

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπολογιστική Προσομοίωση της Θερμικής Απόδοσης Τοιχοποιών Ξηράς Δόμησης με Εφαρμογή Συμβατικών και Υπέρ-Μονωτικών Υλικών

Φοιτητής: **Ανδρέας Σκανδαλής**

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: **Μαρία Φούντη**

Αθήνα, Μάρτιος 2015

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υπολογιστική Προσομοίωση της Θερμικής Απόδοσης Τοιχοποιών
Ξηράς Δόμησης με Εφαρμογή Συμβατικών και Υπέρ-Μονωτικών
Υλικών**

Φοιτητής: **Ανδρέας Σκανδαλής**

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: **Μαρία Φούντη**

Αθήνα, Μάρτιος 2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια Ε.Μ.Π., κ. Μαρία Φούντη, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και τη στήριξη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δήμο Κοντογεώργο, διδάκτορα Ε.Μ.Π., για τη βοήθειά του, τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές του, καθώς και για τη συμπαράσταση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου. Ακόμα, θερμές ευχαριστίες και στο προσωπικό του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθειά του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με βοήθησε σημαντικά όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Δεδομένου ότι η ενέργεια είναι η κύρια πηγή όλων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, η κατανάλωσή της πρέπει να μειωθεί σε κάθε στάδιο της οικονομικής αλυσίδας των βιομηχανικών δραστηριοτήτων που οδηγούν στην τεχνολογική και κοινωνική ανάπτυξη. Στις μέρες μας, ο κτιριακός τομέας καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας δαπανώνται για τη θέρμανση, τον κλιματισμό και τον αερισμό των κτιρίων με σκοπό την επιβολή συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό τους. Η τρέχουσα τάση στην ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων προς τη σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας δημιουργεί έναν αριθμό από καινούριες προκλήσεις για το σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η ενσωμάτωση μονωτικών νανοϋλικών και υπέρ-μονωτικών υλικών στο περίβλημα των οικοδομικών συστημάτων με αποτελεσματικό τρόπο. Μέχρι στιγμής, οι μελέτες σχετικά με υπέρ-μονωτικά υλικά έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των συστημάτων αυτών σε κλίμακα συστατικών. Αλλά, όσο το επίπεδο της θερμικής μόνωσης στο περίβλημα ενός κτιρίου γίνεται μεγαλύτερο, η επίδραση των θερμογεφυρών γίνεται πιο σοβαρή. Η τρέχουσα εργασία επικεντρώνεται, κυρίως, στην αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του περιβλήματος και του σκελετού του σπιτιού (κτίριο ELISSA) σε σχέση με όλους τους τύπους θερμογεφυρών που εισάγονται είτε από τα κατασκευαστικά στοιχεία είτε από τη γεωμετρία. Σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε την επίδραση των θερμογεφυρών στα στοιχεία κτιρίου ελαφριάς κατασκευής, με αλλά και χωρίς τη χρήση νανοϋλικών. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες βασίζονται στο ISO 10211:2007, όπως και στην υπολογιστική προσομοίωση σε περιβάλλον ANSYS CFX, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το κρίσιμο ζήτημα των θερμογεφυρών και ιδιαίτερα να αποκαλυφθούν τα αδύνατα σημεία και να προσδιοριστούν οι θέσεις εντός της ελαφριάς κατασκευής, όπου απαιτούνται διαφορετικές προδιαγραφές μονωτικών νανοϋλικών.

Abstract

Since energy is the main source of all human activities, its consumption must be reduced at every stage of the value chain of industrial activities leading to the technological and social development. Nowadays, buildings represent the largest proportion of total energy consumption. The largest amounts of energy are spent for heating, cooling and ventilation of buildings in order to impose conditions of comfort inside. The current trend in the energy efficiency of buildings to nearly zero energy creates a number of new challenges for the design and construction of buildings. One of the major challenges is the integration of nanomaterial insulation and super insulators in building envelope systems in an efficient way. So far, the studies on super insulating materials have focused on the development and optimization of these systems at component scale. But, as the level of thermal insulation in a building envelope becomes higher, the effect of thermal bridges becomes more severe. The current work focuses mainly on the evaluation of the thermal performance of the building envelope and the skeleton of the house (ELISSA building) in respect with all the types of thermal bridges introduced either by the construction elements or the geometry. Our aim is to estimate the effect of thermal bridges in light manufacturing building elements, with and without the use of nanomaterials. The proposed methodology is based on ISO 10211:2007, as well on the computational simulation to ANSYS CFX environment, in order to address the critical issue of thermal bridges and particularly to reveal the weak points and identify the appropriate positions within the light-weight construction, where different specifications of nanomaterials are required.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	15
1.1 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων.....	15
1.2 Κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων.....	16
1.3 Η σημασία της θερμομόνωσης.....	18
1.4 Θερμογέφυρες.....	20
1.5 Θερμομονωτικά υλικά.....	23
1.5.1 Ιδιότητες μονωτικών υλικών	23
1.5.2 Συμβατικά μονωτικά υλικά	24
1.5.2.1 Πετροβάμβακας	24
1.5.3 Υπέρ-μονωτικά υλικά.....	27
1.5.3.1 Μονωτικά πάνελ κενού (VIPs).....	27
1.5.3.2 Αερογέλη (Aerogel).....	30
1.6 Διάρθρωση διπλωματικής	31
2. Μεθοδολογία για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης κτιρίου	33
2.1 Υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας του κεντρικού μέρους των τοιχοποιιών.....	35
2.2 Υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας.....	37
3. Ορισμός του κτιρίου ELISSA	41
3.1 Ορισμός της γεωμετρίας των τοιχοποιιών	41
3.1.1 Κεντρικό μέρος των τοιχοποιιών.....	43
3.1.1.1 Εξωτερικός τοίχος.....	43
3.1.1.2 Οροφή	43
3.1.1.3 Πάτωμα	44
3.1.2 Συνδέσεις των επιμέρους τοιχοποιιών.....	45
3.1.2.1 Εξωτερικός τοίχος - Εξωτερικός τοίχος	45
3.1.2.2 Εξωτερικός τοίχος - Εσωτερικός τοίχος.....	46
3.1.2.3 Εξωτερικός τοίχος - Οροφή	46
3.1.2.4 Εξωτερικός τοίχος - Ταβάνι.....	47
3.1.2.5 Εξωτερικός τοίχος - Πάτωμα.....	47
3.1.2.6 Εσωτερικός τοίχος - Οροφή.....	48
3.1.2.7 Εσωτερικός τοίχος - Πάτωμα	48

3.2 Ορισμός των υλικών των τοιχοποιιών	49
4. Αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης των τοιχοποιιών	51
4.1 Θερμική απόδοση.....	51
4.1.1 Οριακές συνθήκες.....	51
4.2 Κεντρικό μέρος των τοιχοποιιών	52
4.2.1 Πλέγμα και καθορισμός οριακών συνθηκών	52
4.2.1.1 Εξωτερικός τοίχος.....	52
4.2.1.2 Οροφή	53
4.2.1.3 Πάτωμα	53
4.2.2 Αποτελέσματα	54
4.2.2.1 Εξωτερικός τοίχος.....	54
4.2.2.2 Οροφή	55
4.2.2.3 Πάτωμα	57
4.3 Συνδέσεις των τοιχοποιιών.....	58
4.3.1 Πλέγμα και καθορισμός οριακών συνθηκών	58
4.3.1.1 Εξωτερικός τοίχος - Εξωτερικός τοίχος	58
4.3.1.2 Εξωτερικός τοίχος - Εσωτερικός τοίχος	59
4.3.1.3 Εξωτερικός τοίχος - Οροφή	59
4.3.1.4 Εξωτερικός τοίχος - Ταβάνι.....	60
4.3.1.5 Εξωτερικός τοίχος - Πάτωμα.....	60
4.3.1.6 Εσωτερικός τοίχος - Οροφή.....	61
4.3.1.7 Εσωτερικός τοίχος - Πάτωμα	61
4.3.2 Αποτελέσματα	62
4.3.2.1 Εξωτερικός τοίχος - Εξωτερικός τοίχος	62
4.3.2.2 Εξωτερικός τοίχος - Εσωτερικός τοίχος	63
4.3.2.3 Εξωτερικός τοίχος - Οροφή	65
4.3.2.4 Εξωτερικός τοίχος - Ταβάνι.....	68
4.3.2.5 Εξωτερικός τοίχος - Πάτωμα.....	70
4.3.2.6 Εσωτερικός τοίχος - Οροφή.....	71
4.3.2.7 Εσωτερικός τοίχος - Πάτωμα	73
5. Θερμική απόδοση του κτιρίου ELISSA.....	75
5.1 Τοιχοποιίες	75
5.1.1 Εξωτερικός τοίχος "AW 001"	75

5.1.2 Εξωτερικός τοίχος "AW 002"	77
5.1.3 Εξωτερικός τοίχος "AW 003"	79
5.1.4 Εξωτερικός τοίχος "AW 004"	80
5.1.5 Εξωτερικός τοίχος "AW 101"	82
5.1.6 Εξωτερικός τοίχος "AW 102"	84
5.1.7 Εξωτερικός τοίχος "AW 103"	86
5.1.8 Εξωτερικός τοίχος "AW 104"	88
5.1.9 Πάτωμα "BO 001"	90
5.1.10 Οροφή "DA 101"	92
5.2 Κτίριο ELISSA.....	93
6. Συμπεράσματα.....	97
7. Βιβλιογραφία	99



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας έχει γίνει αντιληπτή σε παγκόσμια κλίμακα. Οι ενέργειες προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν οδηγήσει στην εύρεση μεθόδων και την εφαρμογή τεχνολογιών για την επίτευξη του στόχου. Όμως, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, ο αυξανόμενος ρυθμός κατανάλωσης της ενέργειας έμοιαζε να μην απασχολεί κανέναν, ενώ άρχισε να οξύνεται και το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα καυσαέρια των συμβατικών καυσίμων. Έγινε πλέον φανερό ότι έπρεπε να περιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας, κυρίως από τους μεγάλους καταναλωτές που είναι τα οικοδομήματα κάθε είδους. Επομένως, για τον περιορισμό της ροής θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος των οικοδομημάτων, επιβλήθηκαν στις περισσότερες χώρες διάφορα μέτρα για την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ένα από τα μέτρα αυτά είναι και η χρησιμοποίηση θερμομονωτικών υλικών, η οποία συνδυαζόμενη με τη βιοκλιματικά ορθή αρχιτεκτονική των οικοδομημάτων μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι και 50% αυτής που απαιτείται για τη διατήρηση του εσωκλίματος σε τιμές άνεσης. Ακόμη, η σωστή θερμομόνωση συσκευών και μηχανολογικών εγκαταστάσεων, εκτός από τη μείωση απωλειών θερμότητας, καλύπτει τεχνικές απαιτήσεις για τα τμήματα των εγκαταστάσεων και τα διακινούμενα ρευστά και συμβάλλει στην ασφάλεια των εργαζομένων [1].

Η εφαρμογή αυτών των μέτρων και τεχνολογιών έχουν ως κύριο στόχο τη δημιουργία κτιρίων μηδενικής ή σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης.

1.1 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων

Η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται πραγματικά ή εκτιμάται ότι ικανοποιεί τις διάφορες ανάγκες που συνδέονται με τη συνήθη χρήση του κτιρίου, οι οποίες περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη θέρμανση, τη ψύξη, την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX), τον αερισμό και το φωτισμό.

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων προσδιορίζεται με βάση μεθοδολογία υπολογισμού της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται υπόψη η χρήση του κτιρίου, τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, τα γεωμετρικά δεδομένα και τα θερμικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων θέρμανσης / ψύξης / κλιματισμού / μηχανικού αερισμού / παραγωγής ZNX και φωτισμού των χώρων [2].

Ο ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων και η ορθολογική χρήση της ενέργειας έχουν ένα και μοναδικό στόχο. Να διασφαλίσουν αποδεκτές εσωκλιματικές συνθήκες με τη σωστή θερμική συμπεριφορά του κτιρίου - χειμώνα καλοκαίρι - και συνεπώς να περιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας με όλα τα οφέλη που αυτό συνεπάγεται, οικονομικά, περιβαλλοντικά (με τη μείωση των εκπομπών CO₂), ποιότητα ζωής κ.λπ.

Ο παραπάνω στόχος στην περίπτωση του βιοκλιματικού σχεδιασμού επιτυγχάνεται με καθαρά σχεδιαστικούς χειρισμούς ή με διάφορες τεχνικές στην κατασκευή του κτιρίου, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την εξάρτηση από το μηχανολογικό εξοπλισμό για τη θέρμανση και ψύξη των κτιρίων. Έτσι, καλύπτοντας τα κτίρια τις ανάγκες τους με ηλιακή ενέργεια και άλλες ατμοσφαιρικές πηγές καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια από ότι οι αντίστοιχες συμβατικές κατασκευές. Εξοικονόμηση ενέργειας στις κατασκευές προκύπτει από το σωστό και ορθολογικό σχεδιασμό, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω της σωστής χωροθέτησης του κτιρίου στο περιβάλλον και τον προσανατολισμό του, του μεγέθους, τον προσανατολισμό και τη θέση των ανοιγμάτων του, την προστασία του κελύφους από τις ατμοσφαιρικές εναλλαγές αλλά και από τη σωστή λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού [16].

Για να επιτύχει κανείς τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας τη χειμερινή περίοδο, είναι αυτονόητο ότι θα πρέπει από τη μία πλευρά να περιορίσει τις θερμικές απώλειες του κτιρίου (δηλαδή απώλειες με αγωγιμότητα και απώλειες αερισμού) και από την άλλη πλευρά να μεγιστοποιήσει κυρίως τα θερμικά ηλιακά κέρδη. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο θα πρέπει να επιδιώκεται ο φυσικός δροσισμός του κτιρίου με την ελαχιστοποίηση των θερμικών κερδών και τη θερμική αποφόρτιση του κτιρίου μέσω του αερισμού και άλλων σχετικών μέτρων [23].

Οι ανεξέλεγκτες και απρόοπτες κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν τόσο στη χώρα μας όσο και στον ευρύτερο ευρωπαϊκό χώρο, είναι γνωστές. Με θερμοκρασίες υψηλότερες το καλοκαίρι λόγω της διόγκωσης του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς και χειμώνες με ακραία καιρικά φαινόμενα, σε συνδυασμό με τη συνεχώς αυξανόμενη άνοδο του πετρελαίου κάνει επιτακτική πλέον τη θερμομόνωση των κτιρίων και κυρίως αυτών χωρίς μόνωση.

Στη χώρα μας, όπου επικρατεί η άναρχη δόμηση, η έλλειψη ελέγχου της εφαρμογής του κανονισμού ενεργειακής απόδοσης κτιρίων (KENAK), έχει ως αποτέλεσμα την ανέγερση πλήθος κτιρίων τα οποία στερούνται θερμομόνωσης και ακολουθίας του KENAK.

1.2 Κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων

Η ελληνική νομοθεσία που ρυθμίζει την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων καθορίζει ουσιαστικά τις απώλειες από το κτιριακό κέλυφος προς το εξωτερικό περιβάλλον χωρίς να λαμβάνει πρόνοια για όλες τις υπόλοιπες συνιστώσες του ενεργειακού ισοζυγίου. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Μόνωσης πραγματοποίησε έρευνα σε όλη την Ευρώπη για τα απαιτούμενα επίπεδα θερμομόνωσης, όπου έδειξε ότι οι απαιτήσεις στην Ελλάδα είναι εξαιρετικά χαλαρές και τα σχετικά όρια απωλειών είναι από τα μεγαλύτερα στην Ευρώπη.

Πολλές ευρωπαϊκές χώρες έχουν ήδη εφαρμόσει εδώ και χρόνια διάφορα νομικά και οικονομικά εργαλεία που εξυπηρετούν την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια, από στενά νομικά πλαίσια και έλεγχο, μέχρι συστήματα επιδότησης, φοροαπαλλαγής κ.λπ. Τα μέτρα έχουν αποφέρει κέρδη μέσω της εξοικονόμησης

ενέργειας των νέων κτιρίων έως 60% σε σχέση με τα κτίρια που κατασκευάστηκαν πριν το 1970 και έως 28% σε σχέση με τα κτίρια που κατασκευάστηκαν το 1985.

Στον ελληνικό χώρο, τον Απρίλιο του 2010, εκδόθηκε ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.), με τον οποίο θεσμοθετείται ο ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός στον κτιριακό τομέα [12]. Σκοπός του Κ.Εν.Α.Κ. είναι η διαμόρφωση του πλαισίου αρχών και ο καθορισμός των όρων και των προϋποθέσεων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός του είναι η μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό, φωτισμό και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με την ταυτόχρονη διασφάλιση συνθηκών άνεσης στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται μέσω του ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού του κελύφους, της χρήσης ενεργειακά αποδοτικών δομικών υλικών και ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας [12].

Η μελέτη ενεργειακής απόδοσης κτιρίων αντικαθιστά τη μελέτη θερμομόνωσης και εκπονείται για κάθε κτίριο (άνω των 50 τ.μ.), νέο ή υφιστάμενο που ανακαινίζεται ριζικά και βασίζεται σε μια συγκεκριμένη μεθοδολογία η οποία αναφέρεται:

α) στην απαίτηση κάλυψης ελάχιστων προδιαγραφών του κτιρίου όσον αφορά στο σχεδιασμό του, το κτιριακό κέλυφος και τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις
β) στη σύγκρισή του με κτίριο αναφοράς. Ως κτίριο αναφοράς νοείται κτίριο με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, θέση, προσανατολισμό, χρήση και χαρακτηριστικά λειτουργίας με το εξεταζόμενο κτίριο που πληροί όμως ελάχιστες προδιαγραφές και έχει καθορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά [27].

Πιο αναλυτικά, οι βασικότερες ρυθμίσεις του Κ.Εν.Α.Κ. είναι:

- Ορίζεται η μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης και ενεργειακής κατάταξης των κτιρίων.
- Καθορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις (kWh/m^2) για την ενεργειακή απόδοση και ενεργειακή κατάταξη των νέων και ριζικώς ανακαινιζόμενων κτιρίων μέσω της μεθοδολογίας του κτιρίου αναφοράς.
- Καθορίζονται οι ελάχιστες προδιαγραφές για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους και οι τεχνικές προδιαγραφές των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων των υπό μελέτη κτιρίων, καθώς και των ριζικώς ανακαινιζόμενων.
- Ορίζεται το περιεχόμενο της μελέτης ενεργειακής απόδοσης (Μ.Ε.Α.) των κτιρίων.
- Καθορίζεται η μορφή του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης (Π.Ε.Α.) κτιρίου, καθώς και τα στοιχεία που αυτό θα περιλαμβάνει.
- Καθορίζεται ο τρόπος εκπόνησης των ενεργειακών επιθεωρήσεων του κτιρίου, των λεβήτων και των κλιματιστικών [12].

Τα οφέλη από τον Κ.Εν.Α.Κ. είναι οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά. Τα οικονομικά οφέλη αφορούν κυρίως στον περιορισμό των λειτουργικών εξόδων συντήρησης των κτιρίων, αλλά και στην αναθέρμανση της οικοδομικής δραστηριότητας. Τα κοινωνικά οφέλη αφορούν στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής, ενώ τα περιβαλλοντικά οφέλη αφορούν στον περιορισμό των εκπομπών ρύπων, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα, με σημαντική συμβολή στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και στην εξοικονόμηση ενέργειας [27].

1.3 Η σημασία της θερμομόνωσης

Θερμομόνωση ενός δομικού στοιχείου ονομάζεται το σύνολο των μεθόδων και των υλικών που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ροής θερμότητας μεταξύ των χώρων εκατέρωθεν του στοιχείου. Η ροή θερμότητας οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των δύο χώρων, η οποία προκαλεί τη μετάδοση θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο χώρο, μέσω του δομικού στοιχείου.

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος ενός κτιρίου γίνεται μέσω του κτιριακού κελύφους. Τις ψυχρές ημέρες του έτους, η ροή θερμότητας είναι από το θερμότερο εσωτερικό περιβάλλον προς το ψυχρότερο εξωτερικό περιβάλλον, ενώ τις θερμές ημέρες η ροή είναι αντίθετη. Στην πρώτη περίπτωση, η θερμότητα που διαφεύγει εκτός του κτιρίου ονομάζεται θερμικές απώλειες και στη δεύτερη περίπτωση, εξωτερικά θερμικά κέρδη.

Σκοπός της θερμομόνωσης είναι να ελαχιστοποιήσει τη μετάδοση θερμότητας από το εσωτερικό στο εξωτερικό περιβάλλον και αντίστροφα, περιορίζοντας έτσι τα εξωτερικά θερμικά κέρδη το καλοκαίρι και τις θερμικές απώλειες το χειμώνα. Έτσι, περιορίζονται οι ανάγκες του κτιρίου για ψύξη το καλοκαίρι και θέρμανση το χειμώνα, αντίστοιχα.

Οι θερμικές απώλειες ενός κτιρίου είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, κάποιοι από τους οποίους είναι το κλίμα της περιοχής, οι διαστάσεις των εξωτερικών επιφανειών του, η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία και το είδος των υλικών κατασκευής των δομικών στοιχείων του [11].

Η εξάρτηση των θερμικών απωλειών από το είδος των δομικών υλικών εκφράζεται από το συντελεστή θερμοπερατότητας U των δομικών στοιχείων του κελύφους. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας αποτελεί κριτήριο της θερμομονωτικής ικανότητας του δομικού στοιχείου. Ένα μη μονωμένο στοιχείο έχει υψηλό συντελεστή θερμοπερατότητας, δηλαδή έχει μεγάλες απώλειες θερμότητας. Επομένως, η θερμομόνωση του στοιχείου έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητάς του. Η μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός στοιχείου απαιτεί τη χρήση θερμομονωτικών υλικών για την κατασκευή του στοιχείου, καθώς αυτά χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που τους προσδίδει μεγάλη αντίσταση θερμοδιαφυγής.

Μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας μπορεί να προκύψει και με αύξηση του πάχους των υλικών κατασκευής του δομικού στοιχείου, αλλά αυτή η μέθοδος έχει κόστος χώρου και χρημάτων εξαιτίας της ελάττωσης του ωφέλιμου εσωτερικού εμβαδού και της αύξησης των ποσοτήτων των δομικών υλικών, αντίστοιχα. Μάλιστα, η αντίσταση θερμοδιαφυγής που προκύπτει με χρήση αυτής της μεθόδου έχει μικρότερες τιμές συγκρινόμενη με την προηγούμενη μέθοδο. Επιπλέον, η εξοικονόμηση ενέργειας δεν είναι ανάλογη της αύξησης του πάχους του στοιχείου. Συνεπώς, η δεύτερη μέθοδος θερμομόνωσης δε συνίσταται από τεχνοοικονομική άποψη.

Θερμομόνωση εφαρμόζεται σε όλα τα δομικά στοιχεία του κελύφους του κτιρίου, διαφανή και αδιαφανή. Στα αδιαφανή δομικά στοιχεία περιλαμβάνονται τα στοιχεία που βρίσκονται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, αλλά και εκείνα που βρίσκονται σε επαφή με μη θερμαινόμενους εσωτερικούς χώρους ή με το έδαφος. Η εφαρμογή παρεμβάσεων θερμομόνωσης εξαρτάται άμεσα από το αν το κτίριο είναι υπό κατασκευή ή ανακαίνιση. Ασφαλώς, στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ευρύτερο φάσμα δυνατοτήτων και προοπτικών θερμομόνωσης και αναμένονται σαφώς καλύτερα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με τη δεύτερη.



Εικόνα 1.1 Εξωτερική θερμομόνωση κτιρίου [28]

Μια επιτυχής θερμομόνωση του κτιρίου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των λειτουργικών εξόδων για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου, καθώς περιορίζει την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, μειώνει το κόστος εγκατάστασης συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, αφού η απαραίτητη εγκατεστημένη ισχύς και των δύο είναι μικρότερη. Ακόμη, μειώνει σε μεγάλο βαθμό τη δημιουργία θερμογεφυρών και πετυχαίνει καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτιρίου. Η θερμομόνωση, όμως, έχει αντίκτυπο στο κόστος κατασκευής του κτιρίου, το οποίο αυξάνεται. Συνεπώς, οι τεχνικές θερμομόνωσης που θα εφαρμοστούν σε ένα κτίριο πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τον οικονομικό παράγοντα πέραν του τεχνικού και του ενεργειακού παράγοντα.



Εικόνα 1.2 Εσωτερική θερμομόνωση δωματίου [28]

Συμπερασματικά, η εξασφάλιση άνετης διαμονής, η οικονομία στη λειτουργία και στην αρχική εγκατάσταση θέρμανσης, η αποφυγή βλαβών και επομένως τα μικρότερα έξοδα συντήρησης, καθώς και η αύξηση του χρόνου ζωής των κτιρίων που επιτυγχάνονται με τη θερμομόνωση κάνουν απαραίτητη και αποδοτική τη δαπάνη της θερμομόνωσης. Δαπάνη που σε μικρό χρονικό διάστημα αποσβένεται και στα υπόλοιπα χρόνια ζωής των κτιρίων συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Η σπουδαιότητα της θερμομόνωσης στην προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας στον τομέα των κτιριακών εγκαταστάσεων έχει γίνει πλέον ευρέως αντιληπτή και αυτό αντικατοπτρίζεται και στη σχετική νομοθεσία του κράτους. Έτσι, η θερμομόνωση έγινε υποχρεωτική για πρώτη φορά στην Ελλάδα με τη θέσπιση του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (Κ.Θ.Κ.) το 1979, ενώ ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.), ο οποίος τέθηκε σε ισχύ το 2010 (αντικαθιστώντας τον Κ.Θ.Κ.), τυποποίησε πλήρως τη θερμομόνωση, προσδιορίζοντας με ακρίβεια και σαφήνεια τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις που πρέπει αυτή να πληρεί.

1.4 Θερμογέφυρες

Ένα σημαντικό πρόβλημα στη θερμομόνωση των κτιρίων αποτελούν οι θερμογέφυρες. Θερμογέφυρες είναι οι περιοχές του κελύφους ενός κτιρίου (γενικότερα μιας επιφάνειας) οι οποίες παρουσιάζουν μικρότερη θερμική αντίσταση απ' ό,τι η κύρια μάζα των στοιχείων που ανήκουν, ή εκείνες οι περιοχές που λόγω γεωμετρίας εμφανίζουν αυξημένες θερμικές απώλειες (ή και συνδυασμός των παραπάνω) [1].

Οι θερμογέφυρες προκαλούνται όταν υλικά με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα διαπερνούν, ή εν μέρει διαπερνούν, ένα στρώμα με μεγαλύτερη θερμική αντίσταση (μικρότερη θερμική αγωγιμότητα) δημιουργώντας ένα μονοπάτι με χαμηλότερη θερμική αντίσταση, με αποτέλεσμα τις αυξημένες απώλειες θερμότητας. Συνήθως η παρουσία των θερμογεφυρών οφείλεται σε κακοτεχνία, σε

κατασκευαστική αστοχία, σε αμέλεια, σε άγνοια ή ακόμα σε φθορά με το χρόνο. Οι θερμογέφυρες αποτελούν τα "ασθενή" σημεία του κτιριακού περιβλήματος και λειτουργούν επιβαρυντικά στη θερμική του προστασία.

Οι θερμογέφυρες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. *Θερμογέφυρες λόγω μικρής θερμικής αντίστασης.*

Εμφανίζονται σε όσα σημεία υλικά μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας παρεμβάλλονται σε υλικά χαμηλότερης αγωγιμότητας (π.χ. το κονίαμα που συνδέει τα τούβλα, τα μεταλλικά ελάσματα που αγκυρώνουν τη θερμομόνωση ή δομικά στοιχεία).

2. *Θερμογέφυρες λόγω γεωμετρίας.*

Οι γεωμετρικές θερμογέφυρες δημιουργούνται σε θέσεις στις οποίες η βασική γεωμετρία του δομικού στοιχείου παύει να είναι γραμμική π.χ. στη θέση κάθετης τομής δύο εξωτερικών δομικών στοιχείων με τη συνέχεια της θερμομόνωσης να μη διακόπτεται (γωνία). Σ' αυτήν την περίπτωση, επειδή η συνολική εξωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων διαφέρει από την εσωτερική, αναπτύσσονται έντονα φαινόμενα δισδιάστατης ροής θερμότητας. Ανάλογα με τον αν χρησιμοποιούνται εσωτερικές ή εξωτερικές διαστάσεις για τους υπολογισμούς των θερμικών ροών, η τιμή του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας της συγκεκριμένης θερμογέφυρας διαφοροποιείται.

3. *Μικτές θερμογέφυρες.*

Οι περισσότερες θερμογέφυρες που εμφανίζονται στα κτίρια είναι μικτού τύπου [1].

Οι συνέπειες από τη δημιουργία θερμογεφυρών σε ένα κτίριο είναι οι παρακάτω [21]:

- Απώλειες θερμότητας. Στα δομικά στοιχεία, τα οποία δεν έχουν θερμομονωτική στρώση, οι απώλειες θερμότητας μπορεί να φτάσουν να είναι διπλάσιες, ακόμη και τριπλάσιες έναντι των υπολοίπων δομικών στοιχείων του κελύφους που είναι μονωμένα.
- Εμφάνιση χαμηλών επιφανειακών θερμοκρασιών. Η επιφανειακή θερμοκρασία στα σημεία αυτά είναι χαμηλότερη κατά 3-5 °C σε επίπεδες επιφάνειες και κατά 3-7 °C σε γωνίες του κτιρίου.
- Περιορισμός του αισθήματος θερμικής άνεσης. Στις περιοχές αυτές δε διατηρούνται οι συνθήκες θερμικής άνεσης των υπόλοιπων χώρων του κτιρίου, επειδή λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας τους, η εκπομπή θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα είναι μεγαλύτερη. Η αίσθηση ψύχους είναι τόσο πιο έντονη, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια που αποτελεί θερμογέφυρα.

- Συμπύκνωση υδρατμών. Αν η επιφανειακή θερμοκρασία στο σημείο αυτό είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία δρόσου, οι υδρατμοί του αέρα θα συμπυκνωθούν και θα εμποτίσουν το δομικό στοιχείο.
- Ανάπτυξη μούχλας. Η περίπτωση αυτή είναι απόρροια του σχηματισμού δρόσου. Η υγρή επιφάνεια διευκολύνει τη συσσώρευση σκόνης, σχηματίζοντας σκουρόχρωμα στίγματα. Μάλιστα, η ύπαρξη κατάλληλου περιβάλλοντος, η έλλειψη αερισμού, η υψηλή υγρασία και η παρουσία μικροοργανισμών οδηγεί πολύ συχνά στην ανάπτυξη μυκήτων.
- Επιφανειακές φθορές. Η συνεχής προσβολή του δομικού στοιχείου από υγρασία συμπύκνωσης, καθώς και εναλλασσόμενες υγράνσεις και εξατμίσεις μπορούν να προκαλέσουν αποφλοιώσεις και σχισμές στην επιφάνεια του επιχρίσματος.



Εικόνα 1.3 Θερμογέφυρες κτιρίου [29]

Οι θερμογέφυρες πρέπει να εντοπίζονται εγκαίρως και να λαμβάνονται μέτρα εξάλειψής τους. Βεβαίως, ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης των θερμογεφυρών είναι ο εκ των προτέρων καλός σχεδιασμός της θερμικής προστασίας της κατασκευής (κτιριακό κέλυφος), ώστε αυτές να μειωθούν στο ελάχιστο. Ωστόσο, πρέπει να καταστεί σαφές ότι η πλήρης εξάλειψή τους είναι πάρα πολύ δύσκολο-έως απίθανο να επιτευχθεί [1]. Δεν υπάρχει συμβατική κατασκευή που να μην παρουσιάζει σε ορισμένα σημεία της θερμογέφυρες. Ο κύριος στόχος, όμως, είναι τα σημεία αυτά να είναι μικρής έκτασης και όσο το δυνατόν λιγότερα.

Τέλος, αναφέρουμε κάποιες από τις συνηθισμένες θέσεις εμφάνισης θερμογεφυρών σε κτίριο [21]:

- Οι δοκοί και τα υποστυλώματα (όταν δε θερμομονώνονται).
- Τα διαζώματα ενίσχυσης.
- Οι προεξοχές του σκυροδέματος.
- Τα κουτιά για τα ρολά των κουφωμάτων.
- Τα σημεία συναρμογής των κουφωμάτων με τις παράπλευρες τοιχοποιίες.

1.5 Θερμομονωτικά υλικά

1.5.1 Ιδιότητες μονωτικών υλικών

Αρκετά χρόνια μετά την καθιέρωση της υποχρεωτικής θερμικής μόνωσης στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, τα μονωτικά υλικά εξακολουθούν να αποτελούν το κύριο εργαλείο για τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου.

Η επιλογή του κατάλληλου μονωτικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το σκοπό για τον οποίο κατασκευάζεται το κτίριο. Για παράδειγμα, σε βιομηχανικές μονάδες χρησιμοποιούνται μονωτικά υλικά τα οποία δεν είναι εύφλεκτα και δε συνεισφέρουν στην εξάπλωση της φωτιάς. Τα μονωτικά υλικά χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο φυσικών ιδιοτήτων που τα διαχωρίζουν και τα διακρίνουν, όπως είναι η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα, κ.λπ. Το κάθε θερμομονωτικό υλικό έχει τις δικές του ιδιότητες που το καθιστούν περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλο για τη μία ή άλλη χρήση. Η γνώση των ιδιοτήτων αυτών είναι πολύτιμη για την επιλογή του υλικού, το οποίο θα μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα στις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής του. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποιες από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών.

- *Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k):* Εκφράζει την ποσότητα θερμότητας που περνά ανά δευτερόλεπτο μέσα από τις απέναντι πλευρές κύβου ακμής 1m (από ομοιογενές και ισότροπο υλικό), όταν η διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ των επιφανειών αυτών διατηρείται σταθερή, ίση με 1K. Μονάδες του k είναι $Wm^{-1}K^{-1}$ ή $Kcal\ m^{-1}h^{-1}\ ^\circ C^{-1}$. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αποτελεί φυσική ιδιότητα κάθε υλικού και η τιμή του προσδιορίζεται πειραματικά.

Την τιμή του συντελεστή k ενός υλικού επηρεάζουν η δομή του υλικού (πορώδες, πυκνότητα), η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση.

- *Συντελεστής θερμοπερατότητας (U):* Θερμοπερατότητα μέσα από ένα στοιχείο χαρακτηρίζεται η ευκολία μετάδοσης θερμότητας μέσα από τη μάζα του, λαμβανομένων υπόψη της θερμοδιαφυγής και της θερμικής μετάβασης και από τις δύο πλευρές του (θερμή και ψυχρή).

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U εκφράζει τη θερμοροή που μεταδίδεται, ανά μονάδα επιφάνειας του στοιχείου, μέσω αυτού, από το θερμό στο ψυχρό ρευστό, όταν η διαφορά θερμοκρασίας των δύο ρευστών διατηρείται σταθερή ίση με 1K (ή $1^\circ C$). Ο συντελεστής U αποτελεί μέτρο της θερμομονωτικής ικανότητας του στοιχείου και έχει μονάδες $Wm^{-2}K^{-1}$ [1].

- *Ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p):* Είναι η ενέργεια που χρειάζεται ένα σώμα για να θερμανθεί και διαφέρει από υλικό σε υλικό.

1.5.2 Συμβατικά μονωτικά υλικά

1.5.2.1 Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας (mineral wool) είναι ένα ινώδες μονωτικό υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται στις οικοδομές, στη βιομηχανία, αλλά και σε άλλες τεχνικές εφαρμογές. Ο πετροβάμβακας αποτελείται από ίνες οξειδίου πυριτίου - αλουμινίου και οι κύριες χημικές ενώσεις που περιλαμβάνονται σ' αυτόν είναι τα οξείδια του πυριτίου, αλουμινίου, ασβεστίου, μαγνησίου και σιδήρου. Χρησιμοποιείται για περιπτώσεις θερμομόνωσης και ηχομόνωσης.



Εικόνα 1.4 Πάπλωμα πετροβάμβακα [30]

Για τη δημιουργία του πετροβάμβακα, τα ακατέργαστα υλικά τοποθετούνται σ' έναν κλίβανο όπου τήκονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1400°C. Ως ενεργειακή πηγή στη φάση τήξης των ακατέργαστων υλικών χρησιμοποιείται γαιάνθρακας, ενώ ως πρόσθετη πηγή ενέργειας για την αποτέφρωση των αερίων του καπναγωγού χρησιμοποιείται πετρέλαιο. Σκόνη και μονοξείδιο του άνθρακα κατακρατούνται με ένα σύστημα καθαρισμού των αερίων του καπναγωγού, ενώ ένα μεγάλο μέρος ενέργειας επιστρέφει στη διαδικασία παραγωγής. Η μάζα που παράγεται από τη διαδικασία τήξης στον κλίβανο καταλήγει σε διάταξη που δημιουργεί τις ίνες με μηχανισμό φυγοκέντρισης. Ο μηχανισμός διαλύει τη μάζα σε σταγόνες και διερχόμενος αέρας διασπά τις σταγόνες σε ίνες. Οι ίνες περνάνε μέσα σε ένα θάλαμο συγκέντρωσης και έτσι επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός αρχικού στρώματος μονωτικού υλικού από πετροβάμβακα. Στη συνέχεια, προστίθεται ένας συνδέτης για να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων πλακών πετροβάμβακα. Το αρχικό στρώμα καταλήγει σε ένα σύστημα εναπόθεσης, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία εξαιρετικών μονωτικών χαρακτηριστικών προσδίδοντας μια ομοιόμορφη κατανομή των ινών και υψηλά ποσοστά συνύφανσης. Έτσι, παράγεται

περισσότερος χώρος για τη συγκράτηση του αέρα που είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του μονωτικού υλικού. Η διαδικασία της ξήρανσης και ωρίμανσης, η οποία μαζί με τη στερέωση των ινών παρέχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μονωτικού υλικού, πραγματοποιείται στο θάλαμο ξήρανσης. Η διαδικασία διεξάγεται στους 270°C με εξάτμιση του νερού και ωρίμανση του συνδέτη που είχε προστεθεί σε προηγούμενο στάδιο. Όλα τα απαέρια αποφερώνονται και φιλτράρονται και έτσι κλείνει ο κύκλος της χρήσης των απαερίων.



Εικόνα 1.5 Αρχικό στρώμα πετροβάμβακα πριν το θάλαμο ξήρανσης [31]

Μετά το πέρας της ξήρανσης, φτάνουμε στο τελικό στάδιο της παραγωγής που είναι το κόψιμο των προϊόντων στις απαιτούμενες διαστάσεις, το στοίβαγμα και το πακετάρισμα.



Εικόνα 1.6 Πακετάρισμα πετροβάμβακα [32]

Η πυκνότητα του πετροβάμβακα είναι περίπου 30 kg/m³ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς του κυμαίνεται από 0.033 έως 0.045 W/mK. Στην περίπτωση προσβολής του από υγρασία επηρεάζεται σημαντικά η υψηλή θερμομονωτική του

ικανότητα. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η λήψη μέτρων προστασίας από την υγρασία είτε με την προσθήκη οργανικών ενώσεων του πυριτίου είτε με την τοποθέτηση επικάλυψης φύλλων αλουμινίου ή γύψου. Ακόμη, η θερμομονωτική ικανότητα του πετροβάμβακα επηρεάζεται αρνητικά και από την αυξημένη παρουσία συμπαγών σφαιριδίων τήξης, χρώματος καφέ ή μαύρου που δημιουργούνται παράλληλα με τις επιθυμητές ίνες στη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας.

Σημαντικό είναι ότι ο πετροβάμβακας διαθέτει ιδιαίτερα υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι πρώτες ύλες και τα πρόσθετα στον πετροβάμβακα κατά την παραγωγή λιώνουν σε μεγάλες θερμοκρασίες. Η ανώτερη θερμοκρασία εφαρμογής (750°C) καθορίζει μέχρι ποια θερμοκρασία διατηρεί το μονωτικό υλικό τις ιδιότητές του.

Ο πετροβάμβακας, λοιπόν, βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις όπως: στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, στη μόνωση λεβήτων, σε πόρτες πυρασφάλειας, σε αγωγούς εξαερισμού, στη μόνωση τοιχοποιιών και σωληνώσεων, καθώς και σε περιπτώσεις ακόμα θερμοηχομόνωσης [14].



Εικόνα 1.7 Εφαρμογή πλακών πετροβάμβακα σε δάπεδο [33]

Τέλος, αναφέρουμε κάποια από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του πετροβάμβακα.

Πλεονεκτήματα πετροβάμβακα:

- Είναι άκαυστο υλικό.
- Εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.
- Δε φθείρεται με το χρόνο (διατηρώντας παράλληλα όλες τις ιδιότητές του και τις διαστάσεις του).
- Έχει υψηλές μηχανικές αντοχές σε μεγάλες πυκνότητες.
- Δεν προσβάλλεται από διαλύτες και δεν προσβάλλει τα μέταλλα.
- Δεν προσβάλλεται από έντομα και παράσιτα.
- Είναι άοσμος.

Μειονεκτήματα πετροβάμβακα:

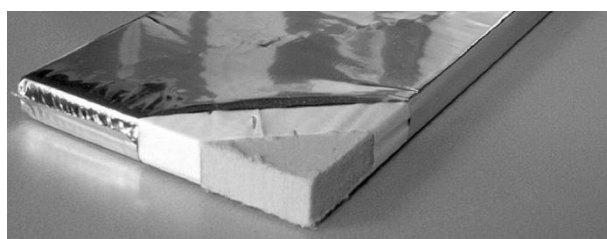
- Επιτρέπει την είσοδο υδρατμών (λόγω της πορώδους φύσης του).
- Μικρή αντοχή σε θραύση και εφελκυσμό.
- Επικίνδυνη και δύσκολη τοποθέτηση.

1.5.3 Υπέρ-μονωτικά υλικά

Για την ενεργειακή βελτίωση των κτιρίων, οι βιομηχανίες έχουν προχωρήσει στην ανάπτυξη - πέραν των συμβατικών μονωτικών υλικών - μιας νέας γενιάς μονωτικών υλικών, τα οποία ονομάζονται υπέρ-μονωτικά υλικά (super insulation materials - SIM) με θερμική αγωγιμότητα μικρότερη των 0.025 W/mK [13].

1.5.3.1 Μονωτικά πάνελ κενού (VIPs)

Ένα από τα υλικά αυτά είναι τα μονωτικά πάνελ κενού (Vacuum Insulation Panels ή VIPs), τα οποία παρέχουν πολύ καλή θερμική μόνωση έχοντας ελάχιστο πάχος. Σε σύγκριση με τα συνήθη συμβατικά μονωτικά υλικά, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται κατά δέκα περίπου φορές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, είτε την επίτευξη μεγαλύτερης θερμικής αντίστασης για το ίδιο πάχος μόνωσης, είτε τη χρήση μικρότερου πάχους μόνωσης για την επίτευξη της ίδιας θερμικής αντίστασης. Με λίγα λόγια, λοιπόν, επιτυγχάνεται μέγιστη θερμική μόνωση με το μικρότερο δυνατό πάχος μονωτικού υλικού.



Εικόνα 1.8 VIP σε τομή [34]

Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνεται με την παντελή έλλειψη αέρα (δημιουργία κενού). Όμως, κατά τη δημιουργία των πάνελ παρουσιάζεται το πρόβλημα της υψηλής πίεσης εξαιτίας του επίπεδου σχήματος που έχουν. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός ιδιαίτερα λεπτού υλικού (υπό μορφή αφρού, σκόνης ή ινών) που παρεμβάλλεται μεταξύ των επιφανειών, με νανοπορώδες που αγγίζει τα 100 nm. Συνεπώς, μια σχετικά μικρή πίεση είναι ικανή πλέον να εκκενώσει τον αέρα κάνοντας εφικτή την κατασκευή πάνελ κενού και τη χρήση τους σε διάφορες κατασκευές. Δημιουργώντας αυτό το κενό, ουσιαστικά

εξαλείφεται η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στο εσωτερικό του μονωτή, αφού εξαρτάται από την παρουσία των μορίων του αερίου. Επίσης, οι συνθήκες κενού μειώνουν σημαντικά την αγωγή της θερμότητας, καθώς υπάρχουν πολύ λιγότερες συγκρούσεις μεταξύ των γειτονικών μορίων του αερίου ή του αερίου και των ατόμων του υλικού του πυρήνα. Το πάχος αυτών των πάνελ κυμαίνεται από 2 mm έως 4 mm.

Τα επιμέρους στοιχεία ενός μονωτικού πάνελ κενού είναι:

- ❖ το εξωτερικό αεροστεγές περίβλημα
- ❖ το ενδιάμεσο κάλυμμα του πυρήνα
- ❖ ο πεπιεσμένος πυρήνας πυριτίου

Τα μονωτικά αυτά πάνελ κατασκευάζονται ως εξής: Ένας περιβάλλον σκελετός, υπό μορφή φακέλου, κατασκευασμένος από πλαστικό (συνήθως καλύπτεται από αλουμίνιο) ή από ανοξείδωτο ατσάλι περιέχει το υλικό πλήρωσης σε κενό. Το υλικό πλήρωσης έχει τη μορφή αφρού, σκόνης ή ινών και πρέπει πάντα να είναι πορώδες, να αντιστέκεται στην πίεση και να μπορεί να εκκενωθεί. Τα άκρα σφραγίζονται ερμητικά, τυλίγονται προς το εσωτερικό του φακέλου και κολλάνε σ' αυτόν.



Εικόνα 1.9 Μηχανή παραγωγής VIP [35]

Κατά την κατασκευή πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές παράμετροι. Συγκεκριμένα, πρέπει πάντα να διατηρούνται σταθερές διαστάσεις κατά την κατασκευή των πάνελ ή τουλάχιστον όποτε αυτό είναι εφικτό, καθώς σε αντίθετη περίπτωση, λόγω των ιδιαίτερων τεχνικών κατασκευής το κόστος γίνεται αρκετά υψηλό. Για τη σωστή λειτουργία των πάνελ πρέπει το περίβλημα του φακέλου (που περιέχει το κενό) να μην έχει τρύπες. Αυτό σημαίνει πως τα πάνελ δεν μπορούν να κοπούν, ώστε να μεταβληθεί το μέγεθός τους. Για περιοχές που παραμένουν ανοικτές ή για άλλες που διαπερνούν για οποιοδήποτε λόγο το μονωτικό υλικό, χρησιμοποιείται συνήθως συνδυασμός πάνελ διαφορετικών μεγεθών. Ιδιαίτερη

σημασία πρέπει επίσης να δίνεται και κατά την τοποθέτηση των πάνελ για να μη μένουν κενά που μπορεί να λειτουργήσουν ως θερμογέφυρες [18].

Το υλικό ενός πυρήνα VIP έχει παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά για υλικά που χρησιμοποιούνται στη συμβατή μόνωση. Αφαιρώντας τον αέρα, επιτυγχάνεται μια πολύ χαμηλότερη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τη συμβατή μόνωση, δηλαδή υψηλότερη θερμική αντίσταση ανά μονάδα πάχους. Τυπικά VIPs έχουν επιτευχθεί με θερμική αγωγιμότητα 0.004 W/mK στο κέντρο του πάνελ, ενώ αν συμπεριληφθούν και οι θερμογέφυρες που δημιουργούνται στις επιφάνειες εξαιτίας του περιβλήματος, η ενεργός τιμή κυμαίνεται από 0.006 έως 0.008 W/mK . Η διαφορά αυτής της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των VIPs και των συμβατικών μονωτικών σημαίνει ότι τα VIPs έχουν περίπου το ένα πέμπτο της θερμικής αγωγιμότητας με τη συμβατή μόνωση και ως εκ τούτου περίπου πέντε φορές τη θερμική αντίσταση ανά μονάδα πάχους. Για μια τυπική τιμή θερμικής αγωγιμότητας (0.007 W/mK), ένα VIP πάχους 25 mm είναι ισοδύναμο με 154 mm πετροβάμβακα [6].



Εικόνα 1.10 Γραμμή παραγωγής VIPs [36]

Τα μονωτικά πάνελ κενού υπάρχουν από το 1950, αλλά το υψηλό κόστος κατασκευής τους έκανε αδύνατη τη χρήση στις κατασκευές. Κατά τη δεκαετία του '90, τα VIPs εισήχθησαν στη βιομηχανία της ψύξης στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ευρώπη. Στη συνέχεια, τα VIPs βρήκαν οικοδομικές εφαρμογές στις αρχές του 21ου αιώνα στην Ευρώπη και τώρα εξαπλώνεται στην Ανατολική Ασία και τη Βόρεια Αμερική [5]. Σήμερα, η εκτεταμένη έρευνα έχει οδηγήσει στη σημαντική μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής, λόγω και της χρήσης νέων υλικών. Ο χρόνος ζωής των πάνελ κυμαίνεται σήμερα μεταξύ 20 και 50 χρόνων, ενώ κάποια υλικά εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερη αντοχή. Η σημαντική αυτή βελτίωση οφείλεται στη μεγάλη αντοχή του περιβάλλοντος υλικού, στο βαθμό του κενού στο εσωτερικό, στον τρόπο σφράγισης του φακέλου και επιπλέον στον τρόπο εγκατάστασης των πάνελ κατά την κατασκευή. Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως τα μονωτικά πάνελ κενού μπορούν να ανακυκλωθούν.

1.5.3.2 Αερογέλη (Aerogel)

Πρόκειται για ένα νέο υλικό που εμφανίζει υψηλές αποδόσεις, τόσο θερμικής μόνωσης όσο και ηχητικής. Είναι το πιο ελαφρύ στερεό υλικό. Το ζελέ αυτό είναι σφαιρικό, κοκκώδες και με γαλακτώδη υφή, ημιδιαφανές και έχει τη μορφή νέφους. Δεν είναι τίποτε άλλο από έναν αεριούχο αφρό που αποτελείται σχεδόν από 100% αέρα (η ακριβής περιεκτικότητα κυμαίνεται από 95% έως 99.9%).



Εικόνα 1.11 Πλάκα μονωτικού υλικού aerogel [37]

Ιδιαίτερης σημασίας για την ποιότητα του τζελ είναι οι νανοδιαστάσεις των πόρων (μεγέθους 20 nm) που σχηματίζονται, καθώς σε αυτούς παγιδεύονται τα μόρια αέρα, τα οποία αδυνατώντας να κινηθούν δίνουν στο υλικό τις άριστες θερμομονωτικές ιδιότητές του. Η πολύ υψηλή θερμική αντίσταση που εμφανίζει φαίνεται στον πολύ χαμηλό θερμικό συντελεστή του υλικού που φτάνει τα 0.018 W/mK. Πέρα από την απώλεια θερμότητας σε κρύες περιοχές (φαινόμενο "κρύου τοίχου"), εμποδίζεται η εισροή θερμότητας από έξω (σε ζεστά κλίματα). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η αερογέλη να λειτουργεί καταλυτικά στη μείωση του κόστους - θέρμανσης των χώρων. Χρησιμοποιείται σαν υλικό πλήρωσης σε διαφόρων τύπων κενά, όπως υαλοπίνακες, κ.λπ.

Λόγω της ιδιότητάς του ως ημιδιαφανές υλικό, επιτρέπει την πολύ καλή διάδοση του φωτός και επιπλέον βοηθά στη σωστή κατανομή του στο χώρο. Το άπλετο φως μετατρέπεται σε απαλό χωρίς λάμψη, με αποτέλεσμα υλικά που χρησιμοποιούνται για δημιουργία σκιάς να καθίστανται πλέον άχρηστα και ακόμα να μη γίνεται χρήση τεχνητού φωτός κατά τη διάρκεια της μέρας. Η ομοιόμορφη κατανομή του φωτός είναι και η αιτία του φαινομένου κατά τις σκοτεινές μέρες, όπου το εσωτερικό του κτιρίου μοιάζει πιο φωτεινό από το εξωτερικό περιβάλλον. Οι ακτίνες UV δε χρωματίζουν το υλικό. Τέλος, λόγω της υδρόφοβης ιδιότητάς του εμποδίζει τη διάδοση υγρασίας.

Η αερογέλη, λοιπόν, με τις πολύ καλές θερμικές της ιδιότητες βοηθά σήμερα σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας στις κατασκευές. Επιπλέον, επιτρέπει την καλή κατανομή του φωτός τη μέρα και λόγω του μικρού βάρους που έχει είναι ιδιαίτερα ευέλικτο κατά τις διάφορες χρήσεις του [18].



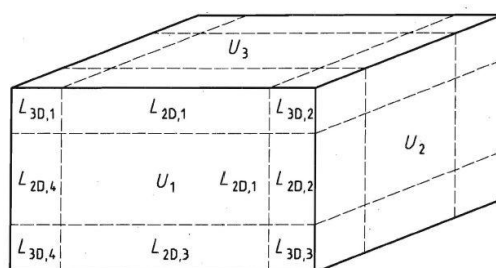
Εικόνα 1.12 Λόγω των πολύ καλών θερμομονωτικών ιδιοτήτων του aerogel το ανθρώπινο χέρι δεν καίγεται [38]

1.6 Διάρθρωση διπλωματικής

Αρχικά, στη διπλωματική αυτή, παρουσιάσαμε τον κανονισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων με τον οποίο θεσμοθετείται ο ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός στον κτιριακό τομέα και τις βασικότερες ρυθμίσεις του, καθώς και τη σημασία της θερμομόνωσης στα κτιριακά συγκροτήματα. Στη συνέχεια, παρουσιάσαμε τις κατηγορίες των θερμογεφυρών που αντιμετωπίζουμε κατά τη θερμομόνωση, αλλά και τα θερμομονωτικά υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, όπως το μονωτικό πάνελ κενού (VIP) και η αερογέλη. Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζουμε τη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης κτιρίου, διαχωρίζοντας το κτίριο σε 1-D, 2-D και 3-D γεωμετρικά μοντέλα, ώστε να υπολογίσουμε το συντελεστή θερμοπερατότητας (U) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ), σύμφωνα με το ISO 10211:2007. Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι γεωμετρίες των κεντρικών τοιχοποιιών και των συνδέσεων αυτών του κτιρίου ELISSA, καθώς και τα υλικά που τοποθετήθηκαν στις τοιχοποιίες. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης των τοιχοποιιών του κτιρίου, όπου φαίνονται αναλυτικά οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν και το πλέγμα όλων των περιπτώσεων. Ακόμη, φαίνονται οι καμπύλες θερμοκρασίας εσωτερικά των τοιχοποιιών για κάθε περίπτωση. Στο κεφάλαιο 5, υπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας του κτιρίου ELISSA (αναλυτικά), με αλλά και χωρίς την παρουσία των υπέρ-μονωτικών υλικών. Τέλος, παρουσιάζονται όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Η μεθοδολογία για την αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του κτιρίου βασίζεται στη μεθοδολογία που προτείνεται στο πρότυπο ISO 10211:2007. Η βασική ιδέα αυτής της μεθοδολογίας είναι ο διαχωρισμός του κτιρίου σε 1-D, 2-D και 3-D γεωμετρικά μοντέλα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1. Το γεωμετρικό μοντέλο 1-D αντιπροσωπεύει το κέντρο της τοιχοποιίας, ενώ τα 2-D και 3-D γεωμετρικά μοντέλα αντιπροσωπεύουν τις 2-D και 3-D συνδέσεις ενός συγκεκριμένου τοιχώματος, αντίστοιχα (π.χ. εξωτερικός τοίχος και πάτωμα, εξωτερικός τοίχος και εσωτερικός τοίχος και ταβάνι, κλπ) [8].



Εικόνα 2.1 Διαχωρισμός κτιρίου σε 1-D, 2-D και 3-D γεωμετρικά μοντέλα

Μετά το διαχωρισμό του κτιρίου, ο συνολικός συντελεστής θερμικής σύζευξης, L_{3D} , μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 2.1:

$$L_{3D} = \sum_{k=1}^{N_k} U_k A_k + \sum_{m=1}^{N_m} L_{2D,m} l_m + \sum_{n=1}^{N_n} L_{3D,n}$$

Εξίσωση 2.1

όπου:

$L_{3D,n}$ ο συντελεστής θερμικής σύζευξης που λαμβάνεται από έναν 3-D υπολογισμό για την πλευρά n του κτιρίου

$L_{2D,m}$ ο συντελεστής θερμικής σύζευξης που λαμβάνεται από έναν 2-D υπολογισμό για την πλευρά m του κτιρίου

l_m το μήκος κατά το οποίο εφαρμόζεται το μέγεθος $L_{2D,m}$

- U_k ο συντελεστής θερμοπερατότητας που λαμβάνεται με υπολογισμό στο κέντρο της τοιχοποιίας για την πλευρά k του κτιρίου
- A_k η περιοχή πάνω στην οποία εφαρμόζεται το U_k
- N_n ο συνολικός αριθμός των 3-D τμημάτων
- N_m ο συνολικός αριθμός των 2-D τμημάτων
- N_k ο συνολικός αριθμός των κεντρικών τοιχοποιιών

Η εξίσωση 2.1 μπορεί να ξαναγραφεί με όρους τους συντελεστές της γραμμικής και σημειακής θερμοπερατότητας, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.2:

$$L_{3D} = \sum_{k=1}^{N_k} U_k A_k + \sum_{m=1}^{N_m} \Psi_m l_m + \sum_{n=1}^{N_n} \chi_n$$

Εξίσωση 2.2

όπου:

- U_k ο συντελεστής θερμοπερατότητας των τμημάτων k του κτιρίου (κέντρο των τοιχοποιιών)
- A_k η περιοχή πάνω στην οποία εφαρμόζεται το U_k
- Ψ_m ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας των τμημάτων m του κτιρίου
- l_m το μήκος πάνω στο οποίο εφαρμόζεται το Ψ_m
- χ_n ο συντελεστής σημειακής θερμοπερατότητας των τμημάτων n του κτιρίου
- N_n ο συνολικός αριθμός των 3-D τμημάτων
- N_m ο συνολικός αριθμός των 2-D τμημάτων
- N_k ο συνολικός αριθμός των κεντρικών τοιχοποιιών

Σύμφωνα με την εξίσωση 2.2, προκειμένου να υπολογίσουμε το συνολικό συντελεστή θερμικής σύζευξης, θα πρέπει να υπολογίσουμε τις επιμέρους θερμοπερατότητες για κάθε γεωμετρικό μοντέλο. Οι υπολογισμοί αυτοί μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με πρότυπες μεθοδολογίες ή με προσομοιώσεις στο ANSYS. Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας των κεντρικών τοιχοποιιών, καθώς και του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας περιγράφεται παρακάτω.

2.1 Υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας του κεντρικού μέρους των τοιχοποιιών

Η εικόνα 2.2 απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα του κεντρικού τμήματος μιας τυπικής τοιχοποιίας, συμπεριλαμβανομένου ενός ορθοστάτη (ατσάλι). Είναι γνωστό ότι ο ορθοστάτης δημιουργεί μια σημαντική θερμογέφυρα, η οποία πρέπει να αξιολογείται. Υποθέτοντας ότι το Φ_l είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας ανά μέτρο μήκους, που υπολογίζεται από 2-D προσομοιώσεις στο CFX, ο συντελεστής θερμικής σύζευξης, L_{2D} , αυτού του στοιχείου υπολογίζεται από την εξίσωση 2.3:

$$L_{2D} = \frac{\Phi_l}{(T_i - T_e)}$$

Εξίσωση 2.3

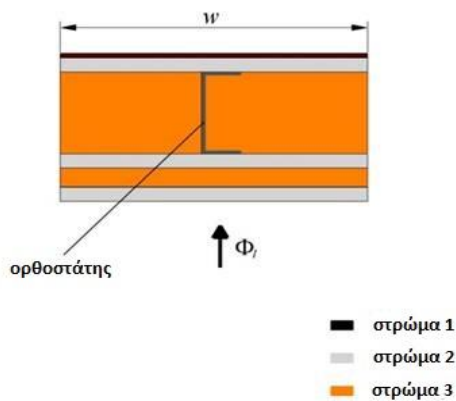
όπου:

L_{2D} ο συντελεστής θερμικής σύζευξης που λαμβάνεται από έναν 2-D υπολογισμό

Φ_l ο ρυθμός ροής θερμότητας ανά μέτρο μήκους που ορίζεται από έναν 2-D υπολογισμό

T_i η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου

T_e η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος



Εικόνα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα μιας τυπικής κεντρικής τοιχοποιίας

Ο ρυθμός ροής θερμότητας ανά μέτρο μήκους μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 2.4, όπου το Q_{2D} είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας που υπολογίζεται με 2-D υπολογισμούς (CFX), ενώ το H αναφέρεται στην τρίτη διάσταση, δηλαδή το ύψος της διαμόρφωσης.

$$\Phi_l = \frac{Q_{2D}}{H}$$

Εξίσωση 2.4

Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας, λόγω της παρουσίας του ορθοστάτη και της γραμμικής θερμογέφυρας ορίζεται από την εξίσωση 2.5:

$$\Psi = L_{2D} - U_{1D} \times w$$

Εξίσωση 2.5

όπου:

Ψ ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας

L_{2D} ο συντελεστής θερμικής σύζευξης που λαμβάνεται από έναν 2-D υπολογισμό

U_{1D} ο συντελεστής θερμοπερατότητας του καθαρού τοίχου (δηλαδή, χωρίς την επίδραση του ορθοστάτη)

w το μήκος πάνω στο οποίο εφαρμόζεται το U_{1D}

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας, U_k , του τμήματος k του κτιρίου υπολογίζεται από την εξίσωση 2.6:

$$U_k = U_{1D,k} + \frac{\Psi_k \times l_k}{A_k}$$

Εξίσωση 2.6

όπου:

U_k ο συντελεστής θερμοπερατότητας του τμήματος k του κτιρίου (κέντρο της τοιχοποιίας)

$U_{1D,k}$ ο συντελεστής θερμοπερατότητας του καθαρού τοίχου του τμήματος k του κτιρίου (δηλαδή, χωρίς την επίδραση του ορθοστάτη)

Ψ_k ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας λόγω των γραμμικών θερμογεφυρών του τμήματος k του κτιρίου

l_k το συνολικό μήκος των θερμογεφυρών (συνολικό μήκος των ορθοστατών)

A_k η περιοχή πάνω στην οποία εφαρμόζεται το U_k

Η εξίσωση 2.6 μπορεί να ξαναγραφεί με την παρακάτω μορφή:

$$U_k A_k = U_{1D,k} A_k + \Psi_k \times l_k$$

Εξίσωση 2.7

2.2 Υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας

Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας, Ψ , αφορά τις 2-D γεωμετρίες και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 2.8:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j$$

Εξίσωση 2.8

όπου:

L_{2D} ο συντελεστής θερμικής σύζευξης που λαμβάνεται από έναν 2-D υπολογισμό του μέρους που διαχωρίζει τους δύο περιβάλλοντες χώρους που εξετάζουμε

U_j ο συντελεστής θερμοπερατότητας του καθαρού τμήματος 1-D, j, της σύνδεσης

l_j το μήκος πάνω στο οποίο εφαρμόζεται το U_j

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο συντελεστής θερμικής σύζευξης που λαμβάνεται από έναν 2-D υπολογισμό, αξιολογείται από την εξίσωση 2.9:

$$L_{2D} = \frac{\Phi_l}{\Delta T}$$

Εξίσωση 2.9

όπου:

Φ_l ο ρυθμός ροής θερμότητας ανά μέτρο μήκους που ορίζεται από έναν 2-D υπολογισμό

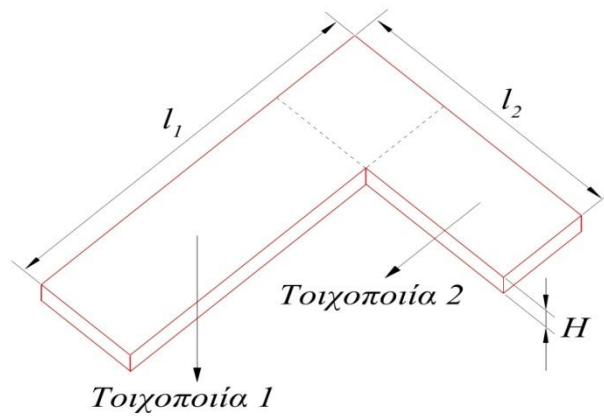
ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στους δύο περιβάλλοντες χώρους που εξετάζουμε

Ο ρυθμός ροής θερμότητας ανά μέτρο μήκους υπολογίζεται από την εξίσωση 2.10, όπου το Q_{2D} είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας που υπολογίζεται με 2-D υπολογισμούς (CFX), ενώ το H αναφέρεται στην τρίτη διάσταση, δηλαδή το ύψος της διαμόρφωσης.

$$\Phi_l = \frac{Q_{2D}}{H}$$

Εξίσωση 2.10

Το επόμενο παράδειγμα μας δείχνει πως υπολογίζεται ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας. Η εικόνα 2.3 απεικονίζει ένα τυπικό παράδειγμα μιας διδιάστατης σύνδεσης ανάμεσα σε δύο τοιχοποιίες (π.χ. τοιχοποιία 1 και τοιχοποιία 2, αντίστοιχα).



Εικόνα 2.3

Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του συγκεκριμένου παραδείγματος υπολογίζεται (σύμφωνα με την εξίσωση 2.8) από την εξίσωση 2.11:

$$\Psi = L_{2D} - U_1 l_1 - U_2 l_2$$

Εξίσωση 2.11

όπου τα U_1 και U_2 είναι οι συντελεστές θερμοπερατότητας των καθαρών τοιχοποιιών 1 και 2 (δηλ. χωρίς την επίδραση των ορθοστατών), αντίστοιχα, ενώ τα l_1 και l_2 είναι τα μήκη που φαίνονται στην εικόνα 2.3.

3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ELISSA

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της θερμικής απόδοσης κτιρίου (που περιγράφεται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο), εφαρμόστηκε στο κτίριο ELISSA.

3.1 Ορισμός της γεωμετρίας των τοιχοποιιών

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση των θερμογεφυρών στη συνολική απόδοση της κατασκευής, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το κτίριο ELISSA αναλύθηκε σε όλες τις επιμέρους τοιχοποιίες και τις συνδέσεις μεταξύ αυτών των τοιχοποιιών. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι τοιχοποιίες και οι συνδέσεις αυτών, καθώς και η διαμόρφωσή τους.

Πίνακας 3.1 Επιμέρους τοιχοποιίες για τη διαμόρφωση του κτιρίου ELISSA

Τοιχοποιίες	Συντομογραφία	Διαμόρφωση
Εξωτερικός τοίχος	EW	χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP
		με ορθοστάτες-χωρίς VIP
		χωρίς ορθοστάτες-με VIP
		με ορθοστάτες-με VIP
Εσωτερικός τοίχος	IW	<i>δε διαχωρίζει διαφορετικές θερμικές ζώνες</i>
Οροφή	RF	χωρίς ορθοστάτες-με κοιλότητα αέρα
		με ορθοστάτες-με κοιλότητα αέρα
		χωρίς ορθοστάτες-με πετροβάμβακα
		με ορθοστάτες- με πετροβάμβακα
		χωρίς ορθοστάτες-με αερογέλη
		με ορθοστάτες-με αερογέλη
Ταβάνι	CL	<i>δε διαχωρίζει διαφορετικές θερμικές ζώνες</i>
Πάτωμα	FL	χωρίς ορθοστάτες
		με ορθοστάτες

Πίνακας 3.2 Συνδέσεις των επιμέρους τοιχοποιών του κτιρίου ELISSA

Συνδέσεις	Συντομογραφία	Διαμόρφωση
Εξωτερικός τοίχος- Εξωτερικός τοίχος	EW-EW	χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP
		με ορθοστάτες-χωρίς VIP
		χωρίς ορθοστάτες-με VIP
		με ορθοστάτες-με VIP
Εξωτερικός τοίχος- Εσωτερικός τοίχος	EW-IW	χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP
		με ορθοστάτες-χωρίς VIP
		χωρίς ορθοστάτες-με VIP
		με ορθοστάτες-με VIP
Εξωτερικός τοίχος- Πάτωμα	EW-FL	χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP
		με ορθοστάτες-χωρίς VIP
		χωρίς ορθοστάτες-με VIP
		με ορθοστάτες-με VIP
Εξωτερικός τοίχος- Ταβάνι	EW-CL	χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP
		με ορθοστάτες-χωρίς VIP
		χωρίς ορθοστάτες-με VIP
		με ορθοστάτες-με VIP
Εξωτερικός τοίχος- Οροφή	EW-RF	χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP/με κοιλότητα αέρα
		με ορθοστάτες-χωρίς VIP/με κοιλότητα αέρα
		χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP/με πετροβάμβακα
		με ορθοστάτες-χωρίς VIP/με πετροβάμβακα
		χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP/με αερογέλη με ορθοστάτες-χωρίς VIP/με αερογέλη
		χωρίς ορθοστάτες-με VIP/με κοιλότητα αέρα
		με ορθοστάτες-με VIP/με κοιλότητα αέρα χωρίς ορθοστάτες-με VIP/με πετροβάμβακα
		με ορθοστάτες-με VIP/με πετροβάμβακα χωρίς ορθοστάτες-με VIP/με αερογέλη
		με ορθοστάτες-με VIP/με αερογέλη με ορθοστάτες-με VIP/με αερογέλη
		χωρίς ορθοστάτες
με ορθοστάτες		
Εσωτερικός τοίχος- Πάτωμα	IW-FL	
Εσωτερικός τοίχος- Ταβάνι	IW-CL	<i>δε διαχωρίζει διαφορετικές θερμικές ζώνες</i>
Εσωτερικός τοίχος- Οροφή	IW-RF	χωρίς ορθοστάτες-με κοιλότητα αέρα
		με ορθοστάτες-με κοιλότητα αέρα
		χωρίς ορθοστάτες-με πετροβάμβακα
		με ορθοστάτες- με πετροβάμβακα
		χωρίς ορθοστάτες-με αερογέλη με ορθοστάτες-με αερογέλη

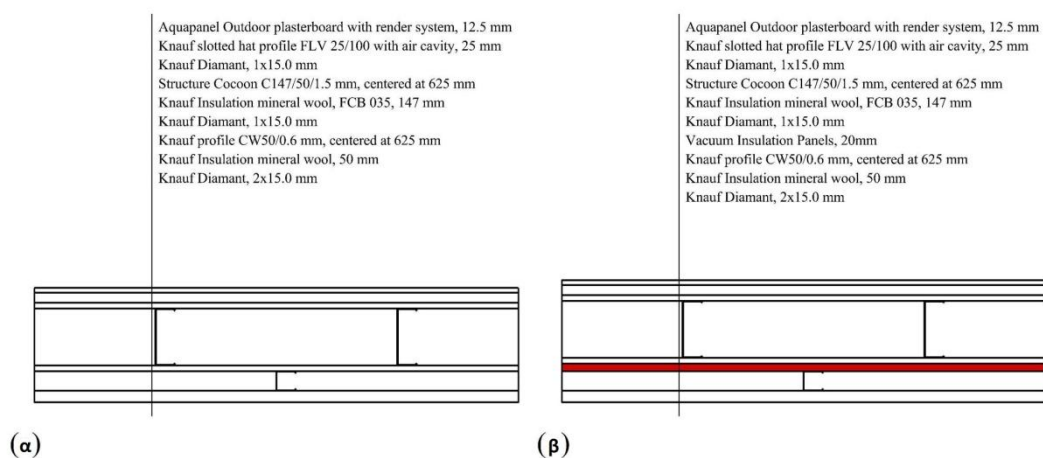
Τα σχέδια για τις τοιχοποιίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως στους παραπάνω πίνακες απεικονίζονται στην επόμενη ενότητα.

3.1.1 Κεντρικό μέρος των τοιχοποιιών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται σχηματικά διαγράμματα των επιμέρους τοιχοποιιών, όπως ο εξωτερικός τοίχος, το πάτωμα και η οροφή (δεν απεικονίζονται ο εσωτερικός τοίχος και το ταβάνι, γιατί δε διαχωρίζουν διαφορετικές θερμικές ζώνες).

3.1.1.1 Εξωτερικός τοίχος

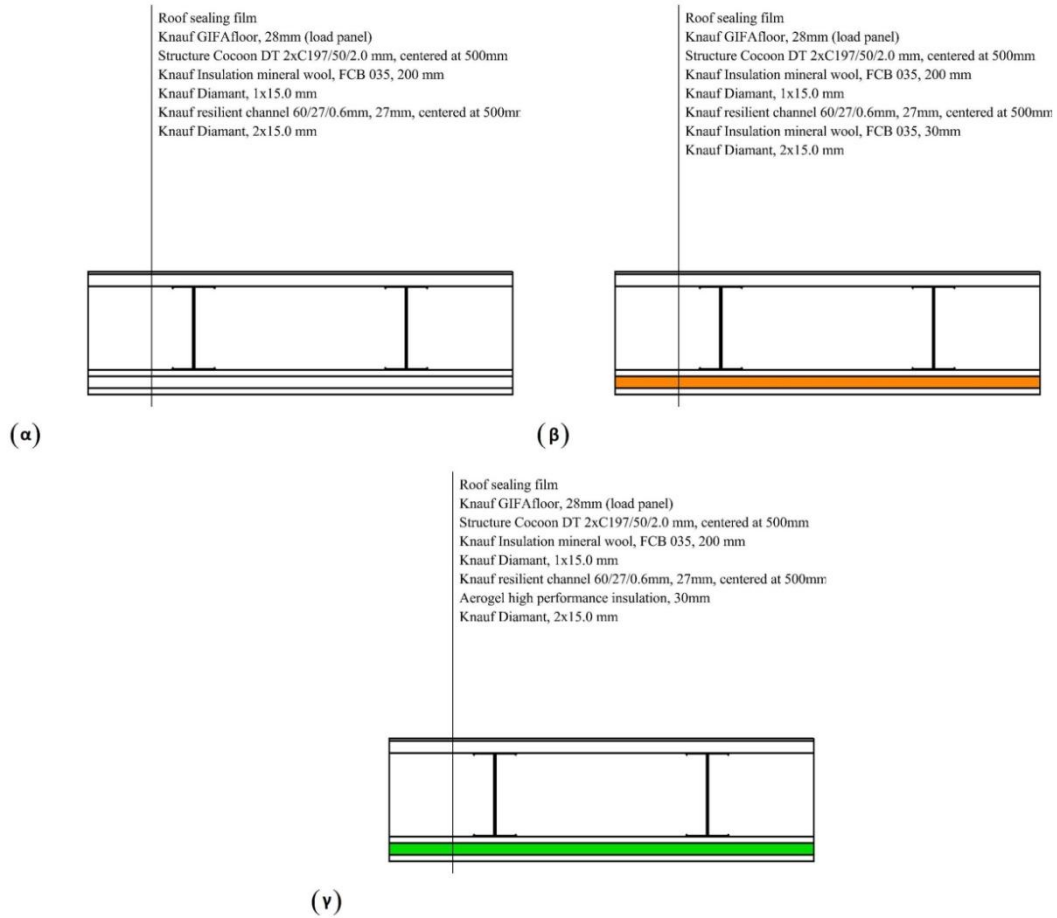
Η εικόνα 3.1 απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα της διαμόρφωσης του εξωτερικού τοίχου. Όπως φαίνεται, η διαφορά μεταξύ της εικόνας 3.1α και της 3.1β είναι ότι η διαμόρφωση του τοίχου στην εικόνα 3.1β περιλαμβάνει ένα επιπλέον στρώμα μόνωσης με υλικό VIP πάχους 20 χιλιοστών (20mm), προκειμένου να μειωθεί η επίδραση των θερμογεφυρών που εισάγονται από τους μεταλλικούς ορθοστάτες.



Εικόνα 3.1 Σχηματικό διάγραμμα της διαμόρφωσης του εξωτερικού τοίχου: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP (κόκκινο στρώμα)

3.1.1.2 Οροφή

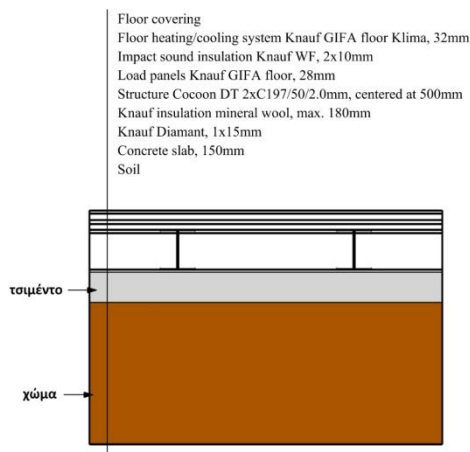
Η εικόνα 3.2 απεικονίζει το σχηματικό διάγραμμα της διαμόρφωσης της οροφής. Όπως φαίνεται, και στις τρεις περιπτώσεις έχουμε την ίδια διαμόρφωση, με τη μόνη διαφορά ότι εμφανίζεται διαφορετικό μονωτικό υλικό, όσο αναφορά ένα συγκεκριμένο στρώμα της τοιχοποιίας (resilient channel): στη 3.2α υπάρχει αέρας, στη 3.2β πετροβάμβακας, ενώ στη 3.2γ αερογέλη.



Εικόνα 3.2 Σχηματικό διάγραμμα της διαμόρφωσης της οροφής: (α) με αέρα, (β) με πετροβάμβακα (πορτοκαλί στρώμα) και (γ) με αερογέλι (πράσινο στρώμα)

3.1.1.3 Πάτωμα

Η εικόνα 3.3 απεικονίζει το σχηματικό διάγραμμα της διαμόρφωσης του πατώματος. Όπως φαίνεται, το μέγιστο αποδεκτό πάχος για μόνωση με πετροβάμβακα στο εσωτερικό της κοιλότητας είναι 180 χιλιοστά.



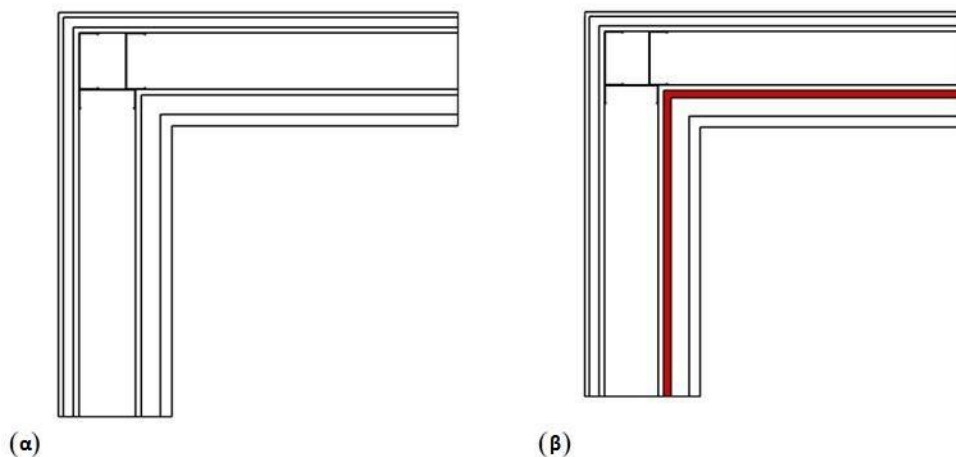
Εικόνα 3.3 Σχηματικό διάγραμμα της διαμόρφωσης του πατώματος

3.1.2 Συνδέσεις των επιμέρους τοιχοποιιών

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των σχηματικών διαγραμμάτων των συνδέσεων (2-D) των επιμέρους τοιχοποιιών του κτιρίου (π.χ. εξωτερικός τοίχος - εξωτερικός τοίχος, εσωτερικός τοίχος - πάτωμα, κλπ).

3.1.2.1 Εξωτερικός τοίχος - Εξωτερικός τοίχος

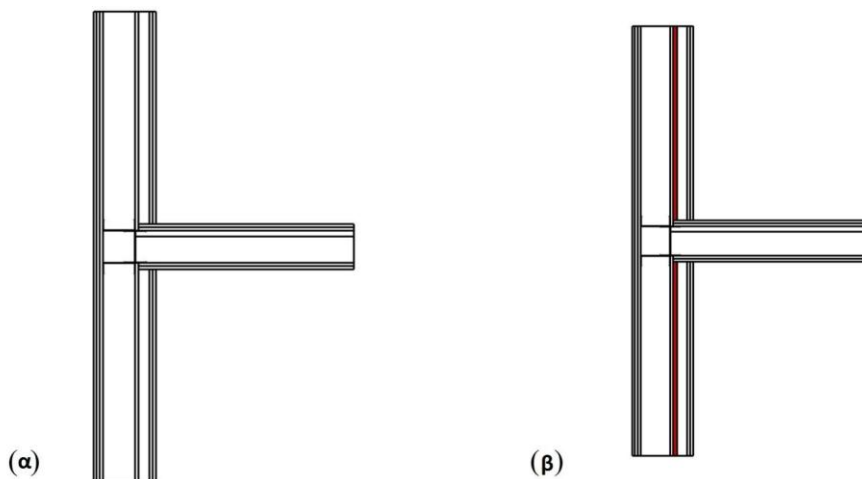
Η εικόνα 3.4 απεικονίζει τη σύνδεση ανάμεσα σε δύο εξωτερικούς τοίχους. Η διαφορά ανάμεσα στις εικόνες 3.4α και 3.4β είναι ότι στη μεν 3.4α δεν υπάρχει μονωτικό υλικό VIP στους δύο εξωτερικούς τοίχους, ενώ στην 3.4β χρησιμοποιείται VIP και στους δύο εξωτερικούς τοίχους.



Εικόνα 3.4 Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης εξωτερικού με εξωτερικό τοίχο: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP (κόκκινο στρώμα)

3.1.2.2 Εξωτερικός τοίχος - Εσωτερικός τοίχος

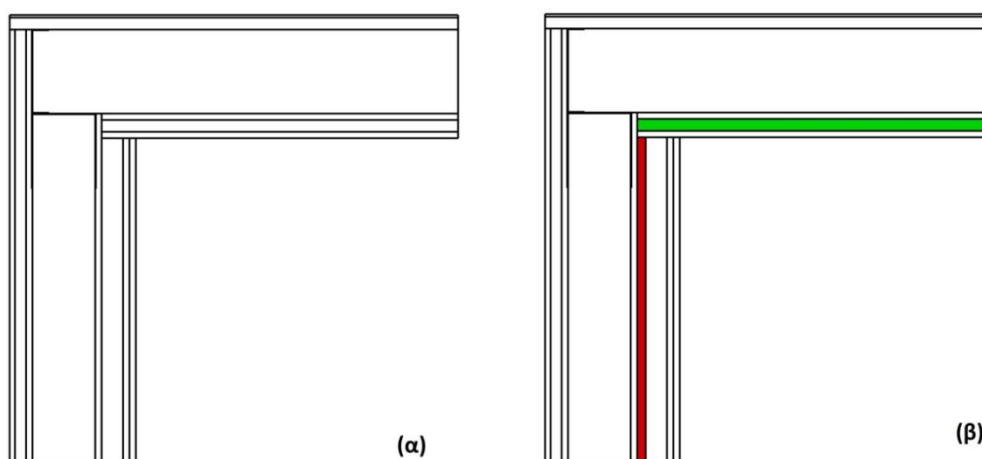
Η εικόνα 3.5 απεικονίζει τη σύνδεση μεταξύ ενός εξωτερικού και ενός εσωτερικού τοίχου, χωρίς (εικόνα 3.5α) και με (εικόνα 3.5β) την παρουσία μονωτικού υλικού VIP.



Εικόνα 3.5 Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης εξωτερικού με εσωτερικό τοίχο: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP (κόκκινο στρώμα)

3.1.2.3 Εξωτερικός τοίχος - Οροφή

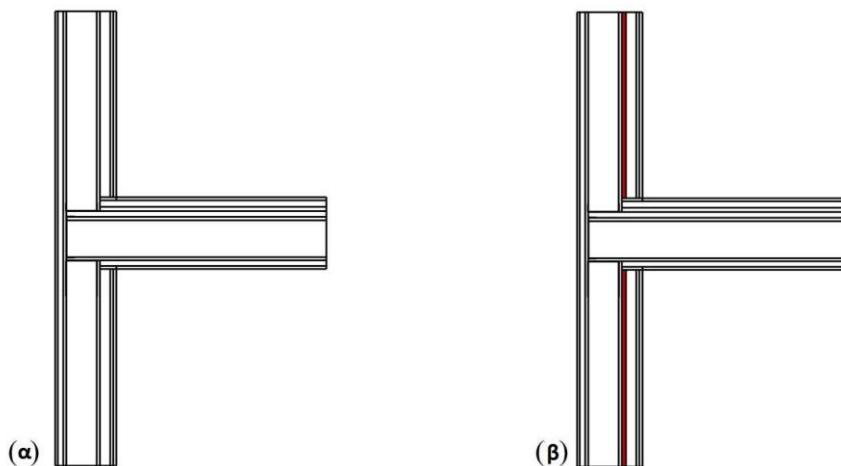
Η εικόνα 3.6 απεικονίζει τη σύνδεση μεταξύ ενός εξωτερικού τοίχου και της οροφής. Στην 3.6α, ο εξωτερικός τοίχος παρουσιάζεται χωρίς VIP και το resilient channel της οροφής με αέρα, ενώ στην 3.6β, ο εξωτερικός τοίχος με VIP και το resilient channel της οροφής με πετροβάμβακα ή αερογέλη.



Εικόνα 3.6 Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου με την οροφή: (α) χωρίς VIP και άδειο resilient channel και (β) με VIP (κόκκινο στρώμα) και πετροβάμβακα ή αερογέλη στο resilient channel (πράσινο στρώμα)

3.1.2.4 Εξωτερικός τοίχος - Ταβάνι

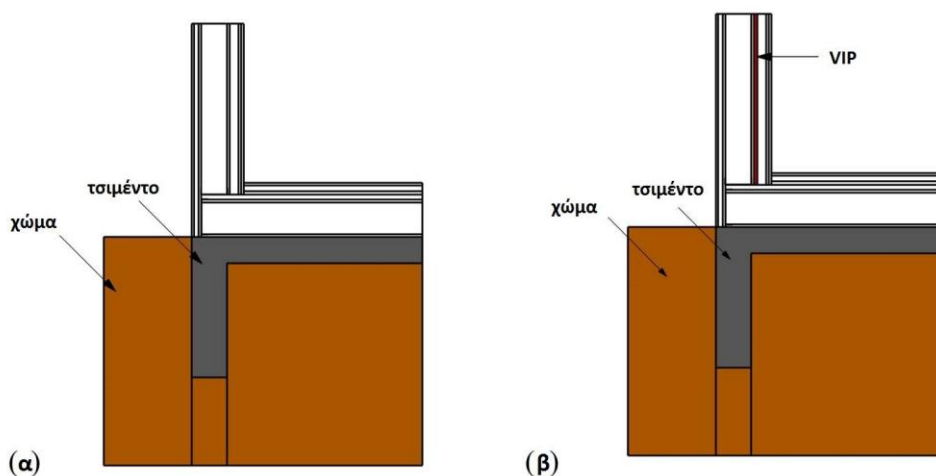
Η εικόνα 3.7 απεικονίζει τη σύνδεση μεταξύ ενός εξωτερικού τοίχου και του ταβανιού, χωρίς (εικόνα 3.7α) και με (εικόνα 3.7β) την παρουσία μονωτικού υλικού VIP.



Εικόνα 3.7 Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου με το ταβάνι: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP (κόκκινο στρώμα)

3.1.2.5 Εξωτερικός τοίχος - Πάτωμα

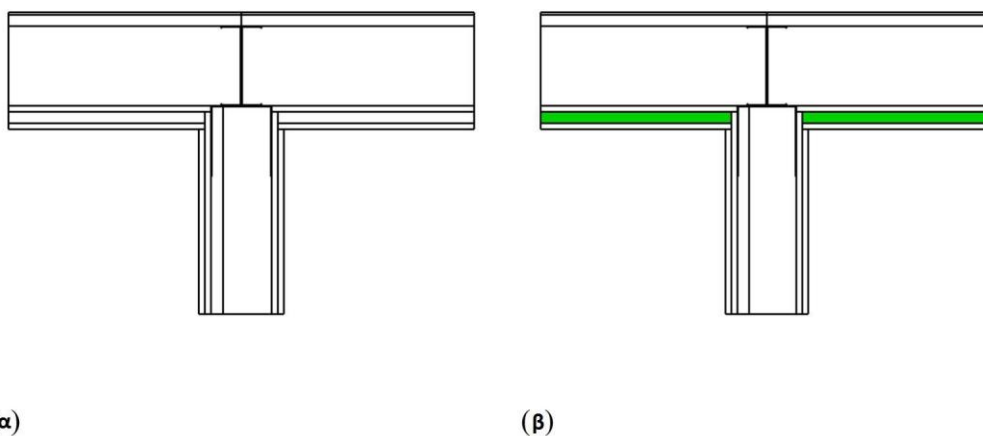
Η εικόνα 3.8 απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης μεταξύ ενός εξωτερικού τοίχου και του πατώματος, χωρίς (εικόνα 3.8α) και με (εικόνα 3.8β) VIP. Όπως φαίνεται, το πάτωμα βρίσκεται πάνω σε πλάκα σκυροδέματος πάχους 150 χιλιοστών, πάνω από το έδαφος.



Εικόνα 3.8 Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου με το πάτωμα: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP (κόκκινο στρώμα)

3.1.2.6 Εσωτερικός τοίχος - Οροφή

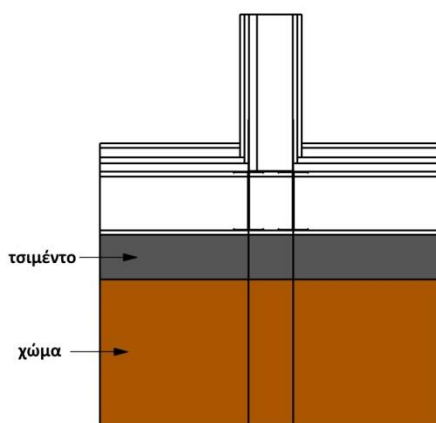
Η εικόνα 3.9 απεικονίζει τη σύνδεση μεταξύ του εσωτερικού τοίχου και της οροφής, χωρίς κάποιο μονωτικό υλικό στο resilient channel (εικόνα 3.9α) και με πετροβάμβακα ή αερογέλη στο resilient channel (εικόνα 3.9β).



Εικόνα 3.9 Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με την οροφή: (α) με κενό το resilient channel και (β) με πετροβάμβακα ή αερογέλη στο resilient channel

3.1.2.7 Εσωτερικός τοίχος - Πάτωμα

Η εικόνα 3.10 απεικονίζει τη σύνδεση του πατώματος με τον εσωτερικό τοίχο.



Εικόνα 3.10 Σχηματικό διάγραμμα της σύνδεσης του πατώματος με τον εσωτερικό τοίχο

3.2 Ορισμός των υλικών των τοιχοποιιών

Στον πίνακα 3.3 που ακολουθεί, αναφέρονται οι φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση των τοιχοποιιών (συμπεριλαμβανομένου του προμηθευτή). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η θερμική αγωγιμότητα του αέρα που υπάρχει στις κοιλότητες ορισμένων τοιχοποιιών υπολογίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6946.

Πίνακας 3.3 Φυσικές ιδιότητες των υλικών

Υλικό	Πάχος d [mm]	Πυκνότητα ρ [kg/m ³]	Θερμική αγωγιμότητα k [W/m/K]	Ειδική θερμοχωρητικότητα C_p [J/kg/K]	Προμηθευτής
Aquapanel outdoor	12.5	1150	0.35	1000	Knauf
Γυψοσανίδα	15	1033	0.27	990	Knauf
Impact sound insulation Knauf WF	10	250	0.07	2100	Knauf
GIFAfloor load panel	28	1500	0.44		Knauf
GIFAfloor Klima	32	1500	0.38		Knauf
Πετροβάμβακας FCB 035		23	0.035	850	Knauf
Vacuum Insulation Panel (VIP)	20	195	0.007	800	Va-Q-Tec
Αερογέλη		100	0.018	1000	
Knauf profile CW50	0.6	7854	60.5	434	
Roof sealing film			0.2		
Πλακάκια δαπέδου		2000	1.5	1000	
Τσιμέντο		2300	1.95	900	
Χώμα		100	2.0	1000	

Στον πίνακα 3.4, παρουσιάζεται η θερμική αγωγιμότητα του αέρα για τις κοιλότητες που εμφανίζονται στις γεωμετρίες που εξετάζουμε.

Πίνακας 3.4 Θερμική αγωγιμότητα αέρα

Κοιλότητα αέρα	Πάχος d [mm]	Θερμική αγωγιμότητα k [W/m/K]
Εξωτερικός τοίχος	25	0.14
Οροφή/Ταβάνι (resilient channel)	27	0.15
Πάτωμα/Ταβάνι (μέσα στον πετροβάμβακα)	17	0.10

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η θερμική απόδοση των τοιχοποιιών και των συνδέσεων αυτών του κτιρίου ELISSA. Η συνολική ανάλυση για κάθε διαμόρφωση χωρίζεται σε δύο μέρη: στο πρώτο μέρος, παρουσιάζονται το πλέγμα και οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται, ενώ στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό κάθε διαμόρφωσης για συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, καθώς και η αξιολόγηση από την επίδραση των θερμογεφυρών.

4.1 Θερμική απόδοση

Προκειμένου να μελετηθεί η θερμική απόδοση του κτιρίου ELISSA, καθώς και να εκτιμηθεί η επίδραση των θερμογεφυρών, χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό ANSYS-CFX.

4.1.1 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται σε κάθε διαμόρφωση είναι οριακές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας (εξίσωση 4.1), υποθέτοντας μια διαφορά θερμοκρασίας 30°C μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Συγκεκριμένα, η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρήθηκε ίση με $T_{out} = -10^{\circ}\text{C}$, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$.

$$q = h(T_{amb} - T_{wall})$$

Εξίσωση 4.1

όπου:

h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος (εξωτερικού ή εσωτερικού)

T_{wall} η θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου

Στην περίπτωση που έχουμε έδαφος (χώμα), τότε η θερμοκρασία χώματος θεωρείται σταθερή και ίση με $T_{soil} = -10^{\circ}\text{C}$.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας ελήφθησαν σύμφωνα με το ISO 6946 [9].

Πίνακας 4.1 Παράμετροι οριακών συνθηκών

	Επιφάνεια τοίχου	
	Εξωτερική	Εσωτερική
h [$W/m^2/K$]	25	7.69
T_{amb} [$^{\circ}C$]	-10	20

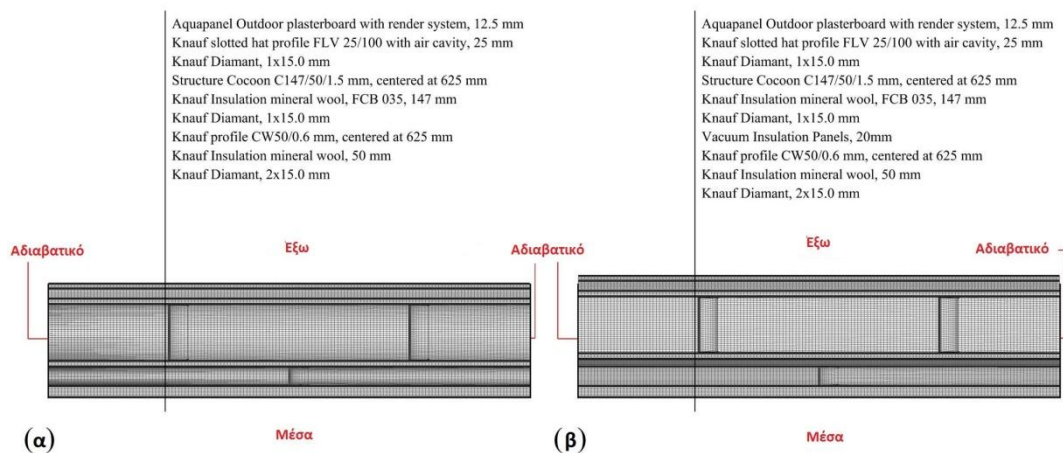
4.2 Κεντρικό μέρος των τοιχοποιιών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται με λεπτομέρειες, το πλέγμα, οι οριακές συνθήκες, καθώς και τα αποτελέσματα όλων των τοιχοποιιών για τη διαμόρφωση του κτιρίου ELISSA.

4.2.1 Πλέγμα και καθορισμός οριακών συνθηκών

4.2.1.1 Εξωτερικός τοίχος

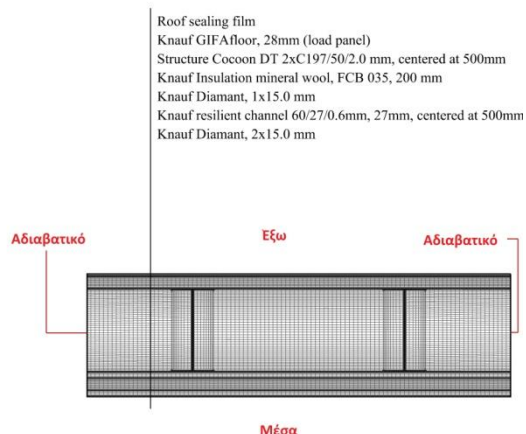
Η εικόνα 4.1 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη γεωμετρία του εξωτερικού τοίχου, χωρίς (εικόνα 4.1α) και με VIP (εικόνα 4.1β). Όπως φαίνεται, υπάρχει τοπική προσαρμογή του πλέγματος κοντά στους ορθοστάτες, καθώς και σε όλο το πάχος του VIP που οφείλεται στην πολύ χαμηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητάς του.



Εικόνα 4.1 Πλέγμα και οριακές συνθήκες του εξωτερικού τοίχου: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP

4.2.1.2 Οροφή

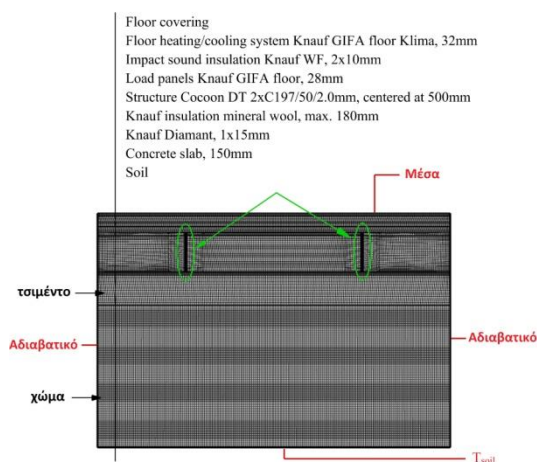
Η εικόνα 4.2 δείχνει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη γεωμετρία της οροφής. Πρέπει να αναφερθεί πως ένα στρώμα της οροφής (resilient channel) είναι είτε κενό (με αέρα), είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη.



Εικόνα 4.2 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της οροφής

4.2.1.3 Πάτωμα

Η εικόνα 4.3 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη γεωμετρία του πατώματος. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η θερμοκρασία του εδάφους (χώμα) θεωρείται σταθερή και ίση με $T_{\text{soil}} = -10^{\circ}\text{C}$.



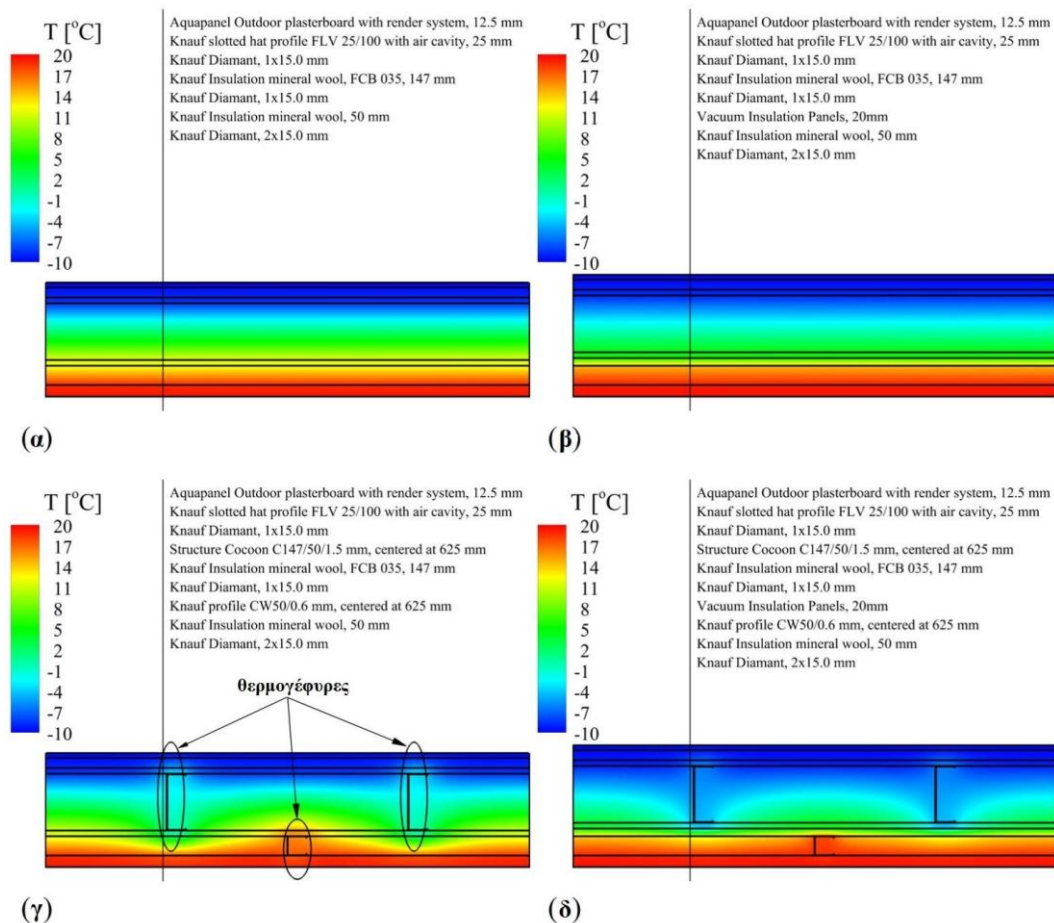
Εικόνα 4.3 Πλέγμα και οριακές συνθήκες του πατώματος

4.2.2 Αποτελέσματα

Παρακάτω φαίνονται οι καμπύλες θερμοκρασίας στο εσωτερικό των διαμορφώσεων που εξετάζουμε, καθώς και η επίδραση των θερμογεφυρών στις διαμορφώσεις αυτές.

4.2.2.1 Εξωτερικός τοίχος

Η εικόνα 4.4 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας εσωτερικά του εξωτερικού τοίχου με, αλλά και χωρίς τους μεταλλικούς ορθοστάτες, καθώς και με ή χωρίς την ύπαρξη VIP. Είναι φανερό πως η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών δημιουργεί μια θερμογέφυρα ανάμεσα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον. Αυτό μπορούμε εύκολα να το παρατηρήσουμε, συγκρίνοντας τις εικόνες 4.4α,β που παρουσιάζονται χωρίς τα μεταλλικά στηρίγματα με τις εικόνες 4.4γ,δ που έχουν μεταλλικά στηρίγματα.



Εικόνα 4.4 Καμπύλες θερμοκρασίας του εξωτερικού τοίχου: (α) χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP, (β) χωρίς ορθοστάτες-με VIP, (γ) με ορθοστάτες-χωρίς VIP και (δ) με ορθοστάτες-με VIP

Ο πίνακας 4.2 που ακολουθεί συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας (Q), το συντελεστή θερμοπερατότητας (U) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ), λόγω της παρουσίας των μεταλλικών ορθοστατών για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Όπως φαίνεται, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνει τις θερμικές απώλειες και την τιμή του U κατά 50% στην περίπτωση που δεν έχουμε VIP. Από την άλλη, όταν υπάρχει VIP στη διαμόρφωση του εξωτερικού τοίχου, οι μεταλλικοί ορθοστάτες αυξάνουν τις θερμικές απώλειες και το U κατά 26.5% περίπου. Τέλος, όταν συγκρίνουμε τις πραγματικές λύσεις (δηλαδή, η διαμόρφωση του εξωτερικού τοίχου περιλαμβάνει μεταλλικούς ορθοστάτες), η προσθήκη VIP στην τοιχοποιία μειώνει τις απώλειες θερμότητας και την τιμή του U κατά 41.8%. Το τελευταίο σημαίνει πως το VIP βοηθάει σημαντικά στη μείωση των θερμικών απωλειών του εξωτερικού τοίχου.

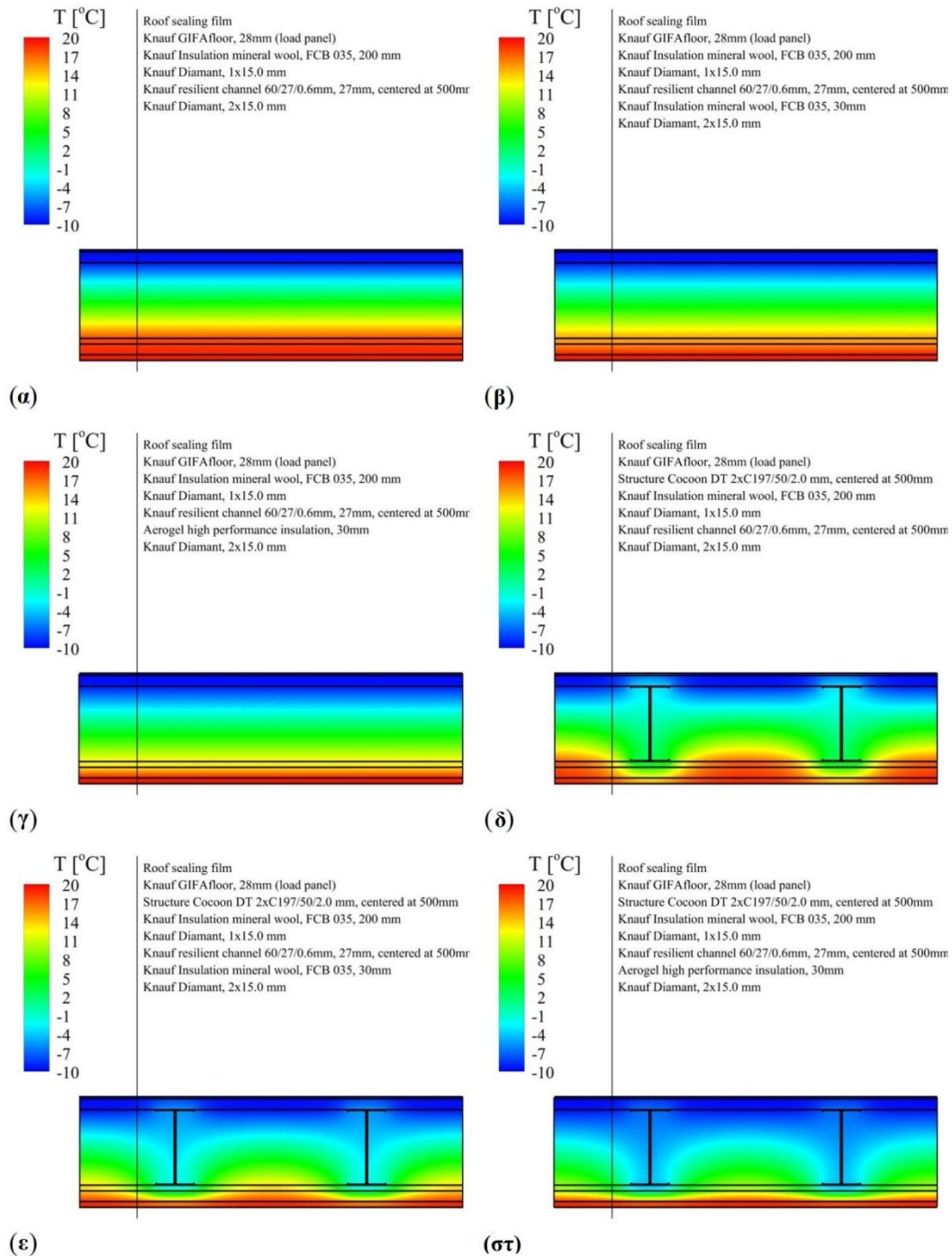
Πίνακας 4.2 Απώλειες θερμότητας και συντελεστές θερμοπερατότητας (U) και γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) για τον εξωτερικό τοίχο

Περίπτωση	Q [W]	U [W/m ² K]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.00601	0.16017	0.00000
με ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.00900	0.24007	0.09987
χωρίς ορθοστάτες-με VIP	0.00414	0.11028	0.00000
με ορθοστάτες-με VIP	0.00524	0.13968	0.03675

Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι οι τιμές για το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) αφορούν τη συνολική διαμόρφωση του εξωτερικού τοίχου που εξετάζεται (η συνολική διαμόρφωση περιλαμβάνει δύο ορθοστάτες τύπου C και έναν ορθοστάτη τύπου CW). Γενικά, ισχύει: $\Psi_{\text{tot}} = 2 \cdot \Psi_C + \Psi_{\text{CW}}$.

4.2.2.2 Οροφή

Η εικόνα 4.5 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας εσωτερικά της οροφής με, αλλά και χωρίς τους μεταλλικούς ορθοστάτες, καθώς και όλους τους τύπους μόνωσης εσωτερικά του resilient channel (π.χ. αέρας, πετροβάμβακας και αερογέλη). Είναι εμφανές πως η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών εισάγει θερμογέφυρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 4.5 Καμπύλες θερμοκρασίας της οροφής: (α) χωρίς ορθοστάτες-με αέρα, (β) χωρίς ορθοστάτες-με πετробάμβακα, (γ) χωρίς ορθοστάτες-με αερογέλη, (δ) με ορθοστάτες-με αέρα, (ε) με ορθοστάτες-με πετробάμβακα και (στ) με ορθοστάτες-με αερογέλη

Ο πίνακας 4.3 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας (Q), καθώς και τους συντελεστές U και Ψ για τις περιπτώσεις που εξετάζουμε της γεωμετρίας της οροφής. Όπως φαίνεται, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνει τις απώλειες θερμότητας και την τιμή του U κατά 268% στην περίπτωση που δεν έχουμε κάποιο μονωτικό υλικό στο resilient channel (αέρας). Από την άλλη πλευρά, όταν το resilient

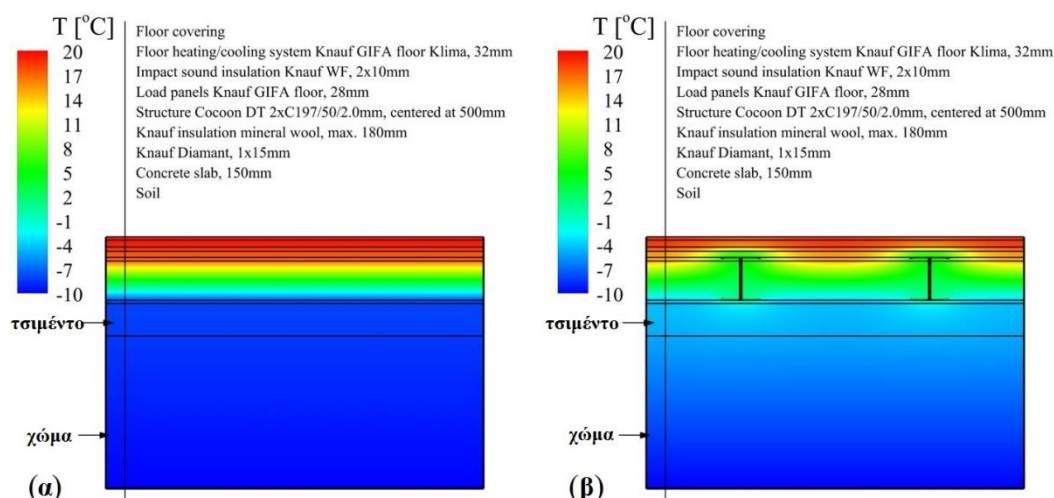
channel περιέχει κάποιο μονωτικό υλικό, η παρουσία των ορθοστατών αυξάνει τις θερμικές απώλειες και την τιμή του U κατά 168% και 121% για πετροβάμβακα και αερογέλη, αντίστοιχα. Τέλος, συγκρίνοντας τις πραγματικές λύσεις, δηλαδή τις τοιχοποιίες με μεταλλικούς ορθοστάτες, παρατηρούμε πως με την προσθήκη μονωτικού υλικού στο resilient channel μειώνουμε τις απώλειες θερμότητας και την τιμή του συντελεστή U κατά 33.6% και 50.6% για πετροβάμβακα και αερογέλη, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.3 Απώλειες θερμότητας και συντελεστές θερμοπερατότητας (U) και γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) για την οροφή

Περίπτωση	Q [W]	U [W/m ² K]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες-με αέρα	0.00485	0.16155	0.00000
με ορθοστάτες-με αέρα	0.01784	0.59458	0.43303
χωρίς ορθοστάτες-με πετροβάμβακα	0.00442	0.14732	0.00000
με ορθοστάτες-με πετροβάμβακα	0.01184	0.39480	0.24748
χωρίς ορθοστάτες-με αερογέλη	0.00398	0.13256	0.00000
με ορθοστάτες-με αερογέλη	0.00881	0.29359	0.16102

4.2.2.3 Πάτωμα

Η εικόνα 4.6 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας εσωτερικά του πατώματος με, αλλά και χωρίς να λαμβάνουμε υπόψιν τους μεταλλικούς ορθοστάτες. Είναι φανερό πως η θερμογέφυρα που δημιουργείται ανάμεσα στο εσωτερικό περιβάλλον και το χώμα οφείλεται στην παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών.



Εικόνα 4.6 Καμπύλες θερμοκρασίας του πατώματος: (α) χωρίς ορθοστάτες και (β) με ορθοστάτες

Ο πίνακας 4.4 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες (Q), το συντελεστή θερμοπερατότητας (U) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) λόγω της παρουσίας των ορθοστατών για τις περιπτώσεις του πατώματος. Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, παρατηρούμε ότι με την παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνονται οι απώλειες θερμότητας και η τιμή του U κατά 210% περίπου.

Πίνακας 4.4 Απώλειες θερμότητας και συντελεστές θερμοπερατότητας (U) και γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) για το πάτωμα

Περίπτωση	Q [W]	U [W/m ² K]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες	0.00471	0.15707	0.00000
με ορθοστάτες	0.01459	0.48644	0.32937

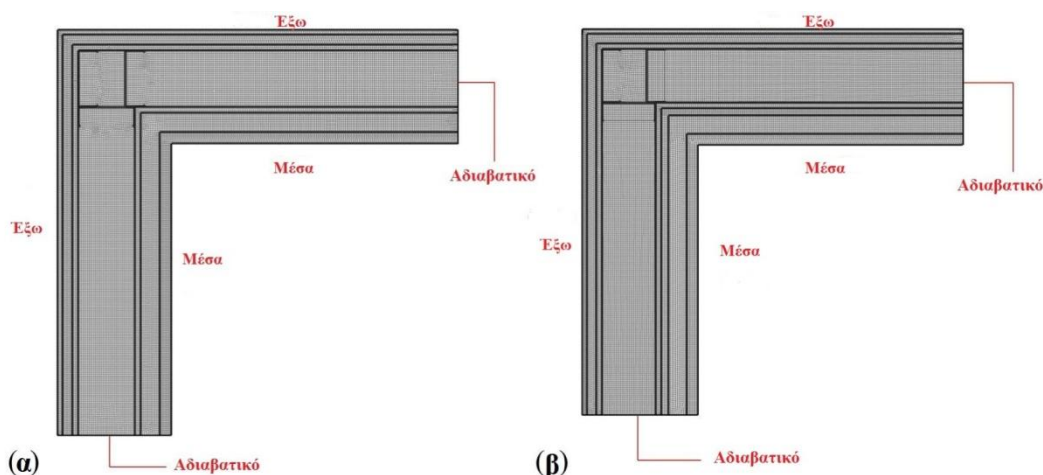
4.3 Συνδέσεις των τοιχοποιιών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά το πλέγμα, οι οριακές συνθήκες, καθώς και τα αποτελέσματα των συνδέσεων των τοιχοποιιών του κτιρίου ELISSA.

4.3.1 Πλέγμα και καθορισμός οριακών συνθηκών

4.3.1.1 Εξωτερικός τοίχος - Εξωτερικός τοίχος

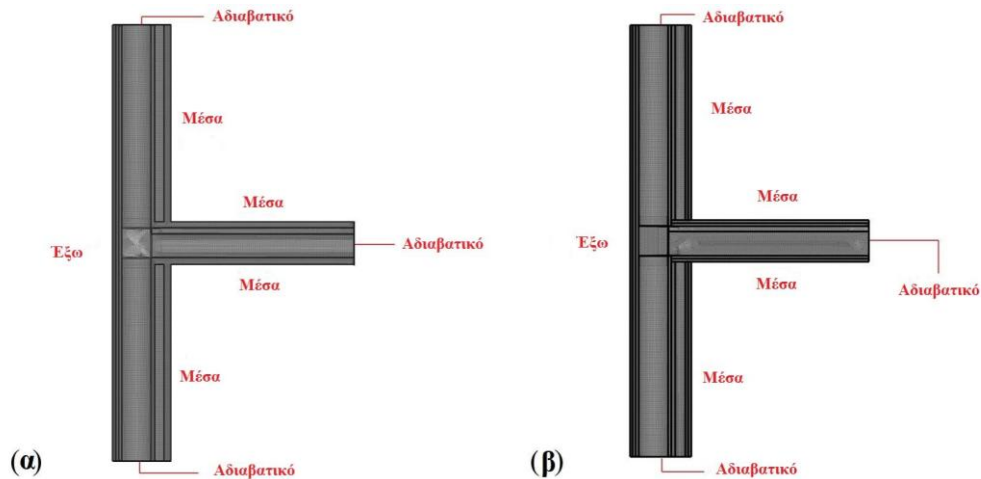
Η εικόνα 4.7 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη σύνδεση μεταξύ των εξωτερικών τοίχων, χωρίς (εικόνα 4.7α) και με VIP (εικόνα 4.7β).



Εικόνα 4.7 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της σύνδεσης των εξωτερικών τοίχων: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP

4.3.1.2 Εξωτερικός τοίχος - Εσωτερικός τοίχος

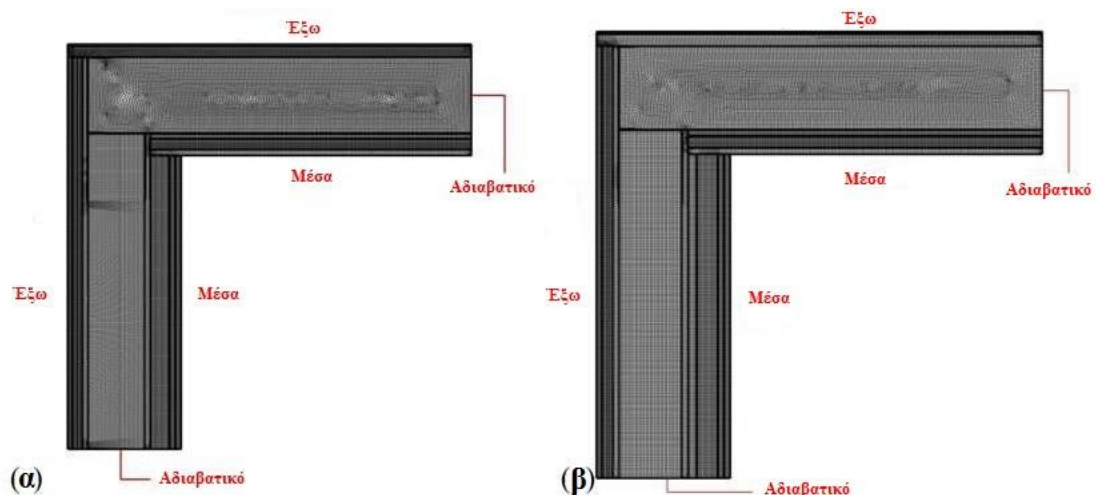
Η εικόνα 4.8 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη σύνδεση μεταξύ ενός εξωτερικού και ενός εσωτερικού τοίχου, χωρίς (εικόνα 4.8α) και με VIP (εικόνα 4.8β), το οποίο ενσωματώνεται στον εξωτερικό τοίχο.



Εικόνα 4.8 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της σύνδεσης εξωτερικού με εσωτερικό τοίχο: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP

4.3.1.3 Εξωτερικός τοίχος - Οροφή

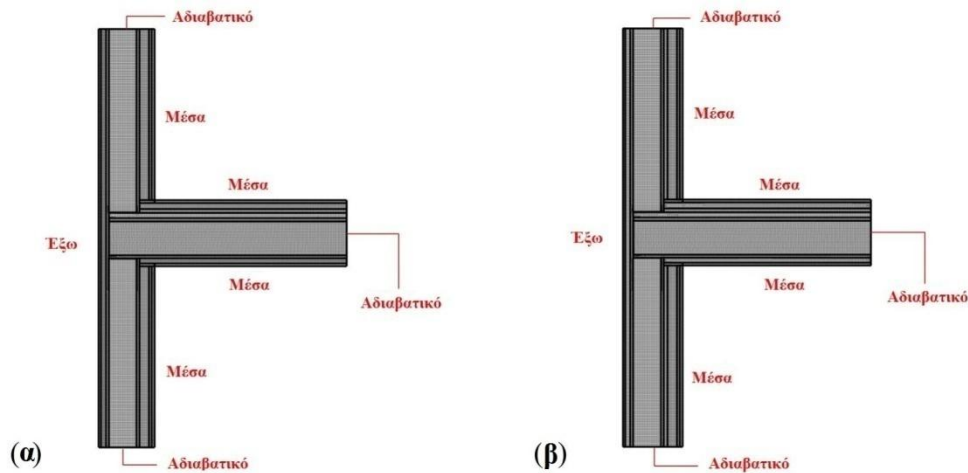
Η εικόνα 4.9 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη σύνδεση του εξωτερικού τοίχου με την οροφή, χωρίς (εικόνα 4.9α) αλλά και με το VIP (εικόνα 4.9β) ενσωματωμένο στον εξωτερικό τοίχο. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και προηγουμένως, το resilient channel της οροφής μπορεί να είναι είτε άδειο (αέρας) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη.



Εικόνα 4.9 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου με την οροφή: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP

4.3.1.4 Εξωτερικός τοίχος - Ταβάνι

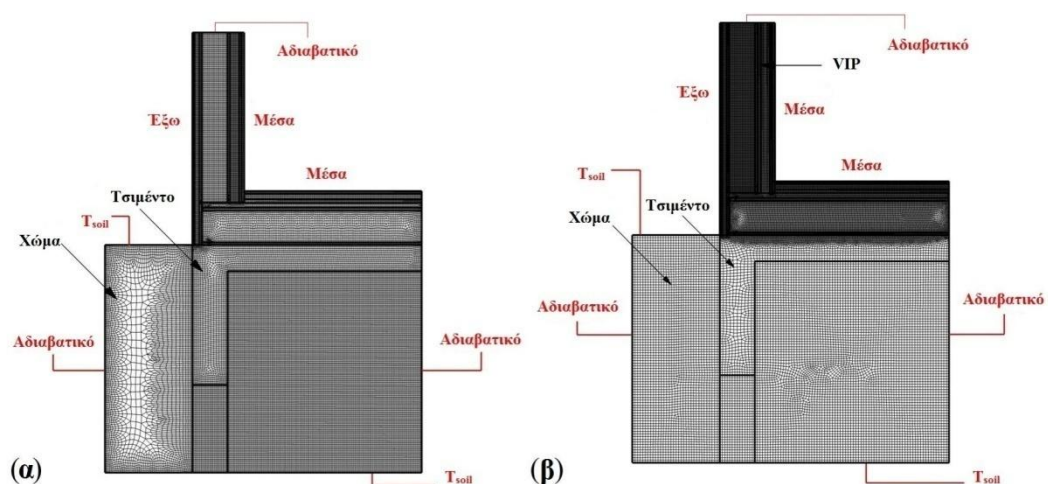
Η εικόνα 4.10 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη σύνδεση του εξωτερικού τοίχου με το ταβάνι, χωρίς (εικόνα 4.10α) αλλά και με το VIP (εικόνα 4.10β) ενσωματωμένο στον εξωτερικό τοίχο.



Εικόνα 4.10 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου με το ταβάνι: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP

4.3.1.5 Εξωτερικός τοίχος - Πάτωμα

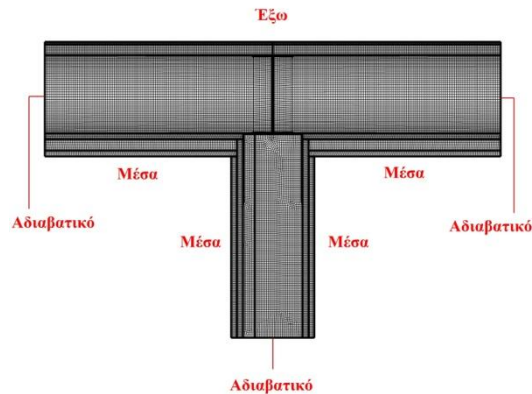
Η εικόνα 4.11 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη σύνδεση του εξωτερικού τοίχου με το πάτωμα, χωρίς (εικόνα 4.11α) αλλά και με το VIP (εικόνα 4.11β) ενσωματωμένο στον εξωτερικό τοίχο.



Εικόνα 4.11 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου με το πάτωμα: (α) χωρίς VIP και (β) με VIP

4.3.1.6 Εσωτερικός τοίχος - Οροφή

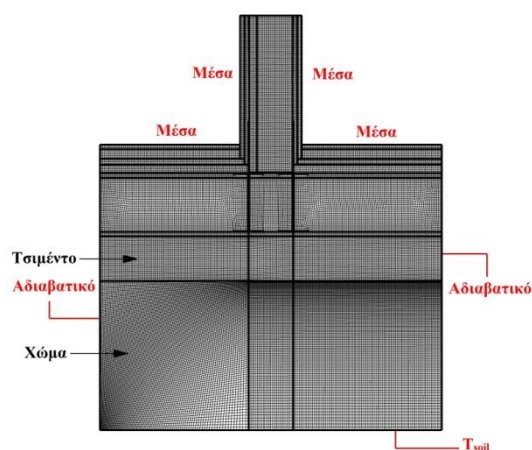
Η εικόνα 4.12 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη σύνδεση ανάμεσα στον εσωτερικό τοίχο και την οροφή. Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, το resilient channel της οροφής μπορεί να είναι είτε άδειο (δηλαδή περιέχει αέρα) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη. Παρ' όλα αυτά, το πλέγμα είναι ίδιο για όλες τις δυνατές περιπτώσεις.



Εικόνα 4.12 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με την οροφή

4.3.1.7 Εσωτερικός τοίχος - Πάτωμα

Η εικόνα 4.13 απεικονίζει το πλέγμα και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στη σύνδεση του εσωτερικού τοίχου με το πάτωμα.



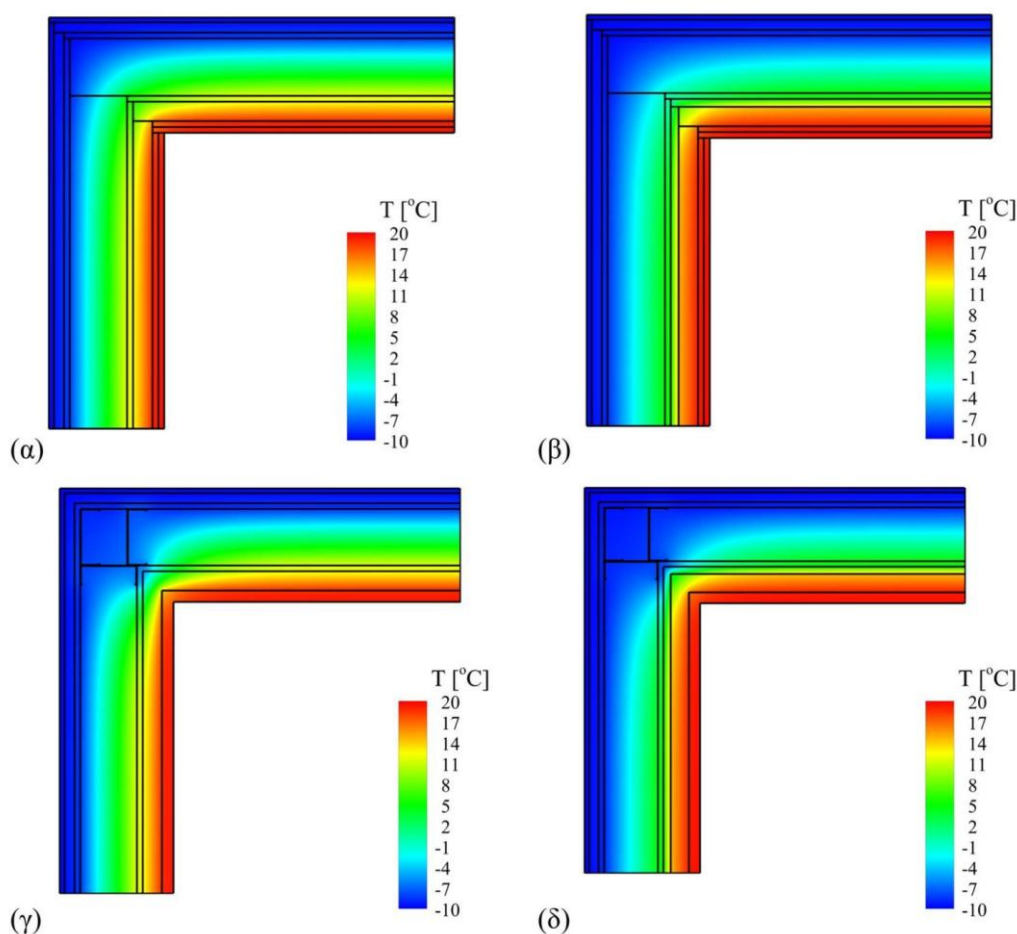
Εικόνα 4.13 Πλέγμα και οριακές συνθήκες της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με το πάτωμα

4.3.2 Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι καμπύλες θερμοκρασίας εσωτερικά των συνδέσεων των τοιχοποιιών που εξετάζουμε, καθώς και η επίδραση των θερμογεφυρών στις γεωμετρίες αυτές.

4.3.2.1 Εξωτερικός τοίχος - Εξωτερικός τοίχος

Η εικόνα 4.14 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας για τη σύνδεση δύο εξωτερικών τοίχων με, αλλά και χωρίς μεταλλικούς ορθοστάτες, καθώς και με ή χωρίς την ύπαρξη VIP. Όπως φαίνεται, το σχήμα της σύνδεσης, χωρίς τα μεταλλικά στηρίγματα (εικόνες 4.14α και β), συμβάλλει στη δημιουργία γεωμετρικής θερμογέφυρας. Το τελευταίο προσδιορίζεται από την καμπυλότητα των ισόθερων καμπυλών, ιδιαίτερα κοντά στη σύνδεση των δύο τοιχοποιιών. Από την άλλη πλευρά, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνει τη ροή θερμότητας διαμέσου των τοιχοποιιών, το οποίο φαίνεται από την απότομη κλίση των καμπυλών θερμοκρασίας (εικόνες 4.14γ και δ).



Εικόνα 4.14 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης εξωτερικών τοίχων: (α) χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP, (β) χωρίς ορθοστάτες-με VIP, (γ) με ορθοστάτες-χωρίς VIP και (δ) με ορθοστάτες-με VIP

Ο πίνακας 4.5 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας (Q) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) λόγω της γεωμετρικής θερμογέφυρας της σύνδεσης, καθώς και της παρουσίας των μεταλλικών ορθοστατών, για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις της συγκεκριμένης σύνδεσης. Παρατηρούμε ότι, η παρουσία των μεταλλικών στηριγμάτων αυξάνει τις απώλειες θερμότητας κατά 12% για την περίπτωση που δεν έχουμε VIP. Αντιθέτως, αν έχουμε VIP στους εξωτερικούς τοίχους, τότε οι μεταλλικοί ορθοστάτες αυξάνουν τις θερμικές απώλειες κατά 6%. Τέλος, όταν συγκρίνουμε τις ρεαλιστικές περιπτώσεις (δηλαδή τις τοιχοποιίες με ορθοστάτες), διαπιστώνουμε πως με την προσθήκη VIP μειώνουμε τις απώλειες θερμότητας κατά 36.6%. Αυτό σημαίνει πως το VIP έχει πολύ σημαντική συμβολή στη μείωση των θερμικών απωλειών της σύνδεσης εξωτερικών τοίχων.

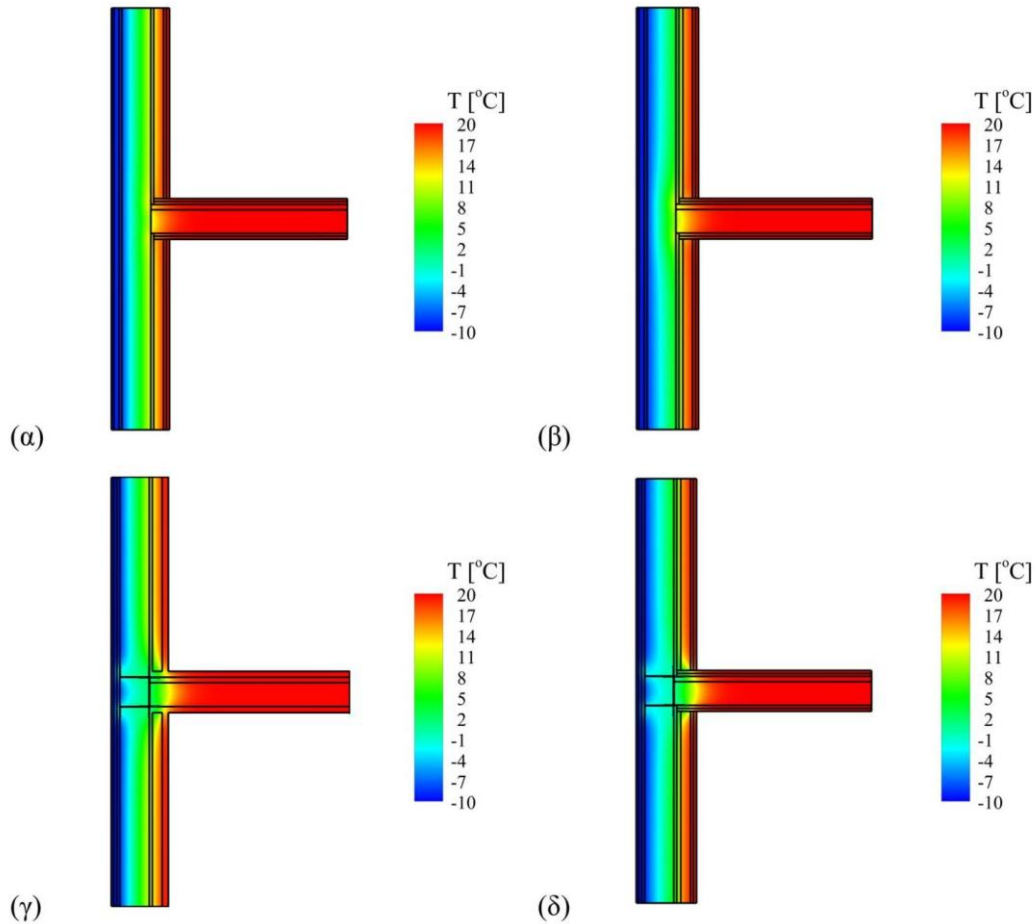
Παρατήρηση: Οι τιμές του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ (πίνακας 4.5) αναφέρονται σε όλη τη γεωμετρία της σύνδεσης, συμπεριλαμβανομένων όλων των στηριγμάτων.

Πίνακας 4.5 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης εξωτερικών τοίχων

Περίπτωση	Q [W]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.04050	-0.06505
με ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.04534	-0.03284
χωρίς ορθοστάτες-με VIP	0.02710	-0.05002
με ορθοστάτες-με VIP	0.02876	-0.03898

4.3.2.2 Εξωτερικός τοίχος - Εσωτερικός τοίχος

Η εικόνα 4.15 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης ανάμεσα στον εξωτερικό και τον εσωτερικό τοίχο χωρίς, αλλά και με την παρουσία μεταλλικών ορθοστατών, καθώς και με ή χωρίς την ύπαρξη VIP. Είναι φανερό πως το γεωμετρικό σχήμα της σύνδεσης, χωρίς να υπολογίζουμε τους ορθοστάτες, συμβάλλει στη δημιουργία γεωμετρικής θερμογέφυρας. Αυτό είναι εμφανές από τις καμπύλες θερμοκρασίας που αναπτύσσονται κοντά στη σύνδεση των δύο τοιχοποιιών (εικόνα 4.15α και β). Από την άλλη πλευρά, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνει την κλίση των καμπυλών θερμοκρασίας κοντά στη σύνδεση, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι θερμικές απώλειες (εικόνα 4.15γ και δ).



Εικόνα 4.15 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης εξωτερικού με εσωτερικό τοίχο: (α) χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP, (β) χωρίς ορθοστάτες-με VIP, (γ) με ορθοστάτες-χωρίς VIP και (δ) με ορθοστάτες-με VIP

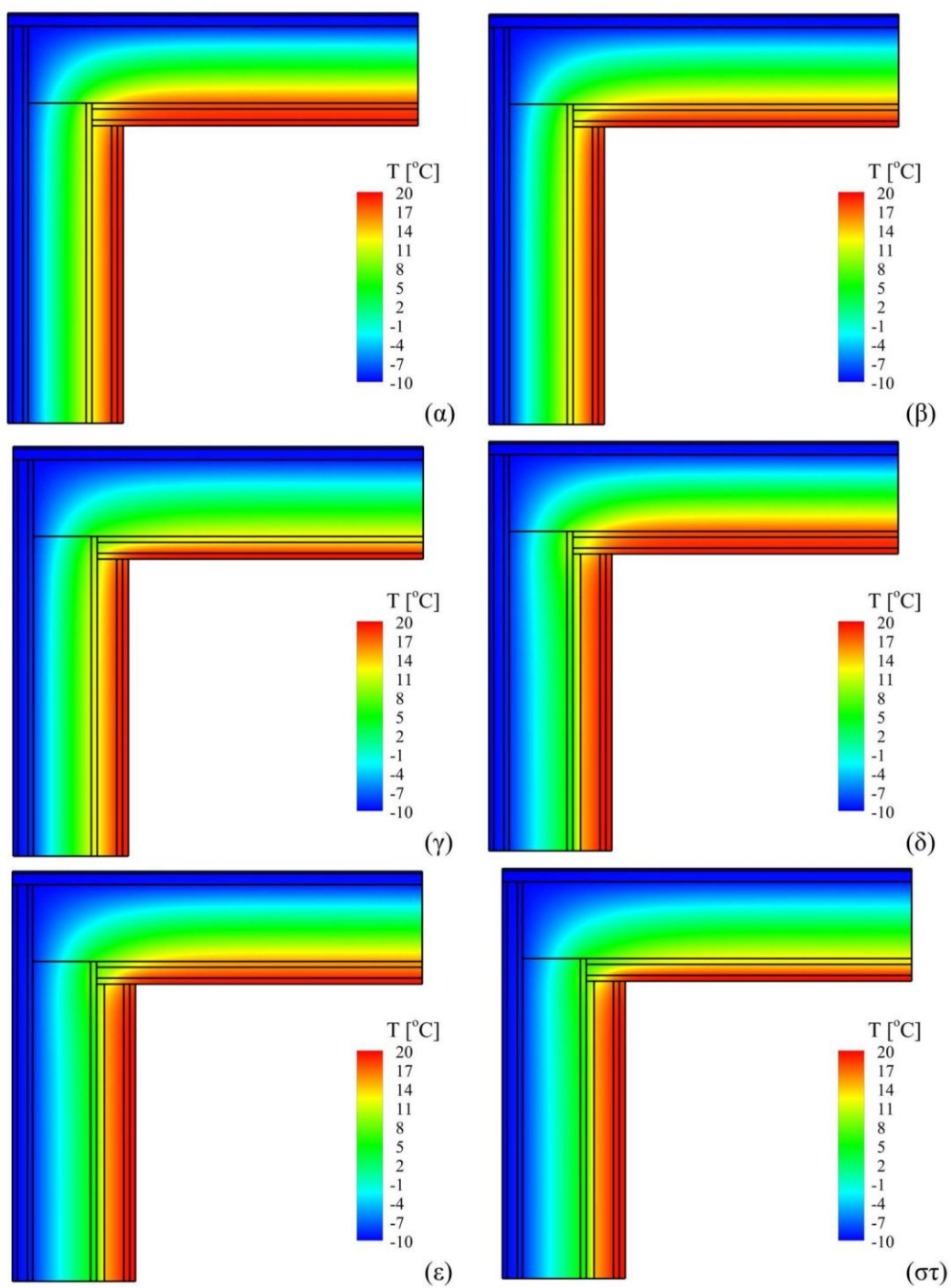
Ο πίνακας 4.6 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες (Q) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) λόγω της γεωμετρικής θερμογέφυρας από τη σύνδεση, όπως και από την παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών, για τις περιπτώσεις που εξετάζονται στη σύνδεση αυτή. Όπως φαίνεται, με την παρουσία των ορθοστατών στην περίπτωση που δεν υπάρχει VIP στον εξωτερικό τοίχο έχουμε αύξηση απωλειών θερμότητας κατά 50%, ενώ αν υπάρχει VIP αυξάνονται κατά 52%. Το τελευταίο σημαίνει ότι παρά την παρουσία του VIP, η θερμογέφυρα αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το VIP δεν καλύπτει την περιοχή όπου η θερμογέφυρα εμφανίζεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ελαφρά. Τέλος, συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις που έχουμε ορθοστάτες (πραγματικές περιπτώσεις), παρατηρούμε πως με την προσθήκη VIP στον εξωτερικό τοίχο μειώνουμε τις απώλειες θερμότητας κατά 25.5%.

Πίνακας 4.6 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης εξωτερικού με εσωτερικό τοίχο

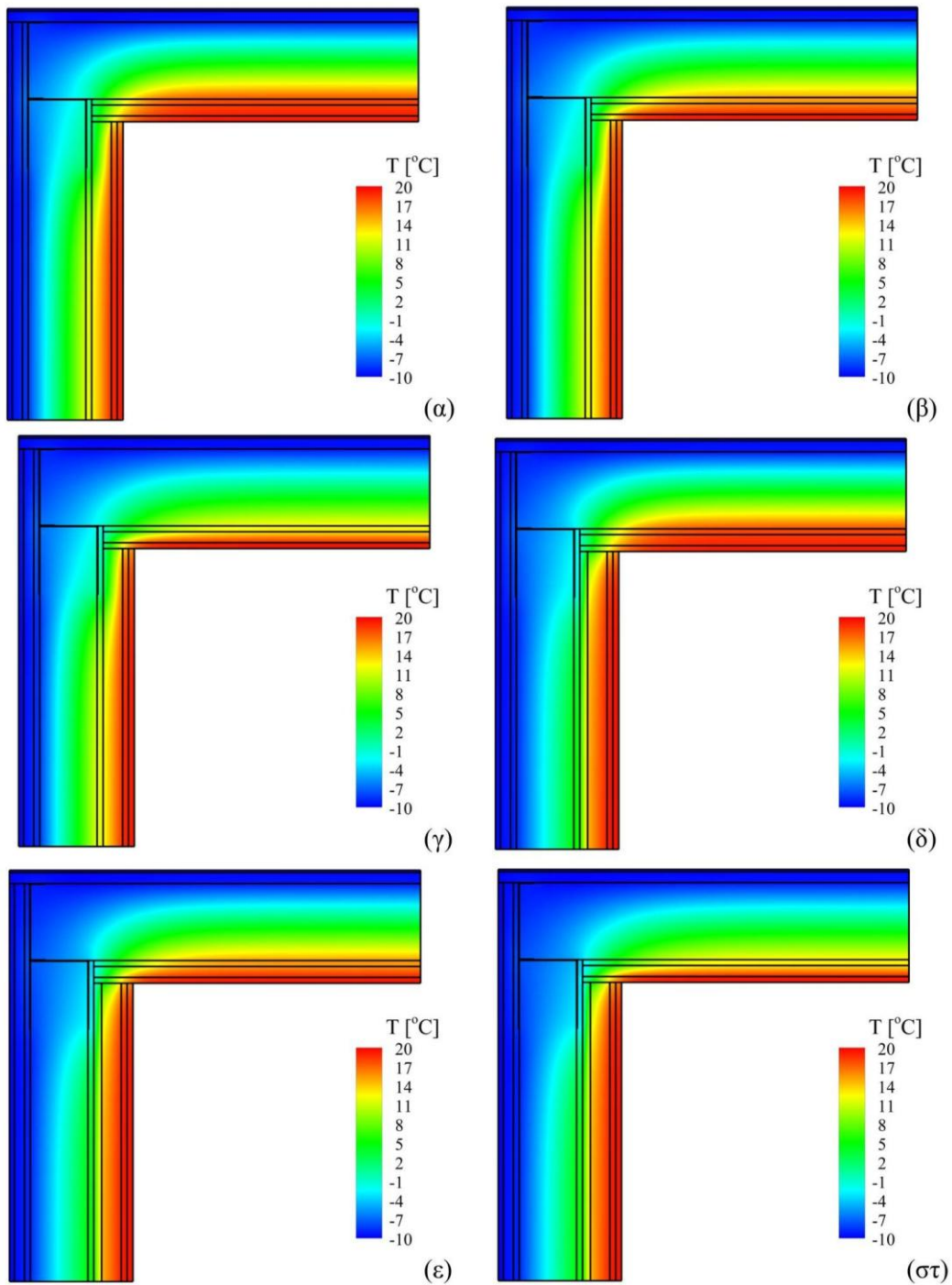
Περίπτωση	Q [W]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.01043	0.00390
με ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.01569	0.17922
χωρίς ορθοστάτες-με VIP	0.00767	0.01892
με ορθοστάτες-με VIP	0.01169	0.15287

4.3.2.3 Εξωτερικός τοίχος - Οροφή

Οι εικόνες 4.16 και 4.17 απεικονίζουν τις καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης ανάμεσα στον εξωτερικό τοίχο και την οροφή με αλλά και χωρίς τα μεταλλικά στηρίγματα, καθώς και με ή χωρίς την ενσωμάτωση του VIP στον εξωτερικό τοίχο. Ακόμα, διακρίνονται και οι περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής που μπορεί να είναι είτε άδειο (αέρας) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη. Όπως φαίνεται, το γεωμετρικό σχήμα της σύνδεσης, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψιν τους μεταλλικούς ορθοστάτες (εικόνα 4.16), συμβάλλει στη δημιουργία γεωμετρικής θερμογέφυρας. Αυτό υποδεικνύεται από τις βαθμίδες θερμοκρασίας που αναπτύσσονται κοντά στη σύνδεση των δύο τοιχοποιιών. Από την άλλη πλευρά, η παρουσία των ορθοστατών (εικόνα 4.17) αυξάνει περισσότερο την κλίση των καμπυλών θερμοκρασίας, πράγμα που σημαίνει ότι αυξάνεται και η θερμογέφυρα. Τέλος, με την προσθήκη VIP στον εξωτερικό τοίχο, καθώς και πετροβάμβακα ή αερογέλης στο resilient channel της οροφής μειώνουμε σημαντικά τη θερμογέφυρα.



Εικόνα 4.16 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με την οροφή χωρίς μεταλλικούς ορθοστάτες: (α) χωρίς VIP-με αέρα, (β) χωρίς VIP-με πετροβάμβακα, (γ) χωρίς VIP-με αερογέλη, (δ) με VIP-με αέρα, (ε) με VIP-με πετροβάμβακα και (στ) με VIP-με αερογέλη



Εικόνα 4.17 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με την οροφή με μεταλλικούς ορθοστάτες: (α) χωρίς VIP-με αέρα, (β) χωρίς VIP-με πετροβάμβακα, (γ) χωρίς VIP-με αερογέλη, (δ) με VIP-με αέρα, (ε) με VIP-με πετροβάμβακα και (στ) με VIP-με αερογέλη

Ο πίνακας 4.7 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας (Q) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) για τις περιπτώσεις της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με την οροφή. Είναι φανερό πως η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνει την επίδραση των θερμογεφυρών (ανεξάρτητα με το αν υπάρχει ή όχι VIP στον εξωτερικό τοίχο της σύνδεσης). Για την περίπτωση χωρίς VIP έχουμε αύξηση

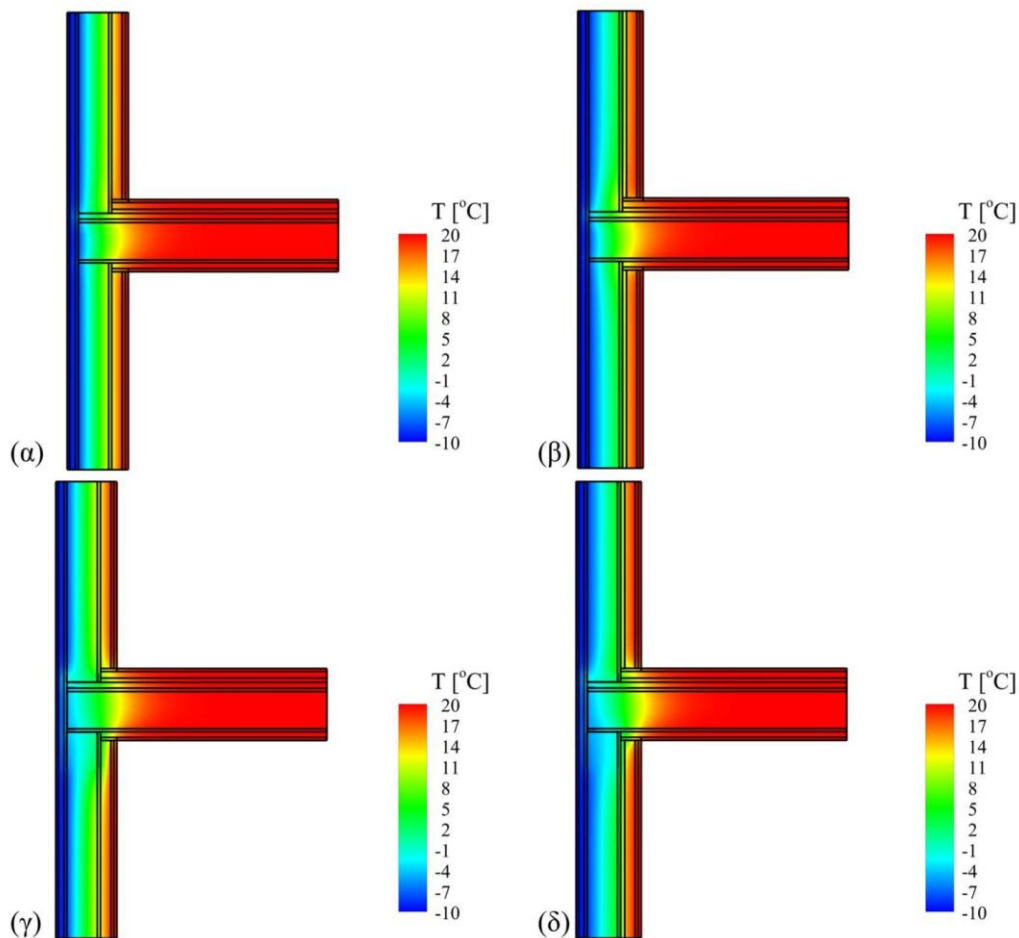
απωλειών θερμότητας κατά 28.7%, 26.2% και 26.3% για το κενό αέρος, τον πετροβάμβακα και την αερογέλη, αντίστοιχα, μέσα στο resilient channel της οροφής. Από την άλλη πλευρά, τα αντίστοιχα ποσοστά για την περίπτωση που υπάρχει VIP είναι 22.4%, 19% και 18.4%, αντίστοιχα. Επίσης, παρατηρούμε ότι η προσθήκη VIP μειώνει σημαντικά τη θερμογέφυρα που εισάγει η σύνδεση των τοίχων (γεωμετρική θερμογέφυρα) και οι ορθοστάτες. Συγκεκριμένα, η μείωση της θερμογέφυρας φτάνει το 18.5%, 20.2% και 21.5% για τις περιπτώσεις όπου έχουμε αέρα, πετροβάμβακα και αερογέλη, αντίστοιχα, μέσα στο resilient channel. Τέλος, όταν υπάρχει VIP στον εξωτερικό τοίχο, η παρουσία του πετροβάμβακα στην οροφή μειώνει τις θερμικές απώλειες κατά 9.5%, ενώ η αερογέλη κατά 15.6%.

Πίνακας 4.7 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με την οροφή

Περίπτωση	resilient channel	Q [W]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP	κενό αέρος	0.0421	-0.05778
	πετροβάμβακας	0.0397	-0.05867
	αερογέλη	0.0376	-0.05710
χωρίς ορθοστάτες-με VIP	κενό αέρος	0.0361	-0.04514
	πετροβάμβακας	0.0336	-0.04662
	αερογέλη	0.0315	-0.04511
με ορθοστάτες-χωρίς VIP	κενό αέρος	0.0542	0.02308
	πετροβάμβακας	0.0501	0.01059
	αερογέλη	0.0475	0.00888
με ορθοστάτες-με VIP	κενό αέρος	0.0442	0.00911
	πετροβάμβακας	0.0400	-0.00436
	αερογέλη	0.0373	-0.00670

4.3.2.4 Εξωτερικός τοίχος - Ταβάνι

Η εικόνα 4.18 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας για τη σύνδεση ανάμεσα στον εξωτερικό τοίχο και το ταβάνι με αλλά και χωρίς τους μεταλλικούς ορθοστάτες, καθώς και με ή χωρίς την ενσωμάτωση του VIP στον εξωτερικό τοίχο. Όπως φαίνεται, το γεωμετρικό σχήμα της σύνδεσης, χωρίς τους μεταλλικούς ορθοστάτες (εικόνα 4.18α και β), συμβάλλει στη δημιουργία γεωμετρικής θερμογέφυρας, η οποία υποδεικνύεται από τις βαθμίδες θερμοκρασίας κοντά στη σύνδεση. Ακόμα, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών (εικόνα 4.18γ και δ) αυξάνει περισσότερο την κλίση των καμπυλών θερμοκρασίας στην περιοχή που έχουν τοποθετηθεί, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμογέφυρα.



Εικόνα 4.18 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με το ταβάνι: (α) χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP, (β) χωρίς ορθοστάτες-με VIP, (γ) με ορθοστάτες-χωρίς VIP και (δ) με ορθοστάτες-με VIP

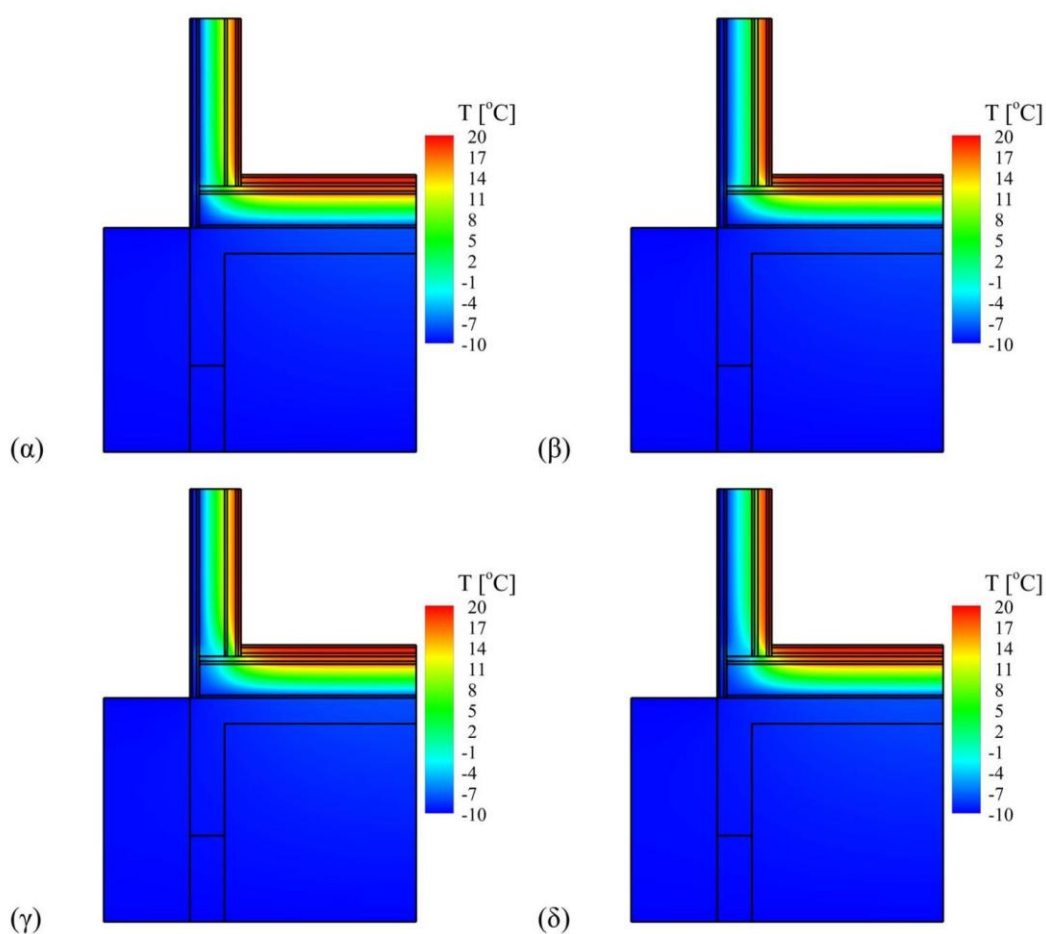
Ο πίνακας 4.8 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας (Q) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) λόγω της γεωμετρικής θερμογέφυρας και της παρουσίας των μεταλλικών ορθοστατών, με αλλά και χωρίς VIP για τη συγκεκριμένη σύνδεση. Παρατηρούμε ότι η παρουσία των ορθοστατών αυξάνει τις θερμικές απώλειες κατά 36.8% όταν δεν έχουμε VIP και κατά 37.8% όταν υπάρχει VIP. Αν συγκρίνουμε τις πραγματικές λύσεις (δηλαδή τις περιπτώσεις με ορθοστάτες), βλέπουμε πως με την ενσωμάτωση του VIP μειώνουμε τις απώλειες θερμότητας κατά 21.8%.

Πίνακας 4.8 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με το ταβάνι

Περίπτωση	Q [W]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.06060	0.04967
χωρίς ορθοστάτες-με VIP	0.04707	0.06986
με ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.08291	0.19842
με ορθοστάτες-με VIP	0.06485	0.18836

4.3.2.5 Εξωτερικός τοίχος - Πάτωμα

Η εικόνα 4.19 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με το πάτωμα με αλλά και χωρίς τα μεταλλικά στηρίγματα, καθώς και με ή χωρίς το VIP στον εξωτερικό τοίχο. Και σε αυτήν την περίπτωση, το γεωμετρικό σχήμα της σύνδεσης, χωρίς τους μεταλλικούς ορθοστάτες (εικόνα 4.19α και β), συμβάλλει στη δημιουργία γεωμετρικής θερμογέφυρας. Επίσης, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών (εικόνα 4.19γ και δ) αυξάνει την κλίση των καμπυλών θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η θερμογέφυρα.



Εικόνα 4.19 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με το πάτωμα: (α) χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP, (β) χωρίς ορθοστάτες-με VIP, (γ) με ορθοστάτες-χωρίς VIP και (δ) με ορθοστάτες-με VIP

Ο πίνακας 4.9 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες (Q) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης λόγω της γεωμετρικής θερμογέφυρας και της παρουσίας των μεταλλικών ορθοστατών με αλλά και χωρίς VIP. Παρατηρούμε ότι, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνει τις απώλειες θερμότητας κατά 9.9% και 8.6% για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP, αντίστοιχα.

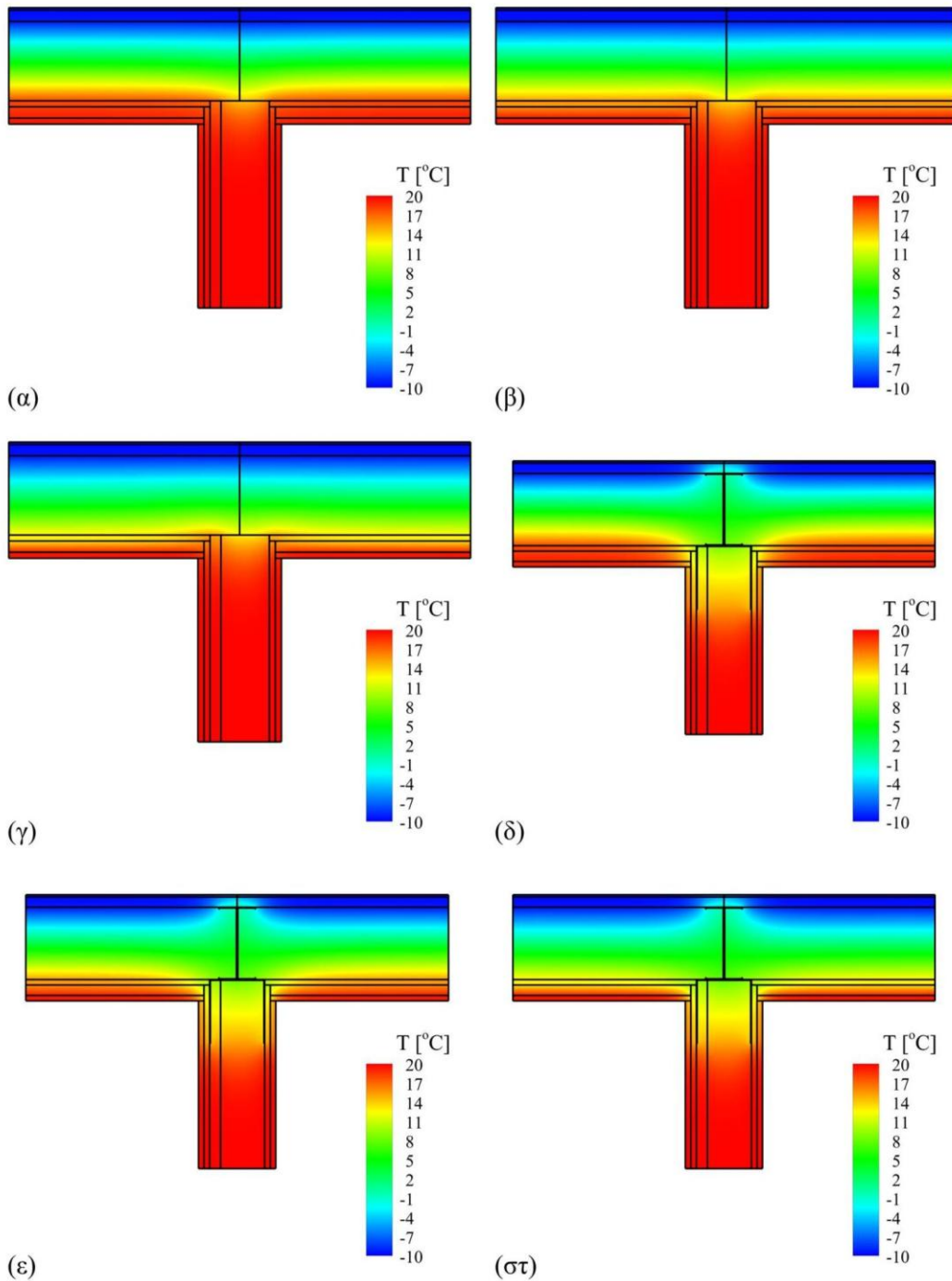
Συγκρίνοντας τώρα τις δύο περιπτώσεις με τους ορθοστάτες (πραγματικές λύσεις), βλέπουμε ότι η προσθήκη του VIP στον εξωτερικό τοίχο μειώνει τις θερμικές απώλειες κατά 16.5%.

Πίνακας 4.9 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης του εξωτερικού τοίχου με το πάτωμα

Περίπτωση	Q [W]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.01116	-0.02782
χωρίς ορθοστάτες-με VIP	0.00944	-0.02489
με ορθοστάτες-χωρίς VIP	0.01227	0.00890
με ορθοστάτες-με VIP	0.01025	0.00215

4.3.2.6 Εσωτερικός τοίχος - Οροφή

Η εικόνα 4.20 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με την οροφή με και χωρίς μεταλλικούς ορθοστάτες, καθώς και τις τρεις περιπτώσεις για το resilient channel, το οποίο μπορεί να είναι είτε άδειο (κενό αέρος) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη. Είναι φανερό πως το γεωμετρικό σχήμα της σύνδεσης, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψιν τα μεταλλικά στηρίγματα (εικόνα 4.20α, β και γ), συμβάλλει στη δημιουργία γεωμετρικής θερμογέφυρας, η οποία υποδεικνύεται από τις καμπύλες θερμοκρασίας κοντά στο σημείο σύνδεσης των δύο τοίχων. Αφ' ετέρου, η παρουσία των ορθοστατών αυξάνει την κλίση των καμπυλών θερμοκρασίας, πράγμα που σημαίνει ότι αυξάνεται και η θερμογέφυρα.



Εικόνα 4.20 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με την οροφή: (α) χωρίς ορθοστάτες-με αέρα, (β) χωρίς ορθοστάτες-με πετροβάμβακα, (γ) χωρίς ορθοστάτες-με αερογέλη, (δ) με ορθοστάτες-με αέρα, (ε) με ορθοστάτες-με πετροβάμβακα και (στ) με ορθοστάτες-με αερογέλη

Ο πίνακας 4.10 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας (Q) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) για τις περιπτώσεις της σύνδεσης που εξετάζουμε. Παρατηρούμε ότι, η παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνει τις θερμικές απώλειες κατά 178.6%, 188.8% και 202.8% για τις περιπτώσεις με αέρα,

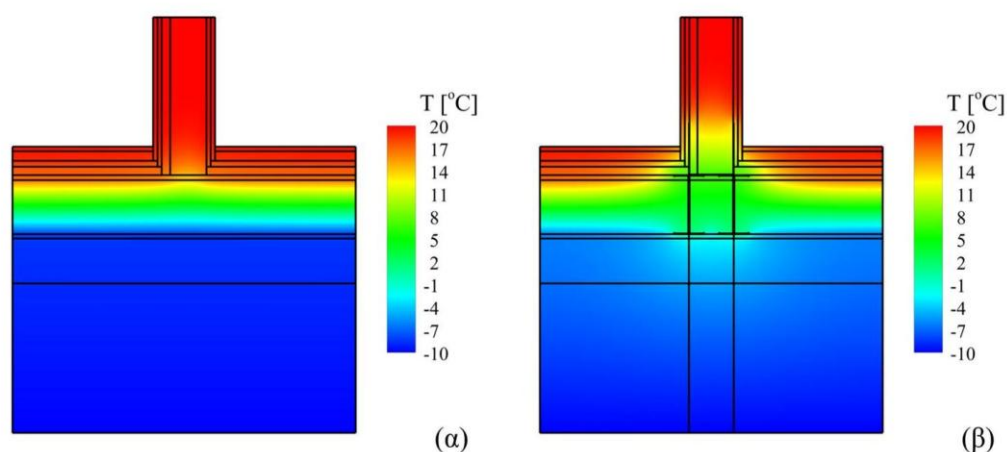
πετροβάμβακα και αερογέλης του resilient channel, αντίστοιχα. Επίσης, στην περίπτωση με τους ορθοστάτες (πραγματική λύση), η παρουσία του πετροβάμβακα στο resilient channel της οροφής μειώνει τις απώλειες θερμότητας κατά 4.4%, ενώ η αερογέλη κατά 7.6%, όταν συγκρίνονται με την περίπτωση που το resilient channel είναι άδειο (κενό αέρος).

Πίνακας 4.10 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με την οροφή

Περίπτωση	resilient channel	Q [W]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες	κενό αέρος	0.02735	-0.00343
	πετροβάμβακας	0.02522	-0.00131
	αερογέλη	0.02325	0.00258
με ορθοστάτες	κενό αέρος	0.07620	0.32225
	πετροβάμβακας	0.07286	0.31631
	αερογέλη	0.07040	0.31687

4.3.2.7 Εσωτερικός τοίχος - Πάτωμα

Η εικόνα 4.21 απεικονίζει τις καμπύλες θερμοκρασίας για τη σύνδεση του εσωτερικού τοίχου με το πάτωμα με και χωρίς μεταλλικούς ορθοστάτες. Όπως φαίνεται στην εικόνα, το γεωμετρικό σχήμα της σύνδεσης, χωρίς τους ορθοστάτες (εικόνα 4.21α), συμβάλλει στη δημιουργία γεωμετρικής θερμογέφυρας. Με την παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών αυξάνεται η κλίση στις καμπύλες θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η θερμογέφυρα.



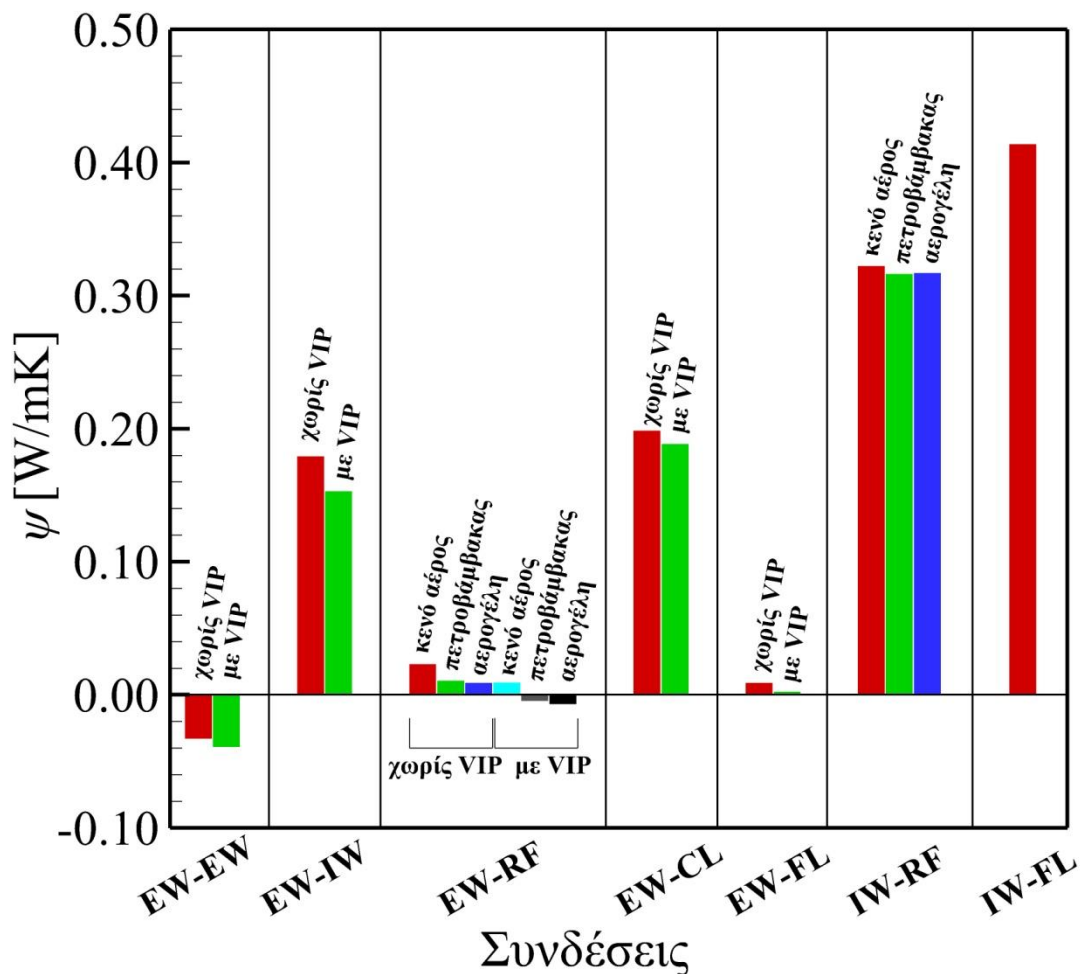
Εικόνα 4.21 Καμπύλες θερμοκρασίας της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με το πάτωμα: (α) χωρίς ορθοστάτες και (β) με ορθοστάτες

Ο πίνακας 4.11 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες (Q) και το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) λόγω της γεωμετρικής θερμογέφυρας της σύνδεσης και της παρουσίας των μεταλλικών ορθοστατών. Είναι φανερό ότι η παρουσία των ορθοστατών αυξάνει σημαντικά τις απώλειες θερμότητας, δηλαδή κατά 229.4%.

Πίνακας 4.11 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της σύνδεσης του εσωτερικού τοίχου με το πάτωμα

Περίπτωση	Q [W]	Ψ [W/mK]
χωρίς ορθοστάτες	0.00541	0.00007
με ορθοστάτες	0.01782	0.41373

Στο διάγραμμα 1 που ακολουθεί απεικονίζεται ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) για τις συνδέσεις των τοιχοποιιών του κτιρίου. Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη θερμογέφυρα εισάγεται στη σύνδεση του εσωτερικού τοίχου με το πάτωμα. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η εγκατάσταση ενός υπέρ-μονωτικού υλικού (π.χ. VIP, αερογέλη) δε μειώνει σημαντικά την επίδραση της θερμογέφυρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα υπέρ-μονωτικά υλικά δεν προστατεύουν τη σύνδεση, αλλά μόνο την τοιχοποιία στην οποία έχουν εγκατασταθεί. Έτσι, θα πρέπει να γίνει ειδική μελέτη κοντά στη σύνδεση που να περιλαμβάνει είτε επανατοποθέτηση των ορθοστατών είτε τοπική μόνωση με συμβατικά ή υπέρ-μονωτικά υλικά.



Διάγραμμα-1 Συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) των συνδέσεων του κτιρίου

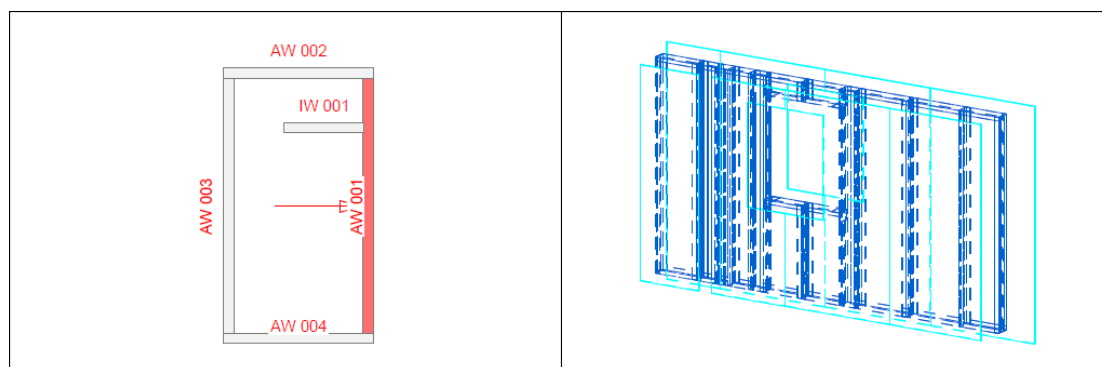
5. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ELISSA

Όλη η παραπάνω ανάλυση έγινε λαμβάνοντας υπόψιν συγκεκριμένα τμήματα τοιχοποιιών, όπως οι συνδέσεις μεταξύ τοίχων, προκειμένου να υπολογίσουμε τις θερμογέφυρες που εισάγονται από το μεταλλικό σκελετό του κτιρίου (π.χ. μεταλλικοί ορθοστάτες). Συνεπώς, με τη χρησιμοποίηση των τιμών για τους συντελεστές θερμοπερατότητας (U) και γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) που προέκυψαν, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις θερμικές απώλειες για τις πραγματικές τοιχοποιίες του κτιρίου ELISSA. Παρουσιάζεται παρακάτω η ανάλυση για κάθε τοιχοποιία του κτιρίου ELISSA.

5.1 Τοιχοποιίες

5.1.1 Εξωτερικός τοίχος "AW 001"

Η εικόνα 5.1 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 001" (αριστερά), καθώς και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά). Η επιφάνεια του τοίχου είναι $A=8.307925 \text{ m}^2$ (δε λαμβάνεται υπόψιν το παράθυρο επιφάνειας ίσης με $A_{\pi}=0.99 \text{ m}^2$).



Εικόνα 5.1 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 001"

Ο πίνακας 5.1 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U) που οφείλονται σε διάφορες περιπτώσεις της τοιχοποιίας (π.χ. θερμικές απώλειες λόγω μεταλλικών ορθοστατών, απώλειες λόγω σύνδεσης με επιμέρους τοιχοποιίες). Πρέπει να αναφερθεί πως για το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της κάθε σύνδεσης έχουμε λάβει υπόψιν το μισό της αξίας του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θεωρούμε την επίδραση της θερμογέφυρας (και κατ' επέκταση την αξία του Ψ) ισομερώς κατανομημένη και στα δύο μέρη της σύνδεσης. Ο τύπος για τον υπολογισμό του (συνολικού) συντελεστή θερμοπερατότητας (U_{wall}) παρουσιάζεται παρακάτω:

$$U_{wall} = U_{clear,wall} + U_{studs} + U_{junction}$$

Εξίσωση 5.1

όπου:

$$U_{studs} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{studs}} (\psi_{stud_i} l_{stud_i}) n_i}{A_{wall}} \quad \text{και}$$

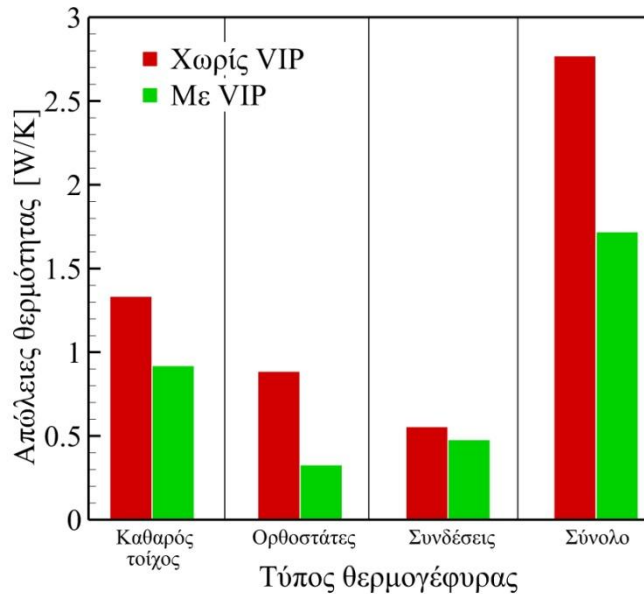
$$U_{junction} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{junction}} (\frac{\psi_j}{2} l_j)}{A_{wall}}$$

Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα, η τιμή U του κεντρικού μέρους της πραγματικής τοιχοποιίας (δηλαδή ο καθαρός τοίχος μαζί με τα μεταλλικά στηρίγματα- $U_{clear,wall} + U_{stud}$) είναι ίση με $U_{NoVIP} = 0.26644 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.14938 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές που προέκυψαν είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές που έχουμε ορίσει για τον εξωτερικό τοίχο (πίνακας 4.2), δηλαδή στις $U_{NoVIP} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$. Παρουσιάζεται, λοιπόν, μια διαφορά της τάξης του 11% και 7% αντίστοιχα. Το τελευταίο αποδεικνύει ότι η ακολουθούμενη μεθοδολογία οδηγεί σε αρκετά ακριβή αποτελέσματα.

Πίνακας 5.1 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 001"

	Χωρίς VIP	Με VIP
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [W/m²K]	
$U_{clear,wall}$	0.16017	0.11028
U_{stud}	0.10627	0.03910
$U_{junction}$	0.06654	0.05712
U_{WALL}	0.33298	0.20650
	Απώλειες θερμότητας [W/K]	
$Q_{clear,wall}$	1.33070	0.91622
Q_{stud}	0.88285	0.32487
$Q_{junction}$	0.55281	0.47452
Q_{WALL}	2.76636	1.71561

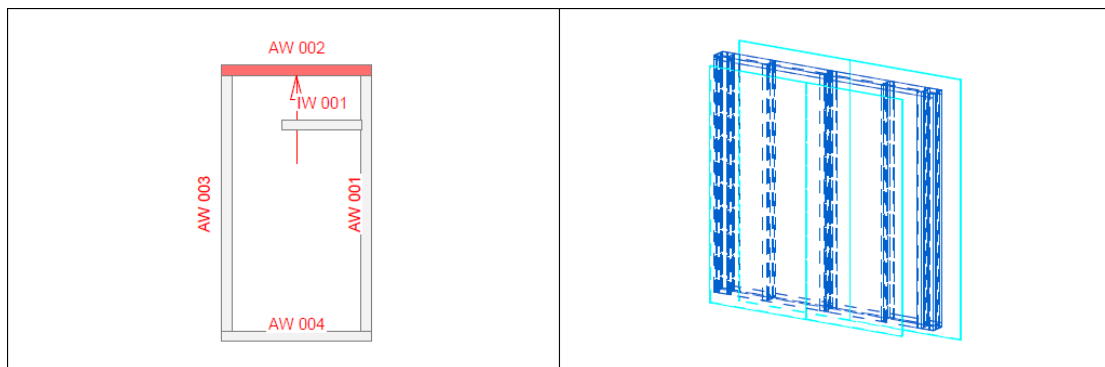
Το Διάγραμμα-2 που ακολουθεί παρουσιάζει αναλυτικά τις απώλειες θερμότητας που οφείλονται στον καθαρό τοίχο ($Q_{clear,wall}$), στην παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών (Q_{stud}) και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων ($Q_{junction}$), με και χωρίς την ενσωμάτωση του μονωτικού υλικού VIP. Όπως φαίνεται, η παρουσία του VIP μειώνει τις συνολικές θερμικές απώλειες της τοιχοποιίας κατά 38% περίπου. Ωστόσο, η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στη μείωση των απωλειών από το κεντρικό τμήμα του τοίχου ($Q_{clear,wall} + Q_{stud}$). Παρατηρούμε λοιπόν ότι, το VIP "προστατεύει" κυρίως το κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας σε σχέση με τις συνδέσεις.



Διάγραμμα-2 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 001"

5.1.2 Εξωτερικός τοίχος "AW 002"

Η εικόνα 5.2 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 002" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά). Η επιφάνεια αυτού του τοίχου είναι ίση με $A=5.430425 \text{ m}^2$.



Εικόνα 5.2 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 002"

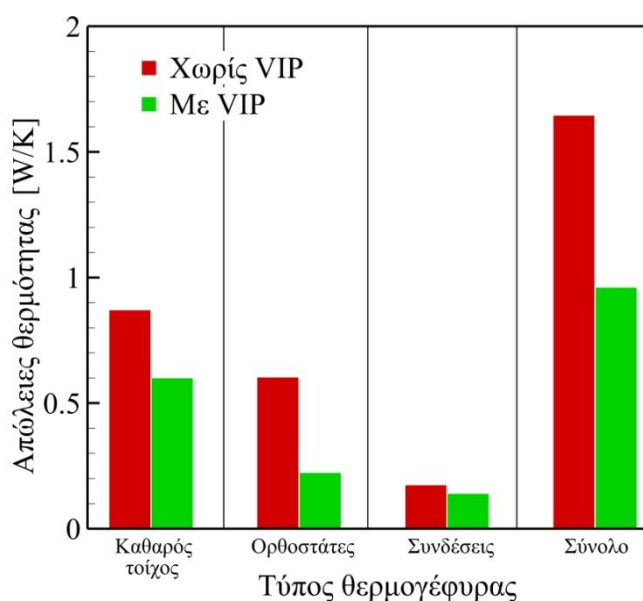
Ο πίνακας 5.2 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U) που οφείλονται σε διάφορες περιπτώσεις της τοιχοποιίας, όπως π.χ. αυτή του "καθαρού" τοίχου (δηλ. χωρίς ορθοστάτες). Για τον υπολογισμό του (συνολικού) συντελεστή θερμοπερατότητας (U_{WALL}) χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση 5.1 (όπου για το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας της κάθε σύνδεσης έχουμε λάβει υπόψιν το μισό της αξίας του). Όπως φαίνεται από τον πίνακα, η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του τοίχου ($U_{\text{clear,wall}} + U_{\text{stud}}$) είναι ίση με

$U_{NoVIP} = 0.27104 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.15108 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Οι τιμές λοιπόν αυτές είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες που έχουμε ορίσει για τον εξωτερικό τοίχο ($U_{NoVIP} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$). Επομένως, παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 13% και 8% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 002"

	Χωρίς VIP	Με VIP
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [W/m²K]	
$U_{clear,wall}$	0.16017	0.11028
U_{stud}	0.11087	0.04080
$U_{junction}$	0.03181	0.02554
U_{WALL}	0.30285	0.17662
Απώλειες θερμότητας [W/K]		
$Q_{clear,wall}$	0.86980	0.59888
Q_{stud}	0.60209	0.22156
$Q_{junction}$	0.17273	0.13869
Q_{WALL}	1.64462	0.95913

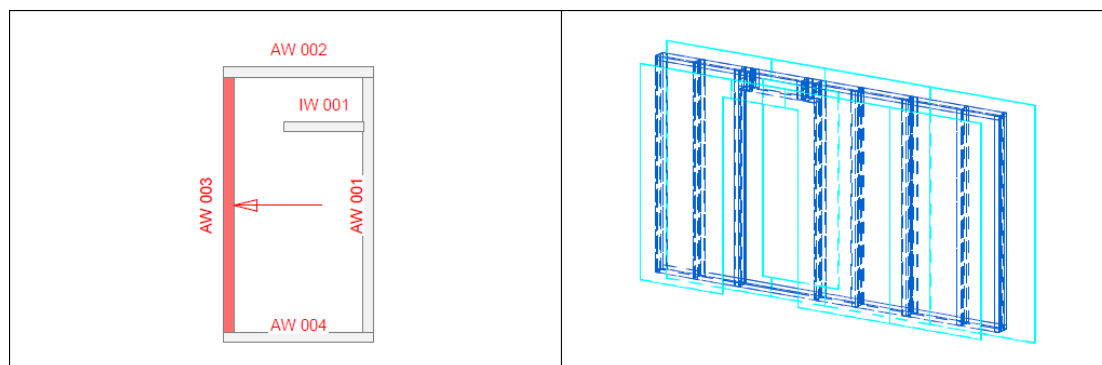
Το Διάγραμμα-3 παρουσιάζει τις θερμικές απώλειες που οφείλονται στο κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας αυτής (καθαρός τοίχος και ορθοστάτες) και στις 2-D συνδέσεις, με και χωρίς την παρουσία του VIP. Είναι φανερό ότι με την προσθήκη του VIP μειώνουμε τις συνολικές απώλειες θερμότητας κατά 41.7%. Όμως, το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της μείωσης οφείλεται στο κεντρικό τμήμα του τοίχου, γιατί το VIP "προστατεύει" κυρίως το κεντρικό μέρος της τοιχοποιίας σε σχέση με τις συνδέσεις.



Διάγραμμα-3 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 002"

5.1.3 Εξωτερικός τοίχος "AW 003"

Η εικόνα 5.3 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 003" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά). Η επιφάνεια του τοίχου είναι ίση με $A=7.326675 \text{ m}^2$ (δε λαμβάνεται υπόψιν η πόρτα επιφάνειας ίσης με $A_{\pi}=1.97 \text{ m}^2$).



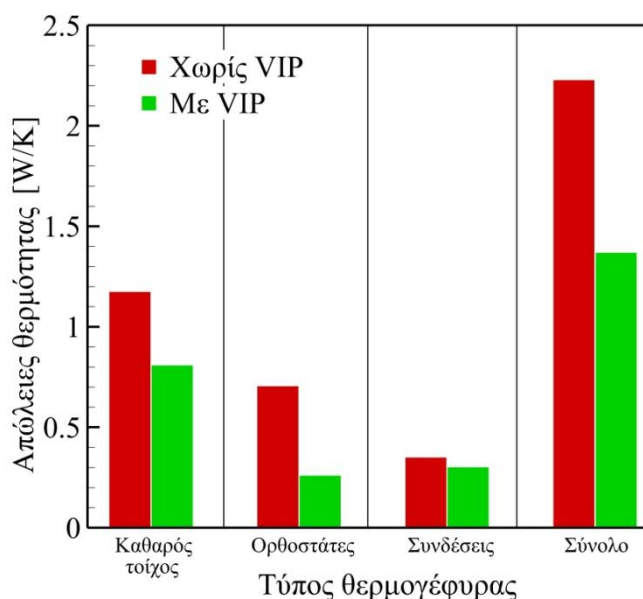
Εικόνα 5.3 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 003"

Ο πίνακας 5.3 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U) για τις περιπτώσεις του κεντρικού τμήματος της τοιχοποιίας ($U_{\text{clear,wall}} + U_{\text{stud}}$) και της σύνδεσης με επιμέρους τοιχοποιίες (U_{junction}). Για το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της κάθε σύνδεσης έχουμε λάβει υπόψιν το μισό της αξίας του, γιατί θεωρούμε την επίδραση της θερμογέφυρας ισομερώς κατανομημένη και στα δύο μέρη της σύνδεσης. Για τον υπολογισμό του (συνολικού) συντελεστή θερμοπερατότητας (U_{WALL}) χρησιμοποιούμε την εξίσωση 5.1. Η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του τοίχου είναι ίση με $U_{\text{NoVIP}} = 0.25630 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{\text{VIP}} = 0.14565 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές που προκύπτουν είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές που έχουμε ορίσει αρχικά για τον εξωτερικό τοίχο ($U_{\text{NoVIP}} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{\text{VIP}} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$). Παρουσιάζεται δηλαδή μεταξύ των τιμών αυτών μια διαφορά της τάξης του 6.8% και 4.3% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.3 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 003"

	Χωρίς VIP	Με VIP
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [$\text{W/m}^2\text{K}$]	
$U_{\text{clear,wall}}$	0.16017	0.11028
U_{stud}	0.09613	0.03537
U_{junction}	0.04763	0.04103
U_{WALL}	0.30393	0.18669
	Απώλειες θερμότητας [W/K]	
$Q_{\text{clear,wall}}$	1.17353	0.80801
Q_{stud}	0.70433	0.25918
Q_{junction}	0.34895	0.30063
Q_{WALL}	2.22681	1.36781

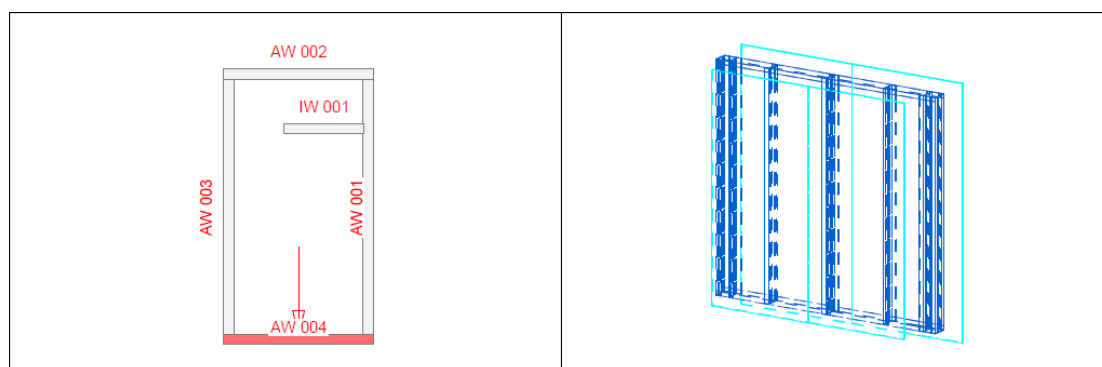
Το Διάγραμμα-4 απεικονίζει τις απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 003" που οφείλονται στον καθαρό τοίχο ($Q_{clear,wall}$), στην παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών (Q_{stud}) και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων ($Q_{junction}$), με και χωρίς την ενσωμάτωση του VIP. Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη VIP μειώνουμε τις συνολικές απώλειες θερμότητας κατά 38.6%. Ωστόσο, η κύρια συνεισφορά αυτής της μείωσης οφείλεται στη μείωση των θερμικών απωλειών από το κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας ($Q_{clear,wall} + Q_{stud}$). Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το VIP "προστατεύει" σε μεγαλύτερο βαθμό το κεντρικό τμήμα σε σχέση με τις συνδέσεις.



Διάγραμμα-4 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 003"

5.1.4 Εξωτερικός τοίχος "AW 004"

Η εικόνα 5.4 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 004" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά), του οποίου η επιφάνεια είναι ίση με $A=5.430425 \text{ m}^2$.



Εικόνα 5.4 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 004"

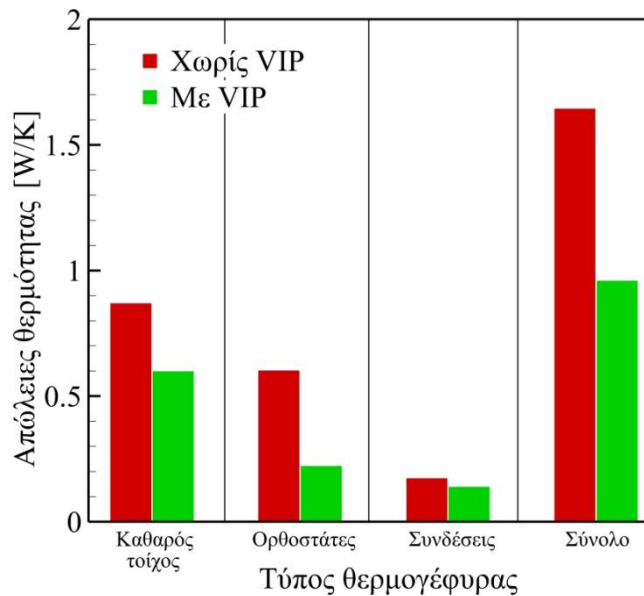
Ο πίνακας 5.4 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U) για τις περιπτώσεις του καθαρού τοίχου, της παρουσίας των ορθοστατών και της σύνδεσης με επιμέρους τοιχοποιίες. Για τον υπολογισμό των τιμών του U χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση 5.1. Παρατηρούμε ότι, η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του τοίχου ($U_{\text{clear,wall}} + U_{\text{stud}}$) είναι ίση με $U_{\text{NoVIP}} = 0.27104 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{\text{VIP}} = 0.15108 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Οι τιμές λοιπόν αυτές είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες που έχουμε ορίσει για τον εξωτερικό τοίχο ($U_{\text{NoVIP}} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{\text{VIP}} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$). Επομένως, παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 13% και 8% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.4 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 004"

	Χωρίς VIP	Με VIP
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [$\text{W/m}^2\text{K}$]	
$U_{\text{clear,wall}}$	0.16017	0.11028
U_{stud}	0.11087	0.04080
U_{junction}	0.03181	0.02554
U_{WALL}	0.30285	0.17662
Απώλειες θερμότητας [W/K]		
$Q_{\text{clear,wall}}$	0.86980	0.59888
Q_{stud}	0.60209	0.22156
Q_{junction}	0.17273	0.13869
Q_{WALL}	1.64462	0.95913

Το Διάγραμμα-5 παρουσιάζει αναλυτικά τις θερμικές απώλειες του εξωτερικού τοίχου "AW 004" που οφείλονται στον καθαρό τοίχο ($Q_{\text{clear,wall}}$), στην παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών (Q_{stud}) και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων (Q_{junction}), με και χωρίς την παρουσία του VIP. Είναι φανερό ότι με την προσθήκη του VIP μειώνουμε τις συνολικές απώλειες θερμότητας κατά 41.7%. Ωστόσο, η κύρια συνεισφορά αυτής της μείωσης οφείλεται στη μείωση των θερμικών απωλειών από τον καθαρό τοίχο και την παρουσία των μεταλλικών ορθοστατών ($Q_{\text{clear,wall}} + Q_{\text{stud}}$). Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το VIP "προστατεύει" σε μεγαλύτερο βαθμό το κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας σε σχέση με τις συνδέσεις.

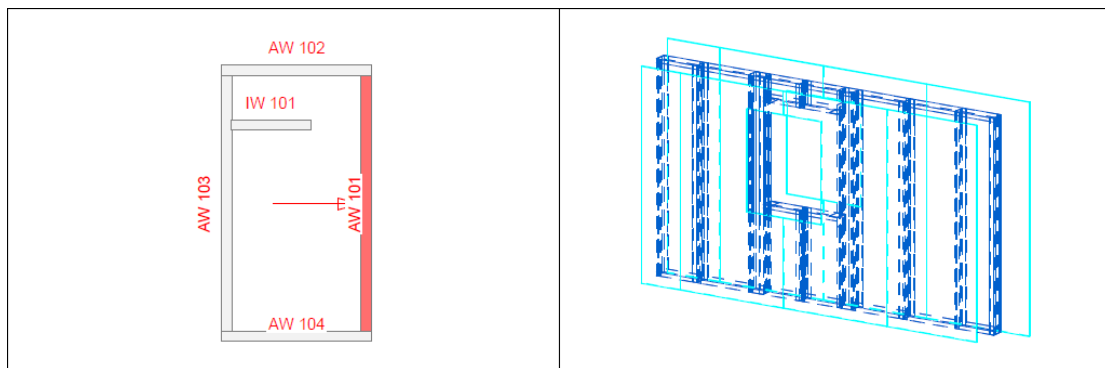
Παρατήρηση: Η περίπτωση του εξωτερικού τοίχου "AW 004" είναι ακριβώς ίδια με αυτή του εξωτερικού τοίχου "AW 002" (έχουν την ίδια επιφάνεια, ίδιο συντελεστή θερμοπερατότητας U και ίδιες απώλειες θερμότητας).



Διάγραμμα-5 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 004"

5.1.5 Εξωτερικός τοίχος "AW 101"

Η εικόνα 5.5 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 101" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά). Η επιφάνεια του τοίχου είναι ίση με $A=8.475492 \text{ m}^2$ (δε λαμβάνεται υπόψιν το παράθυρο επιφάνειας ίσης με $A_{\pi}=0.99 \text{ m}^2$).



Εικόνα 5.5 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 101"

Ο πίνακας 5.5 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U) για τις περιπτώσεις της τοιχοποιίας χωρίς αλλά και με ορθοστάτες, καθώς και για τις συνδέσεις που έχουν προκύψει με τον τοίχο αυτόν. Πρέπει να αναφέρουμε πως για τη σύνδεση ανάμεσα στον εξωτερικό τοίχο "AW 101" και την οροφή προκύπτουν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, γιατί το resilient channel της οροφής είναι είτε άδειο (κενό αέρος) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη. Παρατηρούμε από τον πίνακα ότι η τιμή U για το

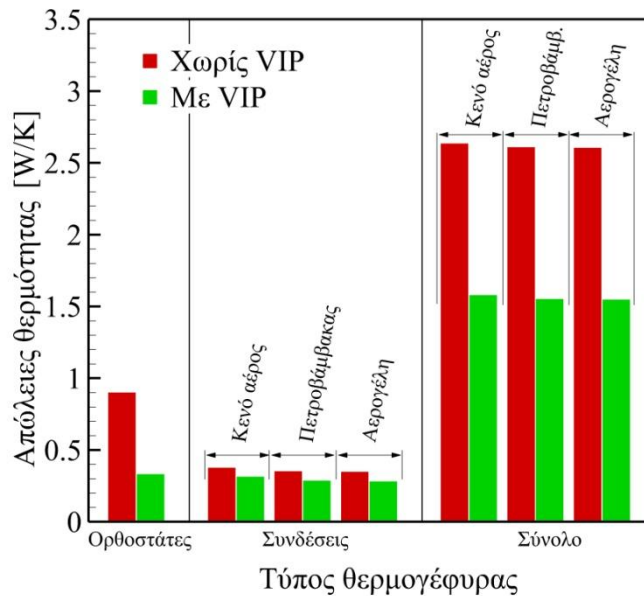
κεντρικό τμήμα του πραγματικού τοίχου (δηλ. ο καθαρός τοίχος μαζί με τους μεταλλικούς ορθοστάτες) είναι $U_{NoVIP} = 0.26636 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.14936 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές που ορίσαμε αρχικά για τον εξωτερικό τοίχο ($U_{NoVIP} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$). Προκύπτει δηλαδή μεταξύ των τιμών αυτών μια διαφορά της τάξης του 11% και 7% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.5 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 101"

<i>Resilient channel</i>	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη
	<i>Χωρίς VIP</i>			<i>Με VIP</i>		
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [W/m²K]					
$U_{clear,wall}$	0.16017	0.16017	0.16017	0.11028	0.11028	0.11028
U_{stud}	0.10619	0.10619	0.10619	0.03908	0.03908	0.03908
$U_{junction}$	0.04443	0.04142	0.04101	0.03696	0.03371	0.03315
U_{WALL}	0.31080	0.30779	0.30737	0.18632	0.18307	0.18251
	Απώλειες θερμότητας [W/K]					
$Q_{clear,wall}$	1.35754	1.35754	1.35754	0.93470	0.93470	0.93470
Q_{stud}	0.90005	0.90005	0.90005	0.33120	0.33120	0.33120
$Q_{junction}$	0.37658	0.35105	0.34756	0.31325	0.28573	0.28094
Q_{WALL}	2.63417	2.60864	2.60515	1.57915	1.55163	1.54684

Το Διάγραμμα-6 παρουσιάζει τις απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 101" που οφείλονται στους μεταλλικούς ορθοστάτες της τοιχοποιίας και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων, με και χωρίς την παρουσία του VIP. Πρέπει να αναφέρουμε πως οι θερμικές απώλειες που προκύπτουν από τις συνδέσεις (2-D) υπολογίστηκαν αναλυτικά και για τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής. Παρατηρούμε ότι, η παρουσία του VIP στον εξωτερικό τοίχο μειώνει τις συνολικές απώλειες θερμότητας κατά 40%, 40.5% και 40.6% για τις περιπτώσεις όπου το resilient channel είναι είτε άδειο (κενό αέρος) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη αντίστοιχα. Ωστόσο, η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στη μείωση των απωλειών από το κεντρικό τμήμα του τοίχου (δηλ. ο καθαρός τοίχος μαζί με τους μεταλλικούς ορθοστάτες). Είναι φανερό λοιπόν ότι το VIP "προστατεύει" σε μεγαλύτερο βαθμό το κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας σε σχέση με τις συνδέσεις.

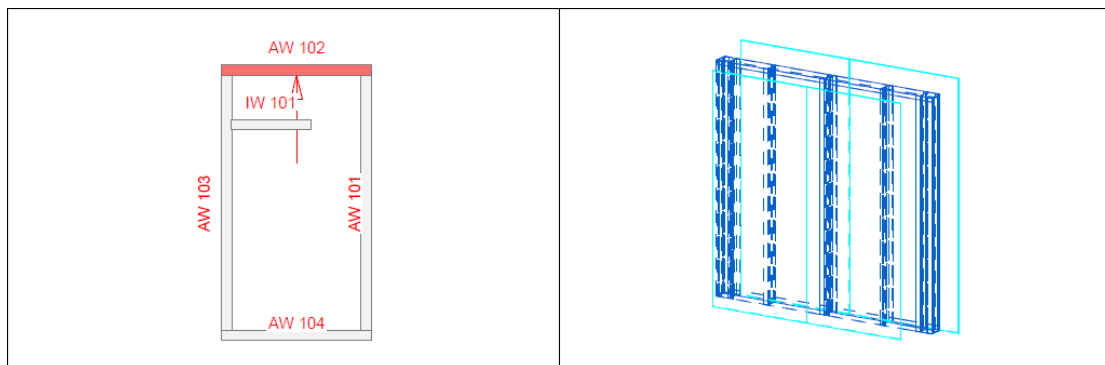
Παρατήρηση: Στο Διάγραμμα-6 δεν εμφανίζονται ξεχωριστά οι απώλειες του "καθαρού" τοίχου.



Διάγραμμα-6 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 101"

5.1.6 Εξωτερικός τοίχος "AW 102"

Η εικόνα 5.6 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 102" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά), του οποίου η επιφάνεια είναι ίση με $A=5.528292 \text{ m}^2$.



Εικόνα 5.6 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 102"

Ο πίνακας 5.6 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U), που οφείλονται στον "καθαρό" τοίχο, στους μεταλλικούς ορθοστάτες της τοιχοποιίας και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων, και για τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης (κενό αέρα, πετροβάμβακας, αερογέλη) του resilient channel της οροφής. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, για το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της κάθε σύνδεσης έχουμε λάβει υπόψιν το μισό της αξίας

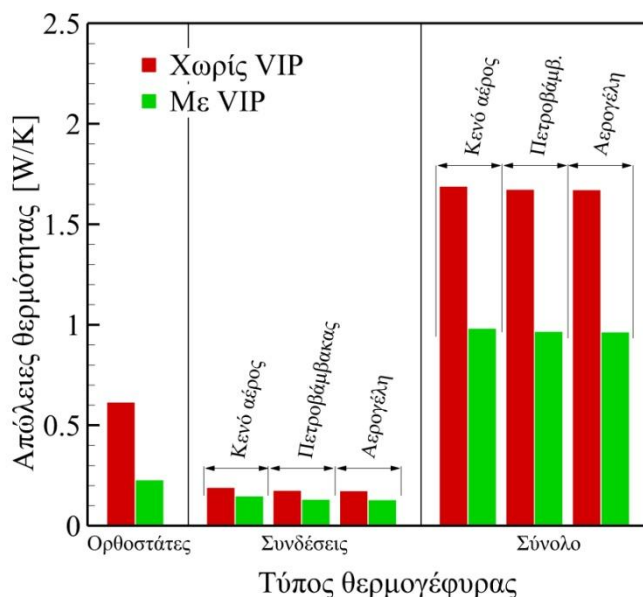
του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θεωρούμε την επίδραση της θερμογέφυρας ισομερώς κατανομημένη και στα δύο μέρη της σύνδεσης. Για τον υπολογισμό του U χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση 5.1. Από τον πίνακα βλέπουμε ότι η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του πραγματικού τοίχου (δηλ. ο καθαρός τοίχος μαζί με τους ορθοστάτες) είναι $U_{NoVIP} = 0.27104 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.15108 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες τιμές που ορίσαμε αρχικά για τον εξωτερικό τοίχο, δηλαδή στις $U_{NoVIP} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$. Συνεπώς, η διαφορά που προκύπτει μεταξύ των τιμών αυτών είναι της τάξης του 13% και 8% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.6 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 102"

<i>Resilient channel</i>	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη
	<i>Χωρίς VIP</i>			<i>Με VIP</i>		
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [$\text{W/m}^2\text{K}$]					
$U_{\text{clear,wall}}$	0.16017	0.16017	0.16017	0.11028	0.11028	0.11028
U_{stud}	0.11087	0.11087	0.11087	0.04080	0.04080	0.04080
U_{junction}	0.03406	0.03137	0.03100	0.02630	0.02339	0.02289
U_{WALL}	0.30511	0.30241	0.30204	0.17738	0.17448	0.17397
	Απώλειες θερμότητας [W/K]					
$Q_{\text{clear,wall}}$	0.88548	0.88548	0.88548	0.60968	0.60968	0.60968
Q_{stud}	0.61294	0.61294	0.61294	0.22555	0.22555	0.22555
Q_{junction}	0.18830	0.17340	0.17136	0.14540	0.12933	0.12653
Q_{WALL}	1.68672	1.67182	1.66978	0.98063	0.96455	0.96176

Το Διάγραμμα-7 που ακολουθεί παρουσιάζει τις θερμικές απώλειες του εξωτερικού τοίχου "AW 102", οι οποίες οφείλονται στους μεταλλικούς ορθοστάτες της κεντρικής τοιχοποιίας και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων, με και χωρίς την παρουσία του VIP. Για τους υπολογισμούς λάβαμε υπόψιν και τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής. Παρατηρούμε ότι, με την προσθήκη του VIP στον εξωτερικό τοίχο μειώνουμε τις συνολικές απώλειες θερμότητας κατά 41.9%, 42.3% και 42.4% για τις περιπτώσεις όπου το resilient channel είναι είτε άδειο (κενό αέρος) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη αντίστοιχα. Όμως, η κύρια συνεισφορά της μείωσης αυτής οφείλεται στη μείωση απωλειών από τον "καθαρό" τοίχο και τους ορθοστάτες. Το τελευταίο φανερώνει ότι το VIP "προστατεύει" κυρίως το κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας σε σχέση με τις συνδέσεις.

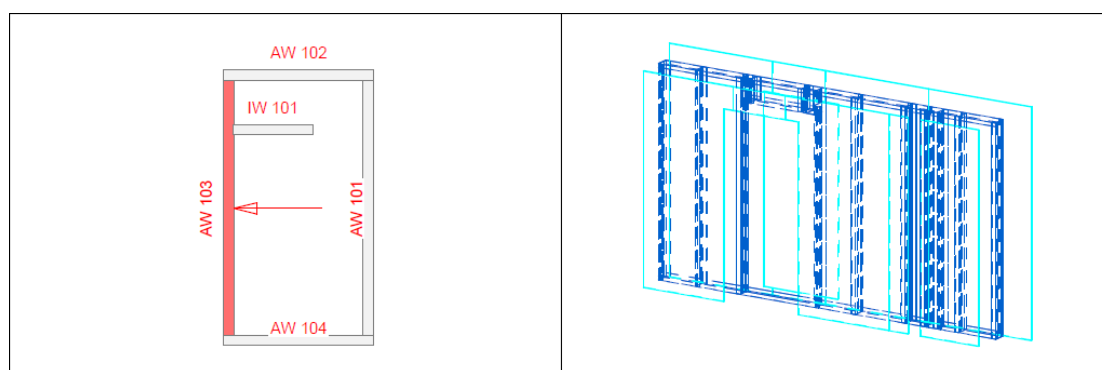
Παρατήρηση: Στο Διάγραμμα-7 δεν εμφανίζονται ξεχωριστά οι απώλειες του "καθαρού" τοίχου.



Διάγραμμα-7 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 102"

5.1.7 Εξωτερικός τοίχος "AW 103"

Η εικόνα 5.7 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 103" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά). Η επιφάνεια του τοίχου είναι ίση με $A=7.506592 \text{ m}^2$ (δε λαμβάνεται υπόψιν η πόρτα επιφάνειας ίσης με $A_{\pi}=1.96 \text{ m}^2$).



Εικόνα 5.7 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 103"

Ο πίνακας 5.7 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U) για τις περιπτώσεις του "καθαρού" τοίχου, των ορθοστατών της κεντρικής τοιχοποιίας και των συνδέσεων 2-D (έχουμε λάβει υπόψιν και τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής). Από τον πίνακα

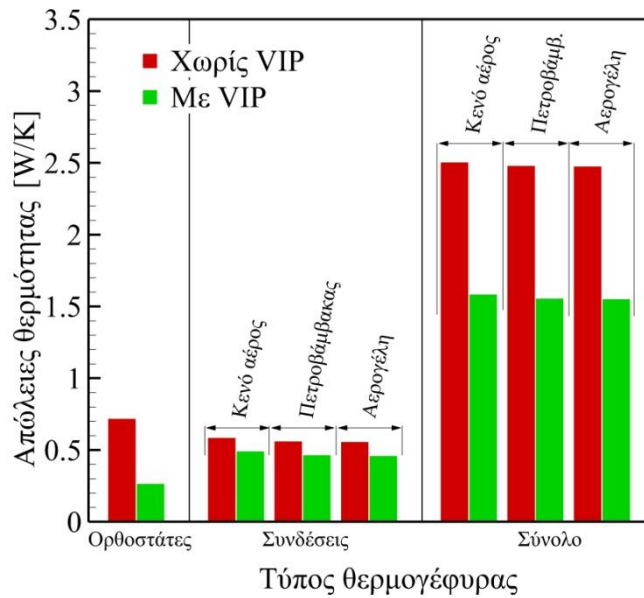
φαίνεται ότι η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του πραγματικού τοίχου είναι $U_{NoVIP} = 0.25569 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.14543 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές που ορίσαμε αρχικά για τον εξωτερικό τοίχο ($U_{NoVIP} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$). Προκύπτει, λοιπόν, μεταξύ των τιμών αυτών μια διαφορά της τάξης του 6.5% και 4.1% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.7 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 103"

<i>Resilient channel</i>	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη
	<i>Χωρίς VIP</i>			<i>Με VIP</i>		
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [$\text{W/m}^2\text{K}$]					
$U_{\text{clear,wall}}$	0.16017	0.16017	0.16017	0.11028	0.11028	0.11028
U_{stud}	0.09552	0.09552	0.09552	0.03515	0.03515	0.03515
U_{junction}	0.07781	0.07441	0.07395	0.06531	0.06165	0.06101
U_{WALL}	0.33351	0.33011	0.32964	0.21074	0.20708	0.20644
	Απώλειες θερμότητας [W/K]					
$Q_{\text{clear,wall}}$	1.20235	1.20235	1.20235	0.82785	0.82785	0.82785
Q_{stud}	0.71703	0.71703	0.71703	0.26385	0.26385	0.26385
Q_{junction}	0.58411	0.55859	0.55510	0.49028	0.46275	0.45797
Q_{WALL}	2.50349	2.47797	2.47447	1.58198	1.55445	1.54967

Το Διάγραμμα-8 παρουσιάζει τις απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 103" που οφείλονται στους μεταλλικούς ορθοστάτες της κεντρικής τοιχοποιίας (Q_{stud}) και στις συνδέσεις με τις επιμέρους τοιχοποιίες (Q_{junction}), με και χωρίς την ενσωμάτωση του VIP. Πρέπει να αναφέρουμε πως οι θερμικές απώλειες που προκύπτουν από τις συνδέσεις δύο διαστάσεων υπολογίστηκαν αναλυτικά και για τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής. Παρατηρούμε ότι, η παρουσία του VIP στον εξωτερικό τοίχο μειώνει τις συνολικές θερμικές απώλειες κατά 36.8%, 37.3% και 37.4% για τις περιπτώσεις όπου το resilient channel είναι είτε άδειο (κενό αέρος) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη αντίστοιχα. Ωστόσο, η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στη μείωση των απωλειών θερμότητας από το κεντρικό τμήμα του πραγματικού τοίχου (δηλ. ο "καθαρός" τοίχος μαζί με τους μεταλλικούς ορθοστάτες). Είναι φανερό, οπότε, ότι το VIP "προστατεύει" σε μεγαλύτερο βαθμό το κεντρικό τμήμα της πραγματικής τοιχοποιίας σε σχέση με τις συνδέσεις.

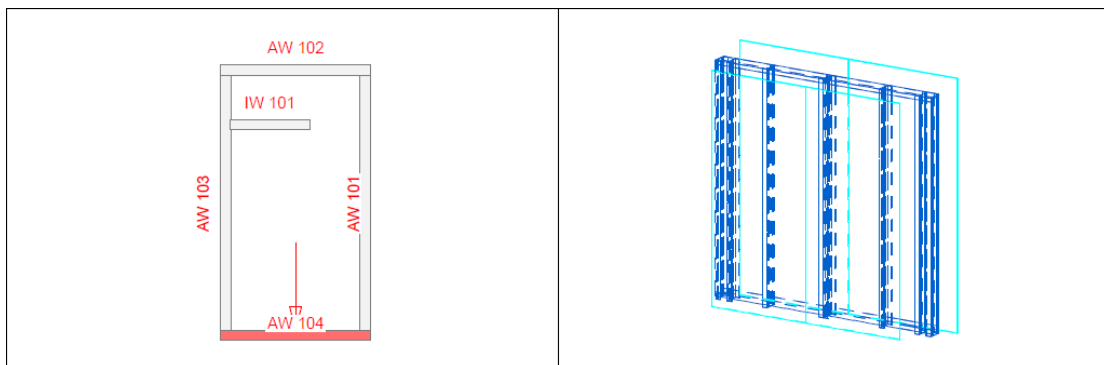
Παρατήρηση: Στο Διάγραμμα-8 δεν εμφανίζονται ξεχωριστά οι απώλειες του "καθαρού" τοίχου.



Διάγραμμα-8 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 103"

5.1.8 Εξωτερικός τοίχος "AW 104"

Η εικόνα 5.8 απεικονίζει την τοποθεσία του εξωτερικού τοίχου "AW 104" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά), του οποίου η επιφάνεια είναι ίση με $A=5.528292 \text{ m}^2$.



Εικόνα 5.8 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του εξωτερικού τοίχου "AW 104"

Ο πίνακας 5.8 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες και τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U), που οφείλονται στον "καθαρό" τοίχο, στους μεταλλικούς ορθοστάτες της κεντρικής τοιχοποιίας και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων, και για τις

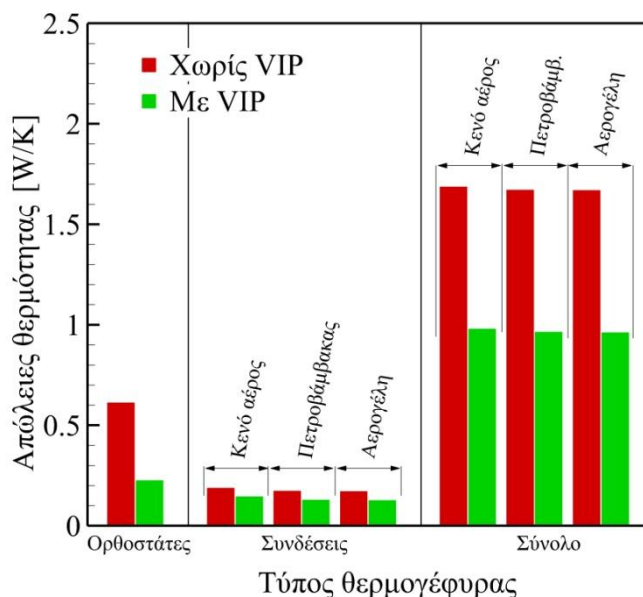
τρεις περιπτώσεις μόνωσης (κενό αέρος, πετροβάμβακας, αερογέλη) του resilient channel της οροφής. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, για το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας (Ψ) της κάθε σύνδεσης έχουμε λάβει υπόψιν το μισό της αξίας του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θεωρούμε την επίδραση της θερμογέφυρας ισομερώς κατανεμημένη και στα δύο μέρη της σύνδεσης. Για τον υπολογισμό του U χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση 5.1. Από τον πίνακα βλέπουμε ότι η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του πραγματικού τοίχου (δηλ. ο "καθαρός" τοίχος μαζί με τους ορθοστάτες) είναι $U_{NoVIP} = 0.27104 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.15108 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις χωρίς και με VIP αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες τιμές που ορίσαμε αρχικά για τον εξωτερικό τοίχο, δηλαδή στις $U_{NoVIP} = 0.24007 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{VIP} = 0.13968 \text{ W/m}^2\text{K}$. Συνεπώς, η διαφορά που προκύπτει μεταξύ των τιμών αυτών είναι της τάξης του 13% και 8% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.8 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για τον εξωτερικό τοίχο "AW 104"

<i>Resilient channel</i>	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη
	<i>Χωρίς VIP</i>			<i>Με VIP</i>		
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [$\text{W/m}^2\text{K}$]					
$U_{\text{clear,wall}}$	0.16017	0.16017	0.16017	0.11028	0.11028	0.11028
U_{stud}	0.11087	0.11087	0.11087	0.04080	0.04080	0.04080
U_{junction}	0.03406	0.03137	0.03100	0.02630	0.02339	0.02289
U_{WALL}	0.30511	0.30241	0.30204	0.17738	0.17448	0.17397
	Απώλειες θερμότητας [W/K]					
$Q_{\text{clear,wall}}$	0.88548	0.88548	0.88548	0.60968	0.60968	0.60968
Q_{stud}	0.61294	0.61294	0.61294	0.22555	0.22555	0.22555
Q_{junction}	0.18830	0.17340	0.17136	0.14540	0.12933	0.12653
Q_{WALL}	1.68672	1.67182	1.66978	0.98063	0.96455	0.96176

Το Διάγραμμα-9 που ακολουθεί παρουσιάζει τις θερμικές απώλειες του εξωτερικού τοίχου "AW 104", οι οποίες οφείλονται στους μεταλλικούς ορθοστάτες της κεντρικής τοιχοποιίας και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων, με και χωρίς την παρουσία του VIP. Για τους υπολογισμούς λάβαμε υπόψιν και τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής. Παρατηρούμε ότι, με την προσθήκη του VIP στον εξωτερικό τοίχο μειώνουμε τις συνολικές απώλειες θερμότητας κατά 41.9%, 42.3% και 42.4% για τις περιπτώσεις όπου το resilient channel είναι είτε άδειο (κενό αέρος) είτε γεμάτο με πετροβάμβακα ή αερογέλη αντίστοιχα. Όμως, η κύρια συνεισφορά της μείωσης αυτής οφείλεται στη μείωση απωλειών από τον "καθαρό" τοίχο και τους ορθοστάτες. Το τελευταίο φανερώνει ότι το VIP "προστατεύει" κυρίως το κεντρικό τμήμα της τοιχοποιίας σε σχέση με τις συνδέσεις.

Παρατήρηση: Στο Διάγραμμα-9 δεν εμφανίζονται ξεχωριστά οι απώλειες του "καθαρού" τοίχου.

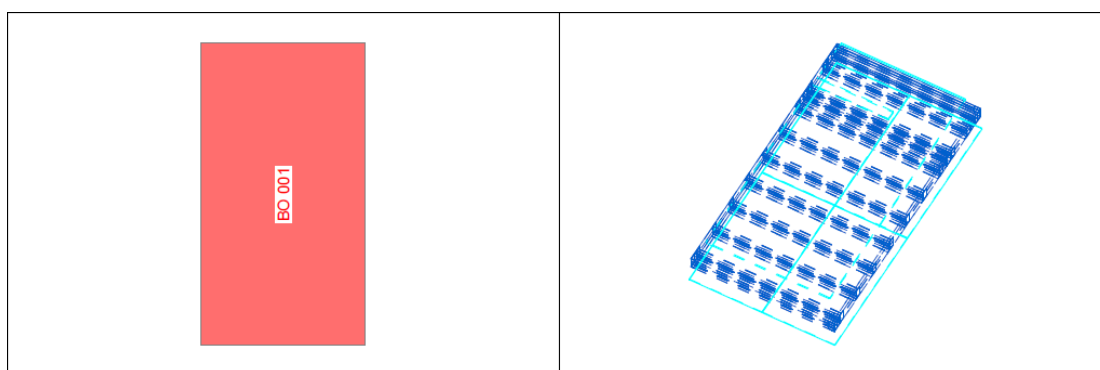


Διάγραμμα-9 Απώλειες θερμότητας του εξωτερικού τοίχου "AW 104"

Παρατήρηση: Η περίπτωση του εξωτερικού τοίχου "AW 104" είναι ακριβώς ίδια με αυτή του εξωτερικού τοίχου "AW 102" (έχουν την ίδια επιφάνεια, ίδιο συντελεστή θερμοπερατότητας U και ίδιες απώλειες θερμότητας).

5.1.9 Πάτωμα "BO 001"

Η εικόνα 5.9 απεικονίζει την τοποθεσία του πατώματος "BO 001" (αριστερά) και το σχηματικό του διάγραμμα (δεξιά). Η επιφάνειά του είναι ίση με $A=10.471769 \text{ m}^2$.



Εικόνα 5.9 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) του πατώματος "BO 001"

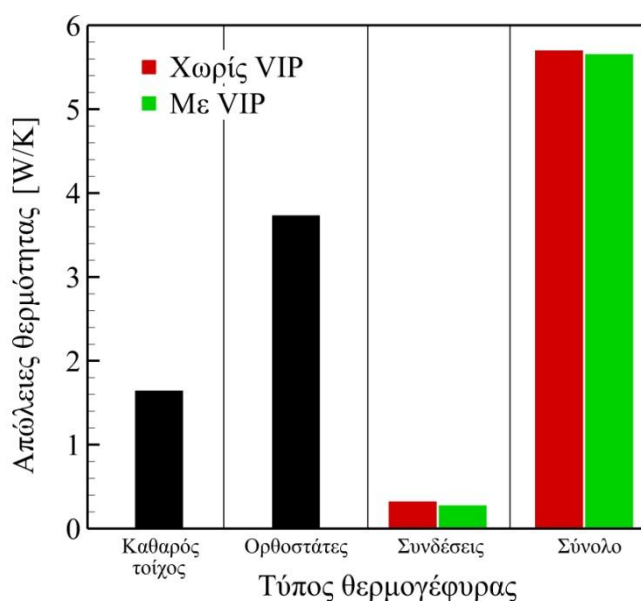
Ο πίνακας 5.9 συνοψίζει τις απώλειες θερμότητας και τις τιμές του U για τις περιπτώσεις του "καθαρού" τοίχου, των ορθοστατών της κεντρικής τοιχοποιίας και των συνδέσεων 2-D. Για το συντελεστή Ψ της κάθε σύνδεσης έχουμε λάβει υπόψιν το

μισό της αξίας του, γιατί θεωρούμε την επίδραση της θερμογέφυρας ισομερώς κατανεμημένη και στα δύο μέρη της σύνδεσης. Παρατηρούμε ότι η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του πραγματικού τοίχου είναι $U=0.51369 \text{ W/m}^2\text{K}$, η οποία είναι κατά 5.6% μεγαλύτερη από την τιμή που ορίσαμε αρχικά (πίνακας 3-4) για το πάτωμα ($U=0.48644 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Πίνακας 5.9 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας για το πάτωμα "BO 001"

	Χωρίς VIP	Με VIP
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [$\text{W/m}^2\text{K}$]	
$U_{\text{clear,wall}}$	0.15707	0.15707
U_{stud}	0.35662	0.35662
U_{junction}	0.03079	0.02642
U_{WALL}	0.54448	0.54012
Απώλειες θερμότητας [W/K]		
$Q_{\text{clear,wall}}$	1.64483	1.64483
Q_{stud}	3.73448	3.73448
Q_{junction}	0.32239	0.27666
Q_{WALL}	5.70170	5.65597

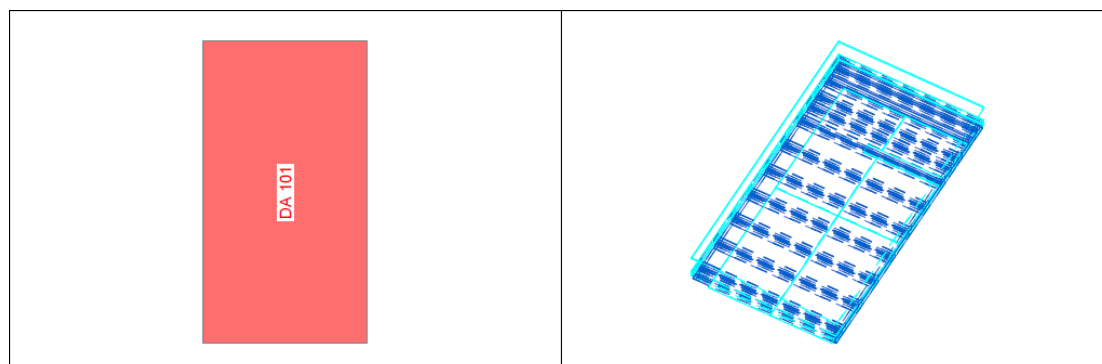
Το Διάγραμμα-10 παρουσιάζει τις θερμικές απώλειες του πατώματος που οφείλονται στον "καθαρό" τοίχο, στους ορθοστάτες του κεντρικού μέρους της τοιχοποιίας και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων, με και χωρίς το VIP στους εξωτερικούς τοίχους. Είναι φανερό πως το VIP δε μειώνει σημαντικά τις απώλειες θερμότητας που οφείλονται στις συνδέσεις, γιατί "προστατεύει" κυρίως το κεντρικό τμήμα των εξωτερικών τοίχων. Οι συνολικές θερμικές απώλειες μειώνονται δηλαδή κατά 0.8%.



Διάγραμμα-10 Απώλειες θερμότητας του πατώματος "BO 001"

5.1.10 Οροφή "DA 101"

Η εικόνα 5.10 απεικονίζει την τοποθεσία της οροφής "DA 101" (αριστερά) και το σχηματικό της διάγραμμα (δεξιά). Η επιφάνειά της είναι ίση με $A=10.471769 \text{ m}^2$.



Εικόνα 5.10 Τοποθεσία (αριστερά) και σχηματικό διάγραμμα (δεξιά) της οροφής "DA 101"

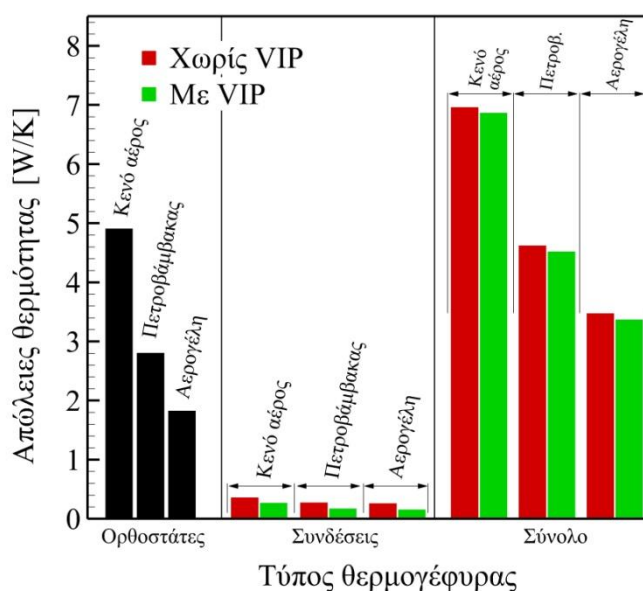
Ο πίνακας 5.10 συνοψίζει τις θερμικές απώλειες και τις τιμές του U που οφείλονται στον "καθαρό" τοίχο, στους ορθοστάτες της κεντρικής τοιχοποιίας και στις 2-D συνδέσεις και για τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής. Παρατηρούμε ότι η τιμή U για το κεντρικό τμήμα του πραγματικού τοίχου είναι $U_{\text{αέρ.}}=0.63041 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{πετροβ.}}=0.41528 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{\text{αερογ.}}=0.30690 \text{ W/m}^2\text{K}$ για τις περιπτώσεις όπου το resilient channel είναι άδειο (κενό αέρος), γεμάτο με πετροβάμβακα και γεμάτο με αερογέλη αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές που προέκυψαν είναι κατά 6%, 5.2% και 4.5% μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που ορίσαμε αρχικά για την οροφή ($U_{\text{αέρ.}}=0.59458 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{πετροβ.}}=0.39480 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $U_{\text{αερογ.}}=0.29359 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Πίνακας 5.10 Απώλειες θερμότητας και συντελεστής θερμοπερατότητας (U) για την οροφή "DA 101"

Resilient channel	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη
	<i>Χωρίς VIP</i>			<i>Με VIP</i>		
	Συντελεστής θερμοπερατότητας [$\text{W/m}^2\text{K}$]					
$U_{\text{clear,wall}}$	0.16155	0.14732	0.13256	0.16155	0.14732	0.13256
U_{stud}	0.46886	0.26796	0.17434	0.46886	0.26796	0.17434
U_{junction}	0.03442	0.02599	0.02491	0.02539	0.01632	0.01484
U_{WALL}	0.66483	0.44126	0.33182	0.65580	0.43159	0.32174
	Απώλειες θερμότητας [W/K]					
$Q_{\text{clear,wall}}$	1.69170	1.54269	1.38817	1.69170	1.54269	1.38817
Q_{stud}	4.90980	2.80599	1.82569	4.90980	2.80599	1.82569
Q_{junction}	0.36049	0.27212	0.26089	0.26586	0.17085	0.15535
Q_{WALL}	6.96199	4.62080	3.47475	6.86736	4.51952	3.36921

Το Διάγραμμα-11 παρουσιάζει τις απώλειες θερμότητας της οροφής "DA 101" που οφείλονται στους ορθοστάτες του κεντρικού τμήματος της τοιχοποιίας και στις συνδέσεις δύο διαστάσεων, με και χωρίς την παρουσία του VIP στους εξωτερικούς τοίχους. Πρέπει να αναφέρουμε ότι έχουμε συμπεριλάβει και τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής. Στην περίπτωση με VIP, παρατηρούμε ότι με την προσθήκη πετροβάμβακα στο resilient channel μειώνουμε τις συνολικές θερμικές απώλειες κατά 34.2%, ενώ με την προσθήκη αερογέλης κατά 51% περίπου. Τέλος, είναι φανερό πως σημαντικότερο ρόλο στη μείωση των συνολικών θερμικών απωλειών παίζει η μόνωση του resilient channel σε σχέση με την παρουσία του VIP, το οποίο δε μειώνει σημαντικά τις απώλειες στις συνδέσεις.

Παρατήρηση: Στο Διάγραμμα-11 δεν εμφανίζονται ξεχωριστά οι απώλειες του "καθαρού" τοίχου.



Διάγραμμα-11 Απώλειες θερμότητας της οροφής "BO 001"

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι οι εσωτερικοί τοίχοι του σπιτιού "IW 001" και "IW 101", καθώς και το ταβάνι "DA 001" δεν αναλύονται ξεχωριστά, γιατί γνωρίζουμε πως δε διαχωρίζουν διαφορετικές θερμικές ζώνες.

5.2 Κτίριο ELISSA

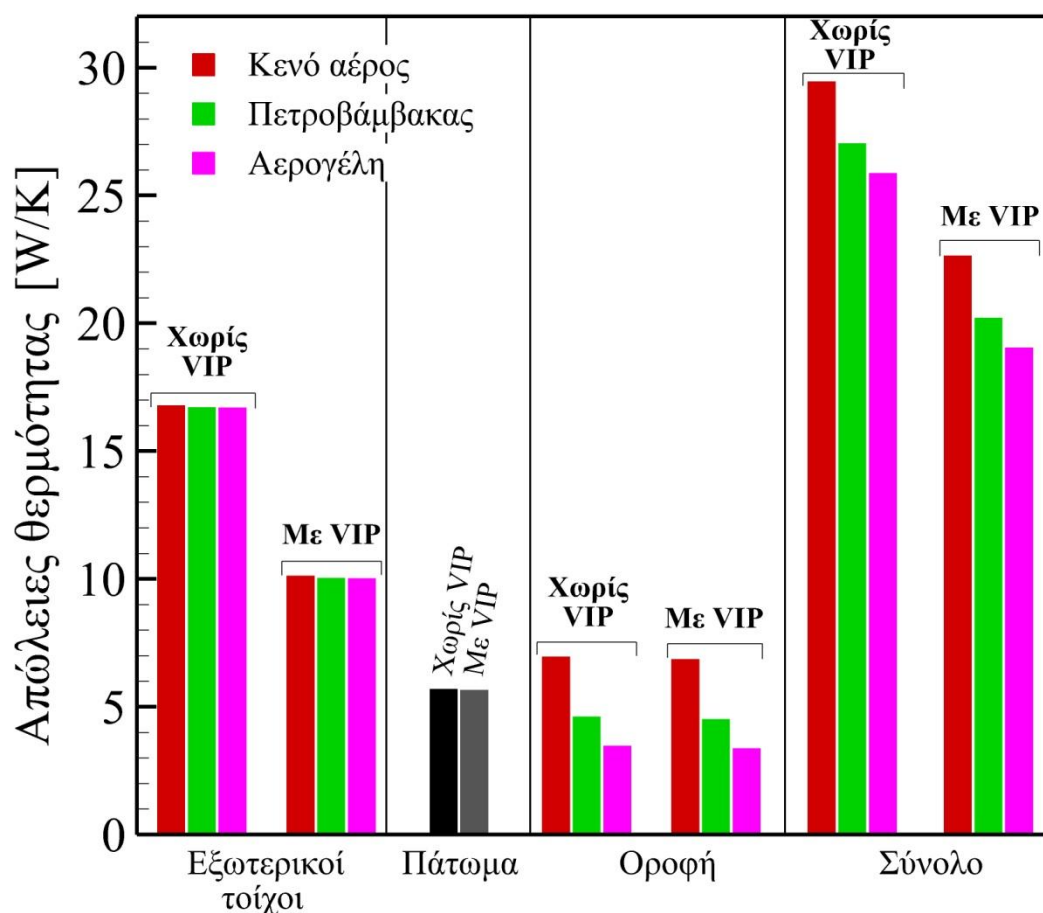
Ο πίνακας 5.11 συνοψίζει τις συνολικές απώλειες θερμότητας του κτιρίου ELISSA που οφείλονται σε όλους τους εξωτερικούς τοίχους, στο πάτωμα και στην οροφή, με αλλά και χωρίς την παρουσία του VIP. Στους υπολογισμούς έχουμε λάβει υπόψιν και τις τρεις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής (κενό αέρος, πετροβάμβακας, αερογέλη). Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που υπάρχει

VIP στους εξωτερικούς τοίχους, οι συνολικές απώλειες θερμότητας μειώνονται κατά 10.8% και 15.9% για τις περιπτώσεις με πετροβάμβακα και αερογέλη αντίστοιχα, συγκριτικά με το ενδεχόμενο να υπάρχει αέρας στο resilient channel.

Πίνακας 5.11 Απώλειες θερμότητας του κτιρίου ELISSA

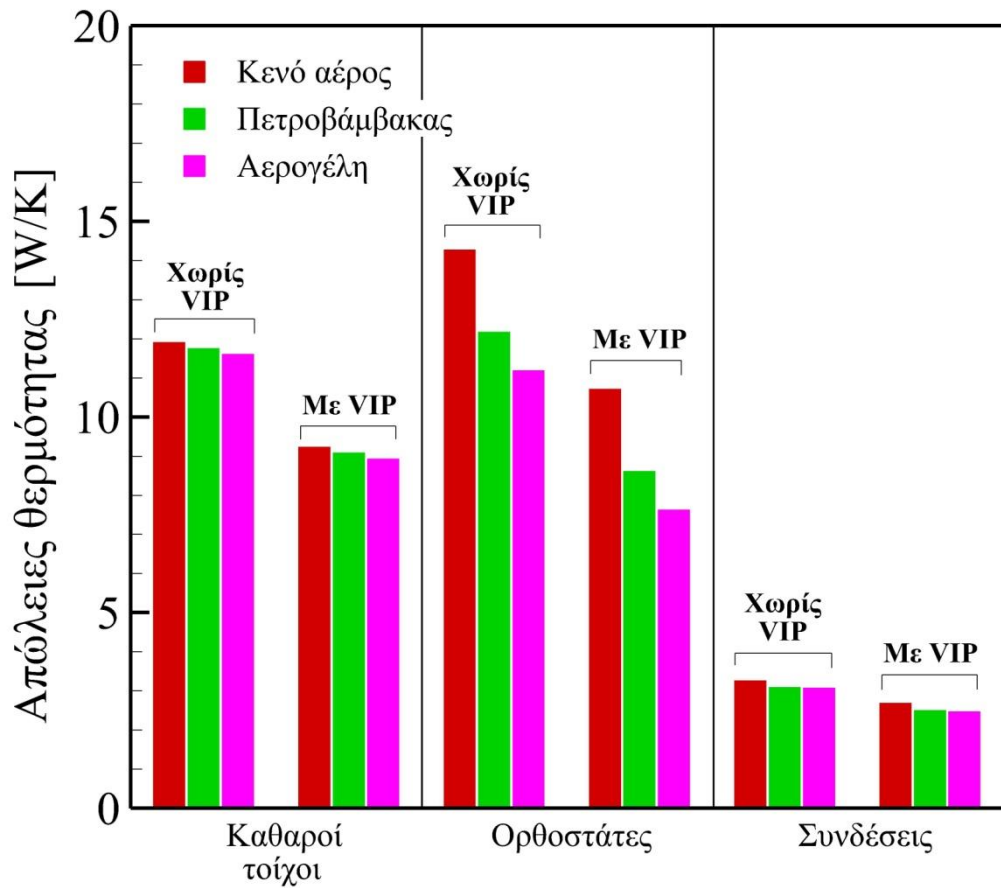
<i>Resilient channel</i>	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη	Κενό αέρος	Πετροβάμβακας	Αερογέλη
	<i>Χωρίς VIP</i>			<i>Με VIP</i>		
	Απώλειες θερμότητας [W/K]					
Εξωτερικοί τοίχοι	16.79351	16.71266	16.70159	10.12407	10.03686	10.02171
Πάτωμα	5.70170	5.70170	5.70170	5.65597	5.65597	5.65597
Οροφή	6.96199	4.62080	3.47475	6.86736	4.51952	3.36921
Κτίριο ELISSA	29.45720	27.03516	25.87804	22.64740	20.21235	19.04689

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας του κτιρίου ELISSA φαίνονται και στο Διάγραμμα-12 που ακολουθεί.



Διάγραμμα-12 Απώλειες θερμότητας του κτιρίου ELISSA

Τέλος, στο Διάγραμμα-13 παρουσιάζονται αναλυτικά οι απώλειες θερμότητας του κτιρίου ELISSA που οφείλονται στους "καθαρούς" τοίχους όλων των τοιχοποιιών, στους ορθοστάτες και στις συνδέσεις (2-D), με αλλά και χωρίς την παρουσία του VIP. Στους υπολογισμούς έχουμε συμπεριλάβει και τις περιπτώσεις μόνωσης του resilient channel της οροφής (κενό αέρος, πετροβάμβακας, αερογέλη).



Διάγραμμα-13 Απώλειες θερμότητας του κτιρίου ELISSA

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης του περιβλήματος του κτιρίου ELISSA με εφαρμογή συμβατικών και υπέρ-μονωτικών υλικών, σε σχέση με όλους τους τύπους θερμογεφυρών που εισάγονται από τα κατασκευαστικά στοιχεία και τη γεωμετρία.

Εκτός από τις θερμογέφυρες που συναντήσαμε και αναλύσαμε παραπάνω, υπάρχουν και οι σημειακές θερμογέφυρες, οι οποίες αφορούν τις 3-D γεωμετρίες του κτιρίου (π.χ. η σύνδεση ενός εξωτερικού τοίχου με το πάτωμα και έναν εσωτερικό τοίχο). Η ανάλυση, όμως, για τις εν λόγω θερμογέφυρες δεν κατέστη δυνατή λόγω περιορισμένου χρόνου.

Ακόμα, η επεξεργασία και η ανάλυση όλων των τοιχοποιιών του κτιρίου, καθώς και των συνδέσεων (2-D) αυτών, πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ANSYS CFX, όπου καθορίσαμε τις απαραίτητες οριακές συνθήκες. Με την παρουσία του υπέρ-μονωτικού υλικού VIP στις εξωτερικές τοιχοποιίες του κτιρίου προκύπτει ότι η μείωση των θερμικών απωλειών αυτών των τοιχοποιιών κυμαίνεται από 37% έως 42% περίπου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το VIP "προστατεύει" κυρίως το κεντρικό τμήμα των τοιχοποιιών (δηλ. τον "καθαρό" τοίχο μαζί με τους μεταλλικούς ορθοστάτες) σε σχέση με τις συνδέσεις. Αντίθετα, οι απώλειες θερμότητας του πατώματος μειώνονται μόνο κατά 0.8% με την προσθήκη VIP στους εξωτερικούς τοίχους με τους οποίους συνδέεται. Φαίνεται, δηλαδή, η μικρή συνεισφορά του VIP στις συνδέσεις των τοιχοποιιών. Επίσης, στην περίπτωση της οροφής, σημαντικό ρόλο για τις απώλειες της παίζει η μόνωση του resilient channel. Έτσι, αν το resilient channel μονωθεί με αερογέλη μειώνουμε τις θερμικές απώλειες της κατά 50% περίπου (σε σχέση με την περίπτωση που το resilient channel είναι άδειο-κενό αέρος). Και στην περίπτωση της οροφής η συνεισφορά του VIP στη μείωση των απωλειών θερμότητας είναι μικρή (αφού συνεισφέρει μόνο στις συνδέσεις και όχι στο κεντρικό τμήμα της οροφής). Επιπλέον, πρέπει να αναφέρουμε ότι οι απώλειες θερμότητας του πατώματος και της οροφής οφείλονται κυρίως στους μεταλλικούς ορθοστάτες (σε σχέση με τις απώλειες που έχουν από τον "καθαρό" τοίχο και τις συνδέσεις με τις επιμέρους τοιχοποιίες).

Αξίζει ακόμα να επισημάνουμε ότι η προσθήκη των μεταλλικών ορθοστατών στη γεωμετρία του πατώματος αύξησε τις θερμικές απώλειες του κατά 210%. Συνεπώς, ιδιαίτερη βάση πρέπει να δοθεί στη μόνωση της περιοχής των μεταλλικών ορθοστατών, ώστε να μειώσουμε σε μεγάλο βαθμό τις απώλειες που οφείλονται στο γεγονός αυτό.

Συμπερασματικά λοιπόν, παρατηρούμε ότι η εγκατάσταση ενός υπέρ-μονωτικού υλικού (π.χ. VIP, αερογέλη) δε μειώνει σημαντικά την επίδραση της θερμογέφυρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα υπέρ-μονωτικά υλικά δεν προστατεύουν τη σύνδεση, αλλά μόνο την τοιχοποιία στην οποία έχουν εγκατασταθεί. Επομένως, θα πρέπει να γίνει ειδική μελέτη κοντά στις συνδέσεις που να περιλαμβάνει είτε επανατοποθέτηση των μεταλλικών ορθοστατών είτε τοπική μόνωση με συμβατικά ή υπέρ-μονωτικά υλικά.

Τέλος, το αρνητικό πρόσημο που παρουσιάζεται σε ορισμένες περιπτώσεις στο συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ προκύπτει από τη σύμβαση επιλογής της εξωτερικής διάστασης για το μήκος των τοιχοποιιών για τον υπολογισμό της τιμής του συντελεστή Ψ .

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Σπύρος Ι. Καρέκος, Μετάδοση Θερμότητας - Θερμομόνωση, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα (2001).
- 2) Carneiro JO, Vasconcelos G, Azevedo S, Jesus C, Palha C, Gomes N, Teixeira V: The evaluation of the thermal behaviour of a mortar based brick masonry wall coated with TiO₂ nanoparticles: An experimental assessment towards energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 2014.
- 3) Leahy M, Barden JL, Murphy BT, Slater-Thompson N, Peterson D: *International Energy Outlook 2013*, U.S. Energy Information Administration (EIA) ΟοΕΑ, U.S. Department of Energy (ed), Vol. Washington, DC, 2013.
- 4) Mohsen S.M., Akash B.A.: Some prospect of energy savings in buildings. *Energy Conversion Management*, 2001.
- 5) Cho K, Hong Y, Seo J: Assessment of the economic performance of vacuum insulation panels for housing projects. *Energy and Buildings*, 2014.
- 6) Mandilaras I, Atsonios I, Zannis G, Founti M.: Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS. *Energy and Buildings*.
- 7) Malliotakis E. MI, Kontogeorgos D., Katsourinis D., Founti M.: 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, IVIS 2013 - 11 th International Vacuum Insulation Symposium Vol. Empa, Switzerland, 2013.
- 8) ISO 10211:2007, Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.
- 9) ISO 6946:1996, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method.
- 10) Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010, Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών, Β' έκδοση, Αθήνα (2012).
- 11) Οδηγός Θερμομόνωσης Κτιρίων, Υπηρεσία Ενέργειας, Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού, 2η έκδοση (2010).
- 12) Φ.Ε.Κ. Β' 407/9.4.2010, Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων.
- 13) Ατσόνιος Ι., Υπολογιστική Προσομοίωση Φαινομένων Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας σε Δομικά Υλικά, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα (2014).

- 14) Σεμιτέλος Γ., Μελέτη Θερμικής Συμπεριφοράς Δομικών Υλικών και Τοιχοποιίας σε Θερμοκρασίες Φωτιάς, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα (2013).
- 15) Κοσμόπουλος Π., Κτίρια, Ενέργεια και Περιβάλλον, University Studio Press, Θεσσαλονίκη (2008).
- 16) Παναγούλια Γ.-Π., Χρήση Θερμομονωτικών Υλικών για Θερμομόνωση των Κτιρίων στην Ελλάδα, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα (2013).
- 17) Παπαδόπουλος Μ., Θερμομόνωση Κτιρίων, Τεχνικές Εκδόσεις MONYAA ABE (1979).
- 18) Μαραγκουδάκη Α., Δυνατότητες Εφαρμογών της Νανοτεχνολογίας στις Κατασκευές, Περιβαλλοντικά Οφέλη - Επιπτώσεις, Μεταπτυχιακή Εργασία, Χανιά (2009).
- 19) Αθανασόπουλος Χ., Προστασία Κτιρίων: Θερμομόνωση - Ηχομόνωση - Ηχοπροστασία, γ' έκδοση, Αθήνα (2005).
- 20) Αθανασόπουλος Χ., Κατασκευή Κτιρίων, Σύνθεση και Τεχνολογία, στ' έκδοση, Αθήνα (2003).
- 21) Αραβαντινός Δ., Ενεργειακός Σχεδιασμός Νέων και Υφιστάμενων Κτιρίων, Επίδραση των Θερμογεφυρών στην Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων: Προβλήματα και Τρόποι Αντιμετώπισής τους, Σημειώσεις για το μικρής διάρκειας σεμινάριο του τμήματος Κεντρικής Μακεδονίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Θεσσαλονίκη (2009).
- 22) Φούντας Γ., Θερμομόνωση Κτιρίων, Εκδόσεις Πλαίσιο, Αθήνα (1980).
- 23) Τσίππρας Κ., Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων, Εκδόσεις Psystems, Αθήνα (2000).
- 24) Αξαρχλή Κ., Γενικές Αρχές του Βιοκλιματικού Σχεδιασμού, Σημειώσεις από μικρής διάρκειας σεμινάριο του ΤΕΕ/ΤΚΜ με γενικό τίτλο - Ενεργειακός Σχεδιασμός Νέων και Υφιστάμενων Κτιρίων, Θεσσαλονίκη (2009).
- 25) Κωνσταντινίδου Χ., Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική και Ενεργειακός Σχεδιασμός, Εκδόσεις Τεχνική Εκδοτική (2008).
- 26) Παντατοσάκη Α., Η Επίδραση των Θερμογεφυρών στη Θερμομονωτική Επάρκεια Κτιρίου σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ., Πτυχιακή Εργασία, Ηράκλειο (2012).
- 27) www.ypeka.gr
- 28) www.fos-xroma.com
- 29) <http://e-infratech.blogspot.com/2011/03/blog-post.html>
- 30) www.isover.ro

- 31) www.knaufinsulation.rs
- 32) www.motpanels.com
- 33) www.isoren.gr
- 34) www.inhabitat.com
- 35) www.buykorea.org
- 36) www.anuncios.cn/motor
- 37) www.ingentaconnect.com
- 38) www.nok6a.net