



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ
ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ ΥΠΕΡ-ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Αντ. Ατσόνιος

Επιβλέπουσα

Μαρία Α. Φούντη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ
ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ ΥΠΕΡ-ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Αντ. Ατσόνιος

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μαρία Φούντη, Καθ. ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)

Κίμων Αντωνόπουλος, Καθ. ΕΜΠ

Χρήστος Τζιβανίδης, Αναπλ. Καθ. ΕΜΠ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μαρία Φούντη, Καθ. ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)

Κίμων Αντωνόπουλος, Καθ. ΕΜΠ

Χρήστος Τζιβανίδης, Αναπλ. Καθ. ΕΜΠ

Εμμανουήλ Ρογδάκης, Καθ. ΕΜΠ

Αθηνά Στέγγου-Σαγιά, Καθ. ΕΜΠ

Ειρήνη Κορωνάκη, Αναπλ. Καθ. ΕΜΠ

Αργυρώ Δημούδη, Αναπλ. Καθ. ΔΠΘ

ΑΘΗΝΑ, 2018



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

THERMAL ENGINEERING DEPARTMENT
HETEROGENEOUS MIXTURES AND COMBUSTION SYSTEMS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS FOR THE
ENERGY ASSESSMENT OF BUILDING ENVELOPE FOCUSING
ON SUPER INSULATION MATERIALS

Thesis for the degree of Doctoral of Philosophy

Ioannis A. Atsonios

Supervisor

Maria A. Founti

Professor

ATHENS, 2018

Στην οικογένειά μου

«Φτάσε όπου δεν μπορείς»

Νίκος Καζαντζάκης

Σύμφωνα με απόφαση της Γενικής Συνέλευσης της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ στις 24/11/2017 η παρούσα Διατριβή γίνεται αποδεκτή στην Αγγλική γλώσσα. Έχει επιπλέον προστεθεί ελληνική περίληψη με έκταση μεγαλύτερη από το ένα τρίτο της έκτασης του αγγλικού κειμένου.

Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για την ολοκλήρωση της διατριβής υπήρξε ένα πλήθος ανθρώπων οι οποίοι στάθηκαν αρωγοί στην προσπάθειά μου, προσφέροντας πολύτιμη βοήθεια και στήριξη.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Μαρία Φούντη με την οποία είχα μια άψογη συνεργασία όλα τα χρόνια και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο, αρχής γενομένης με την επίβλεψη της Διπλωματικής εργασίας το 2012. Η εξαιρετική καθοδήγηση, η διαρκής υποστήριξη και η εμπιστοσύνη της όλα τα χρόνια έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξή μου και στην ολοκλήρωση της διατριβής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς και επταμελούς επιτροπής για τη συνεργασία και τις παρατηρήσεις τους.

Παράλληλα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Δρ. Γιάννη Μανδηλαρά για την άψογη συνεργασία, την αδιάλειπτη επιστημονική καθοδήγηση από την εκπόνηση της Διπλωματικής εργασίας το 2012 μέχρι και την τελευταία ημέρα της ολοκλήρωσης της διδακτορικής διατριβής. Η συνεισφορά του όλα αυτά τα χρόνια ήταν καταλυτική, καταφέροντας να με καθοδηγεί εύστοχα στο κάθε επόμενο βήμα. Ήταν σημαντικό για μένα να αισθάνομαι ότι υπάρχει ένας άνθρωπος που θα δώσει λύση σε κάθε δυσκολία, συζητώντας και διορθώνοντας από μεγάλα ερευνητικά ζητήματα μέχρι την πιο «ασήμαντη» λεπτομέρεια.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Δήμο Κοντογεώργο και το Δρ. Γιώργο Ζαννή για τη ξεχωριστή βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές σε επιστημονικά και τεχνικά θέματα, αλλά και για την εξαιρετική συνεργασία. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον τεχνικό Χαράλαμπο Μαυράκη για την άψογη συνεργασία, την καταλυτική βοήθεια σε όλες τις πειραματικές διαδικασίες και την επιτυχή διεκπεραίωση όλων των τεχνικών ζητημάτων.

Στους συναδέλφους Μάγδα Αλ Φάντελ, Γιώργο Σεμιτέλο, Λίνα Κλουσάκου, Νίκο Βάσιλα και Σωτήρη Μπενέκο οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για τη βοήθειά τους σε πολλά ερευνητικά θέματα, την άψογη συγκατοίκηση στο «γραφείο 107», την ηθική στήριξη στις δύσκολες στιγμές και τις ατέλειωτες ώρες συζητήσεων/γέλιων. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη τους συναδέλφους Άρη Μανωλίτση, Αλεξάνδρα Μπόνου, Τασία Γκίκα και Δρ. Ελένη Ασημακοπούλου όπου τα τελευταία χρόνια μοιραστήκαμε το «γραφείο 1» για τη συμβολή και τη βοήθειά τους παρέχοντας χρήσιμες συμβουλές, υποστηρίζοντας ηθικά και δημιουργώντας ένα ευχάριστο κλίμα συνεργασίας. Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης για την άψογη συνεργασία και τη βοήθειά τους όλα αυτά τα χρόνια.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) για την χορήγηση υποτροφίας κατά τη διάρκεια των τελευταίων 8 μηνών της διατριβής μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου, την Πορφυρία και τους φίλους μου για τη βοήθεια τους, την ηθική και την υλική συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον αδελφό μου Κωστή για τη βοήθεια και την υποστήριξη σε κάθε μου βήμα και για το γεγονός ότι ήταν ο πρώτος που μου έδειξε όλες τις χαρές και τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει κάποιος υποψήφιος διδάκτορας, πολύ πριν πάρω την απόφαση να ξεκινήσω κι εγώ την πρόκληση του διδακτορικού.

Ιωάννης Ατσόνιος
Σεπτέμβριος, 2018

Abstract

The current thesis addresses the experimental and numerical methods for the energy assessment of building envelopes and investigates the impact of Super Insulation Materials on the envelope upgrade. The energy efficiency of envelope is crucial for the minimization of the energy demand in building sector and the achievement of the national and international targets regarding the reduction of global energy consumption. The assessment of the envelope thermal performance is the benchmark for the enhancement of buildings, decision making during the design stage and the evaluation of innovative materials and techniques. Such a material is the Vacuum Insulation Panel (VIP) which is the most promising Super Insulation Material for applications in building sector.

In the experimental approach of thesis, it is shown that the in-situ measurement of the thermal resistance (R-value) and the thermal transmittance (U-value) of existing wall is vital for the energy assessment of the building envelope. In this context, the thesis examines and compares the current available and proposes new methods for the in-situ characterization of building walls. The widely used standardized methods for the in-situ R-value measurement of building walls (described by ISO 9869 and ASTM C1155) are extensively analyzed and evaluated. For this purpose, an experimental campaign is performed for the in-situ R-value measurement of tree walls under different measuring conditions. The outcomes provide guidelines for the in-situ R-value measurement, the pre-processing of measurements and the selection of the appropriate method. Furthermore, emphasis is put on the in-situ characterization of lightweight steel-framed (LSF) building envelopes, revealing that there is a gap in literature concerning the in-situ U-value measurement. To fill this gap, the thesis introduces and validates two new methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of LSF walls, including the negative and complex effect of metal structure. The two methods, namely the Representative Points Method (RPM) and the Weighted Area Method (WAM), achieve fast and accurate in-situ U-value measurement, combining infrared thermography with the recording and processing of air temperatures and heat flux measurements. The proposed methods could be useful tools for the introduction of standardized methods for the in-situ measurement of the U-value of lightweight envelopes.

At the same time, the thesis experimentally investigates the thermal and hygrothermal behavior of VIPs and their impact on the envelope energy efficiency. For this reason, the above new methods along with widely used experimental techniques are employed on innovative building envelopes. Two LSF building envelopes incorporating different types of VIPs are constructed and monitored over an entire year. The first involves a renovated wall in Greece (the first building application of VIPs in Greece), while the second constitutes the entire envelope of a small-scale building, in Switzerland. The comprehensive experimental investigation reveals the benefits of using the Super-Insulation technology in envelope upgrade, but also indicates some weaknesses to overcome.

In the numerical approach, the thesis examines and evaluates the existing numerical methods for the energy assessment of innovative building envelopes. The investigation focuses on the simulation of VIP and the calculation of the contribution of thermal bridges, which is the main challenge regarding the LSF envelopes. In particular, two different numerical techniques, the steady state analysis according to ISO 10211 and the whole building simulation in dynamic conditions, are applied to an LSF envelope incorporating VIPs with available measurements from the experimental part of thesis. It is shown that the methods calculate the accurate behavior of VIPs, while the contribution of thermal bridges can be calculated by an EnergyPlus model by means of appropriate modifications of the material thermal properties.

In this thesis, the numerical techniques are employed for the investigation of the energy and cost effectiveness of the VIPs for two theoretical real scale buildings. In the first, the installation of a VIP layer at the external walls of an LSF envelope is examined as a measure for the reduction of thermal bridges. It is shown that the VIPs improve the envelope thermal performance by 15% in terms of heating/cooling demand and reduce the effect of all thermal bridges and their hygrothermal issues. Moreover, design modifications on the current construction practices are proposed for the further reduction of the most crucial thermal bridges. In the second application, a techno-economic assessment of the renovation of an old massive building is carried out. The application of VIPs is compared with conventional solutions for cities with different climate conditions and economic factor. The assessment of the cases is performed by means of the calculation of annual savings/operating costs and the payback period, indicating that the use of VIPs with the current prices can be profitable in cold climates and for areas with high rental prices.

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή εξετάζει τις πειραματικές και υπολογιστικές μεθόδους για την ενεργειακή αξιολόγηση κτιριακών κελυφών και διερευνά τη συνεισφορά των Υπέρ-Μονωτικών Υλικών στην αναβάθμιση του κελύφους. Η ενεργειακή απόδοση του κελύφους είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών αναγκών στον κτιριακό τομέα και την επίτευξη των εθνικών και διεθνή στόχων σχετικά με τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του κελύφους είναι το σημείο αναφοράς για την βελτίωση των κτιρίων, τη λήψη αποφάσεων στη φάση του σχεδιασμού και την αξιολόγηση καινοτόμων υλικών και τεχνικών. Ένα τέτοιο καινοτόμο υλικό είναι η Μονωτική Σανίδα Κενού (Vacuum Insulation Panel - VIP), το οποίο είναι το πιο πολλά υποσχόμενο Υπέρ-Μονωτικό Υλικό για εφαρμογές στον κτιριακό τομέα.

Στην πειραματική προσέγγιση της διατριβής, διαπιστώνεται ότι η επιτόπια μέτρηση της θερμικής αντίστασης (R-value) ή της θερμικής διαπερατότητας (U-value) υπάρχουσας τοιχοποιίας είναι καθοριστική για την ενεργειακή αξιολόγηση του κτιριακού κελύφους. Σε αυτό το πλαίσιο, η διατριβή συγκρίνει τις υπάρχουσες μεθόδους και προτείνει νέες για τον επιτόπιο χαρακτηρισμό τοιχοποιιών. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες προτυποποιημένες μεθόδους για τη μέτρηση του R-value μιας τοιχοποιίας (όπως περιγράφονται από τα πρότυπα ISO 9869 και ASTM C1155) αναλύονται διεξοδικά και αξιολογούνται. Για το σκοπό αυτό διενεργείται μια πειραματική μελέτη για τη μέτρηση του R-value τριών τοιχοποιιών υπό διαφορετικές μετρητικές συνθήκες. Τα συμπεράσματα της μελέτης παρέχουν χρήσιμες οδηγίες για την μέτρηση του R-value, την προετοιμασία των μετρήσεων και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου. Επιπλέον, στη διατριβή δίνεται έμφαση στον επιτόπιο χαρακτηρισμό των ελαφρών κελυφών χαλύβδινου σκελετού (lightweight steel-framed - LSF), φανερώνοντας ότι υπάρχει ένα κενό στη βιβλιογραφία σχετικά με τη μέτρηση του U-value τέτοιων τοιχοποιιών. Για την κάλυψη αυτού του κενού, η διατριβή εισάγει και επικυρώνει δύο νέες μεθόδους για την επιτόπια μέτρηση της συνολικής θερμικής διαπερατότητας των LSF τοιχοποιιών, συμπεριλαμβανομένης της αρνητικής και πολύπλοκης επίδρασης του μεταλλικού σκελετού. Οι δύο μεθόδους, η Μέθοδος των Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Points Method - RPM) και η Μέθοδος της Σταθμισμένης Περιοχής (Weighted Area Method - WAM), επιτυγχάνουν γρήγορη και ακριβή επιτόπια μέτρηση του U-value, συνδυάζοντας την υπέρυθη θερμογραφία με την καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα και ροής θερμότητας. Οι προτεινόμενες μέθοδοι μπορούν να είναι χρήσιμα εργαλεία για την εισαγωγή προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση του U-value σε ελαφρές τοιχοποιίες.

Παράλληλα, η διατριβή διερευνά πειραματικά τη θερμική και υγραυθερμική συμπεριφορά των VIPs καθώς επίσης και την συνεισφορά τους στην ενεργειακή απόδοση του κελύφους. Για το λόγο αυτό, οι παραπάνω μέθοδοι μαζί με ευρέως χρησιμοποιούμενες πειραματικές τεχνικές εφαρμόζονται σε καινοτόμα κτιριακά κελύφη. Δύο LSF κελύφη που περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους VIPs κατασκευάζονται και λαμβάνονται δεδομένα παρακολούθησης για ένα ολόκληρο έτος. Το πρώτο περιλαμβάνει μια αναβαθμισμένη τοιχοποιία στην Ελλάδα (η πρώτη κτιριακή εφαρμογή με VIP στην Ελλάδα), ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει ένα ολόκληρο κέλυφος κτιρίου μικρής κλίμακας στην Ελβετία. Η εκτενής πειραματική διερεύνηση φανερώνει τα οφέλη της χρήσης της Υπέρ-Μονωτικής τεχνολογίας στην αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους, αλλά και αναδεικνύει μερικές δυσκολίες που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Στην αριθμητική προσέγγιση, η διατριβή εξετάζει και συγκρίνει τις υπάρχουσες αριθμητικές μεθόδους για την ενεργειακή αξιολόγηση καινοτόμων κτιριακών κελυφών. Η διερεύνηση εστιάζει στην προσομοίωση του VIP και στον υπολογισμό της συνεισφοράς των θερμογεφυρών, οι οποίες αποτελούν την κύρια δυσκολία στην ανάλυση των LSF κελυφών. Συγκεκριμένα, δύο διαφορετικές τεχνικές, η

ανάλυση σε μόνιμες συνθήκες σύμφωνα με το ISO 10211 και η προσομοίωση ολόκληρου του κτιρίου σε δυναμικές συνθήκες, εφαρμόζονται σε ένα LSF κέλυφος που περιλαμβάνει VIPs με διαθέσιμες μετρήσεις από το πειραματικό μέρος της διατριβής. Διαπιστώνεται ότι οι μέθοδοι υπολογίζουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά των VIPs, ενώ η συνεισφορά των θερμογεφυρών μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από ένα μοντέλο στο λογισμικό EnergyPlus μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών.

Στην διατριβή, οι αριθμητικές τεχνικές εφαρμόζονται για την διερεύνηση της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης των VIPs για δύο θεωρητικά κτίρια πραγματικού μεγέθους. Στου πρώτο, εξετάζεται η εγκατάσταση μιας στρώσης VIP στις εξωτερικές τοιχοποιίες ενός LSF κτιρίου, ως ένα μέτρο για τη μείωση των θερμογεφυρών. Διαπιστώνεται ότι τα VIPs βελτιώνουν τη θερμική απόδοση του κελύφους μειώνοντας κατά 15% τις ανάγκες για θέρμανση και ψύξη και παράλληλα μειώνουν την επίδραση των θερμογεφυρών και των υγραθερμικών προβλημάτων τους. Επιπλέον προτείνονται σχεδιαστικές τροποποιήσεις των συνήθων κατασκευαστικών πρακτικών για την περαιτέρω μείωση των πιο σημαντικών θερμογεφυρών. Στη δεύτερη εφαρμογή, διεξάγεται μία τεχνο-οικονομική αξιολόγηση για την αναβάθμιση ενός παραδοσιακού κτιρίου. Συγκρίνεται η εφαρμογή των VIPs με συμβατικές λύσεις για πόλεις με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και οικονομικούς παράγοντες. Η αξιολόγηση των περιπτώσεων πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού των ετήσιων ενεργειακών εξοικονομήσεων/λειτουργικών εξόδων και την περίοδο αποπληρωμής φανερώνοντας ότι η χρήση των VIPs, με το σημερινό τους κόστος, μπορεί να είναι επικερδής σε περιοχές με ψυχρό κλίμα και υψηλές τιμές ενοικίου.

Table of Contents

Ευχαριστίες.....	i
Abstract.....	ii
Περίληψη	iv
Table of Contents	vi
Nomenclature.....	xii
1st Chapter – Introduction.....	1
1.1 Energy consumption in the building sector.....	2
1.2 National and International Regulations.....	3
1.3 New trends for advanced building envelopes	5
1.3.1 Renovation in existing buildings towards Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) ..	5
1.3.2 Lightweight steel-framed (LSF) buildings.....	6
1.3.3 Prefabricated envelopes	7
1.3.4 Innovative insulation materials – Super Insulation Materials (SIM)	8
1.4 Aim and outline of the PhD thesis	11
1.4.1 Thesis outline	12
1.4.2 Publications.....	15
References	17
2nd Chapter – Energy Assessment of building envelope.....	23
2.1 Introduction.....	24
2.2 Building envelope	24
2.3 Thermal bridges	25
2.4 Indicators for the energy assessment of the building envelope.....	27
2.4.1 Panel scale.....	27
2.4.2 Element scale	28
2.4.3 Whole building scale.....	33
2.5 Classification of methods for the energy assessment of the building envelope	34
2.5.1 Experimental methods.....	35
2.5.2 Numerical methods	35
2.6 Conclusions.....	36
References	37
3rd Chapter – Vacuum Insulation Panels	41
3.1 Introduction.....	42
3.2 Basic Properties of VIPs	43
3.2.1 Structure of VIPs.....	43

3.2.2	Heat transfer through VIPs	44
3.2.3	Ageing - Service life	47
3.2.4	Other properties.....	49
3.3	Edge effect	50
3.4	Methods for the thermal performance assessment of the VIPs	52
3.4.1	Experimental methods.....	52
3.4.2	Numerical methods	55
3.5	Applications in buildings	56
3.5.1	VIPs handling.....	56
3.5.2	Applications in new and existing buildings	57
3.5.3	Economic analysis.....	60
3.6	Conclusions.....	60
	References	62
4th Chapter - An experimental comparison of the standardized methods for the in-situ measurement of the wall thermal resistance		67
4.1	Introduction.....	68
4.2	Current status for the in-situ measurement of the wall thermal performance	68
4.2.1	Homogenous walls.....	69
4.2.2	Non-homogenous walls.....	70
4.3	Standardized methods for the in-situ R-value measurement.....	72
4.3.1	Description of methods	72
4.3.2	Characteristics of methods	74
4.4	Development of computational tools for the employment of standardized methods ..	75
4.5	Parameters for the comparison of standardized methods.....	77
4.6	Experimental set-up	77
4.6.1	Wall configurations.....	78
4.6.2	Instrumentation	78
4.6.3	Measuring Conditions	80
4.7	Results and discussion	80
4.7.1	Estimation of required measuring period	80
4.7.2	Estimation of the variability.....	82
4.8	Conclusions.....	84
	References	86
5th Chapter - Two new methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of lightweight steel-framed walls.....		91
5.1	Introduction.....	92

5.2	The proposed methods	93
5.2.1	IR thermography and calculation of temperature profile	93
5.2.2	Representative Points Method (RPM)	94
5.2.3	Weighted Area Method (WAM)	96
5.3	Numerical validation of the proposed methods	98
5.3.1	Theoretical implementation of methods.....	98
5.3.2	Parametric analysis regarding the properties of the wall	102
5.3.3	Uncertainty Estimation	104
5.4	Experimental validation of the methods on a cold frame wall.....	105
5.4.1	Tested wall and measuring equipment.....	105
5.4.2	Calculation of theoretical $U_{overall}$ of the tested wall.....	106
5.4.3	Implementation of methods	107
5.5	Conclusions.....	110
	References	112
	6th Chapter - Experimental investigation of two lightweight building envelopes incorporating VIPs.....	115
6.1	Introduction.....	116
6.2	Renovation of an external wall with VIPs - The first building application of VIPs in Greece	118
6.2.1	Construction of the building	118
6.2.2	Material properties	120
6.2.3	Instrumentation and measuring devices	122
6.2.4	Boundary conditions	123
6.2.5	Thermal performance assessment of the building wall.....	123
6.2.6	Hygrothermal performance of the wall	126
6.3	A lightweight mock-up building in Switzerland.....	128
6.3.1	Construction of the building	128
6.3.2	Material properties	131
6.3.3	Instrumentation and measuring devices	133
6.3.4	Boundary conditions	135
6.3.5	Thermal assessment of the mock-up envelope.....	135
6.3.6	Hygrothermal assessment of the mock-up envelope.....	143
6.4	Conclusions.....	145
	References	147
	7th Chapter - Numerical techniques and their validation for the assessment of lightweight envelope incorporating VIPs.....	151

7.1	Introduction.....	152
7.2	Analysis of building envelope according to ISO	153
7.2.1	Calculation of thermal bridges	153
7.2.2	Calculation of the direct heat transfer coefficient of the whole building.....	155
7.3	Simulation of building into an EnergyPlus model	156
7.3.1	EnergyPlus (EP).....	156
7.3.2	Introduction of thermal bridges into EnergyPlus model	156
7.4	Implementation of numerical techniques into the mock-up building	157
7.4.1	Analysis of the mock-up building envelope according to ISO	158
7.4.2	Simulation of mock-up building	162
7.5	Conclusions.....	165
	References	167
8th	Chapter - Impact of VIP on the energy and cost efficiency of building envelopes.....	169
8.1	Introduction.....	170
8.2	Installation of VIP for the reduction of thermal bridges on a lightweight steel-framed envelope	172
8.2.1	Description of the building	172
8.2.2	Analysis of the building envelope.....	174
8.2.3	Whole building simulation.....	179
8.2.4	Design modifications for the further improvement of the envelope	180
8.3	Comparative techno-economic assessment between the conventional insulation and the VIP for the renovation of a building envelope	186
8.3.1	Description of case study	186
8.3.2	Energy analysis	188
8.3.3	Economic analysis.....	189
8.4	Conclusions.....	193
	References	195
9th	Chapter - Conclusions – Future work.....	197
9.1	Introduction.....	198
9.2	Main conclusions	199
9.2.1	Methods for the assessment of the energy efficiency of building envelope	199
9.2.2	Investigation of VIPs as building insulation	201
9.3	Thesis innovation	203
9.4	Future research.....	204
	Εκτεταμένη περιληψη στα ελληνικα	207

Nomenclature

Symbol	Explanation	Units
A	area	m ²
C	thermal conductance	W/(m ² K)
C ₀	installation cost	€
C _p	specific heat capacity	J/(kg·K)
CV	coefficient of variation	%
d	thickness	m
DF	decrement factor	-
e	error	%
ES	energy saving	€/yr
f	temperature factor	-
f _{stud}	weighted ration of the stud area	-
h	heat transfer coefficient	W/(m ² K)
H _D	direct heat transfer coefficient	W/K
l	length	m
L	thermal coupling coefficient	W/(m ² K) or W/K
p	perimeter	m
PP	payback period	years
q	heat flux	W/m ²
Q	heating power	W
R	R-value (thermal resistance)	(m ² K)/W
RH	relative humidity	%
RRR	rent revenue reduction	€/yr
T	temperature	°C
t	time	sec or hr
t _{lag}	time lag	hr
U	U-value (thermal transmittance)	W/(m ² K)
w	width of heat flux sensor	m

Greek	Explanation	Units
α	thermal diffusivity	m ² /sec
ΔT _{stud}	surface temperature disturbance due to the metal stud	°C
λ	thermal conductivity	W/(m·K)
ρ	density	kg/m ³
χ	point thermal transmittance	W/K
Ψ	linear thermal transmittance	W/(m·K)

Subscript

amb	ambient
av	average
betw_studs	area between studs
C	section at the C-stud
calc	calculated value
CL	section at the clear area
clear	excluding all thermal bridges
cop	center of panel
cr	critical
CW	section at the CW-stud
eff	effective

eq	equivalent
exp	experimental value
in	indoor environment
max	maximum
min	minimum
outdoor	outdoor environment
overall	including the effect of metal studs (as a subscript of U)
repr	representative point
s	surface
se	external surface
si	internal surface
st	stud
studs	area of studs
tot	total

Superscript

^	averaged value over the width of the heat flux sensor
max	maximum
min	minimum

Abbreviations

ARX	Auto-Regressive with eXogeneous input
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIC	Composite Insulation Component
DAQ	Data Acquisition device
DAS	Data Acquisition System
DHW	Domestic Hot Water
EED	Energy Efficiency Directive
EP	EnergyPlus
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPS	Expanded polystyrene
ETICS	External Thermal Insulation Composite Systems
GHP	Guarded Hot Plate
HF	Heat Flux
HFM	Heat Flux Meter
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
LSF	Lightweight Steel-Framed
MW	Mineral Wool
nZEB	nearly Zero Energy Building
PUR	Polyurethane
RPM	Representative Points Method
SIM	Super Insulation Material
SLS	Sum of Least Square
TB	Thermal bridge
VIP	Vacuum Insulation Panel
WAM	Weighted Area Method
XPS	Extruded polystyrene
K.Ev.A.K.	Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων

CHAPTER 1

INTRODUCTION

Contents

1.1	Energy consumption in building sector.....	2
1.2	National and International Regulations.....	3
1.3	New trends for advanced building envelopes	5
1.4	Aim and outline of the PhD thesis	11
	References	17

Summary

In the present chapter, the topic of the present thesis is introduced indicating the high importance of the energy assessment of building envelopes. The national and international regulations regarding the reduction of the energy consumption in buildings are discussed. New trends towards the improvements of envelope efficiency are discussed focusing on innovative materials and new construction techniques. The chapter presents the objective and the aim of the thesis, indicating that the study investigates the experimental and numerical methods for the assessment of the energy efficiency of building envelope, and at the same time, the methods are applied in building applications aiming to the evaluation of VIP as insulation material. Finally, the chapter ends with a short description of the thesis outline and the list of publications which were produced in the frame of the current PhD thesis.

1.1 Energy consumption in the building sector

One of the most vital issues that humanity faces during the last centuries concerns the Energy consumption. The availability of natural resources, energy production and the price of energy are some of the most important factors in the energy field with severe economy, social and political consequences. However, the most essential consequence of the energy problem is the climate change. Scientists sound the alarm about the climate change highlighting that the global surface temperature of our planet has been increased by 0.89°C over the past 150 years [1]. At the same line, the greenhouse gas emissions, which are fundamentally responsible for the global temperature increase, have risen by 50% since 1750 [2].

The continuous increase in global energy demand is considered as one of the major concerns that should be seriously addressed in short term. The global energy consumption is separated into three main factors: the building sector, the transportation and the industry. Nowadays, the building sector has a lion's share of the global energy consumption, as it consumes more than the one third of the global energy. In the European Union, the building sector is occupied the 39% of the total energy consumption and it is responsible for the 36% of the total CO₂ emissions [3, 4]. Specifically, as depicted in Figure 1.1, the energy consumption for the residential buildings accounts for 25%, while the non-residential buildings (office buildings, hospitals, buildings in trade, schools, hotels, etc.) accounts for 14%.

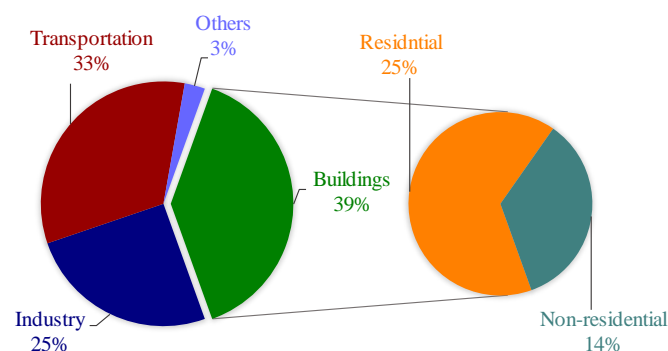


Figure 1.1 – The energy consumption in EU-28 in 2015 [4].

The most efficient way to reduce the negative impacts of the Energy problem is the energy saving in all fields. Particularly, the reduction of the energy consumption in the building sector seems to be not only effective but also feasible. The use of solar heating system for domestic hot water, the replacement of electrical devices with new low-power consumption ones and the use of environmentally friendly lights are some of the most common measures to reduce the energy consumption in buildings.

The buildings consume energy for space heating or cooling, domestic hot water, lighting, cooking, electrical devices etc. Among them, the energy demand for heating represents the largest amount of the total energy consumption, as it is presented in Figure 1.2 for the residential sector [5]. The amount of energy for heating needs depends on the type of the building, the materials used for the construction, the number and the type of the openings (windows/doors), the climate conditions, the effectiveness of HVAC systems, the building operation, etc. A critical way to reduce the energy demands for heating/cooling is the improvement of the thermal performance of buildings, referred to how well it responds to outdoor environment changes in order to maintain the indoor environment in thermal comfort conditions [6]. The most crucial parameter for the characterization of the building thermal performance is the “building envelope” [7], meaning the physical barrier between the indoor and outdoor environment (i.e. walls, roof, floor, windows etc.). The enhancement of the building envelope

improves the thermal performance of the building resulting to a severe reduction of total energy demands.

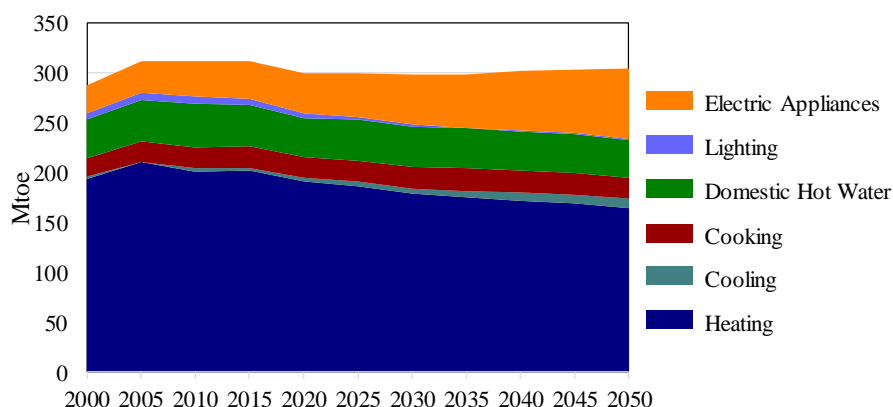


Figure 1.2 – Final energy demand in the residential sector [8].

The most effective way to improve the thermal performance of a building envelope is the installation of insulation materials at the external elements of the envelope. In building physics, the term “insulation” applies to thermal, acoustic or fire insulation. In the present thesis, which investigates the thermal performance of building envelopes in terms of the energy efficiency of building, the term “insulation” refers to the thermal insulation. In buildings, the thermal insulation is used in order to reduce the heat transfer between the indoor and outdoor environments. The installation of insulation in building envelope leads to a significant decrease of energy demands for heating/cooling needs. Generally, the insulation should be increased in cold climates for the reduction of heating demand, while in warmer climates where ventilation strategies are used for the reduction of cooling needs, the insulation can be smaller.

The main mechanism of heat transfer, that is reduced by insulating the building envelope, is the conduction. The property for the assessment of the material insulation performance is the thermal conductivity, λ , which is a measure of the ability of a material to conduct heat. The lower thermal conductivity, the higher is the insulation performance of the material. At the same line, the insulation ability of a building envelope, characterized by the thermal resistance or the thermal transmittance, depends not only on the thermal conductivity, but also on the thicknesses of the incorporated material layers. Generally, the increase of the thickness of the insulation layer leads to increase of the energy performance of the wall, but it also increases the cost and reduces the net floor area of the building.

1.2 National and International Regulations

In the frame of the occurring global warming and the extremely likely that human-made CO₂ emissions have principally caused it, an international treaty, the Kyoto Protocol, was adopted on 1997. The target of this treaty is the reduction of greenhouses gases emissions. The European Union, complied with the Kyoto Protocol, has set targets in order to honor both its long-term commitment to maintain the global temperature rise below 2°C this century, and its commitment to reduce the overall greenhouse gas emissions by at least 20% below 1990 levels, by 2020 [5]. To meet these targets, two directives for the reduction of the energy consumption of building sector have been established: the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD – Directive 2002/91/EU with its recast EPBD recast, Directive 2010/31/EU) [9, 10] and the Energy Efficiency Directive (EED – Directive 2012/27/EU) [11].

On the 30 November 2016 the Commission proposed an updated EPBD to promote the use of smart technology in buildings and to streamline the existing rules.

The purpose of the EPBD is the improvement of the energy performance of buildings within the European Union, taking into account the climatic conditions, the indoor climate requirements and lifecycle cost effectiveness. The EPBD brings into national laws and regulations in order to set minimum requirements on the energy performance of new and existing buildings. Furthermore, the Energy Performance Certificate (EPC) is introduced in this Directive as the first step to gain an insight into the energy performance of existing buildings and improve the performance of new buildings. The most important requirements of the EPBD are:

- The EPC must be involved for all buildings which are going to be sold or rented out to a new tenant.
- EU countries must set minimum energy use requirements and inspection schemes for heating and air conditioning systems or mount measures with equivalent effect.
- EU countries have to draw up national plans to increase the number of nearly Zero Energy Buildings (nZEBs). For this reason, all new buildings must be nZEBs by 31 December 2020 (public buildings by 31 December 2018).
- Each Member State has to set minimum energy performance requirements for new buildings, and for the renovation of existing buildings with a view to achieving cost-optimal levels.
- Each Member State has to draw up lists of national financial measures to improve the energy efficiency of buildings.

The aim of the EED is the establishment of a common framework of measures for the upgrade of energy efficiency of buildings within the European Union in order to achieve the Union's targets. Following the EED, the headline target of saving 20% until 2020 on energy efficiency is ensured, and at the same time, the Directive pave the way for further energy efficiency improvements beyond that date [12]. The key points of the EED are:

- At least the 3% of the buildings owned and occupied by EU central government should be renovated each year to meet the energy performance requirements of the EPBD.
- The buildings which are purchased by the EU governments should be highly energy efficient.
- Each Member State have to stablish long-term national building renovation strategies improving the energy performance building stock.

In Greece, the first regulatory laws were established addressing issues like the energy design study and the energy label of buildings in 1979 (FEK 362/4.7.1979), well before the introduction of EPBD [13]. The Hellenic Government complied with the European Directives has set the national targets regarding the energy efficiency of buildings. National transposition of the EPBD was established in 2010 by introducing the national regulation on the energy performance of buildings, KENAK (Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων – Κ.Εν.Α.Κ.) [14]. The KENAK set stricter regulations regarding the thermal insulation of the building and more efficient HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) systems. KENAK describes the general calculation method and overall approach for the energy performance of buildings, based on EN 13790-2008 standard [15]. Among others, KENAK set limitations for the higher values of the thermal transmittance (U-value) of the building walls replacing the previous building thermal insulation regulation (FEK 362/4.7.1979), which had been in use for 30 years without any adaptation. The new U-values were reduced by 14 - 43% depending on the location of building.

At the same line, EPC is being issued on January 2011 in Greece, with validity up to 10 years. The EPC is compulsory for all new buildings that are going to be sold and for the existing buildings that are going to be rented out for the first time to a new tenant. An energy inspector, certified by the Ministry, carries out the building energy audit collecting all relevant data, which are then submitted to the national electronic registry in order to issue the certificate [12].

1.3 New trends for advanced building envelopes

The building construction field has been adapted in line with the international regulations for the energy performance of buildings, concerning both the renovation of the existing buildings and the construction of new buildings. Hence, new construction trends have been introduced in the last decades, concerning the use of more efficient materials, cost-effective techniques, high environmental performance practices, etc.

1.3.1 Renovation in existing buildings towards Nearly Zero Energy Buildings (nZEB)

The new buildings are designed according to national regulations fulfilling the minimum requirements for the energy efficiency of building. On the other hand, the existing buildings represent the majority of the building stock, since about 40% of the EU' buildings are built before 1960 and 90% before 1990 [16, 17]. Consequently, the largest and most cost-effective sector for potential savings is the existing buildings [18]. Improving the energy performance of buildings, the total energy consumption would be reduced by 5% - 6% and the CO₂ emissions by about 5%. Hence, renovation of the existing building is an urgent need for the achievement of the EPBD targets. For this purpose, the annual renovation rate in EU is increased from 1.2% to 2 - 3% (based on finance schemes) [19].

The renovation of buildings can be performed under different methods, such as the refurbishment of the building envelope, the upgrade of HVAC and domestic hot water (DHW) systems, the installation of energy production units, etc. The optimum measures for the energy and cost efficiency of the building depend on the type, the geometry and the climate conditions [18]. However, the most effective measure is the refurbishment of the building façade installing thermal insulation and new windows compared to the renovation of the overall building envelope and systems (HVAC, DHW, lighting) [20, 21].

After the establishment of the EPBD and EED, several existing buildings are deep renovated towards nearly Zero Energy Building (nZEB). According to EPBD, nZEB is a very high energy performance building and the very low amount of energy required is covered by renewable sources [9]. Despite the fact that the nZEB concept is an future worldwide target, there is not a commonly agreed definition for nZEBs [22].

There are numerous methods available to design and construct a nZEB. However, the optimum design method depends on a number of factors such as location, cost, available renewable resources, etc. [23]. Among the strategies, the minimizing of the space heating/cooling requirements is the basic factor during the design of a nZEB. This can be achieved using high thermal performance and air tightness building envelope [24]. The deep renovation of the existing buildings towards nZEB is financially viable concept and the measures may give a payback period lower than 10 years [25].

1.3.2 Lightweight steel-framed (LSF) buildings

The current trend in the building sector is towards integrated techniques that fulfill numerous requirements in terms of eco-efficiency, health, safety (structural and fire resilience) and comfort without neglecting the economic aspects. In this framework, lightweight steel framed (LSF) building systems meet these diverse requirements and form an attractive solution additionally fulfilling architectural requirements [26]. The LSF buildings are based on a "skeleton frame" of repeated vertical steel columns, namely studs, and horizontal beams, namely runners (Figure 1.3a). This skeleton is constructed in a rectangular grid to support the walls, the roof and the floor anchored on the frame. The LSF constructions are coupled with drywall materials, such as gypsum-boards, cement-boards etc. (Figure 1.3b).

The Rand McNally building was the first steel-framed building, constructed in Chicago in 1890, while the Royal Insurance in Liverpool was the first building which used a steel frame in Europe in 1895 [27]. The LSF constructions gained popularity at the beginning of the 20th century. The LSF buildings were increased during the World War II and significantly expanded after the war when the production of steel was evolved.

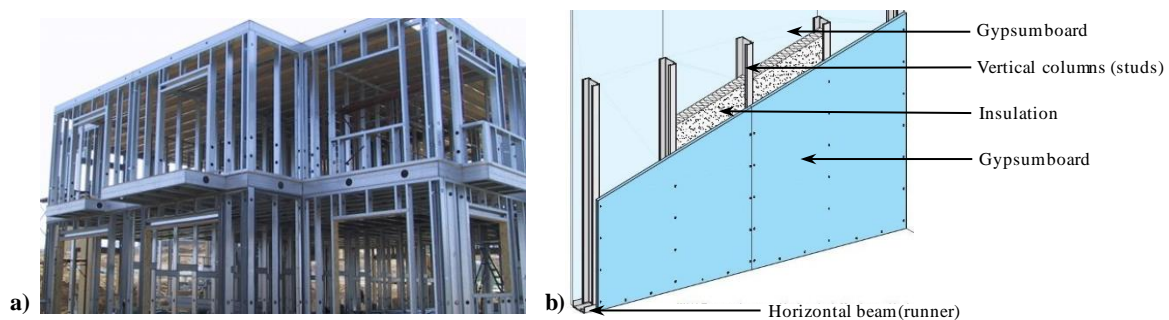


Figure 1.3 – Lightweight envelopes: a) a view of a steel-frame skeleton in Cyprus [28] and b) a typical drywall system [26].

Nowadays, the development of improved materials and design capabilities has extended their field of application [29]. LSF buildings have a widespread use in the US, Australia and Japan, while their market share is increasingly extended in some European countries [30]. Their rising fame is caused mainly thanks to their cost efficiency, as well as the combination of LSF with the development of drywall materials offers numerous of advantages in all fields. More specifically, the LSF buildings provide benefits in environmental field, upgrade the energy performance of buildings, use recyclable materials and reduce the wastes and pollutant emissions. The structural performance is improved in the seismic resistance and fire protection offering advantages in safety of the construction. Finally, these constructions eliminate the hygrothermal issues and offer extra sound insulation, providing a healthy and comfort indoor environment [6, 26, 31, 32]. The LSF constructions provide an exceptional opportunity to reduce the material employed, resulting to a more sustainable building.

The main drawback of LSF constructions regarding their thermal performance is the strong effect of metal structure, caused by its high thermal conductivity. The significant difference between the thermal conductivity of steel and the drywall materials introduced regions where multidimensional heat transfer is occurred, called "thermal bridges". The presence of metal studs increases the thermal transmittance of the wall up to 74% [31]. One of the main challenges is the limitation of the impact of thermal bridges.

In many cases, the lightweight constructions are combined with the use of Phase Change Materials (PCM) in order to increase thermal inertia of LSF buildings. In this case, the use of massive materials is avoided resulting an increased net floor area with thinner and lighter walls [33]. The use of PCMs is an innovative solution to overcome the overheating and overcooling issues which are presented in lightweight constructions due to the low thermal mass of the incorporated materials [34].

1.3.3 Prefabricated envelopes

During the last decades, the building industry has turned its attention to the industrialization of the buildings, and especially to the off-site construction, as an alternative to the on-site (or conventional) method. By means of the off-site construction, the processes of designing, manufacturing, and assembling of the building components and modules take place at an industrial environment prior to their installation to the final construction site [35].

In this perspective, the prefabricated construction has become increasingly widespread in the building industry thanks to its capability in sustainable building [36]. Prefabrication is an industrial process that takes place in a specialized facility where components of a structure are assembled and the assemblies or sub-assemblies are transported to the construction site for the final installation process (Figure 1.4) [37]. Prefabrication concerns to be the first level of industrialization, which is followed by mechanization, automation, robotics, and reproduction in the building sector [38]. The concept of prefabricated buildings is the fast construction in short time with fewer resources [39].



Figure 1.4 – Prefabricated wall assembly: a) transportation and b) final installation [40].

There are three types of types of prefabrication construction method: semi-prefabrication, comprehensive prefabrication and volumetric modular off-site fabrications [41, 42]. In the first type, some elements of the building are constructed on-site and the rest off-site. In the comprehensive prefabrication, the building elements are independently constructed at the factory site and transported on-site in order to be assembled. Finally, in the modular building prefabrication, rooms or entire buildings are manufactured in a factory [41].

Prefabricated lightweight construction has irrefutable advantages against the typical massive on-site construction. The prefabricated techniques reduce the overall cost up to 30% and the on-site labor cost up to 75%. The reduction of cost is carried out thanks to the improved cost controlling possibilities, the standardization of design, the bulk material purchases directly from the suppliers instead of through subcontractors, the reduction of labor and machinery transportation, and the avoidance of weather extremes [43]. In the same time, the use of the off-site prefabrication reduces the times from starting the construction to complete (ca. 40% reduction in time to design and build), mainly due to the simultaneous activities of prefabricated modules production and foundation phase of the building [44].

The fact that approximately the 85% of the work for the prefabricated constructions is done off the construction site, under controlled factory environment, strict quality checks and safety controls reduces the fatality rate up to 80% [45]. Moreover, this factory environment increases the quality of products and the flexibility. The repetitive processes, operations and automated machinery take place according to specific standards resulting to extremely high precision in fabrication (± 0.2 mm) [46]. The productivity is increased thanks to the many parallel activities which are occurred in well-organized manufacturing environments without any interruption [47].

The prefabricated construction require less skilled workmanship on site due to the fact that the work on-site is more coordinated and less complicated with minimized disturbance (noise, dust pollution, congestion and waste) [45, 48]. The precise purchasing, planning, cutting and recycling (use of recyclable materials) of the raw materials result to a severe reduction of the waste and material consumption. The greenhouse gas emissions are reduced because of the decrease of the construction time, which leads to less energy consumption, fewer workers', suppliers' and subcontractors' trips to the construction sites [49].

Prefabricated modular technique is advantageous in the reconstruction procedure because it is an inexpensive and quick way for massive production of buildings. This is beneficial for reconstruction of cities during disasters [50]. For example, many eastern European cities, which had been severely damaged due to the World War II, were reconstructed using prefabricated buildings [51]. Moreover, prefabricated buildings have been used as temporary houses for survivors after earthquakes disaster [50, 52, 53].

The application of prefabricated modular elements constitute an innovative way for a deep renovation of existing buildings. The costs and the renovation time are reduced as well as the disturbance for occupants is also minimized. At the same time, the energy and environmental efficiency, the structural performance and the indoor climate environment are sufficiently improved, providing a comprehensive solution for the overall sustainability of a building and its deep renovation towards nZEB [54, 55].

1.3.4 Innovative insulation materials – Super Insulation Materials (SIM)

The most common conventional insulation materials are the mineral wool, expanded polystyrene (EPS), extruded polystyrene (XPS), Cellulose, Cork and Polyurethane (PUR). Their typical thermal conductivity values are between 0.025 and 0.055 W/(m·K) (Figure 1.5) and varies with the temperature, moisture content and mass density [56]. These insulations may be adjusted, cut or perforated during the installation on the building, without any loss of their insulation performance. Furthermore, utilizing thermal insulation brings other benefits, including fire protection, personal comfort, condensation control and sound control [57]. Although the thermal properties of the conventional insulation have not been improved significantly during the last decades, a series of other features have upgraded, like reaction to fire and moisture or mechanical properties [58].

The conventional insulation materials, mostly developed before the 1960's, use air as insulator, while fibers and cellular structures prevent the movement of the encompassed air. Except from the heat transfer by means of the solid conduction, the largest amount of heat is transferred through the stagnant air by conduction (with thermal conductivity 0.026 W/(m·K)) and radiation, while if the air is moving the main heat transfer mechanism is convection. Nowadays, insulation materials with thermal conductivity lower than the thermal conductivity of stagnant air have been developed using alternative

gases or even by evacuating the contained gas aiming at the suppression of all heat transfer mechanisms relating to the encompassed air [59].

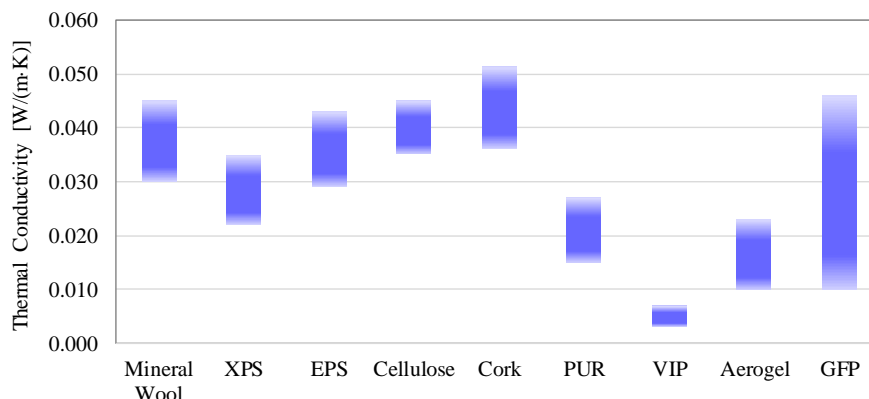


Figure 1.5 – Thermal conductivities of conventional and innovative insulation materials.

The state-of-the-art insulation materials should couple the lowest thermal conductivity with reduced weight and thickness [60]. At the same time, crucial properties should be taken into account such as, cost, adaptability, mechanical strength, fire protection, fume emission during fire, water resistance, service life, and the environmental impact for the entire life-cycle [56, 57]. In future development of the insulation technologies, nanotechnology may be applied to the production of new high-performance insulation materials focusing on particles to pores in the nano range [56].

A category of innovative insulation materials is the Super Insulation Materials (SIM), which thermal conductivity is generally below 0.015 W/(m·K) and can be achieved below 0.003 W/(m·K). Their very low thermal conductivities achieve high thermal performance in small thicknesses. However, SIMs remain much more expensive than the conventional insulation. The most common Super Insulation Materials are the Vacuum Insulation Panel and the Aerogels, which are already available on the market.

Vacuum Insulation Panel (VIP)

Vacuum Insulation Panel (VIP) is the most promising SIM with the lowest thermal conductivity, which can be achieved below 5 mW/(m·K), resulting an insulation capability 5 – 10 times better than the conventional insulation. VIP consists of an evacuated open pore core material surrounded by a thin envelope barrier. The evacuated microporous core material provides a very low thermal conductivity, while the envelope contributes to maintain the high level of vacuum.

The largest application of the VIPs is seen in the refrigeration and the transportation industries, however the last decades the VIPs is investigated as building insulation. The very low thermal conductivity of VIPs offers high thermal resistance with thin walls, increasing the net floor area of building (Figure 1.6). The use of only 4 cm thick of VIP is enough to meet (most of) national building regulations regarding the limits of U-values [61]. For this reason, the VIP is an attractive solution for the renovation of existing buildings.

On the other hand, the envelope barrier has to be made of a material with very low vapor and air permeability, but the high thermal conductivity of the incorporating films causes a non-negligible amount of thermal bridge. For this reason, the thickness of these films is limited providing a lower

service life time than traditional building materials. Moreover, the VIPs are fragile and cannot be cut making inflexible and impossible their adaptation on the construction site.

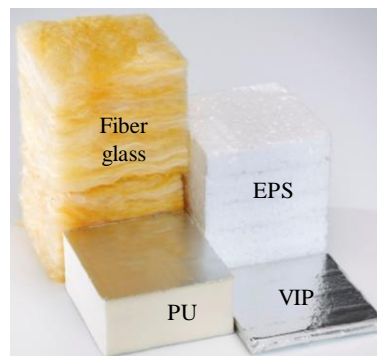


Figure 1.6 – Comparative thickness of different insulation materials to achieve the same thermal resistance [62].

The still relatively high cost of VIPs along with the durability of panels are the main reasons that they have not already gained popularity in the building market. However, the development of new VIP production technologies is expected to significantly lower production costs and offer products with better envelope barrier ensuring a service life for a period of 30 or 50 years. One of the main objectives of the current thesis is the evaluation of VIP as building insulation material analyzing its contribution on the upgrade of the envelope thermal performance. Further details about the theory and the basic properties of VIPs are presented in following Chapters.

Aerogel

Another promising Super Insulation Material for the building sector is aerogel. Its thermal conductivity, varied between 10 to 20 mW/(m K), shows outstanding features in comparison with conventional insulation materials [63]. Although aerogels discovered in 1931 by Samuel Stephens Kistler [64] and their high thermal performance, limited commercial products are available for building applications [65].

The aerogels, also known as frozen smoke or solid air, are dried gels with an outstandingly high porosity, resulting a solid with extremely low density and thermal conductivity [66, 67]. Aerogels can be produced from several materials such as chromium, carbon, alumina, and silica. Among them, silica aerogel is the most known commercially aerogel, thanks to its reliability and relatively easy preparation [68]. Silica aerogels contain numerous of air-filled pores with diameter between 5 and 100 nm occupying more than 90% of the total volume of the aerogel. This high porosity results in a bulk density as low as 3 kg/m³, but the density of aerogels for the building sector varies between 70 kg/m³ and 150 kg/m³.

The thermal conductivity of the commercially available aerogel insulation for building sector is approximately 13.5 mW/(m K) at ambient temperature, while at a pressure of 50 mbar the thermal conductivity can be decreased up to 4 mW/(m K). The high transmittance of radiation within the range of visible light and the high transparency in the infrared spectrum (Figure 1.7) make the optical properties of silica aerogels ideal for architectural solutions in construction sector [65]. Moreover, aerogels have good acoustic properties, excellent fire resistance, resistance to direct sunlight, and long durability to different aging effects [69]. On the other hand, they have low mechanical strength. For the improvement of their strength, the production of hybrids with aerogel and supporting fiber materials is developed [70]. Their high cost is an important drawback against the conventional insulation materials.



Figure 1.7 - An example of aerogel [71].

Nowadays, aerogel producers emphasize on cost reduction and the production of new types of aerogels. The aerogels are developed mainly for applications as thermal and acoustic insulation. However, their remarkable optical properties, translucency and possible transparency, make aerogels ideal for future applications as windows and skylights, providing huge energy savings.

Gas-Filled Panels

Gas-Filled Panels (GFPs) are innovative insulation materials with promising thermal performance for building applications. GFPs consist of a low-diffusivity gas-barrier film and a reflective multilayer baffles cellular structure filled with a gas in atmospheric pressure, as shown in Figure 1.8. The gas barrier is a hermetically airtight envelope to preserve the gas-fill, while the baffles are necessary to reduce the convection and radiation of the inner gas. The gas can be air or other non-toxic and non-flammable gas with lower thermal conductivity, such as argon, krypton, xenon. The choice of gas is crucial for the thermal performance, while the structure of barrier and baffles is responsible for the mechanical strength of the GFPs [72].

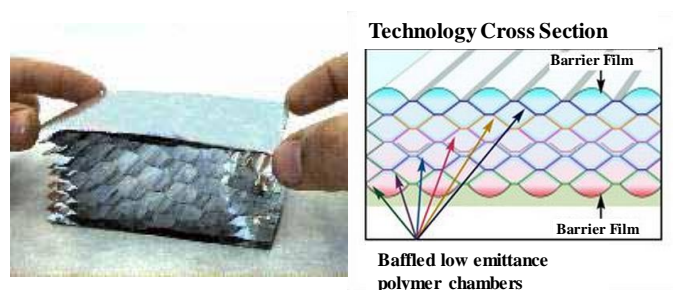


Figure 1.8 - View on the barrier foil and the baffle structure inside a gas-filled insulation panel [72, 73].

In tests, the thermal conductivity has been measured about 46 mW/(m K) for prototype air filled panels and 40 mW/(m K) for argon filled panels, slightly higher than the conventional insulation materials [72]. However, theoretical thermal conductivity values have been calculated to be between 3.5 to 10 mW/(m K), depending on the filled gas. The thermal performance of GFPs is still being questioned for building applications. Compared to other innovative insulation materials, the performance of VIPs appears to be a higher for the time being and the future [56, 72].

1.4 Aim and outline of the PhD thesis

As discussed in previous sections, the reduction of the global energy consumption is the driving force for the limitation of energy demand in building sector. The upgrade of the building envelope thermal performance is the most effective way to achieve the national and international targets. In this context, the scientific effort faces this issue with two lines of action: the development of new high-

insulation materials and techniques and the development of methods for the quantitative assessment of new and existing envelopes and the evaluation of innovative solutions.

In this framework, the current thesis discusses the energy efficiency of the building envelope in both lines of action. The aim of this research is the evaluation of current experimental and numerical techniques and the development of new methods for the assessment of the envelope energy efficiency, as well as the investigation of the innovative Super Insulation Materials as building insulation. The thesis focuses on the Vacuum Insulation Panels (VIP) and their application in building envelopes analyzing their thermal behavior under different climate conditions. Increased attention is also devoted to lightweight steel-framed buildings which have become an effective alternative in building sector.

It is shown that the in-situ measurement of the thermal resistance (R-value) and the thermal transmittance (U-value) of existing walls is vital for the improvement of the existing building envelopes, the evaluation of customary or innovative solutions and decision making during the design stage. For this reason, the aim is to compare and evaluate the widely used standardized methods for the in-situ R-value measurement of building walls. Moreover, as it is revealed, there was a gap in literature concerning the in-situ U-value measurement of LSF building walls. To fill this gap, the current thesis aims to introduce two methods.

As the focus of the current thesis is on the application of VIP in building sector, their use has to be examined not only numerically but also experimentally. Aiming to meet the need for reliable investigation of the thermal and hygrothermal behavior of VIPs in real buildings under different climatic conditions, two VIP applications in different locations are to be examined. The lesson learned from these applications will reveal benefits and possible weaknesses to overcome in order to improve the VIPs as building material. Moreover, the thesis aims to compare the use of VIP with conventional insulation materials from the techno-economic point of view.

A special emphasis is devoted to the LSF buildings, where the main challenge regarding their envelope energy efficiency is the calculation and the reduction of thermal bridges caused by the high thermal conductivity of metal structure. For this purpose, different techniques for the assessment of LSF building envelopes have to be evaluated. At the same time the thesis examines the use of VIPs as a measure for the reduction of their thermal bridges.

To sum up, the thesis aims to:

- Evaluate the standardized methods for the in-situ assessment of the envelope thermal performance
- Develop new methods for the assessment of the thermal performance of LSF walls
- Evaluate the methods for the theoretical assessment of the envelope thermal performance
- Investigate the use of VIP as building insulation
- Provide lessons learned from the application of VIPs in the building construction
- Examine the use of VIPs as a measure to reduce the thermal bridges of LSF walls
- Investigate the energy and cost effectiveness of VIPs in buildings

1.4.1 Thesis outline

The thesis comprises three distinct parts: the theoretical background, the experimental approach and the numerical approach. In the first part, the theory regarding the energy assessment of the building

envelope is provided, giving the basic equations the definitions and the classification of the methods. At the same time, the background and the basic properties of the VIPs are presented, focusing on the building applications. In the experimental part, the evaluation of the currently available standardized methods and the introduction of two new methods for the in-situ measurement of the wall thermal performance is carried out. Moreover, two lightweight buildings incorporating VIPs, located in Athens (which is the first building application of VIPs in Greece) and in Switzerland, are experimental investigated. In the numerical part, two available theoretical techniques regarding the envelope energy assessment are analyzed and validated, emphasizing on the impact of thermal bridges. The techniques are employed in two theoretical buildings for the investigation of the impact of VIPs on their energy and cost efficiency.

The present thesis consists of 9 Chapters. After the introduction of the overview around the energy efficiency of building envelope presented in the current Chapter, the main body of thesis is composed of two Chapters for the theoretical background, three Chapters for experimental approach and two Chapters for the numerical approach. Figure 1.9 illustrates the structure of the thesis.

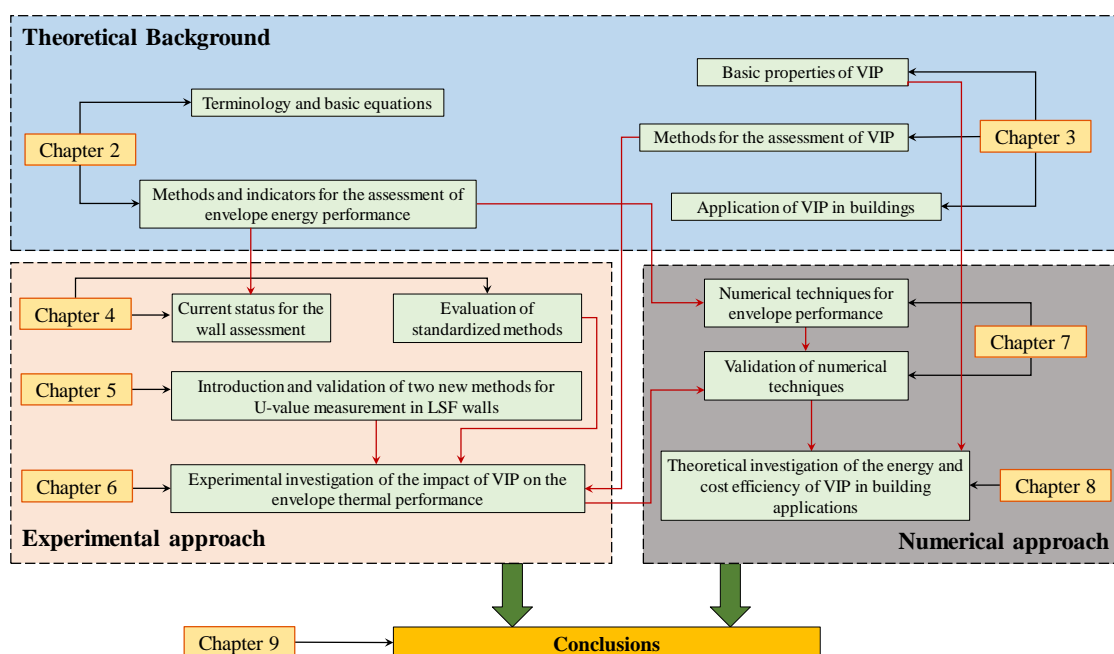


Figure 1.9 – Structure of the present thesis.

In Chapter 2, the theory and the basic definitions regarding the energy assessment of the building envelope are introduced. Terms as the building envelope or the thermal bridge are defined indicating their importance on the energy efficiency of the building. Appropriate indicators for the thermal performance assessment are discussed and classified into three scales: a) panel scale, b) element scale and c) whole building envelope scale. The basic equations of the indicators are presented highlighting the information given from their use. Finally, a brief introduction and classification of the state-of-the-art methods for the envelope thermal assessment are provided.

The Chapter 3, presents an overview for the most promising Super Insulation Material, the Vacuum Insulation Panel (VIP). The theory, the basic properties and the terminology are introduced and analyzed by means of an extensive literature review. The experimental and numerical methods for the characterization of the thermal performance of VIPs are discussed. The chapter gives the theoretical background of VIPs and focuses on the benefits and drawbacks of the use of VIPs as building insulation material.

The Chapter 4 is dedicated to the in-situ thermal performance assessment of building walls by means of the R-value measurements. After an extensive literature review concerning the current status of the existing methods for the R-value measurement, the focus is on the four standardized methods described in two international standards: ISO 9869 and ASTM C1155. An experimental campaign is carried out for the comparative assessment of the standardized methods in terms of the required measuring period, the variability of results and the effect of the measuring conditions on these two parameters. These parameters are examined by measuring the thermal resistance of tree walls under different conditions.

As it was found there was a gap in literature for the in-situ U-value measurement in lightweight steel-framed walls. To fill this gap, Chapter 5 introduces, for the first time, two methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of lightweight steel-framed (LSF) walls, including the effect of metal studs ($U_{overall}$). The two methods, Representative Points Method (RPM) and Weighted Area Method (WAM), focus on the fast and accurate in-situ $U_{overall}$ measurement at the central part of an existing LSF wall, combining the analysis of the wall using infrared thermography with the recording and processing of air temperatures and heat flux measurements. The requirements and the procedure of the methods are extensively described, as well as the methods are theoretically and experimentally validated.

In Chapter 6, the previous described methods along with other experimental techniques are employed into two real building envelopes for their comprehensive investigation. The first application concerns the renovation of an external wall at a building in Greece, while the second application concerns the use of VIP at all external walls of a building in Switzerland. Actually, the Greek building is the first application of VIPs in the construction sector of Greece. The two buildings were constructed and monitored over entire year. The experimental methods and techniques, discussed in previous chapters, are implemented in order to assess the thermal and hygrothermal performance of two envelopes. The study focuses on the use VIPs in building envelope revealing their impact on the envelope upgrade. At the same time, some weaknesses and barriers to overcome are brought to light adding to the ever-increasing experience for making the VIPs an effective solution for the insulation of buildings.

In Chapter 7 discusses the numerical investigation of the building envelope by means of two different techniques: the steady state analysis according to ISO 10211 and the whole building simulation in dynamic conditions using the EnergyPlus software. The first approach calculates the direct heat transfer coefficient, H_D , and the second the total energy demand for heating and cooling. The two techniques are applied to the lightweight steel-framed building constructed in Switzerland and validated comparing the simulated results with the measurements.

In Chapter 8, the previous described and validated methods are employed in two theoretical building applications in order to investigate the impact of VIPs on the energy and cost efficiency in cities with different climatic conditions and economic factors. The first application was the installation of a VIP layer at the external walls of a lightweight steel-framed modular building aiming to reduce the thermal bridges. The second application addresses a techno-economic comparative assessment between the VIP and conventional insulation for the renovation of an old building.

Finally, Chapter 9 summarizes the main conclusions of the present thesis and suggests recommendations and ideas for further study in continuation of this work.

1.4.2 Publications

The following publications have been produced as a result of the current thesis:

- Journal papers
 1. I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, M.A. Founti, Experimental investigation of the thermal performance of a lightweight envelope incorporating Vacuum Insulation Panels (VIPs), *Energy and Buildings*. (*Submitted – Under Review*)
 2. I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, Two new methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of cold frame lightweight steel-framed walls, *Energy and Buildings*, 170 (2018) 183-194.
 3. I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls, *Energy and Buildings*, 154 (Supplement C) (2017) 198-206.
 4. D.A. Kontogeorgos, I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, M.A. Founti, Numerical investigation of the effect of vacuum insulation panels on the thermal bridges of a lightweight drywall envelope, *Journal of Facade Design and Engineering*, 4 (1-2) (2016) 3-18.
 5. I. Mandilaras, I. Atsonios, G. Zannis, M. Founti, Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS, *Energy and Buildings*, 85 (0) (2014) 654-665.

- International Conference proceedings and Workshops
 1. I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, A.A. Manolitsis, D.A. Kontogeorgos, G.K. Semitelos, M.A. Founti, Comparative techno-economic assessment between the conventional insulation and the VIP for the renovation of a building envelope, EinB2018 - 7th International Conference Energy in Buildings 2018, ASHRAE, November 2018, Athens, Greece. (*Accepted*)
 2. A.A. Bonou, A.A. Manolitsis, I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, Deep renovation of a residential building – A Life Cycle perspective, EinB2018 - 7th International Conference Energy in Buildings 2018, ASHRAE, November 2018, Athens, Greece. (*Accepted*)
 3. I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, A.A. Manolitsis, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, Experimental and Numerical investigation of the Energy Efficiency of a Lightweight Steel Framed building incorporating Vacuum Insulation Panels, EinB2017 - 6th International Conference Energy in Buildings 2017, ASHRAE, October 2017, Athens, Greece.
 4. A.A. Manolitsis, I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, Techno-Economic Analysis of Deep Renovation for a Typical Residential Multi-Storey Building EinB2017 - 6th International Conference Energy in Buildings 2017, ASHRAE, October 2017, Athens, Greece.
 5. I. Atsonios, I. Mandilaras, D. Kontogeorgos, M. Founti, Experimental investigation of the thermal and hygrothermal performance of a lightweight envelope incorporating Vacuum Insulation Panels (VIPs), 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.

6. G.K. Semitelos, D.A. Kontogeorgos, I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, M.A. Founti, Comparative investment assessment between prefabricated lightweight steel frame drywall construction insulated with VIP and massive construction with conventional materials, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS) - September 20-21, 2017, CSTB, France.
7. I.A. Atsonios, A.A. Manolitsis, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, The effect of Vacuum Insulation Panels on the energy efficiency of lightweight steel-framed drywall buildings, 5th International Conference Energy in Buildings 2016, ASHRAE, November 2016, Athens, Greece.
8. M. Scotto, L. Napolano, V. James, M. Founti, D. Kontogeorgos, D. Mandilaras, I. Atsonios, R. Landolfo, L. Fiorino, V. Macillo, T. Fateh, N. Tian, J. Zhang, M. Delichatsios, M. Gündel, C. Block, ELISSA: A new concept for Energy Efficient LIghtweight-Sustainable-SAFE-Steel Construction, Abracadabra 1st International Workshop, June 2016, Bologna, Italy.
9. I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, I.A. Atsonios, C. Stark, S. Vidi, D. Marity, D. Seiler, D. Herfurth, M.A. Founti, Thermal performance of a steel skeleton / drywall building insulated with Vacuum Insulation Panels, 12th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), September 19 to 21, 2015, NUAA, China.
10. Dimos A. Kontogeorgos, Ioannis A. Atsonios, Ioannis D. Mandilaras and Maria A. Founti, Numerical investigation of the effect of vacuum insulation panels on the thermal bridges of a lightweight drywall envelope, VII International Congress on Architectural Envelopes, May 27 to 29, 2015, San-Sebastian-Donostia, Spain.
11. Mandilaras I., Atsonios I., Zannis G. and Founti M., In Situ Performance Assessment of a Composite Insulation System Consisting of Mineral Wool and Vacuum Insulation Panels, 11th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), September 19 to 20, 2013, Empa, Switzerland
12. I. Atsonios, I. Mandilaras, D. Kolaitis, E. Tsakanika-Theohari, E. Alexandrou and M. Founti, Large Scale Measurement Campaign to Assess the Thermal Behaviour of an 18th Century Historic Building, 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation Bozen / Bolzano, Italy, September 16 to 18, 2013.

References

- [1] Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, An indicator-based report, European Environment Agency, (2017).
- [2] Greenhouse gases and climate change - Environment in EU at the turn of the century, European Environmental Agency, (2016).
- [3] International Energy Agency, Energy conservation in buildings and community systems, ECBCS News, International Energy Agency, (54) (2011).
- [4] Eurostat, Simplified energy balances - annual data, Last update: 08-06-2017.
- [5] M. da Graça Carvalho, EU energy and climate change strategy, *Energy*, 40 (1) (2012) 19-22.
- [6] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa, L. Simões da Silva, Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (2017) 194-209.
- [7] Z. Zhou, C. Wang, X. Sun, F. Gao, W. Feng, G. Zillante, Heating energy saving potential from building envelope design and operation optimization in residential buildings: A case study in northern China, *Journal of Cleaner Production*, 174 (2018) 413-423.
- [8] European Commission, EU Energy, Transport and GHG Emissions, Trends to 2050 (Reference Scenario 2013).
- [9] EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- [10] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.
- [11] Directive 2012/27/EU. European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC.
- [12] K.G. Droutsa, S. Kontoyiannidis, E.G. Dascalaki, C.A. Balaras, Mapping the energy performance of hellenic residential buildings from EPC (energy performance certificate) data, *Energy*, 98 (Supplement C) (2016) 284-295.
- [13] E.G. Dascalaki, C.A. Balaras, A.G. Gaglia, K.G. Droutsa, S. Kontoyiannidis, Energy performance of buildings—EPBD in Greece, *Energy Policy*, 45 (Supplement C) (2012) 469-477.
- [14] Hellenic regulation on the energy performance in the building sector, Hellenic ministry of environment, energy and Climatic change – YPEKA, ministerial decision D6/B/5825 (Official Journal of the Hellenic Republic FEK 407/B/9.4.2010), Athens., 2010.
- [15] EN ISO 13790-2008, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.
- [16] Boosting building renovation: What potential and value for Europe, Policy Department Economic and scientific policy, Study for the ITRE Committee, 2016.

- [17] European Commission - Buildings, available online: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>, 2018.
- [18] V. Corrado, I. Ballarini, S. Paduos, E. Primo, Refurbishment of the Residential Building Stock toward the Nearly-Zero Energy Target Through the Application of the Building Typology, *Energy Procedia*, 101 (Supplement C) (2016) 208-215.
- [19] European Commission, Draft Horizon 2020 Work Programme 2014-2015 in the are of Secure, Clean and Efficient Energy, 2015.
- [20] D.A. Delia, Z. Paolo, C. Luca, Towards Nearly Zero Energy Buildings in Europe: A Focus on Retrofit in Non-Residential Buildings, *Energies*, 10 (117) (2017).
- [21] Despina K. Serghides, Chrissa G. Georgakis, The building envelope of Mediterranean houses: Optimization of mass and insulation, *Journal of Building Physics*, 36 (1) (2012) 83-98.
- [22] A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings*, 43 (4) (2011) 971-979.
- [23] P. Moran, J. Goggins, M. Hajdukiewicz, Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate, *Energy and Buildings*, 139 (Supplement C) (2017) 590-607.
- [24] A. Buonomano, G. De Luca, U. Montanaro, A. Palombo, Innovative technologies for NZEBs: An energy and economic analysis tool and a case study of a non-residential building for the Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 121 (Supplement C) (2016) 318-343.
- [25] D.K. Serghides, S. Dimitriou, M.C. Katafygiotou, M. Michaelidou, Energy Efficient Refurbishment towards Nearly Zero Energy Houses, for the Mediterranean Region, *Energy Procedia*, 83 (Supplement C) (2015) 533-543.
- [26] R. Landolfo, D. Holl, Lightweight steel drywall constructions for seismic areas. Design, research and applications, KNAUF, 2015.
- [27] Jackson A. Alistair, The Development of Steel Framed Buildings in Britain 1880–1905, *Construction History*, 14 (1998).
- [28] Home Design Ideas, <http://home-design.com.cy>, 2017.
- [29] I. Alhejji, *Steel Construction*, Future City, 2017.
- [30] M. Veljkovic, B. Johansson, Light steel framing for residential buildings, *Thin-Walled Structures*, 44 (12) (2006) 1272-1279.
- [31] E. de Angelis, E. Serra, Light Steel-frame Walls: Thermal Insulation Performances and Thermal Bridges, *Energy Procedia*, 45 (2014) 362-371.
- [32] P. Santos, Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings, E.H. Yap (Ed.) *Energy Efficient Buildings*, InTech, Rijeka, 2017, pp. Ch. 03.
- [33] I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti, Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, *Building and Environment*, 61 (Supplement C) (2013) 93-103.

- [34] P. Marin, M. Saffari, A. de Gracia, X. Zhu, M.M. Farid, L.F. Cabeza, S. Ushak, Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions, *Energy and Buildings*, 129 (Supplement C) (2016) 274-283.
- [35] M. Kamali, K. Hewage, Life cycle performance of modular buildings: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (Supplement C) (2016) 1171-1183.
- [36] Z. Li, G.Q. Shen, X. Xue, Critical review of the research on the management of prefabricated construction, *Habitat International*, 43 (Supplement C) (2014) 240-249.
- [37] G. Sparksman, S. Groak, A. Gibb, R. Neale, *Standardisation and pre-assembly: Adding value to construction projects*, 1999.
- [38] R.-B. Richard, Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics, *Automation in Construction*, 14 (4) (2005) 442-451.
- [39] S. Naji, O.C. Çelik, U. Johnson Alengaram, M.Z. Jumaat, S. Shamshirband, Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings, *Energy and Buildings*, 84 (Supplement C) (2014) 727-739.
- [40] ELISSA: Energy Efficient Lightweight Sustainable Safe Steel Construction, FP7-2013-NMP-ENV-EeB, Grant no. 609086, <http://www.elissaproject.eu>.
- [41] C. Mao, Q. Shen, L. Shen, L. Tang, Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects, *Energy and Buildings*, 66 (2013) 165-176.
- [42] V.W.Y. Tam, C.M. Tam, S.X. Zeng, W.C.Y. Ng, Towards adoption of prefabrication in construction, *Building and Environment*, 42 (10) (2007) 3642-3654.
- [43] Carl T. Hass, Walter R. Fagerlund Preliminary research on prefabrication, pre-assembly, modularization and off-site fabrication in construction, July 2002.
- [44] Ryan E. Smith, *Prefab architecture: a guide to modular design and construction*, New Jersey, 2011.
- [45] Mark R. Lawson, Ray G. Ogden, Rory Bergin, Application of modular construction in high-rise buildings, *Journal of Architectural Engineering*, 18 (2) (2012) 148-154.
- [46] C.M. Cartz JP, Symonds DC. , Building high-rise modular homes, *The Structural Engineer*, 85 (19) (2007).
- [47] N. Lu, *The Current Use of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry*, Construction Research Congress: Building a Sustainable Future, ASCE, Reston, Virginia, USA, April 2009.
- [48] N. Blismas, C. Pasquire, A. Gibb, Benefit evaluation for off-site production in construction, *Construction Management and Economics*, 24 (2) (2006) 121-130.
- [49] Peter J. Cameron, Nadia G. DiCarlo, *Piecing together modular: understanding the benefits and limitations of modular construction methods for multifamily development*, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [50] Q. Shen, Y. Yu, J. Hou, Q. Wang, L. Zhang, X. Meng, The Testing Research on Prefabricated Building Indoor Thermal Environment of Earthquake Disaster Region, *Procedia Engineering*, 205 (2017) 453-460.

- [51] A. Warszawski, Industrialized and automated building systems: A managerial approach., 2004.
- [52] T. Mahdi, A. Mahdi, Reconstruction and Retrofitting of Buildings after Recent Earthquakes in Iran, *Procedia Engineering*, 54 (Supplement C) (2013) 127-139.
- [53] C. Johnson, Impacts of prefabricated temporary housing after disasters: 1999 earthquakes in Turkey, *Habitat International*, 31 (1) (2007) 36-52.
- [54] P. Pihelo, T. Kalamees, K. Kuusk, nZEB Renovation of Multi-Storey Building with Prefabricated Modular Panels, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251 (1) (2017) 012056.
- [55] Gabriele Masera, Giuliana Iannaccone, Graziano Salvalai, Retrofitting the Existing Envelope of Residential Buildings: Innovative Technologies, Performance Assessment and Design Methods, *Advanced Building Skins - 9th Energy Forum*, Bressanone,
- [56] B.P. Jelle, Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities, *Energy and Buildings*, 43 (10) (2011) 2549-2563.
- [57] L. Aditya, T.M.I. Mahlia, B. Rismanchi, H.M. Ng, M.H. Hasan, H.S.C. Metselaar, O. Muraza, H.B. Aditiya, A review on insulation materials for energy conservation in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73 (Supplement C) (2017) 1352-1365.
- [58] A.M. Papadopoulos, State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, *Energy and Buildings*, 37 (1) (2005) 77-86.
- [59] T. Thorsell, Advances in Thermal Insulation - Vacuum Insulation Panels and Thermal Efficiency to Reduce Energy Usage in Buildings, Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering 2012.
- [60] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali, Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (Supplement C) (2016) 988-1011.
- [61] R. Baetens, B.P. Jelle, J.V. Thue, M.J. Tenpierik, S. Grynning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond, *Energy and Buildings*, 42 (2) (2010) 147-172.
- [62] J.-H. Kim, S.-M. Kim, J.-T. Kim, Simulation Performance of Building Wall with Vacuum Insulation Panel, *Procedia Engineering*, 180 (2017) 1247-1255.
- [63] U. Berardi, Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: Insights from a case study, *Energy and Buildings*, 159 (Supplement C) (2018) 370-381.
- [64] S.S. Kistler, Coherent Expanded Aerogels and Jellies, *Nature*, 127 (1931) 741.
- [65] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 43 (4) (2011) 761-769.
- [66] B.P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, R. Hart, Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96 (Supplement C) (2012) 1-28.
- [67] A. Soleimani Dorcheh, M.H. Abbasi, Silica aerogel; synthesis, properties and characterization, *Journal of Materials Processing Technology*, 199 (1) (2008) 10-26.

[68] R.H. Nosrati, U. Berardi, Hygrothermal characteristics of aerogel-enhanced insulating materials under different humidity and temperature conditions, *Energy and Buildings*, 158 (Supplement C) (2018) 698-711.

[69] N. Roya, B. Umberto, Long-term behavior of aerogel-based materials, 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, Trondheim, Norway, 2017.

[70] Chuanwei Zhai, Zhuangxian Li, Yi He, Ting Liu, Miaotian Sun, Jianbo Liu, A Comprehensive Study on the Production Process and Properties of Composite Core Materials for Vacuum Insulation Panels for Construction Applications, 13th International Vacuum Insulation Symposium, CSTB, Paris, FRANCE, 2017.

[71] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User* (2nd ed.), 1999.

[72] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, S. Grynning, Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 42 (11) (2010) 1969-1975.

[73] Fi-Foil Company, <http://www.gfpinsulation.com/>, 2017.

CHAPTER 2

ENERGY ASSESSMENT OF BUILDING ENVELOPE

Contents

2.1	Introduction.....	24
2.2	Building envelope	24
2.3	Thermal bridges	25
2.4	Indicators for the energy assessment of the building envelope.....	27
2.5	Classification of methods for the energy assessment of the building envelope	34
2.6	Conclusions	36
	References	37

Summary

The present chapter provides the theory and the basic definitions regarding the energy assessment of the building envelope that are used in the current thesis. Terms as the building envelope or the thermal bridge are defined indicating their importance on the energy efficiency of the building. The appropriate indicators for the thermal performance assessment are discussed and classified into three scales: a) panel scale, b) element scale and c) whole building envelope scale. The basic equations of the indicators are presented highlighting the information given from their use. Finally, a brief introduction and classification of the state-of-the-art methods for the envelope thermal assessment are provided.

2.1 Introduction

The implementation of the EU Directives, EPBD and EED, as well as the introduction of the EPC in building sector bring to light the need for quantified energy assessment of new and existing buildings. The energy assessment of a building concerns the evaluation of the building in terms of consumed energy in order to fulfill its heating/cooling, domestic hot water, lighting, electrical appliances, etc. needs. The energy assessment is a benchmark for the enhancement of the energy performance of a building [1]. The evaluation of possible energy efficiency measures for the energy upgrade of the building (such as innovative materials, new construction techniques, upgraded building systems) can be carried out by means of the energy assessment of a building.

Among the information provided by an energy assessment analysis, the thermal performance of the building envelope (walls, windows, etc.) has a major importance. The building envelope regulates the heating/cooling energy consumption, which represent the largest amount of the total energy consumption, as has been presented in Figure 1.2 [2]. For this reason, the energy assessment of the building envelope is crucial for the whole assessment of the building. The envelope assessment gives information about the thermal performance of the incorporated materials, how well insulated are the walls and how the envelope responds to the outside environment. It is necessary for the quality assurance and the successful decision making in policy implementation, the design, construction and refurbishment of buildings [3]. In the same time, envelope assessment is essential for correct sizing of building systems, cost efficiency, evaluation of innovative techniques regarding the improvement of the envelope, etc.

The assessment of the envelope thermal performance may be performed quantitatively by means of several methods and indicators. The appropriate indicators should be utilized for the quantification of the improvement or the degradation of the envelope performance. Each indicator points out particular characteristics of the envelope. The indicators, calculated by either experimental or theoretical methods, differ in terms of their simplicity, their features etc. [4]. The most common indicators are the thermal conductivity for the assessment of the materials, the thermal transmittance (U-value) or the thermal resistance (R-value) for the assessment of the walls and the total heating/cooling demands for the assessment of the whole building envelope.

The current chapter presents the strategies for the thermal assessment of the building envelope. After a brief definition of the building envelope, the crucial regions of thermal bridges are analyzed focusing on their impact on the energy efficiency of the whole building. The most important indicators for the energy assessment of the envelope are described and categorized regarding the scale of the building envelope. The analysis of the building envelope is separated into three scales: a) the scale of panel, concerning the material scale b) the scale of envelope element, concerning the walls, roof, floor, openings etc. and c) the scale of the whole building envelope. Each scale approaches the issue of the energy assessment from a different point of view. The basic equations are provided and the significance of each indicator is highlighted for the appropriate usage. Finally, the state-of-the art methods for the envelope energy assessment are briefly presented and separated into experimental and numerical.

2.2 Building envelope

The term “building envelope” is defined according to ISO 9972 standard as “the boundary or barrier separating the inside of the building or part of the building subject to the test from the outside

environment or another building or another part of the building” [5]. The building envelope is responsible for the control of the indoor thermal comfort and indoor air quality against the external environment [6, 7]. It includes the envelope elements, i.e. the external walls, the roof, the floor, the windows and anything that borders the indoor environment of the tested space. The building envelope is separated into two systems: the opaque and the transparent system. Opaque system contains the external walls, doors, roof, and floor, while the transparent system includes the windows, skylights, and glass doors.

The building envelope meaningfully influences the total energy efficiency of the building since space heating/cooling demands are directly related to the thermal performance of the envelope [8]. For this reason, the upgrade of the building envelope is the most effective solution for the improvement of the energy efficiency of buildings [9]. It can be carried out by means of extra insulation materials, enhancing the openings (windows and doors) and the shading systems, using ventilated façade, green roofs, passive systems, appropriate colors, etc.[6, 9].

2.3 Thermal bridges

There are critical regions of the building envelope, named thermal bridges, where multidimensional heat flows are generated. According to ISO 10211 standard the term thermal bridge is defined by the “part of the building envelope where the otherwise uniform thermal resistance is significantly changed by full or partial penetration of the building envelope by materials with a different thermal conductivity and/or a change in thickness of the fabric, and/or a difference between internal and external areas, such as occur at wall/floor/ceiling junctions” [10].

The thermal bridges are created by discontinuity of the insulation layer and generally in regions with reduced thermal resistance or change in the geometry of the envelope [11]. Thermal bridges are generated at the junctions between the elements of the envelope, for example between the walls, or the wall with the roof/ceilings/floor/windows/doors etc. The intersection between an uninsulated column with the wall or the penetration of the insulation layer with a nail are also thermal bridges. Figure 2.1 illustrates common thermal bridges on the building envelope.

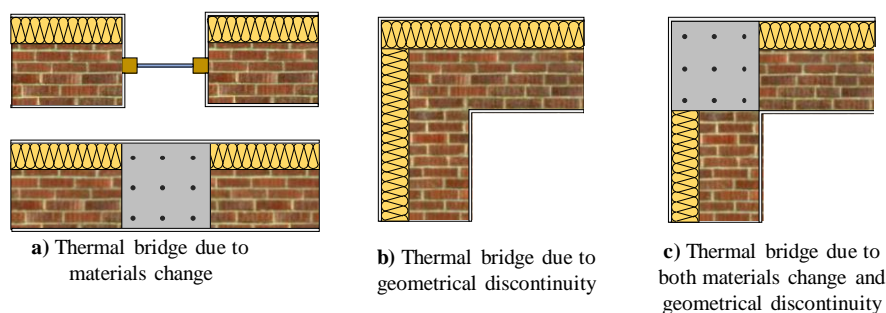


Figure 2.1 – Common typologies of thermal bridges in buildings [12].

The thermal bridges can be categorized in terms of their repeatability on the envelope and their geometry. Regarding their repeatability, the thermal bridges are separated into repeating and non-repeating. Repeating thermal bridges are evenly distributed over the envelope component usually following a regular pattern, while non-repeating thermal bridges are intermittent and scattered on the envelope [10]. The repeated nails on a gypsum-board or the metal studs at the lightweight envelopes are repeating thermal bridges, while the junction of two adjacent walls or the corners between walls and roof are non-repeating thermal bridges. Regarding the geometry, the thermal bridges are separated into,

linear and point thermal bridges. A linear thermal bridge is created at the junction between two or more elements of the envelope with a uniform cross section along one of the three orthogonal axes, while a point thermal bridge is defined as the continuity of the insulation is locally interrupted in one point [10]. The thermal bridge caused by the junctions or the studs are linear thermal bridges, while the penetration of a nail or the corner of three envelope elements are point thermal bridges. The linear thermal bridges are quantified by the linear thermal transmittance, Ψ -value expressed in $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$. The point thermal bridges are quantified by the point thermal transmittance, χ -value expressed in $[\text{W}/\text{K}]$. The effect of the point thermal bridges is often neglected in the thermal performance analysis for reasons of simplification [13, 14].

Thermal bridges reduce the thermal performance of the building envelope because increase the heat flow transmitted through the envelope surfaces. Many researchers have studied the impact of thermal bridges in the total energy demands of a building. The calculation of the thermal transmittance of the building envelope neglecting the effect of thermal bridges can lead to an underestimation greater than the 44% [15]. Theodosiou and Papadopoulos [16] show that the heating need can be 30% higher than the one calculated without taking into account the thermal bridge effects at a typical three-storey building in Greece. The impact of thermal bridges is essential even in the case of a high insulated the building envelope, increasing the energy demands up to 67% [17]. It is mentioned that the more a building envelope is insulated, the more significant the thermal bridges are in the energy demands for heating/cooling [18].

The presence of thermal bridges on the building envelope causes a local increase of heat flow resulting into the reduction of the internal surface temperature in the winter months (Figure 2.2). As a result, a high risk of condensation (moisture) and mold growth exists in thermal bridge regions [19]. This is, indeed, not only an aesthetic issue, but also a serious problem for the indoor air quality, which directly affects the occupants' health, and the deterioration of the building materials [20].

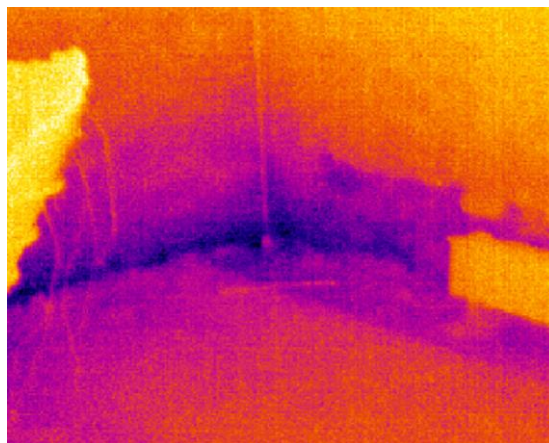


Figure 2.2 – Example of low internal surface temperature in thermal bridge.

The reduction of the impact of thermal bridges is crucial for the limitation of their negative effects regarding the thermal performance and the moisture issues. There are several ways for the reduction of the impact of thermal bridges. Evola et al. [13] found out that correcting thermal bridges using external insulation the heating need is decreased by around 17-25%, while the annual energy demand is reduced by ca. 8% in Mediterranean climate. Goulouti et al. [11] showed that the use of fiber-reinforced polymer thermal breaks for balcony connections lead to the reduction of the heat losses from the opaque elements of the building envelope by 12-18%, in Switzerland.

2.4 Indicators for the energy assessment of the building envelope

The energy assessment of a building envelope or the envelope thermal performance is quantified by means of the determination of specific indicators. There are many indicators that characterize the energy efficiency of the envelope, such as the total energy consumption of the building (expressed in kWh/m²), the thermal transmittance (expressed in W/m²K), the thermal resistance (R-value in m²K/W), the decrement factor (f), the time lag (expressed in hr), the heat loss coefficient (H_D in W/K), the total solar energy transmittance (g-value for windows) etc.

The indicators for thermal performance assessment of the building envelope are separated into three different scales, regarding the examined scale of the envelope: a) the panel scale, b) the element scale and c) the whole building envelope scale (Figure 2.3). In the first scale, the scale of panel, the indicators are focused on the thermal properties of the incorporating materials. The dimensions for the panel scale are in the order of 0.3-1 m and thicknesses 1~15 cm such as an insulation panel or the contact between two adjacent insulation panels. The indicators concerning the second scale, the element scale, evaluate the thermal performance of a whole element of the envelope (wall, roof, floor or opening). The dimensions of the element scale are in the order of 2-10 m and thicknesses about 20~70 cm. Final, the indicators of the whole building envelope examine the thermal performance of the whole envelope surface, including all incorporated elements and thermal bridges between the elements.

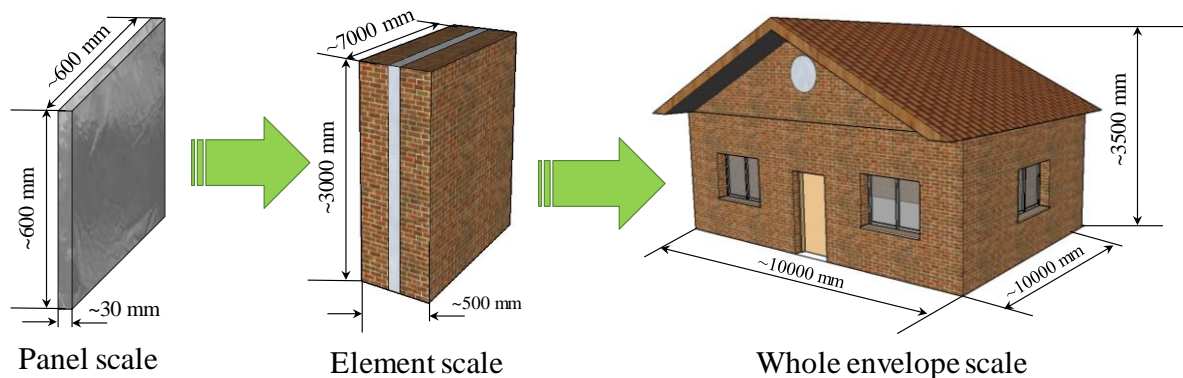


Figure 2.3 – The separation of the building envelope analysis into three scales.

2.4.1 Panel scale

The thermal performance assessment in the panel scale concerns the calculation of the material thermal properties, which are usually considered i.e. the thermal conductivity, the density and the heat capacity of materials [21]. These properties can be determined experimentally using specialized experimental apparatuses and theoretically, based on tabulated values. Furthermore, the thermal bridges caused by the contact between adjacent material panels, such as the joint between two insulation panels, are assessed in the panel scale.

Thermal conductivity

Thermal conductivity, λ or k , is the most crucial property for the characterization of the thermal performance for a building material. It is defined as the heat flow that passes per unit of length for a temperature difference equal to 1°C, expressed in [W/(m·K)]. The conductivity determines the ability of the material to conduct heat, indicating the insulation ability of the material, i.e. the lower thermal

conductivity, the better insulation is. A material can be characterized as thermal insulation when its thermal conductivity is lower than 0.1 W/(m·K).

The thermal conductivity of materials depends on the temperature and moisture content. As the temperature increases, the thermal conductivity is also increased, with rate lower than 0.0003 (W/(m·K))/K [22]. Most studies in building applications usually neglect the temperature dependence of the thermal conductivity, since in practice the temperature ranges are relatively low (lower than 20°C, annually). However, even in the case of a temperature variation of 20°C, the error assuming constant thermal conductivity does not exceed 10% for insulation materials [22, 23].

In practice, the installation of insulation at the whole surface of the building envelope is performed using several insulation panels with specific dimensions. The joint between two adjacent panels fills with mortar or air generating a thermal bridge due to the difference of the thermal conductivities between joint and the center of panel. This thermal bridge is taken into account by means of the effective thermal conductivity, λ_{eff} , calculated by the following equation:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \Psi \cdot d \cdot \frac{p}{A} + \chi \frac{d}{A} \quad 2.1$$

where, λ the thermal conductivity of panel (at the center), Ψ [W/(m·K)] the linear thermal transmittance of the thermal bridge due to the joint between two panels, χ [W/K] the point thermal transmittance of the thermal bridge due to the joint between three or four panels, d [m] the thickness, p [m] the perimeter and A [m²] the surface of the panel. In building analysis, the material properties are considered to be isotropic, meaning that all properties are the same in the three directions. This hypothesis is a realistic for the majority of materials.

Thermal diffusivity, a

Although thermal conductivity is the most representative property indicating the thermal performance of a building material, it does not give any information about the dynamic characteristics and the thermal inertia of the material. For this reason, it is defined the thermal diffusivity, a , representing the rate of heat transfer from one side to another. The thermal diffusivity is expressed in [m²/sec] and defined by the following equation:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad 2.2$$

where λ [W/(m·K)] is the thermal conductivity, ρ [kg/m³] the density and C_p [J/(kg·K)] the specific heat capacity of the material. Although, the diffusivity of building materials moves in a relatively small range, $a \sim 2 - 9 \cdot 10^{-7}$ m²/sec, there are significant differences on their thermal behavior on transient conditions [24].

2.4.2 Element scale

The envelope thermal performance at the element scale (wall, roof, floor, etc.) is assessed by means of several indicators. The most widely used is the thermal transmittance, U-value, which is a steady state indicator; however, several other indicators are used for the comprehensive description the thermal performance of the walls. Moreover, there are additional indicators that are used for specific

applications, like the “g-value” for transparent elements. The most important indicators for the element performance, which are used in the current thesis, are described in following paragraphs.

Thermal resistance, R-value and thermal transmittance, U-value

The thermal resistance, or *R-value*, is the most representative measure for the thermal performance assessment of a wall indicating its insulation level. The higher the R-value of a wall, the better is the insulating effectiveness [25, 26]. The R-value of an one-layered wall is defined as the ratio of the thickness over the thermal conductivity of the material layer, expressed in [(m²K)/W], according to the following equation:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad 2.3$$

where d [m] is the thickness of the wall and λ [W/(m·K)] the thermal conductivity of the wall. For homogenous and multilayered wall, the total R-value is equal with the sum of all R-values of the individual layers, calculated according to the equation 2.3. Thus, for a homogenous wall with N individual layers, the total R-value of the wall is calculated according to the equation:

$$R_{wall} = \sum_{i=1}^N R_i \quad 2.4$$

The R-value of each layer, and consequently of the whole wall, depends on all factors that influence the thickness and the thermal conductivity of the materials, such as the temperature, the density and the moisture content.

The R-value of a homogenous wall can also be calculated by the ratio of the wall surface temperature difference divided by the total heat flow rate in steady state conditions, according to the equation:

$$R_{wall} = \frac{T_{si} - T_{se}}{q_{wall}} \quad 2.5$$

where q_{wall} [W/m²] is the heat flux at the surface of the wall, T_{si} and T_{se} [°C] are the internal and external surface temperature, respectively.

The thermal transmittance, or *U-value*, is the most common indicator for the thermal performance of the building envelope elements. The U-value of a wall represents the amount of heat per square meter that is transmitted through the element when the temperature difference between external and internal environments is 1°C. It is expressed in [W/(m²·K)] and defined by the following equation:

$$U_{wall} = \frac{q_{wall}}{T_{in} - T_{out}} \quad 2.6$$

where q_{wall} [W/m²] is the heat flow rate, T_{in} and T_{out} [°C] are the internal and external ambient temperatures, respectively. The U-value includes not only the insulation level of the wall, but also the surface thermal resistance of the wall. The U-value of a wall can be linked with the R-value by the equation 2.7:

$$U_{wall} = \frac{1}{R_{si} + R_{wall} + R_{se}} = \frac{1}{R_{tot}} \quad 2.7$$

where R_{tot} [(m²K)/W] is the total thermal resistance of the wall, R_{si} and R_{se} [(m²K)/W] are the internal and external surface thermal resistances, respectively. Typical values for the surface thermal resistances of a wall are 0.13 (m²K)/W for the internal surface and 0.04 (m²K)/W for the external surface, according to ISO 6946 standard [27].

The definition of the U-value of the wall is usually confused as the inverse of the R-value, but this is incorrect. The inverse of the thermal resistance is called thermal conductance (C-value) expressed in [W/(m²K)]. The thermal conductance is not so common and calculated by the following equation:

$$C_{wall} = \frac{1}{R_{wall}} \quad 2.8$$

Figure 2.4 clarifies that the definition of the U-value includes the ambient temperatures, while that of R-value the surface temperatures. In literature, both of the indicators are used for the thermal assessment of a wall. Especially, U-value is usually used by state regulations setting the limits of the thermal transmittances of the envelope elements. Limiting the U-value of the envelope elements is the most common measure adopted by state regulations in order to reduce energy consumption for space heating/cooling [28].

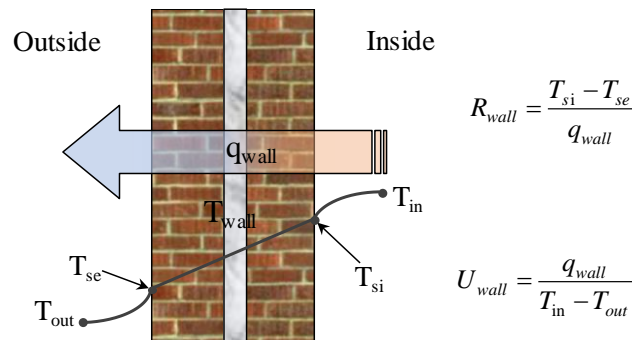


Figure 2.4 – The heat transfer through a wall and the definitions of the U-value and R-value.

Theoretical calculation of the R-values and the U-values is performed according to national/international standards such as ISO 6946. These standards require the knowledge of thermal conductivity of the individual building units of the envelope obtained from tables in relation to their density or provided by the manufacturer. Geometry of the envelope assembly (thicknesses of incorporating layers) that is described in the building plans is also necessary. Accurate estimations of the above parameters into the theoretical calculation lead to accurate determination of values. Air voids and moisture presence have also to be taken into account using correlation factors.

Calculation of thermal bridges

The impact of thermal bridges, that strongly affects the thermal performance of the envelope, is taken into account calculating an equivalent thermal transmittance, U_{eq} , of the element. The U_{eq} includes the contribution of all thermal bridges of the element, linear and point thermal bridges, as determined by their representative indicators, linear and point thermal transmittance, respectively. The equivalent

thermal transmittance, U_{eq} , including the thermal bridges is calculated according to the following equation:

$$U_{eq} = U_{clear} + \frac{\sum_i l_i \cdot \Psi_i}{A} + \frac{\sum_j \chi_j}{A} \quad 2.9$$

where U_{clear} [W/(m²K)] is the thermal transmittance of the element excluding all thermal bridges, calculated by the equation 2.7, A [m²] is the surface of the element, l_i and Ψ_i are the length [m] and the linear thermal transmittance (Ψ -value) of the linear thermal bridge i , expressed in [W/(m·K)] and χ_j is the point thermal transmittance (χ -value) of the point thermal bridge j , expressed in [W/K]. The impact of thermal bridges, involving two or three envelope elements (such as junctions between two walls or corners), is equally distributed to the respective elements.

The accurate calculation of the Ψ -value and the χ -value is based on the steady-state simulation of the thermal bridge configuration, according to ISO 10211 [10]. However, there are semi-empirical equations, simplified methods, catalogues and tables which provides the estimation of the thermal bridges [29-31]. The impact of the point thermal bridges is often neglected simplified the above equation removing the third term [13, 14]. The detail calculation of thermal bridges is presented in following chapter (Chapter 7, section 7.2).

Temperature factor, f_{Rsi}

The temperature factor at the internal surface, f_{Rsi} or f , is an indicator which is usually used for the thermal performance of thermal bridges. The f_{Rsi} expresses the relation of the thermal resistance of the envelope element (R_{tot}) to the thermal resistance of the element without the impact of the surface thermal resistance (R_{si}) [32]. Hence, it is defined as the difference between the internal surface temperature (T_{si}) and the outdoor temperature (T_{out}), divided by the difference between the indoor (T_{in}) and outdoor temperature [10]. The temperature factor, f_{Rsi} (-), for a given surface resistance, R_{si} , is calculated by the following equation:

$$f_{Rsi} = \frac{R_{tot} - R_{si}}{R_{tot}} = \frac{T_{si} - T_{out}}{T_{in} - T_{out}} \quad 2.10$$

The temperature factor is also an indicator of the hygro-thermal performance of all types of thermal bridges [33]. Mold growth is expected, when the relative humidity on a surface is higher than 80% for several days. The mold growth is avoided when the temperature factor is greater than a critical value depended on the building use and the consequent indoor relative humidity. The higher the desired indoor relative humidity, the higher the critical temperature factor will be in order to eliminate the likelihood of condensation and mold growth. For residential buildings, a typical value of the critical temperature factor is 0.7 [34], however, national standards have set the lower limits for the temperature factor to be ranged between 0.65 to 0.75 [32].

Dynamic thermal performance

There are thermal characteristics of the building envelope that cannot be described by the above-mentioned indicators, such as the dynamic characteristics. The determination of the dynamic characteristics of the building envelope is also essential receiving great interest due to the potential upgrading and optimizing the envelope thermal performance with the effectiveness of building systems

[35]. There are several indicators that express the dynamic characteristics of the envelope elements. The most important are the decrement factor and the time lag [36]. The meaning of these indicators is illustrated in Figure 2.5, for the case of sinusoidal period heat wave.

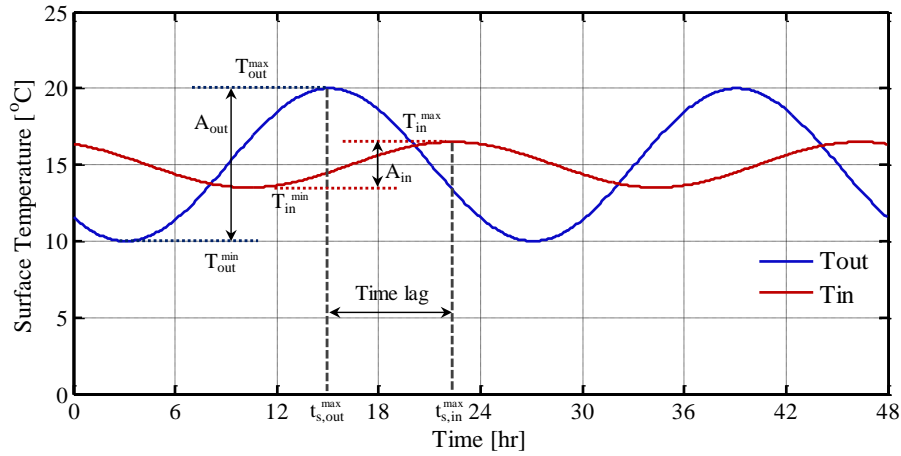


Figure 2.5 – Definition of the decrement factor and time lag for a sinusoidal heat wave.

The decrement factor (DF) is a dimensionless magnitude which expresses the ability of the wall to reduce the daily temperature fluctuation caused by the outside environment. The decrement factor is defined by the following equation:

$$DF = \frac{T_{si}^{\max} - T_{si}^{\min}}{T_{se}^{\max} - T_{se}^{\min}} \quad 2.11$$

where T_{si}^{\max} , T_{si}^{\min} are the maximum and minimum internal surface temperature, respectively and T_{se}^{\max} , T_{se}^{\min} are the maximum and minimum external surface temperature, respectively. For a multi-layered wall, the decrement factor of each layer is defined as the ratio of the temperature fluctuation at the internal side compared with the temperature fluctuation at the external side of the layer. The DF of a multilayer wall is derived from the multiplication the decrement factors of the incorporating layers.

On the other hand, time lag, t_{lag} , [hr] expresses the delay of a heat wave to pass through the wall from the external to the internal surface. It is defined by the following equation:

$$t_{lag} = t_{T_{si}^{\max}} - t_{T_{se}^{\max}} \quad 2.12$$

where $t_{T_{si}^{\max}}$ and $t_{T_{se}^{\max}}$ represent the time when the exterior and interior surface temperatures are maximized, respectively.

Although these indicators do not provide information about the insulation level of the wall, their importance is reflected in the sizing on the heating and cooling system. Low values of decrement factor mean low peak loads resulting to a smaller size of system and low variability of the internal temperature. As a result, the low decrement factor lead to a more even use of the system (on/off operation) and more constant indoor conditions [37]. On the other hand, the advantages of high time lag can be clear in the summer months. If the time lag is high, the indoor surface temperature maximizes during the night time, when the external conditions allow the use of passive cooling strategies, i.e. night ventilation [37, 38].

Thermal delay is another factor that characterizes the dynamic thermal performance of an envelope. It is defined as the time for the mean indoor temperature to change by a specified amount ΔT_i under specified building system [39, 40]. This parameter indicates the time that a building reaches on thermal comfort condition using heating/cooling systems.

2.4.3 Whole building scale

The thermal assessment of the whole building envelope is performed mainly by means of the calculation of the transmission heat transfer coefficient or the calculation of the total energy demands for heating or cooling needs. The most common is the second and numerous of methods are used in literature [41-43]. It should be mentioned that since the energy assessment concerns only the building envelope, the indicators do not include the efficiency of building HVAC systems, domestic hot water systems, ventilation or lightening, etc.

Transmission heat transfer coefficient, H_D and H_T

The thermal performance of a whole building envelope can be evaluated by means of the direct heat transfer coefficient, H_D . It determines the heat that passes through the whole building envelope divided by the temperature difference between indoor and outdoor spaces [44], expressed in [W/K] and defined by the following equation:

$$H_D = \sum_{i=1}^N (U_{eq,i} \cdot A_i) \quad 2.13$$

where $U_{eq,i}$ is the equivalent thermal transmittance (including all thermal bridges) of each element of the envelope i with surface A_i . In several studies, the transmittance concerning the floor element is multiplied with a temperature correction factor equal to 0.6 [45]. The H_D takes into account not only the thermal characteristics, but also the geometry and the size of the building envelope.

The transmission heat transfer coefficient, H_T , is also defined by the following equation, according to ISO 14683 [29]:

$$H_T = H_D + H_g + H_U + H_A \quad 2.14$$

where H_g , the ground heat transfer coefficient, H_U the heat transfer coefficient through unconditioned spaces and H_A the infiltration heat transfer coefficient. The ground heat transfer coefficient, H_g , is determined according to ISO 13370 [46] standard, taking into account the thermal inertia of the ground, while the heat transfer coefficients through unconditioned spaces H_U , and the infiltration, H_A , are determined according to ISO 13789 [44]. The heat transfer coefficients are steady state indicators providing information concerning the insulation performance of the envelope, regardless of the external conditions, the dynamic characteristics of the envelope, the internal loads or gains, the ventilation, etc.

Energy Demands

The most representative measure for the thermal performance assessment of the building envelope is the calculation of the annual energy demand for heating and cooling. The energy demands are usually expressed in units of energy per year or energy per year per net floor area, i.e. [kWhr/year] or

[kWhr/(year·m²)]. Except from the thermal characteristic (including dynamic characteristics) and the geometry of the envelope, the energy demands take into account the external conditions (outside temperature, solar gains, wind velocity, etc.). Hence, the same building envelope has different energy demands in cold climate in comparison with mild climate conditions.

The determination of the energy demands may be performed using simplified or fully detailed methods. A simplified method is the Degree Days Method. The energy demands may be determined multiplying the transmission heat transfer coefficient with the heating and cooling degree-days for the location of building. The latter is estimated by tabulated values taking into account the climate conditions and the base temperature of the indoor space [47]. It is a steady state method that calculates the ideal energy demands, excluding dynamic characteristics of the envelope, the efficiency of the building systems, internal loads etc. On the other hand, a detailed determination of the energy demands takes into account all factors that influence the energy consumption of building for heating/cooling needs. The factors may be the accurate weather conditions (temperature, humidity, solar radiation, wind velocity and direction), dynamic characteristic of envelope, orientation, solar gains.

2.5 Classification of methods for the energy assessment of the building envelope

The energy assessment of the building envelope can be performed by means of several methods and approaches. The methods are categorized into numerical, experimental and hybrid methods, as shown in Figure 2.6, according to the energy data acquisition approaches [1]. The hybrid methods combine the use of measurements with numerical methods in order to calibrate the calculated models or to identify parameters to support calculations. There are two basic approaches for the determination of the thermal performance of the envelope: the steady state approach and the dynamic approach. In the current analysis, the methods are also separated into the scale of the envelope element: panel, element and whole envelope scale.

In the next sections, a brief description of the state-of-the-art methods is presented. In the following chapters, the current status concerning both the experimental and numerical investigation of the building envelope is discussed in detail.

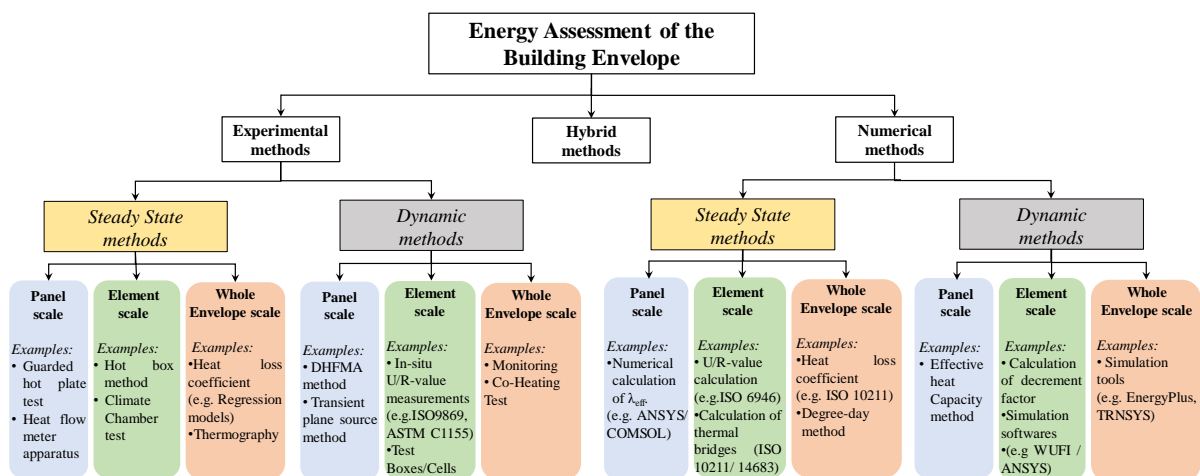


Figure 2.6 – Classifications of the methods for the energy assessment of the building envelope.

2.5.1 Experimental methods

There are numerous experimental methods for the thermal performance assessment of the building envelope. Many studies have indicated the importance of the experimental assessment of the envelope highlighting the differences between the theoretical and design performance [48]. The implementation of such methods requires appropriate experimental set up, availability of appropriate experimental apparatus, installation of sensors and the implementation of specific methodologies. Many international standards describe in detail the procedure for the experimental measurement of thermal indicators of envelope, both in laboratory and in-situ measurements. The experimental methods examine the thermal performance of the envelope in steady state or dynamic conditions.

The steady state experimental methods are usually used for the determination of important thermal properties and indicators. For the panel and element scale, the experimental methods require special laboratory apparatus, such as Guarded Hot Plate or Hot Box or Climate Chamber, for the maintenance of steady state conditions. For the whole envelope scale, the methods use either instantaneous measurements, such as the thermography investigation, or assuming quasi-steady state conditions.

The dynamic methods can evaluate the dynamic characteristics of the materials or the envelope in real or laboratory transient conditions. The laboratory apparatus, such as Hot Box or Climate chamber, can be used in order to impose controlled dynamic conditions investigating the panel or the envelope elements. However, the most common experimental methods are the in-situ investigation of the envelope under real weather conditions. According to these methods, the envelope performance can be evaluated by means of the measurement of the energy indicators, such as the R-value or the U-value. On the other hand, the whole building envelope can be experimentally investigated only under real conditions using monitoring methodologies, controlling or not the indoor conditions such as the co-heating tests [49].

2.5.2 Numerical methods

The numerical methods for the thermal performance assessment concern the calculation of the material thermal properties or indicators based on numerical models. The accuracy of results depends on the simplicity of model, the simulated conditions (steady state or dynamic simulations) and the simulation tools.

The steady state methods are used for simplified energy analysis concerning the calculation of material properties, thermal bridges or indicators for the envelope assessment. The dynamic characteristics of the envelope are ignored or simplified by correlation factors. These methods are performed by means of simple calculations or the use of commercial or in-house models. The advantages of these methods are the simplicity and usually the relative high computational speed [1]. Regarding the elements scale, these methods involve the calculation of the U-value, the g-value of a window, the thermal bridges, etc. The steady state numerical methods for the whole envelope scale concern the calculation of the heat transfer coefficient or the energy demands by means of the degree-days method or whole building regression models.

The dynamic numerical methods are used for indicators taking into account the dynamic characteristics of the envelope. Usually the dynamic methods use commercial or in-houses developed models for the calculation of the heat transfer through the envelope. The results are usually more reliable, but the models require more input parameters in comparison with the steady state methods.

Regarding the elements approaches, the calculation of the decrement factor is an example of numerical dynamic method. For the whole envelope scale, the dynamic methods usually concern the calculation of the total energy demands by means of detailed simulation tools, such as the EnergyPlus, TRNSYS, DOE-2, etc.

2.6 Conclusions

In the present chapter, the fundamental definitions for the assessment of the envelope thermal performance were provided. The definition of the building envelope is given discussing its significance on the energy demand of the whole building. Moreover, the regions of the envelope which create thermal bridges were defined and categorized into linear and point thermal bridges. Their impact on the envelope performance was discussed highlighting their contribution on the increase of energy demand and the negative hygrothermal consequences.

The quantification of the thermal performance assessment is performed by means of basic indicators which were introduced and defined. In the present thesis, the analysis of the envelope is divided into three scales: the panel, the element and the whole envelope scale. For each scale, different indicator is used, providing particular information about the insulation level and the dynamic characteristics of the envelope. The basic equations and terms have been defined and explained. The appropriate indicator has to be used for an accurate assessment.

Finally, in the present chapter, a categorization of the state-of-the-art methods for the thermal performance assessment of building envelope was provided. The methods are implemented for the calculation of the above indicators and classified into three categories: the experimental, the numerical and the hybrid methods. Moreover, the methods were separated into the under-investigated scale of envelope (panel, element, whole building scale), based on the assessment purpose and depth of assessment.

References

- [1] S. Wang, C. Yan, F. Xiao, Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings, *Energy and Buildings*, 55 (2012) 873-888.
- [2] G. Feng, S. Sha, X. Xu, Analysis of the Building Envelope Influence to Building Energy Consumption in the Cold Regions, *Procedia Engineering*, 146 (Supplement C) (2016) 244-250.
- [3] E. Sassine, A practical method for in-situ thermal characterization of walls, *Case Studies in Thermal Engineering*, 8 (2016) 84-93.
- [4] M. De Rosa, V. Bianco, F. Scarpa, L.A. Tagliafico, Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach, *Applied Energy*, 128 (2014) 217-229.
- [5] ISO 9972-2015, Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method.
- [6] S. Mirrahimi, M.F. Mohamed, L.C. Haw, N.L.N. Ibrahim, W.F.M. Yusoff, A. Aflaki, The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53 (Supplement C) (2016) 1508-1519.
- [7] J. Iwaro, A. Mwashia, The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2 (2) (2013) 153-171.
- [8] M. da Graça Carvalho, EU energy and climate change strategy, *Energy*, 40 (1) (2012) 19-22.
- [9] L. De Boeck, S. Verbeke, A. Audenaert, L. De Mesmaeker, Improving the energy performance of residential buildings: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (Supplement C) (2015) 960-975.
- [10] ISO 10211:2017, Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.
- [11] K. Goulouti, J. de Castro, A.P. Vassilopoulos, T. Keller, Thermal performance evaluation of fiber-reinforced polymer thermal breaks for balcony connections, *Energy and Buildings*, 70 (Supplement C) (2014) 365-371.
- [12] F. Ascione, N. Bianco, R.F. De Masi, F. de' Rossi, G.P. Vanoli, Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology, *Applied Thermal Engineering*, 61 (2) (2013) 344-354.
- [13] G. Evola, G. Margani, L. Marletta, Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 43 (9) (2011) 2385-2393.
- [14] E. Roque, P. Santos, The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position, *Buildings*, 7 (13) (2017) 1-18.
- [15] J. Kośny, E. Kossecka, Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs, *Energy and Buildings*, 34 (5) (2002) 445-454.
- [16] T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulos, The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, *Energy and Buildings*, 40 (11) (2008) 2083-2089.

- [17] V. Corrado, F. Cappelletti, A. Gasparella, A. Gorrino, Detailed assessment of thermal bridges in highly insulated buildings, *Clima 2010 - 10th REHVA World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings"*, Antalya (Turchia), 2010.
- [18] A. Capozzoli, A. Gorrino, V. Corrado, A building thermal bridges sensitivity analysis, *Applied Energy*, 107 (Supplement C) (2013) 229-243.
- [19] H. Ge, F. Baba, Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building, *Energy and Buildings*, 105 (Supplement C) (2015) 106-118.
- [20] S. Fantucci, F. Isaia, V. Serra, M. Dutto, Insulating coat to prevent mold growth in thermal bridges, *Energy Procedia*, 134 (Supplement C) (2017) 414-422.
- [21] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali, Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (Supplement C) (2016) 988-1011.
- [22] U. Berardi, M. Naldi, The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance, *Energy and Buildings*, 144 (2017) 262-275.
- [23] B.A. Peavy, A Heat Transfer Note on Temperature Dependent Thermal Conductivity, *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 20 (1) (1996) 76-90.
- [24] A. Baïri, J.M. García de María, N. Laraqi, Thermal diffusivity measurements of building materials based on 2D models, *Computational Materials Science*, 38 (4) (2007) 838-846.
- [25] C. Peng, Z. Wu, In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, *Energy and Buildings*, 40 (11) (2008) 2076-2082.
- [26] G. Desogus, S. Mura, R. Ricciu, Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance, *Energy and Buildings*, 43 (10) (2011) 2613-2620.
- [27] ISO 6946:2017, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods.
- [28] Atanasiu B., Despret C., Economidou M., Maio J., Nolte I., Rapf O., Laustsen J., Ruyssevelt P., Staniaszek D., Strong D., Zinetti S., Verheyen L., Europe's buildings under the microscope - A country-by-country review of the energy performance of buildings, 2011.
- [29] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method.
- [30] M.P. Modera, Sherman, M. H., Sonderegger, R.C., Determining the U-value of a wall from field measurements of heat flux and surface temperatures, *ASTM workshop on heat flow sensors*, Philadelphia, 1986.
- [31] A. Capozzoli, A. Gorrino, V. Corrado, A building thermal bridges sensitivity analysis, *Applied Energy*, 107 (2013) 229-243.
- [32] T. Kalamees, Critical values for the temperature factor to assess thermal bridges *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 12 (3-1) (2006) 219-229.
- [33] M. Pool, Insulation of a mixed use building with 7 storeys in Munich with VIP, 9th international vacuum insulation symposium (IVIS), London, UK, 17-18 September, 2009.

- [34] DIN 4108-2:2013, Thermal protection and energy economy in buildings - Part 2: Minimum requirements to thermal insulation.
- [35] K.J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou, The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region, *Renewable Energy*, 33 (7) (2008) 1652-1664.
- [36] L.E. Mavromatidis, M. El Mankibi, P. Michel, M. Santamouris, Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones, *Applied Energy*, 92 (2012) 480-491.
- [37] Simone Ferrari, Valentina Zanotto, *Building Energy Performance Assessment in Southern Europe*, Springer International Publishing, Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2016.
- [38] J. Zhou, G. Zhang, Y. Lin, Y. Li, Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings, *Energy and Buildings*, 40 (6) (2008) 979-986.
- [39] K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, A correlation for the thermal delay of buildings, *Renewable Energy*, 6 (7) (1995) 687-699.
- [40] K.A. Antonopoulos, E.P. Koronaki, Thermal parameter components of building envelope, *Applied Thermal Engineering*, 20 (13) (2000) 1193-1211.
- [41] V.S.K.V. Harish, A. Kumar, A review on modeling and simulation of building energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 (2016) 1272-1292.
- [42] T. Nikolaou, D. Kolokotsa, G. Stavrakakis, A. Apostolou, C. Munteanu, Review and State of the Art on Methodologies of Buildings' Energy-Efficiency Classification, T. Nikolaou, D. Kolokotsa, G. Stavrakakis, A. Apostolou, C. Munteanu (Eds.) *Managing Indoor Environments and Energy in Buildings with Integrated Intelligent Systems*, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 13-31.
- [43] E.H. Borgstein, R. Lamberts, J.L.M. Hensen, Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review, *Energy and Buildings*, 128 (2016) 734-755.
- [44] ISO 13789:2007, Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method.
- [45] R. Ohl, K. Tichelmann, *Wärmebrücken Atlas: Trockenbau, Stahl-Leichtbau, Bauen im Bestand*, 2005.
- [46] ISO 13370:2007, Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods.
- [47] M.S. Al-Homoud, Computer-aided building energy analysis techniques, *Building and Environment*, 36 (4) (2001) 421-433.
- [48] P.G. Cesaratto, M. De Carli, A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings, *Energy and Buildings*, 59 (0) (2013) 29-36.
- [49] G. Bauwens, S. Roels, Co-heating test: A state-of-the-art, *Energy and Buildings*, 82 (Supplement C) (2014) 163-172.

CHAPTER 3

VACUUM INSULATION PANELS

Contents

3.1	Introduction.....	42
3.2	Basic Properties of VIPs	43
3.3	Edge effect	50
3.4	Methods for the thermal performance assessment of the VIPs.....	52
3.5	Applications in buildings	56
3.6	Conclusions.....	60
	References	62

Summary

The present chapter presents an overview of the most promising Super Insulating Material, the Vacuum Insulation Panel (VIP). A VIP is composed of an evacuated open pore core material surrounded by a thin envelope barrier. The theory, the basic properties and the terminology are introduced and analyzed. The experimental and numerical methods for the characterization of the thermal performance of VIPs are discussed. The chapter gives the theoretical background of VIPs and focuses on the benefits and drawbacks of the use of VIPs as insulation in buildings by means of an extensive literature review.

3.1 Introduction

Having presented in the previous chapter the need and the indicators commonly used for the thermal assessment of the building envelope, the current chapter introduces the characteristics of one of the most promising insulation materials that can find application in the enhancement of the building envelope performance. As the building sector accounts for the majority of the global energy consumption and the international directives require high insulated building envelopes, more attention is placed on the enhancement of the building material thermal properties. As a result, innovative insulation materials with high thermal performance are currently developed. Nowadays, the evolution and the assessment of their thermal behavior are developing faster today than at any time in history. One of the most promising innovative material is the Vacuum Insulation Panel, or VIP, belonging on the category of Super Insulation Materials, with thermal conductivity below $0.005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. The insulation capability of VIP is 5 – 10 times better than the conventional insulation materials, such as mineral wool or EPS. As a result, the principal benefit of VIP is that it can provide the same thermal resistance using thinner material.

VIP consists of an evacuated open pore core material surrounded by a thin envelope barrier. The evacuated microporous core material provides a very low thermal conductivity, while the envelope contributes to maintain the high level of vacuum. The envelope has to be made of a material with very low vapor and air permeability, but the high thermal conductivity of the incorporating films causes a non-negligible amount of thermal bridge (edge effect). For this reason, the thickness of these films is limited providing a lower service life time than traditional building materials.

The first VIP originates from 1930 when a German patent was filed on a rubber-enclosed evacuated porous body [1]. During the next decades, the development of VIP continued with experiments of different core materials and envelope techniques [2]. In 1970, the first commercial application of VIP was developed for use in refrigerators, freezers and cold shipping boxes. Since the end of the 1990s, vacuum insulation panels (VIP) have increasingly caught the attention of the building industry in research of better and more effective solutions.

The largest application of the VIPs is seen in the refrigeration and the transportation industries. The use of VIPs in these fields, where the space is at a premium, is ideal minimizing the energy consumption [3]. At the same time, the service life time of these applications (such as a refrigerator) is lower than the service life time of VIPs [4].

One of the reasons for the late introduction of VIP in the building sector is the requirement on the durability of materials [5]. Moreover, the still relatively high cost of VIPs is an additional reason that they have not already gained popularity in the building market. However, the development of new VIP production technologies is expected to significantly lower production costs and offer products with better envelope tightness ensuring a service life of VIPs for a period of 30 or 50 years [6, 7]. The use of VIPs in buildings offers an energy efficient building envelope with small wall thicknesses increasing the net floor area. Generally, with the current prices, the use of VIPs can be financially viable in cold climates and for areas with high rental price [8].

The International Energy Agency (IEA) has published two studies regarding the VIPs. During 2002-2005, the research team investigated the use VIP in building applications in the frame of IEA/ECBCS Annex 39 High Performance Thermal Insulation (HiPTI) [9, 10]. The study dealt with the basic issues concerning the VIPs (in Subtask A) and practical aspects of their application in buildings (in Subtask B). The Annex 39 showed that VIP's products have reached a level of quality that customers

can trust for specific applications under well-defined conditions. During 2013-2017, the Annex 65 - Long-Term Performance of Super-Insulating Materials in Building Components & Systems investigated the overall performance and durability of Super Insulating Materials (SIM). The Annex 65 provides the state-of-the-art regarding the SIM as well as the experimental and numerical tools for the thermal performance and durability characterization of insulation materials.

The present chapter provides an overview of the theoretical background of the VIPs and their application in building sector. The theory, the basic properties and the terminology are analyzed. The state-of-the-art regarding the VIP in buildings as well as the characterization of their thermal performance are discussed. Furthermore, experimental and numerical methods for the assessment of the thermal performance of VIPs are introduced and commented. The chapter focuses on the benefits and drawbacks of the use of VIPs as insulation in buildings.

3.2 Basic Properties of VIPs

3.2.1 Structure of VIPs

A Vacuum insulation panel (VIP) consists of two major components: the core material and the envelope barrier. The core is evacuated to a low pressure (0.2 - 5 mbar), while the envelope barrier surrounds it maintaining the high level of vacuum (Figure 3.1). If the VIP loses its vacuum, it loses the high thermal performance. As time goes by, air and water vapor permeate the barrier increasing the pressure. For this reason, in many cases, getter and desiccant are placed inside the core in order to adsorb gases and water vapors enhancing the service life of the VIP.

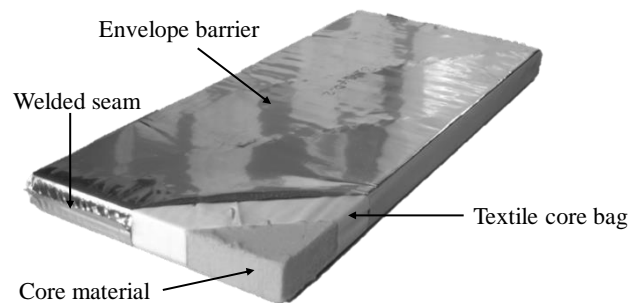


Figure 3.1 – The structure of a VIP.

The core is responsible to support the VIP envelope under the low-pressure condition. The core material has to accomplish special requirements as a) the extremely small pore diameter, b) the 100% open cell structure, c) resistance to compression due to the atmospheric pressure, d) impermeable, as possible, to infrared radiation and e) low thermal conductivity at a pressure more than 50 mbar [9, 11]. The VIP cores can be foams, powders and fibers, but the most common core material is the fumed silica, while glass fiber and open cell polyurethane are also used in Asian market.

The envelope barrier consists of a multilayer film covering the core surfaces, including the edges. The incorporated layers are metal films, metalized films and polymer films with overall thickness equal to 100 – 200 μm . The envelope barrier is the most critical component, as it is responsible for the service life and the thermal performance of the VIP. The barrier protects the evacuated core from the permeance of air and water vapor. For this reason, the use of polymer films containing inorganic layers, as aluminum or SiO_x , is common because of their very low gas and water vapor permeability. However,

the high thermal conductivity of such an envelope leads to increased heat flow at the edges of panel [11].

The main steps followed in manufacturing a VIP are presented in Figure 3.2. Firstly, the core material is dried and mixed with a small amount of fibers. The core is then enclosed by a textile bag and placed in a pressing tool to be pressed into the form of a board (Figure 3.3) and then the board is cut to specific dimensions. Secondly, the multilayer barrier envelope is prepared joining all the layers of laminate and sealing the two or the three sides (Figure 3.4). Heat-welding sealing is the most common used process, heating the film surfaces between two hot bars under pressure. Then, the pressed core material is introduced inside the envelope barrier. All air is removed from the package and the open side of the envelope is sealed. The internal vacuum is responsible for the stiffness and the low thermal conductivity of the panel [12].

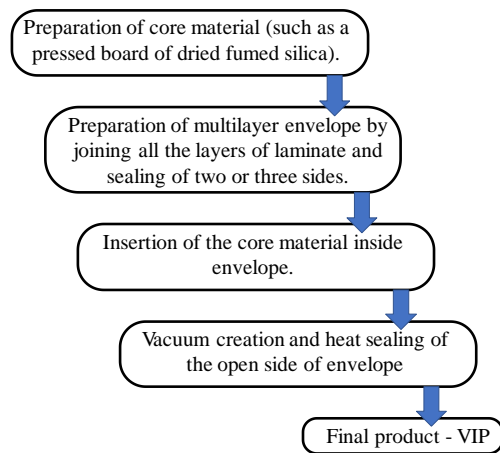


Figure 3.2 – Steps in manufacturing of VIPs [13].

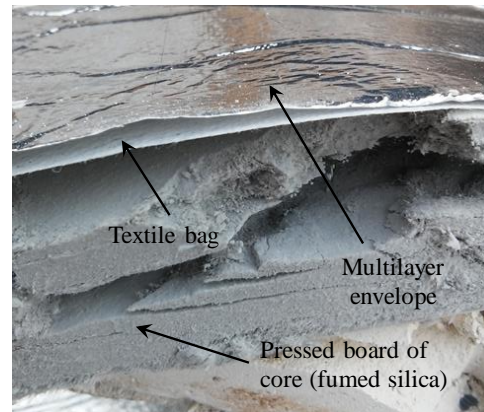


Figure 3.3 – View from a cut section of a VIP.

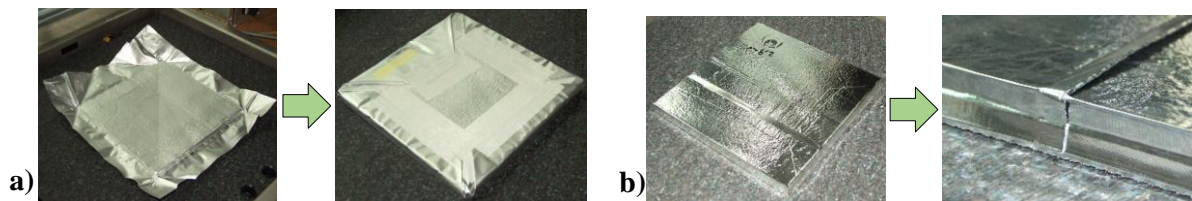


Figure 3.4 - Two types of VIP packaging technologies: a) four seams around the perimeter and b) one or two seams at the remaining open sides [9].

3.2.2 Heat transfer through VIPs

The heat transfer through such porous materials can be divided into four different processes: (a) conduction through the solid skeleton of the core, (b) radiation between internal surfaces of the pores, (c) convection through the gas within the porous and (d) conduction through the gas of the porous [11]. The four mechanisms are considered to act in parallel and simultaneously. In this approach, the equivalent overall thermal conductivity, λ_{tot} , is the sum of the four single values which describe the previous heat transfer processes:

$$\lambda_{tot} = \lambda_{s,cd} + \lambda_r + \lambda_{g,cd} + \lambda_{g,cv} + \lambda_{coupling} \quad 3.1$$

where $\lambda_{s,cd}$ is the thermal conductivity due to the solid conduction, λ_r is the radiative thermal conductivity, $\lambda_{g,cd}$ is the gas conduction thermal conductivity, $\lambda_{g,cv}$ is the gas convection thermal conductivity and the term $\lambda_{coupling}$ is the thermal conductivity due to coupling effect, which becomes important at higher pressures mainly for powders and fiber materials. All thermal conductivities are expressed in [W/(m·K)]. In VIPs, where the pressure is maintained at a certain low value, the convection through the gas within the porous is negligible [13].

The conduction through the solid occurs due to the physical contact of the constituent particles of the core material. It depends on the material characteristics, such as the density and the material structure, as well as the external pressure on the solid. Materials with low density lead to lower value of solid thermal conductivity. A common way for the limitation of this value is the increase of the porosity of the core material, leading to an increased heat path inside the material.

The radiative heat transfer is caused by the emission of the electromagnetic radiation from the surfaces inside the pores. Radiation is a significant heat transfer mechanism inside the vacuum, because it does not require medium. The thermal conductivity due to the radiation is expressed by the following equation:

$$\lambda_r = \frac{16n^2\sigma T_r^3}{3E} \quad 3.2$$

where n [-] is the mean index of refraction, T_r is the average temperature within the material expressed in [K], σ is the Stefan-Boltzmann constant, [$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ J/(K⁴m²s)], E is the extinction coefficient of the material expressed in [m⁻¹]. Radiation heat transfer can be reduced using an opacifier to the core material. The opacifier, e.g. silicon carbide, has higher value of the extinction coefficient, E , compared with other materials. The use of silicon carbide can reduce the thermal conductivity of pure silica by 0.002 – 0.003 W/(m·K) [14].

The thermal conductivity of the gas conduction inside the core material depends on the gas, the size of pores and the number of gas molecules in the pores. The gas conductivity can be estimated by the following equation, as it was proposed by Kaganer [15]:

$$\lambda_{g,cd} = \frac{\lambda_0}{1 + 2\beta \cdot K_n} \quad 3.3$$

where λ_0 [W/(m·K)] is the thermal conductivity of air at atmospheric pressure, β [-] is a constant between 1.5 – 5, characterizing the efficiency of energy transfer when gas molecules collide with the solid structure of the material and K_n is the Knudsen Number defined as the ratio between the mean free path of the gas molecules, l_{mean} , and the size of pores, δ . The Knudsen Number, K_n , is calculated by the following equation:

$$K_n = \frac{l_{mean}}{\delta} \quad \text{and} \quad l_{mean} = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi d_g^2 P_g} \quad 3.4$$

where δ [m] is the characteristic size of pores, k_B is the Boltzmann's constant ($k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T [K] is the thermodynamic temperature, P_g [Pa] is the gas pressure and d_g [m] is the diameter of gas molecule.

One way to reduce the heat transfer due to gas conduction is the reduction of the pore size of the material core, leading to fewer collisions between gas molecules and increasing the number of elastic

collisions between gas molecules and pore structure [2]. The gaseous thermal conductivity of air for different pore sizes as a function of pressure is depicted in Figure 3.5. It is obvious that as the pore size and the gas pressure are increased, the gaseous thermal conductivity is also increased. Materials with pore size in the nanometric range (fumed silica and aerogels) have very low gaseous thermal conductivity even at atmospheric pressure.

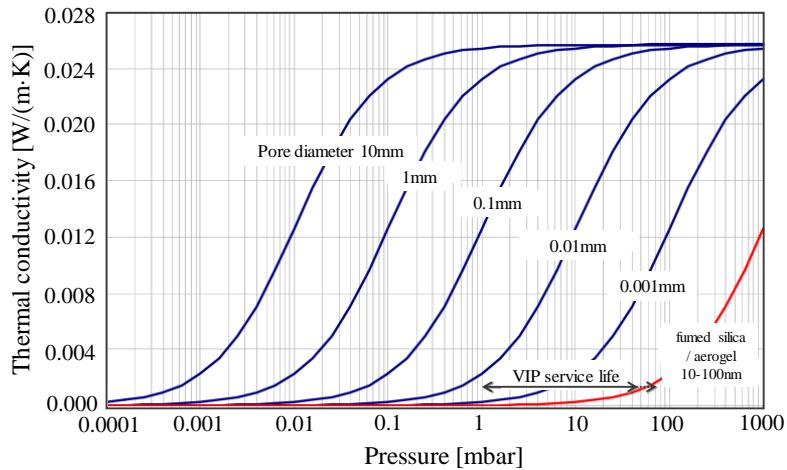


Figure 3.5 – Gaseous thermal conductivity as a function of the gas pressure and pore diameter [9].

Figure 3.6 illustrates the variation of the equivalent overall thermal conductivity, λ_{tot} , of different core material as a function of the gas pressure. It is observed that the thermal conductivity at very low values of pressure (approximately vacuum) is between 2 and 6 mW/(m·K) for all materials. However, as the pressure increases, the thermal conductivity increased. At atmospheric pressure, the thermal conductivity of fumed silica is 18 mW/(m·K), while the thermal conductivity of all the other materials range between 27 and 35 mW/(m·K). The thermal conductivity of glass fiber, PU foam and PS foam is rapidly increased at the pressure of 0.1 – 1 mbar, while that of fumed silica is rapidly increased at 30 mbar. The extremely small pores size of fumed silica results to a high value of Knudsen Number that leads to low values of thermal conductivity even in atmospheric pressure. The initial pressure of the VIP with fumed silica core ranges between 1 and 3 mbar, while the end of service life is reached when the gas conductivity starts to rise (50 - 100 mbar).

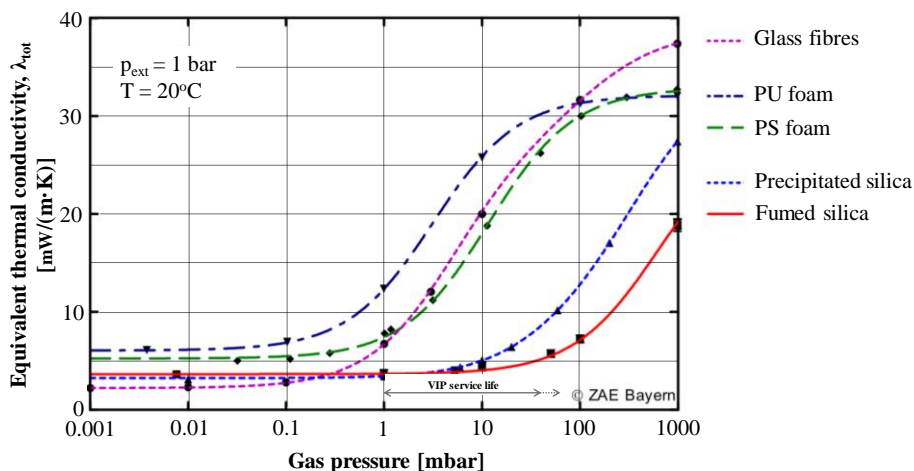


Figure 3.6 – Equivalent overall thermal conductivity of different potential VIP core materials as function of the internal gas pressure [9].

3.2.3 Ageing - Service life

The most commonly used definition of VIP service life concerns the superinsulation performance of panels expressed as “the time elapsed from the moment of production until the moment when the thermal conductivity of the VIP, λ_{tot} , has exceeded a certain limiting value” [12, 16]. There is also a less used definition which refers to the time-averaged thermal conductivity. There is not any standardized criterion for the end of life of VIPs yet [9, 17]. The limiting value of the thermal conductivity can be 8 mW/(m·K) [18] or 11 mW/(m·K) [16], starting with a general accepted value at the center-of-panel equal to 4 mW/(m·K) [11].

There are many possible failure mechanisms, starting with the “early failure”. An early failure of VIPs can be caused generally by imperfect production appearing in the first stage of the VIP manufacture (low quality of seams). For this reason, in recent years, the production process and the quality control have been improved, reducing the production failure rate below 1%. An effective way to reduce the early VIP failure is the storage of panels over a period of 10 days in the factory before the final check and transport. Another cause of early failure of VIP is the mechanical damage during the transport or installation on the construction site. For this reason, the use of VIP in prefabricated assemblies reduces the possibility of this failure.

The normal failure mechanism during the long-term application of VIPs is the increase of the internal pressure due to the slow permeation of atmospheric molecules through the envelope barrier. Also, increase of water content is performed due to the permeation of atmospheric molecules. The presence of getters and desiccants inside the VIP core slows down the gas and water permeation, but it increases the thermal conductivity of the panel. The increase of internal pressure and water content along with the influence of getters/desiccants determine the service life of the VIPs.

The most important factors affecting the permeation rates are the type of the envelope barrier, the panel size and the environmental conditions [19]. Researchers have focused on the development of barrier properties. Three different film types are used for VIP envelopes: the metal foils, the metallized films and the polymer films. The later envelopes are less common due to the high gas permeability [11]. The metal film (AF) consists of a central aluminum layer (up to 10 μ m) laminated with a polyethylene terephthalate (PET) providing extra mechanical resistance (Figure 3.7). The metallized film (MF) consists of up to three layers of aluminum metallized PET films or/and polypropylene (PP) layer (Figure 3.7). Al laminates have an inner polyethylene (PE) layer for sealing purpose [17].

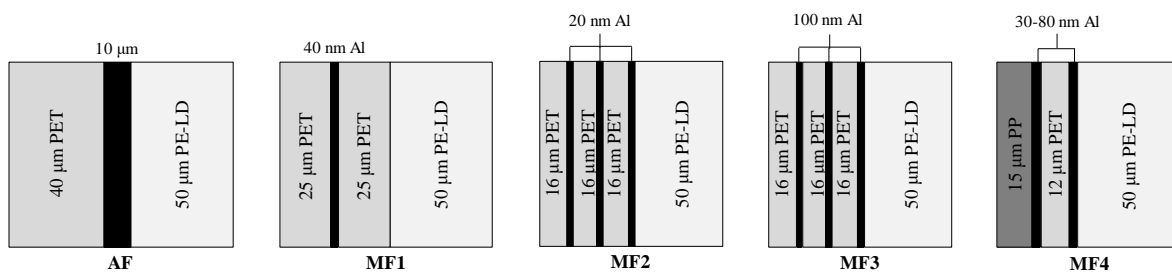


Figure 3.7 – Cross section of various envelope solutions for applications in VIPs [11, 17].

Figure 3.8 presents the increase of water content and air pressure over the period of 100 years for two different sizes (100cm×100cm×2cm and 50cm×50cm×1cm) of VIPs with AF, MF1 and MF2 foil (as illustrated in Figure 3.7), assumed constant climatic conditions. As it is shown, the increase of water content depends significantly on the type of the foil (Figure 3.8a). In particular, the water content of the

VIP with metal film (AF) is always lower than the metalized films (MF). The water content increases approximately linear in the case of AF, while in the case of MF there is a rapid increase at the first 10 - 40 years, when the water content is maximized. There is also a dependency of the VIP size, since the larger size of panel, the lower water content. Regarding the air pressure, the rate of increase is approximately constant for all cases (Figure 3.8b). The air pressure is generally lower at AF than MF barriers, while the larger sizes has lower air pressure. For AF there is a mean increase of 0.2 - 0.6 mbar per year, while the increase for MF ranges from 0.3 to 3.2 mbar per year depending on the size and the type of foil.

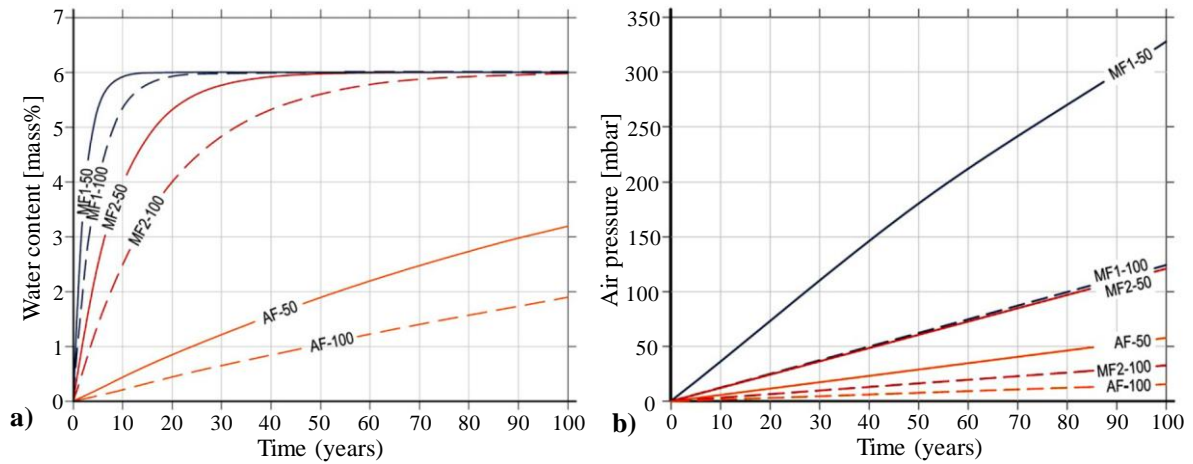


Figure 3.8 – Calculated increase of water content and air pressure for different foil types and panel sizes [11].

The increase of water content and air pressure leads to an increase of the thermal conductivity of the VIP, as shown in equations 3.3 and 3.4. A correlation of the time-dependent thermal conductivity $\lambda(t)$, for fumed silica VIP has been proposed by Schwab et al [20], described by the following equation:

$$\lambda(t) = \lambda_{tot, vac} + \frac{\lambda_{freegas}}{1 + \frac{p_{1/2gas}}{p_{gas}(t)}} + bX_w(t) \quad 3.5$$

where, $\lambda_{tot, vac}$ [W/(m·K)] is the initial thermal conductivity in evacuated conditions, $\lambda_{freegas}$ [W/(m·K)] is the thermal conductivity of free still gas, $p_{1/2gas}$ [Pa] is the pressure at which the gaseous thermal conductivity equals to one half of $\lambda_{freegas}$, p_{gas} [Pa] is the gas pressure, b [-] is the sorption constant and X_w [%mass] is the water content.

As it is shown in Figure 3.9, the increase of the center of panel thermal conductivity for AF is less significant than in MF barriers. 25 years after the production, the thermal conductivity of AF panels has increased by 0.5 to 1 mW/(m·K), while the thermal conductivity of MF panels has increased by 3 to 7 mW/(m·K), depending on size panel [11]. Simmler and Brunner [21] suggested that the preliminary design values of core thermal conductivity for a useful time period of 25 years are 6 mW/(m·K) for AF and 8 mW/(m·K) for MF, starting with 4 mW/(m·K) for dry low-pressure silica VIP with a thickness of at least 20 mm and width of 250 mm or more.

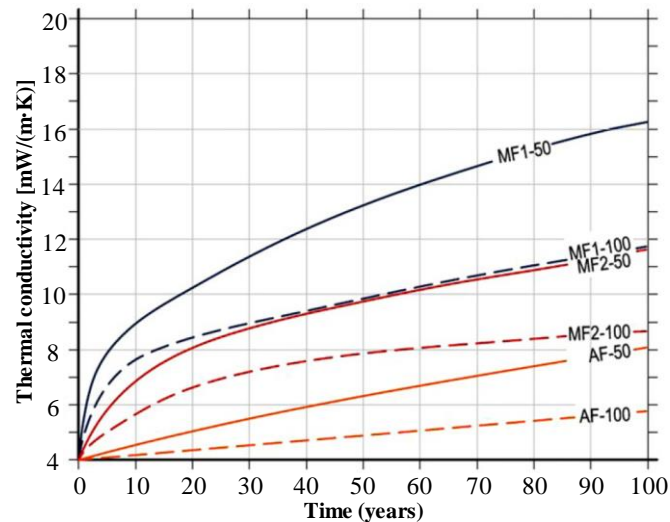


Figure 3.9 – Calculated center-of-panel thermal conductivity of VIPs for different foil types and panel sizes [11].

A “high” barrier can be achieved with massive metal layers having a thickness of approximately 10 μm . However, the thermal performance of such a VIP is doubtful, because the heat flow through the edges of the VIP will be larger than the heat flow through the core. For this reason, the selection of the envelope is an optimization process between the thermal performance and the service life of the VIP, making the metalized films widely used.

3.2.4 Other properties

Except from the thermal and hygrothermal properties of VIP, also other properties, such as the sound performance and the fire resistance, should be considered for building applications. The acoustical performance and knowledge of VIPs is separated into three groups: a single VIP, VIPs insulated sandwich elements and VIPs insulated cavity walls. The VIP, as a single panel, has not beneficial acoustic performance due to the very small thickness [11]. However, the acoustical properties can be improved applying VIPs in sandwich elements [22]. Nevertheless, there is limited knowledge about the acoustic performance of VIPs available [23].

The commercial VIPs are non-flammable materials with a flammability label B2 according to DIN 4102 [11]. The fumed silica is a non-flammable material, classified A1 according to EN 13501-1, but the metalized multi-layered polymer laminate is highly flammable [24]. For this reason, a thin flame-retardant coating is utilized on the external side of the envelope to enhance the fire resistance. The VIP, as an intermediate layer at a building envelope, is a very good fire retardancy agent from ambient to fire conditions [25, 26]. Experimental tests indicated that the VIP significantly delays the penetration of the heat through the wall and increases the time-to-failure in comparison with the conventional insulation materials [26].

The environmental impact of VIP is comparable to the impact of other conventional insulation materials [2]. More energy is consumed during the production and processing of the core material, which can be counterbalanced if the life cycle of the thermal performance of a building is considered. However, the environmental impact of VIP can be reduced by approximately 45%, for alternative core materials with less embodied energy or a more energy efficient production process [27].

3.3 Edge effect

The presence of the envelope barrier with high thermal conductivity, which continuously wraps the whole surface of the core material with extremely low thermal conductivity, creates a non-negligible thermal bridge (Figure 3.10). The effect of thermal bridges, namely *edge effect*, affects the total thermal performance of the VIP. The effective thermal conductivity, λ_{eff} , is defined as the overall equivalent thermal conductivity taking into account the edge effect. The effective thermal conductivity is higher than the ideal center-of-panel thermal conductivity, λ_{cop} , which is theoretically unaffected by the edge effect. The effective thermal conductivity represents the thermal conductivity of a homogeneous material with equivalent thermal behavior.

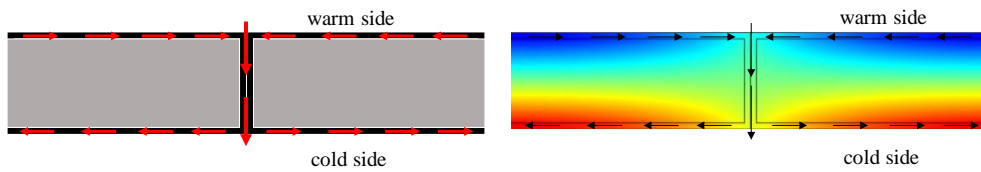


Figure 3.10 – Schematic representation of edge effect between two adjacent VIPs [10].

The additional heat flow through the laminate at the edges is quantified by the linear thermal transmittance, Ψ_{VIP} expressed in [W/(m·K)], while the additional heat flow through the corner thermal bridges is defined by the point thermal transmittance χ_{VIP} expressed in [W/K]. The effective thermal conductivity is calculated by the following equation:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cop} + \Psi_{VIP} \cdot d \cdot \frac{p}{A} + \chi_{VIP} \frac{d}{A} \quad 3.6$$

where d [m] is the panel thickness, p [m] and A [m²] are the perimeter and surface of the panel, respectively. The effect of point thermal bridges at the corners is much smaller than the effect at the edges, hence the third term of the equation 3.6 is usually neglected [11].

The edge effect depends on the envelope barrier (thickness and thermal conductivity), the type of seam, the thermal conductivity of the core material, the thickness and the size of panel. Among them, the highest influence on the linear thermal transmittance is the envelope barrier. Figure 3.11 illustrates the linear thermal transmittance, Ψ_{VIP} , for the different envelope barriers, presented in Figure 3.7, as a function of the thickness of panel, d . As it is observed, the Ψ_{VIP} in the case of the aluminum foil (AF) is higher than the Ψ_{VIP} in the cases of the metalized films (MF) by 15 to 20 times. As a result, the increase of the effective thermal conductivity for the AF VIPs is relatively higher than the MF VIPs. Although, the AF foil is better concerning the service life of the VIP, the contribution to the edge effect is significant.

The Figure 3.11 also indicates the importance of the thickness of the incorporated aluminum foils on the linear thermal transmittance. Between the three metalized foils, it is shown that the highest Ψ_{VIP} is observed in the case of MF3 foil where there are three aluminum foils with thickness 100 nm, while the lowest Ψ_{VIP} is observed in the case of MF1 foil where there is one aluminum foil with thickness 20 nm (Figure 3.7).

Regarding the influence of the VIP size, the larger panels, the lower effective thermal conductivity and the square-shaped panels have lower effective thermal conductivity than the rectangular-shaped [28].

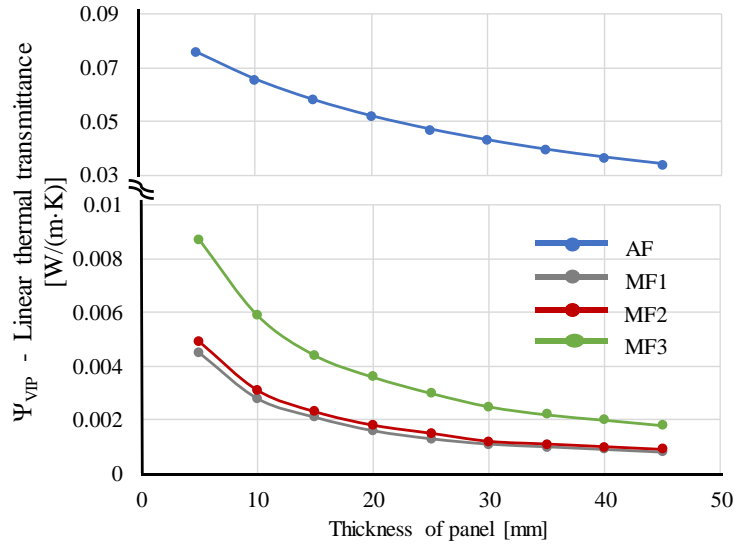


Figure 3.11 – Linear thermal transmittances for different thickness and envelope barriers (values obtained from [11]).

A measure for the reduction of the edge effect is lengthening the thermal bridge itself in order to impose the heat flow to pass through a longer pathway. This is accomplished by folding the metal layer of the envelope to a serpentine shape (Figure 3.12) [10]. For a stainless steel envelope the serpentine edge reduces the Ψ_{VIP} from 0.028 W/(m·K), with straight edge, to 0.0096 W/(m·K) with 17 serpentine, for 20mm thick VIP [12].



Figure 3.12 – The serpentine edge.

Another factor that influences the edge effect is the seam construction. The linear thermal transmittance, Ψ_{VIP} , depends on the ratio ϕ of the thickness of the laminate envelope, d_f , to the thickness on the laminate envelope at the panel edge, d_f' , namely $\phi = d_f / d_f'$. The impact of different seam construction on the calculated Ψ_{VIP} is depicted in Figure 3.13. It is shown that the seam construction increases the Ψ_{VIP} up to 50%, in the case of aluminum foil, and up to 150%, in the case of metalized film.

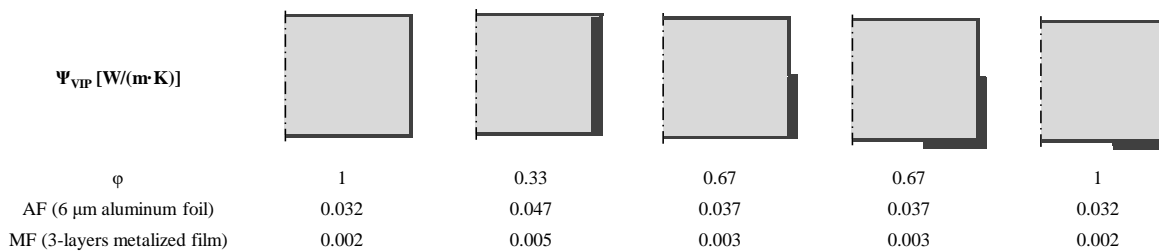


Figure 3.13 – Comparison of the calculated linear thermal transmittance for different edge seam construction (results obtained by [29] for $\lambda_{cop}=4$ mW/(m·K) and d=20 mm).

Except from the edge effect caused by the VIP envelope alone, there are two additional thermal bridges appeared for VIP application: thermal bridges due to the small air gap between two adjacent panels and thermal bridges due to constructional irregularities or the presence of structural joints. The air gap between two adjacent VIPs creates a thermal bridge which should be taken into account. An air gap of 5 mm can increase the linear thermal transmittance, Ψ_{VIP} , up to 900% in the case of metalized film, while this increase is in the range of 15% for aluminum foil [11]. However, despite this high increase, the thermal performance of metalized films is even better than aluminum foils. A measure for the reduction of the effect of thermal bridges due to air gap is the use of adhesive tape.

3.4 Methods for the thermal performance assessment of the VIPs

3.4.1 Experimental methods

The most common ways for the experimental assessment of the thermal performance of the VIPs are: the measurement of the thermal conductivity and the measurement of the internal pressure. These properties determine the thermal performance and the service life of panels that are the most important issues concerning the applications of VIPs in buildings.

Measurement of the thermal conductivity

The measurement of the thermal conductivity is fundamental for the thermal performance assessment of the VIP. There are several methods for the determination of the center-of-panel and the effective thermal conductivity of VIPs, but the most common method is the guarded hot plate and the heat flow meter method.

According to the guarded hot plate (GHP) method, the thermal conductivity is measured under steady state conditions in a GHP apparatus. The procedure for the GHP measurement is explicitly described by international standards [30-32]. The apparatus consists of a heating and a cooling unit surrounded by insulation. There are two types of GHP apparatus, the two-specimen and the single specimen apparatus. In the first, the heating unit is sandwiched between two identical specimens (VIPs), while in the single specimen apparatus one of the specimens is replaced by a combination of insulation and a guarded plate. The heating unit, divided into a central measuring area, A_m , and a surrounding guarding area, is electrically heated with a constant heating power, Q , maintaining the warm surface temperature constant, T_h . The heat flow rate is transferred through the specimen to the cooling unit, which maintains its temperature, T_c , constant. The guarding area prevents a lateral heat flow maintaining one-dimensional heat flow. The thermal conductivity of a specimen with thickness d is calculated according to the Fourier law:

$$\lambda_{GHP} = d \frac{Q}{A_m \cdot (T_h - T_c)} \quad 3.7$$

In GHP apparatus can be measured both the center-of-panel thermal conductivity and the edge effect depending on the sample assembly at the apparatus (Figure 3.14). The configuration in Figure 3.14c is used for the measurement of the thermal conductivity at the joint of two adjacent VIPs, $\lambda_{JOINT,GHP}$, [W/(m·K)]. Hence the linear thermal transmittance, Ψ_{VIP} , can be calculated according to the following equation:

$$\Psi_{VIP} = \frac{A_m (\lambda_{JOINT,GHP} - \lambda_{COP,GHP})}{2 \cdot d \cdot L_{joint}} \quad 3.8$$

where $\lambda_{COP,GHP}$, [W/(m·K)] is the center-of-panel thermal conductivity, measured by GHP (Figure 3.14b) configuration and L_{joint} [m] is length of the joint inside the metering area. The accuracy of the measured thermal conductivities is within 3% [28, 31].

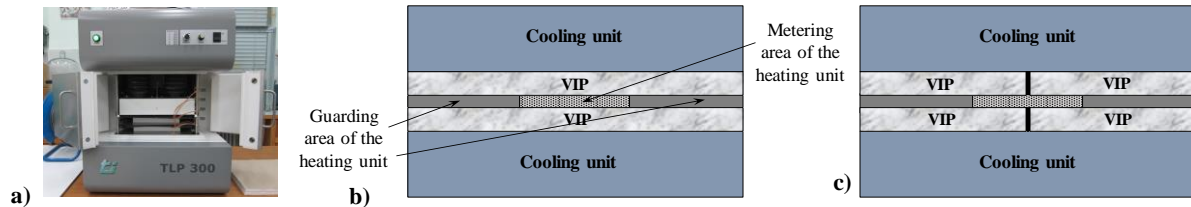


Figure 3.14 – Guarded hot plate method: a) a two-specimen apparatus, b) sample assembly in the two-specimen guarded hot plate apparatus for the measurement of the center-of-panel thermal conductivity and c) the linear thermal transmittance.

The heat flow meter method is similar to the guarded hot plate. The main difference is that in the heat flow apparatus the heat flow is measured by means of sensors installed against the one or two tested specimens (Figure 3.15a). There are also single or two specimen apparatus. In each case, the specimen is placed between the heating and the cooling unit maintaining one dimensional heat flow under steady state conditions. The heat flow meters are placed at one or two surfaces of the specimen measuring the density of heat flow at a specific metering area.

Many researchers have determined the thermal performance of VIPs by means of the hot box method [12, 33, 34]. According to this method, the tested specimen is placed between two chambers, a hot and a cold chamber, in which the environmental conditions are controllable. A metering box is placed at the hot surface of the specimen measuring the power input to the metering box in order to achieve steady state conditions, while the heat transfer through all the other sides is zero (Figure 3.15b). The test specimen, typically 2.4 m × 2.4 m, is placed tightly against the surrounding environment. The hot box has been developed for the measurement of an average thermal resistance of a wall assembly, including the effect of thermal bridges.

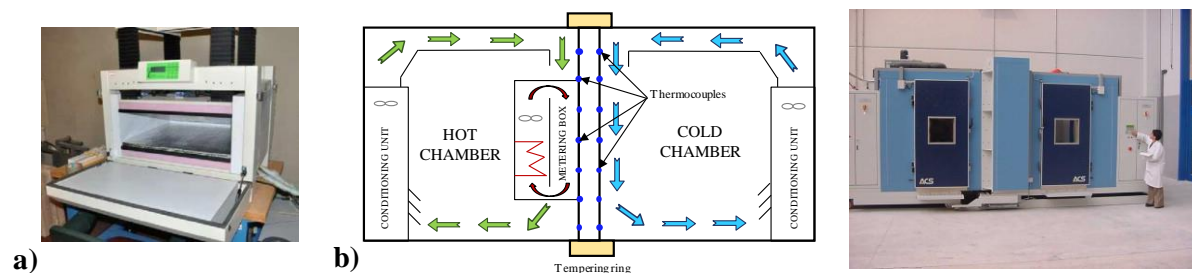


Figure 3.15 – a) The heat flow meter apparatus [35] and b) the hot box method [36].

Another method for the measurement of the thermal properties of VIP is the Transient Plane Source (TPS) method [37]. According to TPS method, a plane thick sensor is closed between two layers of the tested material. A constant heat power is generated rising the temperature and the resistance of the sensor. The rate of this temperature rise depends on the rate of the conducted heat through the test specimen. The variation of the temperature calculates the thermal conductivity and the specific heat capacity of the specimen by means of mathematical models [30].

Many researchers use infrared thermography as a method for the assessment of the VIPs [2, 38]. However, this method is qualitative for the in-situ identification of damaged panels. This method can be applied for applications where the VIPs are not covered by insulated materials or ventilated façade at the external side. Finally, studies have investigated the in-situ thermal performance of VIPs by means of a monitoring system [39-41]. In these cases, the studies usually measure the in-situ thermal resistance of a wall incorporated VIPs or the temperature variation of the VIP surfaces.

Measurement of the internal pressure

There is not any standardized method for the measurements of the internal pressure of a VIP, however widely applied methods used for the determination of the internal pressure. Generally, there are two approaches for the measuring of the internal gas and water vapor pressure, the non-thermal and the thermal methods.

The most common non-thermal method is the envelope lift-off method. According to this method, the VIP is placed in a vacuum chamber. As soon as the internal pressure of the VIP is slightly higher than the pressure of the chamber, the envelope of the panel lifts off from the core because of the pressure difference (Figure 3.16a). This method is hardly practical for pressures below 0.5 mbar [42]. A new method, namely cold lift-off method, determines the partial air pressure at very low temperatures in order to calculate the air permeance through the VIP envelope [43]. Another non-thermal method is the Spinning Rotor Gauge (SRG) procedure. A steel tube, closed on one side and containing a steel spinning ball, is attached through the seam to the inner side of the VIP (Figure 3.16b). The ball spins at a specific speed by a rotating magnetic field. The internal pressure is determined by the deceleration of the rotating ball. A third non-thermal method is the ratio frequency identification technique, providing data remotely from specific devices, called RFID-tags. A RFID tag, incorporated into a VIP, transmits data from an additional sensor to a remote reader, several centimeters away from the tag measuring temperature or pressure. Va-Q-tec has developed a simple to detect the damaged VIPs, receiving no signal if the internal pressure is higher than a certain value, e.g. 600 mbar.

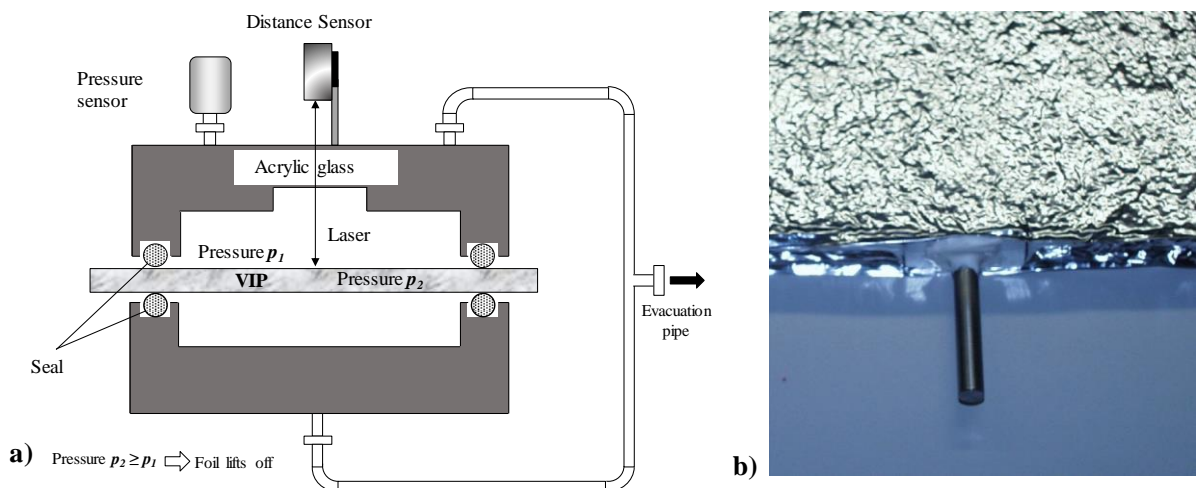


Figure 3.16 – Non-thermal methods - a) principle of the lift-off method [44] and b) The steel tube attached to a VIP [42].

The thermal methods determine the internal pressure indirectly measuring thermal properties of the panel or a sensor. The internal pressure can be result from the measuring of the thermal conductivity of the VIP, thanks to the dependency of thermal conductivity on pressure (Figure 3.6). The thermal conductivity can be measured using one of the above-mentioned methods (e.g. guarded hot plate

method) and the performance of the envelope can be estimated by the change of the heat transmission over the time. A thermal detector has been developed by “va-Q-check” [45] for the gas pressure measurement. A disk of thin fiber fleece (0.2 mm thick) is placed under the envelope of the VIP above a thin metal plate (Figure 3.17). The thermal conductivity of disk is measured by placing a hot measurement head (transmitter/detector) on it from the external side, with measuring time only 10 seconds [46]. The head introduces a heat flow through the envelope achieving a steady state heat flux. The value of the thermal conductivity of the fleece is measured which is depended on the internal gas pressure. This technique requires direct contact with the surface of the VIP that is not accessible for most application. In these cases, the gas pressure is monitored by means of a measurement head (1 mm thick) which is permanently fixed at the surface of the VIP above the internal sensor chip measuring temperature and heat flux. The wires for the head and sensors are permanently connected with a connector [46].

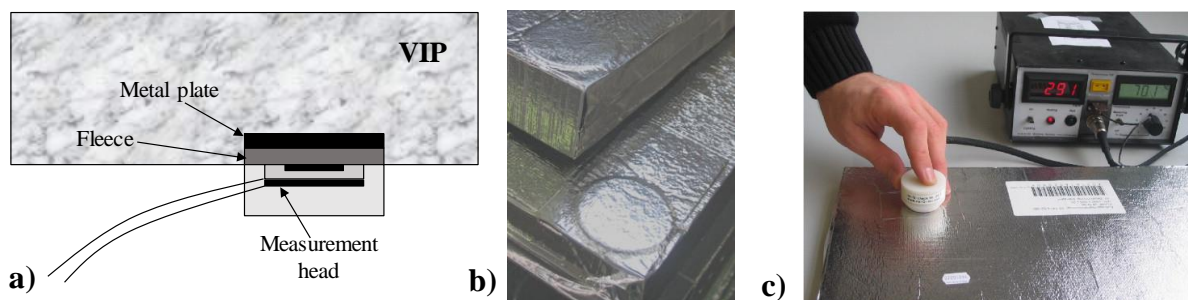


Figure 3.17 – a) Principle of the va-Q-check, b) sensor disks and c) measuring gas pressure [42]

3.4.2 Numerical methods

The numerical investigation of the thermal performance of VIPs has been dealt with by several studies. The investigation may be separated into three scales: a) the panel scale, b) the wall scale and c) the whole building scale. The investigation at the panel scale concerns the characterization of the panel properties, the edge effect, the aging effect, etc. The analysis at the wall scale refers to the thermal performance of wall elements incorporating VIPs, the moisture transfer, the impact of VIPs on thermal bridges, etc. Finally, the whole building scale investigation deals with the energy efficiency of a whole building envelope incorporating VIPs, the use of VIPs in retrofitting envelopes, the cost analysis etc.

The panel scale numerical investigation of the VIPs is usually carried out using numerical simulation software. A 2D or 3D numerical model is created using a validated commercial software such as HEAT, THERM, COMSOL, PHYSIBEL (VOLTRA/BISCO/TRISCO) and ANSYS (CFX/FLUENT). The edge effect is the most common issue which is dealt with. The VIP is simulated consisting of the core material surrounded with a single equivalent homogenous layer for the envelope barrier [47]. The challenge is the generation of appropriate grid for the solution of the heat transfer equation, due to the different order of magnitude between the core (about 20 mm) and the envelope thicknesses (about 75 μm) [28]. Another important issue of the numerical model is the seam construction and the size of the air gaps at the joint of two VIPs [28, 29]. Cauberg and Tenpierik [48] calculated the linear thermal transmittance, Ψ_{VIP} , for different edge spacers using the commercial software TRISCO.

Except from the use of software, the edge effect has been investigated using analytical models. Tenpierik and Cauberg [49] introduced analytical mode for the calculation of the Ψ_{VIP} . The Ψ_{VIP} is calculated as a function of the thermal conductivity, the thicknesses of the core and envelope, the seam

by means of the ratio φ and other parameters. Although this approach gives reliable results for envelope with thickness 10 - 300 μm , large deviation are noticed for two- or three-metallized films, panel thicknesses less than 20 mm and center-of-panel thermal conductivity of 0.020 W/(m·K) [11].

The numerical investigation in the wall scale is carried out utilizing commercial software for the 2D or 3D solution of the heat transfer both in steady state and transient conditions. In these cases, the VIP is a homogenous layer of a wall assembly. The VIP is simulated as an equivalent layer with the effective thermal conductivity, taking into account the edge effect. Another issue that has been investigated numerically is the dynamic simulation of the moisture transfer through a wall with VIPs. Wakili et al. [50] uses WUFI 2D for the hygro-thermal performance of two different installation methods of VIPs on the brick walls: dry and wet.

Finally, in the cases of the whole building scale investigation the building envelope is simulated in transient conditions, usually for a whole year period. The VIP is simulated as a homogenous layer of the building envelope assuming equivalent thermal properties taking into account the edge effect and the ageing effects. The EnergyPlus and TRNSYS are the most common software for the whole building investigation. Malliotakis et al. [19] combined the use of an in-house code with the TRNSYS software to predict the ageing effects on long term thermal performance of VIPs.

3.5 Applications in buildings

In 2014, the 60% of the VIPs production used for refrigeration (refrigerator, freezers) and the 30% for transportation (refrigeration vehicles, container box), while only 10% of the VIPs are applied in building sector [5]. There are a set of requirements for a material to be used in buildings. Among them, the material needs to have a documented lifetime of at least 30-50 years but 100 years would be preferable [12].

The benefit of VIPs that offer high thermal resistance with small thickness makes VIPs competitive in building applications compared to conventional insulation materials. The extremely low effective thermal conductivity of VIP reaches four to ten times lower than conventional insulations (e.g. mineral wool or EPS), offering high thermal performance and increasing the net floor area. However, the VIPs have severe drawbacks that make their application in buildings doubtful up today. The most important drawbacks are that VIPs are very fragile, expensive and their thermal performance is reduced through time. Nevertheless, several building applications have been investigated during the last decades and their findings are promising.

3.5.1 VIPs handling

VIPs are fragile and rigid panels produced by manufacturers in specific shape and sizes. This make VIPs inflexible and impossible their adaptation (cutting of panels) on the construction site. The sizes of the panels should be in correct dimensions before the VIPs installation, because of the lack of adaptability requiring more effort during the planning phase [23]. For this reason, manufacturers provide dedicated software to find the optimum layout plan and the sizes of panels. The optimum pattern uses as possible large size panels (less edge effect) and maximizes the area covered with VIP [51]. Accounting for tolerance in the production, the VIPs must be slightly smaller than the covered surface. For the uncovered area, conventional and adaptable insulation (e.g. EPS, mineral wool, PUR) can be used to fill the gap [52].

VIPs have to be handled very carefully from the production until the installation. Every failure at the VIP envelope results to loss of vacuum and the increase of the thermal conductivity up to five times. In practice, the most common cause of failure of the VIPs occurs before and during the installation [53]. That is why the VIPs should be installed by special trained staff to treat the panels with care. Moreover, Simmler and Brunner [21] highlighted that the installation of unprotected VIP should be avoided to reduce the risk of mechanical damage of the delicate envelope. For this reason, the VIP is integrated into a protective material defining the encapsulated VIPs (Figure 3.18). The protective material is usually an additional insulation board such as expanded polystyrene (EPS), polyurethane (PU), mineral wool (MW) etc. The additional insulation layers not only protect the VIP from mechanical damage, but also provide further improved thermal performance [54].

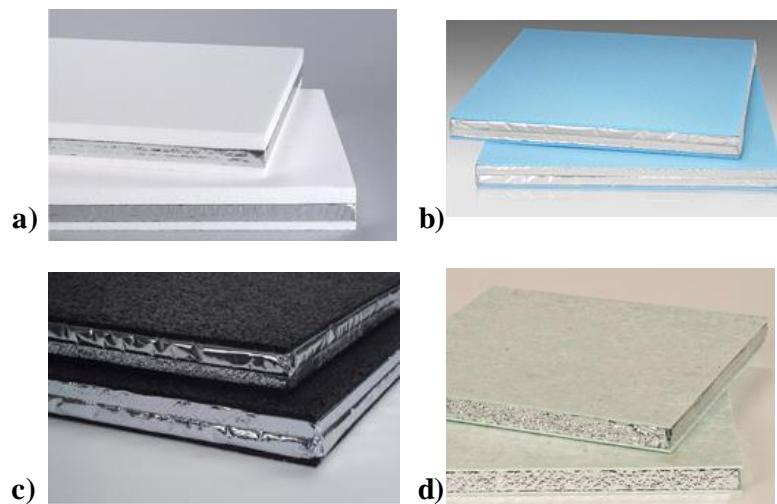


Figure 3.18 – Encapsulated VIPs with protective layer from a) EPS, b) XPS, c) rubber granule mat and d) sound protection board [55].

Another way to ensure the right handling of panels is the integration of the VIPs in prefabricated constructions [2, 56]. The automated and controlled factory environment, offered in prefabricated construction, can handle the panels appropriate during the installation on the wall assemblies. Figure 3.19 illustrates the construction, the installation and the view of a prefabricated dormer window in Zurich.



Figure 3.19 - Prefabrication, installation and view of the finished dormer window [57].

3.5.2 Applications in new and existing buildings

VIPs have been applied in buildings since the last decade for both the construction of new and the renovation of existing buildings. VIPs can be used in many different areas of a construction. The most common application is the insulation of walls and roofs [10]. VIPs can insulate the external or the

internal side of the walls. Only a few centimeters of VIP are enough to meet almost all national regulations regarding the U-value of the external wall, thanks to their very low thermal conductivity [11]. For retrofitting cases, where the installation of external insulation is impossible (historical buildings or multi-storey residential buildings), the internal façade insulation with VIPs is beneficial, due to the thin thickness of VIP which allows much less loss of indoor space. The use of VIPs as insulation of flat roof terraces is common, mainly in Switzerland, avoiding the high steps between the interior and terrace. VIPs are used in glazing structures for more architecturally appealing enabling smoother transition between the glass areas and opaque areas. Also, the integration of VIPs in a door leads to a substantial improvement of the thermal resistance, reducing the heat loss of a building. Nussbaumer et al. [58] showed that the implementation of VIPs at a wooden door system leads to an improvement on the thermal performance approximately 25%.

VIPs can be used both in lightweight and in massive constructions. Regarding the steel-framed lightweight buildings, Martins et al. [59] investigated several solutions for the reduction of the effect of thermal bridges caused by metal structure of lightweight envelopes. They showed that the most effective way is the installation of VIPs on both sides of metal structure. The VIPs have also been applied in lightweight timber framed buildings for the insulation of the cavity between the studs [60]. Ahmad et al. [61] combined the use of VIPs with phase change materials (PCM) in lightweight envelope improving both the thermal inertia and the thermal resistance of the wall.

Several new buildings have constructed since the beginning of 21th century. In 2003, a passive house in Bersenbrück (Germany) was built applied encapsulated VIPs with PUR, achieving U-value equal to 0.15 W/(m²K) [62]. The construction of a 7-storey building in Munich, which is the first building over two stories to be entirely insulated with VIPs, was completed in 2005 (Figure 3.20). The VIPs were installed at the concrete walls with adhesive. The application of VIPs contributed to reduce the heating requirements with a slimmer façade. Four years after the installation, an thermographic scan on a large surface of the building indicated that none of the VIPs showed any signs of damage (Figure 3.20) [63].



Figure 3.20 – The building in Munich and the thermographic scan [63].

The use of VIPs is an attractive and efficient option for the refurbishment of old buildings, especial where space is limited. Several examples from application of VIP on retrofitting have been carried out. Mukhopadhyaya et al. [64] investigated the thermal performance of a retrofitted with glass fiber core VIPs wall in the Canadian climate over a period of seven years (2011 – 2017). They concluded that the in-situ performance of the VIPs is reduced by a rate less than 0.8% per year. Moreover, the thermal bridges due to the timber frame were reduced after the installation of VIPs (Figure 3.21).

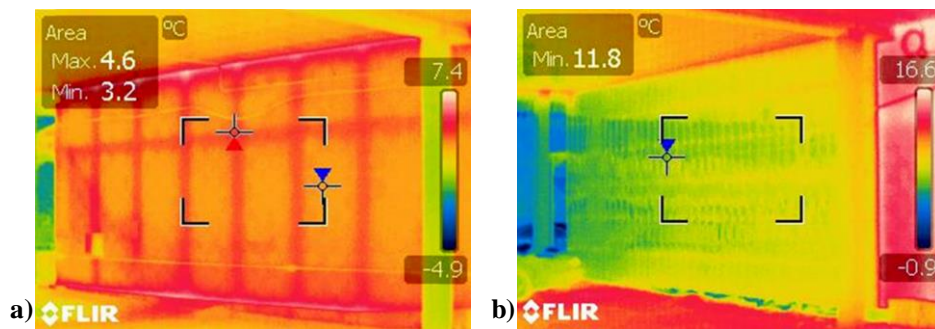


Figure 3.21 – Infrared image a) before and b) after the VIP retrofit [39].

In the same line, Johansson et al. [65] evaluated the performance of a retrofitted building façade for 5 years in Gothenburg (Sweden). The energy use for heating reduced about 24% using 20 mm thick VIPs on the external side of the walls. The monitoring analysis revealed that there is no sign of degradation of panels and the risk of condensation was decreased. In Regensdorf (Switzerland), the roof of an existing building was retrofitted with VIPs covered by a protective layer. The outcomes of a two-year monitoring suggested a service life of panels for several decades [66]. In Nuremberg (Germany), a protected heritage building was retrofitted in 2000, using VIPs at the exterior walls. The U-value is reduced from 0.7 W/(m²K) to 0.19 W/(m²K), which would be increased to 0.32 W/(m²K), if the VIPs were damaged. Infrared thermography in 2001, 2003 and 2008 showed that a first panel, in 2001, and a second panel, in 2008, were damaged (Figure 3.22). However, the remaining panel seem to be in a satisfactory condition, 8 years after the installation [2].

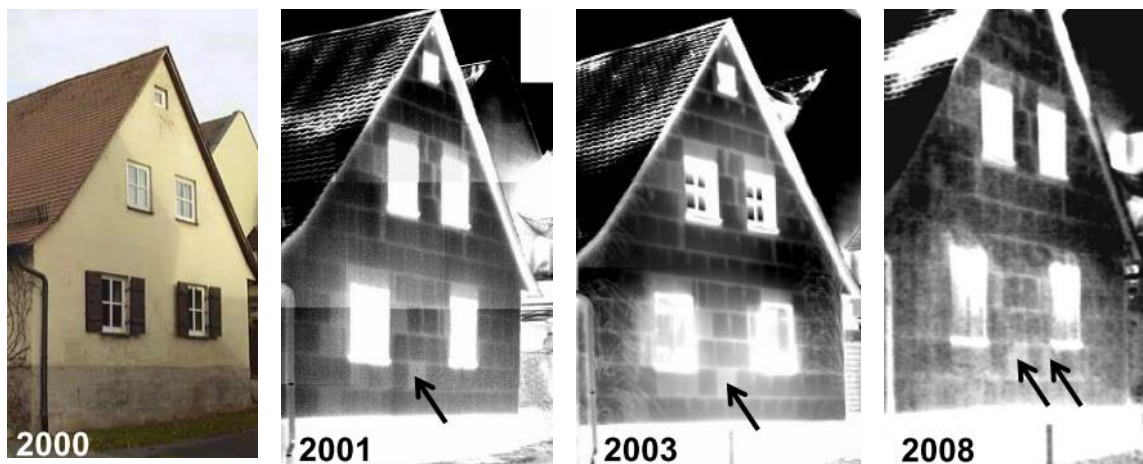


Figure 3.22 – The façade of a historic building and the infrared images in 2000, 2003 and 2008 [67].

Further examples regarding the applications of VIPs in building sector are described in the Annex 39 and in VIP Prove project [10, 62, 68]. In Annex 39, in total 20 constructions with VIPs were studied. They concluded that VIP has become a feasible insulation material for energy efficient buildings. However, there are obstacles to overcome, mainly cost and service life issues, before VIP can be introduced on a wide scale in building sector [10]. In VIP Prove, a total of 29 constructions (walls/roof/floor or whole building) were assessed in order to investigate the behavior of VIPs under practical conditions. In three buildings, the VIPs might be handled incorrectly or a production error had taken place. For 16 constructions which were further investigated, only the 4.9% of the installed panels were classified as damaged [2, 23, 68]. For this reason, the check of VIPs regarding the air pressure and thermal conductivity before the installation is necessary.

3.5.3 Economic analysis

Even though VIP is an innovative and energy efficient insulation material, it is still an expensive material which is a major drawback against conventional insulations. Nowadays, the cost of VIPs is generally between 4 - 15 times higher than conventional insulation materials for the same thermal performance. The high cost of VIPs is caused to the materials required for the production and especially at the cost of the core material. Nowadays the cost of VIPs is varied between 50 - 145 €/m² [10, 24].

The use of VIPs is profitable in cold climates, where low U-values are required and the rental prices are high. Alam et al. [13] investigated the payback period calculated for the use of VIP and EPS as an insulation of a typical building in UK. Four different scenarios were examined, regarding the resulting U-value of the external walls. The results, presented in Figure 3.23, show that the payback period in the case of VIP is always much higher than the use of EPS. The U-value of the wall increases, the payback period reduces. However, the payback period of VIPs is severely reduced if the economic value of the increased net floor area thanks to thinner walls is taken account. In this case, the use of VIPs is more profitable for the lowest U-value, equal to 0.24 W/(m²K).

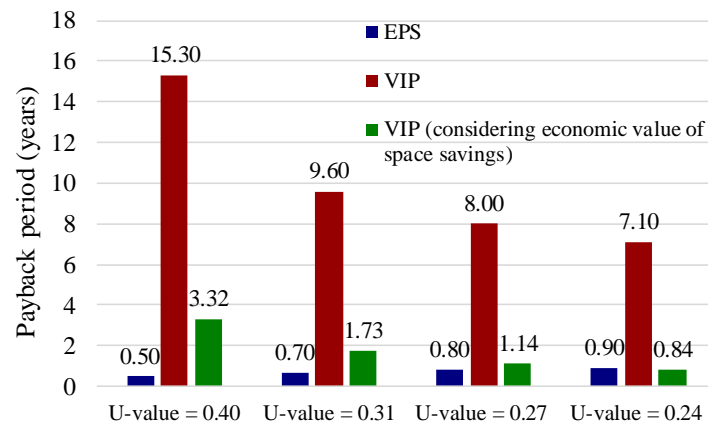


Figure 3.23 – Payback period of VIP and EPS in different U-values for buildings in UK [13].

Alam and Singh [69] carried out a life cycle cost analysis indicating that the payback period for the use of VIP insulation in six story office building in UK is between 2.5 - 7 years depending on the building rental value, while for a typical semi-detached UK house, the cost of insulation cannot be recovered over the 60 years period. Between fumed silica and glass fiber core material, the silica VIP had shorter payback period, despite the fact that it is more expensive [8].

3.6 Conclusions

The present chapter addressed the innovative insulation material Vacuum Insulation Panel (VIP) focusing on applications in building sector. The VIP, composed of an evacuated open pore core material surrounded by a thin envelope barrier, belongs in the category of Super Insulation Materials (SIM). The basic properties of the VIPs concerning the thermal performance and the service life of VIPs were extensively analyzed. Furthermore, the most important experimental and numerical methods for the assessment of their thermal performance were discussed. The chapter presented an extensive literature review about the use of VIPs in buildings.

Without any doubt, the VIP has become a feasible insulation material for the improvement of the energy efficiency of buildings. Their high thermal performance, in conjunction with small thicknesses, makes VIP an effective solution for building applications. However, there are obstacles to overcome before the wide scale introduction of VIPs in the building sector. VIP is a sensitive material with lower service life time in contrast to the conventional building materials. Moreover, it is still an expensive material, but manufacturers are optimistic that the cost will be reduced in the following years [70].

VIP is considered as an innovative insulation solution with multiple prospects in the building sector. Several experimental and numerical studies have been carried out regarding the thermal and hygrothermal properties of VIP, [5, 21, 71, 72]. However, there are still a lot of uncertainties about the actual performance in building applications [23]. The actual in-situ thermal and hygrothermal performance of VIPs in real buildings is an under-investigation issue that concerns several researchers and is examined in the following chapters of the current thesis.

References

- [1] J. Fricke, U. Heinemann, H.P. Ebert, Vacuum insulation panels—From research to market, *Vacuum*, 82 (7) (2008) 680-690.
- [2] P. Johansson, Building Retrofit using Vacuum Insulation Panels - Hygrothermal Performance and Durability Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, 2014.
- [3] E.C. Hammond, J.A. Evans, Application of Vacuum Insulation Panels in the cold chain – Analysis of viability, *International Journal of Refrigeration*, 47 (Supplement C) (2014) 58-65.
- [4] S. Brunner, K.G. Wakili, P. Johansson, Vacuum insulation panels (VIP) in refrigerator room, freezing room & fridge, 11th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Switzerland, September 19 – 20, 2013.
- [5] S. Brunner, K. Ghazi Wakili, T. Stahl, B. Binder, Vacuum insulation panels for building applications—Continuous challenges and developments, *Energy and Buildings*, 85 (Supplement C) (2014) 592-596.
- [6] E. Kucukpinar, O. Miesbauer, Y. Carmi, M. Fricke, L. Gullberg, C. Erkey, R. Caps, M. Rochefort, A.G. Moreno, C. Delgado, M. Koehl, P. Holdsworth, K. Noller, Development of Transparent and Opaque Vacuum Insulation Panels for Energy Efficient Buildings, *Energy Procedia*, 78 (2015) 412-417.
- [7] C. Zhai, Z. Li, Y. He, T. Liu, M. Sun, J. Liu, A Comprehensive Study on the Production Process and Properties of Composite Core Materials for Vacuum Insulation Panels for Construction Applications, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [8] M. Alam, H. Singh, S. Suresh, D.A.G. Redpath, Energy and economic analysis of Vacuum Insulation Panels (VIPs) used in non-domestic buildings, *Applied Energy*, 188 (Supplement C) (2017) 1-8.
- [9] H. Simmler, S. Brunner, U. Heinemann, H. Schwab, K. Kumaran, P. Mukhopadhyaya, D. Quénard, H. Sallée, K. Noller, E. Küçükpinar-Niarchos, C. Stramm, M. Tenpierik, H. Cauberg, M. Erb, IEA/ECBCS Annex 39, Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), September 2005.
- [10] A. Binz, A. Moosmann, G. Steinke, U. Schonhardt, F. Fregnan, H. Simmler, S. Brunner, K. Ghazi, R. Bundi, U. Heinemann, H. Schwab, H. Cauberg, M. Tenpierik, G. Johannesson, T. Thorsell, M. Erb, B. Nussbaumer, IEA/ECBCS Annex 39, Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications (Subtask B), December 2005.
- [11] R. Baetens, B.P. Jelle, J.V. Thue, M.J. Tenpierik, S. Grynning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond, *Energy and Buildings*, 42 (2) (2010) 147-172.
- [12] T. Thorsell, Advances in Thermal Insulation - Vacuum Insulation Panels and Thermal Efficiency to Reduce Energy Usage in Buildings, Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering 2012.

- [13] M. Alam, H. Singh, M.C. Limbachiya, Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions, *Applied Energy*, 88 (11) (2011) 3592-3602.
- [14] A.A. Stec, T.R. Hull, Assessment of the fire toxicity of building insulation materials, *Energy and Buildings*, 43 (2) (2011) 498-506.
- [15] M.G. Kaganer, *Thermal Insulation in Cryogenic Engineering*, Israel Program for Scientific Translations, 1969.
- [16] ASTM C1484-10, Standard Specification for Vacuum Insulation Panels.
- [17] E. Wegger, B.P. Jelle, E. Sveipe, S. Grynning, A. Gustavsen, R. Baetens, J.V. Thue, Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels, *Journal of Building Physics*, 35 (2) (2011) 128-167.
- [18] Hans Simmler, Samuel Brunner, Aging and Service Life of VIP in Buildings 7th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Duebendorf, Switzerland, September 28-29, 2005
- [19] E. Malliotakis, I. Mandilaras, D. Kontogeorgos, D. Katsourinis, M. Founti, The Ageing Effects of Vacuum Insulation Panels (VIPs) on the Long Term Thermal Performance of a Building Envelope with the use of Dynamic Simulation Tools, 11th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Dubendorf, Switzerland, 2013.
- [20] H. Schwab, U. Heinemann, A. Beck, H.-P. Ebert, J. Fricke, Prediction of Service Life for Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernel and Foil Cover, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28 (4) (2005) 357-374.
- [21] H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life, *Energy and Buildings*, 37 (11) (2005) 1122-1131.
- [22] Hans Cauberg, Martin Tenpierik, Sound Reduction of Vacuum Insulation Based Facade Panels 8th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Würzburg, Germany, 18 - 19 September 2007.
- [23] S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways, *Applied Energy*, 116 (Supplement C) (2014) 355-375.
- [24] Martin Tenpierik Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions Doctoral thesis, Building Technology, Delft University of Technology, 2010.
- [25] D.A. Kontogeorgos, G.K. Semitelos, I.D. Mandilaras, R. Caps, M.A. Founti, Experimental determination of the effective thermal conductivity of Vacuum Insulation Panels at fire temperatures, *Fire and Materials*, 41 (6) (2017) 738-749.
- [26] D.A. Kontogeorgos, G.K. Semitelos, I.D. Mandilaras, M.A. Founti, Experimental investigation of the fire resistance of multi-layer drywall systems incorporating Vacuum Insulation Panels and Phase Change Materials, *Fire Safety Journal*, 81 (Supplement C) (2016) 8-16.
- [27] U. Schonhardt, A. Binz, M. Wohler, R. Dott, Ökobilanz eines Vakuüm-Isolations-Paneels (VIP) Institut für Energie, Fachhochschule beider Basel, Muttenz (2003).
- [28] K.G. Wakili, R. Bundi, B. Binder, Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels, *Building Research & Information*, 32 (4) (2004) 293-299.

- [29] M. Tenpierik, W. van der Spoel, H. Cauberg, Analytical Model for Predicting Thermal Bridge Effects due to Vacuum Insulation Panel Barrier Envelopes, *Bauphysik*, 30 (1) (2008) 38-45.
- [30] ISO 22007-2:2015, Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method.
- [31] BS EN 12667:2001, Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance.
- [32] ASTM C177 - 13, Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
- [33] C. Sprengard, L. Berger, Overall thermal performance of VIP – Comparison of Hot-Plate Measurements (GHP and HFM), Hot-Box Measurements and numerical simulation, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [34] C. Baldwin, C.A. Cruickshank, M. Schiedel, B. Conley, Comparison of Steady-state and In-situ Testing of High Thermal Resistance Walls Incorporating Vacuum Insulation Panels, *Energy Procedia*, 78 (Supplement C) (2015) 3246-3251.
- [35] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, VIPs Thermal Conductivity Measurement: Test Methods, Limits and Uncertainty, *Energy Procedia*, 78 (Supplement C) (2015) 418-423.
- [36] K. Martin, A. Campos-Celador, C. Escudero, I. Gómez, J.M. Sala, Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility, *Energy and Buildings*, 50 (Supplement C) (2012) 139-149.
- [37] P. Johansson, B. Adl-Zarrabi, C.-E. Hagentoft, Using transient plane source sensor for determination of thermal properties of vacuum insulation panels, *Frontiers of Architectural Research*, 1 (4) (2012) 334-340.
- [38] M. Pool, Insulation of a mixed use building with 7 storeys in Munich with VIP, 9th international vacuum insulation symposium (IVIS), London, UK, 17-18 September, 2009.
- [39] P. Mukhopadhyaya, D. MacLean, J. Korn, D. van Reenen, S. Molleti, Building application and thermal performance of vacuum insulation panels (VIPs) in Canadian subarctic climate, *Energy and Buildings*, 85 (Supplement C) (2014) 672-680.
- [40] P. Johansson, C.-E. Hagentoft, A. Sasic Kalagasidis, Retrofitting of a listed brick and wood building using vacuum insulation panels on the exterior of the facade: Measurements and simulations, *Energy and Buildings*, 73 (Supplement C) (2014) 92-104.
- [41] F. Ascione, R.F. De Masi, R.M. Mastrullo, S. Ruggiero, G.P. Vanoli, Experimental investigation and numerical evaluation of adoption of multi-layered wall with vacuum insulation panel for typical Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 152 (2017) 108-123.
- [42] R. Caps, H. Beyrichen, D. Kraus, S. Weismann, Quality control of vacuum insulation panels: Methods of measuring gas pressure, *Vacuum*, 82 (7) (2008) 691-699.
- [43] B. Yrieix, E. Pons, New method to assess the air permeance into vacuum insulation panel, *Vacuum*, 148 (2018) 265-271.
- [44] D. Kraus, D. Büttner, U. Heinemann, J. Fricke, Non-destructive Method to Determine the Water Vapour Pressure in Vacuum Insulation Panels (VIP) 7th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Duebendorf / Zurich, Switzerland, September 28-29, 2005

- [45] R. Caps, Determination of the gas pressure in an evacuated thermal insulating board (vacuum panel) by using a heat sink and test layer that are intergrated therein, in, 2003.
- [46] R. Caps, Monitoring Gas Pressure in Vacuum Insulation Panels 7th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Duebendorf / Zurich, Switzerland September 28-29, 2005
- [47] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, Experimental and numerical investigation of thermal bridging effects of jointed Vacuum Insulation Panels, Energy and Buildings, 111 (Supplement C) (2016) 164-175.
- [48] J.J.M. Cauberg, M.J. Tenpierik, From VIP to Building Panel 7th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Duebendorf / Zurich, Switzerland September 28-29, 2005
- [49] M. Tenpierik, H. Cauberg, Analytical models for calculating thermal bridge effects caused by thin high barrier envelopes around vacuum insulation panels, Journal of Building Physics, 30 (2007) 185-215.
- [50] K.G. Wakili, T. Stahl, R. Vonbank, S. Brunner, Dry and wet application of VIP layers as internal insulation to brick walls. Measurement and Simulation, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [51] A. Uriarte, I. Garai, A. Ferdinando, O. Nicolas, E. Barreiro, Affordable and adaptable super-insulation solutions for energy efficient retrofitting of public buildings, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [52] T. Voellinger, A. Bassi, M. Heitel, Facilitating the incorporation of VIP into precast concrete sandwich panels, Energy and Buildings, 85 (Supplement C) (2014) 666-671.
- [53] R. Kunič, Vacuum Insulation Panels - An Assessment of the Impact of Accelerated Ageing on Service Life, 2012, 58 (10) (2012) 9.
- [54] M.J. Tenpierik, J.J.M. Cauberg, Encapsulated vacuum insulation panels: theoretical thermal optimization, Building Research & Information, 38 (6) (2010) 660-669.
- [55] Morgan Advanced Materials, Vacuum Insulation Panels for the Building Industry, <http://www.bauvip.de/en/products-bauvip.html>, 2018.
- [56] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, The Effect of Different Materials Joint in Vacuum Insulation Panels, Energy Procedia, 62 (Supplement C) (2014) 374-381.
- [57] A. Binz, G. Steinke, Applications of Vacuum Insulation in the Building Sector, 7th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Duebendorf / Zurich, Switzerland September 28-29, 2005
- [58] T. Nussbaumer, R. Bundi, C. Tanner, H. Muehlebach, Thermal analysis of a wooden door system with integrated vacuum insulation panels, Energy and Buildings, 37 (11) (2005) 1107-1113.
- [59] M. Cláudio, S. Paulo, S. Luís Simões da, Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study, Journal of Building Physics, 39 (4) (2015) 342-372.
- [60] H. Thomas, J. Bjørn Petter, G. Arild, Vacuum insulation panels in wood frame wall constructions with different stud profiles, Journal of Building Physics, 36 (2) (2012) 212-226.

- [61] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, D. Quenard, Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, *Energy and Buildings*, 38 (6) (2006) 673-681.
- [62] VIP-Bau, <http://www.vip-bau.de>, 2018.
- [63] M. Pool, Insulation of a mixed use building with 7 storeys in Munich with VIP, 9th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), London, UK, 17-18 September 2009.
- [64] P. Mukhopadhyaya, D. MacLean, J. Korn, M. Ooms, T.T. Zhang, S. Mooney, In Situ Performance of Glass Fiber Core VIPs in Extreme Cold Climate, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [65] P. Johansson, B. Adl-Zarrabi, A. Sasic Kalagasidis, Evaluation of 5 years' performance of VIPs in a retrofitted building façade, *Energy and Buildings*, 130 (Supplement C) (2016) 488-494.
- [66] S. Brunner, H. Simmler, In situ performance assessment of vacuum insulation panels in a flat roof construction, *Vacuum*, 82 (7) (2008) 700-707.
- [67] U. Heinemann, R. Kastner, VIP-PROVE: Vakuumisolationspaneele - Bewährung in der Baupraxis. Wissenschaftliche Begleitforschung. Schlussbericht Energieoptimiertes Bauen, 2010.
- [68] U. Heinemann, R. Kastner, S. Braxmeier, VIP-PROVE - Vacuum insulation for buildings in the practical application, 9th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), London, UK, 17-18 September, 2009.
- [69] M. Alam, H. Singh, A combined life cycle cost and energy analysis of Vacuum insulation Panels (VIPs) in building applications, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [70] Y. Carmi, H. Yitzhaki, PST Metallized Films - A New Era of Performance and Prices, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [71] M. Alam, H. Singh, S. Brunner, C. Naziris, Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core, *Energy and Buildings*, 69 (Supplement C) (2014) 442-450.
- [72] D.E. Awuye, Z. Chen, A. Shahzad, B. Li, W. Xuejia, L. Xudong, Characterization and properties of vacuum insulation panel (VIP) with silica-fly ash powder composite core material, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.

CHAPTER 4

AN EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE STANDARDIZED METHODS FOR THE IN-SITU MEASUREMENT OF THE WALL THERMAL RESISTANCE

Contents

4.1	Introduction.....	68
4.2	Current status for the in-situ measurement of the wall thermal performance	68
4.3	Standardized methods for the in-situ R-value measurement.....	72
4.4	Development of computational tools for the employment of standardized methods....	75
4.5	Parameters for the comparison of standardized methods.....	77
4.6	Experimental set-up	77
4.7	Results and discussion	80
4.8	Conclusions.....	84
	References	86

Summary

The present chapter is dedicated to the in-situ thermal performance assessment of building walls by means of the R-value measurements. After an extensive literature review concerning the current status of the existing methods for the R-value measurement, the focus is on the four standardized methods described in two international standards: ISO 9869 and ASTM C1155. The standardized methods are compared in terms of the required measuring period, the variability of results and the effect of the measuring conditions on these two parameters by means of the thermal resistance measurement of tree walls. The outcomes provide guidelines for the in-situ R-value measurement, the pre-processing of measurements and the selection of the appropriate method. The results of the current work have been published in the international journal Energy and Buildings [1].

4.1 Introduction

As it has been mentioned in previous chapters, the thermal performance assessment of the building envelope may be performed by several methods, calculating a number of energy indicators. Among them, the thermal resistance, R-value, and the thermal transmittance, U-value, are the most widely used indicators for the characterization of the wall thermal performance. As discussed in Chapter 2, the R-value is the most representative measure indicating the insulation level of the wall. The theoretical calculation of the R-value, according to ISO 6946 standard [2], is essential during the design stage of a building. However, the results may vary and deteriorate in practice due to construction irregularities, the quality of workmanship, multi-dimensional heat and moisture flow and material degradation effects [3, 4]. In the cases of existing buildings, the determination of R-value is complex, since the material thermal properties are usually unknown and the experimental test should be fast and non-destructive. Therefore, the in-situ R-value measurement may be required for post-evaluation of the envelope thermal performance especially in cases of renovation but also for providing real values to BIM platforms and energy efficiency evaluation software.

The most common way for the in-situ R-value measurement for an existing wall is the implementation of a standardized method. There are totally four standardized method introduced by the ISO 9869 [5] and ASTM C1155 [6] standards. Besides, many studies have proposed methodologies based on the concept of the standardized methods [7, 8]. All methods require the consecutive measurement of the internal and external surface temperature and the inner heat flux for more than 3 days. Despite the wide use of the standardized methods, two issues have to be faced: the required measuring period and the precision of the results [9, 10]. At the same time, the methods are affected by the measuring conditions, i.e. the internal/external temperature difference [4, 11].

In this direction, the main aim of the current chapter is to address the above issues by evaluating the standardized methods for the in-situ R-value measurements of building walls in terms of the required measuring period, the variability of the results and the effect of the measuring conditions on these two parameters. In particular, after an extensive literature review concerning the current status of the existing methods for the R-value measurement, the focus is on the evaluation of the standardized methods. Appropriate computational tools and experimental setups are developed for the implementation of the methods. Moreover, the current study introduces a criterion for the determination of the required measuring period for the methods which is not clearly defined by the standards. All methods are employed for the R-value measurement of three different building walls (a lightweight drywall construction, a rubble and a brick wall) under different measuring conditions. The examined measuring conditions are the surface temperature difference and the direction of heat flow (stable or alternating during the day). The results provide guidelines for the in-situ calculation of the thermal resistance of an existing wall, the pre-processing of measurements and the selection of the appropriate method.

4.2 Current status for the in-situ measurement of the wall thermal performance

There are several methods for the measurement of the thermal resistance (R-value) or the thermal transmittance (U-value) of a building wall. The methods can be separated into two categories: the laboratory methods and the in-situ measurements. In laboratory methods, the examined wall is a test sample which separates two environments with controlled conditions by means of a special laboratory

apparatus. All types of envelope elements can be measured by these methods. The most widely used laboratory method is the Hot Box method, described by ISO 8990 and ASTM C1363 standards [12, 13]. However, several studies propose methods for the characterization of the thermal performance of envelope elements in controlled conditions [14-17].

On the other hand, the in-situ methods concern the measurement of existing envelope elements in real buildings. The examined wall is exposed under real weather conditions making more difficult the measuring procedure. As the weather conditions is intrinsically dynamic, the measurement of an stationary indicator, such as R-value or U-value, is complicated [4]. The applicability of the different methods is determined by their ability to deal with the variation of climate conditions.

Another significant issue for the in-situ measurement of wall thermal performance is the type of the under-investigation wall. For homogenous and massive walls, the analysis of methods is based on the one-dimensional heat transfer assumption, choosing a representative area at the center of the wall, avoiding the thermal bridges. On the contrary, for non-homogenous walls, with several not negligible thermal bridges, such as lightweight steel-framed walls, the in-situ measurement is more complicated. As, in the majority of cases, the type of the examined wall is not a priori known, a thermography test is carried out identifying possible thermal bridges (and as a result the homogeneity of the wall).

4.2.1 Homogenous walls

The only reliable technique for the quantitative measurement of the R-value of an existing wall is the Heat Flux Meter (HFM) technique. The HFM is a non-destructive technique requiring the measurements of the internal heat flux and temperature at the inner and outer surface of the wall for a period of time. As the measurements are local, the measuring area should be representative for the entire wall. Hence, the HFM techniques should be applied in homogenous walls. Another technique for the R-value determination is the infrared thermography (IRT) [18, 19]. IRT is more a qualitative approach and further research is required to quantify the influence of several parameters, such as the air velocity, heat transfer coefficients, emissivity, etc.

Since the 1980s, in-situ R-value measurement has been the topic of many research works that involve the analysis of the collected HFM measurements in different ways for the calculation of the R-value [7, 8, 20-26]. According to the literature there are two main approaches for the analysis: a) modeling of the envelope with RC networks (analogical to electrical RC networks) and use of system identification tools [14, 27-31] and b) the use of standardized methods [5, 6] (often with minor modifications). The system identification methods can conditionally provide more accurate results as long as the tools developed are adequately validated and the users are highly experienced [32]. On the other hand, the standardized methods are more likely to produce reliable results when used by non-experienced users and thus, are the most widely used.

The system identification models are based on the identification of parameters of a model that describes the thermal behavior of buildings or building envelope elements [33]. The model calculates the value of parameters (either physical meaning [27] or not [34]) that minimizes the error between the measured value and the output predicted by the model. AR(MA)X models are widely used system identification models for the analysis of time series of in-situ measurements [29, 35]. ARX-models (autoregressive models with exogenous) are completely black-box, meaning that the model parameters have no direct physical meaning [4]. In the recent years, the renewed use of ARX-models are grey-box models meaning that the model is based on prior physical knowledge, transforming the model

parameters into physical parameters [29, 35]. A software package LORD has been developed for the modelling and identification of building thermal systems, as electrical analogue RC networks. The software have to be utilized by a certain degree of experience [31].

Regarding the standardized methods, two international standards are currently available for the in-situ R-value measurement of building envelope components - ISO 9869 and ASTM C 1155. The two standards introduce four methods that require measurements of the internal and external surface temperature and the internal heat flux. The standards describe in detail the procedure for the in-situ R-value measurement, the convergence criteria and the expected uncertainty. The standardized methods are extensively analyzed in the following sections.

Many researchers have proposed techniques for the in-situ measurement of the thermal performance of existing walls based on the standardized methods. Wang et al. [7] proposed a data analysis method for the in-situ R-value measurement on the basis of measuring both the internal and external heat fluxes and temperatures taking into account the wind velocity. The proposed method improves the precision of the results in comparison with the standardized methods. Rasooli et al. [10] proposed an excitation pulse method for the R-value in-situ measurement, based on the theory of the response factors, reducing significantly the measuring period. Another widely used technique for the in-situ U-value measurement of real walls is the infrared thermography providing results in agreement with the standardized methods [36-39].

In any case it is well known that R-value measurements of the same wall using different methods are not always in agreement. Cesaratto et al. [40] employed different analysis tools (both RC network tools and standardized methods) for the in-situ estimation of the R-value for a large number of walls and they found that the results for each wall could deviate significantly (up to 30%) depending on the analysis tool. Ghazi Wakili et al. [41] showed that the estimations of R-value for a wall using a RC network model and a standardized method may deviate up to 10%. Androutsopoulos et al. [32] compared the spread of the results using different system identification tools for the estimation of the R-value of specific walls. They concluded that the measurements should be analyzed by a person with experience in order to obtain reliable results.

4.2.2 Non-homogenous walls

The existing standardized methods and RC models for the in-situ measurement of R-value or U-value, concern homogenous walls assuming one dimensional heat transfer. The approach of the in-situ measurement of the thermal performance for non-homogenous walls is different. In non-homogenous walls, the heat transfer through the envelope is multi-dimensional, creating temperature variation on the wall surfaces. Hence, the R-value measurement, which requires the surface temperature measurements at a representative area on both wall surfaces, is tricky. To overcome this issue, the thermal performance of non-homogenous walls is evaluated by means of the thermal transmittance, U-value, because it requires the ambient temperatures and not the surface temperatures (section 2.4.2).

The in-situ measurement of the thermal performance of non-homogenous walls, has been dealt with by several researchers [37, 42-44]. The use of infrared thermography is the most widely known technique for the measurement of the thermal behavior of non-homogenous walls. Tejedor et al. [37] measured the U-value of a traditional masonry by means of infrared thermography technique and their results were in a good agreement with the theoretical values. On the contrary, the U-value of the same type of wall (masonry) is measured by means of standardized methods, assuming that the thermal

bridges caused by the difference between the thermal conductivities of stone and mortar is negligible [45, 46].

In lightweight steel-framed walls (LSF) walls, the steel frame introduces strong structural thermal bridges, due to the high thermal conductivity of metal. The presence of metal studs causes a multi-dimensional heat transfer resulting on a non-homogenous temperature gradient inside the wall. The thermal bridges due to metal studs are not negligible and their impact on the thermal performance has to be taken into account on the energy studies of LSF buildings [47, 48]. The main challenge is the measurement of the total thermal transmittance of the wall, including the effect of thermal bridges due to the repeated metal studs at the central part of the wall [49]. This measure, namely overall thermal transmittance of the wall, $U_{overall}$, is vital for the energy assessment of LSF walls.

The standardized method for the experimental calculation of the $U_{overall}$ of LSF walls is the Hot Box method [12, 13]. There is not yet any standardized method for the in-situ measurement of the $U_{overall}$ for real existing LSF walls [50]. However, nowadays a new standard, ISO 9869-2, is under development concerning the in-situ measurement of thermal transmittance of frame structures by means of infrared technique [51, 52].

Many researchers have approached the experimental calculation of the $U_{overall}$ for lightweight walls in laboratory conditions [43, 44, 53-55]. Zalewski et al. [43] combined experimental measurements and numerical simulations in order to calculate the $U_{overall}$ of a LSF wall. The examined wall was investigated in experimental cells. Measurements of surface temperature and heat flux were obtained at different positions of the wall. They used the measured data in order to validate a numerical tridimensional heat transfer model, developed in commercial software. The $U_{overall}$ was calculated using the results obtained by the model. Santos et al. [55] calculated the $U_{overall}$ of a LSF wall based on the Zone Method of ASHRAE [56], which is a simplified and accurate numerical method [57]. They investigated the examined wall in controlled steady state conditions using a test chamber. Temperatures and heat flux measurements were obtained at two zones: the zone of stud and the zone far from stud. The U-values at the two zones were measured and the $U_{overall}$ was obtained as a weighted average of the measured U-values, according to Zone Method. The difference between the theoretical and experimental values of $U_{overall}$ was approximately 9%.

O'Grady et al. [44] introduced an in-situ method of assessing heat loss through studs at lightweight walls, by means of infrared thermography under controlled conditions. The $U_{overall}$ was obtained using thermal images, air temperatures as well as the calculation of the convection heat transfer coefficient using semi-empirical equations and wind velocities measurements. The validation of the method was performed by means of hot box measurements. The results showed that the differences between the $U_{overall}$ from the proposed method and the hot box method were up to 24%. The authors indicated the need of the in-situ implementation of the proposed method in existing walls under real weather conditions, highlighting the main limitations in real buildings (limitation in indoor space, influenced by weather conditions, etc.).

It is obvious that there has been a lot of interest in the measurement of the thermal transmittance of LSF walls. Most of the methods concern applications in laboratory conditions with well-known geometry and materials, such as dimensions and shape of the metal studs. However, a method for the in-situ measurement of the $U_{overall}$ concerning existing LSF walls in real building is missing from the literature. In the frame of the current thesis, two new methods for the in-situ measurement of the $U_{overall}$ of LSF are introduced, the Representative Points Method (RPM) and the Weighted Area Method

(WAM). The following chapter (Chapter 5) describes in detail the procedure for the measurement of the $U_{overall}$ as well as their experimental and theoretical validation.

4.3 Standardized methods for the in-situ R-value measurement

Two international standards propose methods for the R-value measurement of building envelope elements using in-situ measurement data - ISO 9869 and ASTM C 1155 [5, 6]. The ISO 9869 standard introduces the Average and the Dynamic Method, while ASTM C 1155 standard introduces the Summation and the Sum of Least Square Method. For the R-value measurement, all methods require the measurement of the internal and external surface temperature and the heat flux at the internal side of the examined wall for a prolonged period. However, the ISO 9869 states that if the environmental temperatures of both environments are well defined instead of the surface temperatures, the total thermal resistance (R_{tot}) or the thermal transmittance, U-value, of the wall can be measured (see equations 2.6 and 2.7).

For the R-value measurement, the temperature and heat flux sensors should be installed at a representative area of the wall, in homogenous locations avoiding thermal bridges. The standards describe in detail the methodology, as well as the criteria that should be met in order to provide acceptable results (convergence criteria). The equations for the calculation of the R-value, the convergence criteria and the expected uncertainty (for 95% probability) of each method are summarized in Table 4.1.

4.3.1 Description of methods

Average Method

The Average method, according to ISO 9869, assumes a one-dimensional quasi-steady state heat transfer model, which calculates the R-value of an assembly as the quotient of the mean indoor/outdoor temperature difference by the mean density of heat flow. The R-value is obtained by the following equation:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^N q_j} \quad 4.1$$

where q [W/m^2] is the measured heat flux at the internal surface of the wall, T_{si} and T_{se} [$^{\circ}C$] are the internal and external surface temperatures, respectively, and the index j enumerates the individual measurements. According to ISO 9869, a result is obtained when certain criteria are fulfilled, presented in Table 4.1.

As the Average method does not include the impact of thermal mass of the wall, ISO 9869 proposes a data correction taking into account the storage effect of walls with high thermal mass. This correction requires the a priori knowledge of the accurate thermal capacity and thickness of the incorporating layers of the examined wall. This is generally impossible for existing buildings with unknown properties, so this correction is not examined in the current study.

Table 4.1 - The description of four methods according to the standards.

Method	Estimation of R-value	Convergence Criteria	Uncertainty
Average	$R = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^N q_j}$	<p>For a unique R-value result:</p> <ul style="list-style-type: none"> – The duration of data should be at least 3 days. – The value calculated at the end of the data set should not deviate more than $\pm 5\%$ from the respective value obtained 24 hours before. – The resulting value when applying the method to the first 2/3 of data should not deviate by more than $\pm 5\%$ from the respective value when analyzing the last 2/3 of data. – The change in the stored heat in the wall should not be more than 5% of the heat passing through the wall over the measuring period. 	14–28%
Summation	$R = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^N q_j}$	<p>For a unique R-value result:</p> <p>A convergence factor (CR_n) is defined:</p> $CR_n = \frac{R(t) - R(t-n)}{R(t)}$ <ul style="list-style-type: none"> – The value n is a time interval chosen by the user and varies between 6 and 48h. – The factor CR_n should remain below 0.10 for at least 3 periods of n. <p>For more results, the coefficient of variation of results should be less than 10%.</p>	20%
Dynamic	<p>1. The internal wall heat flux q_i (W/m^2) at each time interval t_i is calculated by the following equation:</p> $q_i = \frac{1}{R} (T_{si,i} - T_{se,i}) + K_1 T_{si,i} + K_2 T_{se,i} + \sum_n P_n \sum_{j=i-p}^{i-1} T_{si,j} (1 - \beta_n) \beta_n (i-j) + \sum_n Q_n \sum_{j=i-p}^{i-1} T_{se,j} (1 - \beta_n) \beta_n (i-j)$ <p>2. A linear system of equations is created and is expressed in a matrix form as:</p> $\vec{q} = X \cdot \vec{Z}$ <p>\vec{Z} an array including all the unknown parameters, including R-value and X the matrix containing the measured temperatures with their derivatives.</p> <p>3. The solution that minimizes the sum of the differences $S^2 = (q_i^{calc} - q_i)^2$ between calculated and experimental heat fluxes is calculated by solving the following equation:</p> $\vec{Z} = [(X)'(X)]^{-1} (X)' q$	<p>For a unique R-value result:</p> <ul style="list-style-type: none"> – The goodness of fit between the experimental and the calculated values of heat flux indicates the accuracy of result. – The uncertainty (as it is defined by the standard) should be lower than 10% for probability 0.90. 	13%
Sum of Least Square (SLS)	<p>1. The masonry is assumed to be thermally equivalent to a homogenous and one layered wall with the real thickness, d, and unknown thermal properties.</p> <p>2. The governing equation of conductive heat transfer in the assumed wall is:</p> $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = (\rho \cdot C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t}$ <p>where λ_{eq} and $(\rho \cdot C_p)_{eq}$ are the thermal conductivity and the heat capacity of the equivalent wall respectively.</p> <p>3. The equation can be solved with the Crank-Nicholson method, assuming the thermal properties, λ_{eq} and $(\rho \cdot C_p)_{eq}$, and defining the measuring data as boundary conditions.</p> <p>4. The calculated heat flux or temperature values are compared with the experimental values.</p>	<p>For a unique R-value result:</p> <ul style="list-style-type: none"> – The goodness of fit between the experimental and the calculated values of heat flux indicates the accuracy of result. <p>For more results, the uncertainty remains within 10% at a 95% confidence interval.</p>	11%

Summation Method

The Summation method, according to ASTM C1155, is similar with the Average, since both methods are based on the same assumption, concerning the quasi steady state model, and the resulting R-value is obtained by the same equation (4.1). The main difference between the two methods concerns the convergence criteria for the R-value calculation and the end of the measuring period. The criteria of the Summation methods are summarized in Table 4.1.

Dynamic Method

The Dynamic method, according to ISO 9869, assumes that the heat flux, q_i , at each time t_i is a function of the previous measured temperatures and several parameters, among which is the R-value of the wall (Table 4.1). The method requires the development of a linear model for the calculation of the heat flux taking into account only the measured surface temperatures. The R-value is calculated for the minimization of the differences between the measured and calculated heat flux values. The accuracy of method depends on the agreement between the calculated and experimental heat flux values and the duration of the measuring period [9].

Sum of Least Square Method

The Sum of Least Square (SLS) method, according to ASTM C1155, assumes that the temperature and heat flux measurements are obtained from a one-layered homogenous wall with equivalent thermal properties and the same thickness. The method requires the development of a code for the numerical solution of the transient conduction heat transfer equation. The measurements of each side are assumed as boundary conditions and the model calculates the temperatures or the heat fluxes at the internal side which are not used as boundary condition (Table 4.1). The final result is obtained for the optimum thermal properties that minimizes the differences between the measured and the calculated values. As in Dynamic method, the fit of the experimental to the calculated values indicates the accuracy of results and the duration of the measuring period.

4.3.2 Characteristics of methods

Special requirements, limitations and features of the methods are provided by the standards and the literature. The Average and the Summation methods are similar to each other with their main advantages being the simplicity in use and the rapid export of results, making them the most widely used methods. However, their precision strongly depends on the measuring conditions [4-6]. A large mean temperature difference between the internal and external surface of the wall is needed for fast and accurate convergence of the methods [6, 8, 58, 59]. As the model does not take into consideration the thermal storage of the envelope, these methods are sensitive to gradual increase or decrease of the mean (in terms of time and space) wall temperature, especially for massive constructions [6]. Large fluctuations in the internal and external wall surface temperature during and shortly prior to the test increases the required duration of the measurements [60].

On the other hand, the Sum of Least Square and the Dynamic method, are more likely to provide reliable results regardless of the measuring conditions [5, 6], but require the development of complex algorithms and computational tools for the analysis of the time series data due to their sophisticated methodology. For this reason, these methods are less commonly used. The methods take into account the thermal variations by the use of the heat equation. Hence, it can be used when large variations occur in temperature and heat flow rates.

The main limitation of all the standardized methods is that the precision of the R-value measurement depends on the measuring conditions and the duration of the measuring period. Generally, the optimum measuring conditions are the high temperature difference with low temperature variations. Flanders et al. [11] analyzed the estimations of R-value using the two ASTM methods (Summation and Sum of Least Square method) and concluded that the agreement between the two methods was within 1%-13% for cases with high internal and external surface temperature difference. Comparison studies between the two ISO methods (Average and Dynamic method) in terms of different measuring conditions have concluded that the Average method performs equally well to the Dynamic method when the measuring conditions are optimum. In case of low temperature difference only the Dynamic method leads to reliable results [4, 9]. Moreover, the results of two methods were stable when the indoor temperature was constant before and during the measuring period [61].

The second critical measuring parameter is the required duration of the measurements. It can be defined as the minimum duration required by the method in order to provide reliable results. According to the standards this duration can range from 72 hours to more than 7 days, depending on the method, the measuring conditions and the type of the tested wall. In case of the Average and Summation methods, the required duration, referred as convergence time, is determined by different convergence criteria for each method. However, the required duration of the Dynamic and the SLS methods is not clearly defined by the standards. Gaspar et al. [9] showed that the accuracy of the Dynamic method was significantly improved by extending the measuring period.

From the literature review, it becomes clear that the main weaknesses of the standardized methods, namely the effect of the measuring conditions and the duration of the measuring period, are limiting the usability of the methods and can potentially increase the uncertainty of the results. Gaspar et al. [9] suggested that further investigation regarding the optimum measuring period is needed in order to improve the reliability of the results. Furthermore, Desogus et al. [59] have concluded, that it is difficult to achieve ideal environmental measuring conditions especially in mild climates and the solution to that could be the selection of the appropriate method among the available standardized methods.

The following sections address the above issues focusing on the evaluation of the standardized methods in terms of the required measuring period, the variability of the results and the impact of the measuring conditions on these two parameters. For this reason, the standardized methods are employed in three different types of existing walls under different measuring conditions. In the same time, a criterion for the determination of the required measuring period for the Dynamic and the SLS methods is introduced and validated.

4.4 Development of computational tools for the employment of standardized methods

The four standardized methods are employed for three different walls under different conditions. The required measuring data sets involve measurements of the internal and external surface temperature and the internal heat flux. The duration of each data set is at least 72 h and integer multiple of 24 h. For the scope of this study, FORTRAN codes are developed in order to implement the methods.

In the case of the Average and Summation methods, the codes compute the R-value according to the equation 4.1 and examine if the convergence criteria (Table 4.1) are met for a given data set. When a data set provides an acceptable value, the convergence to an asymptotical value is examined with graphical charts (Figure 4.1a).

In the case of the Dynamic method, a linear model is developed calculating the heat flux values of a data set using only the measured temperatures, according to the equation of the Table 4.1. The model examines the differences between the calculated and measured values and a graph confirms the fit (Figure 4.1b).

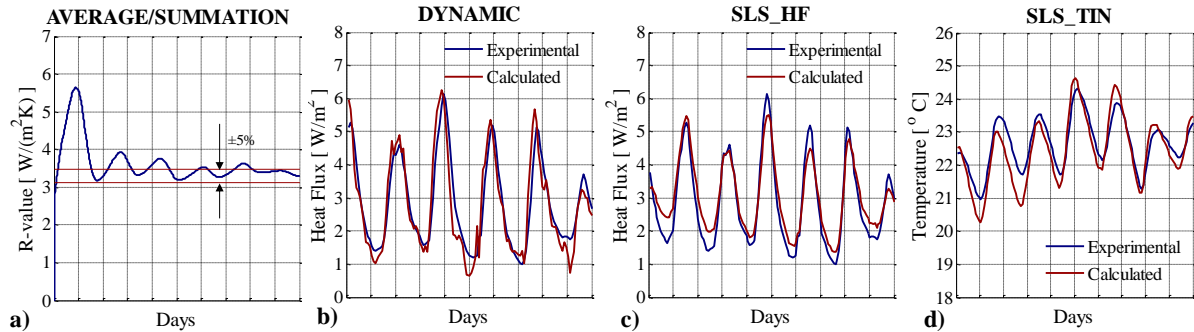


Figure 4.1 – Output graph obtained from each model for a data set: a) Average and Summation convergence, b) Fit of heat flux values from Dynamic, c) Fit of heat flux values from SLS_HF and d) Fit of internal surface temperature values from SLS_TIN.

Regarding the Sum of Least Square (SLS) method, the conduction heat transfer equation (Table 4.1) can be solved with two different ways, each one is approached as a different method. The first, namely the SLS_HF (Sum of Least Square of the error between the measured and the calculated Heat Flux) method, uses the measured internal and external surface temperatures as boundary conditions in order to calculate the heat flux at the internal surface. Next, the sum of squares, S , of the differences between the experimental and the calculated heat flux values (Figure 4.1c), is calculated as follows:

$$S = \sum_{i=1}^N (q_i^{\text{exp}} - q_i^{\text{calc}})^2 \quad 4.2$$

where q^{exp} and q^{calc} [W/m^2] are the measured and the calculated heat flux values respectively and N is the number of measurements.

In the second approach, SLS_TIN (Sum of Least Square of the error between the measured and the calculated Internal Temperature) method, the measured external surface temperature and the internal wall heat flux are employed as boundary conditions in order to calculate the internal surface temperature. The sum S , is calculated as the sum of squares of the differences between the experimental internal temperatures, T_{si}^{exp} [$^{\circ}\text{C}$], and the calculated T_{si}^{calc} [$^{\circ}\text{C}$] ones, as expressed in the following equation for N measurements:

$$S = \sum_{i=1}^N (T_{si}^{\text{exp}} - T_{si}^{\text{calc}})^2 \quad 4.3$$

In both methods the S value is calculated for different combinations of thermal properties (thermal conductivity, λ , density, ρ and specific heat capacity, Cp) of the tested wall. The thermal properties that minimize the sum S are used for the determination of the R-value of the wall. In doing so and having given the real thickness of the wall, the two SLS methods provide not only the equivalent thermal conductivity, λ_{eq} , of the wall, but also the equivalent heat capacity $(\rho \cdot Cp)_{eq}$. The fit between the measured and the calculated values is confirmed by a graph, for the use of the optimum properties on the model (Figure 4.1c and Figure 4.1d).

4.5 Parameters for the comparison of standardized methods

The standardized methods are compared in terms of the required measuring period and the variability of the results for different measuring conditions. Apart from the duration and the measuring conditions, there are several other factors that can increase the total uncertainty of the results, such as the accuracy of the measuring equipment, the homogeneity of the tested wall, the presence of moisture and the thermal radiation [5]. For the comparison of the methods in the current thesis, these factors were avoided as possible and their influence was common for all cases.

The required measuring period is defined as the shortest duration of data set needed to obtain an acceptable result according to the standards. In this study, the R-value was calculated using data series with different durations, from 3 days up to 30 days. The required measuring period was calculated as follows:

- a) For the Average and Summation methods, the required measuring period is the shortest duration in which their convergence criteria are met, as described by their standards.
- b) For the Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN methods the required measuring period is not defined by the standards. For this reason, a criterion for the required measuring period is introduced as the duration in which the last three obtained daily values do not deviate more than $\nu = 3\%$. The reason is that higher values of ν increases the variability of the results to unacceptable levels. Moreover, the use of more than 3 previous daily values results to longer required measuring period without further improvement on the variability of the results.

The variability of the results is examined by calculating the coefficient of variation, %CV, (often known as relative standard deviation) of the resulting R-values. It expresses an estimation of the amount of random variation expected when applying the method many times and is calculated as follows:

$$CV(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (R_i - \bar{R})^2}{M - 1}} \cdot \frac{1}{\bar{R}} \cdot 100\% \quad 4.4$$

where, \bar{R} is the average R-value and M the number of the resulting R-values ($M \geq 3$).

The error of the results is estimated with 95.4% confidence level according to the equation:

$$e(\%) = 2 \cdot CV(\%) \quad 4.5$$

The standards define the maximum value for the expected coefficient of variation. According to ISO standard, the CV of the Average and Dynamic method is expected to be 10% and 6% (for confidence level 90%), respectively. When the variation exceeds these values, the results are not rejected, but their uncertainty increases accordingly. On the other hand, the CV of the Summation and the two SLS methods expected to be 10% and 6% (for confidence level 95.4%), respectively and when the variation exceeds these values, the results are not accepted, according to ASTM standard.

4.6 Experimental set-up

The standardized methods are compared in terms of the required measuring period and the variability of results. For this reason, an experimental set-up was developed for the implementation of methods in three walls under different measuring conditions. This section describes the examined walls,

the measuring equipment and the environmental conditions under which the in-situ R-value measurements were performed.

4.6.1 Wall configurations

For the comparison of the standardized methods, three different walls were examined:

- Wall A: Drywall construction
- Wall B: Traditional rubble wall
- Wall C: Brick wall

Table 4.2 presents a section of each wall and the thicknesses of the incorporating layers. The Wall A, 360 mm thick, is located in a two-storey experimental mock up building inside the campus of National Technical University of Athens. It is a drywall construction based on a cavity wall system incorporating an External Thermal Insulation Composite System (ETICS). A composite insulation component consisting of two layers of mineral wool and a 20 mm thick layer of vacuum insulated panel (VIP) is included in the ETICS. The drywall materials are anchored on a metal frame structure, however the impact of studs is almost negligible, because the studs do not penetrate the whole thickness of the air cavity layer, as well as the insulation is located outside the framing (warm type of LSF wall, according to [50]). This is reflected on the theoretical R-value, which was calculated equal to 4.307 m²K/W including the metal studs and 4.315 m²K/W excluding the impact of studs. For these reasons, the wall is considered as homogenous wall without any limitation for the implementation of the standardized methods. Further description and thermal performance analysis of the Wall A is performed in the Chapter 6 (section 6.2), in which the experimental investigation of the wall is carried out.

The Wall B, 600 mm thick, is a heavy rubble wall situated in a historical building in Athens [62]. The wall consists of approximately 60 – 70% stone and the rest are mortar. The theoretical R-value is expected to be ca. 0.37 m²K/W. The Wall C is a typical brick wall with a thick layer of mortar at the two wall surfaces, located at the same historical building with theoretical R-value equal to 0.36 m²K/W. The total thickness of the Wall C is equal to 220 mm.

4.6.2 Instrumentation

The Hukseflux TRSYS01 equipment (Figure 4.2a), was used for the in-situ temperature and heat flux measurements and the calculation of the thermal resistance [63]. The system is equipped with two heat flux sensors and two pairs of matched thermocouples for differential temperature measurements (Figure 4.2b). The thermal resistance of the heat flux sensors is less than $6.25 \cdot 10^{-3}$ m²K/W and can be considered negligible in relation to the total thermal resistance of the examined walls. The sensitivity of the sensors is approximately 60 μV m²/W and the expected accuracy lies within ±5% of the measured value. The use of matched thermocouple pairs (K type) assures a differential temperature measurement with accuracy less than ± 0.1°C. High accuracy electronics with sensitivity up to 1 microvolt (CR1000, Campbell Scientific) were used for signal conditioning and measurement.

Table 4.2 - The configuration and the incorporating material of the three examined walls.

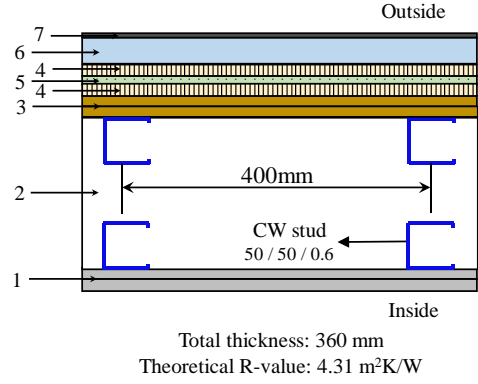
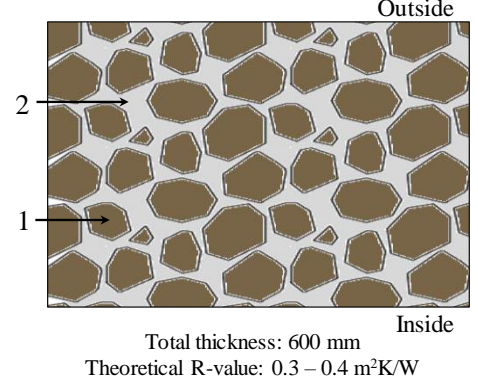
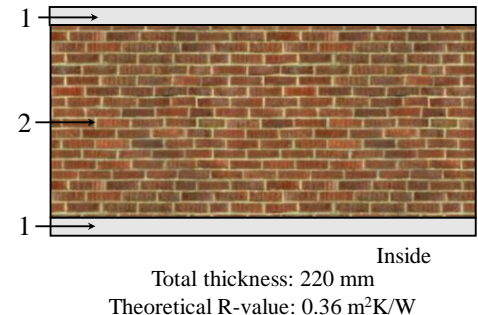
	Wall configuration	n/a	Material	Thickness [mm]
Wall A	 <p>Outside</p> <p>Inside</p> <p>Total thickness: 360 mm Theoretical R-value: 4.31 m²K/W</p>	1	Gypsumboard	2 × 12.5
		2	Air cavity	190
		3	Cement board	2 × 12.5
		4	Mineral Wool	20
		5	VIP	15
		6	Insulation Render	50
		7	Finishing mortar	5.5
Wall B	 <p>Outside</p> <p>Inside</p> <p>Total thickness: 600 mm Theoretical R-value: 0.3 – 0.4 m²K/W</p>	1	Stone	60 – 70 % of total thickness
		2	Mortar	30 – 40 % of total thickness
Wall C	 <p>Outside</p> <p>Inside</p> <p>Total thickness: 220 mm Theoretical R-value: 0.36 m²K/W</p>	1	Mortar	40
		2	Brick	140



Figure 4.2 – Instrumentation: a) The TRSYS01 equipment and b) the temperature and heat flux sensor at the Wall A, c) the temperature and heat flux sensor at the Wall B and d) heat flux sensor at the Wall C.

The sensors were installed according to ASTM C 1046-95 [64] and placed at thermally homogenous locations avoiding thermal bridges. The homogeneity of the tested walls was examined using infrared thermography using an IR camera (FLIR, model 595). Solar radiation on the tested sites was avoided either by selecting the North facing exterior walls or by using shaded surfaces.

4.6.3 Measuring Conditions

In the present study, six different cases were investigated: one case for wall A, three cases for wall B and two cases for wall C. These cases cover different measuring conditions and measuring periods.

Table 4.3 presents the total measurement duration, the average value of the temperature difference between the two surfaces of the walls and the direction of heat flow during the measurements (stable or alternating during the day) for the examined cases. In case A, the wall was monitored for a period of 28 days with high temperature difference between the inside and outside environments. To achieve this temperature difference, a temperature control system using a fan heater was installed inside the building. Wall B was monitored for three distinct periods (cases B1, B2 and B3). During these cases stable heat flow direction was observed and the mean surface temperature difference was lower than 3°C. Wall C was monitored for two distinct periods (cases C1 and C2). In these cases, low temperature difference was observed. The direction of heat flow through the internal wall was alternating during the day.

The data loggers collected data with 1-minute interval. However, the data analysis was based on 5 minutes averaged values.

Table 4.3 - The measuring conditions of the examined cases.

	Case	Duration [days]	$\overline{\Delta T}$ [°C] = $(\overline{T_{in}} - \overline{T_{out}})$	Direction of heat flow
Wall A	A	27	11.0	Stable
	B.1	130	-2.2	Stable
Wall B	B.2	130	0.9	Stable
	B.3	38	-1.6	Stable
Wall C	C.1	66	0.4	Alternating
	C.2	28	0.6	Stable

4.7 Results and discussion

The standardized methods are evaluated in terms of the required measuring period and the variability of their results, as defined in section 4.5. The influence of the measuring conditions (surface temperature difference and direction of heat flow during the day) on the above parameters is investigated. The only input of the models was the available data sets obtained by the measuring equipment. The a priori knowledge of the examined walls and measuring conditions are not required for the current analysis.

4.7.1 Estimation of required measuring period

The required measuring period for each method was examined for the six cases. Figure 4.3 presents the time evolution of the results provided by the four methods and the required measuring period which has been calculated by the models described in section 4.4. It is noted that the measurements start at

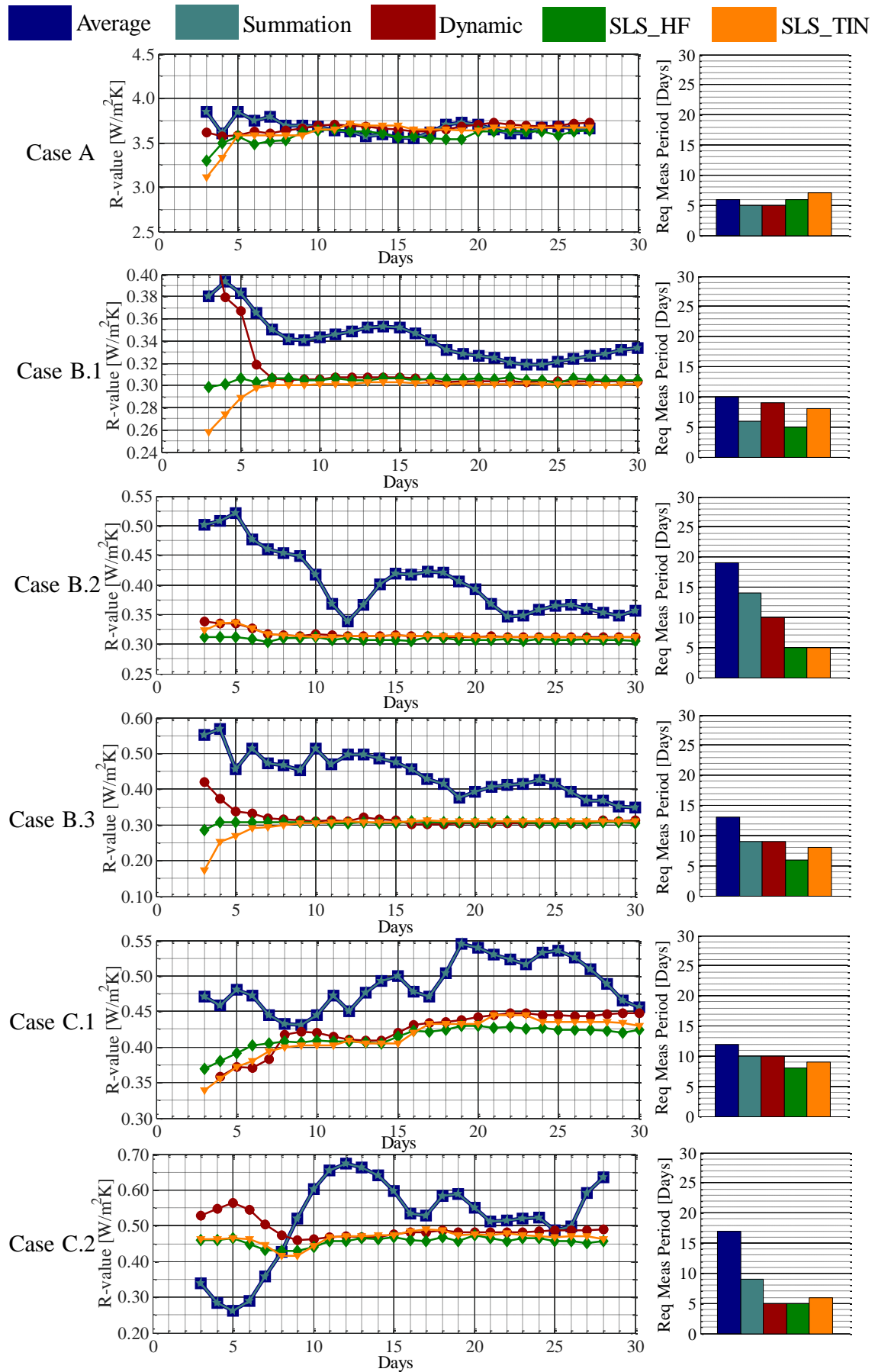


Figure 4.3 - Evolution at the time of R-value results and required measuring period for every method.

day 0 but the first results appear in day 3 according to the standards which define 3 days minimum measuring period before the calculation of the first value.

The results of the Average and Summation methods have the same evolution in time, since R-value is calculated by the same equation (4.1). However, the required measuring period for the two methods varies, because of their different convergence criteria. In case A, where the temperature difference is high (11°C), the Average and Summation methods require 6 and 5 days respectively in order to provide a result which satisfies their criteria. Moreover, the results are close to the R-values of the other three methods. In the other cases, where the surface temperature difference is low, the two methods require 6 to 20 days to provide results that fulfill their criteria. However, in these cases, the results of Average and Summation methods are different and appear to overestimate the R-value compared with the other three methods.

Regarding the Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN methods, it is observed that approximately the same values are provided. The required measuring periods for these methods is always 5 to 10 days and appear to be independent of the measuring conditions. It is observed that the required measuring periods of these methods are not influenced by the thermal mass of the tested wall. Regarding the two SLS methods, despite the fact that they are based on the same concept, their results are different and the required measuring period of SLS_HF is always shorter or equal to that of SLS_TIN method.

4.7.2 Estimation of the variability

In this section, the coefficient of variation (*CV*) of the results was calculated for each method in all cases. At least three independent R-values for each method were used in order to calculate the *CV*. The results were provided by data sets such that the convergence criteria are fulfilled. Additionally, regarding the Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN methods, the obtained results met the criterion for the required measuring period described in section 4.5. Figure 4.4 illustrates the R-value results for the six cases and the *CV* for all methods. In case A, the high surface temperature difference between the two sides of the wall results to low variance for all methods. The *CV* is lower than the expected uncertainty according to the standards.

In all other cases (B.1, B.2, B.3, C.1 and C.2) where the surface temperature difference is lower than 3°C, the *CV* of the Average and Summation method is significantly higher. The effect of the temperature difference on these two methods is in line with the standards which state that the uncertainty of the results depends on the temperature difference. The *CV* of the results for the Average and Summation method exceeds the 10%. Hence, the results of Summation method are rejected according to the ASTM. Regarding the Average method, the *CV* is higher than the expected value, however the ISO standard does not reject the results.

Regarding the SLS_HF method, the *CV* is always lower than 5% in all cases, indicating that the variability of this method is not affected by the measuring conditions. Particularly, in case of wall B, the coefficient of variation is extremely low (1.0% - 1.3%), despite the fact that the duration of the set of data was shorter than 6 days and the thermal mass of the wall was high.

In the cases A, B.1, B.2, B.3 and C.2, where the direction of heat flow is stable during the day (Table 4.3), the *CV* of the Dynamic and SLS_TIN methods is lower than 6%. On the contrary, in the case C.1 where the direction of heat flow is alternating during the day (Table 4.3) the *CV* of these two methods exceeds the 8%. Hence, the results of SLS_TIN method are not accepted according to ASTM

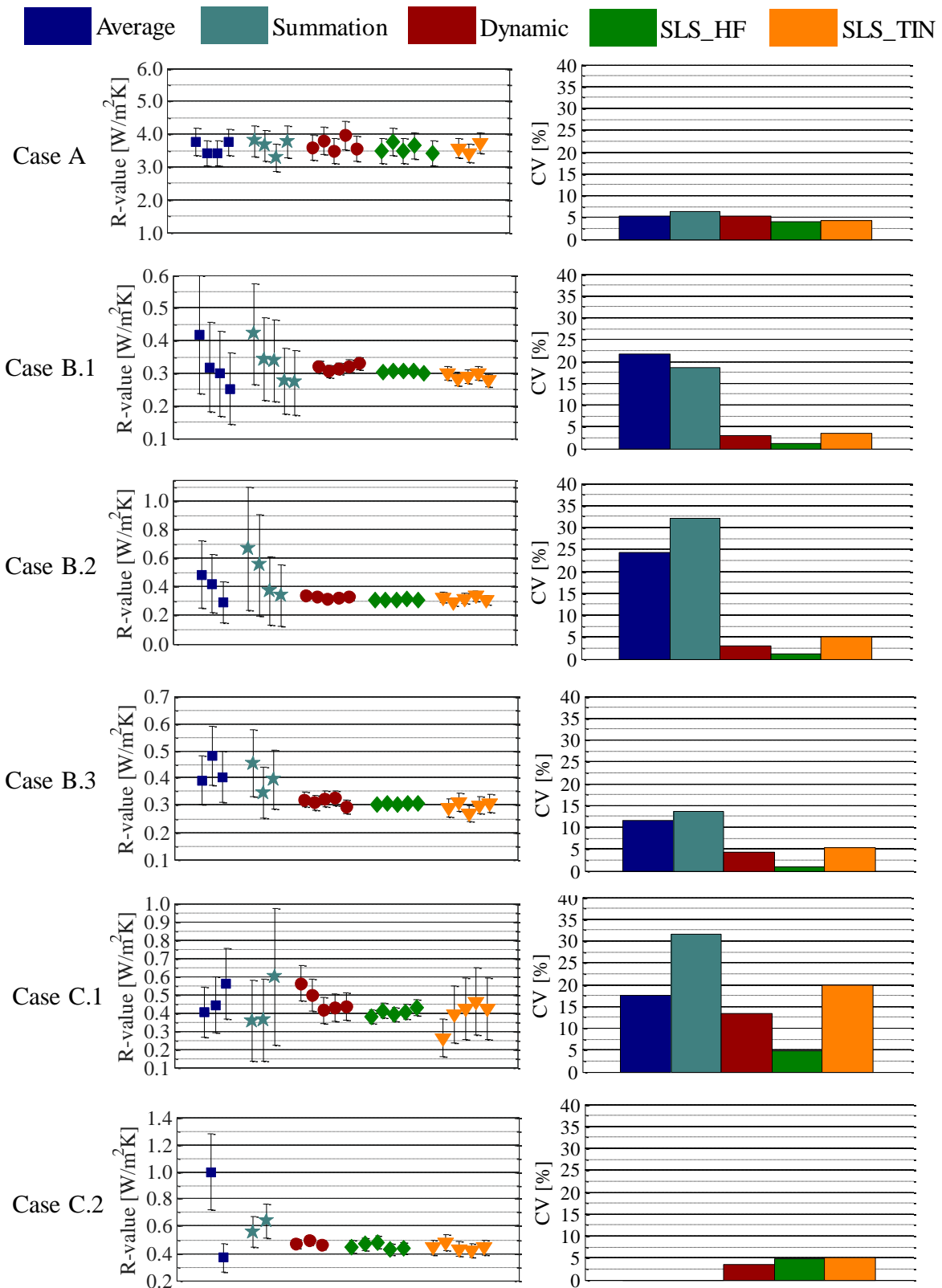


Figure 4.4 - The R-value results and the respective coefficient of variation (CV) for every method.

standards because the CV is higher than 6%. On the other hand, the results of Dynamic method are accepted according to ISO standard, but the uncertainty increase accordingly.

The Dynamic and the SLS_TIN methods were further investigated for the case C.1. Results were obtained for longer duration of data sets than the period defined according to the criterion of section 4.5. Figure 4.5 illustrates the calculated values of CV for the two methods using R-values obtained from 10, 15 and 20 days. Despite of the increase of the duration of data collection, the CV of these methods remains higher than the expected values. It is demonstrated that the high variation of the results for these two methods is independent of the collection duration of data sets.

It should be remarked that in the cases of the rubble wall, the fit between the measured and the calculated values for the Dynamic and SLS methods is perfect. Not only does this indicate the low uncertainty of the results, but also the assumption of the one-dimensional heat transfer is confirmed. Moreover, the IR images obtained by the thermography came to the same conclusion.

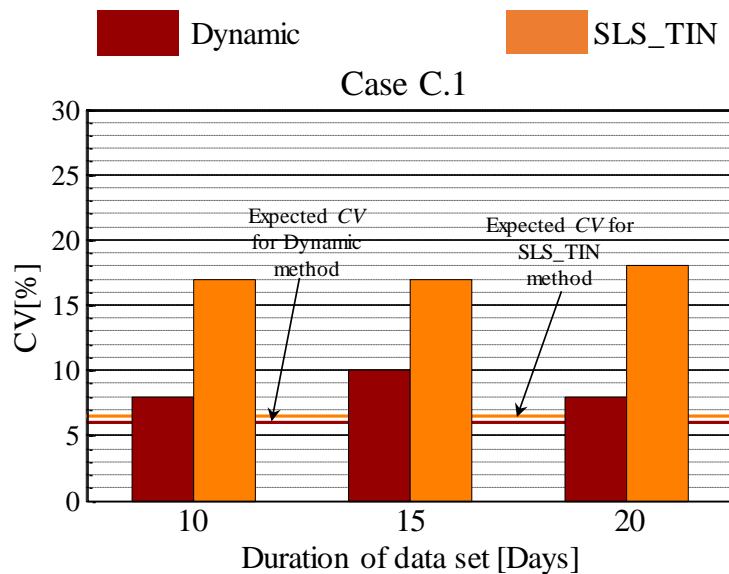


Figure 4.5 - The CV of the Dynamic and SLS_TIN methods for different measuring periods in case C.1.

4.8 Conclusions

The present chapter addressed the experimental thermal performance assessment of existing walls in real buildings. The thermal performance is evaluated in-situ by means of the measurement of the thermal resistance (R-value). After an extensive literature review, the current status of the existing methods for the R-value measurement was presented and categorized into homogenous and non-homogenous walls. The researcher's interest in the methods for the in-situ R-value measurement can be observed and is focused on the standardized methods, as they are the most widely used methods. The two available standards, ISO 9869 and ASTM C1155, introduce four methods: the Average, the Summation, the Dynamic and two different approaches of the Sum of Least Square method (SLS_HF and SLS_TIN). Although, the four methods require measurements of the internal and external surface temperature and internal heat flux, special features and limitations are observed in literature. In the present chapter, a comparative assessment of the four standardized methods was carried out. The effect of measuring conditions on the required measuring period and the variability of the results for each method was investigated.

In the frame of the comparative assessment of the methods, computational models were developed for the implementation of methods. The models require only the data set (temperatures and heat flux measurements) in order to calculate the R-value and examine the convergence criteria, according to the

standards. An experimental set-up was developed for the implementation of methods measuring the R-value of existing walls under different measuring conditions. Six cases in total were examined in three different walls.

The results showed that the mean temperature difference between the surfaces of the wall and the direction of heat flow during the day strongly influence the duration of the required measuring period and the variability of the results. In particular, the Average and Summation methods require a high temperature difference and, as a consequence, a stable direction of heat flow in order to provide acceptable and reliable results in a short measuring period. In cases where the temperature difference was lower than 3°C, the results of Average and Summation method have high and not acceptable coefficients of variation, respectively. Hence, the Average and Summation methods should not be used when the temperature difference is too low or their criteria should be stricter.

The study also investigated the required measuring period of all methods. For the Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN methods, where the required measuring period is not determined by their standards, it was defined as the duration in which the last three obtained daily values do not deviate more than 3%. The results showed that this criterion can be used for these methods at any measuring conditions.

Regarding the variability of the results, the Dynamic and SLS_TIN methods appeared to be affected only by the direction of the heat flow. These methods appeared to require a stable direction of the heat flow during the day in order to provide results with the expected variability. In case where the direction of the heat flow is stable, their results do not deviate more than 6%, which is the expected value according to the standards. On the other hand, when the heat flow direction is changing during the day, the deviation of the Dynamic and SLS_TIN reaches up to 8% and 18% respectively. On the contrary, the SLS_HF method is not affected by the measuring conditions providing fast and reliable results at all cases.

The outcomes provide guidelines for the in-situ measurement of the thermal resistance of an existing wall, the pre-processing of measurements and the selection of the appropriate method. The results of the current study have been published in the international journal *Energy and Buildings* [1].

References

- [1] I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls, *Energy and Buildings*, 154 (Supplement C) (2017) 198-206.
- [2] ISO 6946, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method.
- [3] H. Hens, A. Janssens, W. Depraetere, J. Carmeliet, J. Lecompte, Brick Cavity Walls: A Performance Analysis Based on Measurements and Simulations, *Journal of Building Physics*, 31 (2) (2007) 95-124.
- [4] A.-H. Deconinck, S. Roels, Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements, *Energy and Buildings*, 130 (2016) 309-320.
- [5] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method.
- [6] ASTM C1155 - 95(2013), Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-situ Data.
- [7] F. Wang, D. Wang, X. Wang, J. Yao, A data analysis method for detecting wall thermal resistance considering wind velocity in situ, *Energy and Buildings*, 42 (10) (2010) 1647-1653.
- [8] L. Laurenti, Marcotullio, F. and Filippo de Monte, Determination of the thermal resistance of walls through a dynamic analysis of in-situ data, *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (3) (2004) 297-306.
- [9] K. Gaspar, M. Casals, M. Gangolells, A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value, *Energy and Buildings*, 130 (2016) 592-599.
- [10] A. Rasooli, L. Itard, C.I. Ferreira, A Response Factor-Based Method for the Rapid In-Situ Determination of Wall's Thermal Resistance in Existing Buildings, *Energy and Buildings*, (119) (2016) 51-61.
- [11] S.N. Flanders, A.O. Desjarlais, T.J. Kunz, A comparison of two techniques for R-value calculation, using winter in-situ data, *Thermal Envelops VI/Heat Transfer in Walls*.
- [12] ISO 8990, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box.
- [13] ASTM C1363 - 11, Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus.
- [14] M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras, Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value, *Building and Environment*, 44 (2) (2009) 361-367.
- [15] K. Martín, I. Flores, C. Escudero, A. Apaolaza, J.M. Sala, Methodology for the calculation of response factors through experimental tests and validation with simulation, *Energy and Buildings*, 42 (4) (2010) 461-467.

- [16] P. Baker, IQ-test—improving quality in testing and evaluation of solar and thermal characteristics of building components, *Energy and Buildings*, 36 (5) (2004) 435-441.
- [17] J.M. Sala, A. Urresti, K. Martín, I. Flores, A. Apaolaza, Static and dynamic thermal characterisation of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis, *Energy and Buildings*, 40 (8) (2008) 1513-1520.
- [18] E. Lucchi, Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2018) 3077-3090.
- [19] R. Albatici, A.M. Tonelli, Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site, *Energy and Buildings*, 42 (11) (2010) 2177-2183.
- [20] D.A. McIntyre, In situ measurement of U-values, *Building Services Engineering Research and Technology*, 6 (1985) 1-6.
- [21] M.P. Modera, Sherman, M. H., Sonderegger, R.C., Determining the U-value of a wall from field measurements of heat flux and surface temperatures, ASTM workshop on heat flow sensors, Philadelphia, 1986.
- [22] C. Buratti, S. Grignaffini, Measurement of the thermal resistance of masonry walls, *International Journal of Heat and Technology*, 21 (2) (2003) 107-114.
- [23] C. Buratti, Moretti, E., Thermal resistance of masonry walls: in situ measurements, 6th world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics, and thermodynamics, 2005.
- [24] M. Cucumo, A.D. Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance, *Energy and Buildings*, 38 (3) (2006) 238-244.
- [25] C. Peng, Z. Wu, In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, *Energy and Buildings*, 40 (11) (2008) 2076-2082.
- [26] P.G. Cesaratto, M. De Carli, S. Marinetti, Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation, *Energy and Buildings*, 43 (7) (2011) 1792-1801.
- [27] C. Ghiaus, Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load, *Energy*, 50 (2013) 292-301.
- [28] M.J. Jimenez, B. Porcar, M.R. Heras, Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions, *Sol. Energy*, 82 (7) (2008) 573-587.
- [29] M.J. Jiménez, H. Madsen, K.K. Andersen, Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 170-180.
- [30] M.J. Jiménez, H. Madsen, Models for describing the thermal characteristics of building components, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 152-162.
- [31] O. Gutschker, Parameter identification with the software package LORD, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 163-169.
- [32] A. Androutsopoulos, J.J. Bloem, H.A.L. van Dijk, P.H. Baker, Comparison of user performance when applying system identification for assessment of the energy performance of building components, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 189-196.

- [33] A. Rabl, Parameter Estimation in Buildings: Methods for Dynamic Analysis of Measured Energy Use, *Journal of Solar Energy Engineering*, 110 (1) (1988) 52-66.
- [34] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User* (2nd ed.), 1999.
- [35] I. Naveros, C. Ghiaus, D.P. Ruíz, S. Castaño, Physical parameters identification of walls using ARX models obtained by deduction, *Energy and Buildings*, 108 (2015) 317-329.
- [36] R. Albatici, A.M. Tonelli, M. Chiogna, A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance, *Applied Energy*, 141 (2015) 218-228.
- [37] B. Tejedor, M. Casals, M. Gangolells, X. Roca, Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades, *Energy and Buildings*, 151 (Supplement C) (2017) 187-197.
- [38] C.A. Balaras, A.A. Argiriou, Infrared thermography for building diagnostics, *Energy and Buildings*, 34 (2) (2002) 171-183.
- [39] P.A. Fokaides, S.A. Kalogirou, Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Applied Energy*, 88 (12) (2011) 4358-4365.
- [40] P.G. Cesaratto, M. De Carli, A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings, *Energy and Buildings*, 59 (0) (2013) 29-36.
- [41] K. Ghazi Wakili, B. Binder, M. Zimmermann, C. Tanner, Efficiency verification of a combination of high performance and conventional insulation layers in retrofitting a 130-year old building, *Energy and Buildings*, 82 (Supplement C) (2014) 237-242.
- [42] X. Meng, B. Yan, Y. Gao, J. Wang, W. Zhang, E. Long, Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method, *Energy and Buildings*, 86 (Supplement C) (2015) 754-765.
- [43] L. Zalewski, S. Lassue, D. Rousse, K. Boukhalifa, Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls, *Energy Conversion and Management*, 51 (12) (2010) 2869-2877.
- [44] M. O'Grady, A.A. Lechowska, A.M. Harte, Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging, *Energy and Buildings*, 135 (2017) 20-32.
- [45] E. Lucchi, Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data, *Energy and Buildings*, 151 (Supplement C) (2017) 393-405.
- [46] E. Lucchi, Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements, *Energy and Buildings*, 134 (Supplement C) (2017) 171-184.
- [47] E. de Angelis, E. Serra, Light Steel-frame Walls: Thermal Insulation Performances and Thermal Bridges, *Energy Procedia*, 45 (2014) 362-371.
- [48] D.A. Kontogeorgos, I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, M.A. Founti, Numerical investigation of the effect of vacuum insulation panels on the thermal bridges of a lightweight drywall envelope, *Journal of Facade Design and Engineering*, 4 (1-2) (2016) 3-18.

- [49] E. Barbour, J. Goodrow, J. Kosny, J.E. Christian, Thermal Performance of Steel-Framed Walls, The American Iron and Steel Institute 1994.
- [50] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa, L. Simões da Silva, Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (2017) 194-209.
- [51] ISO/FDIS 9869-2, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 2: Infrared method for frame structure dwelling.
- [52] L. Ibos, J.-P. Monchau, V. Feuillet, Y. Candau, A comparative study of in-situ measurement methods of a building wall thermal resistance using infrared thermography, in: *The International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015*, SPIE, 2015, pp. 10.
- [53] M. Gorgolewski, Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing, *Building and Environment*, 42 (1) (2007) 230-236.
- [54] Y. Li, J. Yao, R. Li, Z. Zhang, J. Zhang, Thermal and energy performance of a steel-bamboo composite wall structure, *Energy and Buildings*, 156 (Supplement C) (2017) 225-237.
- [55] P. Santos, C. Martins, L.S. da Silva, L. Bragança, Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses, *Journal of Building Physics*, 38 (1) (2013) 81-98.
- [56] ASHRAE. 2009, Handbook, Fundamentals, Chapter 27, Heat, air and moisture control in building assemblies - examples.
- [57] J. Kosny, J.E. Christian, Reducing the uncertainties associated with using the ASHRAE zone method for R-value calculations of metal frame walls, in: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), United States*, 1995.
- [58] A. Ahmad, M. Maslehuddin, L.M. Al-Hadhrami, In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls, *Energy and Buildings*, 84 (0) (2014) 132-141.
- [59] G. Desogus, S. Mura, R. Ricciu, Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance, *Energy and Buildings*, 43 (10) (2011) 2613-2620.
- [60] P. Biddulph, V. Gori, C.A. Elwell, C. Scott, C. Rye, R. Lowe, T. Oreszczyn, Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements, *Energy and Buildings*, 78 (0) (2014) 10-16.
- [61] C. Roulet, J. Gass, I. Marcus, In situ U value measurement: reliable results in short time by dynamic interpretation of the measurement, *ASHARE Transactions*, 93 (1987) 1371-1379.
- [62] I. Atsonios, I. Mandilaras, D. Kolaitis, E. Tsakanika Theohari, E. Alexandrou, M. Founti, Large Scale Measurement Campaign to Assess The Thermal Behaviour of an 18th Century Historic Building, EWCHP-2013, 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Bolzano, Italy, 16-18 September, 2013.
- [63] Hukseflux Thermal Sensors, Version 1003, www.hukseflux.com, Delft, The Netherlands, in, 2015.
- [64] ASTM C1046 - 95(2013), Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components.

CHAPTER 5

TWO NEW METHODS FOR THE IN-SITU MEASUREMENT OF THE OVERALL THERMAL TRANSMITTANCE OF LIGHTWEIGHT STEEL-FRAMED WALLS

Contents

5.1	Introduction.....	92
5.2	The proposed methodologies	93
5.3	Numerical validation of the proposed methodologies	98
5.4	Experimental validation of the methodologies on a cold frame wall.....	105
5.5	Conclusions.....	110
	References	112

Summary

The present chapter introduces, for the first time, two methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of lightweight steel-framed (LSF) walls, including the effect of metal studs ($U_{overall}$). The two methods, Representative Points Method (RPM) and Weighted Area Method (WAM), focus on the fast and accurate in-situ $U_{overall}$ measurement at the central part of an existing LSF wall, combining the analysis of the wall using infrared thermography with the recording and processing of air temperatures and heat flux measurements. The requirements and the procedure of the methods are extensively described, as well as the methods are theoretically and experimentally validated. The proposed methods could be useful tools for the introduction of standardized methods for the in-situ measurement of the U-value of lightweight envelopes. The introduction and the validation of the proposed methods have been published in the international journal Energy and Buildings [1].

5.1 Introduction

As lightweight steel-framed (LSF) buildings gain widespread in the construction sector in the last decades, it is necessary to pay more attention to the thermal performance of their building envelopes. The envelope of LSF buildings is made by drywall materials supported by a metal structure. The metal structure consists of repeating vertical steel columns usually with “C”, “I”, “Σ” or “Z” shaped section, namely studs, anchored on horizontal beams usually “U” shaped section, namely runners. This skeleton is constructed in a rectangular grid to support the walls, the roof and the floor anchored on the frame. The gap between the metal studs, is partly or fully filled with insulation or remains an air cavity.

The location of the whole insulation classifies the LSF walls into three types: cold, hybrid and warm frame LSF walls [2]. In cold frame LSF wall, the whole insulation is located inside the wall at the gap between the steel studs. In hybrid frame LSF wall, the insulation is distributed between the external side of the wall and the gap between steel studs. Finally, when the whole insulation is located outside the framing, the LSF wall is warm type.

The presence of metal studs introduces a large amount of thermal bridges due to their high thermal conductivity. The impact of metal studs on the thermal performance is not negligible and have to be taken into account, mainly in cold and hybrid LSF walls [3]. Meanwhile, the most common way for the thermal performance assessment of a wall is the calculation of the thermal transmittance, U-value, as discussed in Chapter 2. In LSF walls, the effect of thermal bridges due to the repeating studs is included on the thermal transmittance of the wall [4]. This value, called *overall thermal transmittance* of the wall, $U_{overall}$, is essential for the thermal performance assessment of LSF walls. As the metal studs are located at a constant distance each other, the calculation of the $U_{overall}$ at the created repeating geometry is sufficient for the determination of the $U_{overall}$ of the whole central part of the wall.

As it was mentioned in previous chapter (Chapter 4), the in-situ measurement of the wall thermal transmittance is vital for the thermal performance assessment of an existing wall. However, the extensive literature review concerning the methods for the in-situ thermal performance measurement, presented in previous chapter (section 4.2.2), brought to light the absence of a method regarding the LSF walls. This need has also been indicated by several studies [2, 5]. The current available in-situ standardized methods concern homogenous walls in which one-dimensional heat transfer can be assumed. However, nowadays a new standard, ISO 9869-2, is under development concerning the in-situ thermal transmittance measurement of frame structures by means of infrared technique [6, 7]. The only available method for the experimental determination of the $U_{overall}$ is performed by means of the Hot Box method [8, 9] and other approaches in laboratory conditions with a priori known geometry and incorporating materials [5, 10-14].

To meet this need, in the frame of the current thesis, the present chapter introduces two new non-destructive methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of LSF wall, including the effect of the repeating thermal bridges due to the metal studs ($U_{overall}$). The two proposed methods, the *Representative Points Method* (RPM) and the *Weighted Area Method* (WAM), require a high surface temperature disturbance at the internal surface of the wall due to metal stud. Hence, they can be employed mainly on cold frame LSF walls, while in certain cases the methods can be employed also on hybrid frame LSF walls. For the measurement of the $U_{overall}$, the methods combine the analysis of the examined wall using infrared thermography with the recording and processing of indoor/outdoor air temperatures and heat flux measurements. For the post-processing of the measurements, a standardized method, introduced by the ISO 9869 [15] and ASTM C1155 [16] (Table 4.1), have to be selected, taking into account the measuring conditions during the test, according to the results in

previous chapter (Chapter 4 – section 4.7). In this chapter, the proposed methods are numerically validated in both cold and hybrid frame LSF walls, while they are experimentally validated on a well-known cold frame LSF wall. The methods could be a useful tool for engineers and designers of lightweight buildings in order to measure the $U_{overall}$. The in-situ measurement of the $U_{overall}$ is essential for energy audits, designers, engineers, or technicians for labeling of walls, comparative assessments with homogenous walls, and use of software concerning Building Information Modeling (BIM).

5.2 The proposed methods

Two new methods are introduced for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance ($U_{overall}$) of LSF walls: The *Representative Points Method* (RPM) and the *Weighted Area Method* (WAM). The methods concern the measurement of the thermal transmittance at the central part of a LSF wall including the effect of the repeating vertical metal studs, $U_{overall}$. The point thermal bridges due to screws and fasteners are not taken account, due to the fact that their influence on the thermal transmittance is usually negligible in contrast with the thermal bridges caused by metal studs [17].

The two methods comprise five distinct general steps:

- IR thermography of the internal surface of the wall.
- Analysis of IR images in order to calculate the temperature profile.
- Analysis of the temperature profile, according to each method.
- Recording of indoor/outdoor air temperature and heat flux values at the locations which are indicated by each method.
- Calculation of the overall thermal transmittance of the wall, including the effect of metal studs, $U_{overall}$.

5.2.1 IR thermography and calculation of temperature profile

In LSF walls, the presence of studs leads to a multi-dimensional heat transfer inside the wall resulting on a temperature disturbance at the internal surface. The graph of the surface temperature over the length of the wall at a middle height is called *temperature profile* (Figure 5.1). The shape of the temperature profile depends on the configuration of the studs, the materials of the wall and the indoor/outdoor temperature difference.

Both methods require the determination of the temperature profile of the examined wall. This can be provided by means of infrared images without the requirement of the a priori knowledge of the wall configuration. IR thermography is performed according to ASTM C1060 standard [18]. According to this standard, a high indoor/outdoor temperature difference is required, setting a minimum temperature difference of 10°C for at least 4 h prior to test. The distance between the metal studs, d , is determined by the thermal images from the extreme points of the temperature profile. This distance is, usually, constant at the central part of the wall, hence there is a repeating geometry with length equal to d .

The surface temperature disturbance, ΔT_{stud} , caused by the presence of metal stud, has to be more than 0.7°C, depending on the resolution of IR camera, providing an accurate calculation of the temperature profile for the employment of methods. This is achieved mainly on the cold frame LSF walls, as depicted in Figure 5.1. The hybrid LSF wall, results to a lower ΔT_{stud} , but more than 1.5°C for an indoor/outdoor temperature difference equal to 15°C. On the other hand, the ΔT_{stud} at the warm construction is almost negligible. Hence, the proposed methods cannot be practically employed in warm

LSF walls. These walls are usually dealt with as homogenous walls, because the impact of metal studs is almost negligible (the U-value increased only by 1.5% due to the presence of studs for the example presented in Figure 5.1c).

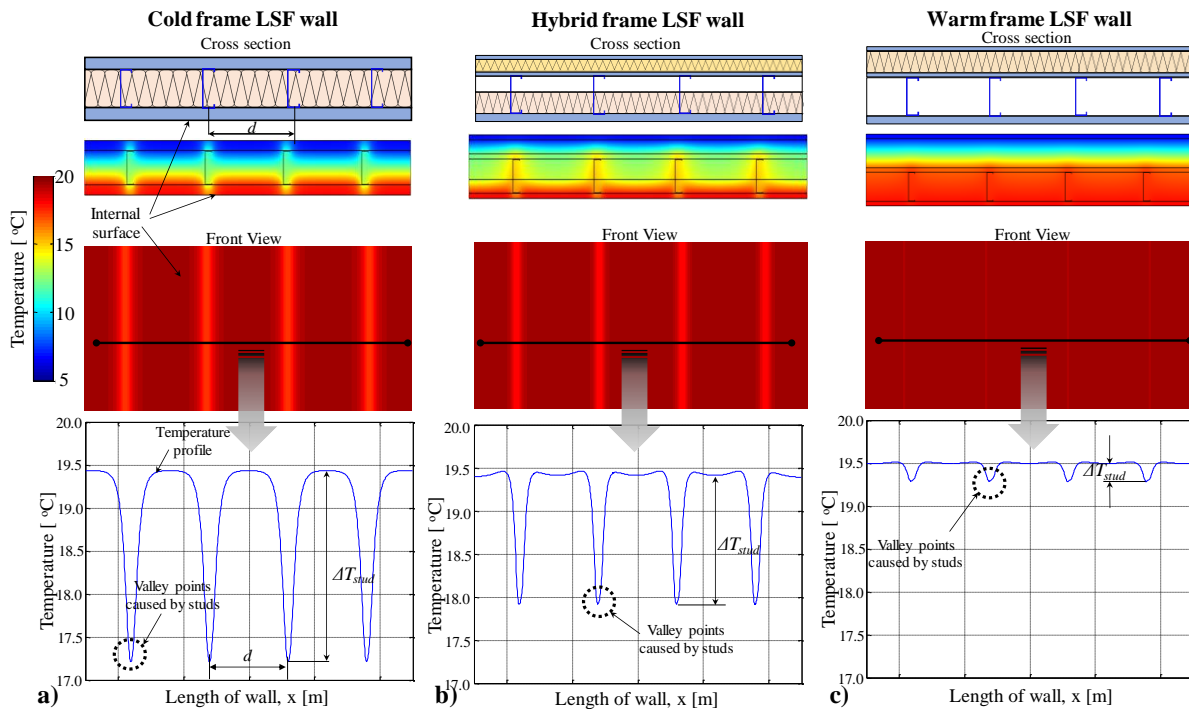


Figure 5.1 - The impact of metal studs and wall configuration on the temperature profile for the three types of LSF walls under the same boundary conditions ($T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ and $T_{out} = 5^{\circ}\text{C}$) : a) cold, b) hybrid and c) warm frame LSF wall.

In the case where the examined wall configuration and the incorporating materials are a priori known, the temperature profile can also be calculated by means of numerical simulations. In this case, the methods may be used for validation of the material thermal properties.

5.2.2 Representative Points Method (RPM)

The Representative Points Method (RPM) is based on the assumption that the heat flow on specific points at the internal surface of the examined wall is always equal to the averaged heat flow of the whole surface. These points, namely “*Representative Points*”, are schematically illustrated in Figure 5.2a. The concept of the RPM is that the $U_{overall}$ is measured by means of heat flux measurements obtained on the Representative Points and temperatures of the indoor and outdoor environments.

The determination of the Representative Points takes into account the width of the heat flux sensor which is going to be used for the heat flux measurements in following step. The average temperature over the width of the heat flux sensor, \hat{T} , is defined by the following equation:

$$\hat{T} = \frac{1}{w} \int_{-w/2}^{w/2} T dx \quad 5.1$$

where w is the width of heat flux sensor and T the temperature obtained by the temperature profile.

Accordingly, the average heat flux over the width of the heat flux sensor, \hat{q} , is defined by the following equation:

$$\hat{q} = \frac{1}{w} \int_{-w/2}^{w/2} q dx \quad 5.2$$

where q is the heat flux at the internal surface of the wall.

The position of each Representative Point, x_{repr} , is located on the intersection of the \hat{T} profile with the average temperature of the temperature profile, T_{av} :

$$\hat{T}_i^{repr} = T_{av} \quad 5.3$$

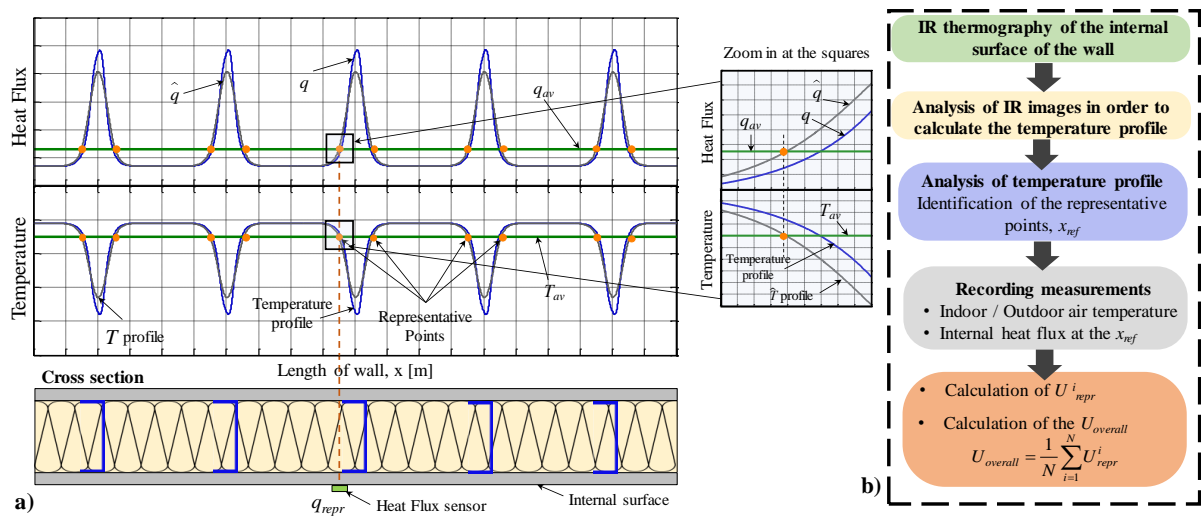


Figure 5.2 - RPM: a) the Representative Points and the location of heat flux sensors and b) the flowchart of the method.

For the required heat flux measurements, the center of the heat flux sensor is installed at the x_{repr} (Figure 5.2a). Additionally, measurements of indoor and outdoor ambient temperature are obtained. The temperature sensors have to be ventilated and shielded against solar and thermal radiation [15].

The thermal transmittance at the Representative Point, U_{repr} , is measured by means of the indoor/outdoor air temperatures and heat flux measurements as well as the implementation of a standardized method (Average Summation, Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN), as introduced by ISO 9869 [15] or ASTM C1155 [16] and extensively analyzed in previous chapter (Chapter 4). As stated in section 4.3, the U-value or the total thermal resistance (R_{tot}) can be measured if the air temperatures of both environments replace the surface temperatures. In doing so, the contribution of the internal and external surface thermal resistances, R_{si} and R_{se} , is included on the output results of the models developed for the implementation of standardized models. Hence, the resulting thermal resistance is the R_{tot} instead of R_{wall} . The appropriate method should be selected taking into account the results of the comparative assessment of methods regarding the required measuring period and the variability of results in terms of the measuring conditions, as presented in section 4.7. The convergence criteria of the methods, described by their standards and summarized in Table 4.1, have to be fulfilled for accurate measurement of the U-value. The methods which the required measuring period is not clearly defined by the standards, the definition in section 4.5 has to be used.

When the criteria of the selected method are met, the U_{repr} is measured. The measurement of at least two U_{repr} values are required and the $U_{overall}$ is obtained by the average value of the U_{repr} values:

$$U_{overall} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{repr}^i \quad 5.4$$

The above process is repeated to obtain at least three independent values for the $U_{overall}$, at different locations at the central part of the wall. The final result is the average of the $U_{overall}$ values and it is acceptable only when the coefficient of variation (CV , equation 4.4) of the independent $U_{overall}$ values at the different locations is less than 10%. The flowchart for the procedure of the RPM is illustrated in Figure 5.2b.

5.2.3 Weighted Area Method (WAM)

The Weighted Area Method (WAM) is based on the Zone Method concept, introduced by ASHRAE [19]. In both methods, the $U_{overall}$ is the weighted average of the U-value obtained at the area of studs and at the area between the studs. According to WAM, the area mostly affected by the studs is identified by the temperature profile. The length of this area (Figure 5.3a), l_{stud} , is determined by the intersection of the temperature profile with the critical temperature, T_{cr} , defined by the equation:

$$T_{cr} = T_{betw_studs} - \frac{(T_{av} - \hat{T}_{min})}{2} \quad 5.5$$

where T_{betw_studs} is the temperature observed at the area between the studs, T_{av} is the average temperature and \hat{T}_{min} is the minimum average temperature over the width of the heat flux sensor (equation 5.1).

According to the WAM, measurements of indoor and outdoor air temperature as well as heat flux at two areas at the internal surface of the wall are obtained. Two heat flux sensors are placed on the internal surface at the area between the studs and the stud area (Figure 5.3a).

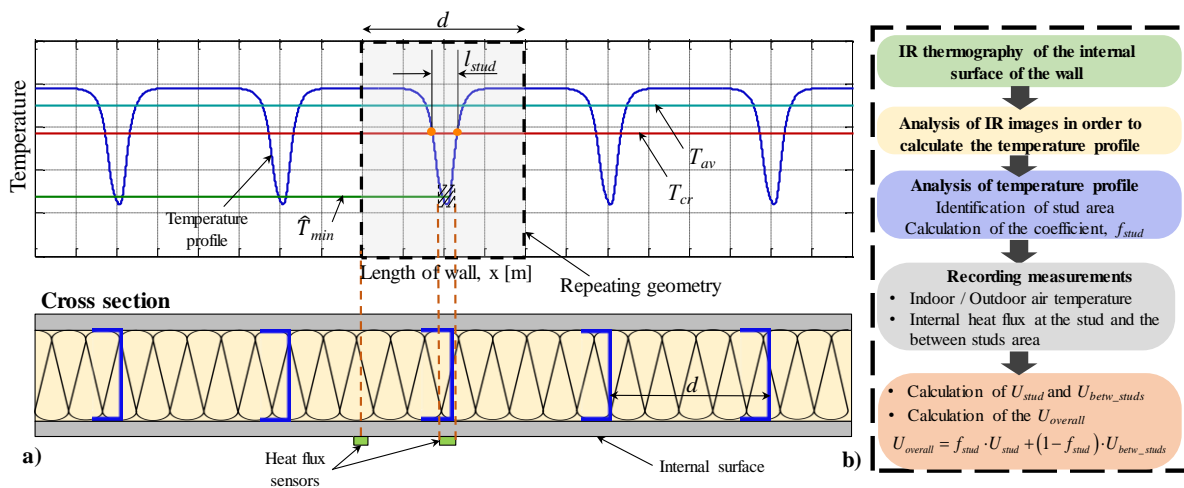


Figure 5.3 - WAM: a) the calculation of l_{stud} and the location of heat flux sensors and b) the flowchart of the method.

The measured heat flux values, from each sensor, \hat{q}_{betw_stud} and \hat{q}_{stud} , along with the measured indoor and outdoor environmental ambient temperatures are used for the calculation of the thermal transmittances at the area between studs, U_{betw_studs} , and the stud area, U_{stud} , respectively. The calculation of the thermal transmittances, U_{stud} and U_{betw_studs} , is performed by means of a standardized method. As referred in RPM and discussed in previous chapter (section 4.7), the selection of appropriate method depends on the measuring conditions during the test. The measurements are ended when the convergence criteria of the selected method are fulfilled.

The $U_{overall}$ of the examined wall is calculated as the weighted average of the U_{stud} and U_{betw_studs} by the equation:

$$U_{overall} = f_{stud} \cdot U_{stud} + (1 - f_{stud}) \cdot U_{betw_studs} \quad 5.6$$

where the coefficient, f_{stud} , is calculated by the following equation:

$$f_{stud} = \frac{l_{stud}}{d} \quad 5.7$$

The above process is repeated for at least three times to obtain at least three independent values for the $U_{overall}$. The final result is the average of the $U_{overall}$ values and it is acceptable only when the coefficient of variation (equation 4.4) is less than 10%. The flowchart for the procedure of the WAM is depicted in Figure 5.3b.

For the implementation of the WAM, the temperature profile of the examined wall is required to be clearly divided into two areas: the area of stud and the area between studs. The latter has to be slightly affected by the studs, as a result, the temperature at this area is almost constant (as the “Gaussian” shape of temperature profile in Figure 5.3). To achieve this, the studs have to be located at enough distance on one row or aligned on a double row. In the case where the studs are placed in two rows at alternating pattern, as presented in Figure 5.4, the temperature at the area between the studs is significantly varied. As a result, in these LSF walls, the WAM cannot be employed, and the $U_{overall}$ is measured by means of the RPM, identified the Representative Points from the temperature profile, as illustrated in Figure 5.4.

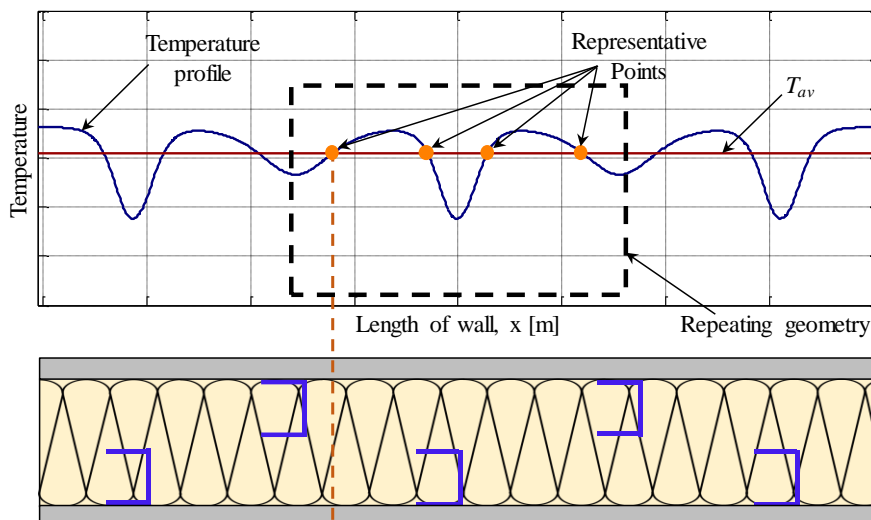


Figure 5.4 – An example of LSF wall with double row of studs at alternating pattern in which the WAM cannot be employed.

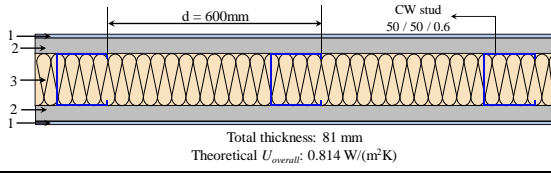
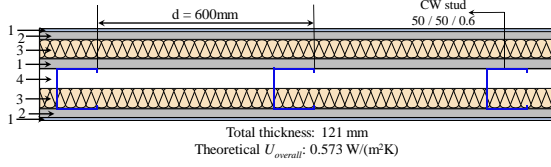
5.3 Numerical validation of the proposed methods

In the current section, the proposed methods are theoretically validated by means of numerical simulations. The numerical validation is performed for both cold and hybrid frame LSF walls. The $U_{overall}$ is calculated according to the proposed methods and the ISO 10211 standard [20], in order to compare the results from theoretical point of view. Limitations and difficulties of the methods are also discussed.

5.3.1 Theoretical implementation of methods

Two different geometries were examined, a cold and a hybrid LSF wall. Table 5.1 presents the configuration of the examined walls and the thermal conductivity of the incorporating materials. The numerical investigation was performed by means of the commercial software COMSOL [21]. The boundary conditions are summarized in Table 5.2 and the width of heat flux sensor was assumed equal to $w = 32$ mm.

Table 5.1 - The configuration and the incorporating material of the examined walls.

Type of LSF wall	Wall configuration	n/a	Material	Thickness [mm]	Thermal conductivity [W/(m·K)]
Cold			1 Finishing mortar	0.5	0.50
			2 Gypsum Board	15	0.27
			3 Mineral Wool	50	0.035
Hybrid			1 Finishing mortar	0.5	0.50
			2 Gypsum Board	15	0.27
			3 Mineral Wool	25	0.035
			4 Air Cavity	25	0.14 ^a

^a The air cavity was treated according to ISO 6946.

Table 5.2 – Boundary conditions.

Boundary condition	Value
Indoor temperature, T_{in}	20°C
Internal heat transfer coefficient, h_{in}	7.69 W/(m ² K)
Outdoor temperature, T_{out}	5°C
External heat transfer coefficient, h_{out}	25 W/(m ² K)

For the theoretical validation of two methods, the results obtained by the steady state simulations are compared against the theoretical calculation according to ISO 10211. The extensive description of the numerical calculation of thermal bridges due to studs, and the calculation of the $U_{overall}$, according to ISO, is presented in following chapter (Chapter 7 – section 7.2), as the focus of the current chapter is on the validation of the proposed methods. The accuracy of the methods is evaluated by means of the *Relative error*, comparing the $U_{overall}$ obtained by each method with the theoretical $U_{overall}$ value according to ISO (U_{ISO}).

The U_{ISO} values are equal to $0.814 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for the cold and $0.573 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for the hybrid frame LSF wall. As it is observed in Figure 5.5, the surface temperature disturbance, ΔT_{stud} , caused by the metal stud, is more than 3°C for the cold and 1.2°C for the hybrid frame wall, for indoor/outdoor temperature difference equal to 15°C . The proposed methods can be employed on both walls theoretically, since the required ΔT_{stud} is achieved.

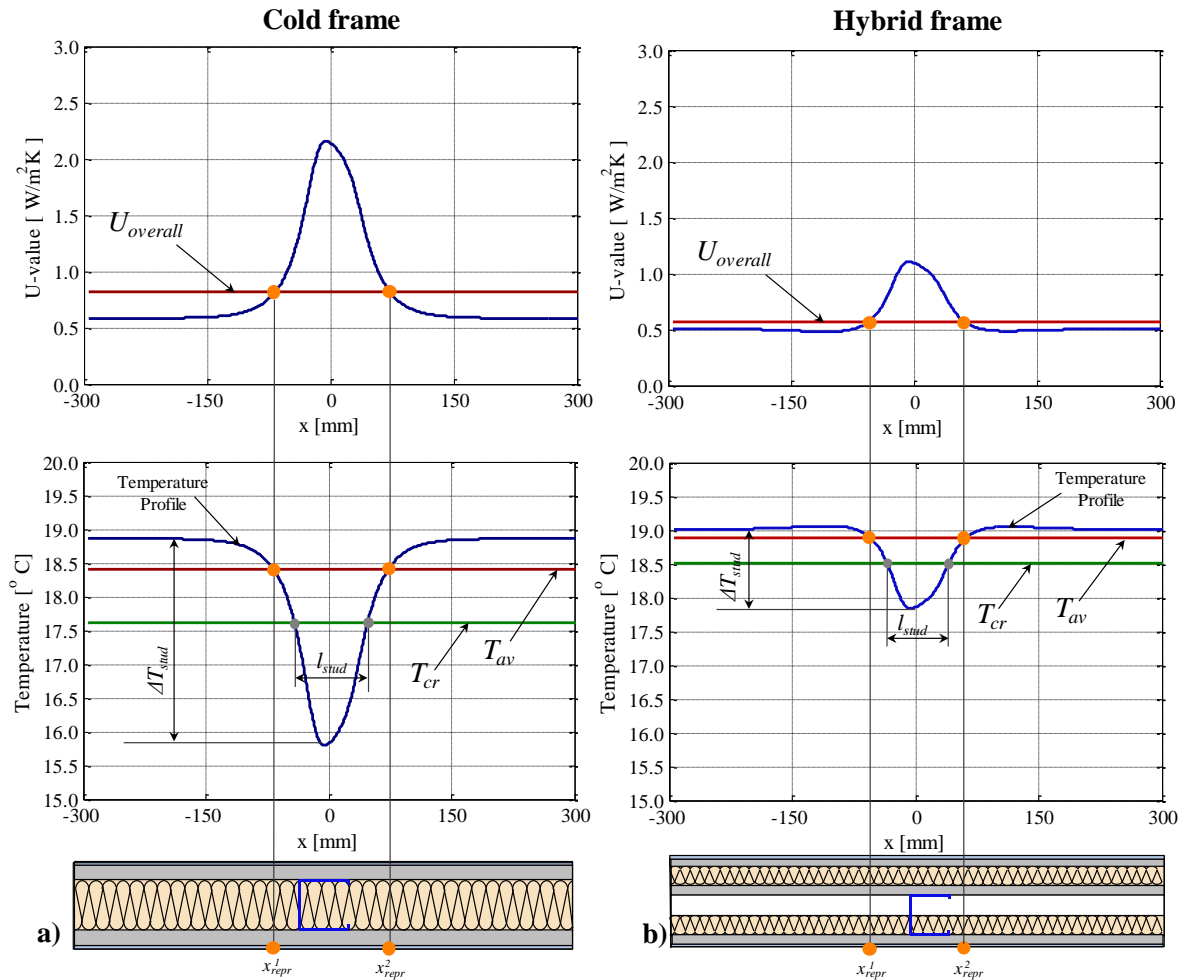


Figure 5.5 - The numerical analysis at the repeating part of the examined walls, a) cold frame and b) hybrid frame LSF wall.

The numerical investigation confirms the basic assumption of the RPM method concerning the Representative Points of the two walls. More specifically, the positions where the T_{av} line crosses the temperature profile are exactly same with the positions where the $U_{overall}$ line crosses the curve of U-values. Taking into account the width of heat flux sensor, the assumption is also confirmed for the \hat{T} profile. Hence, the heat flux obtained at the Representative Points is equal with the average heat flow of the whole internal surface. There are two Representative Points at the repeating geometries of the walls at the locations $x_{repr,1}$ and $x_{repr,2}$, at the left and the right side of the stud, respectively.

According to the RPM in real conditions, the determination of the Representative Point location, x_{repr} , is performed by means of the analysis of the temperature profile, obtained by thermography. The impact of the conditions during the measurements on the x_{repr} was numerically investigated. It was found that the only factor that affects the x_{repr} is the variation of the internal heat transfer coefficient. As shown in Figure 5.6a, the x_{repr} is affected by the internal heat transfer coefficient, h_{in} , while the effect of the external heat transfer coefficient, h_{out} , on both walls is negligible. The impact of a possible variation of

h during the thermography test and measuring period on the accuracy of RPM is illustrated in Figure 5.6b. The influence of the h_{in} variation seems to be higher in the cold frame wall than the hybrid. However, even high h_{in} variation in the order of $\pm 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, the error of RPM does not exceed 5% for both walls.

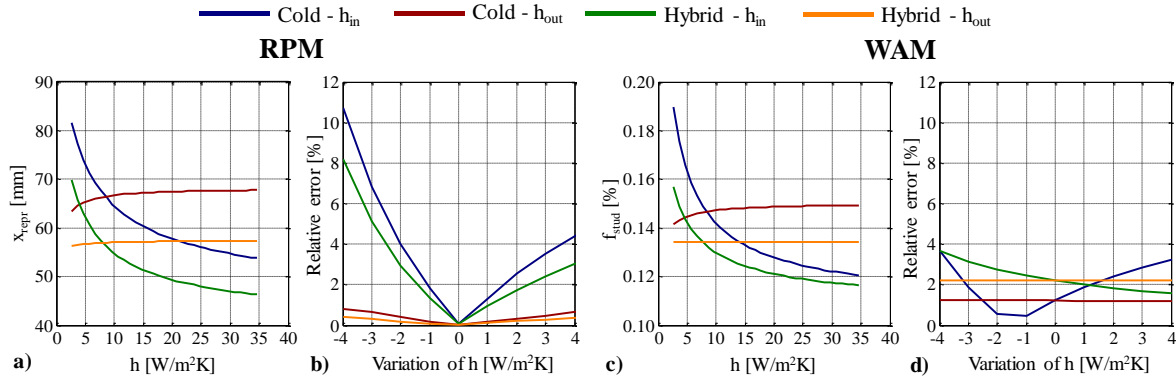


Figure 5.6 - Influence of the h_{in} and h_{out} on the proposed methods for the two examined walls, a) the x_{repr} according to RPM, b) the Relative error of the RPM as a function of the variation of h , c) the f_{stud} according to WAM, d) the Relative error of the WAM as a function of the variation of h .

The results of the WAM are summarized in Table 5.3. As it is shown, the Relative error between the WAM and the theoretical value (U_{ISO}) is 1.4% for the cold frame LSF wall and 2.1% for the hybrid frame wall. The calculation of the f_{stud} from the temperature profile influences the accuracy of the results. The main factor that affects the f_{stud} is the variation of the internal heat transfer coefficients during the thermography and measurements. As it is shown in Figure 5.6c, the h_{in} affects the f_{stud} , while the influence of the h_{out} is negligible. The influence of the variation of h on the Relative error is illustrated in Figure 5.6d. The impact of the variation of h_{in} is lower on the WAM than on the RPM. However, for variation of h_{in} even $\pm 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, the error does not exceed 3% for the two walls.

Table 5.3 - The results of the WAM for the two walls.

	Cold frame	Hybrid frame
$U_{ISO} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0.814	0.573
$f_{stud} [-]$	0.148	0.134
$U_{betw_studs} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0.584	0.510
$U_{stud} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	2.087	1.077
$U_{WAM} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0.803 (1.4%)	0.585 (2.1%)

A sensitivity analysis was carried out regarding the effect of the width of heat flux sensor, w , on the Relative error of the WAM for the two walls. As depicted in Figure 5.7, the cold frame wall is influenced by the width of sensors more than the hybrid wall. In the cold frame, as the width of the sensor increases, the Relative error increases with a rate approximately equal to $0.5\%/cm$. For width of sensor larger than 100 mm the error exceeds 4%, however most of the commercial sensors have width between 5 and 80 mm, where the error is lower than 3%. In the case of the hybrid wall the error is always lower than 4%, while, for the examined hybrid wall, the WAM provides the exact theoretical value for $w=95 \text{ mm}$. On the other hand, the accuracy of RPM is independent on the size of heat flux sensor.

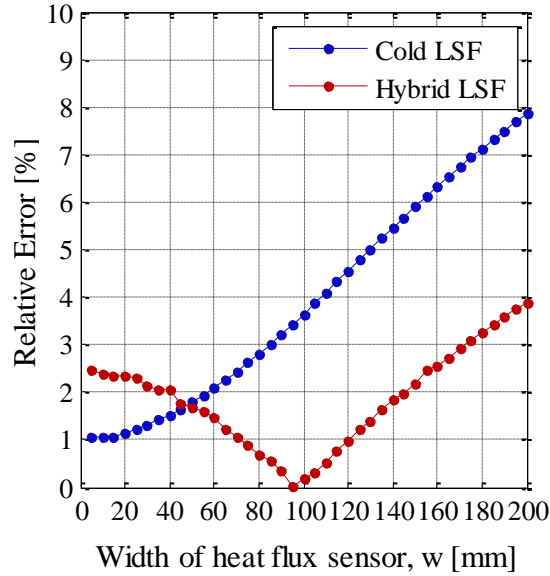


Figure 5.7 - The impact of the width of heat flux sensor on the WAM for the two examined walls.

Further numerical simulations in transient conditions were performed for the investigation of the impact of the unsteady conditions on the proposed methods. The two walls were simulated in two different transient conditions in order to investigate the behavior of the methods on the daily variation of the external temperature. The indoor temperature was assumed to be varied in time, according to the following equation:

$$T_{in}(t) = 20 + \sin\left(\frac{2\pi t}{3600 \cdot 24}\right) + \varepsilon_{in}, \quad t \text{ in sec and } \varepsilon_{in} \text{ white noise of } \pm 0.5^\circ\text{C amplitude} \quad 5.8$$

Regarding the outdoor temperature, two different cases were examined: a) $T_{out,max}$ for high daily variation and high indoor/outdoor temperature difference and b) $T_{out,min}$ for low daily variation and low indoor/outdoor temperature difference. The two temperatures were obtained by the following equations:

$$T_{out,max}(t) = 0 - 10 \cos\left(\frac{2\pi t}{3600 \cdot 24}\right) + \varepsilon_{out}, \quad t \text{ in sec and } \varepsilon_{out} \text{ white noise of } \pm 1^\circ\text{C amplitude} \quad 5.9$$

$$T_{out,min}(t) = 10 - 2.5 \cos\left(\frac{2\pi t}{3600 \cdot 24}\right) + \varepsilon_{out}, \quad t \text{ in sec and } \varepsilon_{out} \text{ white noise of } \pm 1^\circ\text{C amplitude} \quad 5.10$$

The impact of dynamic effects on the two methods is evaluated by means of the Relative error caused by the variation of x_{repr} , for the RPM, and the f_{stud} for the WAM. The results, presented in Figure 5.8, show that the x_{repr} and the f_{stud} are slightly affected by the transient conditions. For the two methods, the Relative error in the case of the cold LSF wall does not exceed 1.8%, while the dynamic effects appear to have a negligible impact (Relative error up to 0.4%) for the hybrid LSF wall. The impact of the transient conditions is almost the same for the case of low and high indoor/outdoor temperature variation and difference.

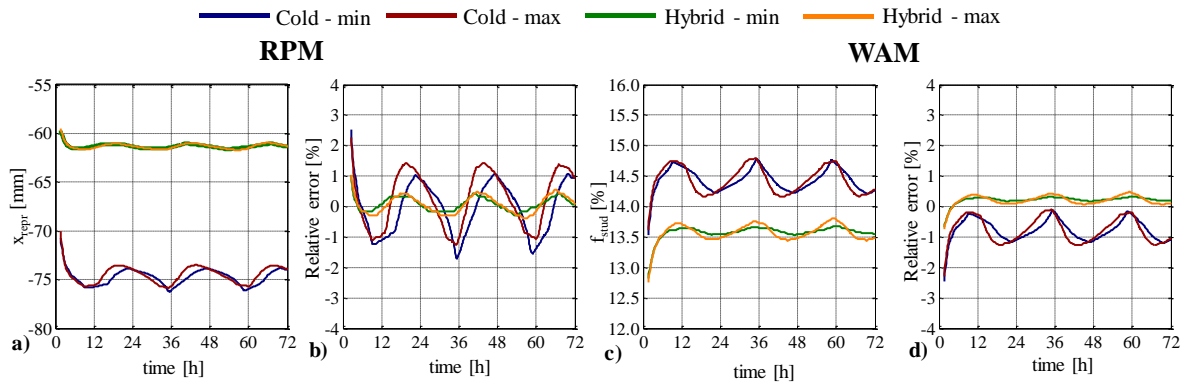


Figure 5.8 - Transient results of the numerical simulation of two walls in two different boundary conditions: a) the x_{repr} according to RPM, b) the Relative error of the RPM, c) the f_{stud} according to WAM, b) the Relative error of the WAM.

5.3.2 Parametric analysis regarding the properties of the wall

A parametric analysis regarding the properties of the walls was carried out in order to confirm the general validity of the two proposed methods at a cold and a hybrid frame LSF walls. The validity was examined for walls with the same configuration, as depicted in Table 5.1, and different incorporated materials (thermal resistances).

The examined walls were simulated under different combinations of material thermal conductivities, thicknesses of stud and the convection heat transfer coefficients (more than 1000 cases), which are the most important properties for the calculation of the thermal transmittance. The ranges of the examined values are presented in Table 5.4.

Table 5.4 - The ranges of the examined properties at the parametric analysis.

Materials	Property	Range	Units
Finishing mortar	Thermal conductivity	0.1 – 0.4	[W/(m·K)]
Gypsumboard	Thermal conductivity	0.1 – 0.4	[W/(m·K)]
Mineral Wool	Thermal conductivity	0.030 – 0.060	[W/(m·K)]
Air cavity	Thermal resistance	0.10 – 0.25	[(m ² K)/W]
Stud	Thickness	0.6 – 1.5	[mm]
h_{in}	Convection heat transfer coefficient	5 – 35	[W/(m ² K)]
h_{out}	Convection heat transfer coefficient	5 - 35	[W/(m ² K)]

The parametric analysis for the RPM concerns the calculation of the location of the Representative Points, x_{repr} , in different cases. According to the RPM, the x_{repr} is obtained by the cross section of the average temperature, T_{av} , with the \hat{T} profile. This position was examined in comparison with the position where the average heat flow of the internal surface would be measured, namely the points obtained by the cross section of the average heat flux, q_{av} , with the \hat{q} profile. The results are shown in Figure 5.9a and Figure 5.9b for the cold and the hybrid wall, respectively. As it is shown, the positions of Representative Points defined by the \hat{T} profile are exactly the same with the positions where the q_{av} crosses the \hat{q} profile for the cold wall. Accordingly, the differences between the two definitions are negligible for the hybrid frame wall. Hence, the error of the obtained $U_{overall}$ is negligible, in each case of the two walls.

The parametric analysis for the WAM focuses on the error of the obtained results in contrast with the theoretical value obtained by ISO. Figure 5.9c and Figure 5.9d illustrate the Relative error for the two examined walls. It is observed that the results of the WAM are closed to the theoretical values and the error does not exceed 2%, in the cases of the cold frame and 5% in the cases of the hybrid frame LSF wall. The error is not affected by the U-value of the examined wall.

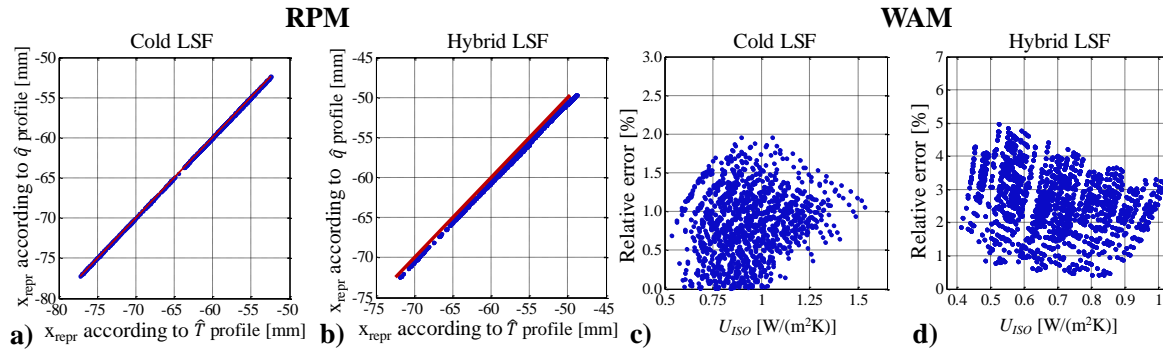


Figure 5.9 - Parametric analysis: a) x_{repr} obtained by RPM in cold frame, b) x_{repr} obtained by RPM in hybrid frame, c) relative error of the WAM in cold frame and d) relative error of the WAM in hybrid frame wall.

A sensitivity analysis regarding the definition of the critical temperature, T_{cr} , of the WAM was performed for the cases of the parametric study of two walls. The analysis compared the results obtained by the WAM for four different definitions of T_{cr} with the U_{ISO} by means of the maximum Relative error and the coefficient of determination, R^2 . The latter is calculated by the following equation:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (U_{ISO}^i - U_{WAM}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (U_{ISO}^i - \overline{U_{ISO}})^2} \quad 5.11$$

where $\overline{U_{ISO}}$ is the average theoretical value of the U_{ISO} values obtained by the N examined cases of the parametric study.

Table 5.5 presents the R^2 and the maximum Relative error obtained employing the WAM for four different definitions of the critical temperature, T_{cr} , in all parametric cases. It is observed that in the case of the cold frame LSF wall, the definition of the T_{cr} according to the equation 5.5 gives by far the most accurate results in comparison with the other definitions. As presented in Figure 5.9c, the maximum Relative error is 1.9%. On the contrary, in the case of the hybrid frame LSF wall, the results obtained by the second and third definition of T_{cr} are slightly better, reducing the maximum error up to 1%. However, due to the fact that an in-situ methodology does not require the a priori configuration of the examined wall, it was selected the definition of the equation 5.5 as the optimum. This error has already taken into account in previous analysis and the uncertainty of method. In the case of a priori known hybrid frame LSF wall, the third definition of the Table 5.5 has to be used for the implementation of the WAM.

Table 5.5 - The R^2 and the maximum error employing the WAM for different definitions of T_{cr} .

Definition of T_{cr}	Cold frame		Hybrid frame	
	R^2	Maximum error	R^2	Maximum error
$T_{cr} = T_{betw_studs} - \frac{(T_{av} - \hat{T}_{min})}{2}$	1.00	1.9%	0.98	4.9%
$T_{cr} = T_{betw_studs} - \frac{(T_{betw_studs} - \hat{T}_{min})}{2}$	0.97	5.5%	0.99	4.2%
$T_{cr} = \frac{(T_{betw_studs} + T_{min})}{2}$	0.95	6.4%	0.99	3.9%
$T_{cr} = T_{av}$	0.55	18.2%	0.79	15.7%

5.3.3 Uncertainty Estimation

For the measurement of the $U_{overall}$, according to the proposed methods, the measurement of the U_{repr} , U_{stud} or U_{betw_studs} values by a standardized method is required. The uncertainty for the measurement of the latter values is expected to vary between 11% and 28% (see Table 4.1), depending on the selected standardized method, for optimum measuring conditions. The accuracy of these measurements depends on the accuracy of the measuring equipment, the variation of the temperatures and heat flux over the measuring period, differences between air and radiant temperatures, random errors, etc. [22, 23]. However, for the measurement of the $U_{overall}$ according to the proposed methods, additional uncertainties are introduced. Taking into account all parameters, the additional uncertainties are added mainly due to the analysis of IR images [24, 25]. In ideal conditions, the temperature profile has to be the same over the height of the wall both during the thermography and measuring period. However, in practice there are factors that affect the accuracy of the temperature profile.

For the RPM, the additional uncertainties are related to the determination of the Representative Points' location, x_{repr} from the analysis of temperature profile. A typical deviation of the x_{repr} , due to the variation of temperatures over the height of wall is estimated to be 2 - 5 mm resulting to an uncertainty ranging from 3% to 7%. Moreover, the possible variation of h_{in} during the thermography test and the measuring period results to a deviation of the x_{repr} causing an uncertainty on the measurement up to 5%, as approved in previous analysis. Finally, a slightly deviation of the x_{repr} due to transient heat transfer through the wall introduces an uncertainty up to 2%. The total uncertainty of the $U_{overall}$ measurement according to RPM, selecting the Average method in optimum measuring conditions for the post-processing of measurements, is estimated equal to 17%.

Regarding the WAM, the additional uncertainty is related to the calculation of the weighted averaged coefficient, f_{stud} , and the dependence on the width of sensor. A typical deviation of the f_{stud} , due to the variation of temperatures over the height of wall, introduces an uncertainty up to 2%. A variation of the h_{in} during the whole measuring procedure results to a deviation of the f_{stud} causing an uncertainty to the $U_{overall}$ measurement up to 5%. Moreover, the variation of temperature and heat flux in dynamic conditions introduces an additional uncertainty of $\pm 2\%$. Finally, for heat flux sensors having width less than 80 mm, an additional uncertainty up to 5% is introduced (Figure 5.7 and Figure 5.9).

The total uncertainty for the WAM is estimated equal to 16%, selecting the Average method for the post-processing of measurements in optimum measuring conditions.

5.4 Experimental validation of the methods on a cold frame wall

5.4.1 Tested wall and measuring equipment

The experimental validation of the two proposed methods was carried out on a well-known cold frame LSF wall, as described in Table 5.1 and analyzed in previous section. The wall is part of a lightweight construction, with dimensions $1.82\text{ m} \times 2.05\text{ m} \times 2.50\text{ m}$, inside a large unconditioned building, with floor area equal to 1550 m^2 and 12 m height. The building is located in National Technical University of Athens. Figure 5.10a illustrates the experimental room. The cold-frame LSF wall is a drywall construction, with total thickness 81 mm . The structure is based on one row of metal studs. The section of studs is C-shaped, with dimensions $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ and thickness 0.6 mm . The distance between the studs is constant and equal to $d = 600\text{ mm}$. Two gypsum board layers, 15 mm thick, are anchored on the two sides of studs. The intermediate gap between the studs is filled with mineral wool.

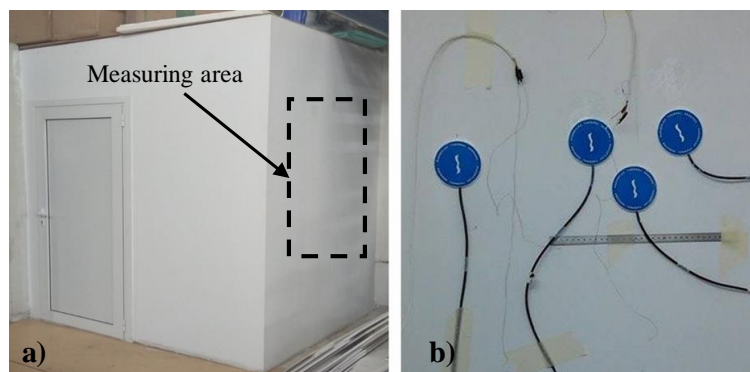


Figure 5.10 - Experimental validation on a cold frame wall: a) the experimental room and b) the location of heat flux sensors at the internal surface.

The required measuring equipment comprises an IR camera, a data acquisition system, heat flux and temperature sensors. The IR camera (FLIR model 595) was used in order to obtain the required IR images of the internal wall surface for the calculation of the temperature profile. The thermal sensitivity of the IR camera is 0.1°C at 30°C with accuracy $\pm 2^\circ\text{C}$. A Data Acquisition System (DAS) was designed to collect and record the required temperature and heat flux measurements. For the heat flux measurements, heat flux plates of Hukseflux, type HFP01, were used. These sensors have high sensitivity and are dedicated for heat flow measurements of building envelopes. The uncertainty of sensors is equal to 3%, by the guarded hot plate of National Physical Laboratory (NPL) of the UK (04/03/2017) according to ISO 8302 and ASTM C177 [26]. The heat flux plates are circular with 80 mm diameter, while the width of the sensors is $w = 32\text{ mm}$ [26]. For the temperature measurements Micro-BETAchip NTC thermistor probes (MCD 10k3MCD1) with a nominal resistance $10\text{ k}\Omega$ at 25°C , were used. Thermistors have higher accuracy in the small temperature ranges of building applications in comparison to thermocouples [27, 28]. The absolute error of measurement is less than 0.5°C [29]. According to ISO 9869, the temperatures sensors for the U-value measurement have to be shielded against solar/thermal radiation and ventilated. Figure 5.10b shows the installation of the heat flux at the

surface and temperature sensors at the indoor ambient. All sensors were connected to an Agilent DAQ device for signal processing and logging. The time interval for all the measurements was set to 1 minute.

For fast convergence and reliable results, a high temperature difference between the indoor/outdoor environments and low variation of internal temperatures are required, for the measurements of the U-values, according to the results in section 4.7. However, the experiments took place during summer months when the temperature inside the large unconditioned building (outside of the examined wall) was ranging between 22 – 26°C. Since the outdoor conditions cannot be controlled, a temperature control system was used for the maintenance of a stable indoor temperature equal to 37°C, achieving the required high indoor/outdoor temperature difference. This high internal temperature represents a very warm condition, far from thermal comfort however, the accuracy of the results, obtained by the proposed methods, depends on temperature differences and not absolute temperatures. Additionally, the average temperature of the wall (ca. 30°C) is a normal temperature during the summer months in Mediterranean climate.

5.4.2 Calculation of theoretical $U_{overall}$ of the tested wall

The two proposed methods were employed at the tested cold frame LSF wall and the experimental results of the $U_{overall}$ were compared with the theoretical value. As the U-value takes into account the surface thermal resistances, the calculation of the theoretical $U_{overall}$ requires the determination of the real heat transfer coefficient, h , at the external and internal side. The total heat transfer coefficients on both surfaces of the wall were experimentally determined in this study only for the validation of methods comparing the experimental with the theoretical results. It is highlighted that it is not necessary for the employment of the methods.

The heat transfer coefficients were determined according to Evangelisti et al. [30, 31]. For the estimation of h_{in} , heat flux and temperature measurements obtained at the same point of the internal surface of the wall as well as the indoor ambient temperatures. The heat transfer coefficient was calculated according to the following equation:

$$h = \frac{\hat{q}_{HFM}}{(T_s - T_{amb})} \quad 5.12$$

where \hat{q}_{HFM} is the measured heat flux density, T_s and T_{amb} are the measured surface and ambient temperatures, respectively. The same methodology was applied at the external side of the wall for the calculation of the h_{out} .

The heat transfer coefficients were measured at different positions. Figure 5.11 presents indicative measurements of the internal and external heat flux, as well as the calculated values of the h_{in} and h_{out} . As it shown, the variation of the h_{in} , which affects the accuracy of two methods, does not exceed 0.8 W/(m²K), indicating that the indoor heat transfer coefficient is almost stable. The average heat transfer coefficient at the internal and the external side was measured equal to $h_{in} = 5.97$ W/(m²K) and $h_{out} = 6.37$ W/(m²K). As a result, the theoretical $U_{overall}$ of the tested wall, taking into account the experimental values of the heat transfer coefficients, was calculated equal to $U_{ISO} = 0.723$ W/(m²K).

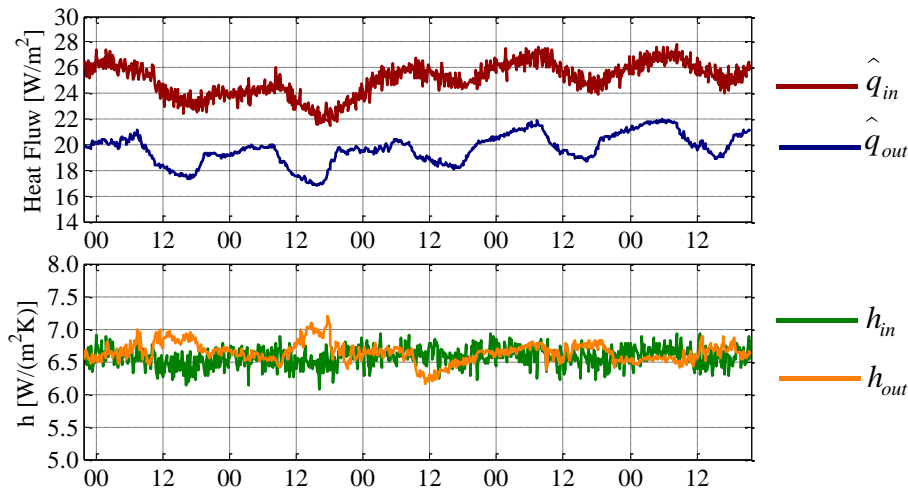


Figure 5.11 - Measurements of heat flux values and the calculated values of the heat transfer coefficients.

5.4.3 Implementation of methods

The calculation of the temperature profile was performed using infrared thermography for temperature difference between the indoor/outdoor environments approximately 11 °C. The IR image was smoothed in order to remove the signal noise. To achieved this, each pixel on the image represents the average surface temperature of the pixel and its 8 neighboring pixels, as proposed by O’Grady et al. [5]. As illustrated in Figure 5.12, the averaging of temperatures results to smooth the temperature profile obtained by the IR image. The temperature profile is calculated on a horizontal line at a middle height at the central part of the wall, avoiding the impact of thermal bridges caused by the adjacent envelope elements. According to the IR image, the position of metal stud was identified by the high surface temperature disturbance, $\Delta T_{stud}=1.5^{\circ}\text{C}$ and the distance between the studs was determined equal to $d=600\text{mm}$ (as a result the length of the repeating part of the wall).

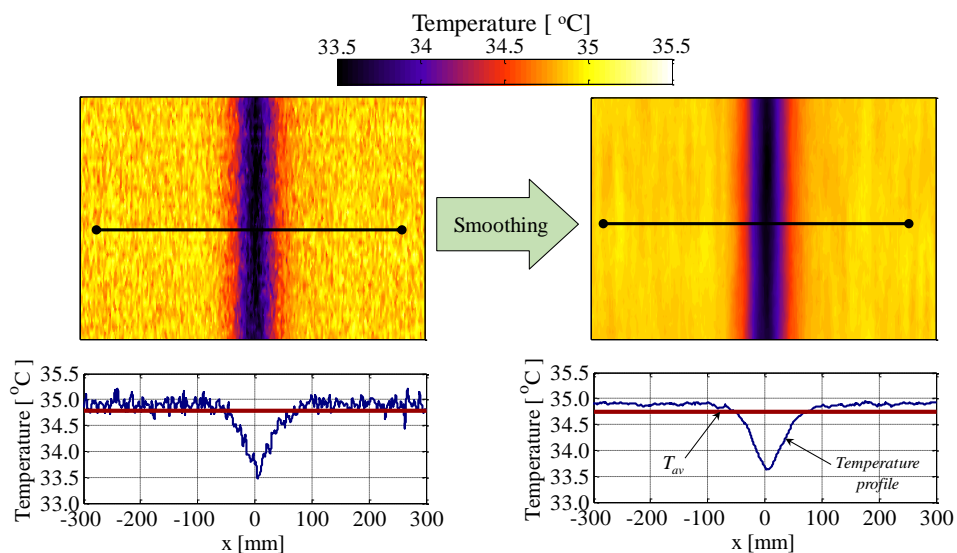


Figure 5.12 – Smoothing of the IR image.

The post-processing of the indoor/outdoor ambient temperatures and heat flux measurements and the calculation of the required U-values for the two methods (U_{repr} for the RPM and U_{stud} , U_{betw_studs} for the WAM) were performed by means of all standardized methods. The results showed that the

differences between the calculating U-values does not exceed 2%. However, the results, which are presented in the current section for the experimental validation of both the RPM and the WAM, are obtained by the Average Method, described in ISO 9869 standard [15]. As concluded in the comparative assessment of the standardized methods and presented in previous chapter (Chapter 4), for fast and accurate results obtained by Average method, a high temperature difference, at least 10°C, between the indoor and outdoor environment is required. The measuring period for the measurement of an individual U-value was determined by the satisfaction of the Average method criteria (Table 4.1).

RPM

The implementation of the RPM requires the identification of the position of the Representative Points, x_{repr} , at the examined wall by the temperature profile analysis. The average temperature, T_{av} , and the \hat{T} profile were calculated from the temperature profile and the x_{repr} were determined by the cross section of two curves (Figure 5.13).

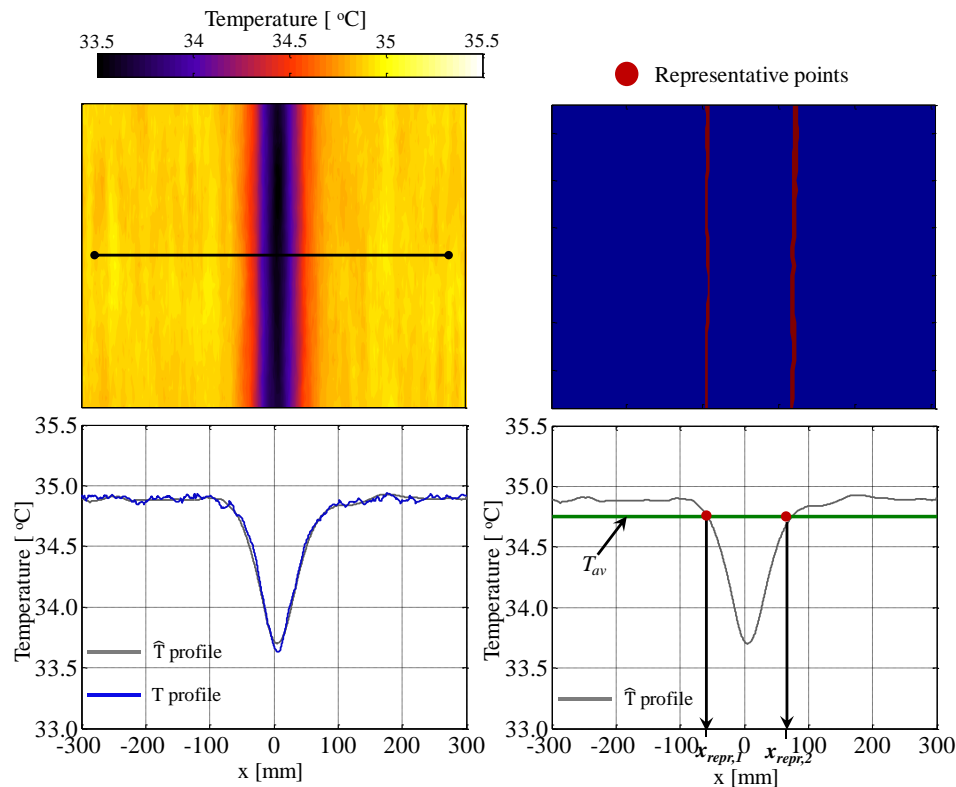


Figure 5.13 - Identification of the Representative Points according to RPM.

The x_{repr} were calculated from the thermographic analysis for temperature profiles in different heights. The Representative Points located at the positions $x_{repr,1} = -71 \pm 3$ mm and $x_{repr,2} = 78 \pm 4$ mm at the left and right side of studs, respectively, assuming $x = 0$ the point where the minimum temperature observed. The two heat flux sensors were installed at the internal surface of the wall, one at the position $x_{repr,1}$ and one at the $x_{repr,2}$. The indoor and outdoor air temperatures were considered as the average value obtained by three thermistors in each environment.

The RPM was employed in five different locations of the wall. In each location, two U_{repr} values were measured at two representative points, one at the left and one at the right side of stud ($U_{repr,1}$ and $U_{repr,2}$). The $U_{overall}$ obtained as the average of the two U_{repr} values. The results of the implementation of the RPM are presented in Table 5.6. As it is shown, the results of the $U_{overall}$ values are in a very good

agreement with the theoretical value, U_{ISO} . The difference between the final result ($\overline{U_{overall}}$) with the theoretical is only 0.4%. The interval of the final result was estimated taking into account the uncertainty analysis, described in section 5.3.3. The results have high repeatability, since the relative standard deviation of the $U_{overall}$ values is $CV = 1.9\%$.

Table 5.6 - The U-values for the tested wall implementing the proposed methods.

Locations	RPM			WAM		
	$U_{repr.1}$ [W/(m ² K)]	$U_{repr.2}$ [W/(m ² K)]	$U_{overall}$ [W/(m ² K)]	U_{stud} [W/(m ² K)]	U_{betw_studs} [W/(m ² K)]	$U_{overall}$ [W/(m ² K)]
1	0.698	0.707	0.703	1.889	0.584	0.762
2	0.759	0.723	0.741	1.745	0.575	0.734
3	0.738	0.710	0.724	1.828	0.669	0.827
4	0.791	0.682	0.736	1.731	0.560	0.720
5	0.744	0.713	0.729	1.551	0.551	0.687
$U_{overall}$ [W/(m ² K)]	0.726 ± 0.124			0.746 ± 0.119		
Difference with $U_{ISO}=0.723$ W/(m ² K)	0.4%			3.1%		

WAM

The implementation of the WAM requires the calculation of the critical temperature, T_{cr} , according to the equation 5.5, in order to define the characteristic length, l_{stud} . This calculation was performed using the temperature profile (Figure 5.14) obtained by the thermal imaging. The l_{stud} was calculated for several heights at the central part of the wall, equal to 81 ± 2 mm, hence the weighted ratio, f_{stud} , was equal to $f_{stud} = 0.136 \pm 0.004$.

Two heat flux sensors were installed at the internal surface of the wall. The center of the first sensor was installed at the position where the minimum temperature is observed (stud area), while the center of the second sensor was installed at the position where the maximum temperature is observed (area between studs).

The WAM was employed in five different locations of the wall. In each location, the U_{stud} and the U_{betw_studs} were calculated and the $U_{overall}$ was obtained according to the equation 5.6. The results of the implementation of the WAM are presented in Table 5.6. It is observed that the results are close to the theoretical value, U_{ISO} . The difference between the final result ($\overline{U_{overall}}$) with the theoretical is only 3.1%. The repeatability of method is acceptable, since the relative standard deviation is equal to $CV = 7.1\%$, lower than 10%.

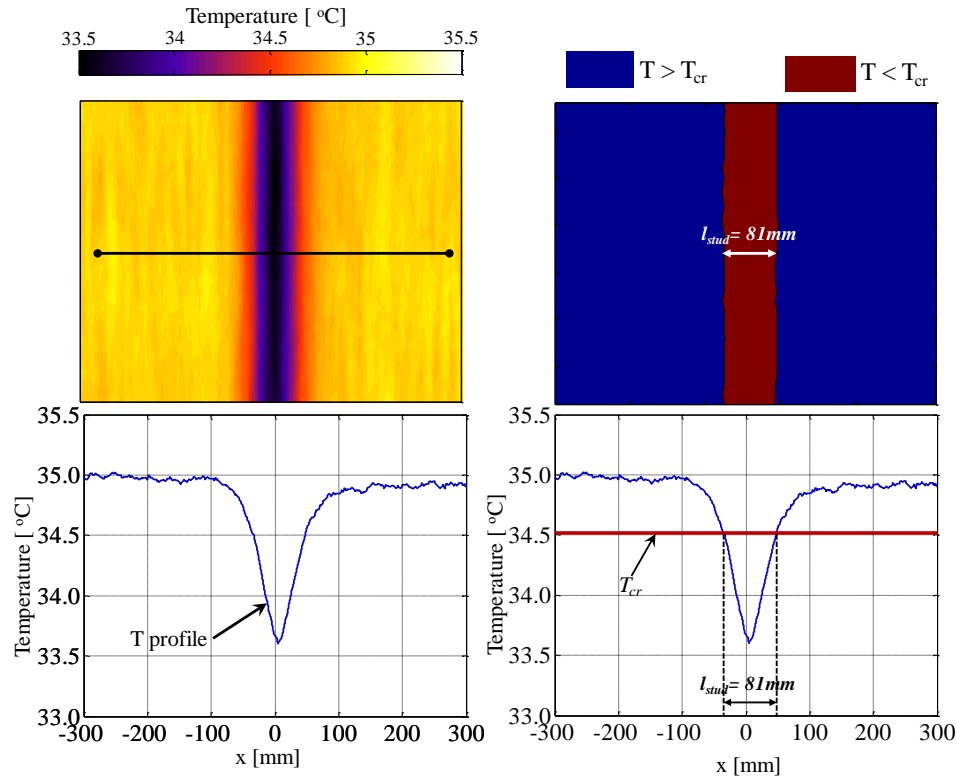


Figure 5.14 - Calculation of l_{stud} according to WAM.

5.5 Conclusions

The present chapter introduced two new methods regarding the in-situ measurement of the overall thermal transmittance, $U_{overall}$, for lightweight steel-framed (LSF) walls including the effect of metal studs. The two methods, namely the *Representative Points Method* (RPM) and the *Weighted Area Method* (WAM), combine the analysis of the examined wall using infrared thermography with the recording and processing of indoor/outdoor ambient temperature and heat flux measurements. The methods require a relatively high internal surface temperature disturbance caused by the presence of metal stud for the calculation and the processing of the temperature profile. This can be achieved in cold frame LSF wall (insulation between studs) and, in certain cases, in hybrid LSF walls (insulation is distributed between the external side and the cavity between studs). The methods were theoretically validated using a cold and a hybrid frame LSF wall, while they were experimentally validated into a well-known cold frame LSF wall, located in a real experimental building.

The theoretical validation of the proposed methods was performed evaluating the accuracy of methods against the theoretical value obtained according to ISO 10211. The results showed that the RPM gives always accurate $U_{overall}$, while the error of the WAM does not exceed 2% for cold frame and 5% for hybrid frame walls. A numerical parametric analysis was carried out indicating the general validity of the proposed methods for the two wall configurations. Moreover, several factors, that influence the uncertainty of the in-situ $U_{overall}$ measurement for existing walls, were investigated. The main error introduced due to the variation of the internal heat transfer coefficient during the measurements, which may reach the value of 5% for the RPM and 3% for the WAM.

The experimental validation of the two methods on the cold frame wall showed that their results were in a very good agreement with the theoretical value, obtained by ISO 10211. The $U_{overall}$ obtained by the RPM was measured almost the same with the theoretical value (difference only 0.4%) with high

repeatability. The difference on the $U_{overall}$ measured according to WAM was 3%, while the coefficient of variation of results was 7%.

It is remarked that in the following chapter (section 6.3), the RPM method is employed for the in-situ $U_{overall}$ measurement of a real LSF wall with double row of studs at alternating pattern, where the WAM cannot be employed. The measurements are in agreement with the theoretical value confirming the validation of the method. Nevertheless, further implementations of both proposed methods should be carried out under different measuring conditions and configurations of LSF walls in order to improve the methods and provide general characteristics and limitations.

So far, a method (standardized or not) for the in-situ measurement of the $U_{overall}$ concerning existing LSF walls in real building is missing from the literature. Nevertheless, despite the high interest in the experimental measurement of the $U_{overall}$, the state-of-the-art methods can be employed only in laboratory environment or require laboratory apparatus (such as Hot Box), as discussed in previous chapter (section 4.2). To meet this need, the proposed methods could be useful tools for the introduction of standardized methods for the in-situ measurement of the U-value at lightweight envelopes. Moreover, both methods can be used for the post-evaluation of existing lightweight buildings in order to assess the thermal performance of the envelope.

References

- [1] I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, D.A. Kontogeorgos, M.A. Founti, Two new methods for the in-situ measurement of the overall thermal transmittance of cold frame lightweight steel-framed walls, *Energy and Buildings*, 170 (2018) 183-194.
- [2] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa, L. Simões da Silva, Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (2017) 194-209.
- [3] E. de Angelis, E. Serra, Light Steel-frame Walls: Thermal Insulation Performances and Thermal Bridges, *Energy Procedia*, 45 (2014) 362-371.
- [4] E. Barbour, J. Goodrow, J. Kosny, J.E. Christian, Thermal Performance of Steel-Framed Walls, The American Iron and Steel Institute 1994.
- [5] M. O'Grady, A.A. Lechowska, A.M. Harte, Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging, *Energy and Buildings*, 135 (2017) 20-32.
- [6] ISO/FDIS 9869-2, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 2: Infrared method for frame structure dwelling.
- [7] L. Ibos, J.-P. Monchau, V. Feuillet, Y. Candau, A comparative study of in-situ measurement methods of a building wall thermal resistance using infrared thermography, in: *The International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015*, SPIE, 2015, pp. 10.
- [8] ASTM C1363 - 11, Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus.
- [9] ISO 8990, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box.
- [10] M. Gorgolewski, Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing, *Building and Environment*, 42 (1) (2007) 230-236.
- [11] L. Zalewski, S. Lassue, D. Rouse, K. Boukhalfa, Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls, *Energy Conversion and Management*, 51 (12) (2010) 2869-2877.
- [12] T. Thorsell, M. Bomberg, Integrated methodology for evaluation of energy performance of the building enclosures: part 3 — uncertainty in thermal measurements, *Journal of Building Physics*, 35 (1) (2011) 83-96.
- [13] Y. Li, J. Yao, R. Li, Z. Zhang, J. Zhang, Thermal and energy performance of a steel-bamboo composite wall structure, *Energy and Buildings*, 156 (Supplement C) (2017) 225-237.
- [14] P. Santos, C. Martins, L.S. da Silva, L. Bragança, Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses, *Journal of Building Physics*, 38 (1) (2013) 81-98.
- [15] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method.

- [16] ASTM C1155 - 95(2013), Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-situ Data.
- [17] E. Roque, P. Santos, The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position, *Buildings*, 7 (13) (2017) 1-18.
- [18] ASTM C1060-11a Standard, Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings.
- [19] ASHRAE. 2009, Handbook, Fundamentals, Chapter 27, Heat, air and moisture control in building assemblies - examples.
- [20] F. Ascione, R.F. De Masi, R.M. Mastrullo, S. Ruggiero, G.P. Vanoli, Experimental investigation and numerical evaluation of adoption of multi-layered wall with vacuum insulation panel for typical Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 152 (2017) 108-123.
- [21] COMSOL Multiphysics®, <https://www.comsol.es/comsol-multiphysics>.
- [22] X. Meng, B. Yan, Y. Gao, J. Wang, W. Zhang, E. Long, Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method, *Energy and Buildings*, 86 (Supplement C) (2015) 754-765.
- [23] G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello, F.R. d'Ambrosio Alfano, M. Dell'Isola, U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings, *Energy and Buildings*, 104 (Supplement C) (2015) 108-121.
- [24] B. Tejedor, M. Casals, M. Gangoellés, X. Roca, Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades, *Energy and Buildings*, 151 (Supplement C) (2017) 187-197.
- [25] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [26] Hukseflux Thermal Sensors, User Manual HFP01 & HFP03, manual version 1620, 2017.
- [27] Temperature Handbook and Encyclopedia, 5th Edition, Omega Engineering.
- [28] M.W. Ahmad, M. Mourshed, D. Mundow, M. Sisinni, Y. Rezgui, Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research, *Energy and Buildings*, 120 (2016) 85-102.
- [29] MICRO-BETACHIP (MCD), Thermistor Probe, Specifications 09/2015.
- [30] L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, F. Bianchi, Heat transfer study of external convective and radiative coefficients for building applications, *Energy and Buildings*, 151 (Supplement C) (2017) 429-438.
- [31] L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, R. de Lieto Vollaro, F. Asdrubali, Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78 (Supplement C) (2016) 214-223.

CHAPTER 6

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TWO LIGHTWEIGHT BUILDING ENVELOPES INCORPORATING VIPs

Contents

6.1	Introduction.....	116
6.2	Renovation of an external wall with VIPs - The first building application of VIPs in Greece	118
6.3	A lightweight mock-up building in Switzerland.....	128
6.4	Conclusions.....	145
	References	147

Summary

The present chapter presents a comprehensive experimental investigation of two real building envelopes incorporating VIPs in different climatic conditions. The first application concerns the investigation of a renovated wall in Greece (first building application of VIPs in Greece), and the second concerns the investigation of the whole envelope, incorporating VIPs at the external walls, in Switzerland. The two buildings were constructed and monitored over an entire year. The experimental methods and techniques, discussed in previous chapters, are implemented in order to assess the thermal and hygrothermal performance of two envelopes. The study focuses on the use VIPs in building envelope revealing their impact on the envelope upgrade. At the same time, some weaknesses and barriers to overcome are brought to light adding to the ever-increasing experience for making the VIPs an effective solution for the insulation of buildings. A part of the results regarding the thermal and hygrothermal performance of the Greek building has been published in the international journal Energy and Buildings [1], while the a part of the results regarding the Swiss building has been published in the international conference IVIS 2017 [2].

6.1 Introduction

As already discussed in the introduction of the current thesis (Chapter 1), innovative insulation materials with very low thermal conductivity are developed, aiming to upgrade the thermal performance of the building envelope. In this direction, Chapter 3 highlighted that the Vacuum Insulation Panels (VIPs) form an ideal solution for the further increase of the envelope thermal resistance in small thicknesses. At the beginning of the 21st century, the use of VIPs as building insulation material has been the object of several studies [3-8]. However, despite the very low thermal conductivity of VIPs (up to 10 times lower than conventional insulation), the fact that the VIPs are fragile and their thermal performance is reduced through the time makes their application in buildings doubtful up today. Moreover, the lack of experience regarding the handling of VIPs hinders their widespread in building sector [9]. So, there is still a need for test methods and evaluation procedures to prove the suitability of VIPs as a building material.

As the service life and fragility of the panels are the most significant barriers for the application of VIPs in buildings, the majority of the current published scientific work regarding VIPs has focused on durability and applicability issues [10, 11]. Moreover, several studies have investigated the optimization of the panel properties, regarding the development of core materials [6, 12] and envelope configuration [13]. At the same time, there is a lack of information on in-situ thermal performance of VIPs under different thermo-hygric conditions. As the building industry requires reliable materials with proven performance and life span, further efforts are required to improve the implementation and performance of VIPs in the building structure. In this direction, experimental validation of the expected benefits and quantification of possible discrepancies between design values and field performance are extremely important in terms of establishment of the new materials in the market.

Recently, examples of application of VIPs in buildings have been reported in the IEA Annex 39 - High Performance Thermal Insulation - evaluating their effectiveness using numerous approaches. Aware that the actual thermal performance of an existing wall may deviate significantly from the theoretically performance, even for conventional insulation [14], some of studies in Annex 39 used experimental techniques for the investigation of the VIPs. Mukhopadhyaya et al. [15] monitored a VIP retrofitted wall, exposed to subarctic climate, over a period of three years. They highlighted that the in-situ performance of the VIPs is reduced by a rate less than 0.8% per year. Ascione et al. [16] evaluated the effectiveness of VIPs in Mediterranean climate by means of infrared thermography and in-situ monitoring measurements. They revealed the high thermal performance of VIPs and their positive effect on the dynamic behavior of the envelope, both in summer and winter months. At the same time, several studies have indicated that the impact of the introduced linear thermal bridges (edge effect, section 3.3) and the fixing devices on the actual performance of the VIPs has to be taken into account, adding a further complexity [9, 17].

Most studies focus on the thermal performance of VIPs and the achieving energy saving, however, the hygrothermal behavior of the VIP application is not entirely investigated. The low permeance of the envelope increases the risk of moisture accumulation in the VIP surfaces, which can result to moisture condensation, affecting significantly their service life, leading to possible mold growth and deterioration of the wall [18, 19]. Johansson et al. [20] monitored the thermal and hygrothermal performance of a retrofitted wall incorporating VIPs. Having confirmed the improvement of the envelope thermal performance, they showed that the VIP did not increase the moisture content in the wall after retrofitting. Ghazi Wakilli et al. [21] investigated the “dry and wet installation methods” of VIPs by means of measurements in controlled conditions using climate chambers and simulations in WUFI 2D

[22] software. They concluded that the use of dry installation method is important for the appropriate hygrothermal performance of VIP layers. At the wet method, the initial Relative Humidity (*RH*) was 100% due to the wet gluing plaster and dried out to 90%, when the respective initial Relative Humidity at the dry method was 70% and dried out to 60%.

It is obvious that there is a need for reliable characterization of in-situ thermal and hygrothermal performance of VIPs in real buildings under different climatic conditions. Addressing the above challenge, the current chapter presents a comprehensive experimental investigation of two envelopes incorporating VIPs in different climatic conditions. For this purpose, two lightweight steel-framed (LSF) “mock-up” (small scale) buildings were constructed and monitored for at least one year. The construction methodology followed the rules applying to steel framed buildings according to Eurocode 3 [23]. Configuration and thickness of the envelope components as well as the materials utilized are the same as in full scale buildings. The investigation concerns the thermal and hygrothermal performance of the envelope, focusing on the behavior of VIPs. The core material of VIPs is fumed silica, providing the higher thermal performance, according to section 3.2. The properties of the incorporating VIPs were measured by means of the Guarded Hot Plate method, calculating the impact of the edge effect. The assessment of the two envelopes and the incorporating materials is performed by means of the methods and the indicators described in previous chapters (Chapters 2, 4 and 5).

The first application is a wall at a two-story lightweight mock-up building located in Greece. The walls were initially insulated with conventional External Thermal Insulation Composite System (ETICS) using expanded polystyrene (EPS) as insulation material. After two years, the insulation of the north wall was replaced with an ETICS incorporating VIPs. This application is the first building application of VIPs in Greece. The thermal and hygrothermal performance of the renovated wall is investigated by means of the R-value measurements, taking into account the methods and the results of the Chapter 4, as well as thermography and monitoring data for more than one year. Moreover, a comparison assessment between the two ETICS (EPS and VIP) is carried out focusing on the wall thermal performance upgrade.

The second examined building is a LSF mock-up building located in Switzerland. A VIP layer was installed at the internal side of the load bearing structure in order to reduce the thermal bridges caused by the metal frame. The thermal performance assessment is performed by means of the U-value measurement, using the proposed RPM introduced in Chapter 5, thermography, and monitoring results over an entire year. The experimental investigation focuses on the effect of the VIPs on the improvement of the envelope performance and their impact on the thermal bridges. The results obtained by the monitoring campaign are also used for the validation of numerical simulation model in the following Chapter 7 (section 7.4.2).

The current study reveals the thermal and hygrothermal behavior of VIPs and their contribution on the envelope performance under real conditions. At the same time, the construction and the analysis of the two buildings brings to light limitations, obstacles and barriers to overcome, indicating the need of an integral approach when designing building components and constructions with VIPs. The present work is an innovative contribution to the needed data and experience regarding the performance of VIPs as a building insulation.

6.2 Renovation of an external wall with VIPs - The first building application of VIPs in Greece

The present section carries out an extensive investigation of the thermal and hygrothermal performance for a building wall incorporating VIPs. As the building is located in Athens, the current case study is the first building application of VIPs in Greece. The insulation of the building is based on External Thermal Insulation Composite System (ETICS). The initial insulation was based on conventional material (EPS), while the north wall was renovated using a VIP based ETICS. The basic insulation component of the renovated wall is a composite insulation component (CIC) consisting of one layer of VIP and two layers of mineral wool.

After the detailed description of the building construction, focusing on the installation of the CIC panels, the material properties and the edge effect of VIPs are measured. A comparative assessment of the two insulation systems (EPS and CIC ETICS) is followed by means of the in-situ R-value measurement and thermography test. Finally, the thermal and hygrothermal performance of the renovated wall is analyzed by means of temperature and humidity monitoring data, obtained for a whole year.

6.2.1 Construction of the building

The under-investigation building (Figure 6.1a) is a two-storey lightweight mock-up building located inside the campus of the National Technical University of Athens. The construction is based on a cavity wall system incorporating External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). The external dimensions of the mock-up are 3.65 m x 3.65 m and 7.53 m height.

The construction of the mock-up is based on a lightweight steel skeleton system (cold-formed sections) completed with drywall systems and an inclined roof with OSB sheathing (Figure 6.1b). The steel frame is anchored on a cement base and consists mainly of I-shaped elements. Metal runners and studs are anchored on the frame for the attachment of the gypsum and cement boards covering the metal frame, internally and externally respectively. The symmetry axis of the mock-up is aligned with the points of the horizon with the entrance facing west.

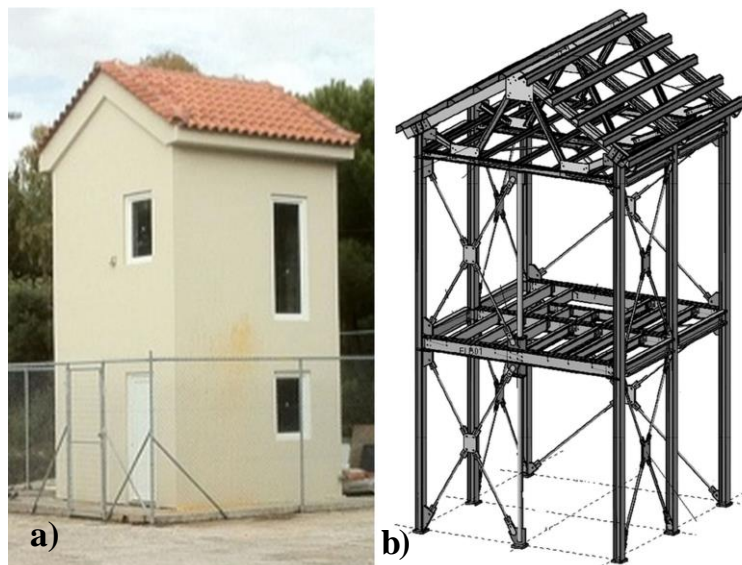


Figure 6.1 – The NTUA mock-up building: a) southwest view and b) its steel load bearing frame.

The building was built in 2010 and the four external walls were initially insulated by a conventional system using EPS ETICS. In July 2012, the ETICS of the north wall was replaced by a VIP based system incorporating a composite insulation component (CIC) consisting of two layers of mineral wool and one layer of VIP (encapsulated or sandwich VIP). The insulation of the south, west and east walls remained the EPS ETICS. The Figure 6.2 shows the lateral side of the two ETICS for the north and west wall, respectively, during the renovation.

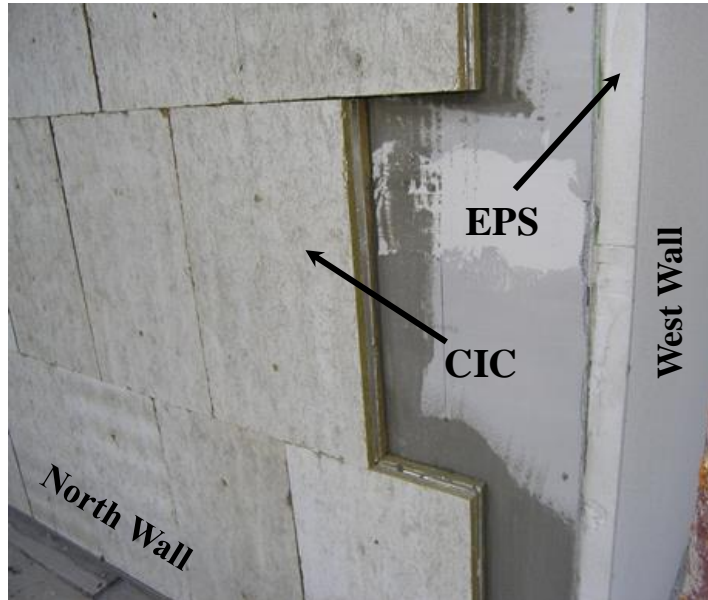


Figure 6.2 – Composite insulation component (CIC) and expanded polystyrene (EPS) panels during the renovation.

The EPS ETICS comprises an EPS layer 50 mm thick attached on a single cement board forming the external part of the wall. The exposed EPS surface was finished with cement-based mortar resulting to a total thickness of 69.5 mm for the EPS ETICS. The EPS ETICS were attached on the cement boards by means of bonding mortar and special dowels. The internal part of the wall consists of a double layer gypsum board. Between the external and the internal part of the wall there is an air cavity, 190 mm thick, resulting to a total thickness of the “EPS wall”, equal to 284.5 mm. The configuration of the EPS wall is shown in Figure 6.3a.

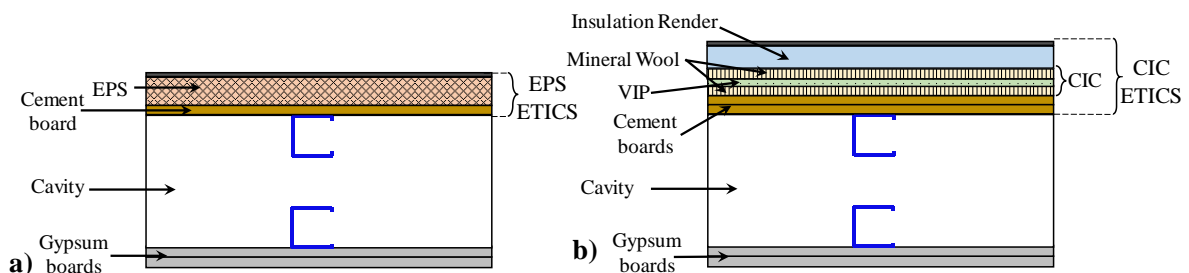


Figure 6.3 – The configuration of the two types of walls: a) EPS wall and b) VIP wall.

The CIC ETICS is a multi-layer insulation system comprising 55 mm thick CIC component (Figure 6.4a) and 50 mm of thermal insulation render. Its total thickness is 120 mm (including finishing coating and bonding mortar layers) attached on a double layer cement board, resulting to a total thickness of the “VIP wall” equal to 360 mm, including the cavity and the internal part. The configuration of the VIP wall is shown in Figure 6.3b.

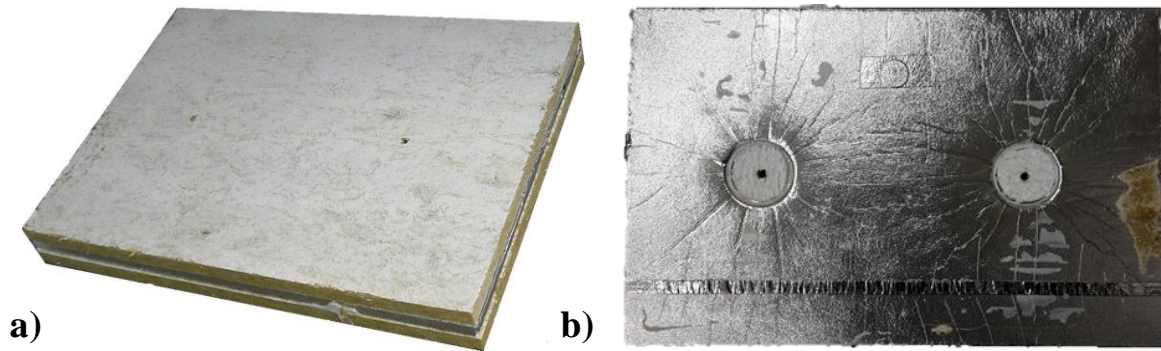


Figure 6.4 – a) The Composite Insulation Component (CIC) where a VIP is located between two mineral wool layers and b) the incorporating VIP with the two circular holes filled with EPS.

The CIC panels were specially assembled by a multinational insulation company in Germany and shipped with special care to the construction site. Prior to installation, the panels were checked by optical means at the lateral side for possible damages. The installation of CIC panels was performed by the “wet installation method” using bonding of mortar on the both surfaces. Additionally, the safe attachment of CICs on the wall was ensured by means of 2 steel dowels (4.2 mm diameter and 80 mm length) in PVC housing for each board (Figure 6.5a). For this purpose, the VIPs were specially manufactured with 2 circular holes of 75 mm diameter filled with EPS (Figure 6.4a) allowing the dowel to pass through without affecting the sealing membrane. The VIP used in the CIC consists of a pyrogenic silica core wrapped in a three-layer metalized membrane. The dimensions of the CIC boards (Figure 6.4b) are 600 mm width, 400 mm height and 55 mm thickness (15mm VIP and 20 mm each layer of mineral wool) weighting approximately 8.3 kg/m². The two layers of mineral wool serve as protection from mechanical damage of the delicate VIP envelope and from the alkalic nature of the bonding mortar as the instability of aluminum at extreme pH values is well known [6, 10]. As the CIC cannot be cut during the installation, an uncovered area was created, 20 cm – 35 cm length, at each side of the lateral part of the wall (Figure 6.5b). EPS insulation was installed at the uncovered area (Figure 6.5c), introducing a linear thermal bridge due to the difference of thermal conductivities between EPS and CIC panels.

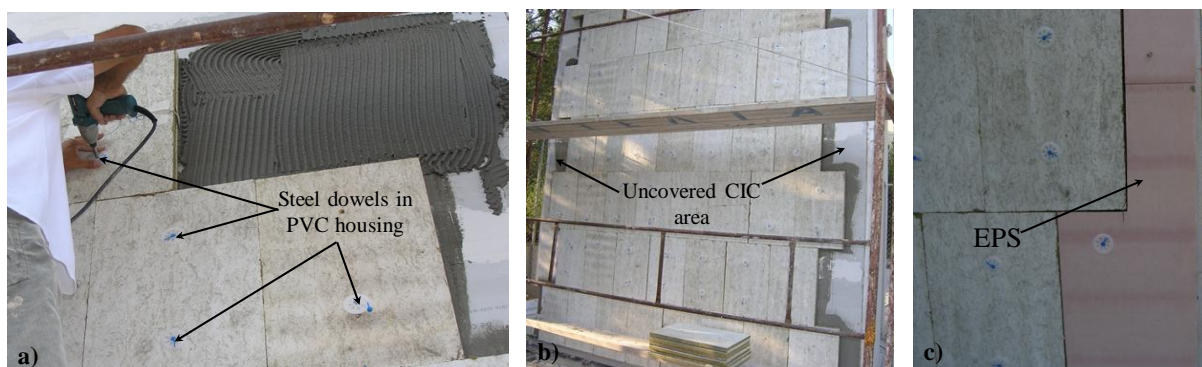


Figure 6.5 – a) Installation of CIC panels with mortar and dowels, b) uncovered areas by CIC panels and c) installation of EPS at the uncovered area by CIC.

6.2.2 Material properties

The thermal properties of the individual materials incorporating the initial and renovated walls are presented in Table 6.1. The thermal conductivities of materials were either measured in the laboratory

by a Guarded Hot Plate (GHP) apparatus or obtained from tabulated values in relation to their density [24].

Table 6.1 – Thermal properties of the incorporating materials.

Material	Thickness [mm]	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Density [kg/m ³]	Specific heat capacity [J/(kg·K)]
Finishing coating	2.0	0.61	1600	1000
Finishing mortar	4.0	0.29	870	1000
Insulation render	50.0	0.065 ^a	1600	1000
Bonding plaster	4.5	0.61	1600	1000
Mineral wool	20.0	0.035 ^a	120	1000
VIP (center of panel)	15.0	0.005 ^a	180	850
Bonding mortar	4.5	0.61	1600	1000
Cement board	12.5	0.36 ^a	1150	879
Gypsum board	12.5	0.183 ^a	810	950
EPS	49.0	0.037 ^a	14	1450

^a Measured by means of Guarded Hot Plate

The VIP's effective thermal conductivity (λ_{eff}) including edge effects was measured according to the GHP method described in Chapter 3 (section 3.4.1). The same method was also applied to the CIC panels in a way that it was possible to calculate the contribution of linear thermal bridges due to the joint of two panels to the total λ_{eff} of the composite panels. The linear thermal transmittances of VIP, Ψ_{VIP} , and CIC panels, Ψ_{CIC} , was calculated according to the equations 3.7 and 3.8.

The measurements were taken at the temperature of 20°C and the results are summarized in Table 6.2. It is noted that the calculated λ_{eff} values of the VIP and CIC panels includes the edge effect only due to the perimeter of the VIPs and not the edge effect due to the perimeter of the two holes and the EPS area (due to instrument limitations). The edge effect increases the thermal conductivity of VIP by 24% and that of CIC by 17%, compared with the center of panel thermal conductivity (λ_{cop}). The λ_{eff} value of the CIC panel (0.0156 W/(m·K)) is 149% higher the λ_{eff} value of the VIP (0.0062 W/(m·K)), due to the presence of two mineral wool layers.

Table 6.2 - Thermal conductivity and linear thermal transmittance values with the use of Guarded Hot Plate.

	Thickness [mm]	λ_{cop} [W/(m·K)]	Ψ [W/(m·K)]	λ_{eff} [W/(m·K)] (not including holes)
VIP	15	0.0050	0.0099	0.0062
CIC	55	0.0133	0.0049	0.0156

The impact of the two holes and the EPS area was impossible to be measured by the GHP apparatus, due to the configuration of the holes. The two holes were concerned as point thermal bridges and their effect was calculated numerically, according to ISO 10211 [25]. The effective thermal conductivity of the VIP, including the effect of two holes is equal to 0.0075 W/(m·K) and the effective thermal conductivity of the CIC is equal to 0.0176 W/(m·K). As a result, the respective R-value of CIC

(55 mm thick) is $3.12 \text{ m}^2\text{K/W}$, approximately 57% higher than the VIP's R-value ($1.99 \text{ m}^2\text{K/W}$). The latter is a significant increase showing that, apart from the protective role, mineral wool also serves as extra insulation. Finally, the impact of all thermal bridges (EPS holes, edge effect and joint) result to an increase of the clear thermal resistance of the wall (R_{wall}) by 19.2%.

6.2.3 Instrumentation and measuring devices

The instrumentation for the experimental investigation of the mock-up building is separated into three systems: the monitoring system, the R-value measuring system and the thermography equipment. The monitoring system was designed to collect and record temperature and humidity values inside the whole building envelope as well as indoor and outdoor conditions aiming to the assessment of the thermal and hygrothermal performance of the renovated wall (VIP wall). Sensors were installed at key points in the building envelope both at the ground and the upper floor. In total, 47 sensors were installed (39 temperature and 8 humidity sensors) following the recommendations of ASTM C1046 standard [26]. For the temperature measurements, NTC thermistors, with nominal resistance $10 \text{ k}\Omega$ at $25 \text{ }^\circ\text{C}$, were used. The small tip size of the sensor (less than 0.5 mm) provides positioning accuracy, fast response and higher temperature accuracy in comparison with thermocouples (see also section 5.4.1) [27], since the absolute error is less than 0.5°C . Relative humidity was measured by means of Honeywell HIH-4030 integrated circuit humidity sensors, suitable for use even in condensing environments. These sensors are of dimensions $8.6 \text{ mm} \times 4.2 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ and their accuracy is $\pm 2\%$. The humidity sensors are encapsulated into a thin wire mesh protecting it from harsh environments like dust and mineral wool fibers. A temperature sensor was also installed in the same probe. Also, a meteorological station was installed at the proximity of the mock-up for the measurement of the following parameters: temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, solar radiation and rain fall. The measured variables were logged in regular intervals by means of an advanced data acquisition system based on the Agilent 34972A data acquisition/logger switch unit. The logging rate is 1 measurement/min.

As the focus is on the thermal and hygrothermal performance of the VIP wall, the current work utilizes only the data from sensors installed on the north wall of the building. The layout of the sensor plan for the VIP wall is shown in Figure 6.6. The data analyzed in this section were recorder from July 2012, when the VIP wall was constructed, to September 2013. A temperature control system coupled with a heating system was used during two periods maintaining the indoor temperature equal to a set point.

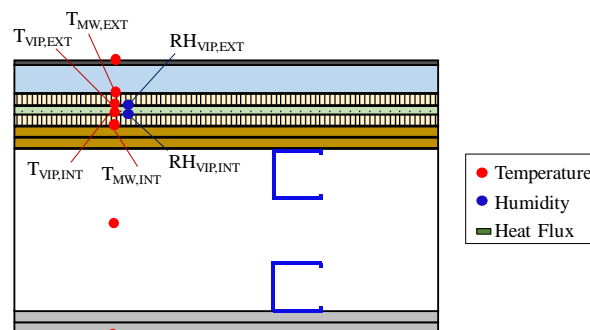


Figure 6.6 – Locations of temperature, humidity and heat flux sensors of the VIP wall for the both floors.

The R-value monitoring system is used only for the in-situ R-value measurement both of the EPS and the VIP wall. The required measurements of the internal and external surface temperature and the internal heat flux was obtained by means of the TRSYS01 (Hukseflux), consisting of two heat flux

sensors and two pairs of matches thermocouples. The extensive description of the system is presented in section 4.6.2. The thermography test of the under-investigation building was performed by means of the IR camera (FLIR model 595) (see section 5.4.1).

6.2.4 Boundary conditions

Athens is a region with subtropical Mediterranean climate characterized by warm/hot, dry summers and mild/cool winters. According to weather data (Figure 6.7) obtained by the monitoring system, the average high temperature during August (the hottest month of the year) is 33.7°C while the average low temperatures for February (the coldest month) is 6.9°C. Mean daily temperature fluctuations exceed 13°C during the summer months, while they are lower (ca. 8°C) during January. Outdoor Relative Humidity values range from 25% to 90% during the whole measuring period.

The indoor ambient temperature follows the external conditions reaching up to 35°C during the summer and 10°C during the winter. The daily fluctuation reaches up to 3.5°C, in summer months indicating the low thermal mass of the examined envelope. There are two periods during the winter with controlled indoor conditions when the temperature control system was turned on maintaining the indoor temperature to 25°C during the first period and 22°C during the second (Figure 6.7).

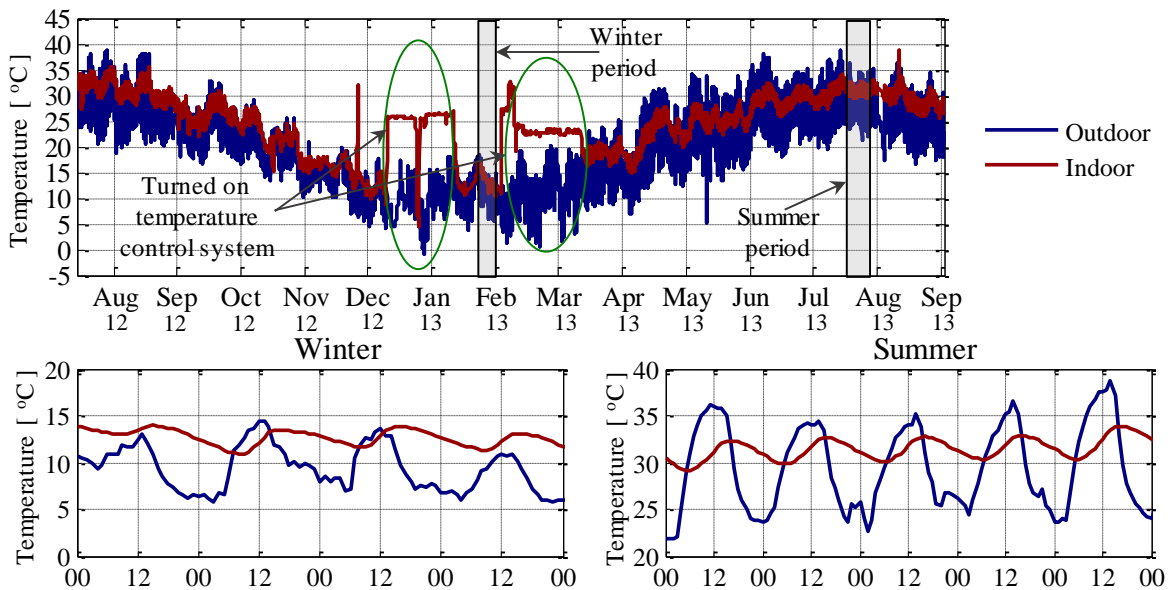


Figure 6.7 - Indoor and outdoor air temperatures at the NTUA mock-up building.

6.2.5 Thermal performance assessment of the building wall

The thermal performance assessment of the mock-up building envelope focuses on the renovation of the north wall replacing of the EPS ETICS to the CIC ETICS. The comparative assessment of two walls was performed by means of the IR thermography and the in-situ R-value measurement. Furthermore, the contribution of the incorporating layers of the VIP walls to the insulation ability of the wall is presented by means of the temperature measurements.

Thermography

IR images were obtained in order to optically compare the CIC and EPS ETICS of the mock-up. The thermography test was carried out during the early morning hours in winter, avoiding the solar radiation, following the ASTM C1060 standard [28]. An indoor/outdoor temperature difference higher than 10°C was achieved by means of activation of a heating source inside the building.

An IR image of the mock-up building is illustrated in Figure 6.8. As it is shown, the VIP wall is colder than the EPS wall by approximately 2°C. This reveals that the wall with CIC ETICS is more insulated than the wall with conventional insulation. Moreover, the central part of the two walls appears to be homogenous without strong thermal bridges. The insulation render at the external side of the CIC layer weakens possible thermal bridges creating a uniform temperature field. For instance, the temperature field at the lateral side of the north wall, where the EPS insulation was installed on the uncovered by CIC area (Figure 6.5c), appears to be uniform.

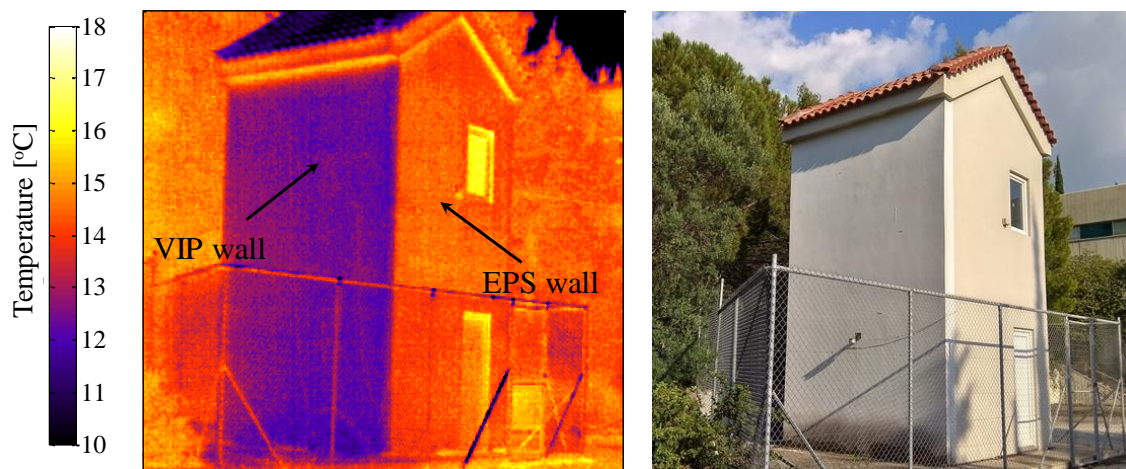


Figure 6.8 – IR image and view of the mock-up building.

R-value measurement

The in-situ R-value measurement of the two walls was performed according to ISO 9869 and the Dynamic method [29], as described in section 4.3. The measurements were obtained in optimum measuring conditions for the Dynamic method, according to the results of the Chapter 4 (section 4.7). The R-value measurements were obtained during the periods when the temperature control system was activated, resulting a surface temperature difference higher than 10°C and the stable direction of the heat flow.

According to the guidelines of international standards [29, 30], direct solar radiation on the measured wall surfaces were avoided. This is the main reason for the selection of the north wall for the installation and measurement of the CIC ETICS. EPS ETICS were also measured on the north wall prior to their replacement by the VIPs. The R-value was measure at both ground and upper floor of the building.

The two walls are warm lightweight steel-framed walls, because the insulation is located outside the framing. For this reason, the surface temperature disturbance, caused by the presence of metal stud, is almost negligible. Moreover, the load bearing structure of the building is the metal skeleton which is located at the cavity layer of the wall (Figure 6.1b). As the skeleton does not penetrate the material layers at the central part of the wall, its impact on the wall thermal performance is negligible. This is

revealed by the IR thermography of the internal surface of the two walls showing a uniform temperature field. Further numerical analysis of the examined walls indicates that the surface temperature disturbance is ca. 0.04°C in the case of EPS wall and the 0.02°C in the case of VIP wall (Figure 6.9). As it is observed by the heat flux charts, the heat flux at the surface of the wall is almost uniform and a random installation of the heat flux sensor may result to an overestimation of the thermal resistance up to 3%. For this reason, the two walls were faced as homogeneous. However, despite the low surface heat flux disturbance, the section of studs was avoided for the position of the heat flux sensors. Moreover, the R-value was measured near the center of the wall at different heights on both floors of the building.

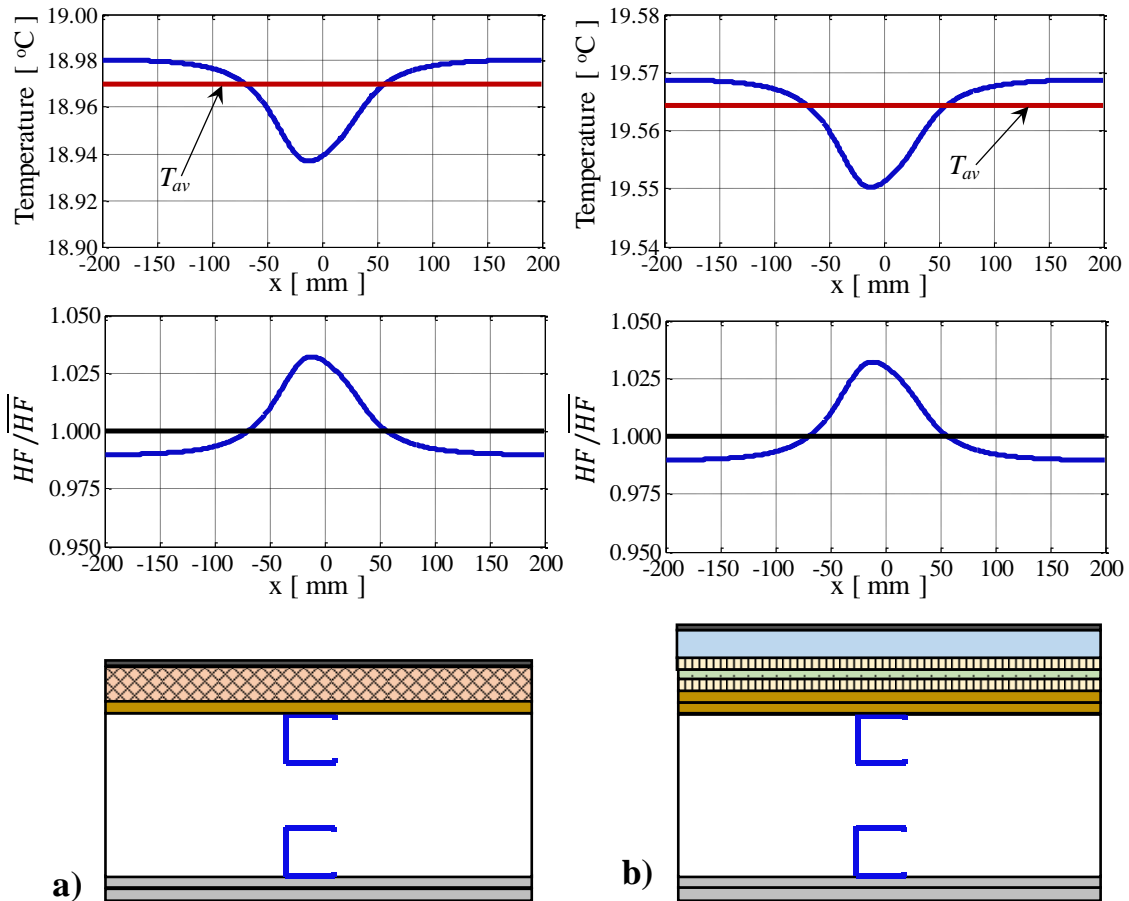


Figure 6.9 – Theoretical analysis a) wall with EPS ETICS and b) wall with CIC ETICS.

Table 6.4 presents the experimental and theoretical results for the R-value of the two walls. The obtained mean R-values are $1.74 \text{ m}^2\text{K/W}$ and $3.88 \text{ m}^2\text{K/W}$ for the EPS and the VIP wall respectively. Hence, the installation of the CIC ETICS improved the thermal performance of the north wall by 123%. In terms of the overall thermal conductivity of two walls (taking into account the thickness of two walls), the value of the VIP wall is lower by 43% than EPS wall.

Table 6.3 – Theoretical and experimental R-values for the two types of walls.

	Thickness [mm]	Theoretical R-value [$\text{m}^2\text{K/W}$]	Experimental R-value [$\text{m}^2\text{K/W}$]
Wall with EPS ETICS	284.5	1.74	1.74 ± 0.19
Wall with CIC ETICS	360.0	4.31	3.88 ± 0.43

Comparing the experimental with theoretical R-values, it is observed that the measurement of the EPS wall is in agreement with theoretical value. In the case of the VIP wall, the theoretical R-value is ca. 10% higher than the measurement, however the margin of error of the experimental value include the theoretical value. This small difference may be caused by the severe thermal bridges due to junction of VIP wall with the lateral EPS walls. The impact of these thermal bridges affects the central part of the wall via the air movement inside the cavity creating a uniform temperature field.

Material Contribution

The monitoring of temperature at the interfaces between the layers of the wall was used for the thermal performance assessment of the individual insulation layers, focusing of the materials of CIC ($MW_{int} - VIP - MW_{ext}$). The contribution of the CIC materials to the resulting total insulation ability of the wall was evaluated calculating the ratio of the temperature difference caused by each layer to the total surface temperature difference of the wall. The results are presented in Figure 6.10 for a period of two days with activated temperature control system (almost constant indoor temperature) and low variation of the outdoor temperature in order to reduce the effect of heat storage. The results show that the 15 mm thick VIP layer causes ca. 30% of the total wall temperature difference for the two floors, while the two mineral wool layers contribute on the total difference by 13 – 17%. The external mineral wool layer results slightly higher temperature difference than the internal mineral wool layer of CIC. It should be mentioned that the other materials (insulation render, cavity and boards) results approximately 37% of the total wall surface difference.

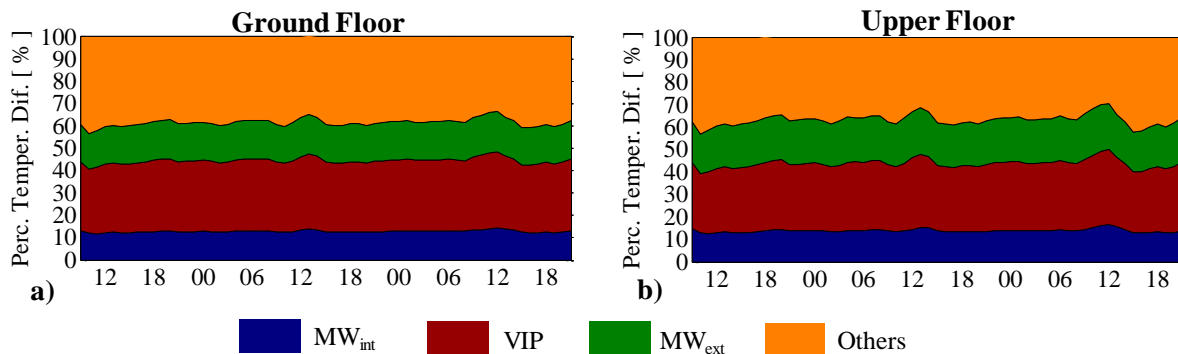


Figure 6.10 - The contribution of CIC on the percentage temperature difference of the wall with CIC ETICS for a) the ground floor and b) the upper floor.

6.2.6 Hygrothermal performance of the wall

The hygrothermal of the VIP wall emphasizes on temperature and moisture conditions developed on the surface of the VIPs. Figure 6.11 presents the mean daily relative humidity (RH) and temperature values on the surfaces of the VIPs for both ground and upper floor. High relative humidity values and presence of condensates (shown as $RH > 100\%$) are observed during the first weeks after installation. This is caused due to the wet installation method of the CIC panels and the initial moisture of the construction materials/mortars attained during the application (Figure 6.5). The relative humidity of the VIP wall is gradually reduced for the next 6 weeks. The elevated summer temperatures contribute significantly in accelerating the drying of the wall, which reaches a low relative humidity value of ca. 40% in the beginning of September. The onset of winter and the resulting ambient temperature drop results to a noticeable increase of the levels of relative humidity inside the wall. Especially, saturation is occurred at the external VIP surface at the ground floor (Figure 6.11 a). It becomes apparent, that the

excessive humidity resident inside the wall, due to initial moisture during the construction, has only partially removed during summer, since the low winter temperatures create re-condensation inside the wall.

The activation of the heating system reduces the humidity level and eliminates condensation at the external surface of the VIPs. During the heating periods, the increased indoor temperature results to the reduction of the *RH* by ca. 20% on both sides of VIPs. The differences in the *RH* values between the ground and upper floor are owed to differences of indoor ambient condition.

It is noted that the above findings are based on observations on the north wall of the building that is not exposed to direct solar radiation. It can be assumed that if CIC ETICS was installed on the south, east or west wall the direct solar radiation would result in the removal of high amount of the initial moisture reducing the risk of future re-condensation. The increased relative humidity and the presence of condensates analyzed above affect the envelope thermal performance.

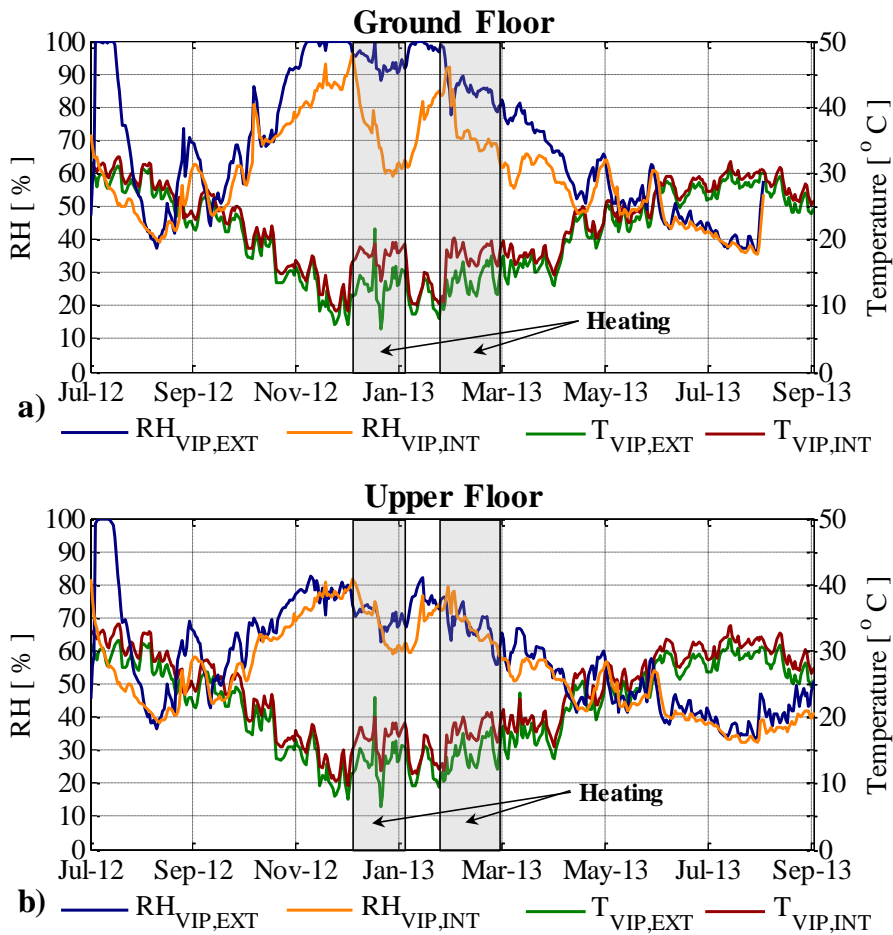


Figure 6.11 – Measurements of relative humidity and temperature on the VIP surfaces at the wall of a) ground floor and b) upper floor of the building.

6.3 A lightweight mock-up building in Switzerland

An extensive experimental investigation of a lightweight steel-framed (LSF) building envelope incorporating VIPs is carried out in the present section. A mock-up building was constructed in Switzerland in the frame of the FP7 project “ELISSA: Energy Efficient Lightweight Sustainable Safe Steel Construction” (Grant no. 609086) [31]. A VIP layer was installed at the internal side of the external walls in order to reduce the thermal bridges caused by the load bearing structure.

A description of the building construction and the incorporating materials is carried out focusing on the installation of VIPs and revealing obstacles and limitations. The effective thermal conductivity of VIPs was measured taking into account the edge effect. The thermal and hygrothermal performance of the whole buildings envelope is assessed by means of a monitoring campaign for a whole year, from February 2016 to February 2017, in-situ U-value measurement and thermography test.

6.3.1 Construction of the building

The purposely built small scale building (mock-up), located in Laupersdorf, Switzerland, was constructed in 2016 by drywall materials anchored on a lightweight steel-framed structure (Figure 6.12). The external dimensions of the mock-up building are $4.00\text{ m} \times 2.19\text{ m} \times 2.80\text{ m}$. The construction did not include any windows, in order to permit focusing on the effect of the VIPs on the thermal performance of the opaque envelope. The only opening of the building is a wooden door with dimensions $82 \times 190\text{ cm}$, located at the southern wall.

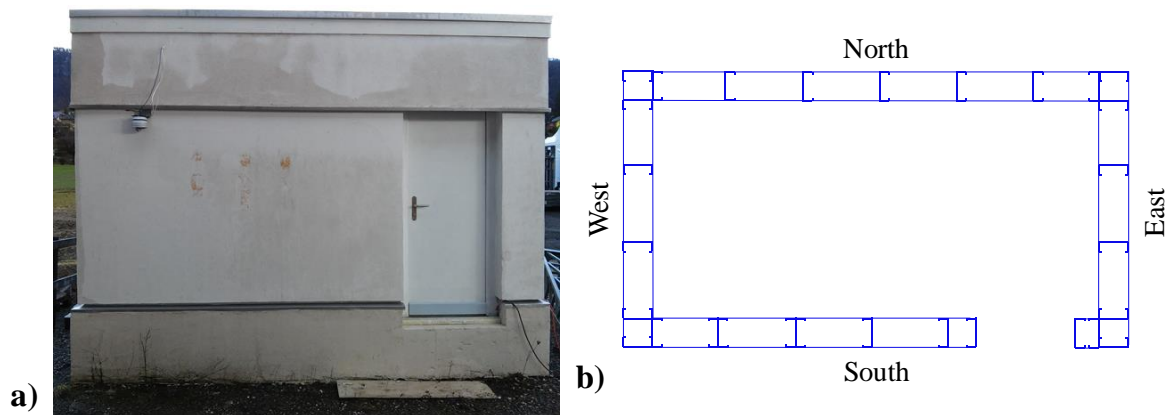
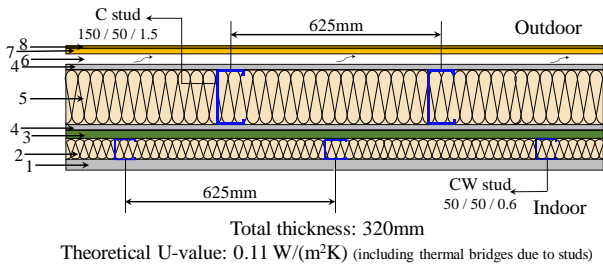
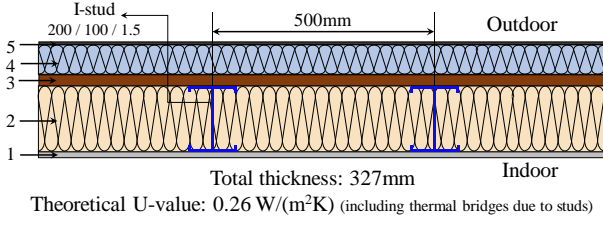
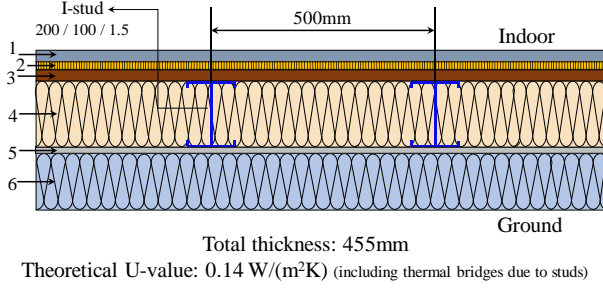


Figure 6.12 – The ELISSA mock-up building: a) a view of the South wall and b) the load bearing structure of the building.

Table 6.4 presents the configuration of the elements of the building envelope. The 320 mm thick external walls comprise two parts: the load bearing and the non-load bearing structure. The load bearing structure (Figure 6.12b) consists of one row of C-shaped steel studs (C-studs), with dimensions $150\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ and 1.5 mm thickness, equally spaced at 625 mm (Figure 6.14a). The gap between successive C-studs was filled with 150 mm thick mineral wool (MW150). Gypsum board layers were anchored on the external and internal side of the C-studs. A ventilated façade was installed at the central part of the external side of the wall, while the upper and the bottom part were additionally insulated with EPS coated with finishing mortar (Figure 6.13). The non-load bearing part of the wall consists of one row of C-shaped steel studs (CW-studs), with dimensions $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ and 0.6 mm thickness, located at the middle of the distance between the sections of two successive C-studs (Figure 6.14b). The

intermediate gap between the CW-studs was filled with 50 mm thick mineral wool. Two gypsum board layers were located at the internal surface of the wall.

Table 6.4 - The configuration of the elements of the building envelope.

Element	Configuration of the element	No	Materials	Thickness [mm]
Walls	 <p>Total thickness: 320mm Theoretical U-value: 0.11 W/(m²K) (including thermal bridges due to studs)</p>	1	Gypsum board	30
		2	Mineral Wool	50
		3	VIP	20
		4	Gypsum board	15
		5	Mineral Wool	150
		6	Air Cavity	27
		7	Cement board	12
		8	Finishing mortar	1
Roof	 <p>Total thickness: 327mm Theoretical U-value: 0.26 W/(m²K) (including thermal bridges due to studs)</p>	1	Gypsum board	15
		2	Mineral Wool	200
		3	Load panel	28
		4	EPS	80
		5	Roof sealing	4
Floor	 <p>Total thickness: 455mm Theoretical U-value: 0.14 W/(m²K) (including thermal bridges due to studs)</p>	1	Floor panel	32
		2	Sound Insulation	20
		3	Load panel	28
		4	Mineral Wool	200
		5	Gypsum board	15
		6	EPS	160

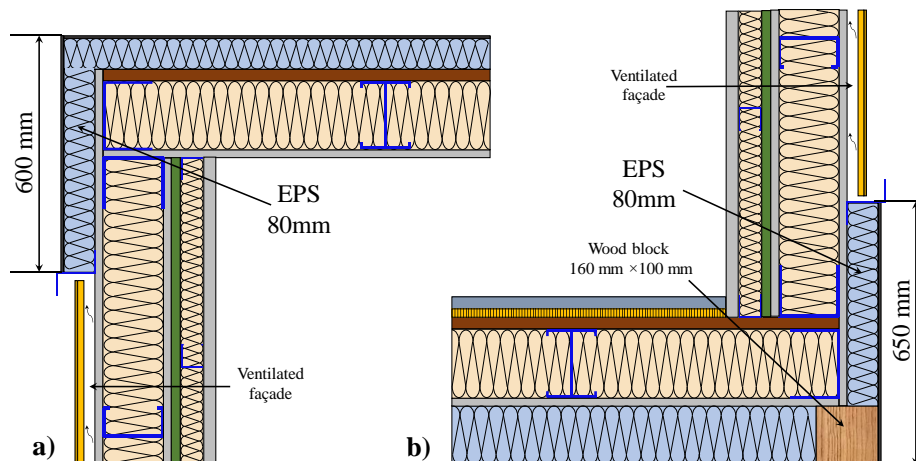


Figure 6.13 – Extra insulation of the walls: a) at the junction with the roof and b) at the junction with the floor.

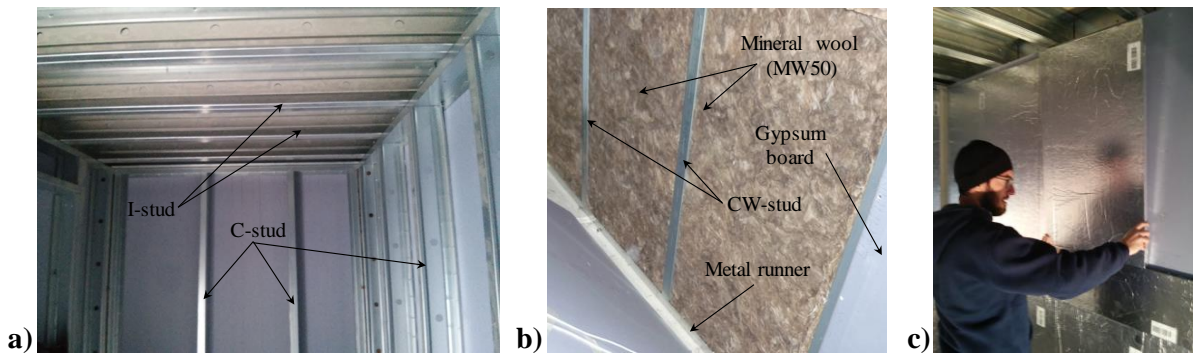


Figure 6.14 – Construction of walls: a) load bearing metal structure, b) installation of VIPs and c) installation of non-load bearing part of the walls.

One layer of Vacuum Insulation Panel (VIP), with thickness 20mm, was located between the load bearing and the non-load bearing structure of the walls. The VIP consists of a fumed silica core wrapped in a three-layer metalized membrane. The VIPs covered the surfaces of the internal walls, according to a specific optimized pattern (Figure 6.15) obtained with the use of a dedicated software developed by the VIP manufacturer. The aim of the optimization is the maximization of the area covered with VIP by means of, as far as possible, larger size panels, reducing the edge effect (see section 3.5.1). In doing so, 13 different sizes of panel were totally used. The placement of the VIPs on the wall was performed by means of the “dry installation method”, using a double-side bonding tape and building glue (Figure 6.14c). Adhesive tape was used for the reduction of the thermal bridges caused by the air gap between the joint of the adjacent panels.

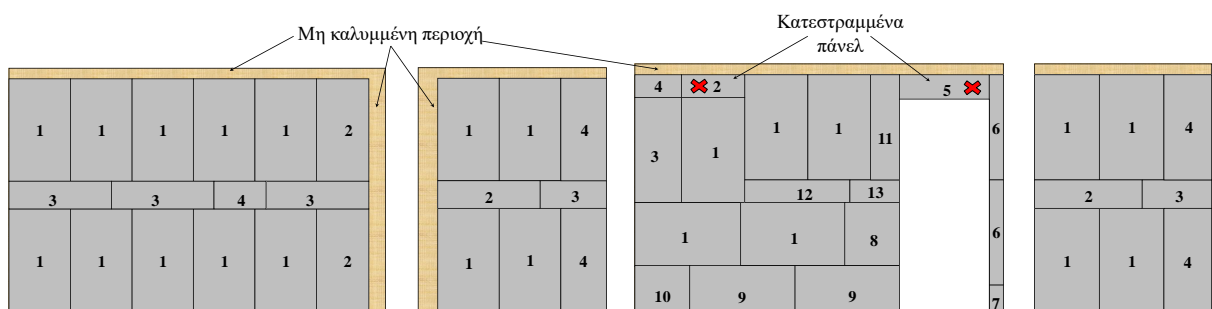


Figure 6.15 - Pattern of VIP for a) the North, b) the East, c) the South and d) the West wall.

Due to dimensional inaccuracies, one of the junctions between two adjacent walls (north and east) was not completely covered with VIPs creating a gap 100 mm, as illustrated in Figure 6.16. A part from this dimensional inaccuracy is owed to the tolerance in the production where the covered VIP area has to be slightly smaller (~ 5 mm tolerance at each edge of the covered area) than the covered surface (section 3.5.1). All uncovered areas (Figure 6.15) were filled with mineral wool. Furthermore, “improper” handling of the VIPs by non-trained technicians resulted to lose the vacuum of two VIPs located on South wall during the installation (Figure 6.15c), revealing the need for handling of VIPs by experienced and well-trained persons.

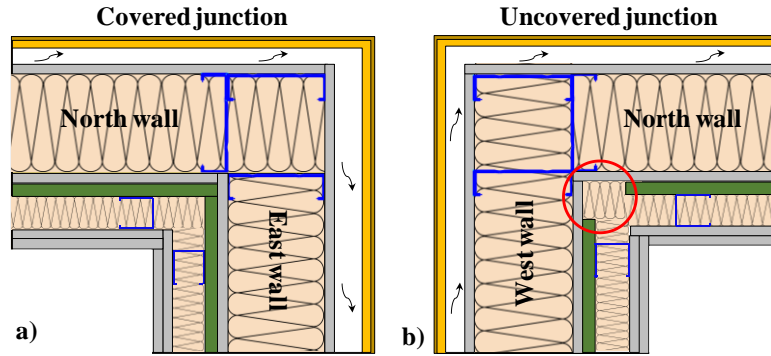


Figure 6.16 – Junction between two walls: a) proper insulation and b) construction irregularity.

The roof (Table 6.4) load bearing structure was constructed with I-shaped steel studs (I-studs), with dimensions 200 mm × 100 mm and 1.5 mm thickness, equally spaced at 500 mm. The intermediate gap between I-studs was filled with 200 mm thick mineral wool. A load panel was anchored on the external side of the metal structure, while a gypsum board layer was installed at the internal side (Figure 6.17a). An EPS insulation layer, 80mm thick, protected by finishing mortar, was applied at the external surface of the roof. The total thickness of the roof is 327 mm.

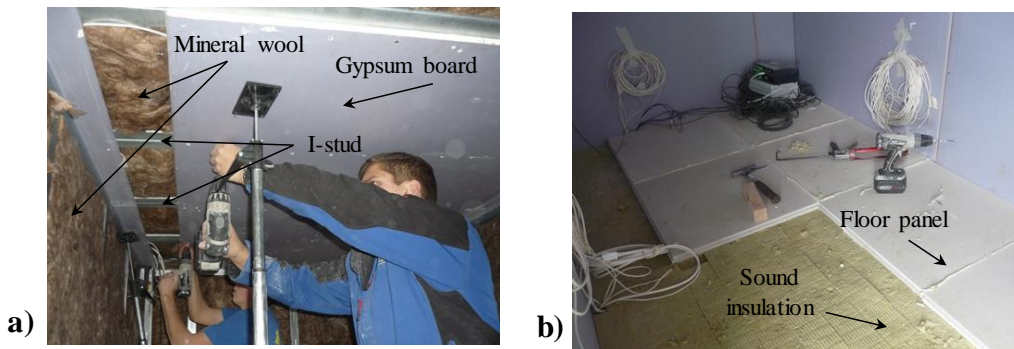


Figure 6.17 – Installation of materials: a) at the roof and b) at the floor.

The floor (Table 6.4) was constructed with 1.5 mm thick, I-shaped steel studs (I-studs), with dimensions 200 mm × 100 mm, equally spaced at 500 mm. The intermediate gap between I-studs was filled with 200 mm thick mineral wool. A gypsum board layer and a 160 mm thick EPS layer was installed at the bottom of the floor. A load panel, a sound insulation layer and a floor panel were placed at the internal side of the structure (Figure 6.17b). The total thickness of the floor is 455 mm.

6.3.2 Material properties

The thermal properties of the materials are presented in Table 6.5. The thermal properties of the individual materials used for the construction of the walls were either measured in the laboratory using the Guarded Hot Plate (GHP) technique or obtained from the manufacturer’s datasheets.

Table 6.5 - The thermal properties of materials.

Materials	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Density [kg/m ³]	Specific Heat [J/(kg·K)]
Steel stud	60.5	7854	434
Gypsum board	0.27 ^a	1033	990
Mineral Wool	0.035 ^a	23	850
VIP	0.0045 ^{a,b}	195	800
Cement board	0.35 ^a	1150	1000
Finishing mortar	0.50	700	1000
Load Panel	0.44 ^a	1500	1000
EPS	0.035 ^a	42	1400
Roof Sealing	0.2	1000	1000
Floor	0.38	1500	1000
Sound Insulation	0.07	250	2100
Door	0.22 ^a	850	900

^a Measured by means of Guarded Hot Plate

^b Effective thermal conductivity, λ_{eff} , of a panel with dimensions 1000 × 600 (mm)

Particularly, the effective thermal conductivity of the VIPs, λ_{eff} , taking into account the edge effect and thermal bridges at joints was measured by means of the GHP method described in Chapter 3, according to the equations 3.7 and 3.8. The measured effective thermal conductivities are presented in Table 6.6, for the most commonly used panel (dimensions 1000 mm × 600 mm) in the construction for two different temperatures, 10°C and 23°C. As it is shown; the “edge effect” significantly increases the effective thermal conductivity, λ_{eff} , of VIP (ca. 18%) compared with the thermal conductivity at the center of panel (λ_{cop}). This increase of the thermal conductivity of the VIP layer results to a reduction of the clear thermal resistance of the wall (without taking into account any other thermal bridge) by 7.7%. Moreover, higher temperatures result to a slightly higher λ_{eff} values, since the increase of temperature by 13°C results to a difference of the λ_{eff} by ca. 4%. However, the below analysis uses the effective thermal conductivity at 15°C, $\lambda_{eff} = 0.004508$ W/(m·K), taking into account the annual mean temperature of the VIP layer.

Table 6.6 - Thermal conductivity and linear thermal transmittance values with the use of Guarded Hot Plate.

Temperature	λ_{cop} [W/(m·K)]	Ψ_{VIP} [W/(m·K)]	λ_{eff} [W/(m·K)]
$T=10^\circ\text{C}$	0.00375	0.00618	0.00444
$T=23^\circ\text{C}$	0.00392	0.00616	0.00461

The effective thermal conductivity was calculated for all used VIP sizes. The λ_{eff} of the panels ranges from 4.5 to 6.5 mW/(m·K) depending on the dimensions of the panel, revealing the strong influence of the panel size on the edge effect. Table 6.7 presents the λ_{eff} for the VIP layer of each wall, taking into account the VIP pattern on the walls (Figure 6.15). It is observed that the λ_{eff} of the South wall is ca. 4% higher than the North wall. This is caused due to the use of several panels with small size in order to cover the complicated geometry of the wall caused by the presence of the door. The edge effect results to a reduction of the theoretical clear thermal resistance of the wall (excluding all thermal bridges) by 8.1%, in the case of North wall and by 9.6% in the case of South wall.

Table 6.7 – Effective thermal conductivity of VIP layer for the four walls, taking into account the pattern of VIPs.

Wall	λ_{eff} [W/(m·K)]
North	0.004547
West	0.004575
South	0.004724
East	0.004575

6.3.3 Instrumentation and measuring devices

The Data Acquisition System (DAS) installed at the mock-up building was designed to monitor and record the necessary data for the assessment of the thermal and hygrothermal performance of the envelope. In particular, approximately 100 sensors monitored and recorded temperatures inside the envelope elements (walls, floor and roof), heat flux values, indoor conditions, weather data and energy consumption of the utilized electrical devices. The measurements were recorded for a whole year, from February 2016 to February 2017.

The instrumentation of the current study is similar with the monitoring system described in section 6.2.3. Briefly, for the temperature measurements, Micro-Betachip NTC thermistor probes (MCD 10k3MCD1) were used (Figure 6.18a). Relative humidity was measured by means of Honeywell HIH-4030 sensors. The heat flow through the elements was measured with the use of high sensitivity heat flux sensors of Hukseflux (type HFP01) (see also section 5.4.1). A mini weather station (Figure 6.18b) was constructed for the weather conditions measurements (temperature and humidity of air). The temperatures sensors for the indoor and outdoor conditions were shielded against solar/thermal radiation and ventilated. Finally, the total electrical power consumption was measured by a portable power/energy meter.

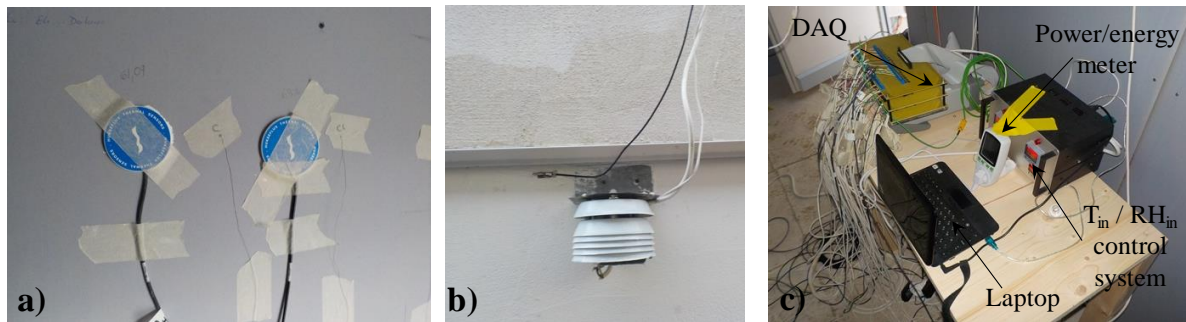


Figure 6.18 – Experimental equipment: a) temperature and heat flux sensors, b) the weather station and c) the Data Acquisition System (DAS).

The monitoring system is described in Figure 6.19. All sensors were connected to the Data Acquisition (DAQ) device, Agilent 34972A, for signal processing and logging (Figure 6.18c). The time interval for all the measurements was set to 2 minutes. The DAQ device was linked to a laptop that recorded the data continuously over the 12-month monitoring period. The indoor ambient temperature and humidity were controlled by means of a control (JUMO dTRON 316). A remote connection was available by means of the TeamViewer software allowing the remote retrieval of data, the control of the temperature and humidity system and optical surveillance. Besides, infrared thermography was performed using a portable IR camera (FLIR model 595).

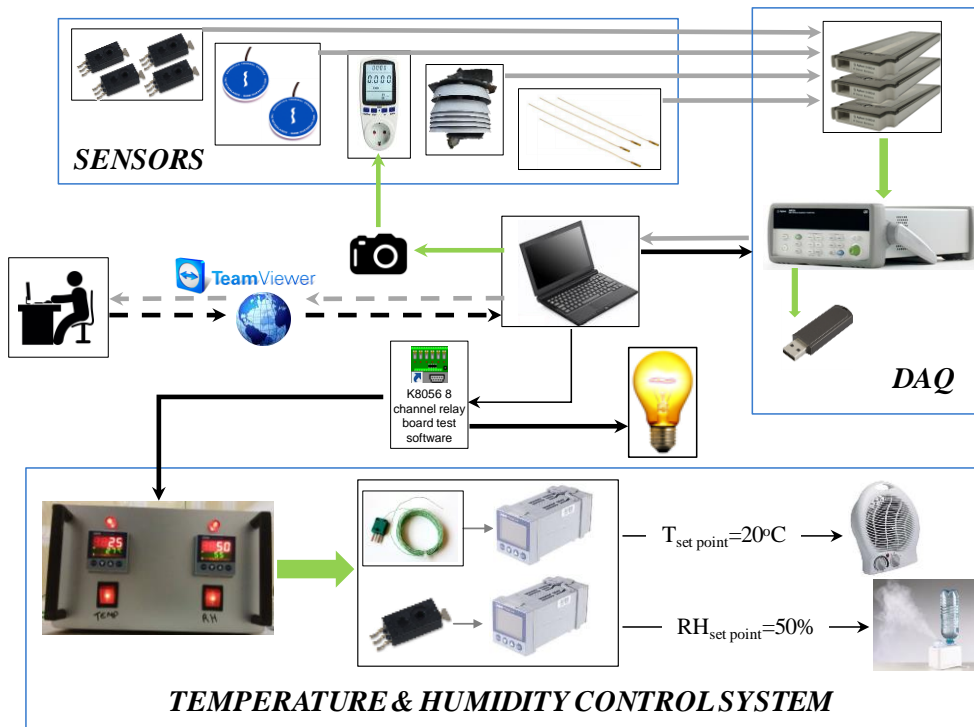


Figure 6.19 – Monitoring System.

As explained, the aim of the monitoring campaign was the assessment of the thermal performance of the envelope focusing on the thermal and hygrothermal behavior of the VIPs. Focus was given on the impact of the repeating and geometrical (non-repeating) thermal bridges caused by the metal structure and the junctions, respectively. For this reason, the temperature monitoring at the central part of the building envelope elements was performed in three sections: “C”, “CL” and “CW”, as presented in Figure 6.20. The “C” section is a section at the location of the C-stud for the external walls or the I-stud for roof and floor. The “CW” section, concerning only the walls, is a section at the location of the CW-stud. Finally, the “CL” section means the clear area, that is the section between C-stud and CW-stud for the walls and the section between two I-stud for the roof and the floor. The humidity sensors were installed at the “CL” section. All sensors were installed at the interfaces between the layers of the envelope following the practices proposed in ASTM C1046 [26].

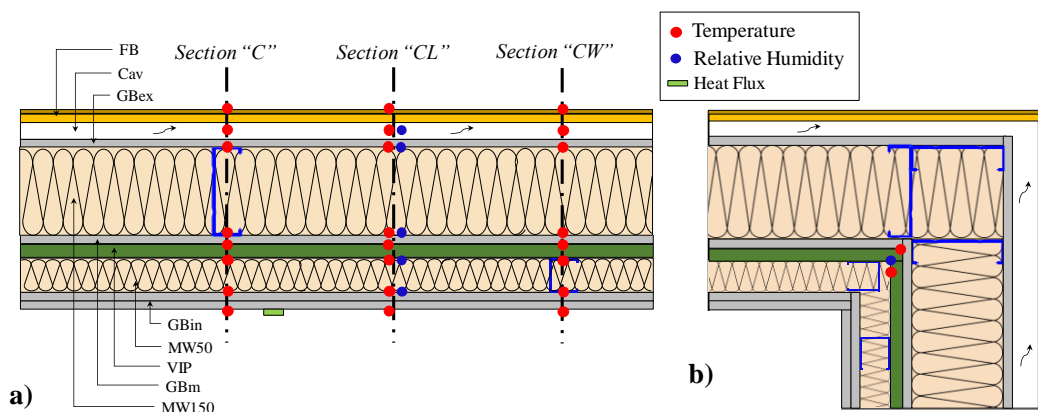


Figure 6.20 – Indicative locations of sensors for a) central part of walls and b) the junctions of the building envelope.

6.3.4 Boundary conditions

Laupersdorf, where the investigated building is located, is a region of Switzerland with temperate climate, characterized by cool/cold winters and warm/mild summers. According to weather measurements (Figure 6.21), the winter of the measuring period was cold, with average low temperatures for January 2017 (the coldest month) equal to -3°C , while the mean daily temperature fluctuations were lower than 5°C . The summer was mild, with average high temperatures equal to 20°C for the August (the hottest month), while the mean daily temperature fluctuations were ca. 15°C .

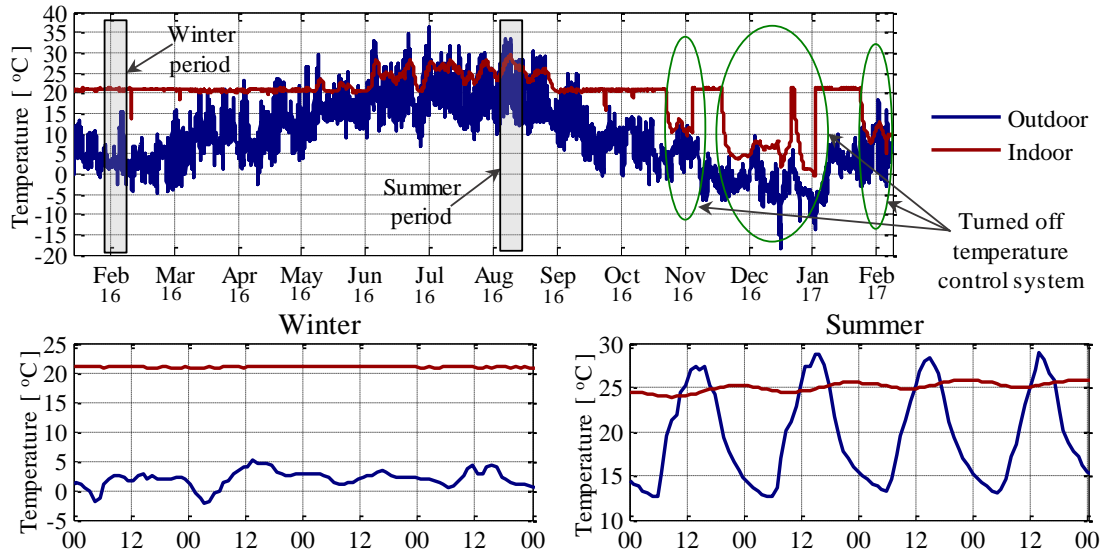


Figure 6.21 - Indoor and outdoor air temperatures at the ELISSA mock-up building.

The indoor ambient temperature was maintained at 21°C by means of the temperature control system. When the temperature dropped below this set point, a fan heater was activated. Moreover, this system was turned off for three periods in order to examine the response of the building envelope without the use of heating system during the winter (Figure 6.21). As a result, when the control system was turned off, the indoor temperature dropped by 6.5°C within 12 h and 9.5°C within 24 h, following the outdoors conditions. This rapid reduction of the indoor temperature is owed to the low thermal mass of the construction. In summer months, the indoor air temperature reaches up to 25°C and the control system was apparently not used.

6.3.5 Thermal assessment of the mock-up envelope

The thermal performance assessment of the mock-up building emphasizes on the impact of the VIP on the envelope upgrade, as well as the impact of thermal bridges. The thermal transmittance of the external walls is measured evaluating the effect of metal structure. Several indicators, introduced in section 2.4, are measured by means of the monitoring data. Finally, a simple ARX (Auto-Regressive with eXogeneous input) model is developed and validated for the estimation of the heat transfer coefficient of the whole envelope.

Thermal bridges

A large amount of heat losses due to the thermal bridges are introduced by the metal structure of the LSF building. Infrared thermography and temperature time series data were used in order to quantify the effect of the repeating thermal bridges, caused by the metal studs at the central part of the envelope elements. The thermographic analysis was performed with temperature difference between the indoor/outdoor environments equal with 25°C ($T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$ and $T_{out} = 5^{\circ}\text{C}$), following the ASTM C1060 [28] standard.

According to the obtained IR images, the surface temperature of the walls is only slightly disturbed by the presence of the studs (Figure 6.22a-top). Even in the case where the indoor/outdoor temperature difference reached at 25°C , the maximum temperature disturbance at the internal surface was 0.3°C . This low disturbance is owed to the intermediate VIP layer which reduces the heat flow and the fact that the walls are supported by two rows of metal studs at an alternating pattern creating a more uniform temperature profile. The monitoring results also indicate that the disturbance at the surface temperature do not exceed 0.1°C during the whole measuring period for the four walls, as indicated in Figure 6.22a.

On the other hand, the metal studs have a significant effect on the thermal performance of the roof (absence of VIPs). As depicted in Figure 6.22b, a high surface temperature disturbance, ca. 4°C , is observed during the thermography test. Furthermore, the area between the studs (CL section) is warmer than the stud area (C section), by ca. 2°C during the winter measurements, as presented in the monitoring results. It is remarked that a high temperature disturbance is observed despite the fact that the roof element is a hybrid frame LSF element, as the insulation is distributed between the external surface and the cavity between the studs.

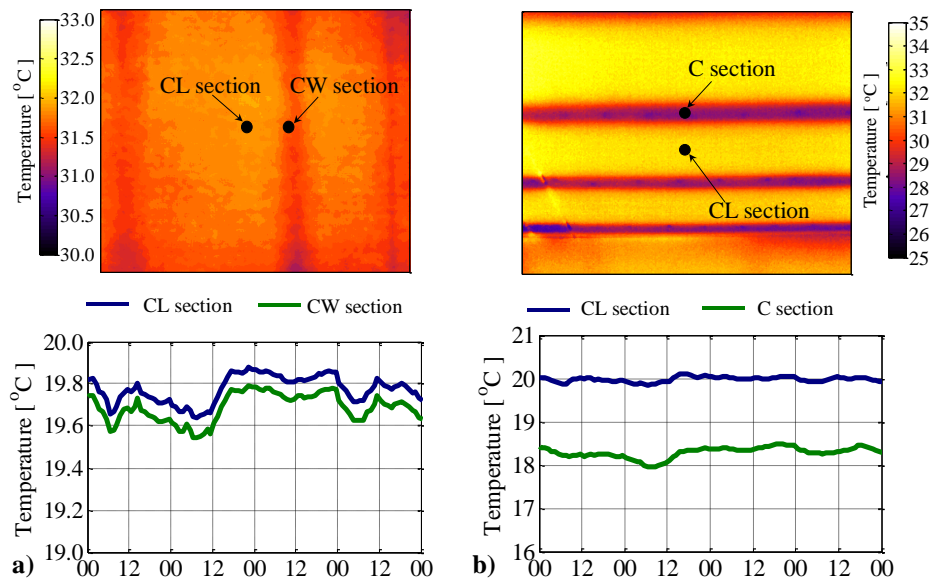


Figure 6.22 – IR images and temperature measurements during the winter days (maximum temperature differences) at the internal surface of a) wall and b) roof.

The impact of the small “dimensional inaccuracies” (resulting to a small area not covered by VIPs) on the geometrical thermal bridges between two adjacent walls is also investigated by means of IR thermography and temperature measurements. Figure 6.23a illustrates the IR images of two wall junctions: one completely covered and one not covered with VIPs, as depicted in Figure 6.16. The absence of VIPs lowers the recorded temperatures by ca. 2°C , during the thermography test. This significant effect of VIPs on the geometrical thermal bridges is also revealed by the monitoring results.

Figure 6.23b illustrates the temperature measurements for the two junctions at the interface between the internal gypsum board and the 50 mm thick mineral wool (MW50). It is observed that the completely covered (by VIP) junction has always a higher temperature than the one without VIP. The influence of this inaccuracy is stronger in the winter months, since the temperature difference reaches up to 1.5°C during the winter, while in the summer period the difference is reduced up to 0.3°C. The strong effect of the improper construction is numerically confirmed by the calculation of the linear thermal transmittance (Ψ_{2D}) of two junctions. The results are presented in the following chapter (section 7.4.1) concerning the numerical investigation of the mock-up building.

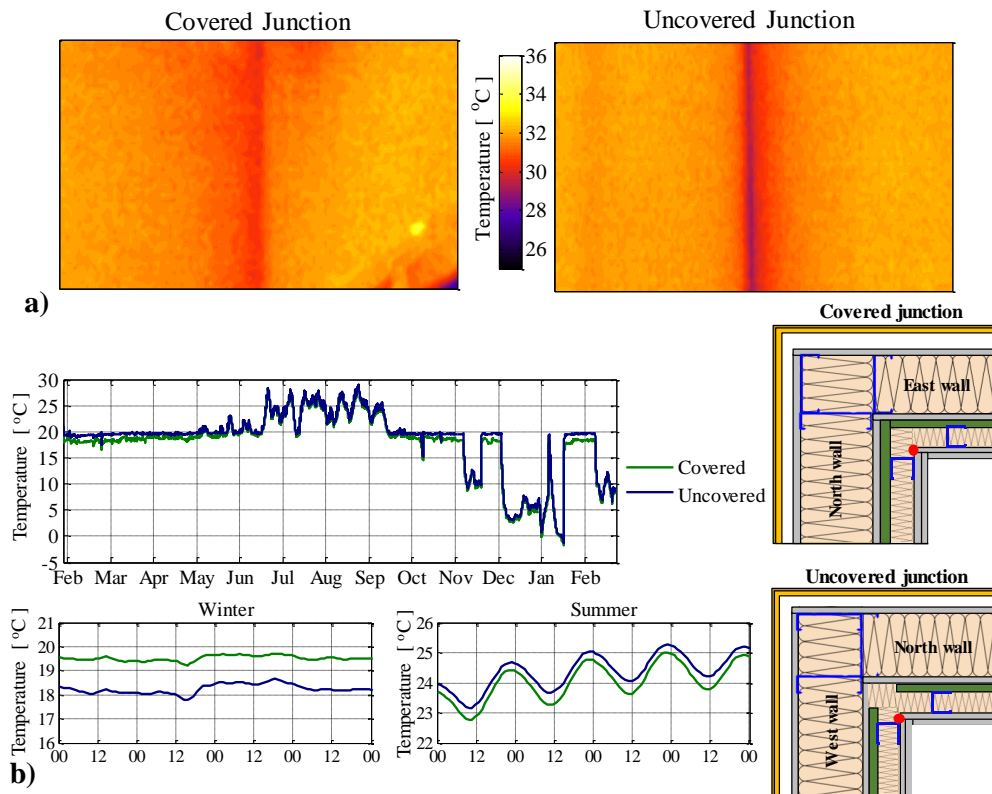


Figure 6.23 – Junctions covered and not covered with VIPs: a) infrared thermography and b) temperatures at the interface between the internal gypsum board and the MW50 during winter and summer.

U-value measurement

The thermal transmittance of the external walls, including the effect of metal studs, $U_{overall}$ was in-situ measured according to the Representative Points Method, as described in previous chapter (section 5.2.2). According to this method, the heat flux sensor has to be installed at “*Representative Points*”, where the heat flow at the internal surface is always equal to the averaged heat flow of the whole surface. The Representative Points are identified by means of the intersection of the \hat{T} profile (taking into account the width of heat flux sensor), obtained by infrared thermography at the internal surface of the wall and the average surface temperature. Besides, the surface temperature disturbance, ΔT_{stud} , caused by studs is required to be higher than 0.7°C. However, as previously analyzed (Figure 6.22a), the maximum temperature disturbance is $\Delta T_{stud} = 0.3^\circ\text{C}$, even in the case where the indoor/outdoor temperature difference was 25°C. As a result, it is not possible the accurate identification of the Representative Points’ locations, x_{repr} , from the resulting temperature profile obtained by IR image (Figure 6.24a top).

As the examined wall configuration and the incorporating materials are a priori known, the temperature profile and consequently, the accurate identification of the x_{repr} are performed by means of the numerical simulation of the wall. The central part of the wall was simulated by means of COMSOL software using the material thermal properties presented in Table 6.5 and the λ_{eff} for the north wall (Table 6.7). As depicted in Figure 6.24b, the deviation of the surface temperature is lower than 0.3%, in line with the monitoring and thermography results (Figure 6.22a). According to the results, there are several Representative Points on the repeated geometry of the external walls. The x_{repr} nearby the C-stud section was selected for the installation of the heat flux sensor, due to the smooth gradience of the heat flux curve. As it is observed from the variation of the heat flux at the length of wall (Figure 6.24b top), a random installation of the heat flux sensor may result to an overestimation of the heat flux (and as a result, the obtained U-value) up to 30% or an underestimation up to 15%.

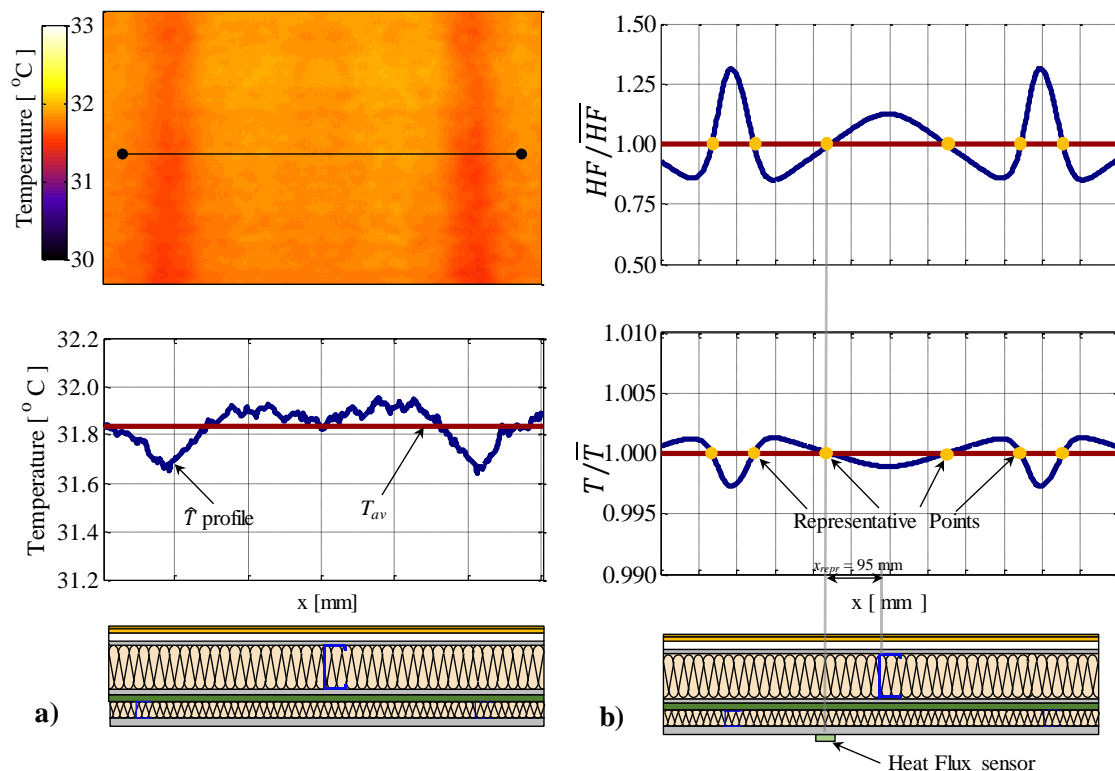


Figure 6.24 – Identification of representative points a) using IR thermography of the wall and b) according to numerical analysis.

Indoor/outdoor ambient temperatures and heat flux measurements are used for the in-situ measurement of the $U_{overall}$ of the wall. The post processing of measurements for the calculation of the U_{repr} was performed using the Average method, described in ISO 9869 [29].

The $U_{overall}$ is measured in different locations of the wall for several measuring periods during the year. The average results of the measured U-values are presented in Table 6.8. The experimental results are compared to the theoretical $U_{overall}$, as calculated according to the ISO 10211 [25], for the central part of the examined wall. As it is shown, the experimental $U_{overall}$ is in a very good agreement with the theoretical value, providing a difference ca. 2%. The results obtained over the monitoring year are very close and provide high repeatability, since their relative standard deviation is only 1%.

Table 6.8 - Theoretical and experimental $U_{overall}$ for the North wall.

	Period of measurement	$U_{overall}$ [W/(m ² ·K)]
Experimental $U_{overall}$	Winter	0.1173
	Spring	0.1169
	Summer	0.1180
	Autumn	0.1159
	Average	0.1170±0.019
	Theoretical $U_{overall}$	0.1146
	Difference	2.1%

Despite the fact that the surface temperature disturbance is almost negligible, the thermal transmittance of the walls is increased by 27% due to the presence of studs. Further numerical analysis of walls with and without VIPs indicates that the theoretical $U_{overall}$ of the wall without the layer of VIP is 0.2422 W/(m²·K). Hence, the VIP layer reduces the $U_{overall}$ at the center of the wall by ca 52%. It is noted that, the absolute values of the $U_{overall}$ shows that the under-investigation wall remains a high insulated wall even the ignorance of the VIP layer. It should be mentioned that the influence of the convection heat transfer on both walls (with and without VIPs) is very low, due to the fact that the thermal resistance of the walls is much higher than that of the surface thermal resistances.

Material contribution

The contribution of the materials on the thermal performance of the wall is investigated by means of the percentage temperature difference across each of the incorporating material compared to the total (internal/external) surface temperature difference of the wall [15]. In doing so, the insulative ability of each insulation layer is measured on the three sections (Figure 6.20a), in terms of the presence of thermal bridges due to metal studs. A period of three days with low fluctuations of the outdoor temperature and low solar radiation is selected in order to limit the heat storage effects.

The results are presented in Figure 6.25 for the three sections “C”, “CL” and “CW”. In all sections the VIP layer is responsible for the largest temperature difference of the wall (ca. 50%). However, the position of studs strongly affects the insulation efficiency of the materials. Despite the fact that the VIP and MW150 layer have similar thermal resistance (ca. 4.25 (m²K)/W) excluding studs, their contribution of the thermal performance of the wall is completely changed due to the presence of studs. In section “C”, the MW150 causes only the 10% due to the thermal bridge of the C-stud while, it contributes about 35% of the total temperature difference in “C” and “CL” sections. At the same line, the contribution of the MW50 is affected by the thermal bridges, since in “CW” section it stands for only 5%, while in sections “C” and “CL” it causes 18% and 11%, respectively.

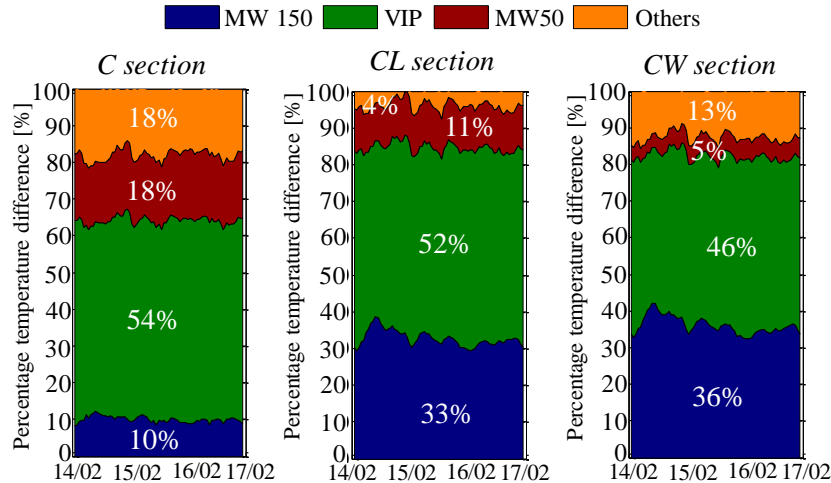


Figure 6.25 - The contribution of materials at the percentage temperature difference for the three sections: “C”, “CL” and “CW”.

Dynamic characteristics of the envelope

The impact of the building envelope in the smoothing of the external temperature fluctuations is investigated by means of the decrement factor (DF) and time lag (t_{lag}) indicators, as have been described in chapter 2 (section 2.4.2). The analysis of the envelope was performed for the period when the temperature control system was turned off in order to assess the envelope behavior without any external influence. The effect of the incorporated materials on the dynamic characteristics of the walls (DF and t_{lag}) was calculated for two different seasons, summer and winter.

Table 6.9 – Decrement factor for two walls.

DF [-]	North		East	
	Summer	Winter	Summer	Winter
MW150	0.300	0.370	0.274	0.340
VIP	0.398	0.477	0.497	0.563
MW50	0.800	0.839	0.724	0.781
Other materials	0.960	0.892	0.967	0.871
Whole wall	0.092	0.132	0.095	0.130

The DF was measured for external air temperature close to the sinusoidal trend (summer days) and for sharp changes of the daily temperatures occurred (winter days). Table 6.9 presents the average decrement factor of the incorporating insulation materials for the North and West wall of the building. The results show that the DF of the two walls is ca. 0.09 in summer, while in winter the DF is increase to 0.13. These values are relatively high due to the low thermal mass of the wall, as the DF of a typical massive wall is ca. 0.05. As it is observed, the highest impact on the DF is induced by the 150 mm thick mineral wool (MW150), since the DF of this layer is ca. 0.30. However, the 20 mm thick VIP contributes on the further reduction of the DF of the wall, since the DF of the VIP layer ranges between 0.4 – 0.55. Finally, the orientation of the walls slightly influences the DF values due to the presence of the air cavity at the external side of the wall, which smooths the changes of the external temperatures caused by the solar radiation.

The time lag values (t_{lag}) of the examined walls were measured for periods when the outdoor air temperature profile is close to the sinusoidal trend. Otherwise, the time lag results are not representative for the examined walls. Figure 6.26 illustrates the average time lag of the incorporating materials for the North and West wall. It is observed that the t_{lag} for the North and West wall is 8.25 h and 8.50 h, respectively. This means that when the higher outdoor daily temperature is observed at 14:00, the higher indoor temperature is observed at 22:00. The slight differences of the t_{lag} values between the two walls are caused by the orientation and the exposure solar radiation. The 150 mm thick mineral wool delays the temperature peak by ca 4 h, while the 20 mm thick VIP by 2.5 h.

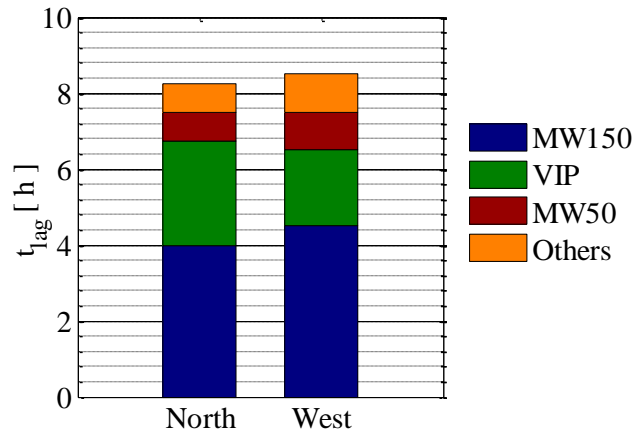


Figure 6.26 – Time lag of external walls.

Estimation of direct heat transfer coefficient, H_D

The determination of the heat transfer coefficient of the envelope, H_D , was based on a simplified linear model, introduced by Jimenez et. al [32-37]. According to this model, the steady state energy balance includes four terms: the heat losses due to the building envelope, the solar gains, the ventilation heat losses and the heat gains caused by the heating system and electrical devices inside the mock-up. The energy balance can be written by the following equation:

$$Q = H_D \cdot (T_{in} - T_{out}) + gA_{sol}I_{sol} + H_{ve}W_s(T_{in} - T_{out}) \quad 6.1$$

where Q [W] is heat flow rate from the heating system and electrical devices inside the building, T_{in} [°C] and T_{out} [°C] is the indoor and outdoor ambient temperature respectively, g [-] is the solar transmittance (it is negative in the above equation), I_{sol} [W/m²] is the incoming solar radiation, A_{sol} [m²] is the effective collecting area (solar aperture), H_{ve} [W/K] is the wind induced ventilation heat loss coefficient and W_s [m/s] is the wind speed.

Assuming that the air infiltration into the mock-up is negligible (door always closed), the term of the ventilation can be eliminated. Moreover, due to the fact that there is no any transparent surface at the envelope (window, skylight, etc.) and a large part of the mock-up is constantly shaded by neighboring buildings, the term of the solar gains at the above equation can also be excluded. For further limitation of the error, as external boundary of the envelope is assumed the temperature at the air cavity of the ventilated façade, excluding the impact of the solar radiation of the walls. Hence, the above equation is simplified as following:

$$Q = H_D \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad 6.2$$

The heat load, Q , and the temperatures T_{in} and T_{out} are available from the measurements, as heat load concerns the total electrical consumption (assuming that all electricity of devices converts to heat) measured by energy/power meter. In order to estimate the direct heat transfer coefficient, H_D , the energy balance is reformulated into the linear static model for each time interval, t :

$$Q_t = H_D \cdot \Delta T_t + c + \varepsilon_t \quad 6.3$$

where ΔT_t is the temperature difference between the indoor and air cavity for each time interval t , c is the intercept of the linear model and ε_t is the error $\sim N(0, \sigma^2)$ representing to the white noise. The intercept, c , is a constant and includes all non-climate dependent heat losses (e.g. climatic, diffuse radiation, losses through the ground etc.). A linear ARX (Auto-Regressive with eXogeneous input) model has been selected to estimate the parameters using MATLAB and its System Identification Toolbox [33]. As the model is a steady state model, the imposed physical constraint is that all input (Q , T_{in} and T_{out}) and output (physical parameters) must be constant [32, 35, 37]. Studies have shown that an integration period of 5 days can fulfill the statistical criteria of the model and provide acceptable results [36].

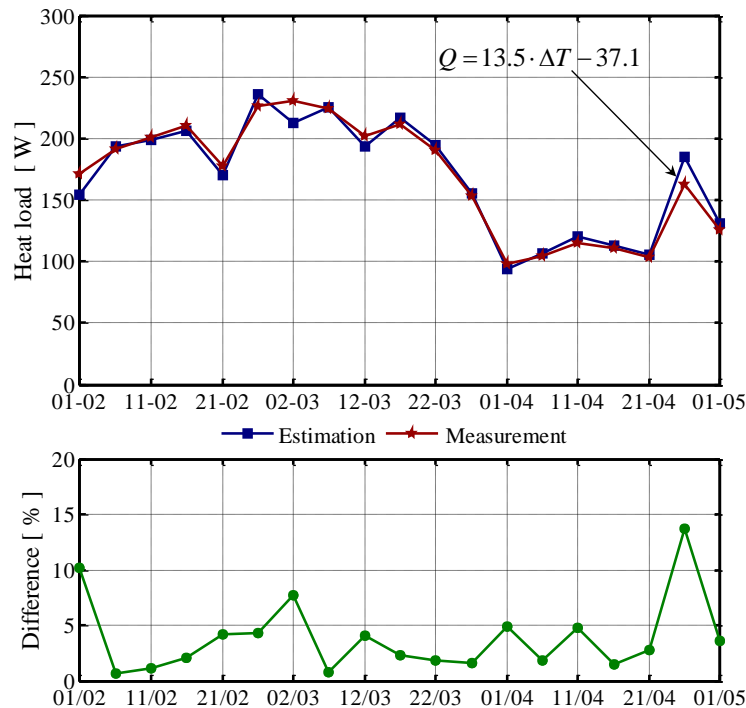


Figure 6.27 – The experimental and the estimated heat load according to the simplified model.

For the estimation of the heat transfer coefficient of the mock-up, the above described model was employed for a period when the temperature control system was activated and consecutive measurements of the energy consumption were available. Figure 6.27 illustrates the estimated by the model and the measured heat load by the energy meter. It is observed that the estimations are in a good agreement with the measured values and the average error is 4%. This indicates that despite the fact that the model is quite simplified, the simplicity of the building envelope (no windows) allows the use of such a simple model. The results show that the estimated direct heat transfer coefficient, H_D is equal to 13.5 W/K with adjusted R^2 parameter equal to 0.96. In the following chapter (section 7.2.3), it is revealed that the experimental estimation of H_D is in agreement with the theoretical calculation (equal to 12.57 W/K). The difference between the experimental and theoretical approach is lower than 7%,

which can be explained due to the simplicity of model, the infiltration, the effect of the ground, the radiation effects and other non-accounted for parameters.

6.3.6 Hygrothermal assessment of the mock-up envelope

A hygrothermal performance of the building envelope was carried out by means of the temperature and relative humidity (RH) monitoring for a whole year. The indoor RH was varied between 40-55% in summer, while in the winter the RH was varied between 20-40% for the period with activated temperature control system, and 40-50% for the period when the temperature control system was turned off. It is noted that an absence of condensation was observed at the building envelope during the whole measuring period.

Humidity test

A humidity test was carried out in order to investigate the response of building envelope on the mass transfer. The concept of the test was the increase of the moisture content in the indoor space resulting to the increase of indoor relative humidity. This was achieved by means of the humidity control system and two humidifiers. As a result, the response of the building envelope in humidification was investigated. Having reached at a constant set point of indoor relative humidity ($RH=45\%$) for several hours, the humidifiers were turned off in order to investigate the response of materials in drying. The temperature control system was activated during the humidity test maintaining the indoor temperature to 21°C .

The measurements of the relative humidity (RH) at the interfaces between the layers of the wall are presented in Figure 6.28a. It is observed that the RH at the interfaces in front of the VIP is increased almost at the same time, while the RH behind the VIP (MW150 - GBm) is not influenced by the increase of the indoor moisture content. This is also revealed by the humidity ratio (or water content, w) (Figure 6.28b), calculated by psychrometric chart, using the RH and temperature measurements at the interfaces between the layers. The humidity ratio in front of the VIP increases, while the humidity ratio behind the VIP follows the outdoor conditions. This shows that the VIP acts as a barrier for the mass transfer for the layers at the external side of the wall. The humidification of the layers in front of VIP (GBin and MW50) appears to delay only 2 h, while the materials maintain the moisture content for approximately 8 h after the humidifiers turning off.

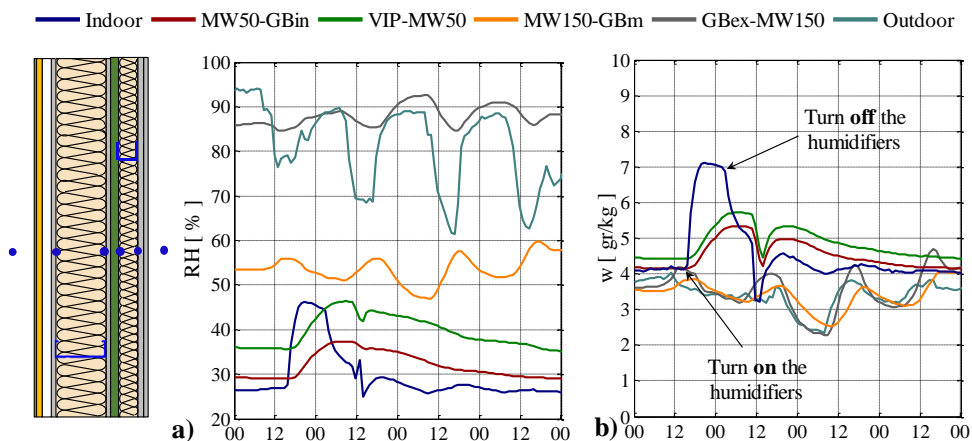


Figure 6.28 – Humidity test: a) RH and b) humidity ratio between the layers of the wall.

Temperature factor

Except from the monitoring results, the hygrothermal performance of the building envelope was assessed by means of the temperature factor, f , as it is introduced in section 2.4.2 and equation 2.10. The temperature factor is used as an indicator for the possibility of humidity issues at the regions of thermal bridges. The temperature factor was calculated using the surface temperatures for different critical regions at the internal side of the envelope. As the temperature factor is a steady state indicator, the calculated values concern a 5-day period with low outdoor temperature and humidity fluctuations and stable indoor temperature.

The temperature factors for the nine most critical regions of the envelope are presented in Figure 6.29. It is shown that the f values of all regions are higher than the critical value of 0.7, at which there is a risk for mold growth, according to the DIN 4108 standard [38]. The high values of the temperature factors indicate the high thermal and hygrothermal performance of the under-investigation building envelope. The most severe thermal bridge appears to be at the junction that was not covered with VIP, the local f value is equal to 0.77, while the f value at the covered junction is equal to 0.85. The latter is an indicator for the hygrothermal importance of the proper complete cover of the envelope with VIPs.

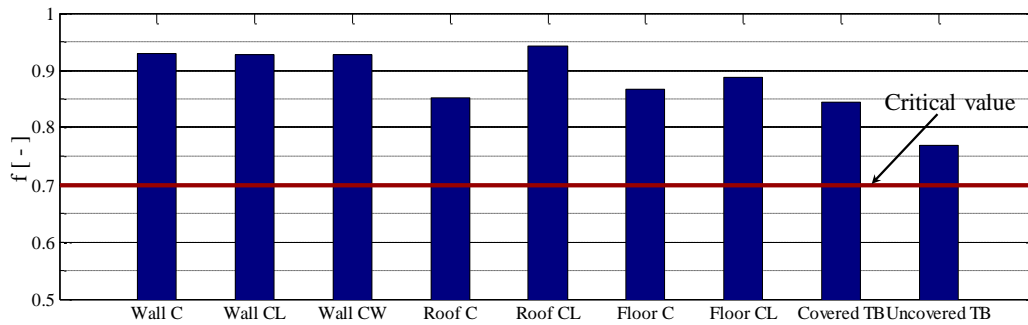


Figure 6.29 – Temperature factors for nine regions of the building envelope.

6.4 Conclusions

The present chapter discussed the comprehensive experimental investigation of two real building envelopes incorporating VIPs in different climatic conditions. The two constructions are small scale (“mock-up”) buildings built in Greece and in Switzerland. Actually, the Greek application is the first application of VIPs at a real building in Greece. The initially EPS based insulation of the north wall was replaced with VIP based insulation, where the VIP was integrated with two layers of mineral wool (encapsulated or sandwich VIP) resulting to a one-size composite insulation component (CIC). The Swiss building is a lightweight steel-framed (LSF) construction, where different sizes of VIPs were used in order to create an intermediate layer of the external walls. The two buildings were monitored for at least one year. Experimental methods and techniques, which have been introduced and discussed in previous chapters, are used for the measurement of several thermal performance indicators. The study focuses on the thermal and hygrothermal performance of the building envelope highlighting the contribution of VIPs.

The material properties are measured and validated by means of the Guarded Hot Plate method, giving greater emphasis to the edge effect of VIPs. It was found that the edge effect increases the thermal conductivity of VIPs by ca. 20% (for typical size of VIP). However, the panel size strongly affects the effective thermal conductivity, since for small panels this increase may reach up to 70%.

Remarkable findings were revealed during the construction of two buildings regarding the installation of VIPs and their applicability issues. Two different installation techniques were used and investigated. In the Greek building, the CIC panels were installed by means of the “wet method” (bonding mortar) and the use of dowels penetrating the panels via two EPS holes integrated to the VIPs. As the CIC panels were one-sized, the external wall could not be fully covered and the remaining area was filled with EPS. In the Swiss building, the VIPs were installed by means of the “dry method” (bonding tape). Even if a dedicated software tool for the optimum coverage of the walls with VIPs was used, small dimensional inaccuracies resulted to a small uncovered area at the junction of two walls. Also, despite of the efforts to perform a proper installation finally some panels were damaged, indicating the need for appropriate handling of VIPs from their production to the installation.

The results of the experimental investigation showed the improvement of the envelope thermal performance due to the use of VIPs. In the Greek building, the renovated VIP wall was compared with the initial EPS wall. The in-situ R-value measurements revealed an improvement of the envelope by 123%, in agreement with the theoretical values achieving thermal transmittance equal to $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. In the Swiss building, the in-situ U-value measurements indicated an achieving U_{overall} value equal to $0.12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, including the effect of thermal bridges, for 320 mm thick wall, while the U-value without the VIP was calculated to be higher by 52%. Monitored and thermography results pointed out that the VIP layer reduced significantly the negative effect of the metal structure on the walls decreasing the risk for condensation. Also, the results showed the steady state and dynamic behavior of VIPs highly contributes to the total temperature difference and decrement factor of the wall.

The hygrothermal performance of the two building envelopes due to the presence of VIPs actually depends on the installation method (wet / dry). In the wet method, the initial moisture due to the installation of CIC panels was partly removed during the summer, while the low winter temperatures, 5 months after the installation, created re-condensation at the surfaces of VIPs. On the other hand, in the dry installation method, an absence of condensation was observed at the surfaces of the VIPs during the whole measuring period. These findings, obtained by monitored in real buildings, were in agreement with the results of Ghazi Wakilli et al. [21] who examined the two installation methods in laboratory

and controlled conditions. Finally, a humidity test in the Swiss building revealed the hygrothermal behavior of VIP as a barrier to the mass transfer due to the low air and vapor permeability of VIP envelope.

Overall, the extensive experimental study of two buildings showed that the use of VIPs as building insulation forms an attractive solution to the improvement of the envelope thermal performance. Some weaknesses and barriers to overcome were revealed for making the VIPs an effective building material. In any event, the present chapter provides information concerning the construction issues and monitored results adding to the ever-increasing experience for the VIPs as a building insulation.

References

- [1] I. Mandilaras, I. Atsonios, G. Zannis, M. Founti, Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS, *Energy and Buildings*, 85 (0) (2014) 654-665.
- [2] I. Atsonios, I. Mandilaras, D. Kontogeorgos, M. Founti, Experimental investigation of the thermal and hygrothermal performance of a lightweight envelope incorporating Vacuum Insulation Panels (VIPs), 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [3] H. Simmler, S. Brunner, U. Heinemann, H. Schwab, K. Kumaran, P. Mukhopadhyaya, D. Quénard, H. Sallée, K. Noller, E. Küçükpinar-Niarchos, C. Stramm, M. Tenpierik, H. Cauberg, M. Erb, IEA/ECBCS Annex 39, Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), September 2005.
- [4] T. Nussbaumer, K.G. Wakili, C. Tanner, Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum-insulation system applied to a concrete wall, *Applied Energy*, 83 (8) (2006) 841-855.
- [5] M. Alam, H. Singh, M.C. Limbachiya, Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions, *Applied Energy*, 88 (11) (2011) 3592-3602.
- [6] H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life, *Energy and Buildings*, 37 (11) (2005) 1122-1131.
- [7] R. Baetens, B.P. Jelle, J.V. Thue, M.J. Tenpierik, S. Grynning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond, *Energy and Buildings*, 42 (2) (2010) 147-172.
- [8] S. Brunner, K. Ghazi Wakili, T. Stahl, B. Binder, Vacuum insulation panels for building applications—Continuous challenges and developments, *Energy and Buildings*, 85 (Supplement C) (2014) 592-596.
- [9] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, Experimental and numerical investigation of thermal bridging effects of jointed Vacuum Insulation Panels, *Energy and Buildings*, 111 (2016) 164-175.
- [10] S. Brunner, T. Stahl, K. Ghazi Wakili, An example of deteriorated vacuum insulation panels in a building façade, *Energy and Buildings*, 54 (2012) 278-282.
- [11] M. Alam, H. Singh, S. Brunner, C. Naziris, Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core, *Energy and Buildings*, 69 (2014) 442-450.
- [12] J.-S. Kwon, C.H. Jang, H. Jung, T.-H. Song, Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (23) (2009) 5525-5532.
- [13] K.G. Wakili, R. Bundi, B. Binder, Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels, *Building Research & Information*, 32 (4) (2004) 293-299.

- [14] International Energy Agency, IEA ECBCS, Annex 58 Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements, 2011-2015.
- [15] P. Mukhopadhyaya, D. MacLean, J. Korn, D. van Reenen, S. Molleti, Building application and thermal performance of vacuum insulation panels (VIPs) in Canadian subarctic climate, *Energy and Buildings*, 85 (2014) 672-680.
- [16] F. Ascione, R.F. De Masi, R.M. Mastrullo, S. Ruggiero, G.P. Vanoli, Experimental investigation and numerical evaluation of adoption of multi-layered wall with vacuum insulation panel for typical Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 152 (2017) 108-123.
- [17] S. Park, B.-H. Choi, J.-H. Lim, S.-Y. Song, Evaluation of Mechanically and Adhesively Fixed External Insulation Systems Using Vacuum Insulation Panels for High-Rise Apartment Buildings, *Energies*, 7 (9) (2014) 5764.
- [18] E. Wegger, B.P. Jelle, E. Sveipe, S. Grynning, A. Gustavsen, R. Baetens, J.V. Thue, Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels, *Journal of Building Physics*, 35 (2) (2011) 128-167.
- [19] E. Malliotakis, I. Mandilaras, D. Kontogeorgos, D. Katsourinis, M. Founti, The Ageing Effects of Vacuum Insulation Panels (VIPs) on the Long Term Thermal Performance of a Building Envelope with the use of Dynamic Simulation Tools, 11th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Dubendorf, Switzerland, 2013.
- [20] P. Johansson, C.-E. Hagentoft, A. Sasic Kalagasidis, Retrofitting of a listed brick and wood building using vacuum insulation panels on the exterior of the facade: Measurements and simulations, *Energy and Buildings*, 73 (Supplement C) (2014) 92-104.
- [21] K.G. Wakili, T. Stahl, R. Vonbank, S. Brunner, Dry and wet application of VIP layers as internal insulation to brick walls. Measurement and Simulation, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [22] Fraunhofer Institut Bauphysik IBP, WUFI 2D, available from: <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/>, 05/2018.
- [23] EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [24] BS EN 1745:2012, Masonry and masonry products. Methods for determining thermal properties.
- [25] ISO 10211:2017, Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.
- [26] ASTM C1046 - 95(2013), Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components.
- [27] M.W. Ahmad, M. Mourshed, D. Mundow, M. Sisinni, Y. Rezgui, Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research, *Energy and Buildings*, 120 (2016) 85-102.
- [28] ASTM C1060-11a Standard, Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings.
- [29] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method.

- [30] ASTM C1155 - 95(2013), Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-situ Data.
- [31] ELISSA: Energy Efficient Lightweight Sustainable Safe Steel Construction, FP7-2013-NMP-ENV-EeB, Grant no. 609086, <http://www.elissaproject.eu>.
- [32] M.J. Jiménez, H. Madsen, Models for describing the thermal characteristics of building components, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 152-162.
- [33] M.J. Jiménez, H. Madsen, K.K. Andersen, Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 170-180.
- [34] M.J. Jimenez, B. Porcar, M.R. Heras, Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions, *Sol. Energy*, 82 (7) (2008) 573-587.
- [35] M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras, Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value, *Building and Environment*, 44 (2) (2009) 361-367.
- [36] I. Naveros, M.J. Jiménez, M.R. Heras, Analysis of capabilities and limitations of the regression method based in averages, applied to the estimation of the U value of building component tested in Mediterranean weather, *Energy and Buildings*, 55 (2012) 854-872.
- [37] M.J. Jiménez, H. Bloem, Energy Performance Assessment of Buildings and Building Components. Guidelines for Data Analysis from Dynamic Experimental Campaigns Part 1: Physical Aspects, *Energy Procedia*, 78 (2015) 3306-3311.
- [38] DIN 4108-2:2013, Thermal protection and energy economy in buildings - Part 2: Minimum requirements to thermal insulation.

CHAPTER 7

NUMERICAL TECHNIQUES AND THEIR VALIDATION FOR THE ASSESSMENT OF LIGHTWEIGHT ENVELOPE INCORPORATING VIPs

Contents

7.1	Introduction.....	152
7.2	Analysis of building envelope according to ISO	153
7.3	Simulation of building into an EnergyPlus model	156
7.4	Implementation of numerical techniques into the mock-up building	157
7.5	Conclusions.....	165
	References	167

Summary

The present chapter discusses the numerical investigation of the building envelope by means of two different techniques: the steady state analysis according to ISO 10211 and the whole building simulation in dynamic conditions. The first approach calculates the direct heat transfer coefficient, H_D , and the second the total energy demand for heating and cooling. The two techniques are applied to the lightweight steel-framed building constructed in Switzerland and described in the previous chapter. All configurations of thermal bridges are analyzed and introduced into an EnergyPlus model. The model is validated comparing the simulated results with the measurements. The numerical analysis also reveals the importance of thermal bridges in the envelope thermal performance. The results indicate the increase of the energy demands caused by the metal structure as well as the improvement of the envelope performance due to the presence of VIPs.

7.1 Introduction

The knowledge of the actual thermal behavior of the building envelope over the whole year is necessary for the energy design and the analysis of building. Particularly, the accurate calculation of the energy demands for heating and cooling is imposed for the achievement of the required building energy performance towards nZEB. Until recently, the calculation of the energy demands is based on national regulations by means of significant simplifications regarding the steady state boundary conditions, the building geometry, solar gains, infiltration, thermal mass, etc. [1]. During the second half of 20th century, a variety of building simulation programs have been developed solving complex issues and achieving higher accuracy [2]. Among others, BLAST, DOE-2, EnergyPlus, eQuest and TRNSYS, are widely used for the whole building energy simulation.

Due to the computational time constraint and the complexity of the dimensions of building envelope (large length and height but small thicknesses of the incorporating materials), the simulation programs are also forced to make significant simplifications. One of the most important simplifications is the assumption of one-dimensional heat transfer through the envelope. This is an obstacle for the analysis of thermal bridges, which are regions with multi-dimensional heat transfer and their impact must be taken into account, as mentioned in Chapter 2 (section 2.3). Particularly, in the case of lightweight buildings, where the thermal bridges can reduce the envelope thermal performance up to 74% [3], the neglect of thermal bridges leads to severe underestimation of energy demands.

The most common method for the introduction of thermal bridges into the one-dimensional simulation models is the appropriate modification of the material thermal properties [4-13]. This modification is based on a correction of the envelope thermal transmittance obtained by the calculation of thermal bridges. The most accurate method for the calculation of thermal bridges requires the simulation of each thermal bridge configuration in steady state conditions, as described by ISO 10211 standard [14]. This approach provides results with typical accuracy $\pm 5\%$, however the use of the appropriate software (e.g. ANSYS, COMSOL, BISCO, THERM, etc.) or handmade code is necessary. An easier and faster way for the estimation of thermal bridges is the use of catalogues and default values, provided results with accuracy $\pm 20\%$ - 50% . The most common catalogue is the ISO 14683 standard [15] providing default values of linear thermal transmittance for 76 configurations. Besides the fact that this number is small in relation to the variety of possible configurations, the tabulated values concern only junctions between envelope elements (e.g. wall-roof). For higher accuracy compared to the default values, many researchers have proposed simplified calculations and relationships for the estimation of thermal bridges [16]. Furthermore, the effect of thermal bridges in dynamic conditions should be taken into account, mainly in massive building envelopes [8].

The present chapter discusses the numerical analysis of building envelope by means of two different techniques: the envelope analysis according to ISO 10211 and the whole building simulation. The two techniques are applied to the lightweight steel-framed mock-up building, constructed in Switzerland and experimentally investigated in the previous chapter (section 6.3). This building was selected due to the large amount of thermal bridges in order to focus on their contribution to the envelope thermal performance. All configurations of thermal bridges (both linear and point) are simulated and analyzed according to ISO 10211 in order to calculate the theoretical value of the direct heat transfer coefficient of the envelope, H_D . Furthermore, the whole building is simulated by means of the EnergyPlus program (EP model), which is the most widely used in building simulations. The effect of all thermal bridges is introduced into the model. The aim of the EP model is the calculation of the

energy demands for heating. The results obtained by the model are compared to the measurements for its validation.

7.2 Analysis of building envelope according to ISO

The analysis of the building envelope according to ISO 10211:2007 [14] is a steady state approach aiming to the calculation of the equivalent thermal transmittance taking into account all thermal bridges, repeating and non-repeating (geometrical). The basic concept of the methodology is the partitioning of the envelope into three geometrical models: 1D, 2D and 3D model, as shown in Figure 7.1. The 1D geometrical model stands for the central part of the envelope assembly, while the 2D and 3D geometrical models concern the 2D junctions (geometrical linear thermal bridges) and 3D junctions (geometrical point thermal bridges) of the envelope, respectively.

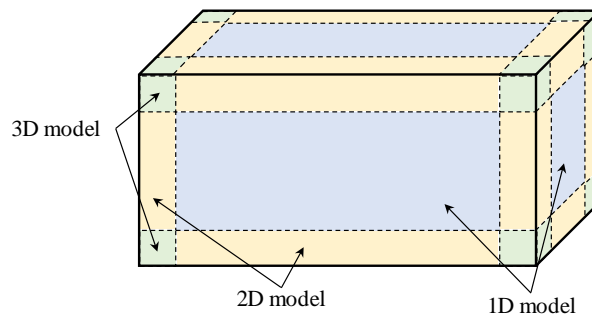


Figure 7.1 - Partitioning of building into 1D, 2D and 3D geometrical models.

The 1D model describes the thermal performance at the central part of the envelope element (wall, roof or floor) far away from thermal bridges caused by intersections between other envelope elements. The characteristic value for the thermal performance of the central part is the U-value of the element. In the cases of lightweight envelopes, the 1D model calculates the significant repeating linear thermal bridges at the central part of the wall introduced by the studs and beams.

The 2D model describes the thermal performance of the non-repeating (geometrical) linear thermal bridges introduced by the intersection between two elements of the building envelope, for example the wall – roof or the wall – door junction. Finally, the 3D model describes the thermal performance of the non-repeating point thermal bridges, caused by the envelope corners, point insulation discontinuity, etc.

Regarding the dimension system of the analysis for the three models, lengths may be measured using internal dimensions, overall internal dimensions or external dimensions. The same system has to be used consistently for all parts of the envelope. In the current thesis, the external dimension system is used.

7.2.1 Calculation of thermal bridges

In 1D model, the thermal performance for the central part of the envelope is assessed by means of the calculation of the thermal transmittance for the whole central surface of the element. In the case of homogenous elements (without thermal bridges), the U-value of the element, U_{clear} , is calculated according to ISO 6946 standard [17]. In the case of lightweight envelope, where repeating thermal bridges are caused by the structure, the thermal transmittance of the central part is evaluated by means

of the $U_{overall}$ taking into account the effect of thermal bridges (Figure 7.2a). The $U_{overall}$, is calculated according to ISO 10211, as described by the following equation:

$$U_{overall} = U_{clear} + \frac{\sum_{i=1}^{N_{st}} \Psi_{st}^i l_{st}^i}{A} \quad 7.1$$

where U_{clear} [W/(m²K)] is the U-value of the element without the effect of thermal bridges, calculated according to ISO 6946 standard, Ψ_{st} expressed in [W/(m·K)] is the linear thermal transmittance of the repeating thermal bridges caused by the structure, l_{st} [m] is the length over the which the Ψ_{st} value applies, A [m²] is the total surface of the element and N_{st} is the number of linear thermal transmittances. The Ψ_{st} is calculated according to the following equation:

$$\Psi_{st} = L_{1D,st} - U_{clear} \cdot l_{st} \quad 7.2$$

where $L_{1D,st}$ is the thermal coupling coefficient, expressed in [W/(m·K)] obtained from steady state 2D simulation of the examined configuration separating two environments being considered.

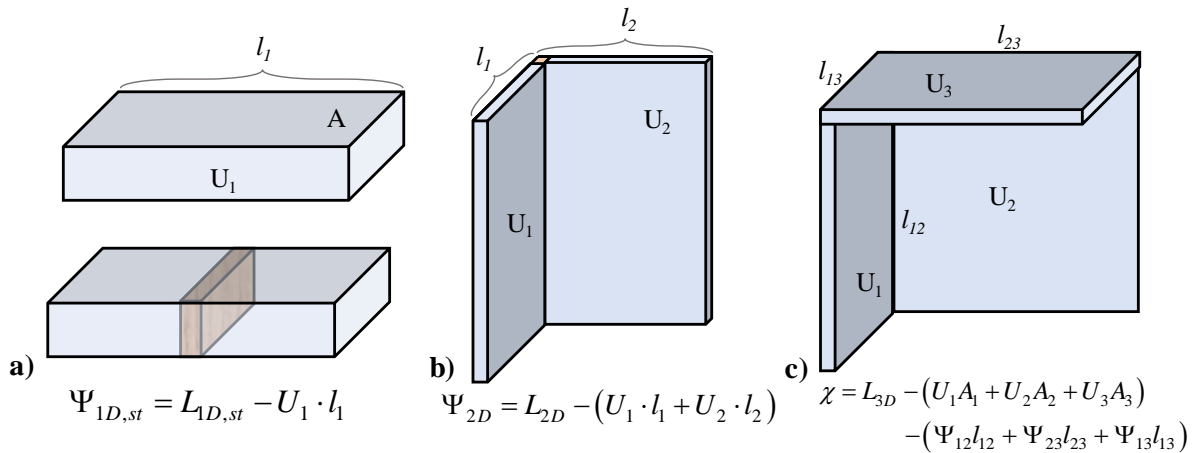


Figure 7.2 – The calculation of thermal bridges a) 1D, b) 2D and c) 3D model.

The non-repeating linear thermal bridges due to the junctions between two elements of the envelope are calculated by the 2D model (Figure 7.2b). The linear thermal transmittance, Ψ_{2D} , is determined by the equation:

$$\Psi_{2D} = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \quad 7.3$$

where L_{2D} is the thermal coupling coefficient, expressed in [W/(m·K)], obtained from the simulation of the junction in steady state conditions, U_j is the thermal transmittance of each simulated element j of the junction and l_j is the length over which the value Ψ_{2D} applies.

The 3D model calculates the non-repeating point thermal bridges caused by the corners of the envelope (junctions between three elements of the envelope), the point insulation discontinuities etc. (Figure 7.2c). The point thermal transmittance, χ , is calculated by the equation:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} (U_i \cdot A_i) - \sum_{j=1}^{N_j} (\Psi_j \cdot l_j) \quad 7.4$$

where L_{3D} is the thermal coupling coefficient, expressed in [W/K], obtained from a 3D simulation of the point thermal bridge separating the two environments being considered.

After the calculation of all the individual thermal bridges, the equivalent thermal transmittance, $U_{eq,i}$ for each element i of the building envelope, is calculated by the following equation, taking into account all incorporating thermal bridges on the element:

$$U_{eq,i} = U_{clear,i} + \frac{\sum_k (\Psi_{st}^k \cdot l_{st}^k)}{A_i} + \frac{\sum_m (\Psi_{2D}^m \cdot l^m)}{A_i} + \frac{\sum_n \chi_n}{A_i} \quad 7.5$$

The Equation 7.5 can be written in thermal transmittance terms, as follows:

$$U_{eq,i} = U_{clear,i} + U_{repeating,i} + U_{2D_geometrical,i} + U_{3D_geometrical,i} \quad 7.6$$

where $U_{repeating}$, $U_{2D_geometrical}$ and $U_{3D_geometrical}$ are the terms for the effect of the repeating, linear and point non-repeating thermal bridges, respectively, expressed in thermal transmittance values ([W/(m²K)]).

7.2.2 Calculation of the direct heat transfer coefficient of the whole building

As explained in Chapter 2 (section 2.4.3), an indicator for the thermal performance assessment of the whole building envelope is the direct heat transfer coefficient, H_D . It represents the heat flow rate through the whole envelope divided by the temperature difference between indoor and outdoor spaces, expressed in [W/K] and defined by the following equation, according to ISO 14683:

$$H_D = \sum_i (A_i \cdot U_{clear,i}) + \sum_j (l_j \cdot \Psi_j) + \sum_k \chi_k \quad 7.7$$

where A_i is the area of each element i of the building envelope, $U_{clear,i}$ is the thermal transmittance of element i of the building (center of wall), l_j is the length of linear thermal bridge j , Ψ_j is the linear thermal transmittance of each linear thermal bridge j , and χ_k is the point thermal transmittance of each the point thermal bridge k . The direct heat transfer coefficient can also be calculated by the following equation, combining the equations 7.5 and 7.7:

$$H_D = \sum_i (A_i \cdot U_{eq,i}) \quad 7.8$$

7.3 Simulation of building into an EnergyPlus model

A more accurate approach for the analysis of the whole building envelope is the simulation of the building in dynamic conditions. The building simulation technique aims to the calculation of the annual energy demands for heating and cooling by means of widely used and validated programs. As these programs assume one-dimensional heat transfer through the envelope, the introduction of thermal bridges is a challenge. In the current thesis, a model was developed for the annual heating needs of a lightweight envelope, using the commercial software EnergyPlus. The large amount of thermal bridges is introduced to the model modifying the material properties based on the previous analysis from ISO 10211.

7.3.1 EnergyPlus (EP)

EnergyPlus™ (EP) [18] is a building energy simulation program developed by a team of researchers, engineers, and programmers at US national labs, universities, and private companies in 1996. The program is based on the development experience of previous existing tools, BLAST and DOE-2 [19], developed in the late 1970s and early 1980s, respectively. Despite the fact that BLAST and DOE-2 are hourly-simulation programs, EnergyPlus does sub-hourly calculations and integrates the load and system dynamic performance into the whole building energy balance calculations providing more accurate simulation results [20]. The structure of the EnergyPlus is a modular code written in Fortran 90 [21].

The entire building simulation in EnergyPlus software is based on the heat balance model. According to this model, two basic assumptions are taken into account. The first concerns the modeling of the air of each building thermal zone that is assumed as well stirred with uniform temperature throughout (zero-dimensional) [21]. The second major assumption in heat balance models is that building envelope elements have the following features: (a) uniform surface temperatures, (b) uniform long- and short-wave irradiation, (c) diffuse radiating surfaces and (d) one dimensional heat conduction [21]. The first and the latter indicate that the EnergyPlus solves the heat transfer equation assuming one-dimensional heat flow through the walls, which is a significant issue for the introduction of thermal bridges into the model. This issue is solved in the present chapter following the methodology described in the next section.

Engineers, architects and researchers use EnergyPlus to model energy and water use for the whole building demands. It is a widespread, free and accepted program with detailed simulation capabilities for the modelling of every energy flow in building, such as heating, cooling, ventilation, domestic hot water, renewable systems, etc. [22, 23]. However, the interface of EnergyPlus is complicated and difficult to use. For this reason, several graphical interfaces and utilities are available (DesignBuilder, OpenStudio, EP-Quick, etc.).

7.3.2 Introduction of thermal bridges into EnergyPlus model

The method for the introduction of thermal bridges into the EP model is based on the assumption that their impact on the thermal performance can be approached by modifying the properties of the incorporating materials [5, 11-13]. The modified properties are calculated from the equivalent thermal transmittance of each envelope element, U_{eq} , as calculated by the equation 7.5, involving the effect of

all thermal bridges. The equivalent thermal resistance for every layer of each envelope element i , $R_{layer,eq,i}$, expressed in [m²K/W] is calculated by the equation:

$$R_{layer,eq,i} = \frac{R_{layer,clear,i}}{R_{clear,i}} \cdot R_{eq,i} \quad 7.9$$

where $R_{layer,clear,i}$ is the clear (excluding thermal bridges) thermal resistance of the layer of the element i (wall, roof, floor, etc.), $R_{eq,i}$ is the equivalent thermal resistance of the envelope element i based on the $U_{eq,i}$ and $R_{clear,i}$ is the clear thermal resistance of the envelope element i . It is reminded that all thermal resistance values do not include the impact of the internal and external surface thermal resistances, R_{si} and R_{se} [(m²K)/W] respectively, according to the section 2.4.2. The thickness, d_{layer} , of each layer at the initial and the equivalent element is maintained the same. Thus, the equivalent thermal conductivity for each layer of the element i , $k_{layer,eq,i}$, expressed in [W(m·K)] is calculated by the following equation:

$$k_{layer,eq,i} = \frac{d_{layer,i}}{R_{layer,eq,i}} \quad 7.10$$

In the same line, dynamic thermal properties of the materials are modified in order to introduce the dynamic impact of thermal bridges. An increase of the thermal capacity of the envelope element is caused due to the presence of the metal structure. The additional thermal capacity caused by the repeating metal studs has to be included to the incorporated layers. Usually, this layer is either an insulation layer or air cavity or both. The following analysis assumed that the studs are incorporated into mineral wool layers. The modification of mineral wool dynamic thermal properties is based on the methodology described by Gomes et. al [6]. According to this method, the equivalent density, $\rho_{MW,eq,i}$ [kg/m³] and specific heat capacity, $Cp_{MW,eq,i}$ [J/(kg·K)] are calculated by the following equations:

$$\rho_{MW,eq,i} = w_{studs,i} \rho_{steel} + w_{MW,i} \rho_{MW} \quad 7.11$$

$$Cp_{MW,eq,i} = w_{studs,i} Cp_{steel} + w_{MW,i} Cp_{MW} \quad 7.12$$

where $w_{studs,i}$ and $w_{MW,i}$ [-] is the mass ratio of the studs and the mineral wool, respectively, at the layer of each element i .

7.4 Implementation of numerical techniques into the mock-up building

The two above described numerical techniques (envelope analysis according to ISO and whole building simulation) are implemented into the lightweight steel-framed building described and experimentally analyzed in previous chapter (section 6.3). This building is ideal for the investigation of the impact of thermal bridges into the envelope thermal performance and the energy demands, as it is a simple small room, without windows constructed with well-known materials. Figure 7.3 summarizes the configuration of envelope, as analyzed in the previous chapter.

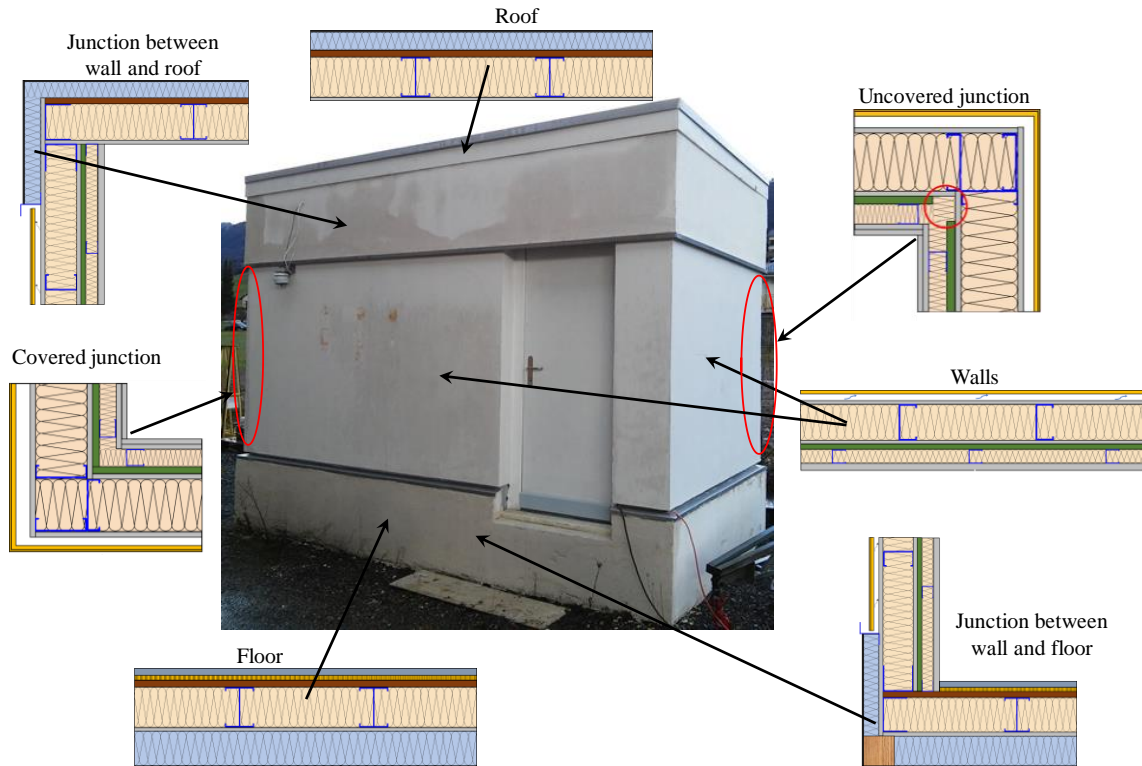


Figure 7.3 – The envelope of the lightweight steel-framed mock-up building.

7.4.1 Analysis of the mock-up building envelope according to ISO

The envelope is separated into the three models (1D, 2D and 3D) and all thermal bridges are calculated according to ISO 10211. For this purpose, all geometries configurations were drawn in AUTOCAD software and were simulated by means of the commercial CFD package COMSOL [24]. The material thermal properties were in accordance to the Table 6.5 in section 6.3.2. The boundary conditions are summarized in Table 7.1.

The total heat flow, Φ , which passes through each configuration, was obtained by the simulation results. Hence, the 2D and 3D thermal coupling coefficients, L_{2D} and L_{3D} , were calculated by the following equation:

$$L = \frac{\Phi}{T_{in} - T_{out}} \quad 7.13$$

where the total heat flow, Φ , is expressed in [W/(m·K)] in cases of 2D simulations for the linear thermal bridges and in [W/K] in cases of 3D simulations for the point thermal bridges.

Table 7.1 – Boundary Conditions.

Boundary Condition	Value
Outdoor temperature	-10°C
Soil temperature	-10°C
Indoor temperature	20°C
External heat transfer coefficient, h_{out}	25 W/(m ² K)
Internal heat transfer coefficient for walls, h_{in}	7.69 W/(m ² K)
Internal heat transfer coefficient for roof, $h_{in,roof}$	10 W/(m ² K)
Internal heat transfer coefficient for floor, $h_{in,floor}$	5.88 W/(m ² K)

In the 1D geometrical model, according to ISO 10211, the repeating thermal bridges due to the presence of metal structure at the central part of the envelope elements were calculated. Table 7.2 summarizes the results for the analysis presenting the thermal transmittances excluding and including thermal bridges, U_{clear} and $U_{overall}$, the Ψ_{st} -value caused by studs and the temperature factor, f , at the area of studs. It is observed that there is a significant increase of the thermal transmittance of the elements due to the presence of metal studs. The repeating thermal bridges increase the U-value of the wall by 27%, while the U-values of the floor and the roof are increased by 57% and 112%, respectively. Despite of this increase, the thermal transmittance of envelope elements remains low, since the $U_{overall}$ values range between 0.12 W/(m²K) and 0.26 W/(m²K), indicating the high envelope thermal performance. The importance of the VIP layer is revealed by the fact that the Ψ -value and the $U_{overall}$ in the case of wall without VIP are increased by 239% and 106%, respectively. It should be mentioned that the temperature factor, f , is higher than 0.92 in all cases, so there is not any moisture issue regarding the risk of condensation and mold growth at the central part of envelope elements.

Table 7.2 – Repeating thermal bridges at the center of building envelope elements.

Envelope element	U_{clear} [W/(m ² K)]	$U_{overall}$ [W/(m ² K)]	Ψ_{st} [W/(m·K)]	f [-]
Wall with VIP	0.0927	0.1177	0.0156	0.98
Wall without VIP	0.1577	0.2422	0.0529	0.96
Roof	0.1208	0.2559	0.0676	0.92
Floor	0.0914	0.1434	0.0260	0.97

In the 2D geometrical model, the linear non-repeating thermal bridges created by the intersections between two elements of the examined lightweight envelope were calculated. Table 7.3 presents the Ψ -value and the temperature factor of these thermal bridges. It is reminded that there are two types of junctions between the walls, the covered and the uncovered with VIP junctions, due to dimensional inaccuracies of the VIP pattern (Figure 6.15). The Ψ -value of the uncovered junction is higher by 51.3%, revealing the strong effect of the improper construction of the VIP. It is observed that the linear thermal transmittance of both junctions has negative values, meaning that these thermal bridges have positive effect on the total heat transfer coefficient of the envelope. This is caused due to the use of external dimensions on the envelope analysis resulting on an overestimation of the heat losses through the central part of the elements. Assuming internal dimensions on the analysis, the Ψ -values of the covered and

uncovered junction are positive (0.0325 W/(m·K) and 0.0462 W/(m·K). However, as explained above the same dimensional system has to be consistently used for all parts of the envelope.

The linear thermal transmittances of the wall - roof and wall - floor junctions are lower than 0.02 W/(m·K). The low impact of these thermal bridges is caused due to the presence of the extra EPS insulation layer on the top and the bottom part of the walls (Figure 7.3). On the other hand, the junction between the wall and the door strongly affects the thermal performance of the envelope, since the Ψ -value of this thermal bridge is by one order of magnitude higher than the previous thermal bridges. This is owed to the large difference between the thermal resistance of the wall and the door.

The temperature factors of the linear non-repeating thermal bridges indicate that there is not any moisture issue, except from the junction between the wall and the door. Growth of mold is possible on the latter thermal bridge since the temperature factor is slightly lower than the critical value of 0.7. The temperature factor of the rest thermal bridges is higher than 0.86 (Table 7.3).

Table 7.3 – Linear non-repeating thermal bridges at the junctions of envelope elements (2D geometrical model)

Thermal bridge	Ψ_{2D} [W/(m·K)]	f [-]
Covered Wall-Wall	-0.0265	0.95
Uncovered Wall-Wall	-0.0129	0.93
Wall-Roof	0.0194	0.87
Wall-Floor	0.0146	0.87
Wall-Door	0.1170	0.68

In the 3D geometrical model, the point non-repeating thermal bridges created in the corners of the building envelope and the damaged VIPs (see section 6.3.1) were calculated. Table 7.4 presents the point thermal transmittance (χ -value) and temperature factor for the point thermal bridges. It is observed that the impact of the corners on the envelope thermal performance is positive. As above mentioned, this is caused due to the use of the external dimensions on the analysis of the envelope as well as the presence of the extra insulation on the top and the bottom part of the walls which is not taken into account at the 1D geometrical model. It should be mentioned that there was not significant difference between the corners of the covered and uncovered with VIP junctions. The damaged VIP result to a significant point thermal transmittance equal to 0.05 W/K. From the hygrothermal point of view, there is no possibility for moisture issues, because all temperature factors are higher than the critical value of 0.7.

Table 7.4 – Point non-repeating thermal bridges at the corners of the envelope (3D geometrical model)

	χ -value [W/K]	f [-]
Roof-Wall-Wall	-0.0179	0.73
Floor-Wall-Wall	-0.0447	0.76
Damaged VIP	0.0514	0.97

The equivalent thermal transmittances of all envelope elements, taking into account all thermal bridges, were calculated according to the equation 7.5 and 7.6. The impact of thermal bridges, involving

two or three envelope elements (such as junctions between wall and roof), is equally distributed to the respective elements. Table 7.5 summarizes the surfaces, the equivalent thermal transmittance and the terms of the thermal bridges for each envelope element. The values in parenthesis represent the contribution of each type of thermal bridge on the total heat flow through the envelope element. For this analysis all construction details were taken into account, such as the VIP pattern, the use of polyurethane in the door junctions, the two damaged VIPs, etc.

Table 7.5 – The equivalent thermal transmittance and the impact of thermal bridges for each envelope element.

Envelope element	A [m ²]	U_{clear} [W/(m ² ·K)]	$U_{repeating}$ [W/(m ² ·K)]	$U_{2D_geometrical}$ [W/(m ² ·K)]	$U_{3D_geometrical}$ [W/(m ² ·K)]	U_{eq} [W/(m ² ·K)]
North Wall	13.00	0.0931	0.0174 (17.0%)	-0.0049 (-4.8%)	-0.0032 (-3.1%)	0.1025
West Wall	7.06	0.0933	0.0134 (13.8%)	-0.0039 (-4.0%)	-0.0059 (-6.1%)	0.0969
South Wall	11.28	0.0946	0.0187 (12.1%)	0.0187 (12.1%)	0.0229 (14.8%)	0.1548
East Wall	7.06	0.0933	0.0134 (13.8%)	-0.0039 (-4.0%)	-0.0059 (-6.1%)	0.0969
Roof	8.66	0.1208	0.1351 (50.9%)	0.0121 (4.6%)	-0.0028 (-1.0%)	0.2653
Floor	8.66	0.0914	0.0520 (37.5%)	0.0021 (1.5%)	-0.0069 (-5.0%)	0.1386
Door	1.72	2.4070	0 (0%)	0.1595 (5.9%)	0.1161 (4.3%)	2.6826

The repeating thermal bridges of the walls, due to the presence of the metal structure at the central part, contribute to the equivalent thermal transmittance by ca. 12-17%. Except from the South wall, the geometrical thermal bridges (linear and point) have positive effect on the thermal performance reducing the thermal transmittance by ca. 4% and 6%, respectively. The impact of geometrical thermal bridges on the South wall is higher (ca. 13% for the linear and 15% for the point thermal bridges) due to the presence of the door, which results to higher linear and point thermal bridges, and some extra point thermal bridges due to construction failures (two damaged VIP panels).

On the other hand, the thermal bridges have a strong effect on the thermal transmittance of the roof and the floor elements where no VIPs are present. The metal structures contribute by 51% on the roof and 38% on the floor element, while the non-repeating linear thermal bridges increase the thermal transmittance by ca. 5%. On the contrary, the non-repeating point thermal bridges have positive effect on the thermal performance by 1% on the roof and 5% on the floor. The thermal transmittance of the door is increased due to the geometrical thermal bridges by 11%.

The direct heat transfer coefficient, H_D , is calculated according to the equation 7.7 or 7.8. The H_D , according to the numerical analysis of the envelope, results to be equal to 12.57 W/K, based on the results depicted in Table 7.5. It is noted that the door, occupying only the 3% of the total envelope

surface, is responsible for more than one third of the total H_D , indicating the high thermal performance of the rest of the envelope.

The contribution of each type of thermal bridge on the calculation of the direct heat transfer coefficient, H_D , is depicted in Figure 7.4. The contribution of “clear elements” represents the heat through the envelope elements without any thermal bridge (the edge effect of VIPs is also excluded). It is shown that all thermal bridges (edge effect, repeating non-repeating) are responsible for 26% of the H_D . The largest contribution (18%) is due to the repeating thermal bridges at the central part of the envelope elements (metal structure), indicating the significance of these thermal bridges. The linear and point non-repeating thermal bridges, due to the junctions of the envelope, account for 4% and 2% of the total H_D value, respectively. The low contribution of these thermal bridges on the H_D can be associated with the presence of extra insulation on the top and the bottom part of the external wall (at the junctions with the roof and the floor) and the use of the external dimensions on the analysis of the building envelope. Finally, the edge effect of VIPs contributes by 2% to the whole building envelope heat transfer coefficient.

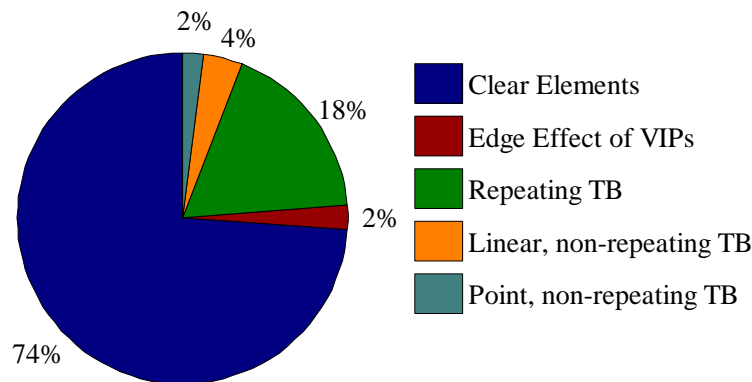


Figure 7.4 – Contribution of thermal bridges on the direct heat transfer coefficient, H_D .

7.4.2 Simulation of mock-up building

The experimental lightweight mock-up building (section 6.3) is also investigated by the simulation technique, by means of the EnergyPlus model (EP model). The results obtained by the EP model are compared to the measurements presented in the previous chapter (section 6.3.5) aiming to validate the model. For this reason, the mock-up building was drawn in Sketch-Up software (Figure 7.5), considered as a unique thermal zone. It is mentioned that the same dimensional system (external dimensions) is used both at the analysis of the thermal bridges and the design of the building geometry. As boundary external conditions were assumed the measured outdoor temperature and relative humidity values, obtained by the mini weather station (Figure 6.18b). Furthermore, the required solar radiation, the wind velocity and the wind direction for the creation of the required EnergyPlus weather file were obtained by measurements from a neighboring weather station. The indoor temperature control system was designed taking into account the periods when it was turned off, according to the Figure 7.6, and the temperature set point equal to 21°C.

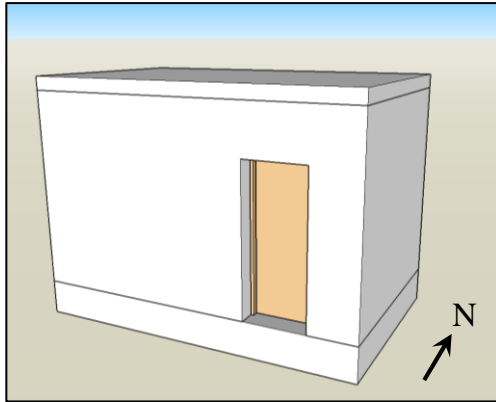


Figure 7.5 – The drawing of the simulated building in Sketch-up.

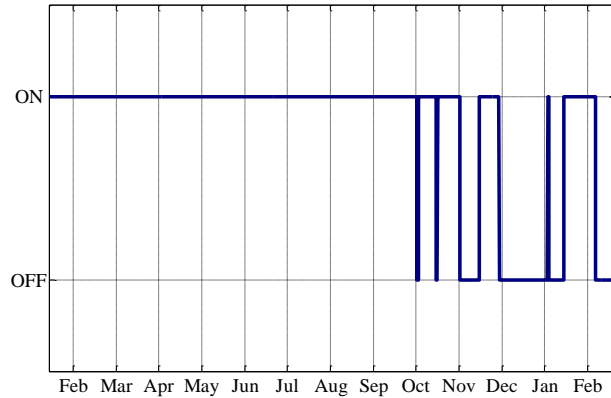


Figure 7.6 – The schedule of the temperature control system.

The internal convection was calculated according to TARP model, developed by Walton [25], using ASHRAE correlations. The external convection coefficient was obtained according to DOE-2 algorithm, developed by Klems and Yazdanian [26]. The Conduction Finite Difference method was used as the heat balance algorithm at the building envelope surfaces, solved using the Crank Nicholson difference scheme (second order method). The electrical consumption of the measuring devices was equal to 45W (measured value) converted into radiant heat. The air infiltration to the envelope was assumed equal to 0.1 ACH, due to the fact that there was only one door which was closed over the measuring period.

The impact of the numerous amounts of thermal bridges (both repeating and geometrical) was introduced to the EP model, according to the methodology described in section 7.3.2. The equivalent thermal properties of the incorporating layers were calculated based on the equivalent thermal transmittances of each envelope element, as presented in Table 7.5. Table 7.6 presents indicative values of the equivalent thermal conductivity for three material layers. It is observed that the thermal properties are significantly changed in roof and floor elements, due to the high thermal bridges introduced by the metal structure. On the other hand, in the case of the North wall, the material thermal conductivities are increased by only 10%, equally with the contribution of thermal bridges.

Table 7.6 – The equivalent thermal conductivity for three material layers of four envelope elements taking into account all thermal bridges.

[W/(m·K)]	Clear element	North wall	South wall	Roof	Floor
VIP	0.0045	0.0049	0.0071	-	-
Mineral wool	0.035	0.038	0.060	0.079	0.054
Gypsum board	0.27	0.29	0.46	0.61	0.42

The simulation of the mock-up building by means of EP model leads to the calculation of several variables, such as temperatures, energy consumption, infiltration rates, radiation, etc. Among them, the most important measures for the comparison of the simulation results with the measurements are the indoor temperature and the total energy consumption for the operation of the temperature control system and electrical devices.

Figure 7.7 presents the simulation results and the measurements of the indoor temperature. The comparison of results for the validation of the model is based on the periods when the temperature control system was turned off. It is observed that the results of the EP model are in a good agreement with the measurements. The mean absolute difference between the simulated and measured temperatures is 0.27°C , near to the measuring error, while the maximum difference does not exceed 0.6°C . The good agreement between the model results and the measurements are indicated by the coefficient of determination, R^2 (equation 5.11), which is equal to 99% for the period when the control system was not activated.

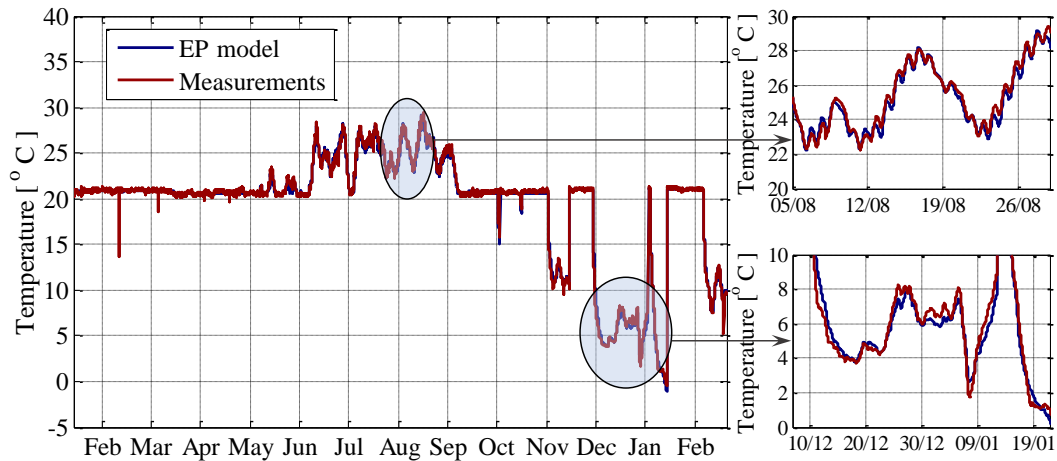


Figure 7.7 – Comparison of indoor temperature measurements to the EP model results.

The energy consumption for the activation of the temperature control system and the electrical devices is calculated by the EP model and compared to the measured values obtained by the energy/power meter in Figure 7.8. As it is observed from the daily results (Figure 7.8a), the differences rarely exceed $\pm 10\%$ (mean absolute difference equal to 7.6%) and the absolute difference ranges between ± 0.25 kWhr/day in the winter and 0.05 kWhr/day in the summer (no temperature control system). The difference of the results for the total energy consumption is almost zero (Figure 7.8b), due to the fact that there is both daily overestimation and underestimation through the whole run period.

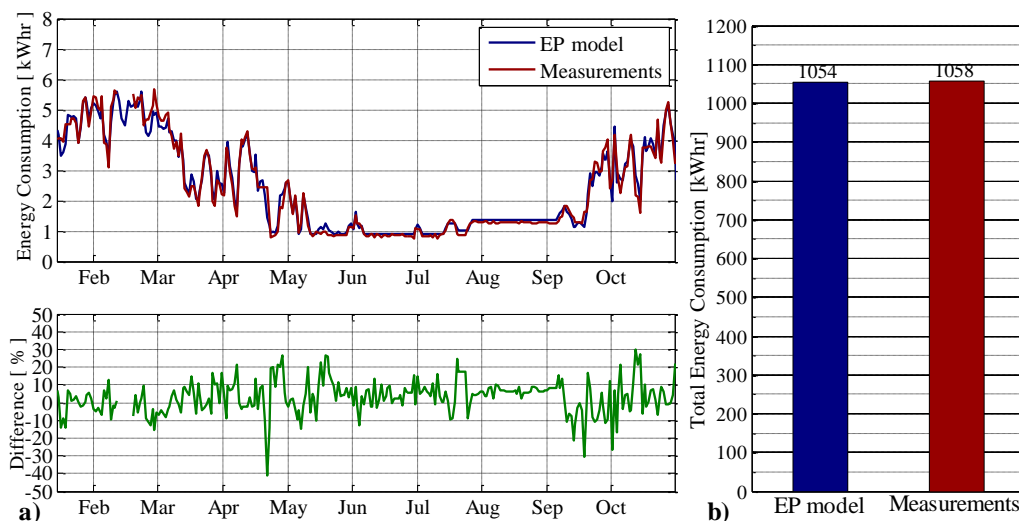


Figure 7.8 – Comparison of energy consumption measurements to the EP model results: a) daily values and b) annual values.

The EP model was applied to both including and excluding the impact of thermal bridges in order to evaluate their influence on the total energy demands for heating. For this reason, the building was simulated assuming that the temperature control system was activated over the whole measuring period. The contribution of thermal bridges on the energy demands of the mock-up building is illustrated in Figure 7.9. As it is observed, the thermal bridges increase the energy demands for heating of the mock-up by 25%. The latter is a significant increase revealing that the impact of thermal bridges should not be underestimated in modelling of lightweight buildings. Particularly, the repeating thermal bridges at the central part of the elements are responsible for 16% of the total energy demands, while the linear and point non-repeating thermal bridges increase the energy demands by 7%. Finally, the edge effect of VIPs seems to increase the energy demands by 2%.

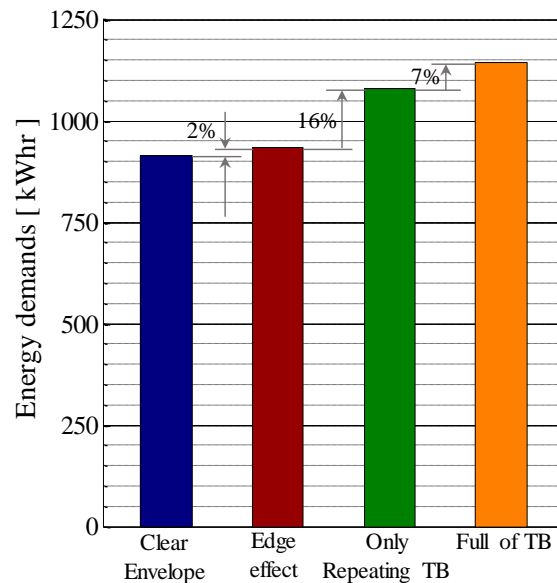


Figure 7.9 – Contribution of thermal bridges (TB) on the energy demands of the mock-up building.

It is remarked that the impact of thermal bridges on the thermal performance of the whole building envelope is almost the same both on the calculation of energy demands and direct heat transfer coefficient. The thermal bridges contribute to the heat transfer coefficient by 26%, as calculated in section 7.4.1, while they are responsible for the 20% on the total energy demands of the mock-up. The difference is caused due to the infiltration, the solar radiation, the ground temperature etc. which are not taken into account in the first approach.

7.5 Conclusions

The present chapter addressed the numerical investigation of the envelope thermal performance by means of two different techniques: (a) calculation of the whole envelope heat transfer coefficient, H_D , according to ISO 10211 and (b) calculation of energy demands by means of whole building simulation. The analysis focuses on the calculation of thermal bridges and their introduction into the building simulation program EnergyPlus (EP model), which assumes one-dimensional heat transfer through the envelope. The two techniques for the numerical analysis were applied to the lightweight steel-framed envelope, built in Switzerland and described in previous Chapter (section 6.3). All thermal bridges (edge effect by VIPs, repeating thermal bridges by studs, linear and point non-repeating thermal bridges) were calculated according to the most accurate method (ISO 10211).

The numerical analysis of the building envelope according to the two techniques revealed the high contribution of thermal bridges to the envelope thermal performance. A large amount of heat losses was introduced by the repeating thermal bridges due to the metal structure increasing the heat transfer coefficient, H_D , by 24%, while the non-repeating thermal bridges contribute to the H_D by 6%. From the energy demands point of view, the results obtained by the EP model indicated that the thermal bridges increased the heating needs by 25% and the repeating thermal bridges due to metal structure caused the largest contribution by 16%. The outcomes of the two techniques were similar, and the differences were due to the simplicity of the first approach. For instance, the edge effect found to be responsible only for the 2% of both the heat transfer coefficient and the annual energy demands.

The findings of the numerical analysis of the mock-up building brought to light the thermal behavior of VIPs. The presence of VIPs in the walls reduce the impact of the repeating thermal bridges caused by metal structure. Despite the fact that the thermal transmittance excluding thermal bridges (U_{clear}) of the walls and the floor is almost the same, the thermal transmittance including the effect of metal studs ($U_{overall}$) in the floor (absence of VIP) is higher than the walls (presence of VIP) by ca. 22%.

The results of the EP model were compared to the temperature and energy consumption measurements. The findings indicated a very good agreement with indoor temperature measurements predicting the actual trend during the period when the temperature control system was not activated. The results regarding the energy needs were also in agreement, since the difference between the measured and the simulated daily values rarely exceed 10% with mean difference equal to 7.6%, while the difference between the annual values was negligible. The results indicated that the model is validated for the numerical analysis of lightweight buildings. In the following Chapter (Chapter 8), the EP model is used for the energy analysis of a real scale building investigating the impact of VIP and its contribution on the reduction of thermal bridges.

References

- [1] M. Stamatiadou, PhD Thesis, Numerical analysis of cooling loads in buildings with phase change materials in their elements, 2014.
- [2] D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert, B.T. Griffith, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment*, 43 (4) (2008) 661-673.
- [3] E. de Angelis, E. Serra, Light Steel-frame Walls: Thermal Insulation Performances and Thermal Bridges, *Energy Procedia*, 45 (2014) 362-371.
- [4] G. Evola, G. Margani, L. Marletta, Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 43 (9) (2011) 2385-2393.
- [5] J. Ramalho de Freitas, E. Grala da Cunha, Thermal bridges modeling in South Brazil climate: Three different approaches, *Energy and Buildings*, 169 (2018) 271-282.
- [6] A.P. Gomes, H.A. de Souza, A. Tribess, Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil, *Applied Thermal Engineering*, 52 (1) (2013) 84-89.
- [7] S. Kotti, D. Teli, P.A.B. James, Quantifying Thermal Bridge Effects and Assessing Retrofit Solutions in a Greek Residential Building, *Procedia Environmental Sciences*, 38 (2017) 306-313.
- [8] K. Martin, A. Erkoreka, I. Flores, M. Odriozola, J.M. Sala, Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions, *Energy and Buildings*, 43 (2) (2011) 529-535.
- [9] H. Ge, F. Baba, Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building, *Energy and Buildings*, 105 (2015) 106-118.
- [10] T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulos, The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, *Energy and Buildings*, 40 (11) (2008) 2083-2089.
- [11] F. Ascione, N. Bianco, F.d. Rossi, G. Turni, G.P. Vanoli, Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates, *Applied Energy*, 97 (2012) 405-418.
- [12] E. Kossecka, J. Kosny, Equivalent Wall as a Dynamic Model of a Complex Thermal Structure, *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 20 (3) (1997) 249-268.
- [13] P. Mahattanataw, C. Puvanant, D. Mongkolsawat, The energy performance of the cold-formed steel-frame and wood-frame houses developed for Thailand, *SimBuild 2006 Conference*, IBPSA-USA, MIT, Cambridge, MA, 2006.
- [14] ISO 10211:2017, Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.
- [15] ISO 14683:2007, Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values.
- [16] A. Capozzoli, A. Gorrino, V. Corrado, A building thermal bridges sensitivity analysis, *Applied Energy*, 107 (2013) 229-243.

- [17] ISO 6946:2017, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods.
- [18] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy Office, Building Technology Program, EnergyPlus, <https://energyplus.net/>, 2018.
- [19] W. Ma, S. Fang, G. Liu, R. Zhou, Modeling of district load forecasting for distributed energy system, *Applied Energy*, 204 (2017) 181-205.
- [20] T. Hong, F. Buhl, P. Haves, S. Selkowitz, M. Wetter, Comparing computer run time of building simulation programs, *Building Simulation*, 1 (3) (2008) 210-213.
- [21] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang, C.O. Pedersen, R.K. Strand, R.J. Liesen, D.E. Fisher, M.J. Witte, J. Glazer, EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, 33 (4) (2001) 319-331.
- [22] P.S. Nimlyat, E. Dassah, E.L.A. Allu, Computer Simulations In Buildings: Implications For Building Energy Performance., *IOSR Journal of Engineering*, 04 (03) (2014) 56-62.
- [23] N. Fumo, P. Mago, R. Luck, Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models, *Energy and Buildings*, 42 (12) (2010) 2331-2337.
- [24] COMSOL Multiphysics®, <https://www.comsol.es/comsol-multiphysics>.
- [25] G.N. Walton, Thermal Analysis Research Program Reference Manual, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1983.
- [26] M. Yazdanian, H.J. Klems, Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings, *ASHRAE Transactions*, 100 (1) (1994) 1087.

CHAPTER 8

IMPACT OF VIP ON THE ENERGY AND COST EFFICIENCY OF BUILDING ENVELOPES

Contents

8.1	Introduction.....	170
8.2	Installation of VIP for the reduction of thermal bridges on a lightweight steel-framed envelope	172
8.3	Comparative techno-economic assessment between the conventional insulation and the VIP for the renovation of a building envelope	186
8.4	Conclusions.....	193
	References	195

Summary

The present chapter discusses the impact of VIPs on the energy and cost efficiency in real scale buildings, located in cities with different climatic conditions and economic factors. For this purpose, two different VIP applications are analyzed, using techniques described in previous Chapters: (a) the installation of a VIP layer at the external walls of a lightweight steel-framed modular building in order to improve the envelope thermal performance and (b) the comparative assessment between VIPs and conventional insulation for the renovation of an old building. In the first application, the building is evaluated in the cases with and without the VIPs, revealing that the VIPs improves the envelope performance by 20% and reduces the effect of all thermal bridges. In the second application, different renovation cases using conventional and VIP insulation are analyzed, from the techno-economic point of view. The assessment of the cases is performed by means of the annual savings/operating costs and the payback period, indicating that the use of VIPs with the current prices can be profitable in cold climates and for areas with high rental prices. A part of the results regarding the VIP application in lightweight building has been published in the international Journal of Facade Design and Engineering [1].

8.1 Introduction

As is quoted in previous Chapters, at the dawn of the 21st century, Vacuum Insulation Panels (VIPs) have introduced in building applications, first in Europe and then in East Asia and North America [2]. The very low thermal conductivity of VIPs offers high thermal resistance, in conjunction with thin walls, increasing the net floor area of building. On the other hand, the still relatively high cost of VIPs along with the durability of panels are the main reasons that they have not already gained popularity in the building market. However, the new technologies of VIPs are directed to the reduction of process and the extension of service life [3, 4].

The application of VIPs in building envelopes has been investigated in several studies, as in detail discussed in Chapter 3 (section 3.5.2). The incorporation of VIPs in building envelope results to low U-values and high thermal performance. The use of 20 mm thick VIP at the walls can reduce the energy consumption for heating by 20% - 30% for a multi-family building in Sweden [5, 6]. Furthermore, VIPs coupled with concrete elements have been developed for the production of prefabricated load bearing walls with high thermal performance [7].

The benefits provided by the application of VIPs in the building envelope have been pointed out in Chapter 6 by means of the experimental investigation of lightweight steel-framed (LSF) buildings. The combination of LSF buildings with the use of VIPs form an attractive solution regarding the sustainability in building sector. This is particularly because the problem of low thermal performance associated with the steel frame of such constructions is effectively solved by the installation of VIPs on the wall [8].

Due to the thin dimensions of VIPs, their use for the renovation of historical buildings is ideal, since the space constraint is a usual challenge for the architectural design process. Johansson et al. [6, 9] renovated a historical brick wall with wooden beams by means of VIPs at the internal side reducing the energy demand for heating and improving the hygrothermal performance of the wall. In IEA/ECBCS Annex 39 (HiPTI) [10], the thermal performance upgrade of a natural stone masonry of a German church, built in 1612, was examined. Since thick conventional insulation was not permitted, as the building is a historical monument, the use of VIPs was an ideal solution.

Despite the high thermal performance and the validated behavior of the VIPs, their high cost compared with the conventional insulation materials make their cost effectiveness doubtful. Alam et al [11] assessed the financial viability of the use of VIP and EPS as building insulation. They found that the case of EPS insulation recovered the initial cost much earlier compared with the VIP. However, considering the economic value of space saving due to thinner VIP, the payback period in the VIP case was significantly reduced (Figure 3.23). Alam et al. [12] indicated that the energy and cost effectiveness of VIP application depend on the type of building, the climatic conditions and the economic factor of the location. They underlined the need for further research to clarify the achieving energy saving potential of VIPs.

In this context, the present chapter discusses the impact of the VIPs on the energy and cost efficiency in real scale buildings located in cities with different climatic conditions and economic factors. For this purpose, two different VIPs applications are examined: (a) the installation of a VIP layer at the external walls of a lightweight steel-framed modular building and (b) the comparative assessment between the VIP and conventional insulation for the renovation of an old building.

In the first examined application, a LSF building is thoroughly investigated in two cases, with and without VIP at the external walls, focusing on the contribution of VIPs on the reduction of thermal bridges and the further improvement of the envelope thermal performance. The two envelopes (with and without VIP) are numerically investigated by means of the two techniques analyzed and validated in previous Chapter: the envelope analysis according to ISO 10211 [13] (section 7.2) and the whole building simulation (section 7.3). The repeating thermal bridges caused by the metal structure as well as the geometrical (non-repeating) linear and point thermal bridges caused by the junctions of the envelope elements are calculated both in the case with and without VIPs. The building is simulated using the EnergyPlus model for the calculation of the energy demand for heating and cooling for four different climate conditions: Athens, Frankfurt, Hong Kong and Stockholm. Finally, design modifications on the current construction practices of such constructions are proposed in order to further reduce the impact of the most significant thermal bridges.

In the second application, the renovation of an old building is investigated aiming to improve the envelope thermal performance. Five renovation cases, regarding the use of VIP and EPS in different thicknesses, are evaluated in terms of the achieving energy saving and the financial viability for three different European cities: Athens, Geneva and Stockholm. As the building is historical, the insulation is located at the internal side of the walls. The economic analysis is performed for two scenarios: excluding and including the impact of the rent revenues caused by the reduction of the net floor area, due to the increase of wall thickness after the renovation. The comparative assessment of the renovation cases is performed by means of the calculation of the annual savings / operating costs and the time for the recovery of the initial installation cost. The energy analysis is based on the reduction of the energy demand for heating and cooling calculated by the EnergyPlus software (EP model), while the economic analysis is performed according to the common payback period method.

8.2 Installation of VIP for the reduction of thermal bridges on a lightweight steel-framed envelope

In the current section, the application of VIPs in a modular lightweight steel-framed (LSF) building envelope is investigated. The envelope is based on the concept of the FP7 project “ELISSA: Energy Efficient Lightweight Sustainable Safe Steel Construction” (Grant no. 609086) [14] and is similar with the envelope of the mock-up building constructed in Switzerland and experimentally investigated in Chapter 6 (section 6.3). The present analysis emphasizes on the use of a VIP layer at the inner side of the external walls as a measure for the reduction of thermal bridges and the further thermal performance improvement for an a priori well insulated envelope. For this purpose, the building envelope is investigated in two cases: with and without the VIP layer. Since the thermal bridges of such constructions are significant at the energy analysis, the focus is on the reduction of their contribution due to the presence of VIPs. Further design modifications are also proposed for the elimination of the most crucial thermal bridges.

8.2.1 Description of the building

The under-investigation building is a two-storey modular residential building. The modules are prefabricated LSF constructions that can be easily constructed and adjusted for their specific use. The metal skeleton is founded on a cement base and the dry-wall system envelope is anchored on the steel skeleton. The external dimensions of the building are 4.4 m × 2.4 m × 5.6 m. Figure 8.1 illustrates the schematic view of the examined building.

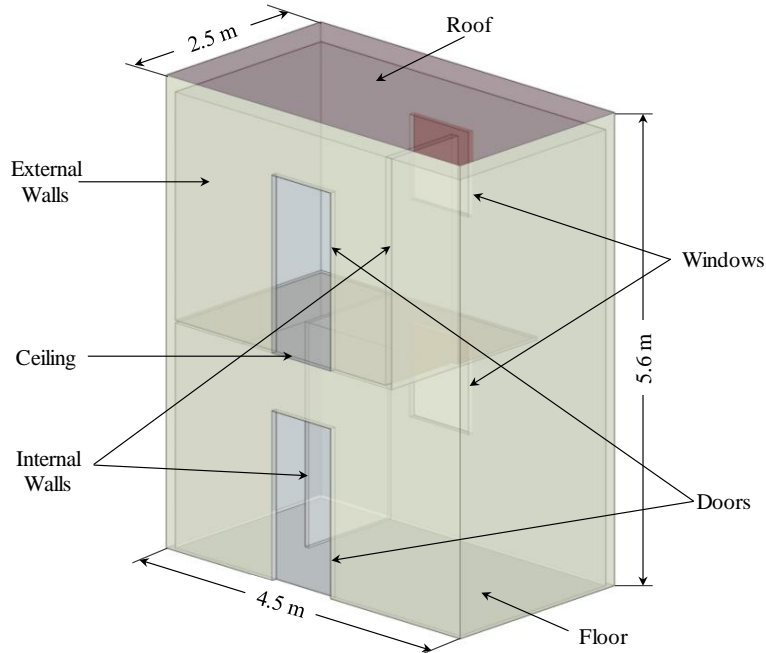


Figure 8.1 – The view of the two storey modular building.

The configuration and the incorporating materials of the building construction are presented in Table 8.1. The building envelope elements are similar with the experimental mock-up building, investigated in Chapter 6 (section 6.3). The External Walls (EW) are anchored on three different types of metal studs, i.e. C, CW (smaller C type) and I type. In the case of the building envelope with VIP, an additional VIP layer is placed in the internal side of the external walls.

Table 8.1 - The configuration of the building envelope elements.

Element	Configuration of the element	No	Materials	Thickness [mm]
External Walls (EW) In the case With VIP	<p style="text-align: center;">Total thickness: 320 mm</p>	1	Gypsumboard	30
		2	Mineral Wool	50
		3	VIP	20
		4	Gypsumboard	15
External Walls (EW) In the case Without VIP	<p style="text-align: center;">Total thickness: 300 mm</p>	5	Mineral Wool	150
		6	Air Cavity	27
		7	Cement board	12
		8	Finishing mortar	1
Roof (RF)	<p style="text-align: center;">Total thickness: 289 mm</p>	1	Gypsumboard	15
2	Mineral Wool	27		
3	Mineral Wool	200		
4	Load panel	28		
5	Roof sealing	4		
Floor (FL)	<p style="text-align: center;">Total thickness: 450 mm</p>	1	Soil	
2	Concrete slab	150		
3	Gypsumboard	15		
4	Mineral Wool	180		
5	Air Cavity	20		
6	Load panel	28		
7	Sound Insulation	20		
8	Floor	32		
9	Floor covering	5		
Internal Wall (IW)	<p style="text-align: center;">Total thickness: 210 mm</p>	1	Gypsumboard	30
2	Mineral Wool	120		
3	Air Cavity	30		
Ceiling (CL)	<p style="text-align: center;">Total thickness: 342 mm</p>	1	Gypsumboard	15
2	Mineral Wool	27		
3	Mineral Wool	180		
4	Air Cavity	20		
5	Load panel	28		
6	Sound Insulation	20		
7	Floor	32		
8	Floor covering	5		

The load bearing structure of the Roof (RF) and the Floor (FL) elements is based on I-type studs, 200mm width. It is noted that the suspended part of the roof (supported by slotted resilient channels) is considered to be filled with 27 mm thick mineral wool. In the floor, a 180mm thick mineral wool layer is placed inside the cavity, while a 150mm thick foundation concrete slab and 500mm of soil were assumed for the analysis of the current study. The configuration of the Ceiling (CL) (i.e. between the 1st and the 2nd floor) is similar to the floor replacing the concrete layer and the soil with the suspended part utilized in the roof. The Internal Wall (IW) consists of two gypsum boards at the two sides of the wall and mineral wool (120 mm) with air cavity (30 mm) at the intermediate.

Table 8.2 presents the thermal properties of the incorporating materials. Particularly, the thermal conductivity of the VIP was considered to be equal with the equivalent effective thermal conductivity for a useful time period of 25 years, as suggested by Simmler and Brunner [15], taking into account the aging and the edge effect. As the current study focuses on the improvement of an a priori well insulated envelope using VIPs, the windows (dimensions 0.8 m × 1 m) are considered as triple glazing with U-value equal to 1.25 W/(m²·K) (including the frame) and the U-value of the doors (dimensions 0.8 m × 2.2m) equal to 1.8 W/(m²·K).

Table 8.2 – Material thermal properties.

Materials	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Density [kg/m ³]	Specific Heat Capacity [J/(kg·K)]
Steel stud	60.5	7854	434
Gypsum board	0.27	1033	990
Mineral Wool	0.035	23	850
VIP	0.007 ^a	195	800
Cement board	0.35	1150	1000
Finishing mortar	0.50	700	1000
Load Panel	0.44	1500	1000
EPS	0.035	42	1400
Roof Sealing	0.2	1000	1000
Sound Insulation	0.07	250	2100
Floor	0.38	1500	1000
Floor covering	0.17	1200	1400

^a effective thermal conductivity, λ_{eff} , of a panel with dimensions 1000 × 600 (mm)

8.2.2 Analysis of the building envelope

The analysis of the building envelope is based on the ISO 10211 [13] methodology, analyzed in previous chapter (section 7.2), focusing on the contribution of the VIP to the thermal bridges and the envelope improvement. In doing so, the envelope is separated into the three models: 1D, 2D and 3D, for the calculation of the repeating thermal bridges at the central part of elements, the linear and point non-repeating thermal bridges, respectively. All configurations of thermal bridges are investigated in two cases: with and without VIP on the external walls. The commercial CFD software ANSYS CFX [16] were used to simulate all configurations. The boundary conditions were assumed the same as in previous chapter, presented in Table 7.1. The air cavities (ventilated and unventilated) are assumed to

be stagnant air with an effective thermal conductivity calculated according to ISO 6946 [17] taking into account the convection and radiation phenomena.

Central part of the envelope elements

The 1D model calculated the effect of the metal structure on the thermal performance at the central part of the envelope elements. The metal structure creates repeating linear thermal bridges, quantified by the linear thermal transmittance, Ψ -value, resulting on the increase of the U_{clear} (excluding thermal bridges) into $U_{overall}$ (including repeating thermal bridges).

The impact of metal structure on the thermal performance at the central part of the elements is significant, as depicted in Figure 8.2. The external wall was investigated both in the case with and without VIP for all types of studs. The temperature contours for every type, as well as the Ψ -values of each stud, are illustrated in Figure 8.2a. As it is shown, the presence of the metal studs introduces severe thermal bridges, which have to be taken into account in the overall thermal assessment of the building. Moreover, it can be seen that the thermal transmittance of the I-studs is ca. 29% - 36% higher than the respective of C-type stud (in both cases without and with VIPs). This is due to the fact that the I-stud is a double C-stud, which means that there is more metal in the same area increasing the heat losses. Additionally, the impact of the CW-type is not significant compared to the other types of the studs, due to its low thickness. Finally, the linear thermal transmittances for all the types of stud are reduced by ca. 54% to 67% due to the presence of the VIP layer.

The effect of the metal studs on the U-value, for each envelope element is presented in Figure 8.2b. As it is shown, the presence of the metal studs affects significantly the thermal performance of the envelope elements increasing the U-value. More specifically, the increase of the U-value is 66% for the external wall without the VIP and 32% in the case with the VIP.

The strong impact of the repeating thermal bridges is observed at the increase of the thermal transmittance of the roof and the floor. The Ψ -value of the I-stud, which supports the roof, is equal to $0.137 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ increasing the U-value by 188%. The thermal bridges due to the presence of the resilient channel, which supports the suspended part of the roof, is negligible. The Ψ -value of the resilient channel is below $10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ due to the slotted shape and the small thickness. Regarding the floor, the inclusion of the metal studs creates significant linear repeating thermal bridges with Ψ -value equal to $0.180 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, increasing the U-value by 220%.

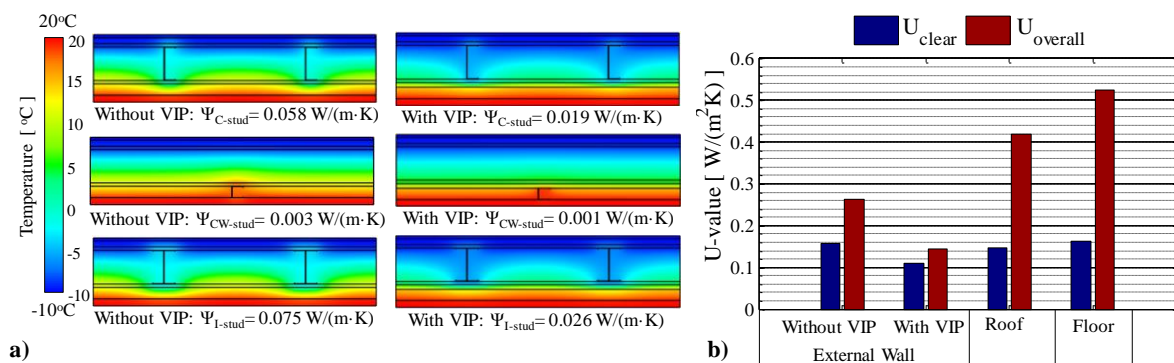


Figure 8.2 – Repeating thermal bridges at the central part of the envelope elements: a) temperature contours of the external wall and Ψ -values for all the types of studs in the cases without and with the VIPs and b) the impact of studs on the U-value of all envelope elements.

Linear, non-repeating thermal bridges

The 2D model calculated all linear non-repeating thermal bridges created by the junctions between the envelope elements. All configurations were simulated in the cases with and without VIP at the walls in order to calculate the linear thermal transmittance, Ψ -value. Temperature contours of an indicative linear junction, i.e. junction between two external walls, for the cases without and with VIPs, are illustrated in Figure 8.3a. The metal stud's intersection affects the temperature field in both cases, while comparing the two cases, the presence of the VIPs creates a more uniform temperature field through the junction.

The linear thermal transmittance, Ψ -value, of all examined linear geometrical junctions of the envelope elements is presented in Figure 8.3b and Figure 8.3c. Focusing on Figure 8.3b, it is obvious that the VIP layer improves the impact of the linear junctions, decreasing the Ψ -value by 12% up to 92%. It is observed that the Ψ -value of the junctions between external walls (EW+EW) has negative values, meaning that for the current analysis this thermal bridge has positive effect on the total thermal performance of the building envelope. As in previous chapter (section 7.4.1), this is caused due to the use of external dimensional system and the fact that the walls in the two cases are well insulated. Figure 8.3c presents the 2D intersections that are not affected by the additional insulation of VIP layer. Overall, it can be seen that the most important thermal bridges are the junctions that include the internal walls (i.e. EW+IW, IW+RF and IW+FL), as well as the junction between the external wall and the ceiling (EW+CL). Thus, special design modification should be taken into account in order to further reduce the heat losses through these thermal bridges. Some design modifications are proposed in following section (section 8.2.4).

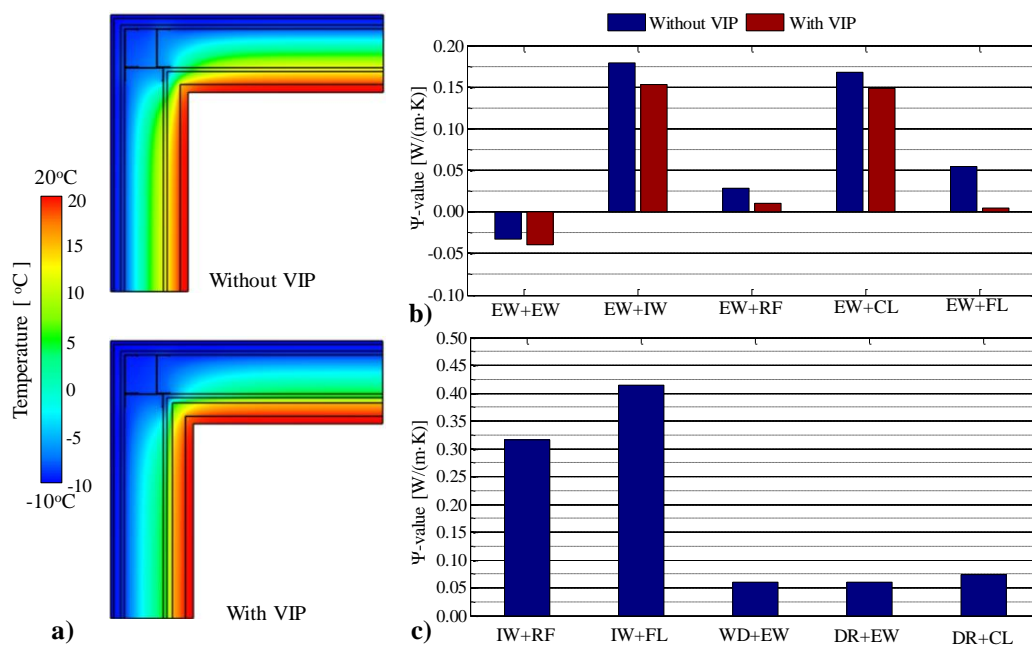


Figure 8.3 – Linear non-repeating thermal bridges: a) temperature contours of the junctions between two external walls in the cases without and with the VIPs, b) Ψ -value for the linear junctions affected by the VIPs and c) Ψ -value for the linear junctions not affected by the VIPs.

Point, non-repeating thermal bridges

The 3D model calculated the point non-repeating thermal bridges caused by the corners between the junctions of three envelope elements. All configurations were simulated in the cases with and without VIPs at the external walls. The model calculated the point thermal transmittance, χ -value, of all

thermal bridges. Figure 8.4a illustrates the temperature contours of an indicative 3D junction, i.e. the corner between the two external walls and the roof, for the cases without and with the VIPs. The metal structure and their junction significantly affect the three-dimensional temperature field in both cases.

The results of the χ -values of all point non-repeating thermal bridges are presented in Figure 8.4b. Most point thermal bridges have positive effect in the current analysis, providing negative χ -values. Hence, the overall impact of point thermal bridges is positive, since the sum of all transmittances are ca. -0.4 W/K, in the case without VIP and -0.1 W/K in the case with VIP. Generally, the χ -values in the cases without VIP are lower, due to higher Ψ -values of the linear geometrical junctions. The most severe point thermal bridge is the corner between external wall - internal wall – ceiling.

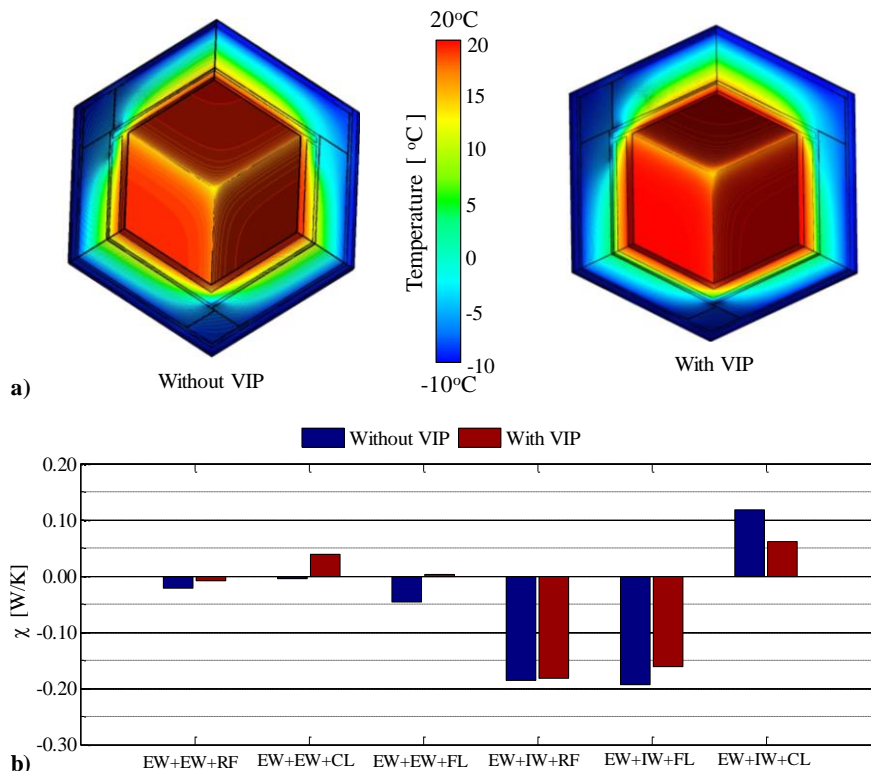


Figure 8.4 – Point, non-repeating thermal bridges: a) temperature contours of the corner between two external walls and the roof without and with the VIPs and b) χ -values of all point junctions without and with the VIPs.

Overall thermal performance

The contribution of the thermal bridges and the impact of the VIP layer on the overall thermal performance of the building envelope were calculated by means of the direct heat transfer coefficient, H_D , according to the ISO 10211. The results, presented in Figure 8.5, include the contribution of all building envelope (including the windows and doors) for the two examined cases. It is observed that the additional VIP layer decreases the total H_D by 20%. Additionally, the VIP reduces the impact of thermal bridges by 5%, since the contribution of the clear elements (without any thermal bridge) on the H_D increased from 59% to 64%. It is remarked that the openings (two windows and two doors) are responsible for the largest part of this contribution of clear elements, since their impact on the total H_D is 22% and 28% in the case without and with VIP, respectively. This high contribution of openings shows the high thermal performance of the two examined opaque envelopes.

The reduction of the Ψ -values of all repeating thermal bridges due to the presence of VIP layer results to the reduction of their contribution on the overall thermal performance from 27% to 23%. The total impact of the non-repeating thermal bridges (linear and point) in the case with VIP is also reduced by 1%.

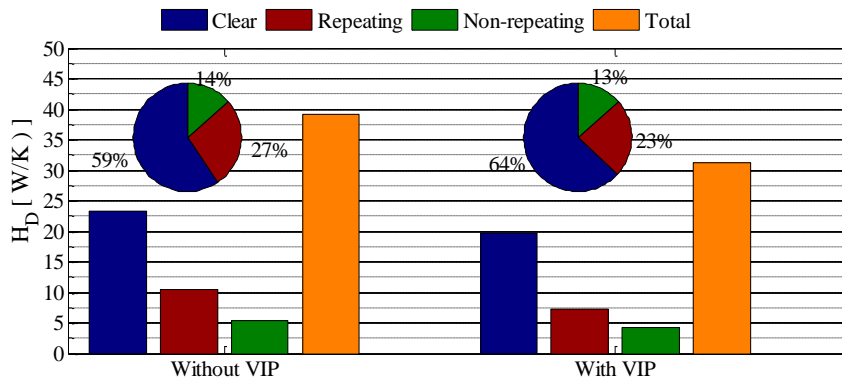


Figure 8.5 – The direct heat transfer coefficient, H_D , of the whole building envelope and the contribution of thermal bridges in the two examined cases, without and with VIP.

Temperature factor

The hygrothermal performance of all types of thermal bridges was assessed by means of the temperature factor, f , described in section 2.4.2. A critical value of temperature factor equal to 0.7 is defined to avoid the mold growth and the condensation risk [18]. The results of the hygrothermal analysis of all thermal bridges for the cases without and with VIP at the external walls are presented in Figure 8.6. It is shown that mold growth is not expected at the central part of the envelope elements, since the temperature factor is higher than the critical value of 0.7, in both cases. The additional VIP layer increases the temperature factor by 3%, on the central part of external walls. Regarding the non-repeating thermal bridges, it is shown that there are several configurations in which the temperature factor is slightly below the critical value. For the linear non-repeating thermal bridges there is no condensation risk, except from the intersections between the external wall and the window or door frame. However, the presence of VIPs increases the temperature factor up to 5% for these configurations. On the other hand, the growth of mold is possible on several point non-repeating junctions. The lowest temperature factor is equal to 0.64, observed at the corner external wall - internal wall - roof. However, the VIP improves the hygrothermal performance of all corners increasing the temperature factor up to 6%.

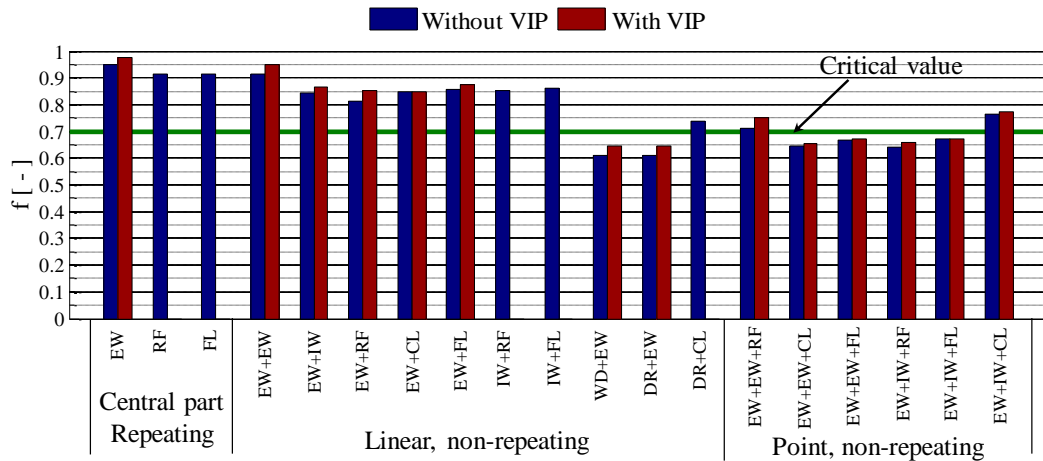


Figure 8.6 - The temperature factor of all thermal bridges in the cases without and with VIP.

8.2.3 Whole building simulation

The entire building was simulated by means of the EnergyPlus model (EP model), described and validated in previous chapter (section 7.3), investigating the energy demand for heating and cooling for four different climate conditions: Athens, Frankfurt, Stockholm and Hong Kong. The building was simulating for the two examined cases, without and with VIP at the external walls.

A unique thermal zone was considered for the whole building. All thermal bridges were introduced according to the methodology described in section 7.3.2. The EP model was used for the calculation of the energy demand for heating and cooling, assuming the indoor temperature equal to 20 °C during heating and equal to 24 °C during cooling, in order to ensure indoor thermal comfort.

The building was considered without any internal thermal load in order to evaluate only the building envelope performance. The infiltration and the required ventilation rate of the building elements was calculated equal to 0.68 ACH according to ASHRAE [19]. The weather data was obtained from the EnergyPlus database [20].

The results of the annual energy demand for heating and cooling of the examined lightweight building are presented in Figure 8.7 in the case without and with VIP for the four different climate conditions. As it is shown, the additional insulation layer of VIPs reduces the total energy demand for heating and cooling by 14% up to 16% for all the examined climate conditions. This reduction is significant at the cities with cold climate, since the additional insulation layer saves 628 kWhr annually, at the climatic conditions of Stockholm.

However, from the techno-economic point of view, this energy saving can recover the additional cost of VIPs in 56 years, assuming a high-efficiency natural gas heating system and typical prices of VIPs (ca. 71.3 €/m² for 20mm thick). This renders the installation of the additional VIP layer unprofitable due to the fact that the envelope without VIPs is also well-insulated and the high cost of VIPs.

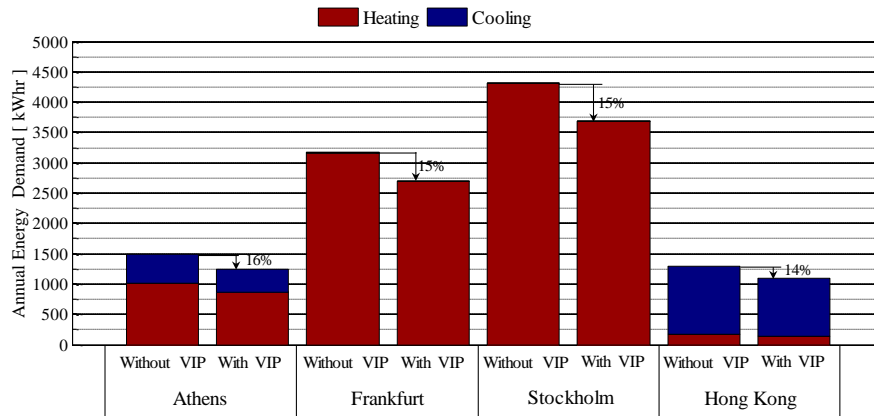


Figure 8.7 – Annual energy demand for the cases without and with the VIP layer in four climate conditions.

The contribution of each part of the building envelope on the annual energy demand of the building is investigated for the two examined cases: without and with VIP at the external walls. Figure 8.8 illustrates the results for the Stockholm weather conditions. However, the outcomes are similar for the rest climatic conditions. As it is shown, the largest amount of heat losses is caused by the air movement through the infiltration and the ventilation of the building in both cases. This occurred due to the fact that the heat losses caused by the air movement, which cannot be avoided, are high compared with the heat losses through the envelope indicating the well-insulated examined envelopes in both cases. For this reason, the infiltration/ventilation account for 39% in the case with VIP and 34% in the case without VIP. In absolute values, the amount of heat losses in two cases is the same.

The presence of VIP reduces the impact of the clear opaque envelope (walls, roof and floor) and the thermal bridges by 3% and 4%, respectively. The impact of clear envelope is reduced from 28% to 25% and that of thermal bridges is reduced from 27% to 23%. The reduction of the thermal bridges is caused by the reduction of the impact of repeating and non-repeating thermal bridges. Finally, a significant increase of energy demand is caused by the openings contributing by 10% and 12% in the case without and with VIP, respectively. It is observed that the outcomes are similar with the results obtained by the analysis of direct heat transfer coefficient (Figure 8.5).

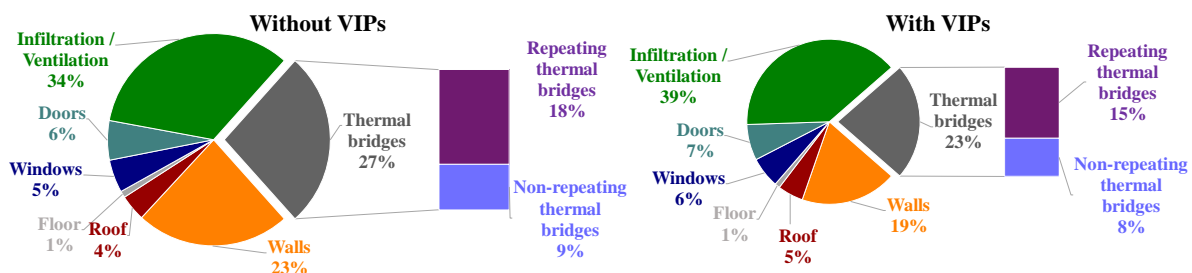


Figure 8.8 – Allocation of the energy losses from the building envelope for the cases without and with VIP.

8.2.4 Design modifications for the further improvement of the envelope

According to the above results, the installation of VIPs at the internal part of the external walls results in a decrease of 20% at the direct heat transfer coefficient and ca. 14% at the energy needs for heating and cooling. Nevertheless, despite the installations of VIPs, the thermal bridges significantly deteriorate the thermal performance of the envelope. Specific thermal bridges, such as the repeating presented at the roof and the floor (Figure 8.2) and the linear non-repeating at the junctions of the

external walls with the internal walls or the ceiling (Figure 8.3), highly influence the thermal performance of the envelope. For this reason, different design modifications and solutions are proposed on the current construction practices and examined to further eliminate the remaining increased thermal bridges.

Additional insulation at the roof

The roof contributes to the overall direct heat transfer coefficient by 14% including its repeating thermal bridges caused by I-studs which are responsible for 9%. For the reduction of these repeating thermal bridges, two potential design modifications are proposed. The first concerns the increase of the thickness of the suspended part increasing the thickness of the incorporated mineral wool (Figure 8.9a). The second modification proposes the installation of an additional conventional insulation layer (such as XPS or EPS) on the top of the roof, as illustrated in Figure 8.9b. In this case, an extra layer with pebble stones or load panel has to be installed above the insulation in order to protect it from weather conditions.

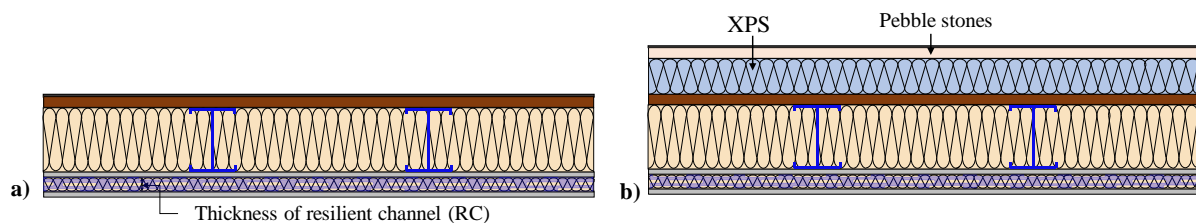


Figure 8.9 – Configurations of the two proposed modifications for the upgrade of the roof: a) increase of the thickness of the suspended part and b) the installation of an addition XPS layer

The two proposed modifications are investigated, calculating the Ψ -value and the $U_{overall}$ (U-value including the effect of the repeating thermal bridges). Figure 8.10 presents the results for different insulation thicknesses of the two proposed modifications. It is mentioned that the “RC” means the thickness of the resilient channel (and as a result the incorporated mineral wool), for the first modification.

As it is expected, the increase of the thickness of the insulation layer (either in the case of mineral wool inside the resilient channel, or the additional XPS insulation on the top of the roof) results to the reduction of the linear thermal transmittance of the I-studs. Particularly, the increase of the RC thickness achieves 32% - 82% and 24% - 68% reduction of the Ψ -value and the $U_{overall}$, respectively. Nevertheless, increasing the RC thickness means that the room’s height decreases. On the other hand, the installation of the XPS layer on the top of the roof, which is an easier design solution from a construction point of view, reduces the Ψ -value and the $U_{overall}$ by 54% - 71% and 41% - 57%, respectively. The percentage values, illustrated in Figure 8.10b, represents the reduction of the initial overall direct heat transfer coefficient, H_D , caused by the proposed modification, achieving a reduction of the H_D up to 10%. From techno-economic point of view, an optimum solution may be the installation of the additional XPS layer at the top of the roof resulting 7% reduction of H_D with only 80 mm thick of extra insulation.

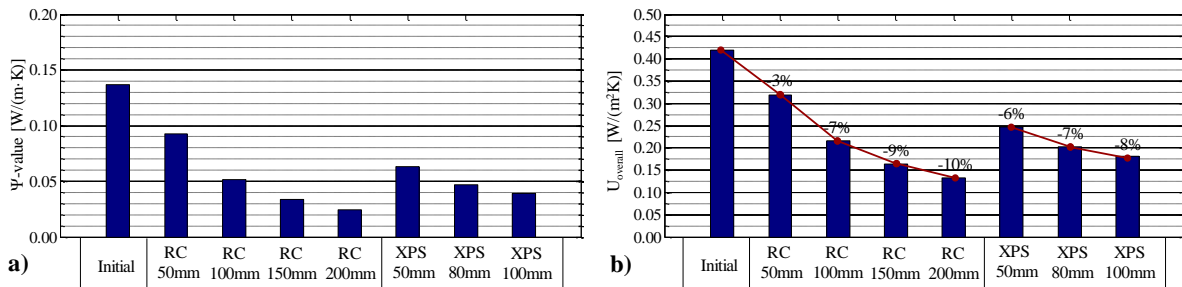


Figure 8.10 – Calculation of the repeating thermal bridges for the two proposed modifications of the roof: a) Ψ -value and b) $U_{overall}$.

Additional insulation at the floor

According to the envelope analysis, the floor is responsible for the 18% of the overall heat transfer coefficient, H_D , including its repeating thermal bridges due to I-studs which are responsible for 12%. Hence, the degradation of these thermal bridges is essential for the further improvement of the envelope performance. The installation of an extra conventional insulation layer (such as EPS) below the concrete slab of the floor is proposed, as illustrated in Figure 8.11a.

The proposed modification is investigated for four different thicknesses of EPS insulation (50 mm, 100 mm, 150 mm and 200 mm) evaluating their impact by means of the calculation of the Ψ -value (Figure 8.11b) and the $U_{overall}$ values (Figure 8.11c). As it is expected, the increase of the EPS thickness reduces the Ψ -values and the $U_{overall}$ values, but the rate of decrease is also reduced. Particularly, the installation of the additional EPS layer achieves 54% - 87% and 43% - 75% reduction of the Ψ -value and the $U_{overall}$, respectively. This modification offers an improvement of the initial H_D by 8% up to 13%, as presented the percentage values in Figure 8.11c. The installation of 100 mm thick EPS may be an optimum solution resulting a reduction of the H_D by 11%.

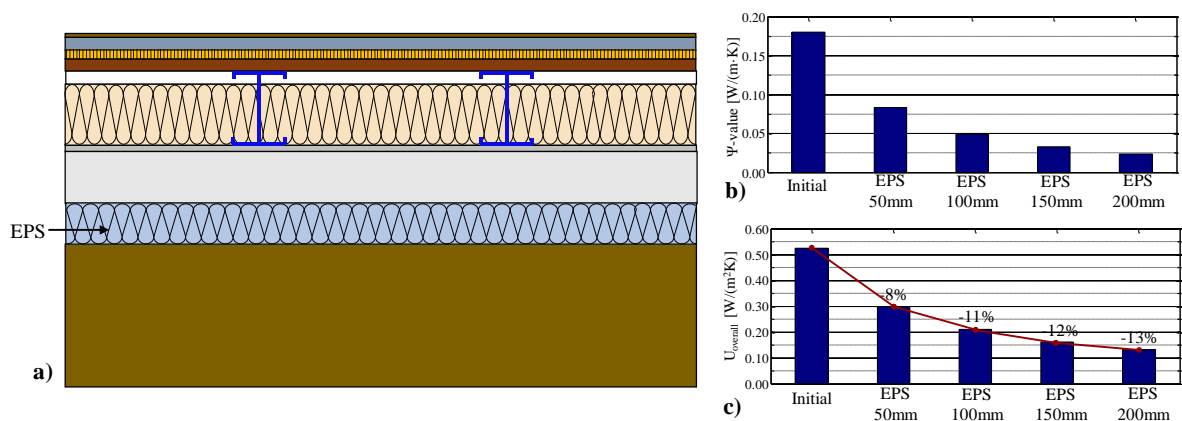


Figure 8.11 - Design modification of the repeating thermal bridge at the floor: a) configuration of the proposed modification and b) Ψ -values for different thicknesses of the additional EPS layer and c) $U_{overall}$ values for different thicknesses of the additional EPS layer.

Additional insulation at the junction between the external walls and the ceiling

The junction of the external walls with the ceiling (EW+CL) is the most severe non-repeating thermal bridge, taking into account the Ψ -values obtained by the Figure 8.3 coupled with its total length. This thermal bridge is responsible for the 6% of the total H_D . For the reduction of the impact of this thermal bridge, it is proposed the installation of a Super Insulation Material (SIM) inside the ventilated cavity of the external wall covering the junction, as depicted in Figure 8.12a. Two different SIMs,

aerogel and VIP, are investigated for this solution with two different thicknesses (10 mm and 15 mm) and five different lengths. The lengths are obtained based on VIP's lengths, according to specified sizes by manufacturers: 308.0 mm, 338.8 mm, 369.6 mm, 462.0 mm and 616.0 mm. The minimum length (308 mm) corresponds to the minimum length, inside the ventilation cavity, which covers the distance between the metal studs of the junctions (see Figure 8.12a).

The proposed modification is evaluated by means of the calculation of the Ψ -value for the different SIMs and sizes. The results are presented in Figure 8.12b. It is observed that the modification improves the Ψ -value by 18% to 61%. This can be translated into a reduction of the initial H_D by 1.2% to 3.9%.

The installation of VIP is more effective than the aerogel, even the VIP thickness is 5 mm smaller than the aerogel, due to the significant difference in the thermal conductivity. Moreover, as it is expected the increase of SIM's length or thickness results to the reduction of the Ψ -value, in each case of SIM. It is clearly shown that the aerogel cannot reach the insulation capability of the VIP. The bigger aerogel sample (i.e. 15 mm thickness and 616 mm length) reduces the Ψ -value by 33%, almost the same with the smaller VIP (i.e. 10 mm thickness and 308 mm length), which reduces the Ψ -value by 31%.

Another significant issue is the thickness of the SIM due to the restriction concerning the thickness of the ventilation cavity. As it is shown, the thickness of the SIM could be compensated with the respect to the reduction of thermal bridges by increasing the length of the SIM. Hence, the 10 mm thick and 616 mm length VIP has an almost equivalent insulation capability as the 15 mm thick and 462 mm length VIP.

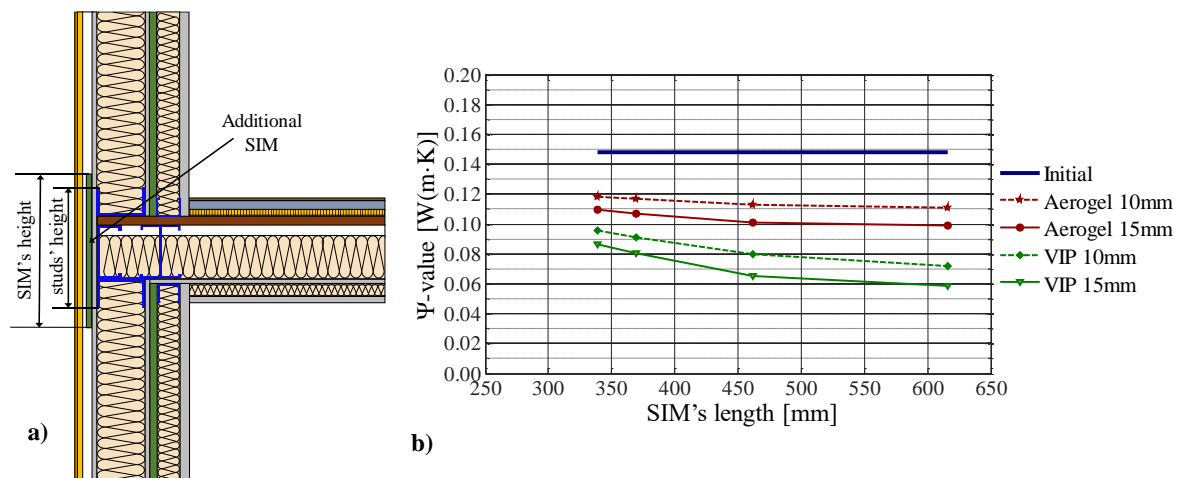


Figure 8.12 – Design modification of the thermal bridge at the junction between the external walls and the ceiling: a) configuration of the proposed solution and b) Ψ -values for different SIMs (types and sizes).

External wall – Internal wall junction

The second more severe linear non-repeating thermal bridge is the junction between the external and the internal wall (EW+IW). This thermal bridge is responsible for the 1.3% of the H_D . The impact of this thermal bridge is caused mainly by the presence of metal studs which connect the two walls. For the elimination of the impact of this thermal bridge, it is proposed the decoupling of the metal structure between the external and the internal wall, as depicted in Figure 8.13a and Figure 8.13b. The proposed modification can be performed in certain cases for static reasons, such as the under-investigation building. The decoupling of the two walls results to the extension of the VIP layer at the whole length of the external wall (Figure 8.13b). The reduction of the linear thermal transmittance for the proposed

modification is illustrated in Figure 8.13c. It is observed that the Ψ -value of the thermal bridge is eliminated by 98.4%, reducing the H_D by 1.2%.

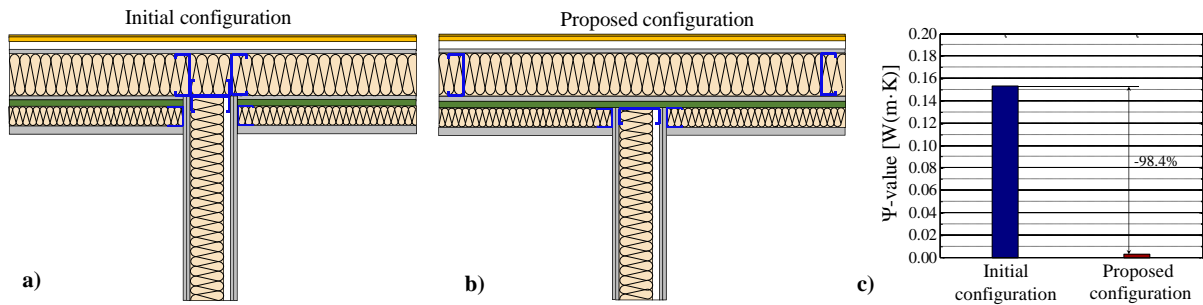


Figure 8.13 – Design modification for the linear non-repeating thermal bridges caused by the junction between the external and the internal wall: a) the initial configuration, b) the proposed configuration and c) Ψ -values for the two non-repeating thermal bridges.

Implementation of all proposed modifications

The above mentioned proposed modifications concern the further upgrade of the envelope thermal performance reducing the effect of the most severe thermal bridges. Table 8.3 summarizes the optimum solution for the improvement of each thermal bridge, taking into account the applicability (ease of construction) and the cost effectiveness.

Table 8.3 – Design modifications for the further improvement of the building envelope.

Modification	Configuration	Description
Ref	Initial case	The reference building with VIPs at the external walls
Mod - 1	Roof	Installation of XPS layer (80 mm thick) at the top of the roof
Mod - 2	Floor	Installation of EPS layer (100 mm thick) below the concrete slab
Mod - 3	EW+CL	Installation of VIP strip (10 mm thick & 616 mm length) in the cavity
Mod - 4	EW+IW	Decoupling of external and internal wall
All Mod	All modifications	Implementation of all solutions

The contribution of each proposed modification on the energy efficiency of the envelope is illustrated in Figure 8.14. As it is observed in Figure 8.14a, which summarizes the reduction of the direct overall heat transfer coefficient, H_D , the modifications reduce the H_D by 2% - 9%. The larger improvements are obtained due to the modifications concerning the repeating thermal bridges of roof and floor. The combination of all design modifications leads to a reduction of the H_D by 22%. It should be mentioned that this reduction is achieved on the high-insulated building with VIPs.

The reduction of the annual energy demand implementing each of the above modifications is depicted in Figure 8.14b. The results are presented for Stockholm conditions; however, the outcomes are similar for the other climate conditions. It is observed that the modifications can save from 58 kWhr to 220 kWhr, annually, which means a reduction of the energy demand by 1.6% up to 6.0%. The highest reduction is observed for the modifications of the roof and the floor, while the modification regarding the two non-repeating thermal bridges reduces the energy demand by ca. 2%. Finally, the implementation of all proposed modifications results to a reduction of the energy demand by 14.8%, which can be translated into an energy saving equal to 547 kWhr, annually. It is reminded that the presence of VIP on the building envelope results to an energy saving in the order of 633 kWhr. Further

tecn-economic assessment of the proposed design modifications is necessary for the selection of the optimum solution. Other solution, such as thermal breaks, slotted steel studs, bolted connections, etc. should be examined.

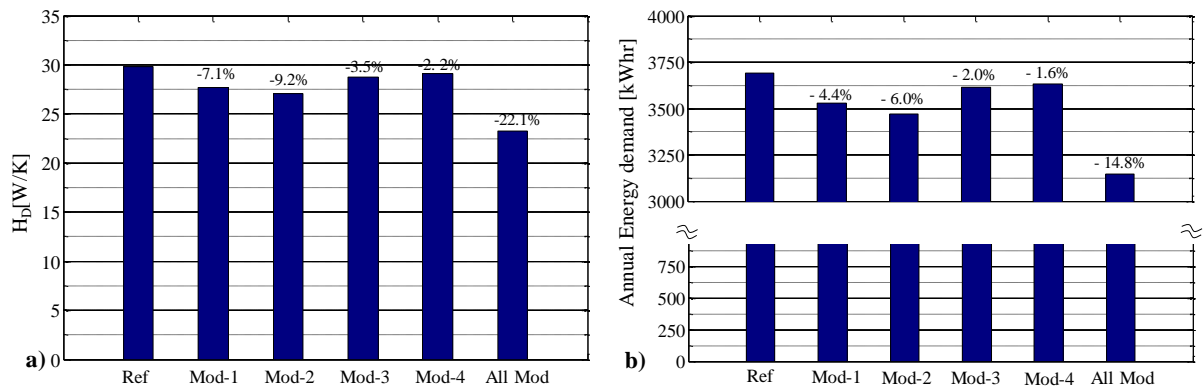


Figure 8.14 – Effect of different design modifications: a) on the direct overall thermal coefficient and b) on the annual energy demand for Stockholm conditions.

8.3 Comparative techno-economic assessment between the conventional insulation and the VIP for the renovation of a building envelope

In the present section, a comparative assessment of different renovation cases using conventional and VIP insulation systems for a single-story historical residential building is carried out from the techno-economic point of view. The existing building envelope is a non-insulated masonry of an old building which is common in South and Central Europe, but less common in North Europe. The investigation is performed for three European cities, with different climatic conditions and economic factors: Athens, Geneva and Stockholm. The assessment of the renovation cases is based on the energy and economic analysis for the three cities.

8.3.1 Description of case study

The analysis of the current study concerns the envelope upgrade of a single story residential building with dimensions $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ and 3 m height. The building is supposed to be an old construction built at the beginning of 20th century, with traditional non-insulated rubble walls (R-value ca $0.3\text{ m}^2\text{K/W}$), as the rubble wall measured in Chapter 4 (Table 4.2, Figure 4.2c). The building comprises of two bedrooms, one kitchen, one dining room, one living room and one bathroom. A schematic description of the building is depicted in Figure 8.15. Two windows are located at each orientation, and a door is placed at the South wall. Aiming to focus only on the upgrade of the opaque envelope elements, the windows are assumed to be energy efficient, comprising modern insulated aluminum frame and triple pane, low-e glazing. Further details of the building are summarized in Table 8.4.

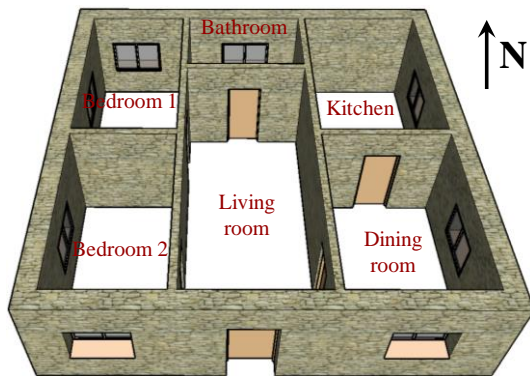


Figure 8.15 – Plan of the examined building.

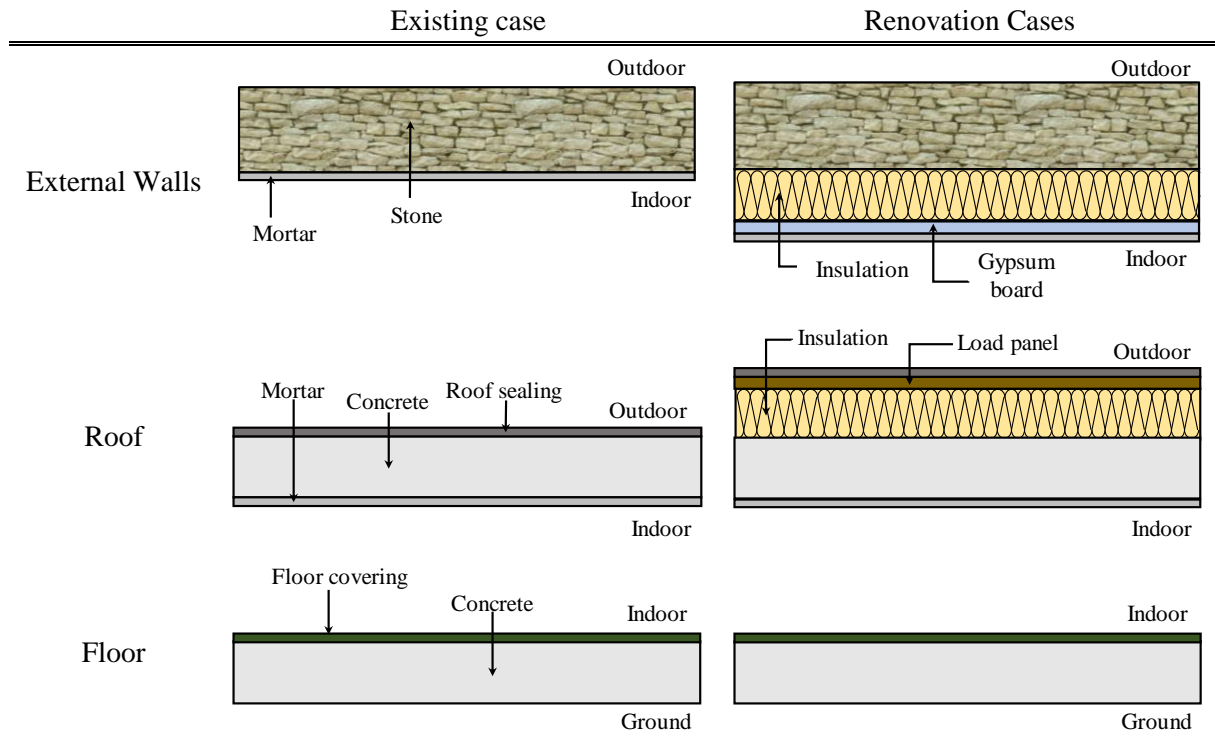
Table 8.4 – Details of the building envelope.

Description	Value
Total envelope area	120 [m ²]
Total windows area	12 [m ²]
Windows' dimensions	1 × 1.5 [m]
Windows U-value	1.25 [W/(m ² K)]
Door's dimensions	1.10 × 2.20 [m]
Door U-value	1.25 [W/(m ² K)]
Infiltration / Ventilation	0.5 ACH
People	3
Electric devices	150 W
Lighting	4 W/m ²

The upgrade of the envelope's thermal performance is achieved by means of the installation of insulation in the walls and the roof. As the contribution of floor to the energy losses is small, according to Figure 8.8, the renovation cases do not examine the installation of insulation in the floor. The configurations of the envelope elements are presented in the Table 8.5 for the existing case and the examined renovation cases. Due to the traditional façade, the insulation of the walls has to be installed at the internal side. A gypsum board layer is also added in order to protect the insulation by damages

and moisture effects. Regarding the roof, the insulation is applied at the top along with a load panel and roof sealing for protection from weather conditions.

Table 8.5 – The configuration of the building envelope for the existing and the renovation cases.



The materials' thermal properties are presented in Table 8.6. Particularly, as in previous section (section 8.2.1), the thermal conductivity of the VIP was considered to be equal with the equivalent effective thermal conductivity for a useful time period of 25 years, as suggested by Simmler and Brunner [15], taking into account the aging and edge effect.

Table 8.6 – Material thermal properties.

Material	Thickness [mm]	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Density [kg/m ³]	Specific Heat Capacity [J/(kg·K)]
Stone	400	1.25	2000	1000
Mortar	5	0.63	800	1000
Concrete	150	1.3	2000	1000
Roof sealing	4	0.2	1000	1000
Floor covering	10	1.5	2000	1500
EPS	70/100/150	0.035	23	1450
VIP	20	0.007	195	800
Gypsum board	12.5	0.27	1033	990
Load panel	28	0.44	1500	1000

In total, 5 renovation cases are examined using different types and thicknesses of insulation, as presented in Table 8.7. In all renovation cases, the insulation is installed at the "Insulation" layer illustrated in Table 8.5. EPS70, EPS100 and EPS150 cases examine the installation an EPS layer with

70 mm, 100 mm and 150 mm thick, respectively, while the VIP case represents the installation of 20 mm thick VIP both in the walls and in the roof. The VIP+EPS case examines the combination of 20 mm thick VIP in the walls and 150 mm thick EPS in the roof.

Table 8.7 –Insulation at the building envelope for the five proposed renovation cases.

Renovation case	Walls insulation	Roof insulation
EPS70	EPS 70mm	EPS 70mm
EPS100	EPS 100mm	EPS 100mm
EPS150	EPS 150mm	EPS 150mm
VIP	VIP 20mm	VIP 20mm
VIP+EPS	VIP 20mm	EPS 150mm

8.3.2 Energy analysis

The under-investigation residential building is simulated for the six cases (existing and five renovation cases) by means of the EnergyPlus software. The annual energy consumption for heating and cooling are calculated for the three different climate conditions: Athens, Geneva and Stockholm.

A unique thermal zone is considered for the whole building. All thermal bridges are calculated according to ISO 10211 [13] and introduced into the model, according to the methodology described in section 7.3.2. The heating system of the house is composed of a natural gas condensing boiler, with efficiency 100% and high insulated pipes resulting to distribution losses equal to 5%, while the cooling system is a typical air conditioning system with COP = 3. The set point indoor temperature is assumed 20°C during winter and 24°C during summer months. The weather data is obtained from the EnergyPlus database [20]. The ventilation and infiltration rates are calculated according to ASHRAE [19]. The internal gains caused by the electric equipment is assumed 150 W and the lighting 4 W/m² (Table 8.4), according to KENAK [21].

The results of the annual energy consumption for heating and cooling for the three European cities are depicted in Figure 8.16. As it is expected, the renovation of the envelope leads to a significant reduction of the energy consumption for all renovation cases. The reduction ranges between 66% – 75% for the three cities. The higher reduction of energy consumption is observed for EPS150 case. The VIP case offers the same reduction with the EPS100 case in all climate conditions, because the two insulation layers (100 mm EPS and 20 mm VIP) have the same thermal resistance and similar thermal capacity. The VIP+EPS case further reduces the energy consumption by 2% in comparison with the VIP case. The envelope upgrade can save more than 10000 kWh in Athens, 22000 kWh in Geneva and 33000 kWh in Stockholm conditions. Significant electricity loads for cooling are presented only in the Athens, while in Geneva and Stockholm the cooling demand is almost negligible or zero.

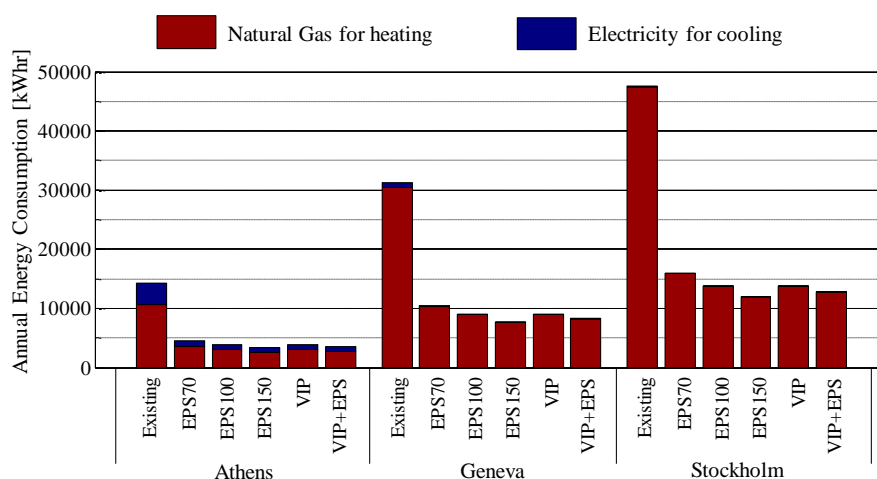


Figure 8.16 – Annual energy consumption for heating and cooling of the examined cases for the three European cities.

8.3.3 Economic analysis

A techno-economic analysis of the five examined renovation cases is performed investigating their financial viability. The analysis investigates the most profitable solution for the renovation of the building taking into account the annual cash inflows (revenues) and outflows (operating costs). Revenues are considered the cash inflows from the rental of the house, taking into account the net floor area and the rent price for each country. Annual costs are considered the operating cost for the energy consumption of the house. In the current analysis the operating costs are paid by the owner of the house for all cases, for comparison purposes, even in the case of Athens, where the operating costs are paid by the tenants. The assessment of each renovation case is based on the reduction of the operating cost (energy saving due to the envelope upgrade) and the reduction of the rent revenues (due to reduction of net floor area) compared with the existing case.

The five examined renovation cases are compared with the existing case taking into account the installation costs. Table 8.8 summarizes the prices that were taken into consideration. The current prices (second semester of 2017) for the natural gas (operating cost for heating) and the electricity (operating cost for cooling) for each country are taken from Eurostat [22], while the rent prices concern the average values of each city, taken from Global Property Guide [23].

Table 8.8 – Prices for the heating and cooling energy systems, the rent prices, the material and labor costs.

	Athens	Geneva	Stockholm
Natural gas price [€/kWh] ^a	0.065	0.101	0.113
Electricity price [€/kWh] ^a	0.194	0.189	0.194
Rent price [€/m ² net floor] ^a	5.17	26.65	19.02
EPS material cost per 50 mm thickness [€/m ²] ^a	7.31	6.37	7.38
VIP material cost per 20 mm thickness [€/m ²] ^a	71.30	71.30	71.30
Cost of other materials [€/m ²] ^a	9.87	8.59	9.95
Labor cost [€/m ²] ^a	14.94	63.38	34.79

^a including all taxes and levies (VAT: 24% for Athens, 8% for Geneva and 25% for Stockholm)

The installation cost for each renovation case is analyzed into two different costs, i.e. purchase of raw materials and labor cost. The data for these costs is specified on the basis of information obtained from material suppliers and manufacturers in Greece for the year 2018. For the other countries, it was assumed that the cost for purchasing raw materials is approximately the same as in Greece, while the labor costs were assumed to be proportional to the Greek's labor cost, based on the national average salary. Hence, the labor cost in Sweden and Switzerland is set 2.31 and 4.87 times the Greek's labor cost, respectively, according to Trading Economics [24] for year 2018. Finally, the VIPs are considered to consist of fumed silica core, due to the high thermal performance and lifetime, despite the fact that it is more expensive [12].

The installation cost for the five examined renovation cases for the three cities are presented in Figure 8.17. It is observed that the VIP case is always more expensive than the other cases (more than 9000 € in comparison with EPS150 case), while the VIP+EPS case reduces the installation cost by ca. 5000 €. The difference in taxes and labor costs for the three cities results to different installation costs. Particularly, the installation cost in Athens is higher than 6500 €, in Geneva than 15000 € and in Stockholm than 10000 €. Besides, for each 1 cm increase of the additional conventional insulation thickness the installation cost increases by ca. 270 €.

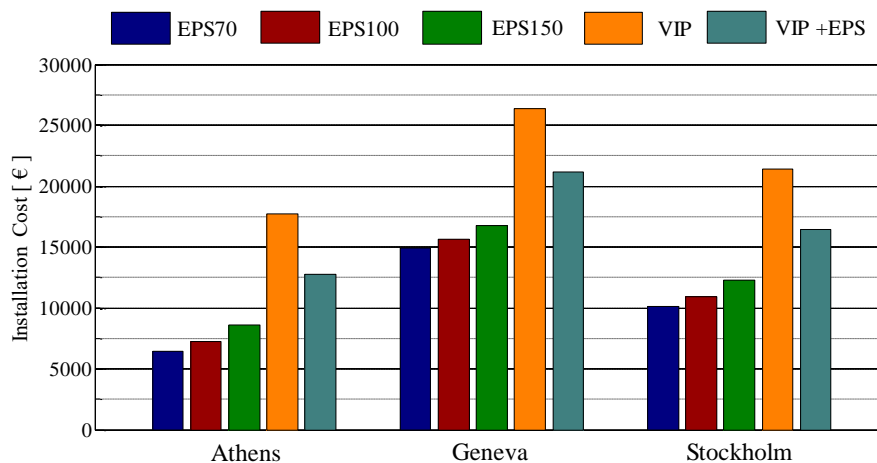


Figure 8.17 – Installation cost of the five renovation cases for the three European cities.

In each renovation case, the operating costs are reduced resulting a significant energy saving due to the building envelope upgrade. In the same time, the rent revenues are also decreased due to the reduction of the net floor area caused by the insulation layers at the internal side. The annual energy saving is compared with the annual rent revenues reduction in Figure 8.18 for the three cities. As it is shown, the renovation saves a significant amount mainly in cold climates, reducing the annual operation costs by 950 € - 1050 € in Athens, by 2200 € - 2400 € in Geneva, and by 3600 € - 4000 € in Stockholm.

It is observed that the energy saving is higher than the rent revenue reduction providing annual profits for all cases. The numbers above the bars in the Figure 8.18 illustrate the annual profit for each case. The annual profits in Athens range between 700 € - 960 €, while in Geneva and in Stockholm range between 500 € - 2000 € and 2600 € - 3600€, respectively. The cases with VIPs (VIP and the VIP+EPS) offer by far the highest profits in the three cities due to the combination of the high insulation level with low thickness. Particularly in Stockholm the annual profit of cases with VIPs is by 650 € – 970 € higher than the cases with conventional insulation.

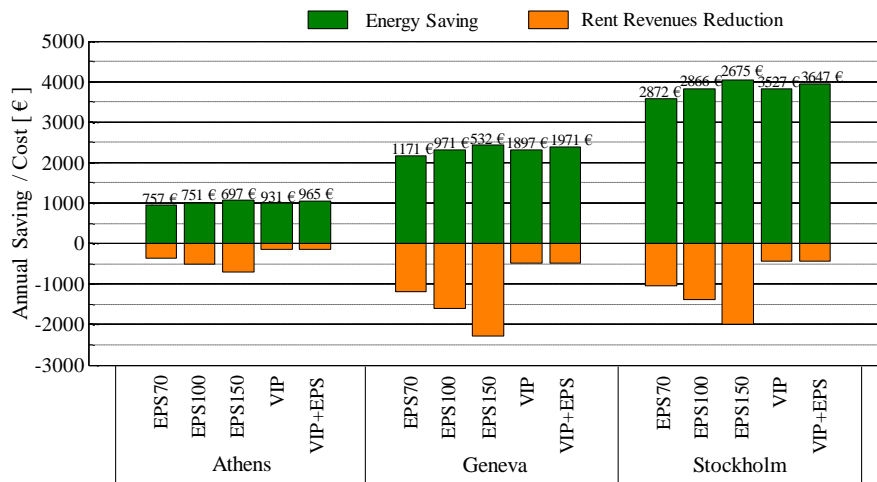


Figure 8.18 – Annual energy saving and rent revenue reduction for each examined renovation case for the three cities.

The renovation cases are also evaluated by means of the payback period method. The payback period (PP) is the most common used index representing the time required for an investment to recover its initial costs. The PP is calculated by the following equation:

$$PP = \frac{C_0}{ES + RRR} \quad 8.1$$

where C_0 [€] is the installation cost, ES [€] is the energy saving and the RRR [€] is the rent revenue reduction (negative value) for each renovation case. The purpose of the techno-economic analysis is the comparative assessment of the five examined renovation cases, allowing the use of the simple payback period instead of the discount payback period or other financial index, which take into account the varying time value of money.

The results concerning the PP are presented in Figure 8.19 assuming two scenarios: (α) excluding and (β) including the impact of the rent revenues reduction. In the first scenario, the cases with conventional insulation recover the initial costs earlier than the cases with VIP. In each city, the VIP case has by far the largest payback period, while the replacement of roof insulation with conventional (VIP+EPS case) results to a significant reduction of the PP . In the second scenario (Figure 8.19b), taking into account the impact of the rent revenues reduction, the PP s are significantly increased. The selection of the most viable renovation case significantly depends on the climate conditions and economical factor of each city.

In Athens, the EPS70 case has the lowest PP , recovering the initial cost in 7 years for the scenario excluding the rent revenue reduction and in 8.5 years including the house rent. In the first scenario, the VIP and VIP+EPS cases require 17 and 12 years to recover the initial cost, respectively. In the second scenario, the PP of the VIP is 19 years due to the high installation cost, while the PP of the VIP+EPS case is 13 years.

In Geneva, the three conventional insulation cases provide the approximately the same PP (7 years) in the first scenario. On the other hand, for the scenario including the rent revenue reduction, the use of VIPs in the walls is the most viable and profitable solution, as the PP in the VIP+EPS case is 11 years and in the VIP case 14 years. The conventional insulation cases require more than 12 years for the paying off. The latter shows the importance of the insulation thickness in cities with high rent price.

In Stockholm, in both scenarios the *PP* values for all cases are low due to the high achieving energy saving caused by the extremely cold conditions and the poor-insulated existing case. In the scenario without rent revenue reduction, the *PP*s of all cases are close since the conventional insulation require 3 years, the VIP+EPS case 4 years and the VIP 5 years for the recovery of initial cost. In the second scenario, all cases have close *PP* values (4 - 6 years), however the extremely high annual profit of the VIP+EPS case (Figure 8.18) make it as the optimum and most cost-effective solution.

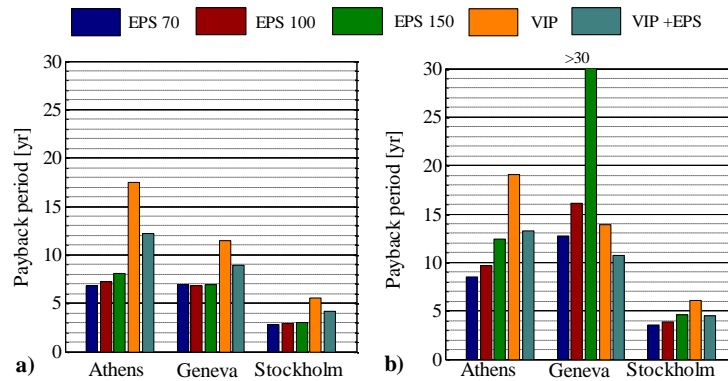


Figure 8.19 – Payback period a) excluding the house rent and b) including the house rent.

It is noted that the reference case (existing case) for the economic analysis of the three cities is a non-insulated building (initial U-value ca. 2.5 W/(m²K)), described in section 8.3.1. Further investigation showed that a more insulated reference building (existing case) in cold climates, which is close to the reality, resulted to lower energy saving and higher *PP*s. However, the outcomes regarding the comparison for the most profitable and cost-effective solution were not changed.

Figure 8.20 illustrates the results of the economic analysis regarding the five examined renovation cases in Stockholm, assuming a poor-insulated building (U-value = 0.7 W/(m²K)) in the existing case. For the scenario including the impact of rent revenue reduction, the cases with conventional insulation are not profitable, since the EPS70 and EPS100 cases require more that 40 years to recover the initial cost and the rent revenue reductions of the EPS150 case are higher than the energy savings. The only cost-effective solution is the use of VIPs in the walls, however the *PP*s are larger than 19 years (but within the service life of VIPs). On the other hand, for the scenario excluding the rent revenue reduction, the EPS solutions recover the installation costs within 10 years, while the VIP and VIP+EPS cases required 20 and 14 years, respectively, for recovering the installation cost.

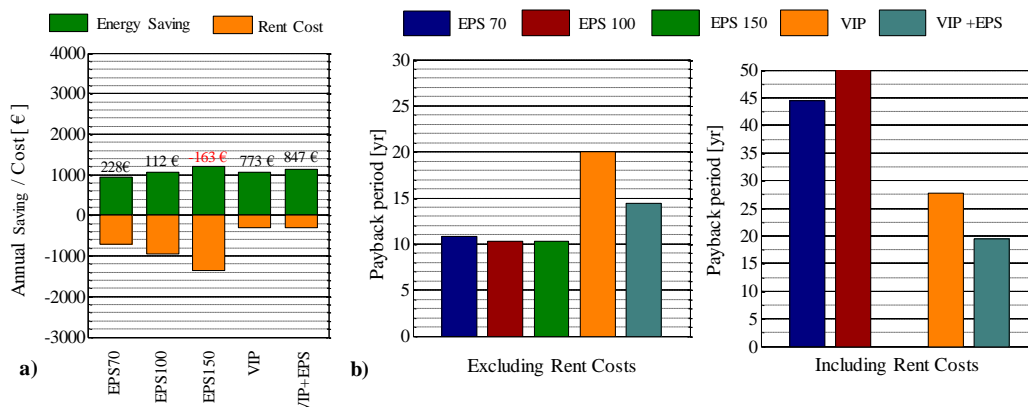


Figure 8.20 – Economic analysis for the examined renovation cases assuming poor-insulated building in the existing case in Stockholm a) Energy saving and rent revenue reduction and b) Payback periods for two scenarios.

8.4 Conclusions

The present chapter discussed the energy and cost effectiveness of VIPs in building applications. Two different building envelopes were examined: the incorporation of VIPs into a lightweight steel-framed (LSF) construction and the renovation of a massive residential building. In the LSF application, the installation of an additional VIP insulation layer is examined as a measure for the reduction of thermal bridges and the upgrade of the total envelope performance. In the massive application, a comparative assessment of five examined renovation cases was carried out focusing on their financial viability. In both cases the impact of VIPs was evaluated in real scale buildings located in cities with different climatic conditions and economic factors.

In the LSF application, the envelope was investigated in the cases both with and without VIP by means of the two numerical techniques described and validated in previous Chapter (Chapter 7): the analysis of the building envelope according to ISO 10211 and the whole building simulation for the calculation of energy demands for heating and cooling. The findings obtained by two techniques were in agreement regarding the improvement of the envelope performance due to the additional VIP layer. According to the first approach, the VIP reduced the overall direct heat transfer coefficient, H_D , by 20%, while the building simulation indicated that the energy demands were reduced by 14% - 16%, depending on the climate conditions. The reduction of energy demands was remarkable in cold conditions (Stockholm) saving 630 kWhr annually. However, the additional VIP insulation was unprofitable, even in the case of Stockholm, requiring more than 50 years for the recovering the installation cost, due to the high cost of VIPs and the well-insulated envelope even in the case without VIPs.

The analysis of the LSF building indicated the significant impact of thermal bridges on such constructions contributing to the H_D by ca. 40% and at to the energy demands by ca. 25%. As it was expected, the repeating thermal bridges caused by the metal structure represented the largest rate. It was found that the presence of VIP on the external walls significantly decreased the linear transmittances of both the repeating and non-repeating thermal bridges leading to a reduction of the contribution of thermal bridges by 4%.

The analysis of the LSF building taking into consideration the additional VIP layer revealed that there were remaining increased thermal bridges. The most crucial thermal bridges were found to be the repeating at the roof and the floor, and the non-repeating at the external wall - ceiling and the external wall - internal wall junctions. Design modifications on the current construction practices were proposed for the further reduction of thermal bridges. The implementation of all design modifications resulted to a further reduction of the energy demands by 15%.

In the massive application, five renovation cases of the opaque envelope were examined using VIP or conventional insulation in different thicknesses. The renovation concerned the application of insulation at the internal side of the walls (as the building was historical) and at the top of the roof. Three cases concerned the installation of an EPS layer with thicknesses 70 mm, 100 mm and 150 mm, respectively and one case concerned the installation of 20 mm thick VIP at the walls and the roof. The fifth case involved the combination of 20 mm thick VIP at the walls and 150 mm thick EPS at the roof. All cases were investigated from the techno-economic point of view for three European cities: Athens, Geneva and Stockholm.

The energy analysis was performed by means of the whole building simulation in EnergyPlus software. It was showed that the renovation reduced the energy consumption for heating and cooling by 66% - 75%, depending on the renovation case and the climate conditions. This high reduction was

caused by the extremely low envelope performance at the existing case, as the initial envelope was a non-insulated traditional masonry (R-value ca. $0.3 \text{ m}^2\text{K/W}$).

The economic analysis of the renovation cases was carried out in terms of the calculation of the annual savings/costs and the time for the recovery of the initial installation cost (payback period). The economic analysis was performed for two scenarios: excluding and including the impact of the rent revenue reduction caused by the reduction of the net floor area, due to the increase of wall thickness after the renovation. It was found that the replacement of EPS with VIPs at the external walls and the roof increased the installation cost by ca 9000 € in all cities, while the combination of VIP at the walls and EPS at the roof (VIP+EPS case) reduced the installation cost by 5000 €. Despite the high installation cost, the use of VIPs at the walls offered the maximum annual profit, owed to the high thermal performance coupled with the low rent revenue reduction.

The comparative assessment between the renovation cases indicated that the use of VIPs with the current prices can be profitable in areas with cold climates and high rental prices. In Athens, the use of conventional insulation with low thickness was the most profitable providing lower payback period, both in the scenario excluding and including the rent revenue reduction. This is caused due to the low energy demands and relatively low rent prices. In Geneva, for the scenario excluding the rent revenue reduction, the use of conventional insulation was the most profitable case, while for the scenario including the house rent the use of VIPs was the most cost-effective solution, due to the high rent prices. In Stockholm, all renovation cases provided the lowest payback period, compared with the other two cities. In this city, the use of VIP at the walls was more cost-effective because offer by far the highest annual profit. Finally, the concept of poor-insulated existing building was investigated providing similar findings regarding the comparative assessment and the identification of the optimum solution.

References

- [1] D.A. Kontogeorgos, I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, M.A. Founti, Numerical investigation of the effect of vacuum insulation panels on the thermal bridges of a lightweight drywall envelope, *Journal of Facade Design and Engineering*, 4 (1-2) (2016) 3-18.
- [2] S. Brunner, T. Stahl, K. Ghazi Wakili, An example of deteriorated vacuum insulation panels in a building façade, *Energy and Buildings*, 54 (2012) 278-282.
- [3] E. Kucukpinar, O. Miesbauer, Y. Carmi, M. Fricke, L. Gullberg, C. Erkey, R. Caps, M. Rochefort, A.G. Moreno, C. Delgado, M. Koehl, P. Holdsworth, K. Noller, Development of Transparent and Opaque Vacuum Insulation Panels for Energy Efficient Buildings, *Energy Procedia*, 78 (2015) 412-417.
- [4] C. Zhai, Z. Li, Y. He, T. Liu, M. Sun, J. Liu, A Comprehensive Study on the Production Process and Properties of Composite Core Materials for Vacuum Insulation Panels for Construction Applications, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [5] P. Johansson, B. Adl-Zarrabi, A. Sasic Kalagasidis, Evaluation of 5 years' performance of VIPs in a retrofitted building façade, *Energy and Buildings*, 130 (Supplement C) (2016) 488-494.
- [6] P. Johansson, S. Geving, C.-E. Hagentoft, B.P. Jelle, E. Rognvik, A.S. Kalagasidis, B. Time, Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations, *Building and Environment*, 79 (2014) 31-45.
- [7] T. Voellinger, A. Bassi, M. Heitel, Facilitating the incorporation of VIP into precast concrete sandwich panels, *Energy and Buildings*, 85 (2014) 666-671.
- [8] C. Martins, P. Santos, L.S. da Silva, Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study, *Journal of Building Physics*, 39 (4) (2015) 342-372.
- [9] P. Johansson, C.-E. Hagentoft, A. Sasic Kalagasidis, Retrofitting of a listed brick and wood building using vacuum insulation panels on the exterior of the facade: Measurements and simulations, *Energy and Buildings*, 73 (2014) 92-104.
- [10] A. Binz, A. Moosmann, G. Steinke, U. Schonhardt, F. Fregnan, H. Simmler, S. Brunner, K. Ghazi, R. Bundi, U. Heinemann, H. Schwab, H. Cauberg, M. Tenpierik, G. Johannesson, T. Thorsell, M. Erb, B. Nussbaumer, IEA/ECBCS Annex 39, Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications (Subtask B), December 2005.
- [11] M. Alam, H. Singh, M.C. Limbachiya, Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions, *Applied Energy*, 88 (11) (2011) 3592-3602.
- [12] M. Alam, H. Singh, S. Suresh, D.A.G. Redpath, Energy and economic analysis of Vacuum Insulation Panels (VIPs) used in non-domestic buildings, *Applied Energy*, 188 (Supplement C) (2017) 1-8.
- [13] ISO 10211:2017, Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.
- [14] ELISSA: Energy Efficient Lightweight Sustainable Safe Steel Construction, FP7-2013-NMP-ENV-EeB, Grant no. 609086, <http://www.elissaproject.eu>.

- [15] H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life, *Energy and Buildings*, 37 (11) (2005) 1122-1131.
- [16] ANSYS CFX®, <https://www.ansys.com>.
- [17] ISO 6946, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method.
- [18] DIN 4108-2:2013, Thermal protection and energy economy in buildings - Part 2: Minimum requirements to thermal insulation.
- [19] ASHRAE Handbook, Fundamentals (SI).
- [20] EnergyPlus, Weather Data, <https://energyplus.net/weather>, 2018.
- [21] Hellenic regulation on the energy performance in the building sector, Hellenic ministry of environment, energy and Climatic change – YPEKA, ministerial decision D6/B/5825 (Official Journal of the Hellenic Republic FEK 407/B/9.4.2010), 2010.
- [22] Eurostat Statistics Explained, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/overview>, 05/2018.
- [23] Global Property Guide, <http://www.globalpropertyguide.com/most-expensive-cities>, 05/2018.
- [24] Trading Economics, <http://www.tradingeconomics.com/country-list/wages>, 05/2018.

CHAPTER 9

CONCLUSIONS – FUTURE WORK

Contents

9.1	Introduction.....	198
9.2	Main conclusions	199
9.3	Thesis innovation	203
9.4	Future research.....	204

Summary

The present chapter summarizes the main conclusions and the original contribution of the thesis, while a framework for future research is proposed. After a short introduction to the topic, the conclusions of this thesis are derived on the basis of the developed methods for the envelope thermal performance assessment and the use of VIPs in building applications. In both fields, the thesis contributed in several innovative aspects. Finally, recommendations and ideas for future study in continuation of this work are suggested.

9.1 Introduction

As the building sector is responsible for the lion's share of the global energy consumption, national and international regulations impose reduction of energy demand. Among others, the reduction of heating and cooling needs, which accounts for the largest share, is both an effective and feasible solution. The energy efficiency of the building envelope, known as envelope thermal performance, is a key factor in the total energy efficiency of the building. In this context, the majority of the current scientific effort regarding the improvement of the envelope efficiency lies on two main areas: (a) the development of new materials or techniques and (b) the development of methods for the evaluation of innovative solutions and the quantitative assessment of new and existing envelopes.

In the first area, one of the most promising innovative high-insulation materials is the Vacuum Insulation Panel (VIP) belonging in the category of Super Insulating Materials. The achieved thermal conductivity of VIP can be $0.004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, resulting an insulation capability 5 – 10 times better than the conventional insulation. VIP, composed of an evacuated open pore core material surrounded by a thin envelope barrier, offers high insulation performance in conjunction with thin walls providing an effective alternative in building applications. However, the still relatively high cost of VIPs, along with the durability of panels, are the main reasons that they have not already gained popularity in the building market.

At the same time, as the current challenges for energy reduction and sustainability in building sector require advanced building envelopes with high thermal performance, the combination of VIPs with lightweight steel-framed (LSF) buildings constitute a complete solution. In doing so, the requirements are fulfilled, achieving easy and fast implementation, architectural flexibility, structural and fire resilience, energy effectiveness and reduction of economic and environmental costs.

In the second area, the fast and accurate calculation of the envelope thermal performance is vital for the evaluation of customary or innovative solutions and the improvement of the existing building envelopes. In this direction, several researchers emphasize on the development of reliable methods for the quantification of the energy efficiency of building envelopes. Despite the fact that the theoretical and numerical calculations are essential to support decision making during the design stage of a building, the results may significantly deteriorate in practice due to material degradation effects, construction irregularities or complex phenomena as multi-dimensional heat and moisture flow. Hence, the development of both experimental and numerical methods for the assessment of envelope is fundamental for the research area of the energy efficiency of buildings.

In this framework, the current PhD thesis deals with the energy efficiency of building envelopes both at the area of the methods for their thermal performance assessment and at the area of innovative materials (VIP). The thesis investigates the experimental and numerical methods for the assessment of the energy efficiency of building envelope, and at the same time, the methods are applied in building applications aiming to the evaluation of VIP as insulation material.

The indicators and the methods for the assessment of the energy efficiency of envelopes were introduced and classified into three scales: panel scale, envelope element scale and whole envelope scale (Chapter 2). It was concluded that the most representative and widely used indicators for the envelope assessment are the thermal resistance (R-value) and the thermal transmittance (U-value). Although both the experimental and theoretical calculation of these indicators provides different benefits, the in-situ measurement of an envelope under real weather conditions offers fundamental information, especially for innovative and under-development solutions. For this reason, the focus was

given on the in-situ assessment of the envelope elements comparing the current available methods (Chapter 4) and introducing new methods for LSF walls (Chapter 5).

The energy efficiency of LSF buildings was investigated both experimentally and numerically. The main challenge regarding the assessment of the envelope performance is the calculation of the contribution of thermal bridges caused by the higher thermal conductivity of metal structure (Chapter 7). As the lightweight constructions are an evolving perspective in the residential sector, the investigation of their energy efficiency and the development of methods for the envelope thermal performance assessment are necessary for their further evolution.

The present thesis focused on the use of Super Insulating Materials in building applications, and particularly the VIPs. The basic properties and the terminology of VIPs are introduced (Chapter 3) indicating the benefits and drawbacks regarding the building applications. Since the last decade, the use of VIPs as building insulation material has shown optimistic results, encouraging the development of new VIP technologies. In each case, the buildings applications are limited and there is a need for reliable in-situ characterization of the thermal behavior of VIPs in real buildings under different climatic conditions. To meet this need, the experimental investigation of two building applications incorporating VIPs in different locations was carried out (Chapter 6) by means of monitoring observations. At the same time, the energy and cost effectiveness of the use of VIPs at building envelopes was numerically investigated for two theoretical buildings (a LSF and a massive) providing a comprehensive approach to the use of VIP in buildings (Chapter 8).

9.2 Main conclusions

The main conclusions of the current thesis are derived from the methods for the envelope thermal performance assessment and the use of VIPs in building applications. The following sections summarize the most significant conclusions.

9.2.1 Methods for the assessment of the energy efficiency of building envelope

The thesis addressed the experimental and numerical methods for the quantitative assessment of the energy efficiency of building envelopes. For the experimental approach, the focus was given to the in-situ R-value and U-value measurement of the central part of existing walls, since the central part of the envelope elements is shown to account for the largest amount on the total envelope efficiency. For the numerical approach, the calculation of thermal bridges in LSF walls and their introduction to whole building simulation model was emphasized.

Comparison of in-situ standardized methods

After an extensive literature review regarding the methods for the in-situ measurement of the thermal resistance (R-value) of a building wall, it was found that the most common methods are the four standardized methods described by the ISO 9869 and ASTM C1155 standards. The methods, Average, Summation, Dynamic and Sum of Least Square (two approaches SLS_HF and SLS_TIN), require the measurement of internal and external surface temperature and internal heat flux. However, two main parameters have been dealt with in practice for the implementation of methods: the required measuring period and the variability of results. The measuring conditions during the test were a crucial parameter affecting these two parameters. A comparative assessment of the standardized methods was carried out in terms of the required measuring period, the variability of results and the effect of the

measuring conditions on these two parameters. The comparison was performed by means of an experimental campaign for the R-value measurement of three existing walls under different measuring conditions. The findings of this comparison provide guidelines for the in-situ R-value measurement, the pre-processing of measurements and the selection of the appropriate method.

The results showed that the simple and most common methods, Average and Summation, require a temperature difference between the indoor and outdoor environments higher than 10°C for reliable results in a short measuring period. The required measuring period of the three more sophisticated methods (Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN) is not affected by the measuring conditions. However, it was found that the Dynamic and SLS_TIN methods require stable direction of heat flow for high repeatability of results, while the SLS_HF provides reliable and fast results regardless of the measuring conditions.

Finally, an additional criterion for the determination of the required measuring period of Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN methods was introduced, as it is not clearly determined by their standards. The criterion imposed a minimum deviation of 3% for the values obtained the last three days and seemed to give reliable results encouraging its future use.

Development of in-situ methods for LSF walls

The literature review also indicated that, despite the high interest in the measurement of the thermal transmittance of LSF walls, including the effect of thermal bridges due to metal structure ($U_{overall}$), a method for the in-situ measurement of $U_{overall}$ in real buildings was missing. In this context, the present thesis filled this gap introducing two new methods for the in-situ measurement of the $U_{overall}$. The proposed methods, the *Representative Points Method* (RPM) and the *Weighted Area Method* (WAM), were extensively described and analyzed, providing the requirements and the accuracy of methods. The methods can be applied in cold and hybrid frame LSF walls, combining infrared thermography with the recording and processing of indoor/outdoor air temperatures and heat flux measurements. The infrared thermography is used for the calculation of the temperature profile, illustrating the surface temperature disturbance at the internal surfaced caused by the presence of metal studs.

The two methods were validated in a well-known cold frame LSF wall and the measured $U_{overall}$ results were compared with the theoretical values obtained according to ISO 10211. The results of two proposed methods were in a good agreement with the theoretical values providing high repeatability. Several factors affect the accuracy of both methods, among others the variation of the internal heat transfer coefficient during the measurements is a non-negligible uncertainty source.

The proposed methods could be useful tools for the introduction of standardized methods for the in-situ measurement of the U-value at lightweight envelopes. Moreover, both methods can be used for the post-evaluation of existing lightweight buildings in order to assess the thermal performance of the envelope.

Numerical methods for thermal bridges

The thesis addressed the issue of thermal bridges and the calculation of their contribution to the energy efficiency of the entire envelope. As the thesis specializes on LSF buildings, where the calculation of thermal bridges is vital, the investigation was performed for two LSF buildings (a mock-up building and a theoretical real scale). For this reason, all thermal bridges of the buildings (repeating by metal structure, linear and point non-repeating thermal bridges) were simulated and calculated according to the most accurate method, described by the ISO 10211 standard. The thermal performance

of two envelopes was numerically investigated by means of two approaches: (a) the calculation of the envelope heat transfer coefficient, H_D and (b) the calculation of the energy demands for heating and cooling by means of the whole building simulation software (EnergyPlus). In the latter approach the impact of thermal bridges was introduced modifying the material thermal properties with equivalent values. Both approaches were applied and validated for a lightweight steel-framed building incorporating VIPs, constructed and monitored in the frame of the current thesis.

The numerical analysis showed that both approaches revealed the importance of thermal bridges in such constructions. The findings of the two techniques were similar and the differences were due to the simplicity of the H_D approach, excluding solar gains, infiltration rates, ground effect, etc. The results obtained by the EnergyPlus model were in line with the available measurements of indoor temperature and total energy consumption indicating that the calculation and the introduction of thermal bridges into the model by means of the modification of thermal properties was accurate.

9.2.2 Investigation of VIPs as building insulation

The thermal behavior of VIPs as building material was investigated applying not only the previous proposed or analyzed methods but also several widely used techniques. The main conclusions are summarized in the following paragraphs.

Edge effect of VIPs

The higher thermal conductivity of envelope barrier of the VIP, which surrounds the core material, introduces a thermal bridge, the edge effect. As a result, the edge effect influences the thermal performance of VIPs defined by the effective thermal conductivity, λ_{eff} .

It was proved that the impact of the edge effect is a non-negligible factor for the building envelope thermal performance. From the experimental point of view, the λ_{eff} was measured by means of the widely used Guarded Hot Plate method. It was found that the edge effect increased the thermal conductivity of VIPs more than 20%, depending on the envelope barrier properties and the panel dimensions since for small panels this increase might exceed 50%. From the numerical point of view, it was revealed that the edge effect contributed to the total heat transfer coefficient and the annual energy demands by 2%. To minimize this contribution, the VIPs manufacturers provide the optimum pattern that uses as possible large size panels.

Installation of VIPs

In the frame of the current thesis, VIPs were installed in two small scale “mock-up” LSF building envelopes: a) for the renovation of the external thermal insulation composite system (ETICS) placed on a wall of a two-story building in Athens and b) for the construction of a building in Switzerland. Also, two different VIPs applications were examined, since in the first building the VIP was integrated with two layers of mineral wool (encapsulated or sandwich VIP) resulting to a composite insulation component (CIC), while in the second building, different sizes of VIPs were used creating an intermediate layer of the walls.

The installation method was also different for the two applications. In the case of CIC panels, the “wet method” was employed (bonding mortar) along with the use of dowels. For the penetration of panels, two EPS holes were integrated to the VIP introducing thermal bridges and further increasing the λ_{eff} of VIPs by 26%. As the panels were one-sized, it was not possible to covered the whole wall

surface, remaining a large uncovered (by CIC panels) area which was filled with conventional insulation. In the case of the different sizes of VIPs in Swiss application, the VIPs were installed by means of the “dry method” (bonding tape). Even if a dedicated software tool was used for the optimum coverage of the walls by different sizes of VIPs, a small uncovered area at the lateral sides was created. Moreover, despite of the efforts to perform a proper installation, finally some panels were damaged. On the other hand, there was not any damage CIC panel in the first application, proving that the mineral wool layers served a significant protective role for the incorporated VIPs.

Overall, some weaknesses and barriers to overcome were brought into light adding to the ever-increasing experience for making the VIPs an effective solution for the insulation of buildings. As the VIP is a fragile material with impossible on-site adaptation, it was found that the appropriate design and installation of VIPs at the walls is vital for their successful application. The handling of VIP is essential and should be performed by experienced and well-trained persons. Damaged panels or uncovered areas were proved to introduce large thermal bridges, weakening the thermal performance of the envelope and increasing the risk of moisture problems. However, the application of VIPs in prefabricated envelopes, under automated and controlled factory environment would make it possible to eliminate these issues concerning the appropriate handling, the transportation and installation of VIPs.

Hygrothermal performance

The hygrothermal performance of the VIPs incorporated at the building envelopes was investigated by means of monitoring measurements at the two examined buildings. The presence of VIP at the external walls acted as a barrier to the moisture transfer due to the envelope barrier of the VIP which protects the evacuated core material from permeance of air and water vapor.

On the other hand, the different installation method led to different conclusions regarding the hygrothermal performance of the wall. In the case of the CIC panels and the “wet method”, the initial moisture due to the installation was partly removed during the summer. However, the low temperatures of the following winter created re-condensation at the surfaces of VIPs. On the other hand, the case with the “dry method”, an absence of condensation was observed at the VIP surfaces. However, a critical role plays the position of the VIPs into the wall, since at the first application the VIPs were at the external side, while at the second application at the internal side of the wall. For this reason, further investigation for the hygrothermal performance is necessary.

Upgrade of the energy efficiency of building envelope

The implementation of VIPs into the building envelope led to enhancement of the thermal performance due to their extremely low thermal conductivity. The impact of the VIP on the envelope energy efficiency was investigated for the two above mentioned building applications. At the renovation case, the thermal resistance of the wall with encapsulated VIPs (CIC panels) was increased by 123% compared with the initial wall with conventional insulation. At the second case, the presence of VIPs improved the thermal performance of the walls by 52%.

The current thesis examined the application of VIPs in LSF buildings, where the contribution of thermal bridges is fundamental to the envelope thermal performance (ca. 25% in energy demands). It was proved that the VIP efficiently reduced all thermal bridges not only in the element scale but also in the whole envelope scale. Particularly, the linear thermal transmittance (Ψ -value) of the significant repeating thermal bridges at the central part of the walls due to the presence of metal studs was

diminished by 70%. The presence of VIP also reduced the geometrical (non-repeating) linear and point thermal bridges, reducing their contribution to the overall envelope performance. The positive effect of VIPs in thermal bridges affected the hygrothermal issues of thermal bridges eliminating the possibility of condensation risk and mold growth. Overall, in this study, the use of VIPs as insulation in lightweight buildings was revealed as an attractive solution to the problem of low thermal performance associated with the steel frame of such constructions.

For the further reduction of the most crucial thermal bridges, the thesis proposed design modifications on the current construction practices. The implementation of these modifications can improve the envelope performance by 22%, however the optimum solutions should be selected by techno-economic analysis.

Energy and cost effectiveness

The impact of VIPs on energy demands for heating and cooling was investigated for both lightweight and massive constructions. It was found that the presence of 20 mm thick VIP at an a priori well insulated lightweight wall (U-value without VIP 0.25 W/(m²K)) is responsible for the reduction of energy demands by ca. 15%. On the other hand, the same thickness of VIP layer at a poor-insulated wall (U-value 0.70 W/(m²K)) led to a 41% energy saving and at a non-insulated wall (U-value 2.5 W/(m²K)) led to 72% energy saving. The percentage of the reduction of energy demands was almost independent of the climate conditions, however, in all cases, this energy saving was significant and remarkable for cold climates.

The assessment of the VIP application from the cost effectiveness point of view depends on several factors such as the price of VIPs, the climate conditions, the building operation, etc. The high cost of VIP compared with the conventional insulation make their use doubtful. However, the techno-economic analysis showed that the use of VIPs, with the current prices, can be an ideal solution if the economic value of the potential space savings due to thinner walls was taken into consideration. In this case, the use of VIPs is the optimum solution for the cities of the Central and North Europe with high rental prices. However, the development of new VIP technologies is expected to reduce their prices, which means that the use of VIPs in building will be more cost and energy effective.

9.3 Thesis innovation

The investigated aspects of the present thesis considered as innovative are summarized below:

- Comparison of all standardized methods for the in-situ R-value measurements and introduction of an additional criterion for the required measuring period of three methods (Dynamic, SLS_HF and SLS_TIN).
- Introduction for the first time of two methods for the in-situ measurement of the U-value at lightweight steel-framed walls including the effect of thermal bridges due to metal structure.
- Construction and monitoring of real buildings incorporating VIPs.
- Construction and investigation of the first building application of VIP in Greece.
- Experimental and numerical investigation of construction inaccuracies in real building.
- Comparative assessment of the VIPs application methods (wet and dry) in terms of the in-situ hygrothermal performance under real climate conditions.

- Propose of design modifications on the current practice for the reduction of thermal bridges in LSF modules.

9.4 Future research

In this thesis, the investigation of the energy efficiency of the building envelope was carried out developing new or applying widely used methods, while at the same time addressing the use of VIP as building insulation. After the discussion of the main conclusions at the above sections, the present thesis lays the ground for the new research. The following list summarizes the research topic could form the basis of such a potential future research:

- In the current thesis, the four standardized methods for the in-situ R-value measurement of existing homogenous wall were compared in terms of the impact of measuring condition on the required measuring period and the repeatability. A further evaluation of these methods regarding the insulation level or the thermal mass of the wall is proposed. Moreover, a comparative assessment of the in-situ methods for the thermal performance measurement of openings (U-value and g-value) is also recommended.
- In the frame of the present thesis, the first methods for the in-situ measurement of the thermal transmittance in lightweight steel-framed (LSF) walls were introduced (Weighted Area Method – WAM and Representative Points Method – RPM). Despite their validation and their theoretical analysis, presented in the Chapter 5, further investigation of these methods is needed in order to provide possible difficulties, limitations and accuracy issues. The analysis could include the response of methods regarding different wall configurations, measuring conditions, etc. Moreover, the application of two methods in hybrid frame LSF walls was validated only theoretically. Hence, an experimental validation of these method to such construction is also suggested.
- The aim of the thesis was the investigation of VIP in the energy efficiency of building envelopes. The essential issues, as the durability of panels and the reduction of their thermal performance through time, were not experimentally addressed. It is recommended the analysis of aging effect under real climate conditions. To extend this issue, the aging effect is suggested to be introduced in building simulation models (such as EnergyPlus) for the numerical examination under different climate conditions.
- As the VIP is still an innovative and under-development material, the development of new alternative core materials and envelope barriers are essential for its establishment as a reliable building material. At the same time, the improvement of VIP production technologies reducing the costs is vital to gain the popularity in building market.
- The monitoring observations of the two buildings incorporating VIPs showed a difference hygrothermal behavior of the examined envelopes regarding the installation method (“wet” or “dry”) in line with literature. As the topic of present thesis was the energy efficiency of the envelope, further investigation is needed for the actual hygrothermal performance of VIP. It is also recommended the numerical approach of these issue by means of simulation tools such as WUFI, as well as the hygrothermal impact of VIP on the thermal bridges of LSF walls.
- In the Chapter 8, the thesis proposed some design modifications for the reduction of thermal bridges in LSF modular envelopes. It is suggested an extensive techno-economic assessment of all measures (including other measures from the literature) for the selection of the optimum solution.

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή	212
1.1 Ενεργειακή κατανάλωση στην κτιριακό τομέα.....	212
1.2 Διεθνής και εθνικοί κανονισμοί	213
1.3 Νέες τάσεις για προχωρημένα κτιριακά κελύφη.....	214
1.3.1 Αναβάθμιση υφιστάμενου κελύφους με στόχο τη δημιουργία κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας.....	214
1.3.2 Ελαφρά κτίρια χαλύβδινου σκελετού - LSF.....	214
1.3.3 Προκατασκευασμένα κελύφη.....	215
1.3.4 Καινοτόμα μονωτικά υλικά.....	216
1.4 Στόχος και διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής.....	219
Κεφάλαιο 2^ο - Ενεργειακή αξιολόγηση κτιριακού κελύφους	222
2.1 Εισαγωγή.....	222
2.2 Κτιριακό κέλυφος.....	222
2.3 Θερμογέφυρες.....	222
2.4 Δείκτες για την ενεργειακή αξιολόγηση κτιριακού κελύφους	223
2.4.1 Κλίμακα πάνελ	224
2.4.2 Κλίμακα στοιχείου κελύφους.....	225
2.4.3 Κλίμακα ολόκληρου κελύφους	228
2.5 Κατηγοριοποίηση των μεθόδων ενεργειακής αξιολόγησης κελύφους	229
2.6 Συμπεράσματα	230
Κεφάλαιο 3^ο – Μονωτικές Σανίδες Κενού (Vacuum Insulation Panels – VIPs).....	231
3.1 Εισαγωγή.....	231
3.2 Βασικές Ιδιότητες.....	231
3.2.1 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας στο VIP	233
3.2.2 Γήρανση και διάρκεια ζωής.....	234
3.2.3 Άλλες ιδιότητες	235
3.3 Επίδραση των ακμών	235
3.4 Μέθοδοι αξιολόγησης θερμικής απόδοσης των VIPs.....	237
3.4.1 Πειραματικές μέθοδοι.....	237
3.4.1 Υπολογιστικές μέθοδοι.....	238
3.5 Εφαρμογές σε κτίρια	238
3.5.1 Μεταχείριση των VIPs	238
3.5.2 Εφαρμογές σε νέα και υφιστάμενα κτίρια.....	239
3.5.3 Οικονομική ανάλυση.....	239

3.6	Συμπεράσματα	239
Κεφάλαιο 4^ο – Πειραματική αξιολόγηση των προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση θερμικής αντίστασης τοιχοποιίας..... 240		
4.1	Εισαγωγή.....	240
4.2	Τρέχουσα κατάσταση για την επιτόπια μέτρηση θερμικής απόδοσης τοιχοποιίας... 240	
4.2.1	Ομογενείς τοιχοποιίες.....	241
4.2.2	Μη ομογενείς τοιχοποιίες.....	242
4.3	Προτυποποιημένες μέθοδοι για την επιτόπια μέτρηση θερμικής αντίστασης	242
4.4	Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων για την εφαρμογή των μεθόδων	244
4.5	Παράμετροι σύγκρισης των προτυποποιημένων μεθόδων.....	245
4.6	Πειραματική διάταξη	246
4.6.1	Περιγραφή τοιχοποιιών	246
4.6.2	Μετρητική διάταξη.....	246
4.6.3	Μετρητικές συνθήκες.....	247
4.7	Αποτελέσματα.....	248
4.7.1	Υπολογισμός απαιτούμενης διάρκειας μέτρησης.....	248
4.7.2	Υπολογισμός μεταβλητότητας	250
4.8	Συμπεράσματα	251
Κεφάλαιο 5^ο – Εισαγωγή δύο μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση ολικής θερμικής διαπερατότητας σε ελαφρές τοιχοποιίες χαλύβδινου σκελετού..... 253		
5.1	Εισαγωγή.....	253
5.2	Προτεινόμενες μέθοδοι	254
5.2.1	Θερμογραφία και υπολογισμός θερμοκρασιακού προφίλ.....	254
5.2.2	Μέθοδος των Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Point Method – RPM).....	255
5.2.3	Μέθοδος Σταθμισμένης Περιοχής (Weighted Area Method – WAM)	257
5.3	Θεωρητική επικύρωση των μεθόδων	258
5.3.1	Θεωρητική εφαρμογή των μεθόδων.....	258
5.3.2	Εκτίμηση αβεβαιότητας.....	260
5.4	Πειραματική επικύρωση των μεθόδων	260
5.4.1	Η εξεταζόμενη τοιχοποιία και ο μετρητικός εξοπλισμός.....	260
5.4.2	Υπολογισμός θεωρητικού $U_{overall}$	261
5.4.3	Εφαρμογή των μεθόδων	261
5.5	Συμπεράσματα	264
Κεφάλαιο 6^ο – Πειραματική διερεύνηση δύο κτιριακών κελυφών που περιλαμβάνουν VIPs		
265		
6.1	Εισαγωγή.....	265

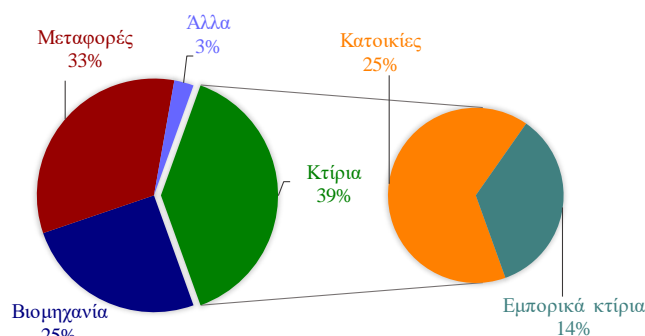
6.2	Αναβάθμιση μιας εξωτερικής τοιχοποιίας με τη χρήση VIPs – Η πρώτη εφαρμογή VIP στην Ελλάδα	266
6.2.1	Κατασκευή του κτιρίου	266
6.2.2	Ιδιότητες υλικών	268
6.2.3	Μετρητικός εξοπλισμός.....	270
6.2.4	Αξιολόγηση θερμικής απόδοσης τοιχοποιίας.....	270
6.2.5	Αξιολόγηση υγροθερμικής απόδοσης τοιχοποιίας	272
6.3	Ελαφρός πειραματικό οικίσκος στην Ελβετία	273
6.3.1	Κατασκευή του κτιρίου	273
6.3.2	Ιδιότητες υλικών.....	276
6.3.3	Μετρητική διάταξη.....	277
6.3.4	Θερμική αξιολόγηση κελύφους.....	278
6.3.5	Υγροθερμική αξιολόγηση κελύφους	283
6.4	Συμπεράσματα	283
Κεφάλαιο 7^ο – Υπολογιστικές τεχνικές για την αξιολόγηση ελαφρών κελυφών με VIPs και η επικύρωσή τους.....		285
7.1	Εισαγωγή.....	285
7.2	Ανάλυση του κελύφους σύμφωνα με το πρότυπο ISO	286
7.2.1	Υπολογισμός θερμογεφυρών.....	286
7.2.2	Υπολογισμός του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας ολόκληρου του κελύφους.....	288
7.3	Προσομοίωση του κτιρίου και εισαγωγή θερμογεφυρών στο μοντέλο EnergyPlus .	288
7.4	Εφαρμογή των υπολογιστικών τεχνικών σε πειραματικό οικίσκο.....	289
7.4.1	Ανάλυση του οικίσκου σύμφωνα με το ISO	290
7.4.2	Προσομοίωση του πειραματικού οικίσκου	292
7.5	Συμπεράσματα	295
Κεφάλαιο 8^ο – Επίδραση του VIP στην ενεργειακή και οικονομική απόδοση των κτιριακών κελυφών.....		296
8.1	Εισαγωγή.....	296
8.2	Εγκατάσταση VIP για τη μείωση των θερμογεφυρών σε ελαφρύ κέλυφος χαλύβδινου σκελετού	297
8.2.1	Περιγραφή του κτιρίου.....	297
8.2.2	Ανάλυση του κτιριακού κελύφους	299
8.2.3	Προσομοίωση ολόκληρου του κελύφους.....	304
8.2.4	Σχεδιαστικές τροποποιήσεις για περεταίρω βελτίωση του κελύφους	305
8.3	Συγκριτική τεχνο-οικονομική αξιολόγηση μεταξύ συμβατικών μονωτικών και VIP για την αναβάθμιση κτιριακού κελύφους	307
8.3.1	Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης	307

8.3.2	Ενεργειακή ανάλυση	309
8.3.3	Οικονομική ανάλυση.....	310
8.4	Συμπεράσματα	314
Κεφάλαιο 9^ο – Συμπεράσματα.....		316
9.1	Εισαγωγή.....	316
9.2	Συμπεράσματα	317
9.2.1	Μέθοδοι για την ενεργειακή αξιολόγηση του κελύφους.....	317
9.2.2	Διερεύνηση του VIP ως μονωτικού υλικού στα κτίρια.....	319
9.3	Στοιχεία καινοτομίας.....	321
9.4	Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	321
Βιβλιογραφία Ελληνικής Περίληψης		323

Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακή κατανάλωση στην κτιριακό τομέα

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα στις μέρες μας είναι το Ενεργειακό πρόβλημα. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων, η παραγωγή και η τιμή της ενέργειας είναι μερικά από τα πιο σημαντικά ζητήματα που αφορούν με σοβαρές οικονομικές, κοινωνικές και πολιτικές συνέπειες. Ωστόσο, η πιο σημαντική συνέπεια του ενεργειακού προβλήματος είναι η κλιματική αλλαγή με σημαντικές συνέπειες στην οικονομία, την κοινωνία και την πολιτική. Ωστόσο το μεγαλύτερο επακόλουθο του ενεργειακού προβλήματος είναι οι περιβαλλοντικές συνέπειες και η κλιματική αλλαγή. Η συνεχόμενη αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης είναι η κύρια ανησυχία που πρέπει να αντιμετωπιστεί τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις κύριους τομείς: τον κτιριακό, τη βιομηχανία και τις μεταφορές. Σήμερα, ο κτιριακός τομέας κατέχει τη μερίδα του λέοντος, καθώς καταναλώνει περισσότερο από το ένα τρίτο της παγκόσμιας ενέργειας (Εικόνα 1). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα κτίρια είναι υπεύθυνα για το 39% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης και για το 36% των συνολικών εκπομπών CO₂ [1, 2]. Συγκεκριμένα, οι κατοικίες καταναλώνουν το 25%, ενώ τα εμπορικά κτίρια (κτίρια γραφείων, νοσοκομεία, σχολεία, ξενοδοχεία κλπ.) το 14% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας στην Ευρώπη.



Εικόνα 1 – Η ενεργειακή κατανάλωση στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2015 [2].

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την μείωση των αρνητικών επιπτώσεων του ενεργειακού προβλήματος είναι η εξοικονόμηση ενέργειας σε όλους τους τομείς. Ιδιαίτερα, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα είναι όχι μόνο μια αποδοτική αλλά και εφικτή λύση. Μεταξύ άλλων, το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας που καταναλώνεται οφείλεται στη θέρμανση και στη ψύξη για την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης. Η ενέργεια για τις ανάγκες θέρμανσης/ψύξης εξαρτάται από τον τύπο του κτιρίου, τα υλικά, τον αριθμό και τον τύπο των ανοιγμάτων (παράθυρα, πόρτες, κλπ.), τις κλιματικές συνθήκες, την αποτελεσματικότητα των συστημάτων θέρμανσης, κλπ. Ο πιο σημαντικός τρόπος για τη μείωση των ενεργειακών αναγκών θέρμανσης/ψύξης είναι η βελτίωση της θερμικής απόδοσης των κτιρίων. Ο όρος «θερμική απόδοση» αναφέρεται στο πόσο καλά ανταποκρίνεται το κτίριο στις αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος προκειμένου να διατηρηθεί το εσωτερικό περιβάλλον σε συνθήκες θερμικής άνεσης [3]. Η πιο κρίσιμη παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της θερμικής απόδοσης του κτιρίου είναι το «κτιριακό κελύφος» [4], δηλαδή το φυσικό όριο μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος (η εξωτερική τοιχοποιία, η οροφή, το

δάπεδο, τα παράθυρα κ.λπ.). Η αναβάθμιση του κελύφους βελτιώνει τη θερμική απόδοση του κτιρίου με αποτέλεσμα σημαντική μείωση στις συνολικές ενεργειακές ανάγκες.

Ο πιο αποδοτικός τρόπος για την αναβάθμιση και τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κτιριακού κελύφους είναι η χρήση μονωτικών (ή θερμομονωτικών) υλικών. Αν και ο όρος μόνωση στον κτιριακό τομέα χρησιμοποιείται για διάφορους λόγους (ακουστική, πυροπροστασία κλπ.), στην παρούσα διατριβή ο όρος «μόνωση» αναφέρεται μόνο στην θερμομόνωση. Η τοποθέτηση της μόνωσης στο κέλυφος οδηγεί σε σημαντική μείωση των απαιτήσεων ενέργειας για τις ανάγκες θέρμανσης/ψύξης. Η αγωγιμότητα είναι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας ο οποίος μειώνεται εξαιτίας της μόνωσης. Η ιδιότητα για την αξιολόγηση της θερμομονωτικής απόδοσης των υλικών είναι η θερμική αγωγιμότητα, λ (ή k), ποσοτικοποιώντας την ικανότητα ενός υλικού να άγει τη θερμότητα. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμική αγωγιμότητα, τόσο καλύτερη είναι μονωτική ικανότητα του υλικού. Αντίστοιχα, η ικανότητα μόνωσης ενός κτιριακού κελύφους χαρακτηρίζεται από τη θερμική αντίσταση (R-value) ή τη θερμική διαπερατότητα (U-value) και εξαρτάται όχι μόνο από τη θερμική αγωγιμότητα των ενσωματωμένων υλικών αλλά και από τα πάχη τους.

1.2 Διεθνής και εθνικοί κανονισμοί

Στα πλαίσια της διαφαινόμενης υπερθέρμανσης του πλανήτη και της εξαιρετικά πιθανής αιτίας του ανθρώπινου παράγοντα στις εκπομπές CO₂, μια διεθνής συνθήκη, το Πρωτόκολλο του Κιότο, υπογράφηκε το 1997 με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η ΕΕ συμμορφωμένη με τη συνθήκη έχει θέσει τόσο μακροπρόθεσμους όσο και βραχυπρόθεσμους στόχους. Για την επίτευξη των στόχων, η ΕΕ θέσπισε δύο οδηγίες για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα: την οδηγία για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD 2002/91/EU με αναδιατύπωση EPBD 2010/31/EU) [5, 6] και την οδηγία ενεργειακής απόδοσης (Energy Efficiency Directive - EED – 2012/27/EU) [7]. Σκοπός του EPBD είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματικές συνθήκες και τις απαιτήσεις θερμικής άνεσης. Η οδηγία EPBD ενσωματώνει εθνικούς νόμους και κανονισμούς για τον καθορισμό των ελάχιστων απαιτήσεων σχετικά με την ενεργειακή απόδοση νέων και υφιστάμενων κτιρίων. Επιπλέον, το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης - ΠΕΑ (Energy Performance Certificate - EPC) εισάγεται στην παρούσα οδηγία ως το πρώτο βήμα για να αποκτηθεί μια εικόνα σχετικά με την ενεργειακή αποτίμηση των υφιστάμενων κτιρίων με στόχο την βελτίωσή τους. Η EED οδηγία θεσπίζει κοινά πλαίσια για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας κατά 20% μέχρι το 2020 και την περαιτέρω βελτίωσή τους.

Στην Ελλάδα, οι πρώτοι κανονισμοί σχετικά με τον ενεργειακό σχεδιασμό των κτιρίων θεσπίστηκαν το 1979 (ΦΕΚ 362/4.7.1979), πολύ πριν τις Ευρωπαϊκές οδηγίες [8]. Με την θέσπιση της EPBD ορίστηκαν εθνικοί στόχοι σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων εισάγοντας το 2010 τον εθνικό κανονισμό ΚΕΝΑΚ (Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων) [9]. Ο ΚΕΝΑΚ θέσπισε αυστηρότερους κανονισμούς σχετικά με τη θερμομόνωση του κτιρίου και πιο αποδοτικά συστήματα για θέρμανση, εξαερισμό και κλιματισμό. Ο ΚΕΝΑΚ περιγράφει τη γενική μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων βάσει του προτύπου EN 13790-2008 [10]. Μεταξύ άλλων, ορίστηκαν περιορισμοί για τις υψηλότερες τιμές της θερμικής διαπερατότητας (U-value) αντικαθιστώντας τον προηγούμενο κανονισμό του 1979. Οι νέες τιμές U-value μειώθηκαν κατά 14% - 43% ανάλογα με την τοποθεσία του κτιρίου. Στην ίδια γραμμή, το ΠΕΑ είναι υποχρεωτικό για όλα τα κτίρια που πρόκειται να πωληθούν και για τα υφιστάμενα κτίρια που πρόκειται να ενοικιαστούν για πρώτη φορά σε νέο μισθωτή με ισχύ 10 έτη.

1.3 Νέες τάσεις για προχωρημένα κτιριακά κελύφη

Ο κτιριακός τομέας έχει προσαρμοστεί σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, τόσο όσον αφορά την αναβάθμιση των υφιστάμενων κτιρίων όσο και την κατασκευή νέων κτιρίων. Ως εκ τούτου, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν εισαχθεί νέες τάσεις με σκοπό την δημιουργία προχωρημένων κελυφών μέσω της χρήσης καινοτόμων και αποδοτικότερων υλικών, οικονομικά αποτελεσματικών τεχνικών και πρακτικών υψηλής περιβαλλοντικής επίδοσης.

1.3.1 Αναβάθμιση υφιστάμενου κελύφους με στόχο τη δημιουργία κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας

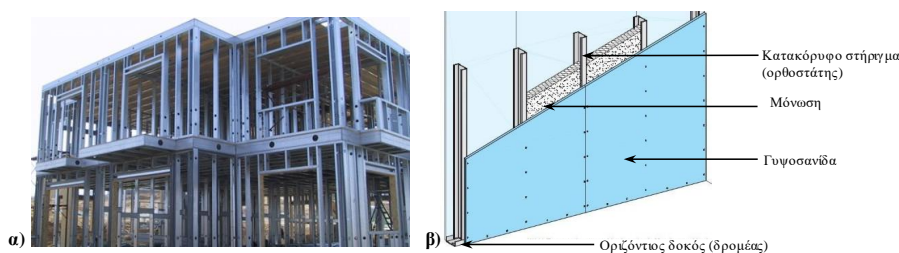
Τα νέα κτίρια σχεδιάζονται σύμφωνα με τους εθνικούς κανονισμούς ώστε να πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ενεργειακή τους απόδοση. Από την άλλη πλευρά, τα υφιστάμενα κτίρια αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος του κτιριακού αποθέματος, καθώς περίπου το 40% των κτιρίων της ΕΕ έχουν χτιστεί πριν από το 1960 και το 90% πριν από το 1990 [11, 12]. Συνεπώς για την επίτευξη των στόχων και τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης είναι επιτακτική ανάγκη η αναβάθμιση των κελυφών στα υφιστάμενα κτίρια.

Η αναβάθμιση ενός κτιρίου μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, όπως η αναβάθμιση του κελύφους, ο εκσυγχρονισμός των ενεργειακών συστημάτων για θέρμανση/ψύξη και ζεστό νερό χρήσης, ο εκσυγχρονισμός των ηλεκτρικών συσκευών κλπ. Ο βέλτιστος σχεδιασμός εξαρτάται από τη λειτουργία και τον τύπο του κτιρίου, τις κλιματικές συνθήκες κλπ. [13]. Όμως, ο πιο αποδοτικός τρόπος για την αναβάθμιση ενός παλιού και υφιστάμενου κτιρίου είναι η τοποθέτηση μόνωσης και σύγχρονων παραθύρων [14, 15].

Μετά την θέσπιση των οδηγιών EPBD και EED, απαιτείται η ριζική αναβάθμιση πολλών υφιστάμενων κτιρίων με σκοπό τη δημιουργία σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης κτίρια (nearly Zero Energy Building –nZEB). Το nZEB είναι ένα κτίριο όπου οι ελάχιστες ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [5]. Παρά το γεγονός ότι η δημιουργία nZEB είναι ένας μελλοντικός παγκόσμιος στόχος, μέχρι τώρα δεν υπάρχει κάποιος κοινά αποδεκτός ορισμός [16]. Η ριζική αναβάθμιση των υφιστάμενων κτιρίων σκοπεύοντας το nZEB είναι μια οικονομικά βιώσιμη εκδοχή αποφέροντας περίοδο αποπληρωμής μικρότερη των 10 ετών [17].

1.3.2 Ελαφρά κτίρια χαλύβδινου σκελετού - LSF

Η σύγχρονη τάση στον κτιριακό τομέα απαιτεί ολοκληρωμένες τεχνικές που πληρούν πολυάριθμες απαιτήσεις όσον αφορά το περιβάλλον, την υγεία, την άνεση, την ασφάλεια (αντισεισμικότητα και πυρασφάλεια) χωρίς να παραμελούν τις οικονομικές πτυχές. Στο πλαίσιο αυτό, τα ελαφρά κτίρια χαλύβδινου σκελετού (Lightweight Steel-Framed - LSF) πληρούν αυτές τις απαιτήσεις και αποτελούν μια ελκυστική λύση ανταποκρινόμενη στις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις [18]. Τα LSF κτίρια στηρίζονται σε ένα μεταλλικό «σκελετό» με επαναλαμβανόμενα κατακόρυφα χαλύβδινα στηρίγματα, τους ορθοστάτες και οριζόντιους δοκούς, τους δρομείς (Εικόνα 2). Οι LSF κατασκευές ενσωματώνουν με υλικά ξηράς δόμησης, όπως γυψοσανίδες, τσιμεντοσανίδες κλπ. (Εικόνα 2β).



Εικόνα 2 – Ελαφρά κελύφη: α) μια όψη ενός μεταλλικού σκελετού στην Κύπρο [19] και β) διαστρωμάτωση των υλικών σε μια τοιχοποιία ξηράς δόμησης [18].

Σήμερα, η ανάπτυξη βελτιωμένων υλικών και δυνατοτήτων σχεδιασμού έχει επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής αυτών των κατασκευών [20]. Η αύξηση της δημοτικότητάς τους οφείλεται κυρίως στην μείωση του κόστους, καθώς και ο συνδυασμός των LSF με την ανάπτυξη νέων υλικών ξηράς δόμησης αποφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε όλους τους τομείς. Πιο συγκεκριμένα, τα LSF κτίρια προσφέρουν οφέλη στον περιβαλλοντικό τομέα, αναβαθμίζουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, χρησιμοποιούν ανακυκλώσιμα υλικά και μειώνουν τα απόβλητα και τις εκπομπές ρύπων. Επίσης παρέχεται αυξημένη σεισμική αντίσταση και πυροπροστασία, προσφέροντας πλεονεκτήματα στην ασφάλεια της κατασκευής. Τέλος, οι κατασκευές αυτές μειώνουν τα προβλήματα υγρασίας και προσφέρουν επιπλέον ηχομόνωση, παρέχοντας ένα υγιεινό και άνετο εσωτερικό περιβάλλον [3, 18, 21, 22].

Το κύριο μειονέκτημα των LSF κατασκευών όσον αφορά τη θερμική τους συμπεριφορά είναι η επίδραση του μεταλλικού σκελετού εξαιτίας της υψηλής θερμική αγωγιμότητας του χάλυβα. Η σημαντική διαφορά μεταξύ της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα και των υλικών ξηράς δόμησης δημιουργεί περιοχές με πολυδιάστατη μεταφορά θερμότητας, που ονομάζονται «θερμογέφυρες». Η παρουσία των μεταλλικών στηριγμάτων αυξάνει τη θερμική διαπερατότητα του τοίχου έως και 74% [21]. Μία από τις κύριες προκλήσεις όσο αφορά τη θερμική απόδοση αυτών των κτιρίων είναι ο περιορισμός των επιπτώσεων των θερμογεφυρών.

1.3.3 Προκατασκευασμένα κελύφη

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η κτιριακή βιομηχανία έχει στρέψει την προσοχή της στην εκβιομηχανοποίηση των κτιρίων. Η προκατασκευασμένη δόμηση αποτελεί μια καινοτόμα κατασκευαστική λύση όπου οι διαδικασίες σχεδιασμού, κατασκευής και συναρμολόγησης των στοιχείων του κελύφους πραγματοποιούνται σε βιομηχανικό περιβάλλον πριν από την τελική τους εγκατάσταση (Εικόνα 3) [23]. Τα προκατασκευασμένα κελύφη έχουν γίνει ολοένα και πιο διαδεδομένα στον κατασκευαστικό κλάδο προσφέροντας μια βιώσιμη λύση στην κατασκευή των κτιρίων [24]. Οι προπαρασκευαστικές εργασίες αφορούν το πρώτο επίπεδο εκβιομηχανοποίησης, το οποίο ακολουθείται από τη χρήση μηχανημάτων, την αυτοματοποίηση και τη ρομποτική στον κτιριακό τομέα [25]. Η βασική ιδέα για την εφαρμογή των προκατασκευασμένων κελυφών είναι η γρήγορη κατασκευή σε σύντομο χρονικό διάστημα, χρησιμοποιώντας λιγότερους πόρους [26].



Εικόνα 3 – Προκατασκευασμένη τοιχοποιία: α) μεταφορά και β) τελική τοποθέτηση [27].

Τα προκατασκευασμένα ελαφρά κελύφη έχουν αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής βαριάς κατασκευής. Τα συνολικά οφέλη προέρχονται κυρίως από τον ακριβή σχεδιασμό του κελύφους σε βιομηχανοποιημένο περιβάλλον και συνοψίζονται παρακάτω:

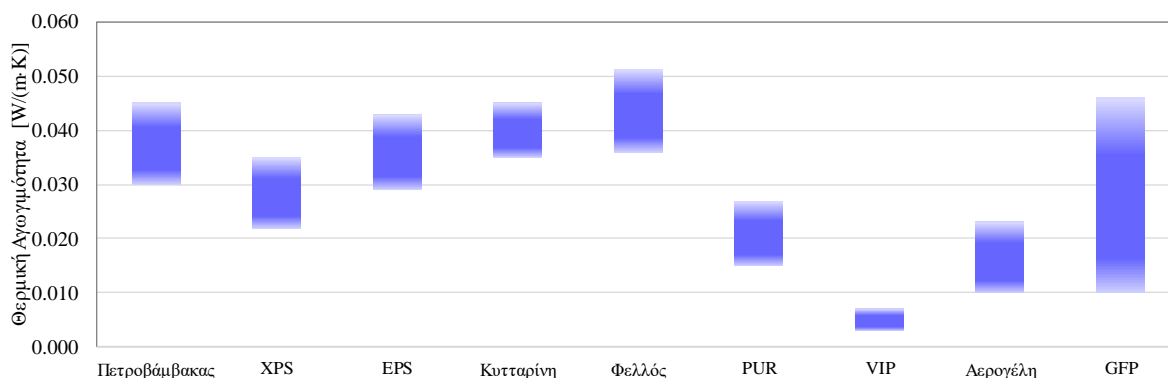
- Μείωση του συνολικού κόστους έως 30% και των εργατικών έως 75% [28].
- Μείωση του χρόνου κατασκευής [29].
- Μείωση των θανατηφόρων ατυχημάτων κατά την κατασκευή έως 80% [30].
- Καλύτερη ποιότητα και ευελιξία στις κατασκευές [31].
- Αύξηση της παραγωγικότητας [32].
- Μείωση της όχλησης στο χώρο της τελικής εγκατάστασης [33].
- Αύξηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων (ανακυκλώσιμα υλικά, μείωση αποβλήτων και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου) [34]

Η εφαρμογή των προκατασκευασμένων κελυφών αποτελεί μια καινοτόμος μέθοδο για τη περίπτωση της ριζικής αναβάθμισης ενός υφιστάμενου κτιρίου. Το κόστος και ο χρόνος της αναβάθμισης μειώνονται, ενώ παράλληλα βελτιώνεται επαρκώς η ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση του κτιρίου, ανοίγοντας το δρόμο στη δημιουργία nZEB [35, 36].

1.3.4 Καινοτόμα μονωτικά υλικά

Τα συνηθέστερα συμβατικά μονωτικά υλικά είναι ο πετροβάμβακας, η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS), η κυτταρίνη, ο φελλός και η πολουρεθάνη (PUR). Η θερμική τους αγωγιμότητα κυμαίνεται μεταξύ 0.025 W/(m·K) και 0.055 W/(m·K) (Εικόνα 4) και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε υγρασία [37]. Τα υλικά μπορούν να κοπούν και να προσαρμοσθούν κατά τη διάρκεια της τοποθέτησής τους χωρίς να χάσουν τις θερμομονωτικές ιδιότητές τους.

Τα συμβατικά μονωτικά υλικά, τα οποία αναπτύχθηκαν κυρίως πριν από τη δεκαετία του 1960, χρησιμοποιούν τον αέρα ως το βασικό μονωτικό συστατικό, ενώ οι ίνες και οι κυψελοειδής δομή του στερεού εμποδίζουν την κίνηση του εμπεριεχόμενου αέρα. Εκτός από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της αγωγιμότητας του στερεού, η μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας μεταφέρεται με αγωγή μέσω του ακίνητου αέρα (θερμική αγωγιμότητα 0.026 W/(m·K)) και ακτινοβολία. Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί καινοτόμα μονωτικά υλικά με θερμική αγωγιμότητα χαμηλότερη από εκείνη του ακίνητου αέρα χρησιμοποιώντας εναλλακτικά αέρια ή ακόμη και με την εκκένωση του αέρα με στόχο την ελαχιστοποίηση όλων των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας που σχετίζονται με τον εμπεριεχόμενο αέρα [38].

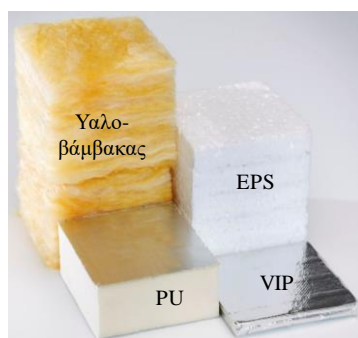


Εικόνα 4 – Θερμική αγωγιμότητα συμβατικών και καινοτόμων μονωτικών υλικών.

Στα σύγχρονα μονωτικά υλικά πρέπει να επιτυγχάνεται ελάχιστη θερμική αγωγιμότητα σε μικρό βάρος, ενώ δε θα πρέπει να αγνοείται η μηχανική αντοχή, η αντίσταση στη φωτιά, το κόστος, η διάρκεια ζωής κλπ. [37, 39, 40]. Η ναυοτεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί ως μια μελλοντική τεχνική για την ανάπτυξη νέων μονωτικών υλικών υψηλής απόδοσης εστιάζοντας στη δημιουργία πόρων σε νάνο-κλίμακα [37]. Μία κατηγορία καινοτόμων μονωτικών υλικών είναι τα Υπέρ Μονωτικά Υλικά (Super Insulation Materials – SIM) με θερμική αγωγιμότητα η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και $0.003 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Αυτή η μικρή θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνει μεγάλη θερμική απόδοση σε μικρό πάχος. Όμως τα υλικά αυτά παραμένουν πολύ πιο ακριβά σε σχέση με τα συμβατικά. Τα πιο κοινά SIMs είναι οι μονωτικές σανίδες κενού και η αερογέλη, τα οποία είναι ήδη διαθέσιμα στην αγορά.

Μονωτική Σανίδα Κενού (Vacuum Insulation Panel – VIP)

Η μονωτική σανίδα κενού ή Vacuum Insulation Panel (VIP) είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία των SIMs με την μικρότερη θερμική αγωγιμότητα η οποία μπορεί να φτάσει και κάτω από $5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, δηλαδή 5 έως 10 φορές μικρότερη από εκείνη των συμβατικών μονωτικών υλικών (Εικόνα 5). Στην ελληνική επιστημονική βιβλιογραφία δεν συναντάται συχνά ο όρος «Μονωτική Σανίδα Κενού», όμως ο αγγλικός όρος και η συντομογραφία «VIP» είναι περισσότερο διαδεδομένη. Για το λόγο αυτό στο εξής οι μονωτικές σανίδες κενού θα αναφέρονται με τον αγγλικό όρο Vacuum Insulation Panel ή VIP.



Εικόνα 5 - Πάχος διαφορετικών μονωτικών υλικών για την επίτευξη της ίδιας θερμικής αντίστασης [41].

Το VIP αποτελείται από έναν ανοιχτό πορώδες πυρήνα (core material) του οποίου έχει αφαιρεθεί ο αέρας και διατηρείται αεροστεγές με ένα πολύ λεπτό περίβλημα (envelope barrier). Ο εκκενωμένος πορώδης πυρήνας παρέχει πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα, ενώ το περίβλημα διατηρεί το κενό μέσα στον πυρήνα.

Τα VIPs χρησιμοποιούνται από το 1980 και οι περισσότερες εφαρμογές τους είναι σε ψυκτικές εφαρμογές και στη βιομηχανία των μεταφορών, όμως τα τελευταία χρόνια συναντώνται και στον κτιριακό τομέα. Η πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνει μεγάλη θερμική αντίσταση με μικρό πάχος μόνωσης, αυξάνοντας την ωφέλιμη επιφάνεια. Η χρήση μόνο 4 cm πάχους VIP μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των περισσότερων εθνικών κανονισμών για τον περιορισμό του U-value της τοιχοποιίας [42]. Για το λόγο αυτό τα VIP αποτελούν μια πολύ ελκυστική λύση στην αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων.

Από την άλλη πλευρά, το περίβλημα του VIP είναι κατασκευασμένο από υλικά με πολύ χαμηλή διαπερατότητα αέρα, ενώ η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των ενσωματωμένων μεμβρανών προκαλεί μη αμελητέα ποσότητα θερμογέφυρας. Για το λόγο αυτό, το πάχος του περιβλήματος είναι περιορισμένο, με συνέπεια χαμηλότερο χρόνο ζωής από τα συμβατικά δομικά υλικά. Επιπλέον, τα VIPs

είναι εύθραυστα και δεν μπορούν να κοπούν ή να προσαρμοστούν κατά την τοποθέτησή τους καθώς σε αυτή την περίπτωση θα έχανε το κενό τους και άρα τη πολύ μικρή θερμική τους αγωγιμότητα.

Το σχετικά υψηλό κόστος των VIPs μαζί με την ανθεκτικότητά τους είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους δεν συναντώνται συχνά στον κτιριακό τομέα. Ωστόσο, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών παραγωγής VIP αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής και να προσφέρει προϊόντα με καλύτερο περίβλημα, εξασφαλίζοντας διάρκεια ζωής για 30 ή 50 χρόνια. Ένας από τους κύριους στόχους της τρέχουσας διατριβής είναι η αξιολόγηση του VIP ως μονωτικού υλικού σε κτίρια, αναλύοντας τη συμβολή τους στην αναβάθμιση της θερμικής απόδοσης του κελύφους. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη θεωρία και τις βασικές ιδιότητες των VIP παρουσιάζονται σε επόμενα κεφάλαια.

Αερογέλη

Ένα δεύτερο Υπέρ Μονωτικό Υλικό είναι η Αερογέλη ή το Αεροπήκτωμα (aerogel) με θερμική αγωγιμότητα η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 mW/(m·K) [43]. Παρότι ανακαλύφθηκαν το 1931, οι εφαρμογές τους σε κτίρια είναι ελάχιστες [44, 45]. Η αερογέλη, επίσης γνωστή ως παγωμένος καπνός ή στερεός αέρας, είναι ξηρά πηκτώματα (gel) με εξαιρετικά υψηλό πορώδες που έχει ως αποτέλεσμα εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα [46, 47]. Η αερογέλη μπορεί να παραχθεί από διάφορα υλικά όπως το χρώμιο, ο άνθρακας, το αλουμίνιο και το διοξείδιο του πυριτίου. Μεταξύ αυτών, η αερογέλη από διοξείδιο του πυριτίου είναι η πιο γνωστή εμπορική αερογέλη, εξαιτίας της αξιοπιστίας και της σχετικά εύκολης παρασκευής της [48]. Η αερογέλη πυριτίου περιέχει πολλούς πόρους με διάμετρο 5 έως 100 nm και καταλαμβάνουν περισσότερο από το 90% του συνολικού όγκου της.

Η θερμική αγωγιμότητα της εμπορικής αερογέλης είναι περίπου 13.5 mW/(m·K) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ σε πίεση 50 mbar η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να μειωθεί έως και 4 mW/(m·K). Η υψηλή διαπερατότητα της ακτινοβολίας εντός του εύρους του ορατού φωτός και η υψηλή διαφάνεια στο υπέρυθρο φάσμα, καθιστούν τις οπτικές ιδιότητες της αερογέλης (Εικόνα 6α) ιδανικές για αρχιτεκτονικές λύσεις στον κατασκευαστικό τομέα [45]. Επιπλέον, η αερογέλη έχει καλές ακουστικές ιδιότητες, εξαιρετική αντοχή στη φωτιά, αντοχή στο άμεσο ηλιακό φως και μεγάλη ανθεκτικότητα [49]. Από την άλλη πλευρά όμως, η αερογέλη έχει χαμηλή μηχανική αντοχή. Όπως και στα VIP, έτσι και στην αερογέλη, το υψηλό κόστος αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα έναντι των συμβατικών μονωτικών υλικών.



Εικόνα 6 – Υπέρ μονωτικά υλικά: α) αερογέλη [50]. και β) πάνελ αερίου [51, 52].

Πάνελ αερίου

Τα πάνελ αερίου (Gas Filled Panel - GFP) είναι καινοτόμα μονωτικά υλικά με ελκυστικές θερμικές επιδόσεις. Τα πάνελ αερίου αποτελούνται από μία μεμβράνη χαμηλής διάχυσης και μια ανακλαστική πολυστρωματική κυψελωτή δομή γεμάτη με ένα αέριο σε ατμοσφαιρική πίεση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6β. Η μεμβράνη είναι ένα ερμητικά αεροστεγές περίβλημα για τη διατήρηση του αερίου, ενώ ο

ανακλαστήρας είναι απαραίτητος για τη μείωση της μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας στο εσωτερικό του πάνελ. Το αέριο μπορεί να είναι αέρας ή άλλο μη τοξικό και μη εύφλεκτο αέριο με χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα, όπως αργό, κρυπτό, ξένο. Η επιλογή του αερίου είναι σημαντική για τη θερμική απόδοση, ενώ η μεμβράνη και ο ανακλαστήρας είναι υπεύθυνοι για τη μηχανική αντοχή των πάνελ αερίου [51].

Η θερμική αγωγιμότητα έχει μετρηθεί περίπου $46 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ για πάνελ με αέρα και $40 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ για πάνελ με αργό, δηλαδή ελαφρώς υψηλότερα από τα συμβατικά μονωτικά υλικά [51]. Ωστόσο, οι θεωρητικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας υπολογίστηκαν μεταξύ 3.5 και $10 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ανάλογα με το εμπεριεχόμενο αέριο. Η θερμική απόδοση των πάνελ αερίου εξακολουθεί να τίθεται υπό αμφισβήτηση για εφαρμογές κτιρίων. Σε σύγκριση με άλλα καινοτόμα μονωτικά υλικά, η απόδοση των VIP φαίνεται να είναι υψηλότερη [37, 51].

1.4 Στόχος και διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η μείωση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης είναι η κινητήριος δύναμη για τον περιορισμό των ενεργειακών αναγκών στον κτιριακό τομέα. Η αναβάθμιση της ενεργειακής απόδοσης (ή θερμικής απόδοσης) του κτιριακού κελύφους είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος για την επίτευξη των εθνικών και διεθνών στόχων. Η επιστημονική κοινότητα αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα σε δύο βασικούς άξονες: στην ανάπτυξη νέων, υψηλής απόδοσης, μονωτικών υλικών ή τεχνικών και στην ανάπτυξη μεθόδων για την ποσοτική ενεργειακή αξιολόγηση νέων ή υφιστάμενων κελυφών και καινοτόμων λύσεων.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διδακτορική διατριβή αντιμετωπίζει την ενεργειακή απόδοση των κτιριακών κελυφών και στους δυο αυτούς άξονες. Ο στόχος της έρευνας είναι η αξιολόγηση των τρεχουσών πειραματικών και υπολογιστικών μεθόδων και η ανάπτυξη νέων μεθόδων για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης κτιριακών κελυφών καθώς επίσης και η διερεύνηση των καινοτόμων Υπέρ Μονωτικών Υλικών στον κτιριακό τομέα. Η διατριβή εστιάζει στα VIPs σε κτιριακές εφαρμογές αναλύοντας τη θερμική τους συμπεριφορά υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα κτίρια ελαφρού χαλύβδινου σκελετού τα οποία αποτελούν μια αποδοτική και εναλλακτική προοπτική στον κτιριακό τομέα.

Η επιτόπια μέτρηση της θερμικής αντίστασης (R-value) και της θερμικής διαπερατότητας (U-value) των τοιχοποιιών είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση των υφιστάμενων κτιρίων, την αξιολόγηση συμβατικών ή καινοτόμων λύσεων και τη λήψη αποφάσεων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός κτιρίου. Για το λόγο αυτό, στόχος είναι να συγκριθούν και να αξιολογηθούν οι ευρέως χρησιμοποιούμενες προτυποποιημένες μέθοδοι για την επιτόπια μέτρηση θερμικής αντίστασης τοιχοποιιών. Επιπλέον, η τρέχουσα εργασία αποσκοπεί στην εισαγωγή δύο μεθόδων για την κάλυψη του κενού στη βιβλιογραφία σχετικά με την επιτόπια μέτρηση της τιμής U-value σε ελαφρά κτίρια χαλύβδινου σκελετού (LSF).

Δεδομένου ότι το επίκεντρο της παρούσας διατριβής είναι η εφαρμογή του VIP στον κτιριακό τομέα, η χρήση τους θα πρέπει να μελετηθεί όχι μόνο θεωρητικά αλλά και πειραματικά. Με στόχο την ικανοποίηση της ανάγκης για αξιόπιστο χαρακτηρισμό της θερμικής και υγροθερμικής συμπεριφοράς των VIPs σε πραγματικά κτίρια υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, θα διερευνηθούν δύο κτιριακές εφαρμογές σε διαφορετικές περιοχές. Τα διδάγματα που αντλούνται από αυτές τις εφαρμογές θα αποκαλύψουν τα πλεονεκτήματα και τυχόν αδυναμίες που θα πρέπει να ξεπεραστούν με σκοπό την εδραίωση των VIPs ως δομικά υλικά. Επιπλέον, η εργασία αποσκοπεί στη σύγκριση της χρήσης των VIPs με συμβατικά μονωτικά υλικά από την τεχνοοικονομική σκοπιά.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα LSF κτίρια, όπου η κύρια πρόκληση όσον αφορά την ενεργειακή τους απόδοση είναι ο υπολογισμός και η μείωση των θερμογεφυρών που προκαλούνται από την υψηλή θερμική αγωγιμότητα του μεταλλικού σκελετού. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές για την αξιολόγηση των LSF κελυφών. Ταυτόχρονα, η διατριβή εξετάζει τη χρήση των VIPs ως ένας μέτρο για τη μείωση των θερμογεφυρών τους.

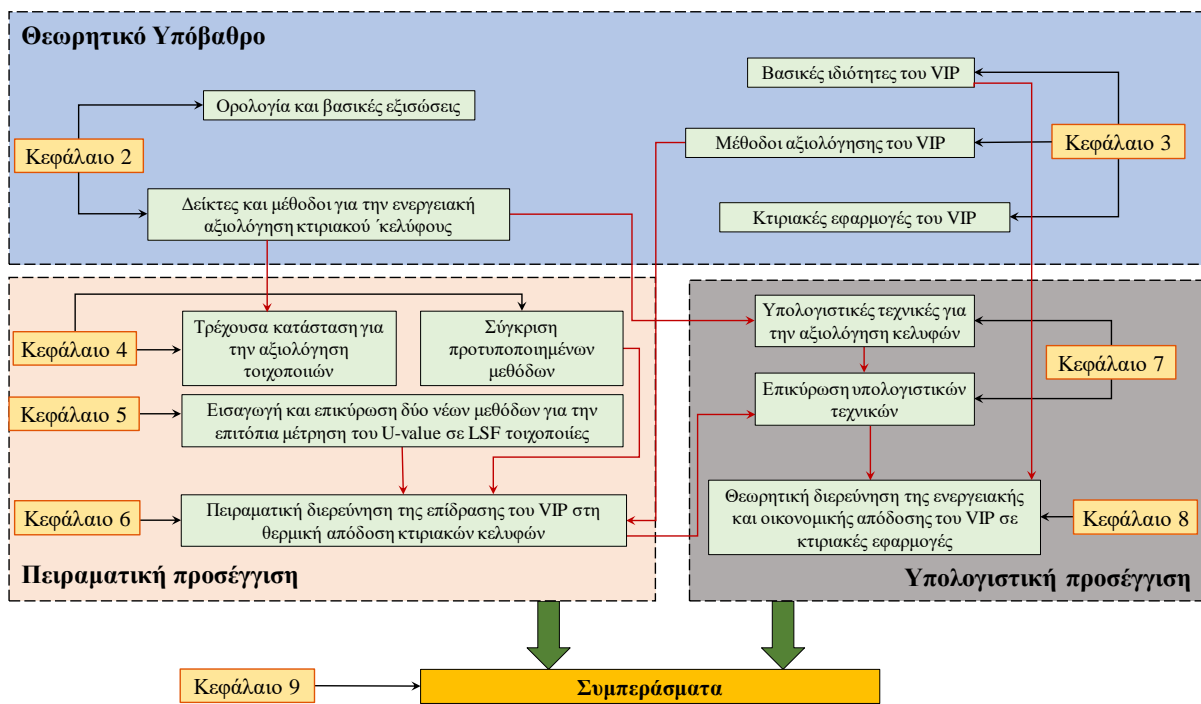
Συνοψίζοντας, οι στόχοι της διατριβής είναι:

- Αξιολόγηση προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση θερμικής απόδοσης κελύφους.
- Ανάπτυξη νέων μεθόδων για την αξιολόγηση LSF κελυφών
- Αξιολόγηση μεθόδων θεωρητικής ενεργειακής αποτίμησης κελύφους
- Διερεύνηση της χρήσης του VIP ως μονωτικό υλικό στα κτίρια
- Προβολή διδαγμάτων σχετικά με την κατασκευή κτιρίων με VIP
- Ανάλυση της χρήσης του VIP ως μέτρο μείωσης των θερμογεφυρών σε LSF κτίρια
- Διερεύνηση ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης του VIP στα κτίρια

Η διατριβή αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη: το θεωρητικό υπόβαθρο, την πειραματική προσέγγιση και την υπολογιστική προσέγγιση. Στο πρώτο μέρος, δίνεται η θεωρία σχετικά με την ενεργειακή αξιολόγηση του κτιριακού κελύφους παρουσιάζοντας βασικούς ορισμούς, δείκτες και ταξινομώντας τις υπάρχουσες μεθόδους. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες του VIP, εστιάζοντας στις κτιριακές εφαρμογές. Στο πειραματικό μέρος, πραγματοποιείται η αξιολόγηση των διαθέσιμων προτυποποιημένων μεθόδων και η εισαγωγή δύο νέων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής απόδοσης των τοιχοποιιών. Επιπλέον, πειραματικά διερευνώνται δύο ελαφρά κτίρια με ενσωματωμένα VIPs, που βρίσκονται στην Αθήνα (η οποία είναι και η πρώτη κτιριακή εφαρμογή των VIPs στην Ελλάδα) και στην Ελβετία. Στο υπολογιστικό μέρος, αναλύονται και επικυρώνονται δύο διαθέσιμες θεωρητικές τεχνικές σχετικά με την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης LSF κελυφών. Οι τεχνικές χρησιμοποιούνται σε δύο θεωρητικά κτίρια για τη διερεύνηση της επίδρασης των VIPs στην ενεργειακή και οικονομική τους απόδοση.

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από 9 κεφάλαια. Το θεωρητικό μέρος αποτελείται από δυο κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 εισάγονται οι βασικοί ορισμοί σχετικά με την ενεργειακή αποτίμηση κτιριακού κελύφους, τις θερμογέφυρες και τους κατάλληλους δείκτες για την ποσοτική αξιολόγηση του κελύφους. Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται μια συγκεντρωτική επισκόπηση σχετικά με τα VIPs παρέχοντας πληροφορίες για τις βασικές ιδιότητες, τις μεθοδολογίες θερμικής αξιολόγησής τους και τις υπάρχουσες κτιριακές εφαρμογές.

Το πειραματικό μέρος αποτελείται από τρία κεφάλαια (Εικόνα 7). Το Κεφάλαιο 4 είναι αφιερωμένο στην επιτόπια μέτρηση θερμικής αντίστασης υφιστάμενων τοιχοποιιών παρουσιάζοντας μια συγκριτική αξιολόγηση των προτυποποιημένων μεθόδων (από τα δύο διεθνή πρότυπα: ISO 9869 και ASTM C1155). Το Κεφάλαιο 5 εισάγει δύο νέες μεθόδους σχετικά με τη μέτρηση U-value σε LSF τοιχοποιίες: την Μέθοδο Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Points Method - RPM) και τη Μέθοδο Σταθμισμένων Περιοχών (Weighted Area Method - WAM). Τέλος, το Κεφάλαιο 6 εφαρμόζει υφιστάμενες και νέες μεθόδους ενεργειακής αποτίμησης σε δύο LSF κτίρια με ενσωματωμένα VIPs με σκοπό την διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς του VIP σε πραγματικές συνθήκες.



Εικόνα 7 – Διάρθρωση της διατριβής.

Το υπολογιστικό μέρος αποτελείται από δύο Κεφάλαια. Το Κεφάλαιο 7 πραγματεύεται την υπολογιστική αξιολόγηση LSF κελυφών, εστιάζοντας στον υπολογισμό της επίδρασης των θερμογεφυρών. Το Κεφάλαιο 8 μελετά τη χρήση του VIP σε θεωρητικές εφαρμογές διερευνώντας τη μείωση των θερμογεφυρών σε LSF κτίρια και την τεχνοοικονομική απόδοση σε σύγκριση με συμβατική μόνωση για την αναβάθμιση ενός παλιού κτιριακού κελύφους.

Τέλος το Κεφάλαιο 9 συνοψίζει και παρουσιάζει τα βασικά συμπεράσματα της διατριβής, προτείνοντας ιδέες για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 2^ο - Ενεργειακή αξιολόγηση κτιριακού κελύφους

2.1 Εισαγωγή

Η θέσπιση των δυο οδηγιών της ΕΕ, EPBD και EED, όπως επίσης και η έκδοση του ΠΕΑ έφεραν στο φως τη έννοια της ενεργειακής αξιολόγησης των νέων και υφιστάμενων κτιρίων. Η ενεργειακή αξιολόγηση ενός κτιρίου είναι σημείο αναφοράς για την αναβάθμισή του και αφορά την αποτίμηση του κτιρίου σε σχέση με τη συνολική κατανάλωση ενέργειας για την ικανοποίηση των αναγκών του, συμπεριλαμβανομένων της ανάγκης για θέρμανση/ψύξη, ζεστό νερό χρήσης, φωτισμό, χρήση ηλεκτρικών συσκευών κ.λπ. [53]. Μέσω της ενεργειακής αξιολόγησης μπορεί να εκτιμηθούν πιθανά μέτρα, όπως η χρήση καινοτόμων υλικών, νέων τεχνικών κατασκευής, η αναβάθμιση των κτιριακών συστημάτων, κλπ.

Μεταξύ των πληροφοριών που παρέχει η ενεργειακή αξιολόγηση, η θερμική απόδοση του κτιριακού κελύφους (εξωτερική τοιχοποιία, οροφή, παράθυρα κ.λπ.) έχει μεγάλη σημασία, καθώς το κέλυφος είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο ποσό της κατανάλωσης για θέρμανση και ψύξη [54]. Για το λόγο αυτό, η ενεργειακή αξιολόγηση του κελύφους είναι ζωτικής σημασίας και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω διαφόρων μεθόδων και δεικτών.

Το παρόν κεφάλαιο αντιμετωπίζει τις μεθόδους για τη ενεργειακή αξιολόγηση του κτιριακού κελύφους. Μετά από την εισαγωγή βασικών ορισμών αναλύονται και κατηγοριοποιούνται οι σημαντικότεροι δείκτες σε τρία επίπεδα: α) την κλίμακα του πάνελ, β) την κλίμακα των στοιχείων του κελύφους και γ) την κλίμακα ολόκληρου του κελύφους. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά και κατηγοριοποιούνται οι μέθοδοι για την ενεργειακή αξιολόγηση.

2.2 Κτιριακό κέλυφος

Ο όρος «κτιριακό κέλυφος» ορίζεται από το πρότυπο ISO 9972 ως «το φυσικό όριο που διαχωρίζει το εσωτερικό ενός κτιρίου ή μέρος ενός κτιρίου από το εξωτερικό περιβάλλον» [55]. Το κέλυφος είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της θερμικής άνεσης και της ποιότητας του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου [56, 57]. Αποτελείται από τα στοιχεία του κελύφους, δηλαδή τους εξωτερικούς τοίχους, την οροφή, το δάπεδο, τα ανοίγματα (εξωτερικές πόρτες, παράθυρα) και οτιδήποτε άλλο διαχωρίζει το εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον. Τα στοιχεία του κελύφους μπορούν να διαχωριστούν σε διαφανή (παράθυρα, φεγγίτες κλπ.) και αδιαφανή (τοιχοποιία, οροφή, κλπ.).

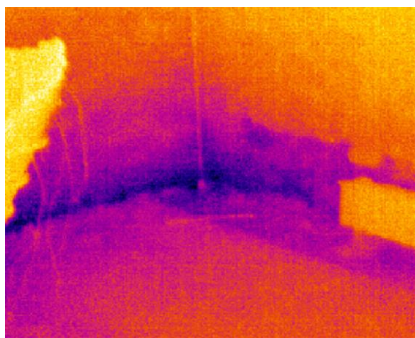
2.3 Θερμογέφυρες

Υπάρχουν κρίσιμες περιοχές στο κτιριακό κέλυφος όπου δημιουργείται πολυδιάστατη μεταφορά θερμότητας. Στα σημεία αυτά η, κατά τα άλλα, ομοιόμορφη θερμική αντίσταση αλλάζει σημαντικά εξαιτίας είτε της πλήρους ή μερικής διείσδυσης του κελύφους από υλικά με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα είτε της μεταβολής του πάχους των υλικών. Θερμογέφυρες είναι για παράδειγμα οι ενώσεις μεταξύ των στοιχείων του κελύφους (τοίχος με οροφή), η παρουσία μεταλλικών συνδέσμων ή στηριγμάτων στο κέλυφος [58].

Οι θερμογέφυρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε ανάλογα με την επαναληψιμότητά τους είτε ανάλογα με τη γεωμετρία τους. Ανάλογα με την επαναληψιμότητα, οι θερμογέφυρες χωρίζονται σε «επαναλαμβανόμενες» και «μη επαναλαμβανόμενες». Οι πρώτες συναντώνται στα στοιχεία του κελύφους σε ένα ομαλό και επαναλαμβανόμενο μοτίβο ενώ οι μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες είναι διάσπαρτες στο κέλυφος [58]. Ανάλογα με τη γεωμετρία, οι θερμογέφυρες διαχωρίζονται σε γραμμικές και σημειακές. Οι γραμμικές δημιουργούνται από την ένωση μεταξύ δύο ή περισσότερων στοιχείων του κελύφους με ομοιόμορφη διατομή κατά μήκος ενός από τους τρεις ορθογώνιους άξονες. Η γραμμική θερμογέφυρα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από την γραμμική θερμική διαπερατότητα, Ψ -value, εκφρασμένη σε $[W/(m \cdot K)]$. Γραμμική θερμογέφυρα είναι η ένωση μεταξύ δύο εξωτερικών τοίχων ή η παρουσία μεταλλικού ορθοστάτη στο κεντρικό μέρος ελαφράς κατασκευής. Η σημειακή θερμογέφυρα ορίζεται ως μια ασυνέχεια της ομοιόμορφης θερμικής αντίστασης που διακόπτεται τοπικά σε ένα σημείο. Η σημειακή θερμογέφυρα ποσοτικοποιείται από τη σημειακή θερμική διαπερατότητα εκφρασμένη σε $[W/K]$ και μπορεί να είναι οι γωνία στην ένωση δύο τοίχων με την οροφή ή η παρουσία καρφιού για τη στήριξη μιας γυψοσανίδας. Συχνά η επίδραση των σημειακών θερμογεφυρών αμελείται για απλοποίηση του υπολογισμού της θερμικής απόδοσης του κελύφους, καθώς η συνεισφορά τους είναι συνήθως μικρή [59, 60].

Η συνεισφορά των θερμογεφυρών στην ενεργειακή απόδοση του κελύφους είναι σημαντική, αυξάνοντας τη συνολικές ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου. Ο υπολογισμός της θερμικής διαπερατότητας μιας τοιχοποιίας αμελώντας τις θερμογέφυρες μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση [61]. Η συνεισφορά των θερμογεφυρών ακόμα και σε ένα καλά μονωμένο κέλυφος είναι σημαντική και μπορεί να αυξήσουν τις ενεργειακές ανάγκες μέχρι και 67% [62].

Η παρουσία θερμογεφυρών προκαλεί τοπική αύξηση της ροής θερμότητας με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια κατά τους χειμερινούς μήνες (Εικόνα 8). Ως αποτέλεσμα, υπάρχει υψηλός κίνδυνος συμπύκνωσης της υγρασίας και ανάπτυξης μούχλας στις περιοχές αυτές [63]. Αυτό είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, που επηρεάζει άμεσα την υγεία των ανθρώπων και την επιδείνωση των δομικών υλικών [64].

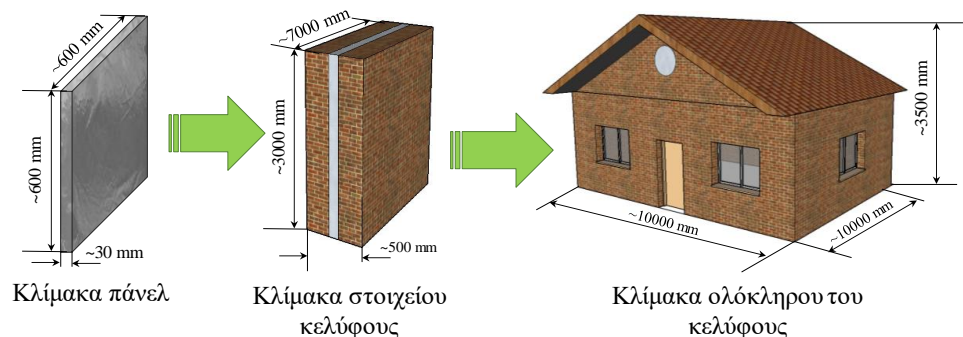


Εικόνα 8 – Παράδειγμα χαμηλότερης θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια θερμογέφυρας.

2.4 Δείκτες για την ενεργειακή αξιολόγηση κτιριακού κελύφους

Η ενεργειακή/θερμική απόδοση του κελύφους μπορεί να προσδιορισθεί μέσω του υπολογισμού συγκεκριμένων δεικτών, όπως η θερμική διαπερατότητα (U -value), η θερμική αντίσταση (R -value), ο υπολογισμός των συνολικών ενεργειακών αναγκών, κλπ. Στην παρούσα διατριβή, οι δείκτες για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του κελύφους χωρίζονται σε τρεις διαφορετικές κλίμακες: α) την κλίμακα σε επίπεδο πάνελ, β) την κλίμακα σε επίπεδο των στοιχείων του κελύφους και γ) την κλίμακα ολόκληρου του κτιριακού κελύφους (Εικόνα 9). Στην πρώτη κλίμακα, την κλίμακα του πάνελ, οι δείκτες επικεντρώνονται στις θερμικές ιδιότητες των ενσωματωμένων υλικών. Οι δείκτες που αφορούν

τη δεύτερη κλίμακα αξιολογούν τη θερμική απόδοση ενός ολόκληρου στοιχείου του κελύφους (τοιχοποιία, οροφή, δάπεδο ή άνοιγμα). Τέλος, στην τρίτη κλίμακα οι δείκτες εξετάζουν τη θερμική απόδοση ολόκληρης της επιφάνειας του κελύφους, συμπεριλαμβανομένων όλων των στοιχείων, των θερμογεφυρών κλπ.



Εικόνα 9 – Ο διαχωρισμός της ανάλυσης του κελύφους σε τρεις κλίμακες.

2.4.1 Κλίμακα πάνελ

Η ενεργειακή αξιολόγηση του κελύφους σε επίπεδο πάνελ αφορά τον υπολογισμό των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών που εμπεριέχονται στο κέλυφος. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις ιδιότητες της μόνωσης αλλά και στη θερμογέφυρα εξαιτίας της ένωσης δύο μονωτικών πάνελ (αρμός).

Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα, λ ή k , είναι η πιο σημαντική ιδιότητα που χαρακτηρίζει την θερμική απόδοσή του υλικού και εκφράζεται σε $[W/(m \cdot K)]$. Η θερμική αγωγιμότητα καθορίζει την ικανότητα του υλικού στη μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής και ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας που διαπερνά υλικό πάχους 1 m όταν επιβάλλεται σε αυτό διαφορά θερμοκρασίας ίση με $1^\circ C$. Όσο μικρότερη είναι η θερμική αγωγιμότητα, τόσο καλύτερες μονωτικές ιδιότητες έχει το υλικό. Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από την πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε υγρασία του υλικού. Ένα μονωτικό υλικό πρέπει να έχει θερμική αγωγιμότητα μικρότερη από $0.1 W/(m \cdot K)$.

Στην πράξη, η τοποθέτηση των μονωτικών πάνελ στην επιφάνεια του κελύφους έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία αρμού μεταξύ δύο γειτονικών πάνελ, στον οποίο εμπεριέχεται αέρας και συνδετικό κονίαμα. Εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς στη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ μονωτικού και αρμού δημιουργείται μια θερμογέφυρα στις ακμές κάθε πάνελ. Αυτή η θερμογέφυρα λαμβάνεται υπόψη στις ιδιότητες της μονωτικής στρώσης μέσω του ορισμού ενός πραγματικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ_{eff} , υπολογιζόμενο από την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \Psi \cdot d \cdot \frac{p}{A} + \chi \frac{d}{A} \quad 1$$

όπου, λ η θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο του πάνελ, Ψ η γραμμική θερμική διαπερατότητα της θερμογέφυρας των αρμών, χ η σημειακή θερμική διαπερατότητα της θερμογέφυρας των αρμών μεταξύ τριών ή τεσσάρων πάνελ, d το πάχος, p η περίμετρος και A η επιφάνεια του πάνελ. Στην ενεργειακή ανάλυση κτιρίων, οι ιδιότητες των υλικών θεωρούνται ιστροπικές, πράγμα που σημαίνει ότι όλες οι ιδιότητες είναι οι ίδιες και στις τρεις κατευθύνσεις. Αυτή η υπόθεση είναι ρεαλιστική για την πλειοψηφία των υλικών.

Θερμική διάχυση

Αν και η θερμική αγωγιμότητα είναι η πιο αντιπροσωπευτική ιδιότητα που υποδεικνύει τη θερμική επίδοση ενός δομικού υλικού, δεν παρέχει καμία πληροφορία σχετικά με τα δυναμικά χαρακτηριστικά και τη θερμική αδράνεια του υλικού. Για το λόγο αυτό, ορίζεται η θερμική διάχυση, a , εκφρασμένη σε $[m^2/sec]$ και καθορίζει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από τη μια πλευρά στην άλλη. Η θερμική διάχυση υπολογίζεται ως εξής:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad 2$$

όπου ρ η πυκνότητα και C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού.

2.4.2 Κλίμακα στοιχείου κελύφους

Οι δείκτες για την ενεργειακή αξιολόγηση των στοιχείων του κελύφους αφορούν κυρίως την μονωτική ικανότητα των στοιχείων. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι σημαντικότεροι δείκτες.

Θερμική αντίσταση R-value και θερμική διαπερατότητα U-value

Η θερμική αντίσταση ή R-value είναι το πιο αντιπροσωπευτικό μέγεθος για την εκτίμηση της θερμικής απόδοσης μιας τοιχοποιίας φανερώνοντας το επίπεδο μόνωσής της [65, 66]. Το R-value ενός μονοστρωματικού τοίχου ορίζεται ως το πηλίκο του πάχους προς τη θερμική αγωγιμότητα της στρώσης του υλικού, εκφρασμένη σε $[(m^2K)/W]$, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad 3$$

Για ομογενείς (κατά τη διεύθυνση του ύψους και του μήκους του τοίχου) πολυστρωματικές τοιχοποιίες, η συνολική θερμική αντίσταση, R_{wall} , είναι ίση με το άθροισμα όλων των θερμικών αντιστάσεων των επί μέρους N στρώσεων:

$$R_{wall} = \sum_{i=1}^N R_i \quad 4$$

Το R-value μπορεί επίσης να προσδιορισθεί ως το πηλίκο της επιφανειακής διαφοράς θερμοκρασίας προς τη ροή θερμότητας που διαπερνά τον τοίχο σε μόνιμες συνθήκες:

$$R_{wall} = \frac{T_{si} - T_{se}}{q_{wall}} \quad 5$$

όπου q_{wall} $[W/m^2]$ η ροή θερμότητας στην επιφάνεια του τοίχου, T_{si} και T_{se} $[^{\circ}C]$ οι θερμοκρασίες της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας, αντίστοιχα.

Η θερμική διαπερατότητα ή U-value είναι ο πιο κοινός και ευρέως χρησιμοποιούμενος συντελεστής για την ενεργειακή αποτίμηση στοιχείων κελύφους. Το U-value, εκφρασμένο σε $[W/(m^2 \cdot K)]$, ενός τοίχου αντιπροσωπεύει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται μέσω της επιφάνειας ενός τετραγωνικού μέτρου του τοίχου, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος είναι $1^{\circ}C$, και υπολογίζεται ως εξής:

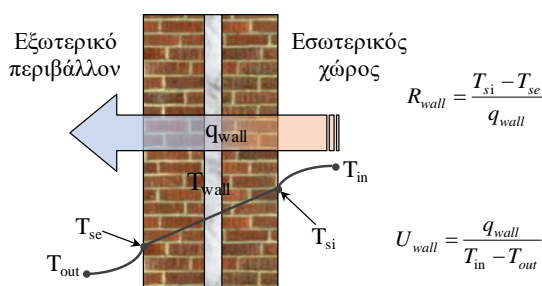
$$U_{wall} = \frac{q_{wall}}{T_{in} - T_{out}} \quad 6$$

όπου T_{in} και T_{out} [$^{\circ}\text{C}$] είναι οι θερμοκρασίες του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, αντίστοιχα. Το U-value περιλαμβάνει όχι μόνο τη μονωτική ικανότητα της τοιχοποιίας, αλλά και την επιφανειακή της αντίσταση. Έτσι το U-value συνδέεται με το R-value μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$U_{wall} = \frac{1}{R_{si} + R_{wall} + R_{se}} = \frac{1}{R_{tot}} \quad 7$$

όπου R_{tot} [$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$] η συνολική θερμική αντίσταση, R_{si} and R_{se} [$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$] οι εσωτερική και εξωτερική επιφανειακή θερμική αντίσταση, αντίστοιχα. Τυπικές τιμή για την εσωτερική επιφανειακή θερμική αντίσταση είναι $0.13 (\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ και για την εξωτερική $0.04 (\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 [67].

Πολλές φορές τα δύο μεγέθη, R-value και U-value, συγχέονται. Η Εικόνα 10 διασαφηνίζει τους δύο ορισμούς υποδεικνύοντας ότι το U-value περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες του αέρα ενώ το R-value της επιφανειακές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, το U-value χρησιμοποιείται στους εθνικούς κανονισμούς καθορίζοντας τα όρια των θερμικών διαπερατοτήτων των στοιχείων του κελύφους με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση/ψύξη [68]. Ο θεωρητικός υπολογισμός των R-value και U-value βασίζεται σε εθνικά ή διεθνή πρότυπα όπως το ISO 6946, απαιτώντας τη θερμική αγωγιμότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στα στοιχεία του κελύφους και τα πάχη των επί μέρους στρώσεων.



Εικόνα 10 – Η ροή θερμότητας μέσω μιας τοιχοποιίας και η διαφορά στους ορισμούς R-value και U-value.

Υπολογισμός θερμογεφυρών

Η επίδραση των θερμογεφυρών, λαμβάνεται υπόψη υπολογίζοντας μια ισοδύναμη θερμική διαπερατότητα, U_{eq} , για ολόκληρη την επιφάνεια του στοιχείου του κελύφους. Το U_{eq} περιλαμβάνει τη συμβολή όλων των θερμογεφυρών, γραμμικών και σημειακών, απαιτώντας τον υπολογισμό όλων των συντελεστών γραμμικής και σημειακής διαπερατότητας, αντίστοιχα. Η ισοδύναμη θερμική διαπερατότητα, U_{eq} , λαμβάνοντας υπόψη όλες τις θερμογέφυρες, υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$U_{eq} = U_{clear} + \frac{\sum_i l_i \cdot \Psi_i}{A} + \frac{\sum_j \chi_j}{A} \quad 8$$

όπου U_{clear} [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] η θερμική διαπερατότητα του στοιχείου υπολογιζόμενο από την εξίσωση 7,

χωρίς την επίδραση των θερμογεφυρών, A η επιφάνεια του στοιχείου, l_i και Ψ_i το μήκος και η γραμμική θερμική διαπερατότητα της γραμμικής θερμογέφυρας i που βρίσκεται στο στοιχείο του κελύφους και χ_j η σημειακή θερμική διαπερατότητα της σημειακής θερμογέφυρας του στοιχείου j . Η επίδραση της θερμογέφυρας που εμπλέκεται σε δύο ή τρία στοιχεία του κελύφους κατανέμεται εξίσου στα αντίστοιχα στοιχεία.

Ο ακριβής υπολογισμός των Ψ -value και χ -value βασίζεται στη προσομοίωση των θερμογεφυρών σε μόνιμες συνθήκες, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211 [58]. Ωστόσο, υπάρχουν ημι-εμπειρικές εξισώσεις, απλοποιημένες μέθοδοι, κατάλογοι και πίνακες για την εκτίμηση των θερμογεφυρών [69-71].

Θερμοκρασιακός παράγοντας, f_{Rsi}

Ο θερμοκρασιακός παράγοντας εσωτερικής επιφάνειας, f_{Rsi} , είναι ένας δείκτης που συνήθως χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των θερμογεφυρών [72]. Ο f_{Rsi} ορίζεται από το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας ενός στοιχείου και του εξωτερικού περιβάλλοντος προς την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, δηλαδή:

$$f_{Rsi} = \frac{R_{tot} - R_{si}}{R_{tot}} = \frac{T_{si} - T_{out}}{T_{in} - T_{out}} \quad 9$$

Ο θερμοκρασιακός παράγοντας είναι ένας δείκτης για την υγραθερμική συμπεριφορά των θερμογεφυρών [73]. Η συμπύκνωση υγρασίας και η ανάπτυξη μούχλας αποφεύγεται όταν ο θερμοκρασιακός παράγοντας είναι μεγαλύτερος από μια κρίσιμη τιμή. Για κατοικίες αυτή η κρίσιμη τιμή δίνεται από πρότυπα περίπου ίση με 0.7 [74, 75], ενώ μπορεί να κυμανθεί από 0.65 έως 0.75 ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής [72].

Δυναμικά χαρακτηριστικά

Οι κύριοι δείκτες που περιγράφουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας τοιχοποιίας είναι ο παράγοντας μείωσης (decrement factor), DF και η χρονική υστέρηση (time lag), t_{lag} [76]. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του κελύφους είναι σημαντικά κυρίως για τη διαστασιολόγηση των ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου [77-80].

Ο παράγοντας μείωσης, DF , εκφράζει την ικανότητα του στοιχείου να μειώσει την ημερήσια διακύμανση του εξωτερικού περιβάλλοντος (Εικόνα 11). Ο DF είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$DF = \frac{T_{si}^{\max} - T_{si}^{\min}}{T_{se}^{\max} - T_{se}^{\min}} \quad 10$$

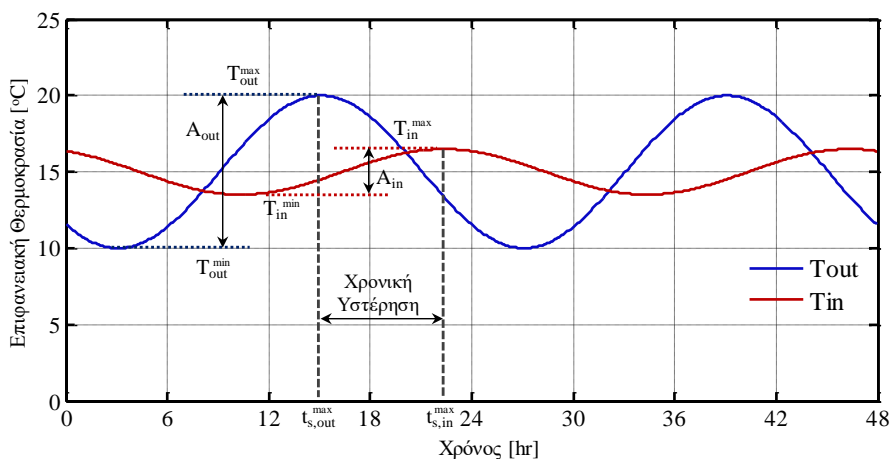
όπου T_{si}^{\max} , T_{si}^{\min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία,

αντίστοιχα και T_{se}^{\max} , T_{se}^{\min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια εξωτερική επιφανειακή θερμοκρασία, αντίστοιχα.

Η χρονική υστέρηση, t_{lag} , εκφράζει την καθυστέρηση ενός κύματος θερμότητας να διαπεράσει ένα στοιχείο κελύφους από την εξωτερική στην εσωτερική επιφάνεια (Εικόνα 11) και ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$t_{lag} = t_{T_{si}^{max}} - t_{T_{se}^{max}} \quad 11$$

όπου $t_{T_{si}^{max}}$ και $t_{T_{se}^{max}}$ είναι ο χρόνος όπου παρατηρείται η μέγιστη εξωτερική επιφανειακή θερμοκρασία και η μέγιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία, αντίστοιχα.



Εικόνα 11 – Ορισμός του παράγοντα μείωσης και της χρονικής υστέρησης.

2.4.3 Κλίμακα ολόκληρου κελύφους

Η ενεργειακή αξιολόγηση ολόκληρου του κτιριακού κελύφους πραγματοποιείται κυρίως με τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ή τον υπολογισμό των συνολικών απαιτήσεων ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης. Πρέπει να αναφερθεί ότι εφόσον η ενεργειακή αξιολόγηση αφορά αποκλειστικά το κτιριακό κέλυφος, η συνεισφορά των συστημάτων θέρμανσης/ψύξης, ζεστού νερού χρήσης, αερισμού ή φωτισμού κλπ. δεν λαμβάνονται υπόψιν.

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, H_D και H_T

Η θερμική απόδοση ολόκληρου του κελύφους μπορεί να αξιολογηθεί από τον υπολογισμό του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας, H_D , εκφράζοντας τη ροή θερμότητας που διαπερνά το κέλυφος για θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα ίση με 1°C [81]. Ο συντελεστής H_D λαμβάνει υπόψιν τόσο τη μονωτική ικανότητα, όσο και τη γεωμετρία του κελύφους και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$H_D = \sum_{i=1}^N (U_{eq,i} \cdot A_i) \quad 12$$

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, H_T , ορίζεται από το πρότυπο ISO 14683 [82] ως το άθροισμά όλων των συντελεστών μεταφοράς που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Ο συντελεστής H_T υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$H_T = H_D + H_g + H_U + H_A$$

όπου H_g ο συντελεστής μεταφοράς του εδάφους με βάση το πρότυπο ISO 13370 [83], H_U ο συντελεστής μεταφοράς των μη-κλιματιζόμενων χώρων και H_A ο συντελεστής μεταφοράς λόγω της διείσδυσης αέρα σύμφωνα με το πρότυπο ISO 13789 [81]. Τόσο ο H_D όσο και ο H_T είναι συντελεστές μόνιμης κατάστασης και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη μονωτική ικανότητα του κελύφους, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες, τα δυναμικά χαρακτηριστικά, τα εσωτερικά φορτία, τα ηλιακά κέρδη κλπ.

Ενεργειακές ανάγκες

Το πιο αντιπροσωπευτικό μέγεθος για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του κελύφους είναι ο υπολογισμός των ετήσιων ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη, εκφρασμένες σε μονάδες ενέργειας ανά έτος [kWhr/year] ή ενέργεια ανά έτος και ανά ωφέλιμη επιφάνεια [kWhr/(year·m²)]. Εκτός από το θερμικά χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία του κελύφους, ο υπολογισμός των ενεργειακών αναγκών λαμβάνει υπόψιν τις εξωτερικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, για το ίδιο κτιριακό κέλυφος (άρα για ίδιο συντελεστή H_D) προκύπτουν διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες.

Ο προσδιορισμός των ενεργειακών αναγκών μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλοποιημένες ή πλήρως λεπτομερείς μεθόδους. Μια απλοποιημένη μέθοδος είναι η μέθοδος των Βαθμομερών, ενώ μια λεπτομερής μέθοδος είναι ο ακριβής υπολογισμός των αναγκών μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης λαμβάνοντας υπόψιν καιρικές συνθήκες, δυναμικά χαρακτηριστικά του περιβλήματος, προσανατολισμό, ηλιακά κέρδη κλπ.

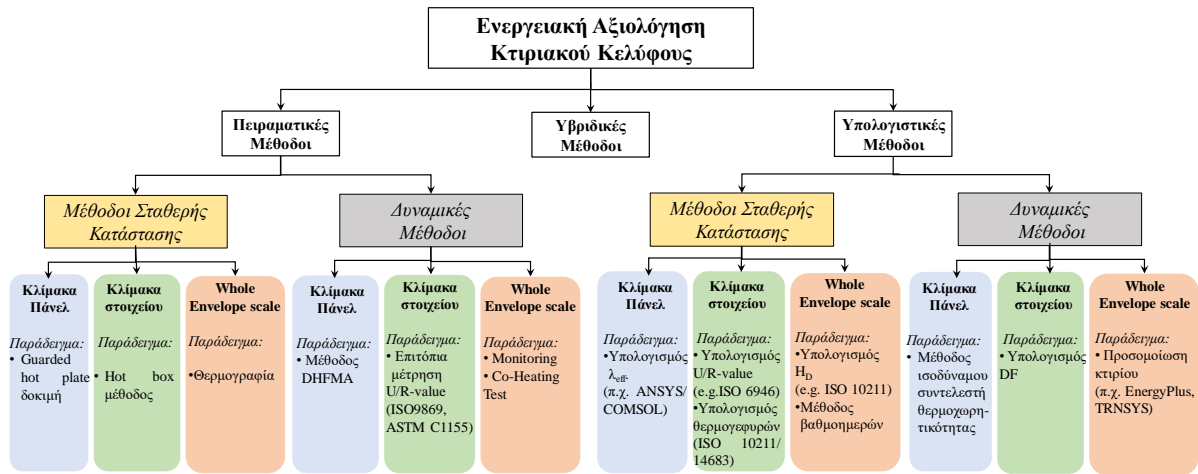
2.5 Κατηγοριοποίηση των μεθόδων ενεργειακής αξιολόγησης κελύφους

Η μέθοδοι για την ενεργειακή αξιολόγηση του κτιριακού κελύφους διαχωρίζονται σε πειραματικές, υπολογιστικές και υβριδικές [53], όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 12. Οι υβριδικές μέθοδοι συνδυάζουν τη χρήση μετρήσεων με αριθμητικές προσομοιώσεις και τεχνικές με σκοπό την βαθμονόμηση των μεθόδων ή την υποστήριξη των υπολογισμών.

Στη βιβλιογραφία απαντώνται πολυάριθμες πειραματικές μέθοδοι για την αξιολόγηση του κελύφους. Πολλές μελέτες έχουν δείξει τη σημασία της πειραματικής προσέγγισης τονίζοντας τις διαφορές σε σχέση με τους θεωρητικούς υπολογισμούς [84]. Αυτές οι μέθοδοι απαιτούν πειραματική διάταξη, διαθεσιμότητα πειραματικών συσκευών, εγκατάσταση αισθητήρων, εφαρμογή συγκεκριμένων μεθοδολογιών κλπ. Πολλά διεθνή πρότυπα περιγράφουν λεπτομερώς τη διαδικασία, τόσο για εργαστηριακές όσο και για επιτόπιες μετρήσεις. Οι πειραματικές μέθοδοι εξετάζουν τη θερμική απόδοση του κελύφους σε σταθερές ή δυναμικές συνθήκες σε όλα τα επίπεδα του κελύφους (πάνελ, στοιχείο, ολόκληρου κελύφους).

Οι υπολογιστικές μέθοδοι αφορούν τον υπολογισμό των δεικτών για την ενεργειακή αξιολόγηση του κελύφους μέσω υπολογιστικών μοντέλων. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την απλότητα του μοντέλου, τις συνθήκες προσομοίωσης (σταθερή κατάσταση ή δυναμικές προσομοιώσεις) και τα εργαλεία προσομοίωσης. Συνήθως τα μοντέλα σταθερής κατάστασης είναι περισσότερο απλοποιημένα, όμως παρέχουν σχετικά γρήγορα αποτελέσματα. Από την άλλη, τα

δυναμικά μοντέλα είναι περισσότερο πολύπλοκα απαιτώντας τη γνώση αρκετών παραμέτρων, όμως δίνουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.



Εικόνα 12 – Κατηγοριοποίηση των μεθόδων ενεργειακής αξιολόγησης κτιριακού κελύφους.

2.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι θεμελιώδεις ορισμοί, όπως το κτιριακό κέλυφος και οι θερμογέφυρες. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της ενεργειακής απόδοσης πραγματοποιείται μέσω βασικών δεικτών οι οποίοι εισήχθησαν και καθορίστηκαν. Στην παρούσα διατριβή, η ανάλυση του κελύφους χωρίζεται σε τρία επίπεδα: την κλίμακα του πάνελ, του στοιχείου και ολόκληρου του κελύφους. Για κάθε κλίμακα, παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι δείκτες, που παρέχουν συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με το επίπεδο μόνωσης και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του κελύφους. Τέλος, κατηγοριοποιήθηκαν όλες οι μέθοδοι για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του κελύφους του κτιρίου. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραπάνω δεικτών, ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες: τις πειραματικές, τις αριθμητικές και τις υβριδικές μεθόδους.

Κεφάλαιο 3^ο – Μονωτικές Σανίδες Κενού (Vacuum Insulation Panels – VIPs)

3.1 Εισαγωγή

Καθώς το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης οφείλεται στον κτιριακό τομέα, και οι διεθνείς οδηγίες απαιτούν πολύ καλά μονωμένα κελύφη, η επιστημονική κοινότητα στρέφει το ενδιαφέρον της στην ανάπτυξη καινοτόμων υλικών με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες. Ένα από τα πλέον υποσχόμενα καινοτόμα μονωτικά υλικά είναι οι μονωτικές σανίδες κενού ή Vacuum Insulation Panels (VIP), που ανήκουν στην κατηγορία των Υπέρ Μονωτικών Υλικών, με θερμική αγωγιμότητα κάτω από $0.005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Η μονωτική τους ικανότητα είναι 5 - 10 φορές καλύτερη από τα συμβατικά μονωτικά υλικά, όπως ο πετροβάμβακας ή το EPS. Ως αποτέλεσμα, το κύριο πλεονέκτημα του VIP είναι ότι μπορεί να παρέχει την ίδια θερμική αντίσταση χρησιμοποιώντας λεπτότερο υλικό.

Αν και η πρώτη εφαρμογή των VIPs ήταν το 1930 [85], η πρώτη εμπορική εφαρμογή έγινε το 1970 σε ψυγεία, καταψύκτες και στη βιομηχανία των μεταφορών με ευρεία χρήση τα επόμενα χρόνια σε αυτούς τους τομείς [86]. Από τα τέλη της δεκαετίας του 90, οι ερευνητικές εφαρμογές των VIPs έχουν στραφεί στον κτιριακό τομέα. Ο σημαντικότερος λόγος της αργής εφαρμογής τους στα κτίρια ήταν η μικρή διάρκεια ζωής τους, συγκριτικά με τα συμβατικά δομικά υλικά [87]. Επιπλέον το υψηλό τους κόστος είναι ένας ακόμη παράγοντας της χαμηλής δημοτικότητάς τους. Όμως η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στοχεύει στη μείωση του κόστους παραγωγής και στην αύξηση της διάρκειας ζωής τους για περίοδο 30 ή 50 έτη [88, 89]. Η χρήση των VIPs στα κτίρια προσφέρει υψηλή ενεργειακή απόδοση στο κέλυφος χρησιμοποιώντας λεπτότερη τοιχοποιία, με αποτέλεσμα την αύξηση της ωφέλιμης επιφάνειας του κτιρίου.

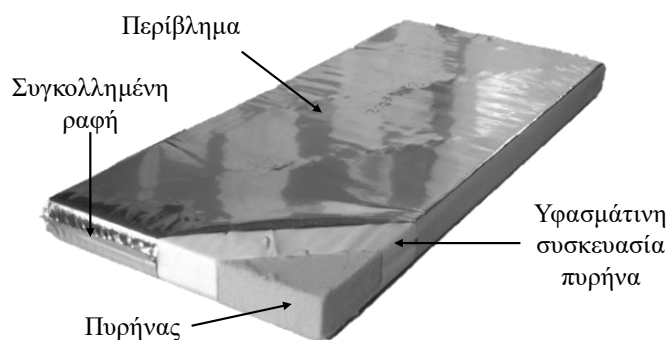
Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει μια γενική εικόνα γύρω από το θεωρητικό υπόβαθρο των VIPs και των εφαρμογών τους στον κτιριακό τομέα, αναλύοντας τις βασικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, εισάγονται οι πειραματικές και υπολογιστικές μέθοδοι για την αξιολόγηση της θερμικής τους απόδοσης. Το κεφάλαιο επικεντρώνεται στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του VIP ως μονωτικού υλικού στα κτίρια.

3.2 Βασικές Ιδιότητες

Το VIP αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: τον πυρήνα (core material) και το περίβλημα (envelope barrier). Ο πυρήνας είναι ένα ανοιχτό πορώδες υλικό του οποίου έχει αφαιρεθεί ο αέρας βρισκόμενο σε πολύ μικρές πιέσεις ($0.2 - 5 \text{ mbar}$) και διατηρείται αεροστεγές με ένα πολύ λεπτό περίβλημα (Εικόνα 13). Με την πάροδο του χρόνου, ο αέρας και οι υδατμοί διαπερνούν το περίβλημα αυξάνοντας την πίεση. Για αυτό το λόγο, σε πολλές περιπτώσεις, τοποθετούνται μέσα στον πυρήνα απορροφητές (getters) και αφυγραντές (desiccant) επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του VIP.

Ο πυρήνας δίνει το σχήμα στο πάνελ και υποβασιάζει το περίβλημα υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης. Το υλικό του πυρήνα πρέπει να ικανοποιεί κάποιες απαιτήσεις, όπως α) να έχει εξαιρετικά μικρή διάμετρο πόρων, β) να έχει 100% ανοιχτή κυψελωτή δομή, γ) να αντέχει στη συμπίεση λόγω της ατμοσφαιρικής πίεσης, δ) όσο είναι δυνατόν να είναι αδιαπέραστο στην υπέρυθη ακτινοβολία και ε)

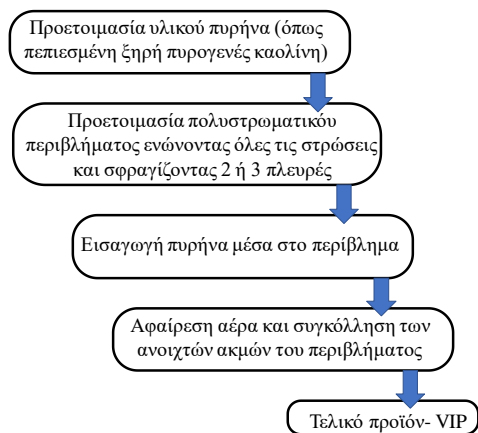
να έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε πίεση μεγαλύτερη από 50 mbar [42, 90]. Οι πυρήνες των VIPs είναι συνήθως αφοί, σκόνες και ίνες, αλλά το πιο κοινό υλικό είναι ο πυρογενές καολίνης (διοξειδίο του πυριτίου).



Εικόνα 13 - Η δομή του VIP.

Το περίβλημα αποτελείται από μία μεμβράνη πολλαπλών στρώσεων, συνολικού πάχους ίσου με 100-200 μm , που καλύπτει τις επιφάνειες του πυρήνα, συμπεριλαμβανομένων και των ακμών. Το περίβλημα είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο του VIP, καθώς είναι υπεύθυνο για τη θερμική απόδοση και τη διάρκεια ζωής του VIP διατηρώντας το κενό στον πυρήνα (άρα τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα) και εμποδίζοντας τον αέρα και τους υδρατμούς να το διαπεράσουν. Για το λόγο αυτό, η χρήση λεπτού φύλλου πολυμερούς που περιέχει ανόργανες στρώσεις είναι κοινή λόγω της πολύ χαμηλής διαπερατότητας αερίων και υδρατμών. Ωστόσο, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα ενός τέτοιου περιβλήματος οδηγεί σε αυξημένη ροή θερμότητας στις ακμές του πάνελ και στη δημιουργία ισχυρής θερμογέφυρας [42].

Τα κύρια στάδια για την παραγωγή ενός VIP παρουσιάζονται στην Εικόνα 14. Αρχικά το υλικό του πυρήνα ξηραίνεται και αναμειγνύεται με μικρή ποσότητα ινών. Στη συνέχεια, ο πυρήνας περικλείεται από μια υφασμάτινη συσκευασία (Εικόνα 15) και τοποθετείται σε ένα εργαλείο συμπίεσης όπου συμπιέζεται στη μορφή σανίδας και κατόπιν κόβεται σε συγκεκριμένες διαστάσεις. Παράλληλα, το περίβλημα παρασκευάζεται ενώνοντας όλες τις ενσωματωμένες στρώσεις και σφραγίζοντας τις δύο ή τις τρεις πλευρές. Στη συνέχεια, το συμπιεσμένο υλικό πυρήνα εισάγεται μέσα στο περίβλημα. Όλος ο αέρας αφαιρείται από τη συσκευασία και η ανοικτή πλευρά του περιβλήματος σφραγίζεται.



Εικόνα 14 – Στάδια κατά την παραγωγή VIP [91].



Εικόνα 15 – Τομή VIP.

3.2.1 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας στο VIP

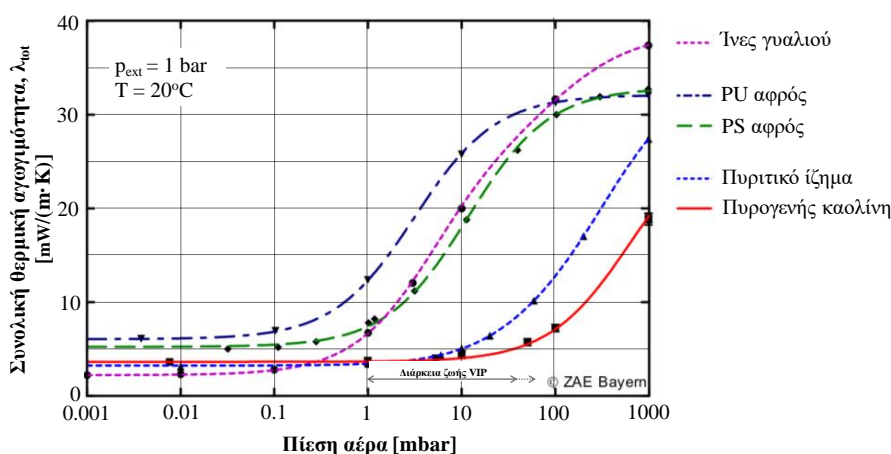
Η μεταφορά θερμότητας μέσω πορώδων υλικών, όπως το υλικό του πυρήνα, μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις διαφορετικούς μηχανισμούς: (α) αγωγή μέσω του στερεού του πυρήνα, (β) ακτινοβολία μεταξύ εσωτερικών επιφανειών των πόρων του πυρήνα, (γ) συναγωγή μέσω του αέρα που εμπεριέχεται στους πόρους και δ) αγωγή μέσω του αέρα των πόρων [42]. Οι τέσσερις μηχανισμοί θεωρούνται ότι δρουν παράλληλα και ταυτόχρονα. Στην προσέγγιση αυτή, η συνολική θερμική αγωγιμότητα, λ_{tot} , είναι το άθροισμα των τιμών που περιγράφουν τους προηγούμενους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας:

$$\lambda_{tot} = \lambda_{s,cd} + \lambda_r + \lambda_{g,cd} + \lambda_{g,cv} + \lambda_{coupling} \quad 14$$

όπου $\lambda_{s,cd}$ η θερμική αγωγιμότητα λόγω της αγωγής στο στερεό, λ_r η θερμική αγωγιμότητα που αντιστοιχεί στην ακτινοβολία, $\lambda_{g,cd}$ η αγωγιμότητα του αέρα, $\lambda_{g,cv}$ η αγωγιμότητα που αντιστοιχεί στην συναγωγή και ο όρος $\lambda_{coupling}$ είναι αγωγιμότητα που οφείλεται στην επίδραση της σύζευξης των μηχανισμών. Όταν η πίεση στο εσωτερικό του πυρήνα είναι χαμηλή, η συναγωγή του αέρα των πόρων είναι αμελητέα [91].

Η αγωγή στο στερεό του πυρήνα δημιουργείται εξαιτίας της φυσικής επαφής των μορίων του πυρήνα και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού όπως η πυκνότητα και η δομή του. Ένας τρόπος για τη μείωση της αγωγής του στερεού είναι η αύξηση του πορώδους, οδηγώντας τη ροή θερμότητας σε μεγαλύτερη διαδρομή. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία προκαλείται από την ακτινοβολία των επιφανειών μέσα στους πόρους. Η ακτινοβολία είναι σημαντικός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μέσα στον πυρήνα του VIP γιατί δεν απαιτεί κάποιο μέσο. Η συναγωγή του αέρα των πόρων εξαρτάται από τον αέρα, το μέγεθος των πόρων και το πλήθος των μορίων του αέρα μέσα στους πόρους. Η μείωση του μεγέθους των πόρων οδηγεί σε ελάττωση της συναγωγής [92].

Η Εικόνα 16 απεικονίζει την μεταβολή της συνολικής θερμικής αγωγιμότητας λ_{tot} για διαφορετικά υλικά πυρήνα σε συνάρτηση της εσωτερικής πίεσης του αέρα. Παρατηρείται ότι η θερμική αγωγιμότητα σε πολύ χαμηλές τιμές πίεσης (συνθήκες κενού) είναι μεταξύ 2 και 6 mW/(m·K) για όλα τα υλικά. Ωστόσο, καθώς η πίεση αυξάνεται, η θερμική αγωγιμότητα επίσης αυξάνεται. Σε ατμοσφαιρική πίεση, η θερμική αγωγιμότητα του πυρογενούς καολίνης είναι 18 mW/(m·K), ενώ η θερμική αγωγιμότητα όλων των άλλων υλικών κυμαίνεται μεταξύ 27 και 35 mW/(m·K).



Εικόνα 16 – Συνολική θερμική αγωγιμότητα για διάφορα υλικά πυρήνα σε συνάρτηση της εσωτερικής πίεσης [90].

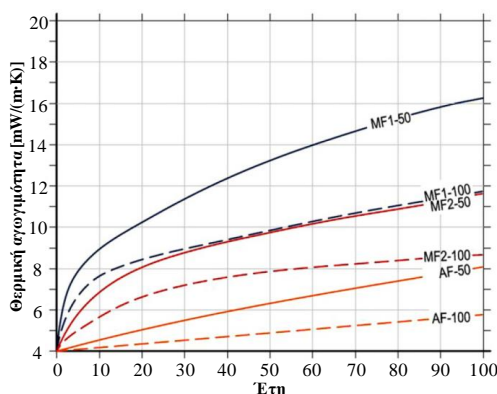
3.2.2 Γήρανση και διάρκεια ζωής

Ο πιο σύνηθες ορισμός της διάρκειας ζωής του VIP αφορά την υπέρ-μονωτική ικανότητά του και εκφράζεται ως ο χρόνος που έχει περάσει από τη στιγμή της παραγωγής μέχρι τη στιγμή που η θερμική αγωγιμότητα του VIP, $\lambda_{\text{τοίς}}$, έχει ξεπεράσει μια ορισμένη οριακή τιμή. [38, 93]. Η οριακή αυτή τιμή μπορεί να είναι $8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [94] ή $11 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [93], ξεκινώντας με μια κοινή αποδεκτή τιμή θερμικής αγωγιμότητας στο κέντρο του πάνελ ίση με $4 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [42].

Υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί γήρανσης, αρχής γενομένης από την πρόωρη καταστροφή του πάνελ. Γενικά, μια πρόωρη καταστροφή ενός VIP μπορεί να πραγματοποιηθεί από την εσφαλμένη παραγωγή. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια, η παραγωγική διαδικασία και ο ποιοτικός έλεγχος έχουν βελτιωθεί, μειώνοντας το ποσοστό της αποτυχίας κατά την παραγωγή κάτω του 1%. Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να μειωθεί η πρόωρη καταστροφή είναι η αποθήκευση των πάνελ για μια περίοδο περίπου 10 ημερών στο εργοστάσιο πριν από τον τελικό έλεγχο και τη μεταφορά. Μια άλλη αιτία πρόωρης καταστροφής του VIP είναι η φθορά του πάνελ κατά τη μεταφορά ή την τελική τοποθέτηση στο κέλυφος.

Ο φυσιολογικός μηχανισμός γήρανσης κατά τη διάρκεια της μακροχρόνιας εφαρμογής των VIPs είναι η αύξηση της εσωτερικής πίεσης λόγω της βραδείας διάχυσης του αέρα μέσω του περιβλήματος. Η αύξηση της εσωτερικής πίεσης και της περιεκτικότητας σε υγρασία μαζί με τη συνεισφορά των απορροφητών/αφυγραντών καθορίζουν τη διάρκεια ζωής των VIPs. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπερατότητα του περιβλήματος είναι ο τύπος του περιβλήματος, το μέγεθος του πάνελ και οι περιβαλλοντικές συνθήκες [95]. Μεταξύ άλλων, οι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην βελτίωση των ιδιοτήτων του περιβλήματος.

Χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί τύποι στρώσεων για το περίβλημα του VIP: τα μεταλλικά φύλλα (AF), τα μεταλλοποιημένα φύλλα (MF) και οι μεμβράνες πολυμερούς. Οι τελευταίες είναι λιγότερο συνηθισμένες λόγω της υψηλής διαπερατότητας του αέρα [42]. Η Εικόνα 17 παρουσιάζει την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των πάνελ στην πάροδο των χρόνων. Η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των AF είναι λιγότερο σημαντική σε σχέση με τα MF, καθώς 25 χρόνια μετά την παραγωγή η θερμική αγωγιμότητα των AF έχει αυξηθεί κατά 0.5 με $1 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ενώ αυτή των MF κατά 3 με $7 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ανάλογα με το μέγεθος του πάνελ. Οι Simmler και Brunner [96] πρότειναν ότι οι ισοδύναμες τιμές θερμικής αγωγιμότητας του πυρήνα για μια χρονική περίοδο 25 ετών είναι $6 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ για AF περίβλημα και $8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ για MF, υποθέτοντας πυρογενή καολίνη για υλικό πυρήνα με θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο του πάνελ ίση με $4 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, πάχος 20 mm και πλάτος 250 mm ή μεγαλύτερο.



Εικόνα 17 – Θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο του VIP για διαφορετικά μεγέθη και τύπους μεμβρανών [42].

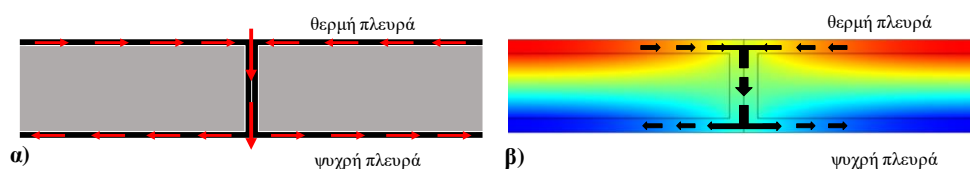
Ένα αδιαπέραστο περιβλήμα μπορεί να επιτευχθεί με μαζικές μεταλλικές στρώσεις που έχουν πάχος περίπου 10 μm. Ωστόσο, η θερμική απόδοση ενός τέτοιου VIP είναι αμφίβολη, επειδή η ροή θερμότητας στις ακμές του VIP θα είναι μεγαλύτερη από τη ροή θερμότητας μέσω του πυρήνα. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός του περιβλήματος είναι μια διαδικασία βελτιστοποίησης μεταξύ της θερμικής απόδοσης και της διάρκειας ζωής του VIP, καθιστώντας ευρέως χρησιμοποιημένα τα μεταλλοποιημένα φύλλα.

3.2.3 Άλλες ιδιότητες

Εκτός από τις θερμικές και υγροθερμικές ιδιότητες του VIP, στις κτιριακές εφαρμογές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και άλλες ιδιότητες, όπως η ηχομόνωση και η αντίσταση στη φωτιά. Το VIP, ως ενιαίο πάνελ, δεν έχει ωφέλιμη ακουστική επίδοση λόγω του πολύ μικρού πάχους [42]. Ωστόσο, οι ακουστικές ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν εφαρμόζοντας το VIP μεταξύ δύο άλλων υλικών (sandwich) [97]. Τα εμπορικά VIP είναι μη εύφλεκτα υλικά με ετικέτα φθοράς B2 σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4102 [42]. Ο πυρογενής καολίνης είναι ένα μη εύφλεκτο υλικό, αλλά το μεταλλοποιημένο πολυστρωματικό πολυμερές είναι εξαιρετικά εύφλεκτο [98]. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μια λεπτή επίστρωση επιβράδυνσης της φλόγας στην εξωτερική πλευρά του περιβλήματος για την ενίσχυση της αντοχής στη φωτιά.

3.3 Επίδραση των ακμών

Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του περιβλήματος, το οποίο περιβάλλει όλες τις επιφάνειες του πυρήνα, δημιουργεί μια σημαντική θερμογέφυρα (Εικόνα 18). Η θερμογέφυρα αυτή ονομάζεται *επίδραση των ακμών* (edge effect) και επηρεάζει τη θερμική επίδοση του VIP ορίζοντας την πραγματική θερμική αγωγιμότητα, λ_{eff} . Η λ_{eff} είναι υψηλότερη από τη θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο του πάνελ (λ_{cop}), σε περιοχή δηλαδή μακριά από την επίδραση των ακμών. Η λ_{eff} αντιπροσωπεύει τη θερμική αγωγιμότητα ενός ομογενούς υλικού με τα ίδια χαρακτηριστικά του VIP.



Εικόνα 18 – Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης των ακμών μεταξύ δύο γειτονικών VIPs [99].

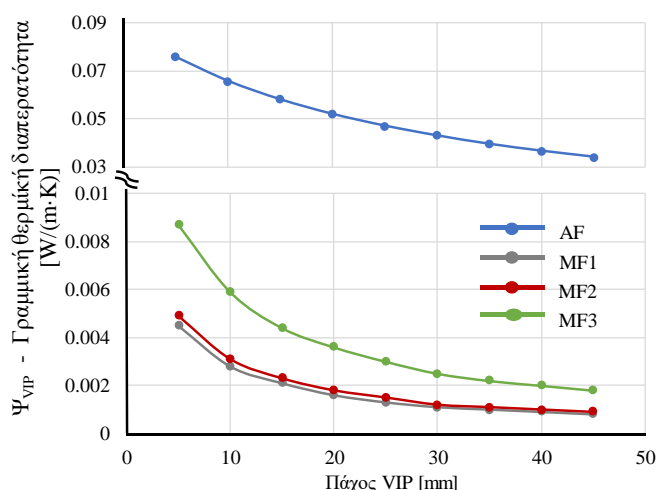
Η επιπρόσθετη ροή θερμότητας στις πλευρικές επιφάνειες του VIP εξαιτίας της επίδραση των ακμών είναι μια γραμμική θερμογέφυρα που ποσοτικοποιείται μέσω της γραμμικής θερμικής διαπερατότητας, Ψ_{VIP} , ενώ η θερμογέφυρα στις γωνίες του VIP είναι σημειακή θερμογέφυρα και ποσοτικοποιείται από τη σημειακή θερμική διαπερατότητα χ_{VIP} . Η πραγματική θερμική αγωγιμότητα ορίζεται από την εξίσωση:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cop} + \Psi_{VIP} \cdot d \cdot \frac{p}{A} + \chi_{VIP} \frac{d}{A} \quad 15$$

όπου d το πάχος, p η περίμετρος και A η επιφάνεια του VIP. Η επίδραση των σημειακών θερμογεφυρών είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με εκείνη της γραμμικής θερμογέφυρας, για αυτό το λόγο ο τρίτος όρος της εξίσωσης 15 συνήθως παραλείπεται [42].

Η επίδραση των ακμών εξαρτάται από το περίβλημα (πάχος και θερμική αγωγιμότητα), το τύπο της ραφής για το σφράγισμα του VIP, τη θερμική αγωγιμότητα του πυρήνα, το πάχος και το μέγεθος

του πάνελ. Μεταξύ αυτών, το περίβλημα του VIP έχει τη μεγαλύτερη επίδραση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 19 για τη μεταβολή της γραμμικής θερμικής διαπερατότητας (Ψ_{VIP}) διαφόρων τύπων περιβλήματος συναρτήσει του πάχους του VIP. Όπως παρατηρείται, το Ψ_{VIP} στην περίπτωση των μεταλλικών φύλλων (AF) είναι κατά 15 με 20 φορές μεγαλύτερο από εκείνο των μεταλλοποιημένων φύλλων (MF). Είναι φανερό ότι η επίδραση των AF περιβλημάτων στη θερμική επίδοση του VIP είναι σημαντική, παρά το γεγονός ότι αυξάνουν τη διάρκεια ζωής τους. Επίσης, το πάχος του VIP παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς όσο το πάχος αυξάνεται το Ψ_{VIP} μειώνεται. Όσον αφορά την επίδραση του μεγέθους του VIP (μήκος και πλάτος), από την εξίσωση 15 προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάνελ, τόσο μικρότερη είναι η πραγματική θερμική αγωγιμότητα και ταυτόχρονα τα τετράγωνα πάνελ έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα μακρόστενα ορθογώνια [100].



Εικόνα 19 – Γραμμική θερμική διαπερατότητα για διάφορα πάχη και περιβλήματα του VIP (οι τιμές προέρχονται από την αναφορά [42])

Ένα μέτρο για τη μείωση της επίδρασης των ακμών είναι η επιμήκυνση της ίδιας της θερμογέφυρας δημιουργώντας μεγαλύτερη διαδρομή στη ροή θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με πολλές αναδιπλώσεις του περιβλήματος σε σχήμα ελικοειδές – σερπαντίνα (Εικόνα 20) [99].



Εικόνα 20 – Αναδιπλώσεις περιβλήματος σε ελικοειδές σχήμα (σερπαντίνα).

Εκτός από την επίδραση των ακμών που προκαλείται μόνο από το περίβλημα του VIP, υπάρχουν δύο επιπρόσθετες θερμογέφυρες: (α) εξαιτίας του μικρού διακένου αέρα μεταξύ δύο γειτονικών VIP και (β) εξαιτίας κατασκευαστικών σφαλμάτων ή της παρουσίας δομικών αρμών και συνδέσμων. Το διάκενο αέρα μεταξύ δύο γειτονικών VIP δημιουργεί μία θερμογέφυρα η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη [42]. Ένα μέτρο για τη μείωση της επίδρασης του διακένου αέρα είναι η χρήση κολλητικής ταινίας.

3.4 Μέθοδοι αξιολόγησης θερμικής απόδοσης των VIPs

3.4.1 Πειραματικές μέθοδοι

Η πειραματική αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης των VIPs βασίζεται στη μέτρηση είτε της θερμικής αγωγιμότητας είτε της εσωτερικής πίεσης, οι οποίες είναι οι βασικές ιδιότητες που καθορίζουν τη μονωτική ικανότητα και τη διάρκεια ζωής των πάνελ. Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας γίνεται με τη μέθοδο θερμής πλάκας (Guarded Hot Plate – GHP), τη μέθοδο της μέτρησης ροής θερμότητας (Heat Flow Meter) [101], τη μέθοδο μεταβατικής επίπεδης πηγής (Transient Plane Source - TPS) κλπ, ενώ η μέτρηση της εσωτερικής πίεσης με τη μέθοδο ανύψωσης περιβλήματος [102], με τη χρήση ενσωματωμένων αισθητήρων [103], κλπ.

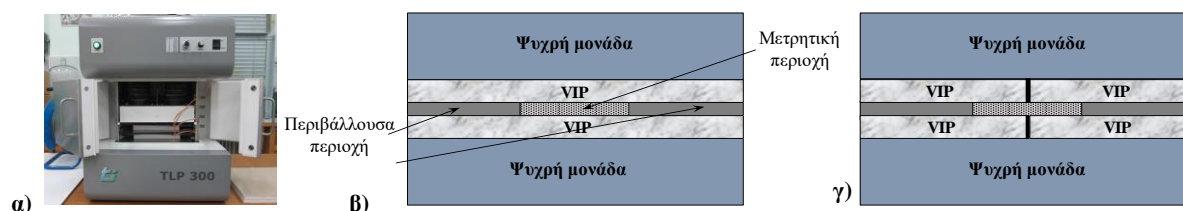
Στη μέθοδο θερμής πλάκας (GHP) η θερμική αγωγιμότητα μετριέται σε χρονικά μόνιμες συνθήκες με ακρίβεια $\pm 3\%$ [75, 100]. Η μέθοδος απαιτεί τη χρήση ειδικής συσκευής (Εικόνα 21α) και την εφαρμογή συγκεκριμένης μεθοδολογίας που περιγράφεται από διεθνή πρότυπα [75, 104, 105]. Η συσκευή αποτελείται από τη μονάδα θέρμανσης και τη μονάδα ψύξης οι οποίες περιβάλλονται από μόνωση. Η μονάδα θέρμανσης είναι τοποθετημένη μεταξύ δύο όμοιων δειγμάτων (π.χ. VIP) και χωρίζεται σε μια κεντρική περιοχή μέτρησης, A_m και μια περιβάλλουσα περιοχή (Εικόνα 21β). Η μονάδα θέρμανσης θερμαίνεται ηλεκτρικά με μια σταθερή ισχύ θέρμανσης, Q , διατηρώντας τη θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας σταθερή, T_h . Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω του δείγματος στη μονάδα ψύξης, η οποία διατηρεί τη θερμοκρασία της σταθερή, T_c . Η περιβάλλουσα περιοχή εμποδίζει την πλευρική ροή θερμότητας διατηρώντας μονοδιάστατη ροή θερμότητας. Η θερμική αγωγιμότητα ενός δείγματος με πάχος d υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο Fourier:

$$\lambda_{GHP} = d \frac{Q}{A_m \cdot (T_h - T_c)} \quad 16$$

Στη συσκευή GHP μπορεί να μετρηθεί τόσο η θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο του πάνελ, λ_{COP} , όσο και η επίδραση των ακμών ανάλογα με τη διάταξη των δειγμάτων στη συσκευή. Όταν η διάταξη των VIPs είναι όπως περιγράφεται στην Εικόνα 21β, μετριέται η θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο του πάνελ, $\lambda_{COP,GHP}$, ενώ όταν η διάταξη των VIPs είναι όπως στην Εικόνα 21γ, μετριέται η θερμική αγωγιμότητα στην ένωση δύο γειτονικών VIPs, $\lambda_{JOINT,GHP}$. Έτσι η γραμμική θερμική διαπερατότητα Ψ_{VIP} μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Psi_{VIP} = \frac{A_m (\lambda_{JOINT,GHP} - \lambda_{COP,GHP})}{2 \cdot d \cdot L_{joint}} \quad 17$$

όπου L_{joint} το μήκος της ένωσης που βρίσκεται μέσα στη μετρητική περιοχή.



Εικόνα 21 – Μέθοδος θερμής πλάκας (GHP): α) η συσκευή GHP, β) διάταξη δειγμάτων για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στο κέντρο του VIP και γ) διάταξη δειγμάτων για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στις ακμές δύο γειτονικών VIP

3.4.1 Υπολογιστικές μέθοδοι

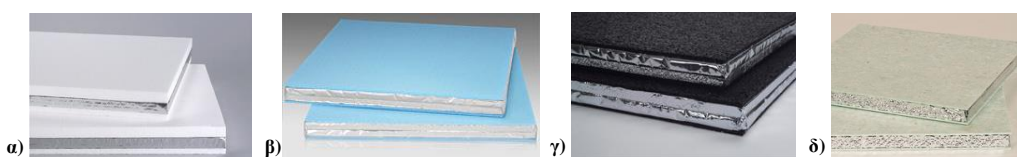
Η υπολογιστική διερεύνηση της θερμικής απόδοσης των VIPs έχει αντιμετωπιστεί από διάφορες μελέτες σε όλες τις κλίμακες του κελύφους (πάνελ, στοιχείο, ολόκληρο κέλυφος). Για την υπολογιστική προσομοίωση των πάνελ χρησιμοποιούνται 2D ή 3D μοντέλα από επικυρωμένα λογισμικά όπως HEAT, THERM, COMSOL, ANSYS κλπ. Η επίδραση των ακμών και ο υπολογισμός του Ψ_{VIP} είναι από τα συνηθέστερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται θεωρητικά τόσο με τη χρήση υπολογιστικών όσο και με τη χρήση αναλυτικών μοντέλων [106, 107]. Στις περιπτώσεις όπου το VIP διερευνάται σε κλίμακα τοιχοποιίας ή ολόκληρου του κελύφους, το VIP θεωρείται ως μια ομογενής στρώση με θερμική αγωγιμότητα ίση με την λ_{eff} , λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ακμών. Ένα άλλο ζήτημα που αντιμετωπίζεται συχνά είναι η γήρανση των VIP προσομοιώνοντας δυναμικά τη μεταφορά αέρα/υγρασίας και τη διεύδυσή τους στον πυρήνα υπολογίζοντας τη σταδιακή μείωση της θερμικής αγωγιμότητας [95].

3.5 Εφαρμογές σε κτίρια

Τα τελευταία χρόνια εξετάζεται ολοένα και περισσότερο η εφαρμογή των VIPs στον κτιριακό τομέα. Παρά την πολύ υψηλή θερμική αντίσταση που παρέχουν σε μικρό πάχος, τα VIPs έχουν σοβαρά μειονεκτήματα που καθιστούν την εφαρμογή τους σε κτίρια αμφίβολη μέχρι και σήμερα. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι ότι τα VIPs είναι πολύ εύθραυστα, ακριβά και η θερμική τους απόδοση μειώνεται με το χρόνο. Το τελευταίο είναι και το πιο σημαντικό, καθώς για να είναι ένα υλικό «δομικό», θα πρέπει να πληρούνται κάποιες απαιτήσεις μεταξύ των οποίων είναι και η μεγάλη διάρκεια ζωής (τουλάχιστον 50 έτη) [38]. Παρόλα αυτά, πολλές κτιριακές εφαρμογές έχουν διερευνηθεί τις τελευταίες δεκαετίες και τα αποτελέσματά τους είναι πολλά υποσχόμενα.

3.5.1 Μεταχείριση των VIPs

Τα VIPs είναι εύθραυστα και άκαμπτα πάνελ που παράγονται από τους κατασκευαστές σε συγκεκριμένα μεγέθη, ενώ η προσαρμογή τους κατά την εγκατάσταση (κοπή των πάνελ) είναι αδύνατη. Τα μεγέθη των VIPs θα πρέπει να έχουν τις σωστές διαστάσεις πριν την εγκατάστασή τους. Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές παρέχουν ειδικό λογισμικό για να βρουν τη βέλτιστη διάταξη των πάνελ στην επιφάνεια του κελύφους χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερα πάνελ (μικρότερη επίδραση ακμών) και μεγιστοποιώντας τη περιοχή που θα καλύπτεται με VIP [108]. Λαμβάνοντας υπόψη την ανοχή στην παραγωγή, τα VIP πρέπει να είναι ελαφρώς μικρότερα από την καλυμμένη επιφάνεια. Στην περιοχή που δεν καλύπτεται με VIP χρησιμοποιούνται συμβατικά μονωτικά λόγω τις εύκολης προσαρμοστικότητά τους [109]. Στην πράξη, η πιο συνηθισμένη αιτία καταστροφής των VIPs εμφανίζεται πριν και κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης [110]. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα VIPs θα πρέπει να εγκατασταθούν από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό και να χειρίζονται με προσοχή τα πάνελ. Σε πολλές περιπτώσεις, το VIP περιβάλλεται από ένα υλικό για μεγαλύτερη προστασία και βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες (Εικόνα 22). Τέλος, η σωστή χρήση των VIPs μπορεί να επιτευχθεί στις περιπτώσεις των προκατασκευασμένων κελυφών εξαιτίας του εργοστασιακού περιβάλλοντος και των συστημάτων αυτοματισμού.



Εικόνα 22 – Ενσωματωμένα VIP με προστατευτικό υλικό από α) EPS, β) XPS, γ) καουτσούκ και δ) ηχομόνωση [111].

3.5.2 Εφαρμογές σε νέα και υφιστάμενα κτίρια

Τα VIPs έχουν εφαρμοστεί σε κτίρια από την τελευταία δεκαετία τόσο για την κατασκευή νέων όσο και για την αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων. Η πιο κοινή εφαρμογή είναι η μόνωση τοιχοποιιών και οροφών [99]. Μόνο μερικά εκατοστά VIP είναι αρκετά για να ικανοποιηθούν σχεδόν όλοι οι εθνικοί κανονισμοί σχετικά με τα όρια του U-value [42]. Για τις περιπτώσεις αναβάθμισης όπου η εγκατάσταση εξωτερικής μόνωσης είναι αδύνατη (ιστορικά κτίρια ή πολυώροφα κτίρια κατοικιών), η εσωτερική μόνωση με VIP είναι ευεργετική, λόγω του λεπτού πάχους που επιτρέπει πολύ λιγότερη απώλεια ωφέλιμου εσωτερικού χώρου.

Στο Annex 39 [99] παρουσιάζονται 20 κτιριακές εφαρμογές των VIPs καταλήγοντας ότι είναι μια αποδοτική και εφικτή λύση για την δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων. Ωστόσο, υπάρχουν διάφορες δυσκολίες που θα πρέπει να ξεπεραστούν, κυρίως όσον αφορά το υψηλό κόστος και τη διάρκεια ζωής, προτού εισαχθεί το VIP σε ευρεία κλίμακα στον κτιριακό τομέα [99].

3.5.3 Οικονομική ανάλυση

Αν και το VIP είναι ένα καινοτόμο και ενεργειακά αποδοτικό μονωτικό υλικό, εξακολουθεί να είναι ένα ακριβό το οποίο αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα έναντι των συμβατικών μονώσεων. Για την ίδια θερμική απόδοση, το κόστος των VIPs είναι περίπου 4 έως 15 φορές υψηλότερο από τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Το υψηλό κόστος των VIPs οφείλεται στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του και ειδικά στο κόστος του υλικού του πυρήνα. Σήμερα, το κόστος των VIP κυμαίνεται από 50 έως 145 €/m² [98, 99]. Γενικά η χρήση των VIPs είναι κερδοφόρα όταν συνδυάζεται με το κέρδος εξαιτίας της αύξησης της ωφέλιμης επιφάνειας του κτιρίου, δηλαδή σε περιοχές με κρύο κλίμα και υψηλό ενοίκιο.

3.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο δόθηκε μια ανασκόπηση γύρω από το πιο ελπιδοφόρο Υπέρ Μονωτικό Υλικό, τη μονωτική σανίδα κενού (Vacuum Insulation Panel - VIP) που αποτελείται από έναν πυρήνα του οποίου έχει αφαιρεθεί ο αέρας και από ένα λεπτό περίβλημα. Οι βασικές ιδιότητες των VIPs για τη θερμική απόδοση και τη διάρκεια ζωής τους αξιολογήθηκαν εκτενώς. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην εφαρμογή των VIPs στα κτίρια συζητώντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προσφέρουν. Χωρίς αμφιβολία, η υψηλή θερμική τους απόδοση, σε συνδυασμό με τα μικρά πάχη, καθιστά το VIP μια ελκυστική λύση για κτιριακές εφαρμογές. Εντούτοις, υπάρχουν δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν πριν από την εισαγωγή τους σε μεγάλη κλίμακα στον κατασκευαστικό τομέα.

Το VIP θεωρείται καινοτόμος λύση μόνωσης με πολλαπλές προοπτικές στον τομέα των κτιρίων. Έχουν διεξαχθεί αρκετές πειραματικές και αριθμητικές μελέτες σχετικά με τις θερμικές και υγροθερμικές ιδιότητές του [87, 96, 112, 113]. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές αβεβαιότητες σχετικά με την πραγματική τους απόδοση στις εφαρμογές κτιρίων [114]. Η επιτόπια θερμική και υγροθερμική απόδοση των VIPs σε πραγματικά κτίρια είναι ένα θέμα που δεν έχει διερευνηθεί και αφορά αρκετούς ερευνητές.

Κεφάλαιο 4^ο – Πειραματική αξιολόγηση των προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση θερμικής αντίστασης τοιχοποιίας

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, η εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιριακού κελύφους μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους μέσω του υπολογισμού διαφόρων δεικτών. Μεταξύ αυτών, η θερμική αντίσταση, R-value, είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός δείκτης υποδεικνύοντας τη μονωτική ικανότητα της τοιχοποιίας. Ο θεωρητικός υπολογισμός του R-value βασίζεται στο πρότυπο ISO 6946 [67] και είναι απαραίτητος κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός κτιρίου. Όμως, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν στην πράξη εξαιτίας της μη ακριβούς γνώσης των ιδιοτήτων των υλικών, πιθανών κατασκευαστικών αστοχιών και φαινομένων πολυδιάστατης ροής θερμότητας και υγρασίας [115, 116].

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την επιτόπια μέτρηση του R-value μιας τοιχοποιίας είναι η εφαρμογή μεθόδων που περιγράφονται από διεθνή πρότυπα. Υπάρχουν τέσσερις προτυποποιημένες μέθοδοι που εισάγονται από τα πρότυπα ISO 9869 [69] και ASTM C1155 [117]. Όλες οι μέθοδοι απαιτούν μετρήσεις της εσωτερικής και εξωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και της εσωτερικής ροής θερμότητας της τοιχοποιίας για περισσότερο από 3 ημέρες. Όμως, παρά την ευρεία χρήση των προτυποποιημένων μεθόδων, δύο σοβαρά ζητήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν: η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων [118, 119]. Ταυτόχρονα, οι μέθοδοι επηρεάζονται από τις συνθήκες μέτρησης, δηλαδή από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος [116, 120].

Σε αυτή την κατεύθυνση, ο κύριος στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση των προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση R-value τοιχοποιιών σε σχέση με την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης, τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων καθώς επίσης και την επίδραση των συνθηκών μέτρησης. Συγκεκριμένα, μετά από μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση των υφιστάμενων μεθόδων για τη μέτρηση R-value, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αξιολόγηση των προτυποποιημένων μεθόδων. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσονται υπολογιστικά εργαλεία και πειραματικές διατάξεις. Όλες οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του R-value σε τρεις διαφορετικές τοιχοποιίες (ελαφριά κατασκευή ξηράς δόμησης, λιθόκτιστη παραδοσιακή τοιχοποιία και τοιχοποιία από τούβλα) υπό διαφορετικές συνθήκες μέτρησης. Οι εξεταζόμενες συνθήκες μέτρησης είναι η επιφανειακή διαφορά θερμοκρασίας και η κατεύθυνση της ροής θερμότητας (σταθερή ή εναλλασσόμενη κατά τη διάρκεια της ημέρας). Τα αποτελέσματα παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές για τον επιτόπιο υπολογισμό της θερμικής αντίστασης μιας υφιστάμενης τοιχοποιίας, την προετοιμασία των μετρήσεων και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

4.2 Τρέχουσα κατάσταση για την επιτόπια μέτρηση θερμικής απόδοσης τοιχοποιίας

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μέτρησης της θερμικής αντίστασης (R-value) ή της θερμικής διαπερατότητας (U-value) μιας τοιχοποιίας και μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις

εργαστηριακές μεθόδους και τις επιτόπιες μετρήσεις. Στις εργαστηριακές μεθόδους, η εξεταζόμενη τοιχοποιία κατασκευάζεται και ενσωματώνεται σε μια ειδική πειραματική διάταξη με ελεγχόμενες συνθήκες. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εργαστηριακή μέθοδος είναι η μέθοδος Hot Box, που περιγράφεται από τα πρότυπα ISO 8990 και ASTM C1363 [121, 122].

Από την άλλη πλευρά, οι επιτόπιες μέθοδοι αφορούν τη μέτρηση υφιστάμενων τοιχοποιιών σε πραγματικά κτίρια. Η εξεταζόμενη τοιχοποιία εκτίθεται υπό πραγματικές καιρικές συνθήκες, καθιστώντας δυσκολότερη τη διαδικασία της επεξεργασίας των μετρήσεων. Δεδομένου ότι οι καιρικές συνθήκες είναι εγγενώς δυναμικές, η μέτρηση ενός δείκτη που ορίζεται σε χρονικά μόνιμες συνθήκες, όπως το R-value και το U-value, είναι πολύπλοκη [116]. Η δυνατότητα εφαρμογής των διαφόρων μεθόδων καθορίζεται από την ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν τα δυναμικά φαινόμενα εξαιτίας της μεταβολής των κλιματικών συνθηκών.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής απόδοσης είναι ο τύπος της τοιχοποιίας. Στις ομοιογενείς τοιχοποιίες, η ανάλυση των μεθόδων βασίζεται στην παραδοχή της μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας κατά το πάχος (διεύθυνση μεταφοράς θερμότητας), επιλέγοντας μια αντιπροσωπευτική περιοχή στο κέντρο της εξεταζόμενης τοιχοποιίας, αποφεύγοντας τις θερμογέφυρες. Αντίθετα, για μη ομοιογενείς τοίχους, με αρκετές μη αμελητέες θερμογέφυρες, όπως οι ελαφρές τοιχοποιίες με χαλύβδινο σκελετό, η επιτόπια μέτρηση είναι πιο περίπλοκη. Καθώς στην πλειονότητα των περιπτώσεων ο τύπος της εξεταζόμενης τοιχοποιίας δεν είναι εκ των προτέρων γνωστός, οι πιθανές θερμογέφυρες (και συνεπώς η ομοιογένεια της τοιχοποιίας) εντοπίζονται μέσω θερμογραφίας.

4.2.1 Ομογενείς τοιχοποιίες

Η μόνη αξιόπιστη τεχνική για την ποσοτική μέτρηση του R-value μιας υπάρχουσας τοιχοποιίας είναι μέσω της τεχνικής μέτρησης ροής θερμότητας (Heat Flux Meter - HFM), η οποία είναι μια μη καταστρεπτική τεχνική που απαιτεί τις μετρήσεις της εσωτερικής ροής θερμότητας και της θερμοκρασίας στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας για μια χρονική περίοδο. Καθώς οι μετρήσεις είναι τοπικές, η περιοχή μέτρησης θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική για ολόκληρη την τοιχοποιία, επομένως οι μέθοδοι HFM πρέπει να εφαρμόζονται σε ομοιογενείς τοιχοποιίες.

Από τη δεκαετία του 1980, η επιτόπια μέτρηση του R-value ήταν θέμα πολλών ερευνητικών εργασιών με σκοπό την ανάλυση των συλλεγόμενων μετρήσεων της HFM τεχνικής [65, 70, 123-129]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για την ανάλυση: α) μοντελοποίηση του κελύφους με δίκτυα RC (ηλεκτρικά ανάλογα με τα δίκτυα ηλεκτρικής αντίστασης, R και πυκνότητας C) και χρήση εργαλείων ταυτοποίησης του συστήματος [130-135] και β) τη χρήση προτυποποιημένων μεθόδων [69, 117] (συχνά με μικρές τροποποιήσεις). Οι μέθοδοι ταυτοποίησης του συστήματος βασίζονται στην αναγνώριση των παραμέτρων ενός μοντέλου που περιγράφει τη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων ή των κτιριακών κελυφών [136] και παρέχοντας, υπό όρους, ακριβέστερα αποτελέσματα, εφόσον τα εργαλεία που αναπτύσσονται είναι επαρκώς επικυρωμένα και υπάρχει εμπειρία από τους χρήστες [137]. Από την άλλη πλευρά, οι προτυποποιημένες μέθοδοι είναι πιο πιθανό να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιούνται από λιγότερο έμπειρους χρήστες και επομένως είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες. Σε κάθε περίπτωση, είναι γνωστό ότι οι μετρήσεις R-value για την ίδια τοιχοποιία με διαφορετική μέθοδο δεν δίνουν πάντοτε τα ίδια αποτελέσματα [84].

Όσον αφορά τις προτυποποιημένες μεθόδους, υπάρχουν δύο διεθνή πρότυπα για την επιτόπια μέτρηση του R-value: το ISO 9869 και το ASTM C 1155 [69, 117]. Τα δύο πρότυπα εισάγουν τέσσερις

μεθόδους και περιγράφουν λεπτομερώς τη διαδικασία για τη μέτρηση του R-value, τα κριτήρια σύγκλισης και την προβλεπόμενη αβεβαιότητα. Πολλοί ερευνητές πρότειναν τεχνικές για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής απόδοσης των υφιστάμενων τοιχοποιιών με βάση αυτές τις προτυποποιημένες μεθόδους [119, 128, 138-141].

4.2.2 Μη ομογενείς τοιχοποιίες

Οι υπάρχουσες προτυποποιημένες μέθοδοι και τα RC μοντέλα για την επιτόπια μέτρηση του R-value ή του U-value αφορούν ομογενείς τοιχοποιίες υποθέτοντας μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας. Η επιτόπια μέτρηση της θερμικής απόδοσης για τις μη ομογενείς τοιχοποιίες είναι διαφορετική καθώς η μεταφορά θερμότητας είναι πολυδιάστατη, δημιουργώντας θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στις επιφάνειες της τοιχοποιίας. Επομένως, η μέτρηση του R-value, η οποία απαιτεί μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας σε μια αντιπροσωπευτική περιοχή και στις δύο επιφάνειες των τοίχων, είναι δύσκολη. Για να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα, η θερμική απόδοση των μη ομογενών τοίχων αξιολογείται μέσω της θερμικής διαπερατότητας, του U-value, καθώς απαιτούνται οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος αέρα (ενότητα 2.4.2).

Στους ελαφρές τοιχοποιίες χαλύβδινου σκελετού (Lightweight Steel-Framed - LSF), ο μεταλλικός σκελετός εισάγει ισχυρές θερμογέφυρες, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του μετάλλου, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη [21, 142]. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην επιτόπια μέτρηση του U-value σε αυτές τις τοιχοποιίες είναι η μέτρηση της ολικής θερμικής διαπερατότητας, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης των θερμογεφυρών στο κεντρικό τμήμα του τοίχου [143]. Αυτό το μέγεθος, δηλαδή η συνολική θερμική διαπερατότητα του τοίχου, $U_{overall}$, είναι ζωτικής σημασίας για την ενεργειακή αξιολόγηση των LSF τοιχοποιιών.

Πολλοί ερευνητές έχουν προσεγγίσει τον πειραματικό υπολογισμό του $U_{overall}$ για ελαφρές τοιχοποιίες σε εργαστηριακές συνθήκες [144-148]. Η χρήση της θερμογραφίας είναι σύνηθες σε αυτές τις περιπτώσεις [146]. Όμως οι περισσότερες από τις μεθοδολογίες αφορούν εφαρμογές σε εργαστηριακές συνθήκες με εκ των προτέρων γνωστά τη γεωμετρία και τα ενσωματωμένα υλικά. Ωστόσο, από τη βιβλιογραφία λείπει μια μέθοδος για την επιτόπια μέτρηση του $U_{overall}$ για υφιστάμενες LSF τοιχοποιίες σε πραγματικό κτίριο. Στο πλαίσιο της παρούσης διατριβής, εισάγονται δύο μέθοδοι για την επιτόπια μέτρηση του $U_{overall}$ σε LSF τοιχοποιίες, η μέθοδος των αντιπροσωπευτικών σημείων (Representative Points Method - RPM) και η μέθοδος σταθμισμένης περιοχής (Weighted Area Method - WAM) που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5).

4.3 Προτυποποιημένες μέθοδοι για την επιτόπια μέτρηση θερμικής αντίστασης

Τα δύο διεθνή πρότυπα που προτείνουν μεθόδους για τη μέτρηση του R-value για υπάρχουσες τοιχοποιίες με τη χρήση επιτόπιων μετρήσεων είναι το ISO 9869 και το ASTM C 1155. Το ISO 9869 εισάγει τη Μέθοδο Μέσης Τιμής (Average Method) και τη Δυναμική Μέθοδο (Dynamic Method), ενώ το πρότυπο ASTM C 1155 εισάγει την Αθροιστική Μέθοδο (Summation Method) και τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (Sum of Least Square – SLS). Για τη μέτρηση του R-value, όλες οι μέθοδοι απαιτούν τη μέτρηση της εσωτερικής και εξωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και της εσωτερικής ροής θερμότητας της εξεταζόμενης τοιχοποιίας. Ωστόσο, το ISO 9869 δηλώνει ότι εάν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος αντικαταστήσουν τις επιφανειακές θερμοκρασίες, μπορεί να μετρηθεί η συνολική θερμική αντίσταση (R_{tot}) ή η θερμική διαπερατότητα, U-value της τοιχοποιίας (ενότητα 2.4.2).

Πίνακας 1 – Περιγραφή των τεσσάρων προτυποποιημένων μεθόδων.

Μέθοδος	Υπολογισμός R-value	Κριτήρια σύγκλισης	Αβεβαιότητα
Average	$R = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^N q_j}$	<p>Για τη μέτρηση μιας τιμής R-value:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Η διάρκεια των μετρήσεων πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 3 ημερών – Η τιμή υπολογιζόμενη στο τέλος των μετρήσεων να μην διαφέρει πάνω από 5% σε σχέση με την αντίστοιχη 24 ώρες πριν. – Το αποτέλεσμα λαμβάνοντας υπόψη τα πρώτα 2/3 των μετρήσεων να μην διαφέρουν πάνω από 5% σε σχέση με το αποτέλεσμα λαμβάνοντας τα τελευταία 2/3 των μετρήσεων – Η αποθηκευμένη θερμότητα στην τοιχοποιία να μην διαφέρει πάνω από 5% σε σχέση με τη θερμότητα που διαπερνά καθόλη τη περίοδο μέτρησης. 	14–28%
Summation	$R = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^N q_j}$	<p>Για τη μέτρηση μιας τιμής R-value:</p> <p>Ο παράγοντας σύγκλισης (CR_n) ορίζεται από:</p> $CR_n = \frac{R(t) - R(t-n)}{R(t)}$ <ul style="list-style-type: none"> – Η τιμή n είναι ένα χρονικό διάστημα μεταξύ 6 και 48 ωρών. – Ο παράγοντας CR_n πρέπει να είναι κάτω από 0.10 για τουλάχιστον 3 περιόδους του n <p>Για τη λήψη πολλών τιμών R-value ο συντελεστής διακύμανσης πρέπει να είναι κάτω από 10%.</p>	20%
Dynamic	<p>1. Η εσωτερική ροή θερμότητας q_i (W/m^2) για κάθε χρονική στιγμή t_i υπολογίζεται από την εξίσωση:</p> $q_i = \frac{1}{R}(T_{si,i} - T_{se,i}) + K_1 T_{si,i} + K_2 T_{se,i} + \sum_n P_n \sum_{j=i-p}^{i-1} T_{si,j} (1 - \beta_n) \beta_n (i-j) + \sum_n Q_n \sum_{j=i-p}^{i-1} T_{se,j} (1 - \beta_n) \beta_n (i-j)$ <p>2. Δημιουργείται ένα γραμμικό σύστημα:</p> $\vec{q} = X \cdot \vec{Z}$ <p>\vec{Z} ένας πίνακας που περιλαμβάνει όλες τις άγνωστες παραμέτρους, μεταξύ αυτών και το R-value και X πίνακας από μετρούμενες θερμοκρασίες.</p> <p>3. Η λύση προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της διαφοράς $S^2 = (q_i^{calc} - q_i)^2$ ανάμεσα σε πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές ροής θερμότητας, σύμφωνα με την εξίσωση</p> $\vec{Z} = [(X)'(X)]^{-1} (X)' q$	<p>Για τη μέτρηση μιας τιμής R-value:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Η προσαρμογή των καμπυλών μεταξύ θεωρητικών και υπολογιζόμενων τιμών ροής θερμότητας υποδεικνύει την ακρίβεια του αποτελέσματος. – Η αβεβαιότητα (όπως ορίζεται από το πρότυπο) πρέπει να είναι μικρότερη από 10% για πιθανότητα 0.90. 	13%
Sum of Least Square (SLS)	<p>1. Η τοιχοποιία θεωρείται ως μία θερμικά ισοδύναμη ομογενείς τοιχοποιία μιας στρώσης και ίδιου πάχους d</p> <p>2. Η εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας είναι:</p> $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = (\rho \cdot C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t}$ <p>όπου λ_{eq} και $(\rho \cdot C_p)_{eq}$ η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα, αντίστοιχα.</p> <p>3. Η εξίσωση επιλύεται με τη μέθοδο Crank-Nicholson, υποθέτοντας τιμές για τη λ_{eq} και τη $(\rho \cdot C_p)_{eq}$, και ορίζοντας οριακές συνθήκες από τις μετρήσεις.</p> <p>4. Οι υπολογιζόμενες τιμές ροής θερμότητας ή εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας συγκρίνονται με τις μετρήσεις..</p>	<p>Για τη μέτρηση μιας τιμής R-value:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Η προσαρμογή των καμπυλών μεταξύ θεωρητικών και υπολογιζόμενων τιμών ροής θερμότητας υποδεικνύει την ακρίβεια του αποτελέσματος. <p>Για περισσότερες τιμές R-value, η αβεβαιότητα παραμένει μέσα στο 10% για 95% διάστημα εμπιστοσύνης.</p>	11%

Για τη μέτρηση του R-value, οι αισθητήρες θερμοκρασίας και ροής θερμότητας πρέπει να εγκατασταθούν σε αντιπροσωπευτική περιοχή του τοίχου, δηλαδή σε ομοιογενείς περιοχές, αποφεύγοντας τις θερμογέφυρες. Τα πρότυπα περιγράφουν λεπτομερώς τη μεθοδολογία, καθώς και τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται προκειμένου να ληφθούν αποδεκτά αποτελέσματα (κριτήρια σύγκλισης). Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό του R-value, τα κριτήρια σύγκλισης και η αναμενόμενη αβεβαιότητα (για 95% πιθανότητα) κάθε μεθόδου συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Ειδικές απαιτήσεις, περιορισμοί και χαρακτηριστικά των μεθόδων παρέχονται από τα πρότυπα και τη βιβλιογραφία. Οι Average και Summation μέθοδοι είναι παρόμοιες και οι πιο ευρέως γνωστές εξαιτίας της απλότητάς τους και της ταχείας εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Ωστόσο για τη γρήγορη και ακριβή σύγκλιση των μεθόδων, απαιτείται μια υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Δεδομένου ότι το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη τη θερμοχωρητικότητα της τοιχοποιίας, αυτές οι μέθοδοι είναι ευαίσθητες στη βαθμιαία αύξηση ή μείωση της μέσης θερμοκρασίας της τοιχοποιίας, ιδίως σε βαριές κατασκευές [117]. Από την άλλη πλευρά, η Dynamic και η SLS μέθοδοι είναι πιο αξιόπιστες και λαμβάνουν υπόψη τη θερμοχωρητικότητα της τοιχοποιίας [69, 117], όμως απαιτούν την ανάπτυξη σύνθετων αλγορίθμων και υπολογιστικών εργαλείων για την ανάλυση των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά.

Ο κύριος περιορισμός όλων των προτυποποιημένων μεθόδων είναι ότι η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από τις συνθήκες μέτρησης και τη διάρκεια της μετρητικής περιόδου. Γενικά, οι βέλτιστες συνθήκες μέτρησης είναι η υψηλή διαφορά θερμοκρασίας με χαμηλές θερμοκρασιακές μεταβολές. Η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης μπορεί να οριστεί ως η ελάχιστη διάρκεια που απαιτείται από τη μέθοδο για την παροχή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τα πρότυπα, αυτή η διάρκεια μπορεί να κυμανθεί από 72 ώρες σε περισσότερες από 7 ημέρες, ανάλογα με τη μέθοδο, τις συνθήκες μέτρησης και τον τύπο της εξεταζόμενης τοιχοποιίας. Στην περίπτωση των Average και Summation μεθόδων, η απαιτούμενη διάρκεια, αναφέρεται ως χρόνος σύγκλισης και καθορίζεται από διαφορετικά κριτήρια σύγκλισης για κάθε μέθοδο. Ωστόσο, η απαιτούμενη διάρκεια των Dynamic και SLS μεθόδων δεν ορίζεται σαφώς από τα πρότυπα.

Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας γίνεται σαφές ότι οι αυτές οι αδυναμίες των προτυποποιημένων μεθόδων (η επίδραση των συνθηκών μέτρησης και η διάρκεια της μετρητικής περιόδου) περιορίζουν τη δυνατότητα χρήσης των μεθόδων και μπορούν δυνητικά να αυξήσουν την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων. Οι ακόλουθες ενότητες διερευνούν τα παραπάνω ζητήματα αξιολογώντας τις προτυποποιημένες μεθόδους ως προς την απαιτούμενη μετρητική περίοδο, τη μεταβλητότητα (επαναληψιμότητα) των αποτελεσμάτων και την επίδραση των συνθηκών μέτρησης στις δύο αυτές παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, οι προτυποποιημένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε τρεις διαφορετικούς τύπους τοιχοποιίας υπό διαφορετικές συνθήκες μέτρησης. Παράλληλα, εισάγεται και επικυρώνεται ένα κριτήριο για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης μετρητικής περιόδου για τις Dynamic και SLS μεθόδους.

4.4 Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων για την εφαρμογή των μεθόδων

Για την εφαρμογή των προτυποποιημένων μεθόδων με σκοπό την αξιολόγησή τους αναπτύχθηκαν μοντέλα σε κώδικες Fortran. Τα μοντέλα χρησιμοποιούν τις μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας και ροής θερμότητας και υπολογίζουν τις τιμές R-value εξετάζοντας τα κριτήρια σύγκλισης σύμφωνα με τα πρότυπα.

Για την περίπτωση της SLS, η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας (Πίνακας 1) μπορεί να λυθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, καθένας από τους οποίους προσεγγίζεται ως μια διαφορετική μέθοδος. Η πρώτη προσέγγιση, η SLS_HF (άθροισμα ελαχίστων τετραγώνων του σφάλματος μεταξύ της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης ροής θερμότητας) χρησιμοποιεί τις μετρούμενες εσωτερικές και εξωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες ως οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια. Στη δεύτερη προσέγγιση, η SLS_TIN μέθοδος (άθροισμα ελαχίστων τετραγώνων του σφάλματος μεταξύ της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης εσωτερικής θερμοκρασίας), χρησιμοποιεί ως οριακές συνθήκες τις μετρήσεις από την εξωτερική επιφανειακή θερμοκρασία και τη ροή θερμότητας με σκοπό τον υπολογισμό της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας.

4.5 Παράμετροι σύγκρισης των προτυποποιημένων μεθόδων

Στην παρούσα μελέτη, οι προτυποποιημένες μέθοδοι αξιολογούνται και συγκρίνονται σε σχέση με την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης και την μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων για διαφορετικές συνθήκες μέτρησης. Εκτός από τη διάρκεια και τις συνθήκες μέτρησης, υπάρχουν διάφοροι άλλοι παράγοντες που μπορούν να αυξήσουν τη συνολική αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, όπως η ακρίβεια του εξοπλισμού μέτρησης, η ομοιογένεια της εξεταζόμενης τοιχοποιίας, η παρουσία υγρασίας και η θερμική ακτινοβολία [69]. Για τη σύγκριση των μεθόδων στην παρούσα διατριβή, οι παράγοντες αυτοί αποφεύχθηκαν όσο το δυνατόν και η επιρροή τους ήταν η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.

Η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης ορίζεται ως η μικρότερη διάρκεια των μετρήσεων που απαιτείται για την επίτευξη αποδεκτού αποτελέσματος σύμφωνα με τα πρότυπα. Σε αυτή τη μελέτη, το R-value υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας σύνολα δεδομένων με διαφορετικές διάρκειες, από 3 ημέρες έως και 30 ημέρες. Η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης υπολογίζεται ως εξής:

α) Για τις Average και Summation μεθόδους, η απαιτούμενη περίοδος μέτρησης είναι η μικρότερη διάρκεια κατά την οποία πληρούνται τα κριτήρια σύγκλισης, όπως περιγράφονται από τα πρότυπά τους.

β) Για τις μεθόδους Dynamic, SLS_HF και SLS_TIN η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης δεν ορίζεται από τα πρότυπα. Για το λόγο αυτό, εισάγεται ένα νέο κριτήριο για την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης ως η διάρκεια κατά την οποία οι τρεις τελευταίες ημερήσιες τιμές R-value δεν αποκλίνουν περισσότερο από $\nu=3\%$. Διαπιστώθηκε ότι για υψηλότερες τιμές ν , η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων αυξάνεται σε μη αποδεκτά επίπεδα. Επιπλέον, η χρήση περισσότερων από τις 3 τελευταίες τιμές οδήγησε σε μεγαλύτερη απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης χωρίς περαιτέρω βελτίωση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων.

Η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων εξετάζεται με τον υπολογισμό του συντελεστή μεταβλητότητας, % CV, (γνωστού και ως σχετική τυπική απόκλιση) των τιμών R-value και υπολογίζεται για $M \geq 3$, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$CV(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (R_i - \bar{R})^2}{M-1}} \cdot \frac{1}{\bar{R}} \cdot 100\% \quad 18$$

Το σφάλμα των αποτελεσμάτων υπολογίζεται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% από την εξίσωση:

$$e(\%) = 2 \cdot CV(\%)$$

Τα πρότυπα ορίζουν τη μέγιστη τιμή για τον αναμενόμενο συντελεστή μεταβλητότητας. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO, το CV της Average και Dynamic μεθόδου αναμένεται να είναι 10% και 6% (για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%), αντίστοιχα. Όταν η διακύμανση υπερβαίνει αυτές τις τιμές, τα αποτελέσματα δεν απορρίπτονται, αλλά αυξάνεται αναλόγως η αβεβαιότητά τους. Από την άλλη πλευρά, το CV της Summation και των SLS μεθόδων αναμένεται να είναι 10% και 6% (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%), αντίστοιχα. Όταν όμως το CV υπερβαίνει αυτές τις τιμές, τα αποτελέσματα δεν γίνονται αποδεκτά σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1155.

4.6 Πειραματική διάταξη

Οι προτυποποιημένες μέθοδοι συγκρίνονται ως προς την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης και τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη για την εφαρμογή μεθόδων σε τρεις τοιχοποιίες υπό διαφορετικές συνθήκες μέτρησης.

4.6.1 Περιγραφή τοιχοποιιών

Για τη σύγκριση των προτυποποιημένων μεθόδων εξετάστηκαν τρεις τοιχοποιίες:

- Τοίχος Α: Τοιχοποιία ξηράς δόμησης
- Τοίχος Β: Παραδοσιακή λιθόκτιστη τοιχοποιία
- Τοίχος Γ: Τοιχοποιία από τούβλα

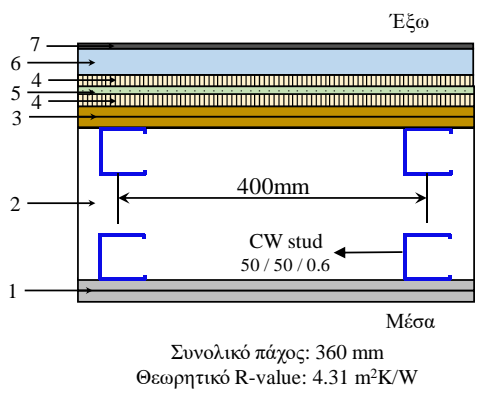
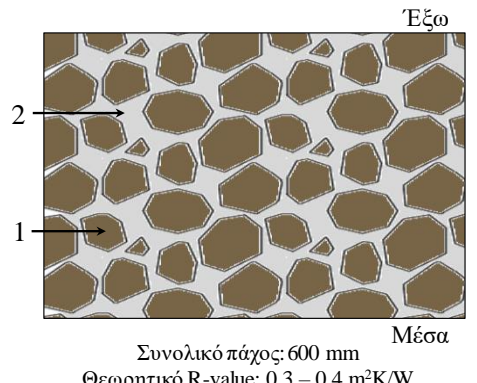
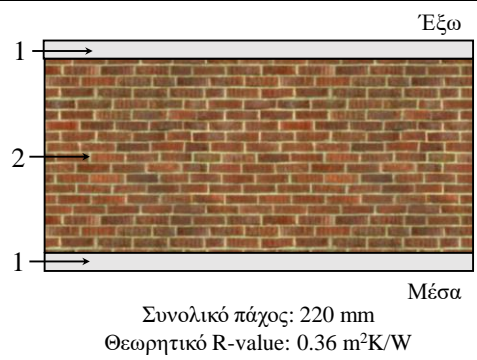
Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τη διαστρωμάτωση κάθε τοίχου με τα ενσωματωμένα υλικά. Ο τοίχος Α, πάχους 360 mm, βρίσκεται σε ένα διώροφο πειραματικό οικίσκο στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, οποίος περιγράφεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 6 (ενότητα 6.2). Πρόκειται για μια κατασκευή ξηράς δόμησης βασισμένη σε τοιχοποιία με ενσωματωμένο σύστημα εξωτερικής θερμικής μόνωσης. Ο τοίχος Β είναι μια βαριά λιθόκτιστη τοιχοποιία, πάχους 600 mm, που βρίσκεται σε ένα ιστορικό κτίριο στην Αθήνα [149]. Ο τοίχος Γ είναι ένας τυπικός τοίχος από τούβλα, πάχους 220mm, που βρίσκεται στο ίδιο ιστορικό κτίριο.

4.6.2 Μετρητική διάταξη

Για τις επιτόπιες μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας με σκοπό τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης κάθε τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός TRSYS01 της Hukseflux [150]. Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με δύο αισθητήρες ροής θερμότητας και δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Οι αισθητήρες εγκαταστάθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1046-91 [151] και τοποθετήθηκαν σε θερμικά ομοιογενείς περιοχές αποφεύγοντας τις θερμογέφυρες. Η ομοιογένεια των εξεταζόμενων τοιχοποιιών εξετάστηκε χρησιμοποιώντας υπέρυθη θερμογραφία. Η ηλιακή ακτινοβολία στις μετρούμενες περιοχές αποφεύχθηκε είτε επιλέγοντας τους εξωτερικούς βόρειους τοίχους είτε χρησιμοποιώντας σκιασμένες επιφάνειες.

Πίνακας 2 – Η διαστρωμάτωση και τα υλικά των τριών εξεταζόμενων τοιχοποιιών.

	Διαστρωμάτωση τοιχοποιίας	α/α	Υλικό	Πάχος [mm]
Τοίχος Α	 <p>Εξω</p> <p>Μέσα</p> <p>Συνολικό πάχος: 360 mm Θεωρητικό R-value: 4.31 m²K/W</p>	1	Γυψοσανίδα	2 × 12.5
		2	Διάκενο αέρα	190
		3	Τσιμεντοσανίδα	2 × 12.5
		4	Πετροβάμβακας	20
		5	VIP	15
		6	Θερμοσοβάς	50
		7	Επίχρισμα	5.5
Τοίχος Β	 <p>Εξω</p> <p>Μέσα</p> <p>Συνολικό πάχος: 600 mm Θεωρητικό R-value: 0.3 – 0.4 m²K/W</p>	1	Ασβεστόλιθος	60 – 70 % του συνολικού πάχους
		2	Επίχρισμα	30 – 40 % του συνολικού πάχους
Τοίχος Γ	 <p>Εξω</p> <p>Μέσα</p> <p>Συνολικό πάχος: 220 mm Θεωρητικό R-value: 0.36 m²K/W</p>	1	Επίχρισμα	40
		2	Τούβλο	140

4.6.3 Μετρητικές συνθήκες

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκαν έξι διαφορετικές περιπτώσεις: μια περίπτωση για το τοίχο Α, τρεις περιπτώσεις για τον τοίχο Β και δύο περιπτώσεις για τον τοίχο Γ, καλύπτοντας διαφορετικές συνθήκες μέτρησης. Ο Πίνακας 3 συνοψίζει τη συνολική διάρκεια μέτρησης, τη μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο επιφανειών των τοιχοποιιών και την κατεύθυνση της ροής θερμότητας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (σταθερή ή εναλλασσόμενη κατά τη διάρκεια της ημέρας) για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 3 – Μετρητικές συνθήκες των εξεταζόμενων περιπτώσεων.

Περίπτωση	Διάρκεια [ημέρες]	$\overline{\Delta T}$ [°C] = $(\overline{T_{in}} - \overline{T_{out}})$	Κατεύθυνση ροής θερμότητας	
Τοίχος Α	Α	27	11.0	Σταθερή
Τοίχος Β	Β.1	130	-2.2	Σταθερή
	Β.2	130	0.9	Σταθερή
	Β.3	38	-1.6	Σταθερή
Τοίχος Γ	Γ.1	66	0.4	Εναλλασσόμενη
	Γ.2	28	0.6	Σταθερή

4.7 Αποτελέσματα

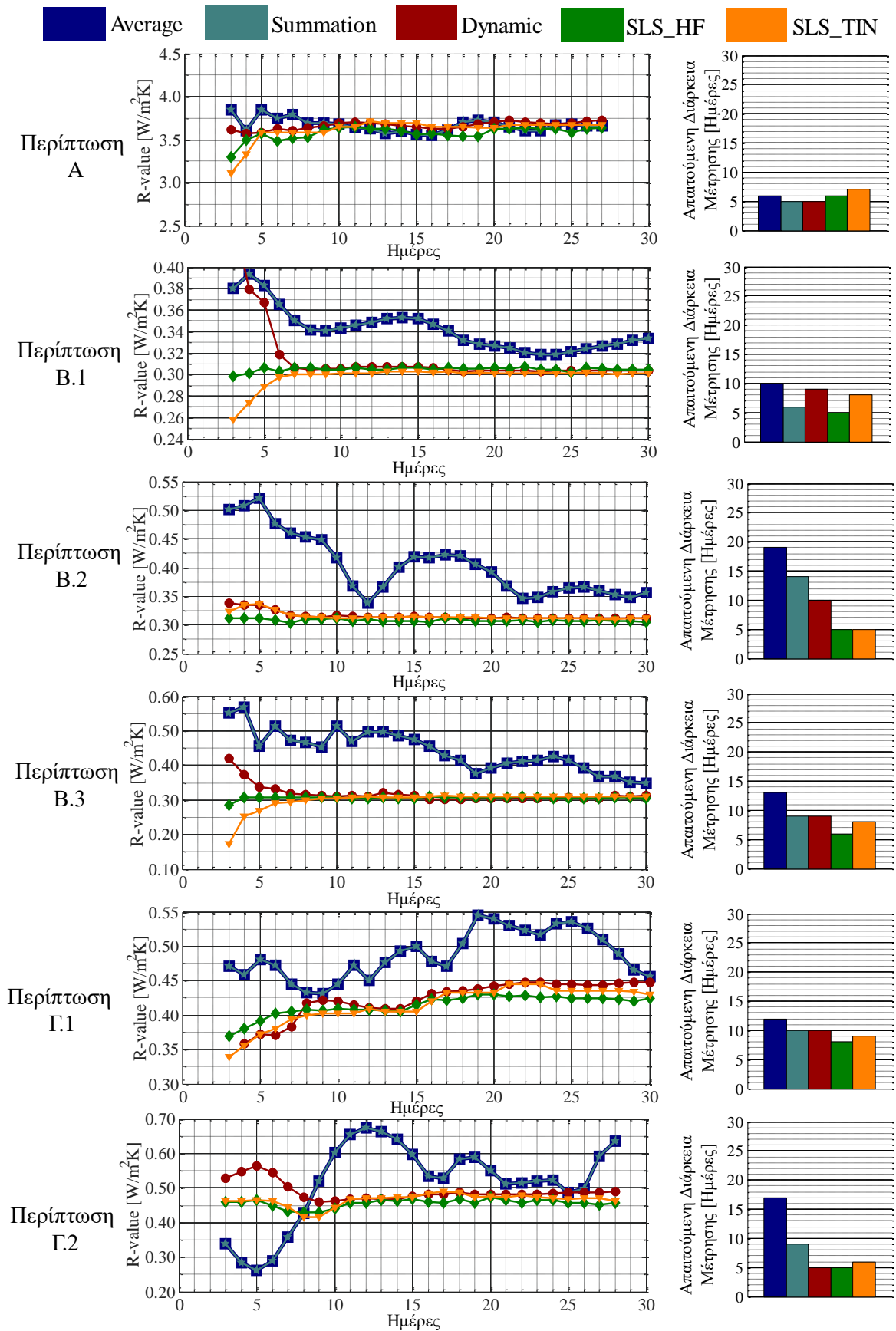
Οι προτυποποιημένες μέθοδοι αξιολογούνται ως προς την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης και τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων τους. Εξετάζεται η επίδραση των συνθηκών μέτρησης (διαφορά θερμοκρασίας και κατεύθυνση της ροής θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας) στις παραπάνω παραμέτρους.

4.7.1 Υπολογισμός απαιτούμενης διάρκειας μέτρησης

Η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης για κάθε μέθοδο εξετάστηκε για τις έξι περιπτώσεις. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τις τέσσερις προτυποποιημένες μεθόδους και η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης, η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με την ενότητα 4.5. Σημειώνεται ότι τα πρώτα αποτελέσματα εμφανίζονται την τρίτη ημέρα καθώς είναι η ελάχιστη περίοδος μέτρησης σύμφωνα με τα πρότυπα.

Τα αποτελέσματα των Average και Summation μεθόδων έχουν την ίδια εξέλιξη στο χρόνο, δεδομένου ότι η τιμή R-value υπολογίζεται από την ίδια εξίσωση (Πίνακας 1). Ωστόσο, η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης για τις δύο μεθόδους διαφέρει εξαιτίας των διαφορετικών κριτηρίων σύγκλισης. Στην περίπτωση Α, όπου η θερμοκρασιακή διαφορά είναι υψηλή (11°C), οι Average και Summation μέθοδοι απαιτούν 6 και 5 ημέρες αντιστοίχως, για να εξάγουν αποτέλεσμα το οποίο ικανοποιεί τα κριτήρια τους. Επιπλέον, τα αποτελέσματα είναι κοντά στις τιμές R-value των άλλων τριών μεθόδων. Στις άλλες περιπτώσεις, όπου η θερμοκρασιακή διαφορά είναι χαμηλή, οι δύο μέθοδοι απαιτούν 6 έως 20 ημέρες για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που να πληρούν τα κριτήρια τους. Ωστόσο, σε αυτές τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των Average και Summation μεθόδων είναι διαφορετικά και φαίνεται να υπερεκτιμούν την τιμή R-value σε σύγκριση με τις άλλες τρεις μεθόδους.

Όσον αφορά τις μεθόδους Dynamic, SLS_HF και SLS_TIN, παρατηρείται ότι εξάγουν κοντινά αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις. Η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10 ημερών και φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης. Επίσης, παρατηρείται ότι η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης αυτών των μεθόδων δεν επηρεάζεται από τη θερμική μάζα της εξεταζόμενης τοιχοποιίας. Όσον αφορά τις δύο μεθόδους SLS, παρά το γεγονός ότι βασίζονται στην ίδια γενική ιδέα (επίλυση εξίσωση μεταφοράς θερμότητας), τα αποτελέσματά τους είναι διαφορετικά και η απαιτούμενη περίοδος μέτρησης της SLS_HF είναι πάντοτε μικρότερη ή ίση με αυτή της SLS_TIN μεθόδου.



Εικόνα 23 – Χρονική εξέλιξη των τιμών R-value και η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης για κάθε μέθοδο.

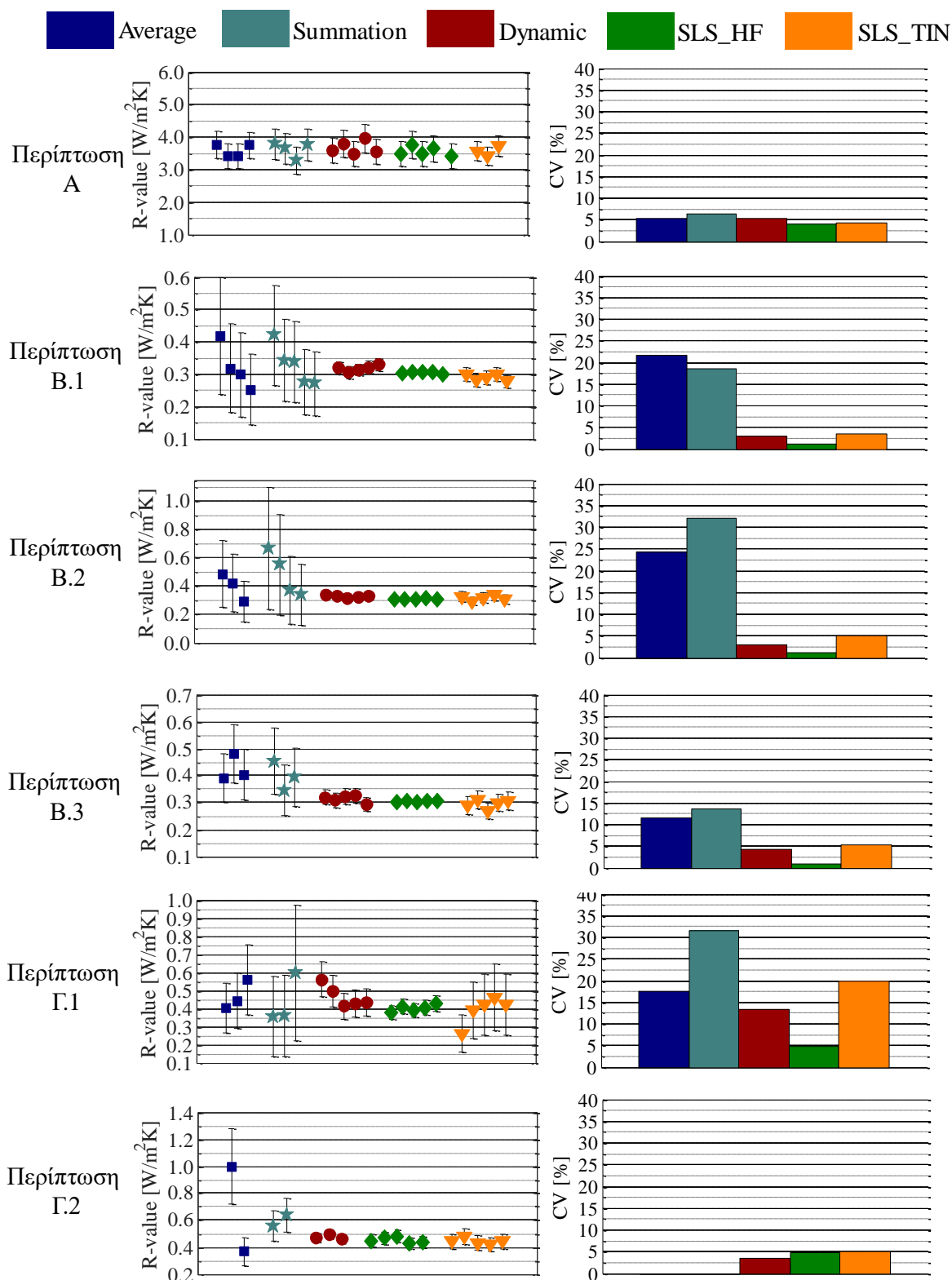
4.7.2 Υπολογισμός μεταβλητότητας

Σε αυτή την ενότητα διερευνάται η μεταβλητότητα των μεθόδων σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Κάθε μέθοδος εξάγει ανεξάρτητα αποτελέσματα R-value που πληρούν τα κριτήρια σύγκλισης και υπολογίζεται ο συντελεστής μεταβλητότητας (CV). Επιπλέον, όσον αφορά τις Dynamic, SLS_HF και SLS_TIN μεθόδους, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν πληρούσαν το κριτήριο για την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης που περιγράφεται στην ενότητα 4.5. Η Εικόνα 24 απεικονίζει τα αποτελέσματα των τιμών R-value για τις έξι περιπτώσεις και το συντελεστή μεταβλητότητας CV για όλες τις μεθόδους. Στην περίπτωση A, η υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο επιφανειών του τοίχου οδηγεί σε κοντινά αποτελέσματα και χαμηλή μεταβλητότητα για όλες τις μεθόδους.

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις (B.1, B.2, B.3, Γ.1 και Γ.2) όπου η θερμοκρασιακή διαφορά είναι χαμηλότερη από 3°C, το CV των Average και Summation μεθόδων είναι σημαντικά υψηλότερο. Η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων για τις Average και Summation μεθόδους υπερβαίνει το 10%. Επομένως, τα αποτελέσματα της Summation απορρίπτονται σύμφωνα με την ASTM. Όσον αφορά τη Average μέθοδο, η τιμή του CV είναι υψηλότερη από την αναμενόμενη, ωστόσο το πρότυπο ISO δεν απορρίπτει τα αποτελέσματα.

Όσον αφορά τη μέθοδο SLS_HF, το CV είναι πάντοτε μικρότερο από 5% σε όλες τις περιπτώσεις, υποδεικνύοντας ότι η μεταβλητότητα αυτής της μεθόδου δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες μέτρησης. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση του τοίχου B, ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι εξαιρετικά χαμηλός (1.0% - 1.3%), παρά το γεγονός ότι η διάρκεια των δεδομένων ήταν μικρότερη από 6 ημέρες και η θερμική μάζα της τοιχοποιίας ήταν μεγάλη.

Στις περιπτώσεις A, B.1, B.2, B.3 και Γ.2, όπου η κατεύθυνση της ροής θερμότητας είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας (Πίνακας 3), το CV των Dynamic και SLS_TIN μεθόδων είναι μικρότερο από 6%. Αντίθετα, στην περίπτωση Γ.1 όπου η κατεύθυνση της ροής θερμότητας εναλλάσσεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, το CV των δύο μεθόδων υπερβαίνει το 8%. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της SLS_TIN μεθόδου δεν γίνονται αποδεκτά σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM, επειδή το CV είναι υψηλότερο από 6%. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα της Dynamic μεθόδου γίνονται αποδεκτά σύμφωνα με το πρότυπο ISO, αλλά η αβεβαιότητα αυξάνεται. Οι μέθοδοι Dynamic και SLS_TIN διερευνήθηκαν περαιτέρω για την περίπτωση Γ.1 για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και αποδείχθηκε ότι η μεγάλη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων είναι ανεξάρτητη από τη διάρκεια μέτρησης.



Εικόνα 24 – Αποτελέσματα R-value και του συντελεστή μεταβλητότητας (CV) για κάθε μέθοδο.

4.8 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε την πειραματική αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης των υπάρχουσών τοιχοποιιών σε πραγματικά κτίρια. Η θερμική απόδοση αξιολογείται με την επιτόπια

μέτρηση της θερμικής αντίστασης (R-value). Μετά από μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζοντας όλες τις σύγχρονες μεθόδους για την πειραματική αξιολόγηση κτιριακού κελύφους, το ενδιαφέρον δόθηκε στις προτυποποιημένες μεθόδους για την επιτόπια μέτρηση του R-value. Τα δύο πρότυπα, ISO 9869 και ASTM C1155, εισάγουν τέσσερις μεθόδους: την Average, τη Summation, τη Dynamic και τη Sum of Least Square (διερευνώντας δύο προσεγγίσεις τη SLS_HF και τη SLS_TIN). Όλες οι μέθοδοι απαιτούν μετρήσεις της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και της εσωτερικής ροής θερμότητας. Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων προτυποποιημένων μεθόδων ως προς την επίδραση των συνθηκών μέτρησης, στην απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης και στη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκαν υπολογιστικά μοντέλα για την εφαρμογή μεθόδων σε τρεις τοιχοποιίες υπό διαφορετικές μετρητικές συνθήκες.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των επιφανειών της τοιχοποιίας και η κατεύθυνση της ροής θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας επηρεάζει σημαντικά την απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης και τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, οι Average και Summation μέθοδοι απαιτούν υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά και, κατά συνέπεια, σταθερή κατεύθυνση της ροής θερμότητας, προκειμένου να εξάγουν αποδεκτά και αξιόπιστα αποτελέσματα σε μικρή περίοδο μέτρησης. Σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασιακή διαφορά ήταν χαμηλότερη από 3°C, τα αποτελέσματα των Average και Summation έχουν υψηλούς και μη αποδεκτούς συντελεστές μεταβλητότητας. Επομένως, οι Average και Summation μέθοδοι δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν η θερμοκρασιακή διαφορά είναι πολύ χαμηλή ή τα κριτήρια τους θα πρέπει να είναι αυστηρότερα.

Για τις Dynamic, SLS_HF και SLS_TIN μεθόδους, όπου η απαιτούμενη διάρκεια μέτρησης δεν καθορίζεται από τα πρότυπά τους, ορίστηκε ως η διάρκεια κατά την οποία οι τρεις τελευταίες ημερήσιες τιμές R-value δεν αποκλίνουν περισσότερο από 3%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτό το κριτήριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτές τις μεθόδους σε οποιοσδήποτε συνθήκες μέτρησης.

Όσον αφορά τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων, οι Dynamic και SLS_TIN μέθοδοι φαίνεται να επηρεάζονται μόνο από την κατεύθυνση της ροής θερμότητας. Αυτές οι μέθοδοι φαινόταν να απαιτούν μια σταθερή κατεύθυνση της ροής θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας προκειμένου να προκύψουν αποτελέσματα με την αναμενόμενη μεταβλητότητα. Στην περίπτωση που η κατεύθυνση της ροής θερμότητας είναι σταθερή, τα αποτελέσματά τους δεν μεταβάλλονται περισσότερο από 6%, που είναι η αναμενόμενη τιμή σύμφωνα με τα πρότυπα. Από την άλλη πλευρά, όταν η κατεύθυνση της ροής θερμότητας αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο συντελεστής μεταβλητότητας των Dynamic και SLS_TIN μεθόδων φτάνει το 8% και 18%, αντίστοιχα. Αντίθετα, η μέθοδος SLS_HF δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες μέτρησης παρέχοντας γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής αντίστασης ενός υπάρχοντος τοίχου, την προετοιμασία των μετρήσεων και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

Κεφάλαιο 5^ο – Εισαγωγή δύο μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση ολικής θερμικής διαπερατότητας σε ελαφρές τοιχοποιίες χαλύβδινου σκελετού

5.1 Εισαγωγή

Καθώς τις τελευταίες δεκαετίες τα ελαφρά κτίρια χαλύβδινου σκελετού (Lightweight Steel-Framed – LSF) είναι ευρέως διαδεδομένα στον τομέα των κατασκευών, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη θερμική τους απόδοση. Ο μεταλλικός σκελετός αποτελείται από επαναλαμβανόμενες κατακόρυφες χαλύβδινες στήλες, που ονομάζονται ορθοστάτες (studs), στερεωμένα σε οριζόντιους δοκούς, που ονομάζονται δρομείς (runners). Το κενό μεταξύ των ορθοστατών είναι εν μέρει ή πλήρως γεμισμένο με μόνωση ή με αέρα. Η θέση της μόνωσης ταξινομεί τις LSF τοιχοποιίες σε τρεις τύπους: ψυχρού, υβριδικού και θερμού LSF σκελετού [3]. Στη ψυχρή LSF τοιχοποιία, ολόκληρη η μόνωση βρίσκεται στο κενό μεταξύ των ορθοστατών. Στην υβριδική LSF τοιχοποιία, η μόνωση κατανέμεται μεταξύ της εξωτερικής πλευράς της τοιχοποιίας και του διακένου μεταξύ των ορθοστατών. Τέλος, όταν ολόκληρη η μόνωση βρίσκεται εκτός του μεταλλικού σκελετού, η LSF τοιχοποιία είναι θερμού τύπου.

Η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών εισάγει μια μεγάλη θερμογέφυρα λόγω της υψηλής θερμικής τους αγωγιμότητας. Η επίδραση των μεταλλικών ορθοστατών στη θερμική απόδοση δεν είναι αμελητέα και πρέπει να ληφθεί υπόψη, κυρίως σε ψυχρές και υβριδικές LSF τοιχοποιίες [21]. Παράλληλα, ο συνηθέστερος τρόπος για την εκτίμηση της θερμικής απόδοσης μιας τοιχοποιίας είναι ο υπολογισμός της θερμικής διαπερατότητας, U-value, όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.4.2. Στις LSF τοιχοποιίες, η επίδραση των θερμογεφυρών λόγω των επαναλαμβανόμενων ορθοστατών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη θερμική διαπερατότητα [143]. Το μέγεθος αυτό, που ονομάζεται συνολική θερμική διαπερατότητα, $U_{overall}$, είναι απαραίτητο για την εκτίμηση της θερμικής απόδοσης των LSF τοιχοποιιών. Καθώς οι μεταλλικοί ορθοστάτες βρίσκονται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, ο υπολογισμός του $U_{overall}$ στη δημιουργούμενη επαναλαμβανόμενη γεωμετρία είναι επαρκής για τον προσδιορισμό του $U_{overall}$ ολόκληρου του κεντρικού τμήματος της τοιχοποιίας.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4), η επιτόπια μέτρηση της θερμικής διαπερατότητας υπάρχουσας τοιχοποιίας είναι εξέχουσας σημασίας για την εκτίμηση της θερμικής απόδοσης. Ωστόσο, η εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις μεθόδους επιτόπιας μέτρησης θερμικής απόδοσης, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 4.2.2), έφερε στο φως την απουσία μιας επιτόπιας μεθόδου σχετικά με τις LSF τοιχοποιίες. Αυτή η ανάγκη έχει επίσης επισημανθεί από αρκετές μελέτες [3, 146].

Για την κάλυψη αυτής της ανάγκης, στο παρόν κεφάλαιο εισάγονται δύο νέες μη καταστροφικές μέθοδοι για την επιτόπια μέτρηση της συνολικής θερμικής διαπερατότητας μιας LSF τοιχοποιίας, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών που οφείλονται στους μεταλλικούς ορθοστάτες ($U_{overall}$). Οι δύο προτεινόμενες μέθοδοι, η *Μέθοδος των Αντιπροσωπευτικών Σημείων* (Representative Points Method - RPM) και η *Μέθοδος της Σταθμισμένης Περιοχής* (Weighted Area Method - WAM), συνδυάζουν την ανάλυση της εξεταζόμενης τοιχοποιίας με υπέρυθρη

θερμογραφία και την καταγραφή - επεξεργασία μετρήσεων θερμοκρασιών εσωτερικού/εξωτερικού αέρα και ροής θερμότητας. Για την επεξεργασία των μετρήσεων, πρέπει να επιλεγεί μια προτυποποιημένη μέθοδος, η οποία εισάγεται από τα πρότυπα ISO 9869 [69] και ASTM C1155 [117] (Πίνακας 1). Σε αυτό το κεφάλαιο, οι προτεινόμενες μέθοδοι επικυρώνονται θεωρητικά τόσο σε ψυχρές όσο και σε υβριδικές LSF τοιχοποιίες, και ταυτόχρονα επικυρώνονται πειραματικά σε μια γνωστή ψυχρή LSF τοιχοποιία.

5.2 Προτεινόμενες μέθοδοι

Δύο νέες μέθοδοι εισάγονται για την επιτόπια μέτρηση της συνολικής θερμικής διαπερατότητας ($U_{overall}$) των LSF τοιχοποιιών: Η Μέθοδος Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Points Method - RPM) και η Μέθοδος της Σταθμισμένης Περιοχής (Weighted Area Method - WAM). Οι μέθοδοι αφορούν τη μέτρηση της θερμικής διαπερατότητας στο κεντρικό τμήμα μιας υπάρχουσας LSF τοιχοποιίας, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης των επαναλαμβανόμενων κατακόρυφων μεταλλικών ορθοστατών $U_{overall}$. Οι δύο μέθοδοι αποτελούνται από πέντε διαφορετικά στάδια:

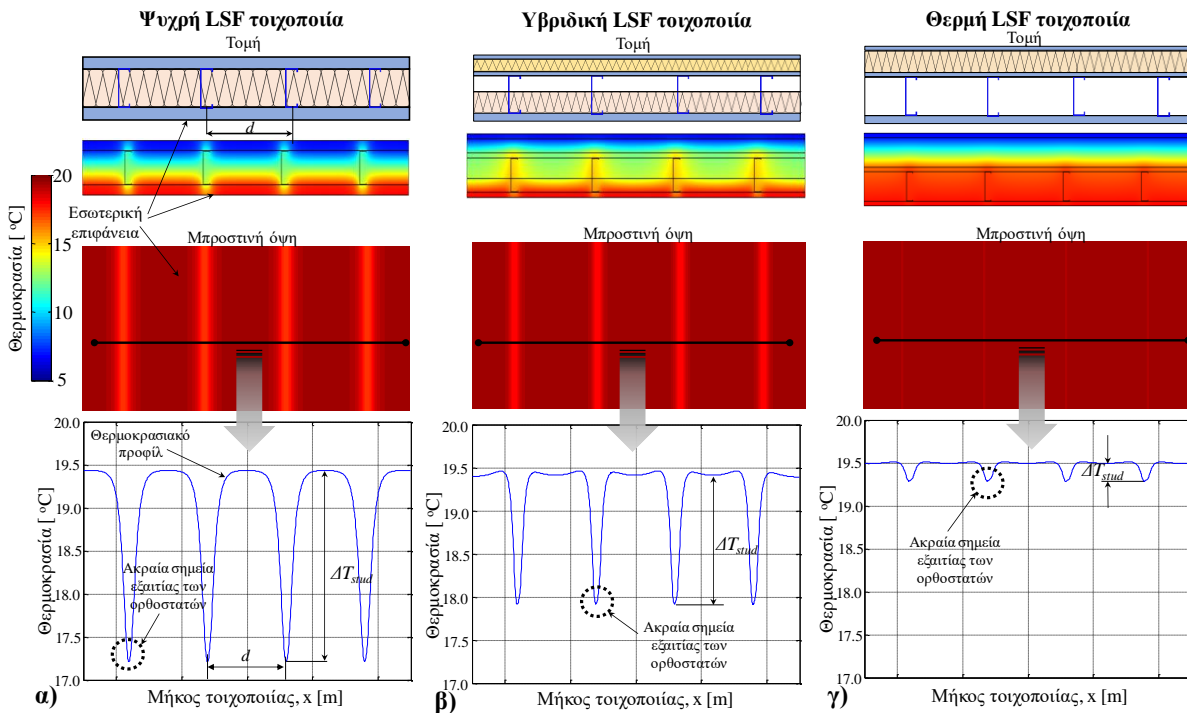
- Υπέρυθρη θερμογραφία της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου.
- Ανάλυση θερμογραφημάτων για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ.
- Ανάλυση του θερμοκρασιακού προφίλ, σύμφωνα με κάθε μέθοδο.
- Λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας εσωτερικού/εξωτερικού αέρα και ροής θερμότητας στις θέσεις που υποδεικνύονται από κάθε μέθοδο.
- Υπολογισμός της συνολικής θερμικής διαπερατότητας του τοίχου, $U_{overall}$.

5.2.1 Θερμογραφία και υπολογισμός θερμοκρασιακού προφίλ

Στις LSF τοιχοποιίες, η παρουσία των ορθοστατών οδηγεί σε μια πολυδιάστατη μεταφορά θερμότητα μέσα στον τοίχο, με αποτέλεσμα τη διακύμανση της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια. Το γράφημα της επιφανειακής θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου σε ένα μέσο ύψος ονομάζεται θερμοκρασιακό προφίλ (Εικόνα 25). Το σχήμα του θερμοκρασιακού προφίλ εξαρτάται από το σχήμα των ορθοστατών, τα υλικά του τοίχου και τη θερμοκρασιακή διαφορά εσωτερικού/εξωτερικού χώρου.

Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν τον προσδιορισμό του θερμοκρασιακού προφίλ της εξεταζόμενης τοιχοποιίας. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας χωρίς να απαιτείται η γνώση της διαστρωμάτωσης της τοιχοποιίας, εκ των προτέρων. Η θερμογραφία πραγματοποιείται σε υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά εσωτερικού/εξωτερικού χώρου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1060 [152]. Μέσω των θερμογραφημάτων υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των μεταλλικών ορθοστατών, d , η οποία είναι συνήθως σταθερή στο κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας, δημιουργώντας μια επαναλαμβανόμενη γεωμετρία.

Για την εφαρμογή των μεθόδων, η μέγιστη διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας, ΔT_{stud} , εξαιτίας των ορθοστατών, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.7°C , ανάλογα με την ανάλυση της θερμοκάμερας, με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 25, αυτό επιτυγχάνεται κυρίως στη ψυχρή LSF τοιχοποιία και κατά περίπτωση στην υβριδική τοιχοποιία. Από την άλλη πλευρά, στη θερμή LSF τοιχοποιία το ΔT_{stud} είναι μικρό με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια το θερμοκρασιακό προφίλ και ως εκ τούτου οι δύο μέθοδοι δε μπορούν να εφαρμοστούν.



Εικόνα 25 – Επίδραση ορθοστατών στο θερμοκρασιακό προφίλ για τρεις τύπους LSF τοιχοποιιών με ίδιες οριακές συνθήκες ($T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ and $T_{out} = 5^{\circ}\text{C}$) : α) ψυχρής, β) υβριδικής και γ) θερμής LSF τοιχοποιίας.

5.2.2 Μέθοδος των Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Point Method – RPM)

Η Μέθοδος των Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Points Method - RPM) βασίζεται στην υπόθεση ότι η ροή θερμότητας σε συγκεκριμένα σημεία στην εσωτερική επιφάνεια της εξεταζόμενης τοιχοποιίας είναι πάντα ίση με την μέση ροή θερμότητας ολόκληρης της επιφάνειας. Αυτά τα σημεία, ονομάζονται «Αντιπροσωπευτικά Σημεία» και απεικονίζονται στην Εικόνα 26. Η βασική ιδέα της RPM είναι ότι το $U_{overall}$ μετριέται μέσω μετρήσεων ροής θερμότητας στα Αντιπροσωπευτικά Σημεία και θερμοκρασιών στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο.

Ο προσδιορισμός των Αντιπροσωπευτικών Σημείων λαμβάνει υπόψη το πλάτος του αισθητήρα ροής θερμότητας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τις μετρήσεις της ροής θερμότητας σε επόμενο στάδιο. Σε κάθε σημείο της εσωτερικής επιφάνειας ορίζεται η μέση θερμοκρασία κατά το εύρος του πλάτους του αισθητήρα ροής θερμότητας, \hat{T} , από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\hat{T} = \frac{1}{w} \int_{-w/2}^{w/2} T dx \quad 20$$

όπου w το πλάτος του αισθητήρα ροής θερμότητας και T η θερμοκρασία που λαμβάνεται από το θερμοκρασιακό προφίλ.

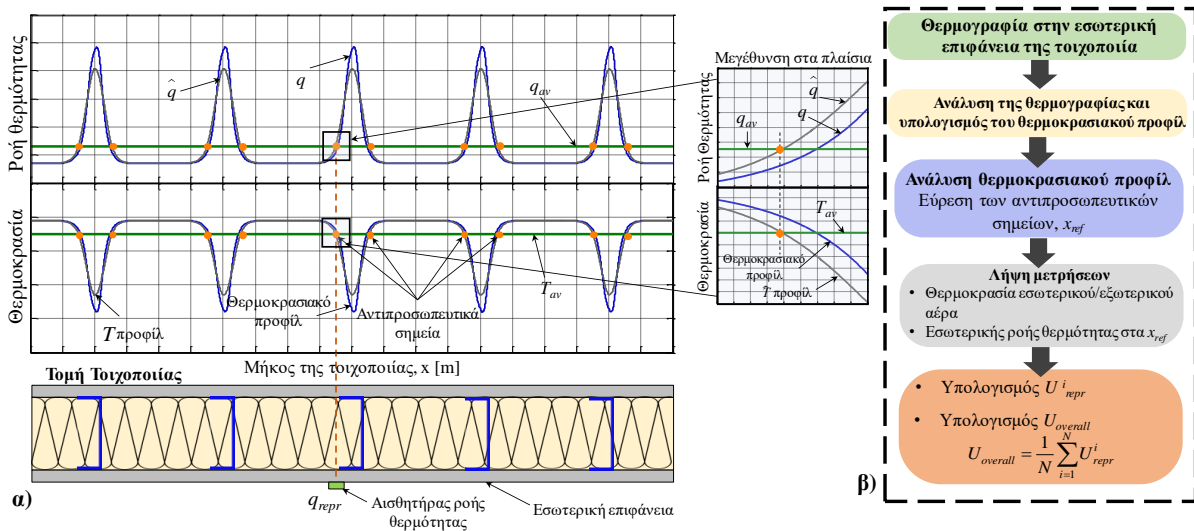
Κατά συνέπεια, σε κάθε σημείο η μέση ροή θερμότητας κατά το εύρος του πλάτους του αισθητήρα ροής θερμότητας, \hat{q} , ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\hat{q} = \frac{1}{w} \int_{-w/2}^{w/2} q dx \quad 21$$

όπου q είναι η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου.

Η θέση κάθε Αντιπροσωπευτικού Σημείου, x_{repr} , βρίσκεται στη τομή της καμπύλης \hat{T} με τη μέση θερμοκρασία του θερμοκρασιακού προφίλ, T_{av} :

$$\hat{T}_i^{repr} = T_{av} \quad 22$$



Εικόνα 26 – RPM: α) τα αντιπροσωπευτικά σημεία και η θέση του αισθητήρα ροής θερμότητας και β) το διάγραμμα ροής της μεθόδου.

Οι απαιτούμενες μετρήσεις της ροής θερμότητας λαμβάνονται τοποθετώντας το κέντρο του αισθητήρα ροής θερμότητας στο σημείο x_{repr} (Εικόνα 26α). Ακόμη, οι μετρήσεις εσωτερικού και εξωτερικού αέρα λαμβάνονται από αισθητήρες επαρκώς αεριζόμενους και προστατευμένους από την ηλιακή και θερμική ακτινοβολία [69]

Ο προσδιορισμός της θερμικής διαπερατότητας στο αντιπροσωπευτικό σημείο, U_{repr} , πραγματοποιείται με τη βοήθεια των μετρήσεων (εσωτερικής/εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα και ροής θερμότητας) καθώς και με την εφαρμογή μιας προτυποποιημένης μεθόδου (Average, Summation, Dynamic, SLS_HF και SLS_TIN), όπως εισάγονται από τα πρότυπα ISO 9869 [69] και ASTM C1155 [117] και αναλύθηκαν εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4). Όταν πληρούνται τα κριτήρια της επιλεγμένης μεθόδου, προσδιορίζεται το U_{repr} . Για τη μέτρηση του $U_{overall}$ απαιτείται η μέτρηση τουλάχιστον δύο τιμών U_{repr} ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή ως εξής:

$$U_{overall} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{repr}^i \quad 23$$

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για να ληφθούν τουλάχιστον τρεις ανεξάρτητες τιμές για το $U_{overall}$, σε διαφορετικές θέσεις του κεντρικού τμήματος της LSF τοιχοποιίας. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο μέσος όρος των τιμών $U_{overall}$ και είναι αποδεκτό μόνο όταν ο συντελεστής

μεταβλητότητας (CV, εξίσωση 18) των τιμών $U_{overall}$ είναι μικρότερος από 10%. Το διάγραμμα ροής για τη RPM μέθοδο απεικονίζεται στην Εικόνα 26β.

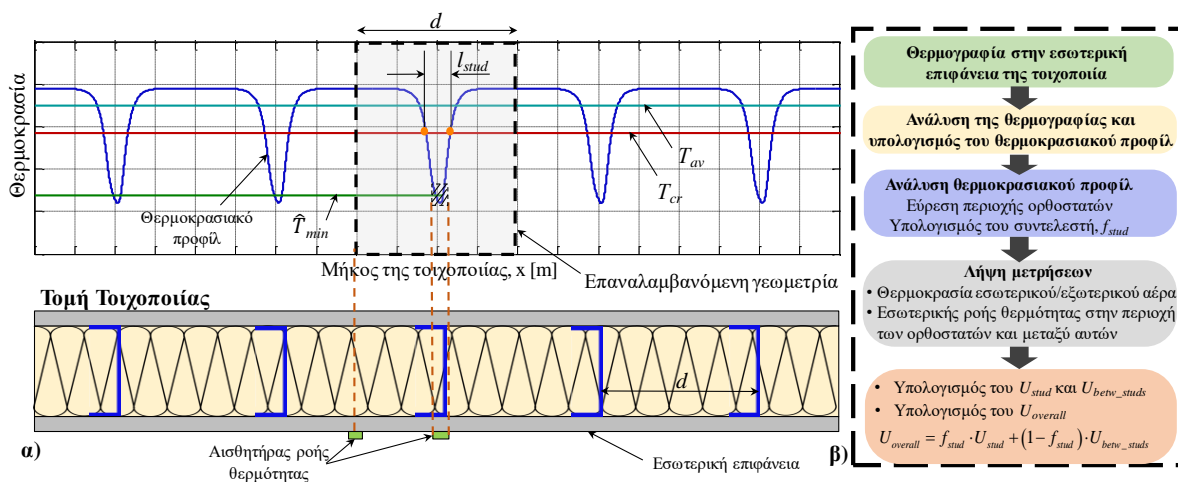
5.2.3 Μέθοδος Σταθμισμένης Περιοχής (Weighted Area Method – WAM)

Η Μέθοδος Σταθμισμένης Περιοχής (Weighted Area Method - WAM) βασίζεται στην ιδέα της Μεθόδου των Ζωνών (Zone Method), που εισάγεται από την ASHRAE [153]. Και στις δύο μεθόδους, το $U_{overall}$ υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των U-values που λαμβάνονται από την περιοχή των ορθοστατών και από την περιοχή μεταξύ αυτών. Σύμφωνα με τη WAM, η περιοχή των ορθοστατών, και κατά συνέπεια ο συντελεστής σταθμίσεως, υπολογίζεται από το θερμοκρασιακό προφίλ. Το μήκος αυτής της περιοχής των ορθοστατών (Εικόνα 27α), l_{stud} , προσδιορίζεται από την τομή του θερμοκρασιακού προφίλ με την κρίσιμη θερμοκρασία, T_{cr} , που ορίζεται από την εξίσωση:

$$T_{cr} = T_{betw_studs} - \frac{(T_{av} - \hat{T}_{min})}{2} \quad 24$$

όπου T_{betw_studs} είναι η θερμοκρασία που παρατηρείται στην περιοχή μεταξύ των ορθοστατών, T_{av} είναι η μέση θερμοκρασία και \hat{T}_{min} είναι η ελάχιστη θερμοκρασία λαμβάνοντας υπόψιν το πλάτος του αισθητήρα ροής θερμότητας (εξίσωση 20).

Σύμφωνα με τη WAM, λαμβάνονται μετρήσεις της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα καθώς και της ροής θερμότητας στις δύο περιοχές. Δύο αισθητήρες ροής θερμότητας τοποθετούνται στην εσωτερική επιφάνεια στην περιοχή των ορθοστατών και στην περιοχή μεταξύ των ορθοστατών (Εικόνα 27α). Οι τιμές ροής θερμότητας από κάθε αισθητήρα και οι θερμοκρασίες αέρα, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των U-value στην περιοχή των ορθοστατών, U_{stud} , και στην περιοχή μεταξύ των ορθοστατών U_{betw_studs} . Ο υπολογισμός των θερμοκλών διαπερατοτήτων, U_{stud} και U_{betw_studs} , πραγματοποιείται μέσω μιας προτυποποιημένης μεθόδου, όπως αναφέρεται και στην περίπτωση της RPM.



Εικόνα 27 – WAM: α) υπολογισμός του l_{stud} και οι θέσεις των αισθητήρων ροής θερμότητας και β) το διάγραμμα ροής της μεθόδου.

Το $U_{overall}$ της εξεταζόμενης LSF τοιχοποιίας υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των U_{stud} και U_{betw_studs} από την εξίσωση:

$$U_{overall} = f_{stud} \cdot U_{stud} + (1 - f_{stud}) \cdot U_{betw_studs} \quad 25$$

όπου ο συντελεστής, f_{stud} , υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$f_{stud} = \frac{l_{stud}}{d} \quad 26$$

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για τουλάχιστον τρεις φορές για να ληφθούν τουλάχιστον τρεις ανεξάρτητες τιμές $U_{overall}$. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο μέσος όρος των τιμών $U_{overall}$ και είναι αποδεκτό μόνο όταν ο συντελεστής μεταβλητότητας, CV (εξίσωση 18) είναι μικρότερος από 10%. Το διάγραμμα ροής για τη WAM μέθοδο απεικονίζεται στην Εικόνα 27β.

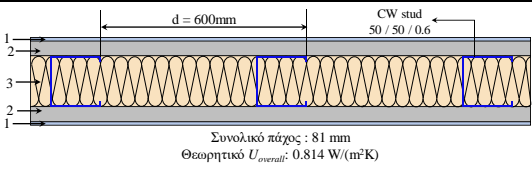
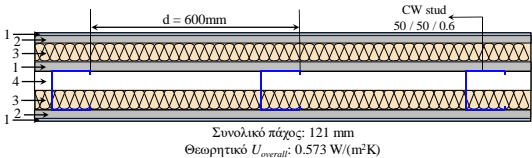
5.3 Θεωρητική επικύρωση των μεθόδων

Στην παρούσα ενότητα, οι προτεινόμενες μέθοδοι εφαρμόζονται και επικυρώνονται θεωρητικά μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων. Η θεωρητική επικύρωση πραγματοποιείται τόσο για ψυχρές όσο και για υβριδικές LSF τοιχοποιίες.

5.3.1 Θεωρητική εφαρμογή των μεθόδων

Δύο διαφορετικές LSF τοιχοποιίες εξετάζονται: μια ψυχρού τύπου και μια υβριδικού τύπου. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τη διαστρωμάτωση και τα υλικά της κάθε τοιχοποιίας. Η αριθμητική προσομοίωση των τοιχοποιιών έγινε στο λογισμικό COMSOL [154]. Ως οριακές συνθήκες ορίστηκε εσωτερική θερμοκρασία αέρα ίση με 20°C με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 7.69 W/(m²K) και εξωτερική θερμοκρασία αέρα ίση με 5°C με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας 25 W/(m²K). Το πλάτος του αισθητήρα ροής θερμότητας θεωρήθηκε ίσο με 32 mm.

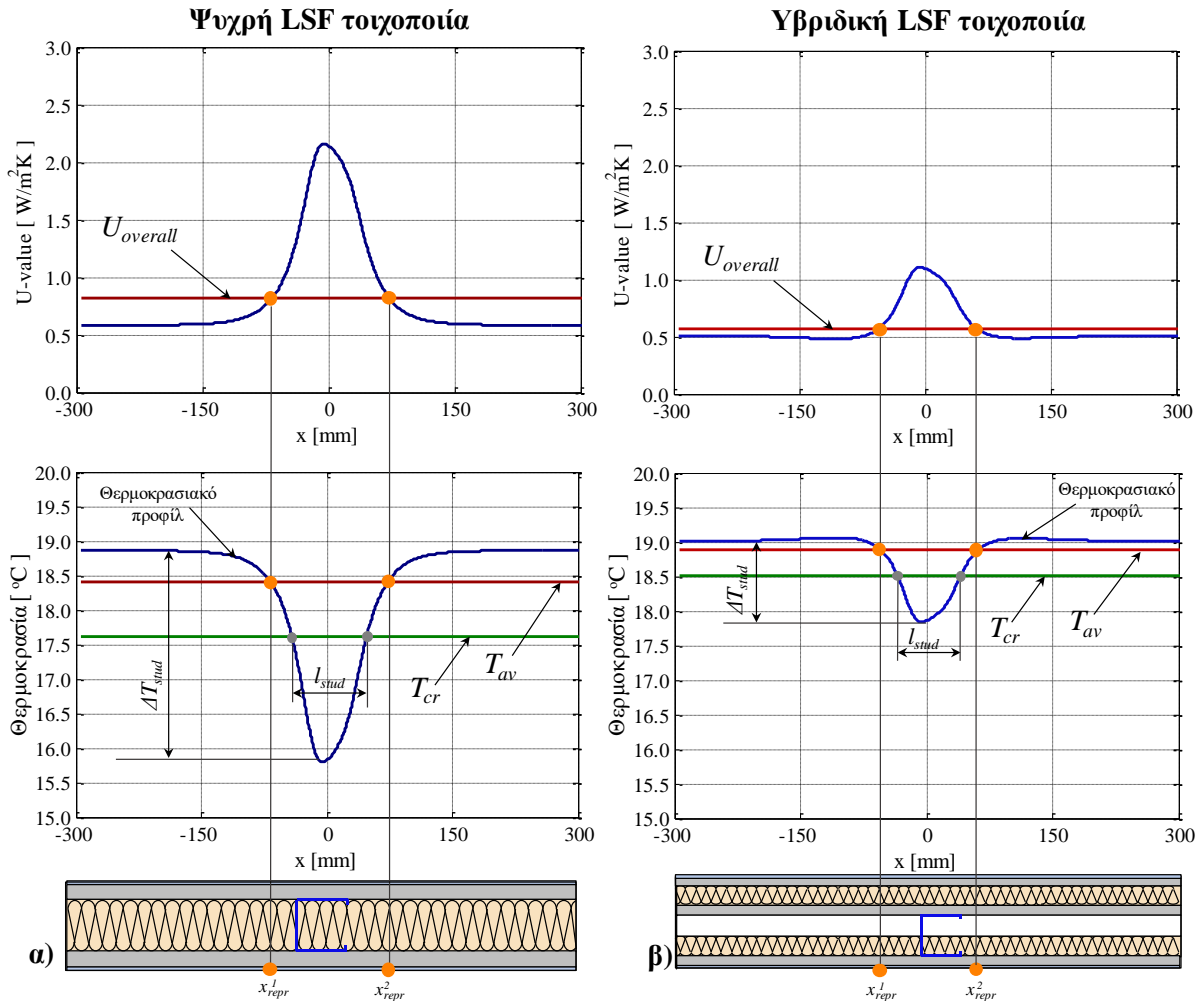
Πίνακας 4 – Η διαστρωμάτωση και τα υλικά των εξεταζόμενων τοιχοποιιών

Τύπος LSF τοιχοποιίας	Διαστρωμάτωση τοιχοποιίας	a/a	Υλικό	Πάχος [mm]	Θερμική αγωγιμότητα [W/(m·K)]
Ψυχρή	 <p>Συνολικό πάχος: 81 mm Θεωρητικό $U_{overall}$: 0.814 W/(m²K)</p>	1	Επίχρισμα	0.5	0.50
		2	Γυψοσανίδα	15	0.27
		3	Πετροβάμβακας	50	0.035
Υβριδική	 <p>Συνολικό πάχος: 121 mm Θεωρητικό $U_{overall}$: 0.573 W/(m²K)</p>	1	Επίχρισμα	0.5	0.50
		2	Γυψοσανίδα	15	0.27
		3	Πετροβάμβακας	25	0.035
		4	Διάκενο αέρα ^a	25	0.14 ^a

^a Το διάκενο αέρα αντιμετωπίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946.

Για τη θεωρητική επικύρωση των μεθόδων, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις και τη θεωρητική εφαρμογή τους συγκρίνονται με τον θεωρητικό υπολογισμό του $U_{overall}$ σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211. Η ακρίβεια των μεθόδων αξιολογείται μέσω του σχετικού σφάλματος, συγκρίνοντας το $U_{overall}$ που λαμβάνεται από κάθε μέθοδο με τη θεωρητική τιμή $U_{overall}$ σύμφωνα με το ISO (U_{ISO}). Οι τιμές U_{ISO} είναι ίσες με 0.814 W/(m²K) για τη ψυχρή και 0.573 W/(m²K) για την υβριδική LSF τοιχοποιία. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 28, η διακύμανση της επιφανειακής

θερμοκρασίας, ΔT_{stud} , που προκαλείται από τον ορθοστάτη, είναι μεγαλύτερη από 3°C για τη ψυχρή και 1.2°C για την υβριδική τοιχοποιία, για εσωτερική/εξωτερική διαφορά θερμοκρασίας ίση με 15°C , πράγμα που σημαίνει ότι οι δύο μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν στις τοιχοποιίες.



Εικόνα 28 – Αριθμητική ανάλυση της επαναλαμβανόμενης γεωμετρίας των δύο τοιχοποιιών α) ψυχρή τοιχοποιία και β) υβριδική τοιχοποιία.

Η αριθμητική διερεύνηση επιβεβαιώνει τη βασική παραδοχή της μεθόδου RPM σχετικά με τα αντιπροσωπευτικά σημεία. Ειδικότερα, τα σημεία όπου η γραμμή T_{av} τέμνει το θερμοκρασιακό προφίλ είναι ακριβώς τα ίδια όπου η γραμμή $U_{overall}$ τέμνει την καμπύλη των τιμών U-value. Λαμβάνοντας υπόψιν το πλάτος του αισθητήρα, η παραδοχή επιβεβαιώνεται για το \hat{T} προφίλ. Ως εκ τούτου, η ροή θερμότητας που λαμβάνεται στα αντιπροσωπευτικά σημεία είναι ίση με τη μέση ροή θερμότητας ολόκληρης της εσωτερικής επιφάνειας. Υπάρχουν δύο αντιπροσωπευτικά σημεία στις επαναλαμβανόμενες γεωμετρίες των τοίχων στις θέσεις $x_{repr,1}$ και $x_{repr,2}$, στην αριστερή και τη δεξιά πλευρά του ορθοστάτη αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου WAM για το $U_{overall}$ των δύο τοιχοποιιών είναι $0.803 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ για τη ψυχρή και $0.585 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ για την υβριδική LSF τοιχοποιία, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η WAM υπερεκτιμά το $U_{overall}$ κατά μόλις 1.4% για την ψυχρή και 2.1% για την υβριδική τοιχοποιία. Ο υπολογισμός του συντελεστή f_{stud} από το θερμοκρασιακό προφίλ επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

5.3.2 Εκτίμηση αβεβαιότητας

Για τη μέτρηση του $U_{overall}$, σύμφωνα με τις προτεινόμενες μεθόδους, απαιτείται η μέτρηση των τιμών U_{repr} , U_{stud} ή U_{betw_studs} με τη χρήση μιας προτυποποιημένης μεθόδου. Η αβεβαιότητα για τη μέτρηση αυτών των τιμών, για βέλτιστες συνθήκες μέτρησης, αναμένεται να κυμαίνεται μεταξύ 11% και 28% (βλ. Πίνακας 1) ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο. Η ακρίβεια αυτών των μετρήσεων εξαρτάται από την ακρίβεια του μετρητικού εξοπλισμού, την διακύμανση των θερμοκρασιών και της ροής θερμότητας κατά τη μετρητική διάρκεια, τη θερμοκρασιακή διαφορά, την ακτινοβολία, τυχαία σφάλματα κλπ. [155, 156]. Ωστόσο, για τη μέτρηση του $U_{overall}$ από τις προτεινόμενες μεθόδους, εισάγονται πρόσθετες αβεβαιότητες. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους, οι πρόσθετες αβεβαιότητες προστίθενται κυρίως λόγω της ανάλυσης των θερμογραφημάτων [139, 157]. Σε ιδανικές συνθήκες, το θερμοκρασιακό προφίλ πρέπει να είναι το ίδιο σε όλο το ύψος της τοιχοποιίας, τόσο κατά τη διάρκεια της θερμογραφίας και όσο και των μετρήσεων. Ωστόσο, στην πράξη υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του θερμοκρασιακού προφίλ.

Για τη RPM μέθοδο, οι πρόσθετες αβεβαιότητες σχετίζονται με τον προσδιορισμό της θέσης των αντιπροσωπευτικών σημείων, x_{repr} από την ανάλυση του θερμοκρασιακού προφίλ. Μια τυπική απόκλιση του x_{repr} , λόγω της διακύμανσης των θερμοκρασιών σε σχέση με το ύψος της τοιχοποιίας, εκτιμάται ότι είναι 2 - 5 mm με αποτέλεσμα μια αβεβαιότητα που κυμαίνεται από 3% έως 7%. Επιπλέον, η πιθανή διακύμανση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην εσωτερική πλευρά, h_{in} , κατά τη διάρκεια της θερμογραφίας και των μετρήσεων οδηγεί σε απόκλιση του x_{repr} προκαλώντας μια αβεβαιότητα έως και 5% στο τελικό αποτέλεσμα. Τέλος, μια ελαφρά απόκλιση του x_{repr} λόγω των χρονικά μεταβαλλόμενων φαινομένων προκαλεί μια αβεβαιότητα της τάξης του 2%. Το πλάτος του αισθητήρα δεν επηρεάζει τη συγκεκριμένη μέθοδο. Η συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης $U_{overall}$ σύμφωνα με τη RPM μέθοδο, επιλέγοντας την Average Method σε βέλτιστες συνθήκες μέτρησης για την επεξεργασία των μετρήσεων, εκτιμάται ότι είναι 17%.

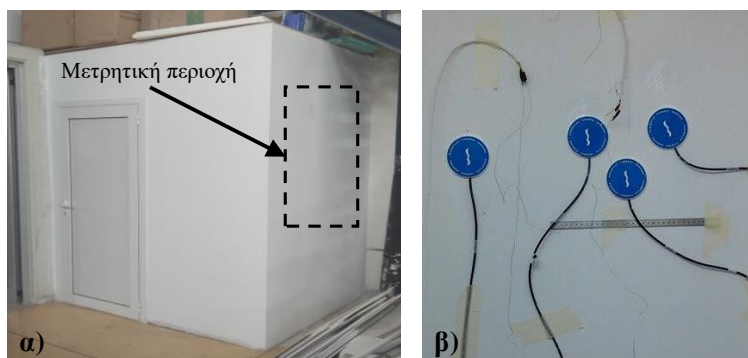
Όσον αφορά τη WAM μέθοδο, η επιπρόσθετη αβεβαιότητα σχετίζεται με τον υπολογισμό του σταθμισμένου μέσου συντελεστή, f_{stud} , και της επίδρασης του πλάτους του αισθητήρα. Μια τυπική απόκλιση από το f_{stud} , λόγω των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων καθ ύψος της τοιχοποιίας, εισάγει μια αβεβαιότητα της τάξης του 2%. Η διακύμανση του h_{in} κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας μέτρησης (θερμογραφία και μετρήσεις) έχει ως αποτέλεσμα μια απόκλιση του f_{stud} προκαλώντας μια αβεβαιότητα στη μέτρηση του $U_{overall}$ έως και 5%. Επιπλέον, η μεταβολή της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας σε δυναμικές συνθήκες εισάγει μια πρόσθετη αβεβαιότητα $\pm 2\%$. Τέλος, για τους αισθητήρες ροής θερμότητας που έχουν πλάτος μικρότερο από 80 mm, εισάγεται πρόσθετη αβεβαιότητα μέχρι 5%. Η συνολική αβεβαιότητα για τη WAM εκτιμάται ότι είναι 16%, επιλέγοντας την Average Method για την επεξεργασία των μετρήσεων σε βέλτιστες συνθήκες μέτρησης.

5.4 Πειραματική επικύρωση των μεθόδων

5.4.1 Η εξεταζόμενη τοιχοποιία και ο μετρητικός εξοπλισμός

Η πειραματική επικύρωση των δύο προτεινόμενων μεθόδων διεξήχθη σε μία γνωστή LSF τοιχοποιία ψυχρού τύπου, όπως περιεγράφηκε στον Πίνακα 4. Η τοιχοποιία είναι μέρος μιας ελαφριάς κατασκευής, με διαστάσεις 1.82 m \times 2.05 m \times 2.50 m, που βρίσκεται μέσα σε ένα μεγάλο μη κλιματιζόμενο κτίριο, με επιφάνεια δαπέδου ίση με 1550 m² και ύψος 12 m. Το κτίριο βρίσκεται στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η Εικόνα 29α απεικονίζει τον πειραματικό δωμάτιο. Η εξεταζόμενη ψυχρή LSF τοιχοποιία ξηράς δόμησης έχει συνολικό πάχος 81 mm και στηρίζεται σε μια σειρά

μεταλλικών ορθοστατών. Οι ορθοστάτες έχουν σχήμα C, με διαστάσεις $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ και πάχος 0.6 mm . Η απόσταση μεταξύ των ορθοστατών είναι σταθερή και ίση με $d = 600 \text{ mm}$.



Εικόνα 29 – Πειραματική επικύρωση των μεθόδων σε μία ψυχρή LSF τοιχοποιία: α) ο πειραματικός οικίσκος και β) εγκατάσταση των αισθητήρων ροής θερμότητας και θερμοκρασίας.

Ο απαιτούμενος μετρητικός εξοπλισμός περιλαμβάνει μια θερμοκάμερα, ένα σύστημα λήψης δεδομένων, αισθητήρες ροής θερμότητας και θερμοκρασίας. Η θερμοκάμερα (μοντέλο FLIR 595) χρησιμοποιήθηκε για να ληφθούν τα απαιτούμενα θερμογραφήματα της εσωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας και τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ. Το σύστημα λήψης δεδομένων (Data Acquisition System - DAS) σχεδιάστηκε με σκοπό τη συλλογή και την καταγραφή των απαιτούμενων μετρήσεων θερμοκρασίας και ροής θερμότητας. Για τις μετρήσεις της ροής θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες της Hukseflux τύπου HFP01 (Εικόνα 29β). Για τις μετρήσεις θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμίστορ NTC (MCD 10k3MCD1) επαρκώς αεριζόμενοι και προστατευμένοι από την ηλιακή/θερμική ακτινοβολία. Όλοι οι αισθητήρες συνδέθηκαν με μια συσκευή Agilent DAQ για την επεξεργασία και την καταγραφή σήματος. Το χρονικό διάστημα για όλες τις μετρήσεις ήταν 1 λεπτό.

Για γρήγορη σύγκλιση και αξιόπιστα αποτελέσματα απαιτείται μια υψηλή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου καθώς επίσης και χαμηλές διακυμάνσεις των εσωτερικών θερμοκρασιών αέρα. Ωστόσο, τα πειράματα έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όπου η θερμοκρασία μέσα στο μεγάλο μη κλιματιζόμενο κτίριο (εξωτερικά της εξεταζόμενης τοιχοποιίας) κυμαινόταν μεταξύ $22 - 26^\circ\text{C}$. Επειδή οι συνθήκες εξωτερικού χώρου δεν ήταν εφικτό να ελεγχθούν, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας για τη διατήρηση μιας σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας 37°C , επιτυγχάνοντας την απαιτούμενη υψηλή εσωτερική/εξωτερική διαφορά θερμοκρασίας.

5.4.2 Υπολογισμός θεωρητικού $U_{overall}$

Για την πειραματική επικύρωση των μεθόδων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του θεωρητικού $U_{overall}$ της τοιχοποιίας. Όμως η τιμή $U_{overall}$ λαμβάνει υπόψη την επίδραση των συντελεστών εσωτερικής και εξωτερικής μεταφοράς θερμότητας, h_{in} και h_{out} . Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Evangelisti et al. [158, 159] προσδιορίστηκαν οι συντελεστές h_{in} και h_{out} πειραματικά ίσοι με $5.97 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ και $6.37 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, το θεωρητικό $U_{overall}$ της τοιχοποιίας υπολογίστηκε σύμφωνα με το ISO 10211 ίσο με $U_{ISO} = 0.723 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

5.4.3 Εφαρμογή των μεθόδων

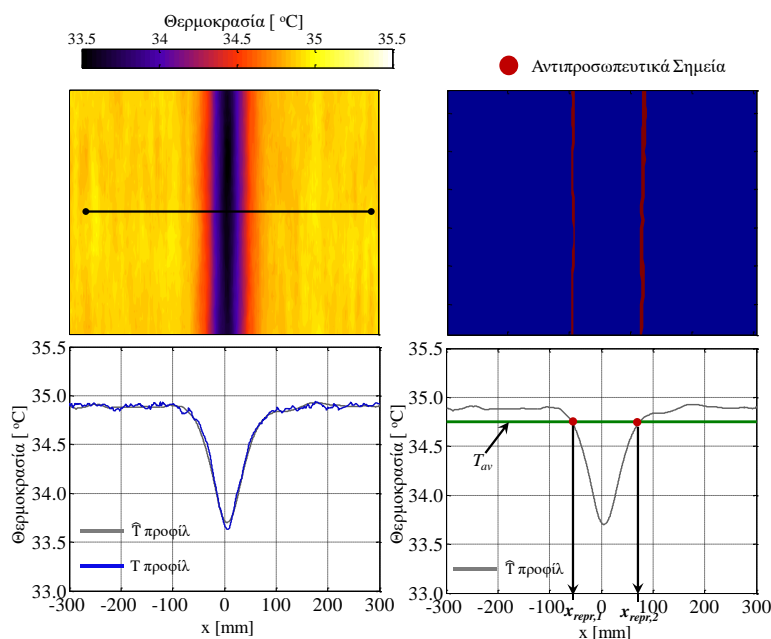
Ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού προφίλ πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας υπέρυθη θερμογραφία σε διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου ίση περίπου με

11°C. Τα θερμογραφήματα εξομαλύνθηκαν για να αφαιρεθεί ο θόρυβος του σήματος και το θερμοκρασιακό προφίλ υπολογίστηκε για μια οριζόντια γραμμή σε μέσο ύψος του κεντρικού τμήματος της τοιχοποιίας, αποφεύγοντας τυχόν θερμογέφυρες που προκαλούνται από τα παρακείμενα στοιχεία του κελύφους (οροφή, δάπεδο, πλαϊνός τοίχος). Σύμφωνα με τα θερμογραφήματα, η θέση των ορθοστατών προσδιορίστηκε εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασιακής διακύμανσης, $\Delta T_{stud}=1.5^\circ\text{C}$ και η απόσταση μεταξύ των ορθοστατών (άρα το μήκος της επαναλαμβανόμενης γεωμετρίας) υπολογίστηκε ίση με $d = 600\text{mm}$.

Η επεξεργασία των μετρήσεων (εσωτερικής/εξωτερικής θερμοκρασίας των χώρων και ροής θερμότητας) και ο υπολογισμός των απαιτούμενων U-value για τις δύο μεθόδους (U_{repr} για την RPM, U_{stud} και U_{betw_studs} για την WAM) πραγματοποιήθηκαν με όλες τις προτυποποιημένες μεθόδους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι διαφορές μεταξύ των τιμών δεν υπερβαίνουν το 2%. Ωστόσο, τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, λαμβάνονται με την Average Method, που περιγράφεται από το πρότυπο ISO 9869 [69].

RPM μέθοδος

Η εφαρμογή της μεθόδου RPM απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των αντιπροσωπευτικών σημείων, x_{repr} , στην εξεταζόμενη τοιχοποιία μέσω της ανάλυσης του θερμοκρασιακού προφίλ. Η μέση θερμοκρασία, T_{av} και το \hat{T} προφίλ υπολογίστηκαν από το θερμοκρασιακό προφίλ, και στη συνέχεια τα x_{repr} προσδιορίστηκαν από τη τομή τους (Εικόνα 30).



Εικόνα 30 – Εύρεση αντιπροσωπευτικών σημείων σύμφωνα με τη μέθοδο RPM.

Τα x_{repr} υπολογίστηκαν από τη ανάλυση των θερμογραφημάτων και τον προσδιορισμό του θερμοκρασιακού προφίλ σε διαφορετικά ύψη. Τα αντιπροσωπευτικά σημεία βρίσκονται στις θέσεις $x_{repr,1} = -71 \pm 3 \text{ mm}$ και $x_{repr,2} = 78 \pm 4 \text{ mm}$ στην αριστερή και δεξιά πλευρά των ορθοστατών, αντίστοιχα, υποθέτοντας το $x = 0$ στο σημείο όπου παρατηρήθηκε η ελάχιστη θερμοκρασία. Οι δύο αισθητήρες ροής θερμότητας τοποθετήθηκαν στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου, ένας στη θέση $x_{repr,1}$ και ένας στη θέση $x_{repr,2}$. Οι θερμοκρασίες εσωτερικού και εξωτερικού αέρα θεωρήθηκαν ως η μέση τιμή των θερμοκρασιών που λαμβάνονται από τρία θερμίστορ σε κάθε χώρο.

Η RPM εφαρμόστηκε σε πέντε διαφορετικές θέσεις της τοιχοποιίας. Σε κάθε θέση, μετρήθηκαν δύο τιμές U_{repr} σε δύο αντιπροσωπευτικά σημεία, ένα στην αριστερή και ένα στη δεξιά πλευρά του ορθοστάτη ($U_{repr,1}$ και $U_{repr,2}$). Το $U_{overall}$ ελήφθη ως η μέση τιμή των δύο τιμών U_{repr} . Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της RPM παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Όπως φαίνεται, τα αποτελέσματα των τιμών $U_{overall}$ είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τη θεωρητική τιμή, U_{ISO} . Η διαφορά μεταξύ του τελικού αποτελέσματος ($\overline{U_{overall}}$) και της θεωρητικής τιμής είναι μόλις 0.4%. Το σφάλμα του τελικού αποτελέσματος εκτιμήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση αβεβαιότητας που περιγράφεται στην ενότητα 5.3.2. Τα αποτελέσματα έχουν υψηλή επαναληψιμότητα, καθώς η σχετική τυπική απόκλιση των τιμών $U_{overall}$ είναι $CV = 1.9\%$.

Πίνακας 5 – Αποτελέσματα θερμικών διαπερατοτήτων για την εξεταζόμενη τοιχοποιία κατά την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων

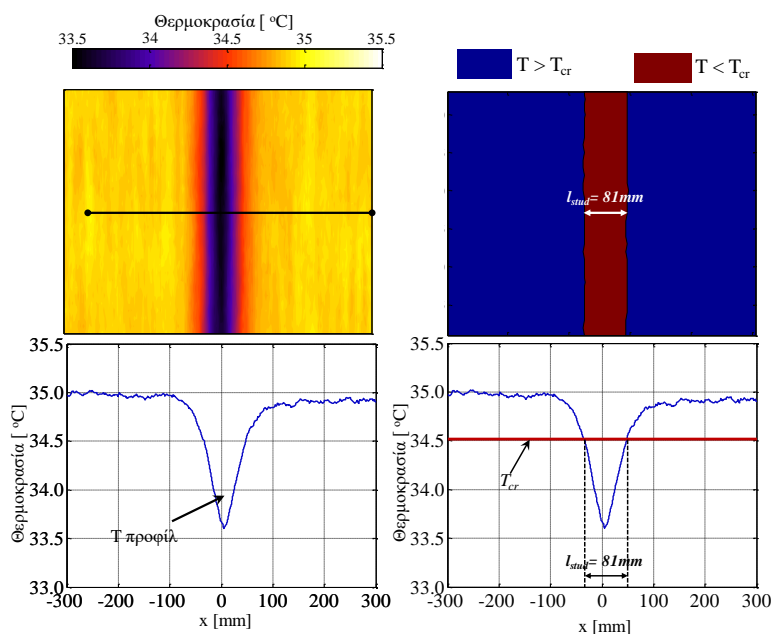
Θέση	RPM			WAM		
	$U_{repr,1}$ [W/(m ² K)]	$U_{repr,2}$ [W/(m ² K)]	$U_{overall}$ [W/(m ² K)]	U_{stud} [W/(m ² K)]	U_{betw_studs} [W/(m ² K)]	$U_{overall}$ [W/(m ² K)]
1	0.698	0.707	0.703	1.889	0.584	0.762
2	0.759	0.723	0.741	1.745	0.575	0.734
3	0.738	0.710	0.724	1.828	0.669	0.827
4	0.791	0.682	0.736	1.731	0.560	0.720
5	0.744	0.713	0.729	1.551	0.551	0.687
$U_{overall}$ [W/(m ² K)]	0.726 ± 0.124			0.746 ± 0.119		
Διαφορά με $U_{ISO}=0.723$ W/(m ² K)	0.4%			3.1%		

WAM μέθοδος

Η εφαρμογή της WAM απαιτεί τον υπολογισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας, T_{cr} , σύμφωνα με την εξίσωση 24, προκειμένου να καθοριστεί το χαρακτηριστικό μήκος, l_{stud} , όπου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το θερμοκρασιακό προφίλ (Εικόνα 31). Το l_{stud} υπολογίστηκε για διάφορα ύψη στο κεντρικό τμήμα του τοίχου, ίσο με 81 ± 2 mm, και ο συντελεστής, f_{stud} , ίσος με $f_{stud} = 0.136 \pm 0.004$.

Δύο αισθητήρες ροής θερμότητας τοποθετήθηκαν στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου. Το κέντρο του πρώτου αισθητήρα τοποθετήθηκε στη θέση όπου παρατηρήθηκε η ελάχιστη θερμοκρασία (περιοχή ορθοστάτη), ενώ το κέντρο του δεύτερου αισθητήρα τοποθετήθηκε στη θέση όπου παρατηρήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία (περιοχή μεταξύ των ορθοστατών).

Η WAM εφαρμόστηκε σε πέντε διαφορετικές θέσεις της τοιχοποιίας. Σε κάθε θέση υπολογίστηκαν τα U_{stud} και τα U_{betw_studs} , ενώ το $U_{overall}$ ελήφθη σύμφωνα με την εξίσωση 25. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της WAM παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα είναι κοντά στη θεωρητική τιμή, U_{ISO} . Η διαφορά μεταξύ του τελικού αποτελέσματος ($\overline{U_{overall}}$) με τη θεωρητική τιμή είναι 3.1%. Η επαναληψιμότητα της μεθόδου είναι αποδεκτή, δεδομένου ότι η σχετική τυπική απόκλιση είναι ίση με $CV = 7.1\%$, δηλαδή μικρότερη από 10%.



Εικόνα 31 – Υπολογισμός του l_{stud} σύμφωνα με τη μέθοδο WAM.

5.5 Συμπεράσματα

Μέχρι στιγμής, από τη βιβλιογραφία έλειπε μια μεθοδολογία (προτυποποιημένη ή μη) για την επιτόπια μέτρηση του $U_{overall}$ για υπάρχουσες LSF τοιχοποιίες. Για την κάλυψη αυτής της ανάγκης, το παρόν κεφάλαιο εισήγαγε δύο νέες μεθόδους σχετικά με την επιτόπια μέτρηση της συνολικής θερμικής διαπερατότητας, $U_{overall}$, για ελαφρές τοιχοποιίες με χαλύβδινο σκελετό (Lightweight Steel-framed - LSF), συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης των μεταλλικών ορθοστατών. Οι δύο μέθοδοι, δηλαδή η Μέθοδος των Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Points Method - RPM) και η Μέθοδος της Σταθμισμένης Περιοχής (Weighted Area Method - WAM), συνδυάζουν την ανάλυση της εξεταζόμενης τοιχοποιίας μέσω υπέρυθρης θερμογραφίας και την καταγραφή - επεξεργασία μετρήσεων εσωτερικής/εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ροής θερμότητας. Οι μέθοδοι απαιτούν μία σχετικά υψηλή θερμοκρασιακή διακύμανση στην εσωτερική επιφάνεια εξαιτίας της παρουσίας του ορθοστάτη με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί σε ψυχρές LSF τοιχοποιίες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε υβριδικές LSF τοιχοποιίες. Οι μέθοδοι θεωρητικά επικυρώθηκαν και για τους δύο τύπους τοιχοποιιών, ενώ πειραματικά επικυρώθηκαν σε μια γνωστή ψυχρή LSF τοιχοποιία, που βρίσκεται σε ένα πραγματικό πειραματικό κτίριο.

Η θεωρητική επικύρωση των προτεινόμενων μεθόδων πραγματοποιήθηκε αξιολογώντας την ακρίβεια τους έναντι της θεωρητικής τιμής σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι RPM δίνουν πάντοτε ακριβή $U_{overall}$ ενώ το σφάλμα του WAM δεν υπερβαίνει το 2% για ψυχρές και 5% για υβριδικές τοιχοποιίες. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αβεβαιότητα της μέτρησης αναλύθηκαν παρουσιάζοντας το εκτιμώμενο σφάλμα για κάθε μέθοδο.

Η πειραματική επικύρωση των δύο μεθόδων στη ψυχρή τοιχοποιία έδειξε ότι τα αποτελέσματά τους ήταν σε πολύ καλή συμφωνία με τη θεωρητική τιμή. Το $U_{overall}$ που λήφθηκε από τις RPM μετρήθηκε σχεδόν το ίδιο με τη θεωρητική τιμή (διαφορά μόλις 0.4%) με υψηλή επαναληψιμότητα. Η διαφορά για το $U_{overall}$ που μετρήθηκε σύμφωνα με τη WAM ήταν 3%, ενώ ο συντελεστής διακύμανσης των αποτελεσμάτων ήταν 7%.

Κεφάλαιο 6^ο – Πειραματική διερεύνηση δύο κτιριακών κελυφών που περιλαμβάνουν VIPs

6.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Εισαγωγή της παρούσας διατριβής (Κεφάλαιο 1), καινοτόμα μονωτικά υλικά με πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αναπτύσσονται με στόχο την αναβάθμιση της θερμικής απόδοσης του κτιριακού κελύφους. Σε αυτή την κατεύθυνση, το Κεφάλαιο 3 υπογράμμισε ότι οι μονωτικές σανίδες κενού (Vacuum Insulation Panel - VIP) αποτελούν ιδανική λύση για την περαιτέρω αύξηση της θερμικής αντίστασης του κελύφους. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η χρήση του VIP ως κτιριακό μονωτικό υλικό αποτέλεσε αντικείμενο πολλών μελετών [42, 87, 90, 91, 96, 160]. Ωστόσο, παρά την πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του VIP (έως και 10 φορές χαμηλότερη από τη συμβατική μόνωση), το γεγονός ότι τα VIPs είναι εύθραυστα και η θερμική τους απόδοση μειώνεται κατά τη διάρκεια του χρόνου καθιστά αμφίβολη μέχρι σήμερα την εφαρμογή τους σε κτίρια. Επιπλέον, η έλλειψη εμπειρίας όσον αφορά τον χειρισμό των VIPs εμποδίζει την ευρεία διάδοσή τους στον κτιριακό τομέα [161]. Συνεπώς, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για μεθόδους και διαδικασίες αξιολόγησης για να αποδειχθεί η καταλληλότητα των VIPs ως δομικό υλικό.

Υπάρχει έλλειψη γνώσεων σχετικά με την επιτόπια θερμική απόδοση των VIPs σε διαφορετικές υγροθερμικές συνθήκες. Καθώς ο κτιριακός τομέας απαιτεί αξιόπιστα υλικά με αποδεδειγμένη απόδοση και διάρκεια ζωής, απαιτούνται περαιτέρω προσπάθειες για τη βελτίωση των επιδόσεων των VIPs. Σε αυτή την κατεύθυνση, η πειραματική επικύρωση των προνομιών και η ποσοτικοποίηση πιθανών αποκλίσεων μεταξύ σχεδιαστικών και πραγματικών τιμών είναι εξαιρετικά σημαντικά όσον αφορά την προώθηση των VIPs στην αγορά.

Είναι προφανές ότι υπάρχει ανάγκη για αξιόπιστο χαρακτηρισμό των επιτόπιων θερμικών και υγροθερμικών επιδόσεων του VIP σε πραγματικά κτίρια υπό διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Σε αυτό το πλαίσιο, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει μια εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση δύο κελυφών που περιλαμβάνουν VIP σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν και παρακολούθηθηκαν δύο ελαφρά κτίρια «μικρής κλίμακας» («mock-up») με χαλύβδινο σκελετό (Lightweight Steel-Framed - LSF) για τουλάχιστον ένα έτος. Η έρευνα αφορά την θερμική και υγροθερμική συμπεριφορά του κελύφους, εστιάζοντας στη απόδοση των VIPs.

Η πρώτη εφαρμογή είναι μια τοιχοποιία από ένα διώροφο ελαφρύ κτίριο που βρίσκεται στην Αθήνα. Η τοιχοποιία ήταν αρχικά μονωμένη με συμβατικό Εξωτερικό Σύστημα Θερμομόνωσης (External Thermal Insulation Composite System - ETICS) με τη χρήση εξηλασμένης πολυστερίνης (EPS). Δύο χρόνια μετά την κατασκευή του κτιρίου, η μόνωση της βόρειας τοιχοποιίας αντικαταστάθηκε με ένα ETICS με ενσωματωμένα VIPs. Αυτή η εφαρμογή είναι η πρώτη κτιριακή εφαρμογή των VIPs στην Ελλάδα. Οι θερμικές και υγροθερμικές επιδόσεις της ανακαινισμένης τοιχοποιίας διερευνώνται μέσω των επιτόπιων μετρήσεων R-value, λαμβάνοντας υπόψη τις μεθόδους και τα ευρήματα του Κεφαλαίου 4, καθώς και δεδομένα θερμογραφίας και παρακολούθησης για περισσότερο από ένα χρόνο. Επιπλέον, διεξάγεται συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των δύο ETICS (EPS και VIP) εστιάζοντας στην αναβάθμιση της θερμικής απόδοσης της τοιχοποιίας.

Το δεύτερο εξεταζόμενο κτίριο είναι ένα LSF mock-up κτίριο που βρίσκεται στην Ελβετία. Στην εσωτερική πλευρά της φέρουσας δομής εγκαταστάθηκε μία στρώση από VIP προκειμένου να μειωθούν οι θερμογέφυρες που προκαλούνται από το μεταλλικό σκελετό. Η αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης πραγματοποιείται με επιτόπια μέτρηση $U_{overall}$, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο RPM που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν θερμογραφήματα και μετρήσεις παρακολούθησης για ένα ολόκληρο έτος. Η πειραματική διερεύνηση επικεντρώνεται στην επίδραση των VIPs στη βελτίωση της απόδοσης του κελύφους και στη μείωση των θερμογεφυρών.

Η παρούσα μελέτη αποκαλύπτει τη θερμική και υγροθερμική συμπεριφορά των VIP και τη συμβολή τους στην απόδοση του κελύφους υπό πραγματικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, η κατασκευή και η ανάλυση των δύο κτιρίων αναδεικνύει τους περιορισμούς και τα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν. Σε κάθε περίπτωση, η παρούσα μελέτη προσθέτει στη συνεχώς αυξανόμενη εμπειρία για τη χρήση του VIP ως μονωτικού υλικού σε κτίρια.

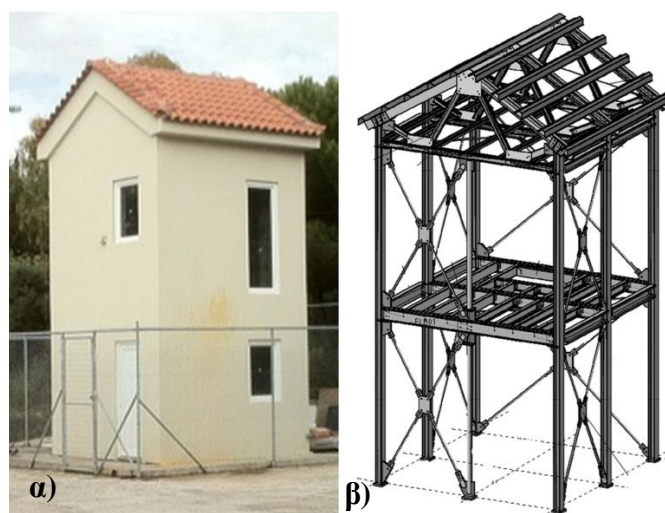
6.2 Αναβάθμιση μιας εξωτερικής τοιχοποιίας με τη χρήση VIPs – Η πρώτη εφαρμογή VIP στην Ελλάδα

Στην παρούσα ενότητα διενεργείται μια εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση της θερμικής και υγροθερμικής απόδοσης μιας τοιχοποιίας που περιλαμβάνει VIPs. Η συγκεκριμένη τοιχοποιία αποτελεί την πρώτη κτιριακή εφαρμογή των VIPs στην Ελλάδα, καθώς το κτίριο βρίσκεται στην Αθήνα. Η μόνωση του κτιρίου βασίζεται σε σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης (External Thermal Insulation Composite System - ETICS). Η αρχική μόνωση περιλάμβανε συμβατική μόνωση (εξηλασμένη πολυστερίνη, EPS), ενώ η βόρεια τοιχοποιία αναβαθμίστηκε χρησιμοποιώντας ETICS με VIP. Το βασικό στοιχείο μόνωσης της ανακαινισμένης τοιχοποιίας είναι ένα σύνθετο μονωτικό στοιχείο (composite insulation component - CIC) που αποτελείται από μία στρώση VIP ανάμεσα σε δύο στρώσεις από πετροβάμβακα.

Μετά την λεπτομερή περιγραφή της κατασκευής των τοιχοποιιών, εστιάζοντας στην τοποθέτηση των CIC, παρουσιάζονται οι μετρήσεις των ιδιοτήτων των υλικών και η επίδραση των ακμών των VIPs. Μια συγκριτική αξιολόγηση των δύο συστημάτων μόνωσης (EPS και VIP ETICS) πραγματοποιείται μέσω επιτόπιων μετρήσεων R-value και θερμογραφίας. Τέλος, η θερμική και υγροθερμική απόδοση της αναβαθμισμένης τοιχοποιίας αναλύεται μέσω δεδομένων παρακολούθησης θερμοκρασίας και υγρασίας, που λαμβάνονται για ένα ολόκληρο έτος.

6.2.1 Κατασκευή του κτιρίου

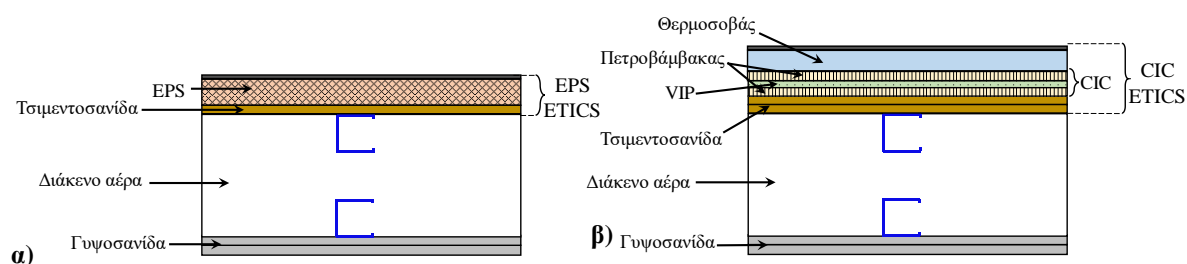
Το υπό-μελέτη κτίριο (Εικόνα 32α) είναι ένας διώροφος ελαφρύς πειραματικός οικίσκος (mock-up) που βρίσκεται στην Πολυτεχνειούπολη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Αθήνα). Το κτίριο στηρίζεται σε ελαφρύ χαλύβδινο σύστημα σκελετού στο οποίο εδράζονται συστήματα ξηράς δόμησης (Εικόνα 32β). Οι μεταλλικοί δρομείς και ορθοστάτες είναι στηριγμένοι στο σκελετό και καλύπτονται πλήρως με τη προσάρτηση γυψοσανίδων και τιμεντοσανίδων. Ο άξονας συμμετρίας του οικίσκου ευθυγραμμίζεται με τα σημεία του ορίζοντα, με την είσοδό του τοποθετημένη στη δυτική τοιχοποιία. Οι εξωτερικές διαστάσεις του οικίσκου είναι 3.65 m x 3.65 m και ύψος 7.53 m.



Εικόνα 32 - Ο πειραματικός οικίσκος του ΕΜΠ: α) η νοτιοδυτική όψη και β) ο χαλύβδινος σκελετός.

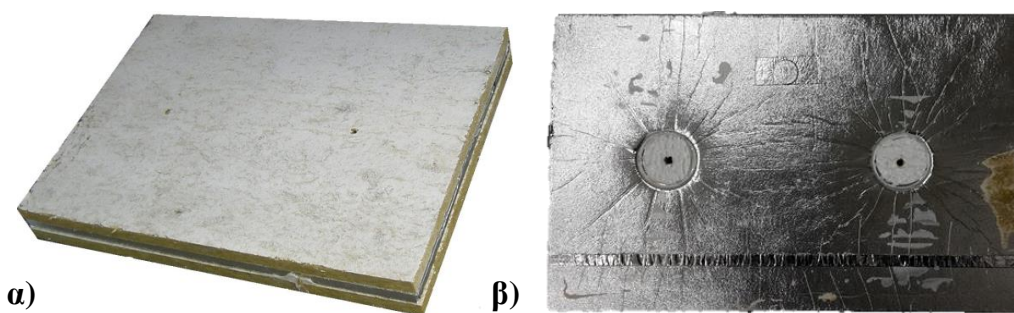
Το κτίριο χτίστηκε το 2010 και οι τέσσερις εξωτερικές τοιχοποιίες ήταν αρχικά μονωμένες με ένα ETICS με EPS. Τον Ιούλιο του 2012, η βόρεια τοιχοποιία αναβαθμίστηκε αντικαθιστώντας τη συμβατική μόνωση από σύνθετο μονωτικό στοιχείο (composite insulation component - CIC) με ενσωματωμένο VIP ανάμεσα σε δύο στρώσεις πετροβάμβακα (ενθυλακωμένο ή σάντουιτς VIP). Η μόνωση των υπόλοιπων τοιχοποιιών (νότιων, δυτικών και ανατολικών) παρέμεινε με το EPS ETICS.

Το EPS ETICS περιλαμβάνει μία στρώση EPS πάχους 50 mm τοποθετημένη μετά από μία τσιμεντοσανίδα, σχηματίζοντας το εξωτερικό τμήμα της τοιχοποιίας. Εξωτερικό επίχρισμα τοποθετήθηκε στην εξωτερική επιφάνεια του EPS, με αποτέλεσμα το συνολικό πάχος του EPS ETICS να είναι ίσο με 69.5 mm. Το εσωτερικό μέρος της τοιχοποιίας αποτελείται από δύο γυψοσανίδες. Μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού μέρους, υπάρχει διάκενο αέρα, πάχους 190 mm, δημιουργώντας ένα συνολικό πάχος της τοιχοποιίας («EPS τοίχος») ίσο με 284.5 mm. Η διαστρωμάτωση του EPS τοίχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 33α.



Εικόνα 33 - Η διαστρωμάτωση των δύο τοιχοποιιών: α) EPS τοίχος και β) VIP τοίχος.

Το CIC ETICS είναι ένα σύστημα εξωτερικής μόνωσης πολλαπλών στρώσεων το οποίο αποτελείται από μία στρώση CIC πάχους 55 mm (Εικόνα 34α) και από μία στρώση θερμοσοβά πάχους 50 mm. Το συνολικό πάχος του CIC ETICS είναι 120 mm, συμπεριλαμβανομένων των στρώσεων τελικής επικάλυψης, συνδετικών κονιαμάτων και της διπλής στρώσης τσιμεντοσανίδας. Το συνολικό πάχος του «VIP τοίχου» είναι ίσο με 360 mm, συμπεριλαμβανομένου του διακένου αέρα και του εσωτερικού μέρους. Η διαστρωμάτωση του VIP τοίχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 33β.



Εικόνα 34 – α) Το σύνθετο μονωτικό στοιχείο (composite insulation component - CIC) και β) το ενσωματωμένο VIP με τις δύο οπές από EPS.

Η τοποθέτηση των CIC πάνελ έγινε με τη μέθοδο της «υγρής εγκατάστασης» χρησιμοποιώντας συγκολλητικό κονίαμα στις δύο επιφάνειες. Επιπλέον, η ασφαλής στερέωση των CIC πάνελ στην τοιχοποιία εξασφαλίστηκε με τη βοήθεια δύο χαλύβδινων κοχλιών σε PVC περίβλημα για κάθε πανελ (Εικόνα 35α). Για το σκοπό αυτό τα VIPs κατασκευάστηκαν με 2 κυκλικές οπές διαμέτρου 75 mm γεμάτες με EPS (Εικόνα 34β) επιτρέποντας τη διέλευση του κοχλία χωρίς να επηρεαστεί το κενό του VIP. Οι διαστάσεις των CIC πάνελ (Εικόνα 34α) έχουν πλάτος 600 mm, ύψος 400 mm και πάχος 55 mm (15 mm VIP και 20 mm κάθε στρώση πετροβάμβακα). Οι δύο στρώσεις πετροβάμβακα χρησιμεύουν ως προστασία από τη φθορά του ευαίσθητου περιβλήματος του VIP από την αλκαλική φύση του συνδετικού κονιάματος καθώς είναι πολύ γνωστή η αστάθεια του αλουμινίου σε ακραίες τιμές pH [96, 162]. Καθώς το CIC δεν μπορεί να προσαρμοστεί ή να κοπεί κατά την τοποθέτησή τους στην εκάστοτε τοιχοποιία, εξαιτίας του VIP, δημιουργήθηκε μια ακάλυπτη περιοχή 20 cm - 35 cm σε κάθε πλευρά (Εικόνα 35β). Στην περιοχή αυτή τοποθετήθηκε συμβατική μόνωση EPS (Εικόνα 35γ), εισάγοντας μια γραμμική θερμογέφυρα εξαιτίας της διαφοράς της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ EPS και CIC.



Εικόνα 35 – α) Τοποθέτηση των CIC πάνελ με συγκολλητικό κονίαμα και κοχλίες, β) ακάλυπτη περιοχή από CIC και γ) τοποθέτηση EPS στην ακάλυπτη περιοχή.

6.2.2 Ιδιότητες υλικών

Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών που ενσωματώνονται στην αρχική και στην αναβαθμισμένη τοιχοποιία, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Οι θερμικές αγωγιμότητες των υλικών είτε μετρήθηκαν στο εργαστήριο με τη μέθοδο Guarded Hot Plate (GHP) είτε ελήφθησαν από πίνακες σε σχέση με την πυκνότητά τους [163].

Πίνακας 6 – Ιδιότητες των υλικών.

Υλικό	Πάχος [mm]	Θερμική αγωγιμότητα [W/(m·K)]	Πυκνότητα [kg/m ³]	Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/(kg·K)]
Επίχρισμα	2.0	0.61	1600	1000
Κονίαμα	4.0	0.29	870	1000
Θερμοσοβάς	50.0	0.065 ^a	1600	1000
Συγκολλητικός σοβάς	4.5	0.61	1600	1000
Πετροβάμβακας	20.0	0.035 ^a	120	1000
VIP (κέντρο του πάνελ)	15.0	0.005 ^a	180	850
Συνδετικό κονίαμα	4.5	0.61	1600	1000
Τσιμεντοσανίδα	12.5	0.36 ^a	1150	879
Γυψοσανίδα	12.5	0.183 ^a	810	950
EPS	49.0	0.037 ^a	14	1450

^a Μετρήσεις με τη μέθοδο Guarded Hot Plate

Η πραγματική θερμική αγωγιμότητα του VIP (λ_{eff}) που περιλαμβάνει την επίδραση των ακμών μετρήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο GHP που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 (ενότητα 3.4.1). Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε επίσης και στα CIC πάνελ κατά τρόπο ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της συμβολής των γραμμικών θερμογεφυρών στο συνολικό λ_{eff} . Οι γραμμικές θερμικές διαπερατότητες των VIP πάνελ, Ψ_{VIP} και CIC πάνελ, Ψ_{CIC} , υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις 16 και 17.

Οι μετρήσεις ελήφθησαν στη θερμοκρασία των 20°C και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 7. Σημειώνεται ότι οι υπολογισμένες τιμές λ_{eff} των VIP και CIC περιλαμβάνουν την επίδραση των ακμών μόνο λόγω της περιμέτρου των VIP και όχι την επίδραση των ακμών εξαιτίας των δύο EPS οπών (λόγω περιορισμών του οργάνου). Η επίδραση των ακμών της περιμέτρου αυξάνει τη θερμική αγωγιμότητα του VIP κατά 24% και του CIC κατά 17% σε σύγκριση με τη θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο των πάνελ (λ_{cop}). Η τιμή λ_{eff} του CIC πάνελ (0.0156 W/(m·K)) είναι υψηλότερη κατά 149% από την τιμή λ_{eff} του VIP (0.0062 W/(m·K)), εξαιτίας των δύο στρώσεων πετροβάμβακα.

Πίνακας 7 – Τιμές θερμικής αγωγιμότητας και γραμμικής διαπερατότητας από τη μέθοδο Guarded Hot Plate.

	Πάχος [mm]	λ_{cop} [W/(m·K)]	Ψ [W/(m·K)]	λ_{eff} [W/(m·K)] (χωρίς τις τρύπες)
VIP	15	0.0050	0.0099	0.0062
CIC	55	0.0133	0.0049	0.0156

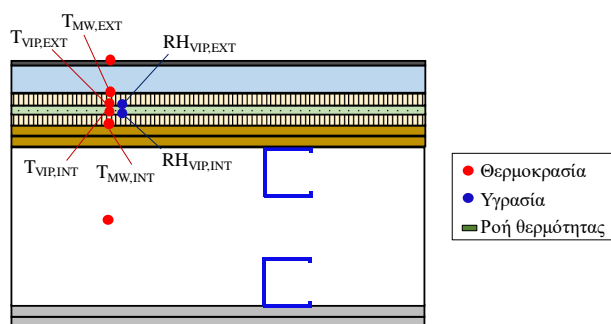
Η παρουσία των δύο EPS οπών δημιουργούν σημειακές θερμογέφυρες και η επίδρασή τους υπολογίστηκε αριθμητικά, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211 [58]. Η πραγματική θερμική αγωγιμότητα του VIP, συμπεριλαμβανομένου της επίδρασης των δύο οπών, είναι ίση με 0.0075 W/(m·K) και η πραγματική θερμική αγωγιμότητα του CIC είναι ίση με 0.0176 W/(m·K). Ως εκ τούτου, η αντίστοιχη θερμική αντίσταση (R-value) του CIC (πάχους 55 mm) είναι 3.12 m²K/W, δηλαδή περίπου 57% μεγαλύτερη από τη θερμική αντίσταση του VIP (1.99 m²K/W). Κάτι που σημαίνει ότι, ο πετροβάμβακας εκτός από τον προστατευτικό ρόλο, χρησιμεύει επίσης ως επιπρόσθετη μόνωση. Τέλος,

η επίδραση όλων των θερμογεφυρών (EPS οπές, επίδραση ακμών και αρμοί) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καθαρής θερμικής αντίστασης της τοιχοποιίας (R_{wall}) κατά 19.2%.

6.2.3 Μετρητικός εξοπλισμός

Ο μετρητικός εξοπλισμός για την πειραματική διερεύνηση του οικίσκου διαχωρίζεται σε τρία συστήματα: το σύστημα παρακολούθησης, το σύστημα μέτρησης R-value και ο εξοπλισμός θερμογραφίας. Το σύστημα παρακολούθησης σχεδιάστηκε για να συλλέγει και να καταγράφει τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας μέσα στην τοιχοποιία, καθώς και τις εσωτερικές/εξωτερικές συνθήκες με στόχο την αξιολόγηση της θερμικής και υγροθερμικής απόδοσης της αναβαθμισμένης τοιχοποιίας (VIP τοίχος). Συνολικά, εγκαταστάθηκαν 47 αισθητήρες (39 αισθητήρες θερμοκρασίας και 8 υγρασίας) ακολουθώντας τις οδηγίες του προτύπου ASTM C1046 [151]. Για τις μετρήσεις θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμίστορ NTC και για τη σχετική υγρασία αισθητήρες Honeywell H1H-4030. Επίσης, τοποθετήθηκε ένας μετεωρολογικός σταθμός κοντά στον οικίσκο για τη μέτρηση των ακόλουθων παραμέτρων: θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου, κατεύθυνση ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία και πτώση βροχής. Οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα με τη βοήθεια ενός προηγμένου συστήματος συλλογής δεδομένων και του καταγραφικού Agilent 34972A, με ρυθμό καταγραφής 1 μέτρηση ανά λεπτό.

Η διάταξη των αισθητήρων στον VIP τοίχο φαίνεται στην Εικόνα 36. Τα δεδομένα που αναλύθηκαν σε αυτή την ενότητα καταγράφηκαν από τον Ιούλιο του 2012, όταν αναβαθμίστηκε η βόρεια τοιχοποιία, έως τον Σεπτέμβριο του 2013. Επίσης, ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας σε συνδυασμό με ένα σύστημα θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια δύο περιόδων, διατηρώντας την εσωτερική θερμοκρασία ίση με ένα καθορισμένο σημείο.



Εικόνα 36 – Θέσεις αισθητήρων θερμοκρασίας, υγρασίας και ροής θερμότητας στον VIP τοίχο και για τους δύο ορόφους.

Για τις μετρήσεις R-value, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα TRSYS01 (Hukseflux), το οποίο παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.6.2, ενώ η θερμογραφία διεκπεραιώθηκε με τη χρήση υπέρυθρης θερμοκάμερας (FLIR μοντέλο 595).

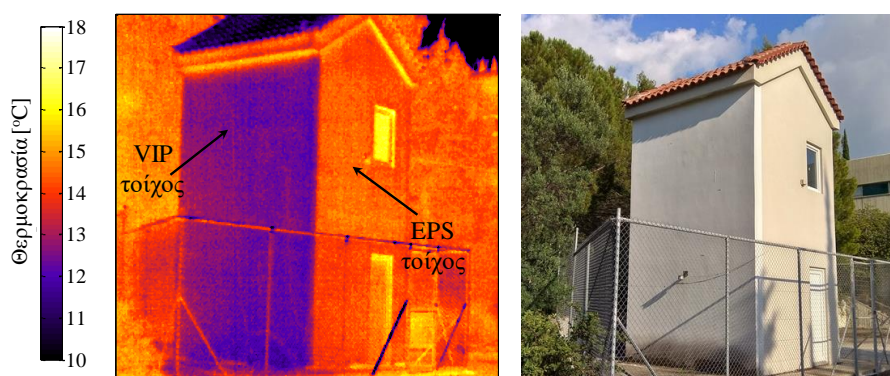
6.2.4 Αξιολόγηση θερμικής απόδοσης τοιχοποιίας

Η αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του κελύφους επικεντρώνεται στην αναβάθμιση της βόρειας τοιχοποιίας όπου το EPS ETICS αντικαταστάθηκε από το CIC ETICS. Η συγκριτική αξιολόγηση δύο τοιχοποιιών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της θερμογραφίας και της επιτόπιας μέτρησης R-value.

Θερμογραφία

Θερμογραφήματα ελήφθησαν προκειμένου να συγκριθεί οπτικά το CIC ETICS με το EPS ETICS του οικίσκου. Η θερμογραφία διεξήχθη κατά τις πρώτες πρωινές ώρες μιας ημέρας του χειμώνα, αποφεύγοντας την ηλιακή ακτινοβολία, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1060 [152]. Μία εσωτερική/εξωτερική διαφορά θερμοκρασίας υψηλότερη από 10°C επιτεύχθηκε μέσω της ενεργοποίησης του συστήματος θέρμανσης.

Ένα θερμογράφημα του κτιρίου απεικονίζεται στην Εικόνα 37. Όπως φαίνεται, ο VIP τοίχος είναι ψυχρότερος από τον EPS τοίχο κατά περίπου 2°C. Αυτό αποδεικνύει ότι ο τοίχος με CIC ETICS είναι πιο μονωμένος από τον τοίχο με συμβατική μόνωση. Επιπλέον, το κεντρικό τμήμα των δύο τοίχων φαίνεται να είναι ομοιογενές χωρίς ισχυρές θερμογέφυρες. Ο θερμοσοβάς στην εξωτερική πλευρά του VIP τοίχου, αποδυναμώνει πιθανές θερμογέφυρες και δημιουργεί ένα ομοιόμορφο πεδίο θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, το πεδίο θερμοκρασίας στις δύο κατακόρυφες πλευρές του βόρειου τοίχου, όπου εγκαταστάθηκε EPS μόνωση στην ακάλυπτη περιοχή από CIC (Εικόνα 35γ), φαίνεται να είναι ομοιόμορφο.



Εικόνα 37 – Θερμογράφημα και όψη της βόρειας και δυτικής τοιχοποιίας.

Μέτρηση R-value

Η επιτόπια μέτρηση R-value των δύο τοιχοποιιών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9869 και τη Dynamic μέθοδο [69] όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.3. Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε βέλτιστες μετρητικές συνθήκες για την Dynamic μέθοδο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4 (ενότητα 4.7). Δηλαδή οι μετρήσεις λήφθηκαν κατά τις περιόδους όπου το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας ήταν ενεργοποιημένο, ώστε να επιτευχθεί θερμοκρασιακή διαφορά υψηλότερη από 10°C και σταθερή κατεύθυνση της ροής θερμότητας. Σύμφωνα με τις οδηγίες των διεθνών προτύπων [69, 117], η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στις μετρούμενες επιφάνειες τοίχων αποφεύχθηκε. Το R-value για τον EPS τοίχο μετρήθηκε επίσης στον βόρειο τοίχο πριν από την αναβάθμισή του.

Οι δύο τοιχοποιίες είναι θερμού τύπου ελαφρού χαλύβδινου σκελετού, επειδή η μόνωση βρίσκεται από την εξωτερική πλευρά του σκελετού. Με υπολογιστική προσομοίωση των δύο τοίχων διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασιακή διακύμανση και η θερμογέφυρα εξαιτίας των ορθοστατών είναι αμελητέα, κάτι που αποκαλύφθηκε και από τα θερμογραφήματα της εσωτερικής επιφάνειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ορθοστάτες βρίσκονται μέσα στο διάκενο αέρα και ο σκελετός δεν διεισδύει τις στρώσεις των υλικών στο κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας. Για το λόγο αυτό, οι δύο τοιχοποιίες αντιμετωπίστηκαν ως ομογενής.

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα για τις τιμές R-value των δύο τοιχοποιιών. Οι επιτόπιες μέσες τιμές R-value είναι 1.74 m²K/W και 3.88 m²K/W για τον EPS και τον VIP τοίχο, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, η αναβάθμιση του βόρειου τοίχου βελτίωσε τη θερμική του απόδοση κατά 123%. Όσον αφορά τη συνολική θερμική αγωγιμότητα δύο τοιχοποιιών (λαμβάνοντας υπόψη το πάχος δύο τοίχων), η τιμή για τον VIP τοίχο είναι χαμηλότερη κατά 43% από τον EPS τοίχο.

Πίνακας 8 – Θεωρητικές και πειραματικές τιμές R-value για τις δύο τοιχοποιίες.

	Πάχος [mm]	Θεωρητικό R-value [m ² K/W]	Πειραματικό R-value [m ² K/W]
EPS τοίχος	284.5	1.74	1.74±0.19
VIP τοίχος	360.0	4.31	3.88±0.43

Συγκρίνοντας τις πειραματικές με τις θεωρητικές τιμές R-value, παρατηρείται ότι η μέτρηση του EPS τοίχου είναι σε συμφωνία με τη θεωρητική τιμή. Στην περίπτωση του VIP τοίχου, η θεωρητική τιμή του R-value είναι περίπου κατά 10% υψηλότερη από την πειραματική. Ωστόσο τα όρια σφάλματος της πειραματικής τιμής περιλαμβάνουν τη θεωρητική τιμή. Αυτή η μικρή διαφορά μπορεί να οφείλεται στις σοβαρές θερμογέφυρες λόγω της ένωσης του VIP τοίχου με τη δυτική και ανατολική τοιχοποιία. Η επίδραση αυτών των θερμογεφυρών επηρεάζει το κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας μέσω της κίνησης του αέρα μέσα στο διάκενο, δημιουργώντας όμως ένα ομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο.

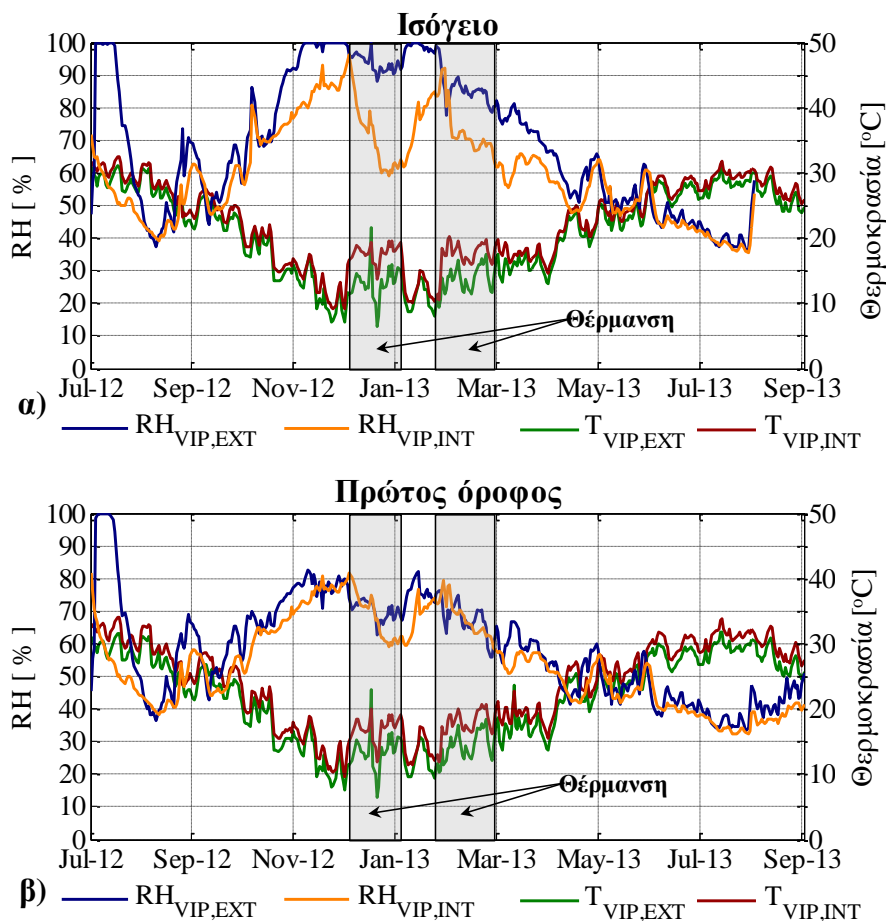
6.2.5 Αξιολόγηση υγρασιακής απόδοσης τοιχοποιίας

Η υγρασιακή απόδοση του VIP τοίχου δίνει έμφαση στις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των VIPs. Η Εικόνα 38 παρουσιάζει την μέση ημερήσια σχετική υγρασία (Relative Humidity - RH) και τις τιμές θερμοκρασίας στις επιφάνειες των VIP για την τοιχοποιία του ισόγειου και του ορόφου. Υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας και παρουσία συμπυκνωμάτων (εμφανίζονται ως RH > 100%) παρατηρούνται κατά τις πρώτες εβδομάδες μετά την αναβάθμιση της τοιχοποιίας. Αυτό οφείλεται στη μέθοδο της «υγρής εγκατάστασης» των CIC πάνελ και στην αρχική υγρασία των δομικών υλικών και κονιαμάτων που επιτυγχάνονται κατά την εγκατάσταση (Εικόνα 35). Η σχετική υγρασία του VIP τοίχου μειώνεται σταδιακά για τις επόμενες 6 εβδομάδες. Οι αυξημένες θερινές θερμοκρασίες συμβάλλουν σημαντικά στην επιτάχυνση της αφύγρανσης της τοιχοποιίας, η οποία φθάνει σε χαμηλή τιμή σχετικής υγρασίας περίπου 40% στις αρχές Σεπτεμβρίου. Η έναρξη του χειμώνα και η προκύπτουσα πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας οδηγεί σε αισθητή αύξηση των επιπέδων σχετικής υγρασίας μέσα στον τοίχο. Ειδικά, συμπύκνωση λαμβάνει χώρα στην εξωτερική επιφάνεια του VIP στο ισόγειο (Εικόνα 38α). Γίνεται εμφανές ότι η υπερβολική υγρασία που βρίσκεται μέσα στον τοίχο, λόγω της αρχικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της κατασκευής, έχει απομακρυνθεί μόνο εν μέρει κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, καθώς οι χαμηλές χειμερινές θερμοκρασίες δημιουργούν επανασυμπύκνωση εντός της τοιχοποιίας.

Η ενεργοποίηση του συστήματος θέρμανσης μειώνει το επίπεδο υγρασίας και εξαλείφει τη συμπύκνωση στην εξωτερική επιφάνεια των VIPs. Κατά τη διάρκεια των περιόδων θέρμανσης, η αυξημένη εσωτερική θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της RH κατά περίπου 20% και στις δύο πλευρές των VIPs. Οι διαφορές στις τιμές RH μεταξύ του ισόγειου και του ορόφου οφείλονται σε διαφορές του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω ευρήματα βασίζονται σε παρατηρήσεις στο βόρειο τοίχο του κτιρίου που δεν εκτίθεται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι εάν το CIC ETICS

είχε εγκατασταθεί στον νότιο, ανατολικό ή δυτικό τοίχο, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία θα είχε ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση της υψηλής ποσότητας αρχικής υγρασίας μειώνοντας τον κίνδυνο μελλοντικής επανασυμπύκνωσης. Η αυξημένη σχετική υγρασία και η παρουσία των συμπυκνωμάτων που αναλύθηκαν παραπάνω επηρεάζουν τη θερμική απόδοση του κελύφους.



Εικόνα 38 – Μετρήσεις σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας στις επιφάνειες του VIP για την τοιχοποιία: α) του ισόγειου και β) του ορόφου.

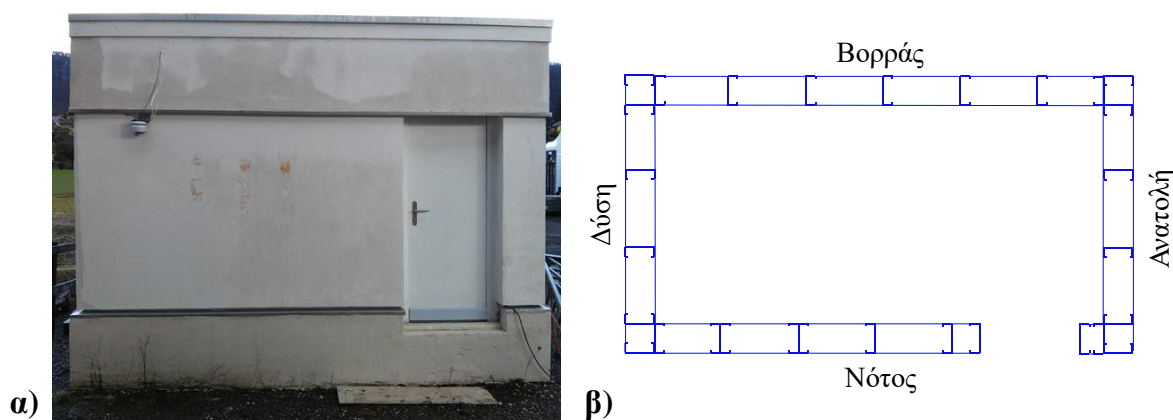
6.3 Ελαφρός πειραματικό οικίσκος στην Ελβετία

Μια εκτενής πειραματική διερεύνηση ενός ελαφρού κτιριακού κελύφους με χαλύβδινο σκελετό (Lightweight Steel-Framed - LSF) και VIPs στις τοιχοποιίες πραγματοποιείται στην παρούσα ενότητα. Ένας πειραματικός οικίσκος κατασκευάστηκε στην Ελβετία, στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού έργου FP7 “ELISSA: Energy Efficient Lightweight Sustainable Safe Steel Construction” (Grant no. 609086) [27]. Στην εσωτερική πλευρά των εξωτερικών τοίχων εγκαταστάθηκε μία στρώση VIP προκειμένου να μειωθούν οι θερμογέφυρες που προκαλούνται από το μεταλλικό σκελετό. Η θερμική και υγροθερμική απόδοση ολόκληρου του κελύφους αξιολογείται μέσω επιτόπιας μέτρησης του U-value, θερμογραφίας και δεδομένων παρακολούθησης για ένα ολόκληρο έτος, από τον Φεβρουάριο του 2016 έως τον Φεβρουάριο του 2017.

6.3.1 Κατασκευή του κτιρίου

Ο πειραματικός οικίσκος, που βρίσκεται στο Laupersdorf της Ελβετίας, κατασκευάστηκε το 2016 με υλικά ξηράς δόμησης στηριγμένα πάνω σε ελαφρύ χαλύβδινο σκελετό (Εικόνα 39). Οι εξωτερικές

διαστάσεις του κτιρίου είναι $4.00 \text{ m} \times 2.19 \text{ m} \times 2.80 \text{ m}$. Η μελέτη εστιάζει στην επίδραση των VIP στην θερμική απόδοση του κελύφους, γι' αυτό το λόγο η κατασκευή δεν περιλάμβανε παράθυρα. Το μοναδικό άνοιγμα του κτιρίου είναι μια ξύλινη πόρτα με διαστάσεις $82 \times 190 \text{ cm}$, στο νότιο τοίχο.



Εικόνα 39 – Ο πειραματικός οικίσκος «ELISSA» : α) μια όψη της νότιας τοιχοποιίας και β) το σχέδιο του φέροντος οργανισμού του κτιρίου.

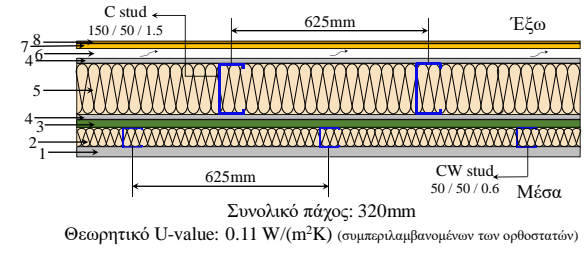
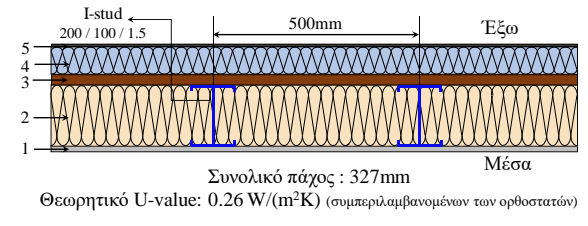
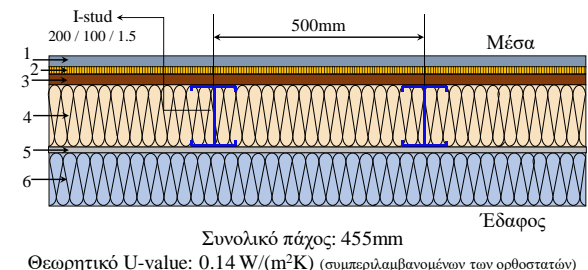
Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει τη διαστρωμάτωση των στοιχείων του κελύφους του οικίσκου. Οι εξωτερικές τοιχοποιίες, πάχους 320 mm , αποτελούνται από δύο μέρη: το φέροντα οργανισμό και το μη φέροντα οργανισμό. Ο φέρων οργανισμός (Εικόνα 39β) αποτελείται από μία σειρά χαλύβδινων ορθοστατών σχήματος «C» (C-studs), με διαστάσεις $150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ και πάχος 1.5 mm , τοποθετημένους σε ίσες αποστάσεις (ανά 625 mm). Το κενό μεταξύ διαδοχικών C-stud γεμίστηκε με πετροβάμβακα πάχους 150 mm (MW150). Στρώσεις γυψοσανίδων στερεώθηκαν στην εξωτερική και την εσωτερική πλευρά των C-studs. Στο κεντρικό τμήμα της εξωτερικής πλευράς του τοίχου τοποθετήθηκε αεριζόμενη πρόσοψη, ενώ το επάνω και το κάτω τμήμα μονώθηκε επιπλέον με EPS επικαλυμμένο με κονίαμα. Ο μη φέρων οργανισμός της τοιχοποιίας αποτελείται από μία σειρά χαλύβδινων ορθοστατών σχήματος «C» (CW-studs), με διαστάσεις $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ και πάχος 0.6 mm , που βρίσκονται στο μέσο της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών C-studs. Το ενδιάμεσο κενό μεταξύ των CW-studs γεμίστηκε με πετροβάμβακα πάχους 50 mm . Δύο στρώσεις γυψοσανίδας τοποθετήθηκαν στην εσωτερική πλευρά της τοιχοποιίας.

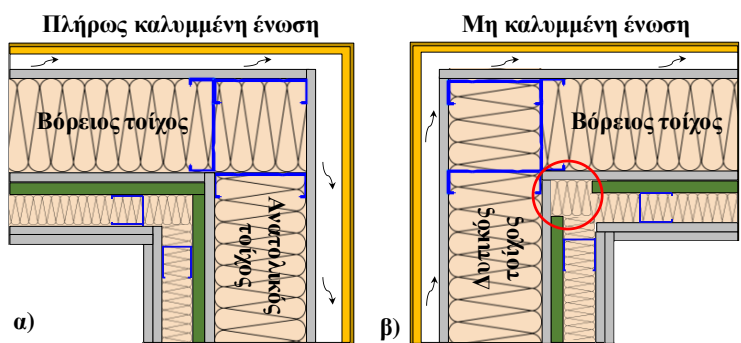
Μία στρώση VIP, πάχους 20 mm , τοποθετήθηκε μεταξύ του φέροντος και του μη φέροντος οργανισμού της τοιχοποιίας. Τα VIP κάλυψαν τις επιφάνειες των εσωτερικών τοίχων, σύμφωνα με ένα μοτίβο που σχεδιάστηκε από τον κατασκευαστή των VIPs με στόχο τη μεγιστοποίηση της περιοχής που καλύπτεται με VIP μέ, όσο το δυνατόν, μεγαλύτερα πάνελ, μειώνοντας την επίδραση των ακμών (Ενότητα 3.5). Γι' αυτό το σκοπό, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 13 διαφορετικά μεγέθη πάνελ. Η τοποθέτηση των VIP στο τοίχωμα πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο «ξηρής εγκατάστασης», χρησιμοποιώντας μια ταινία διπλής επικολλήσεως. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε συγκολλητική ταινία για τη μείωση των θερμογεφυρών που προκαλούνται στους αρμούς των πάνελ.

Εξαιτίας ανακρίβειών σε διαστάσεις, μία ένωση μεταξύ δύο γειτονικών τοιχοποιιών (βόρεια και ανατολική) δεν καλύφθηκε πλήρως με VIP δημιουργώντας ένα διάκενο 100 mm , όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Ένα μέρος αυτής της κατασκευαστικής αστοχίας οφείλεται στην ανοχή στην παραγωγή, όπου η καλυμμένη περιοχή VIP πρέπει να είναι ελαφρώς μικρότερη (ανοχή $\sim 5 \text{ mm}$ σε κάθε άκρο της καλυπτόμενης περιοχής) από την καλυμμένη επιφάνεια (ενότητα 3.5.1). Όλες οι ακάλυπτες περιοχές γεμίστηκαν με πετροβάμβακα. Επιπλέον, η «ακατάλληλη» μεταχείριση των VIP από μη εκπαιδευμένους τεχνικούς κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή

και την απώλεια του κενού σε δύο VIPs που βρίσκονται στη νότια τοιχοποιία, αποκαλύπτοντας την ανάγκη μεταχείρισης των VIPs από έμπειρα και καλά εκπαιδευμένα άτομα.

Πίνακας 9 – Η διάρθρωση των στοιχείων του κελύφους.

Στοιχείο κελύφους	Διάρθρωση στοιχείων κελύφους	α /α	Υλικό	Πάχος [mm]
Τοιχοποιία	 <p>Συνολικό πάχος: 320mm Θεωρητικό U-value: 0.11 W/(m²K) (συμπεριλαμβανομένων των ορθοστατών)</p>	1	Γυψοσανίδα	30
		2	Πετροβάμβακας	50
		3	VIP	20
		4	Γυψοσανίδα	15
		5	Πετροβάμβακας	150
		6	Διάκενο αέρα	27
		7	Τσιμεντοσανίδα	12
		8	Επίχρισμα	1
Οροφή	 <p>Συνολικό πάχος : 327mm Θεωρητικό U-value: 0.26 W/(m²K) (συμπεριλαμβανομένων των ορθοστατών)</p>	1	Γυψοσανίδα	15
		2	Πετροβάμβακας	200
		3	Πλάκα οροφής	28
		4	EPS	80
		5	Στεγανοποίηση οροφής	4
Δάπεδο	 <p>Συνολικό πάχος: 455mm Θεωρητικό U-value: 0.14 W/(m²K) (συμπεριλαμβανομένων των ορθοστατών)</p>	1	Πάτωμα	32
		2	Ηχομόνωση	20
		3	Πλάκα δαπέδου	28
		4	Πετροβάμβακας	200
		5	Γυψοσανίδα	15
		6	EPS	160



Εικόνα 40 – Ένωση μεταξύ δύο τοιχοποιιών: α) σωστή τοποθέτηση και β) κατασκευαστική αστοχία.

Ο φέρων οργανισμός της οροφής (Πίνακας 9) είναι κατασκευασμένος από χαλύβδινους ορθοστάτες σχήματος «I» (I-stud), διαστάσεων 200 mm × 100 mm και πάχους 1.5 mm, τοποθετημένους ανά 500 mm. Το ενδιάμεσο κενό μεταξύ των I-studs γεμίστηκε με πετροβάμβακα πάχους 200 mm. Στην εξωτερική πλευρά της μεταλλικής κατασκευής τοποθετήθηκε μια πλάκα οροφής ενώ στην εσωτερική πλευρά τοποθετήθηκε μια στρώση γυψοσανίδας. Μια μονωτική στρώση EPS, πάχους 80

mm, προστατευμένη με κονίαμα, εφαρμόστηκε στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής. Το συνολικό πάχος της οροφής είναι 327 mm.

Το δάπεδο (Πίνακας 9) είναι κατασκευασμένο από χαλύβδινους ορθοστάτες (I-studs) πάχους 1.5 mm, και διαστάσεις 200 mm × 100 mm, τοποθετημένους ανά 500 mm. Το ενδιάμεσο κενό μεταξύ των I-studs γεμίστηκε με πετροβάμβακα πάχους 200 mm. Μια στρώση γυψοσανίδας και μια στρώση EPS πάχους 160 mm τοποθετήθηκε στο κάτω μέρος του δαπέδου. Στην εσωτερική πλευρά, τοποθετήθηκε μία πλάκα δαπέδου, μία στρώση ηχομόνωσης και το τελικό πάτωμα. Το συνολικό πάχος του δαπέδου είναι 455 mm.

6.3.2 Ιδιότητες υλικών

Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών είτε μετρήθηκαν με τη μέθοδο Guarded Hot Plate (GHP), είτε λήφθηκαν από πίνακες των κατασκευαστών και συνοψίζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10 – Θερμικές ιδιότητες υλικών.

Υλικά	Θερμική αγωγιμότητα [W/(m·K)]	Πυκνότητα [kg/m ³]	Θερμοχωρητικότητα [J/(kg·K)]
Χάλυβας ορθοστατών	60.5	7854	434
Γυψοσανίδα	0.27 ^α	1033	990
Πετροβάμβακας	0.035 ^α	23	850
VIP	0.0045 ^{α,β}	195	800
Τσιμεντοσανίδα	0.35 ^α	1150	1000
Επίχρισμα	0.50	700	1000
Πλάκα οροφής/δαπέδου	0.44 ^α	1500	1000
EPS	0.035 ^α	42	1400
Στεγανοποίηση οροφής	0.2	1000	1000
Πάτωμα	0.38	1500	1000
Ηχομόνωση	0.07	250	2100
Πόρτα	0.22 ^α	850	900

^α Μετρούμενες τιμές από Guarded Hot Plate

^β Πραγματική θερμική αγωγιμότητα, λ_{eff} , για πάνελ με διαστάσεις 1000 × 600 (mm)

Συγκεκριμένα, η πραγματική θερμική αγωγιμότητα του VIP, λ_{eff} , λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση των ακμών και των θερμογεφυρών λόγω των ενώσεων των πάνελ μετρήθηκε με τη μέθοδο GHP, που περιγράφεται στην ενότητα 3.4.1, σύμφωνα με τις εξισώσεις 16 και 17. Οι μετρούμενες πραγματικές θερμικές αγωγιμότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 11, και αφορά τις διαστάσεις του πιο κοινού πάνελ (διαστάσεις 1000 mm x 600 mm) για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, 10°C και 23°C.

Πίνακας 11 – Θερμικές αγωγιμότητες και γραμμική διαπερατότητα με τη χρήση της μεθόδου Guarded Hot Plate.

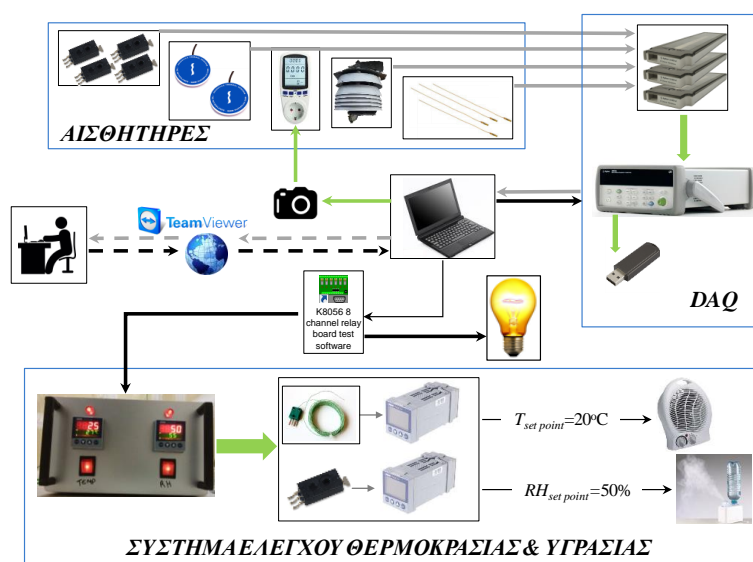
Θερμοκρασία	λ_{cop} [W/(m·K)]	Ψ_{VIP} [W/(m·K)]	λ_{eff} [W/(m·K)]
T=10°C	0.00375	0.00618	0.00444
T=23°C	0.00392	0.00616	0.00461

Όπως φαίνεται, η επίδραση των ακμών αυξάνει σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα λ_{eff} του VIP (περίπου 18%) σε σύγκριση με τη θερμική αγωγιμότητα στο κέντρο του πάνελ (λ_{cop}). Αυτή η αύξηση

της θερμικής αγωγιμότητας μειώνει την καθαρή θερμική αντίσταση της τοιχοποιίας (χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οποιαδήποτε άλλη θερμογέφυρα) κατά 7.7%. Επιπλέον, οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε ελαφρώς υψηλότερες τιμές λ_{eff} , καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 13°C έχει ως αποτέλεσμα τη αύξηση της λ_{eff} κατά περίπου 4%. Η πραγματική θερμική αγωγιμότητα υπολογίστηκε για όλα τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη των VIP. Η λ_{eff} των πάνελ κυμαίνεται από 4.5 έως 6.5 mW/(m·K) ανάλογα με τις διαστάσεις του πάνελ, αποδεικνύοντας την ισχυρή συνεισφορά του μεγέθους των VIP στην επίδραση των ακμών.

6.3.3 Μετρητική διάταξη

Το Σύστημα Λήψης Δεδομένων (Data Acquisition System - DAS), που εγκαταστάθηκε στον οικίσκο, σχεδιάστηκε για να παρακολουθεί και να καταγράφει τα απαραίτητα δεδομένα για την αξιολόγηση της θερμικής και υγραυερμικής απόδοσης του κελύφους. Το σύστημα παρακολούθησης περιγράφεται στην Εικόνα 41. Συγκεκριμένα, περίπου 100 αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή θερμοκρασιών μέσα στα στοιχεία του κελύφους (τοιχοποιίες, οροφή και δάπεδο), ροής θερμότητας, εσωτερικές συνθήκες, δεδομένα καιρού και ενεργειακή κατανάλωση των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρικών συσκευών. Οι μετρήσεις καταγράφηκαν για ένα ολόκληρο έτος, από τον Φεβρουάριο του 2016 έως τον Φεβρουάριο του 2017.

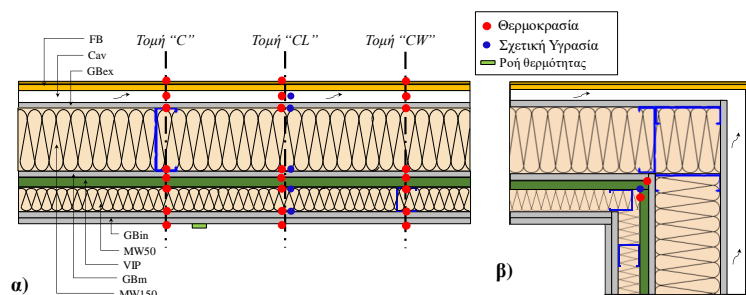


Εικόνα 41 – Το σύστημα παρακολούθησης.

Τα όργανα της παρούσας μελέτης είναι παρόμοια με το σύστημα παρακολούθησης που περιγράφεται στην ενότητα 6.2.3. Εν συντομία, για τις μετρήσεις θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμοστον NTC (MCD 10k3MCD1), η σχετική υγρασία μετρήθηκε μέσω αισθητήρων Honeywell HIH-4030, η ροή θερμότητας μέσω αισθητήρων Hukseflux (τύπος HFP01). Για τις μετρήσεις των καιρικών συνθηκών (θερμοκρασία και υγρασία του αέρα) κατασκευάστηκε ένας μικρός μετεωρολογικός σταθμός. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας για τις εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες ήταν συνεχώς αεριζόμενοι και προστατευμένοι από την ηλιακή/θερμική ακτινοβολία. Τέλος, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μετρήθηκε με ένα απλό οικιακό μετρητή ισχύος/ενέργειας. Η υπέρυθρη θερμογραφία πραγματοποιήθηκε με χρήση της φορητής θερμοκάμερας IR (FLIR μοντέλο 595).

Ο στόχος της πειραματικής διερεύνησης είναι η εκτίμηση της θερμικής απόδοσης του κελύφους εστιάζοντας στη θερμική και υγραυερμική συμπεριφορά των VIPs. Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην επίδραση των επαναλαμβανόμενων και των γεωμετρικών (μη επαναλαμβανόμενων) θερμογεφυρών

που προκαλούνται από το μεταλλικό σκελετό και τις ενώσεις των στοιχείων του κελύφους, αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό, η παρακολούθηση της θερμοκρασίας στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους πραγματοποιήθηκε σε τρεις τομές: «C», «CL» και «CW», όπως παρουσιάζεται η Εικόνα 42. Οι αισθητήρες υγρασίας τοποθετήθηκαν στην τομή «CL». Όλοι οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στις διεπαφές μεταξύ των στρώσεων ακολουθώντας τις οδηγίες που προτείνονται στο πρότυπο ASTM C1046 [151].



Εικόνα 42 – Θέσεις αισθητήρων: α) στο κεντρικό μέρος των στοιχείων του κελύφους και β) στις ενώσεις των τοιχοποιιών

Όλοι οι αισθητήρες συνδέθηκαν στη συσκευή λήψης δεδομένων (Data Acquisition - DAQ), Agilent 34972A, για επεξεργασία και καταγραφή σημάτων. Το χρονικό διάστημα για όλες τις μετρήσεις ήταν 2 λεπτά. Η συσκευή DAQ συνδέθηκε με ένα φορητό υπολογιστή που κατέγραφε τα δεδομένα κατά τη διάρκεια της 12μηνιας περιόδου παρακολούθησης.

Η εσωτερική θερμοκρασία και η υγρασία ελέγχθηκαν μέσω ενός συστήματος ελέγχου (JUMO dTRON 316). Η εσωτερική θερμοκρασία διατηρήθηκε στους 21°C. Όταν η θερμοκρασία έπεφτε κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, ενεργοποιούνταν ένα αερόθερμο. Επιπλέον, το σύστημα αυτό απενεργοποιήθηκε για τρεις περιόδους προκειμένου να εξεταστεί η απόκριση του κελύφους χωρίς τη χρήση συστήματος θέρμανσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τους καλοκαιρινούς μήνες, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα ξεπέρασε τους 21°C και το σύστημα ελέγχου προφανώς δεν χρησιμοποιούταν.

6.3.4 Θερμική αξιολόγηση κελύφους

Στην αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του κτιριακού κελύφους δίνεται έμφαση στην επίδραση του VIP για την αναβάθμιση του κελύφους καθώς και στην επίδραση των θερμογεφυρών.

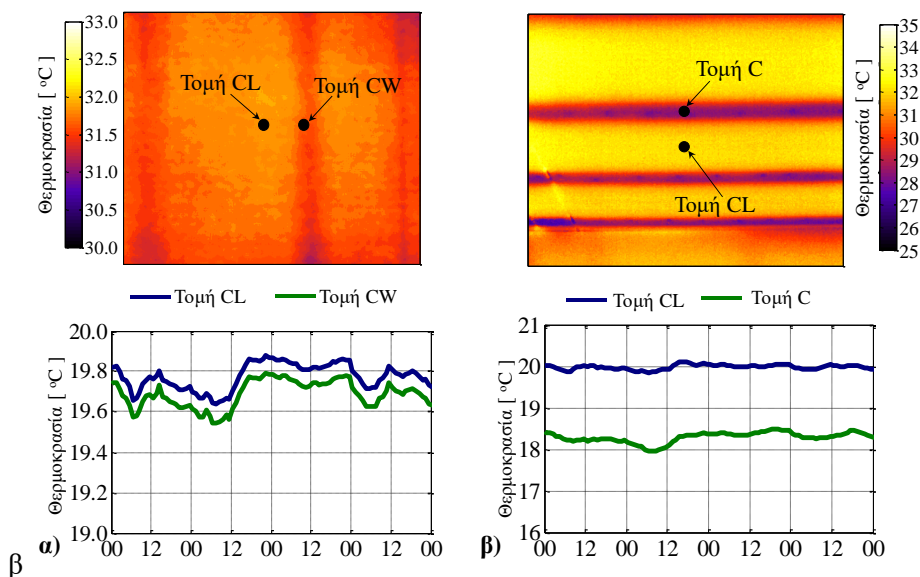
Θερμογέφυρες

Μια μεγάλη ποσότητα των ενεργειακών απωλειών οφείλεται στις θερμογέφυρες που εισάγονται από το μεταλλικό σκελετό του κτιρίου. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών που προκαλούνται από τα μεταλλικά στηρίγματα στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα θερμογραφίας και μετρήσεις θερμοκρασίας. Η θερμογραφία πραγματοποιήθηκε με διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των εσωτερικών/εξωτερικών χώρων ίση με 25°C ($T_{in} = 30^{\circ}\text{C}$ και $T_{out} = 5^{\circ}\text{C}$), λαμβάνοντας υπόψιν τις υποδείξεις του προτύπου ASTM C1060 [152].

Σύμφωνα με τα θερμογραφήματα, η επιφανειακή θερμοκρασία των τοιχοποιιών διαταράσσεται ελαφρώς από την παρουσία των ορθοστατών (Εικόνα 43α-κορυφή). Ακόμα και στην περίπτωση όπου η διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού/εξωτερικού χώρου έφθασε στους 25°C, η μέγιστη θερμοκρασιακή διακύμανση ήταν 0.3°C. Αυτή η χαμηλή διακύμανση οφείλεται στην ενδιάμεση

στρώση VIP που μειώνει τη ροή θερμότητας και στο γεγονός ότι οι τοιχοποιίες υποστηρίζονται από δύο σειρές μεταλλικών ορθοστατών με εναλλασσόμενες θέσεις δημιουργώντας ένα πιο ομοιόμορφο θερμοκρασιακό προφίλ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοκρασίας δείχνουν επίσης ότι η διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας δεν υπερβαίνει τους 0.1°C καθ' όλη τη διάρκεια της μετρητικής περιόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 43α.

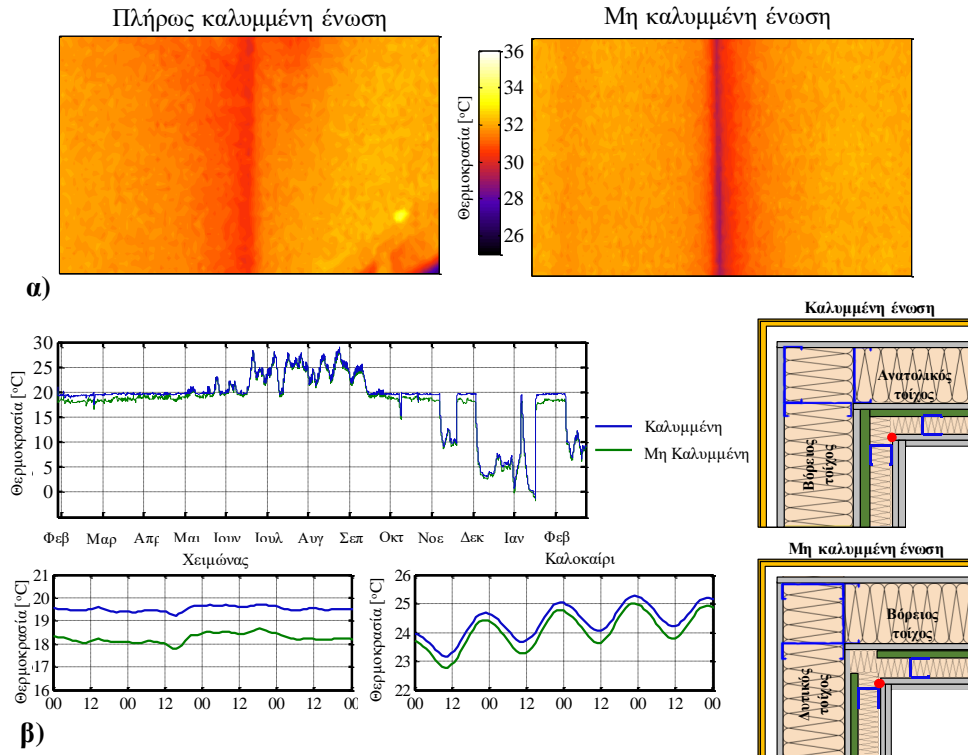
Από την άλλη πλευρά, οι μεταλλικοί ορθοστάτες έχουν σημαντική επίδραση στη θερμική απόδοση της οροφής (απουσία VIP). Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 43β, μια μεγάλη διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας, περίπου 4°C , παρατηρείται κατά τη διάρκεια της θερμογραφίας. Επιπλέον, η περιοχή μεταξύ των στηριγμάτων (τομή «CL») είναι θερμότερη από την περιοχή του ορθοστάτη (τομή «C»), κατά περίπου 2°C κατά τη χειμερινή περίοδο, όπως παρουσιάζονται στις μετρήσεις θερμοκρασίας. Σημειώνεται ότι παρατηρείται μία διαταραχή υψηλής θερμοκρασίας παρά το γεγονός ότι η οροφή είναι ένα LSF στοιχείο υβριδικού τύπου, καθώς η μόνωση κατανέμεται μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας και του κενού μεταξύ των ορθοστατών.



Εικόνα 43 – Θερμογραφήματα και μετρήσεις θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια χειμερινών ημερών: α) εσωτερικής επιφάνειας τοιχοποιίας και β) εσωτερικής επιφάνειας οροφής.

Η επίδραση των μικρών κατασκευαστικών αστοχιών στις διαστάσεις των VIPs στις γεωμετρικές θερμογέφυρες ανάμεσα σε δύο τοιχοποιίες (που δημιουργούν μια μικρή περιοχή που δεν καλύπτεται από VIPs) διερευνάται μέσω θερμογραφίας και μετρήσεων θερμοκρασίας. Η Εικόνα 44α απεικονίζει τα θερμογραφήματα δύο ενώσεων: μία πλήρως καλυμμένη και μία μη καλυμμένη με VIPs, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 40. Η απουσία του VIP στις ενώσεις μειώνει τις θερμοκρασίες κατά περίπου 2°C , κατά τη διάρκεια της θερμογραφίας. Αυτή η σημαντική επίδραση των VIPs στις γεωμετρικές θερμογέφυρες φανερώνεται επίσης από τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοκρασίας σε όλο το έτος. Η Εικόνα 44β απεικονίζει τις μετρήσεις θερμοκρασίας για τις δύο ενώσεις στη διεπιφάνεια μεταξύ της εσωτερικής γυψοσανίδας και του πετροβάμβακα (MW50) πάχους 50 mm. Παρατηρείται ότι η πλήρως καλυμμένη (από VIP) ένωση έχει πάντα υψηλότερη θερμοκρασία από τη μη καλυμμένη. Η επίδραση αυτής της κατασκευαστικής αστοχίας είναι ισχυρότερη τους χειμερινούς μήνες, καθώς η διαφορά θερμοκρασίας φτάνει τους 1.5°C κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ κατά τη θερινή περίοδο η διαφορά μειώνεται στους 0.3°C . Η επίδραση των κατασκευαστικών αστοχιών επιβεβαιώνεται αριθμητικά από τον υπολογισμό της γραμμικής θερμικής διαπερατότητας (Ψ_{2D}) των δύο ενώσεων. Τα αποτελέσματα

παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο (ενότητα 7.4.1) σχετικά με την αριθμητική διερεύνηση του κτιρίου.



Εικόνα 44 – Καλυμμένη και μη καλυμμένη ένωση από VIP: α) θερμογραφήματα και β) μετρήσεις θερμοκρασίας ανάμεσα στην εσωτερική στρώση γυψοσανίδας και το MW50 κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του καλοκαιριού.

Επιτόπια μέτρηση U-value

Η θερμική διαπερατότητα των τοιχοποιιών, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης των μεταλλικών ορθοστατών, $U_{overall}$ μετρήθηκε επιτόπια σύμφωνα με τη μέθοδο Αντιπροσωπευτικών Σημείων (Representative Points Method – RPM), όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 5.2.2). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, ο αισθητήρας ροής θερμότητας πρέπει να εγκατασταθεί στα «Αντιπροσωπευτικά Σημεία», όπου η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια είναι πάντα ίση με την μέση ροή θερμότητας ολόκληρης της επιφάνειας. Τα Αντιπροσωπευτικά Σημεία αναγνωρίζονται μέσω της τομής του \hat{T} προφίλ (λαμβάνοντας υπόψιν το πλάτος του αισθητήρα) με τη μέση θερμοκρασία επιφάνειας. Στην παρούσα τοιχοποιία το θερμοκρασιακό προφίλ υπολογίστηκε αριθμητικά, προσομοιώνοντας την τοιχοποιία χρησιμοποιώντας το λογισμικό COMSOL

Μετρήσεις εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα και ροής θερμότητας χρησιμοποιούνται για την επιτόπια μέτρηση του $U_{overall}$ του τοίχου. Η επεξεργασία των μετρήσεων για τον υπολογισμό του U_{repr} πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την Average μέθοδο, που περιγράφεται στο ISO 9869 [69]. Το $U_{overall}$ μετρήθηκε σε διαφορετικές περιοχές της τοιχοποιίας και σε διάφορες περιόδους μέτρησης κατά τη διάρκεια του έτους. Τα αποτελέσματα των μετρούμενων μέσων τιμών του $U_{overall}$ παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τη θεωρητική τιμή του $U_{overall}$, όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211 [58], για το κεντρικό τμήμα της εξεταζόμενης τοιχοποιίας. Όπως φαίνεται, το πειραματικό $U_{overall}$ βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τη θεωρητική τιμή, παρέχοντας μια διαφορά περίπου 2%. Τα αποτελέσματα που

λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του έτους είναι πολύ κοντά και παρέχουν υψηλή επαναληψιμότητα, καθώς η σχετική τυπική απόκλιση τους είναι μόνο 1%.

Πίνακας 12 – Θεωρητικό και πειραματικό $U_{overall}$ για τη βόρεια τοιχοποιία.

	Περίοδος μέτρησης	$U_{overall}$ [W/(m ² ·K)]
Πειραματικό $U_{overall}$	Χειμώνας	0.1173
	Άνοιξη	0.1169
	Καλοκαίρι	0.1180
	Φθινόπωρο	0.1159
	Μέση τιμή	0.1170±0.019
	Θεωρητικό $U_{overall}$	0.1146
	Διαφορά	2.1%

Παρά το γεγονός ότι η διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας είναι σχεδόν αμελητέα, η θερμική διαπερατότητα των τοίχων αυξάνεται κατά 27% εξαιτίας της παρουσίας των ορθοστατών. Περαιτέρω αριθμητική διερεύνηση των τοιχοποιιών με και χωρίς τη στρώση του VIP έδειξε ότι το θεωρητικό $U_{overall}$ της τοιχοποιίας χωρίς το VIP είναι 0.2422 W/(m²·K). Ως εκ τούτου, η στρώση VIP μειώνει το $U_{overall}$ στο κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας κατά περίπου 52%. Σημειώνεται ότι οι απόλυτες τιμές του $U_{overall}$ δείχνουν ότι η τοιχοποιία παραμένει υψηλά μονωμένη ακόμη και στην περίπτωση χωρίς το VIP. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επίδραση των επιφανειακών αντιστάσεων σε αμφοτέρως τις τοιχοποιίες (με και χωρίς VIP) είναι πολύ χαμηλή, εξαιτίας του γεγονότος ότι η θερμική αντίσταση των τοιχοποιιών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτές.

Πειραματικός προσδιορισμός συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, H_D

Ο προσδιορισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του κελύφους, H_D , βασίστηκε σε ένα απλοποιημένο γραμμικό μοντέλο που εισήχθη από τους Jimenez et. al [130, 132-134, 164, 165]. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το ενεργειακό ισοζύγιο σε χρονικά μόνιμες συνθήκες περιλαμβάνει τέσσερις όρους: τις απώλειες θερμότητας που οφείλονται στον κέλυφος του κτιρίου, τα ηλιακά κέρδη, τις απώλειες θερμότητας λόγω αερισμού και τα θερμικά κέρδη που εισάγονται από το σύστημα θέρμανσης και τις ηλεκτρικές συσκευές του οικίσκου. Το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να διατυπωθεί με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q = H_D \cdot (T_{in} - T_{out}) + gA_{sol}I_{sol} + H_{ve}W_s(T_{in} - T_{out}) \quad 27$$

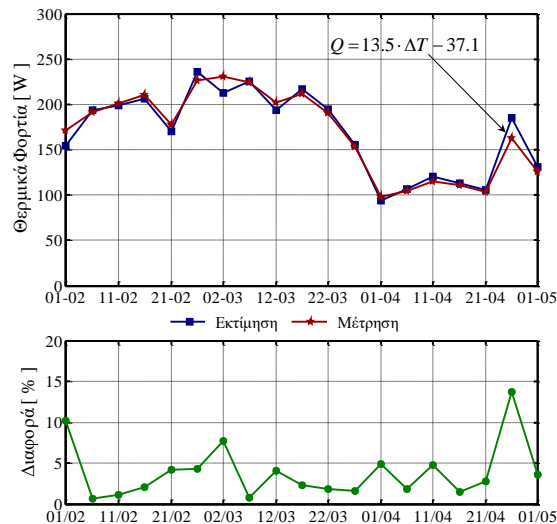
όπου Q [W] είναι τα θερμικά φορτία από το σύστημα θέρμανσης και ηλεκτρικές συσκευές, T_{in} [°C] και T_{out} [°C] η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία, αντίστοιχα, g [-] η ηλιακή διαπερατότητα (αρνητικό για την παραπάνω εξίσωση), I_{sol} [W/m²] η ηλιακή ακτινοβολία, A_{sol} [m²] η πραγματική επιφάνεια ηλιακής έκθεσης, H_{ve} [W/K] συντελεστής απωλειών θερμότητας που αφορά τον εισερχόμενο αέρα και W_s [m/s] η ταχύτητα αέρα.

Υποθέτοντας ότι η διείσδυση αέρα είναι αμελητέα (πάντα κλειστή η πόρτα, μοναδικό άνοιγμα), ο τρίτος όρος της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να μηδενιστεί. Ακόμη, εξαιτίας της απουσίας κάποια διαφανούς επιφάνειας στο κέλυφος (π.χ. παράθυρο) και του γεγονότος ότι ένα μεγάλο μέρος του οικίσκου σκιάζεται από γειτονικό κτίριο, ο δεύτερος όρος της εξίσωσης που αφορά τα ηλιακά κέρδη,

μπορεί επίσης να παραληφθεί. Τα θερμικά φορτία, Q , και οι θερμοκρασίες T_{in} και T_{out} είναι διαθέσιμες από τις μετρήσεις. Τα θερμικά φορτία αφορούν τη συνολική ηλεκτρική κατανάλωση μετρούμενη από το μετρητή ενέργειας/ισχύος, υποθέτοντας ότι όλη η ηλεκτρική κατανάλωση των συσκευών μετατρέπεται σε θερμότητα. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο άμεσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, H_D , το ισοζύγιο ενέργειας διαμορφώνεται στο γραμμικό στατικό μοντέλο για κάθε χρονικό διάστημα t :

$$Q_t = H_D \cdot \Delta T_t + c + \varepsilon_t \quad 28$$

όπου ΔT_t η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού χώρου και αεριζόμενης πρόσοψης για κάθε χρονικό διάστημα t , c μια σταθερά του μοντέλου και ε_t το σφάλμα. Επιλέχθηκε ένα γραμμικό μοντέλο ARX (Auto-Regressive with eXogeneous input) για τον υπολογισμό των παραμέτρων χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB [133]. Δεδομένου ότι το μοντέλο είναι μοντέλο σταθερής κατάστασης (μόνιμες συνθήκες), ο επιβαλλόμενος φυσικός περιορισμός είναι ότι όλες οι εισροές (Q , T_{in} και T_{out}) και η έξοδος (φυσικές παράμετροι) πρέπει να είναι σταθερές [130, 134, 165]. Μελέτες έχουν δείξει ότι μία περίοδος ολοκλήρωσης 5 ημερών μπορεί να ικανοποιήσει τα στατιστικά κριτήρια του μοντέλου και να δώσει αποδεκτά αποτελέσματα [164].



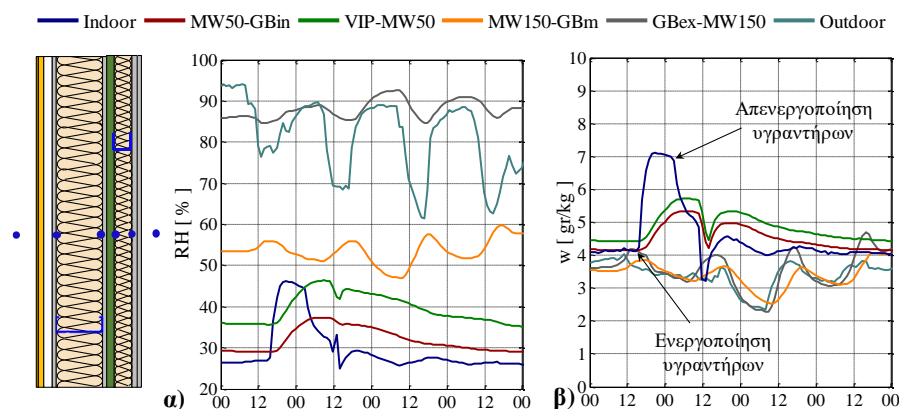
Εικόνα 45 – Πειραματική και εκτιμώμενη τιμή θερμικών φορτίων σύμφωνα με το απλοποιημένο μοντέλο.

Για την εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του κελύφους, χρησιμοποιήθηκε το απλοποιημένο μοντέλο για μια περίοδο κατά την οποία το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας ήταν ενεργοποιημένο και διαδοχικές μετρήσεις της κατανάλωσης ενέργειας ήταν διαθέσιμες. Η Εικόνα 45 απεικονίζει τα θερμικά φορτία όπως προκύπτουν από το απλοποιημένο μοντέλο και τις μετρούμενες τιμές κατανάλωσης ενέργειας. Παρατηρείται ότι οι εκτιμήσεις είναι σε καλή συμφωνία με τις μετρούμενες τιμές και το μέσο σφάλμα είναι 4%. Αυτό δείχνει ότι παρά το γεγονός ότι το μοντέλο είναι αρκετά απλοποιημένο, η απλότητα του κελύφους (απουσία παραθύρων) επιτρέπει τη χρήση ενός τέτοιου απλού μοντέλου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο εκτιμώμενος άμεσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας H_D είναι ίσος με 13.5 W/K με συντελεστή R^2 ίσο με 0.96. Στο επόμενο κεφάλαιο (ενότητα 7.4.1), αποκαλύπτεται ότι η πειραματική εκτίμηση του H_D είναι σύμφωνη με τη θεωρητική τιμή (η οποία προκύπτει ίση με 12.57 W/K). Η διαφορά μεταξύ της πειραματικής και της θεωρητικής προσέγγισης είναι μικρότερη από 7%, η οποία μπορεί να εξηγηθεί λόγω της απλότητας του μοντέλου, της επίδρασης του εδάφους, των επιδράσεων της ακτινοβολίας και άλλων μη υπολογιζόμενων παραμέτρων.

6.3.5 Υγροθερμική αξιολόγηση κελύφους

Μια δοκιμή υγρασίας διεξήχθη προκειμένου να διερευνηθεί η απόκριση του κτιριακού κελύφους στη μεταφορά μάζας. Η βασική ιδέα της δοκιμής ήταν η αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία του εσωτερικού χώρου μέσω υγραντήρων με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής σχετικής υγρασίας. Με αυτό τον τρόπο, διερευνάται η αντίδραση του κελύφους στη μεταφορά υγρασίας. Έχοντας φθάσει σε ένα σταθερό σημείο αναφοράς εσωτερικής σχετικής υγρασίας ($RH = 45\%$) για αρκετές ώρες, οι υγραντήρες απενεργοποιήθηκαν για να διερευνηθεί η απόκριση των υλικών κατά την αφύγρανση. Το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας ήταν ενεργοποιημένο κατά τη διάρκεια της δοκιμής υγρασίας διατηρώντας την εσωτερική θερμοκρασία στους 21°C .

Οι μετρήσεις της σχετικής υγρασίας (RH) στις διεπιφάνειες μεταξύ των στρώσεων της τοιχοποιίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 46α. Παρατηρείται ότι η RH στις διεπιφάνειες μπροστά από το VIP αυξάνεται σχεδόν ταυτόχρονα, ενώ η RH πίσω από το VIP (MW150 - GBm) δεν επηρεάζεται από την αύξηση της εσωτερικής υγρασίας. Αυτό φαίνεται επίσης από την λόγο υγρασίας (ή περιεκτικότητα σε υδρατμούς, w) (Εικόνα 46β), που υπολογίζεται από τον ψυχομετρικό χάρτη, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της υγρασίας και θερμοκρασίας στις διεπιφάνειες μεταξύ των στρώσεων. Ο λόγος υγρασίας μπροστά από το VIP αυξάνεται, ενώ ο λόγος υγρασίας πίσω από το VIP ακολουθεί τις εξωτερικές συνθήκες. Αυτό δείχνει ότι το VIP εμποδίζει τη μεταφορά μάζας στις εξωτερικές στρώσεις της τοιχοποιίας, εξαιτίας του περιβλήματος του VIP.



Εικόνα 46 – Δοκιμή υγρασίας: α) RH και β) περιεκτικότητα υγρασίας μεταξύ των στρώσεων της τοιχοποιίας.

6.4 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται τη διεξοδική πειραματική διερεύνηση δύο πραγματικών κτιριακών κελυφών με VIP σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Οι δύο κατασκευές είναι κτίρια μικρής κλίμακας («οικίσκοι») κτισμένα στην Ελλάδα και στην Ελβετία. Στην ελληνική εφαρμογή, η οποία είναι η πρώτη εφαρμογή των VIP σε κτίριο στην Ελλάδα, διερευνάται η αναβάθμιση μιας τοιχοποιίας που ήταν αρχικά μονωμένη με συμβατική μόνωση σε μόνωση με VIP, (Composite Insulation Component - CIC). Το ελβετικό κτίριο είναι μια ελαφριά κατασκευή με χαλύβδινο σκελετό, όπου χρησιμοποιήθηκε VIP σε ενδιάμεση στρώση της εξωτερικής τοιχοποιίας με σκοπό τη μείωση των θερμογεφυρών. Στα δύο κτίρια χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα παρακολούθησης για τουλάχιστον ένα έτος. Οι πειραματικές μέθοδοι και τεχνικές, που έχουν εισαχθεί και συζητηθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση διαφόρων δεικτών θερμικής απόδοσης. Η μελέτη

επικεντρώνεται στη θερμική και υγροθερμική συμπεριφορά του κελύφους υπογραμμίζοντας τη συνεισφορά των VIPs.

Οι ιδιότητες των υλικών προσδιορίζονται με τη μέθοδο Guarded Hot Plate, δίδοντας μεγαλύτερη έμφαση στην επίδραση των ακμών των VIPs. Διαπιστώθηκε ότι η επίδραση των ακμών αυξάνει τη θερμική αγωγιμότητα των VIPs περίπου 20% (για τυπικό μέγεθος VIP). Ωστόσο, το μέγεθος του πάνελ επηρεάζει σημαντικά την πραγματική θερμική αγωγιμότητα, αφού για μικρά πάνελ αυτή η αύξηση μπορεί να φτάσει μέχρι και 70%.

Παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτα ευρήματα κατά την κατασκευή των δύο κτιρίων σχετικά με την εγκατάσταση των VIPs και ζητήματα κατά την εφαρμογής τους. Χρησιμοποιήθηκαν και διερευνήθηκαν δύο διαφορετικές τεχνικές εγκατάστασης. Στο ελληνικό κτίριο, τα CIC πάνελ εγκαταστάθηκαν μέσω της «υγρής μεθόδου» (χρήση συγκολλητικού κονιάματος) και τη χρήση κοχλιών που διεισδύουν στα πάνελ μέσω δύο οπών, ενσωματωμένων στα VIPs, γεμισμένων με EPS. Καθώς τα CIC πάνελ ήταν μιας διάστασης, η εξωτερική τοιχοποιία δεν μπορούσε να καλυφθεί πλήρως και στην ακάλυπτη περιοχή τοποθετήθηκε EPS. Στο ελβετικό κτίριο, τα VIPs εγκαταστάθηκαν μέσω της «ξηρής μεθόδου» (χρήση συγκολλητικής ταινίας). Ακόμη και αν χρησιμοποιήθηκε ειδικό λογισμικό για τη βέλτιστη κάλυψη των τοίχων με VIPs, μικρές κατασκευαστικές αστοχίες είχαν ως αποτέλεσμα μια μικρή ακάλυπτη περιοχή στην ένωση δύο τοιχοποιιών. Επίσης, παρά τις προσπάθειες για την σωστή μεταχείριση, τελικά, κάποια πάνελ υπέστησαν ζημιά, υποδεικνύοντας την ανάγκη κατάλληλου χειρισμού των VIPs από την παραγωγή τους μέχρι και την τελική τους εγκατάσταση.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης έδειξαν ότι η θερμική απόδοση του κελύφους βελτιώθηκε λόγω της χρήσης των VIPs. Στο ελληνικό κτίριο, ο αναβαθμισμένος VIP τοίχος συγκρίθηκε με τον αρχικό EPS τοίχο. Οι επιτόπιες μετρήσεις R-value φανέρωσαν τη βελτίωση της τοιχοποιίας κατά 123%, επιτυγχάνοντας θερμική διαπερατότητα ίση με $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Στο ελβετικό κτίριο, οι επιτόπιες μετρήσεις U-value έδειξαν ότι επιτυγχάνεται τιμή $U_{overall}$ ίση με $0.12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης θερμογεφυρών, για τοιχοποιία πάχους 320 mm, ενώ η τιμή του $U_{overall}$ χωρίς το VIP υπολογίστηκε υψηλότερη κατά 52%. Τα αποτελέσματα δεδομένων παρακολούθησης και θερμογραφίας έδειξαν ότι η στρώση του VIP μείωσε σημαντικά την αρνητική επίδραση του μεταλλικού σκελετού.

Η υγροθερμική απόδοση των δύο τοιχοποιιών λόγω της παρουσίας του VIP εξαρτάται από τη μέθοδο εγκατάστασης (υγρή / ξηρή). Στην υγρή μέθοδο, η αρχική υγρασία που οφείλεται στην τοποθέτηση των CIC πάνελ απομακρύνθηκε μερικώς κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα, 5 μήνες μετά την εγκατάσταση, δημιούργησαν επανασυμπύκνωση στις επιφάνειες των VIPs. Από την άλλη πλευρά, με τη μέθοδο της ξηρής εγκατάστασης, δεν παρατηρήθηκε συμπύκνωση στις επιφάνειες των VIPs κατά τη διάρκεια ολόκληρης της μετρητικής περιόδου. Τέλος, μια δοκιμή υγρασίας στο ελβετικό κτίριο αποκάλυψε την υγροθερμική συμπεριφορά του VIP ως εμπόδιο στη μεταφορά μάζας λόγω της χαμηλής διαπερατότητας αέρα και υδρατμού του περιβλήματος του VIP.

Συνολικά, η εκτεταμένη πειραματική μελέτη των δύο κτιρίων έδειξε ότι η χρήση των VIPs ως μονωτικό υλικό σε κτιριακές εφαρμογές αποτελεί ελκυστική λύση για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κελύφους. Αποκαλύφθηκαν κάποιες αδυναμίες και εμπόδια που θα πρέπει να ξεπεραστούν, ώστε να καθιστούν τα VIPs ως ένα αποτελεσματικό δομικό υλικό. Σε κάθε περίπτωση, το παρόν κεφάλαιο παρέχει πληροφορίες σχετικά με κατασκευαστικά θέματα και αποτελέσματα δεδομένων παρακολούθησης, προσθέτοντας την συνεχώς αυξανόμενη εμπειρία των VIPs με στόχο την εφαρμογή τους ως δομικό υλικό.

Κεφάλαιο 7^ο – Υπολογιστικές τεχνικές για την αξιολόγηση ελαφρών κελυφών με VIPs και η επικύρωσή τους

7.1 Εισαγωγή

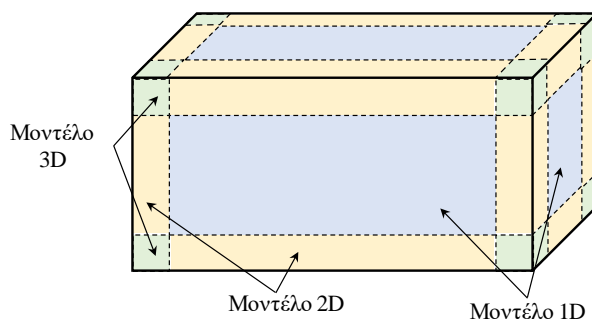
Η γνώση της πραγματικής θερμικής συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι απαραίτητη για τον ενεργειακό σχεδιασμό και την ανάλυση του κτιρίου. Συγκεκριμένα, ο ακριβής υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη είναι αναγκαίος για την επίτευξη της απαιτούμενης ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου στοχεύοντας το nZEB. Μέχρι πρόσφατα, ο υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων βασίζεται σε εθνικούς κανονισμούς μέσω σημαντικών απλουστεύσεων που αφορούν τις οριακές συνθήκες (συνήθως χρονικά μόνιμες συνθήκες), τη γεωμετρία του κτιρίου, τα ηλιακά κέρδη, τον αερισμό, τη θερμική μάζα κ.λπ. [166]. Κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκαν διάφορα προγράμματα προσομοίωσης κτιρίων για την επίλυση πολύπλοκων ζητημάτων και την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας [167]. Μεταξύ άλλων, τα BLAST, DOE-2, EnergyPlus, eQuest και TRNSYS, χρησιμοποιούνται ευρέως για την προσομοίωση ολόκληρου του κτιρίου και της ενεργειακής του κατανάλωσης.

Λόγω του υπολογιστικού κόστους και της πολυπλοκότητας των διαστάσεων του κελύφους (μεγάλες διαστάσεις σε μήκος και ύψος, αλλά μικρό πάχος των ενσωματωμένων υλικών), τα προσομοιωμένα προγράμματα αναγκάζονται να κάνουν σημαντικές απλουστεύσεις. Μία από τις σημαντικότερες απλουστεύσεις είναι η υπόθεση της μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας μέσω του κελύφους. Αυτό αποτελεί εμπόδιο για την ανάλυση και τον υπολογισμό των θερμογεφυρών οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν, ιδιαίτερα, στην περίπτωση ελαφρών κτιρίων [21]. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την εισαγωγή των θερμογεφυρών στα μονοδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης είναι η κατάλληλη τροποποίηση των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών [59, 168-176]. Η τροποποίηση αυτή βασίζεται σε διόρθωση της θερμικής διαπερατότητας του κελύφους που προκύπτει από τον υπολογισμό των θερμογεφυρών. Η πιο ακριβής μέθοδος για τον υπολογισμό των θερμογεφυρών απαιτεί την προσομοίωση κάθε θερμογέφυρας σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, όπως περιγράφεται στο πρότυπο ISO 10211 [58].

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει την υπολογιστική ανάλυση του κτιριακού κελύφους με δύο διαφορετικές τεχνικές: την ανάλυση κελύφους σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211 και την προσομοίωση ολόκληρου του κτιρίου. Οι δύο τεχνικές εφαρμόζονται στο ελαφρύ κτίριο με χαλύβδινο σκελετό που κατασκευάστηκε στην Ελβετία και διερευνήθηκε πειραματικά στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 6.3). Το κτίριο αυτό επιλέχθηκε λόγω των πολλών θερμογεφυρών εστιάζοντας στη συμβολή τους στη θερμική απόδοση του κελύφους. Όλες οι διαμορφώσεις των θερμογεφυρών (τόσο γραμμικών όσο και σημειακών) προσομοιώνονται και αναλύονται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211 για τον υπολογισμό της θεωρητικής τιμής του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας του κελύφους H_D . Επιπλέον, ολόκληρο το κτίριο προσομοιώνεται με το πρόγραμμα EnergyPlus (EP μοντέλο), το οποίο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σε προσομοιώσεις κτιρίων. Η επίδραση όλων των θερμογεφυρών εισάγεται στο μοντέλο. Ο σκοπός του EP μοντέλου είναι ο υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο συγκρίνονται με τις μετρήσεις για την επικύρωσή του.

7.2 Ανάλυση του κελύφους σύμφωνα με το πρότυπο ISO

Η ανάλυση του κτιριακού κελύφους σύμφωνα με το ISO 10211:2007 [58] είναι μια προσέγγιση σε χρονικά μόνιμες συνθήκες στοχεύοντας τον υπολογισμό της ισοδύναμης θερμικής διαπερατότητας κάθε στοιχείου του κελύφους που θα λαμβάνει υπόψιν όλες τις θερμογέφυρες, επαναλαμβανόμενες και μη επαναλαμβανόμενες (γεωμετρικές). Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας βασίζεται στο διαχωρισμό του κελύφους σε τρία γεωμετρικά μοντέλα: το 1D, το 2D και το 3D, όπως φαίνεται στην Εικόνα 47.



Εικόνα 47 – Διαχωρισμός κτιριακού κελύφους σε 1D, 2D και 3D γεωμετρικά μοντέλα

Το μοντέλο 1D περιγράφει τη θερμική απόδοση του κεντρικού τμήματος της τοιχοποιίας, μακριά από τις θερμογέφυρες που οφείλονται στις ενώσεις των στοιχείων του κελύφους. Στην περίπτωση των ελαφρών κτιρίων χαλύβδινου σκελετού (Lightweight Steel-Framed – LSF), το μοντέλο 1D υπολογίζει τις γραμμικές επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες που εισάγονται από τους ορθοστάτες. Το μοντέλο 2D περιγράφει την θερμική απόδοση των γραμμικών μη επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών, όπως είναι οι ενώσεις των στοιχείων του κελύφους. Τέλος, το μοντέλο 3D περιγράφει την θερμική απόδοση των σημειακών μη επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών όπως είναι οι γωνίες μεταξύ τριών στοιχείων του κελύφους.

Όσον αφορά το σύστημα των διαστάσεων της ανάλυσης για τα τρία μοντέλα, τα μήκη μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας εσωτερικές διαστάσεις, συνολικές εσωτερικές διαστάσεις ή εξωτερικές διαστάσεις. Το ίδιο σύστημα θα πρέπει να χρησιμοποιείται με συνέπεια για όλα τα μέρη του κελύφους και σε ολόκληρη την ανάλυση. Στην τρέχουσα διατριβή, χρησιμοποιείται μόνο το σύστημα εξωτερικών διαστάσεων.

7.2.1 Υπολογισμός θερμογεφυρών

Στο μοντέλο 1D, η θερμική απόδοση του κεντρικού τμήματος του κελύφους αξιολογείται μέσω του υπολογισμού της θερμικής διαπερατότητας (U-value) για ολόκληρη την κεντρική επιφάνεια του στοιχείου. Στην περίπτωση ομοιογενών στοιχείων (χωρίς θερμογέφυρες), η τιμή του U-value του στοιχείου, U_{clear} , υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 [67]. Στην περίπτωση LSF κελύφους, όπου οι επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες προκαλούνται από το μεταλλικό σκελετό, η θερμική μετάδοση του κεντρικού τμήματος αξιολογείται με τη βοήθεια του $U_{overall}$ λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των θερμογεφυρών. Το $U_{overall}$, υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211, όπως περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$U_{overall} = U_{clear} + \frac{\sum_{i=1}^{N_{st}} \Psi_{st}^i \cdot l_{st}^i}{A} \quad 29$$

όπου το U_{clear} [W/(m²K)] είναι το U-value του στοιχείου χωρίς την επίδραση των θερμογεφυρών, υπολογιζόμενη σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946, το Ψ_{st} [W/(m·K)] είναι η γραμμική θερμική διαπερατότητα των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών που προκαλούνται από το σκελετό, l_{st} [m] είναι το μήκος πάνω από το οποίο ισχύει η τιμή Ψ_{st} , A [m²] είναι η συνολική επιφάνεια του στοιχείου και N_{st} είναι ο αριθμός γραμμικών θερμικών διαπερατοτήτων. Η τιμή Ψ_{st} υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Psi_{st} = L_{1D,st} - U_{clear} \cdot l_{st} \quad 30$$

όπου $L_{1D,st}$ είναι ο συντελεστής θερμικής σύζευξης, εκφρασμένος σε [W/(m·K)] που λαμβάνεται από τη δισδιάστατη προσομοίωση σε μόνιμες συνθήκες της εξεταζόμενης θερμογέφυρας.

Οι μη επαναλαμβανόμενες γραμμικές θερμογέφυρες που οφείλονται στις ενώσεις μεταξύ δύο στοιχείων του κελύφους υπολογίζονται από το 2D μοντέλο. Η γραμμική θερμική διαπερατότητα, Ψ_{2D} , προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\Psi_{2D} = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \quad 31$$

όπου L_{2D} είναι ο συντελεστής θερμικής σύζευξης, εκφρασμένος σε [W/(m·K)] που λαμβάνεται από την προσομοίωση της θερμογέφυρας σε μόνιμες συνθήκες, U_j είναι η θερμική διαπερατότητα κάθε προσομοιωμένου στοιχείου j της ένωσης και l_j είναι το μήκος πάνω από την οποία ισχύει η τιμή Ψ_{2D} .

Το μοντέλο 3D υπολογίζει τις μη επαναλαμβανόμενες σημειακές θερμογέφυρες που οφείλονται στις γωνίες του κελύφους (διασταυρώσεις μεταξύ τριών στοιχείων του κελύφους). Η σημειακή θερμική διαπερατότητα, χ , υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} (U_i \cdot A_i) - \sum_{j=1}^{N_j} (\Psi_j \cdot l_j) \quad 32$$

όπου L_{3D} είναι ο συντελεστής θερμικής σύζευξης, εκφρασμένος σε [W/K], που λαμβάνεται από την 3D προσομοίωση της σημειακής θερμογέφυρας σε μόνιμες συνθήκες.

Μετά τον υπολογισμό όλων των μεμονωμένων θερμογεφυρών, η ισοδύναμη θερμική διαπερατότητα $U_{eq,i}$ για κάθε στοιχείο i του κελύφους, υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ενσωματωμένες θερμογέφυρες του στοιχείου i :

$$U_{eq,i} = U_{clear,i} + \frac{\sum_k (\Psi_{st}^k \cdot l_{st}^k)}{A_i} + \frac{\sum_m (\Psi_{2D}^m \cdot l^m)}{A_i} + \frac{\sum_n \chi_n}{A_i} \quad 33$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να πάρει και την ακόλουθη μορφή:

$$U_{eq,i} = U_{clear,i} + U_{repeating,i} + U_{2D_geometrical,i} + U_{3D_geometrical} \quad 34$$

όπου $U_{repeating}$, $U_{2D_geometrical}$ και $U_{3D_geometrical}$ οι όροι για την επίδραση των επαναλαμβανόμενων, γραμμικών και σημειακών μη-επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών, αντίστοιχα, εκφρασμένοι σε μονάδες θερμικής διαπερατότητας ($[W/(m^2K)]$).

7.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας ολόκληρου του κελύφους

Όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 2 (ενότητα 2.4.3), ένας δείκτης για την εκτίμηση της θερμικής απόδοσης ολόκληρου του κτιριακού κελύφους είναι ο συντελεστής άμεσης μεταφοράς θερμότητας H_D , που αντιπροσωπεύει τον ρυθμό ροής θερμότητας διαμέσου ολόκληρου του κελύφους διαιρούμενο με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Ο συντελεστής H_D εκφράζεται σε $[W/K]$ και καθορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14683:

$$H_D = \sum_i (A_i \cdot U_{clear,i}) + \sum_j (I_j \cdot \Psi_j) + \sum_k \chi_k \quad 35$$

7.3 Προσομοίωση του κτιρίου και εισαγωγή θερμογεφυρών στο μοντέλο EnergyPlus

Μια πιο ακριβής προσέγγιση για την ανάλυση ολόκληρου του κελύφους είναι η προσομοίωσή του σε δυναμικές συνθήκες. Η τεχνική προσομοίωσης του κτιρίου στοχεύει στον υπολογισμό των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη μέσω ευρέως χρησιμοποιούμενων και επικυρωμένων προγραμμάτων. Καθώς τα προγράμματα αυτά υποθέτουν μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας μέσω του κελύφους, η εισαγωγή των θερμογεφυρών αποτελεί πρόκληση. Στην τρέχουσα διατριβή, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για τις ετήσιες ανάγκες θέρμανσης ενός ελαφρού κτιριακού κελύφους χαλύβδινου σκελετού (LSF), χρησιμοποιώντας το λογισμικό EnergyPlus.

Η επίδραση των θερμογεφυρών εισάγεται στο μοντέλο τροποποιώντας τις ιδιότητες των υλικών υλικού με βάση την προηγούμενη ανάλυση σύμφωνα με το ISO 10211. Οι τροποποιημένες ιδιότητες υπολογίζονται από την ισοδύναμη θερμική διαπερατότητα κάθε στοιχείου του κελύφους, U_{eq} , όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 33, που περιλαμβάνει την επίδραση όλων των θερμογεφυρών. Η ισοδύναμη θερμική αντίσταση για κάθε στρώση του στοιχείου i , $R_{layer,eq,i}$, εκφρασμένη σε $[m^2K/W]$, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R_{layer,eq,i} = \frac{R_{layer,clear,i}}{R_{clear,i}} \cdot R_{eq,i} \quad 36$$

όπου το $R_{layer,clear,i}$ είναι η καθαρή θερμική αντίσταση (χωρίς των επίδραση των θερμογεφυρών) της κάθε στρώσης του στοιχείου i (τοιχος, οροφή, δάπεδο κλπ.), $R_{eq,i}$ είναι η ισοδύναμη θερμική αντίσταση του στοιχείου i με βάση το $U_{eq,i}$ και $R_{clear,i}$ είναι η καθαρή θερμική αντίσταση του στοιχείου i . Το πάχος, d_{layer} , κάθε στρώσης στο αρχικό και στο ισοδύναμο στοιχείο παραμένει ίδιο. Έτσι, η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα για κάθε στρώση του στοιχείου i , $k_{layer,eq,i}$, εκφρασμένη σε $[W(m \cdot K)]$, υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$k_{layer,eq,i} = \frac{d_{layer,i}}{R_{layer,eq,i}} \quad 37$$

Στο ίδιο πλαίσιο, οι δυναμικές θερμικές ιδιότητες των υλικών τροποποιούνται προκειμένου να εισαχθούν οι δυναμικές επιπτώσεις των θερμογεφυρών. Η θερμική χωρητικότητα του κάθε στοιχείου του κελύφους αυξάνεται λόγω της παρουσίας του μεταλλικού σκελετού. Η πρόσθετη θερμική χωρητικότητα που προκαλείται από τους επαναλαμβανόμενους ορθοστάτες πρέπει να συμπεριληφθεί στις ενσωματωμένες στρώσεις. Συνήθως, αυτές οι στρώσεις είναι είτε κάποιο μονωτικό υλικό είτε διάκενο αέρα είτε και τα δύο. Η ακόλουθη ανάλυση υποθέτει ότι οι ορθοστάτες ενσωματώνονται σε στρώσεις από πετροβάμβακα. Η τροποποίηση των δυναμικών θερμικών ιδιοτήτων του πετροβάμβακα βασίζεται στη μεθοδολογία που περιγράφεται από τους Gomes et. al [169]. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η ισοδύναμη πυκνότητα, $\rho_{MW,eq,i}$ [kg/m³] και η ειδική θερμοχωρητικότητα $Cp_{MW,eq,i}$ [J/(kg·K)] υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

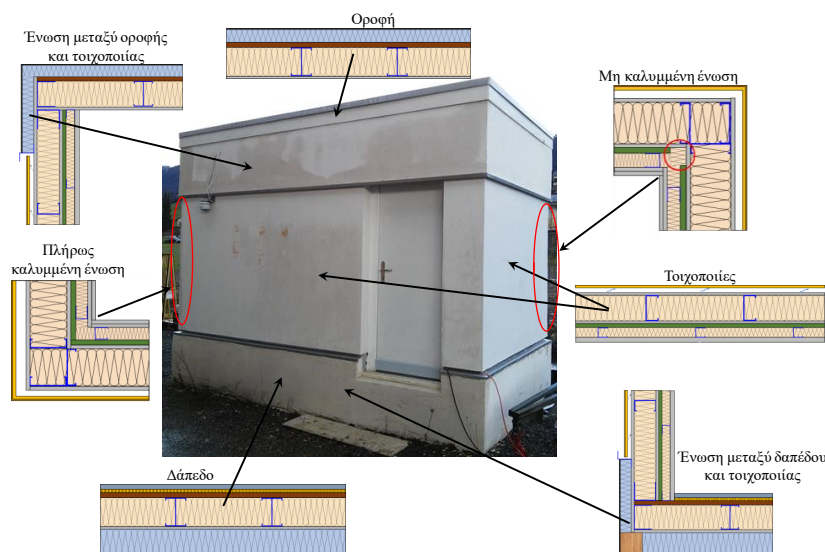
$$\rho_{MW,eq,i} = w_{studs,i} \rho_{steel} + w_{MW,i} \rho_{MW} \quad 38$$

$$Cp_{MW,eq,i} = w_{studs,i} Cp_{steel} + w_{MW,i} Cp_{MW} \quad 39$$

όπου $w_{studs,i}$ και $w_{MW,i}$ [-] είναι οι λόγοι μάζας των ορθοστατών και του πετροβάμβακα, αντίστοιχα, για κάθε στοιχείο i .

7.4 Εφαρμογή των υπολογιστικών τεχνικών σε πειραματικό οικίσκο

Οι δύο παραπάνω περιγραφόμενες υπολογιστικές τεχνικές (ανάλυση κελύφους σύμφωνα με το πρότυπο ISO και προσομοίωση ολόκληρου του κτιρίου) εφαρμόζονται στο ελαφρύ κτίριο με χαλύβδινο σκελετό που περιεγράφηκε και αναλύθηκε πειραματικά σε προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 6.3). Το κτίριο αυτό είναι ιδανικό για τη μελέτη της επίδρασης των θερμογεφυρών στη θερμική απόδοση του κελύφους και τις ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς είναι ένας απλός μικρός οικίσκος χωρίς παράθυρα κατασκευασμένα με γνωστά υλικά. Η Εικόνα 48 συνοψίζει τη διαμόρφωση του κελύφους, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 48 – Το κέλυφος του ελαφρού κτιρίου με χαλύβδινο σκελετό.

7.4.1 Ανάλυση του οικίσκου σύμφωνα με το ISO

Το κτιριακό κέλυφος του οικίσκου διαχωρίζεται σε τρία μοντέλα (1D, 2D και 3D) και όλες οι θερμογέφυρες υπολογίζονται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211. Ο υπολογισμός των θερμογεφυρών πραγματοποιήθηκε, προσομοιώνοντας όλες τις θερμογέφυρες σε χρονικά μόνιμες συνθήκες στο λογισμικό COMSOL. Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών λήφθηκαν από τον Πίνακα 10. Από τη προσομοίωση κάθε θερμογέφυρας υπολογίστηκε η θερμική σύζευξη, L ($L_{1D,st}$, L_{2D} και L_{3D}).

Στο μοντέλο 1D, υπολογίστηκαν οι επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες εξαιτίας της παρουσίας των μεταλλικών ορθοστατών στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους. Ο Πίνακας 13 συνοφίζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τον υπολογισμό των U_{clear} , $U_{overall}$, και Ψ_{st} καθώς επίσης και του θερμοκρασιακού παράγοντα f . Παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική αύξηση της θερμικής διαπερατότητας των στοιχείων λόγω της παρουσίας των ορθοστατών. Οι επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες αυξάνουν το U-value της τοιχοποιίας κατά 27%, ενώ τα U-value του δαπέδου και της οροφής αυξάνονται κατά 57% και 112% αντίστοιχα. Παρά την αύξηση αυτή, η θερμική διαπερατότητα των στοιχείων του κελύφους παραμένει χαμηλή, δεδομένου ότι οι τιμές $U_{overall}$ κυμαίνονται μεταξύ 0.12 W/(m²K) και 0.26 W/(m²K), υποδεικνύοντας την υψηλή θερμική απόδοση του κελύφους. Η σημασία της στρώσης του VIP φανερώνεται από το γεγονός ότι στην περίπτωση της τοιχοποιίας χωρίς VIP το Ψ_{st} αυξάνεται κατά 239% και το $U_{overall}$ αυξάνεται κατά 105%. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο θερμοκρασιακός παράγοντας f είναι υψηλότερος από 0.92 σε όλες τις περιπτώσεις, οπότε δεν υπάρχει ζήτημα υγρασίας και πιθανότητα συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους.

Πίνακας 13 – Επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους

Στοιχείο κελύφους	U_{clear} [W/(m ² K)]	$U_{overall}$ [W/(m ² K)]	Ψ_{st} [W/(m·K)]	f [-]
Τοιχοποιία με VIP	0.0927	0.1177	0.0156	0.98
Τοιχοποιία χωρίς VIP	0.1577	0.2422	0.0529	0.96
Οροφή	0.1208	0.2559	0.0676	0.92
Δάπεδο	0.0914	0.1434	0.0260	0.97

Στο μοντέλο 2D, αναλύθηκαν όλες οι γραμμικές μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες που παρουσιάζονται στις ενώσεις δύο στοιχείων του κελύφους, ενώ στο μοντέλο 3D υπολογίστηκαν οι σημειακές μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις ενώσεις μεταξύ των τοιχοποιιών και στη σύγκριση μεταξύ της πλήρως καλυμμένης από VIP ένωσης και της μη-καλυμμένης ένωσης. Διαπιστώθηκε ότι στην μη-καλυμμένη ένωση η γραμμική διαπερατότητα Ψ -value ήταν υψηλότερη κατά 51%, φανερώνοντας τη μεγάλη σημασία της κατάλληλης τοποθέτησης και τις εξάλειψης των κατασκευαστικών αστοχιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις τόσο το Ψ -value, όσο και το χ -value είχαν αρνητική τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το εξωτερικό σύστημα διαστάσεων με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της μεταφοράς θερμότητας στις κεντρικές επιφάνειες των στοιχείων με αποτέλεσμα κάποιες θερμογέφυρες να έχουν θετική επίδραση στην ανάλυση, εξισορροπώντας τη προηγούμενη υπερεκτίμηση. Τέλος, ο θερμοκρασιακός παράγοντας των μη-επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών ήταν πάντοτε μεγαλύτερος από την κρίσιμη τιμή 0.7, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχουν προβλήματα υγρασίας στο κέλυφος.

Οι ισοδύναμες θερμικές διαπερατότητες των στοιχείων του κελύφους υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις θερμογέφυρες και συνοψίζονται στον Πίνακα 14. Οι τιμές στην παρένθεση αναπαριστούν τη συνεισφορά κάθε τύπου θερμογέφυρας στη συνολική ροή θερμότητας του στοιχείου του κελύφους. Όλες οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες λήφθηκαν υπόψιν, όπως η επίδραση των ακμών των VIPs, η χρήση πολουρεθάνης στις ενώσεις της πόρτας με την τοιχοποιία, τα κατεστραμμένα VIPs στη νότια τοιχοποιία, κλπ.

Πίνακας 14 – Ισοδύναμες θερμικές διαπερατότητες και η συνεισφορά των θερμογεφυρών σε κάθε στοιχείο του κελύφους.

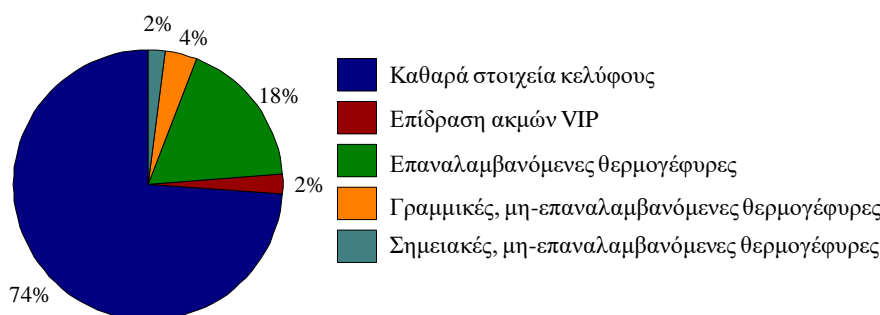
Στοιχείο κελύφους	A [m ²]	U_{clear} [W/(m ² ·K)]	$U_{repeating}$ [W/(m ² ·K)]	$U_{2D_geometrical}$ [W/(m ² ·K)]	$U_{3D_geometrical}$ [W/(m ² ·K)]	U_{eq} [W/(m ² ·K)]
Βόρειος τοίχος	13.00	0.0931	0.0174 (17.0%)	-0.0049 (-4.8%)	-0.0032 (-3.1%)	0.1025
Δυτικός τοίχος	7.06	0.0933	0.0134 (13.8%)	-0.0039 (-4.0%)	-0.0059 (-6.1%)	0.0969
Νότιος τοίχος	11.28	0.0946	0.0187 (12.1%)	0.0187 (12.1%)	0.0229 (14.8%)	0.1548
Ανατολικός τοίχος	7.06	0.0933	0.0134 (13.8%)	-0.0039 (-4.0%)	-0.0059 (-6.1%)	0.0969
Οροφή	8.66	0.1208	0.1351 (50.9%)	0.0121 (4.6%)	-0.0028 (-1.0%)	0.2653
Δάπεδο	8.66	0.0914	0.0520 (37.5%)	0.0021 (1.5%)	-0.0069 (-5.0%)	0.1386
Πόρτα	1.72	2.4070	0 (0%)	0.1595 (5.9%)	0.1161 (4.3%)	2.6826

Οι επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες των τοιχοποιιών, λόγω της παρουσίας του μεταλλικού σκελετού στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους, συμβάλλουν στην ισοδύναμη θερμική διαπερατότητα κατά ca. 12 - 17%. Εκτός από τη νότια τοιχοποιία, οι γεωμετρικές θερμογέφυρες (γραμμικές και σημειακές) έχουν θετική επίδραση στη θερμική απόδοση μειώνοντας τη θερμική διαπερατότητα κατά περίπου 4% και 6% αντίστοιχα. Η επίδραση των γεωμετρικών θερμογεφυρών στη νότια τοιχοποιία είναι μεγαλύτερη (περίπου 13% για τις γραμμικές και 15% για τις σημειακές θερμογέφυρες) εξαιτίας της παρουσίας της πόρτας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες γραμμικές θερμογέφυρες και μερικές επιπλέον σημειακές θερμογέφυρες εξαιτίας κατασκευαστικών αστοχιών (όπως π.χ. τα δύο κατεστραμμένα πλαίσια VIP).

Από την άλλη πλευρά, οι θερμογέφυρες έχουν ισχυρή επίδραση στη θερμική διαπερατότητα της οροφής και του δαπέδου, όπου δεν υπάρχουν VIP. Ο μεταλλικός σκελετός συμβάλλει κατά 51% στην οροφή και κατά 38% στο δάπεδο, ενώ οι μη επαναλαμβανόμενες γραμμικές θερμογέφυρες αυξάνουν τη θερμική διαπερατότητα κατά περίπου 5%. Αντίθετα, οι μη επαναλαμβανόμενες σημειακές θερμογέφυρες έχουν θετική επίδραση στη θερμική απόδοση κατά 1% στην οροφή και κατά 5% στο πάτωμα. Η θερμική διαπερατότητα της πόρτας αυξάνεται λόγω των γεωμετρικών θερμογεφυρών κατά 11%.

Ο συντελεστής άμεσης μεταφοράς θερμότητας, H_D , υπολογίστηκε ίσος με 12.57 W/K, σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση του κελύφους και βάσει των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 14. Σημειώνεται ότι η πόρτα, που καταλαμβάνει μόνο το 3% της συνολικής επιφάνειας του κελύφους, είναι υπεύθυνη για περισσότερο από το ένα τρίτο του συνολικού H_D , υποδεικνύοντας την υψηλή θερμική απόδοση του υπόλοιπου κελύφους.

Η συμβολή κάθε τύπου θερμογέφυρας στον υπολογισμό του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας, H_D , απεικονίζεται στην Εικόνα 49. Η συμβολή των «καθαρών στοιχείων του κελύφους» αντιπροσωπεύει τη θερμότητα μέσα από τα στοιχεία χωρίς οποιαδήποτε θερμογέφυρα (εξαιρείται επίσης και η επίδραση των ακμών των VIPs). Δείχνεται ότι όλες οι θερμογέφυρες (επίδραση ακμών, επαναλαμβανόμενες και μη επαναλαμβανόμενες) είναι υπεύθυνες για το 26% του H_D . Η μεγαλύτερη συνεισφορά (18%) οφείλεται στις επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους (μεταλλική δομή), υποδεικνύοντας τη σημασία αυτών των θερμογεφυρών. Οι γραμμικές και μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες, λόγω των ενώσεων του κελύφους, αντιστοιχούν στο 4% και 2% της συνολικής τιμής H_D , αντίστοιχα. Η χαμηλή συμβολή αυτών των θερμογεφυρών στο H_D μπορεί να συσχετιστεί με την ύπαρξη πρόσθετης μόνωσης στο πάνω και στο κάτω τμήμα της τοιχοποιίας (στις διασταυρώσεις με την οροφή και το δάπεδο) και τη χρήση των εξωτερικών διαστάσεων στην ανάλυση του κελύφους του κτιρίου. Τέλος, η επίδραση των ακμών των VIPs συμβάλλει κατά 2% στο συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του κελύφους.



Εικόνα 49 – Συνεισφορά θερμογεφυρών στο συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας, H_D .

7.4.2 Προσομοίωση του πειραματικού οικίσκου

Ο πειραματικός οικίσκος ελαφρού χαλύβδινου σκελετού προσομοιώθηκε μέσω του μοντέλου EnergyPlus (μοντέλο EP). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο EP συγκρίνονται με τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 6.3) με σκοπό την επικύρωση του μοντέλου.

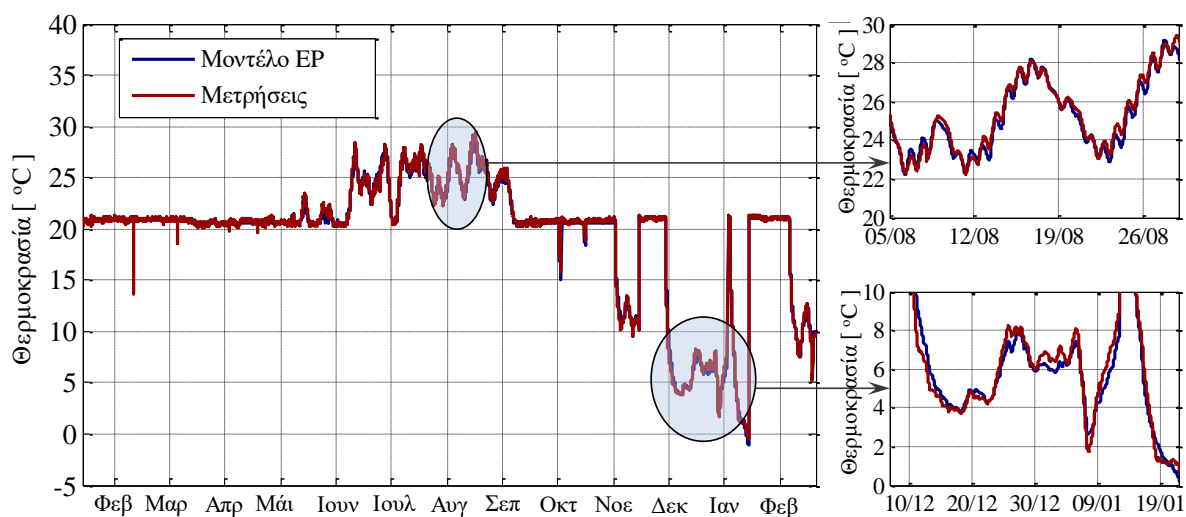
Ο οικίσκος θεωρήθηκε ως μία θερμική ζώνη και με διαστάσεις ίσες με τις εξωτερικές διαστάσεις του οικίσκου. Ως εξωτερικές οριακές συνθήκες θεωρήθηκαν οι πειραματικές τιμές εξωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, που λήφθηκαν από το μικρό μετεωρολογικό σταθμό. Επιπλέον, για τη δημιουργία του αρχείου καιρού στο EnergyPlus ελήφθησαν οι μετρήσεις από έναν γειτονικό μετεωρολογικό σταθμό της ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Το σύστημα ελέγχου εσωτερικής θερμοκρασίας σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις περιόδους κατά τις οποίες ήταν απενεργοποιημένο. Η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος των συσκευών θεωρήθηκε ίση με 45 W η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα. Η διείσδυση του αέρα θεωρήθηκε ίση με 0.1 ACH.

Η επίδραση των πολλών θερμογεφυρών (τόσο επαναλαμβανόμενων όσο και γεωμετρικών) εισήχθη στο μοντέλο EP, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην ενότητα 7.3. Οι

ισοδύναμες θερμικές ιδιότητες των υλικών υπολογίστηκαν με βάση τις ισοδύναμες θερμικές διαπερατότητες κάθε στοιχείου κελύφους, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 14.

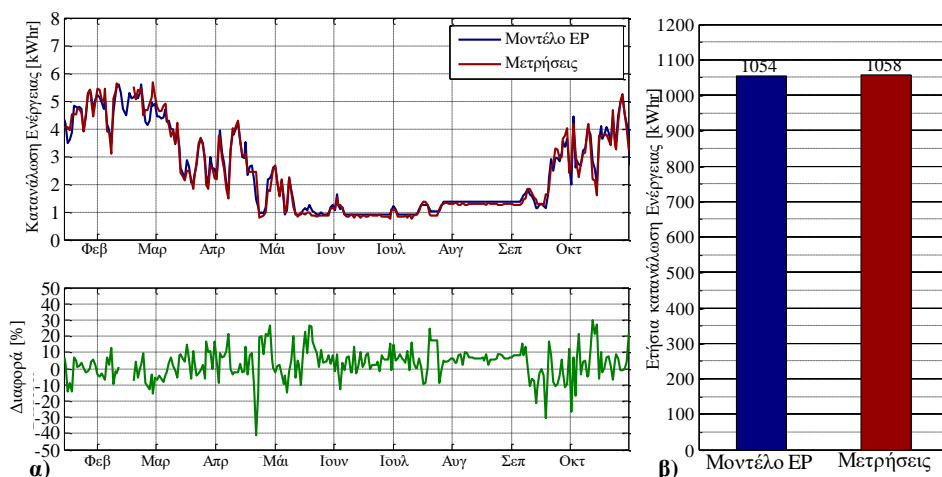
Η προσομοίωση του οικίσκου με το μοντέλο EP οδηγεί στον υπολογισμό πολλών μεταβλητών, όπως θερμοκρασίες, κατανάλωση ενέργειας, διείσδυση αέρα, ακτινοβολία κλπ. Μεταξύ αυτών, τα σημαντικότερα μεγέθη για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις μετρήσεις είναι η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα και η συνολική κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας και των ηλεκτρικών συσκευών.

Η Εικόνα 50 παρουσιάζει τα αποτελέσματα προσομοίωσης τις μετρήσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την επικύρωση του μοντέλου βασίζεται στις περιόδους κατά τις οποίες το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας ήταν απενεργοποιημένο. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου EP είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις μετρήσεις. Η μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρούμενων θερμοκρασιών είναι 0.27°C , δηλαδή κοντά στο σφάλμα μέτρησης, ενώ η μέγιστη διαφορά δεν υπερβαίνει τους 0.6°C . Η καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων υποδεικνύεται από τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 , που ισούται με 99% για την περίοδο κατά την οποία το σύστημα ελέγχου ήταν ανενεργό.



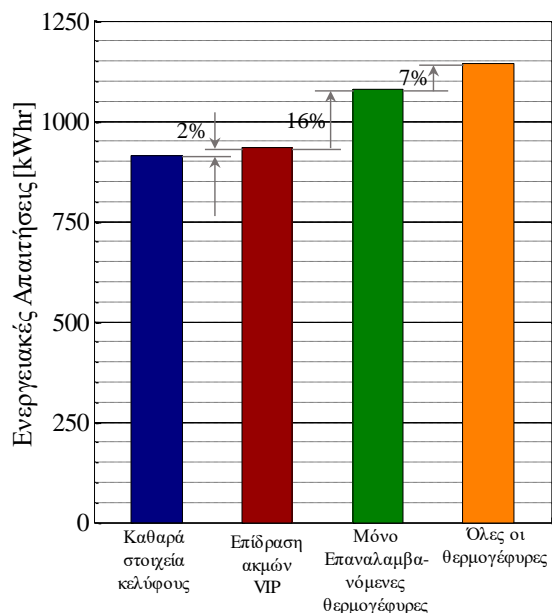
Εικόνα 50 – Σύγκριση μετρήσεων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα.

Η κατανάλωση ενέργειας για την ενεργοποίηση του συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας και των ηλεκτρικών συσκευών υπολογίζεται από το μοντέλο EP και συγκρίνεται με τις πειραματικές τιμές που λαμβάνονται από τον μετρητή ενέργειας/ισχύος στην Εικόνα 51. Όπως παρατηρείται από τα ημερήσια αποτελέσματα (Εικόνα 51α), οι διαφορές σπάνια υπερβαίνουν το $\pm 10\%$ (με μέση απόλυτη διαφορά ίση με 7.6%) και η απόλυτη διαφορά κυμαίνεται μεταξύ ± 0.25 kWh/ημέρα το χειμώνα και 0.05 kWh/ημέρα το καλοκαίρι (χωρίς σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας). Η διαφορά των αποτελεσμάτων για τη συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι σχεδόν μηδενική (Εικόνα 51β), λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει τόσο υπερεκτίμηση όσο και υποεκτίμηση για τις ημερήσιες τιμές κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου λειτουργίας.



Εικόνα 51 - Σύγκριση μετρήσεων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για την ενεργειακή κατανάλωση: α) ημερήσιες τιμές και β) ετήσιες τιμές.

Το μοντέλο EP εφαρμόστηκε συμπεριλαμβάνοντας και εξαιρώντας την επίδραση των θερμογεφυρών, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στις συνολικές απαιτήσεις για θέρμανση. Για το λόγο αυτό, το κτίριο προσομοιάστηκε υποθέτοντας ότι το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας ήταν ενεργοποιημένο σε όλη τη μετρητική περίοδο. Η συμβολή των θερμογεφυρών στις ενεργειακές απαιτήσεις του οικίσκου απεικονίζεται στην Εικόνα 52. Όπως παρατηρείται, οι θερμογέφυρες αυξάνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση κατά 25%, κάτι που είναι μια σημαντική αύξηση αποκαλύπτοντας ότι η επίδραση των θερμογεφυρών δεν πρέπει να υποτιμάται στη μοντελοποίηση ελαφρών κτιρίων. Ιδιαίτερα, οι επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους ευθύνονται για το 16% των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων, ενώ οι γραμμικές και μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες αυξάνουν τις απαιτήσεις ενέργειας κατά 7%. Τέλος, η επίδραση των ακμών των VIPs φαίνεται να αυξάνει τις απαιτήσεις ενέργειας κατά 2%.



Εικόνα 52 – Συνεισφορά των θερμογεφυρών στις ενεργειακές απαιτήσεις του οικίσκου.

Παρατηρείται ότι η επίδραση των θερμογεφυρών στη θερμική απόδοση ολόκληρου του κελύφους είναι σχεδόν η ίδια τόσο στον υπολογισμό του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας όσο και στον

υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων. Οι θερμογέφυρες συμβάλλουν στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά 26%, ενώ είναι υπεύθυνες για το 20% επί των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων του οικίσκου. Η διαφορά οφείλεται στην διείσδυση αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία εδάφους κ.λπ. που δεν λαμβάνονται υπόψη στην πρώτη προσέγγιση.

7.5 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο αφορούσε την υπολογιστική διερεύνηση της θερμικής απόδοσης του κελύφους με δύο διαφορετικές τεχνικές: (α) τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του κελύφους, H_D , σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211 και (β) τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων μέσω προσομοίωσης του κτιρίου. Η ανάλυση επικεντρώνεται στον υπολογισμό των θερμογεφυρών και στην εισαγωγή τους στο πρόγραμμα προσομοίωσης κτιρίων EnergyPlus (μοντέλο EP), το οποίο υποθέτει μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας μέσω του κελύφους. Οι δύο τεχνικές για την αριθμητική ανάλυση εφαρμόστηκαν στο ελαφρύ κτίριο με χαλύβδινο σκελετό που κατασκευάστηκε στην Ελβετία και περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 6.3). Όλες οι θερμογέφυρες (επίδραση των ακμών των VIPs, επαναλαμβανόμενες από τους ορθοστάτες, γραμμικές και μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες) υπολογίστηκαν σύμφωνα με την πιο ακριβή μέθοδο (ISO 10211).

Η υπολογιστική ανάλυση του κτιριακού κελύφους σύμφωνα με τις δύο τεχνικές αποκάλυψε τη μεγάλη συνεισφορά των θερμογεφυρών στη θερμική του απόδοση. Η μεγαλύτερη απώλεια θερμότητας εισάγεται από τις επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες εξαιτίας του μεταλλικού σκελετού αυξάνοντας το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας H_D κατά 24%, ενώ οι μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες συμβάλλουν στο H_D κατά 6%. Από την άποψη των ενεργειακών απαιτήσεων, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο EP έδειξαν ότι οι θερμογέφυρες αύξησαν τις ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση κατά 25% και η μεγαλύτερη συμβολή (16%) οφείλεται στις επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες εξαιτίας του μεταλλικού σκελετού. Τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών ήταν παρόμοια και οι διαφορές οφείλονταν στην απλότητα της πρώτης προσέγγισης.

Τα ευρήματα της υπολογιστικής ανάλυσης του οικίσκου έφεραν στο φως τη θερμική συμπεριφορά των VIPs. Η παρουσία VIP σε τοίχους μειώνει την επίδραση των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών που προκαλούνται από το μεταλλικό σκελετό. Παρά το γεγονός ότι η θερμική διαπερατότητα χωρίς τις θερμογέφυρες (U_{clear}) των τοιχοποιιών και του δαπέδου είναι σχεδόν η ίδια, η θερμική διαπερατότητα που περιλαμβάνει την επίδραση των ορθοστατών ($U_{overall}$) στο δάπεδο (απουσία VIP) είναι υψηλότερη από αυτή των τοιχοποιιών (παρουσία VIP) κατά περίπου 22%.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου EP συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις της θερμοκρασίας και κατανάλωσης ενέργειας. Τα ευρήματα έδειξαν μια πολύ καλή συμφωνία για τις μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας προβλέποντας σωστά την τάση κατά την όπου το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας δεν ήταν ενεργοποιημένο. Τα αποτελέσματα σχετικά με τις ενεργειακές ανάγκες συμφωνούν, καθώς η διαφορά μεταξύ των πειραματικών και των προσομοιωμένων ημερήσιων τιμών σπανίως υπερβαίνει το 10% με μέση διαφορά ίση με 7.6%, ενώ η διαφορά μεταξύ των ετήσιων τιμών ήταν αμελητέα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο επικυρώνεται για την υπολογιστική ανάλυση ελαφρών κτιρίων. Στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 8), το μοντέλο EP χρησιμοποιείται για την ενεργειακή ανάλυση ενός κτιρίου πραγματικής κλίμακας διερευνώντας την επίδραση του VIP και τη συμβολή του στη μείωση των θερμογεφυρών.

Κεφάλαιο 8^ο – Επίδραση του VIP στην ενεργειακή και οικονομική απόδοση των κτιριακών κελυφών

8.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, τα VIPs εισήχθησαν σε κτιριακές εφαρμογές, πρώτα στην Ευρώπη και στη συνέχεια στην Ανατολική Ασία και τη Βόρεια Αμερική [162]. Η πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των VIPs προσφέρει υψηλή θερμική αντίσταση σε λεπτές τοιχοποιίες, αυξάνοντας την ωφέλιμη επιφάνεια δαπέδου του κτιρίου. Από την άλλη πλευρά, το σχετικά υψηλό κόστος των VIPs μαζί με την ανθεκτικότητα των πάνελ είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους δεν έχουν ήδη γίνει ευρέως γνωστή η εφαρμογή τους στα κτίρια. Ωστόσο, οι νέες τεχνολογίες των VIPs στοχεύουν στη μείωση του παραγωγικού κόστους και στην επέκταση της διάρκειας ζωής τους [88, 89].

Η εφαρμογή των VIPs στο κτιριακό κέλυφος έχει διερευνηθεί από διάφορες μελέτες, όπως αναλύθηκαν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3 (τμήμα 3.5.2). Η ενσωμάτωση των VIPs στο κέλυφος οδηγεί σε χαμηλές τιμές U-value και σε στοιχεία κελύφους υψηλής θερμικής απόδοσης. Η χρήση VIP πάχους 20 mm στους τοίχους μιας πολυκατοικίας στη Σουηδία μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση κατά 20% - 30% [177, 178]. Ο συνδυασμός των LSF κτιρίων με τη χρήση VIP αποτελεί μια ελκυστική λύση όσον αφορά τη βιωσιμότητα στον τομέα των κατασκευών. Αυτό συμβαίνει επειδή το πρόβλημα των θερμογεφυρών εξαιτίας του χαλύβδινου σκελετού μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά με τη χρήση VIP [179]. Επίσης, λόγω του λεπτού πάχους του VIP, η χρήση τους για την αναβάθμιση των ιστορικών κτιρίων είναι ιδανική, αφού η εξοικονόμηση χώρου σε τέτοιες περιπτώσεις αποτελεί αρχιτεκτονική πρόκληση. Όμως, παρά την υψηλή θερμική απόδοση των VIPs και την επικυρωμένη συμπεριφορά τους, το υψηλό κόστος τους σε σύγκριση με τα συμβατικά μονωτικά υλικά καθιστά αμφίβολη την οικονομική τους αποδοτικότητα.

Σε αυτό το πλαίσιο, το παρόν κεφάλαιο εξετάζει τον αντίκτυπο των VIPs στην ενεργειακή και οικονομική αποδοτικότητα σε κτίρια πραγματικής κλίμακας που βρίσκονται σε πόλεις με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και οικονομικούς παράγοντες. Για το σκοπό αυτό, εξετάζονται δύο διαφορετικές εφαρμογές VIP: α) τοποθέτηση μιας στρώσης VIP στους εξωτερικούς τοίχους ενός ελαφρού κτιρίου με χαλύβδινο σκελετό και β) συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ του VIP και της συμβατικής μόνωσης για την αναβάθμιση ενός παλιού κτιρίου.

Στην πρώτη εφαρμογή, ένα LSF κτίριο αναλύεται διεξοδικά σε δύο περιπτώσεις, με και χωρίς VIP στους εξωτερικούς τοίχους, με σκοπό τη διερεύνηση της συμβολής των VIP για τη μείωση των θερμογεφυρών. Τα δύο κελύφη (με και χωρίς VIP) εξετάζονται υπολογιστικά μέσω των δύο τεχνικών που έχουν αναλυθεί και επικυρωθεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο: ανάλυση κελύφους σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211 [58] (ενότητα 7.2) και ολόκληρη προσομοίωση του κελύφους (ενότητα 7.3). Οι επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες που προκαλούνται από τη μεταλλική δομή καθώς και οι γεωμετρικές (μη επαναλαμβανόμενες) γραμμικές και σημειακές θερμογέφυρες που προκαλούνται από τις ενώσεις των στοιχείων του κελύφους υπολογίζονται τόσο στην περίπτωση με όσο και χωρίς το VIP. Το κτίριο προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο EnergyPlus για τον υπολογισμό της

απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη για τέσσερις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Τέλος, προτείνονται τροποποιήσεις στον σχεδιασμό του κελύφους προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω ο αντίκτυπος των σημαντικότερων θερμογεφυρών.

Στη δεύτερη εφαρμογή διερευνάται η αναβάθμιση του κελύφους ενός παλαιού κτιρίου με στόχο την βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κελύφους. Αξιολογούνται πέντε διαφορετικές περιπτώσεις αναβάθμισης του κελύφους από την σκοπιά της εξοικονόμησης ενέργειας και της οικονομικής αποδοτικότητας για τρεις διαφορετικές ευρωπαϊκές πόλεις: Αθήνα, Γενεύη και Στοκχόλμη. Τα πέντε σενάρια αφορούν τη χρήση VIP ή συμβατικής μόνωσης (EPS) σε διαφορετικά πάχη. Καθώς το κτίριο είναι ιστορικό, η μόνωση τοποθετείται στην εσωτερική πλευρά των τοίχων. Η οικονομική ανάλυση διενεργείται για δύο σενάρια: με και χωρίς την εννοκίαση του κτιρίου. Η συγκριτική αξιολόγηση των περιπτώσεων πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού της ετήσιας εξοικονόμησης ενέργειας (λειτουργικών εξόδων) και του χρόνου για την αποπληρωμή του αρχικού κόστους εγκατάστασης. Η ενεργειακή ανάλυση βασίζεται στη μείωση των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη που υπολογίζεται από το λογισμικό EnergyPlus (μοντέλο EP), ενώ η οικονομική ανάλυση πραγματοποιείται σύμφωνα με την κοινή μέθοδο της περιόδου απόσβεσης.

8.2 Εγκατάσταση VIP για τη μείωση των θερμογεφυρών σε ελαφρύ κέλυφος χαλύβδινου σκελετού

Στην παρούσα ενότητα, διερευνάται η χρήση των VIP σε ένα κέλυφος ελαφρού κτιρίου χαλύβδινου σκελετού (LSF). Το κέλυφος είναι παρόμοιο με εκείνο του πειραματικού οικίσκου που κατασκευάστηκε στην Ελβετία και διερευνήθηκε πειραματικά στο Κεφάλαιο 6 (ενότητα 6.3). Στόχος της διερεύνησης είναι τη χρήση μιας στρώσης VIP στην εσωτερική πλευρά των εξωτερικών τοιχοποιιών ως μέτρο για τη μείωση των θερμογεφυρών και την περαιτέρω βελτίωση της θερμικής απόδοσης για ένα εκ των προτέρων καλά μονωμένο κέλυφος. Για το σκοπό αυτό, το κέλυφος διερευνάται σε δύο περιπτώσεις: με και χωρίς τη στρώση του VIP. Επειδή οι θερμογέφυρες τέτοιων κατασκευών είναι σημαντικές η ενεργειακή ανάλυση εστιάζει στην μείωση της συνεισφοράς τους λόγω της παρουσίας των VIPs.

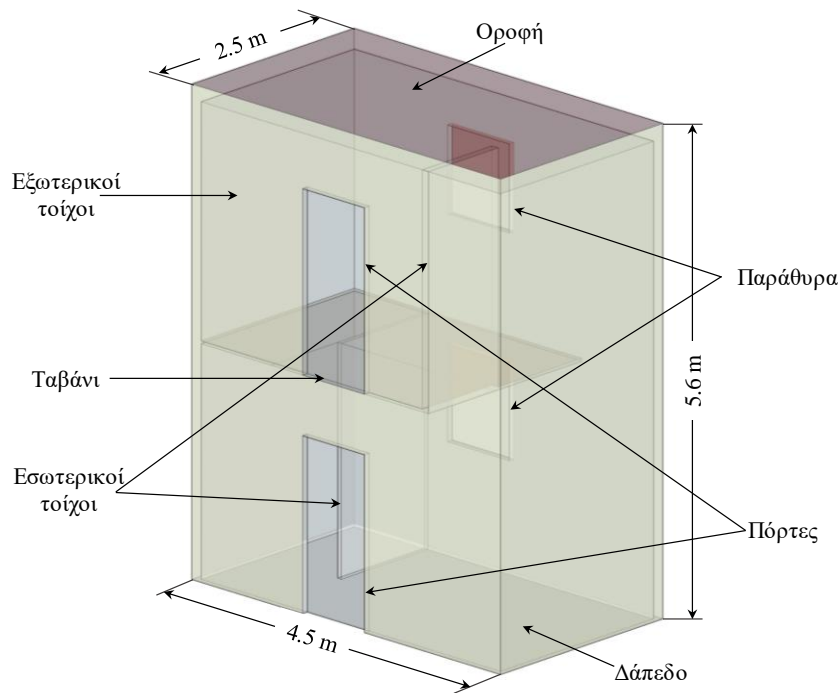
8.2.1 Περιγραφή του κτιρίου

Το υπό-μελέτη κτίριο είναι μία διώροφη αρθρωτή LSF κατοικία κατασκευασμένη από συστήματα ξηράς δόμησης στηριγμένα σε χαλύβδινο σκελετό. Οι εξωτερικές διαστάσεις του κτιρίου είναι $4.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 5.6 \text{ m}$. Η Εικόνα 53 απεικονίζει το εξεταζόμενο κτίριο και ο Πίνακας 15 συνοψίζει τη διαστρωμάτωση των υλικών στα στοιχεία του κελύφους. Τα στοιχεία του κελύφους είναι παρόμοια με το πειραματικό κτίριο που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 6 (ενότητα 6.3). Για τη μείωση των θερμογεφυρών εξαιτίας του μεταλλικού σκελετού, εξετάζεται η τοποθέτηση μιας ενδιάμεσης στρώσης VIP μεταξύ του φέροντος και του μη φέροντος οργανισμού. Στον παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα δύο κέλυφη (με και χωρίς VIP στη τοιχοποιία).

Οι ιδιότητες των υλικών παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 10, στην ενότητα 6.3.2. Συγκεκριμένα η θερμική αγωγιμότητα των VIP θεωρήθηκε να είναι ίση με μια ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα λαμβάνοντας υπόψιν, τόσο την επίδραση των ακμών, όσο και τα φαινόμενα γήρανσης για μια χρονική περίοδο 25 ετών, όπως προτείνεται από τους Simmler και Brunner [96]. Τα ανοίγματα του κελύφους θεωρήθηκαν αρκετά καλά με τριπλά παράθυρα ($U\text{-value} = 1.25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) και μονωμένη πόρτα ($U\text{-value} = 1.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

Πίνακας 15 – Η διαστρωμάτωση των στοιχείων του κτιριακού κελύφους.

Στοιχείο κελύφους	Διαστρωμάτωση στοιχείων κελύφους	α/ α	Υλικό	Πάχος [mm]
Εξωτερική τοιχοποιία (EW) Στην περίπτωση Με VIP	<p>Συνολικό πάχος: 320 mm</p>	1 2 3 4	Γυψοσανίδα Πετροβάμβακας VIP Γυψοσανίδα	30 50 20 15
Εξωτερική τοιχοποιία (EW) Στην περίπτωση Χωρίς VIP	<p>Συνολικό πάχος: 300 mm</p>	5 6 7 8	Πετροβάμβακας Διάκενο αέρα Τσιμεντοσανίδα Επίχρισμα	150 27 12 1
Οροφή (RF)	<p>Συνολικό πάχος: 289 mm</p>	1 2 3 4 5	Γυψοσανίδα Πετροβάμβακας Πετροβάμβακας Πλάκα οροφής Στεγανοποίηση οροφής	15 27 200 28 4
Δάπεδο (FL)	<p>Συνολικό πάχος: 450 mm</p>	1 2 3 4 5 6 7 8 9	Έδαφος Πλάκα τσιμέντου Γυψοσανίδα Πετροβάμβακας Διάκενο αέρα Πλάκα δαπέδου Ηχομόνωση Πάτωμα Πλακάκι	150 15 180 20 28 20 32 5
Εσωτερική τοιχοποιία (IW)	<p>Συνολικό πάχος: 210 mm</p>	1 2 3	Γυψοσανίδα Πετροβάμβακας Διάκενο αέρα	30 120 30
Ταβάνι (CL)	<p>Συνολικό πάχος: 342 mm</p>	1 2 3 4 5 6 7 8	Γυψοσανίδα Πετροβάμβακας Πετροβάμβακας Διάκενο αέρα Πλάκα οροφής Ηχομόνωση Πάτωμα Πλακάκι	15 27 180 20 28 20 32 5



Εικόνα 53 – Το διώροφο αρθρωτό κτίριο.

8.2.2 Ανάλυση του κτιριακού κελύφους

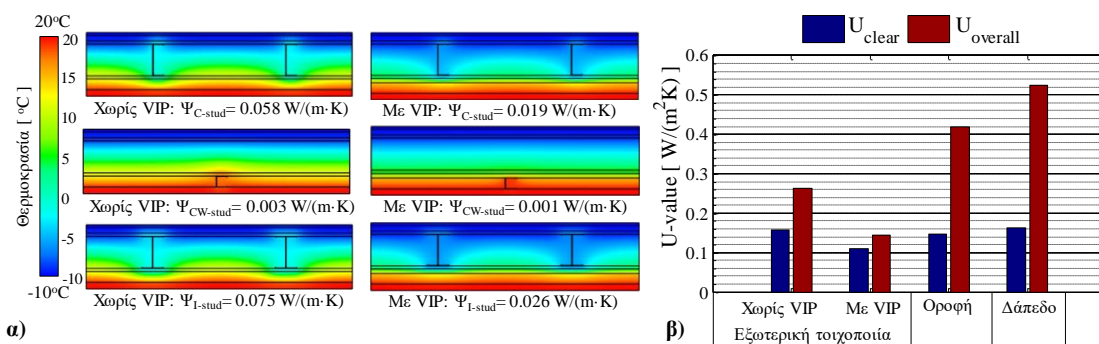
Η ανάλυση του κτιριακού κελύφους βασίζεται στη μεθοδολογία του προτύπου ISO 10211 [58], που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 7.2), εστιάζοντας στη συμβολή του VIP στη μείωση των θερμογεφυρών και στη βελτίωση του κελύφους. Με αυτόν τον τρόπο, το κέλυφος χωρίζεται στα τρία μοντέλα: 1D, 2D και 3D, για τον υπολογισμό των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους, των γραμμικών και σημείων μη επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών, αντίστοιχα. Όλες οι θερμογεφυρες διερευνούνται σε δύο περιπτώσεις: με και χωρίς VIP στις εξωτερικές τοιχοποιίες. Το εμπορικό CFD λογισμικό ANSYS CFX [180] χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση όλων των θερμογεφυρών. Ο αέρας στα διάκενα θεωρήθηκε ακίνητος με ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα υπολογιζόμενη σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946 [67], λαμβάνοντας υπόψιν τα φαινόμενα συναγωγής και ακτινοβολίας.

Κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους

Το μοντέλο 1D υπολόγισε την επίδραση του μεταλλικού σκελετού στη θερμική απόδοση του κεντρικού τμήματος των στοιχείων του κελύφους. Οι ορθοστάτες του μεταλλικού σκελετού δημιουργούν επαναλαμβανόμενες γραμμικές θερμογέφυρες, οι οποίες ποσοτικοποιούνται από τη γραμμική θερμική διαπερατότητα, Ψ -value, με αποτέλεσμα την αύξηση του U_{clear} (χωρίς θερμογέφυρες) στο $U_{overall}$ (συμπεριλαμβανομένων των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών).

Η επίδραση του μεταλλικού σκελετού στην θερμική απόδοση των στοιχείων είναι σημαντική, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 54. Η εξωτερική τοιχοποιία διερευνήθηκε τόσο στην περίπτωση με όσο και χωρίς τη στρώση VIP για όλους τους τύπους ορθοστατών. Όπως φαίνεται, η παρουσία των ορθοστατών εισάγει σοβαρές θερμογέφυρες, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη στη συνολική θερμική αξιολόγηση του κελύφους. Επιπλέον, είναι φανερό ότι το Ψ -value των I-stud είναι περίπου 29% - 36% υψηλότερο από το αντίστοιχο των C-stud (και στις δύο περιπτώσεις με και χωρίς το VIP). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το I-stud είναι ένα διπλό C-stud, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει περισσότερο μέταλλο στην ίδια περιοχή αυξάνοντας τις απώλειες θερμότητας. Επιπρόσθετα, η

επίδραση του CW-stud δεν είναι σημαντική σε σύγκριση με τους άλλους τύπους ορθοστατών, λόγω του χαμηλού πάχους του. Τέλος, τα Ψ -value στις τρεις περιπτώσεις ορθοστατών μειώνονται κατά 54% - 67% λόγω της παρουσίας του VIP.



Εικόνα 54 – Επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες στο κεντρικό τμήμα των στοιχείων του κελύφους α) ισοεπιφάνειες θερμοκρασιών των εξωτερικών τοιχοποιιών και β) επίδραση ορθοστατών στο U-value των στοιχείων του κελύφους.

Η επίδραση των μεταλλικών ορθοστατών στο U-value, για κάθε στοιχείο κελύφους, παρουσιάζεται στην Εικόνα 54β. Όπως φαίνεται, η παρουσία των ορθοστατών επηρεάζει σημαντικά τη θερμική απόδοση των στοιχείων αυξάνοντας το U-value της εξωτερικής τοιχοποιίας κατά 66% για την περίπτωση χωρίς το VIP και κατά 32% στην περίπτωση με VIP.

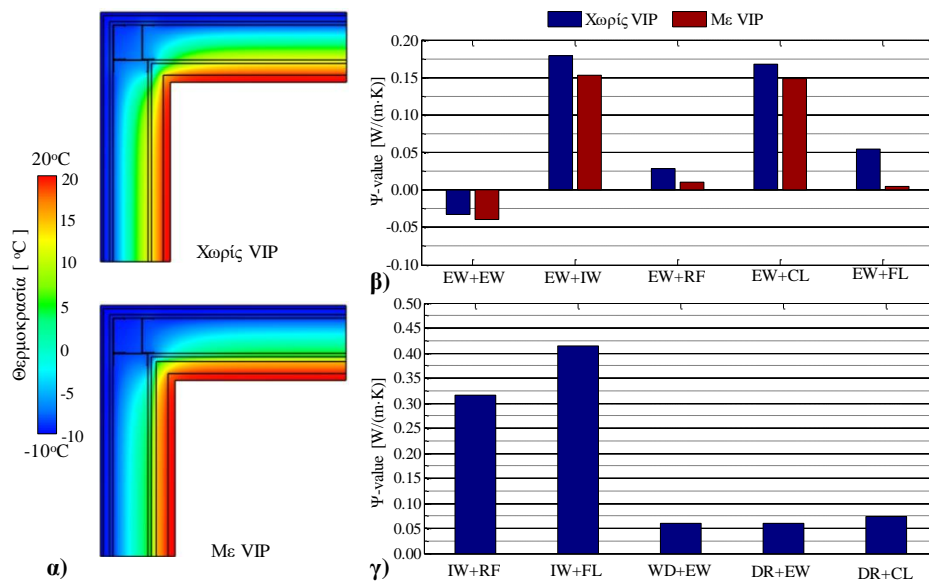
Η έντονη επίδραση των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών παρατηρείται στην αύξηση της θερμικής διαπερατότητας της οροφής και του δαπέδου. Το Ψ -value του I-stud, που στηρίζει την οροφή, είναι ίσο με 0.137 $W/(m \cdot K)$ αυξάνοντας το U-value κατά 188%. Οι θερμογέφυρες που οφείλονται στην παρουσία του ορθοστάτη με αυλακώσεις της ψευδοροφής είναι αμελητέες, καθώς το Ψ -value είναι μικρότερο από $10^{-3} W/(m \cdot K)$ λόγω των σχισμών και του μικρού του πάχους. Όσον αφορά το δάπεδο, τα μεταλλικά στηρίγματα εισάγουν σημαντικές γραμμικές επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες με Ψ -value ίσο με 0.180 $W/(m \cdot K)$, αυξάνοντας το U-value κατά 220%.

Γραμμικές, μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες

Το μοντέλο 2D υπολογίζει όλες τις γραμμικές μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες που δημιουργούνται από τις ενώσεις μεταξύ των στοιχείων του κελύφους. Όλες οι ενώσεις προσομοιώθηκαν στις περιπτώσεις με και χωρίς VIP στους τοίχους προκειμένου να υπολογιστεί η γραμμική θερμική διαπερατότητα, Ψ -value. Οι ισοεπιφάνειες θερμοκρασίας μιας ενδεικτικής ένωσης, μεταξύ δύο εξωτερικών τοιχοποιιών, για τις περιπτώσεις με και χωρίς το VIP, απεικονίζονται στην Εικόνα 55α. Η παρουσία των VIP δημιουργεί ένα πιο ομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο στην ένωση.

Η γραμμική θερμική διαπερατότητα, Ψ -value, όλων των εξεταζόμενων γεωμετρικών ενώσεων των στοιχείων του κελύφους παρουσιάζεται στην Εικόνα 55β και στην Εικόνα 55γ. Εστιάζοντας στην Εικόνα 55β, είναι προφανές ότι η στρώση του VIP βελτιώνει την επίδραση των γραμμικών θερμογεφυρών, μειώνοντας την τιμή του Ψ -value κατά 12% έως και 92%. Παρατηρείται ότι τα Ψ -value των ενώσεων μεταξύ εξωτερικών τοιχοποιιών (EW+EW) έχουν αρνητικές τιμές, πράγμα που σημαίνει ότι για την τρέχουσα ανάλυση αυτή η συγκεκριμένη θερμογέφυρα έχει θετική επίδραση στη συνολική θερμική απόδοση του κελύφους. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 7.4.1), αυτό οφείλεται στη χρήση του συστήματος εξωτερικών διαστάσεων και στο γεγονός ότι οι τοιχοποιίες και στις δύο περιπτώσεις είναι καλά μονωμένες. Η Εικόνα 55γ, παρουσιάζει τις ενώσεις που δεν επηρεάζονται από την πρόσθετη μόνωση του VIP. Συνολικά, είναι φανερό ότι οι σημαντικότερες θερμογέφυρες είναι οι

ενώσεις που περιλαμβάνουν τους εσωτερικούς τοίχους (EW+IW, IW+RF και IW+FL) καθώς και η ένωση μεταξύ εξωτερικής τοιχοποιίας και της ταβανιού (EW+CL).

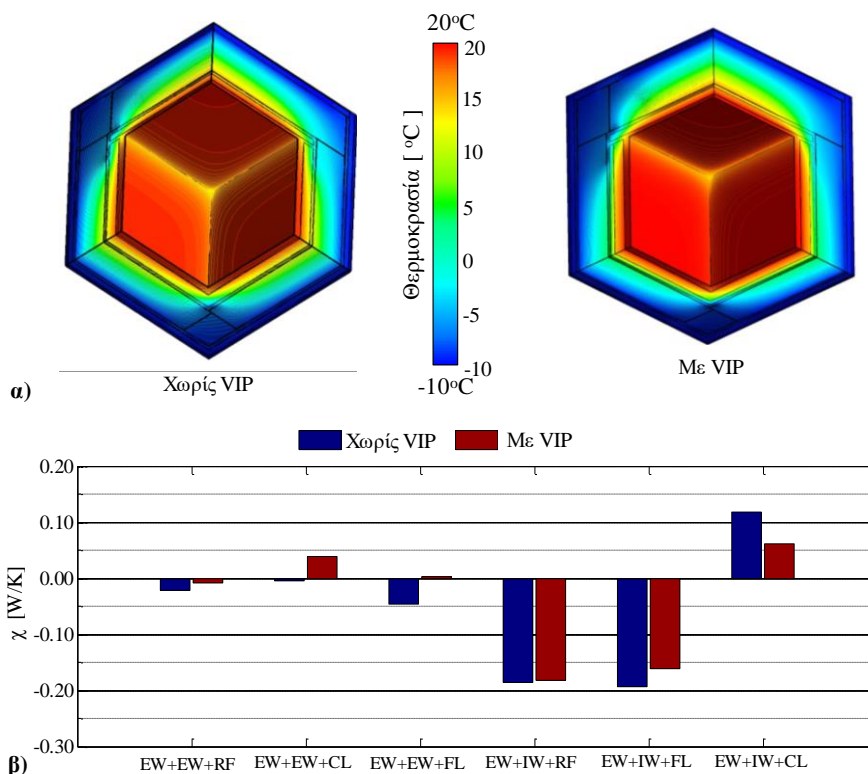


Εικόνα 55 – Γραμμικές, μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες: α) ισοεπιφάνειες θερμοκρασιών στην ένωση μεταξύ δύο τοιχοποιιών στις περιπτώσεις με και χωρίς VIP, β) οι τιμές Ψ-value των ενώσεων που επηρεάζονται από τη στρώση του VIP και γ) οι τιμές Ψ-value όλων των ενώσεων που δεν επηρεάζονται από το VIP

Σημειακές, μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες

Το μοντέλο 3D υπολογίζει τις σημειακές μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες που προκαλούνται από τις γωνίες μεταξύ των ενώσεων τριών στοιχείων του κελύφους. Όλες οι θερμογέφυρες προσομοιώθηκαν στις περιπτώσεις με και χωρίς VIP στην εξωτερική τοιχοποιία. Το 3D μοντέλο υπολόγισε τη σημειακή θερμική διαπερατότητα, χ -value, όλων των θερμογεφυρών. Η Εικόνα 56α απεικονίζει τις ισοεπιφάνειες θερμοκρασιών μιας ενδεικτικής γωνίας του κελύφους, δηλαδή της γωνίας μεταξύ των δύο εξωτερικών τοιχοποιιών και της οροφής, για τις περιπτώσεις με και χωρίς το VIP. Ο μεταλλικός σκελετός επηρεάζει σημαντικά το τρισδιάστατο πεδίο θερμοκρασίας και στις δύο περιπτώσεις.

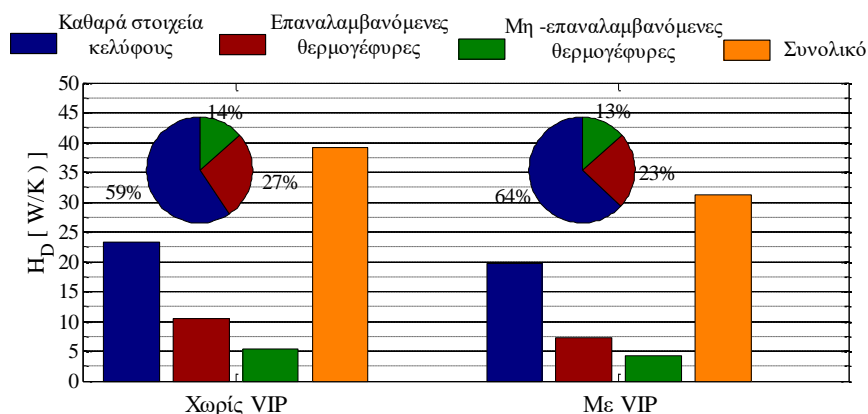
Τα αποτελέσματα των χ -value όλων των μη-επαναλαμβανόμενων σημειακών θερμογεφυρών παρουσιάζονται στην Εικόνα 56β. Οι περισσότερες σημειακές θερμογέφυρες έχουν θετική επίδραση στην τρέχουσα ανάλυση, παρέχοντας αρνητικές τιμές χ -value. Ως εκ τούτου, η συνολική επίδραση των σημειακών θερμογεφυρών είναι θετική, καθώς το άθροισμα όλων των χ -values είναι περίπου -0.4 W/K, στην περίπτωση χωρίς VIP και -0.1 W/K στην περίπτωση με VIP. Γενικά, τα χ -value στις περιπτώσεις χωρίς VIP είναι μικρότερα, εξαιτίας των υψηλότερων τιμών Ψ-value των γραμμικών θερμογεφυρών. Η πιο σημαντική θερμογέφυρα είναι η γωνία μεταξύ εξωτερικής τοιχοποιίας - εσωτερικής τοιχοποιίας - οροφής.



Εικόνα 56 – Σημειακές, μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες: α) ισοεισφαίνεις θερμοκρασιών μιας ενδεικτικής γωνίας μεταξύ δυο εξωτερικών τοιχοποιιών και οροφής και β) οι τιμές χ-value για τις περιπτώσεις με και χωρίς VIP.

Συνολική θερμική απόδοση κελύφους

Η συνεισφορά των θερμογεφυρών και η επίδραση της στρώσης του VIP στη συνολική θερμική απόδοση του κελύφους υπολογίστηκαν μέσω του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας, H_D , σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10211. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 57 και περιλαμβάνουν τη επίδραση όλων των στοιχείων του κελύφους (συμπεριλαμβανομένων των παραθύρων και των πορτών) για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Εικόνα 57 – Ο συντελεστής άμεσης μεταφοράς θερμότητας και η συνεισφορά των θερμογεφυρών στις περιπτώσεις με και χωρίς το VIP.

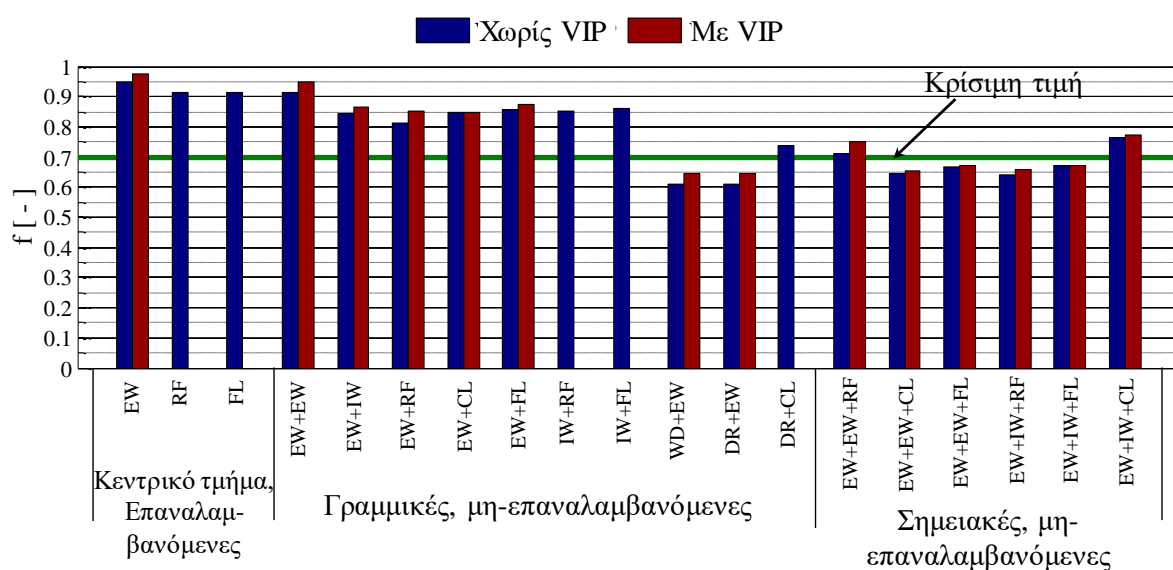
Παρατηρείται ότι η πρόσθετη VIP στρώση μειώνει το συνολικό H_D κατά 20%. Επιπλέον, το VIP μειώνει την επίδραση των θερμογεφυρών κατά 5%, καθώς η συμβολή των καθαρών στοιχείων (χωρίς

θερμογέφυρες) στο H_D αυξήθηκε από 59% σε 64%. Σημειώνεται ότι τα ανοίγματα (δύο παράθυρα και δύο πόρτες) είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος αυτών των ποσοστών, δεδομένου ότι η συνεισφορά τους στο συνολικό H_D είναι 22% και 28% στην περίπτωση χωρίς και με VIP, αντίστοιχα. Αυτή η υψηλή συμβολή των ανοιγμάτων δείχνει την υψηλή θερμική απόδοση και των δύο εξετασμένων κελυφών.

Η μείωση των τιμών Ψ -value όλων των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών λόγω της παρουσίας της στρώσης του VIP οδηγεί στη μείωση της συνεισφοράς τους στη συνολική θερμική απόδοση από 27% σε 23%. Η συνολική επίδραση των μη επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών (γραμμικών και σημειακών) στην περίπτωση του VIP μειώνεται επίσης κατά 1%.

Θερμοκρασιακός παράγοντας

Η υγραυθημική απόδοση όλων των θερμογεφυρών αξιολογήθηκε μέσω του θερμοκρασιακού παράγοντα, f , που περιγράφεται στην ενότητα 2.4.2. Μια κρίσιμη τιμή του θερμοκρασιακού παράγοντα ίση με 0.7 ορίζεται για να αποφευχθεί η ανάπτυξη μούχλας και ο κίνδυνος συμπύκνωσης [74]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης όλων των θερμογεφυρών για τις περιπτώσεις με και χωρίς VIP παρουσιάζονται στην Εικόνα 58. Δείχνεται ότι προβλήματα υγρασίας δεν αναμένονται να παρουσιαστούν στα κεντρικά τμήματα των στοιχείων του κελύφους, καθώς ο θερμοκρασιακός παράγοντας είναι υψηλότερος από την κρίσιμη τιμή και στις δύο περιπτώσεις. Η πρόσθετη στρώση του VIP αυξάνει τον συντελεστή θερμοκρασίας κατά 3%, στο κεντρικό τμήμα των εξωτερικών τοιχοποιιών. Όσον αφορά τις μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες, φαίνεται ότι υπάρχουν αρκετές στις οποίες ο θερμοκρασιακός παράγοντας είναι ελαφρώς χαμηλότερος από την κρίσιμη τιμή. Για τις γραμμικές μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες δεν υπάρχει κίνδυνος συμπύκνωσης, εκτός από τις ενώσεις μεταξύ της εξωτερικής τοιχοποιίας και του πλαισίου του παραθύρου ή της πόρτας. Ωστόσο, η παρουσία των VIPs αυξάνει το θερμοκρασιακό παράγοντα έως και 5% για αυτές τις θερμογέφυρες. Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη μούχλας είναι πιθανή στις γωνίες του κελύφους. Ο χαμηλότερος συντελεστής θερμοκρασίας είναι ίσος με 0.64, ο οποίος παρατηρείται στη γωνία μεταξύ εξωτερικής τοιχοποιίας – εσωτερικής τοιχοποιίας - οροφής. Ωστόσο, το VIP βελτιώνει την υγραυθημική συμπεριφορά όλων των γωνιών, αυξάνοντας το θερμοκρασιακό παράγοντα έως 6%.



Εικόνα 58 – Ο θερμοκρασιακός παράγοντας για όλες τις θερμογέφυρες στις περιπτώσεις με και χωρίς το VIP.

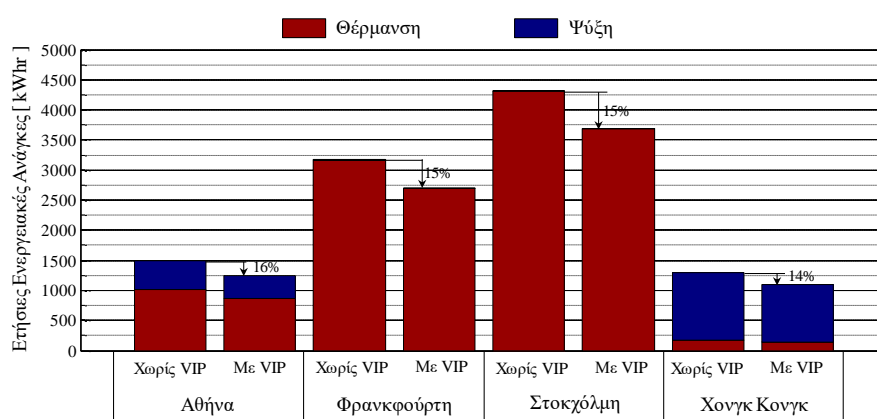
8.2.3 Προσομοίωση ολόκληρου του κελύφους

Ολόκληρο το κτιριακό κέλυφος προσομοιώνεται με το μοντέλο EnergyPlus (μοντέλο EP), που περιεγράφηκε και επικυρώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 7.3) και υπολογίζει τις ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση και ψύξη, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις θερμογέφυρες. Το κτίριο διερευνήθηκε για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις, με και χωρίς VIP στις εξωτερικές τοιχοποιίες, για τέσσερις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες: Αθήνα, Φρανκφούρτη, Στοκχόλμη και Χονγκ Κονγκ.

Το κτίριο θεωρήθηκε ως μια θερμική ζώνη και η εσωτερική θερμοκρασία κατά τη θέρμανση ορίστηκε ίση με 20°C και κατά τη ψύξη ίση με 24°C, προκειμένου να εξασφαλιστεί η εσωτερική θερμική άνεση. Το κτίριο θεωρήθηκε χωρίς εσωτερικό θερμικό φορτίο προκειμένου να αξιολογηθεί μόνο η απόδοση του κτιριακού κελύφους. Η διείσδυση του αέρα και ο απαιτούμενος ρυθμός αερισμού υπολογίστηκε ίσος με 0.68 ACH σύμφωνα με το ASHRAE [181]. Τα δεδομένα καιρού λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του EnergyPlus [182].

Τα αποτελέσματα των ετήσιων ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη του εξεταζόμενου ελαφρού κτιρίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 59 για τις περιπτώσεις με και χωρίς VIP. Όπως φαίνεται, η επιπλέον στρώση του VIP μειώνει τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες κατά 14% έως και 16% για όλες τις εξεταζόμενες κλιματικές συνθήκες. Η μείωση αυτή είναι σημαντική στις πόλεις με ψυχρό κλίμα, καθώς η προσθήκη του VIP εξοικονομεί 628 kWh ετησίως, για τις κλιματολογικές συνθήκες της Στοκχόλμης.

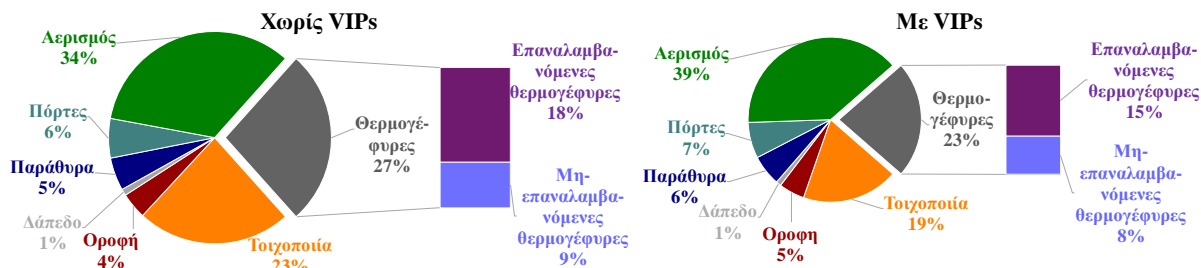
Ωστόσο, από τεχνικοοικονομική άποψη, αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να αποπληρώσει το πρόσθετο κόστος για την αγορά και την εγκατάσταση των VIPs σε 56 χρόνια, υποθέτοντας ένα υψηλής απόδοσης σύστημα θέρμανσης φυσικού αερίου και τυπικές τιμές κόστους των VIPs (περίπου 71.3 €/m² για πάχος 20mm). Αυτό καθιστά την εγκατάσταση της στρώσης των VIPs ασύμφορη λόγω του γεγονότος ότι το κέλυφος χωρίς τα VIPs είναι επίσης καλά μονωμένο και του υψηλού κόστους των VIPs.



Εικόνα 59 – Συνολικές ενεργειακές ανάγκες για τις περιπτώσεις με και χωρίς VIP σε τέσσερις κλιματολογικές συνθήκες.

Η συνεισφορά κάθε τμήματος του κελύφους στις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 60 για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις: με και χωρίς το VIP στην εξωτερική τοιχοποιία. Τα αποτελέσματα αφορούν τις κλιματικές συνθήκες της Στοκχόλμης, ωστόσο είναι παρόμοια με αυτά των υπόλοιπων κλιματικών συνθηκών. Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη ποσότητα θερμικών απωλειών προκαλείται από τον αερισμό του κτιρίου και για τις δύο περιπτώσεις.

Η παρουσία του VIP μειώνει την επίδραση των καθαρών στοιχείων του αδιαφανούς κελύφους (τοιχούς, οροφή και δάπεδο) και των θερμογεφυρών κατά 3% και 4% αντίστοιχα. Για τις θερμογέφυρες, παρατηρείται μείωση τόσο στις επαναλαμβανόμενες όσο και στις μη-επαναλαμβανόμενες. Τέλος, σημαντική αύξηση των ενεργειακών αναγκών οφείλεται στα ανοίγματα που συνεισφέρουν κατά 10% και 12% στην περίπτωση χωρίς και με VIP, αντίστοιχα. Τα συμπεράσματα σχετικά με την κατανομή των ενεργειακών απωλειών στο κέλυφος είναι παρόμοια με εκείνα που προέκυψαν από την ανάλυση του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας (Εικόνα 57).



Εικόνα 60 – Κατανομή των ενεργειακών απωλειών στα διάφορα μέρη του κελύφους.

8.2.4 Σχεδιαστικές τροποποιήσεις για περαιτέρω βελτίωση του κελύφους

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η εγκατάσταση των VIPs στο εσωτερικό μέρος των εξωτερικών τοιχοποιιών οδηγεί σε μείωση κατά 20% του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας και περίπου 14% στις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση και ψύξη. Παρ' όλα αυτά, ακόμη και στην περίπτωση της τοποθέτησης των VIPs, οι θερμογέφυρες επιδεινώνουν σημαντικά τη θερμική απόδοση του κελύφους. Ειδικά θερμογέφυρες, όπως οι επαναλαμβανόμενες στο κεντρικό τμήμα της οροφής και του δαπέδου (Εικόνα 54) και οι γραμμικές μη-επαναλαμβανόμενες στις ενώσεις των εξωτερικών τοιχοποιιών με το ταβάνι ή τους εσωτερικούς τοίχους (Εικόνα 55), μειώνουν σε μεγάλο βαθμό τη θερμική απόδοση του κελύφους. Για το λόγο αυτό, προτείνονται διάφορες τροποποιήσεις των τρεχουσών κατασκευαστικών πρακτικών και λύσεις στο σχεδιασμό του κτιρίου για την περαιτέρω εξάλειψη αυτών των θερμογεφυρών.

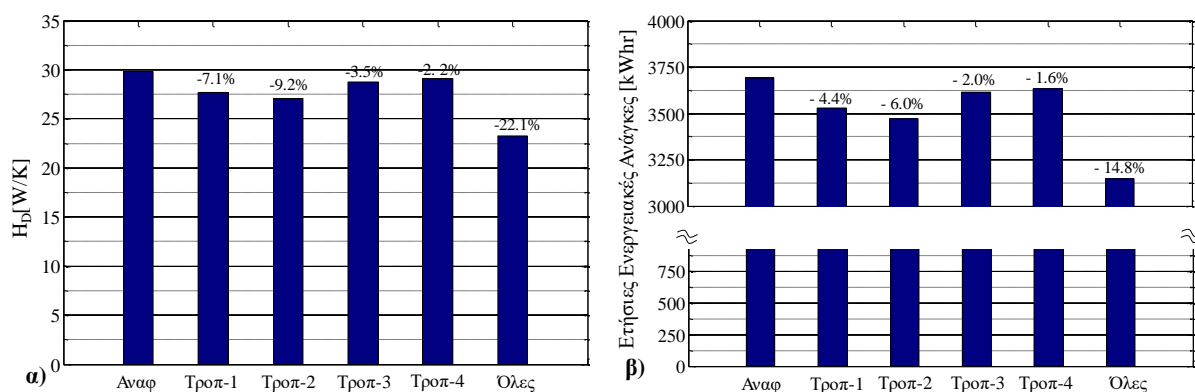
Οι προτεινόμενες τροποποιήσεις που αφορούν την περαιτέρω αναβάθμιση της θερμικής απόδοσης του κελύφους μειώνοντας την επίδραση των πιο σημαντικών θερμογεφυρών συνοψίζονται στον Πίνακα 16. Για τη μείωση των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών εξαιτίας του μεταλλικού σκελετού στο κεντρικό τμήμα της οροφής (που είναι υπεύθυνες για το 9% του συνολικού H_D) προτείνεται η τοποθέτηση μιας επιπλέον στρώσης συμβατικού μονωτικού (π.χ. XPS) στο πάνω μέρος της οροφής. Σε αυτή την περίπτωση μια στρώση στεγανοποίησης απαιτείται για την προστασία του μονωτικού. Για την εξάλειψη των επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών του δαπέδου (που είναι υπεύθυνες για το 12% του συνολικού H_D) προτείνεται η τοποθέτηση συμβατικής μόνωσης (πχ EPS) κάτω από την πλάκα τσιμέντου του δαπέδου. Για τη μείωση της γραμμικής μη-επαναλαμβανόμενης θερμογέφυρας στην ένωση μεταξύ εξωτερικού τοίχου και ταβανιού (EW+CL) (που είναι υπεύθυνη για το 6% του συνολικού H_D) προτείνεται η τοποθέτηση μιας λωρίδας VIP στο διάκενο της τοιχοποιίας, ακριβώς πάνω στην ένωση. Τέλος για τη μείωση της θερμογέφυρας εξαιτίας της ένωσης εξωτερικής-εσωτερικής τοιχοποιίας (που είναι υπεύθυνη για το 1.3% του συνολικού H_D) προτείνεται η πλήρης αποδέσμευση του μεταλλικού σκελετού της εξωτερικής και της εσωτερικής τοιχοποιίας. Αυτό, για στατικούς λόγους είναι εφικτό μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Πίνακας 16 – Τροποποιήσεις σχεδιασμού για περαιτέρω μείωση των πιο σημαντικών θερμογεφυρών.

Τροποποίηση	Θερμογέφυρα	Περιγραφή
Αναφ	Αρχικό (με VIP)	Το κτίριο αναφοράς με το VIP στις εξωτερικές τοιχοποιίες
Τροπ - 1	Επαν. Οροφής	Τοποθέτηση στρώσης XPS (πάχους 80 mm) πάνω από την οροφή
Τροπ - 2	Επαν. Δαπέδου	Τοποθέτηση στρώσης EPS (πάχους 100 mm) κάτω από το τσιμέντο
Τροπ - 3	EW+CL	Τοποθέτηση λωρίδας VIP (πάχους 10 mm & πλάτους 616 mm) στο διάκενο
Τροπ - 4	EW+IW	Αποσύνδεση εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας
Όλες	Όλες οι τροποποιήσεις	Εφαρμογή όλων των λύσεων

Η συνεισφορά κάθε προτεινόμενης τροποποίησης στην ενεργειακή απόδοση του κελύφους απεικονίζεται στην Εικόνα 61. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 61α, που συνομίζει τη μείωση του συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας, H_D , οι τροποποιήσεις μειώνουν το H_D κατά 2% έως 9%. Οι μεγαλύτερες βελτιώσεις επιτυγχάνονται για τις τροποποιήσεις που αφορούν τις επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες της οροφής και του δαπέδου. Ο συνδυασμός όλων των τροποποιήσεων οδηγεί σε μείωση του H_D κατά 22%. Πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή η μείωση αναφέρεται με σημείο αναφοράς το κτίριο με VIP στις εξωτερικές τοιχοποιίες.

Η μείωση των ετήσιων ενεργειακών αναγκών που επιτυγχάνεται για κάθε μία από τις παραπάνω τροποποιήσεις απεικονίζεται στην Εικόνα 61β. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις συνθήκες της Στοκχόλμης, ωστόσο, είναι παρόμοια και για τις άλλες κλιματικές συνθήκες. Παρατηρείται ότι οι τροποποιήσεις μπορούν να εξοικονομήσουν από 58 kWh έως 220 kWh, ετησίως, πράγμα που σημαίνει ότι οι ενεργειακές ανάγκες μειώνονται κατά 1.6% έως 6.0%. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται για τις τροποποιήσεις της οροφής και του δαπέδου, ενώ η τροποποίηση για τις δύο μη επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες μειώνει τη ζήτηση ενέργειας κατά περίπου 2%. Τέλος, η εφαρμογή όλων των προτεινόμενων τροποποιήσεων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ενεργειακών αναγκών κατά 14.8%, η οποία μπορεί να μεταφραστεί σε εξοικονόμηση ενέργειας ίση με 547 kWh, ετησίως. Υπενθυμίζεται ότι η παρουσία του VIP στις εξωτερικές τοιχοποιίες έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης των 633 kWh. Περαιτέρω τεχνικοοικονομική αξιολόγηση των προτεινόμενων τροποποιήσεων είναι απαραίτητη για την επιλογή της βέλτιστης λύσης.



Εικόνα 61 – Επίδραση των προτεινόμενων τροποποιήσεων: α) στον συντελεστή H_D και β) στις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες.

8.3 Συγκριτική τεχνο-οικονομική αξιολόγηση μεταξύ συμβατικών μονωτικών και VIP για την αναβάθμιση κτιριακού κελύφους

Στην παρούσα ενότητα διεξάγεται μια συγκριτική τεχνο-οικονομική αξιολόγηση διαφόρων περιπτώσεων αναβάθμισης κελύφους με τη χρήση συμβατικών και VIP μονωτικών υλικών. Το υπάρχον κέλυφος ανήκει σε μια μη μονωμένη παλαιά κατοικία, παραδοσιακού τύπου, η οποία συναντάται συχνά στη Νότια και Κεντρική Ευρώπη, αλλά λιγότερο συχνά στη Βόρεια Ευρώπη. Η μελέτη διεξάγεται για τρεις ευρωπαϊκές πόλεις, με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και οικονομικούς παράγοντες: Αθήνα, Γενεύη και Στοκχόλμη. Η αξιολόγηση των περιπτώσεων αναβάθμισης βασίζεται στην ενεργειακή και οικονομική ανάλυση των τριών πόλεων.

8.3.1 Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης

Η ανάλυση της παρούσας μελέτης αφορά την αναβάθμιση του κελύφους μια μονοκατοικίας, εξωτερικών διαστάσεων 10 m × 10 m και 3 m ύψος. Το κτίριο υποτίθεται ότι είναι παλαιάς κατασκευής κτισμένο στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με λιθόκτιστους μη-μονωμένους τοίχους (με R-value περίπου 0.3 m²K/W) παρόμοια με τη λιθόκτιστη τοιχοποιία η οποία μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4 (Πίνακας 2). Το κτίριο αποτελείται από δύο υπνοδωμάτια, μια κουζίνα, μια τραπεζαρία, ένα σαλόνι και ένα μπάνιο. Μια σχηματική απεικόνιση του κτιρίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 62. Δύο παράθυρα βρίσκονται σε κάθε προσανατολισμό και μια πόρτα είναι τοποθετημένη στο νότιο τοίχο. Έχοντας ως στόχο την αναβάθμιση των αδιαφανών στοιχείων του κελύφους, τα παράθυρα υποτίθεται ότι είναι ενεργειακά, αποτελούμενα από σύγχρονο μονωμένο πλαίσιο αλουμινίου και τριπλό υαλοπίνακα. Περαιτέρω λεπτομέρειες του κτιρίου συνοψίζονται στον Πίνακα 17.



Εικόνα 62 – Σχηματική απεικόνιση του κτιρίου

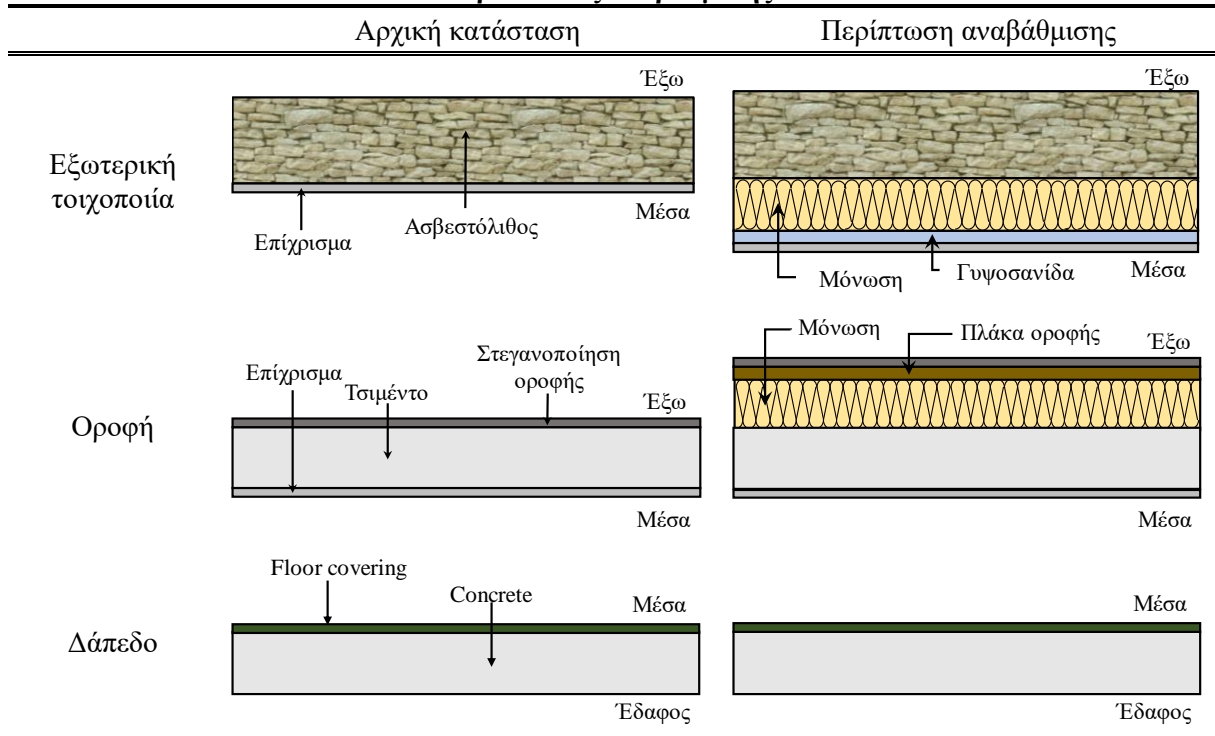
Πίνακας 17 – Λεπτομέρειες κελύφους

Περιγραφή	Τιμή
Συνολική επιφάνεια κελύφους	120 [m ²]
Επιφάνεια παραθύρων	12 [m ²]
Διαστάσεις παραθύρων	1 × 1.5 [m]
U-value παραθύρων	1.25 [W/(m ² K)]
Διαστάσεις πόρτας	1.10 × 2.20 [m]
U-value πόρτας	1.25 [W/(m ² K)]
Διείσδυση αέρα / Αερισμός	0.5 ACH
Ένοικοι	3
Ηλεκτρικές συσκευές	150 W
Φωτισμός	4 W/m ²

Η αναβάθμιση της θερμικής απόδοσης του κελύφους επιτυγχάνεται μέσω της τοποθέτησης μόνωσης στους τοίχους και στην οροφή. Καθώς η συμβολή του δαπέδου στις απώλειες ενέργειας είναι μικρή, σύμφωνα με την Εικόνα 60, οι περιπτώσεις αναβάθμισης δεν εξετάζουν την εγκατάσταση μόνωσης στο δάπεδο. Οι διαστρωματώσεις των στοιχείων του κελύφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 18 για την αρχική κατάσταση και τις εξεταζόμενες περιπτώσεις αναβάθμισης. Λόγω της παραδοσιακής πρόσοψης, η μόνωση των τοιχοποιιών θα πρέπει να τοποθετηθεί στην εσωτερική πλευρά. Επίσης προστίθεται στρώμα γυψοσανίδας για την προστασία της μόνωσης από ζημιές και προβλήματα

υγρασίας. Όσον αφορά την οροφή, η μόνωση εφαρμόζεται στην εξωτερική πλευρά μαζί με μια πλάκα οροφής και στεγανοποίηση για προστασία από τις καιρικές συνθήκες.

Πίνακας 18 – Η διαστρωμάτωση των στοιχείων του κελύφους στην αρχική κατάσταση και στις περιπτώσεις αναβάθμισης.



Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 19. Ειδικότερα, όπως και στην προηγούμενη ενότητα (ενότητα 8.2.1), η θερμική αγωγιμότητα του VIP θεωρήθηκε ίση με την ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα για μια χρονική περίοδο 25 ετών, όπως υποδεικνύουν οι Simmler και Brunner [96], λαμβάνοντας υπόψη τη γήρανση και την επίδραση των ακμών.

Πίνακας 19 – Θερμικές ιδιότητες των υλικών.

Υλικό	Πάχος [mm]	Θερμική αγωγιμότητα [W/(m·K)]	Πυκνότητα [kg/m ³]	Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/(kg·K)]
Ασβεστόλιθος	400	1.25	2000	1000
Επίχρισμα	5	0.63	800	1000
Τσιμέντο	150	1.3	2000	1000
Στεγανοποίηση οροφής	4	0.2	1000	1000
Πλακάκι δαπέδου	10	1.5	2000	1500
EPS	70/100/150	0.035	23	1450
VIP	20	0.007	195	800
Γυψοσανίδα	12.5	0.27	1033	990
Πλάκα οροφής	28	0.44	1500	1000

Συνολικά εξετάζονται 5 περιπτώσεις αναβάθμισης με διαφορετικούς τύπους και πάχη μόνωσης, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 20. Σε όλες τις περιπτώσεις αναβάθμισης, η μόνωση εγκαθίσταται

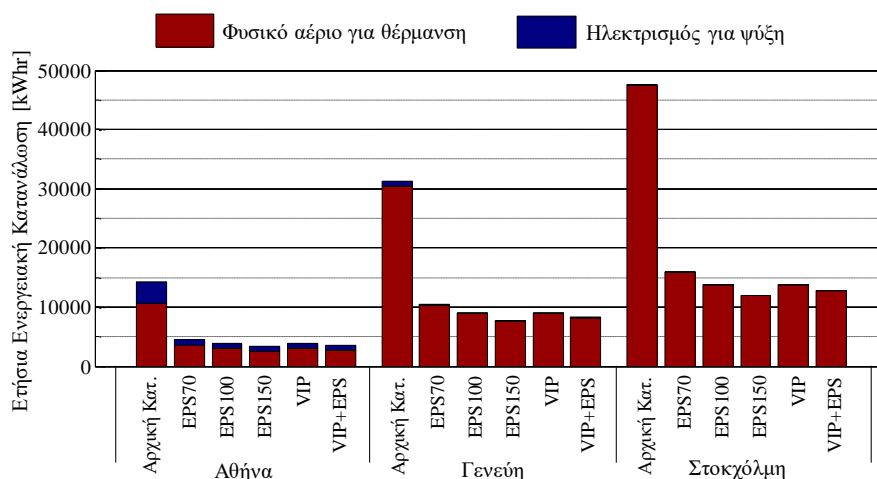
στη στρώση «Μόνωση» που απεικονίζεται στον Πίνακα 18. Τα EPS70, EPS100 και EPS150 εξετάζουν την εγκατάσταση μιας στρώσης EPS με πάχος 70 mm, 100 mm και 150 mm αντίστοιχα, ενώ η περίπτωση VIP αντιστοιχεί την εγκατάσταση VIP πάχους 20 mm τόσο στους τοίχους όσο και στην οροφή. Η περίπτωση αναβάθμισης VIP+EPS εξετάζει το συνδυασμό του VIP πάχους 20 mm στους τοίχους και του EPS πάχους 150 mm στην οροφή.

Πίνακας 20 – Η μόνωση για τις πέντε εξεταζόμενες περιπτώσεις αναβάθμισης.

Περίπτωση αναβάθμισης	Μόνωση στη τοιχοποιία	Μόνωση στην οροφή
EPS70	EPS 70mm	EPS 70mm
EPS100	EPS 100mm	EPS 100mm
EPS150	EPS 150mm	EPS 150mm
VIP	VIP 20mm	VIP 20mm
VIP+EPS	VIP 20mm	EPS 150mm

8.3.2 Ενεργειακή ανάλυση

Το υπο-μελέτη κτίριο προσομοιώνεται για τις έξι περιπτώσεις (αρχική κατάσταση και πέντε περιπτώσεις αναβάθμισης) μέσω του λογισμικού EnergyPlus. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη υπολογίζεται για τις τρεις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες: Αθήνα, Γενεύη και Στοκχόλμη. Το σύστημα θέρμανσης αποτελείται από λέβητα συμπύκνωσης φυσικού αερίου με απόδοση 100% και σωλήνες υψηλής μόνωσης με απώλειες διανομής ίσες με 5%, ενώ το σύστημα ψύξης είναι ένα τυπικό σύστημα κλιματισμού με COP = 3. Η εσωτερική θερμοκρασία θεωρείται 20°C κατά τη διάρκεια του χειμώνα και 24°C κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Μια μοναδική θερμική ζώνη θεωρείται για ολόκληρο το κτίριο. Όλες οι θερμογέφυρες υπολογίζονται σύμφωνα με το ISO 10211 [58] και εισάγονται στο μοντέλο, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην ενότητα 7.3. Τα δεδομένα καιρού λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων του EnergyPlus [182].



Εικόνα 63 – Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη των εξεταζόμενων περιπτώσεων.

Τα αποτελέσματα της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη για τις τρεις ευρωπαϊκές πόλεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 63. Όπως αναμένεται, η αναβάθμιση του κελύφους οδηγεί σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για όλες τις περιπτώσεις ανακαίνισης. Η μείωση κυμαίνεται μεταξύ 66% - 75% για τις τρεις πόλεις. Η μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης

ενέργειας παρατηρείται για την περίπτωση EPS150. Η περίπτωση VIP προσφέρει την ίδια μείωση με την περίπτωση EPS100 σε όλες τις κλιματολογικές συνθήκες, καθώς οι δύο στρώσεις μόνωσης που προστίθενται (100 mm EPS και 20 mm VIP) έχουν την ίδια θερμική αντίσταση και παρόμοια θερμοχωρητικότητα. Η περίπτωση VIP+EPS μειώνει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας κατά 2% σε σχέση με την περίπτωση VIP. Η αναβάθμιση του κελύφους μπορεί να εξοικονομήσει περισσότερες από 10000 kWh στην Αθήνα, 22000 kWh στη Γενεύη και 33000 kWh στη Στοκχόλμη. Σημαντικά φορτία ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη παρουσιάζονται μόνο στην Αθήνα, ενώ στη Γενεύη και στη Στοκχόλμη η ενέργεια για ψύξη είναι σχεδόν αμελητέα ή μηδενική.

8.3.3 Οικονομική ανάλυση

Μια τεχνικοοικονομική ανάλυση των πέντε εξεταζόμενων περιπτώσεων αναβάθμισης πραγματοποιείται διερευνώντας την οικονομική τους βιωσιμότητα. Η ανάλυση διερευνά την πιο αποδοτική λύση για την αναβάθμιση του κτιρίου, λαμβάνοντας υπόψη τις ετήσιες εισροές (έσοδα) και εκροές (λειτουργικά έξοδα). Ως έσοδα θεωρούνται οι ταμειακές εισροές από την ενοικίαση του σπιτιού, λαμβάνοντας υπόψη την ωφέλιμη επιφάνεια δαπέδου και την τιμή ενοικίασης για κάθε χώρα. Ως ετήσιο κόστος θεωρείται το λειτουργικό κόστος για την κατανάλωση ενέργειας του σπιτιού. Στην τρέχουσα ανάλυση, για σκοπούς σύγκρισης, τα λειτουργικά έξοδα καταβάλλονται από τον ιδιοκτήτη του σπιτιού για όλες τις περιπτώσεις, ακόμη και στην περίπτωση της Αθήνας, όπου οι λειτουργικές δαπάνες στην πραγματικότητα καταβάλλονται από τους ενοικιαστές. Η αξιολόγηση κάθε περίπτωσης βασίζεται στη μείωση του λειτουργικού κόστους (εξοικονόμηση ενέργειας λόγω αναβάθμισης του κελύφους) και στη ζημία από τη μείωση των εσόδων ενοικίασης (λόγω μείωσης της ωφέλιμης επιφάνειας) σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση.

Οι πέντε εξεταζόμενες περιπτώσεις αναβάθμισης συγκρίνονται με την αρχική κατάσταση λαμβάνοντας υπόψη το κόστος αναβάθμισης. Ο Πίνακας 21 συνοψίζει τα κόστη που ελήφθησαν υπόψη. Οι τιμές για το φυσικό αέριο (λειτουργικό κόστος για θέρμανση) και η ηλεκτρική ενέργεια (λειτουργικό κόστος για την ψύξη) για κάθε χώρα λαμβάνονται από την Eurostat [183], ενώ οι τιμές ενοικίασης αφορούν τις μέσες τιμές κάθε πόλης, που προέρχεται από το Global Property Guide [184]. Τα στοιχεία για τα κόστη των υλικών και το εργατικό κόστος κάθε χώρας καθορίστηκαν από πληροφορίες προερχόμενες από κατασκευαστές και το Trading Economics [185] για το έτος 2018.

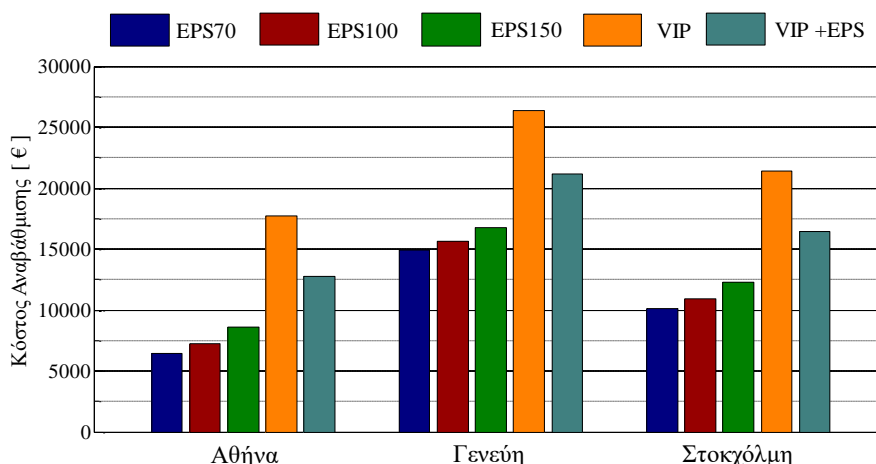
Πίνακας 21 – Τιμές για θέρμανση και ψύξη, τιμές ενοικίων και κόστη υλικών.

	Αθήνα	Γενεύη	Στοκχόλμη
Τιμή φυσικού αερίου [€/kWh] ^a	0.065	0.101	0.113
Τιμή ηλεκτρισμού [€/kWh] ^a	0.194	0.189	0.194
Τιμή ενοικίου [€/m ² ωφέλιμη επιφάνεια] ^a	5.17	26.65	19.02
Κόστος EPS για πάχος 50 mm [€/m ²] ^a	7.31	6.37	7.38
Κόστος VIP για πάχος 20 mm [€/m ²] ^a	71.30	71.30	71.30
Κόστος υπόλοιπων υλικών [€/m ²] ^a	9.87	8.59	9.95
Εργατικό κόστος [€/m ²] ^a	14.94	63.38	34.79

^a περιλαμβάνει όλους τους φόρους (ΦΠΑ: 24% για Αθήνα, 8% για Γενεύη και 25% για Στοκχόλμη)

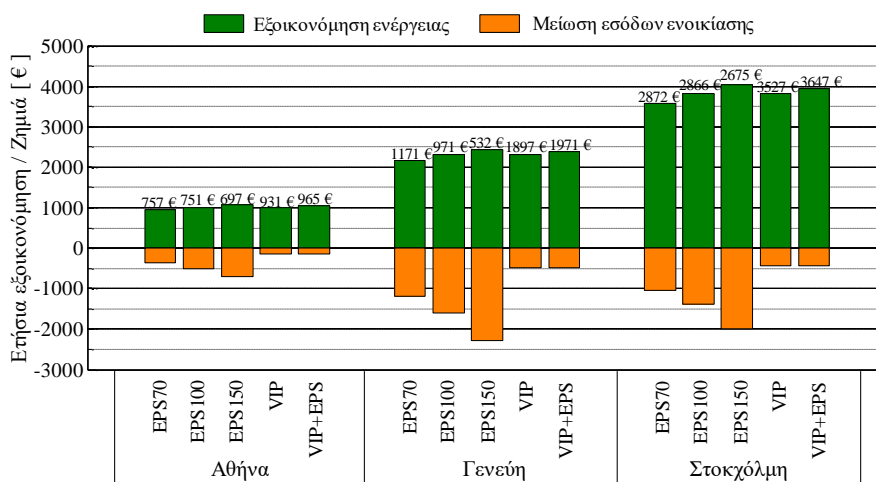
Το κόστος αναβάθμισης για τις πέντε εξεταζόμενες περιπτώσεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 64 για τις τρεις πόλεις. Παρατηρείται ότι η περίπτωση VIP είναι πάντοτε ακριβότερη από τις άλλες περιπτώσεις (πάνω από 9000 € σε σχέση με την περίπτωση EPS150), ενώ η περίπτωση VIP+EPS

μειώνει το κόστος κατά περίπου 5000 €. Η διαφορά στους φόρους και στα εργατικά κόστη για τις τρεις πόλεις έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικά έξοδα αναβάθμισης. Ιδιαίτερα, το κόστος αναβάθμισης στην Αθήνα είναι μεγαλύτερο από 6500 €, στη Γενεύη από 15000 € και στη Στοκχόλμη από 10000 €.



Εικόνα 64 – Κόστος αναβάθμισης για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Σε κάθε περίπτωση αναβάθμισης, τα λειτουργικά κόστη μειώνονται με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Ταυτόχρονα, τα έσοδα από ενοίκια μειώνονται λόγω της μείωσης της ωφέλιμης επιφάνειας που προκαλείται από την τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων στην εσωτερική πλευρά των τοίχων. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας συγκρίνεται με την ετήσια μείωση των εσόδων ενοικίασης στην Εικόνα 65. Όπως φαίνεται, η αναβάθμιση εξοικονομεί σημαντικό ποσό κυρίως σε ψυχρά κλίματα, μειώνοντας τα ετήσια λειτουργικά κόστη κατά 950 € - 1050 € στην Αθήνα, κατά 2200 € - 2400 € στη Γενεύη και κατά 3600 € - 4000 € στη Στοκχόλμη.



Εικόνα 65 – Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και ζημιά από τη μείωση εσόδων ενοικίασης για τις πέντε περιπτώσεις αναβάθμισης.

Παρατηρείται ότι η εξοικονόμηση ενέργειας είναι υψηλότερη από τη μείωση των εσόδων από ενοίκια που παρέχει ετήσια κέρδη για όλες τις περιπτώσεις. Οι αριθμοί πάνω από τις ράβδους στην Εικόνα 65 απεικονίζουν το ετήσιο κέρδος για κάθε περίπτωση. Τα ετήσια κέρδη στην Αθήνα κυμαίνονται μεταξύ 700 € - 960 €, ενώ στη Γενεύη και στη Στοκχόλμη κυμαίνονται μεταξύ 500 € - 2000 € και 2600 € - 3600 €, αντίστοιχα. Οι περιπτώσεις με VIPs (VIP και VIP + EPS) προσφέρουν τα υψηλότερα κέρδη και στις τρεις πόλεις εξαιτίας του συνδυασμού του υψηλού επιπέδου μόνωσης με

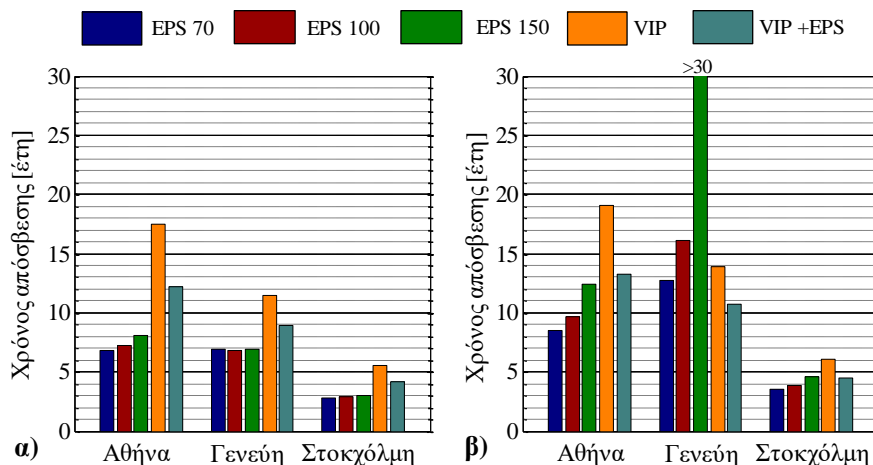
χαμηλό πάχος. Ιδιαίτερα στη Στοκχόλμη, το ετήσιο κέρδος των περιπτώσεων με VIPs είναι κατά 650 € - 970 € υψηλότερο από τις περιπτώσεις συμβατικής μόνωσης.

Οι περιπτώσεις αναβάθμισης αξιολογούνται επίσης με τη μέθοδο του χρόνου απόσβεσης. Ο χρόνος απόσβεσης (*PP*) είναι ο συνηθέστερος χρησιμοποιούμενος δείκτης που αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για μια επένδυση με σκοπό την ανάκτηση του αρχικού κόστους. Ο *PP* υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$PP = \frac{C_0}{ES + RRR} \quad 40$$

όπου C_0 [€] το κόστος αναβάθμισης, ES [€] η εξοικονόμηση ενέργειας και RRR [€] η μείωση εσόδων ενοικίασης (αρνητική τιμή). Σκοπός της τεχνο-οικονομικής ανάλυσης είναι η συγκριτική αξιολόγηση των πέντε εξεταζόμενων περιπτώσεων αναβάθμισης. Γι' αυτό το λόγο, επιτρέπεται η χρήση της απλής μεθόδου του χρόνου απόσβεσης αντί κάποιου άλλου χρηματοοικονομικού δείκτη που θα λαμβάνει υπόψη την αξία του χρήματος στο πέρασμα του χρόνου.

Τα αποτελέσματα σχετικά με τον *PP* παρουσιάζονται στην Εικόνα 66, υποθέτοντας δύο σενάρια: α) εξαιρώντας και β) συμπεριλαμβάνοντας την ενοικίαση του κτιρίου. Στο πρώτο σενάριο, οι περιπτώσεις με συμβατική μόνωση αποσβένουν το αρχικό κόστος νωρίτερα από τις περιπτώσεις με VIPs (VIP και VIP+EPS). Σε κάθε πόλη, η περίπτωση VIP έχει μακράν τη μεγαλύτερη περίοδο αποπληρωμής, ενώ η αντικατάσταση της μόνωσης της οροφής με συμβατική (περίπτωση VIP + EPS) έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του *PP*. Στο δεύτερο σενάριο (Εικόνα 66β), λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση των εσόδων ενοικίασης, οι *PPs* αυξήθηκαν σημαντικά. Η επιλογή της πιο βιώσιμης περίπτωσης αναβάθμισης εξαρτάται σημαντικά από τις κλιματικές συνθήκες και τον οικονομικό παράγοντα κάθε πόλης.



Εικόνα 66 – Χρόνος απόσβεσης: α) χωρίς την ενοικίαση του κτιρίου και β) με την ενοικίαση του κτιρίου.

Στην Αθήνα, η περίπτωση EPS70 έχει το χαμηλότερο *PP*, αποπληρώνοντας το αρχικό κόστος σε 7 χρόνια για το σενάριο χωρίς την ενοικίαση και σε 8.5 χρόνια για το σενάριο συμπεριλαμβανομένου της ενοικίασης της κατοικίας. Στο πρώτο σενάριο, οι περιπτώσεις VIP και VIP+EPS απαιτούν 17 και 12 αποπληρωμής, αντίστοιχα. Στο δεύτερο σενάριο, ο *PP* του VIP είναι 19 χρόνια λόγω του υψηλού κόστους αναβάθμισης, ενώ ο *PP* της περίπτωσης VIP+EPS είναι 13 χρόνια.

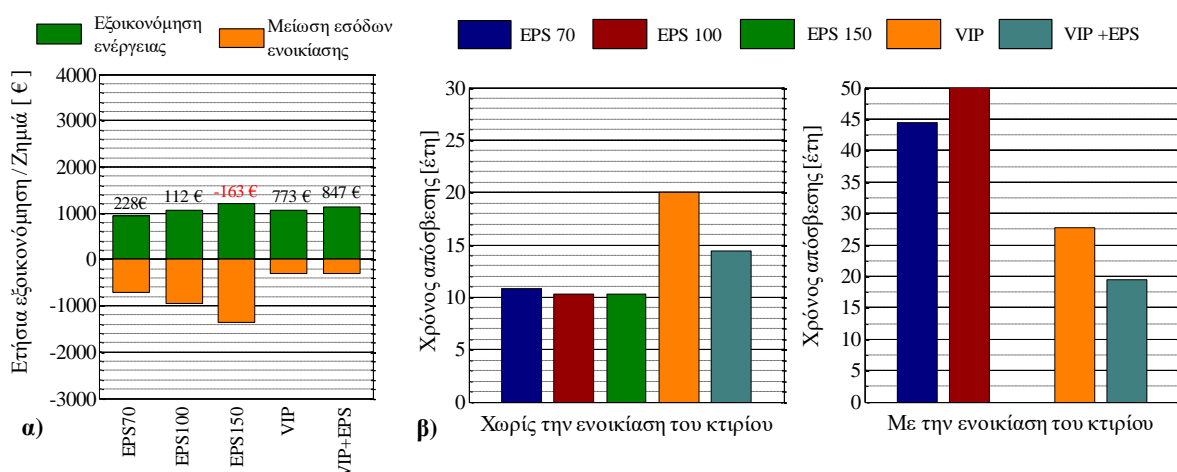
Στη Γενεύη, οι τρεις συμβατικές περιπτώσεις μόνωσης παρέχουν περίπου τον ίδιο *PP* (7 έτη) στο πρώτο σενάριο. Από την άλλη πλευρά, για το σενάριο που περιλαμβάνει την ενοικίαση, η χρήση των

VIP στους τοίχους είναι η πιο βιώσιμη και αποδοτική λύση, καθώς ο *PP* στην υπόθεση VIP + EPS είναι 11 έτη και στην περίπτωση VIP 14 χρόνια. Οι συμβατικές μονώσεις απαιτούν περισσότερα από 12 χρόνια για την αποπληρωμή του αρχικού κόστους. Το τελευταίο δείχνει τη σημασία του πάχους μόνωσης στις πόλεις με υψηλές τιμές ενοικίων.

Στη Στοκχόλμη, και στα δύο σενάρια, ο *PP* για όλες τις περιπτώσεις είναι χαμηλός λόγω της υψηλής εξοικονόμησης ενέργειας που προκαλείται από τις εξαιρετικά ψυχρές συνθήκες και την απουσία μόνωσης στην αρχική κατάσταση. Στο σενάριο χωρίς την ενοικίαση, οι τιμές των *PP* όλων των περιπτώσεων είναι κοντινές, καθώς η συμβατική μόνωση απαιτεί 3 έτη, η περίπτωση VIP + EPS 4 έτη και η περίπτωση VIP 5 έτη για την αποπληρωμή του αρχικού κόστους. Στο δεύτερο σενάριο, όλες οι περιπτώσεις έχουν και πάλι κοντινές τιμές *PP* (4 - 6 χρόνια), ωστόσο το εξαιρετικά υψηλό ετήσιο κέρδος της περίπτωσης VIP+EPS (Εικόνα 65) την καθιστά την βέλτιστη και οικονομικά αποδοτικότερη λύση.

Σημειώνεται ότι η περίπτωση αναφοράς (αρχική κατάσταση) για την οικονομική ανάλυση των τριών πόλεων είναι ένα μη-μονωμένο κτίριο (αρχική τιμή U-value περίπου 2.5 W/(m²K)). Περαιτέρω έρευνα έδειξε ότι ένα πιο μονωμένο κτίριο αναφοράς (αρχική κατάσταση) σε ψυχρά κλίματα, το οποίο είναι κοντά στην πραγματικότητα, οδηγεί σε χαμηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας και υψηλότερους χρόνους απόσβεσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα σχετικά με τη σύγκριση για την πιο οικονομικά αποδοτική λύση δεν άλλαξαν.

Η Εικόνα 67 απεικονίζει τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης σχετικά με τις πέντε εξεταζόμενες περιπτώσεις αναβάθμισης στη Στοκχόλμη, υποθέτοντας ένα κτίριο μερικώς μονωμένο (U-value = 0.7 W/(m²K)) στην αρχική κατάσταση. Για το σενάριο που περιλαμβάνει την ενοικίαση του κτιρίου, οι περιπτώσεις συμβατικής μόνωσης δεν είναι κερδοφόρες, καθώς οι περιπτώσεις EPS70 και EPS100 απαιτούν πάνω από 40 έτη για την αποπληρωμή του αρχικού κόστους και στην περίπτωση EPS150 η μείωση των εσόδων από την ενοικίαση είναι υψηλότερη από την εξοικονόμηση ενέργειας. Η μόνη αποδοτική λύση, από πλευράς κόστους, είναι η χρήση VIPs στις τοιχοποιίες, ωστόσο οι *PPs* είναι μεγαλύτεροι από 19 χρόνια. Από την άλλη πλευρά, για το σενάριο χωρίς την ενοικίαση του κτιρίου, οι λύσεις με EPS αποπληρώνουν τα αρχικά κόστη μέσα σε 10 χρόνια, ενώ οι περιπτώσεις VIP και VIP+EPS χρειάζονται 20 και 14 χρόνια αντίστοιχα για την ανάκτηση του κόστους εγκατάστασης.



Εικόνα 67 – Οικονομική ανάλυση για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις αναβάθμισης στη Στοκχόλμη υποθέτοντας μερικώς μονωμένο κτίριο στην αρχική κατάσταση: α) Εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση εσόδων ενοικίασης και β) Χρόνοι απόσβεσης για τα δύο σενάρια (με και χωρίς ενοικίαση)

8.4 Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο αφορούσε την ενεργειακή και οικονομική αποδοτικότητα των VIPs σε εφαρμογές κτιρίων. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές εφαρμογές: (α) η ενσωμάτωση των VIPs σε μια ελαφριά κατασκευή από χάλυβα (LSF) και (β) η αναβάθμιση ενός παλαιού κτιρίου κατοικίας. Στην LSF εφαρμογή, εξετάστηκε η τοποθέτηση μιας στρώσης VIP ως μέτρο για τη μείωση των θερμογεφυρών και την αναβάθμιση της συνολικής απόδοσης του κελύφους. Στη δεύτερη εφαρμογή πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική αξιολόγηση πέντε εξεταζόμενων περιπτώσεων αναβάθμισης, εστιάζοντας στην οικονομική τους βιωσιμότητα. Και στις δύο εφαρμογές η επίδραση των VIPs αξιολογήθηκε σε κτίρια πραγματικής κλίμακας που βρίσκονται σε πόλεις με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και οικονομικούς παράγοντες.

Στην LSF εφαρμογή, το κέλυφος διερευνήθηκε για τις περιπτώσεις τόσο με όσο και χωρίς το VIP μέσω των δύο αριθμητικών μεθόδων που περιεγράφηκαν και επικυρώθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 7): (α) ανάλυση του κελύφους σύμφωνα με το ISO 10211 και (β) προσομοίωση ολόκληρου του κελύφους για τον υπολογισμό των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη. Σύμφωνα με την πρώτη προσέγγιση, το VIP μείωσε τον συνολικό συντελεστή άμεσης μεταφοράς θερμότητας, H_D , κατά 20%, ενώ η προσομοίωση του κτιρίου έδειξε ότι οι απαιτήσεις ενέργειας μειώθηκαν κατά 14% - 16%, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες. Η μείωση των ενεργειακών αναγκών ήταν αξιοσημείωτη σε ψυχρές συνθήκες (Στοκχόλμη) εξοικονομώντας 630 kWhr ετησίως. Ωστόσο, η πρόσθετη στρώση VIP ήταν οικονομικά ασύμφορη, ακόμη και στην περίπτωση της Στοκχόλμης, απαιτώντας περισσότερο από 50 χρόνια για την αποπληρωμή του κόστους των VIPs. Αυτό οφείλεται στο υψηλό κόστος του VIP αλλά και του καλά μονωμένου κελύφους για την περίπτωση χωρίς VIPs.

Η ανάλυση του LSF κτιρίου έδειξε τη σημαντική επίδραση των θερμογεφυρών σε τέτοιες κατασκευές που συμβάλλουν στο H_D κατά περίπου 40% και στις ενεργειακές ανάγκες κατά περίπου 25%. Οι πιο σημαντικές θερμογέφυρες βρέθηκαν να είναι η επαναλαμβανόμενες στην οροφή και στο δάπεδο, και οι γραμμικές μη-επαναλαμβανόμενες στις ενώσεις των εξωτερικών τοιχοποιιών με το ταβάνι και τον εσωτερικό τοίχο. Για τη περαιτέρω μείωση αυτών των θερμογεφυρών προτάθηκαν τροποποιήσεις στις τρέχουσες κατασκευαστικές πρακτικές, όπου η εφαρμογή όλων οδηγεί σε μείωση των ενεργειακών αναγκών κατά 15%.

Στην εφαρμογή του παλαιού κτιρίου, εξετάστηκαν πέντε περιπτώσεις αναβάθμισης του αδιαφανούς κελύφους χρησιμοποιώντας συμβατική μόνωση σε διαφορετικά πάχη ή VIP. Η ανακαίνιση αφορούσε την εφαρμογή μόνωσης στην εσωτερική πλευρά των τοιχοποιιών (καθώς το κτίριο θεωρείται ιστορικό) και στην κορυφή της οροφής. Τρεις περιπτώσεις αφορούσαν την τοποθέτηση στρώσης EPS με πάχη 70 mm, 100 mm και 150 mm αντίστοιχα και μία περίπτωση αφορούσε την τοποθέτηση VIP 20 mm σε τοίχους και οροφή. Η πέμπτη περίπτωση αφορούσε το συνδυασμό VIP πάχους 20 mm στους τοίχους και του EPS πάχους 150 mm στην οροφή. Όλες οι περιπτώσεις διερευνήθηκαν από τεχνοοικονομική άποψη για τρεις ευρωπαϊκές πόλεις: Αθήνα, Γενεύη και Στοκχόλμη.

Η ενεργειακή ανάλυση έδειξε ότι η αναβάθμιση μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη κατά 66% - 75%, ανάλογα με την περίπτωση ανακαίνισης και τις κλιματικές συνθήκες. Αυτή η υψηλή μείωση οφείλεται στην εξαιρετικά χαμηλή απόδοση του κελύφους στην αρχική κατάσταση, καθώς το αρχικό κέλυφος ήταν μια μη-μονωμένη παραδοσιακή τοιχοποιία (R-value 0.3 m²K/W).

Η οικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για δύο σενάρια: με και χωρίς την ενοικίαση του κτιρίου. Η συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των περιπτώσεων ανακαίνισης έδειξε ότι η χρήση VIP, με τις τρέχουσες τιμές κόστους, μπορεί να είναι κερδοφόρα σε περιοχές με ψυχρό κλίμα και υψηλές τιμές

ενοικίασης. Στην Αθήνα, η χρήση συμβατικής μόνωσης χαμηλού πάχους ήταν η πιο κερδοφόρα, παρέχοντας χαμηλότερη περίοδο αποπληρωμής, τόσο στο σενάριο με όσο και χωρίς την ενοικίαση του κτιρίου. Αυτό οφείλεται στις χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και στις σχετικά χαμηλές τιμές των ενοικίων. Στη Γενεύη, για το σενάριο που εξαιρούσε τη μείωση των εσόδων ενοικίασης, η χρήση της συμβατικής μόνωσης ήταν η πιο κερδοφόρα περίπτωση, ενώ για το σενάριο, συμπεριλαμβανομένης της ενοικίασης, η χρήση των VIPs ήταν η πιο αποδοτική λύση λόγω των υψηλών τιμών ενοικίασης. Στη Στοκχόλμη, όλες οι περιπτώσεις αναβάθμισης παρείχαν τη χαμηλότερη περίοδο αποπληρωμής, σε σύγκριση με τις άλλες δύο πόλεις. Η χρήση VIP στις τοιχοποιίες ήταν πιο οικονομικά αποδοτική λύση, διότι προσφέρει το μεγαλύτερο ετήσιο κέρδος. Τέλος, διερευνήθηκαν οι πέντε περιπτώσεις αναβάθμισης για μερικώς μονωμένο κτίριο στην αρχική κατάσταση, παρέχοντας παρόμοια συμπεράσματα σχετικά με την εύρεση της πιο οικονομικά αποδοτικής λύσης.

Κεφάλαιο 9^ο – Συμπεράσματα

9.1 Εισαγωγή

Καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση ανήκει στον κτιριακό τομέα, εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί επιβάλλουν μέτρα για τη μείωση των ενεργειακών αναγκών. Μεταξύ άλλων, η μείωση των αναγκών για θέρμανση και ψύξη, που αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μερίδιο στην κατανάλωση, είναι μια αποτελεσματική και εφικτή λύση. Η ενεργειακή απόδοση του κτιριακού κελύφους, γνωστή ως θερμική απόδοση κελύφους, αποτελεί βασικό παράγοντα για τη συνολική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Στο πλαίσιο αυτό, η πλειονότητα της επιστημονικής κοινότητας συμβάλλει για τη βελτίωση του κελύφους σε δύο βασικούς άξονες: (α) την ανάπτυξη νέων υλικών ή τεχνικών και (β) την ανάπτυξη μεθόδων για την αξιολόγηση καινοτόμων λύσεων και την ποσοτική αξιολόγηση νέων και υφιστάμενων κελυφών.

Στον πρώτο άξονα, ένα από τα πιο ελπιδοφόρα καινοτόμα υλικά είναι το μονωτικό πάνελ κενού (Vacuum Insulation Panel - VIP) που ανήκει στην κατηγορία των Υπερ-Μονωτικών Υλικών. Η θερμική αγωγιμότητα του VIP μπορεί να είναι 5 έως 10 φορές μικρότερη από αυτή της συμβατικής μόνωσης. Ταυτόχρονα, καθώς οι τρέχουσες προκλήσεις για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βιωσιμότητα στον τομέα των κτιρίων απαιτούν προηγμένα κτιριακά κελύφη, ο συνδυασμός των VIPs με ελαφριά κτίρια χαλύβδινου σκελετού (Lightweight Steel-Framed - LSF) αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση.

Στο δεύτερο άξονα, ο γρήγορος και ακριβής υπολογισμός της θερμικής απόδοσης του κελύφους είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση συνήθων ή καινοτόμων λύσεων και τη βελτίωση των υφιστάμενων κελυφών. Σε αυτή την κατεύθυνση, αρκετοί ερευνητές τονίζουν την ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης των κελυφών. Παρά το γεγονός ότι οι θεωρητικοί υπολογισμοί είναι απαραίτητοι για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός κτιρίου, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά στην πράξη εξαιτίας μη ακριβής γνώσης των ιδιοτήτων των υλικών, κατασκευαστικών αστοχιών και φαινομένων πολυδιάστατης ροής θερμότητας και υγρασίας. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη τόσο των πειραματικών όσο και των αριθμητικών μεθόδων για την αξιολόγηση του κελύφους είναι θεμελιώδης για τον ερευνητικό τομέα της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την ενεργειακή απόδοση των κτιριακών κελυφών τόσο στον τομέα των μεθόδων υπολογισμού της θερμικής απόδοσής τους όσο και στον τομέα των καινοτόμων υλικών (VIP). Έτσι, η διατριβή διερευνά τις πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του κελύφους και ταυτόχρονα οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε κτιριακές εφαρμογές αποσκοπώντας την αξιολόγηση του VIP ως μονωτικού υλικού.

Οι μέθοδοι για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των κελυφών εισήχθησαν και ταξινομήθηκαν σε τρεις κλίμακες: κλίμακα πάνελ, κλίμακα στοιχείων του κελύφους και κλίμακα ολόκληρου του κελύφους (Κεφάλαιο 2), καταλήγοντας ότι οι πιο αντιπροσωπευτικοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι δείκτες είναι η θερμική αντίσταση (R-value) και η θερμική διαπερατότητα (U-value). Παρόλο που τόσο ο πειραματικός όσο και ο θεωρητικός υπολογισμός αυτών των δεικτών παρέχουν διαφορετικά οφέλη, η επιτόπια μέτρηση ενός κελύφους υπό πραγματικές καιρικές συνθήκες προσφέρει θεμελιώδεις πληροφορίες, ιδίως στις περιπτώσεις καινοτόμων λύσεων. Για το λόγο αυτό,

δόθηκε έμφαση στην επιτόπια αξιολόγηση των στοιχείων κελύφους συγκρίνοντας τις τρέχουσες διαθέσιμες μεθόδους (Κεφάλαιο 4) και εισάγοντας νέες μεθόδους για τις LSF τοιχοποιίες (Κεφάλαιο 5).

Η ενεργειακή απόδοση των LSF κτιρίων διερευνήθηκε τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά, εστιάζοντας στην κύρια πρόκληση που αφορά τον υπολογισμό της συνεισφοράς των θερμογεφυρών εξαιτίας του μεταλλικού σκελετού (Κεφάλαιο 7). Δεδομένου ότι οι ελαφρές κατασκευές αποτελούν μια εξελισσόμενη προοπτική στον κτιριακό τομέα, η διερεύνηση της ενεργειακής τους απόδοσης και η ανάπτυξη μεθόδων για την αξιολόγηση των κελυφών είναι απαραίτητες για την περαιτέρω εξέλιξή τους.

Η παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε στη χρήση Υπέρ-Μονωτικών υλικών σε κτιριακές εφαρμογές, και ιδιαίτερα στο VIP. Οι βασικές ιδιότητες και η ορολογία των VIPs εισάγονται (Κεφάλαιο 3) παρουσιάζοντας τα οφέλη και τις αδυναμίες για τις κτιριακές εφαρμογές. Από την τελευταία δεκαετία, η χρήση VIP ως μονωτικού υλικού κτιρίων έχει δείξει αισιόδοξα αποτελέσματα, ενθαρρύνοντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών VIP. Σε κάθε περίπτωση, οι κτιριακές εφαρμογές είναι περιορισμένες και υπάρχει ανάγκη για αξιόπιστο επιτόπιο χαρακτηρισμό της θερμικής τους συμπεριφοράς σε πραγματικά κτίρια κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Για την ικανοποίηση αυτής της ανάγκης, δύο κτιριακές εφαρμογές με VIP σε διαφορετικές τοποθεσίες διερευνήθηκαν πειραματικά (Κεφάλαιο 6). Παράλληλα, διερευνήθηκε η ενεργειακή και οικονομική απόδοση της χρήσης των VIP σε δύο θεωρητικά κτιριακά κελύφη πραγματικών διαστάσεων (ένα LSF και ένα παλιό κτίριο) παρέχοντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη χρήση των VIPs σε κτίρια (Κεφάλαιο 8).

9.2 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα της διατριβής χωρίζονται σε δύο τομείς: τις μεθόδους για την ενεργειακή απόδοση του κελύφους και τη χρήση του VIP ως μονωτικό υλικό στα κτίρια. Οι επόμενες ενότητες συνοψίζουν τα πιο σημαντικά συμπεράσματα

9.2.1 Μέθοδοι για την ενεργειακή αξιολόγηση του κελύφους

Σύγκριση επιτόπιων προτυποποιημένων μεθόδων

Μετά από μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις μεθόδους για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής αντίστασης (R-value) μιας υφιστάμενης τοιχοποιίας, διαπιστώθηκε ότι οι πιο κοινές μέθοδοι είναι οι τέσσερις προτυποποιημένες μέθοδοι που περιγράφονται στα πρότυπα ISO 9869 και ASTM C1155. Οι μέθοδοι, Average, Summation, Dynamic και Sum of Least Square (δύο προσεγγίσεις SLS_HF and SLS_TIN), απαιτούν τη μέτρηση της εσωτερικής και εξωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και της εσωτερικής ροής θερμότητας. Ωστόσο, στην πράξη, αντιμετωπίζονται δύο κύρια ζητήματα για την εφαρμογή των μεθόδων: η απαιτούμενη μετρητική περίοδος και η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Οι συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αποτελούν κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει αυτά τα δύο ζητήματα. Στη διατριβή πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική αξιολόγηση των προτυποποιημένων μεθόδων με βάση την απαιτούμενη μετρητική περίοδο, τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων και την επίδραση των μετρητικών συνθηκών στις δύο αυτές παραμέτρους. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε μέσω επιτόπιων μετρήσεων σε τρεις υπάρχουσες τοιχοποιίες υπό διαφορετικές συνθήκες μέτρησης για τον υπολογισμό του R-value. Τα ευρήματα αυτής της σύγκρισης παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές για την επιτόπια μέτρηση του R-value, την επεξεργασία των μετρήσεων και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι απλές και συνηθέστερες μέθοδοι, Average και Summation, απαιτούν μια θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των εσωτερικού και εξωτερικού χώρου μεγαλύτερη από 10°C για αξιόπιστα αποτελέσματα σε σύντομη περίοδο μέτρησης. Η απαιτούμενη μετρητική περίοδος των τριών πιο πολύπλοκων μεθόδων (Dynamic, SLS_HF και SLS_TIN) δεν επηρεάζεται από τις μετρητικές συνθήκες. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι οι μέθοδοι Dynamic και SLS_TIN απαιτούν σταθερή κατεύθυνση ροής θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας για υψηλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων, ενώ το SLS_HF παρέχει αξιόπιστα και γρήγορα αποτελέσματα ανεξάρτητα από τις συνθήκες μέτρησης.

Τέλος, εισήχθη ένα πρόσθετο κριτήριο για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης μετρητικής περιόδου των μεθόδων Dynamic, SLS_HF και SLS_TIN, καθώς αυτό δεν είναι σαφές καθορισμένο από τα πρότυπα. Το κριτήριο επέβαλε μια ελάχιστη απόκλιση 3% για τις τιμές που λήφθηκαν τις τελευταίες τρεις ημέρες και αποδείχθηκε ότι παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ανάπτυξη επιτόπιων μεθόδων για μέτρηση U-value σε LSF τοιχοποιίες

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη μέτρηση της θερμικής διαπερατότητας των LSF τοιχοποιιών, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης των θερμογεφυρών εξαιτίας του μεταλλικού σκελετούς ($U_{overall}$). Όμως δεν υπάρχει κάποια μέθοδος για την επιτόπια μέτρηση του $U_{overall}$ για πραγματικά κτίρια. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διατριβή εισήγαγε δύο νέες μεθόδους για την επιτόπια μέτρηση του $U_{overall}$. Οι προτεινόμενες μέθοδοι, η Μέθοδος Αντιπροσωπευτικών Σημείων (*Representative Points Method - RPM*) και η Μέθοδος Σταθμισμένης Περιοχής (*Weighted Area Method - WAM*), περιεγράφηκαν εκτενώς και αναλύθηκαν, παρέχοντας όλες τις λεπτομέρειες για τις απαιτήσεις και την ακρίβειά τους. Οι μέθοδοι μπορούν συνδυάζουν την υπέρυθη θερμογραφία με την καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα και εσωτερικής ροής θερμότητας. Η υπέρυθη θερμογραφία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ, που απεικονίζει τη διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια εξαιτίας της παρουσίας των μεταλλικών ορθοστατών.

Οι δύο μέθοδοι επικυρώθηκαν σε μια γνωστή LSF τοιχοποιία ψυχρού τύπου και τα αποτελέσματα $U_{overall}$ που μετρήθηκαν συγκρίθηκαν με τις θεωρητικές τιμές υπολογιζόμενες σύμφωνα με το ISO 10211. Τα αποτελέσματα των δύο προτεινόμενων μεθόδων ήταν σε πολύ καλή συμφωνία με τις θεωρητικές τιμές παρέχοντας υψηλή επαναληψιμότητα. Οι προτεινόμενες μέθοδοι είναι χρήσιμα εργαλεία για την εισαγωγή προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση του U-value σε ελαφρά κελύφη.

Υπολογιστικές μέθοδοι για θερμογέφυρες

Η διατριβή ασχολήθηκε με το ζήτημα των θερμογεφυρών και τον υπολογισμό της συνεισφοράς τους στην ενεργειακή απόδοση ολόκληρου του κελύφους. Δεδομένου ότι η διατριβή ειδικεύεται στα LSF κτίρια, όπου ο υπολογισμός των θερμογεφυρών είναι ζωτικής σημασίας, διερευνήθηκαν δύο LSF κτίρια (έναν πειραματικό οικίσκο και ένα θεωρητικό πραγματικής κλίμακας). Για το λόγο αυτό, όλες οι θερμογέφυρες των κτιρίων (επαναλαμβανόμενες εξαιτίας του μεταλλικού σκελετού, γραμμικές και σημειακές μη-επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες) προσομοιώθηκαν και υπολογίστηκαν σύμφωνα με την πιο ακριβή μέθοδο (πρότυπο ISO 10211). Η θερμική απόδοση των δύο κελυφών διερευνήθηκε αριθμητικά με δύο προσεγγίσεις: α) τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας H_D και β) τον υπολογισμό των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη μέσω της προσομοίωσης ολόκληρου του κελύφους (EnergyPlus). Στην τελευταία προσέγγιση η επίδραση των θερμογεφυρών εισήχθη τροποποιώντας τις θερμικές ιδιότητες των υλικών με ισοδύναμες τιμές. Και οι δύο προσεγγίσεις

εφαρμόστηκαν και επικυρώθηκαν για ένα ελαφρύ κτίριο χαλύβδινου σκελετού με VIPs στην τοιχοποιία, που κατασκευάστηκε και μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Η αριθμητική ανάλυση έδειξε ότι και οι δύο προσεγγίσεις υποδεικνύουν τη σημασία των θερμογεφυρών σε τέτοιες κατασκευές. Τα συμπεράσματα των δύο τεχνικών ήταν παρόμοια και οι διαφορές οφείλονταν στην απλότητα της προσέγγισης H_D . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη προσομοίωση του κελύφους ήταν σε συμφωνία με τις διαθέσιμες μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας και συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του πειραματικού οικίσκου αποδεικνύοντας ότι ο υπολογισμός και η εισαγωγή των θερμογεφυρών στο μοντέλο μέσω της τροποποίησης των θερμικών ιδιοτήτων ήταν ακριβής.

9.2.2 Διερεύνηση του VIP ως μονωτικού υλικού στα κτίρια

Επίδραση των ακμών του VIP

Η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα του περιβλήματος του VIP, που περιβάλλει τον πυρήνα, εισάγει μια θερμογέφυρα, την επίδραση των ακμών, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τη θερμική απόδοση του VIP. Γι αυτό το λόγο ορίζεται η πραγματική θερμική αγωγιμότητα, λ_{eff} , που λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ακμών.

Αποδείχθηκε ότι η επίδραση των ακμών είναι ένας μη αμελητέος παράγοντας, για τη θερμική απόδοση ολόκληρου του κελύφους. Από την πειραματική προσέγγιση, το λ_{eff} μετρήθηκε μέσω της ευρέως χρησιμοποιούμενης μεθόδου Guarded Hot Plate. Διαπιστώθηκε ότι η επίδραση των ακμών αύξησε τη θερμική αγωγιμότητα των VIPs περισσότερο από 20%, ανάλογα με τις ιδιότητες του περιβλήματος και τις διαστάσεις του πάνελ, καθώς για μικρά πάνελ αυτή η αύξηση μπορεί να υπερβαίνει ακόμη και το 50%. Από την υπολογιστική προσέγγιση, αποδείχθηκε ότι η επίδραση των ακμών συνέβαλε στον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και στις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες κατά 2%. Για να ελαχιστοποιηθεί αυτή η συνεισφορά, οι κατασκευαστές των VIPs πρέπει να παρέχουν ένα βέλτιστο μοτίβο χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερα πάνελ.

Εγκατάσταση VIP

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, μελετήθηκε η τοποθέτηση VIPs σε δύο LSF κτιριακά κελύφη μικρής κλίμακας: α) για την αναβάθμιση του εξωτερικού θερμομονωτικού συστήματος (External Thermal Insulation Composite System - ETICS) τοιχοποιίας ενός διώροφου κτιρίου στην Αθήνα και β) για την κατασκευή πειραματικού οικίσκου στην Ελβετία. Επίσης, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές εφαρμογές VIP, καθώς στο πρώτο κτίριο το VIP ενσωματώθηκε μεταξύ δύο στρώσεων πετροβάμβακα με αποτέλεσμα ένα σύνθετο στοιχείο μόνωσης (composite insulation component - CIC), ενώ στο δεύτερο κτίριο, διαφορετικά μεγέθη VIP χρησιμοποιήθηκαν δημιουργώντας μια ενδιάμεση στρώση της τοιχοποιίας.

Η μέθοδος εγκατάστασης ήταν επίσης διαφορετική για τις δύο εφαρμογές. Στην περίπτωση των CIC πάνελ, χρησιμοποιήθηκε η «υγρή μέθοδος» (συγκολλητικό κονίαμα) μαζί με τη χρήση κοχλιών. Για τη διεύθυνση των κοχλιών στα CIC, ενσωματώθηκαν δύο οπές γεμισμένες με EPS στα VIPs εισάγοντας επιπλέον θερμογέφυρες και αυξάνοντας περαιτέρω το λ_{eff} των VIPs κατά 26%. Καθώς όλα τα πάνελ είχαν κοινές διαστάσεις, δεν ήταν δυνατό να καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνεια της τοιχοποιίας, αφήνοντας μια μεγάλη ακάλυπτη (από CIC πάνελ) περιοχή, στην οποία τοποθετήθηκε συμβατική μόνωση. Στην περίπτωση των διαφορετικών μεγεθών VIP της εφαρμογής στην Ελβετία, τα VIPs εγκαταστάθηκαν με τη «ξηρή μέθοδο» (ταινία συγκόλλησης). Ακόμη και αν χρησιμοποιήθηκε ειδικό λογισμικό για τη βέλτιστη κάλυψη των επιφανειών της τοιχοποιίας από διαφορετικά μεγέθη VIP,

δημιουργήθηκε μια μικρή ακάλυπτη περιοχή σε κάποιες πλευρές. Επιπλέον, παρά τις προσπάθειες για σωστή εγκατάσταση, κάποια πάνελ καταστράφηκαν. Σε αντίθεση, τα CIC πάνελ της πρώτης εφαρμογής δεν υπέστησαν κάποια φθορά, αποδεικνύοντας ότι τα στρώματα από πετροβάμβακα είχαν σημαντικό προστατευτικό ρόλο για τα ενσωματωμένα VIP.

Συνολικά, κάποιες αδυναμίες και δυσκολίες που θα πρέπει να ξεπεραστούν ήρθαν στο προσκήνιο προσθέτοντας στην ολοένα αυξανόμενη εμπειρία για να γίνουν τα VIPs μια αποτελεσματική λύση για τη μόνωση των κτιρίων. Δεδομένου ότι το VIP είναι εύθραυστο υλικό με αδύνατη προσαρμογή κατά την εγκατάσταση, διαπιστώθηκε ότι ο κατάλληλος σχεδιασμός και τοποθέτηση των VIPs είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή τους. Η σωστή μεταχείριση των VIPs είναι απαραίτητη και θα πρέπει να γίνεται από έμπειρα και καλά εκπαιδευμένα άτομα. Τα κατεστραμμένα πάνελ ή οι ακάλυπτες περιοχές αποδείχθηκαν ότι εισάγουν μεγάλες θερμογέφυρες, μειώνοντας την θερμική απόδοση του κελύφους και αυξάνοντας τον κίνδυνο για προβλήματα υγρασίας.

Υγροθερμική απόδοση

Η υγροθερμική απόδοση των VIPs που ενσωματώθηκαν στα κτιριακά κελύφη διερευνήθηκε μέσω δεδομένων παρακολούθησης. Η παρουσία του VIP στην εξωτερική τοιχοποιία λειτούργησε εμπόδιο στη μεταφορά υγρασίας λόγω του περιβλήματος του VIP που προστατεύει τον εκκενωμένο πυρήνα από τη διαπερατότητα του αέρα και των υδρατμών.

Από την άλλη πλευρά, η διαφορετική μέθοδος εγκατάστασης οδήγησε σε διαφορετικά συμπεράσματα σχετικά με την υγροθερμική απόδοση της τοιχοποιίας. Στην περίπτωση των CIC πάνελ και της «υγρής μεθόδου», η αρχική υγρασία που οφείλεται στον τρόπο τοποθέτησης απομακρύνθηκε εν μέρει κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ωστόσο, οι χαμηλές θερμοκρασίες του ερχόμενου χειμώνα δημιούργησαν συμπυκνώματα στις εξωτερικές επιφάνειες των VIPs. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση της «ξηρής μεθόδου», δεν παρατηρήθηκαν συμπυκνώματα σε ολόκληρη τη διάρκεια των μετρήσεων. Ωστόσο, ένας κρίσιμος παράγοντας είναι η θέση των VIPs στη διαστρωμάτωση της τοιχοποιίας, αφού στην πρώτη εφαρμογή τα VIP ήταν στην εξωτερική πλευρά, ενώ στη δεύτερη εφαρμογή στην εσωτερική πλευρά του τοίχου. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση της μεταφοράς υγρασίας στα VIPs.

Αναβάθμιση ενεργειακής απόδοσης κελύφους

Η εφαρμογή των VIPs στα κτιριακά κελύφη οδήγησε στην αναβάθμιση της θερμικής τους απόδοσης εξαιτίας της εξαιρετικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς. Η επίδραση του VIP στην ενεργειακή απόδοση του κελύφους διερευνήθηκε για τις δύο προαναφερθείσες εφαρμογές κτιρίων. Στην περίπτωση ανακαίνισης, η θερμική αντίσταση της τοιχοποιίας με VIPs (CIC πάνελ) αυξήθηκε κατά 123% σε σύγκριση με την αρχική τοιχοποιία με συμβατική μόνωση. Στη δεύτερη περίπτωση, η παρουσία VIPs βελτίωσε τη θερμική απόδοση της τοιχοποιίας κατά 52%.

Η τρέχουσα διατριβή εξέτασε την εφαρμογή του VIP σε LSF κτίρια, όπου η συνεισφορά των θερμογεφυρών στη μείωση της θερμικής απόδοσης του κελύφους είναι μεγάλη. Αποδείχθηκε ότι το VIP μείωσε αποτελεσματικά όλες τις θερμογέφυρες. Ιδιαίτερα, η γραμμική θερμική διαπερατότητα (Ψ -value) των σημαντικών επαναλαμβανόμενων θερμογεφυρών στο κεντρικό τμήμα των τοιχοποιιών λόγω της παρουσίας μεταλλικών ορθοστατών μειώθηκε κατά 70%. Η παρουσία του VIP μείωσε επίσης τις γεωμετρικές (μη επαναλαμβανόμενες) γραμμικές και σημειακές θερμογέφυρες, μειώνοντας τη συνεισφορά τους στην απόδοση ολόκληρου του κελύφους. Η θετική επίδραση των VIPs στις θερμογέφυρες μείωσε επίσης την πιθανότητα κινδύνου συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας. Συνολικά, σε αυτή τη μελέτη, η χρήση των VIPs ως μόνωση σε ελαφριά κτίρια αποκαλύφθηκε ως μία

ελκυστική λύση για την αντιμετώπιση των θερμογεφυρών εξαιτίας του χαλύβδινου σκελετού των LSF κτιρίων.

Ενεργειακή και οικονομική απόδοση

Η επίδραση των VIPs στις ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση και ψύξη διερευνήθηκε τόσο για ελαφρές όσο και για βαριές κατασκευές. Διαπιστώθηκε ότι η παρουσία μιας στρώσης VIP πάχους 20 mm σε μια ελαφριά τοιχοποιία, εκ των προτέρων καλά μονωμένης, είναι υπεύθυνη για τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων κατά περίπου 15%. Από την άλλη πλευρά, το ίδιο πάχος στρώσης VIP σε ένα μερικώς μονωμένο τοίχωμα (U-value 0.70 W/(m²K)) οδήγησε σε εξοικονόμηση ενέργειας 41% και σε μια μη-μονωμένη τοιχοποιία (U-value 2.50 W/(m²K)) εξοικονόμησε 72%. Το ποσοστό της μείωσης των ενεργειακών αναγκών ήταν σχεδόν ανεξάρτητο από τις κλιματικές συνθήκες, ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας ήταν σημαντική και αξιοσημείωτη για τα ψυχρά κλίματα.

Η αξιολόγηση της εφαρμογής VIP από την άποψη της οικονομικής απόδοσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η τιμή των VIPs, οι κλιματικές συνθήκες, η λειτουργία του κτιρίου κλπ. Το υψηλό κόστος του VIP σε σύγκριση με τη συμβατική μόνωση καθιστά αμφίβολη τη χρήση τους. Όμως, η τεchnο-οικονομική ανάλυση έδειξε ότι η χρήση των VIPs, με τις τρέχουσες τιμές, μπορεί να είναι μια ιδανική λύση αν ληφθεί υπόψη η οικονομική αξία της εξοικονόμησης χώρου που επιτυγχάνεται λόγω των λεπτότερων τοίχων. Σε αυτή την περίπτωση, η χρήση των VIP είναι η βέλτιστη λύση για τις πόλεις της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης με υψηλές τιμές ενοικίασης.

9.3 Στοιχεία καινοτομίας

Τα στοιχεία καινοτομίας της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται παρακάτω:

- Σύγκριση όλων των προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής αντίστασης τοιχοποιίας, καθώς επίσης και η εισαγωγή ενός πρόσθετου κριτηρίου για την εύρεση της απαιτούμενης μετρητικής περιόδου για μεθόδους που αυτό δεν καθορίζεται από τα πρότυπα.
- Εισαγωγή, για πρώτη φορά, δύο μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση της θερμικής διαπερατότητας τοιχοποιίας ελαφριάς κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του μεταλλικού σκελετού.
- Κατασκευή και λήψη δεδομένων παρακολούθησης πραγματικών κτιρίων με VIPs.
- Κατασκευή και διερεύνηση της πρώτης κτιριακής εφαρμογής των VIPs στην Ελλάδα.
- Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση κατασκευαστικών αστοχιών VIP σε πραγματικά κτίρια.
- Συγκριτική αξιολόγηση εγκατάστασης VIPs («υγρής» και «ξηρής μεθόδου») σε σχέση με την επιτόπια υγροθερμική απόδοση υπό πραγματικές κλιματικές συνθήκες.
- Προτάσεις για τροποποιήσεις των υφιστάμενων κατασκευαστικών πρακτικών για μείωση θερμογεφυρών σε αρθρωτά ελαφρά κτίρια.

9.4 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Παρακάτω συνοψίζονται προτάσεις για μελλοντική εργασία που προέκυψαν από τη μελέτη της παρούσης διατριβής:

- Συγκριτική αξιολόγηση όλων των προτυποποιημένων μεθόδων για την επιτόπια μέτρηση R-value σε σχέση με το επίπεδο μόνωσης, τη θερμική μάζα των τοιχοποιιών, αλλά και την αξιολόγησή τους για μετρήσεις σε άλλα στοιχεία κελύφους (π.χ. παράθυρα)
- Περαιτέρω διερεύνηση των προτεινόμενων μεθόδων RPM και WAM με στόχο την πειραματική επικύρωσή τους σε υβριδικού τύπου LSF τοιχοποιίες, την εύρεση πιθανών αδυναμιών, περιορισμών κλπ.
- Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση φαινομένων γήρανσης των VIPs σε πραγματικές κτιριακές εφαρμογές.
- Ανάπτυξη εναλλακτικών υλικών πυρήνα και περιβλήματος του VIP με στόχο τη μείωση του κόστους και την βελτίωση της θερμικής του απόδοσης.
- Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση της υγραυθερμικής συμπεριφοράς των VIPs σε πραγματικές κλιματολογικές συνθήκες πραγματικών κτιρίων.
- Αξιολόγηση και εύρεση των βέλτιστων τροποποιήσεων του κελύφους με στόχο τη μείωση των θερμογεφυρών από τεχνο-οικονομική πλευρά.

Βιβλιογραφία Ελληνικής Περίληψης

- [1] International Energy Agency, Energy conservation in buildings and community systems, ECBCS News, International Energy Agency, (54) (2011).
- [2] Eurostat, Simplified energy balances - annual data, Last update: 08-06-2017.
- [3] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa, L. Simões da Silva, Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78 (2017) 194-209.
- [4] Z. Zhou, C. Wang, X. Sun, F. Gao, W. Feng, G. Zillante, Heating energy saving potential from building envelope design and operation optimization in residential buildings: A case study in northern China, Journal of Cleaner Production, 174 (2018) 413-423.
- [5] EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- [6] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.
- [7] Directive 2012/27/EU. European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC.
- [8] E.G. Dascalaki, C.A. Balaras, A.G. Gaglia, K.G. Droutsa, S. Kontoyiannidis, Energy performance of buildings—EPBD in Greece, Energy Policy, 45 (Supplement C) (2012) 469-477.
- [9] Hellenic regulation on the energy performance in the building sector, Hellenic ministry of environment, energy and Climatic change – YPEKA, ministerial decision D6/B/5825 (Official Journal of the Hellenic Republic FEK 407/B/9.4.2010), Athens., 2010.
- [10] EN ISO 13790-2008, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.
- [11] Boosting building renovation: What potential and value for Europe, Policy Department Economic and scientific policy, Study for the ITRE Committee, 2016.
- [12] European Commission - Buildings, available online: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>, 2018.
- [13] V. Corrado, I. Ballarini, S. Paduos, E. Primo, Refurbishment of the Residential Building Stock toward the Nearly-Zero Energy Target Through the Application of the Building Typology, Energy Procedia, 101 (Supplement C) (2016) 208-215.
- [14] D.A. Delia, Z. Paolo, C. Luca, Towards Nearly Zero Energy Buildings in Europe: A Focus on Retrofit in Non-Residential Buildings, Energies, 10 (117) (2017).
- [15] Despina K. Serghides, Chrissa G. Georgakis, The building envelope of Mediterranean houses: Optimization of mass and insulation, Journal of Building Physics, 36 (1) (2012) 83-98.

- [16] A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings*, 43 (4) (2011) 971-979.
- [17] D.K. Serghides, S. Dimitriou, M.C. Katafygiotou, M. Michaelidou, Energy Efficient Refurbishment towards Nearly Zero Energy Houses, for the Mediterranean Region, *Energy Procedia*, 83 (Supplement C) (2015) 533-543.
- [18] R. Landolfo, D. Holl, Lightweight steel drywall constructions for seismic areas. Design, research and applications, KNAUF, 2015.
- [19] Home Design Ideas, <http://home-design.com.cy>, 2017.
- [20] I. Alhejji, Steel Construction, Future City, 2017.
- [21] E. de Angelis, E. Serra, Light Steel-frame Walls: Thermal Insulation Performances and Thermal Bridges, *Energy Procedia*, 45 (2014) 362-371.
- [22] P. Santos, Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings, E.H. Yap (Ed.) *Energy Efficient Buildings*, InTech, Rijeka, 2017, pp. Ch. 03.
- [23] G. Sparksman, S. Groak, A. Gibb, R. Neale, Standardisation and pre-assembly: Adding value to construction projects, 1999.
- [24] Z. Li, G.Q. Shen, X. Xue, Critical review of the research on the management of prefabricated construction, *Habitat International*, 43 (Supplement C) (2014) 240-249.
- [25] R.-B. Richard, Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics, *Automation in Construction*, 14 (4) (2005) 442-451.
- [26] S. Najji, O.C. Çelik, U. Johnson Alengaram, M.Z. Jumaat, S. Shamshirband, Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings, *Energy and Buildings*, 84 (Supplement C) (2014) 727-739.
- [27] ELISSA: Energy Efficient Lightweight Sustainable Safe Steel Construction, FP7-2013-NMP-ENV-EeB, Grant no. 609086, <http://www.elissaproject.eu>.
- [28] Carl T. Hass, Walter R. Fagerlund Preliminary research on prefabrication, pre-assembly, modularization and off-site fabrication in construction, July 2002.
- [29] Ryan E. Smith, Prefab architecture: a guide to modular design and construction, New Jersey, 2011.
- [30] Mark R. Lawson, Ray G. Ogden, Rory Bergin, Application of modular construction in high-rise buildings, *Journal of Architectural Engineering*, 18 (2) (2012) 148-154.
- [31] C.M. Cartz JP, Symonds DC. , Building high-rise modular homes, *The Structural Engineer*, 85 (19) (2007).
- [32] N. Lu, The Current Use of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry, Construction Research Congress: Building a Sustainable Future, ASCE, Reston, Virginia, USA, April 2009.
- [33] N. Blismas, C. Pasquire, A. Gibb, Benefit evaluation for off-site production in construction, *Construction Management and Economics*, 24 (2) (2006) 121-130.

- [34] Peter J. Cameron, Nadia G. DiCarlo, Piecing together modular: understanding the benefits and limitations of modular construction methods for multifamily development, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [35] P. Pihelo, T. Kalamees, K. Kuusk, nZEB Renovation of Multi-Storey Building with Prefabricated Modular Panels, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 251 (1) (2017) 012056.
- [36] Gabriele Masera, Giuliana Iannaccone, Graziano Salvalai, Retrofitting the Existing Envelope of Residential Buildings: Innovative Technologies, Performance Assessment and Design Methods, Advanced Building Skins - 9th Energy Forum, Bressanone,
- [37] B.P. Jelle, Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities, Energy and Buildings, 43 (10) (2011) 2549-2563.
- [38] T. Thorsell, Advances in Thermal Insulation - Vacuum Insulation Panels and Thermal Efficiency to Reduce Energy Usage in Buildings, Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering 2012.
- [39] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali, Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62 (Supplement C) (2016) 988-1011.
- [40] L. Aditya, T.M.I. Mahlia, B. Rismanchi, H.M. Ng, M.H. Hasan, H.S.C. Metselaar, O. Muraza, H.B. Aditiya, A review on insulation materials for energy conservation in buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73 (Supplement C) (2017) 1352-1365.
- [41] J.-H. Kim, S.-M. Kim, J.-T. Kim, Simulation Performance of Building Wall with Vacuum Insulation Panel, Procedia Engineering, 180 (2017) 1247-1255.
- [42] R. Baetens, B.P. Jelle, J.V. Thue, M.J. Tenpierik, S. Grynning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond, Energy and Buildings, 42 (2) (2010) 147-172.
- [43] U. Berardi, Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: Insights from a case study, Energy and Buildings, 159 (Supplement C) (2018) 370-381.
- [44] S.S. Kistler, Coherent Expanded Aerogels and Jellies, Nature, 127 (1931) 741.
- [45] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review, Energy and Buildings, 43 (4) (2011) 761-769.
- [46] B.P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, R. Hart, Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities, Solar Energy Materials and Solar Cells, 96 (Supplement C) (2012) 1-28.
- [47] A. Soleimani Dorcheh, M.H. Abbasi, Silica aerogel; synthesis, properties and characterization, Journal of Materials Processing Technology, 199 (1) (2008) 10-26.
- [48] R.H. Nosrati, U. Berardi, Hygrothermal characteristics of aerogel-enhanced insulating materials under different humidity and temperature conditions, Energy and Buildings, 158 (Supplement C) (2018) 698-711.
- [49] N. Roya, B. Umberto, Long-term behavior of aerogel-based materials, 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, Trondheim, Norway, 2017.

- [50] How-To: Make Your Own Aerogel, <https://makezine.com>.
- [51] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, S. Grynning, Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 42 (11) (2010) 1969-1975.
- [52] Fi-Foil Company, <http://www.gfpinsulation.com/>, 2017.
- [53] S. Wang, C. Yan, F. Xiao, Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings, *Energy and Buildings*, 55 (2012) 873-888.
- [54] G. Feng, S. Sha, X. Xu, Analysis of the Building Envelope Influence to Building Energy Consumption in the Cold Regions, *Procedia Engineering*, 146 (Supplement C) (2016) 244-250.
- [55] ISO 9972-2015, Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method.
- [56] S. Mirrahimi, M.F. Mohamed, L.C. Haw, N.L.N. Ibrahim, W.F.M. Yusoff, A. Aflaki, The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53 (Supplement C) (2016) 1508-1519.
- [57] J. Iwano, A. Mwashia, The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2 (2) (2013) 153-171.
- [58] ISO 10211-2017, Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.
- [59] G. Evola, G. Margani, L. Marletta, Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 43 (9) (2011) 2385-2393.
- [60] E. Roque, P. Santos, The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position, *Buildings*, 7 (13) (2017) 1-18.
- [61] J. Kośny, E. Kossecka, Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs, *Energy and Buildings*, 34 (5) (2002) 445-454.
- [62] V. Corrado, F. Cappelletti, A. Gasparella, A. Gorrino, Detailed assessment of thermal bridges in highly insulated buildings, *Clima 2010 - 10th REHVA World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings"*, Antalya (Turchia), 2010.
- [63] H. Ge, F. Baba, Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building, *Energy and Buildings*, 105 (Supplement C) (2015) 106-118.
- [64] S. Fantucci, F. Isaia, V. Serra, M. Dutto, Insulating coat to prevent mold growth in thermal bridges, *Energy Procedia*, 134 (Supplement C) (2017) 414-422.
- [65] C. Peng, Z. Wu, In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, *Energy and Buildings*, 40 (11) (2008) 2076-2082.
- [66] G. Desogus, S. Mura, R. Ricciu, Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance, *Energy and Buildings*, 43 (10) (2011) 2613-2620.
- [67] ISO 6946:2017, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods.

- [68] Atanasiu B., Despret C., Economidou M., Maio J., Nolte I., Rapf O., Laustsen J., Ruyssevelt P., Staniaszek D., Strong D., Zinetti S., Verheyen L., Europe's buildings under the microscope - A country-by-country review of the energy performance of buildings, 2011.
- [69] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method.
- [70] M.P. Modera, Sherman, M. H., Sonderegger, R.C., Determining the U-value of a wall from field measurements of heat flux and surface temperatures, ASTM workshop on heat flow sensors, Philadelphia, 1986.
- [71] A. Capozzoli, A. Gorrino, V. Corrado, A building thermal bridges sensitivity analysis, Applied Energy, 107 (2013) 229-243.
- [72] T. Kalamees, Critical values for the temperature factor to assess thermal bridges Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 12 (3-1) (2006) 219-229.
- [73] ISO 13788:2012, Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods
- [74] DIN 4108-2:2013, Thermal protection and energy economy in buildings - Part 2: Minimum requirements to thermal insulation.
- [75] BS EN 12667:2001, Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance.
- [76] L.E. Mavromatidis, M. El Mankibi, P. Michel, M. Santamouris, Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones, Applied Energy, 92 (2012) 480-491.
- [77] J. Zhou, G. Zhang, Y. Lin, Y. Li, Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings, Energy and Buildings, 40 (6) (2008) 979-986.
- [78] Simone Ferrari, Valentina Zanotto, Building Energy Performance Assessment in Southern Europe, Springer International Publishing, Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2016.
- [79] K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, A correlation for the thermal delay of buildings, Renewable Energy, 6 (7) (1995) 687-699.
- [80] K.A. Antonopoulos, E.P. Koronaki, Thermal parameter components of building envelope, Applied Thermal Engineering, 20 (13) (2000) 1193-1211.
- [81] ISO 13789:2007, Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method.
- [82] ISO 14683:2007, Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values.
- [83] ISO 13370:2007, Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods.
- [84] P.G. Cesaratto, M. De Carli, A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings, Energy and Buildings, 59 (0) (2013) 29-36.

- [85] J. Fricke, U. Heinemann, H.P. Ebert, Vacuum insulation panels—From research to market, *Vacuum*, 82 (7) (2008) 680-690.
- [86] E.C. Hammond, J.A. Evans, Application of Vacuum Insulation Panels in the cold chain – Analysis of viability, *International Journal of Refrigeration*, 47 (Supplement C) (2014) 58-65.
- [87] S. Brunner, K. Ghazi Wakili, T. Stahl, B. Binder, Vacuum insulation panels for building applications—Continuous challenges and developments, *Energy and Buildings*, 85 (Supplement C) (2014) 592-596.
- [88] E. Kucukpinar, O. Miesbauer, Y. Carmi, M. Fricke, L. Gullberg, C. Erkey, R. Caps, M. Rochefort, A.G. Moreno, C. Delgado, M. Koehl, P. Holdsworth, K. Noller, Development of Transparent and Opaque Vacuum Insulation Panels for Energy Efficient Buildings, *Energy Procedia*, 78 (2015) 412-417.
- [89] C. Zhai, Z. Li, Y. He, T. Liu, M. Sun, J. Liu, A Comprehensive Study on the Production Process and Properties of Composite Core Materials for Vacuum Insulation Panels for Construction Applications, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.
- [90] H. Simmler, S. Brunner, U. Heinemann, H. Schwab, K. Kumaran, P. Mukhopadhyaya, D. Quénard, H. Sallée, K. Noller, E. Küçükpinar-Niarchos, C. Stramm, M. Tenpierik, H. Cauberg, M. Erb, IEA/ECBCS Annex 39, Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), September 2005.
- [91] M. Alam, H. Singh, M.C. Limbachiya, Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions, *Applied Energy*, 88 (11) (2011) 3592-3602.
- [92] P. Johansson, Building Retrofit using Vacuum Insulation Panels - Hygrothermal Performance and Durability Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, 2014.
- [93] ASTM C1484-10, Standard Specification for Vacuum Insulation Panels.
- [94] Hans Simmler, Samuel Brunner, Aging and Service Life of VIP in Buildings 7th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Dübendorf, Switzerland, September 28-29, 2005
- [95] E. Malliotakis, I. Mandilaras, D. Kontogeorgos, D. Katsourinis, M. Founti, The Ageing Effects of Vacuum Insulation Panels (VIPs) on the Long Term Thermal Performance of a Building Envelope with the use of Dynamic Simulation Tools, 11th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Dübendorf, Switzerland, 2013.
- [96] H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life, *Energy and Buildings*, 37 (11) (2005) 1122-1131.
- [97] Hans Cauberg, Martin Tenpierik, Sound Reduction of Vacuum Insulation Based Facade Panels 8th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Würzburg, Germany, 18 - 19 September 2007.
- [98] Martin Tenpierik Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions Doctoral thesis, Building Technology, Delft University of Technology, 2010.
- [99] A. Binz, A. Moosmann, G. Steinke, U. Schonhardt, F. Fregnan, H. Simmler, S. Brunner, K. Ghazi, R. Bundi, U. Heinemann, H. Schwab, H. Cauberg, M. Tenpierik, G. Johannesson, T. Thorsell, M. Erb,

B. Nussbaumer, IEA/ECBCS Annex 39, Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications (Subtask B), December 2005.

[100] K.G. Wakili, R. Bundi, B. Binder, Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels, *Building Research & Information*, 32 (4) (2004) 293-299.

[101] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, VIPs Thermal Conductivity Measurement: Test Methods, Limits and Uncertainty, *Energy Procedia*, 78 (Supplement C) (2015) 418-423.

[102] D. Kraus, D. Büttner, U. Heinemann, J. Fricke, Non-destructive Method to Determine the Water Vapour Pressure in Vacuum Insulation Panels (VIP) 7th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Empa, Duebendorf / Zurich, Switzerland, September 28-29, 2005

[103] R. Caps, H. Beyrichen, D. Kraus, S. Weismann, Quality control of vacuum insulation panels: Methods of measuring gas pressure, *Vacuum*, 82 (7) (2008) 691-699.

[104] ISO 22007-2:2015, Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method.

[105] ASTM C177 - 13, Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.

[106] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, Experimental and numerical investigation of thermal bridging effects of jointed Vacuum Insulation Panels, *Energy and Buildings*, 111 (Supplement C) (2016) 164-175.

[107] M. Tenpierik, H. Cauberg, Analytical models for calculating thermal bridge effects caused by thin high barrier envelopes around vacuum insulation panels, *Journal of Building Physics*, 30 (2007) 185-215.

[108] A. Uriarte, I. Garai, A. Ferdinando, O. Nicolas, E. Barreiro, Affordable and adaptable super-insulation solutions for energy efficient retrofitting of public buildings, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.

[109] T. Voellinger, A. Bassi, M. Heitel, Facilitating the incorporation of VIP into precast concrete sandwich panels, *Energy and Buildings*, 85 (Supplement C) (2014) 666-671.

[110] R. Kunič, Vacuum Insulation Panels - An Assessment of the Impact of Accelerated Ageing on Service Life, 2012, 58 (10) (2012) 9.

[111] Morgan Advanced Materials, Vacuum Insulation Panels for the Building Industry, <http://www.bau-vip.de/en/products-bauvip.html>, 2018.

[112] M. Alam, H. Singh, S. Brunner, C. Naziris, Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core, *Energy and Buildings*, 69 (Supplement C) (2014) 442-450.

[113] D.E. Awuye, Z. Chen, A. Shahzad, B. Li, W. Xuejia, L. Xudong, Characterization and properties of vacuum insulation panel (VIP) with silica-fly ash powder composite core material, 13th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), Paris, France, 20-21 September, 2017.

[114] S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways, *Applied Energy*, 116 (Supplement C) (2014) 355-375.

- [115] H. Hens, A. Janssens, W. Depraetere, J. Carmeliet, J. Lecompte, Brick Cavity Walls: A Performance Analysis Based on Measurements and Simulations, *Journal of Building Physics*, 31 (2) (2007) 95-124.
- [116] A.-H. Deconinck, S. Roels, Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements, *Energy and Buildings*, 130 (2016) 309-320.
- [117] ASTM C1155 - 95(2013), Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-situ Data.
- [118] K. Gaspar, M. Casals, M. Gangolells, A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value, *Energy and Buildings*, 130 (2016) 592-599.
- [119] A. Rasooli, L. Itard, C.I. Ferreira, A Response Factor-Based Method for the Rapid In-Situ Determination of Wall's Thermal Resistance in Existing Buildings, *Energy and Buildings*, (119) (2016) 51-61.
- [120] S.N. Flanders, A.O. Desjarlais, T.J. Kunz, A comparison of two techniques for R-value calculation, using winter in-situ data, *Thermal Envelopes VI/Heat Transfer in Walls*.
- [121] ISO 8990, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box.
- [122] ASTM C1363 - 11, Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus.
- [123] D.A. McIntyre, In situ measurement of U-values, *Building Services Engineering Research and Technology*, 6 (1985) 1-6.
- [124] L. Laurenti, Marcotullio, F. and Filippo de Monte, Determination of the thermal resistance of walls through a dynamic analysis of in-situ data, *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (3) (2004) 297-306.
- [125] C. Buratti, S. Grignaffini, Measurement of the thermal resistance of masonry walls, *International Journal of Heat and Technology*, 21 (2) (2003) 107-114.
- [126] C. Buratti, Moretti, E., Thermal resistance of masonry walls: in situ measurements, 6th world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics, and thermodynamics, 2005.
- [127] M. Cucumo, A.D. Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance, *Energy and Buildings*, 38 (3) (2006) 238-244.
- [128] F. Wang, D. Wang, X. Wang, J. Yao, A data analysis method for detecting wall thermal resistance considering wind velocity in situ, *Energy and Buildings*, 42 (10) (2010) 1647-1653.
- [129] P.G. Cesaratto, M. De Carli, S. Marinetti, Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation, *Energy and Buildings*, 43 (7) (2011) 1792-1801.
- [130] M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras, Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value, *Building and Environment*, 44 (2) (2009) 361-367.
- [131] C. Ghiaus, Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load, *Energy*, 50 (2013) 292-301.

- [132] M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras, Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions, *Solar Energy*, 82 (7) (2008) 573-587.
- [133] M.J. Jiménez, H. Madsen, K.K. Andersen, Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 170-180.
- [134] M.J. Jiménez, H. Madsen, Models for describing the thermal characteristics of building components, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 152-162.
- [135] O. Gutschker, Parameter identification with the software package LORD, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 163-169.
- [136] A. Rabl, Parameter Estimation in Buildings: Methods for Dynamic Analysis of Measured Energy Use, *Journal of Solar Energy Engineering*, 110 (1) (1988) 52-66.
- [137] A. Androutsopoulos, J.J. Bloem, H.A.L. van Dijk, P.H. Baker, Comparison of user performance when applying system identification for assessment of the energy performance of building components, *Building and Environment*, 43 (2) (2008) 189-196.
- [138] R. Albatici, A.M. Tonelli, M. Chiogna, A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance, *Applied Energy*, 141 (2015) 218-228.
- [139] B. Tejedor, M. Casals, M. Gangoellés, X. Roca, Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades, *Energy and Buildings*, 151 (Supplement C) (2017) 187-197.
- [140] C.A. Balaras, A.A. Argiriou, Infrared thermography for building diagnostics, *Energy and Buildings*, 34 (2) (2002) 171-183.
- [141] P.A. Fokaides, S.A. Kalogirou, Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Applied Energy*, 88 (12) (2011) 4358-4365.
- [142] D.A. Kontogeorgos, I.A. Atsonios, I.D. Mandilaras, M.A. Founti, Numerical investigation of the effect of vacuum insulation panels on the thermal bridges of a lightweight drywall envelope, *Journal of Facade Design and Engineering*, 4 (1-2) (2016) 3-18.
- [143] E. Barbour, J. Goodrow, J. Kosny, J.E. Christian, *Thermal Performance of Steel-Framed Walls*, The American Iron and Steel Institute 1994.
- [144] M. Gorgolewski, Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing, *Building and Environment*, 42 (1) (2007) 230-236.
- [145] L. Zalewski, S. Lassue, D. Rousse, K. Boukhalfa, Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls, *Energy Conversion and Management*, 51 (12) (2010) 2869-2877.
- [146] M. O'Grady, A.A. Lechowska, A.M. Harte, Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging, *Energy and Buildings*, 135 (2017) 20-32.
- [147] Y. Li, J. Yao, R. Li, Z. Zhang, J. Zhang, Thermal and energy performance of a steel-bamboo composite wall structure, *Energy and Buildings*, 156 (Supplement C) (2017) 225-237.

- [148] P. Santos, C. Martins, L.S. da Silva, L. Bragança, Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses, *Journal of Building Physics*, 38 (1) (2013) 81-98.
- [149] I. Atsonios, I. Mandilaras, D. Kolaitis, E. Tsakanika Theohari, E. Alexandrou, M. Founti, Large Scale Measurement Campaign to Assess The Thermal Behaviour of an 18th Century Historic Building, EWCHP-2013, 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Bolzano, Italy, 16-18 September, 2013.
- [150] Hukseflux Thermal Sensors, Version 1003, www.hukseflux.com, Delft, The Netherlands, in, 2015.
- [151] ASTM C1046 - 95(2013), Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components.
- [152] ASTM C1060-11a Standard, Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings.
- [153] ASHRAE. 2009, Handbook, Fundamentals, Chapter 27, Heat, air and moisture control in building assemblies - examples.
- [154] COMSOL Multiphysics®, <https://www.comsol.es/comsol-multiphysics>.
- [155] X. Meng, B. Yan, Y. Gao, J. Wang, W. Zhang, E. Long, Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method, *Energy and Buildings*, 86 (Supplement C) (2015) 754-765.
- [156] G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello, F.R. d'Ambrosio Alfano, M. Dell'Isola, U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings, *Energy and Buildings*, 104 (Supplement C) (2015) 108-121.
- [157] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [158] L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, F. Bianchi, Heat transfer study of external convective and radiative coefficients for building applications, *Energy and Buildings*, 151 (Supplement C) (2017) 429-438.
- [159] L. Evangelisti, C. Guattari, P. Gori, R. de Lieto Vollaro, F. Asdrubali, Experimental investigation of the influence of convective and radiative heat transfers on thermal transmittance measurements, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78 (Supplement C) (2016) 214-223.
- [160] T. Nussbaumer, K.G. Wakili, C. Tanner, Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum-insulation system applied to a concrete wall, *Applied Energy*, 83 (8) (2006) 841-855.
- [161] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, Experimental and numerical investigation of thermal bridging effects of jointed Vacuum Insulation Panels, *Energy and Buildings*, 111 (2016) 164-175.
- [162] S. Brunner, T. Stahl, K. Ghazi Wakili, An example of deteriorated vacuum insulation panels in a building façade, *Energy and Buildings*, 54 (2012) 278-282.
- [163] BS EN 1745:2012, Masonry and masonry products. Methods for determining thermal properties.

- [164] I. Naveros, M.J. Jiménez, M.R. Heras, Analysis of capabilities and limitations of the regression method based in averages, applied to the estimation of the U value of building component tested in Mediterranean weather, *Energy and Buildings*, 55 (2012) 854-872.
- [165] M.J. Jiménez, H. Bloem, Energy Performance Assessment of Buildings and Building Components. Guidelines for Data Analysis from Dynamic Experimental Campaigns Part 1: Physical Aspects, *Energy Procedia*, 78 (2015) 3306-3311.
- [166] M. Stamatiadou, PhD Thesis, Numerical analysis of cooling loads in buildings with phase change materials in their elements, 2014.
- [167] D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert, B.T. Griffith, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment*, 43 (4) (2008) 661-673.
- [168] J. Ramalho de Freitas, E. Grala da Cunha, Thermal bridges modeling in South Brazil climate: Three different approaches, *Energy and Buildings*, 169 (2018) 271-282.
- [169] A.P. Gomes, H.A. de Souza, A. Tribess, Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil, *Applied Thermal Engineering*, 52 (1) (2013) 84-89.
- [170] S. Kotti, D. Teli, P.A.B. James, Quantifying Thermal Bridge Effects and Assessing Retrofit Solutions in a Greek Residential Building, *Procedia Environmental Sciences*, 38 (2017) 306-313.
- [171] K. Martin, A. Erkoreka, I. Flores, M. Odriozola, J.M. Sala, Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions, *Energy and Buildings*, 43 (2) (2011) 529-535.
- [172] H. Ge, F. Baba, Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building, *Energy and Buildings*, 105 (2015) 106-118.
- [173] T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulos, The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, *Energy and Buildings*, 40 (11) (2008) 2083-2089.
- [174] F. Ascione, N. Bianco, F.d. Rossi, G. Turni, G.P. Vanoli, Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates, *Applied Energy*, 97 (2012) 405-418.
- [175] E. Kossecka, J. Kosny, Equivalent Wall as a Dynamic Model of a Complex Thermal Structure, *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 20 (3) (1997) 249-268.
- [176] P. Mahattanataw, C. Puvanant, D. Mongkolsawat, The energy performance of the cold-formed steel-frame and wood-frame houses developed for Thailand, *SimBuild 2006 Conference, IBPSA-USA, MIT, Cambridge, MA, 2006*.
- [177] P. Johansson, B. Adl-Zarrabi, A. Sasic Kalagasidis, Evaluation of 5 years' performance of VIPs in a retrofitted building façade, *Energy and Buildings*, 130 (Supplement C) (2016) 488-494.
- [178] P. Johansson, S. Geving, C.-E. Hagentoft, B.P. Jelle, E. Rognvik, A.S. Kalagasidis, B. Time, Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations, *Building and Environment*, 79 (2014) 31-45.
- [179] C. Martins, P. Santos, L.S. da Silva, Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study, *Journal of Building Physics*, 39 (4) (2015) 342-372.
- [180] ANSYS CFX®, <https://www.ansys.com>.
- [181] ASHRAE Handbook, Fundamentals (SI).

[182] EnergyPlus, Weather Data, <https://energyplus.net/weather>, 2018.

[183] Eurostat Statistics Explained, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/overview>, 05/2018.

[184] Global Property Guide, <http://www.globalpropertyguide.com/most-expensive-cities>, 05/2018.

[185] Trading Economics, <http://www.tradingeconomics.com/country-list/wages>, 05/2018.