόπηκτη βόρεια του Σχήματος 6.56. Ενώ η νότια (λιθόκτιστη με επίχρισμα) και βόρεια (λιθόκτιστη) παρουσιάζουν θερμική υστέρηση περίπου 15 ωρών. Έτσι επιβεβαιώνεται ότι οι τοιχοποιίες με τη μικρή θερμική μάζα, παρουσιάζουν μικρό χρόνο θερμικής υστέρησης ανεξάρτητα του χώρου.

Επίσης η δυτική τοιχοποιία (ξυλόπηκτη) για πολλές χρονικές στιγμές είναι θερμότερη ακόμα και από τη νότια, παρά το γεγονός ότι η δυτική είναι διαρκώς σκιασμένη ενώ η νότια εκτίθεται συνεχώς στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εσωτερική θερμοκρασία της δυτικής τοιχοποιίας μεγιστοποιείται λίγες ώρες μετά τη μεγιστοποίηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, ενώ για την νότια, όταν ο εσωτερικός αέρας είναι στην ελάχιστη θερμοκρασία. Αυτός είναι ένας άλλος παράγοντας που βοηθά στην ομαλοποίηση της εσωτερικής θερμοκρασίας της λιθόκτιστης.

Στο Σχήμα 6.59 παρουσιάζονται οι επιφανειακές θερμοκρασίες της διατηρούμενης και ανακατασκευασμένης λιθόκτιστης τοιχοποιίας στο χώρο GL.

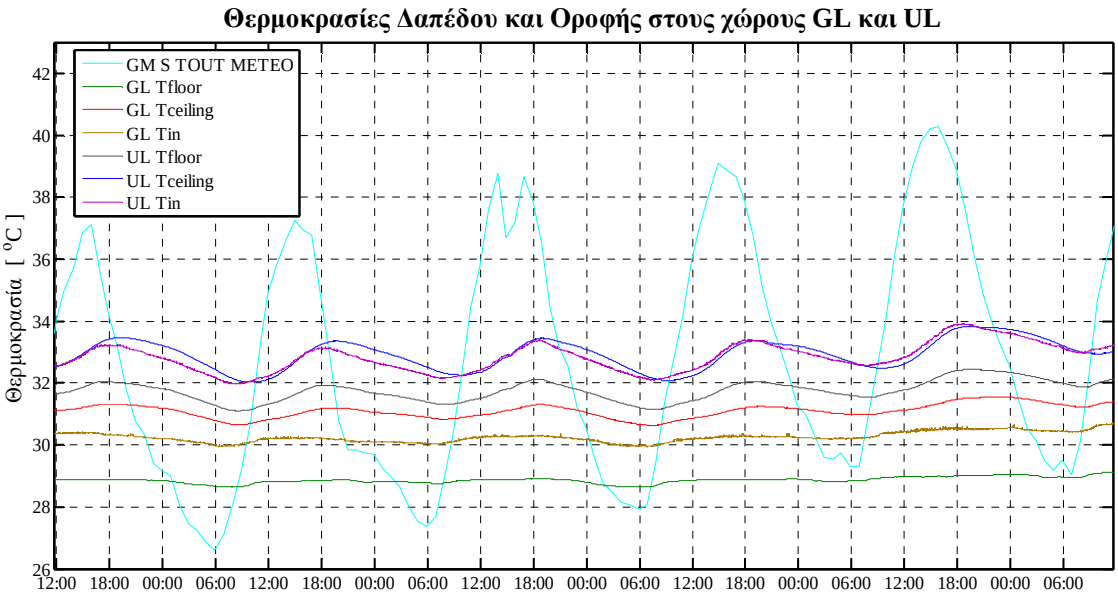


Σχήμα 6.59 - Επιφανειακές θερμοκρασίες ανακατασκευασμένης και διατηρούμενης τοιχοποιίας

Παρατηρείται ότι οι εσωτερικές επιφάνειες των τοιχοποιιών είναι κατά 1 με 1.5°C θερμότερες από τη θερμοκρασία αέρα του χώρου. Επίσης φαίνεται η εσωτερική θερμοκρασία της ανακατασκευασμένης (NEW) τοιχοποιίας να είναι κατά 0.1 με 0.2°C υψηλότερη από την αντίστοιχη διατηρούμενη, κάτι που πιθανόν να οφείλεται είτε στη διαφορά των υλικών από τα οποία αποτελούνται (ένεμα), είτε στους λίθους που τοποθετήθηκαν τα thermistors, είτε ακόμα και σε συστηματικό σφάλμα των μετρήσεων.

Ακόμη η εξωτερική θερμοκρασία της διατηρούμενης είναι κατά 2.5°C υψηλότερη από την αντίστοιχη της ανακατασκευασμένης. Η διαφορά αυτή είναι αρκετά μεγάλη και σε περίπτωση που η διαφορά αυτή παρατηρείται και σε άλλα σημεία των τοιχοποιιών και σε συνδυασμό με την παραπάνω παρατήρηση για τη διαφορά στις εσωτερικές θερμοκρασίες, τότε θα οφείλεται καθαρά στη διαφορά των υλικών των τοιχοποιιών.

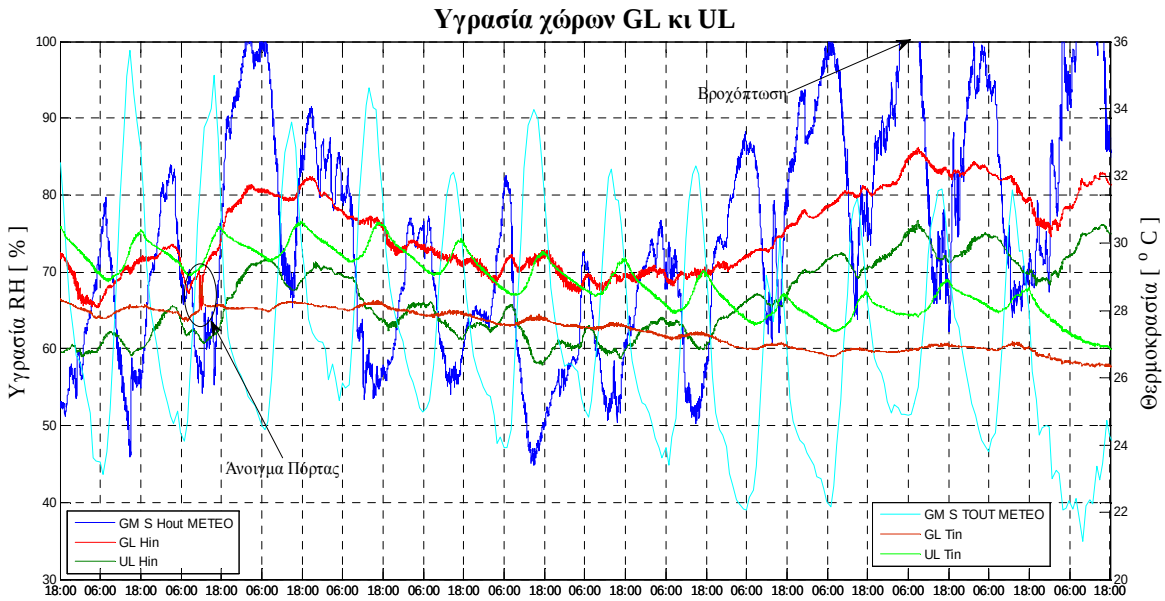
Στο Σχήμα 6.60 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του δαπέδου και της οροφής για τους χώρους GL και UL.



Σχήμα 6.60 - Θερμοκρασίες δαπέδων και οροφών στους αριστερούς χώρους του κτιρίου

Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες αυξάνονται όσο αυξάνεται το ύψος από το έδαφος. Δηλαδή, τη χαμηλότερη θερμοκρασία έχει το χώμα του δαπέδου του χώρου GL, στη συνέχεια ο εσωτερικός αέρας και μετά η οροφή του ίδιου δωματίου. Αμέσως μεγαλύτερη είναι το δάπεδο του χώρου UL, ενώ θερμότερες είναι οι θερμοκρασίες αέρα και οροφής του ίδιου δωματίου οι οποίες πρακτικά δεν έχουν σημαντικές διαφορές. Επίσης με το ίδιο τρόπο που αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η διακύμανση των θερμοκρασιών, με τη διακύμανση της θερμοκρασίας του δαπέδου του GL να είναι ελάχιστη και τη διακύμανση του αέρα και της οροφής του UL να είναι η μέγιστη. Τέλος παρατηρείται ότι οι καμπύλες με την ίδια σειρά παρουσιάζουν και τα ελάχιστά τους. Οι παρατηρήσεις αυτές οφείλονται στη διαφορά στο ύψος και στη θερμική μάζα των δωματίων.

Στο Σχήμα 6.61 παρουσιάζεται η υγρασία των χώρων GL και UL, συγκριτικά με τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες.



Σχήμα 6.61 - Υγρασία των χώρων GL και UL σε σύγκριση με την εξωτερική

Παρατηρείται ότι το δωμάτιο του ισογείου έχει πάντα υψηλότερη υγρασία από το δωμάτιο του ορόφου, κατά 5 έως 10%. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη διείσδυση αέρα που έχει ο χώρος GL και πιθανόν στο χωματένιο δάπεδο. Επίσης οι δύο χώροι συμβαδίζουν χρονικά, στα ελάχιστα και στα μέγιστά τους.

Ενδιαφέρον αποτελεί η χρονική στιγμή κατά την οποία ανοίχτηκε η πόρτα στο χώρο GL, όπου η υγρασία έπεσε αμέσως και αντίθετα η θερμοκρασία αυξήθηκε, καθώς μπήκε στο χώρο αρκετός εξωτερικός αέρας χαμηλής υγρασίας και υψηλής θερμοκρασίας.

Επίσης, οι μέγιστες τιμές της εξωτερικής υγρασίας παρατηρούνται το πρωί (γύρω στις 06:00), ενώ οι εσωτερικές υγρασίες λίγες ώρες αργότερα. Κατά τη περίοδο της βροχόπτωσης η εξωτερική υγρασία φτάνει στο 100%, και οι εσωτερικές τη μέγιστη τιμή τους.

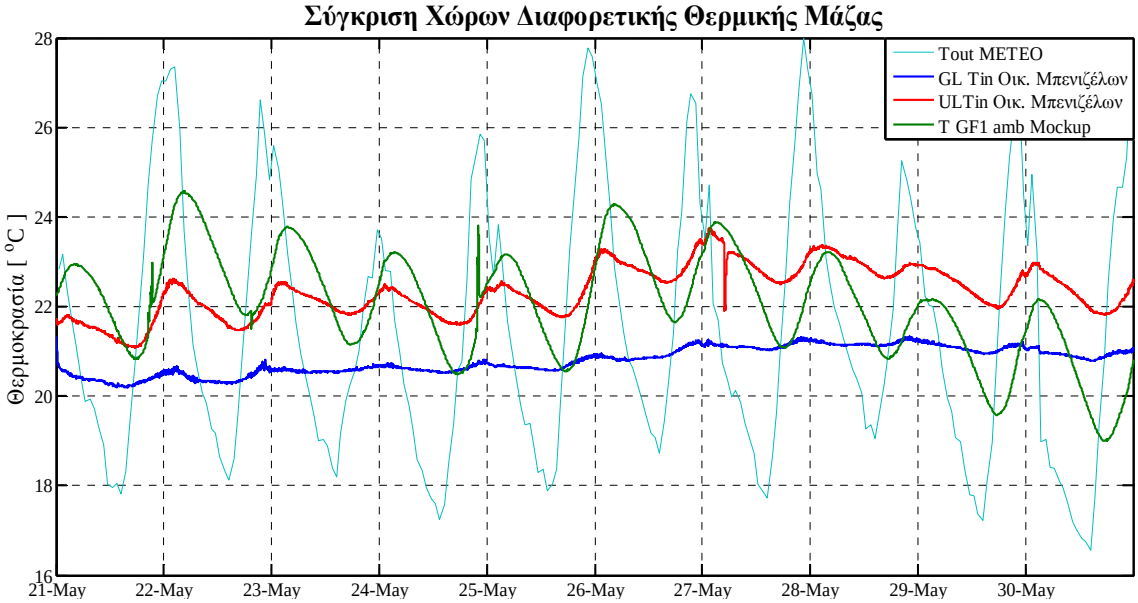
Τέλος είναι χαρακτηριστική η ραγδαία αύξηση και η ραγδαία μείωση της υγρασίας τις στιγμές δύσης και ανατολής του ηλίου, αντίστοιχα.

6.3. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΥΟ ΚΤΙΡΙΑ

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μία σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ του κτιρίου του πειραματικού οικίσκου (mock up) και του αρχοντικού της οικίας των Μπενιζέλων. Είναι χαρακτηριστική η διαφορά των δύο κτιρίων ως προς τη θερμική μάζα των τοιχοποιιών. Αυτό είναι εμφανές από τις θερμικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται (Πίνακες 5.1, 5.23 και 5.39). Το κτίριο στον πειραματικό οικίσκο έχει μικρότερη θερμική μάζα, και οι τοιχοποιίες έχουν μικρό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, σε αντίθεση με το αρχοντικό των Μπενιζέλων όπου αποτελείται από τοιχοποιίες μεγάλης θερμικής μάζας και μεγάλου συντελεστή U-value.

Εξαιτίας των συνθηκών που συνέβησαν στον οικίσκο και περιγράφηκαν στην ενότητα 6.1, η σύγκριση των δύο κτιρίων έχει νόημα μόνο για τις ημέρες μεταξύ 21 Μαΐου και 31 Μαΐου. Το διάστημα αυτό είναι πολύ μικρό για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων, κάποιες παρατηρήσεις όμως μπορούν να γίνουν για τη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο εξωτερικός αέρας για την οικία των Μπενιζέλων (στο κέντρο της Αθήνας) είναι θερμότερος από τον αέρα στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης (Ζωγράφου Αττικής), όπου βρισκόταν ο πειραματικός οικίσκος.

Το Σχήμα 6.62 παρουσιάζει της θερμοκρασίες των τριών χώρων διαφορετικής θερμικής μάζας. Ο χώρος GL του αρχοντικού έχει τη μεγαλύτερη θερμική μάζα, καθώς είναι κατασκευασμένος ως επί το πλείστον από λιθόκτιστη βαριά τοιχοποιία, ο χώρος UL, επίσης του αρχοντικού, έχει τη μεσαία θερμική μάζα, καθώς αποτελείται από λιθόκτιστες και ξυλόπηκτες τοιχοποιίες. Τέλος ο χώρος GF1 του οικίσκου έχει τη μικρότερη θερμική μάζα καθώς είναι κατασκευασμένος από τοιχοποιίες με γυψοσανίδες, τσιμεντοσανίδες, θερμομόνωση, ενώ υπάρχει στο εσωτερικό του κελύφους υπάρχει διάκενο αέρα.

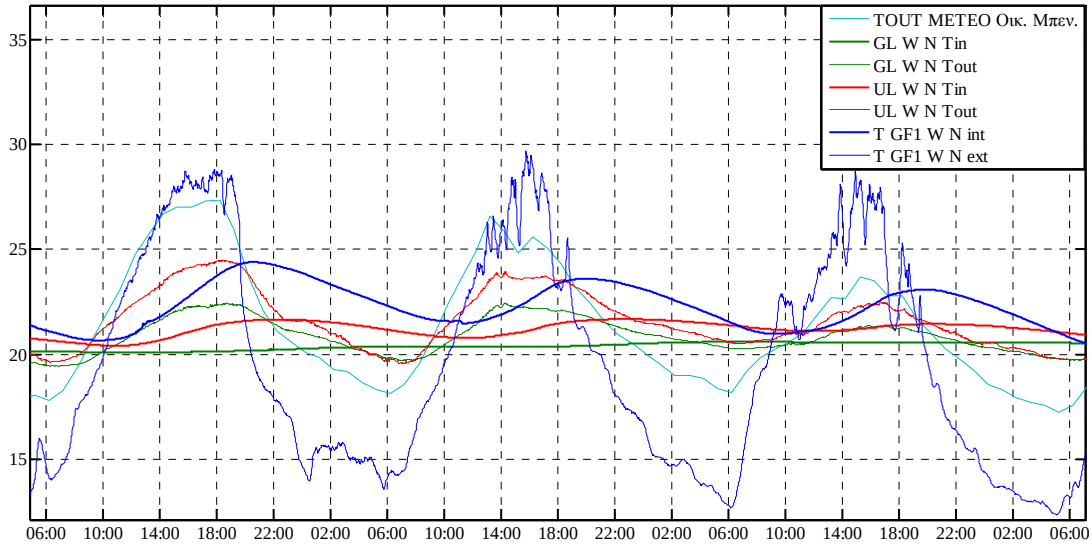


Σχήμα 6.62 - Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα των τριών χώρων των δύο κτιρίων

Από το Σχήμα 6.62 παρατηρείται ότι το κτίριο υψηλής θερμικής μάζας παρουσιάζει ελάχιστη διακύμανση και η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι σχεδόν σταθερή σε αυτό το δεκαήμερο. Αντίθετα, ο χώρος GF1 του οικίσκου, με τη μικρότερη θερμική μάζα, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διακύμανση, 2 έως 4°C ημερησίως. Τέλος ο χώρος με τη μεσαία θερμική μάζα (UL) έχει διακύμανση 1 έως 2°C.

Στο Σχήμα 6.63 παρουσιάζονται οι εσωτερικές και εξωτερικές βόρειες τοιχοποιίες των παραπάνω τριών χώρων. Κάθε τοιχοποιία είναι διαφορετική, η τοιχοποιία του χώρου GL είναι λιθόκτιστη, του UL ξυλόπηκτη και του GF1 από γυψοσανίδες-μόνωση και διάκενο αέρα.

Σύγκριση Εσωτερικών - Εξωτερικών Θερμοκρασιών της Βόρειας Τοιχοποιίας των Τρειών Χώρων



Σχήμα 6.63 - Επιφανειακές θερμοκρασίες των τριών τοιχοποιιών (ίδιου προσανατολισμού)

Στο Σχήμα 6.63 είναι εμφανής η θερμική υστέρηση των τοιχοποιιών με διαφορετική θερμική μάζα. Χαρακτηριστικά η βαριά τοιχοποιία του χώρου GL έχει υστέρηση 16 ώρες, η μεσαία του χώρου UL περίπου 6 ώρες και η ελαφριά του GF1 περίπου 4 ώρες.

Ακόμα και από αυτό το μικρό χρονικό διάστημα είναι εμφανή τα δύο κυριότερα χαρακτηριστικά της θερμοχωρητικότητας για το κέλυφος, δηλαδή οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και η χρονική υστέρηση. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η θερμοχωρητικότητα είναι αρκετά σημαντική στη συνολική θερμική συμπεριφορά του κελύφους.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία δίνει αφορμές για μελέτη σε αρκετά θέματα που αφορούν τη θερμική συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους. Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν ορισμένα από αυτά.

Κρίνεται σωστό, ότι για μια ολοκληρωμένη μελέτη για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας των τοιχοποιίων, θα πρέπει να γίνουν επιπλέον μετρήσεις, τόσο στις ίδιες τοιχοποιίες που μελετήθηκαν, όσο και σε άλλες με παρόμοια χαρακτηριστικά. Θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, και κυρίως τους χειμερινούς μήνες όπου, σύμφωνα και με τξ βιβλιογραφία, είναι ιδανική εποχή για τέτοιου είδους μετρήσεις. Επίσης, για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα είναι αναγκαία η επανάληψη των μετρήσεων στις ίδιες τοιχοποιίες, αλλά σε διαφορετικά σημεία. Έτσι θα προκύψουν ολοκληρωμένα και αξιόπιστα συμπεράσματα για τους συντελεστές κάθε τοιχοποιίας και τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται.

Επίσης, θα ήταν ενδιαφέρον να γίνουν μετρήσεις σε διάφορες συνθήκες για πολλές τοιχοποιίες, ώστε να προσδιορισθούν (αν υπάρχουν) βέλτιστες συνθήκες για επιτόπιες μετρήσεις με σκοπό το προσδιορισμό του συντελεστή U-value. Έτσι θα προέκυπτε στη συνέχεια οι απαιτήσεις που θα πρέπει να πληρούνται σε τέτοιου είδους μετρήσεις ανάλογα με την τοιχοποιία και τη μεθοδολογία επεξεργασίας των μετρήσεων.

Ένα θέμα που δεν έγινε εφικτό να τελειοποιηθεί η μελέτη στην παρούσα διπλωματική είναι η μεθοδολογία της δυναμικής μεθόδου κατά ISO 9869. Δεν συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία και είναι σχετικά δύσκολη η αντίληψη της εφαρμογής της.

Ένα ακόμη ζήτημα το οποίο θα είναι ενδιαφέρον σε επόμενες μελέτες είναι η χρήση και άλλων μεθόδων επεξεργασίας των επιτόπιων μετρήσεων επιφανειακών θερμοκρασιών και θερμοροών. Έτσι θα είναι εφικτή η σύγκριση όλων των μετρήσεων, κάτι που θα είναι πολύ χρήσιμο σε πολλούς μελετητές.

Επιπλέον, στις μετρήσεις της ροής θερμότητας σε κτίρια ένα μεγάλο ρόλο παίζει η συναγωγή γεννώντας πολλά προβλήματα. Επίσης επειδή οι αισθητήρες της θερμοροής τοποθετούνται στην επιφάνεια της τοιχοποιίας και δεν είναι δυνατή η εισχώρησή τους στο εσωτερικό, θα πρέπει να γίνει κάποια κατάλληλη βαθμονόμηση, ώστε οι αισθητήρες που είναι ήδη βαθμονομημένοι σε συνθήκες αγωγής θερμότητας να μπορούν να δίνουν το ίδιο σωστά αποτελέσματα και σε συνθήκες συναγωγής.

Για το θέμα της θερμικής συμπεριφοράς ολόκληρων των κτιρίων (6ο Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας) για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων στη συμπεριφορά των δύο κτιρίων θα πρέπει οι μετρήσεις να συνεχιστούν, αν είναι δυνατόν, για ένα ολόκληρο έτος. Έτσι θα προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά των κτιρίων διαφορετικής θερμικής μάζας και για το πόσο σημαντική είναι η θερμοχωρητικότητα στα δομικά υλικά. Θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η λήψη των

μετρήσεων και κατά τη διάρκεια χρήσης ή λειτουργίας αυτών. Δηλαδή, να εξεταζόταν η θερμική τους συμπεριφορά κάτω από καθορισμένες συνθήκες, π.χ. αερισμός, λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών, σκίαση κλπ.

Τέλος θα μπορούσε να γίνει κάποια υπολογιστική προσομείωση των δύο κτιρίων και να πιστοποιηθούν διάφορα υπολογιστικά πακέτα (TRSYS, ANSYS κλπ).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α.1 - Κωδική Ονομασία Στοιχείων Knauf

Κωδική Ονομασία	Περιγραφή
W626	Επένδυση διπλής στάνταρτ γυψοσανίδας
W384	Τυποποιημένη εξωτερική τοιχοποιία σε μεταλλικό σκελετό
W112	Τοιχοποιία διπλής στανταρτ γυψοσανίδας
D112	Οροφή σε ανισόπεδο μεταλλικό σκελετό
EPS	Διογκωμένη πολυστερίνη THERMOPROSOPSIS
Aquapanel Outdoor	Τσιμεντοσανίδα εξωτερικής χρήσης
Vidifloor	Σύστημα πλωτού ξηρού δαπέδου από πλάκες ινογυψοσανίδας
Knauf Integral Gifafloor	Πλάκες δαπέδου από ειδικό γύψο GIFAtec
Γυψοσανίδα Α (GKB)	Τυποποιημένη κατά EN520 γυψοσανίδα από φυσικό γύψο
Άκρα ΑΚ	Λοξή ακμή (σχήμα Α.1)
Άκρα HPAK	Ημιστρόγγυλη και λοξή ακμή (σχήμα Α.2)
Kurt	Χαρτοταινία αρμού
Fugenfuller	Υλικό αρμολόγησης γυψοσανίδων με βάση το γύψο
Aquapanel Joint Filler	Υλικό αρμολόγησης τσιμεντοσανίδων
Betocoat Primer Elast	Αστάρι εξωτερικής χρήσης
SM 700 Multi	Υλικό επικόλλησης και φινιρίσματος με βάση το τσιμέντο
Nonius	Άκαμπτη ανάρτηση
CW	Τυποποιημένος ορθοστάτης κατά EN 14195 & DIN 18182
UW	Τυποποιημένος στρωτήρας κατά EN 14195 & DIN 18182
UA	Ενισχυμένος ορθοστάτης χάλυβα για άνοιγμα πόρτας
UD	Περιμετρικός οδηγός UD κατά EN14195 & DIN 18182
CD	Οδηγός οροφής CD κατά EN 14195 & DIN 18182

Σχήμα Α.1 - Άκρα ΑΚ

Σχήμα Α.2 - Άκρα HPAK

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9869 **[14]** μία συνθήκη για την αξιοπιστία της χρήσης της Μεθόδου της Μέσης Τιμής για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας από επιτόπιες μετρήσεις επιθανειακής θερμοκρασίας και ροής θερμότητας της τοιχοποιίας, είναι η εξής:

Αν η αλλαγή της αποθηκευμένης θερμότητας της τοιχοποιίας είναι μεγαλήτερη του 5% της συνολικής θερμότητας που διαπέρασε την τοιχοποιία καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η Δυναμική Μέθοδος.

Η αποθηκευμένη θερμότητα στο εσωτερικό της τοιχοποιίας είναι το ποσό θερμότητας το οποίο δεσμεύτηκε η τοιχοποιία για την αύξηση της θερμοκρασίας της. Αντίθετα, αν η θερμοκρασία της τοιχοποιίας μειώθηκε, η θερμότητα που αντιστοιχεί στη μείωση της θερμοκρασίας της είναι η αποδιδόμενη θερμότητα. Όμως η θερμοκρασία της τοιχοποιίας δεν είναι σταθερή σε όλο το πάχος της, για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία, η οποια για ελαφριές και μεσαίες κατασκευές, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1155 [ ], ορίζεται ως εξής:

$$T_e = \frac{\sum_{k=1}^{N} \Delta T_k \cdot \left(T_{isk} - \frac{1}{2}\Delta T_k \right)}{\sum_{k=1}^{N} \Delta T_k} \qquad \text{(B.1)}$$

όπου ΔT_k και T_{isk} η θερμοκρασιακή διαφορά και η θερμοκρασια της εσωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας τη χρονική στιγμή k.

Αν T_e^1 η μέση θερμοκρασία της τοιχοποιίας κατά την έναρξη των μετρήσεων και T_e^N κατά τη λήξη, τότε η αλλαγή της μέσης αποθηκευόμενης ενέργειας της τοιχοποιίας σε W/m^2 θα είναι:

$$\Delta Q_{Stor} = \rho C_p \left(T_e^N - T_e^1 \right) L \qquad \text{(B.2)}$$

όπου ρ, C_p και L η πυκνότητα, η θερμοχωρητικότητα το πάχος της τοιχοποιίας αντίστοιχα.

Η συνολική θερμότητα που διαπέρασε την τοιχοποιία είναι το άθροισμα της θερμότητας που εξήλθε από αυτή και της θερμότητας που αποθηκεύτηκε σε αυτη. Η θερμότητα η οποία εξήλθε, για τις περιπτώσεις των πειραματικών μετρήσεων, είναι ίση με τη μετρούμενη ροή θερμότητας από τους αισθητήρες που εγκαταστάθηκαν στην τοιχοποιίας, σε W/m^2. Έτσι

$$Q_{out} = \sum_{i=1}^{N} HF_i \qquad \text{(B.3)}$$

όπου HF_i η μετρούμενη ροή θερμότητας από τους αισθητήρες τη χρονική στιγμή i.

Συνεπώς η συνολική ροή θερμότητας Q_{in} που διαπέρασε την τοιχοποιία θα είναι ίση με:

$$Q_{in} = Q_{out} + \Delta Q_{stor} \qquad \text{(B.4)}$$

Αν $\Delta Q_{stor} > 5\% Q_{in}$, τότε είναι αναγκαία η χρήση της Δυναμικής Μεθόδου κατά ISO.

Για τους παραπάνω υπολογισμούς είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων ρ και C_p της τοιχοποιίας. Γι αυτούς αρχικά έγινε μια εκτίμηση σύμφωνα με τα θεωρητικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της Μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων κατά ASTM.

Για τις βαριές τοιχοποιίες, η μέση θερμοκρασία δεν υπολογίστικε απο τη σχέση (B.1),καθώς σύμφωνα με το πρότυπο η σχάση αυτή αναφέρεται σε μεσαίες και ελαφριές κατασκευές, αλλά ως η μέση τιμή των επιφανειακών θερμοκρασιών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο της μονοδιάστατης μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε ένα μέσο, είναι η εξής.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_s \frac{\partial T}{\partial x}\right) = \left(\rho C_p\right)_s \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (\Gamma.1)$$

όπου k_s, ρ_s και Cp_s η θερμική αγωγιμότητα, η πυκνότητα και η θερμοχωρητικότητα αντίστοιχα του υλικού μέσου. Οι ιδιότητες αυτές ορίζουν τη θερμική διάχυση του μέσου, η οποία είναι ίση με:

$$a = \left(\frac{k}{\rho C_p}\right)_s \qquad (\Gamma.2)$$

Αν θεωρηθεί οι μεταβολές των ιδιοτήτων του μέσου συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι αμελητέες, τότε η εξίσωση (Γ.1) γίνεται:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (\Gamma.3)$$

Η παραπάνω εξίσωση επιλύεται αριθμητικά χρησιμοποιώντας την μέθοδο Crank-Nicholson.

Το χρονικό διάστημα στο οποίο διακριτοποιείται ο χρόνος είναι ίσος με το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων. Ο χώρος, δηλαδή το πάχος του κελύφους, διακριτοποιείται σε NW κόμβους δημιουργώντας απόσταση μεταξύ των κόμβων ίση με $\Delta x = \frac{L}{NW-1}$, όπου L το πάχος του κελύφους. Το πλήθος των κόμβων NW προκύπτει από την ανεξαρτησία του πλέγματος.

Η διαφορική εξίσωση (Γ.3) γραμμένη τη χρονική στιγμή t+Δt/2 γίνεται:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)^{n+\frac{1}{2}} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)^{n+\frac{1}{2}} \qquad (\Gamma.4)$$

Η παραπάνω εξίσωση διακριτοποιείται με κεντρική διαφορά ως προς το χρόνο για την πρώτη παράγωγο και κεντρική διαφορά για τη χωρική δεύτερη παράγωγο παρέχοντας και στις δύο εκφράσεις ακρίβεια δεύτερης τάξης.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)^{n+\frac{1}{2}} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{2\frac{\Delta t}{2}} \qquad (\Gamma.5)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)^{n} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)^{n+1}\right] \qquad (\Gamma.6)$$

και μετά την εκτέλεση των πράξεων προκύπτει:

$$T_{i+1}^{n+1} - \left[\frac{2(\Delta x)^2}{a\Delta t} + 2\right] T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1} = -\left\{T_{i+1}^{n} + \left[\frac{2(\Delta x)^2}{a\Delta t} - 2\right] T_i^{n} + T_{i-1}^{n}\right\} \qquad (\Gamma.7)$$

Η εξίσωση αυτή των πεπερασμένων διαφορών είναι ακρίβειας $O[(\Delta t)^2,(\Delta x)^2]$ και δείχνει ότι γνωρίζοντας της θερμοκρασίες τριών διαδοχικών κόμβων μιας χρονικής στιγμής n, υπολογίζονται οι θερμοκρασίες των ίδιων κόμβων για την επόμενη χρονικής στιγμή n+1. Παρουσιάζεται έτσι ένα τριδιαγώνιο σύστημα με πλήθος εξισώσεων όσο το πλήθος των εσωτερικών κόμβων και επιλύεται χρησιμοποιώντας το m-file TDMAsolver.m της MATLAB.

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται, για να ξεκινήσει χρειάζεται τις θερμοκρασίες της πρώτης χρονικής στιγμής, γι' αυτό γίνεται η υπόθεση ότι την πρώτη χρονική στιγμή η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερική του κελύφους είναι γραμμική από την T_{in} στην T_{out}.

Ως πρώτη οριακή συνθήκη παίρνεται η θερμοκρασία του τελευταίου κόμβου (εξωτερική επιφάνεια του κελύφους) T_{out} και ως δεύτερη, είτε η ροή θερμότητας στο εσωτερικό του κελύφους, είτε η εσωτερική θερμοκρασία T_{in}, ανάλογα με το αν οι βέλτιστες ιδιότητες προκύψουν από την προσαρμογή της καμπύλης της θερμοκρασίας ή της θερμοροής αντίστοιχα. Για την πρώτη περίπτωση η οριακή συνθήκη θα είναι:

$$HF = -k_s \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \Rightarrow T_1 - T_2 = \frac{HF \cdot \Delta x}{k_s} \qquad (\Gamma.8)$$

Επιλύοντας το νέο τριδιαγώνιο σύστημα προκύπτουν νέες θερμοκρασίες για όλους τους εσωτερικούς κόμβους για την επόμενη χρονική στιγμή. Έτσι η θερμοκρασία στον πρώτο κόμβο αντιστοιχεί στην επιφανειακή εσωτερική θερμοκρασία του κελύφους.

Κατόπιν, αν επιλεγεί η αναζήτηση να γίνει ως προς την βέλτιστη προσαρμογή της T_{in}, συγκρίνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη της εσωτερικής θερμοκρασίας από τη δεύτερη με την αντίστοιχη πειραματική της τιμή, δημιουργώντας έτσι το άθροισα των τετραγώνων Γ από τις διαφορές μεταξύ των υπολογιζόμενων και των μετρούμενων τιμών θερμοκρασιών:

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{K}\left[(Y_i - T_i)^2\right] \qquad (\Gamma.9)$$

όπου Y_i η υπολογιζόμενη, από την επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης τιμή για την εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία για τη χρονική στιγμή i και T_i η πειραματική τιμή για την ίδια χρονική στιγμή.

Διαφορετικά, αν επιλεγεί η αναζήτηση των ιδιοτήτων να γίνει ως προς τη βέλτιστη προσαρμογή της ροής θερμότητας, το άθροισμα Γ θα είναι:

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{K} \left[\left(F_i - q_i \right)^2 \right] \qquad (\Gamma.10)$$

όπου F_i η υπολογιζόμενη, από την επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης τιμή για την ροή θερμότητας για τη χρονική στιγμή i και q_i η πειραματική τιμή για την ίδια χρονική στιγμή.

Τα παραπάνω αθροίσματα υπολογίζονται ξεκινώντας ορισμένο χρονικό διάστημα από την πρώτη χρονική στιγμή, έτσι ώστε να μην συμπεριλαμβάνεται το σφάλμα από την υπόθεση του γραμμικού προφίλ θερμοκρασίας για την πρώτη χρονική στιγμή.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές των θερμικών ιδιοτήτων του κελύφους k_s, ρ_s και Cp_s που επηρεάζουν την τιμή της θερμικής διάχυσης α_s και υπολογίζονται τα αντίστοιχα σταθμισμένα αθροίσματα Γ. Το μικρότερο απ' όλα τα αθροίσματα αντιστοιχεί στην βέλτιστη προσέγγιση της υπολογιστικής μεθόδου με την πειραματική και ως εκ τούτου προσεγγίζονται οι θερμικές ιδιότητες του κελύφους.

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1155 οι βέλτιστες θερμικές ιδιότητες της τοιχοποιίας εκλαμβάνονται σύμφωνα με την ελαχιστοποίιση ενός σταθμισμένου αθροίσματος Γ, το οποίο θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει τόσο τις πειραματικές και μετρούμενες τιμές για της θερμοκρασίας, όσο και της θερμοροής. Το σταθμισμένο αυτό άθροισμα είναι:

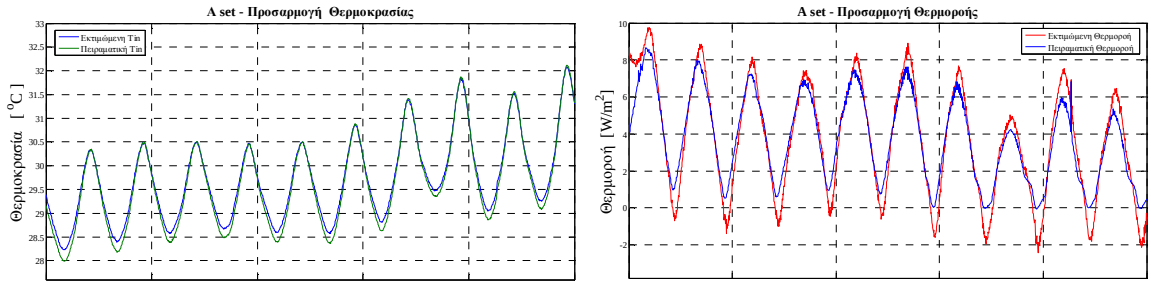
$$\Gamma = \sum_{i=1}^{K} \sum_{m=1}^{M} \left(Y_{mi} - T_{mi} \right)^2 \cdot W_{Tm} + \sum_{i=1}^{K} \sum_{n=1}^{N} \left(F_{ni} - q_{ni} \right)^2 \cdot W_{qn} \qquad (\Gamma.11)$$

όπου T_{mi} και Y_{mi} η υπολογιζόμενη και πειραματική τιμής της θερμοκρασίας στον κόμβο m τη χρονική στιγμή i, και αντίστοιχα F_{mi} και q_{mi} η υπολογιζόμενη και πειραματική τιμής της θερμοροής στον κόμβο n τη χρονική στιγμή i.Τέλος, όπου W_{Tm} και W_{qn} είναι συντελεστές βαρύτητας για τη συνεισφορά της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας κάθε κόμβου στο άθροισμα Γ.

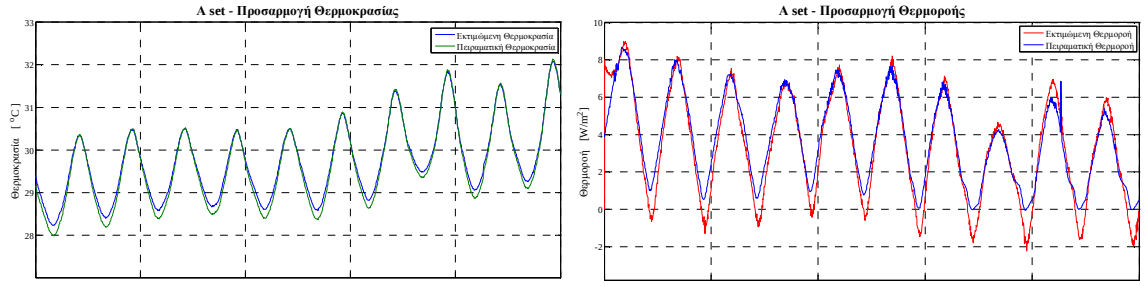
Όμως για να είναι δυνατός ο υπολογισμός αυτού του αθροίσματος θα πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις και στους εσωτερικούς κόμβους της τοιχοποιίας, κάτι για το οποίο δεν ήταν δυνατό να γίνει σε καμία από τις μελετώμενες τοιχοποιίες. Για το λόγο αυτό το άθροισμα διαφοροποιήθηκε στη μορφή της εξίσωσης (Γ.9) ή της (Γ.10) αποφασίζοντας ένα από τα δύο μεγέθη να συμπεριληφθεί στη δημιουργία του αθροίσματος Γ.

Για τη επιλογή του μεγέθους που θα συμπεριληφθεί στο άθροισμα Γ, έγινε εφαρμογή της μεθοδολογίας για διάφορα set μετρήσεων μιας τοιχοποιίας, αναζητώντας τις βέλτιστες θερμικές ιδιότητες k,ρ και C_p έχοντας στο άθροισμα Γ την πρώτη φορά

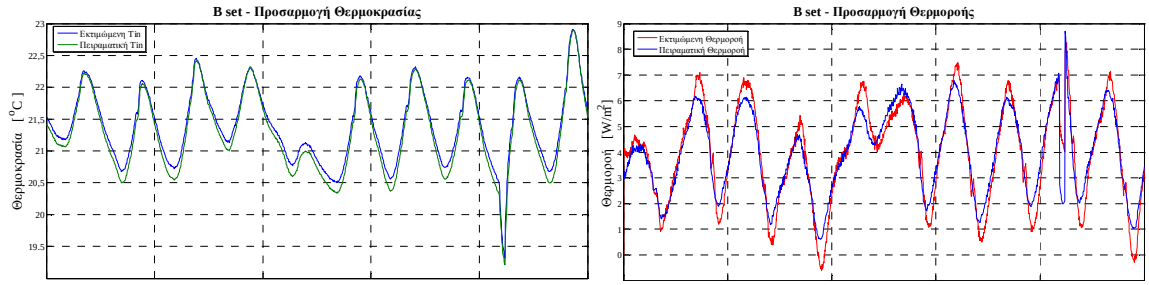
μόνο το μέγεθος της θερμοκρασία και τη δεύτερη φορά μόνο της θερμοροής. Η επίλυση έγινε σε κοινά διαστήματα των k, ρ και C_p με κοινό πλήθος κόμβων. Τα αποτελέσματα των προσαρμογών των καμπυλών σε κάθε μια περίπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα Γ.1.α/β και Γ.2α/β



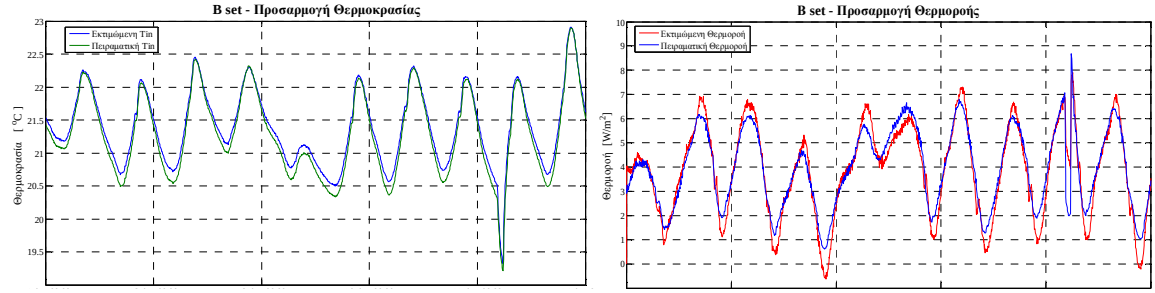
Σχήμα Γ.1.α - A set μετρήσεων - Προσαρμογή καμπυλών με βέλτιστες ιδιότητες με βάση την καλύτερη προσαρμογή της εσωτερικής θερμοκρασίας



Σχήμα Γ.1.β - A set μετρήσεων - Προσαρμογή καμπυλών με βέλτιστες ιδιότητες με βάση την καλύτερη προσαρμογή της θερμοροής



Σχήμα Γ.2.α - B set μετρήσεων, Προσαρμογή καμπυλών με βέλτιστες ιδιότητες με βάση την καλύτερη προσαρμογή της εσωτερικής θερμοκρασίας

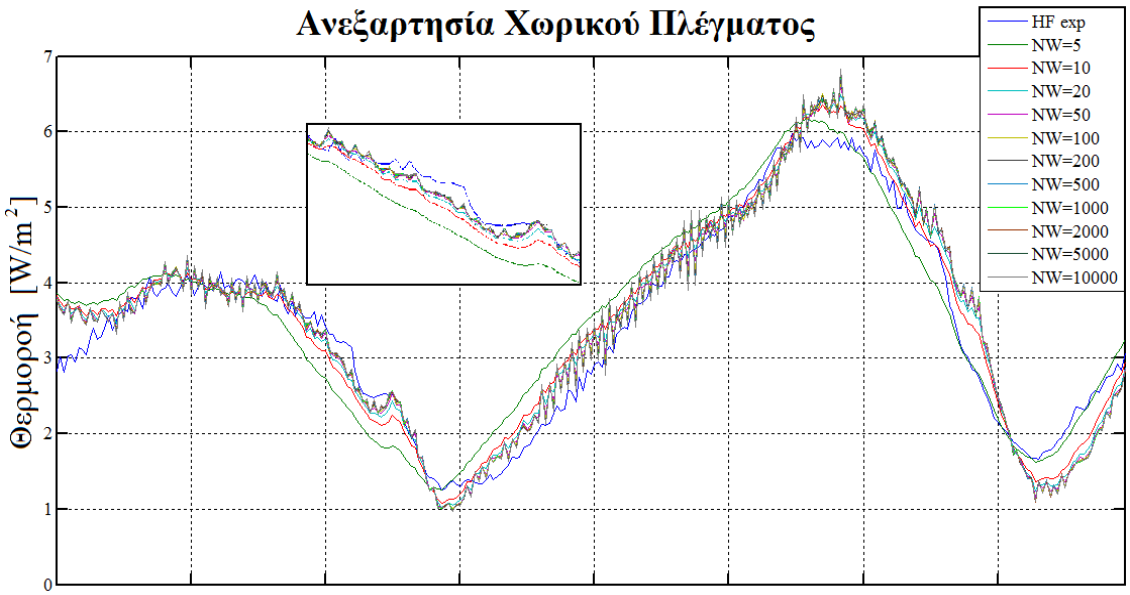


Σχήμα Γ.2.β - B set μετρήσεων, Προσαρμογή καμπυλών με βέλτιστες ιδιότητες με βάση την καλύτερη προσαρμογή της θερμοροής

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων Γ.1 και Γ.2 παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις η προσαρμογή της θερμοκρασίας είναι καλύτερη από την προσαρμογή της θερμοροής, είτε η αναζήτηση των ιδιοτήτων γίνεται με βάση αυτή, είτε με βάση τη ροή θερμότητας. Μια αιτία για την οποία συμβαίνει αυτό, είναι ότι το γεγονός ότι σφάλμα μέτρησης της ροής θερμότητας, σε κάθε περίπτωση, είναι μεγαλύτερο από το σφάλμα μέτρησης της θερμοκρασίας. Για τις καμπύλες της θερμοροής στο πρώτο set μετρήσεων υπάρχουν διαφορές μεταξύ των δύο καμπυλών με την προσαρμογή στην περίπτωση όπου η αναζήτηση γίνεται μόνο από τη θερμοροή να βελτιώνεται (καλύτερη προσέγγιση των μεγίστων) σε σχέση με την αναζήτηση όπου γινόταν με βάση τη θερμοκρασία. Αυτό όμως δεν παρατηρείται στο δεύτερο set μετρήσεων, όπου οι προσαρμογές παρέμειναν σχεδόν οι ίδιες. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάθε περίπτωση το τελικό αποτέλεσμα του συντελεστή U-value μπορεί να άλλαξε, αλλά δεν ξέφυγε ποτέ πέρα από τα όρια του σφάλματος. Συνεπώς, θα πρέπει να γίνεται η εύρεση των βέλτιστων ιδιοτήτων τόσο ως προς την προσαρμογή της θερμοκρασίας, όσο και ως προς της ροής θερμότητας και να επιλέγεται αυτό με την καλύτερη προσαρμογή και των δύο καμπυλών. Στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν αναφέρεται με βάση πιο μέγεθος έγινε η προσαρμογή, τις περισσότερες φορές επιλέχθηκε η θερμοκρασία.

ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΧΩΡΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση, για μετρήσεις δύο τυχαίων ημερών, παίρνοντας ως δεδομένες τις επιφανειακές θερμοκρασίες μιας τοιχοποιίας, υπολογίζεται η θεωρητική ροή θερμότητας για διαφορετικό πλήθος κόμβων NW. Το πλήθος των κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν είναι NW=5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000. Η ροή θερμότητας που προκύπτει για κάθε πλήθος κόμβων παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



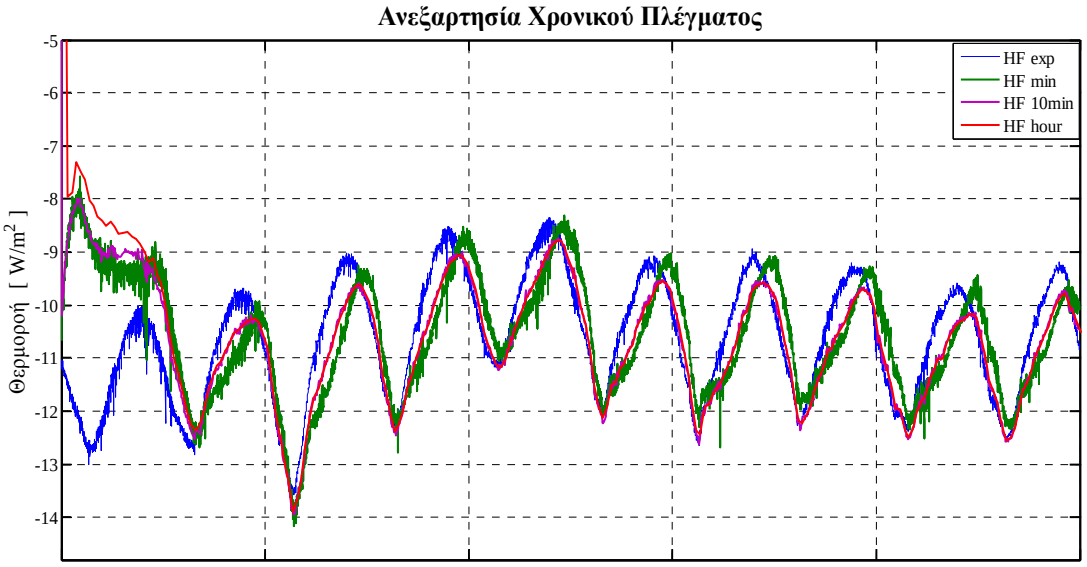
Σχήμα Γ.3 - Εκτιμώμενη θερμοροή για διάφορα πλήθη κόμβων NW

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα (Γ.3), οι καμπύλες για πλήθος κόμβων άνω των NW=50 σχεδόν ταυτίζονται. Συνεπώς η ανεξαρτησία συμβαίνει για πλήθος κόμβων

μεγαλύτερο των NW=50, χωρίς να είναι μεγάλο το σφάλμα σε περίπτωση επιλογής μικρότερου πλήθους κόμβων.

ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

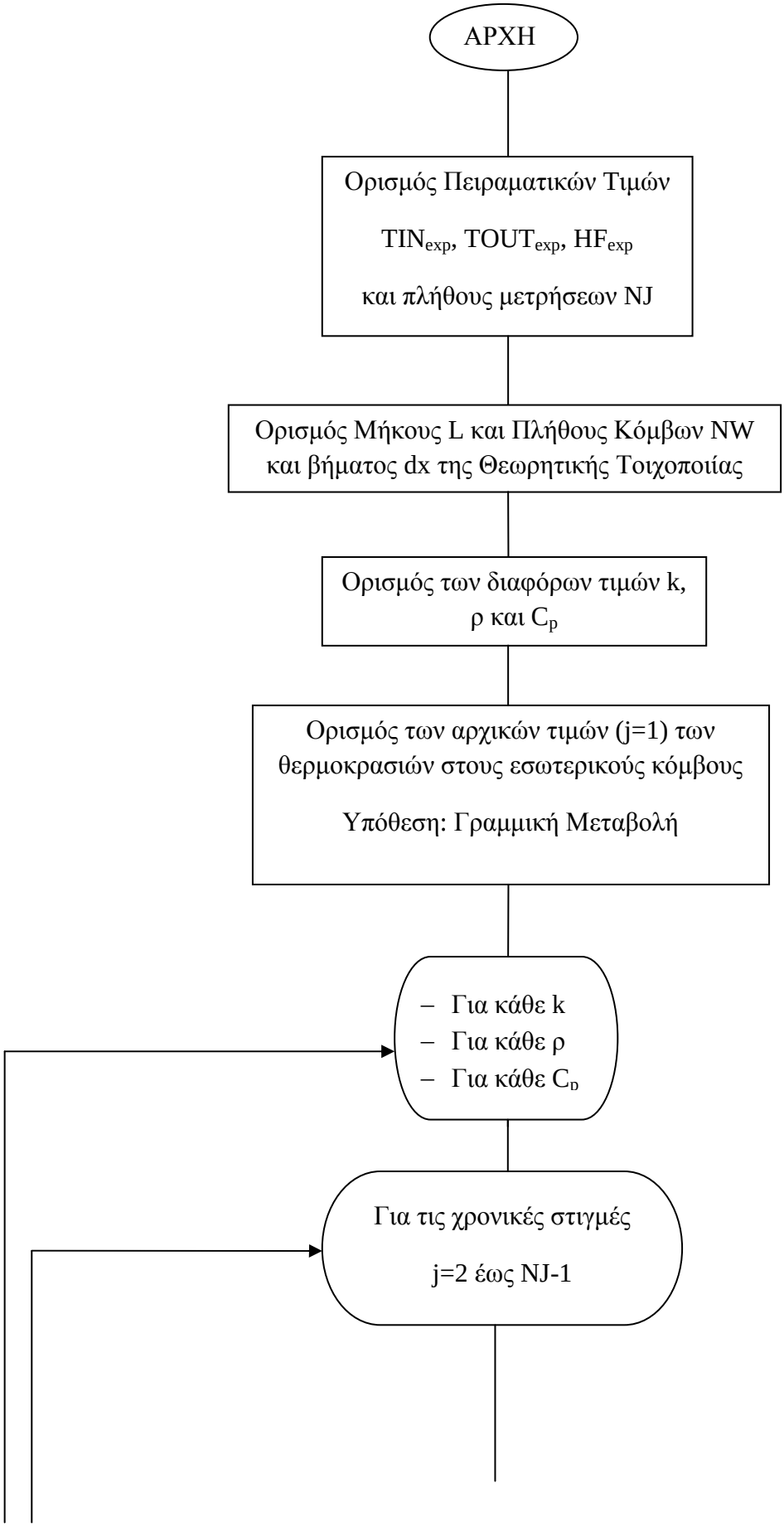
Παίρνοντας ως οριακές συνθήκες τη ροή θερμότητας και την επιφανειακή εξωτερική θερμοκρασία, επιλύθηκε η διαφορική εξίσωση, όπως περιγράφηκε ανωτέρω, για διάφορα χρονικά βήματα dt=1min, dt=10min και dt=1hour. Κάθε φορά η επίλυση έγινε για τα ίδια διαστήματα των k, ρ και C_p καθώς και πλήθος κόμβων και τιμών. Η προσαρμογή της ροής θερμότητας για τις βέλτιστες ιδιότητες όπου βρέθηκαν σε αυτά τα χρονικά διαστήματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος (Γ.4).

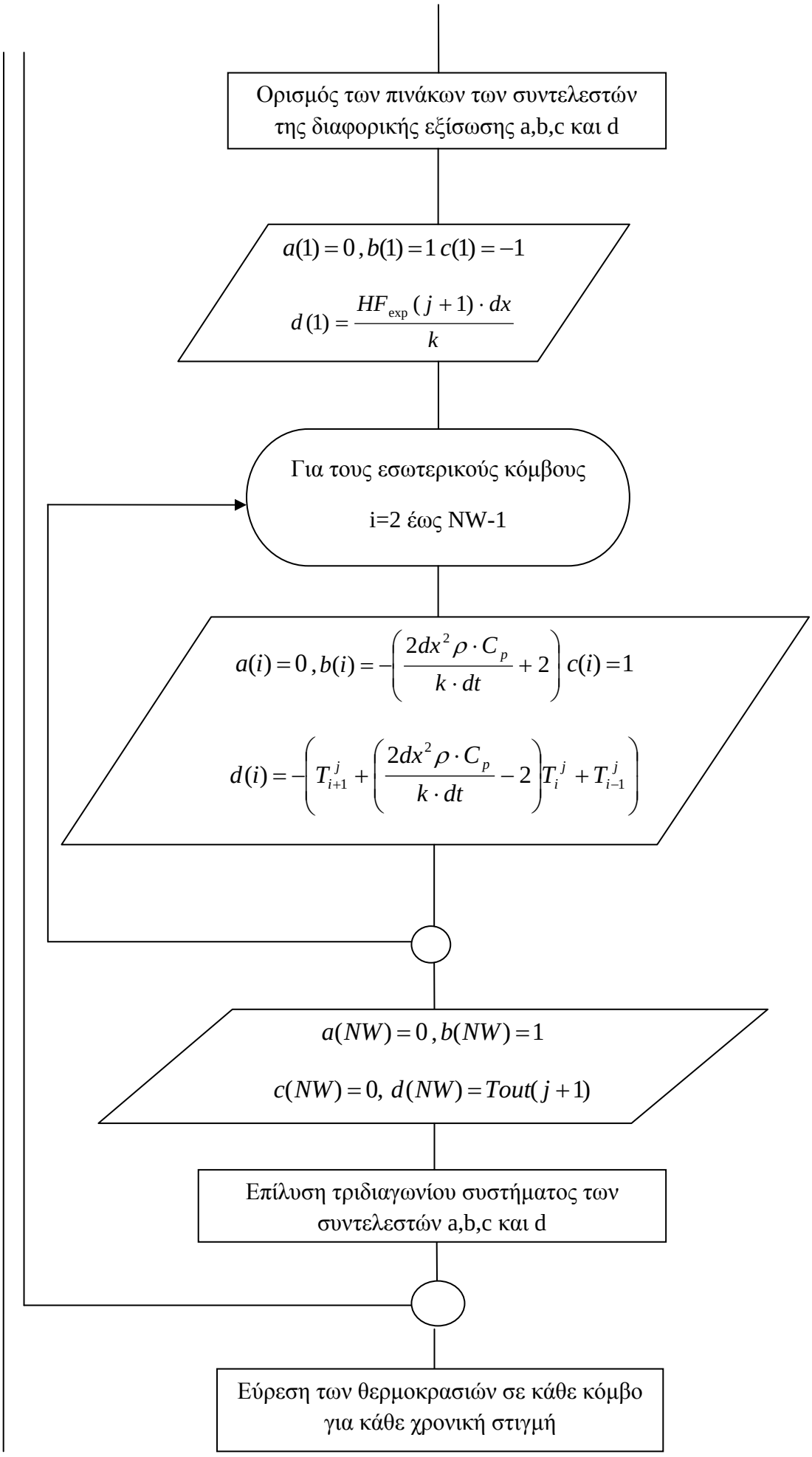


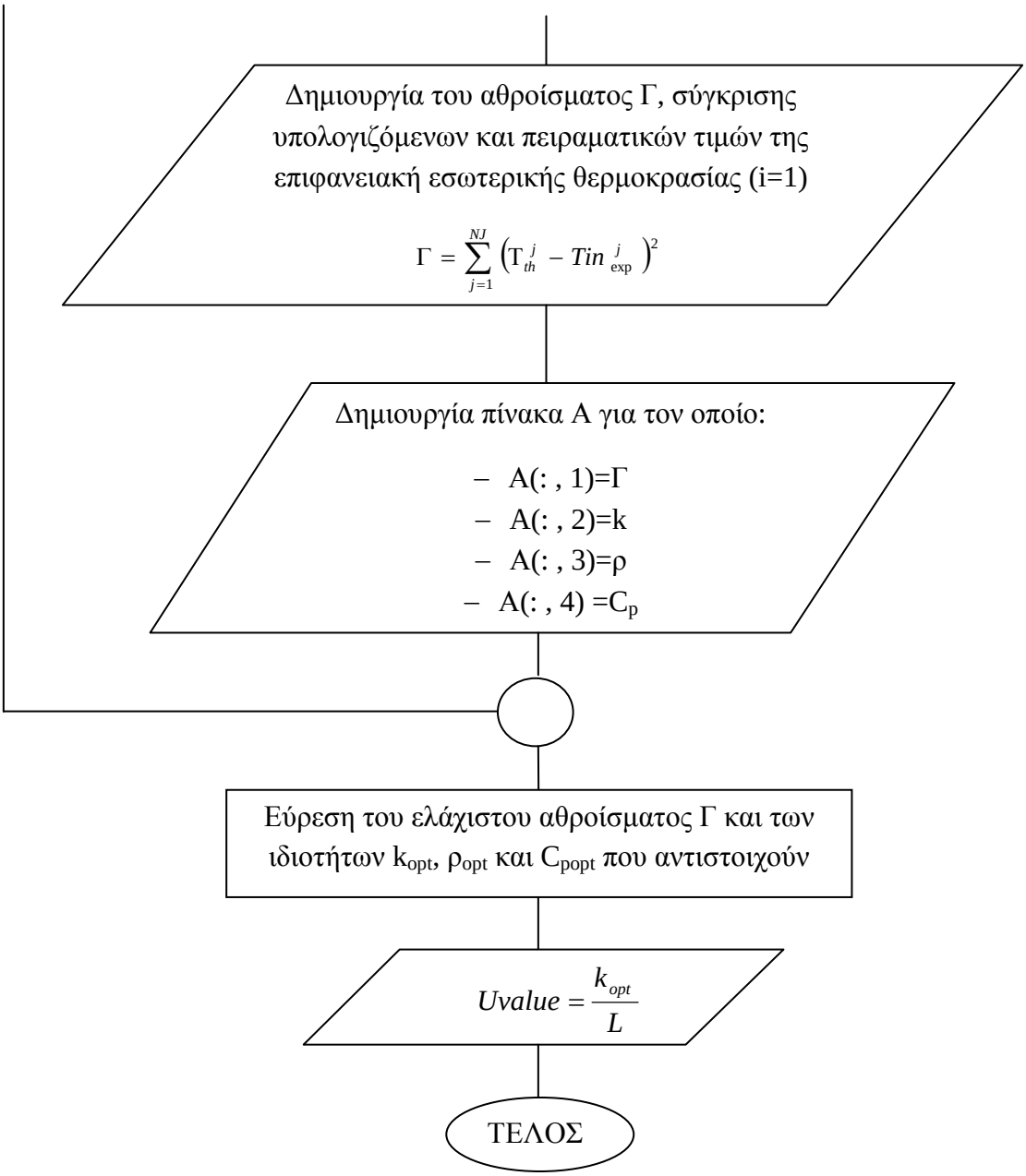
Σχήμα Γ.4 - Εκτιμώμενη θερμοροή για διάφορα χρονικά βήματα dt

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα οι καμπύλες με dt=10min και dt=1hour σχεδόν ταυτίζονται, ενώ η καμπύλη για dt=1min αποκλίνει από αυτές. Επίσης οι καμπύλες ανά λεπτό, τόσο η πειραματική όσο και η θεωρητική, παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Σύμφωνα με το διάγραμμα το χρονικό διάστημα που πρέπει να ληφθεί για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης είναι dt=1min. Όμως η επιλογή αυτή δημιουργεί δύο προβλήματα: Πρώτον υπάρχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και δεύτερον: σε ορισμένες πειραματικές διατάξεις (TRSYS01 της Hukseflux) δεν είναι εφικτή η λήψη των δεδομένων με χρονικό βήμα ενός λεπτού. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε να επιλύεται η διαφορική εξίσωση παίρνοντας βήμα dt=10min. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα, όσο αφορά το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, δεν αλλάζουν αισθητά, η διαφορές παρουσιάζονται στις καμπύλες προσαρμογής της θερμοροής.

ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ – ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ



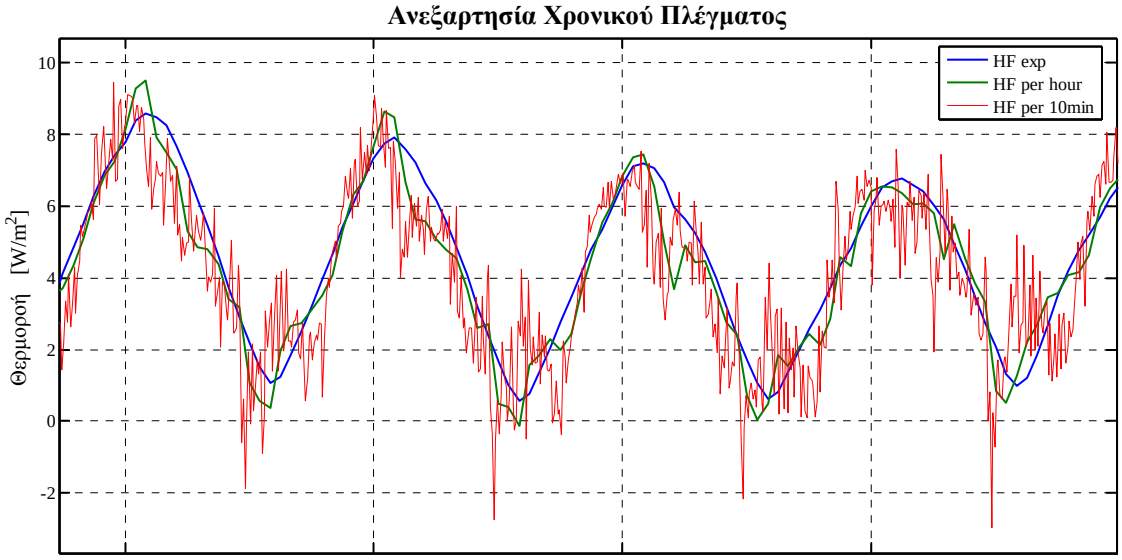

Ορισμός των πινάκων των συντελεστών της διαφορικής εξίσωσης a,b,c και d
$a(1)=0, b(1)=1\ c(1)=-1$
$d(1)=\frac{HF_{\exp}(j+1)\cdot dx}{k}$
Για τους εσωτερικούς κόμβους
i=2 έως NW-1
$a(i)=0, b(i)=-\left(\frac{2dx^2\rho\cdot C_p}{k\cdot dt}+2\right)\ c(i)=1$
$d(i)=-\left(T_{i+1}^{j}+\left(\frac{2dx^2\rho\cdot C_p}{k\cdot dt}-2\right)T_i^{j}+T_{i-1}^{j}\right)$
$a(NW)=0, b(NW)=1$
$c(NW)=0,\ d(NW)=Tout(j+1)$
Επίλυση τριδιαγωνίου συστήματος των συντελεστών a,b,c και d
Εύρεση των θερμοκρασιών σε κάθε κόμβο για κάθε χρονική στιγμή


Δημιουργία του αθροίσματος Γ, σύγκρισης υπολογιζόμενων και πειραματικών τιμών της επιφανειακή εσωτερικής θερμοκρασίας (i=1)
$\Gamma = \sum_{j=1}^{NJ} \left(T_{th}^{j} - Tin_{\exp}^{j} \right)^2$
Δημιουργία πίνακα Α για τον οποίο:
– A(: , 1)=Γ
– A(: , 2)=k
– A(: , 3)=ρ
– A(: , 4) =C_p
Εύρεση του ελάχιστου αθροίσματος Γ και των ιδιοτήτων k_{opt}, ρ_{opt} και C_{popt} που αντιστοιχούν
$Uvalue = \frac{k_{opt}}{L}$
ΤΕΛΟΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Για την επιλογή του χρονικού βήματος της δυναμικής μεθόδου έγιναν δοκιμές σε διάφορα set μετρήσεων διαφόρων τοιχοποιιών για βήματα dt=10min και dt=1hour. Όλες οι δοκιμές έγιναν για ίδιο πλήθος κόμβων των διαστημάτων των παραμέτρων της μεθόδου καθώς επίσης και πλήθος εξισώσεων p που αντιστοιχούν σε ίδιο χρονικό διάστημα. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των αποτελεσμάτων των δοκιμών.



Σχήμα Δ.1 - Προσαρμογή της θερμοροής για διάφορα χρονικά βήματα dt

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η εκτιμώμενη ροή θερμότητας για το χρονικό βήμα των 10 λεπτών (κόκκινη καμπύλη) παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις σε αντίθεση με την αντίστοιχη θερμοροή του χρονικού βήματος μίας ώρας (πράσινη). Επίσης η προσαρμογή της καμπύλης για dt=1hour είναι αρκετά καλή σε αντίθεση με την καμπύλη για dt=10min, η οποία, κυρίως λόγω των διακυμάνσεων, σε πολλά σημεία αποκλίνει από την πειραματική. Τέλος στην περίπτωση των 10 λεπτών υπάρχει μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος κατά την επίλυση της μεθόδου. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε να χρησιμοποιείται χρονικό βήμα μίας ώρας.

Εφόσον τα αποτελέσματα για dt=10min παρουσιάζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, κρίθηκε άσκοπη η εξέταση του ενδεχομένου των αποτελεσμάτων για βήμα dt=1min.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Πίνακας Ε.1 - Αντιστοιχία καναλιών μετρητικής διάταξης στην Οικία Μπενιζέλων

Κανάλι	Όνομα	Καλωδίωση	Σχόλια
101	th1	κόκκινο / μαύρο	GL -Tin
102	HIH-4030	+ κίτρινο / - άσπρο	GL - Hin
103	th2	πράσινο / μπλε	GL - Tceiling
104	th5		GL - Tfloor
105	HFP01	+ άσπρο / - πράσινο	GL - HF - W - S - NEW (από τις 21-05 μέχρι τις 24-07 μετράει με ευαισθησία 63.6 και από της 24-07 μετράει με ευαισθησία 494.6)
106	th6		GL - W - E - Tin
107	th19		GL - W - S -Tin - NEW
108	th4		GL - W - S -Tout - NEW
109	th3		GL - W - S -Tin - OLD
110	th10		GL - W - S -Tout - OLD
111	th7		GL - W - W - Tin
112	th8		GM - W - E - Tin
113	th9		GL - W - N - Tin
114	th12		GL - W - N - Tout
115	th11		GL - N - Tout
116	th14		GR - Tin
117	th15		GR - W - S - Tin
118	th16		GR - W - S - Tout
119	th17		GR - W - W - Tin
120	th20		GR - W - W - Tout
121	th21	μπλε / κόκκινο	GM - S - Tout (METEO)
122	HIH-4030	+ κίτρινο / - μαύρο	GM - S - Hout (METEO)
123	HFP01		GL - W - S - HF - OLD (μέχρι 05/07 στις 10:10)
124	th22	κόκκινο / μαύρο	UL - Tin
125	HIH-4030	+ κίτρινο / - άσπρο	UL - Hin
126	th23	πράσινο / μπλε	UL - Tceiling
127	th24		UL - Tfloor
128			UL - HF (από 05/07 στις 10:30 μετράει στον τοίχο UL-N με ευαισθησία 63.5, και από 24-07 στις 12:30 μετράει UL-W με ευαισθησία 499.5)
129	th25		UL - W - E - Tin
130	th26		UL - W - E - Tout
131	th27		UL - W - S - Tin
132	th28		UL - W - S - Tout
133	th29	κόκκινο / μαύρο	UL - W - W - Tin
134	th30	κίτρινο / μπλε	UL - W - W - Tout
135	th13		UL - W - N - Tin
136	th18		UL - W - N - Tout
137	th31		UM - N - Tout
138	th32		UM - W - S - Tin
139	th33		UM - W - S - Tout
140	th34		UR - Tin

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Οδηγός για εξοικονόμηση ενέργειας στις κατοικίες, Υπουργείο Περιβάκκοντος,Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Αθήνα 2001.

[2] Το πρόβλημα της ηλικίας των κτιρίων στις πόλεις, Τεχνικά Χρονικά, ΤΕΕ, 4/1992.

[3] Πέρδιος Σταμάτης, Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια-Τόμος Α, Τεχνική Εκδοτική, Αθήνα 2007.

[4] Οδηγός θερμομόνωσης κτιρίων,2η έκδοση, Υπηρεσία Ενέργειας, Υπουργίο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού, 2010.

[5] EN 13162:2001 +AC2005E. Thermal insulation products for buildings - Factory made mineral wool (MW) products - Specification. CEN 2005.

[6] Οδηγός Εξοικονόμησης Ενέργειας Μέσω Θερμομόνωσης, ΚΑΠΕ, 1999,

[7] Τζιβανίδης Χρήστος, Σημειώσεις του μαθήματος Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων του 9ου εξαμήνου, Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

[8] Οδηγία 2002/91/ΕΚ της 16ης Δεκεμβρίου 2002, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L1/65-71.

[9] Οδηγία 2010/31/ΕΚ της 19ης Μαΐου 2010, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L153/13-35.

[10] Επίσημος ιστότοπος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Διαθέσιμο από 2007, <http://europa.eu/legislation_summaries/other/l27042_el.htm>, (Επίσκεψη 10/08/2012).

[11] Πέρδιος Σταμάτης, Ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων και βιομηχανιών, Τεχνική Εκδοτική, Αθήνα 2006.

[12] Σ.Ε. Σιμόπουλος, Μετρήσεις τεχνικών Μεγεθών, Β Έκδοση, Αθήνα 1989.

[13] John G.Webster, Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC, 1999

[14] ISO 9869:1994, Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.

[15] ASTM C 1046-95 (Reapproved 2007), Standard practice for in-situ measurement of heat flux and temperature on building envelope components

[16] ASTM C 1155-95 (Reapproved 2007), Standard practice for determining thermal resistance of building envelope components from in-situ data

[17] ISO 8302:1991, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus

[18] ASTM C 177-04, Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-hlate apparatus

[19] Yunus A. Cengel, Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, Second Edition, McGraw-Hill,2008.

[20] ISO 7345:1987, Thermal insulation - Physical quantities and definitions

[21] ISO 6946:2007, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method

[22] prEN 1745:1994, Masonry and products - Methods for determining declared and design thermal values.

[23] Lucio Laurenti,Fulvio Marcotullio,Filippo de Monte, Determination of the thermal resistance of walls through a dynamic analysis of in-situ data, International Journal of Thermal Sciences 43 (2004), pages 297–306

[24] Eleftheria Tsakanika-Theohari,Harris Mouzakis, A Post-Byzantine mansion in Athens.The restoration project of the timber structural elements,World Conference on Timber Engineering,2010

[25] Ελευθερία Τσακανίκα,Ελένη Ζαρογιάννη,Χάρης Μουζάκης,Στατική μελέτη για την αποκατάσταση και απόδοση σε νέα χρήση του διατηρητέου μνημείου οδ.Αδριανού96 Αθήνα (αρχοντικό Μπενιζέλων), Αθήνα, Ιούλιος 2006

[26] Paul Baker,U-values and traditional buildings,In-situ measurements and their comparison to calculated values,Glasgow Caledonian University,January 2011

[27] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2/2010, Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων, Α' έκδοση, Αθήνα Ιούλιος 2010