



















## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Δεδομένου των ιδιαίτερα υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων των κτηρίων, κρίνεται φρόνιμο για λόγους οικονομικούς αλλά και οικολογικούς, να βελτιωθούν και να αναπτυχθούν οι τεχνολογικές λύσεις σε τέτοια κατεύθυνση ώστε να υπάρξει ολιστική διαχείριση του προβλήματος αυτού. Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ο κτηριακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 40% περίπου της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. γεγονός που καθιστά απαραίτητο τον σχεδιασμό κτηρίων με περιορισμένες ενεργειακές ανάγκες. Ταυτοχρόνως, και στα ήδη υπάρχοντα κτήρια μπορούν να γίνουν παρεμβάσεις έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας. Ο κυριότερος τρόπος βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτηρίου, είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη θερμομόνωση του κελύφους του, με σκοπό τον περιορισμό των θερμικών του απωλειών.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται ενεργειακά ένα υποθετικό κτήριο ξηράς δόμησης, από ελαφρύ μεταλλικό σκελετό. Τα κτήρια ξηράς δόμησης, αποδεικνύεται πως τελικά έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα και πως μελλοντικά μπορούν να αποτελέσουν μια ελκυστική λύση στις κτηριακές κατασκευές. Παρόλα αυτά, ο μεταλλικός τους σκελετός εισάγει σημαντικές θερμογέφυρες οι οποίες και ενισχύουν τις θερμικές τους απώλειες. Στη κατεύθυνση αυτή, τα υπερμονωτικά υλικά μπορούν να αποτελέσουν μια ιδανική λύση ως προς τη βελτιστοποίηση της θερμικής τους απόδοσης.

Στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας υπάρχει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της θεωρητικής μεθόδου μελέτης των θερμογεφυρών και των μονωτικών σανίδων κενού (VIP) οι οποίες και προτείνονται για εφαρμογή στη μόνωση των τοίχων του κτηρίου. Στη συνέχεια υπολογίζονται όλες οι θερμογέφυρες όπου εμφανίζονται στο κέλυφος του κτηρίου και προσδιορίζεται η συνεισφορά τους στο συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value) των επιφανειών του. Δεδομένης της θερμική συμπεριφοράς του κτηρίου, παρεμβαίνουμε με επιπλέον βελτιώσεις στη μόνωση του, υπολογίζοντας εκ νέου τον συντελεστή θερμοπερατότητας του κελύφους του. Τέλος προχωρούμε στην ενεργειακή προσομοίωση του κτηρίου, με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος EnergyPlus. Καθώς όμως το πρόγραμμα χρησιμοποιεί εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας για μονοδιάστατη ροή θερμότητας, καταφέρνουμε να εισάγουμε τις θερμογέφυρες που δημιουργούνται στο κέλυφος του κτηρίου, γραμμικές (2D) και

σημειακές (3D), βασιζόμενοι στη θεωρία των μεθόδων της ισοδύναμης τοιχοποιίας και της ισοδύναμης θερμικής αγωγιμότητας Η ενεργειακή μελέτη πραγματοποιείται, με και χωρίς την εφαρμογή στη μόνωση του κελύφους του κτηρίου, των VIP, σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές με διακριτές κλιματολογικές συνθήκες. Παράλληλα υπολογισμοί γίνονται και για τις περιπτώσεις όπου έχουν γίνει οι παρεμβάσεις ως προς τη βελτίωση των μονωτικών ικανοτήτων του κτηρίου. Κατά τον τρόπο αυτό αξιολογώντας τα αποτελέσματα εξάγουμε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τις μονωτικές ικανότητες των VIP

## **ABSTRACT**

Given the high energy requirements of the building sector, it is important, for economic and ecological reasons, to develop technological solutions that provide holistic management of this problem. In the European Union, the building sector is responsible for approximately 40% of the total energy consumption, which makes it necessary to design buildings with reduced energy needs. In parallel, in the existing building stock, interventions are needed so as to achieve maximum energy savings. One of the most efficient ways to improve the energy performance of a building is the thermal insulation of its envelope, that reduces heat losses/gains.

In this thesis, we study a hypothetical dry construction building with a lightweight metal frame. Dry construction technology differs fundamentally from the technology and construction of heavyweight components. The high efficiency of this form of construction regarding the lightweight properties and the minimal use of materials, if fully exploited, can result to high quality buildings with superior technical and building physics characteristics. In this context, one of the main issues that have to be addressed is the strong thermal bridges introduced by the steel frame which enhance the thermal losses/gains from the building shell. In this direction, super insulating materials can be an ideal solution for the minimization of the thermal bridges and the improvement of the thermal efficiency of drywall constructions.

The first part of this thesis, provides a brief introduction of the thermal bridges in buildings and the methods for their calculation. Additionally, the current state-of-the-art in super insulation technology is discussed. Emphasis is put on vacuum insulation panels (VIPs) which are proposed for implementation in the insulation of the building

studied in this thesis. Then a calculation of all the thermal bridges which occur in the shell of the building takes place, and their contribution to the overall thermal transmittance (U-value) of the surface of the building is determined. Given the thermal behavior of the building, we propose additional improvements in its insulation, recalculating the U-value.

Finally, we proceed to the energy modeling of the building, by using EnergyPlus program. Since the program uses heat transfer equations for one-dimensional heat flow, we introduce the linear and the point thermal bridges created in the building shell, based on the theory of equivalent wall and the CTP methods. The energy study is performed with and without the application of the VIPs in the building shell, in four different areas with distinct climatic conditions. Parallel calculations take place for the cases where interventions have been made for the improvement of the insulation of the building. The results are evaluated and discussed, so that interesting conclusions regarding the insulating capabilities of VIPs are drawn.



# **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ**

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί τα τελευταία χρόνια το σημαντικότερο καταναλωτή ενέργειας και τη σημαντικότερη πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, καθώς ευθύνεται περίπου για το 1/3 της συνολικής παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης και για το ήμισυ της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης. Ειδικότερα στην Ευρώπη, τα κτίρια που αποτελούν τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα, ευθύνονται για το 38% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ συμβάλουν κατά 36 % στις συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.

Τα κτίρια, καθίστανται τόσο ενεργοβόρα εξαιτίας κυρίως των θερμικών αλλά και των ψυκτικών τους αναγκών. Τα πιο σπάταλα ενεργειακά κτίρια είναι αυτά που στερούνται θερμομονωτικής προστασίας, δηλαδή τα παλαιά κτήρια που έχουν συμπληρώσει τουλάχιστον 30 έτη ζωής. Στοιχεία δείχνουν πως η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη αναμένεται να αυξηθεί, σχεδόν κατά 150% σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι το 2050, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες με θερμά κλίματα κατά 300 έως 600%. Επομένως, η ενεργειακή κατανάλωση των κτηρίων αναδεικνύεται σε σημαντικό θέμα της καθημερινότητας και η βελτίωση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς σε πρωταρχικό στόχο[1].

Συγκρίνοντας την ενεργειακή κατανάλωση παλαιών κτηρίων με ελλιπή μόνωση, με αντίστοιχες νέες κατασκευές, με σωστό σχεδιασμό και χαμηλές ενεργειακές καταναλώσεις, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη δυνατότητες που υπάρχουν προκειμένου για εξοικονόμηση ενέργειας. Καταρχήν, με τη χρήση καινοτόμων υλικών με αυξημένες θερμομονωτικές ιδιότητες στο κέλυφος, είναι δυνατόν να υπάρξει βέλτιστη παθητική θέρμανση και ψύξη στα κτήρια αυτά. Επιπλέον ενέργεια εξοικονομείται και από τη τοποθέτηση βελτιωμένων υαλοπινάκων με χαμηλούς συντελεστές θερμοπερατότητας αλλά και με άλλες πιο απλές και ταυτοχρόνως οικονομικές παρεμβάσεις, όπως για παράδειγμα η χρήση υλικών με καλές ανακλαστικές ιδιότητες στην οροφή και στις τοιχοποιίες των κτηρίων.[2]

Για το σκοπό αυτό, τα περισσότερα κράτη εκδίδουν οδηγίες προς την κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίες έχουν πολλαπλά οφέλη τόσο

οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά. Όσον αφορά για την Ευρωπαϊκή Ένωση, η πιο πρόσφατη από τις οδηγίες που έχει εκδώσει, θέτει ένα πλαίσιο μέτρων στις χώρες που συμμετέχουν σε αυτή για την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της εξοικονόμησης κατά 20% μέχρι το 2020 και η κατανάλωση της ενέργειας να μην υπερβαίνει τους 1.474 εκατομμύρια Ισοδύναμους Τόνους Πετρελαίου πρωτογενούς ενέργειας ή τους 1.078 εκατομμύρια Ισοδύναμους Τόνους Πετρελαίου τελικής ενέργειας. Η συγκεκριμένη οδηγία «2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου , της 22 Νοεμβρίου 2012, για την ενεργειακή απόδοση» αναφέρει και καθορίζει τις εξής δεσμεύσεις :

- Δημοσίευση μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την ανακαίνιση του εθνικού κτιριακού αποθέματος, η οποία να περιλαμβάνει ανασκόπηση του εθνικού κτηριακού αποθέματος , εξεύρεση οικονομικώς αποδοτικών προσεγγίσεων για τις ανακαινίσεις ανάλογα με το είδος κτηρίου και την κλιματική ζώνη, πολιτικές και μέτρα για την τόνωση οικονομικώς αποδοτικών ριζικών ανακαινίσεων κτιρίων και τέλος την εκτίμηση της αναμενόμενης εξοικονόμησης ενέργειας.
- Ανακαίνιση των δημοσίων κτηρίων που έχουν επιφάνεια άνω των 500 m<sup>2</sup> σε ποσοστό τουλάχιστον 3% της συνολικής τους επιφάνειας.
- Προώθηση ενεργειακών ελέγχων, οι οποίοι θα διενεργούνται από ειδικευμένους εμπειρογνώμονες .
- Εγκατάσταση μετρητών ενέργειας (ηλεκτρισμού, φυσικού αερίου, τηλεθέρμανσης και ζεστού νερού) που θα αντικατοπτρίζουν την πραγματική ενεργειακή κατανάλωση.
- Διασφάλιση ακριβούς πληροφόρησης τιμολόγησης σε όλα τα στάδια (διανομείς, διαχειριστές διανομής και εταιρείες λιανικής πώλησης ενέργειας).
- Προώθηση μέτρων για την αποδοτική χρήση ενέργειας από τους καταναλωτές, όπως φορολογικά κίνητρα, χρηματοδότηση, δανεισμός, επιδοτήσεις κ.ά.[3]

### 1.2 ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ

Η θερμομόνωση μιας εγκατάστασης, είτε αυτή είναι κτηριακή ή βιομηχανική, έχει σαν σκοπό τον περιορισμό των θερμικών απωλειών και την διατήρησης της θερμοκρασίας εντός αυτής σε μια λογική τιμή. Συνεπώς, δημιουργείται εντός του μονωμένου χώρου συνθήκες θερμικής άνεσης ενώ αποτρέπεται η δημιουργία

δυσάρεστων καταστάσεων όπως είναι οι συμπυκνώσεις, ο παγετός, η μεταβολή διαστάσεων των δομικών στοιχείων λόγω συστολών και διαστολών κ.λπ..

Τεχνοοικονομικά, η εγκατάσταση θερμομόνωσης στο κέλυφος ενός κτιρίου ή η ενίσχυση της ήδη υπάρχουσας, προκαλεί αύξηση στις δαπάνες για τη κατασκευή αλλά και τη συντήρηση του κτηρίου. Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η εγκατάσταση, πρέπει το επιπλέον αυτό κόστος συγκρινόμενο με τη μείωση των δαπανών θέρμανσης και κλιματισμού που επιφέρει η θερμομόνωση, να αποσβένεται με τη πάροδο του χρόνου έτσι ώστε αυτό να καλυφθεί.

Μελέτες έχουν αποδείξει πως:

- Η αρχική δαπάνη για εγκατάσταση θέρμανσης σε μονωμένο κτίριο, μπορεί να φθάσει το 83% της δαπάνης ενός κτιρίου χωρίς μόνωση.
- Σε συνηθισμένα κτήρια, μια αύξηση 3% στο κόστος κατασκευής για εγκατάσταση θερμομόνωσης, μπορεί να επιφέρει 30% εξοικονόμηση σε δαπάνες για ενέργεια, ενώ η απόσβεση του κόστους αυτού πραγματοποιείται περίπου μετά από 2 έως 4 χρόνια.
- Οι όποιες επιπλέον παρεμβάσεις για θερμομόνωση, δεν πρέπει να ξεπερνούν το 5% της συνολικής δαπάνης. Σε αντίθετη περίπτωση η εγκατάσταση θα είναι οικονομικά ασύμφορη[4].

Στην Ελλάδα, η πρώτη ουσιαστικά προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα έγινε το 1979 με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΦΕΚ 362Δ/1979). Ο κανονισμός αυτός ήταν σχετικά ελαστικός, εφαρμόστηκε υποχρεωτικά από το 1979 μέχρι το 2010 χωρίς καμία τροποποίηση, οπότε και αντικαταστάθηκε από τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕνΑΚ). Κύριος στόχος του κανονισμού ΚΕνΑΚ, είναι η μείωση των απωλειών θερμότητας από το κτηριακό κέλυφος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου και να εξασφαλίζεται:

- Θερμική άνεση στη διαμονή των ενοίκων.
- Ορθολογική κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση και τον κλιματισμό των χώρων.

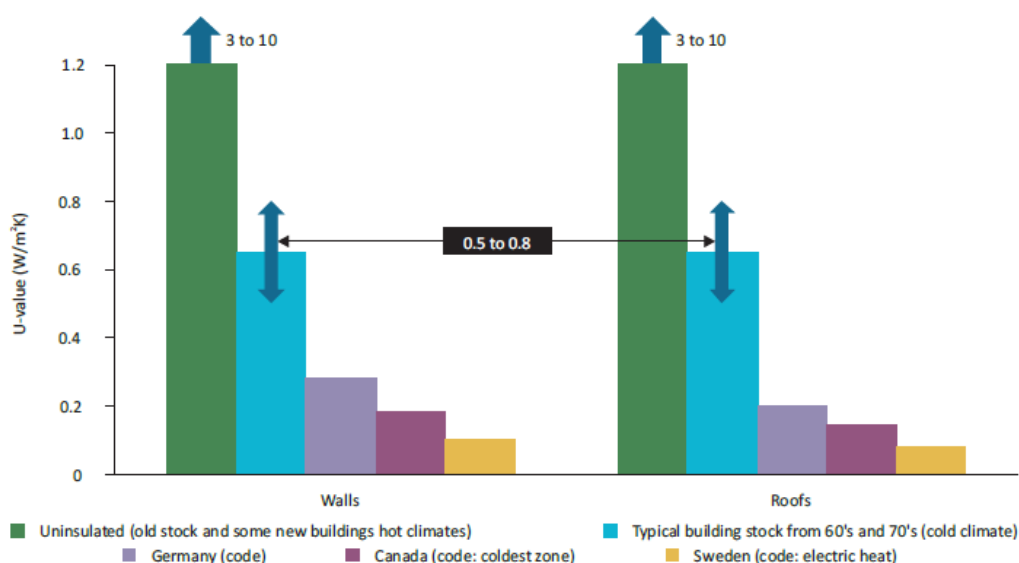
- Οικονομία στις δαπάνες κατασκευής της εγκατάστασης θέρμανσης.
- Μικρότερη ρύπανση του περιβάλλοντος από τα εκλυόμενα καυσαέρια των εγκαταστάσεων θέρμανσης και κλιματισμού.

Ο κανονισμός αυτός, καθορίζει τις απαιτήσεις για τη μόνωση του κτηρίου και περιλαμβάνει:

- Τον ορισμό των τιμών της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου ανά είδος κτιρίου.
- Τα όρια του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για το κέλυφος του κτιρίου.
- Τα όρια θερμικών απωλειών λόγω αερισμού.
- Υποδείξεις για τη βέλτιστη εφαρμογή της θερμομόνωσης εσωτερικά και εξωτερικά των δομικών στοιχείων για εκμετάλλευση της θερμικής τους μάζας.
- Υποδείξεις για την αποφυγή θερμογεφυρών.

### 1.3 ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Θερμομονωτικά υλικά καλούνται τα υλικά εκείνα που χρησιμοποιούνται προκειμένου να παρέχουν αντίσταση στη ροή θερμότητας μεταξύ των χώρων εκατέρωθεν ενός στοιχείου. Με μια επιτυχή θερμομόνωση, εξασφαλίζεται μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$ , ενός δομικού στοιχείου άρα και μείωση της ροής θερμότητας διαμέσου αυτού. (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Συντελεστής θερμοπερατότητας σε κτίρια με και χωρίς μόνωση[5]



Η ιδιότητα αυτή των θερμομονωτικών υλικών, οφείλεται στο ότι αυτά αποτελούνται από κόκκους ή ίνες, δημιουργώντας αναρίθμητους πόρους στο εσωτερικό τους στους οποίους περιέχεται αέρας. Όταν ο αέρας είναι ξηρός και ακίνητος άγει τη θερμότητα με ρυθμούς της τάξης των  $0.0245\text{W/mK}$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνεπώς, τα θερμομονωτικά υλικά ενεργούν σαν εμπόδιο στη κίνηση του αέρα και πλέον αποτελούν βασικό στοιχείο στις κατασκευές στην κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας. Για παράδειγμα, με τη χρήση πολυστερίνης, πετροβάμβακα, τόσο στους εξωτερικούς τοίχους, όσο και στην οροφή ενός κτηρίου θα μπορούσε να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας έως 77% και 73% αντιστοίχως[6]. Προσοχή όμως πρέπει να δίνεται σε επιμέρους παράγοντες, όπως η σωστή τοποθέτηση των μονωτικών υλικών στο κτιριακό κέλυφος, το σχήμα και το μέγεθος τους, η ανακλαστικότητα τους, η παρουσία υγρασίας στη μάζα τους καθώς όλα τα παραπάνω έχουν σοβαρή επίδραση στις θερμομονωτικές τους ιδιότητες.

Ταυτόχρονα, η εξοικονόμηση της ενέργειας αυτής, μεταφράζεται και σε αντίστοιχη μείωση στις συνολικές εκπομπές  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα με ότι αυτό συνεπάγεται. Επιπλέον, ο χρόνος απόσβεσης των μονωτικών υλικών εκτιμάται περίπου σε 2 χρόνια. Αυτό σημαίνει πως το ποσό που εξοικονομείται τα δύο πρώτα χρόνια και το οποίο μεταφράζεται σε ενέργεια, είναι μεγαλύτερο από το κόστος για την αγορά και τη τοποθέτηση των μονωτικών υλικών.

Κατά τη θερμική μόνωση ενός κτιρίου, αυξάνεται η θερμική του αντίσταση. Θεωρητικά, η ροή θερμότητας μπορεί να μηδενισθεί, αυξάνοντας το πάχος των θερμομονωτικών υλικών, λαμβάνοντας υπόψη πως η θερμική αντίσταση μεταφράζεται ως το πηλίκο του πάχους προς το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Όμως, καθώς αυξάνεται το πάχος των τοιχωμάτων, μειώνεται ο ωφέλιμος χώρος του κτιρίου, ενώ αυξάνεται και το κόστος, αφού χρησιμοποιούνται μονωτικά υλικά μεγαλύτερων διαστάσεων. Πρέπει να σημειωθεί, πως τα ενεργειακά κέρδη από τη τοποθέτηση της θερμομόνωσης, δεν είναι ευθέως ανάλογα με το πάχος του θερμομονωτικού υλικού, καθώς μετά από μια ορισμένη τιμή του η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Συνεπώς, προκειμένου να αυξηθεί η θερμομονωτική ικανότητα του κελύφους ενός κτηρίου, κατασκευαστικές επεμβάσεις μπορούν να γίνουν:

- Στην εξωτερική τοιχοποιία.
- Στην οροφή και το δάπεδο εφόσον αυτό συνορεύει με μη θερμαινόμενους χώρους ή με τον εξωτερικό αέρα.
- Στους εσωτερικούς τοίχους που συνορεύουν με μη θερμαινόμενους χώρους ( π.χ. με κλιμακοστάσια ).

Τα αποτελέσματα της σωστής θερμομόνωσης είναι τα εξής:

- Μεγαλύτερη αίσθηση θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτηρίου.
- Μείωση της εμφάνισης του φαινομένου της επιφανειακής συμπύκνωσης των υδρατμών στα σημεία που υπάρχουν θερμογέφυρες .
- Μείωση των λειτουργικών δαπανών για ψύξη και θέρμανση του κτηρίου.

Τα τελευταία χρόνια, γίνονται συνεχώς προσπάθειες για περαιτέρω βελτίωση των ιδιοτήτων των θερμομονωτικών υλικών. Στη κατεύθυνση αυτή, έχει προκύψει μια νέα κατηγορία υλικών, τα υπερμονωτικά υλικά, των οποίων ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι χαμηλότερος από τον αντίστοιχο συντελεστή του ακίνητου αέρα.

### **1.4 ΚΤΗΡΙΑ ΞΗΡΑΣ ΔΟΜΗΣΗΣ**

Τα κτήρια ξηράς δόμησης με ελαφρύ μεταλλικό σκελετό αποτελούν μια πολύ αποδοτική λύση στον τομέα των κτιριακών κατασκευών καθώς επισύρουν πολλά πλεονεκτήματα. Καταρχήν, έχουν πολύ καλές υγροθερμικές αντοχές, προσφέρουν ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς ενώ έχουν πάρα πολύ καλή αντισεισμική συμπεριφορά αφού δέχονται μικρότερα σεισμικά φορτία σε σχέση με τα συμβατικά κτίρια. Ταυτοχρόνως, τα προκατασκευασμένα κομμάτια του κτιρίου από ξηρά δόμηση, σε περίπτωση που υπάρξει κάποια ανάγκη λόγω οποιουδήποτε προβλήματος, είναι δυνατόν να αφαιρεθούν από την ήδη υπάρχουσα κατασκευή, να επισκευασθούν ή να βελτιωθούν και να επανατοποθετηθούν (Εικόνα 1.2). Συγκεκριμένα, για το υπό μελέτη υποθετικό κτήριο της εργασίας, όταν οι προκατασκευασμένες του τοιχοποιίες, ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους, δηλαδή το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι θερμομονωτικές τους κυρίως ιδιότητες χάσουν την αποδοτικότητα τους, μπορούν να αφαιρεθούν, να ανακατασκευαστούν με τυχόν υλικά νέας τεχνολογίας ενώ μπορούν και να ανακυκλωθούν



**Εικόνα 1.2:** Προκατασκευασμένα μέρη κτιρίου ξηράς δόμησης

Εντούτοις, ο μεταλλικός σκελετός ενός κτηρίου ξηράς δόμησης δύναται να εισάγει σημαντικές θερμογέφυρες στο κέλυφος του ενισχύοντας τις θερμικές του απώλειες, υποβαθμίζοντας έτσι την ενεργειακή του απόδοσή. Από την άποψη αυτή, τα υπερμονωτικά υλικά θα μπορούσαν να αποτελέσουν μία ελκυστική λύση ως προς τη βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης κτηρίων ξηράς δόμησης καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της υψηλής θερμικής αντίστασης και του μικρού πάχους.

## **1.5 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στην παρούσα εργασία, μελετάται θεωρητικά η ενεργειακή συμπεριφορά ενός υποθετικού κτιρίου ελαφριάς κατασκευής, ξηράς δόμησης, μονωμένου θερμικά με υπερμονωτικά υλικά, με τη χρήση του λογισμικού EnergyPlus. Το κέλυφος του κτιρίου, θεωρείται μονωμένο με μονωτικές σανίδες κενού (Vacuum insulation materials– VIP), οι οποίες παρουσιάζουν αξιόλογες θερμομονωτικές ιδιότητες σε σχέση με τα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά. Υπολογίζοντας το συντελεστή θερμοπερατότητας κάθε φορά για τα επιμέρους δομικά στοιχεία του κτιρίου, με και χωρίς τη χρήση των υπέρ-μονωτικών αυτών υλικών, είναι δυνατόν μέσα από τις διαφορές που προκύπτουν, να προσδιορίσουμε την θετική επίδραση που αυτά έχουν στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου. Ταυτόχρονα, εξετάζοντας το κέλυφος του κτιρίου, εντοπίζουμε τις θερμογέφυρες όπου υπάρχουν, τις αναλύουμε, τις υπολογίζουμε και παρατηρούμε την αρνητική τους επίδραση, κυρίως λόγω των αυξημένων θερμικών απωλειών στα σημεία εμφάνισής τους.

Εξετάζοντας και αξιολογώντας συγχρόνως την ενεργειακή κατανάλωση του υποθετικού κτηρίου, προχωρούμε σε επιπλέον παρεμβάσεις στη θερμομόνωση του κελύφους του. Γι αυτό το λόγο, είτε προσθέτονται επιμέρους στρώσεις μονωτικών υλικών, είτε αλλάζουμε τα ήδη υπάρχοντα με θερμομονωτικά υλικά παραπλήσιων ιδιοτήτων. Τέλος, προκειμένου να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των μονωτικών υλικών

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας κυρίως, το υποθετικό κτίριο τοποθετείται και μελετάται σε διαφορετικές τοποθεσίες, με διακριτές κλιματολογικές συνθήκες.

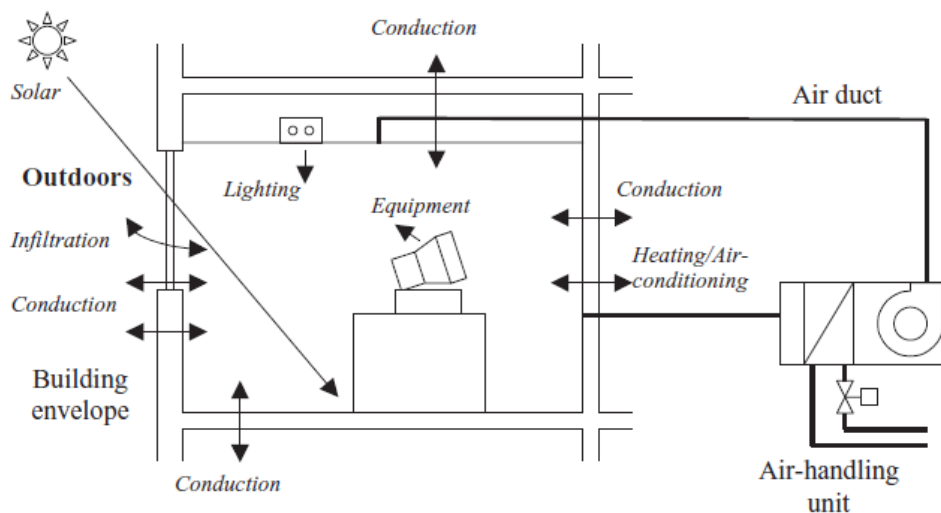
## 2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΕΛΥΦΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε ένα τυπικό κτίριο κατοικίας, το ενεργειακό ισοζύγιο υπολογίζεται από τα κέρδη και τις απώλειες θερμότητας. Τα θερμικά κέρδη προέρχονται κυρίως από τα συστήματα θέρμανσης, την ηλιακή ακτινοβολία και δευτερευόντως από εσωτερικές πηγές θερμότητας όπως οι ηλεκτρικές συσκευές, ο φωτισμός αλλά ακόμη και η θερμότητα που εκλύεται από τους ενοίκους του κτιρίου. Παράλληλα, οι απώλειες θερμότητας οφείλονται στη μεταφορά θερμότητας και μάζας που συμβαίνει από:

- A) Ροή θερμότητας διαμέσου των δομικών στοιχείων του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων των εξωτερικών τοιχοποιιών, του δαπέδου και της οροφής.
- B) Ροή θερμότητας αλλά και ακτινοβολίας διαμέσου των υαλοπινάκων αλλά και των ανοιγμάτων του κτιρίου.
- Γ) Διείσδυση εξωτερικού αέρα και αέρα από παρακείμενα δωμάτια με διαφορές θερμοκρασίας.

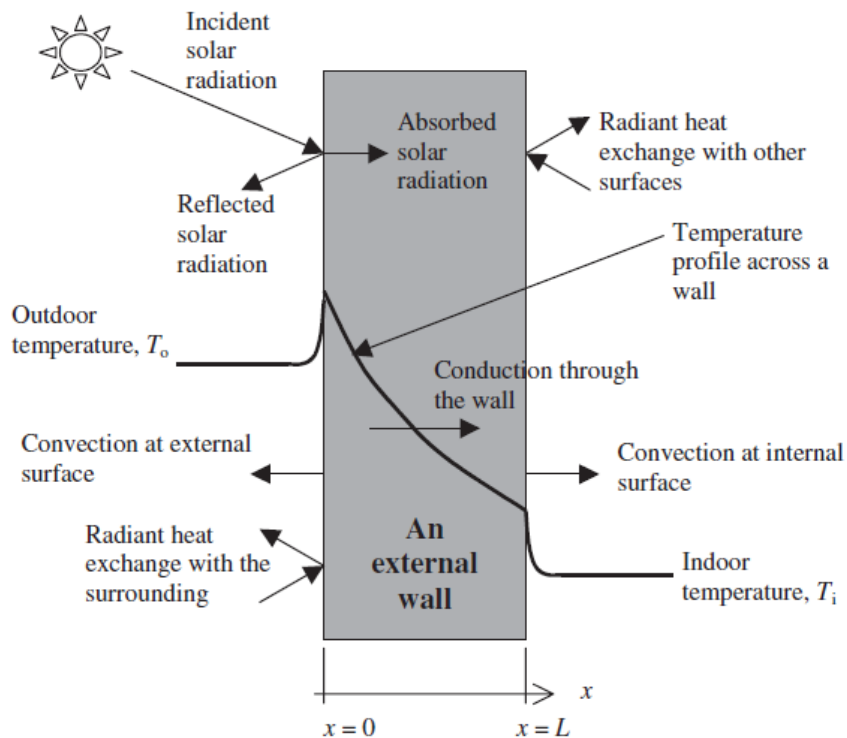
Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται το ενεργειακό ισοζύγιο για ένα τυπικό κτίριο.



Εικόνα 2.1: Ισοζύγιο ενέργειας σε τυπικό κτίριο [7]

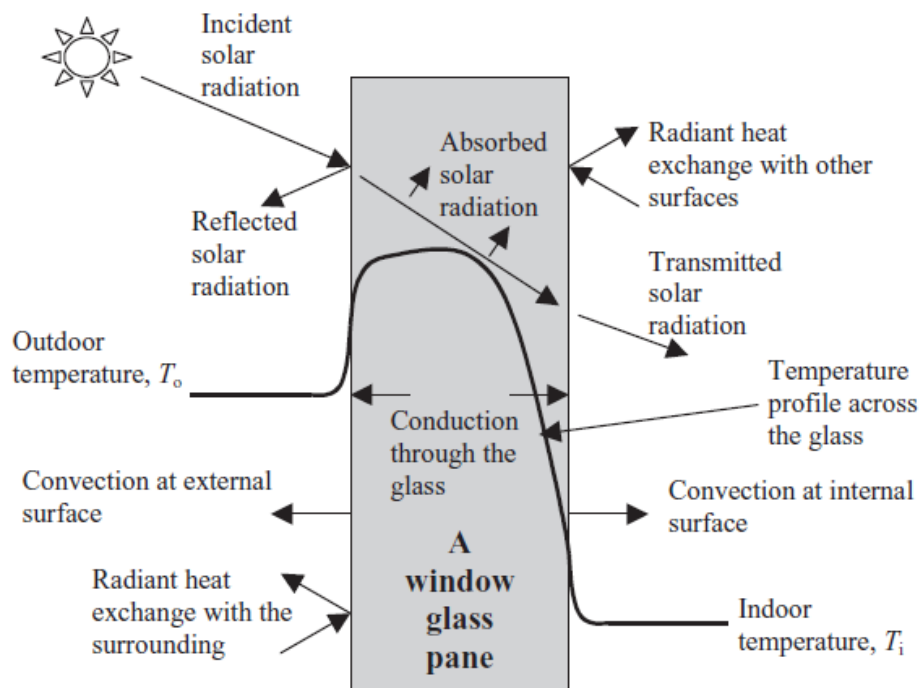
Σε μια αδιαφανή επιφάνεια, όπως είναι η εξωτερική τοιχοποιία του κτιρίου, πραγματοποιείται συναγωγή θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας και του αέρα που βρίσκεται σε σχετική κίνηση και ταυτόχρονα σε επαφή με αυτήν, καθώς επίσης και

μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από τις επιφάνειες στις οποίες είναι εκτεθειμένη η επιφάνεια που εξετάζουμε, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Μεταφορά θερμότητας σε μια εξωτερική τοιχοποιία [7]

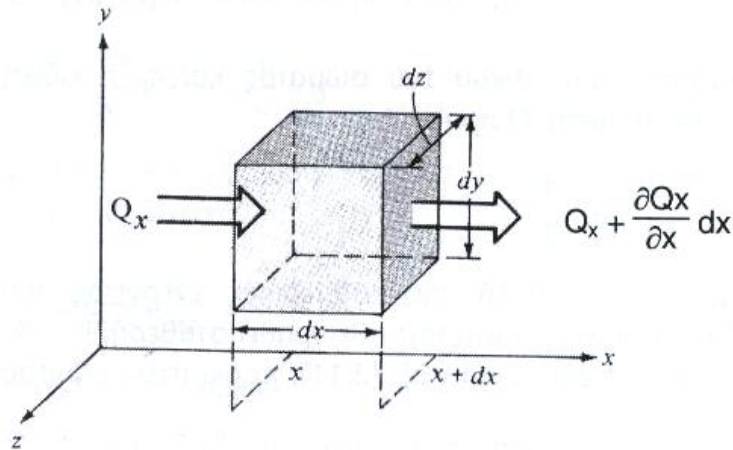
Ταυτοχρόνως, η μεταφορά θερμότητας δια μέσου των υαλοπινάκων, πραγματοποιείται όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3. Μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, θα περάσει μέσα από τον υαλοπίνακα του παραθύρου στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία λοιπόν διεισδύει εντός του κτιρίου, μέρος αυτής θα απορροφηθεί από το γυαλί οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας του, δημιουργώντας έτσι μεταφορά θερμότητας και προς τα μέσα και προς τα έξω, καταρχήν με αγωγιμότητα εντός του τζαμιού και δευτερευόντως με συναγωγή και ακτινοβολία στις επιφάνειες και από τις δύο πλευρές του.



Εικόνα 2.3: Μεταφορά θερμότητας σε υαλοπίνακα παραθύρου [7]

## 2.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ

Για τη μελέτη της ροής θερμότητας σε ένα ομοιογενές σώμα, αναγκαίος είναι ο προσδιορισμός του θερμοκρασιακού πεδίου που προκύπτει από τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν στα όρια του σώματος καθώς επίσης και των θερμικών του ιδιοτήτων. Όταν η κατανομή της θερμοκρασίας είναι γνωστή, είναι δυνατόν με τη σχέση Fourier, να υπολογισθεί η ροή θερμότητας σε κάθε σημείο του σώματος ή και στην επιφάνεια του. Για τον λόγο αυτό, ορίζεται στο σώμα, ένας διαφορικός όγκος υπό μορφή κύβου, με διαστάσεις  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$ , όπως στην Εικόνα 2.4, όπου και εφαρμόζεται ενεργειακός ισολογισμός. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η κατάλληλη εξίσωση του θερμοκρασιακού πεδίου, εφαρμόζεται ο νόμος διατήρησης της ενέργειας, δηλαδή το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει, είναι μια διαφορική εξίσωση, η λύση της οποίας δίνει τη ζητούμενη θερμοκρασιακή κατανομή.



Εικόνα 2.4: Διαφορικός όγκος υπό τη μορφή κύβου για τον ενεργειακό ισολογισμό [8]

Εξετάζοντας το ομοιογενές μέσο, μέσα στο οποίο υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές, με τη κατανομή της θερμοκρασίας  $T(x, y, z)$  να εκφράζεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες, εμφανίζεται αγωγή ροή δια μέσω κάθε επιφάνειας ελέγχου, εξαιτίας της πτώσης της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια της θερμοκρασιακής διαφοράς. Τότε οι αντίστοιχες ροές θερμότητας θα είναι  $Q_x, Q_y, Q_z$ , ενώ για τις απέναντι επιφάνειες, θα ισχύει:

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial(Q_x)}{\partial x} dx \quad 2.1$$

$$Q_{y+dy} = Q_y + \frac{\partial(Q_y)}{\partial y} dy \quad 2.2$$

$$Q_{z+dz} = Q_z + \frac{\partial(Q_z)}{\partial z} dz \quad 2.3$$

Θεωρώντας πως μέσα στο σώμα, υπάρχουν πηγές από τις οποίες εκλύεται, ανά μονάδα χρόνου και όγκου, ποσό θερμότητας  $\Phi$  ( $J/m^3/s=W/m^3$ ), τότε η παραγόμενη ενέργεια είναι:

$$dQ_{\text{παρ}} = \Phi dx dy dz \quad 2.4$$

Εάν για μια δεδομένη στιγμή η θερμοκρασία του στοιχειώδους κύβου είναι  $T$ , τότε η μεταβολή της με το χρόνο θα είναι  $\frac{\partial T}{\partial t}$ . Συνεπώς, εφόσον η πυκνότητα του μέσου είναι  $\rho$  και η ειδική θερμοχωρητικότητα του υπό σταθερή πίεση είναι  $C_p$ , η ενέργεια που αποθηκεύεται στον στοιχειώδη όγκο ανά μονάδα χρόνου, υπολογίζεται:



$$dQ_{αποθ} = C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad 2.5$$

Για τις θερμότητες που εισέρχονται στον κύβο με αγωγή, ισχύουν οι σχέσεις:

$$Q_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dy dz \quad 2.6$$

$$Q_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \quad 2.7$$

$$Q_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \quad 2.8$$

Συνεπώς, εφαρμόζοντας το νόμο διατήρησης της ενέργειας, δίνεται η γενική εξίσωση μετάδοσης θερμότητας με αγωγή σε τρεις διαστάσεις:

$$Q_x + Q_y + Q_z + \Phi dx dy dz = Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} + C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad 2.9$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση τις αντίστοιχες τιμές για τις ροές θερμότητας, προκύπτει:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p \rho} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \frac{\Phi}{C_p \rho} \quad 2.10$$

Η σχέση της εξίσωσης 2.10, εκφράζει τη γενική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Από τη λύση της, προκύπτει η κατανομή της θερμοκρασίας  $T(x,y,z)$  σε συνάρτηση με τον χρόνο. Εάν υποθεθεί πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι σταθερός τότε από τη προηγούμενη εξίσωση προκύπτει:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\Phi}{k} \quad 2.11$$

### 2.2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

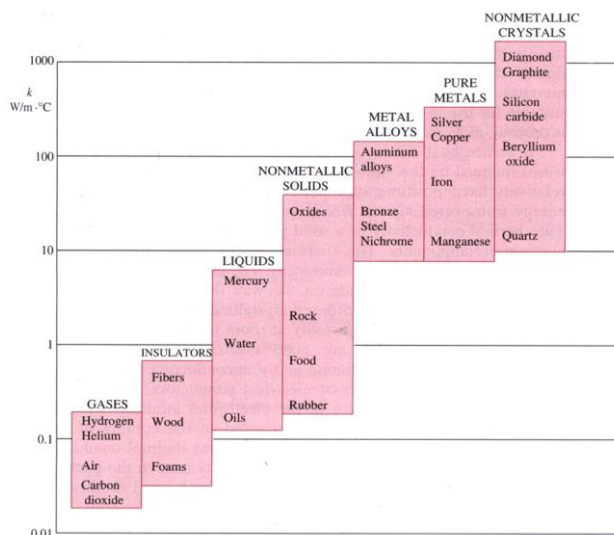
Στην αγωγή επικρατούν δύο μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας. Στον πρώτο, έχουμε αλληλεπίδραση των μορίων, δηλαδή μόρια με σχετικά υψηλή ενέργεια, χαρακτηριζόμενη από τη θερμοκρασία τους, έρχονται σε συναλλαγή ενέργειας με γειτονικά μόρια, «φτωχότερα» ενεργειακά. Στη δεύτερη περίπτωση, η αγωγιμότητα πραγματοποιείται με διάχυση ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία περιέχονται σε καθαρά μεταλλικά σώματα. Η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, ποικίλλει σημαντικά στα μεταλλικά κράματα και είναι πολύ χαμηλή

στα αμέταλλα. Η ικανότητα λοιπόν των στερεών να μεταδίδουν θερμότητα, εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Μια ποσοτική έκφραση, που συνδέει το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται με την πτώση της θερμοκρασίας και το είδος του υλικού είναι η σχέση του Fourier η οποία και περιγράφηκε νωρίτερα. Συγχρόνως όμως, από τη σχέση αυτή, ορίζεται και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, μια χαρακτηριστική ιδιότητα του κάθε υλικού.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, είναι ένας παράγοντας ο οποίος εκφράζει την ικανότητα των υλικών στην διάχυση θερμότητας διαμέσου αυτών, έχει μονάδες  $W/mk$  ή  $W/m^{\circ}C$  και συνήθως συμβολίζεται με  $k$  ή με  $\lambda$ . Για παράδειγμα, για το νερό, η θερμική αγωγιμότητα είναι  $k=0.607 W/m^{\circ}C$ , ενώ για τον σίδηρο  $k=60 W/m^{\circ}C$ , σε θερμοκρασία δωματίου. Από τις τιμές των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας, γίνεται αντιληπτό πως ο σίδηρος, άγει τη θερμότητα περίπου 100 φορές γρηγορότερα από ότι το νερό. Κατά συνέπεια το νερό, συγκρινόμενο με τον σίδηρο, είναι ένας σχετικά κακός αγωγός της θερμότητας ενώ ταυτόχρονα είναι ένα πολύ καλό μέσον για αποθήκευση θερμότητας.

Πρόκειται επομένως, για μια ιδιαίτερα σημαντική ιδιότητα του σώματος ή γενικότερα του μέσου, στο οποίο και μεταφέρεται θερμότητα, ώστε η τιμή του, να αποτελεί κατά ένα μεγάλο ποσοστό και κριτήριο καταλληλότητας κάποιου υλικού για μια δεδομένη χρήση. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων δομικών υλικών για σταθερή θερμοκρασία, ενώ υπάρχουν πίνακες και διαγράμματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5, που δίνουν τις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τα περισσότερα υλικά σε συνάρτηση με την μεταβολή της θερμοκρασίας.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ EnergyPlus



Εικόνα 2.5 Η διακύμανση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για διάφορα υλικά σε συνάρτηση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας [9]

Πίνακας 2.1: Θερμική αγωγιμότητα ορισμένων δομικών υλικών σε θερμοκρασία δωματίου [8]

Δομικό υλικό	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	Δομικό Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)
1) ΠΙΕΤΡΕΣ-ΓΑΙΩΔΗ ΥΛΙΚΑ		2) ΞΗΡΑ ΥΛΙΚΑ	
α) Συμπαγή κρυσταλλικά		α) Συμπαγούς δομής	
Γρανίτης- Βασάλτης	3.49	Άμμος χαλίκια	0.70
Μάρμαρο	2.90	Τρίμματα κεραμικών	0.41
β) Ιζηματογενή		β) Ανόργανα πορώδη	
Ψαμμίτης	2.33	Περλίτης διογκωμένος	0.06
Συμπαγής ασβεστόλιθοι	1.70	Φυσική Ελαφρόπετρα	0.19
γ) Εδάφη με φυσική υγρασία		3) ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ	
Άμμος, χαλίκια	1.40	α) Χωρίς αδρανή υλικά	
Συμπαγές έδαφος	2.09	Ασβεστοκονίαμα	0.87
δ) Άργιλοι		Τσιμεντοκονίαμα	1.40
Συμπαγείς άργιλοι	0.93	β) Με αδρανή υλικά	
Πορώδεις άργιλοι	0.46	Με περλίτη ή βερμικουλίτη	0.31

### 2.2.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας σε μια τοιχοποιία είναι μη μόνιμο. Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε γενική μορφή χρησιμοποιώντας τον τελεστή Laplace, περιγράφεται από την εξίσωση:

$$a\nabla^2\Phi + \frac{\Phi}{\rho C_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.12$$

ο μέγεθος  $a = \frac{k}{\rho C_p}$  ονομάζεται συντελεστής θερμικής διάχυσης της τοιχοποιίας και πρόκειται για μια φυσική ιδιότητα του υλικού του σώματος, από την τιμή της οποίας εξαρτάται ο απαιτούμενος χρόνος για τη μεταβολή της θερμοκρασίας στο σώμα. Είναι δηλαδή, ένα μέτρο θερμικής αδράνειας των σωμάτων.

$$a = \frac{\text{Θερμική Αγωγιμότητα}}{\text{Αποθήκευση θερμότητας}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad 2.13$$

Το γινόμενο  $mc_p$ , συναντάται συχνά σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας και ονομάζεται θερμική μάζα του υλικού. Η ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_p$  και η θερμοχωρητικότητα του μέσου  $C_p$ , εκφράζουν την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ενός σώματος.

Πρέπει να επισημανθεί, πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $k$ , εκφράζει το πόσο καλός αγωγός της θερμότητας είναι το υλικό του μέσου, ενώ η θερμοχωρητικότητα  $C_p$ , το πόσο μεγάλο ποσό ενέργειας μπορεί να αποθηκεύσει. Επομένως, η θερμική διάχυση μπορεί να εκφραστεί σαν ο λόγος της θερμότητας που άγεται δια μέσου μιας μονάδας όγκου του υλικού, προς τη θερμότητα που αποθηκεύεται σε αυτό. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο ταχύτερα διαχέεται η θερμότητα μέσα σε μια τοιχοποιία. Όπως φαίνεται από την εξίσωση 2.11, υψηλές τιμές του  $a$ , προκύπτουν είτε από υψηλούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας, είτε από χαμηλές τιμές της θερμοχωρητικότητας των υλικών. Χαμηλή τιμή της θερμοχωρητικότητας σημαίνει ότι από την ποσότητα της θερμότητας η οποία ρέει μέσα στο σώμα, θα απορροφηθεί μικρότερο ποσοστό για την άνοδο της θερμοκρασίας του σώματος, οπότε θα έχουμε περισσότερη θερμότητα διαθέσιμη για επιπλέον μεταφορά.

Ενδεικτικά, στον Πίνακα 2.2, παρουσιάζονται οι τιμές της θερμικής διάχυσης για διάφορα υλικά σε θερμοκρασία δωματίου.

Πίνακας 2.2: Συντελεστής θερμικής διάχυσης ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία δωματίου [9]

Υλικό	Θερμική Διαχυτότητα ( $m^2/s$ )	Υλικό	Θερμική Διαχυτότητα ( $m^2/s$ )
Ασήμι	$146 \times 10^{-6}$	Τσιμέντο	$0.75 \times 10^{-6}$
Χρυσός	$127 \times 10^{-6}$	Τούβλο	$0.52 \times 10^{-6}$
Χαλκός	$113 \times 10^{-6}$	Σκληρό έδαφος (ξηρό)	$0.52 \times 10^{-6}$
Αλουμίνιο	$97.5 \times 10^{-6}$	Γυαλί	$0.34 \times 10^{-6}$
Σίδηρος	$22.8 \times 10^{-6}$	Υαλοβάμβακας	$0.23 \times 10^{-6}$
Υδράργυρος	$4.7 \times 10^{-6}$		
Μάρμαρο	$1.2 \times 10^{-6}$		
Πάγος	$1.2 \times 10^{-6}$		

### 2.3 ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ

Ως θερμικές γέφυρες ή θερμογέφυρες, χαρακτηρίζονται τα επιμέρους τμήματα (ή περιοχές) του κελύφους ενός κτιρίου, τα οποία παρουσιάζουν μικρότερη θερμική αντίσταση συγκριτικά με την κυρία μάζα των στοιχείων που ανήκουν ή οι περιοχές εκείνες που λόγω γεωμετρίας εμφανίζουν αυξημένες θερμικές απώλειες (ή και ο συνδυασμός των παραπάνω). Στις θέσεις των θερμογεφυρών οι ροές θερμότητας παρουσιάζονται δυσανάλογα αυξημένες σε σύγκριση με τις ροές θερμότητας στο υπόλοιπο κέλυφος.

Στις θέσεις των θερμογεφυρών οι ροές θερμότητες παρουσιάζονται δυσανάλογα αυξημένες σε σύγκριση με τις ροές θερμότητας στο υπόλοιπο κέλυφος.

Στη βιβλιογραφία, εμφανίζονται δυο βασικές κατηγορίες θερμογεφυρών (κατά ISO 14683).

- Οι γραμμικές θερμογέφυρες.
- Οι σημειακές θερμογέφυρες.

Οι **γραμμικές θερμογέφυρες**, εμφανίζονται κατά το μήκος μιας επιφάνειας, δηλαδή στην ίδια διεύθυνση κατά την οποία συνενώνονται διαφορετικά στοιχεία ή ίδια αλλά με διαφορετικό πάχος.

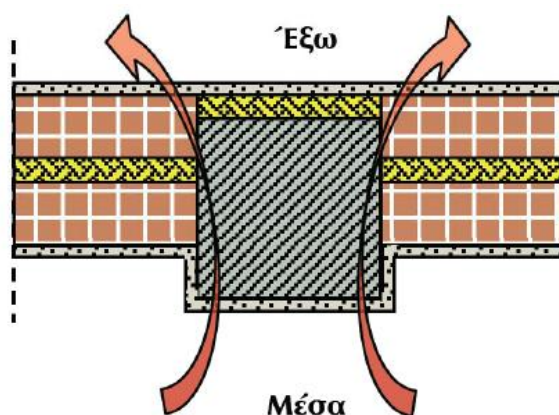
Οι **σημειακές θερμογέφυρες**, εμφανίζονται τοπικά σε ένα σημείο και δεν υπάρχει ομοιογενής ροή θερμότητας κατά μήκος μιας διεύθυνσης, όπως συμβαίνει με τις γραμμικές θερμογέφυρες.

Γενικότερα , η εμφάνιση μιας θερμογέφυρας μπορεί να οφείλεται:

- Σε κατασκευαστικούς λόγους που καθιστούν δυσχερή ή πρακτικά αδύνατη την πλήρη θερμομονωτική προστασία της κατασκευής.
- Στην αλλαγή της σύνθεσης των υλικών ή της διαδοχής των στρώσεων ενός φαινομενικά ενιαίου δομικού στοιχείου, όπως το σημείο συναρμογής στοιχείου του φέροντος οργανισμού και της οπτοπλινθοδομής.
- Στη διακοπή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης σε κάποια θέση του εξωτερικού περιβλήματος.
- Στη συνάντηση δύο κάθετων μεταξύ τους δομικών στοιχείων, των οποίων η πλήρης θερμομονωτική προστασία είναι δυσχερής ή πρακτικά ανέφικτη.
- Σε απουσία θερμομονωτικής στρώσης ή στη μείωση του πάχους της.

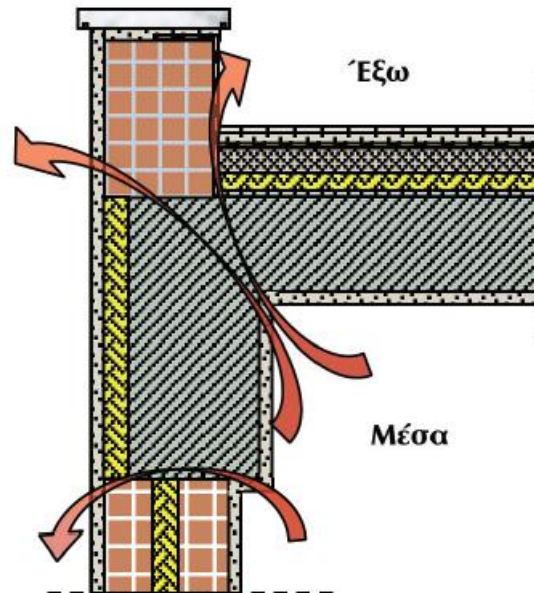
Συνεπώς, στο περίβλημα ενός κτιρίου, εάν εξαιρεθούν οι υαλοπίνακες, περιοχές με μειωμένη θερμομονωτική ικανότητα εμφανίζονται:

- **Στους τοίχους πλήρωσης**, λόγω του ότι εμφανίζονται αλλαγές πάχους όπου συναντούν στοιχεία του φέροντος οργανισμού που δεν έχουν θερμομονωθεί ικανοποιητικά (Εικόνα 2.6).



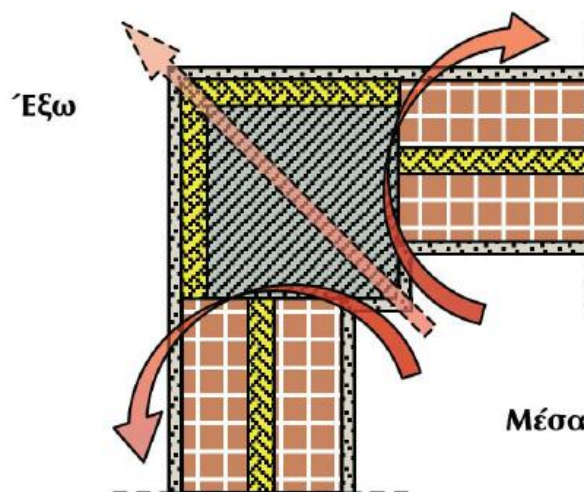
Εικόνα 2.6: Θερμογέφυρα στο σημείο σύνδεσης φέροντος οργανισμού και τοιχοποιίας πλήρωσης[10]

- Σε δώματα, στα περιμετρικά στηθαία με τις δοκούς, στις περιοχές ανεστραμμένων δοκών, στα τοιχώματα κατασκευών πάνω στο δώμα, στις περιοχές διέλευσης αγωγών κ.α.(Εικόνα 2.7) .



Εικόνα 2.7: Θερμογέφυρα στο στηθαίο δώματος [10]

- Στις περιοχές συνάντησης στοιχείων του περιβλήματος όπου υπάρχει διαφορά εμβαδού μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής πλευράς του κελύφους π.χ. γωνιακές συναντήσεις τοίχου – δώματος, τοίχου – τοίχου κ.α. (Εικόνα 2.8).

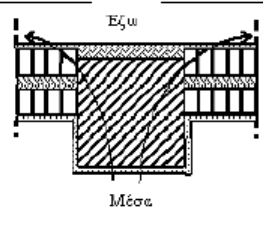
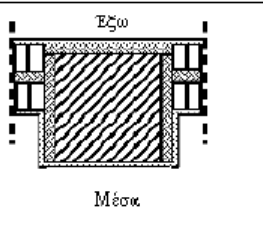
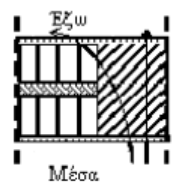
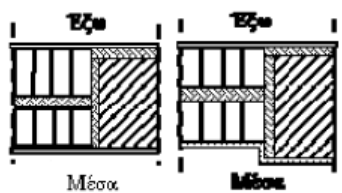


Εικόνα 2.8: Θερμογέφυρα λόγω διαφοράς εμβαδού μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας ενός γωνιακού δομικού στοιχείου [10]

Συμπερασματικά, οι θερμογέφυρες είναι επιζήμιες για την κατασκευή και πρέπει όσο τον δυνατόν να αποφεύγονται. Η κατά το δυνατόν αποφυγή των θερμογεφυρών γίνεται συνήθως με μόνωση της θερμογέφυρας. Παρόλο όμως που η θερμική προστασία των κτιρίων έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, πρακτικά δεν είναι εφικτή η κατασκευή ενός συμβατικού κτιρίου χωρίς την εμφάνιση θερμικών γεφυρών σε κανένα σημείο του κελύφους του. Αυτό συμβαίνει γιατί κάποιο τμήμα ή κάποιο σημείο ενός δομικού στοιχείου, λόγω της θέσης του ή του κατασκευαστικού σχήματος του περιβλήματος του, θα παρουσιάζει υψηλότερες θερμικές απώλειες, τις οποίες μια τυπική μελέτη θερμομόνωσης δεν μπορεί να αντιμετωπίσει. Συνεπώς στα σημεία αυτά πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για αυξημένη θερμομονωτική προστασία και επιμελημένη κατασκευή που συνήθως ξεφεύγει από τα τυποποιημένα.

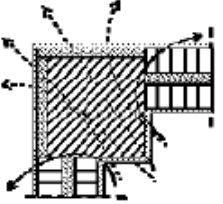
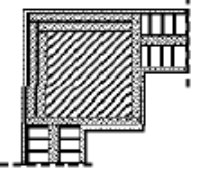
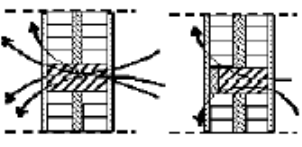
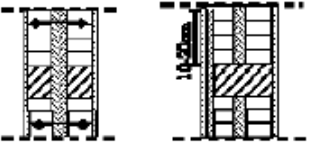
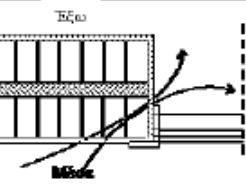
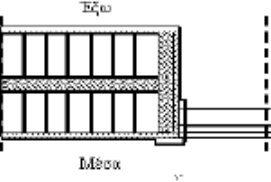
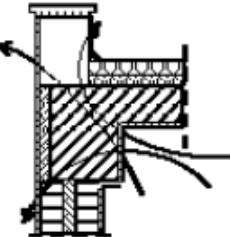
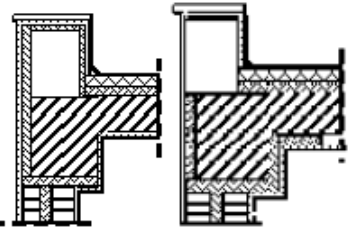
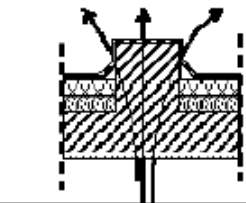
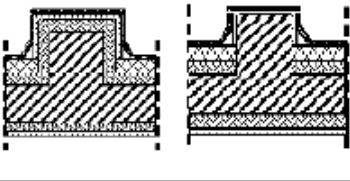
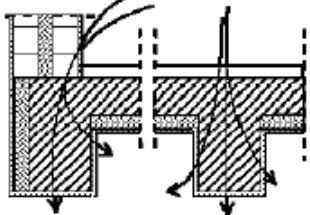
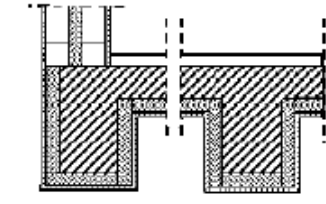
Στον, περιγράφονται συνοπτικά οι βασικότερες κατηγορίες θερμογεφυρών, δίνονται οι σχηματικές παραστάσεις της θέσης τους και οι προτάσεις τεχνικών επεμβάσεων για τον κατά το δυνατόν περιορισμό των θερμικών απωλειών από αυτές.

**Πίνακας 2.3: Περιγραφή, θέση θερμογεφυρών και προτάσεις αντιμετώπισης περιορισμού των θερμικών απωλειών [11]**

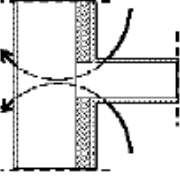
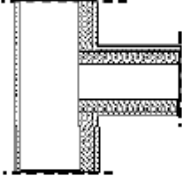
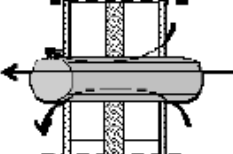
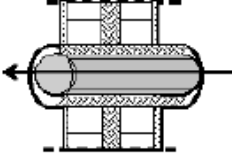
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑΣ	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ
Διακοπή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης στο σημείο σύνδεσης στοιχείου του φέροντα οργανισμού και τοιχοποιίας πλήρωσης		
Η απουσία θερμομόνωσης σε στοιχεία του φέροντα οργανισμού		



ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ EnergyPlus

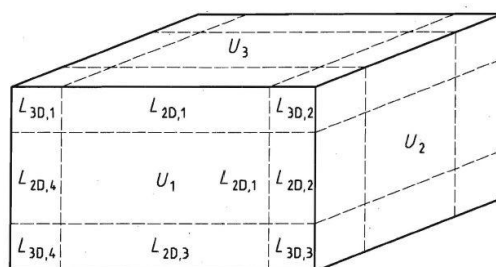
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑΣ	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ
Αυξημένες θερμικές απώλειες λόγω διαφοράς εμβαδού στις δύο όψεις των γωνιακών δομικών στοιχείων		
Οι περίδεσμοι ενίσχυσης σε δικέλυφη τοιχοποιία με θερμομόνωση στον πυρήνα		
Διακοπή της θερμομόνωσης στις παραστάδες, στα υπέρθυρα των ανοιγμάτων και στις ποδιές των παραθύρων		
Οι απολήξεις των εξωτερικών δομικών στοιχείων (στηθαία στα δώματα, αντεσταμμένα δοκάρια και διπλά στηθαία για τη διαμόρφωση αρμών διαστολής)		
		
Τα ενδιάμεσα και περιμετρικά δοκάρια στις θέσεις των δοκών στην οροφή υπογείου ή πιλοτής		

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΕΛΥΦΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑΣ	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ
<p>Διακοπή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης σε θέση εγκάρσιας συναρμογής εξωτερικού κελύφους με εσωτερικό τοίχο</p>		
<p>Οπτόκλινοι με τις οπές κάθετα στο εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου</p>		
<p>Η προέκταση των φερόντων στοιχείων πέραν του κύριου όγκου του κτιρίου (πρόβολοι)</p>		
<p>Τα σημεία διέλευσης σωληνώσεων ύδρευσης, αποχέτευσης, κεντρικής θέρμανσης, αερίου, καμινάδων, αεραγωγών κτλ.</p>		
<p>Τα κουτιά των περιελισσόμενων περσίδων των κουφωμάτων</p>		
<p>Σχισμές και κενά στις θέσεις συναρμογής των κουφωμάτων με τις τοιχοποιίες</p>		

## 2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ

Σύμφωνα με τη μέθοδο για την εύρεση των θερμογεφυρών, ένα κτίριο χωρίζεται σε μονοδιάστατα (1D), δισδιάστατα (2D) και τρισδιάστατα (3D) γεωμετρικά μοντέλα, όπως φαίνεται και Εικόνα 2.9. Το 1D γεωμετρικό μοντέλο αντιστοιχεί στον κεντρικό τομέα της τοιχοποιίας του κτιρίου, ενώ τα 2D και 3D μοντέλα αφορούν συγκεκριμένα σημεία στο κέλυφος του κτιρίου, όπου και συνορεύουν διαφορετικά στοιχεία του, όπως για παράδειγμα το σημείο σύζευξης μεταξύ της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δάπεδο ή την οροφή, του δαπέδου με έναν εσωτερικό τοίχο κ.τ.λ. [12].



Εικόνα 2.9: Διαχωρισμός του κτιρίου σε 1D, 2D και 3D γεωμετρικά μοντέλα [12]

Για κάθε γεωμετρικό μοντέλο υπολογίζεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας αν πρόκειται για κεντρικό τμήμα του κελύφους και οι θερμογέφυρες όπου αυτές υπάρχουν. Ο υπολογισμός επιτυγχάνεται είτε με τις κοινές μεθόδους ή με προσομοίωση μέσω μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD simulation)[12].

Με βάση τους υπολογισμούς αυτούς ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται από την εξίσωση 2.14.

$$U_{total} = \sum_{k=1}^{N_k} U_k A_k + \sum_{m=1}^{N_m} \Psi_m l_m + \sum_{n=1}^{N_n} \chi_n \quad 2.14$$

Όπου :

- $U_k$  Ο συντελεστής θερμοπερατότητας για τα  $k$  κεντρικά μέρη της τοιχοποιίας.
- $A_k$  Το εμβαδόν της επιφάνειας που εφαρμόζεται ο συντελεστής  $U_k$ .
- $\Psi_m$  Ο γραμμικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των  $m$  στοιχείων του κτιρίου.
- $l_m$  Το μήκος για το οποίο εφαρμόζεται ο συντελεστής  $\Psi_m$ .

- $\chi_m$  Ο σημειακός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των  $n$  στοιχείων του κτιρίου.
- $N_n$  Ο συνολικός αριθμός των 3D στοιχείων του κτιρίου.
- $N_m$  Ο συνολικός αριθμός των 2D στοιχείων του κτιρίου.
- $N_k$  Ο συνολικός αριθμός των κεντρικών στοιχείων της τοιχοποιίας του κτιρίου.

#### 2.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΟΡΘΟΣΤΑΤΩΝ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

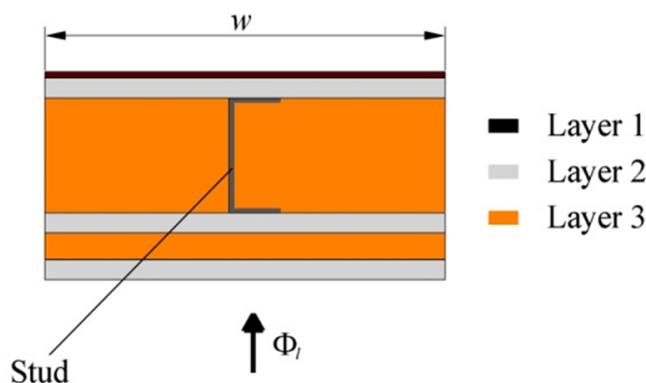
Σε μια τοιχοποιία ξηρής δόμησης, προκειμένου να συγκρατηθούν τα δομικά στοιχεία από τα οποία είναι κατασκευασμένη, χρησιμοποιούνται συνήθως μεταλλικοί ορθοστάτες -steel studs- (Εικόνα 2.10). Εξαιτίας αυτής της ασυνέχειας, εντός της τοιχοποιίας, λόγω των μεταλλικών στοιχείων, δημιουργούνται σημαντικές θερμογέφυρες οι οποίες δεν μπορούν να παραβλεφθούν κατά τη ενεργειακή μελέτη του κελύφους ενός κτιρίου.

Ειδικότερα, θεωρώντας πως  $\Phi_l$  είναι η ανά μήκος ροή θερμότητας, ο συντελεστής θερμικής σύζευξης υπολογίζεται βάσει της παρακάτω εξίσωσης 2.15.

$$L_{2D} = \frac{\Phi_l}{(T_i - T_e)} \quad 2.15$$

Όπου:

- $L_{2D}$  Ο συντελεστής θερμικής σύζευξης όπως υπολογίσθηκε από 2D υπολογισμούς.
- $\Phi_l$  Η ανά μέτρο ροή θερμότητας ορισμένη για 2D υπολογισμούς (W/m).
- $T_i$  Η εσωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- $T_e$  Η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.10: Σχηματική παράσταση κεντρικού μέρους του τοίχου [12]

Η ανά μήκος ροή θερμότητας, υπολογίζεται από την εξίσωση 2.16, όπου  $Q_{2D}$  η ροή θερμότητας προσδιορισμένη μέσα από 2D υπολογισμούς αριθμητικής προσομοίωσης CFD και  $H$  το πάχος του υπολογιστικού χωρίου την τρίτη διάσταση.

$$\Phi_l = \frac{Q_{2D}}{H} \quad 2.16$$

Η γραμμική θερμογέφυρα:

$$\Psi = L_{2D} \cdot U_{1D} \times w \quad 2.17$$

Όπου:

- $\Psi$  Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας.  
 $L_{2D}$  Ο συντελεστής θερμικής σύζευξης όπως υπολογίστηκε από υπολογισμούς 2D.  
 $U_{1D}$  Ο συντελεστής θερμοπερατότητας για την τοιχοποιία που δεν περιλαμβάνει τη γραμμική θερμογέφυρα.  
 $w$  Το μήκος του 2D γεωμετρικού μοντέλου στο οποίο λαμβάνει χώρα το  $U_{1D}$ .

Τελικά, ο συντελεστής θερμοπερατότητας της κεντρικής περιοχής της τοιχοποιίας, υπολογίζεται από την εξίσωση 2.18:

$$U_k = U_{1D,k} + \frac{\Psi_k \times l_k}{A_k} \quad 2.17$$

Όπου:

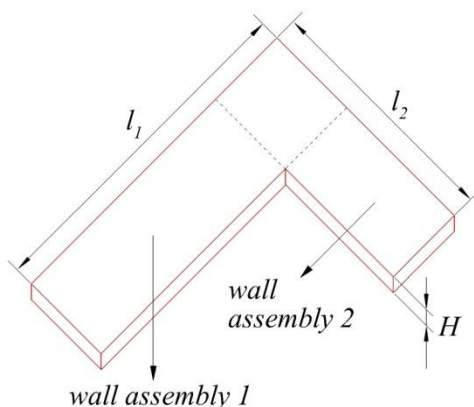
- $U_k$  Ο συντελεστής θερμοπερατότητας για τη κεντρική περιοχή της τοιχοποιίας.  
 $U_{1D,k}$  Ο συντελεστής θερμοπερατότητας για την τοιχοποιία που δεν περιλαμβάνει τη θερμογέφυρα.  
 $\Psi_k$  Η τιμή της γραμμικής θερμογέφυρας.  
 $l_k$  Το συνολικό μήκος της θερμογέφυρας.  
 $A_k$  Το εμβαδόν της υπό εξέταση επιφάνειας.

Η παραπάνω σχέση σε συνδυασμό με την εξίσωση 2.17, μπορεί να εκφραστεί και ως εξής:

$$U_k A_k = U_{1D,k} A_k + \Psi_k \times l_k \quad 2.17$$

### 2.4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΝ

Στο σχήμα της Εικόνα 2.11 , παριστάνεται η ένωση δυο τοίχων ενός κτιρίου, οπότε και στο σημείο σύνδεσής τους, εμφανίζεται θερμογέφυρα .



Εικόνα 2.11:Σχηματική παράσταση 2D σημείου συνένωσης δυο διαφορετικών τοίχων ενός κτιρίου [12]

Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας  $\Psi$ , έχει να κάνει με τις 2D γεωμετρίες και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad 2.18$$

Όπου:

$L_{2D}$  Ο συντελεστής θερμικής σύζευξης όπως υπολογίστηκε από υπολογισμούς 2D.

$U_j$  Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου j.

$l_j$  Το συνολικό μήκος της θερμογέφυρας.

Όπως στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και για τη σύζευξη δυο δομικών στοιχείων ενός κτιρίου, ο συντελεστής θερμικής σύζευξης, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L_{2D} = \frac{\Phi_l}{\Delta T} \quad 2.19$$

Όπου :

$\Phi_l$  Η ανά μέτρο πάχους ροή θερμότητας ορισμένη από τους 2D υπολογισμούς (W/m).

$\Delta T$  Η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις δυο πλευρές του κελύφους.

Η ροή θερμότητας, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, όπου με  $Q_{2D}$  συμβολίζουμε τη ροή θερμότητας, όπως υπολογίζεται από πρόγραμμα CFD σε δυο διαστάσεις [9], ενώ με  $H$  συμβολίζεται η τρίτη διάσταση του υπολογιστικού χωρίου.

$$\Phi_l = \frac{Q_{2D}}{H} \quad 2.20$$

Ειδικότερα, για τη παραπάνω διάταξη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.11, ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας, θα είναι:

$$\Psi = L_{2D} - U_1 l_1 - U_2 l_2 \quad 2.21$$

Όπου  $U_1$  και  $U_2$  είναι οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των δυο τοίχων, ενώ  $l_1$  και  $l_2$  είναι τα αντίστοιχα μήκη τους.

### 2.4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΝΔΕΞΕΙΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΝ

Οι σημειακές θερμογέφυρες εμφανίζονται τοπικά σε σημεία, και δεν υπάρχει συμμετρία κατά το μήκος, όπως γίνεται με τις γραμμικές. Έτσι, προκειμένου να τις προσδιορίσουμε, απαιτείται ο συντελεστής σημειακής θερμογέφυρας, ο οποίος και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \Psi_j l_j \quad 2.22$$

Όπου:

$L_{3D}$  Ο συντελεστής θερμικής σύζευξης προσδιοριζόμενος για ένα 3D μοντέλο .

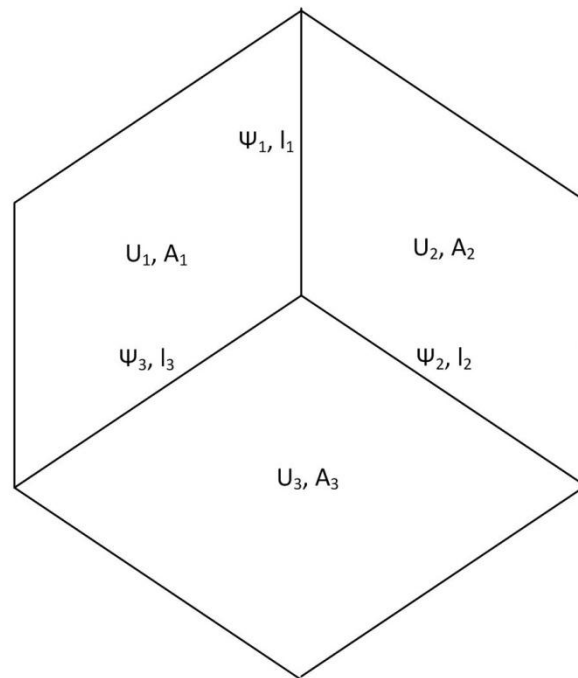
$U_i$  Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κάθε τοίχου  $i$ .

$A_i$  Το εμβαδόν της υπό εξέταση επιφάνειας.

$\Psi_j$  Ο συντελεστής γραμμικής θερμογέφυρας όπως και υπολογίζεται από την εξίσωση 2.20.

$l_j$  Το συνολικό μήκος της γραμμικής θερμογέφυρας.

Στην Εικόνα 2.12 παριστάνεται ένα 3D μοντέλο από τρία διαφορετικά δομικά στοιχεία.



**Εικόνα 2.12: Σχηματική παράσταση 3D σημείου συνένωσης τριών διαφορετικών δομικών στοιχείων του κτιρίου [12].**

Ο συντελεστής θερμικής σύζευξης των στοιχείων υπολογίζεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$L_{3D} = \frac{\Phi}{\Delta T} \quad 2.23$$

Όπου :

$\Phi$  Η συνολική ροή θερμότητας.

$\Delta T$  Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικών και των εξωτερικών επιφανειών.



Ειδικότερα για μια διάταξη σαν του παραπάνω σχήματος, ο συντελεστής σημειακής θερμογέφυρας θα είναι:

$$\chi = L_{3D} - U_1 A_1 - U_2 A_2 - U_3 A_3 - \Psi_1 l_1 - \Psi_2 l_2 - \Psi_3 l_3 \quad 2.24$$

Όπου  $U_1$ ,  $U_2$  και  $U_3$  είναι οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των τριών τοίχων,  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$  και  $\Psi_3$  οι συντελεστές γραμμικών θερμογεφυρών στα σημεία σύζευξης των τοίχων, ενώ  $l_1$ ,  $l_2$  και  $l_3$  τα μήκη των συνδέσεων όπως διακρίνονται και στη σχηματική παράσταση.



### **3 ΜΟΝΩΤΙΚΕΣ ΣΑΝΙΔΕΣ ΚΕΝΟΥ (Vacuum Insulation Panels)**

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ VIP**

Οι μονωτικές σανίδες κενού (VIP), θεωρούνται στις μέρες μας σαν μια από τις πιο καινοτόμες λύσεις για τη θερμομόνωση του κελύφους ενός κτιρίου. Τοποθετούνται στη κατηγορία των υπέρ-μονωτικών υλικών (super insulation materials – SIM), δηλαδή υλικών με θερμική αγωγιμότητα μικρότερη από αυτή του ακίνητου αέρα ( $0.025\text{W/mK}$ ) σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Είναι ιδιαίτερα λεπτές σε πάχος, ενώ η θερμοαγωγιμότητα τους είναι πολύ χαμηλή και κυμαίνεται από  $0.004\text{W/mK}$  κατά τα πρώτα χρόνια τοποθέτησης τους σε ένα κτίριο έως τα  $0.008\text{W/mK}$  έπειτα από 25 χρόνια εφαρμογής τους. Αυτό σημαίνει πως τα υλικά αυτά είναι 5 έως 10 φορές πιο αποδοτικά, μέσα στη διάρκεια του χρόνου, σε σχέση με τα συμβατικά μονωτικά υλικά.

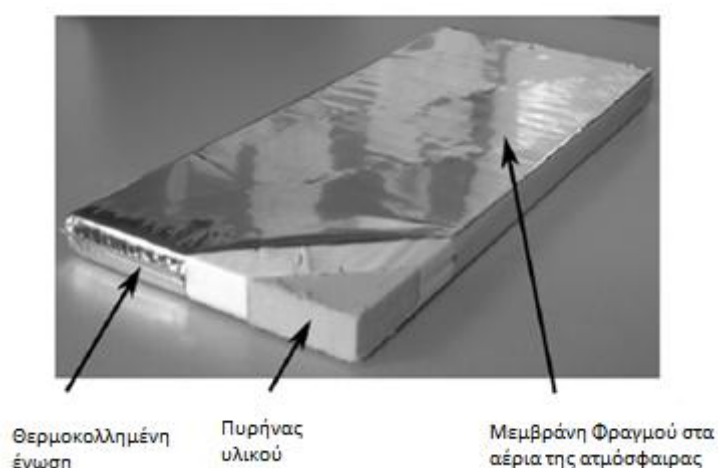
Κατά το παρελθόν τα VIP χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία κυρίως για εφαρμογές σε καταψύκτες και συσκευές θερμικής αποθήκευσης. Κατά τη τελευταία δεκαετία όμως, γίνονται μελέτες για το κατά πόσο είναι εφικτό να βρουν χώρο και στον κτιριακό τομέα. Για το λόγο αυτό αρχικά τοποθετήθηκαν και δοκιμάστηκαν σε κτίρια υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας, με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας (Nearly Zero Energy Buildings – nZEBs). Ως εκ τούτου, οι μονωτικές σανίδες κενού, βρίσκονται σε πρώιμα στάδια εφαρμογής στον κτιριακό τομέα, λαμβάνοντας όμως υπόψη την αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα τους, αυξάνεται συνεχώς το ενδιαφέρον για περαιτέρω χρήση τους, τόσο σε νέες όσο και σε υπό ανακαίνιση κατασκευές.

Ωστόσο, σημαντικό πρόβλημα για τη χρήση των VIP παραμένουν τα περιορισμένα μέχρι στιγμής στοιχεία για την διάρκεια της απόδοσης τους αλλά και το σχετικά υψηλό κόστος εφαρμογής τους σε κτίρια. Γι αυτό και η χρήση τους στην οικοδομική βιομηχανία, αντιμετωπίζεται έως τώρα με σκεπτικισμό. Έτσι υπάρχει πεδίο συνεχούς μελέτης και προσπάθειας για βελτίωση των υλικών αυτών, με συνεχή πρόοδο στην τεχνολογία κατασκευής τους και με ταυτόχρονη προσπάθεια να ελαττωθεί το κόστος τους, ώστε τα VIP να καταστούν μια ανταγωνιστική λύση στον τομέα της θερμομόνωσης των κτιρίων.

## 3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ VIP

### 3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι μονωτικές σανίδες κενού, αποτελούνται από έναν πορώδη πυρήνα ο οποίος περιβάλλεται και σφραγίζεται από μια μεμβράνη με τη μορφή φακέλου. Η ανοιχτού πορώδους δομή του υλικού του πυρήνα, επιτρέπει την απομάκρυνση του αέρα, οπότε δύναται να δημιουργηθούν συνθήκες κενού. Ο φάκελος είναι αεροστεγής και υδατοστεγής ώστε το VIP να μπορεί να διατηρεί τη χαμηλή τιμή εσωτερικής πίεσης και συνεπώς τις θερμομονωτικές του ιδιότητες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην Εικόνα 3.1 διακρίνονται τα επιμέρους στοιχεία ενός τέτοιου υλικού.

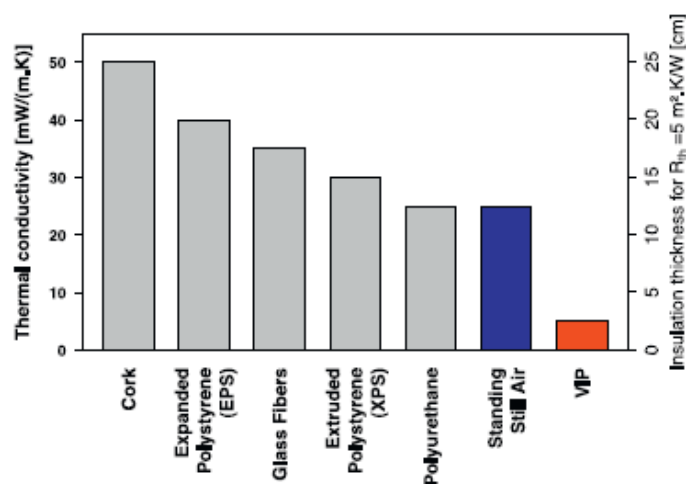


Εικόνα 3.1: Γενική δομή μονωτικού πάνελ κενού VIP

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στον πυρήνα του VIP, είναι περίπου  $0.004\text{W/mK}$ . Εάν συμπεριληφθούν και οι θερμογέφυρες που δημιουργούνται εξαιτίας των διαφορετικών υλικών, πυρήνα-μεμβράνης, η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ  $0.006$  και  $0.008\text{W/mK}$ . Οι χαμηλές αυτές τιμές στην ουσία επιτυγχάνονται καθώς έχει αφαιρεθεί ο αέρας από τον πυρήνα του VIP. Κατά αυτόν τον τρόπο, καθώς έχουν ελαχιστοποιηθεί τα μόρια του αέρα, δεν υπάρχει συναγωγή θερμότητας εντός του υλικού ενώ ταυτόχρονα μειώνεται σημαντικά και η αγωγή θερμότητας αφού σε συνθήκες που πλησιάζουν το κενό οι συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων του πυρήνα του μονωτικού και των γειτονικών ατόμων του αέρα που περιλαμβάνεται σε αυτόν είναι ελάχιστες.

Οι τοιχοποιίες που μονώνονται με τις κοινές μεθόδους, καταλαμβάνουν ιδιαίτερα μεγάλο όγκο στο σύνολο του κτιρίου, λόγω των πολλαπλών στρώσεων των

διαφορετικών υλικών τα οποία εφαρμόζονται σε αυτή [13]. Μια τοιχοποιία όμως μονωμένη με VIP θα κατασκευαστεί με πάχος μονωτικών υλικών από 6 έως 10 φορές μικρότερο από ότι θα συνέβαινε αν ήταν μονωμένη με συμβατικά υλικά. Τούτο συμβαίνει καθώς λόγω της διαφοράς της θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν τα VIP σε σχέση με τα συμβατικά μονωτικά υλικά, εμφανίζουν και μεγαλύτερη θερμική αντίσταση ανά μονάδα πάχους. Για μια τυπική τιμή θερμικής αγωγιμότητας (0.007W/mK) μια σανίδα VIP πάχους 25mm είναι ισοδύναμη με μόνωση πετροβάμβακα πάχους 154mm ή μόνωση με EPS πάχους 121mm [14]. Στην Εικόνα 3.2, παρουσιάζεται η θερμική αγωγιμότητα διαφόρων μονωτικών υλικών σε σχέση με το πάχος τους.



Εικόνα 3.2: Θερμική απόδοση μονωτικών υλικών . Θερμική Αγωγιμότητα και πάχος μονωτικών υλικού για θερμική αντίσταση  $R_{th}=5\text{m}^2\text{K/W}$  [15]

Γενικά, η συνολική μεταφορά θερμότητας μέσα στη μονωτική σανίδα κενού, μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\lambda_{tot} = \lambda_{sol} + \lambda_{gas} + \lambda_{rad} + \lambda_{memb} \quad 3.1$$

Εξαρτάται δηλαδή από το άθροισμα των παραπάνω παραγόντων, εκ των οποίων, κάθε παράγοντας εκφράζεται από τον αντίστοιχο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του. Έτσι, η συνολική μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από την αγωγιμότητα του πορώδους υλικού του πυρήνα,  $\lambda_{sol}$ , τη θερμική αγωγιμότητα του αέρα,  $\lambda_{gas}$ , τη μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας,  $\lambda_{rad}$ , και τη θερμική αγωγιμότητα λόγω της θερμογέφυρας,  $\lambda_{memb}$ , που δημιουργείται λόγω της εξωτερικής μεμβράνης για τη διατήρηση του κενού.

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή μέσω του αέρα, εξαρτάται από την εσωτερική πίεση στο VIP, και ο αντίστοιχος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εκφράζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\lambda_g(p) = \varepsilon \frac{\lambda_g^0}{1 + (p_{1/2} / p)} \quad 3.2$$

όπου το  $\varepsilon$  εκφράζει το πορώδες του υλικού, το  $\lambda_g^0$  την θερμική αγωγιμότητα του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και  $p_{1/2}$  είναι μια εμπειρική τιμή της πίεσης κατά την οποία η αγωγιμότητα του αερίου μειώνεται κατά 50%.

Η αγωγιμότητα του υλικού του πυρήνα, εξαρτάται και από την ύπαρξη υγρασίας  $u$  στο υλικό του πυρήνα του πάνελ των VIP.

$$\lambda_{sol}(u) = \lambda_{sol,dry} + Bu \quad 3.3$$

όπου  $B$  είναι ένας εμπειρικός συντελεστής.

Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, εκφράζεται από την εξίσωση 3.4.

$$\lambda_r = \frac{16}{3} \frac{n^2 \sigma T^3}{E} \quad 3.4$$

Όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$  η σταθερά Boltzmann και  $E$  ο συντελεστής απορρόφησης [16].

Παρά τη στεγανότητα που προσφέρει η αεροστεγής μεμβράνη στο υλικό του πυρήνα των VIP, με την πάροδο του χρόνου, εισέρχεται στο εσωτερικό της μονωτικής σανίδας αέρας και υγρασία. Αυτό οφείλεται στην διάχυση μορίων, λόγω της μεγάλης διαφοράς πίεσης μεταξύ του εσωτερικού του VIP και του περιβάλλοντος, από την επιφάνεια της μεμβράνης αλλά και από τις ενώσεις που «σφραγίζουν» το VIP (heat-sealed joint). Έτσι, αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα του VIP με αποτέλεσμα να μειώνονται οι θερμομονωτικές του ιδιότητες [17].

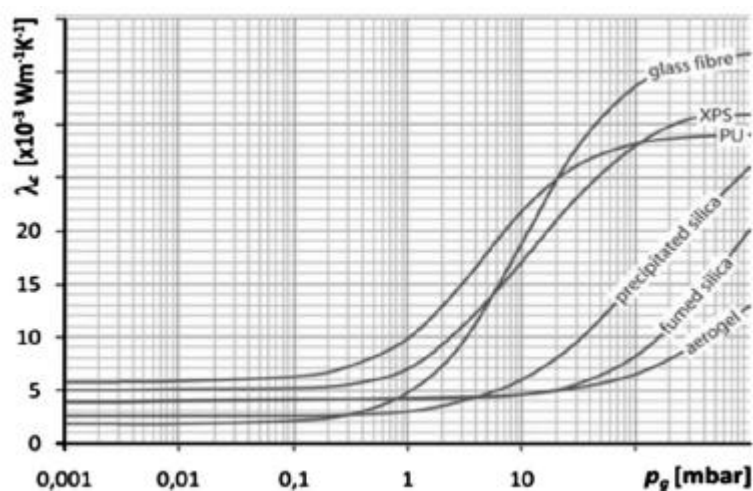
Γι αυτό και όταν δίνεται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή των VIP, η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, δίνεται για ένα εύρος χρόνου έως και τα 25 χρόνια [18].

### 3.2.2 Ο ΠΥΡΗΝΑΣ ΤΩΝ VIP

Σημαντικό ρόλο στη θερμική αντίσταση των μονωτικών σανίδων κενού, στις αυξημένες μονωτικές τους αλλά και μηχανικές τους ιδιότητες (αντίσταση σε υγρασία και υψηλές θερμοκρασίες), έχει η επιλογή του υλικού του πυρήνα των VIP.

Γενικά, για να είναι αποδοτικό μια σανίδα VIP, πρέπει ο πυρήνας του να καλύπτει τις εξής απαιτήσεις:

- Μικρή διάμετρος των πόρων του υλικού του πυρήνα. Σε υλικά με μεγάλο πορώδες, πρέπει η πίεση να διατηρείται σε πάρα πολύ χαμηλές τιμές, ώστε να επιτυγχάνεται χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, κατάσταση δύσκολα επιτεύξιμη με βάση τις μεθόδους και τα υλικά που χρησιμοποιούνται έως τώρα. Με νανοπορώδη όμως υλικά, διατηρείται η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του πυρήνα και έτσι η πίεση δεν χρειάζεται να είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.3), παρουσιάζεται για διαφορετικά υλικά του πυρήνα των VIP, η θερμική τους αγωγιμότητα συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης της μονωτικής σανίδας κενού.
- Το υλικό του πυρήνα πρέπει να έχει τέτοιο πορώδες ώστε να διευκολύνεται η κατάσταση για δημιουργία συνθηκών κενού εντός της μονωτικής σανίδας (ανοιχτό πορώδες).
- Το υλικό του πυρήνα πρέπει να είναι ανθεκτικό στη συμπίεση καθώς η πίεση εντός του VIP κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 3mbar ενώ η εξωτερική πίεση είναι η ατμοσφαιρική (1atm ή 101kPa).
- Να είναι κατασκευασμένος από υλικά αδιαπέραστα στην υπέρυθη ακτινοβολία, ώστε να μειώνεται ο παράγοντας της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία στο VIP.



Εικόνα 3.3: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών του πυρήνα των VIP σε συνάρτηση με τη πίεση στο εσωτερικό του [19]

Για τη κατασκευή του πυρήνα των VIP, έχουν μελετηθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι υλικών μεταξύ των οποίων, σύνθετα ινωδών-σκόνης (fibre-powder) [20], πολυκαρβονικά [21], από αφρό φαινόλης (phenolic foam), υπέρλεπτα υαλονήματα (ultrafine glass fibres) [22].

### 3.2.2.1 Πυρήνας από Πυρογενή καολίνη (Fumed Silica)

Ο πυρογενής καολίνης παράγεται ύστερα από την πυρόλυση του τετραχλωροπυριτίου ( $\text{SiCl}_4$ ). Όταν αντιδράσει με το οξυγόνο, παράγεται διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) το οποίο πρόκειται για μια λεπτόκοκκη άσπρη σκόνη. Η σκόνη αυτή συμπιέζεται οπότε και προκύπτει μια συμπαγής σανίδα.

Οι πόροι του πυρήνα έχουν πολύ μικρή διάμετρο, 30 έως 100nm και μεγάλη αντοχή στη θλίψη. Η πυκνότητα του υλικού αυτού είναι περίπου  $200\text{kg/m}^3$  και η θερμική του αγωγιμότητα κυμαίνεται μεταξύ 0.003 και  $0.006\text{W/mK}$  σε πίεση 20-100mbar [23]. Μειονέκτημα του πυρογενή καολίνης αποτελεί το ότι δεν είναι δυνατόν να ελαττώσει τον παράγοντα μετάδοσης θερμότητας από ακτινοβολία στο VIP. Έτσι ενώ η μετάδοση θερμότητας εξαιτίας του αέρα είναι ιδιαίτερα μικρή, η συνολική μεταφορά θερμότητας μέσα στη μονωτική σανίδα κενού θα παραμένει υψηλή εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας από ακτινοβολία. Η λύση βρίσκεται στη τοποθέτηση αδιαφανοποιητών (opacifiers) στον πυρογενή καολίνη με αποτέλεσμα ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του VIP να μειώνεται περίπου στα  $0.004\text{W/mK}$ .

Τα πλεονεκτήματα του πυρογενή καολίνης τον καταστούν μια πολύ καλή επιλογή για τον πυρήνα των VIP που χρησιμοποιούνται κυρίως στις μονώσεις των



κτιρίων. Το πυρίτιο είναι ένα υλικό μη τοξικό, μη αναφλέξιμο, ανακυκλώσιμο και δεν εκπέμπει βλαβερές ουσίες στο περιβάλλον. Επιπλέον ο πυρήνας από πυρογενή καολίνη μειώνει τη διείσδυση υγρασίας μέσα από τον φάκελο που περικλείει το VIP. Στη περίπτωση δε που υπάρξει διάτρηση της μονωτικής σανίδα κενού, ο πυρήνας θα εξακολουθήσει να έχει σχετικά χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας περίπου  $0.020 \text{ W/mK}$ , σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης.

### **3.2.2.2 Πυρήνας από Αερογέλη (Aerogels)**

Η αερογέλη κατασκευάζεται σε δυο στάδια. Αρχικά, δημιουργείται μια μορφή γέλης σε υγρή μορφή ενώ στη συνέχεια η υγρή αυτή γέλη ξηραίνεται. Κατά αυτόν τον τρόπο, παράγεται ένα νανοπορώδες υλικό με διάμετρο πόρων περίπου  $20\text{nm}$  και πυκνότητα που κυμαίνεται από  $3$  έως  $350\text{kg/m}^3$ . Σε πίεση  $50\text{mbar}$  και με την προσθήκη αιθάλης (carbon black), ώστε να εμποδιστεί η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, η αερογέλη μπορεί να αποκτήσει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας περίπου  $0.004\text{W/mK}$  ενώ σε πίεση περιβάλλοντος ο συντελεστής αυξάνεται στα  $0.0135\text{W/mK}$  [24].

Η αερογέλη είναι ένα υλικό μη εύφλεκτο και αδρανές. Ωστόσο εξαιτίας του υψηλού της κόστους, οι μονωτικές σανίδες κενού με πυρήνα αυτού του είδους καθίστανται απαγορευτικές για τον κλάδο των κατασκευών.

### **3.2.2.3 Πυρήνας από αφρό πολυουρεθάνης**

Τα πρώτα VIP που κατασκευάστηκαν είχαν σαν υλικό πυρήνα αφρό πολυουρεθάνης (PUR). Το σημαντικό μειονέκτημα των μονωτικών σανίδων κενού με πυρήνα πολυουρεθάνης, σε σχέση με τα VIP από πυρογενή καολίνη ή αερογέλη, είναι πώς για να διατηρηθεί χαμηλός ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τους, πρέπει η πίεση να παραμείνει κάτω από  $1\text{mbar}$ . Στη περίπτωση που η πίεση αυξηθεί, αυξάνεται σχεδόν κατακόρυφα και τη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας [25]. Όμως, με τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας και τα οποία περιβάλλουν τον πυρήνα των VIPs, δεν είναι δυνατόν να διατηρηθεί μια τόσο χαμηλή πίεση. Έτσι, καθώς η πολυουρεθάνη μπορεί να διατηρήσει τις μονωτικές της ιδιότητες για μικρό χρονικό διάστημα, παρόλο που σαν υλικό είναι αρκετά οικονομική, καταστούν τις μονωτικές σανίδες κενού με πυρήνα πολυουρεθάνης ακατάλληλες για τον κατασκευαστικό τομέα.

### 3.2.2.4 Πυρήνας από υαλόνημα

Τα VIP με ίνες γυαλιού στον πυρήνα τους, εμφανίζουν παρόμοια μειονεκτήματα με VIP με πυρήνα από αφρό πολυουρεθάνης. Καθώς η διάμετρος των πόρων του πυρήνα τους είναι σχετικά μεγάλη και κυμαίνεται μεταξύ 1 έως 12 $\mu\text{m}$ , για να επιτευχθεί χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πρέπει η πίεση του αέρα να είναι πολύ χαμηλή. Ενδεικτικά, για πίεση 0.1mbar ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι 0.0015W/mK.

Η αντοχή του υαλονήματος σε υψηλές θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική γι αυτό προτείνεται η εγκατάσταση μονωτικών σανίδων κενού με αυτού του είδους πυρήνα για χρήση σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών [26]. Μπορεί το κόστος του πυρήνα από τις ίνες αυτές είναι αρκετά χαμηλό, ωστόσο τα VIP με πυρήνα υαλονήματος διατηρούν ικανοποιητικές μονωτικές ιδιότητες για χρονικό διάστημα περίπου 15ετών, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για εγκατάσταση σε κτιριακές κατασκευές [27].

### 3.2.3 MEMBRANES ΤΩΝ VIP

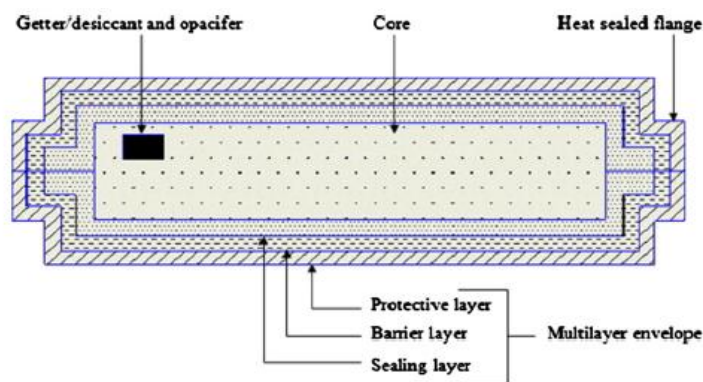
Ο σκοπός για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι μεμβράνες που περικλείουν τον πυρήνα των VIP είναι η αποτροπή της εισροής αέρα εντός αυτού διατηρώντας μια κατάσταση, όσο αυτό είναι εφικτό, κενού αέρος μέσα στον πυρήνα. Αυτή εξάλλου η ιδιότητα της κατάστασης κενού, διαφοροποιεί τις μονωτικές αυτές σανίδες σε σχέση με τα «συμβατικά» μονωτικά υλικά.

Σημαντικός παράγοντας επιλογής της κατάλληλης μεμβράνης, αποτελεί η αποφυγή των θερμογεφυρών. Λύση για τον περιορισμό τους, μπορεί να αποτελέσει η αύξηση της διάστασης των σανίδων, έτσι ώστε κατά την εγκατάσταση τους σε μια επιφάνεια να χρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν μικρότερος αριθμός μονωτικών σανίδων γίνεται [28]. Στο σημείο αυτό όμως πρέπει να σημειωθεί, πως αν σε μια κατασκευή με VIP μεγάλων διαστάσεων προκύψει μια οποιαδήποτε διάτρηση, θα υπάρξει μεγαλύτερη μείωση στη συνολική θερμική αντίσταση της, σε σχέση με το εάν κάτι παρόμοιο συνέβαινε σε μια κατασκευή με περισσότερες σανίδες μικρότερων διαστάσεων.

Κατασκευαστικά, ο «φάκελος» των VIP, είναι συχνά χωρισμένος σε επιμέρους στρώσεις μεμβρανών. Έτσι έχουμε την αεροστεγή στρώση (sealing layer), τη στρώση

φραγμού (barrier layer) και την προστατευτική στρώση (protective layer) όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 3.4. Η αεροστεγής μεμβράνη, αποτελεί την εσωτερική στρώση του «φακέλου» που περιβάλλει τον πυρήνα των VIP και είναι συνήθως κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο. Η μεσαία στρώση, χαρακτηρίζεται ως μεμβράνη φραγμού (barrier layer). Η στρώση αυτή μπορεί να είναι από φύλλα αλουμινίου ή από ένα πολυστρωματικό κάλυμμα. Ρόλος της είναι η προστασία του πυρήνα των VIP την εισχώρηση υγρασίας και αέρα. Η τελευταία στρώση του φακέλου καλείται και προστατευτική. Εξωτερικές πιέσεις και άλλοι εξωγενείς παράγοντες, είναι δυνατόν να δημιουργήσουν ζημιές στο μονωτικό υλικό. Έτσι, η προστατευτική μεμβράνη αποσκοπεί στο να κάνει τα VIP πιο ανθεκτικά σε χρήση. Ταυτοχρόνως η προστατευτική στρώση, λειτουργεί και ως υπόστρωμα για την στρώση φραγμού.

Τέλος, τα σημεία σφράγισης της μεμβράνης των VIP γύρω από τον πυρήνα, αποτελούν ένα αδύνατο σημείο από τα οποία μπορεί να εισέλθει αέρας και υγρασία εντός του μονωτικού υλικού. Συνεπώς, η σφράγιση πρέπει να είναι ιδιαίτερα ποιοτική και ανθεκτική ώστε μεγιστοποιείται ο χρόνος βέλτιστης απόδοσης των VIP. Η εφαρμογή τη μεμβράνης γύρω από τον πυρήνα, επιτυγχάνεται με θερμοσυγκόλληση θερμαινόμενων υπο πίεση ράβδων στα άκρα της [29].



Εικόνα 3.4 Τομή μονωτικής σανίδας κενού [19]

### 3.2.3.1 MEMBRANES ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΦΥΛΟΥ (*metal laminate*)

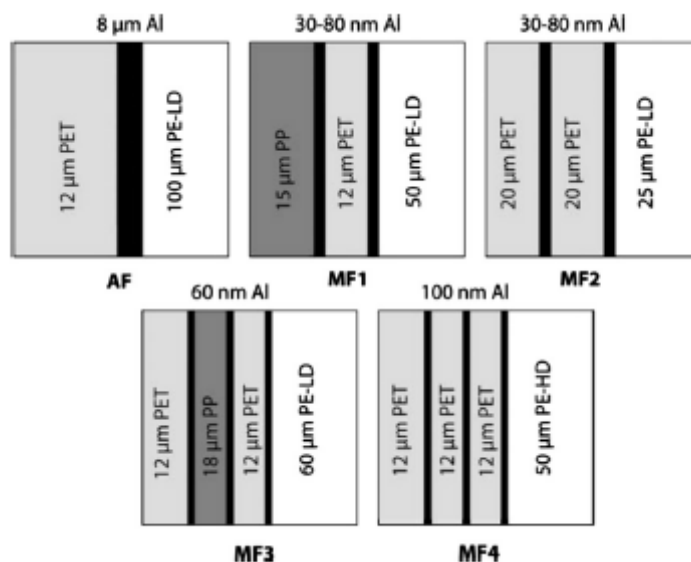
Οι μεταλλικές μεμβράνες, αποτελούνται από τη μεσαία στρώση, η οποία είναι συνήθως από αλουμίνιο με πάχος 5-10μm και αποτελεί την μεμβράνη φραγμού, από την εξωτερική στρώση από τереφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) η οποία έχει τον ρόλο της προστατευτικής μεμβράνης και τέλος την εσωτερική στρώση η οποία είναι

κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο (PE). Η πολυστρωματική αυτή μορφή συνήθως αναφέρεται στις προδιαγραφές των VIP ως φύλλο αλουμινίου (aluminium foil–AF).

Με τη μεσαία στρώση αλουμινίου, επιτυγχάνεται μείωση της διαπερατότητας από αέρα και υγρασία με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διάρκεια της καλής μονωτικής απόδοσης των VIP. Ωστόσο, το μεγάλο πάχος της μεταλλικής πολυστρωματικής μεμβράνης, συμβάλει στη δημιουργία θερμογεφυρών καθώς ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου είναι 210W/mK, του πυρήνα περίπου 0.004W/mK και των πολυμερών στρώσεων (PET–PE) κυμαίνεται από 0.25-0.3 W/mK [30].

### 3.2.3.2 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

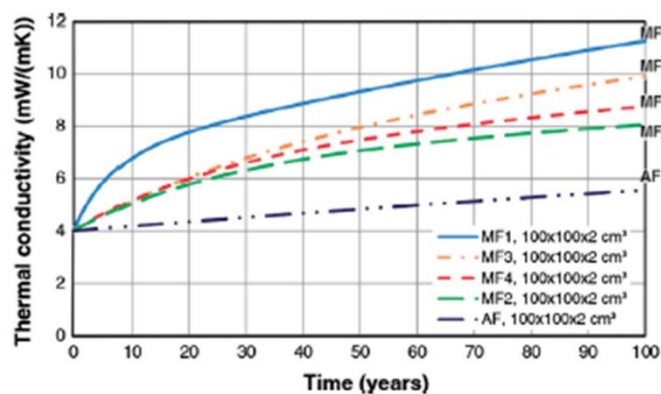
Το πολυστρωματικό μεταλλικό φύλλο (metalized multilayer foil–MF), αποτελείται συνήθως από τρεις μεμβράνες φραγμού από μεταλλικά φιλμ καλυμμένα με τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και μια εσωτερική στρώση από πολυαιθυλένιο (PE). Ολόκληρη η σύνθεση, καλύπτεται από αλουμίνιο πάχους 20-100nm. Στην Εικόνα 3.1, απεικονίζονται οι στρώσεις μεμβρανών μεταλλικού φύλλου και μεταλλικών πολυστρωματικών πολυμερών φύλλων διαφορετικών τύπων



Πίνακας 3.1: Απεικόνιση μεμβράνων από φύλλο αλουμινίου (AF) και από πολυστρωματικά μεταλλικά φύλλα [19]

Οι πολλαπλές αυτές στρώσεις, προσδίδουν στον «φάκελο» μεγαλύτερη αντοχή σε ότι αφορά την διαπερατότητα του σε σύγκριση με τους «φακέλους» με απλές στρώσεις υλικών, ενώ τα πολυμερή υλικά συμβάλουν στη μείωση του φαινομένου δημιουργίας θερμογεφυρών. Εντούτοις, το μικρότερο συνολικό τους πάχος, σε σχέση με τις μεμβράνες από φύλλο αλουμινίου (AF), συμβάλει στη ταχύτερη εισχώρηση

αέρα και υγρασίας μέσα στον πυρήνα των VIP με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια του χρόνου να αυξάνεται και γρηγορότερα η θερμική τους αγωγιμότητα η θερμική τους αγωγιμότητα αυξάνεται. Στην Εικόνα 3.5 παριστάνεται η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για VIP με διαφορετικούς τύπους μεμβράνης.



Εικόνα 3.5: Μεταβολή στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για διαφορετικού τύπου μεμβράνες [19]

### 3.2.4 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΣΑΝΙΔΩΝ ΚΕΝΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΔΟΜΗΣΗΣ.

Στον Πίνακα 3.2, παρουσιάζονται οι κυριότεροι κατασκευαστές VIP για εφαρμογή σε δομικές κατασκευές. Το υλικό του πυρήνα που χρησιμοποιείται κυρίως, είναι ο πυρογενής καολίνης ενώ ο σημαντικότερος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη από σχεδόν όλους τους κατασκευαστές, είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μονωτικών ιδιοτήτων των υλικών. Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, η δυσκολία στο να διατηρηθούν οι ιδιότητες των VIP όπως κατά την αρχική κατάσταση παραγωγής τους, χωρίς να επηρεαστούν από φαινόμενα που αλλοιώνουν τις μονωτικές τους ικανότητες (εισροή αέρα- υγρασίας- αύξηση πίεσης) είναι και ο κυριότερος λόγος για τον οποίο δε χρησιμοποιούνται σαν πρώτη επιλογή στη θερμομόνωση των κτιρίων. Γι αυτό ορισμένοι κατασκευαστές VIP δίνοντας τις προδιαγραφές τους εκτιμούν έναν θεωρητικό ρυθμό στην αύξηση της πίεσης από τη στιγμή της παραγωγής τους, περίπου 0.5-4mbar/χρόνο.

Επιμέρους κριτήρια επιλογής για τη χρήση των VIP σε κτιριακές εγκαταστάσεις, πέρα από την θερμομονωτική τους ικανότητα και την διάρκεια που αυτή μπορεί να έχει, είναι η στατική τους ικανότητα, η συμπεριφορά τους σε συνθήκες πυρκαγιάς, οι τυχόν αρνητική επίδραση τους στο περιβάλλον, η ηχομόνωση που μπορεί να προσφέρουν ακόμη και ο τρόπος εγκατάστασης τους εντός της μόνωσης του κτιρίου [31].

Εξετάζοντας το διάγραμμα της Εικόνα 3.3, παρατηρούμε πως τα VIP με πυρήνα από πυρογενή καολίνη, εγγυούνται σταθερό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μέχρι την πίεση των 10mbar, με τη τιμή του στο κέντρο της μονωτικής σανίδας να βρίσκεται περίπου στα 0.008W/mK για πίεση 100mbar. Παρόλο που το κόστος των μονωτικών σανίδων κενού με τον πυρήνα αυτό είναι υψηλότερο από τα υπόλοιπα VIP, τα πλεονεκτήματά τους και οι απαιτήσεις των κτιρίων που καλύπτονται από αυτού του είδους τα υλικά, τα καταστούν εν κατακλείδι ως τα πιο αποδοτικά θερμομονωτικά για χρήση στον κτιριακό τομέα.

Συμπερασματικά, οι μονωτικές σανίδες κενού με πυρήνα από υαλόνημα και αφρό πολυουρεθάνης έχουν τον ίδια αρχική θερμική αγωγιμότητα με αυτές που έχουν πυρήνα από καολίνη. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους όμως, είναι μικρότερη, ενώ παρεκκλίνουν από τα κριτήρια επιλογής για χρήση των VIP στη μόνωση κτιριακών εγκαταστάσεων. Ταυτοχρόνως, καθώς το κόστος παραγωγής τους, είναι αρκετά μικρότερο από ότι τα VIP με πυρήνα πυρογενούς σιλικόνης, είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται για άλλες εφαρμογές πέρα από τις κτιριακές.

**Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικές προδιαγραφές μονωτικών σανίδων κενού [19]**

Κατασκευαστής	Μοντέλο	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Εσωτερική πίεση	Τύπος Πυρήνα	Τύπος Φακέλου
va-Q-tec	va-Q-vip	0.005 <sup>a</sup>	<5mbar	Καπνοπυριτία	Φύλλο αυξημένης στεγανότητας αερίων
	va-Q-plus	0.0035 <sup>a</sup>	<5mbar	80% καπνοπυριτία, αδιαφανοποιητές, οργανικές ίνες	
	va-Q-plus A	0.0035 <sup>a</sup>	<5mbar		
Panasonic USA	U-Vacua				
Neofas AG	Vakutherm	0.0045 <sup>c</sup> -0.008 <sup>b</sup>		Καπνοπυριτία	
Qingdao ThermoCor	Creek VIP VIP	0.0035 <sup>a</sup>	<0.001Pa	Υαλόνημα	MF
Caralon Global	CG Max-Thermic	0.0038 <sup>a</sup>	1mbar	Υαλοβάμβακας με βάση πυριτικές αλκαλικές γαίες	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
LG Hausys	VIP	0.004 <sup>a</sup>		Πλάκα από υαλόνημα	Πολυστρωματική μεμβράνη Al
Porextherm	Vacupor NT-B2-S	0.005 <sup>c</sup>	<5mbar	Καπνοπυριτία, αδιαφανοποιητές και	MF

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ EnergyPlus

	Vacupor RP-B2-S	0.005 <sup>c</sup>	<5mbar	ινώδη νήματα Καπνοπυριτία , αδιαφανοποιητές και ινώδη νήματα	Πολυστρωματικ ό AI
	Vacupor PS-B2-S	0.005 <sup>c</sup>	<5mbar	Καπνοπυριτία , αδιαφανοποιητές και ινώδη νήματα	Πολυστρωματικ ό AI
	Vacupor TS-B2-S	0.005 <sup>c</sup>	<5mbar	Καπνοπυριτία , αδιαφανοποιητές και ινώδη νήματα	Πολυστρωματικ ό AI + ηχομονωτική πλαστική πλάκα
	Vacusp e d	0.005 <sup>c</sup>	<5mbar	Καπνοπυριτία , αδιαφανοποιητές	Πολυστρωματικ ό AI
	Vacupor NT+B44	0.0043 <sup>c</sup>	<5mbar		
Dow Corning	VIP	0.00369 <sup>c</sup>		Καπνοπυριτία	MF
Microtherm	Slimvac	0.0042 <sup>c</sup>	<5mbar	Ενισχημένα νήματα από πυρίτιο και αδιαφανοποιητές	MF
Vaku- isotherm	Standard	0.005 <sup>c</sup>		Καπνοπυριτία ,αδιαφανοποιητές και ίνες κυτταρίνης	MF
	VakuVIP B2	0.005 <sup>c</sup>		Καπνοπυριτία ,αδιαφανοποιητές και ίνες κυτταρίνης	MF
Variotec	QASA	0.007 <sup>a</sup>	<7mbar	Καπνοπυριτία , αδιαφανοποιητές	
Suzhou VIP	VIP	0.008 <sup>a</sup>		Υαλόνημα	
Kingspan	OPTIM-R	0.007 <sup>b</sup>			
Nanopore insulation	VIP				

<sup>a</sup> Δε δίδονται συγκεκριμένες πληροφορίες

<sup>b</sup> Τιμές με βάση την ηλικία των VIP

<sup>c</sup> Αρχική τιμή





## 4 ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΠΕΡ-ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ταυτοχρόνως με τις μονωτικές σανίδες κενού, υπάρχουν και άλλα υλικά με εξίσου καλές θερμομονωτικές ιδιότητες τα οποία μελλοντικά θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην καλύτερη μόνωση των κτιρίων. Ορισμένα από τα υλικά αυτά, αναλύονται συνοπτικά στις ενότητες που ακολουθούν.

### 4.1 ΑΕΡΟΓΕΛΗ

Πρόκειται για ξηρά γέλη με πολύ μεγάλο πορώδες, χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα και χαμηλό δείκτη διάθλασης. Οι πόροι του υλικού καταλαμβάνουν το 85 έως το 99.8% του συνολικού όγκου της αερογέλης, με αποτέλεσμα η πυκνότητα της να είναι περίπου  $3\text{kg/m}^3$ , γεγονός που την καθιστά ένα από τα ελαφρύτερα στερεά υλικά. Για τις δομικές κατασκευές χρησιμοποιείται αερογέλη με πυκνότητα από 70 έως  $150\text{kg/m}^3$ . Σε πίεση περιβάλλοντος ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού φτάνει τα  $0.0135\text{W/mK}$  και μπορεί να μειωθεί επιπλέον στα  $0.004\text{W/mK}$  σε πίεση 50mbar [32].

Συνεπώς, σε πίεση περιβάλλοντος, η αερογέλη, έχει 2 έως 3 φορές χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά. Βασικό της πλεονέκτημα, συγκρινόμενη με τα VIP, είναι πως μπορεί να διαμορφωθεί και να προσαρμοστεί στις σχεδιαστικές ανάγκες του κτιρίου. Ωστόσο, είναι πολύ εύθραυστη αφού έχει πάρα πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυστικές τάσεις.

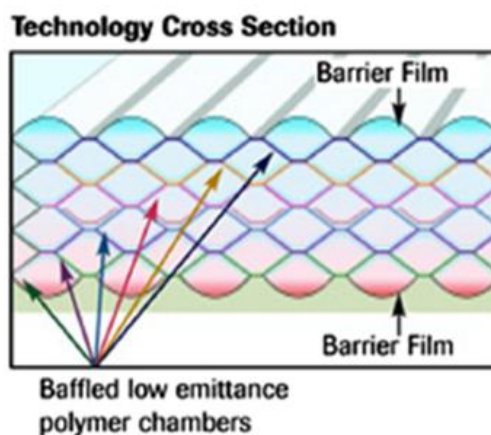
Αξιοσημείωτες είναι και οι οπτικές ιδιότητες της αερογέλης. Μπορεί να παραχθεί αδιαφανής αλλά και ημιδιαφανής και διαφανής (Εικόνα 4.1). Κατά αυτόν τον τρόπο, έχει αρκετά μεγάλο πεδίο εφαρμογής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παράθυρα, σε όψεις κτιρίων, σε οροφές αφήνοντας την ηλιακή ακτινοβολία και το φυσικό φως να την διαπεράσει [32].



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση ημιδιαφανούς/διαφανούς αερογέλης

## 4.2 ΣΑΝΙΔΕΣ ΑΕΡΙΟΥ

Στις μονωτικές σανίδες αερίου (Gas-filled panels –GFP), περιέχεται αέριο μεταξύ ανακλαστικών στρώσεων οι οποίες και είναι καλυμμένες με μια προστατευτική μεμβράνη χαμηλού συντελεστή εκπομπής. Οι ανακλαστικές στρώσεις εντός των GFPs καλούνται και διαφράγματα (Εικόνα 4.2). Το αέριο εντός των κυψέλων του πυρήνα, μπορεί να είναι αέρας ή οποιοδήποτε άλλο βαρύτερο αέριο το οποίο μπορεί να συμβάλει στη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας. Για μονωτικές σανίδες με αέριο αργό και ευγενές αέριο κρυπτό η θεωρητική τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι  $0.020\text{W/mK}$  και  $0.012\text{W/mK}$  αντιστοίχως. Ωστόσο στις μονωτικές σανίδες με αέριο αργό που έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα στις δομικές κατασκευές, συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι περίπου  $0.040\text{W/mK}$  [33].

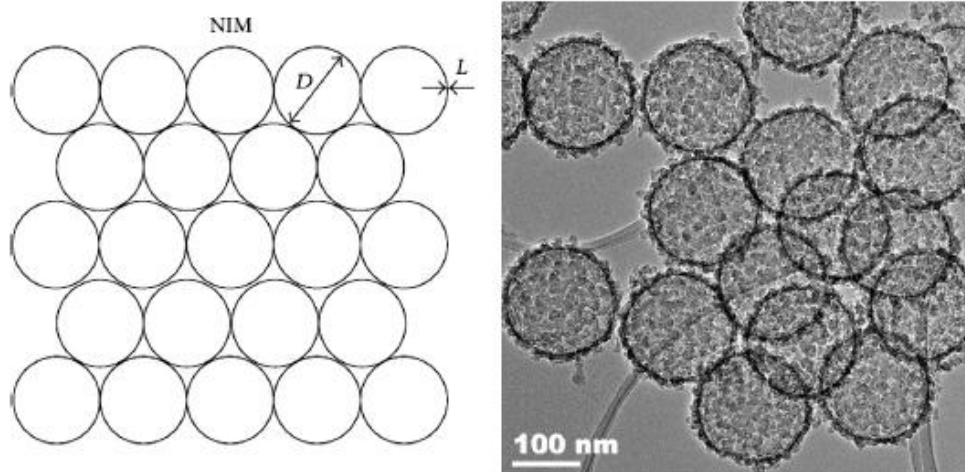


Εικόνα 4.2: Εγκάρσια τομή Μονωτικής Σανίδας Αερίου (GFP)

### 4.3 ΝΑΝΟ-ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα νάνο-μονωτικά υλικά (Nano insulation materials –NIM), είναι ομογενή υλικά που οφείλουν την καλή τους θερμομονωτική ικανότητα στην δομή τους από νανοκυψέλες. Μειώνοντας τους πόρους των υλικών αυτών, ώστε ο μεγαλύτερος σε μέγεθος πόρος να είναι μικρότερος από μέση ελεύθερη διαδρομή του αέρα εντός τους, επιτυγχάνεται μείωση στη θερμική αγωγιμότητα τους. Η τεχνολογία αυτή, μελετάται εργαστηριακά και μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί νανο-μονωτικά υλικά από κοίλα νανοσφαιρίδια πυριτίου (Εικόνα 4.3). Δείγματα σκόνης από τα σφαιρίδια αυτά, έχουν μετρηθεί εργαστηριακά, με κάποια όμως αβεβαιότητα, και έχει υπολογισθεί πως ο συντελεστής θερμικής τους αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 0.020-0.090W/mK [34].

ς



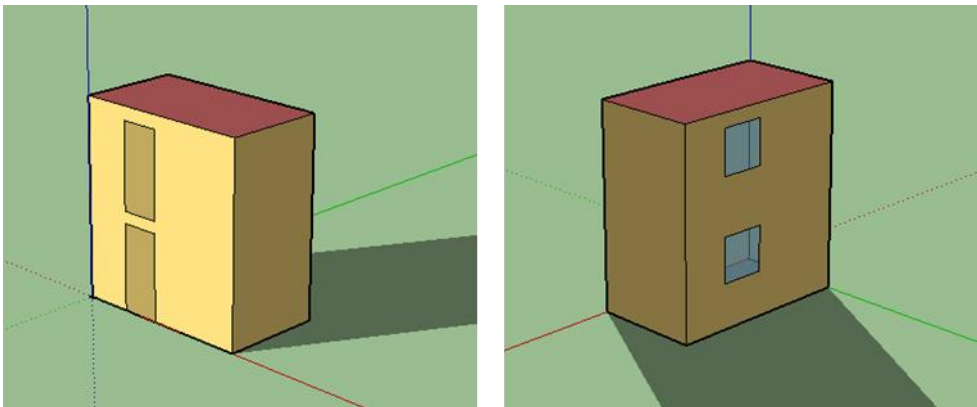
**Εικόνα 4.3: Σχηματικό μοντέλο νανό-μονωτικού υλικού με νανοσφαιρίδια(αριστερά), Φωτογραφία από μικροσκόπιο [34] (Δεξιά)**



## 5 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ VIP ΣΕ ΚΕΛΥΦΗ ΞΗΡΑΣ ΔΟΜΗΣΗΣ-ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

### 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το υποθετικό κτίριο στο οποίο μελετάται η ενσωμάτωση των μονωτικών σανίδων κενού, πρόκειται για κατοικία με ελαφρύ μεταλλικό σκελετό, αποτελούμενη από προκατασκευασμένες τοιχοποιίες ξηρής δόμησης με ιδιαίτερα βελτιωμένες θερμομονωτικές ιδιότητες. Έχει ορθογώνιο σχήμα με διαστάσεις,  $4.387m \times 2.417m \times 4.591m$  και αποτελείται από έναν ισόγειο χώρο με δώμα. Η Εικόνα 5.1 παρουσιάζει την πρόσοψη και την πίσω όψη του κτηρίου όπως αυτές σχεδιάστηκαν με το πρόγραμμα sketchup.



Εικόνα 5.1: Όψεις του υπό εξέταση κτηρίου

Στον Πίνακα 5.10 παραθέτονται τα μέρη του κελύφους του κτιρίου, ενώ αναφέρεται και η ονομασία τους όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη του.

Πίνακας 5.1 Ονομασία και συντομεύσεις τμημάτων του κελύφους του κτηρίου

Επιμέρους Τμήματα	Συντόμευση	Όνομα
Εξωτερικός Τοίχος	EW	AW001-AW002-AW003-AW004- AW101-AW102-AW103-AW104
Εσωτερικός Τοίχος	IW	-
Οροφή	RF	DA101
Δάπεδο Δώματος	CL	-
Δάπεδο	FL	B0001

Τα επιμέρους τμήματα, μαζί με τις φυσικές τους ιδιότητες, τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα οι τοιχοποιίες, το δάπεδο, η οροφή του κτηρίου αλλά και τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες δομικών υλικών και υλικών μόνωσης

Υλικό	Πάχος $d$ [mm]	Πυκνότητα $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Θερμική αγωγιμότητα $k$ [W/m/K]	Ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p$ [J/kg/K]
Τοιχοποιία-Δάπεδο-Οροφή				
Aquapanel Outdoor	12.5	1150	0.35	1000
Knauf Diamant	15	1033	0.27	990
Impact sound insulation	10	250	0.07	2100
GIFAfloor load panel	28	1500	0.44	
GIFA floor Klima	32	1500	0.38	
Μόνωση				
Mineral Wool FCB 035		23/50	0.035	850
VIP (va-Q-vip B/F)	20	195	0.007	800
Aerogel		100	0.018	1000
XPS			0.035	

Σε ότι αφορά τα ανοίγματα του κτιρίου, οι υαλοπίνακες είναι κατασκευασμένοι από τριπλή υάλωση, πάχους 4.6mm κάθε μια, με πλήρωση των ενδιάμεσων κενών από αέριο αργό, το οποίο και έχει περίπου 34% μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από αυτή του αέρα.

### 5.1.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Η αναλυτική κατασκευαστική δομή των τοιχοποιιών του κτηρίου, ξεκινώντας από την εξωτερική πλευρά του κελύφους παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.3

Πίνακας 5.3: Κατασκευαστική δομή τοιχοποιών κτηρίου

<b>Τοίχοι AW001/101-002/102-003/103-004/104</b>	
<b>Υλικά</b>	<b>Πάχος (mm)</b>
Εξωτερική επιφάνεια	
Aquapanel Outdoor	12.0
Air Cavity	26.0
Knauf Diamant	15.0
Mineral Wool	150.0
Knauf Diamant	15.0
VIP	20.0
Mineral Wool	50.0
Knauf Diamant	30.0
Εσωτερική επιφάνεια	

### 5.1.2 ΔΑΠΕΔΟ

Τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένο και μονωμένο το δάπεδο του κτηρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4

Πίνακας 5.4: Κατασκευαστική δομή δαπέδου

<b>BO001</b>	
<b>Υλικά</b>	<b>Πάχος (mm)</b>
Πλάκα Τσιμέντου	
Knauf Diamant	15.0
Mineral Wool	200.0
GIFA floor load panel	28.0
Impact sound insulation	20.0
GIFA floor Klima	32.0
Floor covering	15.0
Εσωτερική επιφάνεια	



### 5.1.3 ΟΡΟΦΗ

Στο Πίνακα 5.5 αποτυπώνεται η σειρά των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη η οροφή του κτηρίου.

Πίνακας 5.5: Κατασκευαστική δομή οροφής

DA101	
Υλικά	Πάχος (mm)
Εξωτερική πλευρά	
Roof Sealing Film	6.0
GIFA floor load panel	28.0
Mineral Wool	200.0
Knauf Diamant	15.0
Mineral Wool	28.0
Knauf Diamant	25.0
Εσωτερική Πλευρά	

### 5.1.4 ΔΑΠΕΔΟ ΔΩΜΑΤΟΣ

Η κατασκευαστική δομή του δαπέδου του δώματος δίνεται στον Πίνακα 5.6

Πίνακας 5.6: Κατασκευαστική δομή δαπέδου δώματος

CL	
Υλικά	Πάχος (mm)
Εξωτερική πλευρά	
Floor Covering	15.0
GIFAFloor Klima	32.0
Impact sound insulation	20.0
GIFAFloor load panel	28.0
Mineral Wool	180.0
Knauf Diamant	15.0
Resilient channe	27.0
Knauf Diamant I	15.0
Εσωτερική Πλευρά	

### 5.1.5 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

Η κατασκευαστική δομή της εσωτερικής τοιχοποιίας του κτιρίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.7

Πίνακας 5.7: Κατασκευαστική δομή της εσωτερικής τοιχοποιίας

IW	
Υλικά	Πάχος (mm)
Εξωτερική πλευρά	
Knauf Diamant	30.0
Mineral Wool	120.0
Knauf Diamant	30.0
Εσωτερική Πλευρά	

## 5.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

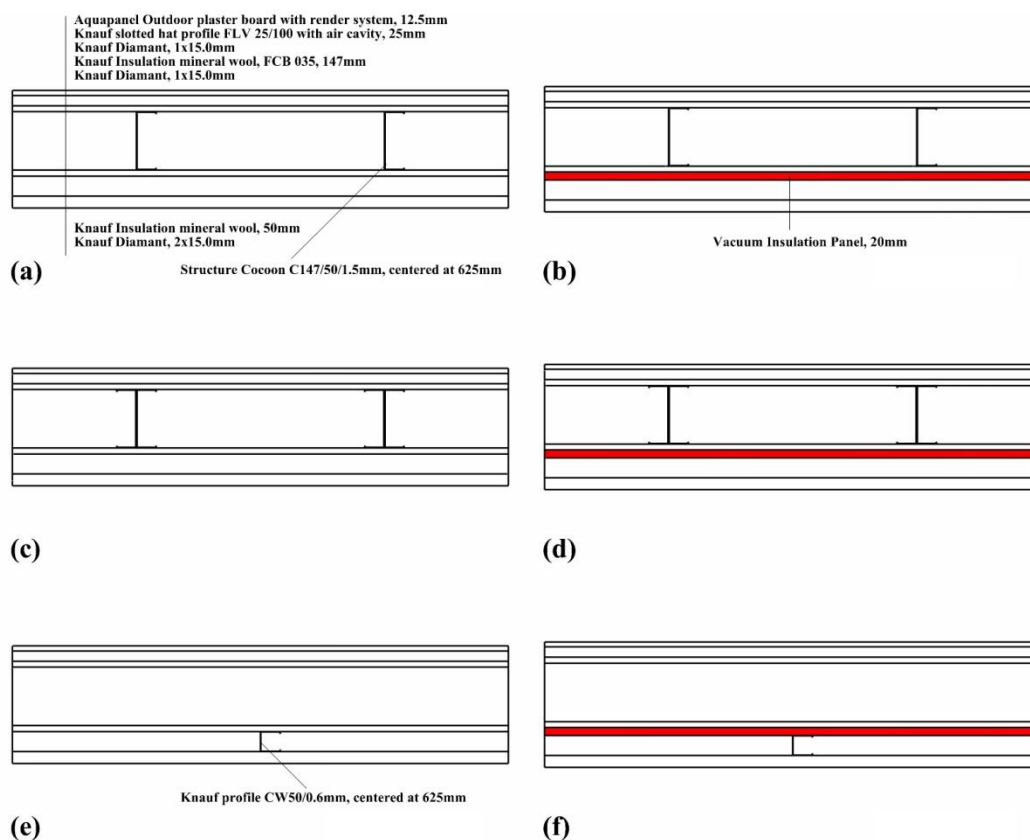
Προκειμένου να γίνει ενεργειακή ανάλυση στο κέλυφος του κτιρίου, έπρεπε αρχικά, να εντοπισθούν και να υπολογισθούν οι όποιες θερμογέφυρες παρουσιάζονται σε αυτό. Γενικά, ο τρόπος εύρεσης των θερμογεφυρών σε ένα κτίριο, αναλύεται στις παρακάτω ενότητες και βασίζεται στη μεθοδολογία η οποία και προτείνεται από τα διεθνή πρότυπα ISO 10211:2007 [EN ISO, 2007].

Ακολουθώντας την μεθοδολογία που αναλύθηκε στην ενότητα 2.4, εντοπίστηκαν και προσδιορίστηκαν οι θερμογέφυρες όπου αυτές εμφανίζονται στο κτίριο. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η επίδραση τους στο κέλυφος του, έγιναν υπολογισμοί της θερμοπερατότητας της κάθε προκατασκευασμένης τοιχοποιίας, του δαπέδου και της οροφή του σπιτιού, αρχικά χωρίς να ληφθούν υπόψη οι μεταλλικοί ορθοστάτες, στη συνέχεια λαμβάνοντας τους υπόψη, ενώ παρόμοιοι υπολογισμοί έγιναν με και χωρίς ενσωμάτωση των VIP στη μόνωση του κελύφους. Στις επόμενες ενότητες, παρουσιάζονται τα σημεία των θερμογεφυρών ενώ γίνεται και η αναλυτική περιγραφή τους.

### 5.2.1 ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ

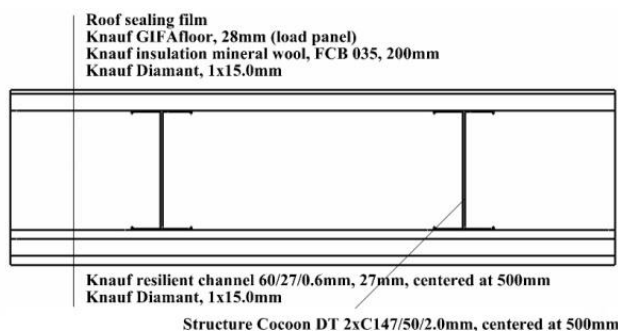
Οι κυριότερες επαναλαμβανόμενες γραμμικές θερμογέφυρες που επηρεάζουν σημαντικά τη θερμική απόδοση του κελύφους εντοπίζονται στις περιοχές σύνδεσης των επίπεδων δομικών στρώσεων της κάθε τοιχοποιίας με τους επαναλαμβανόμενους μεταλλικούς ορθοστάτες. Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η τομή της τοιχοποιίας

όπου και διακρίνονται οι διαφορετικού τύπου μεταλλικοί ορθοστάτες που βρίσκονται μέσα σε αυτήν.



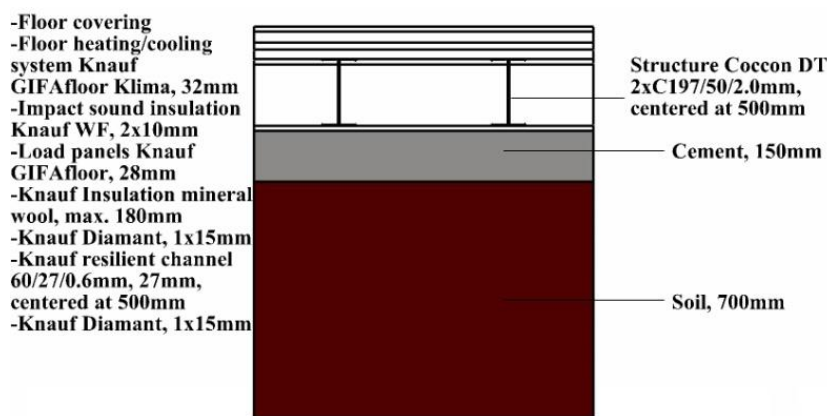
**Εικόνα 5.2: Τομή Τοιχοποιίας a) Με μεταλλικούς ορθοστάτες τύπου C χωρίς VIP b) Με μεταλλικούς ορθοστάτες τύπου C με VIP c) Με μεταλλικούς ορθοστάτες τύπου I χωρίς VIP d) Με μεταλλικούς ορθοστάτες τύπου I με VIP e) Με μεταλλικούς ορθοστάτες τύπου CW χωρίς VIP f) Με μεταλλικούς ορθοστάτες τύπου CW με VIP [12].**

Στην Εικόνα 5.3 φαίνεται σχηματικά η τομή της οροφής του κτηρίου, με τους μεταλλικούς ορθοστάτες που συγκρατούν της δομικές στρώσεις από τις οποίες και αποτελείται.



**Εικόνα 5.3 Τομή οροφής [12]**

Στην Εικόνα 5.4 διακρίνονται οι στρώσεις των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένο το δάπεδο του κτηρίου καθώς επίσης και οι μεταλλικοί ορθοστάτες τύπου I που τις συγκρατούν.



Εικόνα 5.4: Τομή δαπέδου[12]

## 5.2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ

Στην ενότητα αυτή, εντοπίζονται και παρουσιάζονται σχηματικά, τα σημεία συνένωσης δυο δομικών στοιχείων του κτηρίου όπου εμφανίζονται γεωμετρικές γραμμικές θερμογέφυρες. Μελέτη των θερμογεφυρών αυτών γίνεται με και χωρίς την τοποθέτηση VIPs στη μόνωση. Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται τα σημεία σύζευξης δομικών στοιχείων του κτηρίου στα οποία εντοπίζονται οι γραμμικές θερμογέφυρες.

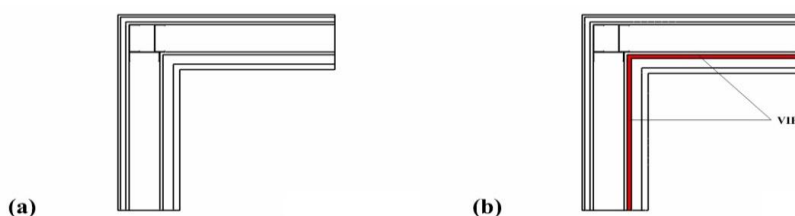
Πίνακας 5.8: Σημεία σύζευξης δομικών στοιχείων του κτηρίου που εντοπίζονται γραμμικές θερμογέφυρες (Two dimensional junctions-2D)

Δομικά Στοιχεία	Συμβολισμός	Περιπτώσεις μελέτης
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– Δάπεδο	EW–FL	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP
		Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP
		Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP

Με ορθοστάτες – Με VIP

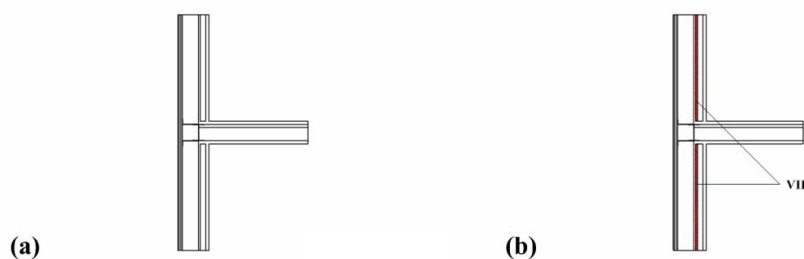
Εξωτερικός Τοίχος– Δάπεδο Δώματος	EW –CL	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP
Εξωτερικός Τοίχος– Οροφή	EW–RF	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP
Εσωτερικός Τοίχος– Δάπεδο	IW–FL	Χωρίς ορθοστάτες Με ορθοστάτες
Εσωτερικός Τοίχος– Δάπεδο Δώματος	IW–CL	Δεν διαχωρίζονται θερμικές ζώνες
Εσωτερικός Τοίχος– Οροφή	IW–RF	Χωρίς ορθοστάτες Με ορθοστάτες

Στην Εικόνα 5.5 φαίνεται η σύζευξη μεταξύ των εξωτερικών τοίχων του κτηρίου, όπου και εμφανίζεται θερμογέφυρα.



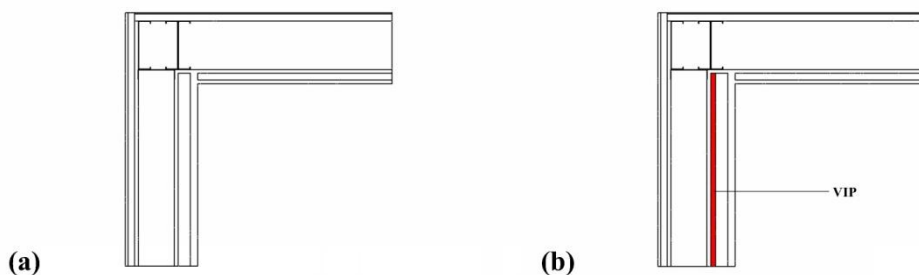
Εικόνα 5.5: Σύζευξη Εξωτερικής–Εξωτερικής Τοιχοποιίας a) Χωρίς VIP b) Με VIP (κόκκινη γραμμή) [12]

Γεωμετρική γραμμική θερμογέφυρα παρουσιάζεται και στο σημείο ένωσης της εξωτερικής τοιχοποιίας με τους εσωτερικούς τοίχους του κτηρίου(Εικόνα 5.6).



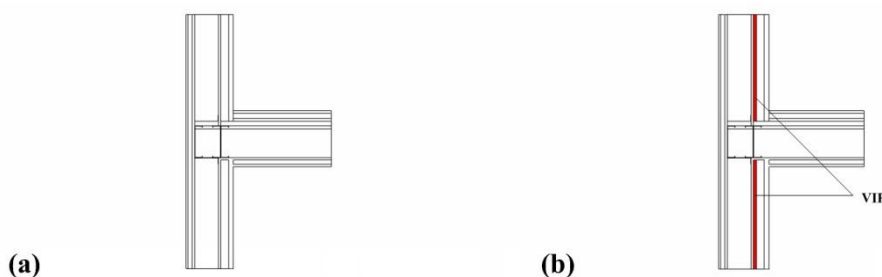
Εικόνα 5.6: Σύζευξη Εξωτερικής–Εσωτερικής Τοιχοποιίας a) Χωρίς VIP b) Με VIP (κόκκινη γραμμή) [12]

Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζεται το σημείο σύζευξης του εξωτερικού τοίχου με την οροφή όπου και υπάρχει θερμογέφυρα.



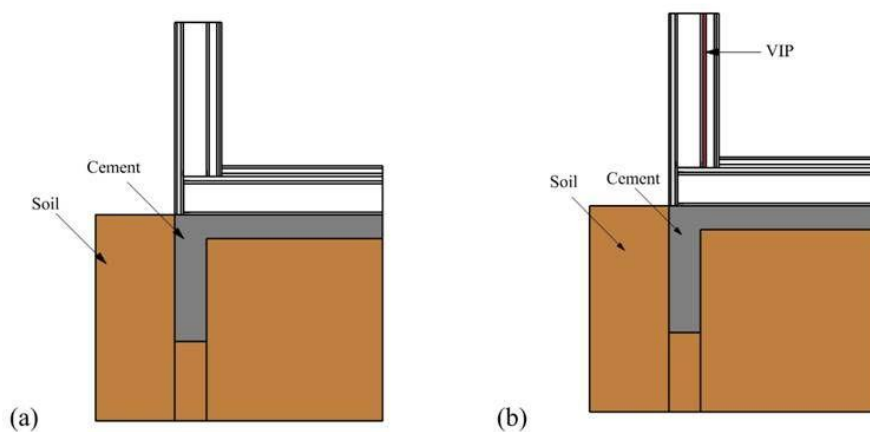
**Εικόνα 5.7: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Οροφής a) Χωρίς VIP b) Με VIP (κόκκινη γραμμή ) [12]**

Στο σημείο που ενώνεται η εξωτερική τοιχοποιία με το δάπεδο του δώματος, εμφανίζεται επίσης γεωμετρική γραμμική θερμογέφυρα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8.



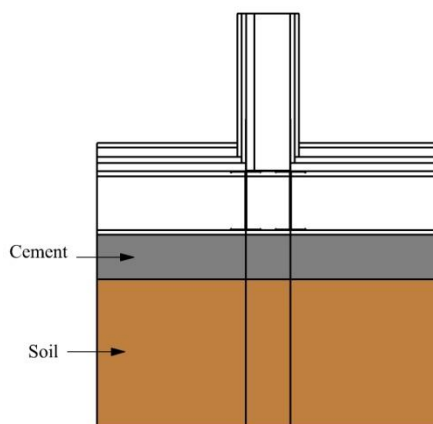
**Εικόνα 5.8: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Δάπεδο Δώματος a) Χωρίς VIP b) Με VIP (κόκκινη γραμμή ) [12]**

Στην Εικόνα 5.9 διακρίνεται το σημείο στο οποίο ενώνεται η εξωτερική τοιχοποιία με το δάπεδο όπου και εμφανίζεται επίσης γεωμετρική γραμμική θερμογέφυρα.



**Εικόνα 5.9: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Δαπέδου a) Χωρίς VIP b) Με VIP (κόκκινη γραμμή ) [12]**

Τέλος, γεωμετρική γραμμική θερμογέφυρα εμφανίζεται και στα σημεία στα οποία ενώνεται ο εσωτερικός τοίχος του κτηρίου με το δάπεδο του (Εικόνα 5.10).



Εικόνα 5.10: Σύζευξη Εσωτερικής Τοιχοποιίας- Δαπέδου [12]

### 5.2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ

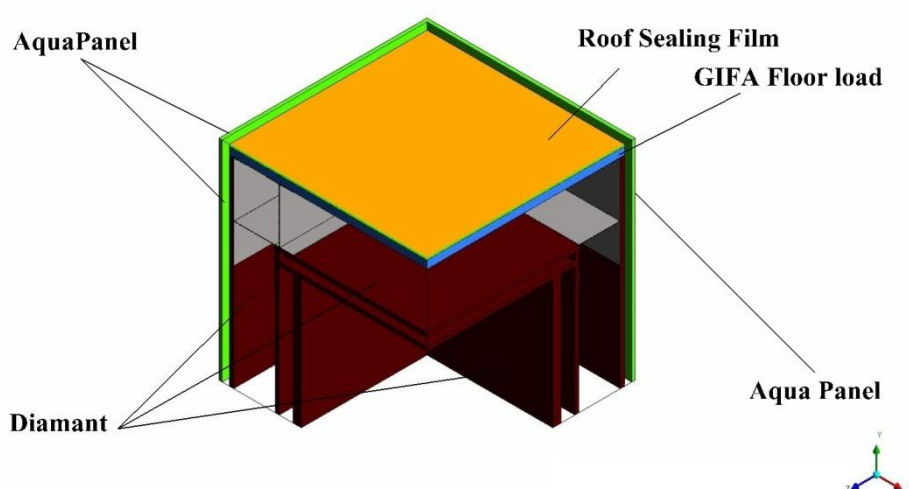
Στην ενότητα αυτή, εντοπίζονται και παρουσιάζονται σχηματικά, τα σημεία συνένωσης τριών δομικών στοιχείων του υπό εξέταση κτηρίου όπου και εμφανίζονται γεωμετρικές σημειακές θερμογέφυρες (Πίνακας 5.9). Η μελέτη των θερμογεφυρών αυτών γίνεται, όπως και προηγουμένως, με και χωρίς την προσθήκη VIP στη μόνωση.

Πίνακας 5.9: Σημεία σύζευξης δομικών στοιχείων του υπό εξέταση κτηρίου που εντοπίζονται γεωμετρικές σημειακές θερμογέφυρες (Three dimensional junctions-3D)

Δομικά Στοιχεία	Συμβολισμός	Περιπτώσεις μελέτης
Εξωτερικός Τοίχος – Εξωτερικός Τοίχος – Οροφή	EW – EW – RF	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP
Εξωτερικός Τοίχος – Εξωτερικός Τοίχος – Δάπεδο Δώματος	EW – EW – CL	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP

Εξωτερικός Τοίχος – Εξωτερικός Τοίχος – Δάπεδο	EW – EW – FL	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP
Εξωτερικός Τοίχος – Εσωτερικός Τοίχος – Οροφή	EW – IW – RF	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP
Εξωτερικός Τοίχος – Εσωτερικός Τοίχος – Δάπεδο Δώματος	EW – IW – CL	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP
Εξωτερικός Τοίχος – Εσωτερικός Τοίχος – Δάπεδο	EW – IW – FL	Χωρίς ορθοστάτες – Χωρίς VIP Με ορθοστάτες – Χωρίς VIP Χωρίς ορθοστάτες – Με VIP Με ορθοστάτες – Με VIP

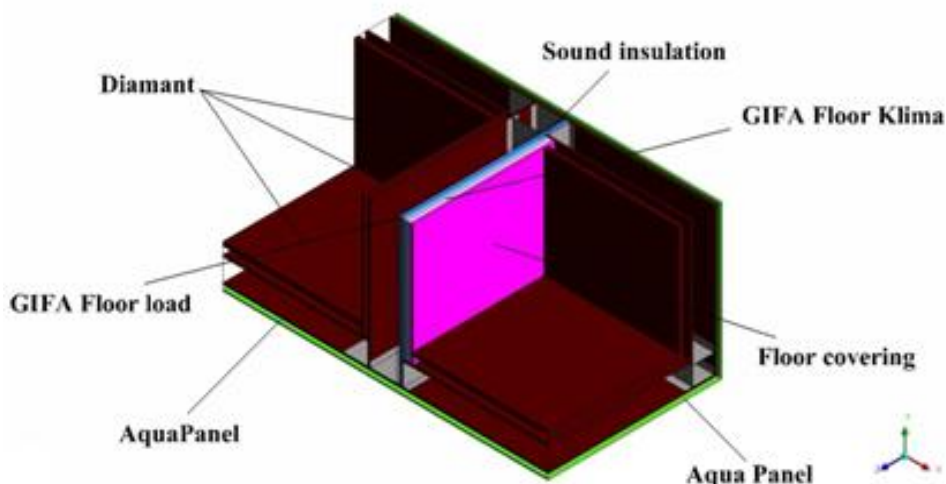
Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η ένωση των εξωτερικών τοιχοποιιών με την οροφή του κτηρίου όπου και εμφανίζεται γεωμετρική σημειακή θερμογέφυρα.



Εικόνα 5.11: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Εξωτερικής Τοιχοποιίας- Οροφής [12]

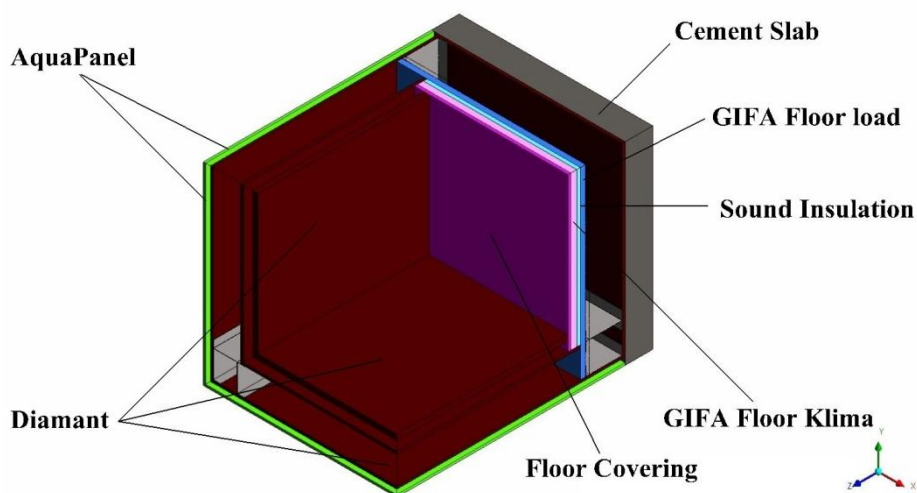


Στην Εικόνα 5.12 φαίνεται η σύζευξη των εξωτερικών τοίχων με το δάπεδο του δώματος, σημείο στο οποίο παρουσιάζεται επίσης σημειακή θερμογέφυρα.



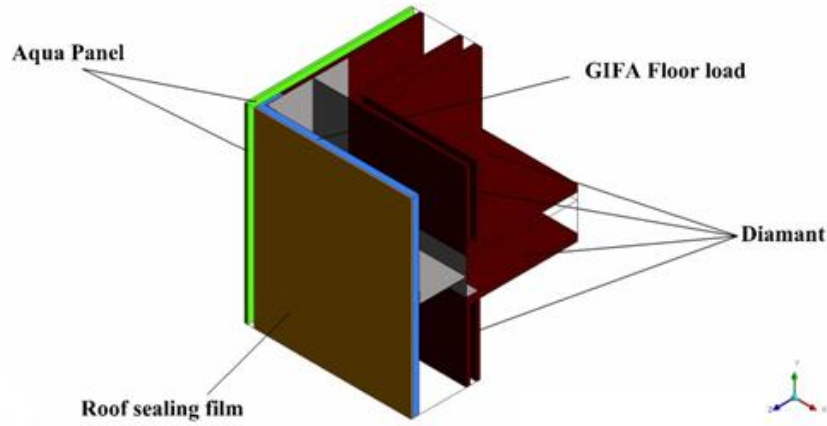
Εικόνα 5.12: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Δαπέδου Δώματος [12]

Στο σημείο σύζευξης των εξωτερικών τοίχων με το δάπεδο του κτηρίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.13 εμφανίζεται σημειακή θερμογέφυρα.

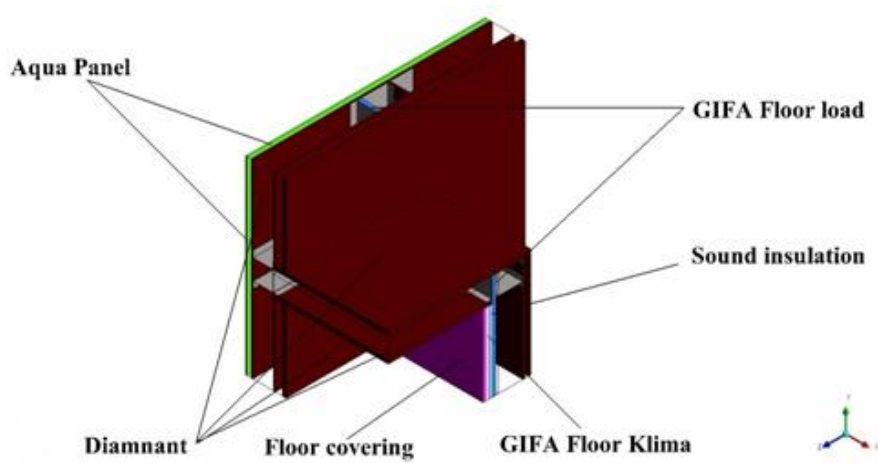


Εικόνα 5.13: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Δαπέδου [12]

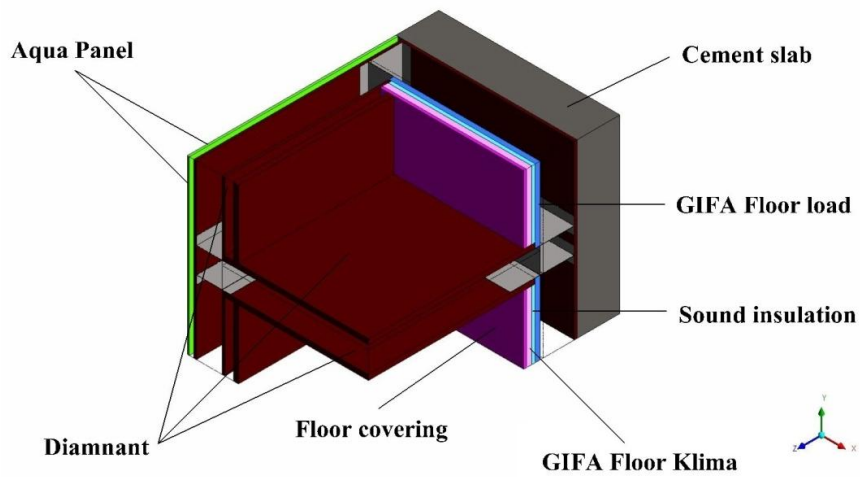
Γεωμετρική σημειακή θερμογέφυρα, παρουσιάζεται επίσης στο σημείο ένωσης του εξωτερικού τοίχου με τον εσωτερικό και την οροφή (Εικόνα 5.14), το δάπεδο του δώματος (Εικόνα 5.15) και το δάπεδο του κτηρίου (Εικόνα 5.16).



Εικόνα 5.14: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Εσωτερικής Τοιχοποιίας– Οροφής [12]



Εικόνα 5.15: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Εσωτερικής Τοιχοποιίας–Δαπέδου Δώματος [12]



Εικόνα 5.16: Σύζευξη Εξωτερικής Τοιχοποιίας– Εσωτερικής Τοιχοποιίας– Δαπέδου [12]

## 5.2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (U-VALUE) ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Γνωρίζοντας το συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας  $\Psi$  των μεταλλικών ορθοστατών, των γραμμικών θερμογεφυρών και τον συντελεστή θερμοπερατότητας  $X$  των σημειακών θερμογεφυρών, από την εξίσωση 2.14, του κεφαλαίου 2.4, υπολογίζουμε το συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$  κάθε δομικού στοιχείου του κτιρίου.

Έτσι, ο ισοδύναμος συντελεστής U-value, εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U_{eff} = U_{clear} + U_{studs} + U_{2Djunctions} + U_{3Djunctions} \quad 5.1$$

Όπου,  $U_{clear}$  είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας για το εκάστοτε δομικό στοιχείο (τοίχος- δάπεδο- οροφή), χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση των μεταλλικών ορθοστατών, των γεωμετρικών και γραμμικών θερμογεφυρών παρά μόνο τις επιμέρους στρώσεις υλικών από τις οποίες είναι κατασκευασμένο (Πίνακας 5.3, Πίνακας 5.4, Πίνακας 5.5, Πίνακας 5.6). Με  $U_{studs}$  συμβολίζουμε το συντελεστή θερμοπερατότητας που υπολογίζεται συμπεριλαμβάνοντας τις θερμογέφυρες που δημιουργούνται εξαιτίας των μεταλλικών ορθοστατών και με  $U_{junctions}$  το συντελεστή θερμοπερατότητας λόγω των των γεωμετρικών και γραμμικών θερμογεφυρών.

Ειδικότερα :

$$U_{studs} = \frac{(\Psi L N)_{c-studs} + (\Psi L N)_{i-studs} + (\Psi L N)_{cw-studs}}{A} \quad 5.2$$

$$U_{2Djunctions} = \left(\frac{\Psi L}{A}\right)_{EW-EW} + \left(\frac{\Psi L}{2A}\right)_{EW-RF} + \left(\frac{\Psi L}{2A}\right)_{EW-FL} + \left(\frac{\Psi L}{A}\right)_{EW-CL} + \left(\frac{\Psi L}{A}\right)_{EW-IW} + \left(\frac{\Psi L}{A}\right)_{WD} \quad 5.3$$

$$U_{3Djunctions} = 2\left(\frac{X}{3A}\right)_{EW-EW-FL} + 2\left(\frac{X}{2A}\right)_{EW-EW-CL} + 2\left(\frac{X}{3A}\right)_{EW-EW-RF} + \left(\frac{X}{2A}\right)_{EW-IW-FL} + \left(\frac{X}{A}\right)_{EW-IW-CL} + \left(\frac{X}{2A}\right)_{EW-IW-I} \quad 4$$

Όπου :

$\Psi$ – ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας ( $W/m^2K$ )

$\chi$ - Ο σημειακός σημειακής θερμοπερατότητας ( $W/m^2K$ )

$L$  – Το μήκος της κάθε θερμογέφυρας (m)

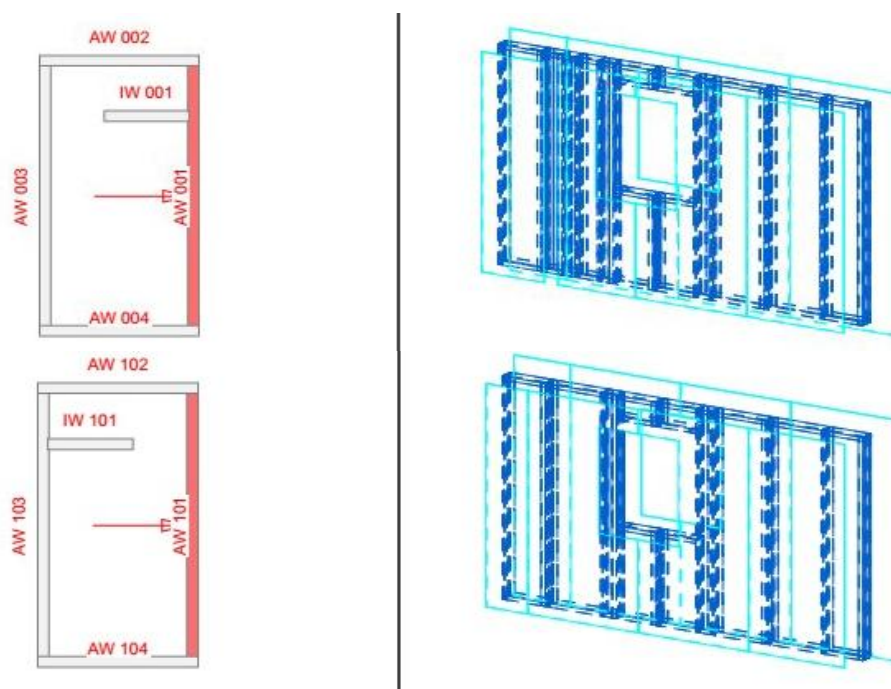
$A$ – Το εμβαδόν της υπό εξέταση επιφάνειας του κελύφους ( $m^2$ )

Να σημειωθεί πως για τις παραπάνω σχέσεις, έχουμε λάβει υπόψη, πως οι εσωτερικοί τοίχοι του κτιρίου, όπως και το δάπεδο του δώματος, δεν διαχωρίζουν διαφορετικές θερμικές ζώνες.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι επιφάνειες του κτιρίου με τους μεταλλικούς ορθοστάτες που βρίσκονται εντός αυτών ενώ ακολουθούν οι πίνακες με τους υπολογισμένους συντελεστές θερμοπερατότητας των επιφανειών του κτιρίου για τις περιπτώσεις όπως αναφέρονται στον Πίνακα 5.8 και Πίνακα 5.9.

#### 5.2.4.1 Τοιχοποιία AW001/101

Στην Εικόνα 5.17 παρουσιάζεται ο τοίχος που αποτελεί την πίσω όψη του κτηρίου. Επίσης διακρίνονται οι μεταλλικοί ορθοστάτες που βρίσκονται σε αυτόν.

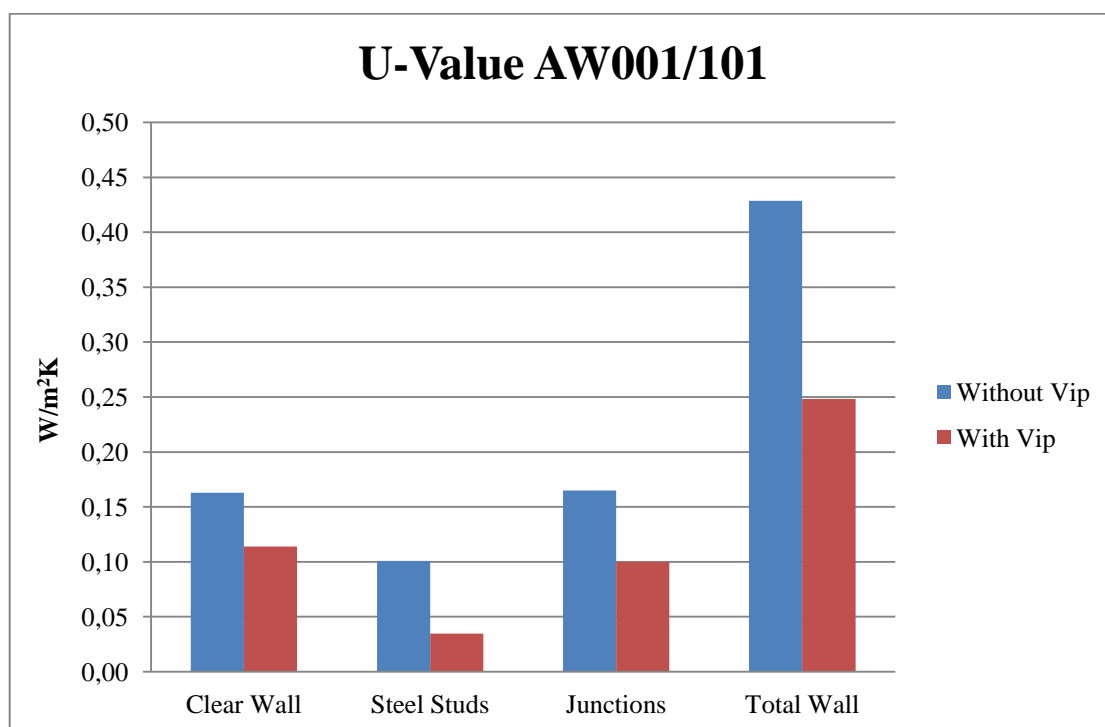


Εικόνα 5.17: Τοίχος AW001/101 (πίσω όψη κτιρίου) [12]

Οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας για την τοιχοποιία AW001/101, όπως αυτές προέκυψαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10 και σχηματικά στην Εικόνα 5.18.

**Πίνακας 5.10:** Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας τοίχου AW001/101, για κάθε μια από τις υπό εξέταση περιπτώσεις

Wall Assembly AW001/101					
U-value		No VIP		VIP	
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.163		0.114	
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.101		0.035	
		With Studs	Without Studs	With Studs	Without Studs
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.165	0.045	0.1	0.033
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.429	0.208	0.248	0.147

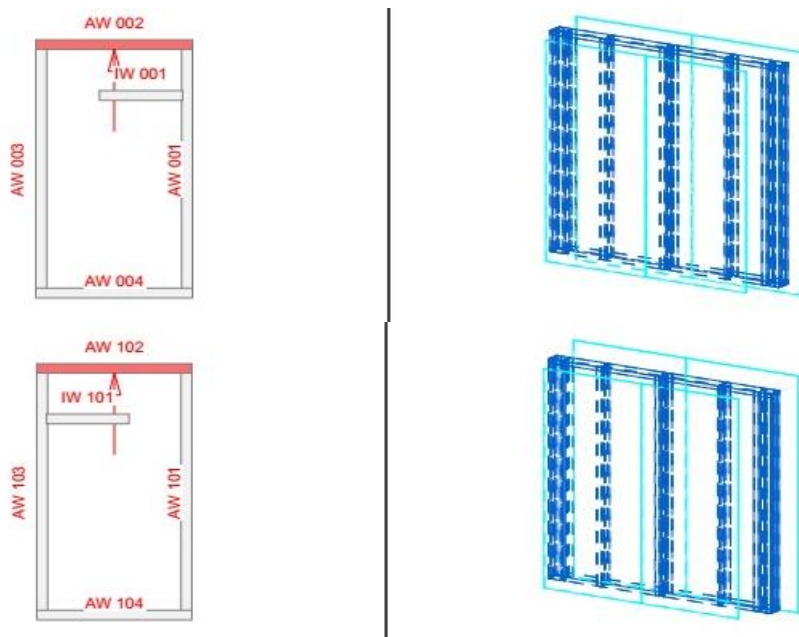


**Εικόνα 5.18:** Απεικόνιση του συντελεστή U-value τοίχου AW001/101, για τις υπό μελέτη περιπτώσεις

Από τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας, παρατηρούμε το θετικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μονωτικών VIP στη τοιχοποιία. Συγκεκριμένα, το συνολικό U-value στον τοίχο χωρίς VIP είναι 0.429W/m<sup>2</sup>K ενώ με VIP μειώνεται σε 0.248W/m<sup>2</sup>K, μια διαφορά της τάξης του 42.19%.

### 5.2.4.2 Τοιχοποιία AW002/102

Στην Εικόνα 5.19 παρουσιάζεται ο τοίχος που αποτελεί την πλάγια όψη του κτηρίου. Στη τοιχοποιία αυτή δεν υπάρχουν ανοίγματα.

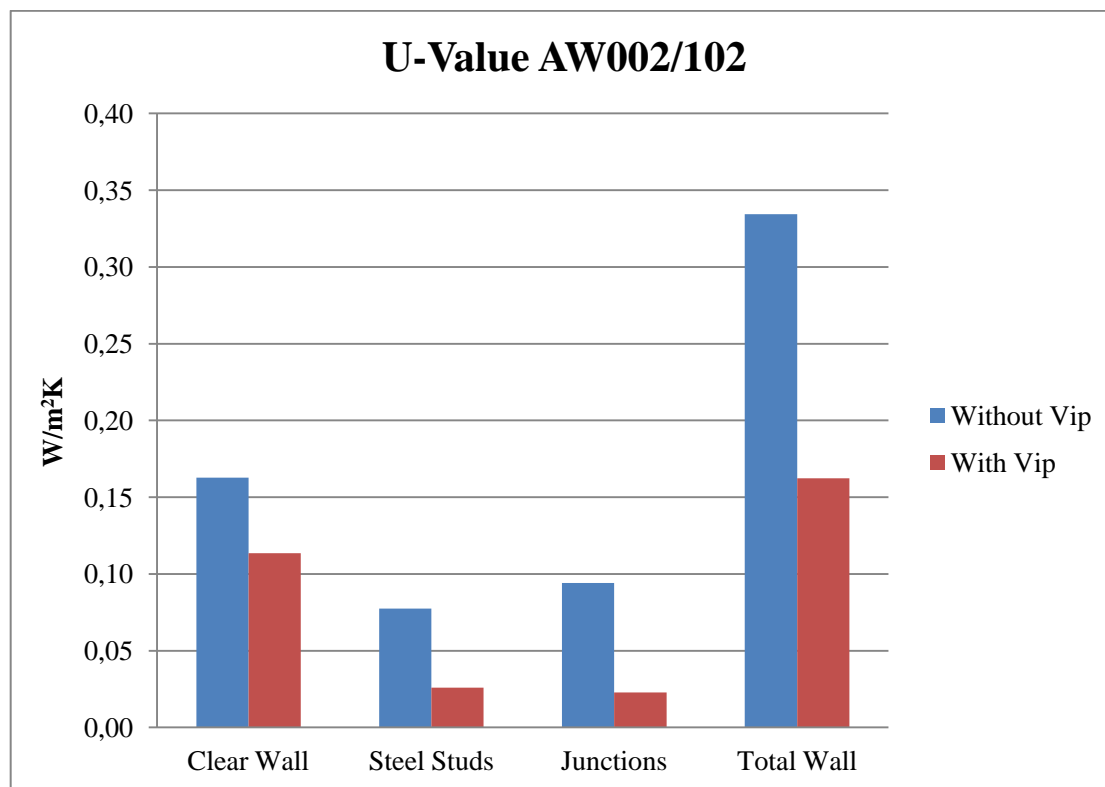


Εικόνα 5.19: Τοίχος AW002/102 ( πλάγια όψη κτιρίου) [12]

Οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας για την τοιχοποιία AW002/102 ,όπως αυτές προέκυψαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11 και σχηματικά στην Εικόνα 5.20.

Πίνακας 5.11: Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας τοίχου AW002/102, για κάθε μια από τις υπό εξέταση περιπτώσεις

Wall Assembly AW002/102					
U-value		No VIP		VIP	
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.163		0.113	
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.077		0.026	
		With Studs	Without Studs	With Studs	Without Studs
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.094	-0.009	0.023	-0.027
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.334	0.154	0.162	0.086



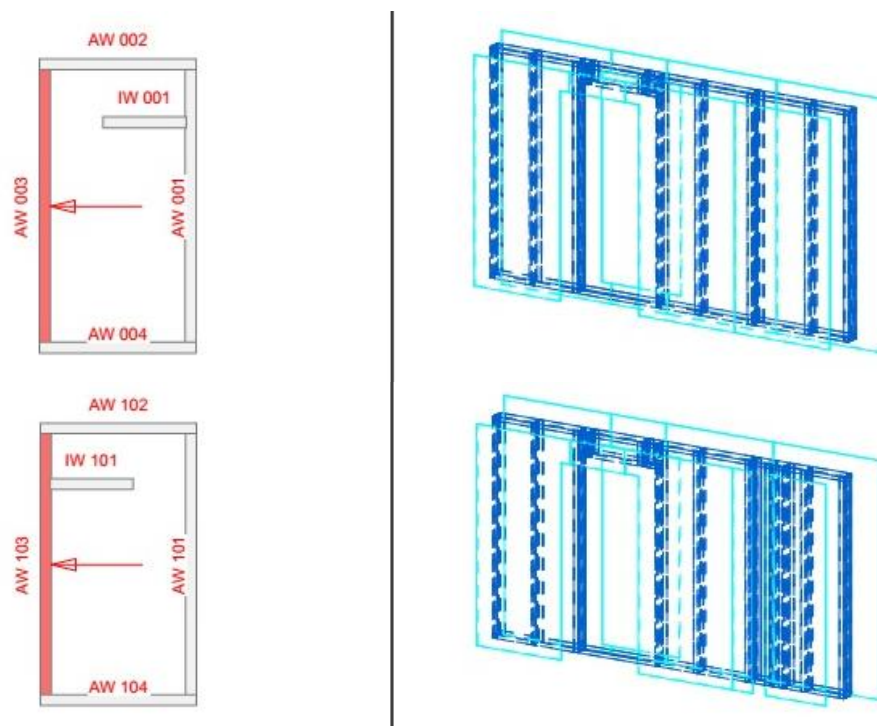
Εικόνα 5.20: Απεικόνιση του συντελεστή U-value τοίχου AW002/102, για τις υπό μελέτη περιπτώσεις

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του τοίχου για τη περίπτωση χωρίς μόνωση με VIP είναι  $0.334\text{W/m}^2\text{K}$  ενώ με την εφαρμογή τους μειώνεται σε  $0.162\text{W/m}^2\text{K}$ . Η διαφορά αυτή μεταφράζεται σε ένα ποσοστό της τάξης του 51.50%.

#### 5.2.4.3 Τοιχοποιία AW003/103

Στην Εικόνα 5.21 παρουσιάζεται η πρόσοψη του κτηρίου που αποτελείται από την τον τοίχο AW003/103. Διακρίνονται τα ανοίγματα της τοιχοποιίας καθώς και οι μεταλλικοί ορθοστάτες που συγκρατούν τις στρώσεις των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη.

Οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας για την τοιχοποιία AW003/103 ,όπως αυτές προέκυψαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.12 και σχηματικά στην Εικόνα 5.22



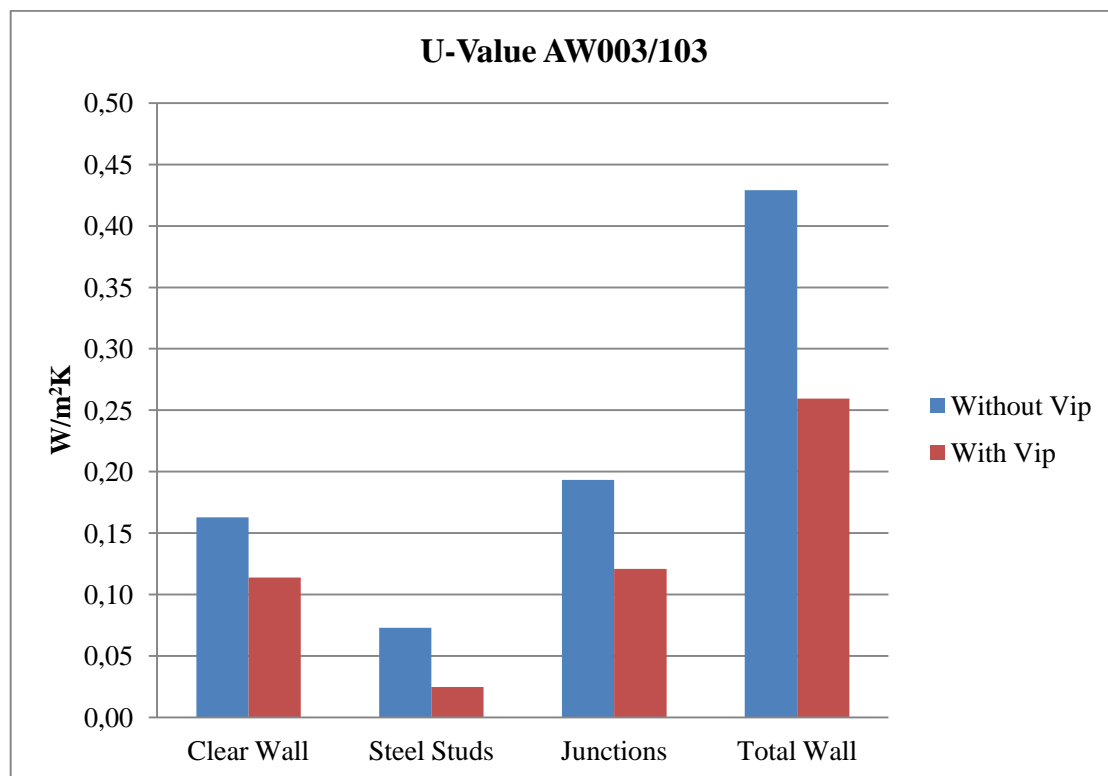
Εικόνα 5.21: Τοίχος AW003/103 (πρόσοψη κτιρίου) [12]

Πίνακας 5.12: Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας τοίχου AW003/103 για κάθε μια από τις υπό εξέταση περιπτώσεις

Wall Assembly AW003/103					
U-value		No VIP		VIP	
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.163		0.114	
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.073		0.025	
		With Studs	Without Studs	With Studs	Without Studs
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.193	0.072	0.121	0.057
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.429	0.235	0.259	0.171

Το συνολικό U-value στον τοίχο χωρίς VIP είναι 0.429W/m<sup>2</sup>K ενώ όταν τοποθετηθούν οι μονωτικές αυτές σανίδες, φτάνει τα 0.259W/m<sup>2</sup>K. Η διαφορά εξαιτίας των θερμομονωτικών ιδιοτήτων που προσφέρουν τα VIP είναι 39.62%.

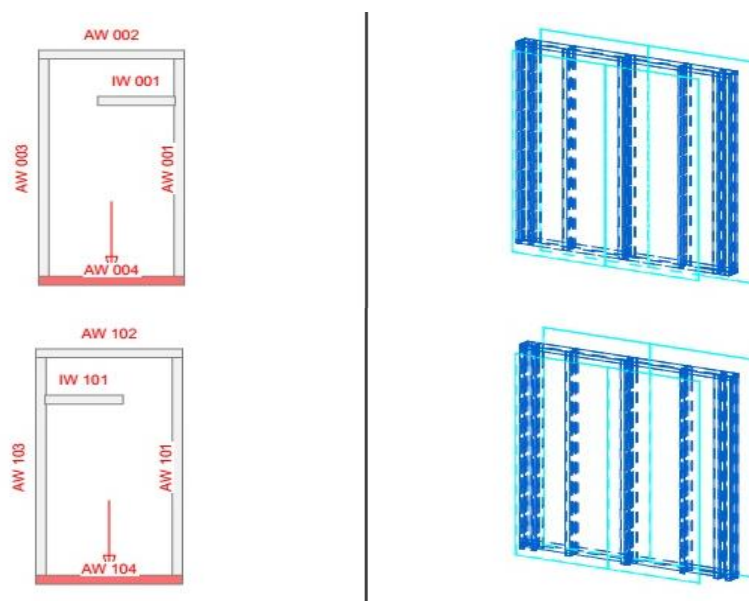




Εικόνα 5.22: Απεικόνιση του συντελεστή U-value τοίχου AW003/103 για τις υπό μελέτη περιπτώσεις

#### 5.2.4.4 Τοιχοποιία AW004/104

Στην Εικόνα 5.23 παρουσιάζετε ο τοίχος AW004/104 ο οποίος είναι κατασκευασμένος όπως και ο AW002/102.

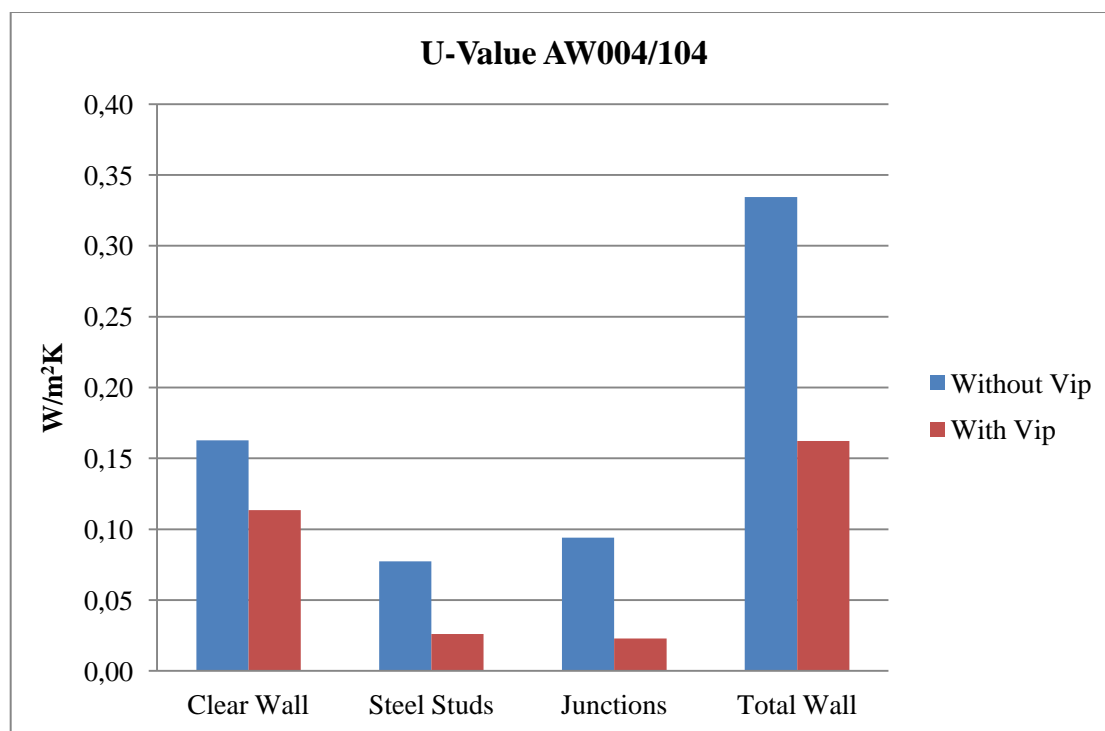


Εικόνα 5.23: Τοίχος AW004/104 (πλάγια όψη κτιρίου) [12]

Οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας για την τοιχοποιία AW004/104 ,όπως αυτές προέκυψαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13 και σχηματικά στην Εικόνα 5.24.

**Πίνακας 5.13: Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας τοίχου AW004/104, για κάθε μια από τις υπό εξέταση περιπτώσεις**

Wall Assembly AW004/104					
U-value		No VIP		VIP	
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.163		0.113	
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.077		0.026	
		With Studs	Without Studs	With Studs	Without Studs
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.094	-0.003	0.023	-0.027
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.429	0.235	0.259	0.171

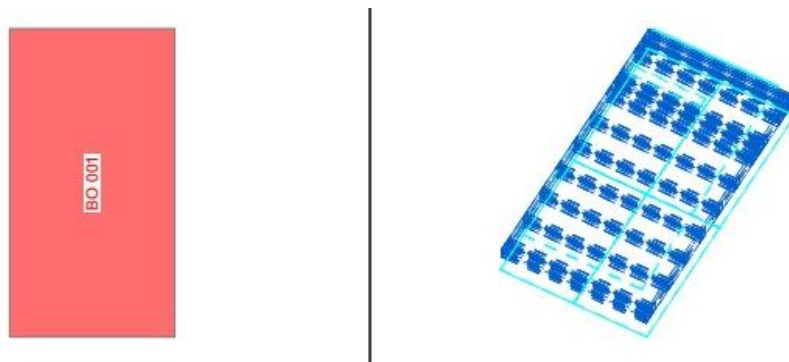


**Εικόνα 5.24: Απεικόνιση του συντελεστή U-value τοίχου AW004/104, για τις υπό μελέτη περιπτώσεις**

Παρατηρούμε πως το συνολικό U-value της τοιχοποιίας στη περίπτωση που τοποθετηθούν μονωτικά VIP, μειώνεται από 0.334 σε 0.162 W/m<sup>2</sup>K. Η σημαντική αυτή διαφορά είναι της τάξης του 51.49%.

#### 5.2.4.5 ΔΑΠΕΔΟ ΒΟ001

Στην Εικόνα 5.25 παρουσιάζετε το δάπεδο με τους μεταλλικούς ορθοστάτες που βρίσκονται σε αυτό.

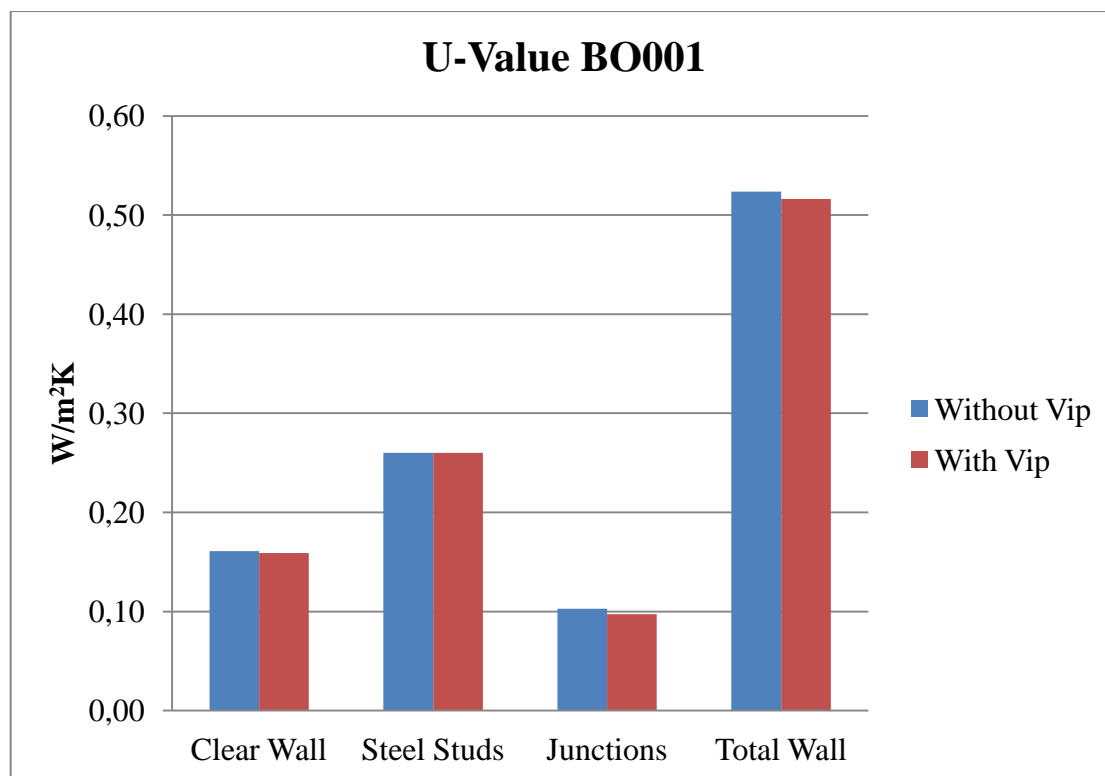


Εικόνα 5.25: Δάπεδο ΒΟ001 [12]

Οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας για το δάπεδο, όπως αυτές προέκυψαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14 και σχηματικά στην Εικόνα 5.26. Στο δάπεδο δεν τοποθετούνται VIP, όμως ο συντελεστής θερμοπερατότητας επηρεάζεται από την εφαρμογή VIP στους τοίχους, λόγω των θερμογεφυρών που εμφανίζονται στα σημεία σύζευξης του δαπέδου με αυτούς.

Πίνακας 5.14: Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας του δαπέδου, για κάθε μια από τις υπό εξέταση περιπτώσεις

Floor BO001					
U-value		No VIP		VIP	
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.161		0.159	
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.260		0.260	
		With Studs	Without Studs	With Studs	Without Studs
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.103	-0.017	0.097	-0.012
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.524	0.144	0.516	0.146

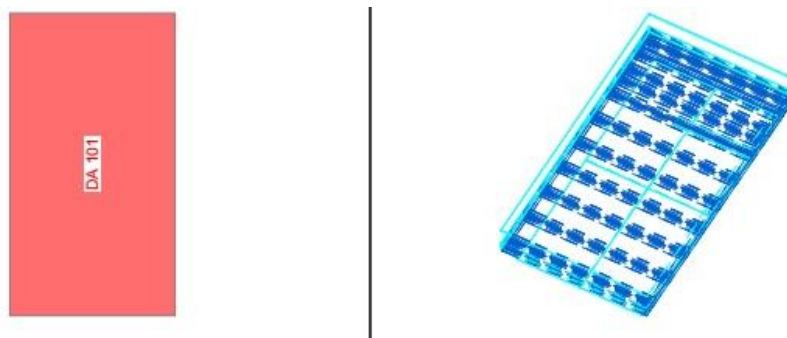


Εικόνα 5.26: Απεικόνιση του συντελεστή U-value του δαπέδου για τις υπό μελέτη περιπτώσεις

Το συνολικό U-value του δαπέδου χωρίς VIP είναι  $0.524\text{W/m}^2\text{K}$  ενώ με τη τοποθέτηση των VIP γίνεται  $0.516\text{W/m}^2\text{K}$ . Προκύπτει δηλαδή μια μικρή διαφορά της τάξης του 1.5%. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως φαίνεται και από τους πίνακες στο κεφάλαιο 5.2, στη κατασκευή του δαπέδου δεν εφαρμόζονται μονωτικές σανίδες κενού. Κατά συνέπεια, η όποια διαφορά προκύπτει, οφείλεται στις διαφορετικές τιμές του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας  $\Psi$ , στη θερμογέφυρα με συντόμευση EW-FL και τη διαφορετική τιμή του συντελεστή σημειακής θερμοπερατότητας, στις θερμογέφυρες EW-EW-FL και EW-IW-FL.

#### 5.2.4.6 ΟΡΟΦΗ DA101

Στην Εικόνα 5.27 παρουσιάζετε η οροφή και οι μεταλλικούς ορθοστάτες που βρίσκονται σε αυτήν.

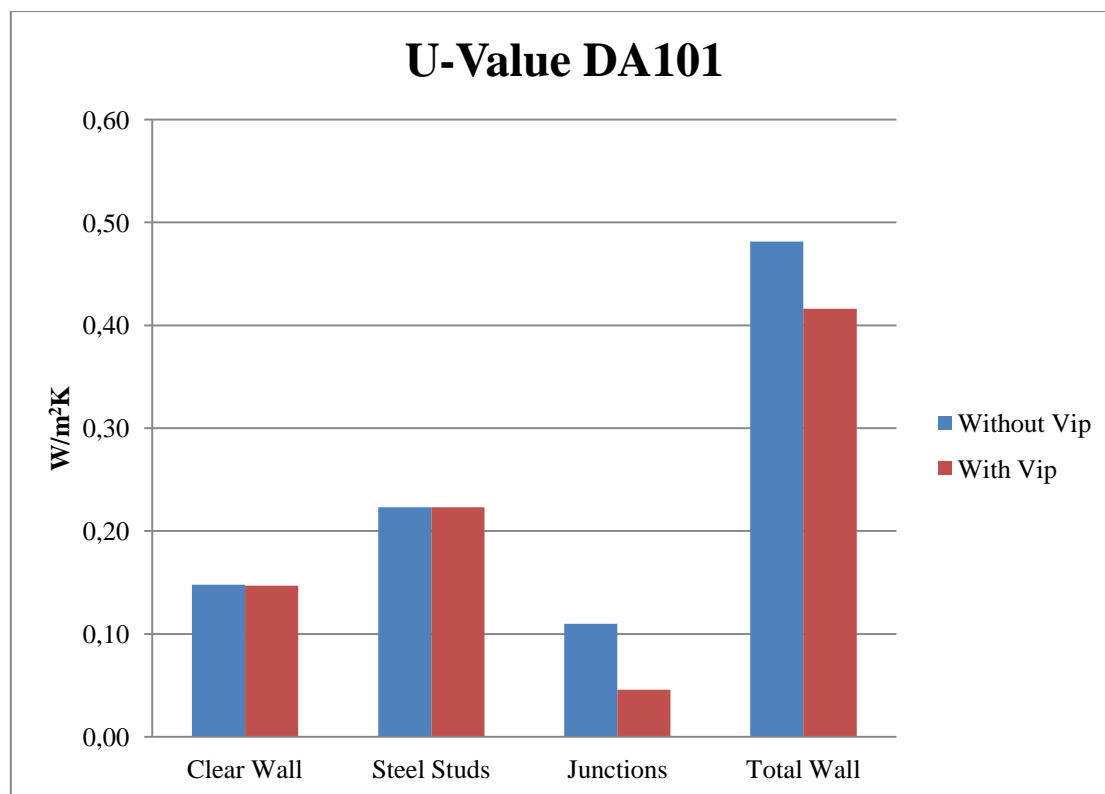


Εικόνα 5.27: Οροφή DA101 [12]

Οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας για την οροφή, όπως αυτές προέκυψαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.15 και σχηματικά στην Εικόνα 5.28. Να σημειωθεί πως στην οροφή δεν έχουν εφαρμοσθεί VIP, όμως το U-value της επιφάνειας αυτής μεταβάλλεται όταν τοποθετηθούν VIP στις τοιχοποιίες, λόγω των θερμογεφυρών που εμφανίζονται στα σημεία σύζευξης της με τους τοίχους.

Πίνακας 5.15: Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας της οροφής για κάθε μια από τις υπό εξέταση περιπτώσεις

Roof DA101					
U-value		No VIP		VIP	
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.148		0.147	
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.223		0.223	
		With Studs	Without Studs	With Studs	Without Studs
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.110	0.079	0.046	0.009
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.481	0.226	0.416	0.156



**Εικόνα 5.28:** Απεικόνιση του συντελεστή U-value της οροφής για τις υπό μελέτη περιπτώσεις

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας της οροφής χωρίς την τοποθέτηση των VIP, είναι  $0.481\text{W/m}^2\text{K}$  ενώ με την εφαρμογή τους στη μόνωση, μειώνεται στα  $0.416\text{W/m}^2\text{K}$ , μια ποσοστιαία διαφορά της τάξης του 13.51%. Οι μονωτικές σανίδες κενού δεν έχουν τοποθετηθεί στην οροφή, συνεπώς, όποιες διαφορές στο U-value της οροφής, οφείλονται στις διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $\Psi$  για τις γραμμικές θερμογέφυρες EW-RF και τις σημειακές θερμογέφυρες EW-EW-RF και EW-IW-RF.

### 5.2.5 ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

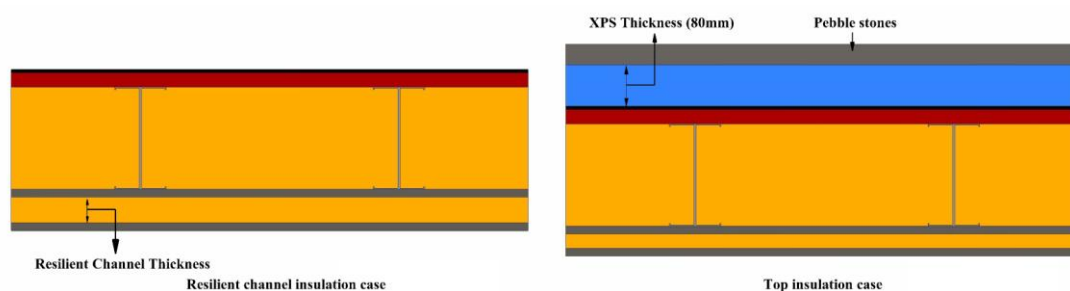
Προκειμένου να υπάρξει επιπλέον βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση του κτηρίου, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες παρεμβάσεις στο κέλυφος του. Οι αλλαγές αυτές, έγιναν στην οροφή, στο δάπεδο, στις συνδέσεις του εξωτερικού με τον εσωτερικό τοίχο αλλά και στη σύνδεση του εξωτερικού τοίχου με το δάπεδο του δώματος.

Πιο συγκεκριμένα οι παρεμβάσεις είναι οι εξής:

## I. ΟΡΟΦΗ

- Έγινε τοποθέτηση στρώματος εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) πάχους 80mm πάνω από την οροφή.
- Αυξήθηκε το πάχος της ψευδοροφής αλλάζοντας το πάχος του ήδη τοποθετημένου στη μόνωση πετροβάμβακα από 28mm σε 50mm, 100mm και 200mm.

Στην **Εικόνα 5.29** παρουσιάζονται οι παραπάνω μεταβολές στην οροφή του κτηρίου.



**Εικόνα 5.29: Παρεμβάσεις στην κατασκευή της οροφής του κτηρίου**

Οι αλλαγές στο συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας κάθε μιας επιφάνειας του κελύφους του κτιρίου, εξαιτίας των παραπάνω παρεμβάσεων, παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν. Οι νέες τιμές που προκύπτουν, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές της ενότητας 5.2.4 (Reference Design).

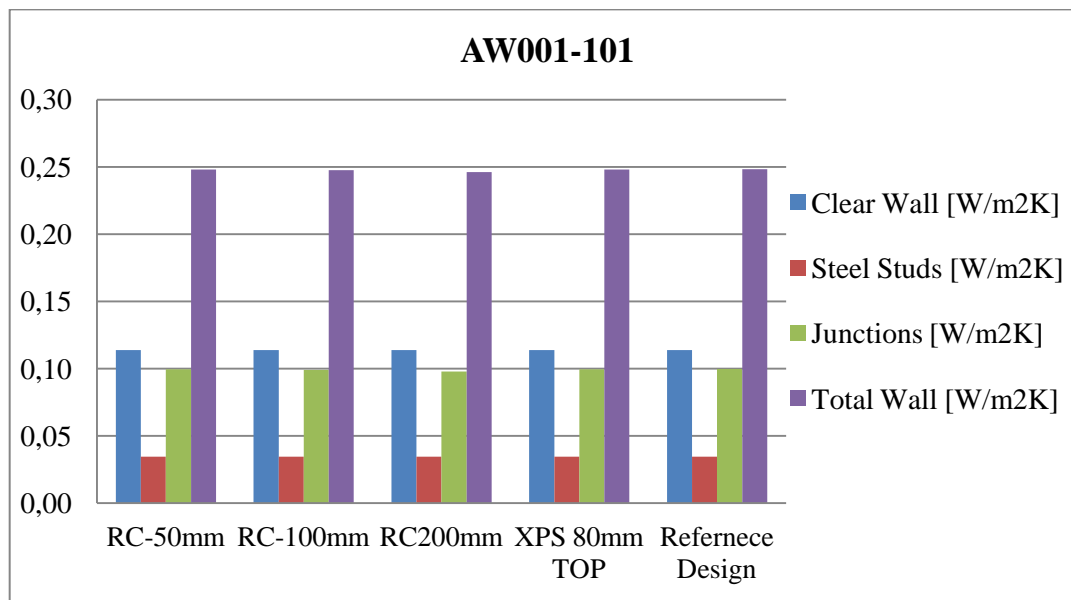
### ΤΟΙΧΟΣ AW001/101

Ο Πίνακας 5.16 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου που προκύπτουν για τις περιπτώσεις που έχει τοποθετηθεί στη μόνωση πετροβάμβακας πάχους 50mm, 100mm και 200mm καθώς επίσης και εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 80mm πάνω από την οροφή.

**Πίνακας 5.16: Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW001-101 για τις περιπτώσεις των βελτιώσεων και οι τιμές για την τοιχοποιία αναφοράς**

AW001-101					
U –value [W/m <sup>2</sup> K]	RC- 50mm	RC- 100mm	RC- 200mm	XPS 80mm TOP	Reference Design
Clear Wall	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Junctions	0.100	0.099	0.098	0.100	0.100
<b>Total Wall</b>	<b>0.248</b>	<b>0.247</b>	<b>0.246</b>	<b>0.248</b>	<b>0.248</b>

Στην Εικόνα 5.30 απεικονίζονται στο διάγραμμα οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες του κεφαλαίου 5.2.4.1



Εικόνα 5.30: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών θερμοπερατότητας του τοίχου AW001/101

Παρατηρούμε πως ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας, του τοίχου δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα. Οι όποιες μικρές διαφορές οφείλονται μόνο στην μεταβολή των γραμμικών και σημειακών συντελεστών θερμοπερατότητας στα σημεία σύζευξης του τοίχου με την οροφή (EW-RF).

#### **ΤΟΙΧΟΙ AW002/102-AW004/104**

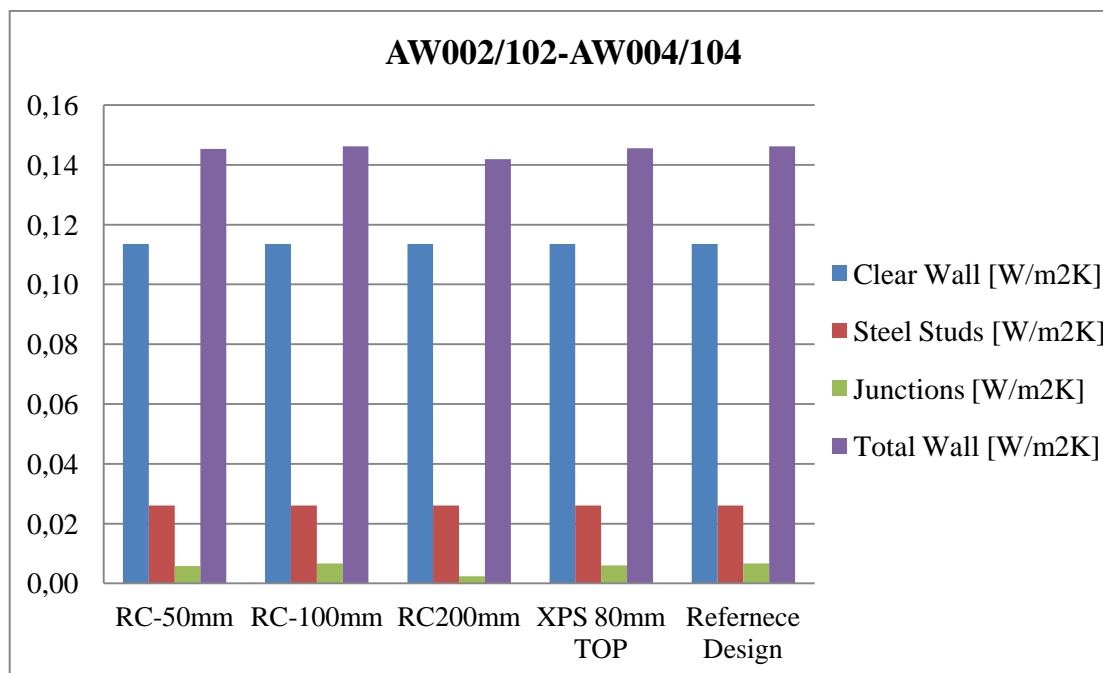
Ο Πίνακας 5.17 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου, ύστερα από τις βελτιώσεις που έγιναν στην οροφή του κτηρίου.

Πίνακας 5.17: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για τις περιπτώσεις των βελτιώσεων του τοίχου AW002/102-AW004/104 και οι τιμές για την τοιχοποιία αναφοράς

<b>AW002/102-AW004/104</b>					
U –value [W/m <sup>2</sup> K]	RC-50mm	RC-100mm	RC-200mm	XPS 80mm TOP	Reference Design
Clear Wall	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
Steel Studs	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
Junctions	0.006	0.007	0.002	0.006	0.007
Total Wall	0.145	0.146	0.142	0.146	0.146



Στην Εικόνα 5.31 απεικονίζονται οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες του κεφαλαίου 5.2.4.2



Εικόνα 5.31: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW002/102-AW004/104 για κάθε μια περίπτωση.

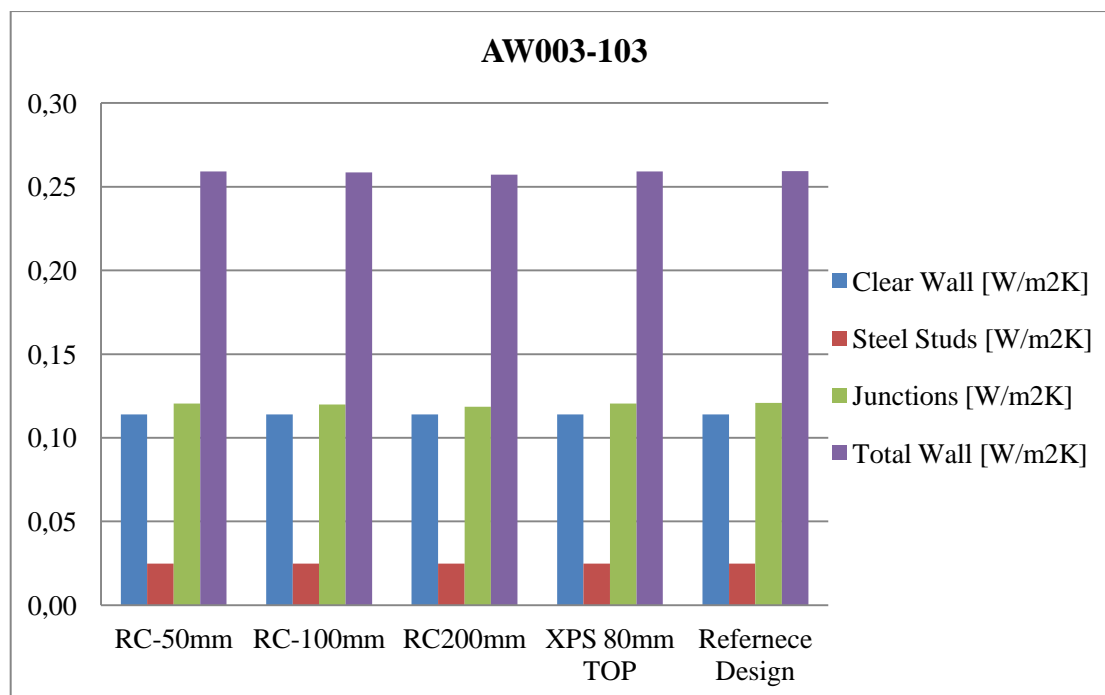
### ΤΟΙΧΟΣ AW003-103

Ο Πίνακας 5.18 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου, ύστερα από τις βελτιώσεις που έγιναν στην οροφή του κτηρίου

Πίνακας 5.18: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του τοίχου AW003-103 για τις περιπτώσεις των βελτιώσεων και οι τιμές για την τοιχοποιία αναφοράς

AW003-103					
U -value [W/m²K]	RC-50mm	RC-100mm	RC-200mm	XPS 80mm TOP	Reference Design
Clear Wall	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Junctions	0.120	0.120	0.119	0.120	0.121
Total Wall	0.259	0.259	0.257	0.259	0.259

Στην Εικόνα 5.32 απεικονίζονται οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες του κεφαλαίου 5.2.4.3.



Εικόνα 5.32: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW003/103 για κάθε μια περίπτωση.

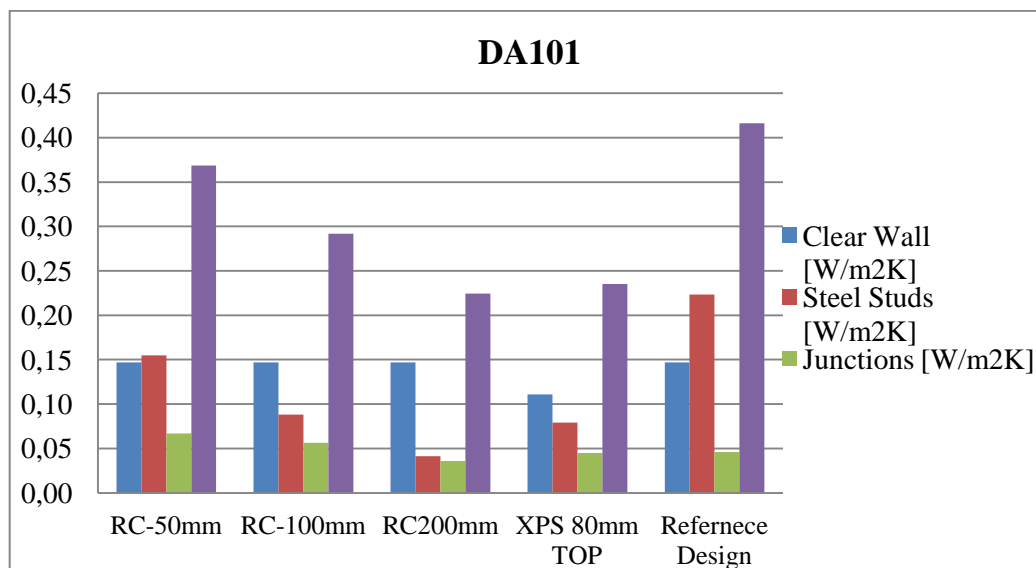
Κατά τις περιπτώσεις των παρεμβάσεων, όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.16, δεν παρατηρήθηκαν κάποιες αξιοσημείωτες μεταβολές για τον τοίχο AW003/103.

### ΟΡΟΦΗ DA101

Ο Πίνακας 5.19 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας της οροφής, ύστερα από τις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή.

Πίνακας 5.19: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για τις περιπτώσεις των βελτιώσεων της οροφής DA101 και οι τιμές για την οροφή αναφοράς

DA101					
U –value [W/m <sup>2</sup> K]	RC-50mm	RC-100mm	RC-200mm	XPS 80mm TOP	Reference Design
Clear Wall	0.147	0.147	0.147	0.111	0.147
Steel Studs	0.155	0.088	0.041	0.079	0.223
Junctions	0.067	0.057	0.036	0.045	0.046
Total Wall	0.369	0.292	0.224	0.235	0.416



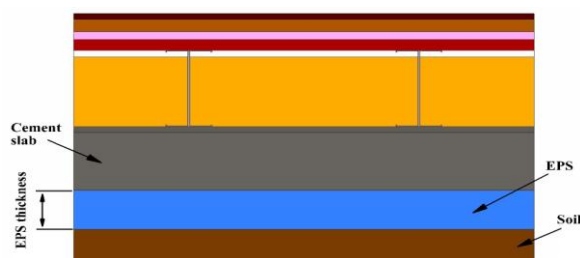
Εικόνα 5.33: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας του δαπέδου DA101 για κάθε μια περίπτωση.

Για τη περίπτωση που τοποθετείται εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 200mm πάνω από την οροφή, επιτυγχάνεται μείωση στο συνολικό U-value της επιφάνειας αυτής από 0.416W/m²K σε 0.224W/m²K. Η διαφορά αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική της τάξης του 46.15%.

Παρεμβαίνοντας στη οροφή αυξάνοντας το πάχος της ψευδοροφής στα 200mm, ο συντελεστής θερμοπερατότητας ελαττώνεται σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς κατά 43.5% και γίνεται 0.235W/m²K.

## II. ΔΑΠΕΔΟ

Παρακάτω εξετάζονται οι μεταβολές στο συντελεστή θερμοπερατότητας για κάθε επιφάνεια του κτηρίου ξεχωριστά, για τη περίπτωση κατά την οποία τοποθετείται ανάμεσα στη πλάκα από τσιμέντο του δαπέδου και το χώμα, διογκωμένη πολυστερίνη πάχους 100mm και 200mm αντίστοιχα (Εικόνα 5.34).



Εικόνα 5.34: Τοποθέτηση διογκωμένης πολυστερίνης ανάμεσα στην τσιμεντένια πλάκα και το δάπεδο

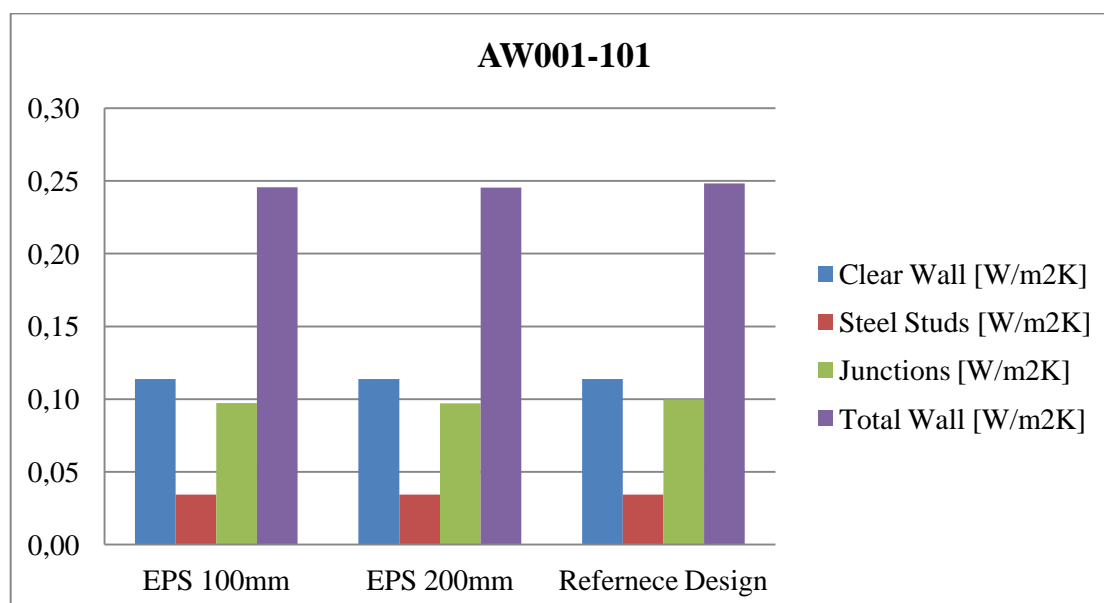
**ΤΟΙΧΟΣ AW001-101**

Ο Πίνακας 5.20 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW001/101, ύστερα από τις βελτιώσεις που έγιναν στο δάπεδο του κτηρίου.

**Πίνακας 5.20:** Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του τοίχου AW001-101 για τις περιπτώσεις βελτίωσης του δαπέδου και οι τιμές για την τοιχοποιία αναφοράς

AW001-101				
U -value		EPS-100mm	EPS-200mm	Reference Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.035	0.035	0.035
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.097	0.097	0.100
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.246	0.245	0.248

Στην Εικόνα 5.35 απεικονίζονται οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες του κεφαλαίου 5.2.4.3.



**Εικόνα 5.35:** Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW001/101

Από τον Πίνακα 5.20 την Εικόνα 5.36, συμπεραίνουμε πως η διογκωμένη πολυστερίνη δεν επηρεάζει το συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου, παρά μόνο κατά ένα ποσοστό μικρότερο του 1% και για τις δύο περιπτώσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν επεμβαίνουμε στην δομή της κατασκευής του τοίχου, επομένως οι όποιες μικρές διαφορές στο συνολικό U-value οφείλονται στις διαφορές των

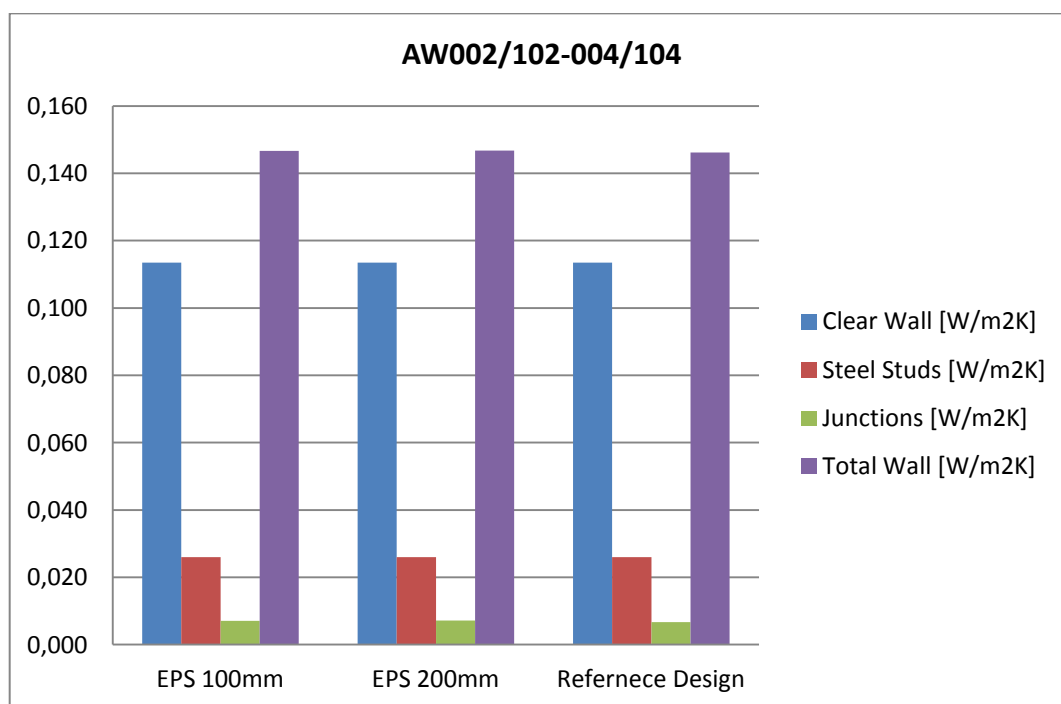
γραμμικών και των σημειακών συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με την αρχική κατασκευή.

### **ΤΟΙΧΟΣ AW002/102-AW004/104**

Ο Πίνακας 5.21 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας των τοίχων τοίχου AW002/102 και AW004/104, ύστερα από τις βελτιώσεις που έγιναν στο δάπεδο του κτηρίου

**Πίνακας 5.21:** Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του τοίχου AW002-102 για τις περιπτώσεις βελτίωσης του δαπέδου και οι τιμές για την τοιχοποιία αναφοράς

<b>AW002-/102-AW004/104</b>				
U -value		EPS 100mm	EPS 200mm	Refernece Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.113	0.113	0.113
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.026	0.026	0.026
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.007	0.007	0.007
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.1466	0.1467	0.1462



**Εικόνα 5.36:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW002/102-004/104 για κάθε μια περίπτωση

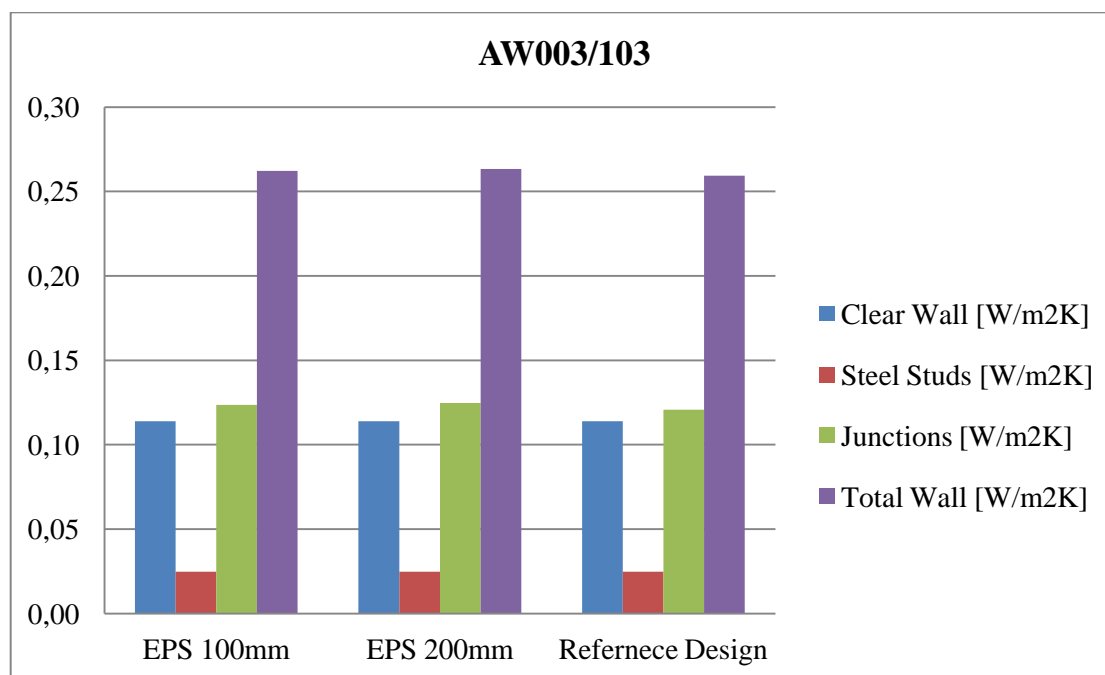
Ομοίως με ότι συνέβη για τον τοίχο AW001/101, οι όποιες διαφορές παρουσιάζονται στο συντελεστή θερμοπερατότητας μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

**ΤΟΙΧΟΣ AW003/103**

Ο Πίνακας 5.22 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW003/103, για τις βελτιώσεις που έγιναν στο δάπεδο του κτηρίου

**Πίνακας 5.22: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του τοίχου AW003-103 για τις περιπτώσεις βελτίωσης του δαπέδου και οι τιμές για την τοιχοποιία αναφοράς**

AW003/103				
U -value		EPS 100mm	EPS 200mm	Referenece Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.025	0.025	0.025
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.124	0.125	0.121
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.262	0.263	0.259



**Εικόνα 5.37: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW003/103 για κάθε μια περίπτωση**

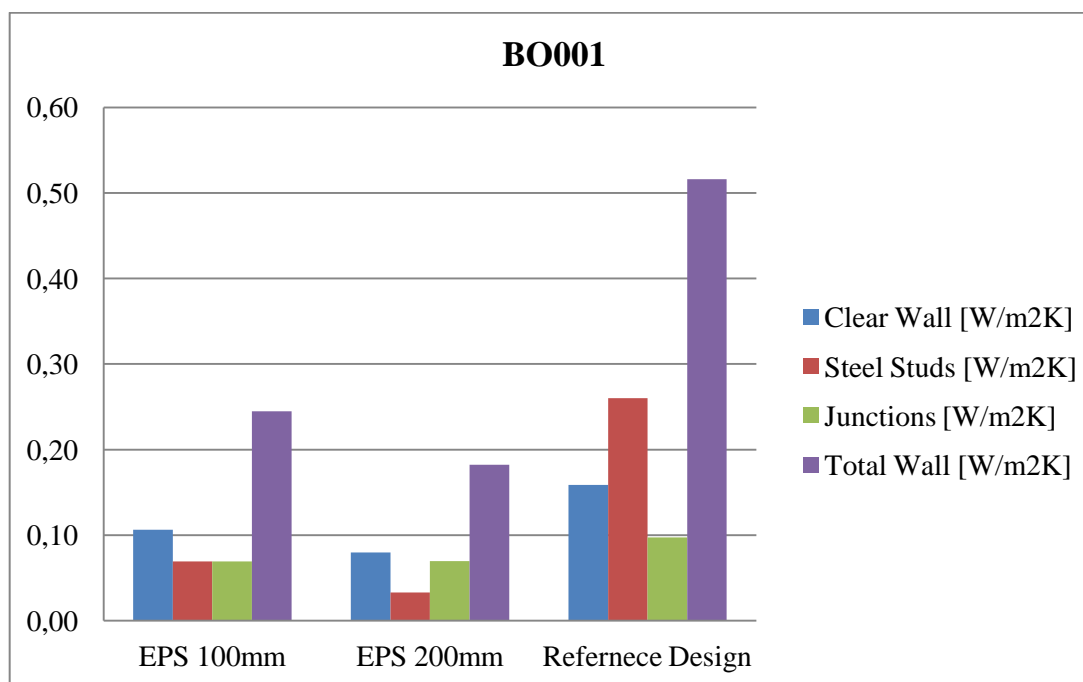
Για τη τοιχοποιία AW003/103, παρατηρείται μια μικρή αύξηση περίπου 1.5% στη περίπτωση της προσθήκης διογκωμένης πολυστερίνης στο δάπεδο

### ΔΑΠΕΔΟ ΒΟ001

Ο Πίνακας 5.23 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας δαπέδου, έπειτα από τις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό.

**Πίνακας 5.23: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του δαπέδου.**

<b>ΒΟ001</b>				
U -value		EPS 100mm	EPS 200mm	Referenece Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.106	0.080	0.159
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.069	0.033	0.260
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.069	0.070	0.097
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.245	0.182	0.516

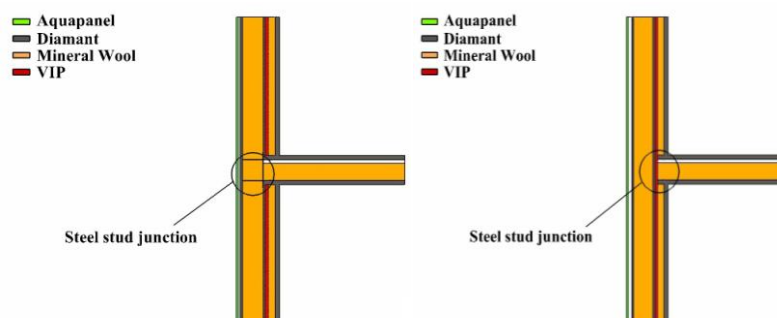


**Εικόνα 5.38: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας**

Η επίδραση της τοποθέτησης EPS στο συνολικό U-value του δαπέδου επιφέρει μείωση κατά 52.5% στη περίπτωση που το πάχος της πολυστερίνης είναι 100mm και επιπλέον μείωση κατά 12.22% δηλαδή συνολικά 64.72% σε σχέση με την κατασκευή αναφοράς, όταν το πάχος της διογκωμένης πολυστερίνης γίνει 200mm. Συνεπώς, η παρέμβαση αυτή κρίνεται αποτελεσματική και προφανώς θα επιφέρει και αντίστοιχη μείωση στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου η οποία και θα αναλυθεί στο παρακάτω κεφάλαιο.

**III. ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ-ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΤΟΙΧΟΥ**

Παρεμβαίνουμε στην ήδη υπάρχουσα κατασκευή, με αποσύζευξη της σύνδεσης μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών τοίχων, τοποθετώντας στη θέση του μεταλλικού ορθοστάτη που συνδέει τις δυο αυτές επιφάνειες, στρώση από πετροβάμβακα (Εικόνα 5.39). Σε αυτή τη περίπτωση δεν εξετάζουμε τις τοιχοποιίες AW002/102 και AW004/104 καθώς δεν συνδέονται με τους εσωτερικούς τοίχους



Εικόνα 5.39: Αποσύζευξη εσωτερικής-εξωτερικής τοιχοποιίας

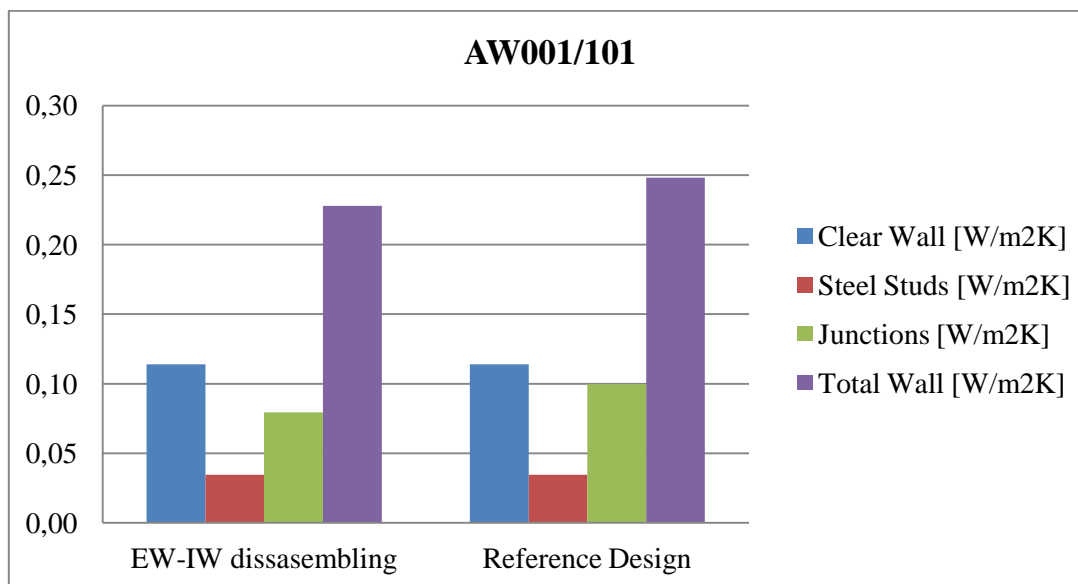
**ΤΟΙΧΟΣ AW001/101**

Ο Πίνακας 5.24 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW001/101, έπειτα από την αποσύζευξη του εξωτερικού με τον εσωτερικό τοίχο.

**Πίνακας 5.24: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για τη περίπτωση αποσύνδεσης εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας και οι τιμές της κατασκευής αναφοράς**

<b>AW001/101</b>			
U -value		EW-IW dissasembling	Reference Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.035	0.035
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.079	0.100
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.228	0.248





**Εικόνα 5.40:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας

Διακρίνεται μια μείωση στο συντελεστή θερμοπερατότητας περίπου 8.06% από 0.248W/m²K σε 0.228W/m²K .

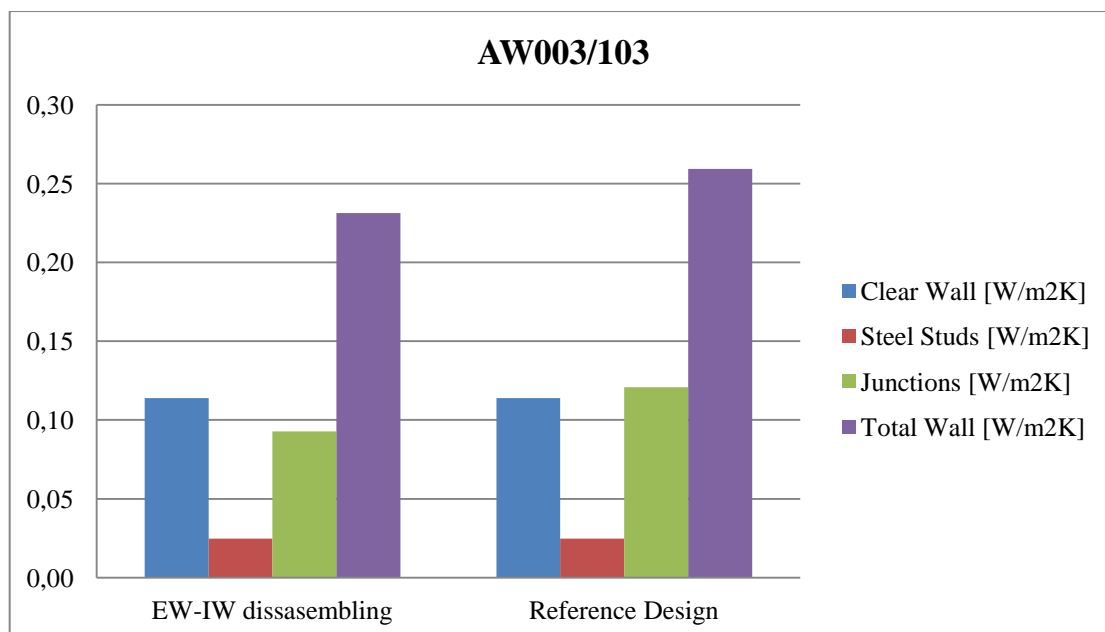
### **ΤΟΙΧΟΣ AW003/103**

Ο Πίνακας 5.25 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW003/103, έπειτα από την αποσύζευξη του εξωτερικού με τον εσωτερικό τοίχο.

**Πίνακας 5.25:** Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για τη περίπτωση αποσύνδεσης εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας και οι τιμές της κατασκευή αναφοράς

<b>AW003-103</b>			
U -value		EW-IW disassembling	Reference Design
Clear Wall	[W/m²K]	0.114	0.114
Steel Studs	[W/m²K]	0.025	0.025
Junctions	[W/m²K]	0.093	0.121
Total Wall	[W/m²K]	0.231	0.259

Η Εικόνα 5.40 δείχνει τη μεταβολή που προκύπτει για στο συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου σε σχέση με την αρχική κατασκευή.



**Εικόνα 5.41:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας

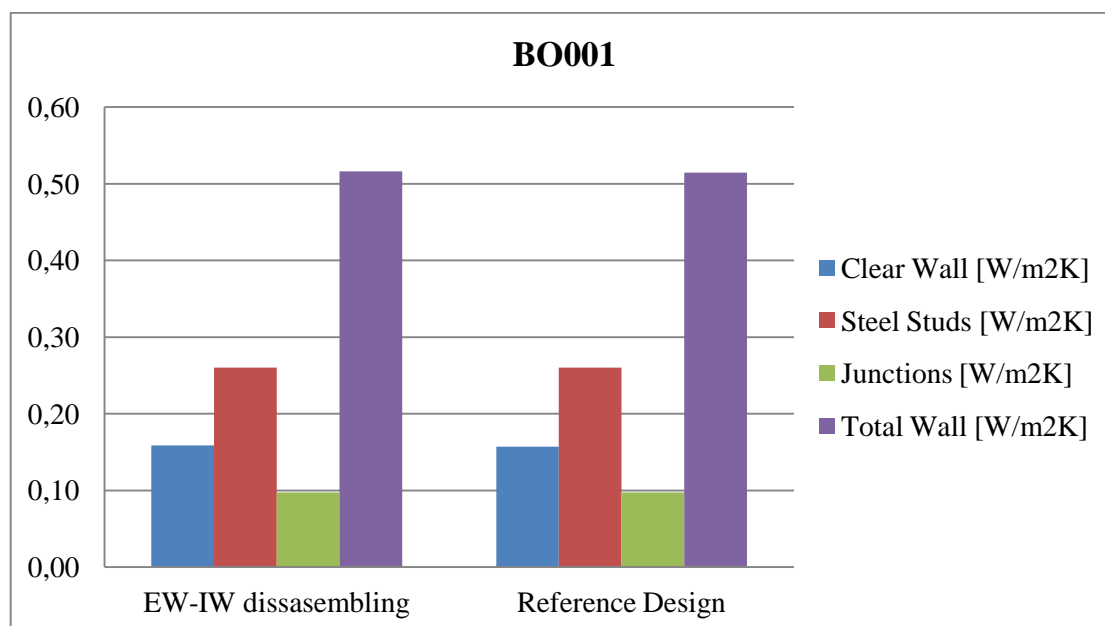
Με τη παρέμβαση αυτή, μειώνεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας από 0.259W/m²K σε 0.231 W/m²K , μια διαφορά 10.8%

### ΔΑΠΕΔΟ ΒΟ001

Ο Πίνακας 5.26 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας του δαπέδου ΒΟ001, έπειτα από την αποσύζευξη του με τον εξωτερικό και τον εσωτερικό τοίχο.

**Πίνακας 5.26:** Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για τη περίπτωση αποσύνδεσης εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας και οι τιμές της κατασκευή αναφοράς

ΒΟ001			
U -value		EW-IW disassembling	Reference Design
Clear Wall	[W/m²K]	0.159	0.157
Steel Studs	[W/m²K]	0.260	0.260
Junctions	[W/m²K]	0.097	0.097
Total Wall	[W/m²K]	0.516	0.514



Εικόνα 5.42: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας

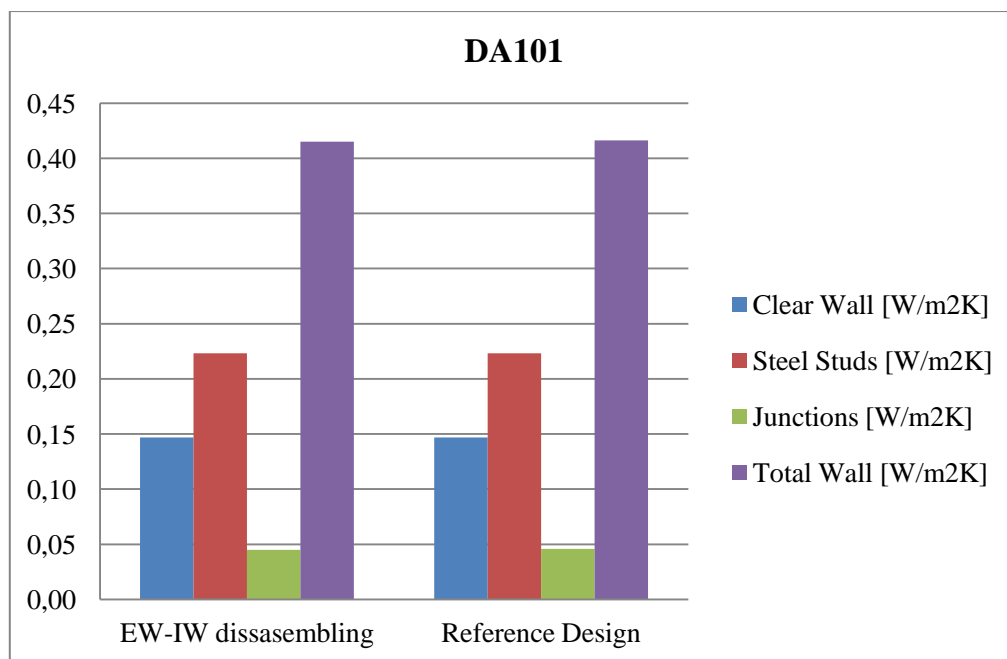
Η σημειακή θερμογέφυρα μεταξύ εξωτερικού-εσωτερικού τοίχου και δαπέδου (EW-IW-FL) δημιουργεί μια ελάχιστη διαφορά στο συντελεστή θερμοπερατότητας του δαπέδου σε σχέση με την αρχική κατασκευή .

### ΟΡΟΦΗ DA101

Ο Πίνακας 5.27 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή θερμοπερατότητας της οροφής DA101, έπειτα από την αποσύζευξη του με τον εξωτερικό και τον εσωτερικό τοίχο.

Πίνακας 5.27: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για τη περίπτωση αποσύνδεσης εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας και οι τιμές της κατασκευής αναφοράς

DA101			
U -value		EW-IW dissasembling	Reference Design
Clear Wall	[W/m²K]	0.147	0.147
Steel Studs	[W/m²K]	0.223	0.223
Junctions	[W/m²K]	0.045	0.046
Total Wall	[W/m²K]	0.415	0.416

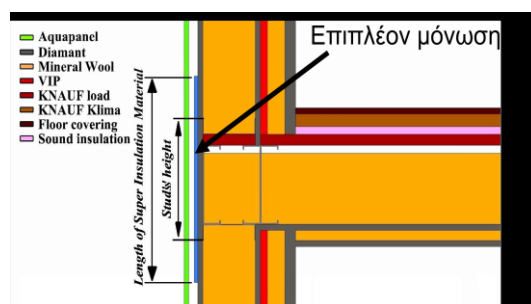


Εικόνα 5.43: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας

Η ελάχιστη διαφορά ανάμεσα στην αρχική κατασκευή και την περίπτωση αποσύνδεσης εξωτερικής και εσωτερικής τοιχοποιίας οφείλεται στο διαφορετικό σημειακό συντελεστή αγωγιμότητας στη θέση σύζευξης της Εξωτερικής τοιχοποιίας με την εσωτερική και την οροφή (EW-IW-RF).

#### IV. ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΤΟΙΧΟΥ ΜΕ ΔΑΠΕΔΟ ΔΩΜΑΤΟΣ

Κατά τη παρέμβαση αυτή, τοποθετούμε μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη (ventilated facade) δυο διαφορετικού τύπου υπέρ-μονωτικά υλικά, VIP και AEROGEL, με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτονται οι μεταλλικοί ορθοστάτες της σύνδεσης (Εικόνα 5.44).



Εικόνα 5.44: Τοποθέτηση μονωτικού υλικού μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

Οι περιπτώσεις που εξετάζονται πραγματοποιούνται με πάχος μονωτικών 10mm και 15mm και με μήκος μονωτικών 308mm,333.8mm,369.6mm,462mm και 616mm αντιστοίχως.

### **ΤΟΙΧΟΣ AW001/101**

Ο πίνακας 5.28 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας του τοίχου AW001/101 όταν τοποθετήσουμε VIP πάχους 10mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη.

**Πίνακας 5.28: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού VIP πάχους 10mm**

VIP						
U -value	308mm / 10mm	338.8mm / 10mm	369.6mm / 10mm	462mm / 10mm	616mm / 10mm	Reference Design
Clear Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs [W/m <sup>2</sup> K]	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Junctions [W/m <sup>2</sup> K]	0.093	0.092	0.091	0.089	0.088	0.100
Total Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.242	0.241	0.240	0.238	0.236	0.248

Ο Πίνακας 5.29 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του τοίχου AW001/101, όταν τοποθετήσουμε VIP πάχους 15mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

**Πίνακας 5.29: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού VIP πάχους 15mm**

VIP						
U -value	308mm /15mm	338.8mm /15mm	369.6mm /15mm	462mm /15mm	616mm /15mm	Reference Design
Clear Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs [W/m <sup>2</sup> K]	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Junctions [W/m <sup>2</sup> K]	0.092	0.091	0.090	0.087	0.086	0.100
Total Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.241	0.239	0.238	0.235	0.234	0.248

**Πίνακας 5.30: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού AEROGEL πάχους 10mm**

AEROGEL						
U -value	308mm /10mm	338.8mm /10mm	369.6mm/ 10mm	462mm /10mm	616mm /10mm	Reference Design
Clear Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs [W/m <sup>2</sup> K]	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Junctions [W/m <sup>2</sup> K]	0.096	0.095	0.095	0.094	0.094	0.100
Total Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.245	0.244	0.244	0.243	0.243	0.248

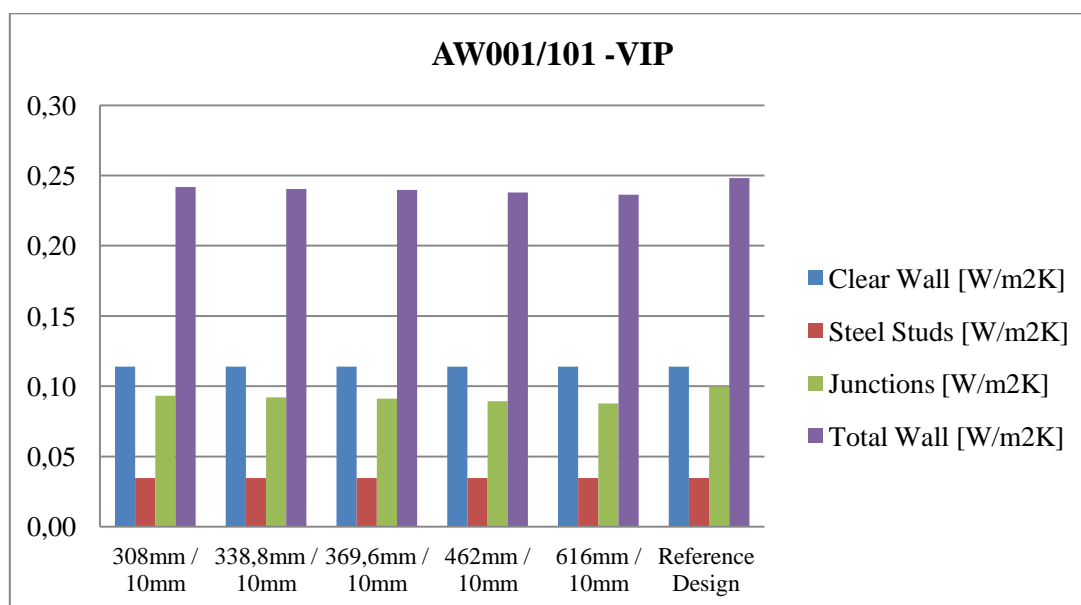
Πίνακας 5.30 δείχνει τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του τοίχου AW001/101, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό AEROGEL πάχους 10mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

Ο Πίνακας 5.31 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του τοίχου AW001/101, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό AEROGEL πάχους 15mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

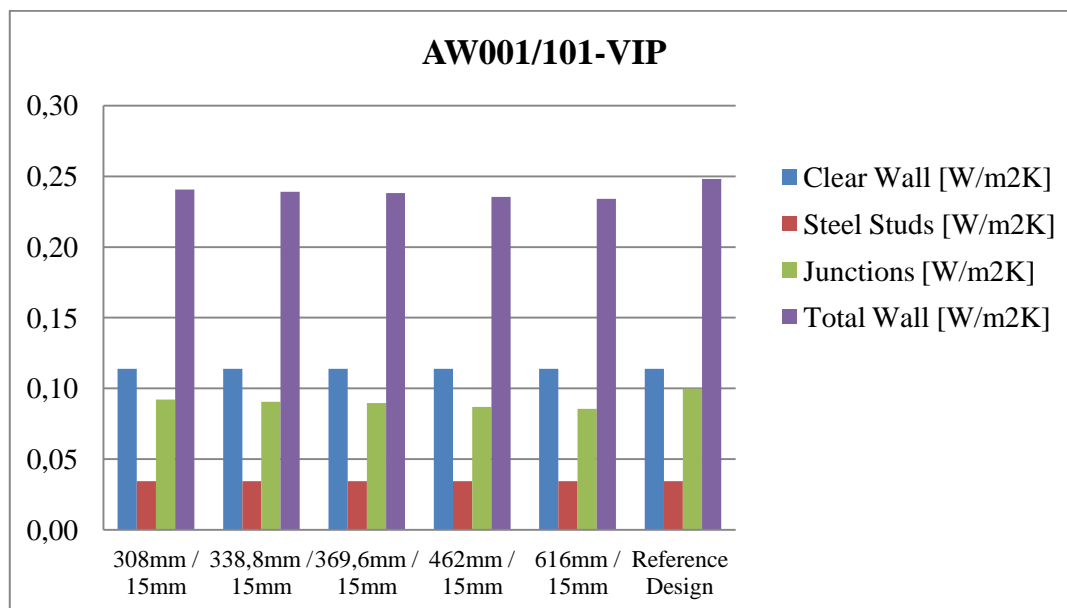
**Πίνακας 5.31: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού AEROGEL πάχους 15mm**

AEROGEL						
U -value	308mm /15mm	338.8mm /15mm	369.6mm /15mm	462mm /15mm	616mm /15mm	Reference Design
Clear Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs [W/m <sup>2</sup> K]	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Junctions [W/m <sup>2</sup> K]	0.095	0.094	0.094	0.093	0.092	0.100
Total Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.243	0.243	0.242	0.241	0.241	0.248

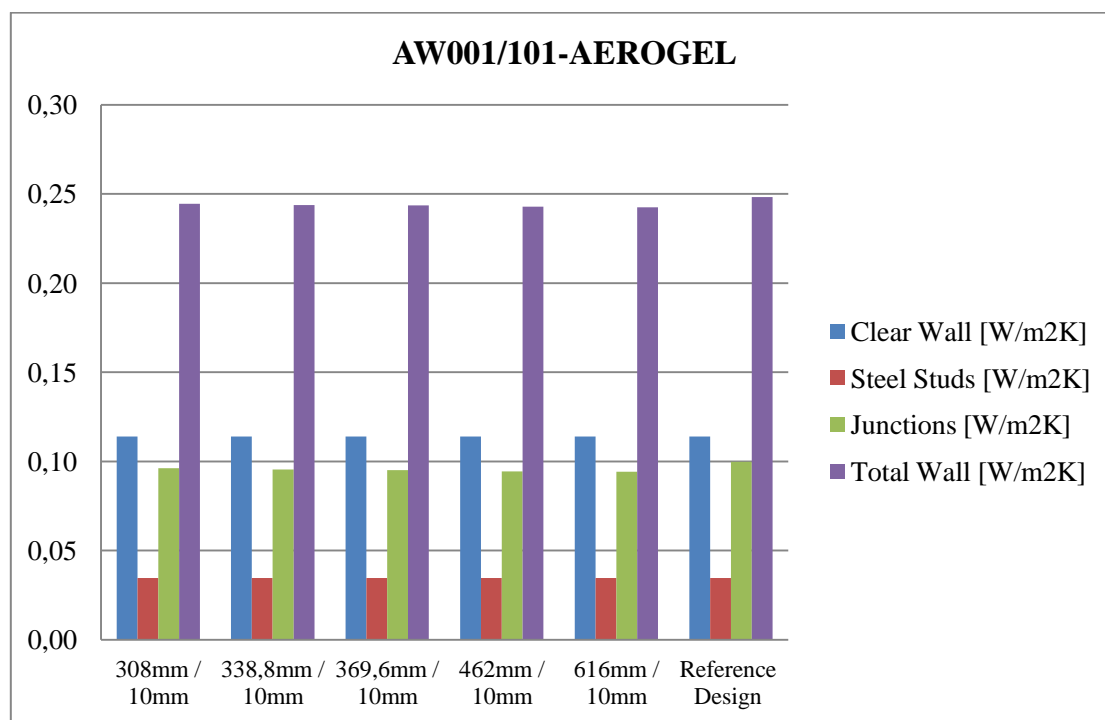
Στην Εικόνα 5.45 απεικονίζεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας όταν έχει τοποθετηθεί στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικό VIP πάχους 10mm για α διαφορετικά του μήκη, στην Εικόνα 5.46 όταν το πάχος του υλικού γίνει 15mm, ενώ στην Εικόνα 5.47 και Εικόνα 5.48 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες περιπτώσεις για μόνωση με υλικό αερογέλης.



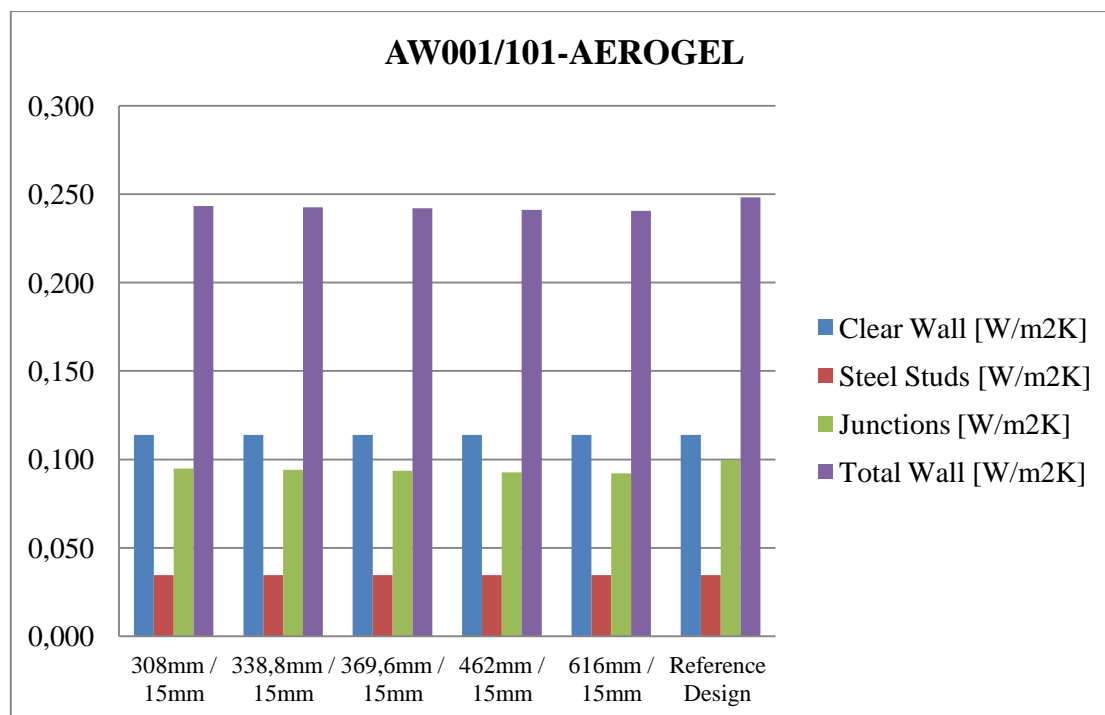
**Εικόνα 5.45: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού VIP πάχους 10mm**



**Εικόνα 5.46:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού VIP πάχους 15mm



**Εικόνα 5.47:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού AEROGEL πάχους 10mm



**Εικόνα 5.48:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW001/101 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού AEROGEL πάχους 15mm

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνουμε πως η μεγαλύτερη μείωση στο συντελεστή θερμοπερατότητας επιτυγχάνεται όταν καλύψουμε τους μεταλλικούς ορθοστάτες της αεριζόμενης πρόσοψης μονωτικό από VIP πάχους 15mm και μήκους 616mm. Στη περίπτωση αυτή, η μείωση του συνολικού U-value της τοιχοποιίας είναι 5.64% σε σχέση με την αρχική κατασκευή. Για την ίδια περίπτωση αλλά με μόνωση από AEROGEL, η μείωση του συνολικού U-value φτάνει το 2.82% συγκρινόμενη με τη κατασκευή αναφοράς. Η διαφορά της μείωσης δηλαδή ανάμεσα στις δυο περιπτώσεις με τα υπέρ-μονωτικά αυτά υλικά είναι της τάξης του 50%.

### **ΤΟΙΧΟΣ AW002/102-004/104**

**Πίνακας 5.32:** Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας τις τοιχοποιίας AW002/102-AW004/104 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού VIP πάχους 10mm

VIP						
U -value	308mm /10mm	338.8mm /10mm	369.6mm /10mm	462mm /10mm	616mm /10mm	Reference Design
Clear Wall [W/m²K]	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
Steel Studs [W/m²K]	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
Junctions [W/m²K]	0.013	0.011	0.010	0.008	0.006	0.023
Total Wall [W/m²K]	0.153	0.151	0.150	0.148	0.146	0.162



Ο Πίνακας 5.32 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας των τοίχων AW002/102 και AW004/104, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό VIP πάχους 10mm, ενώ ο Πίνακας 5.33 τις αντίστοιχες τιμές όταν τοποθετήσουμε μονωτικό πάχους 15mm.

**Πίνακας 5.33: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας τις τοιχοποιίες AW002/102-004/104 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού VIP πάχους 15mm**

VIP							
U -value		308mm /15mm	338.8mm /15mm	369.6mm /15mm	462mm /15mm	616mm /15mm	Reference Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.011	0.010	0.008	0.005	0.005	0.023
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.151	0.149	0.148	0.144	0.144	0.162

Στον Πίνακα 5.34 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες περιπτώσεις όπως προηγουμένως όταν τοποθετήσουμε μονωτικό AEROGEL πάχους 10mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

**Πίνακας 5.34: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας τις τοιχοποιίες AW002/102-004/104 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού AEROGEL πάχους 10mm**

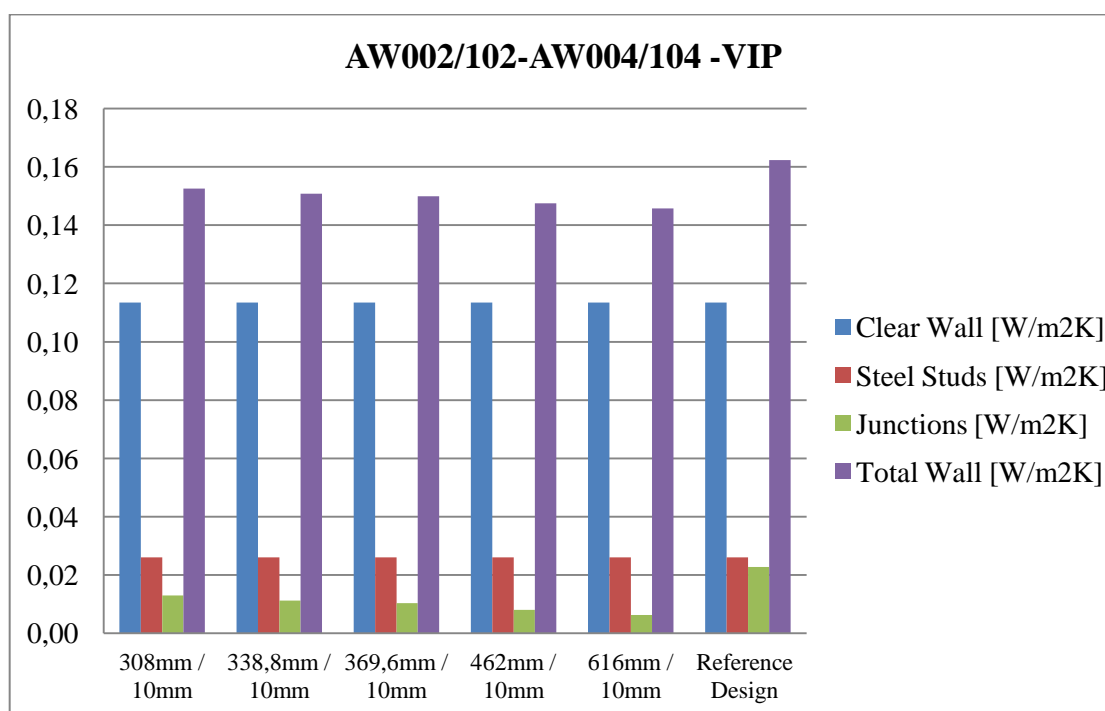
AEROGEL							
U -value		308mm /10mm	338.8mm /10mm	369.6mm /10mm	462mm /10mm	616mm /10mm	Reference Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.017	0.016	0.016	0.015	0.015	0.023
Total Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.157	0.156	0.156	0.155	0.154	0.162

Στον Πίνακα 5.35 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας των τοίχων AW002/102 και AW004/104, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό AEROGEL πάχους 15mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

**Πίνακας 5.35: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας τις τοιχοποιίας AW002/102-004/104 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού AEROGEL πάχους 15mm**

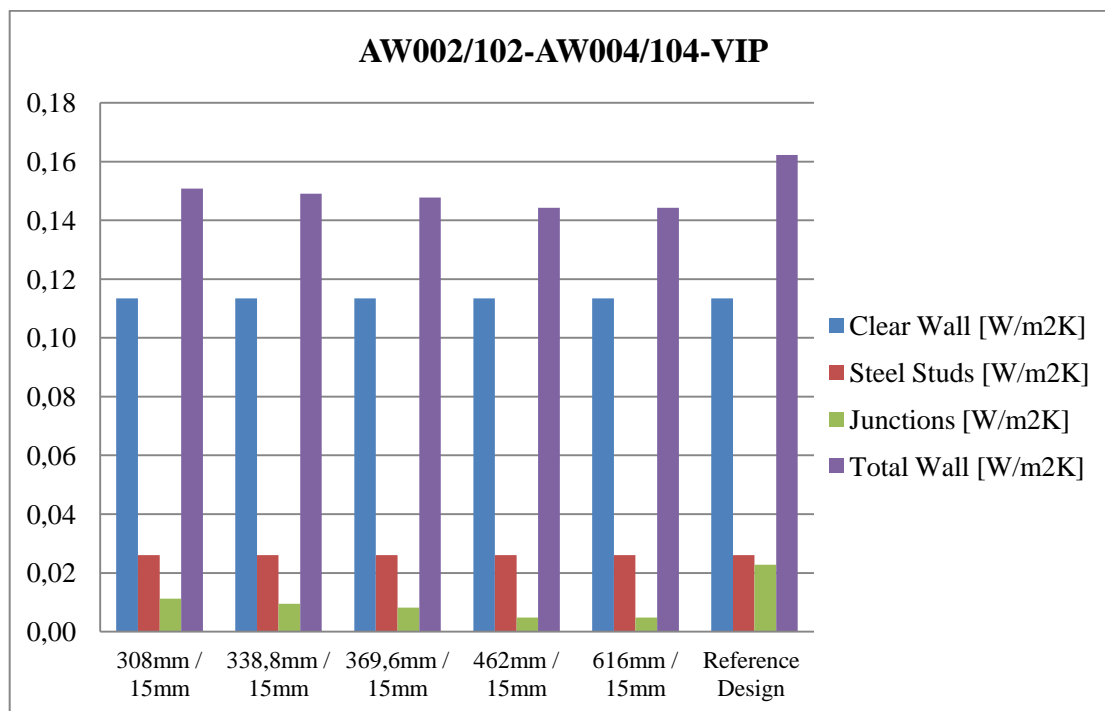
AEROGEL							
U -value		308mm / 15mm	338.8mm / 15mm	369.6mm / 15mm	462mm / 15mm	616mm / 15mm	Reference Design
Clear Wall [W/m <sup>2</sup> K]		0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
Steel Studs [W/m <sup>2</sup> K]		0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
Junctions [W/m <sup>2</sup> K]		0.015	0.015	0.014	0.013	0.012	0.023
Total Wall [W/m <sup>2</sup> K]		0.155	0.154	0.153	0.152	0.152	0.162

Στην Εικόνα 5.49 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό VIP, πάχους 10mm στην αεριζόμενη πρόσοψη.



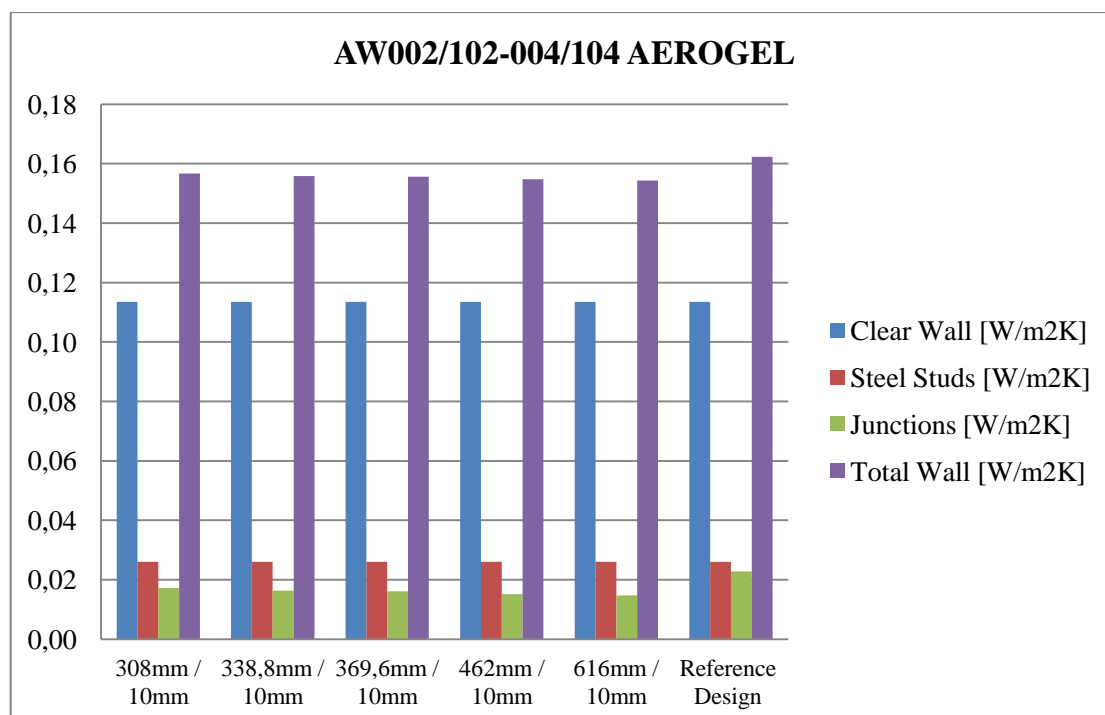
**Εικόνα 5.49: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW002-102 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού VIP πάχους 10mm**

Στην Εικόνα 5.50 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό VIP, πάχους 15mm στην αεριζόμενη πρόσοψη.



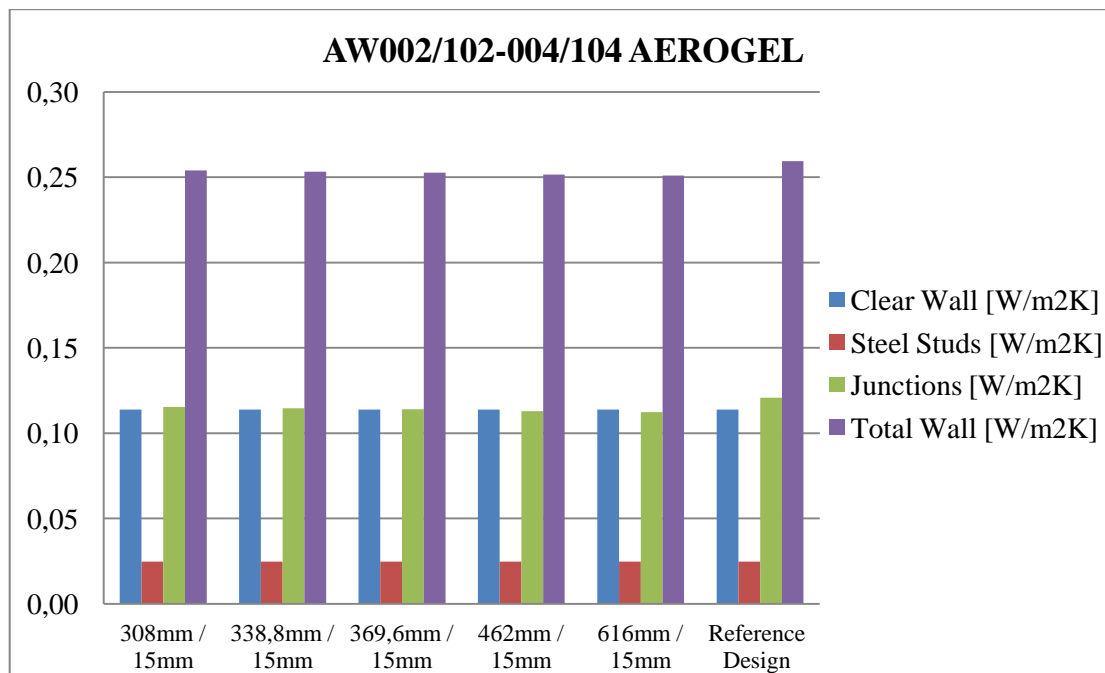
**Εικόνα 5.50:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW002-102 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού VIP πάχους 15mm

Στην Εικόνα 5.51 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό AEROGEL, πάχους 10mm στην αεριζόμενη πρόσοψη.



**Εικόνα 5.51:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW002-102 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού AEROGEL πάχους 10mm

Στην Εικόνα 5.51 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό AEROGEL, πάχους 15mm στην αεριζόμενη πρόσοψη.



**Εικόνα 5.52:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW002-102 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού AEROGEL πάχους 15mm

Στη περίπτωση που οι μεταλλικοί ορθοστάτες της αεριζόμενης πρόσοψης του κτιρίου καλυφθούν με μονωτικό από VIP πάχους 15mm και μήκους 616mm, επιτυγχάνεται μείωση στο συνολικό U-value των τοιχων AW002/102-004/104 κατά 11.1%. Για την αντίστοιχη περίπτωση με μόνωση αερογέλης η μείωση που πραγματοποιείται είναι 6.17%. Συνεπώς με τη χρήση μονωτικών VIP επιτυγχάνεται 45% μεγαλύτερη μείωση στο συντελεστή θερμοπερατότητας από ότι με την αερογέλη.

### ΤΟΙΧΟΣ AW003-103

**Πίνακας 5.36:** Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού VIP πάχους 10mm

		VIP					
U -value		308mm /10mm	338.8mm /10mm	369.6mm /10mm	462mm /10mm	616mm /10mm	Reference Design
Clear Wall	[W/m²K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs	[W/m²K]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Junctions	[W/m²K]	0.114	0.112	0.111	0.109	0.108	0.121
Total Wall	[W/m²K]	0.252	0.251	0.250	0.248	0.246	0.259

Στον Πίνακα 5.36 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του AW003/103, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό VIP πάχους 10mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

**Πίνακας 5.37: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού VIP πάχους 15mm**

VIP						
U -value	308mm / 15mm	338.8mm / 15mm	369.6mm / 15mm	462mm / 15mm	616mm / 15mm	Reference Design
Clear Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs [W/m <sup>2</sup> K]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Junctions [W/m <sup>2</sup> K]	0.112	0.111	0.110	0.107	0.105	0.121
Total Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.251	0.249	0.248	0.245	0.244	0.259

Στον Πίνακα 5.37 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του AW003/103, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό VIP πάχους 15mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

**Πίνακας 5.38: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού AEROGEL πάχους 10mm**

AEROGEL						
U -value	308mm / 10mm	338.8mm / 10mm	369.6mm / 10mm	462mm / 10mm	616mm / 10mm	Reference Design
Clear Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs [W/m <sup>2</sup> K]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Junctions [W/m <sup>2</sup> K]	0.117	0.116	0.116	0.115	0.115	0.121
Total Wall [W/m <sup>2</sup> K]	0.255	0.255	0.254	0.253	0.253	0.259

Στον Πίνακα 5.38 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του AW003/103, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό AEROGEL πάχους 10mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

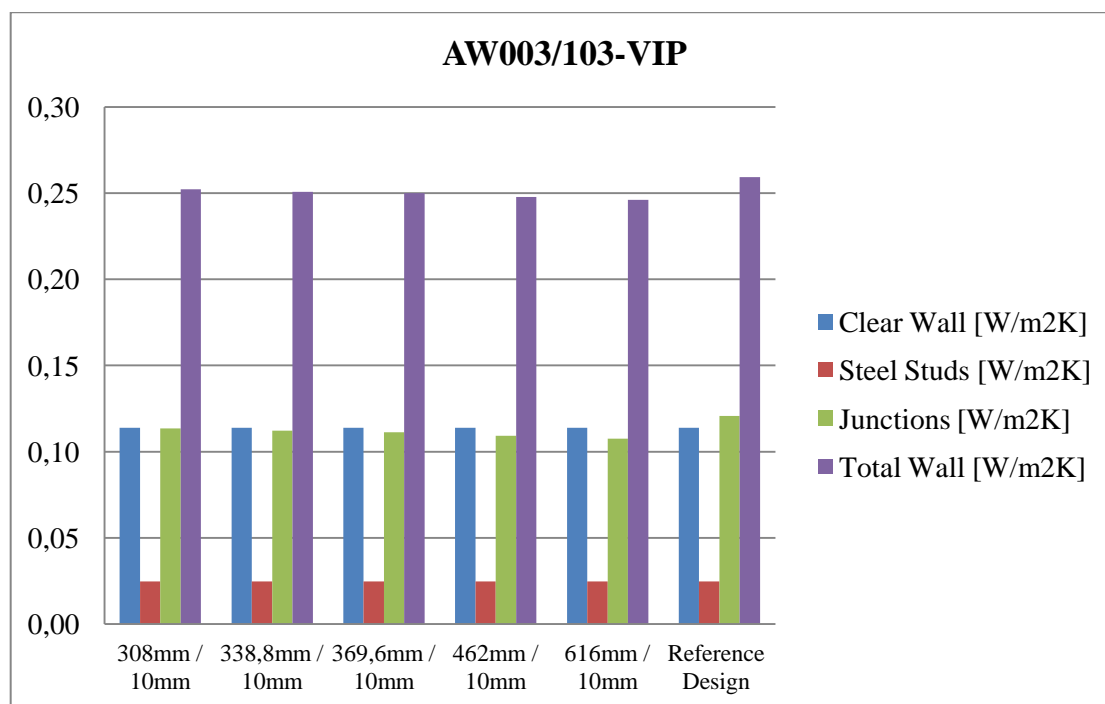
Στον

Πίνακα 5.39 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του AW003/103, όταν τοποθετήσουμε μονωτικό AEROGEL πάχους 15mm μέσα στην αεριζόμενη πρόσοψη

**Πίνακας 5.39: Οι τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού AEROGEL πάχους 15mm**

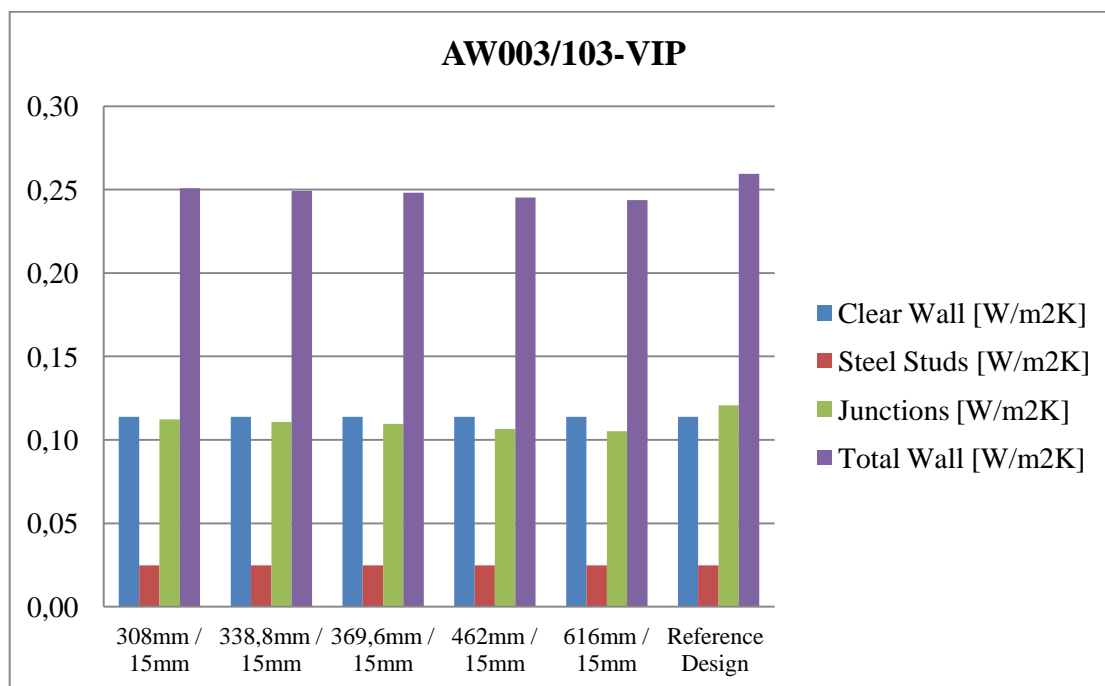
		AEROGEL					
U -value		308mm /15mm	338.8mm /15mm	369,6mm /15mm	462mm /15mm	616mm /15mm	Reference Design
Clear Wall	[W/m <sup>2</sup> K]	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114
Steel Studs	[W/m <sup>2</sup> K]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Junctions	[W/m <sup>2</sup> K]	0.115	0.115	0.114	0.113	0.112	0.121
<b>Total Wall</b>	<b>[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.254</b>	<b>0.253</b>	<b>0.253</b>	<b>0.252</b>	<b>0.251</b>	<b>0.259</b>

Στην Εικόνα 5.53 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό VIP, πάχους 10mm στην αεριζόμενη πρόσοψη.



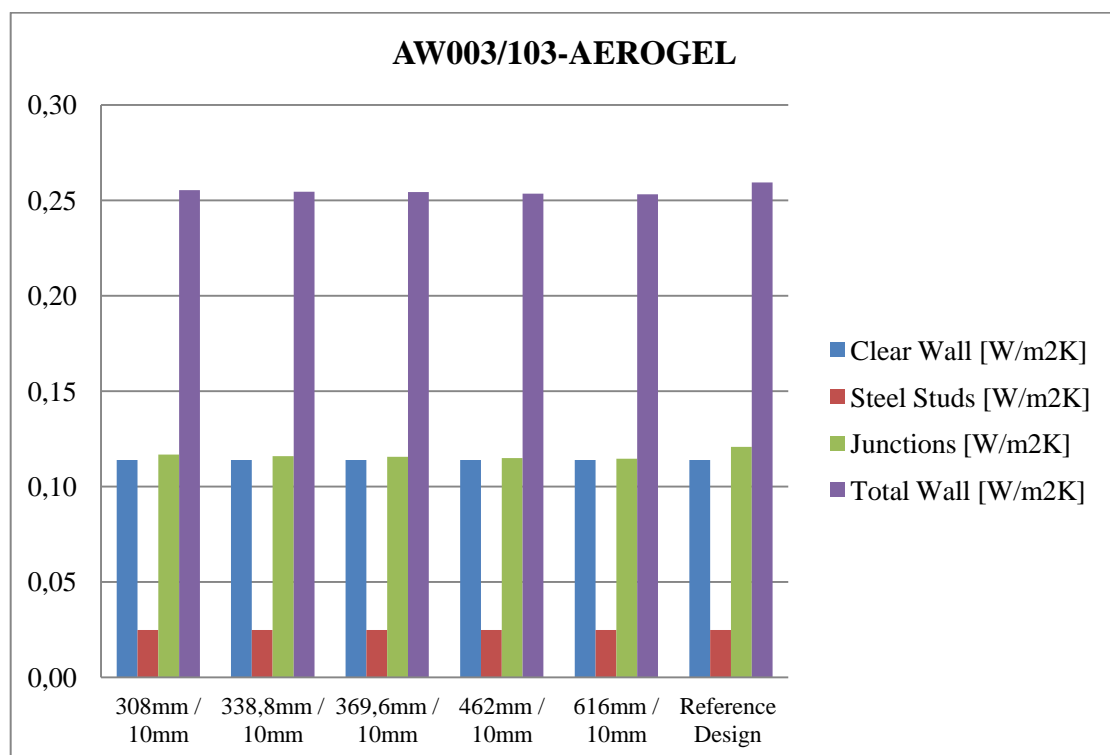
**Εικόνα 5.53: Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού VIP πάχους 10mm**

Στην Εικόνα 5.54 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό VIP, πάχους 15mm στην αεριζόμενη πρόσοψη



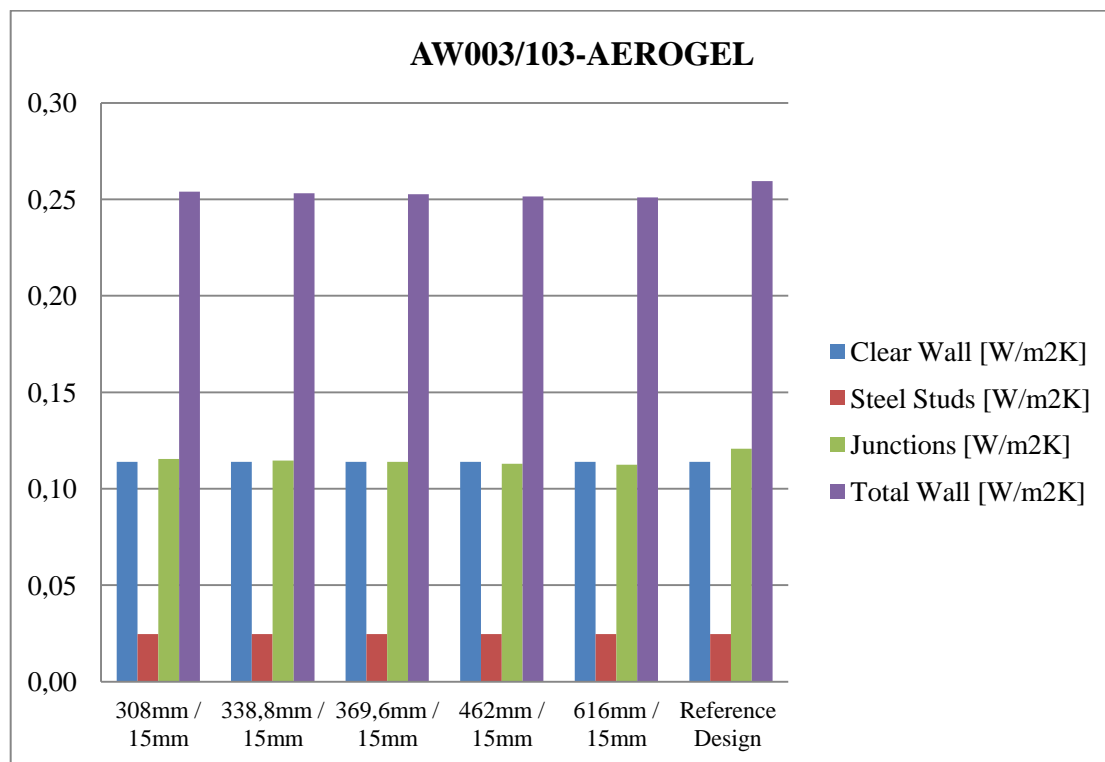
**Εικόνα 5.54:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού VIP πάχους 15mm

Στην Εικόνα 5.55 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό AEROGEL, πάχους 10mm στην αεριζόμενη πρόσοψη



**Εικόνα 5.55:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού AEROGEL πάχους 10mm

Στην Εικόνα 5.56 παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας που προέκυψαν όταν τοποθετήθηκε μονωτικό AEROGEL, πάχους 15mm στην αεριζόμενη πρόσοψη



**Εικόνα 5.56:** Απεικόνιση του συντελεστή θερμοπερατότητας της τοιχοποιίας AW003-103 με χρήση στην αεριζόμενη πρόσοψη μονωτικού AEROGEL πάχους 15mm

Το βέλτιστο αποτέλεσμα στη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας, επιτυγχάνεται και πάλι στη περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε μόνωση με VIP πάχους 15mm και μήκους 616mm. Για τη περίπτωση αυτή, το συνολικό U-value της τοιχοποιίας μειώνεται κατά 5.79%. Εάν οι μεταλλικοί ορθοστάτες καλυφθούν με μονωτικό από AEROGEL, η μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας είναι της τάξης του 3.09%.



## 6 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ

Η ενεργειακή προσομοίωση προσφέρει μια προσεγγιστική εικόνα της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου σε πραγματικές συνθήκες. Γι αυτό και αποτελεί βασικό εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων κατά την κατασκευή ή για τυχόν επεμβάσεις σε ένα υπάρχον κτίριο. Για τη μελέτη του υποθετικού κτηρίου, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο EnergyPlus.

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ EnergyPlus

Το πρόγραμμα EnergyPlus είναι ένα λογισμικό που αποσκοπεί στην προσομοίωση και την ενεργειακή ανάλυση κτιρίων. Βασίζεται στη ταυτόχρονη λειτουργία πολλών υποπρογραμμάτων τα οποία έχουν σαν σκοπό να υπολογίσουν την ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση και τη ψύξη ενός κτιρίου, χρησιμοποιώντας μια πληθώρα πληροφοριών οι οποίες και πρέπει να εισαχθούν σε αυτό. Η προσομοίωση αυτή αφορά ένα μοντέλο κτιρίου, στο οποίο και γίνονται υπολογισμοί στηριζόμενοι σε θεμελιώδεις αρχές της μεταφοράς θερμότητας

Σε λογισμικά ενεργειακής ανάλυσης, όπως το BLAST (Building Loads and Systems Thermodynamics) και το DOE-2 (Department of Energy-2), οι θερμικές ζώνες, τα συστήματα αερισμού, θέρμανσης κτλ, προσομοιώνονται διαδοχικά, χωρίς να υπάρχει κάποια ανάδραση ανάμεσα τους. Την αδυναμία αυτή λύνει το πρόγραμμα EnergyPlus, το οποίο και εφαρμόζει μεθόδους προσομοίωσης με αλληλεπίδραση και εξάγει αποτελέσματα με χρονικό βήμα λιγότερο της μιας ώρας.

### 6.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EnergyPlus

Η εξίσωση που συσχετίζει τη ροή θερμότητας σε μια επιφάνεια ενός στοιχείου με μια άπειρη σειρά θερμοκρασιών μέσα σε ένα ευρύ χρονικό διάστημα και για τις δυο της πλευρές, δίνεται από τη σχέση:

$$q_{ko}''(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad 6.1$$

όπου “q” είναι η ροή θερμότητας, “T” η θερμοκρασία, με “i” συμβολίζεται η εσωτερική πλευρά και με “o” η εξωτερική πλευρά ενός δομικού στοιχείου, με “t” το τρέχον χρονικό βήμα και “X”, “Y” οι συντελεστές απόκρισης.

Η βασική μορφή της λύσης της συνάρτησης μεταφοράς αγωγιμότητας είναι η:

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad 6.2$$

Για την ροή θερμότητας στην εσωτερική πλευρά και

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad 6.3$$

Για τη ροή θερμότητας στην εξωτερική πλευρά της επιφάνειας

$X_j$ = εξωτερικός συντελεστής συνάρτησης μεταφοράς με αγωγιμότητα,  $j= 0,1,\dots,nz$ .

$Y_j$ = διαγώνιος συντελεστής συνάρτησης μεταφοράς με αγωγιμότητα,  $j= 0,1,\dots,nz$ .

$Z_j$ = εσωτερικός συντελεστής συνάρτησης μεταφοράς με αγωγιμότητα,  $j= 0,1,\dots,nz$ .

$\Phi_j$ = συντελεστής ροής συνάρτησης μεταφοράς με αγωγιμότητα,  $j = 1,2,\dots,nq$

$T_i$ = θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας.

$T_o$ = θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας.

$q''_{ki}$ = ροή θερμικής αγωγιμότητας στην εσωτερική επιφάνεια.

$q''_{ko}$ = ροή θερμικής αγωγιμότητας στην εξωτερική επιφάνεια.

Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς των συναρτήσεων μεταφοράς με αγωγιμότητα χρησιμοποιεί τους παρακάτω πίνακες γραμμικών εξισώσεων:

$$\frac{d[x]}{dt} = [A][x] + [B][u] \quad 6.4$$

$$[y] = [C][x] + [D][u] \quad 6.5$$

όπου x είναι το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης, u είναι ένα διάνυσμα εισόδου, y το διάνυσμα εξόδου, t είναι ο χρόνος και A, B, C και D είναι οι συντελεστές πινάκων.

Η παραπάνω διατύπωση χρησιμοποιείται για την επίλυση της μεταβατικής εξίσωσης θερμικής αγωγιμότητας, με δημιουργία ενός πλέγματος πεπερασμένων διαφορών στα επιμέρους στρώματα του δομικού στοιχείου που αναλύεται. Στη περίπτωση αυτή, οι μεταβλητές κατάστασης είναι οι κομβικές θερμοκρασίες, οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος (εσωτερικές και εξωτερικές) είναι οι είσοδοι και ροές θερμότητας που προκύπτουν και στις δύο επιφάνειες είναι οι έξοδοι. Έτσι, η κατάσταση στο χώρο με τις μεταβλητές πεπερασμένων διαφορών ,παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad 6.6$$

$$\begin{bmatrix} q_i'' \\ q_o'' \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad 6.7$$

Όπου  $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}, T_n$  είναι οι πεπερασμένες διαφορές των θερμοκρασιών στους κόμβους του πλέγματος που έχουμε δημιουργήσει,  $n$  ο αριθμός των κόμβων,  $T_i$  και  $T_o$  είναι οι εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και  $q''_i$  και  $q''_o$  είναι οι ροές θερμότητας.

### 6.2.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ TARP

Η προσομοίωση του κτιρίου, έγινε βασιζόμενη στον αλγόριθμο TARP (Thermal Analysis Research Program). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, ο συνολικός συντελεστής συναγωγής θερμότητας είναι ίσος με το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών:

$$h_c = h_f + h_n \quad 6.8$$

Ο Πίνακας 6.1 περιγράφει τις μεταβλητές των στοιχείων που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό του αλγορίθμου.

Πίνακας 6.1: Περιγραφή μεταβλητών αλγορίθμου

Μεταβλητές	Περιγραφή	Μονάδες
A	Εμβαδόν επιφάνειας	m <sup>2</sup>
h <sub>c</sub>	Συντελεστής συναγωγής εξωτερικής επιφάνειας	W/m <sup>2</sup> K
h <sub>f</sub>	Συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής	W/m <sup>2</sup> K
h <sub>n</sub>	Συντελεστής φυσικής συναγωγής	W/m <sup>2</sup> k
P	Περίμετρος επιφάνειας	m
R <sub>f</sub>	Συντελεστής τραχύτητας επιφάνειας	-
T <sub>air</sub>	Εξωτερική θερμοκρασία αέρα	°C
T <sub>so</sub>	Εξωτερική θερμοκρασία επιφάνειας	°C
ΔT	Θερμοκρασιακή Διαφορά μεταξύ επιφάνειας και αέρα	°C
V <sub>z</sub>	Ταχύτητα ανέμου	m/s
W <sub>f</sub>	Συντελεστής κατεύθυνσης ανέμου	-
φ	Γωνία μεταξύ εδάφους και επιφάνειας	

Με h<sub>f</sub> αποτυπώνεται ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 6.8:

$$h_f = 2.537W_f R_f \left( \frac{PV_z}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 6.9$$

Όπου:

W<sub>f</sub>=1.0 για προσήνεμες επιφάνειες

W<sub>f</sub>=0.5 για υπήνεμες επιφάνειες

Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας R<sub>f</sub>, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα κατά ASHRAE παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Συντελεστής τραχύτητας

<b>Roughness Index</b>	<b>R<sub>f</sub></b>
1 Very Rough	2.17
2 Rough	1.67
3 Medium Rough	1.52
4 Medium Smooth	1.13
5 Smooth	1.11
6 Very Smooth	1.00

Ο συντελεστής φυσικής συναγωγής  $h_n$ , προσδιορίζεται από τον συσχετισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε μια επιφάνεια, με την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια αυτή και την θερμοκρασία της θερμικής ζώνης που εξετάζουμε (όπου  $\Delta T = \text{θερμοκρασία αέρα} - \text{θερμοκρασία επιφάνειας}$ ). Ο αλγόριθμος αυτός, προέρχεται από το εγχειρίδιο της ASHRAE (έκδοση 2001, πίνακας 5, παρ.3.12).

Για μηδενική θερμοκρασιακή διαφορά ή για κατακόρυφες επιφάνειες, χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$h = 1.31|\Delta T|^{1/3} \quad 6.10$$

Για θερμοκρασιακές διαφορές  $\Delta T < 0.0$  στις ανάντη επιφάνειες ή για  $\Delta T > 0.0$  στις κατάντη επιφάνειες, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$h = \frac{9.482|\Delta T|^{1/3}}{7.283 - |\cos\Sigma|} \quad 6.11$$

όπου  $\Sigma$  είναι η κλίση της επιφάνειας.

Για θερμοκρασιακές διαφορές  $\Delta T > 0.0$  στις ανάντη επιφάνειες ή για  $\Delta T < 0.0$  στις κατάντη επιφάνειες, χρησιμοποιείται η εξίσωση 6.12:

$$h = \frac{1,810|\Delta T|^{1/3}}{1,382 + |\cos\Sigma|} \quad 6.12$$

### 6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ EnergyPlus

Για την ενεργειακή ανάλυση του κτιρίου χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα EnergyPlus, έπρεπε αρχικά να εισαχθούν βασικά στοιχεία που θα αποτύπωναν το κτίριο σχετικά με τον σχεδιασμό και τη δομή του κελύφους του. Οι πιο σημαντικές παράμετροι αναλύονται παρακάτω.

#### 6.3.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Καταρχήν, το πρόγραμμα απαιτούσε την αναλυτική περιγραφή των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται οι επιφάνειες του κελύφους του κτιρίου. Έτσι για κάθε υλικό ξεχωριστά, έπρεπε να δοθεί η τραχύτητα του, το πάχος του, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του, η πυκνότητα του και η θερμοχωρητικότητα του (Εικόνα 6.1)

Field	Units	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Air Cavity AW001/1	Knauf Diamant 1 AW	Mineral Wool 1 AW	Knauf Diamant 2 AW	Mineral Wool 2 AW	Aquapanel Outdoor
Roughness		VerySmooth	VerySmooth	VerySmooth	VerySmooth	VerySmooth	VerySmooth
Thickness	m	0.026	0.015	0.15	0.03	0.05	0.012
Conductivity	W/m-K	0.323789334	0.582820801	0.075550845	0.582820801	0.075550845	0.789632777
Density	kg/m3	1.2	1033	65.0865943	1033	23	1150
Specific Heat	J/kg-K	1000	990	847.83533	990	850	1000

Εικόνα 6.1: Περιγραφή των υλικών των επιφανειών του κτιρίου

#### 6.3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Η αναλυτική αποτύπωση των στρώσεων των υλικών από τα οποία ήταν κατασκευασμένη κάθε επιφάνεια του κτιρίου ήταν απαραίτητη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.2.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		ASHRAE_189.1-201	AW001/101	AW003/103	AW002/102/004/1	DA101	Exterior Door	TRIPLE PANE WIN	B0001
Outside Layer		Theoretical Glass [2	Aquapanel Outdoor	Aquapanel Outdoor	Aquapanel Outdoor	Roof Sealing Film	Typical Door	CLEAR 4.6mm	Concrete Slab
Layer 2			Air Cavity AW001/1	Air Cavity AW003/1	Air Cavity AW002-1	GIFA floor load pane		ARGON 1.6mm	Knauf Diamant B01
Layer 3			Knauf Diamant 1 AW	Knauf Diamant 1 AW	Knauf Diamant 1 AW	Mineral Wool 1 DA		CLEAR 4.6mm	Mineral Wool B01C
Layer 4			Mineral Wool 1 AW	Mineral Wool 1 AW	Mineral Wool 1 AW	Knauf Diamant DA1		ARGON 1.6mm	GIFA floor load pane
Layer 5			Knauf Diamant 1 AW	Knauf Diamant 1 AW	Knauf Diamant 1 AW	Mineral Wool 2 DA		CLEAR 4.6mm	Impact Sound Insulc
Layer 6			Vip AW001-101	Vip AW003-103	Vip AW002_102_01	Knauf Diamant DA1			GIFA floor Klima
Layer 7			Mineral Wool 2 AW	Mineral Wool 2 AW	Mineral Wool 2 AW				Floor Covering
Layer 8			Knauf Diamant 2 AW	Knauf Diamant 2 AW	Knauf Diamant 2 AW				

Εικόνα 6.2: Αποτύπωση στρώσεων δομικών επιφανειών του κτιρίου

### 6.3.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Οι αναλυτικές διαστάσεις κάθε επιφάνειας, ορίζονται μέσα από τις συντεταγμένες της στον χώρο, ενώ έπρεπε να οριστεί το είδος κάθε επιφάνειας και το εάν αυτή ήταν εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά και στον άνεμο. Επιπλέον, απαραίτητος ήταν ο καθορισμός της θερμική ζώνης μέσα στην οποία βρίσκονταν κάθε επιφάνεια. Για το δεδομένο κτίριο, καμία επιφάνεια δεν χώριζε κάποια θερμική ζώνη. Στην Εικόνα 6.3, διακρίνονται οι ονομασίες των επιφανειών του κελύφους του κτιρίου, οι συντεταγμένες τους στον χώρο και η θερμική ζώνη μέσα στις οποίες βρίσκονται.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
<b>Name</b>		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5	Surface 6
<b>Surface Type</b>		Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof
<b>Construction Name</b>		B0001	Aw002/102/004/1	Aw002/102/004/1	Aw003/103	Aw001/101	DA101
<b>Zone Name</b>		Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1	Thermal Zone 1
<b>Outside Boundary Condition</b>		Ground	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
<b>Outside Boundary Condition Object</b>							
<b>Sun Exposure</b>		NoSun	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
<b>Wind Exposure</b>		NoWind	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
<b>View Factor to Ground</b>							
<b>Number of Vertices</b>							
<b>Vertex 1 X-coordinate</b>	m	4.267	0	4.267	0	4.267	4.267
<b>Vertex 1 Y-coordinate</b>	m	2.387	2.387	0	0	2.387	0
<b>Vertex 1 Z-coordinate</b>	m	0	4.591	4.591	4.591	4.591	4.591
<b>Vertex 2 X-coordinate</b>	m	4.267	0	4.267	0	4.267	4.267
<b>Vertex 2 Y-coordinate</b>	m	0	2.387	0	0	2.387	2.387
<b>Vertex 2 Z-coordinate</b>	m	0	0	0	0	0	4.591
<b>Vertex 3 X-coordinate</b>	m	0	0	4.267	4.267	0	0
<b>Vertex 3 Y-coordinate</b>	m	0	0	2.387	0	2.387	2.387
<b>Vertex 3 Z-coordinate</b>	m	0	0	0	0	0	4.591
<b>Vertex 4 X-coordinate</b>	m	0	0	4.267	4.267	0	0
<b>Vertex 4 Y-coordinate</b>	m	2.387	0	2.387	0	2.387	0
<b>Vertex 4 Z-coordinate</b>	m	0	4.591	4.591	4.591	4.591	4.591

Εικόνα 6.3: Ορισμός, συντεταγμένες και θερμικές ζώνες επιφανειών

Με παρόμοιο τρόπο, έπρεπε να αποτυπωθούν και τα ανοίγματα του κτιρίου όπως φαίνεται και από την Εικόνα 6.4.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Sub Surface 1	Sub Surface 2	Sub Surface 3	Sub Surface 4
Surface Type		Door	Door	Window	Window
Construction Name		Exterior Door	Exterior Door	TRIPLE PANE WIN	TRIPLE PANE WIN
Building Surface Name		Surface 4	Surface 4	Surface 5	Surface 5
Outside Boundary Condition Object					
View Factor to Ground					
Shading Control Name					
Frame and Divider Name					
Multiplier					
Number of Vertices					
Vertex 1 X-coordinate	m	1.1	1.1	3.167	3.167
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0	2.387	2.387
Vertex 1 Z-coordinate	m	2	4.275	2	4.275
Vertex 2 X-coordinate	m	1.1	1.1	3.167	3.167
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	2.387	2.387
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	2.275	1	3.275
Vertex 3 X-coordinate	m	2	2	2.167	2.167
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	0	2.387	2.387
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	2.275	1	3.275
Vertex 4 X-coordinate	m	2	2	2.167	2.167
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	0	2.387	2.387
Vertex 4 Z-coordinate	m	2	4.275	2	4.275

Εικόνα 6.4: Ορισμός, συντεταγμένες ανοιγμάτων

### 6.3.4 ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Η διαφορά πίεσης μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού χώρου του κτιρίου, που προκαλείται είτε από την πρόσπτωση του ανέμου σε αυτό σε συνδυασμό με την αεροδυναμική συμπεριφορά του κτιρίου, που από διαφορές θερμοκρασίας, οδηγούν σε απώλειες αερισμού στο κτίριο και διείσδυση αέρα από της χαραμάδες και τα ανοίγματα του.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα EnergyPlus έτσι ώστε να προσδιορισθεί η διείσδυση του αέρα στο κτίριο φαίνεται στην εξίσωση 6.13

$$Infiltration = (I_{design})(F_{schedule}) [A + B(T_{zone} - T_{odb}) + C(Windspeed) + D(Windspeed^2)] \quad 6.13$$

Όπου:

**I<sub>design</sub>**, η παροχή όγκου του εξωτερικού αέρα (τιμή σχεδιασμού)

**F<sub>schedule</sub>**, ένας συντελεστής (από 0 ως 1) χρήσης του αερισμού που καθορίζεται για κάθε ώρα της ημέρας του χρόνου

**Windspeed**, η ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή στην οποία είναι κατασκευασμένο το κτίριο

**T<sub>zone</sub>**, η θερμοκρασία του χώρου της θερμικής ζώνης



$T_{odb}$ , είναι η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του περιβάλλοντος  
**A, B, C, D**, σταθερές

Για το υπό εξέταση κτήριο, οι τιμές των σταθερών A,B,C,D ελήφθησαν 0, 0, 0.224(Windspeed) και 0 όπως χρησιμοποιούνται και από το λογισμικό DOE-2, τον προκάτοχο του EnergyPlus. Οι τιμές του DOE-2 προκύπτουν από το αντίστοιχο κεφάλαιο για τον αερισμό των κτιρίων του εγχειριδίου της ASHRAE. Στην Εικόνα 6.5 διακρίνονται οι απαραίτητες παράμετροι για τον προσδιορισμό της ανανέωσης του αέρα στο κτίριο.

Field	Units	Obj1
Schedule Name		Air Infiltration
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s	
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2	
Air Changes per Hour	1/hr	0.2
Constant Term Coefficient		0
Temperature Term Coefficient		0
Velocity Term Coefficient		0.224
Velocity Squared Term Coefficient		0

Εικόνα 6.5: Παράμετροι για την ανανέωση του αέρα στο κτίριο

#### 6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ( $\lambda_{eff}$ ). Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΟΝΩΣΗΣ ΜΕ ΣΑΝΙΔΕΣ ΚΕΝΟΥ.

Ο υπολογισμός των θερμικών ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της τοιχοποιίας, του δαπέδου και της οροφής, του υπό εξέταση κτιρίου, έγινε λαμβάνοντας υπόψη τιμές που ελήφθησαν ύστερα από εργαστηριακές μετρήσεις μέσω της μεθόδου Guarded Hot Plate (GHP) [35].

Αντίστοιχα, ο ισοδύναμος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των σανίδων κενού, συμπεριλαμβανομένου και της θερμογέφυρας που δημιουργείται στα όρια δύο γειτονικών σανίδων (edge effect), υπολογίστηκε βασιζόμενος στη παρακάτω μέθοδο όπως περιγράφεται και στη βιβλιογραφία.[36]

Ειδικότερα, για τη κάθε σανίδα από VIP που χρησιμοποιήθηκε, ο ισοδύναμος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με βάση την εξίσωση 6.14:

$$\lambda_{\text{eff,VIP}} = \lambda_{\text{cop}} + \Psi_{\text{VIP}} d_{\text{VIP}} \frac{P_{\text{VIP}}}{A_{\text{VIP}}} \quad 6.14$$

όπου:

$\lambda_{\text{cop}} [W/mK]$ , ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στο κέντρο του πάνελ του VIP

$\Psi [W/mK]$ , ο γραμμικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πάνελ του VIP

$d(m)$ , το πάχος της σανίδας VIP

$P_{\text{VIP}}(m)$ , η περίμετρος της σανίδας του VIP

$A_{\text{VIP}}(m^2)$ , το εμβαδόν της επιφάνειας της σανίδας του VIP

Λαμβάνοντας υπόψη πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στο κέντρο του VIP είναι ίσος με  $0.007W/mK$ , ο γραμμικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του είναι  $0.0078W/mK$  [14], το πάχος του  $2cm$ , η περίμετρος του  $3.2m$ , ο ισοδύναμος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μονωτικής σανίδας προέκυψε ίσος με  $\lambda_{\text{eff,VIP}} = \mathbf{0.007832W/mk}$ .

Τοποθετώντας τις μονωτικές σανίδες κενού στις εξωτερικές τοιχοποιίες, λόγω των γραμμικών θερμογεφυρών, έπρεπε να υπολογιστεί ο συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των VIP σε ολόκληρη τη τοιχοποιία (pattern). Υπολογίζοντας το συνολικό μήκος των γειτνιαζόντων μονωτικών σανίδων κενού, βρέθηκε το συνολικό μήκος των θερμογεφυρών και στη συνέχεια γνωρίζοντας το γραμμικό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των VIP, υπολογίστηκε ο συνολικός συντελεστής των μονωτικών σανίδων κενού για ολόκληρη την επιφάνεια της τοιχοποιίας.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η θερμική αντίσταση και ο συντελεστής θερμοπερατότητας της στρώσης του VIP σε ολόκληρες τις επιμέρους τοιχοποιίες του κελύφους του κτιρίου φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

VIP pattern				
Wall Assembly	A(m <sup>2</sup> )	kvip pattern (W/mK)	R-value (m <sup>2</sup> K/W)	Uvip pattern (W/m <sup>2</sup> K)
AW001/101	16.763	0.007589	2.636	0.379
AW003/103	15.163	0.007648	2.615	0.382
AW002/102-004/104	10.959	0.007498	2.667	0.375

Πίνακας 6.3: Ιδιότητες της συνολικής στρώσης του VIP στις τοιχοποιίες

## 6.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΟΡΘΟΣΤΑΤΩΝ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ.- ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΕΣ.

Η παρουσία μεταλλικών στοιχείων εντός των μονωτικών στοιχείων που καλύπτουν μια τοιχοποιία συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη κατά του υπολογισμούς που αφορούν τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου, καθώς η επίδραση των μεταλλικών στοιχείων έχει ελάχιστη επίδραση στο σύνολο των θερμικών απωλειών που εμφανίζονται στο κέλυφος του. Παρόλα αυτά, αγνοώντας την επίδραση των μεταλλική στοιχείων, υπάρχει η πιθανότητα να υπερεκτιμηθεί η θερμική αντίσταση του κελύφους του κτιρίου. Γι αυτό κρίθηκε σκόπιμο, προκειμένου να προκύψουν ακριβέστερα αποτελέσματα, να μην παραβλεφθεί η συνεισφορά των μεταλλικών ορθοστατών στη συνολική θερμική συμπεριφορά του κελύφους του.

Οι μεταλλικοί ορθοστάτες, καλύπτονται από τη στρώση του πετροβάμβακα στη μόνωση της τοιχοποιίας του κτιρίου. Βασιζόμενοι στη θεωρία της «Μεθόδου Ισοδύναμης Τοιχοποιίας» (Equivalent Wall Method) υπολογίστηκε η πυκνότητα και η θερμοχωρητικότητα του σύνθετου αυτού υλικού ακολουθώντας τη μέθοδο «Σύνθετων Θερμικών Ιδιοτήτων» (CTP method). Σύμφωνα με τη αυτή, τα σύνθετα υλικά απλοποιούνται και θεωρούνται ένα ενιαίο στο οποίο και υπολογίζουμε τις ιδιότητες του.

Για ένα σύνθετο υλικό, το οποίο και αποτελείται από επιμέρους υλικά με διαφορετικές πυκνότητες ( $\rho_i$ ), η συνολική του πυκνότητα του μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 6.14:

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i \quad 6.14$$

Όπου:

$\rho_s$  Η πυκνότητα του σύνθετου υλικού ( $\text{kg/m}^3$ )

$\varphi_i$  Το ογκομετρικό κλάσμα του υλικού  $i$

$\rho_i$  η πυκνότητα του υλικού  $i$  ( $\text{kg/m}^3$ )

Θεωρώντας τη πυκνότητα των μεταλλικών ορθοστατών ίση με  $\rho_{\text{steel}} = 7800 \text{kg/m}^3$  και τη πυκνότητα του πετροβάμβακα ίση με  $\rho_{\text{mineral wool}} = 23 \text{kg/m}^3$ , υπολογίστηκε το ογκομετρικό κλάσμα των μεταλλικών ορθοστατών και του πετροβάμβακα, αντίστοιχα για τη κάθε μια τοιχοποιία ξεχωριστά όπως και για το δάπεδο και την οροφή του κτιρίου.

Έτσι η πυκνότητα του σύνθετου υλικού υπολογίστηκε από την εξίσωση 6.15:

$$\rho_{\text{mineral wool + studs}} = \varphi_{\text{studs}} \rho_{\text{steel}} + \varphi_{\text{mineral wool}} \rho_{\text{mineral wool}} \quad 6.15$$

Η θερμοχωρητικότητα των υλικών ήταν  $C_{p_{\text{steel}}} = 450 \text{ J/KgK}$  και  $C_{p_{\text{mineral wool}}} = 850 \text{ J/KgK}$ .

Επομένως, η θερμοχωρητικότητα του σύνθετου υλικού για κάθε μια από τις επιφάνειες είναι:

$$C_{p_{\text{mineral wool + studs}}} = \varphi_{\text{studs}} C_{p_{\text{steel}}} + \varphi_{\text{mineral wool}} C_{p_{\text{mineral wool}}} \quad 6.16$$

Ο Πίνακας 6.4, παρουσιάζει αναλυτικά τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού (πετροβάμβακας και μεταλλικοί ορθοστάτες) για κάθε μια τοιχοποιία ξεχωριστά, για το δάπεδο και την οροφή του κτιρίου.

**Πίνακας 6.4: Ιδιότητες σύνθετου υλικού για κάθε στοιχείο του κελύφους του κτιρίου.**

<b>Layer Mineral Wool+Studs</b>		
	<b><math>\rho</math> (mineral wool +studs ) (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	<b>Specific Heat Capacity <math>C_p</math> (J/kgK)</b>
<b>AW001-101</b>	63.452	847.919
<b>AW003-103</b>	58.029	848.198
<b>AW004-104</b>	78.632	847.138
<b>AW002-102</b>	78.632	847.138
<b>DA101</b>	55.432	848.331
<b>BO001</b>	55.432	848.331

## 6.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EnergyPlus-ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.

Καθώς το πρόγραμμα EnergyPlus εξετάζει τα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας ως μονοδιάστατα, έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος ώστε να εισαχθούν οι γραμμικές (2D) και οι σημειακές γεωμετρικές (3D) θερμογέφυρες στην ενεργειακή μελέτη του κτηρίου. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στη δημιουργία μιας ισοδύναμης τοιχοποιίας, η οποία εκτός από τη θερμική διαπερατότητα των υλικών της κάθε επιφάνειας θα περιελάμβανε και την αντίστοιχη θερμική διαπερατότητα των γεωμετρικών θερμογεφυρών. Κατά αυτόν τον τρόπο θα υπολογιζόταν και καινούργια ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα κάθε υλικού ξεχωριστά.

Για κάθε επιφάνεια του κελύφους του κτηρίου από την εξίσωση 2.14 του κεφαλαίου 2.4 υπολογίζεται η ισοδύναμη θερμοπερατότητας της  $U_{eff}$  της επιφάνειας (η οποία συμπεριλαμβάνει όλες της θερμογέφυρες). Συνεπώς η ισοδύναμη θερμική αντίστασή της θα είναι:

$$R_{eff} = \frac{1}{U_{eff}} \quad 6.17$$

Χωρίς να εξετάζουμε την επίδραση των θερμογεφυρών σε κάθε επιφάνεια η συνολική της θερμική αντίσταση είναι:

$$R_{total} = \frac{1}{U_{clear}} \quad 6.18$$

Επομένως πλέον για κάθε στρώση του υλικού της επιφάνειας ξεχωριστά η νέα θερμική του αντίσταση θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{new} = \frac{R_{layer}}{R_{total}} \times R_{eff} \quad 6.19$$

Όπου  $R_{layer}$  η αρχική θερμική αντίσταση (χωρίς της θερμογέφυρες) του κάθε υλικού ξεχωριστά.

## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ

Συνεπώς, ο ισοδύναμος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της κάθε μιας στρώσης υλικού στη συνολική επιφάνεια θα είναι:

$$K_{new} = \frac{R_{new}}{d_{layer}} \quad 6.20$$

Όπου  $d_{layer}$  το πάχος του κάθε υλικού ξεχωριστά

## 7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΚΤΙΡΙΟΥ

Η προσομοίωση του υπό μελέτη κτηρίου, πραγματοποιήθηκε για τέσσερις διαφορετικές περιοχές και για χρονική διάρκεια ενός έτους, επιδιώκοντας έτσι να εξεταστεί η ενεργειακή συμπεριφορά του σε ένα εύρος χαρακτηριστικών κλιματικών συνθηκών (Αθήνα, Φρανκφούρτη, Χονγκ Κονγκ και Στοκχόλμη). Για να μελετηθεί η συνεισφορά των μονωτικών σανίδων κενού, υποθέσαμε δυο σενάρια μόνωσης του κελύφους του κτιρίου. Με και χωρίς μονωτικές σανίδες κενού. Επιπλέον για τη περιοχή της Στοκχόλμης, έγιναν επιμέρους υπολογισμοί βασιζόμενοι στις παρεμβάσεις της παραγράφου 4.3.5 για το κέλυφος του κτιρίου.

### 7.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΘΗΝΑΣ

Οι ενεργειακές καταναλώσεις για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου για τη χρονική διάρκεια ενός έτους, με και χωρίς μονωτικές σανίδες κενού, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 και τον

Πίνακα 7.2. Υπολογίστηκαν οι περιπτώσεις αρχικά χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι θερμογέφυρες εξαιτίας των μεταλλικών ορθοστατών και των γραμμικών και σημειακών θερμογεφυρών, έπειτα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των θερμογεφυρών των μεταλλικών ορθοστατών, κατόπιν των γραμμικών και των σημειακών θερμογεφυρών και τελικά όλων των παραπάνω θερμογεφυρών μαζί.

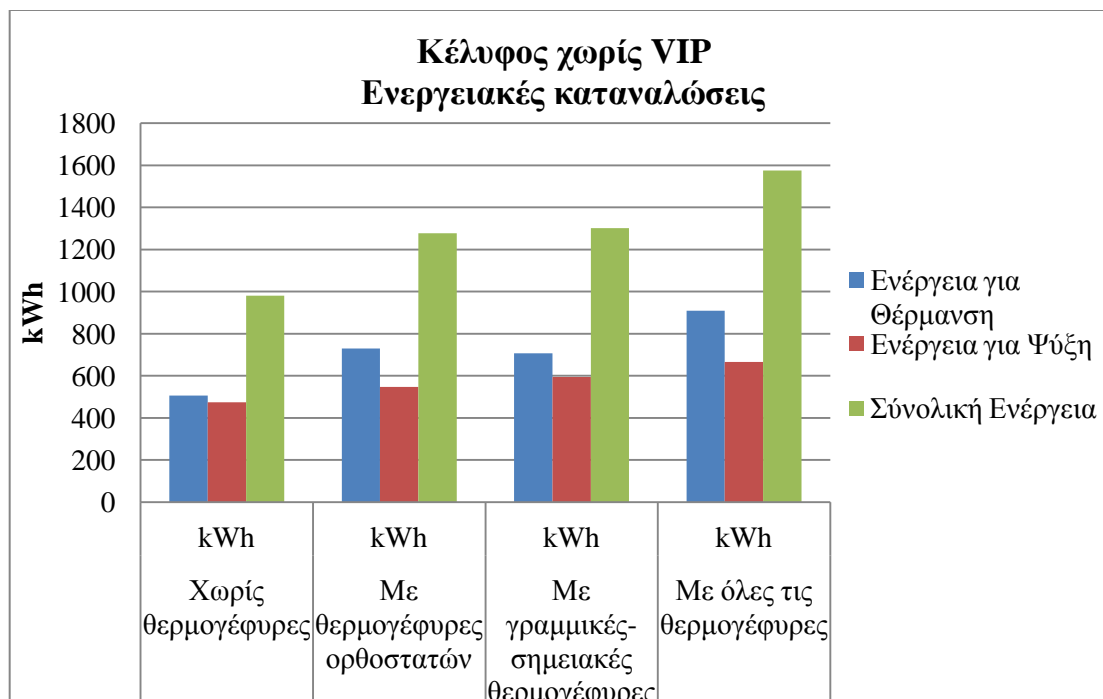
Πίνακας 7.1: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου χωρίς VIP

Κέλυφος χωρίς VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	506	474	980
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	730	548	1277
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	707	594	1301
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	909	666	1575

Πίνακας 7.2: Ενεργειακές καταναλώσεις για κελύφος κτιρίου με VIP

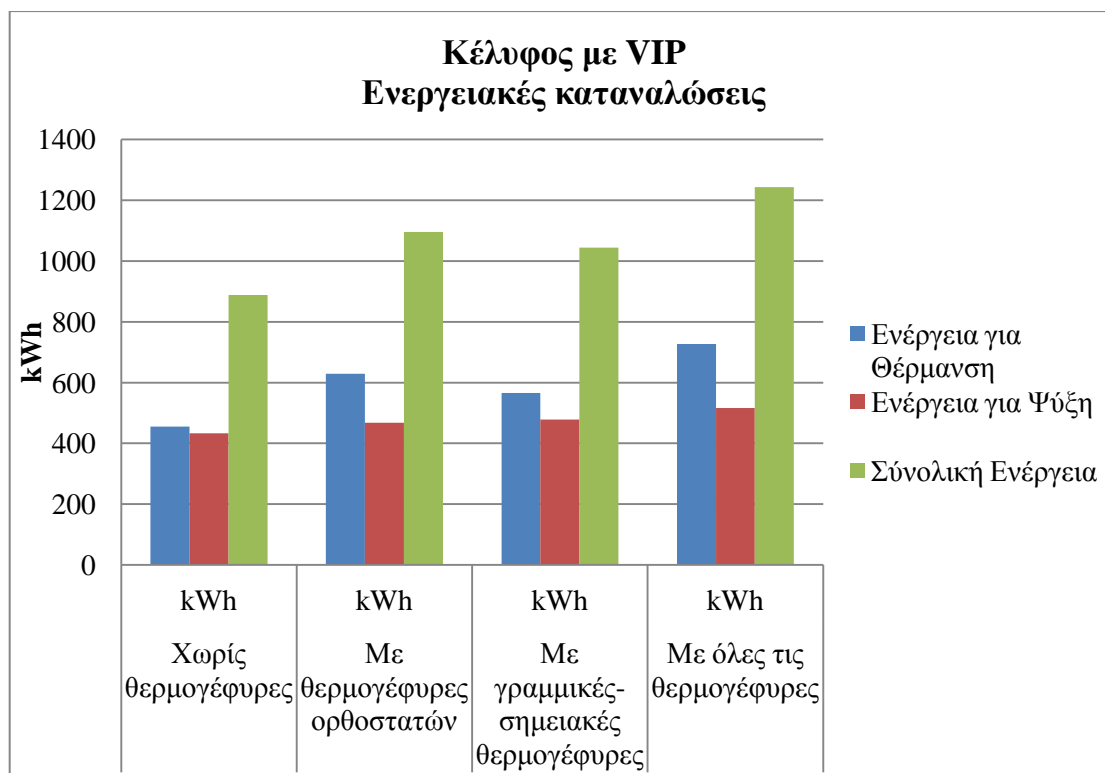
Κέλυφος με VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	455	434	888
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	629	467	1096
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	566	478	1044
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	727	516	1243

Το αντίστοιχο συγκριτικό διάγραμμα των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων του κτηρίου, φαίνεται στην Εικόνα 7.1 για μόνωση του κελύφους χωρίς VIP, ενώ στην Εικόνα 7.2 παρουσιάζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις για όταν έχουν τοποθετηθεί VIP.



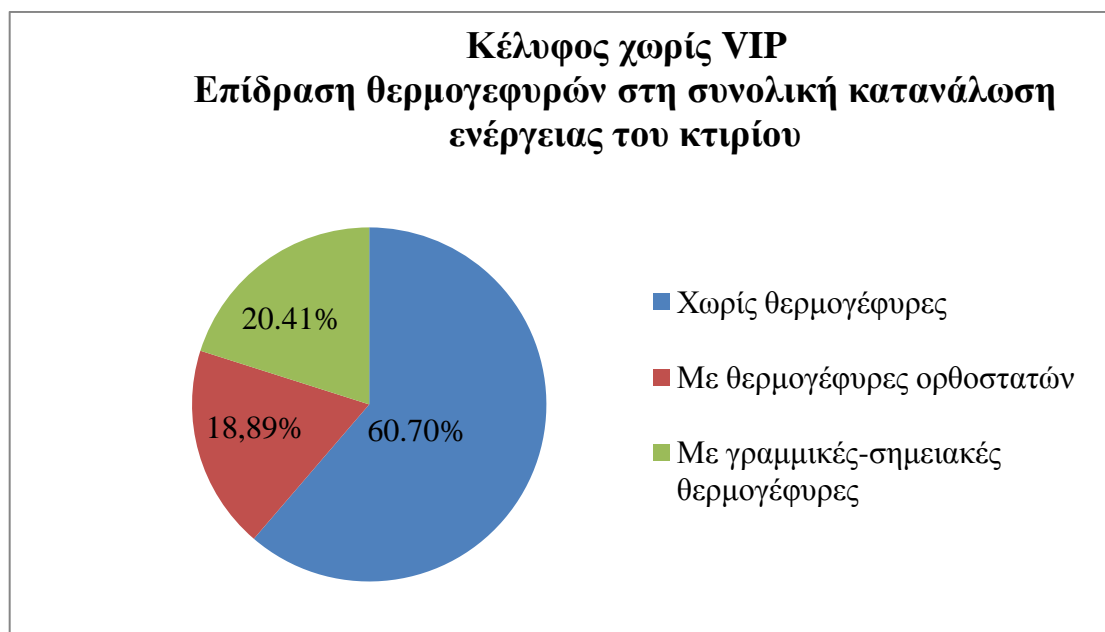
Εικόνα 7.1: Ενεργειακές καταναλώσεις για κελύφος κτιρίου χωρίς VIP



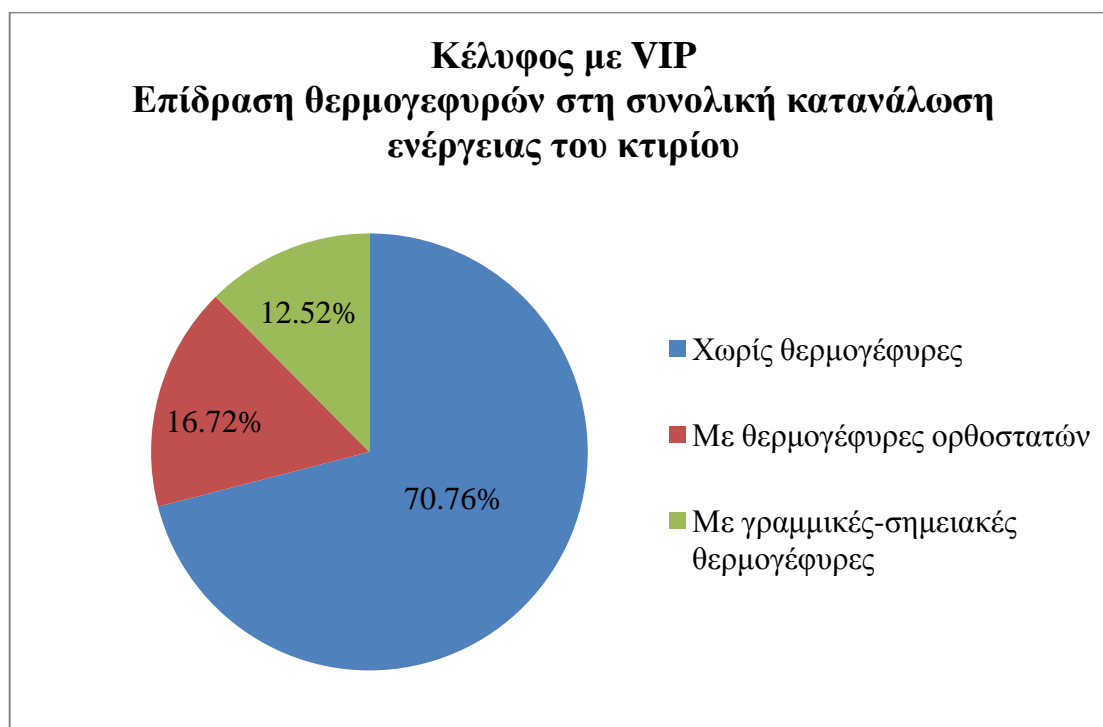


Εικόνα 7.2: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου με VIP

Η «συνεισφορά» των θερμογεφυρών στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου δίνεται ποσοστιαία από τα διαγράμματα στην Εικόνα 7.3 και Εικόνα 7.4 για κέλυφος χωρίς και με VIP αντίστοιχα.

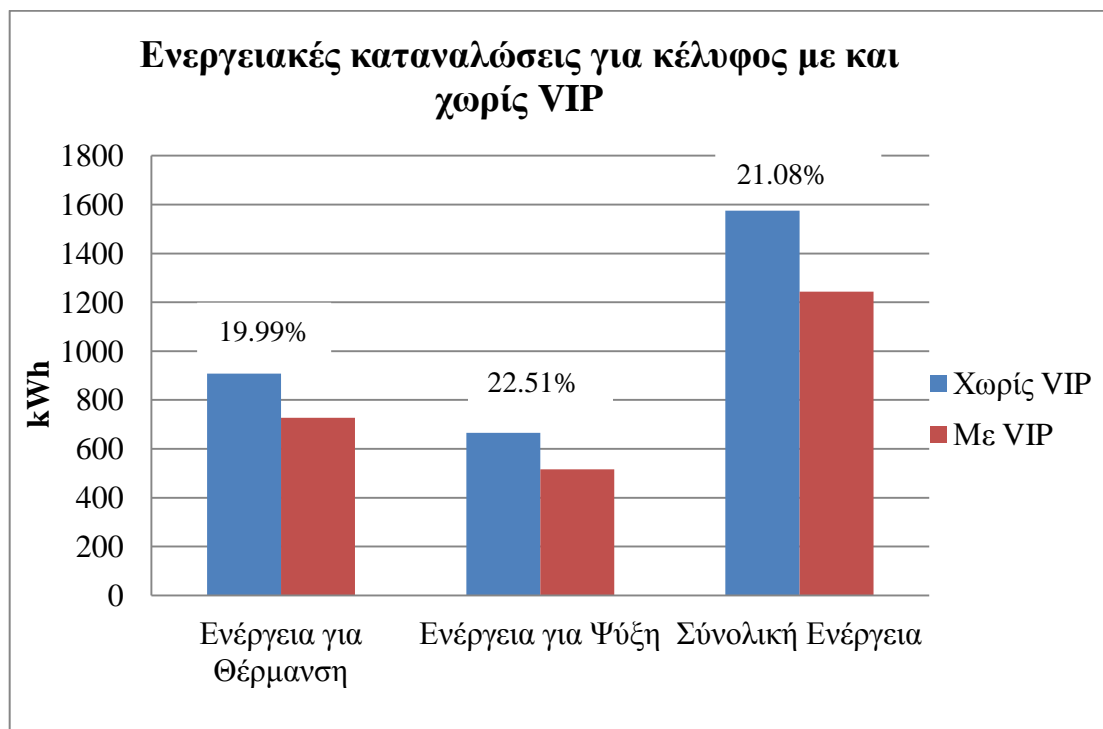


Εικόνα 7.3: Συνεισφορά θερμογεφυρών στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου για κέλυφος χωρίς VIP



**Εικόνα 7.4:** Συνεισφορά θερμογεφυρών στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου για κέλυφος με VIP

Στην Εικόνα 7.5 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες διαφορές στις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη αλλά και συνολικά όταν χρησιμοποιήσουμε στο κέλυφος του, μονωτικές σανίδες κενού.



Εικόνα 7.5: Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων κτιρίου για κέλυφος με και χωρίς VIP για τη περιοχή της Αθήνας

Παρατηρούμε πως, για διάστημα ενός έτους, προσθέτοντας στη θερμομόνωση του κτιρίου VIP, οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση μειώνονται κατά 19.99%, και για ψύξη 22.51%. Συνολικά δηλαδή έχουμε μια μείωση στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου περίπου της τάξης του 20%.

## 7.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΦΡΑΝΚΦΟΥΡΤΗΣ

Οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη στο κτήριο, χωρίς VIP τοποθετημένα στους τοίχους του, για τη περιοχή της Φρανκφούρτης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου χωρίς VIP

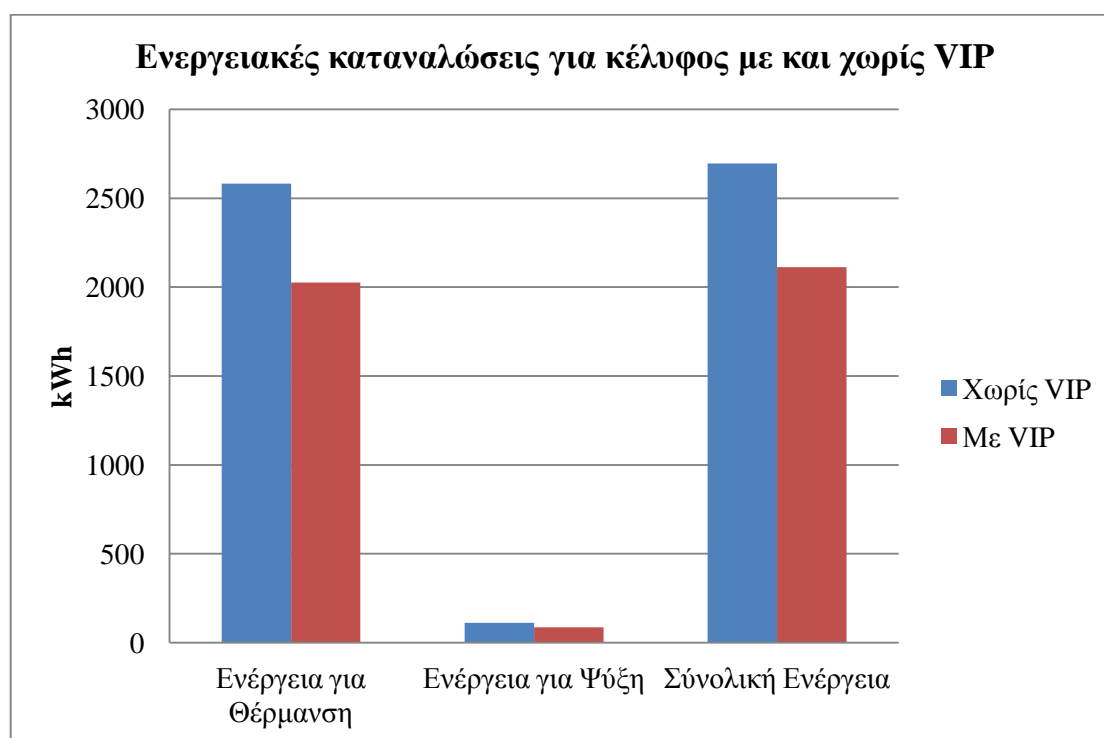
Κέλυφος χωρίς VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	1575	80	1655
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	2329	101	2429
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	2131	100	2231
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	2582	113	2695

Αντίστοιχα, η ενεργειακή κατανάλωση όταν στο κέλυφος του κτηρίου τοποθετηθούν VIP παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.4

Πίνακας 7.4: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου με VIP

Κέλυφος με VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	1412	76	1488
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	1755	81	1836
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	1704	81	1784
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	2025	87	2112

Οι διαφορές στις ενεργειακές καταναλώσεις με και χωρίς VIP στο κέλυφος του κτηρίου είναι, παριστάνονται στην Εικόνα 7.6



Εικόνα 7.6: Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων για κέλυφος κτηρίου με και χωρίς VIP για τη περιοχή της Φρανκφούρτης

Η ενέργεια που απαιτείται για τον δροσισμό του κτιρίου κατά τους θερινούς μήνες είναι ιδιαίτερα χαμηλή αφού στη Φρανκφούρτη οι ημέρες κατά την οποία η

θερμοκρασία είναι πάνω από 24°C, θερμοκρασία που έχουμε ρυθμίσει να λειτουργεί ο κλιματισμός του κτιρίου, είναι ελάχιστες.

Η διαφορά στην ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου, όταν τοποθετηθούν σε αυτό μονωτικές σανίδες κενού, είναι 583 kWh, δηλαδή έχουμε εξοικονόμηση της τάξης του 21.63%.

### 7.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΟΝΓΚ ΚΟΝΓΚ

Η περιοχή του Χονγκ Κονγκ επιλέχθηκε προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των VIP σε κλιματικές συνθήκες σχετικά υψηλών θερμοκρασιών και υγρασίας. Όπως και για τις προηγούμενες τοποθεσίες, εξετάστηκαν παρόμοια σενάρια για τη μόνωση του κελύφους του κτηρίου .

Έτσι, όταν στις τοιχοποιίες του κτηρίου δεν έχουν τοποθετηθεί VIP, οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου φαίνονται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου χωρίς VIP

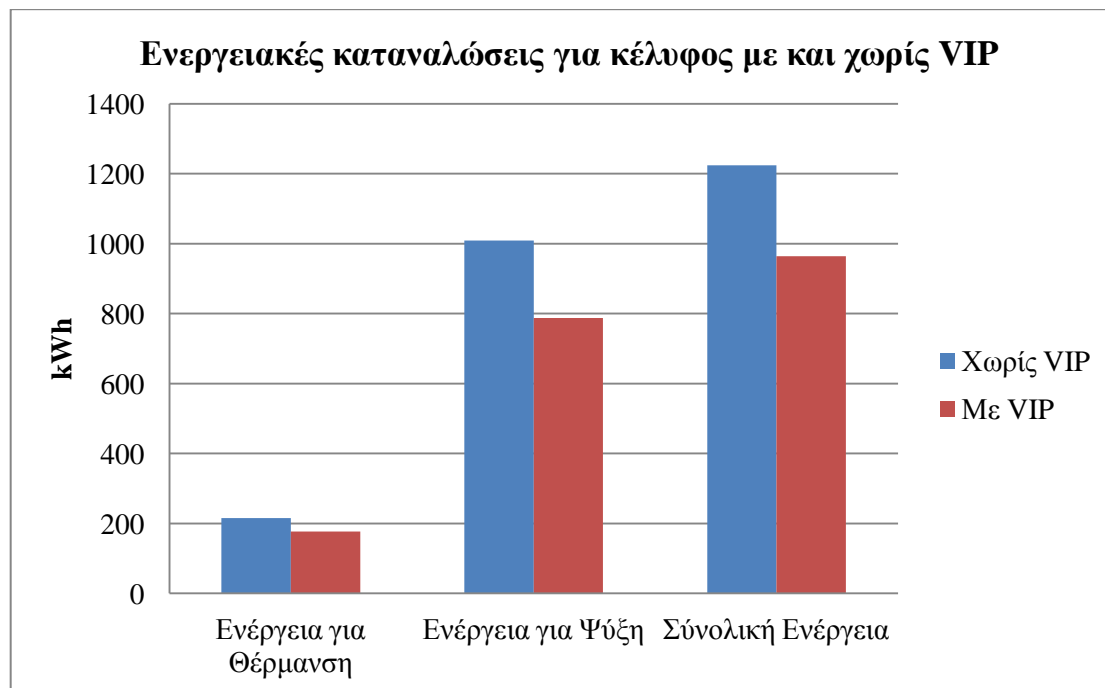
Κέλυφος χωρίς VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	91	771	861
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	165	849	1014
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	146	938	1083
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	215	1009	1224

Όταν τοποθετηθούν μονωτικές σανίδες κενού στην τοιχοποιία, τότε οι ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6

Πίνακας 7.6: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου με VIP

Κέλυφος με VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	79	708	787
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	145	724	869
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	114	769	882
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	177	788	965

Οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις μόνωσης του κελύφους του, φαίνονται στην Εικόνα 7.7



Εικόνα 7.7: Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων κτιρίου για κέλυφος με και χωρίς VIP για τη περιοχή του Χονγκ Κονγκ

Η ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση και τον δροσισμό του κτηρίου, στη περίπτωση που τοποθετήσουμε στο κέλυφος του VIP, μειώνεται κατά 21.2%.

#### 7.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΤΟΚΧΟΛΜΗΣ

Η τελευταία περιοχή που δοκιμάστηκε το υπό μελέτη κτήριο, ήταν η περιοχή της Στοκχόλμης. Οι ενεργειακές καταναλώσεις για μόνωση των τοίχων χωρίς VIP δίνονται στον Πίνακα 7.7

Πίνακας 7.7: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου χωρίς VIP

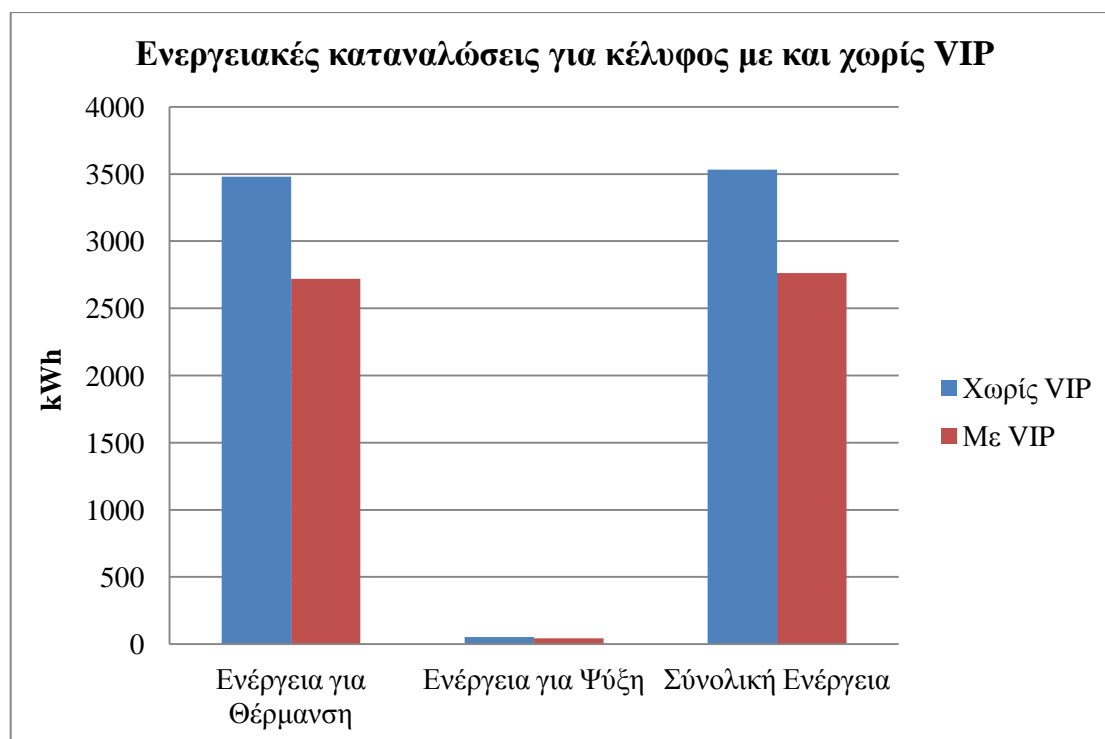
Κέλυφος χωρίς VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	2140	35	2175
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	2797	39	2836
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	2892	41	2933
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	3480	52	3532

Στον Πίνακα 7.8 φαίνονται οι ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου όταν τοποθετηθούν στο κέλυφος του σανίδες VIP.

Πίνακας 7.8: Ενεργειακές καταναλώσεις για κέλυφος κτιρίου με VIP

Κέλυφος με VIP-Ετήσια κατανάλωση ενέργειας				
Υπό εξέταση περιπτώσεις		Ενέργεια για Θέρμανση	Ενέργεια για Ψύξη	Συνολική Ενέργεια
Χωρίς θερμογέφυρες	kWh	1915	34	1949
Με θερμογέφυρες ορθοστατών	kWh	2347	35	2382
Με γραμμικές-σημειακές θερμογέφυρες	kWh	2302	36	2338
Με όλες τις θερμογέφυρες	kWh	2719	43	2762

Στην Εικόνα 7.8 συγκρίνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου με και χωρίς VIP τοποθετημένα στη μόνωση του.

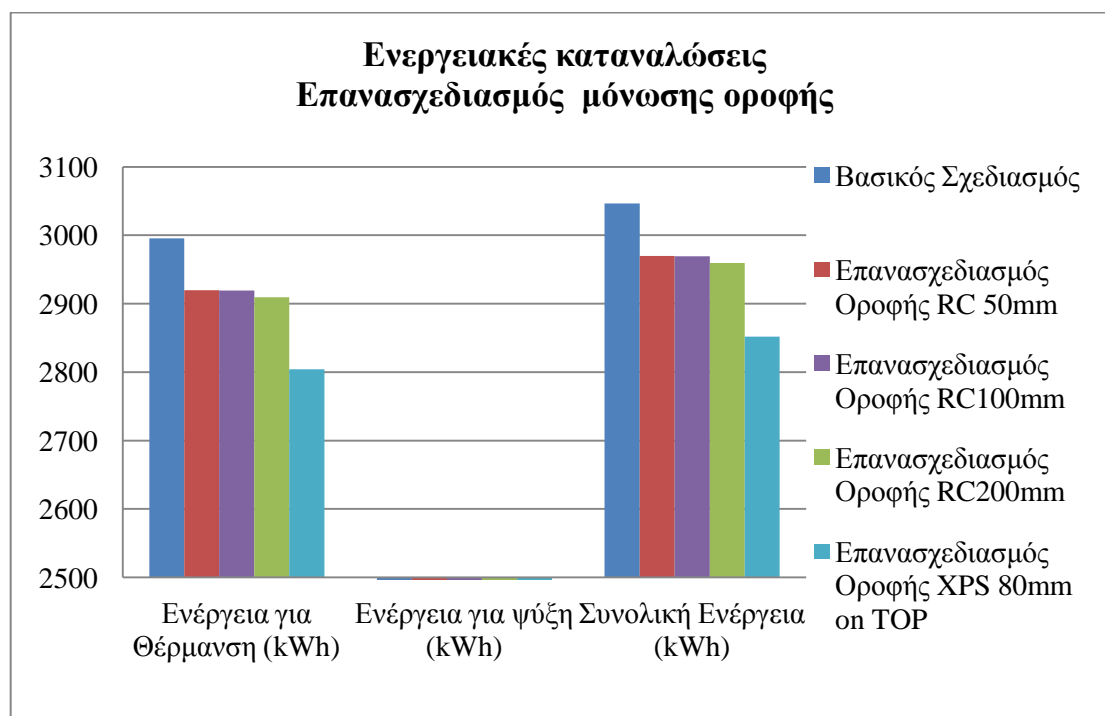


Εικόνα 7.8: Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων κτιρίου για κέλυφος με και χωρίς VIP για τη περιοχή της Στοκχόλμης

## 7.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ

Για τη περίπτωση μελέτης του κτηρίου στη περιοχή της Στοκχόλμης, εκτός από την εξομοίωση που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα EnergyPlus για την τυπική περίπτωση της μόνωσης του κελύφους του με και χωρίς VIP, εξετάστηκαν και οι περιπτώσεις των βελτιώσεων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.2.5, οι οποίες αφορούσαν παρεμβάσεις στη κατασκευαστική δομή του κτηρίου προκειμένου να επιτύχουμε μείωση στις ενεργειακές του απαιτήσεις.

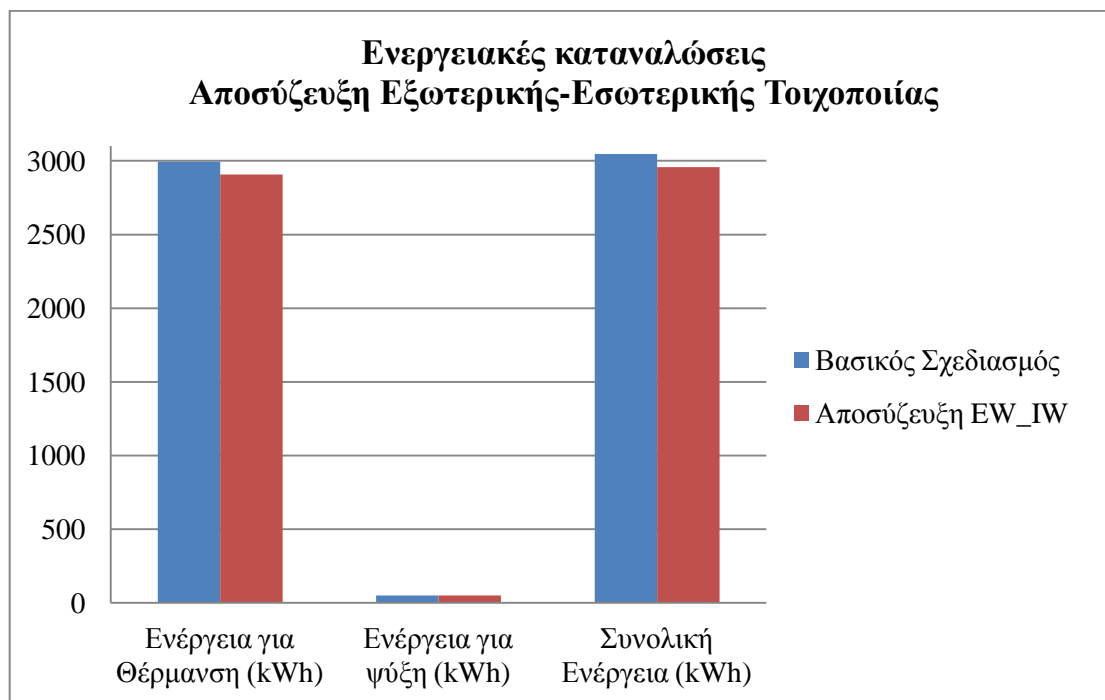
Στην Εικόνα 7.9 παρουσιάζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου έπειτα από τον επανασχεδιασμό της μόνωσης στην οροφή του.



**Εικόνα 7.9:** Ενεργειακές καταναλώσεις ύστερα από τον επανασχεδιασμό της μόνωσης στην οροφή του κτιρίου

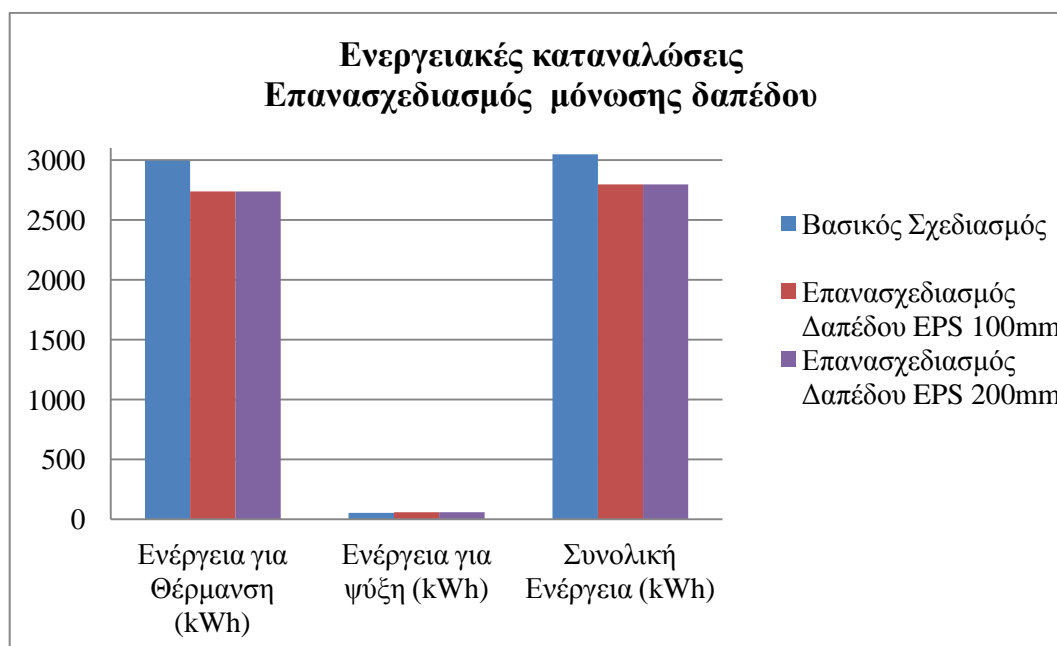
Οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου ύστερα από την αποσύζευξη της εξωτερικής και της εσωτερικής τοιχοποιίας, σε σχέση με τη περίπτωση του βασικού σχεδιασμού του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.10





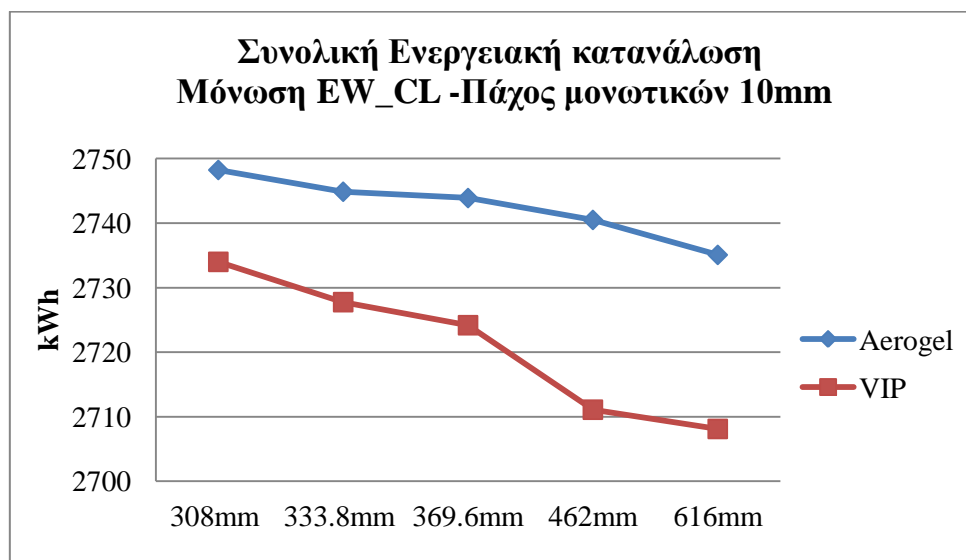
**Εικόνα 7.10:** Ενεργειακές καταναλώσεις ύστερα από την αποσύζευξη της Εξωτερικής με την Εσωτερική τοιχοποιία του κτιρίου

Οι ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου έπειτα από τον επανασχεδιασμό της μόνωσης του δαπέδου, με τοποθέτηση EPS πάχους 100mm και 200mm φαίνονται στην Εικόνα 7.11.



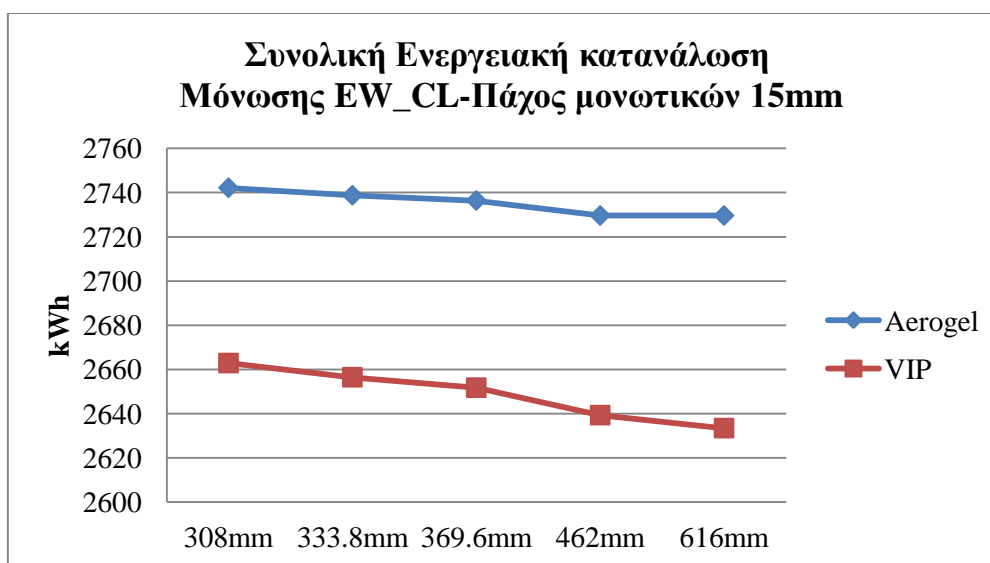
**Εικόνα 7.11:** Ενεργειακές καταναλώσεις ύστερα από τον επανασχεδιασμό στη μόνωση του δαπέδου του κτιρίου

Στην Εικόνα 7.12 παρουσιάζονται στο διάγραμμα οι ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου, ύστερα από τη τοποθέτηση στη σύνδεση του εξωτερικού τοίχου του κτηρίου με το δάπεδο, μονωτικών VIP και AEROGEL, πάχους 10mm με διαφορετικά κάθε φορά μήκη.



Εικόνα 7.12: Ενεργειακές καταναλώσεις ύστερα από μόνωση της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου του κτηρίου με το δάπεδο του δώματος με μονωτικά υλικά Aerogel και VIP πάχους 10mm

Στο διάγραμμα στην Εικόνα 7.13 φαίνονται οι ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου, ύστερα από τη τοποθέτηση στη σύνδεση του εξωτερικού τοίχου του κτηρίου με το δάπεδο, μονωτικών VIP και AEROGEL, πάχους 15mm με διαφορετικά κάθε φορά μήκη.



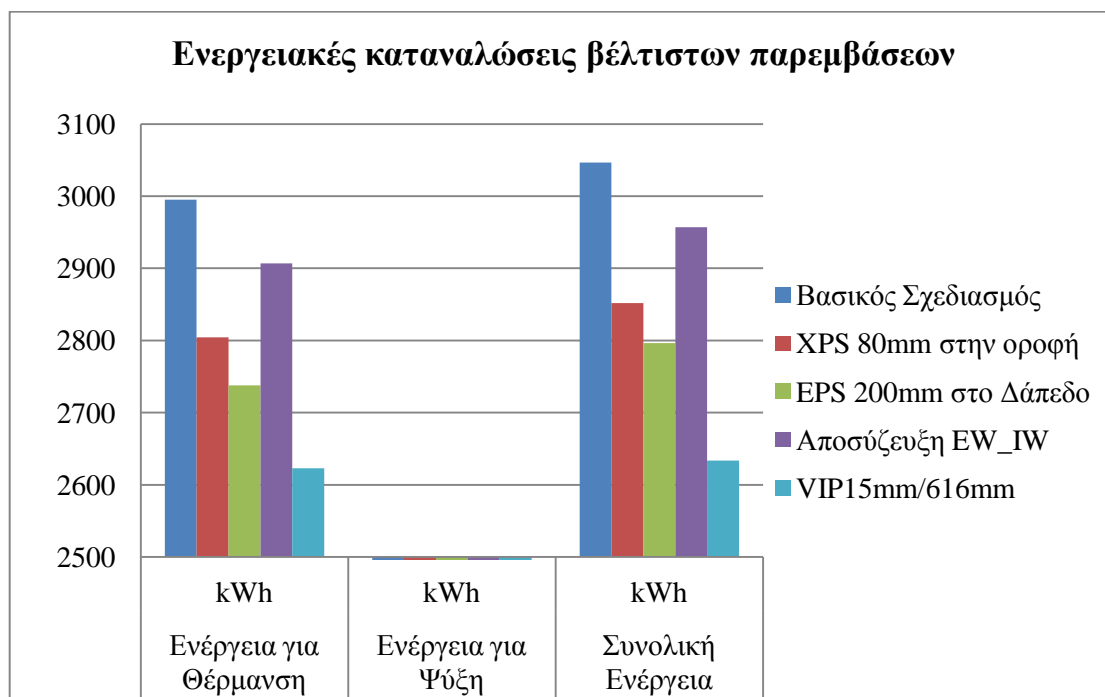
Εικόνα 7.13: Ενεργειακές καταναλώσεις ύστερα από μόνωση της σύνδεσης εξωτερικού τοίχου του κτηρίου με το δάπεδο του δώματος με μονωτικά υλικά Aerogel και VIP πάχους 15mm

Ο Πίνακας 7.9, αποτυπώνει τα αποτελέσματα των ετήσιων ενεργειακών καταναλώσεων του κτηρίου για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες προέκυψαν οι χαμηλότερες απαιτήσεις ως προς τη θέρμανση και τη ψύξη του.

**Πίνακας 7.9: Βέλτιστες περιπτώσεις κατανάλωσης ενέργειας ύστερα από τις παρεμβάσεις στο κέλυφος του κτιρίου**

Σύγκριση βέλτιστων περιπτώσεων						
Ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις		Βασικός Σχεδιασμός	XPS 80mm στην οροφή	EPS 200mm στο Δάπεδο	Αποσύζευξη EW_IW	VIP15mm /616mm
Ενέργεια για Θέρμανση	kWh	2995	2804	2738	2907	2623
Ενέργεια για Ψύξη	kWh	11	8	19	10	10
Συνολική Ενέργεια	kWh	3046	2852	2796	2957	2633

Στο διάγραμμα της Εικόνα 7.14 παρατηρούμε τις ελάχιστες ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου, για τον βασικό σχεδιασμό του και τις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό.



**Εικόνα 7.14: Ελάχιστες ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις ύστερα από τις βελτιώσεις στο κέλυφος του κτιρίου**

Παρατηρούμε πως με τις επιμέρους παρεμβάσεις στην κατασκευή του κτηρίου, επιτυγχάνεται μείωση στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με τον αρχικό βασικό σχεδιασμό κατά τον οποίο έχουμε τοποθετήσει μονωτικές σανίδες κενού στις τοιχοποιίες του κτιρίου. Ποιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη θέρμανση του κτιρίου υπάρχει μείωση στη κατανάλωση ενέργειας κατά 6.38% για τη περίπτωση τοποθέτησης μονωτικού εξηλασμένης πολυστερίνης πάχους 80mm πάνω από την οροφή, 8.6% εάν τοποθετήσουμε μεταξύ της πλάκας τσιμέντου και χώματος διογκωμένη πολυστερίνη πάχους 200mm, 2.95% εάν γίνει αποσύζευξη της σύνδεσης μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού τοίχου και 11.1% εάν τοποθετήσουμε μονωτικό VIP πάχους 15mm και μήκους 616mm, που να καλύπτει τους μεταλλικούς ορθοστάτες στους συνδέσμους της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δάπεδο του δώματος. Για τον δροσισμό του κτιρίου το καλοκαίρι, υπάρχει εξίσου μείωση στη απαίτηση ενέργειας κατά τους θερινούς μήνες εκτός από τη περίπτωση της παρέμβασης στη μόνωση του δαπέδου οπότε και υπάρχει μια μικρή αύξηση από τις 11.18kWh στις 18.6kWh.

## **8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε η ενεργειακή μελέτη ενός υποθετικού κτηρίου ξηράς δόμησης από ελαφρύ μεταλλικό σκελετό, με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος EnergyPlus. Στη μόνωση του κτηρίου, τοποθετήθηκαν μονωτικές σανίδες κενού (VIP), οι οποίες κατατάσσονται στη κατηγορία των υπερμονωτικών υλικών, τα οποία και θεωρούνται έως και 10 φορές πιο αποδοτικά, σε θερμομονωτική ικανότητα, από ότι τα συμβατικά μονωτικά υλικά.

Η διαδικασία εισαγωγής του κτηρίου στο πρόγραμμα Energyplus, απαιτούσε τον εξ' αρχής σχεδιασμό του από το πρόγραμμα Sketchup και κατόπιν τη μοντελοποίηση του με το πρόγραμμα OpenStudio. Με τη διαδικασία αυτή, καθορίστηκε η θερμική ζώνη μέσα στην οποία βρισκόταν το κτήριο και ορίστηκαν τα στοιχεία του κελύφους του. Κατόπιν τα δυο αυτά στάδια, αφού έγινε η αναγνώριση του κτηρίου από το πρόγραμμα EnergyPlus, έπρεπε να γίνει η αναλυτική περιγραφή των στρώσεων των υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν οι επιφάνειες του κελύφους του. Γι αυτό, για κάθε υλικό ξεχωριστά, έπρεπε να εισαχθεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του, εκτός από τη τραχύτητα του, το πάχος του, τη πυκνότητα του, και τη θερμοχωρητικότητα του.

### **8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Καταρχήν πρόβλημα, αποτέλεσαν οι μεταλλικοί ορθοστάτες που συγκρατούσαν τις στρώσεις των υλικών στις τοιχοποιίες, το δάπεδο και την οροφή του κτηρίου, καθώς έπρεπε να προσδιορισθεί η επίδραση της θερμικής τους μάζας στις επιμέρους επιφάνειες του κελύφους. Βασιζόμενοι στη θεωρία της σύνθετης τοιχοποιίας και ακολουθώντας τη μέθοδο των σύνθετων θερμικών ιδιοτήτων, θεωρήσαμε σαν ενιαίο υλικό τη στρώση του πετροβάμβακα στη μόνωση και των μεταλλικών ορθοστατών που τη διαπερνούσαν, υπολογίσαμε τον συντελεστή θερμοπερατότητας του ενιαίου αυτού υλικού και εν συνεχεία τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του. Ταυτοχρόνως, έπρεπε να γίνει και εισαγωγή των θερμογεφυρών στο πρόγραμμα EnergyPlus. Τούτο έγινε εφικτό με τη μέθοδο της ισοδύναμης θερμικής αγωγιμότητας.

Η μελέτη του κτηρίου, πραγματοποιήθηκε αρχικά σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές, με διακριτές κλιματολογικές συνθήκες, την Αθήνα, τη Φρανκφούρτη, το Χονγκ Κονγκ και τη Στοκχόλμη. Εξετάστηκαν όλες οι περιπτώσεις κατασκευής της τοιχοποιίας, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά ξεχωριστά την επίδραση από τους μεταλλικούς ορθοστάτες και τις γραμμικές και σημειακές θερμογέφυρες στο κέλυφος του κτηρίου. Κατά αυτόν τον τρόπο μέσα από τις διαφορές που παρατηρήθηκαν έγινε αντιληπτή η συνεισφορά των παραπάνω στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου. Ειδικότερα, οι επαναλαμβανόμενες θερμογέφυρες των μεταλλικών ορθοστατών συνεισφέρουν κατά 19% στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση, ενώ οι γραμμικές και σημειακές θερμογέφυρες κατά 20% περίπου. Συνεπώς μια ενεργειακή μελέτη χωρίς να υπολογισθούν οι δεδομένες θερμογέφυρες θα οδηγούσε σε λανθασμένα αποτελέσματα για τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου με ότι συνέπειες αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει για την εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης και ψύξης στο κτηρίου.

Η εξοικονόμηση ενέργειας που παρατηρήθηκε σε σχέση με τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου, ανάμεσα στη περίπτωση τοποθέτησης VIP και μη, στη μόνωση των τοίχων, για το σύνολο των περιοχών κυμάνθηκε περίπου στο 20%. Βέβαια η μελέτη των κτηρίων πραγματοποιήθηκε για χρονικό διάστημα 1 έτους κατά το οποίο οι θερμομονωτικές ιδιότητες των VIP, σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες. Έτσι, παράγοντες όπως η υγρασία της κάθε περιοχής δεν επηρέασαν τους υπολογισμούς στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου.

Στη συνέχεια, για τη περίπτωση της Στοκχόλμης όπου και οι απαιτήσεις ενέργειας ήταν και οι μεγαλύτερες, έγιναν επιμέρους παρεμβάσεις στις τοιχοποιίες, την οροφή και το δάπεδο του κτηρίου. Οι επεμβάσεις αυτές είχαν σαν σκοπό να αναδείξουν το κατά πόσο θα μπορούσαν να είναι ωφέλιμες για την συνολική εξοικονόμηση ενέργειας του κελύφους του κτηρίου. Η πιο αποδοτική βελτίωση, παρατηρήθηκε όταν τοποθετήθηκε η στρώση των VIP στην αεριζόμενη πρόσοψη. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια μέγιστη μείωση στη κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου της τάξης περίπου του 10% σε σχέση με τη αρχική περίπτωση εφαρμογής των VIP στις τοιχοποιίες του κτηρίου.

Καταλήγοντας, έως σήμερα το κόστος των VIP παραμένει σχετικά υψηλό σε σχέση με τα συνήθη μονωτικά υλικά. Σε σχέση με το μεγάλο κόστος των VIP,

τέτοιου είδους βελτιώσεις συμφέρει να γίνονται σε περιοχές που η μείωση του πάχους της τοιχοποιίας, καθώς δεν εφαρμόζουμε συμβατικά υλικά με μεγάλο πάχος, αποφέρει μεγάλο οικονομικό όφελος εξαιτίας του υψηλού κόστους του χώρου σε αυτές τις περιοχές. Ωστόσο οι μονωτικές ιδιότητες των σανίδων κενού, αναδεικνύουν πως η τεχνολογία στον τομέα της μόνωσης συνεχώς βελτιώνεται με αποτέλεσμα να υπάρχει μια εμπροσθοβαρής πρόθεση για τη κατασκευή κτηρίων με ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις.

### 8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα εργασία, θα μπορούσε να αποτελέσει την αφορμή για επιπλέον μελέτες όσον αφορά την επίδραση των υπέρ-μονωτικών υλικών στην ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. Στην ενότητα αυτή, προτείνονται ορισμένες ιδέες οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν μελλοντικές εργασίες

Καταρχήν, εκτός από τις μονωτικές σανίδες κενού, στο κεφάλαιο 4 της εργασίας, έγινε μια σύντομη περιγραφή άλλων υπέρ-μονωτικών υλικών. Συνεπώς θα μπορούσε να γίνει μια μελέτη, κατά την οποία κάποια από τα υλικά αυτά θα εφαρμόζονταν στο κέλυφος ενός κτηρίου ξηράς δόμησης, καταλήγοντας σε μια λεπτομερή σύγκριση των υλικών αυτών σε σχέση με τις μονωτικές σανίδες κενού.

Επιπλέον, η παρούσα εργασία αφορούσε ένα σχετικά μικρό κτήριο με δύο βασικούς χώρους και τέσσερα συνολικά ανοίγματα. Ταυτόχρονα, δεχθήκαμε πως εντός του κτηρίου δεν υπήρχαν εσωτερικές πηγές θερμότητας όπως οι ηλεκτρικές συσκευές, ο φωτισμός αλλά ακόμη και η θερμότητα που εκλύεται από τους ενοίκους του κτιρίου. Έτσι, μια παρόμοια ενεργειακή μελέτη θα μπορούσε να λάβει χώρα για ένα μεγαλύτερο κτήριο ξηράς δόμησης, κάτω από συνθήκες ενός πιο ρεαλιστικού σεναρίου.

Επίσης, μια ενδιαφέρουσα εργασία, θα μπορούσε να μελετά την ενεργειακή υποβάθμιση ενός κτηρίου, εξαιτίας της μείωσης των θερμομονωτικών ικανοτήτων των VIP στη διάρκεια του χρόνου (ageing των VIP). Στην παρούσα εργασία, η ενεργειακή μελέτη με το πρόγραμμα EnergyPlus, πραγματοποιήθηκε για χρονικό διάστημα ενός έτους, στο οποίο και οι ιδιότητες των VIP παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες από την υγρασία, τη διείσδυση του αέρα εντός του πυρήνα τους κ.τ.λ.. Τελειώνοντας, μελέτες θα μπορούσαν να γίνουν για διαφορετικά πάχη των VIP στη

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ  
ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ EnergyPlus

τοιχοποιία, όπως και παραμετρικές μελέτες με τοποθέτηση τους σε διαφορετικά σημεία της τοιχοποιίας.



## 9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. International Energy Agency: Energy and Climate change, World Energy Outlook Special Report 2015.
2. International Energy Agency/2013: Technology Roadmap, Energy efficient building envelopes.
3. Οδηγία 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 22 Νοεμβρίου 2012, για την ενεργειακή απόδοση.
4. Εξοικονόμηση ενέργειας και θερμομόνωση κτιρίου, Μ. Παπαδόπουλος – Α. Χριστοδουλοπούλου, Τεχνικά Χρονικά, 1979.
5. IEA (2013a), Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050, OECD/IEA, Paris.
6. Mohsen S.M., Akash B.A.: Some prospect of energy savings in buildings. Energy Conversion Management 42:1307–1315, 2001.
7. Modeling Methods for Energy in Buildings C.P. Underwood , F.W.H. Yik , 1.1 Heat and mass transfer processes in buildings.
8. Μετάδοση θερμότητας-Θερμομόνωση, Σ.Ι Καρέκος, Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος 2001
9. F.P Incropera and D.P. Dewitt : Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer , 3<sup>rd</sup> Edition : John Wiley & Sons , New York 1996.
10. Μετρητικοί έλεγχοι της θερμικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σε θέσεις θερμογεφυρών και προτάσεις βελτιωτικών επεμβάσεων. Δημήτρης Αραβαντινός αναπλ. καθηγητής Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, 2008.
11. Δ.Αραβαντινός, Δ. Τσακίρης, Χριστίνα Γιαρμα , Μετρητικοί Έλεγχοι της θερμικής Συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σε θέσεις θερμογεφυρών και προτάσεις βελτιωτικών επεμβάσεων , 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, 2008.
12. Υπολογιστική Προσομοίωση της Θερμικής Απόδοσης Τοιχοποιιών Ξηράς Δόμησης με Εφαρμογή Συμβατικών και Υπέρ-Μονωτικών Υλικών, Ανδρέας Σκανδάμης, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ.
13. Jelle BP, Gustavsen A, Baetens R. Beyond vacuum insulation panels- how may it be achieved? In: Proceedings of thw 9<sup>th</sup> international vacuum insulation symposium (IVIS 2009), London, UK; 17-18 September, 2009.
14. Mandilaras, I. Atsonios, G. Zannis, M. Founti: Thermal performance of a building envelope incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS.

## BIBΛIOΓPAΦIA

15. Mathias Bouquerel, Thierry Duforestel, Dominique Bailis, Gilles Rusaouen – Mass transfer modelin in gas barrier envelopes for vacuum insulation panels: A review.
16. IEA Annex 39, Subtask A, H Simmler et al. 2005.
17. H. Schwab, U. Heinemann, A. Beck, H.-P. Ebert, J. Fricke, Prediction of service life for vacuum insulation panels with fumed silica kernel and foil cover, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 28 (2005) 357-374.
18. M. Bouquerel, T. Duforestel, D. Bailis, G. Rusaouen, Aging modeling of Vacuum Insulation Panels- a review, *Energy and Buildings*, submitted for publication.
19. Simen Edsjo Kalnaes, Bjorn Petter Jelle- Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways.
20. Mukhopadhyaya P, Kuraman K, Normandin N, van Reenen D. Fibre-powder composite as core material for vacuum insulation panels. In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> international vacuum insulation symposium (IVIS 2009)*, London, UK; 17-18 September, 2009.
21. Kwon Js, Jung H, Yeo IS, Song TH. Outgassing characteristics of polycarbonate core material for vacuum insulation panels. *Vacuum* 2011;85:839-46.
22. Di X, Gao Y, Bao C, Hu Y, Xie Z. Optimization of glass fibre based core materials for vacuum insulation panels with laminated aluminum foils as envelopes. *Vacuum* 2013;97:55-9.
23. Wang X, Walliman N, Ogden R, Kedrick C. VIP and their applications in buildings: a review, *Construct Mater* 2007; 160:145-53.
24. Erbenich G How to identify a high quality VIP. In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> international vacuum insulation symposium (IVIS 2009)*, London, UK; 17-18 September, 2009.
25. Yang CG, Li Yj, Gao X, Xu L. A review of vacuum degradation research and the experimental outgassing research of the core material- PU foam on vacuum insulation panels. *Phys Proc.* 2012; 32:239-44.
26. Araki K, Kamoto D., Matsuoka S. Optimization about multilayer laminated film and getter device materials of vacuum insulation panel for using at high temperature. *J Mater Process Technol* 2009;209:271-82.
27. Di X, Gao Y, Bao C, Hu Y, Xie Z, Optimization of glass fibre based core materials for vacuum insulation panels with laminated aluminum foils as envelopes. *Vacuum* 2013;97:55-9
28. Walkili KG, Nussbaumjer T, Brundi R. Thermal performance of VIP assemblies in building constructions.
29. Marouani S. Investigation of the resistance welding of multilayer aluminum-coated polymer complexes used as envelopes of vacuum insulation panels. *Mater Des* 2012;36:56-56.
30. Brunner S, Gasser P, Simmler H, Walkili KG. Investigation of multilayered aluminum-coated polymer laminates by focused ion beam (FIB) etching. *Surf Coat Technol* 2006; 200:5908-14.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

31. Tenpierik MJ, Cauber JJM, Thorsell TI. Integrating vacuum insulation panels in building constructions: an integral perspective. *Construct Innovation* 2007;7:38-53.
32. Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review. *Energy Build* 2011; 43:761-9.
33. Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Gas-filled panels for building applications: a state-of-the-art review. *Energy Build* 2010; 42:1969-759.
34. Grandcolas S, Jelle BP, Sandberg LIC, Gustavsen A. Jelle BP. Hollow silica nanospheres as a superinsulating material. In: *Proceedings of the 11<sup>th</sup> international vacuum insulation symposium (IVIS 2013)*, Dubendorf, Zurich, Switzerland 19-20 September, 2013 p.43-4.
35. British Standards Institution, BS EN 1975, Masonry and Masonry Products , Methods of Determining Thermal Properties , 2012.
36. K.Ghazi Wakili , R.Brundi, B. Binder , Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels, *Building Research and Information* 32 (2004) 293-299.