



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Βιώσιμος Σχεδιασμός Εσωτερικού Περιβάλλοντος Κτιρίων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

*Οι επιπτώσεις των παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης
κελύφους στην υγροθερμική συμπεριφορά του κτιρίου*

Απόστολος Π. Οικονόμου

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Παν. Πατρών , M.Sc. E.M.Π.

A.M. 529880

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Σκάνδαλος, Ph.D.

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Οικονόμου Απόστολου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

*Οι επιπτώσεις των παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης
κελύφους στην υγροθερμική συμπεριφορά του κτιρίου*

Απόστολος Π. Οικονόμου

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Παν. Πατρών , M.Sc. E.M.Π.

A.M. 529880

Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Νικόλαος Σκάνδαλος

Δρ. Φυσικός

Πανεπιστήμιο Πατρών

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Παντελίδης

Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, MSc

Ε.Α.Π.

Πάτρα, Ιούνιος 2026

*«Αφιερωμένη στη σύζυγό μου Ιωάννα,
για την αμέριστη στήριξη, την κατανόηση και την υπομονή της καθ' όλη τη διάρκεια των
μεταπτυχιακών μου σπουδών»*

Περίληψη

Οι θερμογέφυρες αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, καθώς και τις συνθήκες που ευνοούν την εμφάνιση επιφανειακής συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας στις ψυχρότερες περιοχές του κελύφους. Πρόκειται για τοπικές περιοχές του κτιριακού κελύφους στις οποίες παρατηρείται αυξημένη θερμική ροή, εξαιτίας γεωμετρικών ασυνεχειών ή διαφοροποίησης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών. Τυπικά παραδείγματα θερμογεφυρών εμφανίζονται στα σημεία σύνδεσης διαφορετικών δομικών στοιχείων, όπως στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας και στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, στα σημεία σύνδεσης εξωστών, στηθαίων και κουφωμάτων με την εξωτερική τοιχοποιία.

Η ύπαρξη θερμογεφυρών οδηγεί σε αύξηση των θερμικών απωλειών και σε τοπική μείωση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών, ανάπτυξη μούχλας και μικροοργανισμών, υποβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και της θερμικής άνεσης των χρηστών. Τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται συχνά σε περιπτώσεις ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων, ιδιαίτερα όταν κατά την εκτέλεση των παρεμβάσεων η θερμομονωτική στρώση δεν παρουσιάζει επαρκή συνέχεια ή όταν οι παρεμβάσεις εφαρμόζονται μερικώς στο κτιριακό κέλυφος.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού κελύφους στη θερμική συμπεριφορά των θέσεων θερμογεφυρών και στην προκαταρκτική εκτίμηση κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας. Η μελέτη επικεντρώνεται στις θερμογέφυρες που αναπτύσσονται στις συνδέσεις δώματος – τοιχοποιίας, εξώστη – τοιχοποιίας, τοιχοποιίας – δαπέδου προς *pilotis* και τοιχοποιίας – δαπέδου προς έδαφος. Για τη διερεύνηση των παραπάνω ζητημάτων πραγματοποιούνται δισδιάστατες προσομοιώσεις θερμικής ροής με τη χρήση του λογισμικού THERM, μέσω των οποίων υπολογίζεται η ροή θερμότητας Φ , ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας ψ και η ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία στα σημεία των θερμογεφυρών. Επιπλέον υπολογίζεται ο συντελεστής fR_{si} και εκτιμάται ο κίνδυνος συμπύκνωσης υδρατμών και ανάπτυξης μούχλας. Για τον περιορισμό των επιπτώσεων των θερμογεφυρών προτείνονται

κατασκευαστικές λύσεις διαμόρφωσης της θερμομονωτικής στρώσης στα σημεία αυτά και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι βελτιωμένες διαμορφώσεις της θερμομονωτικής στρώσης συμβάλλουν σε σημαντική μείωση των τιμών του συντελεστή ψ , αύξηση της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και βελτίωση του δείκτη fRsi. Η αποκατάσταση της συνέχειας της θερμομόνωσης στα κρίσιμα σημεία του κελύφους περιορίζει τον κίνδυνο επιφανειακής συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας, ιδιαίτερα στις δυσμενέστερες κλιματικές συνθήκες και σε περιπτώσεις αυξημένης εσωτερικής σχετικής υγρασίας. Τα ευρήματα της εργασίας συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων των ενεργειακών παρεμβάσεων και στη διαμόρφωση πιο αποτελεσματικών και τεχνικά τεκμηριωμένων στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων.

Λέξεις – Κλειδιά

“Θερμογέφυρες”, “Συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ ”, “Λογισμικό THERM”, “Επιφανειακή συμπύκνωση”, “Δισδιάστατη ροή θερμότητας”, “Ενεργειακή απόδοση”

«The impact of building envelope energy retrofit interventions on the hygrothermal performance of buildings»

Apostolos P. Oikonomou

Abstract

Thermal bridges constitute one of the most significant factors affecting the energy performance of buildings, as well as the conditions that favour the occurrence of surface condensation and mould growth in the colder areas of the building envelope. They are localised areas of the building envelope where increased heat flow occurs, due either to geometrical discontinuities or to variations in the thermophysical properties of construction materials. Typical examples of thermal bridges are found at the junctions between different building components, such as the interface between masonry and reinforced concrete elements, as well as at the connections of balconies, parapets and window or door frames with the external masonry.

The presence of thermal bridges leads to increased heat losses and to a local reduction in internal surface temperature. This may result in surface condensation, mould and microbial growth, deterioration of indoor air quality and thermal comfort conditions for building occupants. These phenomena are frequently observed in building energy retrofit projects, particularly when, during the implementation of the interventions, the thermal insulation layer lacks sufficient continuity or when the interventions are applied only partially to the building envelope.

The aim of this dissertation is to investigate the effects of energy retrofit interventions applied to the building envelope on the thermal behaviour of thermal bridge locations and on the preliminary assessment of the risk of surface condensation and mould growth. The study focuses on thermal bridges occurring at the junctions between flat roof

and masonry, balcony and masonry, masonry and floor over pilotis, and masonry and ground-contact floor.

To examine these issues, two-dimensional heat flow simulations are carried out using THERM software. Through these simulations, the heat flow Φ , the linear thermal transmittance coefficient Ψ , and the minimum internal surface temperature at the thermal bridge locations are calculated. In addition, the temperature factor fR_{si} is determined, and the risk of surface condensation and mould growth is assessed. In order to mitigate the effects of thermal bridges, construction solutions concerning the configuration of the thermal insulation layer at these critical junctions are proposed, and their performance is evaluated.

The results indicate that improved configurations of the thermal insulation layer contribute to a significant reduction in the values of the linear thermal transmittance coefficient Ψ , an increase in the minimum internal surface temperature, and an improvement in the fR_{si} factor. Restoring the continuity of thermal insulation at critical points of the building envelope reduces the risk of surface condensation and mould growth, particularly under the most adverse climatic conditions and in cases of increased internal relative humidity. The findings of this dissertation contribute to a better understanding of the effects of energy retrofit interventions and support the development of more effective and technically substantiated strategies for the energy upgrading of buildings.

Keywords

“Thermal bridges”, “Linear thermal transmittance coefficient Ψ ”, “THERM software”, “Surface condensation”, “Two-dimensional heat flow”, “Energy performance”

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xiii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικό πλαίσιο – Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων	1
1.2 Θερμογέφυρες και επιφανειακές συμπυκνώσεις στα κτίρια	2
1.3 Σκοπός, στόχοι και δομή της εργασίας	3
2. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	8
2.1 Τρόποι μετάδοσης θερμότητας	8
2.1.1 Αγωγή.....	9
2.1.2 Συναγωγή	10
2.1.3 Ακτινοβολία	11
2.2 Θερμικά χαρακτηριστικά υλικών.....	12
2.2.1 Ο συντελεστής θερμικής αντίστασης R	13
2.2.2 Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U.....	14
2.3 Θερμικό ισοζύγιο	15
2.3.1 Θερμικό Ισοζύγιο Κτηρίου κατά τη Χειμερινή Περίοδο	17
2.3.2 Θερμικό Ισοζύγιο Κτηρίου κατά τη Θερινή Περίοδο	18
3. Θερμομονωτικά υλικά.....	20
3.1 Ινώδη ανόργανα υλικά	21
3.1.1 Υαλοβάμβακας.....	21
3.1.2 Πετροβάμβακας.....	22
3.2 Αφρώδη οργανικά υλικά	24
3.2.1 Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)	24
3.2.2 Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS)	26
3.3 Ποιοτική αξιολόγηση θερμομονωτικών υλικών	28
3.3.1 Ενεργειακή και Τεχνική Απόδοση	29
3.3.2 Περιβαλλοντική Απόδοση και Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	30
3.3.3 Υγειονομικές και Ανακυκλωτικές Πτυχές	31
3.3.4 Συγκριτική αξιολόγηση θερμομονωτικών υλικών	31
4. Οι θερμογέφυρες του κτιριακού κελύφους	33
4.1 Ο ορισμός της θερμογέφυρας και οι λόγοι εμφάνισής της	33
4.2 Κατηγορίες & θέσεις θερμογεφυρών	33
4.3 Οι επιπτώσεις των θερμογεφυρών	38
4.4 Τυπολογίες θερμογεφυρών στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα	40
5. Μαθηματικός υπολογισμός θερμογεφυρών	45
5.1 Πρότυπα και μεθοδολογικό πλαίσιο υπολογισμού θερμογεφυρών	45
5.1.1 ISO 10211:2017	45
5.1.2 ISO 14683	47
5.1.3 TOTEE 20701-2.....	48
5.2 Η δισδιάστατη ροή θερμότητας	48

5.3 Υπολογισμός του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας ψ	50
5.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή ψ	52
5.5 ISO 13788 - Υπολογισμός του συντελεστή fR_{si}	53
6. Ανασκόπηση βιβλιογραφικών αναφορών & σύνθεση ερευνητικών ερωτημάτων.	55
6.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορών.	55
6.2 Ανάλυση βιβλιογραφικών αναφορών με χρήση VOSviewer.	63
6.3 Ερευνητικά ερωτήματα.	66
6.4 Μεθοδολογική προσέγγιση – Διάγραμμα ροής.	68
7. Προσομοίωση θερμογεφυρών με χρήση του λογισμικού THERM.	70
7.1 Περιγραφή του προγράμματος.....	70
7.2 Περιπτώσεις μελέτης – βασικά μοντέλα προσομοίωσης.....	73
7.2.1 Περίπτωση Μελέτης 1 (CS1) : Θερμογέφυρα εξώστη	74
7.2.2 Περίπτωση Μελέτης 2 (CS2) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με ύπαρξη στηθαίου	76
7.2.3 Περίπτωση Μελέτης 3 (CS3) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δώματος με προεξοχή.....	78
7.2.4 Περίπτωση Μελέτης 4 (CS4) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – pilotis.....	80
7.2.5 Περίπτωση Μελέτης 5 (CS5) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος.	82
7.2.6 Περίπτωση Μελέτης 6 (CS6) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος No2	84
7.3 Ιδιότητες των δομικών υλικών – Συνοριακές συνθήκες.....	86
8. Περιπτώσεις μελέτης – Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	89
8.1 Περίπτωση μελέτης CS1 : Θερμογέφυρα εξώστη	90
8.2 Περίπτωση μελέτης CS2 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με ύπαρξη στηθαίου.....	95
8.3 Περίπτωση μελέτης CS3 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με προεξοχή	98
8.4 Περίπτωση μελέτης CS4 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - pilotis.....	102
8.5 Περίπτωση μελέτης CS5 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος	105
8.6 Περίπτωση μελέτης CS6 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος No2	110
9. Συμπεράσματα.	115
9.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	122
10. Βιβλιογραφία.....	125

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 : Ροή θερμότητας μέσω ενός δομικού στοιχείου	10
Εικόνα 2 : Ενεργειακό ισοζύγιο κτιρίου	16
Εικόνα 3 : Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος (ρολού) και πλάκας (www.xtools.gr).22	
Εικόνα 4 : Πετροβάμβακας σε μορφή παπλώματος (ρολού) και πλάκας (www.fibran.gr)	23
Εικόνα 5 : Αφρώδης διογκωμένη πολυστερίνη (αριστερά) και αφρώδης διογκωμένη πολυστερίνη με άνθρακα (δεξιά) (www.vitex.gr)	25
Εικόνα 6 : Αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη (αριστερά) και αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη με άνθρακα (δεξιά) (www.fibran.gr , www.banarta.com)	27
Εικόνα 7 : Τύποι γραμμικών θερμογεφυρών στο κτιριακό κέλυφος (TOTEE 20701-1/2017)	34
Εικόνα 8 : Υποκατηγορίες κατακόρυφων θερμογεφυρών (TOTEE 20701-2/2017)	35
Εικόνα 9 : Υποκατηγορίες οριζόντιων θερμογεφυρών (TOTEE 20701-2/2017).....	36
Εικόνα 10: Γεωμετρική θερμογέφυρα (TOTEE 20701-2/2017)	37
Εικόνα 11 : Κατασκευαστική θερμογέφυρα (TOTEE 20701-2/2017)	38
Εικόνα 12 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - εξώστη	41
Εικόνα 13 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με στηθαίο	42
Εικόνα 14 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με προεξοχή	42
Εικόνα 15 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - pilotis	43
Εικόνα 16 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - πλάκα δαπέδου σε επαφή με έδαφος	44
Εικόνα 17 : Ο γραμμικός συντελεστής ψ ως αποτέλεσμα της διαφοράς στη ροή θερμότητας του μονοδιάστατου μοντέλου από το δισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού (Passive House Conference, 2010).....	49
Εικόνα 18 : Υπολογισμός του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας ψ (Passive House Institute).....	51
Εικόνα 19 : Χάρτης συνύπαρξης λέξεων-κλειδιών συγγραφέων σχετικά με τις θερμογέφυρες και την ενεργειακή/υδροθερμική συμπεριφορά του κελύφους	64
Εικόνα 20 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 1 (CS1)	74
Εικόνα 21 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 2 (CS2)	76
Εικόνα 22 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 3 (CS3)	78
Εικόνα 23 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 4 (CS4)	80
Εικόνα 24 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 5 (CS5)	82
Εικόνα 25 : Απεικόνιση του μοντέλου της περίπτωσης μελέτης 3 (CS3)	88
Εικόνα 26 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS1.....	94
Εικόνα 27 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS2.....	97
Εικόνα 28 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS3.....	101
Εικόνα 29 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS4.....	104

Εικόνα 30 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS5.....	109
Εικόνα 31 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS6.....	114
Σχήμα 1 : Διάγραμμα Ροής (Flow chart) της μεθοδολογικής προσέγγισης	69

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Κατηγοριοποίηση θερμομονωτικών υλικών	20
Πίνακας 2 : Συγκριτική αξιολόγηση θερμομονωτικών υλικών	31
Πίνακας 3 : Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών	88
Πίνακας 4 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 1 (CS1).....	90
Πίνακας 5 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 2 (CS2).....	95
Πίνακας 6 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 3 (CS3).....	98
Πίνακας 7 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 4 (CS4).....	102
Πίνακας 8 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 5 (CS5).....	105
Πίνακας 9 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 6 (CS6).....	110
Πίνακας 10 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.	116

*Οι επιπτώσεις των παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης
κελύφους στην υγροθερμική συμπεριφορά του κτιρίου.*

Απόστολος Π. Οικονόμου

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικό πλαίσιο – Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων αποτελεί στρατηγική παράμετρο στη σύγχρονη πολιτική για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την κλιματική ουδετερότητα. Ο κτιριακός τομέας ευθύνεται διεθνώς για σημαντικό ποσοστό της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς καλύπτει περίπου το 40% της ενεργειακής ζήτησης και σχεδόν το ένα τρίτο των συνολικών εκπομπών CO₂. Οι ενεργειακές ανάγκες των κτιρίων προκύπτουν κυρίως από τις απαιτήσεις θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, ενώ η θερμική συμπεριφορά του κελύφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ενεργειακή τους επίδοση.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, στο πλαίσιο του European Green Deal και της στρατηγικής για μηδενικές καθαρές εκπομπές έως το 2050, έχει υιοθετήσει ένα ολοκληρωμένο κανονιστικό πλαίσιο για τον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD) επιβάλλει τη σταδιακή μετάβαση σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nZEB) και ενθαρρύνει την αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος, ιδίως σε χώρες με παλαιό κτιριακό δυναμικό, όπως η Ελλάδα.

Στην ελληνική πραγματικότητα, περίπου το 55% των κτιρίων έχει ανεγερθεί πριν από το 1980, δηλαδή πριν την εφαρμογή του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΚΘΚ). Η έλλειψη θερμικής προστασίας του κελύφους και οι περιορισμένες τεχνικές προδιαγραφές της περιόδου οδηγούν σε αυξημένες θερμικές απώλειες και χαμηλή ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στο κτιριακό κέλυφος αποτελούν καίριο μέτρο για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, τη βελτίωση της θερμικής άνεσης και τη διασφάλιση υγιεινών συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος.

Η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων αυτών προϋποθέτει τεχνικά ορθό σχεδιασμό και εφαρμογή ολοκληρωμένων λύσεων θερμικής προστασίας, με ταυτόχρονη κατανόηση της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων. Ως εκ τούτου, η ανάλυση παραμέτρων όπως η αεροστεγανότητα, η αποδοτικότητα των θερμομονωτικών συστημάτων και η αντιμετώπιση των θερμογεφυρών αποκτά κρίσιμη σημασία.

1.2 Θερμογέφυρες και επιφανειακές συμπυκνώσεις στα κτίρια.

Οι θερμογέφυρες συνιστούν σημαντική τεχνική παράμετρο κατά την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων και των συνθηκών που ευνοούν την εμφάνιση επιφανειακής συμπύκνωσης και μούχλας στα δομικά στοιχεία. Ορίζονται ως τοπικές ζώνες του κελύφους στις οποίες παρατηρούνται αυξημένες θερμικές ροές λόγω γεωμετρικών ασυνεχειών ή διαφοροποίησης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών. Τυπικές περιπτώσεις περιλαμβάνουν τα σημεία σύνδεσης διαφορετικών δομικών στοιχείων (π.χ. διεπιφάνεια στοιχείων οπτοπλινθοδομής με στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος), τα σημεία συναρμογής μεταξύ εξωτερικής τοιχοποιίας με εξώστες, στηθαία ή/και κουφώματα και άλλα.

Η παρουσία των θερμογεφυρών στο κτιριακό κέλυφος προκαλεί σημαντικές ενεργειακές απώλειες και τοπική μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε:

- επιφανειακή συμπύκνωση των υδρατμών,
- ανάπτυξη μικροοργανισμών και μούχλας,
- υποβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα,
- φαινόμενα ενδοστρωματικής συμπύκνωσης υδρατμών στα δομικά στοιχεία,
- αυξημένο κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού και υποβάθμιση της δομική ακεραιότητας του κτιρίου.

Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συχνά σε παρεμβάσεις μερικής ενεργειακής αναβάθμισης ή ριζικής ανακαίνισης, στις οποίες η θερμομονωτική στρώση δεν εφαρμόζεται με συνέχεια σε όλα τα κρίσιμα σημεία του κελύφους. Στις περιπτώσεις αυτές, η μείωση των θερμικών απωλειών από τα θερμομονωμένα δομικά στοιχεία μπορεί να καταστήσει πιο έντονη τη σχετική επίδραση των θερμογεφυρών, οδηγώντας σε τοπική μείωση των εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών και, κατά συνέπεια, σε αυξημένο κίνδυνο επιφανειακής συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας.

Συνεπώς, η ενδελεχής αξιολόγηση, ο ορθός σχεδιασμός και υπολογισμός των θερμογεφυρών και η πιστή εφαρμογή της μελέτης κατά τη φάση κατασκευής αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για τεχνικά τεκμηριωμένο ενεργειακό σχεδιασμό, εξασφαλίζοντας τόσο την ενεργειακή αποδοτικότητα του κτιρίου όσο και έναν θερμικά άνετο και υγιεινό εσωτερικό περιβάλλον.

1.3 Σκοπός, στόχοι και δομή της εργασίας

Παρότι οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στο κτιριακό κέλυφος αποσκοπούν κυρίως στη μείωση των θερμικών απωλειών, στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στην αναβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες συνέπειες, όταν δεν συνοδεύονται από ολοκληρωμένο σχεδιασμό των κατασκευαστικών λεπτομερειών. Ιδίως όταν δεν διασφαλίζεται η συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης στα κρίσιμα σημεία του κελύφους, οι θερμογέφυρες είναι δυνατόν να διατηρηθούν ή ακόμη και να καταστούν εντονότερες ως τοπικά αδύναμα σημεία της κατασκευής.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ενεργειακή αναβάθμιση των επιμέρους δομικών στοιχείων μπορεί να συνοδεύεται από συγκέντρωση θερμικών απωλειών στις περιοχές των θερμογεφυρών, με αποτέλεσμα την τοπική πτώση των εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών. Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξήσει την πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων όπως:

- Επιφανειακές συμπυκνώσεις στις εσωτερικές επιφάνειες των δομικών στοιχείων,
- Ενδοστρωματικές συμπυκνώσεις και, σε βάθος χρόνου, πιθανή διάβρωση του οπλισμού,
- Ανάπτυξη μούχλας σε ψυχρές περιοχές του κελύφους,
- Μείωση των επιπέδων θερμικής άνεσης των χρηστών,
- Υποβάθμιση της ανθεκτικότητας και της μακροχρόνιας συμπεριφοράς της κατασκευής.

Παρά το γεγονός ότι οι θερμογέφυρες έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης διεθνούς έρευνας, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης των επιπτώσεων που επιφέρουν οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στη διαμόρφωση και την ένταση των θερμικά ασθενών σημείων του κελύφους. Ειδικότερα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος με τον οποίο η ασυνέχεια ή η πλημμελής εφαρμογή της θερμομονωτικής στρώσης μπορεί να εντείνει τις θερμογέφυρες και να αυξήσει τον κίνδυνο εμφάνισης επιφανειακών συμπυκνώσεων και ανάπτυξης μούχλας.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη συστηματική διερεύνηση του ζητήματος αυτού, μέσα από την ανάλυση χαρακτηριστικών κατασκευαστικών λεπτομερειών του κτιριακού κελύφους. Η διερεύνηση πραγματοποιείται μέσω:

- Προσομοιώσεων δισδιάστατης θερμικής ροής με χρήση του λογισμικού THERM,
- Αξιολόγησης των εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών στις περιοχές των θερμογεφυρών,
- Εκτίμησης του κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης και δημιουργίας συνθηκών ευνοϊκών για την ανάπτυξη μούχλας,
- Διατύπωσης και αξιολόγησης εναλλακτικών κατασκευαστικών λύσεων για τον περιορισμό ή την εξάλειψη των θερμογεφυρών.

Με τον τρόπο αυτό, η εργασία επιδιώκει να συμβάλει στην επιστημονική τεκμηρίωση του προβλήματος και στον σχεδιασμό πιο αποτελεσματικών και ασφαλών παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης.

Κεντρικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού κελύφους στην ανάπτυξη θερμογεφυρών, στη θερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων και στην πιθανότητα εμφάνισης υγρασιακών φαινομένων, όπως οι επιφανειακές συμπυκνώσεις και η ανάπτυξη μούχλας. Παράλληλα, εξετάζεται η επίδραση των θερμογεφυρών στη συνολικότερη ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.

Η μελέτη εστιάζει στη σχέση μεταξύ της θερμομονωτικής αναβάθμισης του κελύφους, της μεταβολής της θερμικής ροής σε σημεία ασυνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης και των φαινομένων που είναι δυνατόν να εκδηλωθούν στις ψυχρότερες περιοχές των εσωτερικών επιφανειών. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ποσοτικό προσδιορισμό του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ , στην αξιολόγηση της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και στην προκαταρκτική διερεύνηση του κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης.

Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, η εργασία επιδιώκει αρχικά να καταγράψει και να ταξινομήσει βασικούς τύπους θερμογεφυρών που συναντώνται στο υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς επιλεγμένων κατασκευαστικών λεπτομερειών πριν και μετά την εφαρμογή προτεινόμενων παρεμβάσεων θερμομόνωσης. Η ανάλυση γίνεται με τη χρήση του λογισμικού THERM, το οποίο επιτρέπει τη μοντελοποίηση δισδιάστατης θερμικής ροής σε κόμβους και συναρμογές του κτιριακού κελύφους, σύμφωνα με τις σχετικές μεθοδολογίες και τα πρότυπα υπολογισμού.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αξιοποιούνται για την αποτίμηση της θερμοκρασιακής κατανομής στις περιοχές των θερμογεφυρών και, ειδικότερα, για τον εντοπισμό των ψυχρότερων σημείων των εσωτερικών επιφανειών. Μέσω της σύγκρισης των ελάχιστων εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών με τα αντίστοιχα σημεία δρόσου, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης επιφανειακών συμπυκνώσεων. Παράλληλα, η αξιολόγηση των τιμών του συντελεστή fRsi επιτρέπει την προκαταρκτική διερεύνηση των συνθηκών που ενδέχεται να ευνοήσουν την ανάπτυξη μούχλας στις κρίσιμες περιοχές του κτιριακού κελύφους.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, η εργασία εξετάζει επίσης την αποτελεσματικότητα εναλλακτικών κατασκευαστικών λύσεων διαμόρφωσης της θερμομονωτικής στρώσης, οι οποίες προτείνονται με σκοπό τον περιορισμό ή την εξάλειψη των θερμογεφυρών και των επιπτώσεών τους. Η συγκριτική αξιολόγηση των περιπτώσεων πριν και μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων αποσκοπεί όχι μόνο στην ανάδειξη της ενεργειακής ωφέλειας, αλλά και στην τεκμηρίωση της ανάγκης για μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση του σχεδιασμού, η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο τη θερμική απόδοση όσο και τις πιθανές υγρασιακές επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής του κτιρίου και στην ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Τελικός στόχος της εργασίας είναι η διατύπωση επιστημονικά τεκμηριωμένων συμπερασμάτων και πρακτικών κατευθύνσεων για μελετητές μηχανικούς, επιβλέποντες μηχανικούς και τεχνικούς εφαρμογής συστημάτων θερμομόνωσης. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύεται η ανάγκη σχεδιασμού ενεργειακών παρεμβάσεων που να εξασφαλίζουν ταυτόχρονα υψηλή ενεργειακή απόδοση, υγιεινό εσωτερικό περιβάλλον και μακροχρόνια ανθεκτικότητα του κτιριακού κελύφους.

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε δέκα κεφάλαια. Τα πρώτα κεφάλαια θέτουν το θεωρητικό και επιστημονικό υπόβαθρο, ενώ τα επόμενα επικεντρώνονται στη βιβλιογραφική διερεύνηση, στη μεθοδολογική προσέγγιση και στις αναλυτικές προσομοιώσεις θερμογεφυρών, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων και την τεκμηρίωση των επιπτώσεων των ενεργειακών παρεμβάσεων στο κτιριακό κέλυφος.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της έρευνας, η σημασία της ενεργειακής απόδοσης στα κτίρια και η προβληματική των θερμογεφυρών και της υδροθερμικής συμπεριφοράς του κελύφους. Παράλληλα, αναλύονται τα κίνητρα για την εκπόνηση της μελέτης, καθώς και ο σκοπός, οι επιμέρους στόχοι και η δομή της εργασίας.

Το Κεφάλαιο 2 αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης και περιλαμβάνει τη θεμελιώδη φυσική βάση του φαινομένου και των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία). Παρουσιάζονται τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών, ο συντελεστής θερμικής αντίστασης (R) και θερμοπερατότητας (U), καθώς και το θερμικό ισοζύγιο κτιρίου για χειμερινές και θερινές συνθήκες. Στόχος του κεφαλαίου είναι η σύνδεση των θεμελιωδών αρχών της μεταφοράς θερμότητας με τη συμπεριφορά των κτιριακών στοιχείων.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται τα θερμομονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ενεργειακές παρεμβάσεις. Εξετάζονται οι βασικές κατηγορίες τους, τα χαρακτηριστικά τους και οι ιδιότητές τους. Επιπλέον, πραγματοποιείται ποιοτική αξιολόγηση των υλικών με βάση την ενεργειακή και τεχνική απόδοση, την περιβαλλοντική συμπεριφορά, τις υγειονομικές παραμέτρους και την ανακυκλωσιμότητα, καταλήγοντας σε συγκριτική αποτίμηση των επιλογών θερμομόνωσης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η έννοια των θερμογεφυρών, οι αιτίες για τη δημιουργία τους και η ταξινόμησή τους ανάλογα με τη θέση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους στο κτιριακό κέλυφος. Εξετάζονται οι επιπτώσεις τους στην ενεργειακή απόδοση, στη θερμική άνεση, στην εμφάνιση συμπυκνώσεων υδρατμών καθώς και στην ανάπτυξη μούχλας. Παράλληλα, παρουσιάζονται ενδεικτικές τυπολογίες θερμογεφυρών στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα.

Το Κεφάλαιο 5 αφορά τον μαθηματικό υπολογισμό των θερμογεφυρών. Γίνεται αναφορά στα διεθνή και εθνικά πρότυπα (ISO 10211, ISO 14683, ISO 13788 και TOTEE 20701-2), παρουσιάζονται οι αρχές της δισδιάστατης ροής θερμότητας και αναλύεται ο υπολογισμός του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας ψ και του συντελεστή θερμοκρασιακού παράγοντα επιφανείας fR_{si} .

Στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η ανάλυση σύγχρονων επιστημονικών ερευνών. Παρουσιάζεται η διαδικασία εντοπισμού και αξιολόγησης των πηγών, η ανάλυση βιβλιογραφικών δεδομένων μέσω του λογισμικού VOSviewer, και διατυπώνονται τα ερευνητικά ερωτήματα και η μεθοδολογική προσέγγιση με συνοδευτικό διάγραμμα ροής (flow chart).

Το Κεφάλαιο 7 παρουσιάζει τη διαδικασία προσομοίωσης των θερμογεφυρών με χρήση του λογισμικού THERM. Περιγράφονται τα εξεταζόμενα σενάρια, οι περιπτώσεις

μελέτης, τα γεωμετρικά μοντέλα, οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών και οι συνοριακές συνθήκες της προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 8 παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις χαρακτηριστικές θερμογέφυρες που εξετάζονται, τόσο για τις συνήθεις κατασκευαστικές διατάξεις όσο και μετά την εφαρμογή των βελτιωμένων κατασκευαστικών λύσεων. Παράλληλα, αναλύεται η επίδραση των επεμβάσεων στην ενεργειακή απόδοση των δομικών στοιχείων, στη θερμοκρασιακή κατανομή των εσωτερικών επιφανειών και στη μείωση του κινδύνου εμφάνισης επιφανειακών συμπυκνώσεων και ανάπτυξης μούχλας.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα, με στόχο την ενίσχυση της επιστημονικής γνώσης και την υποστήριξη της πρακτικής εφαρμογής ενεργειακών παρεμβάσεων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 10 παρατίθεται η βιβλιογραφία και το υποστηρικτικό υλικό της μελέτης.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Τρόποι μετάδοσης θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας αποτελεί τον βασικό μηχανισμό μέσω του οποίου οι εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες επιδρούν στις εσωτερικές θερμικές συνθήκες των κτηρίων. Η εσωτερική θερμική ισορροπία καθορίζεται κυρίως από τη ροή θερμότητας μέσω του κτηριακού κελύφους, τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα διαφανή στοιχεία (υαλοπίνακες), την απορρόφηση της ακτινοβολίας αυτής από τα δομικά στοιχεία, όπως οι τοίχοι και η οροφή καθώς και από την κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό η οποία επηρεάζει την αισθητή θερμοκρασία που αντιλαμβάνονται οι χρήστες.

Ο προσδιορισμός του ρυθμού ροής της θερμότητας μέσω των υλικών είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς επιτρέπει τον υπολογισμό της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας που πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί, προκειμένου να διατηρηθεί η θερμική άνεση και να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου.

Οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας διακρίνονται σε:

- Αγωγή (conduction)
- Συναγωγή (convection)
- Ακτινοβολία (radiation)

Για τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας γίνονται συνήθως ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές:

- Τα δομικά υλικά θεωρούνται ομογενή, δηλαδή οι φυσικές τους ιδιότητες είναι ίδιες σε κάθε σημείο του όγκου τους, χωρίς διαφοροποιήσεις λόγω ανομοιογενειών της σύστασής τους.
- Τα δομικά υλικά θεωρούνται επίσης ισότροπα, γεγονός που σημαίνει ότι οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες είναι ίδιες προς κάθε κατεύθυνση.
- Οι θερμοφυσικές και γεωμετρικές ιδιότητες των υλικών παραμένουν σταθερές και δεν μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία ή λόγω φαινομένων θερμικής διαστολής και συστολής.
- Η μετάδοση θερμότητας προσεγγίζεται ως μονοδιάστατη, δηλαδή θεωρείται ότι η ροή λαμβάνει χώρα καθέτως προς την επιφάνεια του υπό μελέτη δομικού στοιχείου.

2.1.1 Αγωγή

Η αγωγή (conduction) αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων ή περιοχών που βρίσκονται σε φυσική επαφή. Η θερμότητα ρέει πάντοτε από την περιοχή με υψηλότερη θερμοκρασία προς την περιοχή με χαμηλότερη θερμοκρασία, σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο.

Η διαδικασία της αγωγής πραγματοποιείται μέσω μικρομοριακών αλληλεπιδράσεων, δηλαδή με μεταφορά κινητικής ενέργειας από μόρια υψηλής ενέργειας προς γειτονικά μόρια χαμηλότερης ενέργειας. Στα μεταλλικά υλικά, ο μηχανισμός αυτός συμπληρώνεται από την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στη μεταφορά θερμότητας.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας q μέσω αγωγής περιγράφεται από τον νόμο του Fourier, σύμφωνα με τον οποίο η ποσότητα θερμότητας που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας, της επιφάνειας κάθετης στη ροή και του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Η σχέση δίνεται ως εξής:

$$q = -\lambda * A * \frac{\Delta T}{dx}$$

Όπου:

q [W]: ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

A [m²]: η επιφάνεια του μέσου που είναι κάθετη προς τη διεύθυνση μεταφοράς θερμότητας

ΔT [K]: η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων του μέσου

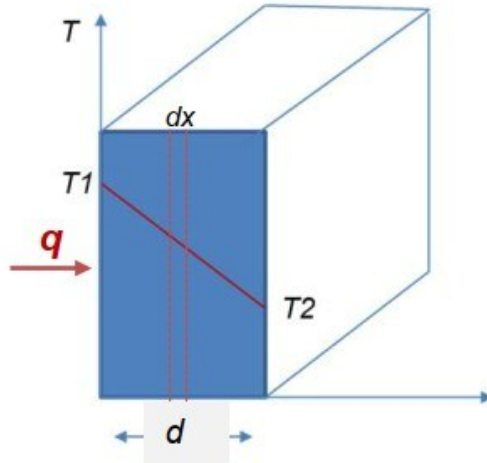
dx [m]: το πάχος του υλικού, η απόσταση μεταξύ δύο σημείων του υλικού

λ [W/m*K]: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ εκφράζει την ποσότητα θερμότητας που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου μέσα από ένα ομογενές υλικό πάχους 1 m, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών του είναι 1 K.

Η φυσική σημασία του συντελεστή αυτού είναι θεμελιώδης: όσο υψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο ευκολότερα το υλικό επιτρέπει τη διέλευση θερμότητας, και επομένως

χαρακτηρίζεται ως καλός αγωγός (π.χ. μέταλλα). Αντιθέτως, τα υλικά με χαμηλές τιμές λ (όπως τα θερμομονωτικά) παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στη θερμική ροή.



Εικόνα 1 : Ροή θερμότητας μέσω ενός δομικού στοιχείου

2.1.2 Συναγωγή

Η συναγωγή (convection) αποτελεί μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνει χώρα μέσω της κίνησης ενός ρευστού μέσου (αέρας ή υγρό), το οποίο έρχεται σε επαφή με μία επιφάνεια διαφορετικής θερμοκρασίας. Η μεταφορά μπορεί να συμβαίνει είτε από την επιφάνεια προς το ρευστό είτε αντίστροφα, ανάλογα με τη θερμοκρασιακή διαφορά.

Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι συναγωγής:

- Φυσική συναγωγή, όπου η κίνηση του ρευστού προκαλείται από μεταβολές της πυκνότητας λόγω διαφορών θερμοκρασίας. Ο θερμότερος, ελαφρύτερος αέρας ανέρχεται, ενώ ο ψυχρότερος, πυκνότερος κατέρχεται, δημιουργώντας κυκλοφορία.
- Εξαναγκασμένη συναγωγή, όπου η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικές μηχανικές δυνάμεις, όπως ανεμιστήρες, αντλίες ή συστήματα εξαερισμού.

Η ένταση της συναγωγής εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του ρευστού: όσο αυξάνεται η ταχύτητα, τόσο εντείνεται η ανταλλαγή θερμότητας.

Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής δίνεται από τον νόμο του Νεύτωνα:

$$q = h * (T_s - T_{\infty})$$

Όπου:

q [W]: η ροή θερμότητας μέσω συναγωγής

h [W/m²*K]: ο συντελεστής συναγωγής

T_s [K]: η θερμοκρασία της επιφάνειας

T_{∞} [K]: η θερμοκρασία του ρευστού μέσου (αέρας ή υγρό) σε απόσταση από την επιφάνεια

Ο συντελεστής συναγωγής h εξαρτάται από τη φύση του ρευστού, τη γεωμετρία της επιφάνειας και τη ροή του ρευστού (στρωτή ή τυρβώδης ροή).

2.1.3 Ακτινοβολία

Η ακτινοβολία (radiation) αποτελεί το μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, χωρίς να απαιτείται ενδιάμεσο υλικό μέσο για τη μεταφορά της. Η μεταφορά αυτή είναι αποτέλεσμα της εκπομπής ενέργειας από όλα τα σώματα που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη του απολύτου μηδενός. Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει σε μία επιφάνεια, μπορεί να απορροφηθεί, να αντανακλαστεί ή να διαχυθεί. Το ποσοστό της απορρόφησης εξαρτάται από τα οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας — όπως η υφή, το χρώμα και η θερμοκρασία της. Η απορρόφηση οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας, ενώ η εκπομπή καθιστά δυνατή τη διάδοση της θερμικής ενέργειας στο περιβάλλον. Όλα τα σώματα εκπέμπουν και απορροφούν θερμική ακτινοβολία, σε βαθμό που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την εκπεμπικότητά τους. Τα μαύρα σώματα, στη θεωρητική τους μορφή, εκπέμπουν και απορροφούν τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ακτινοβολίας για δεδομένη θερμοκρασία, σύμφωνα με τον νόμο του Stefan–Boltzmann. Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα σημαντική στα κτήρια, καθώς συμμετέχει καθοριστικά τόσο στη θερμική συμπεριφορά των εξωτερικών επιφανειών όσο και στην ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ εσωτερικών δομικών στοιχείων.

2.2 Θερμικά χαρακτηριστικά υλικών

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στον ενεργειακό σχεδιασμό ενός κτηρίου, καθώς επηρεάζουν τόσο τον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας μέσω του κελύφους όσο και την ικανότητα των δομικών στοιχείων να αποθηκεύουν και να επαναποδίδουν θερμότητα στο χρόνο. Η θερμική συμπεριφορά των υλικών συμβάλλει ουσιαστικά στη ρύθμιση του μικροκλίματος του εσωτερικού χώρου και στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτηρίου.

Η θερμοχωρητικότητα C εκφράζει την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει θερμική ενέργεια στη μάζα του. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα και η μάζα ενός υλικού, τόσο αυξάνεται η δυνατότητά του να απορροφά και να διατηρεί θερμότητα. Η αποθηκευμένη ενέργεια αυτή αποδίδεται εκ νέου στο εσωτερικό του κτηρίου με χρονική καθυστέρηση, όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα μειώνεται κάτω από τη θερμοκρασία της μάζας των δομικών στοιχείων (Κοσμόπουλος & Περιβολάρης, 2021 , TOTEE 20701-1, 2017).

Εξίσου σημαντικές είναι οι οπτικοθερμικές ιδιότητες των επιφανειών, δηλαδή η ανακλαστικότητα και η απορροφητικότητα, που καθορίζουν το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται ή απορροφάται από ένα υλικό. Η απορροφητικότητα μιας επιφάνειας εκφράζεται με τον συντελεστή ρ , ενώ η ανακλαστικότητα με τον συντελεστή α . Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από το χρώμα και την υφή της επιφάνειας:

- Τα σκούρα και τραχιά υλικά παρουσιάζουν υψηλή απορροφητικότητα,
- ενώ τα ανοιχτόχρωμα και λεία χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα (TOTEE 20701-1, 2017).

Για τα αδιαφανή στοιχεία του κελύφους, το άθροισμα των δύο συντελεστών ισούται με τη μονάδα:

$$\rho + \alpha = 1$$

Το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα αδιαφανές δομικό στοιχείο μεταδίδεται στο εσωτερικό μέσω αγωγής, επηρεάζοντας τη θερμοκρασιακή κατανομή του κελύφους. Αντιθέτως, στα διαφανή δομικά στοιχεία (όπως υαλοπίνακες), εισέρχεται και η έννοια της διαπερατότητας, που εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που διαπερνά και εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο. Ο συντελεστής διαπερατότητας συμβολίζεται με r , και για τα διαφανή στοιχεία ισχύει:

$$\rho + \alpha + r = 1$$

Η ακτινοβολία που διέρχεται στο εσωτερικό απορροφάται από τις επιφάνειες των δομικών στοιχείων (τοίχους, δάπεδα, οροφές) και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Ένα μέρος της εκπέμπεται ξανά υπό μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται στη μάζα των δομικών στοιχείων, συμβάλλοντας στη θερμική αδράνεια του κελύφους.

Η εκπνευτικότητα (ε) αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο: εκφράζει την ικανότητα ενός υλικού να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία προς το περιβάλλον. Ο τέλειος εκπομπός, δηλαδή το ιδανικό μαύρο σώμα, έχει $\varepsilon = 1$ και απορροφά–εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ακτινοβολίας. Τα πραγματικά υλικά έχουν πάντοτε $\varepsilon < 1$, και η τιμή του συντελεστή αυτού εξαρτάται από τη φύση και την υφή της επιφάνειας.

2.2.1 Ο συντελεστής θερμικής αντίστασης R

Η θερμική αντίσταση R εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει μία στρώση υλικού πάχους d στη ροή θερμότητας που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου μέσω μοναδιαίας επιφάνειας, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών είναι ίση με 1 K. Μετρείται σε $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ και υπολογίζεται ως:

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

Όπου:

d [m]: το πάχος της στρώσης του υλικού

λ [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

Σε ένα πολυστρωματικό δομικό στοιχείο, η συνολική θερμική αντίσταση ισούται με το άθροισμα των αντιστάσεων όλων των επιμέρους στρώσεων, καθώς και των αντιστάσεων μετάβασης του αέρα στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες. Συνεπώς:

$$R_{o\lambda} = R_i + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_a$$

όπου:

$R_{o\lambda}$ [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]: η συνολική θερμική αντίσταση του δομικού στοιχείου

R_i [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]: η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο

R_a [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]: η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον

$R_1, R_2, \dots, R_n$ [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]: οι αντιστάσεις των επί μέρους στρώσεων

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η σειρά τοποθέτησης των επιμέρους στρώσεων δεν μεταβάλλει τη συνολική ροή θερμότητας μέσω του στοιχείου. Ωστόσο, επηρεάζει τη θερμοχωρητικότητα του δομικού στοιχείου. Η τοποθέτηση του θερμομονωτικού στρώματος εξωτερικά αυξάνει τη θερμική αδράνεια, ενώ η τοποθέτησή του εσωτερικά την περιορίζει, μειώνοντας την ικανότητα του στοιχείου να αποθηκεύει θερμότητα (TOTEE 20701-2, 2017).

2.2.2 Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U εκφράζει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή μέσω 1 m^2 δομικού στοιχείου ανά μονάδα χρόνου, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλευρών του είναι ίση με 1 K . Πρόκειται για μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της συνολικής θερμικής αντίστασης του στοιχείου και μετριέται σε $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

Ορίζεται από τη σχέση:

$$U = \frac{1}{R_{o\lambda}} = \frac{1}{R_i + \sum_{j=1}^n R_j + R_a}$$

όπου:

$R_{o\lambda}$: η συνολική θερμική αντίσταση του δομικού στοιχείου

R_i, R_a : οι αντιστάσεις μετάβασης αέρα στις δύο επιφάνειες

R_j : η αντίσταση κάθε επιμέρους στρώσης

Ο συντελεστής U εξαρτάται άμεσα από το πάχος και τη θερμική αγωγιμότητα των υλικών που αποτελούν το στοιχείο, καθώς και από τις συνθήκες συναγωγής του αέρα στις δύο επιφάνειες. Επομένως, μια αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης οδηγεί σε αύξηση της συνολικής θερμικής αντίστασης και, κατά συνέπεια, σε μείωση της τιμής του U , βελτιώνοντας τη θερμομονωτική ικανότητα του στοιχείου (TOTEE 20701-2, 2017).

2.3 Θερμικό ισοζύγιο

Ο ενεργειακός σχεδιασμός ενός κτηρίου βασίζεται στην κατανόηση και ανάλυση του θερμικού ισοζυγίου, δηλαδή της ισορροπίας μεταξύ των θερμικών προσόδων και των θερμικών απωλειών που λαμβάνουν χώρα μέσω του κελύφους και των εσωτερικών διαδικασιών. Η ορθή εκτίμηση του θερμικού ισοζυγίου επιτρέπει την επίτευξη θερμικής άνεσης με τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι στην ενεργειακή αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα του κτηρίου.

Σκοπός του θερμικού ισοζυγίου είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας και η αξιοποίηση των προσόδων, με στόχο τη διατήρηση των συνθηκών θερμικής άνεσης των χρηστών. Σύμφωνα με τον Κοσμόπουλο και τον Περιβολάρη (2021), το θερμικό ισοζύγιο μπορεί να θεωρηθεί ως το σύνολο των θερμικών ροών που εισέρχονται και εξέρχονται από το κτήριο, περιλαμβάνοντας τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές πηγές θερμότητας.

Οι εξωτερικές πηγές θερμότητας αφορούν κυρίως την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αποτελεί την πρωτεύουσα μορφή θερμικής προσόδου στο κέλυφος, τόσο μέσω των αδιαφανών όσο και μέσω των διαφανών στοιχείων. Η ηλιακή ενέργεια που διαπερνά τα υαλοστάσια απορροφάται από τις εσωτερικές επιφάνειες (τοίχους, δάπεδα, οροφές), αποθηκεύεται στη μάζα των δομικών στοιχείων και επαναποδίδεται στο χώρο με χρονική υστέρηση, συμβάλλοντας στη θερμική σταθερότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, η μετατροπή μέρους της ακτινοβολίας σε υπέρυθρη ενέργεια μεγάλου μήκους κύματος προκαλεί φαινόμενο εγκλωβισμού θερμότητας, το οποίο αυξάνει τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα.

Αντίστοιχα, οι εσωτερικές πηγές θερμότητας προέρχονται από τη λειτουργία των χρηστών, των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, του τεχνητού φωτισμού και του ζεστού νερού χρήσης (ZNX), που όλα συμβάλλουν στις θερμικές προσόδους του χώρου.

Οι θερμικές απώλειες ενός κτηρίου προκύπτουν κυρίως από:

- τη θερμική αγωγή μέσω των δομικών στοιχείων του κελύφους (διαφανών και αδιαφανών),
- τον αερισμό (φυσικό ή μηχανικό),
- τη διείσδυση αέρα μέσω χαραμιάδων, αρμών και αστοχιών αεροστεγανότητας.

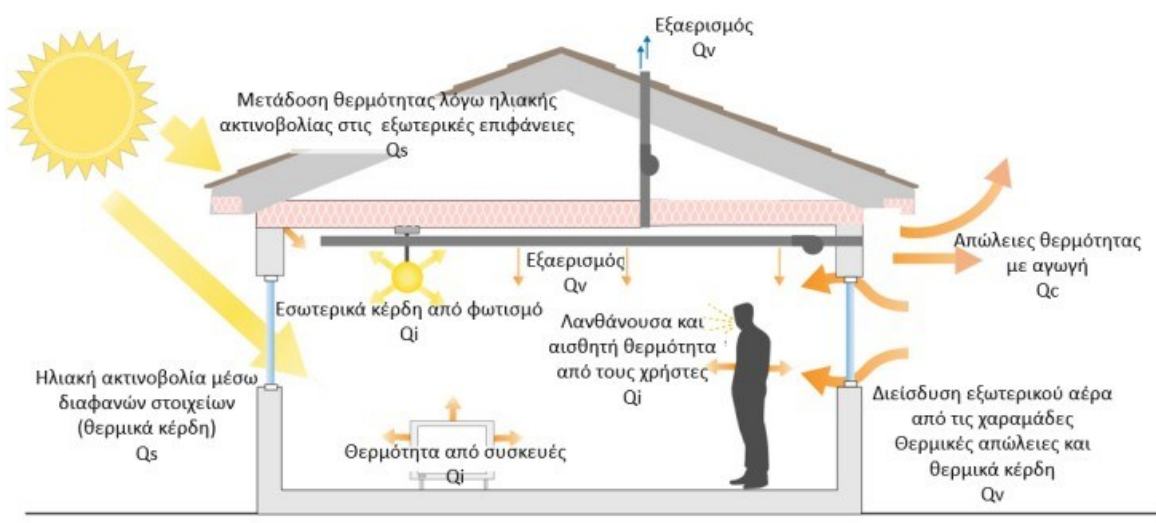
Η ελαχιστοποίηση των απωλειών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της θερμομόνωσης, της τοποθέτησης ενεργειακών κουφωμάτων και του ελέγχου του αερισμού. Ωστόσο, ακόμη και σε βέλτιστα μονωμένες κατασκευές, ένα ποσοστό θερμότητας διαφεύγει μέσω θερμογεφυρών, δηλαδή τοπικών περιοχών με αυξημένη θερμική ροή, οι οποίες αποτελούν αναπόφευκτο χαρακτηριστικό του κελύφους.

Η αντικειμενική μελέτη των θερμογεφυρών είναι ουσιώδης, καθώς επιτρέπει τον περιορισμό αλλά όχι την πλήρη εξάλειψή τους. Οι θερμογέφυρες θα εξεταστούν εκτενώς στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας.

Τέλος, η ανανέωση του εσωτερικού αέρα θεωρείται απαραίτητη για τη διασφάλιση συνθηκών υγιεινής και άνεσης. Ο αερισμός διακρίνεται σε:

- Ηθελημένο αερισμό, ο οποίος περιλαμβάνει τον φυσικό ή μηχανικό αερισμό, και
- Αθέλητο αερισμό, που οφείλεται σε ανεπιθύμητες διαρροές μέσω κουφωμάτων και αρμών.

Ο φυσικός αερισμός πρέπει να πραγματοποιείται ελεγχόμενα, κυρίως κατά τις ώρες με μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, ώστε να αποφεύγονται υπερβολικές θερμικές απώλειες. Αντίθετα, ο αθέλητος αερισμός πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο, καθώς οδηγεί σε άσκοπη ενεργειακή κατανάλωση.



Εικόνα 2 : Ενεργειακό ισοζύγιο κτιρίου

Στην ανωτέρω εικόνα απεικονίζονται οι κυριότερες ροές θερμότητας που συμμετέχουν στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός κτηρίου. Οι βασικές συνιστώσες είναι:

- Q_c : θερμικές ροές λόγω αγωγιμότητας του κελύφους,
- Q_v : θερμικές ροές λόγω αερισμού,
- Q_i : εσωτερικά θερμικά κέρδη,
- Q_s : ηλιακά θερμικά κέρδη.

2.3.1 Θερμικό Ισοζύγιο Κτηρίου κατά τη Χειμερινή Περίοδο

Κατά τη χειμερινή περίοδο, η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης στο εσωτερικό των κτηρίων. Επομένως, προκειμένου να διατηρηθούν οι συνθήκες θερμικής άνεσης, απαιτείται περιορισμός των θερμικών απωλειών και παράλληλα αξιοποίηση των θερμικών προσόδων, κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 13790, για τη χειμερινή περίοδο ισχύει η εξίσωση:

$$(Q_c + Q_v) - n * (Q_i + Q_s) = Q_m$$

όπου:

- Q_c : απώλειες μέσω αγωγιμότητας,
- Q_v : απώλειες μέσω αερισμού,
- Q_i : εσωτερικά θερμικά κέρδη,
- Q_s : ηλιακά κέρδη,
- η : συντελεστής αξιοποίησης των κερδών,
- Q_m : απαιτούμενη συμπληρωματική θερμική ενέργεια.

Για την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας Q_m , η ενεργειακή μελέτη πρέπει να επικεντρώνεται στον περιορισμό των ροών Q_c και Q_v . Ορθές πρακτικές αποτελούν:

- η τοποθέτηση θερμομόνωσης με κατάλληλο πάχος και εξωτερική διάταξη, ώστε να ενισχύεται η θερμική αδράνεια και να αποτρέπεται η συμπύκνωση υδρατμών,
- η εγκατάσταση ενεργειακών κουφωμάτων για μείωση των απωλειών μέσω αγωγής,

- η προσεκτική τοποθέτηση των κουφωμάτων, ώστε να περιορίζονται οι διεισδύσεις αέρα,
- και η εφαρμογή ελεγχόμενου φυσικού αερισμού, κατά προτίμηση τις μεσημβρινές ώρες, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι πιο κοντά στην εσωτερική.

Επιπλέον, η αξιοποίηση των ηλιακών κερδών Q_s μπορεί να ενισχυθεί μέσω παθητικών ηλιακών συστημάτων, όπως ηλιακοί χώροι, νότιος προσανατολισμός ανοιγμάτων και επιφανειών αποθήκευσης θερμότητας, που επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της απορρόφησης και διάχυσης της ηλιακής θερμότητας χωρίς μηχανικά μέσα.

2.3.2 Θερμικό Ισοζύγιο Κτηρίου κατά τη Θερινή Περίοδο

Κατά τη θερινή περίοδο, η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος υπερβαίνει τη θερμοκρασία άνεσης του εσωτερικού χώρου, οδηγώντας συχνά σε υπερθέρμανση και αυξημένη χρήση συστημάτων κλιματισμού (Κοσμόπουλος & Περιβολάρης, 2021). Στην περίπτωση αυτή, στόχος είναι η ενίσχυση της αποβολής θερμότητας προς το περιβάλλον και ο περιορισμός των ηλιακών προσόδων.

Σύμφωνα με το ISO 13790, το θερμικό ισοζύγιο για τη θερινή περίοδο περιγράφεται ως:

$$-n * (Q_c + Q_v) + (Q_i + Q_s) = Q_m$$

όπου Q_m εκφράζει την **απαιτούμενη ψυκτική ενέργεια** για τη διατήρηση των επιθυμητών θερμοκρασιών.

Για τη μείωση της συμπληρωματικής ψυκτικής ενέργειας Q_m , είναι κρίσιμη η λήψη μέτρων όπως:

- Περιορισμός των θερμικών προσόδων μέσω ηλιοπροστασίας (πρόβολοι, σκίαστρα, περσίδες),
- Αύξηση της ανακλαστικότητας των εξωτερικών επιφανειών με τη χρήση ανοιχτόχρωμων επιχρισμάτων,
- Επαρκής θερμομόνωση για περιορισμό της θερμικής ροής από το εξωτερικό προς το εσωτερικό,
- Αεροστεγής κατασκευή για αποφυγή ανεπιθύμητης διείσδυσης θερμού αέρα,
- Περιορισμός της εσωτερικής θερμικής παραγωγής (τεχνητός φωτισμός, ηλεκτρικές συσκευές),

- Αξιοποίηση του νυχτερινού αερισμού, που διευκολύνει την απόρριψη της αποθηκευμένης θερμότητας και συμβάλλει στη φυσική ψύξη του κελύφους.

Ο συνδυασμός των παραπάνω στρατηγικών εξασφαλίζει την ενεργειακή αποδοτικότητα και την θερμική ευστάθεια του κτηρίου κατά τη θερινή περίοδο, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από ενεργοβόρα μηχανικά συστήματα.

3. Θερμομονωτικά υλικά

Η θερμική προστασία του κελύφους αποτελεί τον θεμελιώδη παράγοντα του ενεργειακού σχεδιασμού των κτηρίων, καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό το ενεργειακό ισοζύγιο και την απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση ή ψύξη. Η επιλογή και ορθολογική χρήση των θερμομονωτικών υλικών και των ενεργειακών κουφωμάτων αποτελούν βασικούς πυλώνες για τη μείωση των θερμικών απωλειών και τη διατήρηση συνθηκών θερμικής άνεσης.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα βασικά είδη θερμομονωτικών υλικών, οι ιδιότητές τους και οι παράγοντες επιλογής με στόχο τη συνολική βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων.

Τα θερμομονωτικά υλικά έχουν ως κύριο σκοπό τον περιορισμό της ροής θερμότητας μέσω των δομικών στοιχείων, μειώνοντας τις απώλειες το χειμώνα και περιορίζοντας την υπερθέρμανση το καλοκαίρι. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού εξαρτάται από συνδυασμό παραμέτρων: θερμοφυσικές, μηχανικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές.

Σύμφωνα με τον Κοσμόπουλο (2019), τα θερμομονωτικά υλικά κατατάσσονται σε ανόργανα και οργανικά, ενώ στην αγορά διατίθενται επίσης συνδυασμένα ή νέας τεχνολογίας προϊόντα.

Κατηγορία Υλικού	Υποκατηγορίες / Παραδείγματα
Ανόργανα Υλικά	Ινώδη (Υαλοβάμβακας, Πετροβάμβακας), Αφρώδη (Αφρώδες γυαλί), Κοκκώδη (Περλίτης)
Οργανικά Υλικά	Αφρώδη (EPS, XPS, Αφρός πολυουρεθάνης), Ινώδη (Κυτταρίνη, Προβατόμαλλο, Ίνες καρύδας)
Συνδυασμένα Υλικά	Ξυλόμαλλο, Αφρώδης γύψος, Σιλικονούχο ασβέστιο
Υλικά Νέας Τεχνολογίας	Διαφανή θερμομονωτικά, υπερθερμονωτικά, οικολογικά υλικά

Πίνακας 1 : Κατηγοριοποίηση θερμομονωτικών υλικών

Η καταλληλότητα ενός θερμομονωτικού υλικού καθορίζεται από τις εξής ιδιότητες (Αραβαντινός, 2024):

- Θερμοφυσικά χαρακτηριστικά (συντελεστής λ, θερμοχωρητικότητα, αντίσταση διάχυσης υδρατμών)
- Μηχανική αντοχή και συμπιεσιμότητα
- Αντοχή σε υγρασία, ακτινοβολία και γήρανση

- Περιβαλλοντική συμπεριφορά και ανακυκλωσιμότητα
- Συνεργασία με άλλα δομικά υλικά
- Ευκολία μεταφοράς και τοποθέτησης
- Οικονομικό κόστος και διαθεσιμότητα στην αγορά

Η βέλτιστη επιλογή υλικού εξαρτάται, επομένως, τόσο από τις τεχνικές απαιτήσεις της κατασκευής όσο και από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του έργου.

3.1 Ινώδη ανόργανα υλικά

Τα ινώδη ανόργανα θερμομονωτικά υλικά είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα λόγω της υψηλής θερμομονωτικής και ηχομονωτικής τους ικανότητας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως ο υαλοβάμβακας και ο πετροβάμβακας, οι οποίοι παρουσιάζουν ομοιότητες στη χημική τους σύσταση, διαφοροποιούμενοι ως προς τη μηχανική αντοχή και τη συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες.

3.1.1 Υαλοβάμβακας

Ο υαλοβάμβακας είναι ανόργανο ινώδες υλικό, προϊόν τήξης και ινώσεως υαλωδών ουσιών, με μικρή πυκνότητα και υψηλή θερμομονωτική ικανότητα. Όσο πιο λεπτές και ομοιόμορφες είναι οι ίνες του, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοσή του, καθώς παγιδεύουν περισσότερο αέρα σε στατικές στρώσεις.

Διατίθεται σε πλάκες ή πάπλωμα, είναι άοσμος και διατηρεί σταθερό τον όγκο του χωρίς να επηρεάζεται από τρωκτικά, μικροοργανισμούς ή χημικά. Αντέχει σε θερμοκρασίες 250–400°C και θεωρείται άκαυστο υλικό κατηγορίας A1 σύμφωνα με το EN 13501-1.



Εικόνα 3 : Υαλοβάμβακας σε μορφή παπλώματος (ρολού) και πλάκας (www.xtools.gr)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υαλοβάμβακα είναι (TOTEE 20701-2, 2017):

- Υαλοβάμβακας σε πάπλωμα: $\lambda = 0,035\text{--}0,041 \text{ W/mK}$
- Υαλοβάμβακας σε πλάκες: $\lambda = 0,033\text{--}0,041 \text{ W/mK}$

Η σωστή τοποθέτηση του υαλοβάμβακα είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της θερμικής του απόδοσης: πρέπει να προστατεύεται από την υγρασία, να εφαρμόζεται σταθερά χωρίς κενά και να μην συμπιέζεται. Εσφαλμένες πρακτικές, όπως η στήριξη με απλά καρφιά ή η λανθασμένη τοποθέτηση φράγματος υδρατμών (αλουμινόφυλλο στην ψυχρή πλευρά), μπορούν να οδηγήσουν σε συμύκνωση, καθίζηση και απώλεια θερμομονωτικής ικανότητας (Αραβαντινός, 2024).

3.1.2 Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας (ή ορυκτοβάμβακας) αποτελεί ένα ανόργανο ινώδες θερμομονωτικό υλικό, το οποίο προέρχεται από τη τήξη φυσικών ηφαιστειακών πετρωμάτων, όπως βασάλτης, δολομίτης και ασβεστόλιθος, στους 1600 °C περίπου, και την επακόλουθη ίνωση του τηγμένου υλικού με φυγοκεντρικές μεθόδους. Το αποτέλεσμα είναι μια ινώδης δομή με μεγάλο πορώδες και υψηλή περιεκτικότητα σε εγκλωβισμένο αέρα — χαρακτηριστικό που του προσδίδει την υψηλή θερμομονωτική του ικανότητα.



Εικόνα 4 : Πετροβάμβακας σε μορφή παπλώματος (ρολού) και πλάκας (www.fibran.gr)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πετροβάμβακα είναι (TOTEE 20701-2, 2017):

- Πάπλωμα: $\lambda = 0,035-0,041 \text{ W/mK}$
- Πλάκες: $\lambda = 0,033-0,041 \text{ W/mK}$

Ο συντελεστής αντίστασης στη διάχυση υδρατμών είναι μικρός ($\mu \approx 1-1,5$), επιτρέποντας στο δομικό στοιχείο να «αναπνέει» και να αποφεύγει τη συσσώρευση υγρασίας. Διαθέτει πολύ καλή ακουστική απορρόφηση, ενώ παρουσιάζει αντοχή σε θερμοκρασίες έως 750°C , χωρίς να αλλοιώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες. Για τον λόγο αυτό κατατάσσεται στην πυράντοχη κατηγορία A1 σύμφωνα με το EN 13501-1, δηλαδή ως μη καύσιμο υλικό.

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή αντοχή στη θερμότητα και στη φωτιά (πλήρης ακαυστότητα).
- Καλή ηχομονωτική ικανότητα, λόγω της πορώδους ινώδους δομής.
- Αντοχή σε μικροοργανισμούς, τρωκτικά και χημικά αντιδραστήρια.
- Εύκολη κοπή και τοποθέτηση σε επίπεδες και κατακόρυφες επιφάνειες.
- Μικρός συντελεστής διάχυσης υδρατμών, αποτρέποντας τη συμπύκνωση.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς απώλεια ιδιοτήτων.

Μειονεκτήματα

- Ευαισθησία στην υγρασία (απαιτείται στεγανοποίηση ή φράγμα υδρατμών).
- Μικρή μηχανική αντοχή σε θλίψη (μη κατάλληλο για επιφάνειες με σημειακά φορτία).
- Ελαφρώς αυξημένο κόστος έναντι οργανικών μονωτικών υλικών.

Πεδία Εφαρμογής

Ο πετροβάμβακας χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε:

- Εξωτερικές τοιχοποιίες (εξωτερική ή ενδιάμεση θερμομόνωση),
- Πλάκες οροφής και στέγες,
- Δώματα (συνήθως με προστασία από υγρασία),
- Ηχομονωτικά χωρίσματα και ψευδοροφές,
- Μηχανολογικές εγκαταστάσεις, όπως μονώσεις σωληνώσεων, λεβήτων και αεραγωγών.

Η συνεισφορά του στην πυροπροστασία είναι ιδιαίτερα σημαντική, γι' αυτό και προτιμάται σε βιομηχανικά και πολυώροφα κτήρια. Η τοποθέτησή του πρέπει να εξασφαλίζει μηχανική σταθερότητα και αποφυγή κενών, ενώ προτείνεται η χρήση προστατευτικών μεμβρανών έναντι υγρασίας.

Από περιβαλλοντική άποψη, ο πετροβάμβακας διαθέτει μακρά διάρκεια ζωής (>50 έτη) και είναι μερικώς ανακυκλώσιμος, με μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα χρήσης.

3.2 Αφρώδη οργανικά υλικά

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία περιλαμβάνει τα αφρώδη οργανικά υλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλό βάρος, κλειστή κυψελική δομή και υψηλή θερμομονωτική ικανότητα. Τα πιο διαδεδομένα είναι η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS).

3.2.1 Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)

Η διογκωμένη πολυστερίνη (Expanded Polystyrene – EPS) αποτελεί ένα αφρώδες θερμομονωτικό υλικό οργανικής προέλευσης, που προκύπτει από τον πολυμερισμό του στυρενίου και τη διόγκωση των κόκκων με χρήση πτητικών διογκωτικών μέσων, όπως το πεντάνιο.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής, οι κόκκοι θερμαίνονται με κορεσμένο ατμό, με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου τους έως και 50 φορές. Στη συνέχεια μορφοποιούνται σε πλάκες ή μπλοκ, δημιουργώντας μια δομή κλειστών κυψελίδων που εγκλωβίζουν αέρα — το κύριο θερμομονωτικό συστατικό. Ο εγκλωβισμένος αέρας μειώνει τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή, καθιστώντας το EPS ένα από τα πιο αποδοτικά και οικονομικά μονωτικά υλικά στην οικοδομή.

Διατίθεται σε λευκές (διογκωμένη πολυστερίνη) και γκρι (γραφιτούχα διογκωμένη πολυστερίνη) πλάκες πάχους 2–10 cm και χρησιμοποιείται σε εξωτερική και εσωτερική θερμομόνωση.



Εικόνα 5 : Αφρώδης διογκωμένη πολυστερίνη (αριστερά) και αφρώδης διογκωμένη πολυστερίνη με άνθρακα (δεξιά) (www.vitex.gr)

Η πυκνότητα της διογκωμένης πολυστερίνης κυμαίνεται μεταξύ 15-30 kg/m³ . Εμφανίζει συντελεστής διάχυσης υδρατμών: $\mu = 20\text{--}100$ (ανάλογα με την πυκνότητα), ενώ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του είναι (TOTEE 20701-2, 2017):

- Κόκκοι EPS: $\lambda = 0,045$ W/mK
- Πλάκες EPS: $\lambda = 0,032\text{--}0,041$ W/mK
- Πλάκες με γραφίτη: $\lambda = 0,031\text{--}0,034$ W/mK

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό βάρος και εύκολη κοπή, καθιστώντας το κατάλληλο για πλήθος εφαρμογών.
- Εξαιρετική θερμομονωτική ικανότητα σε σχέση με το κόστος.
- Χημική σταθερότητα και αντοχή στη γήρανση.
- Καλή αντοχή σε συμπίεση, ειδικά σε εκδόσεις υψηλής πυκνότητας.
- Αδρανές υλικό, δεν προσβάλλεται από μύκητες και βακτήρια.

Μειονεκτήματα

- Εύφλεκτο, αν και διατίθενται τύποι με πρόσθετα αυτοσβέσης (κατηγορία E κατά EN 13501-1).
- Ευαίσθητο σε UV ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την κιτρίδωση και την επιφανειακή φθορά.

- Ασυμβατότητα με οργανικούς διαλύτες (π.χ. βενζίνη, ακετόνη).
- Περιορισμένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες ($> 80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Πεδία Εφαρμογής

Η διογκωμένη πολυστερίνη χρησιμοποιείται κυρίως σε:

- Εξωτερικά θερμομονωτικά συστήματα (ETICS),
- Εσωτερικές και ενδιάμεσες τοιχοποιίες,
- Δώματα και οροφές,
- Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος,
- Συστήματα ψευδοροφών και μονώσεις δοκών και υποστρωμάτων.

Η προστασία της επιφάνειάς της από μηχανικές καταπονήσεις και υπεριώδη ακτινοβολία είναι απαραίτητη — συνήθως επιτυγχάνεται με επίχρισμα ή μεμβράνη.

Περιβαλλοντικά Στοιχεία

Το EPS έχει χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια ανά μονάδα όγκου, αλλά λόγω της πετρελαϊκής προέλευσης των πρώτων υλών του, το αποτύπωμα άνθρακα είναι υψηλότερο από αυτό των ανόργανων μονωτικών. Ωστόσο, η μεγάλη διάρκεια ζωής (άνω των 50 ετών) και η δυνατότητα ανακύκλωσης του υλικού μειώνουν την καθαρή περιβαλλοντική του επιβάρυνση.

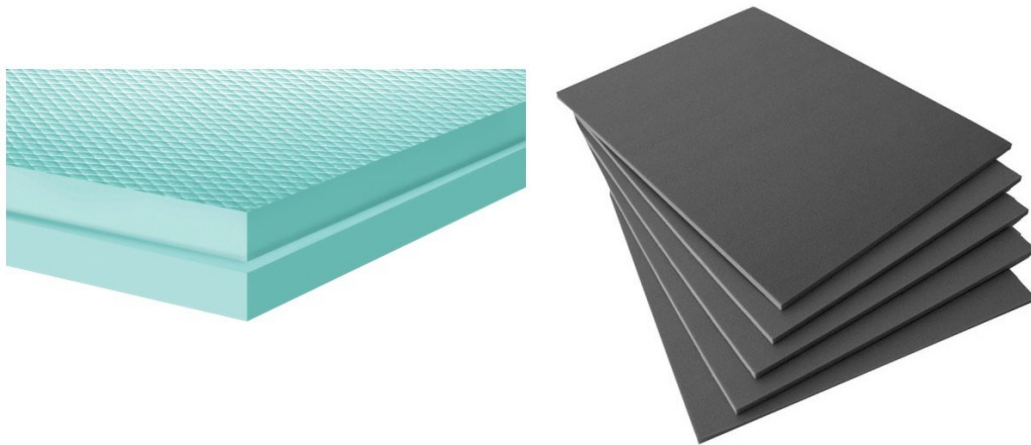
3.2.2 Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS)

Η εξηλασμένη πολυστερίνη (Extruded Polystyrene – XPS) αποτελεί εξελιγμένη μορφή πολυστερίνης, που παρασκευάζεται με εξώθηση του τηγμένου πολυμερούς υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία, δημιουργώντας μια πυκνή, κλειστής κυψελικής δομής μάζα. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε υλικό μεγαλύτερης μηχανικής αντοχής και χαμηλότερης απορρόφησης υγρασίας σε σύγκριση με το EPS.

Η χρωματική του διαφοροποίηση (συνήθως μπλε ή πράσινο) εξαρτάται από τον κατασκευαστή, ενώ οι επιφάνειες του προϊόντος διατίθενται είτε λεία είτε ανάγλυφη για καλύτερη πρόσφυση. Η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) είναι άκαμπτη, με υψηλή αντοχή σε συμπίεση ($20\text{--}50\text{ N/cm}^2$) και πολύ χαμηλή απορροφητικότητα υγρασίας ($0,1\text{--}0,2\%$ κατ' όγκο).

Η πυκνότητα του XPS κυμαίνεται μεταξύ 28-45 kg/m³. Εμφανίζει συντελεστής διάχυσης υδρατμών: $\mu = 80\text{--}250$ (ανάλογα με την πυκνότητα) και απορρόφηση υγρασίας: 0,1 – 0,2 % κατ' όγκο. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς του είναι (TOTEE 20701-2, 2017):

- XPS: $\lambda = 0,031\text{--}0,038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- XPS με άνθρακα: $\lambda = 0,030\text{--}0,032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$



Εικόνα 6 : Αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη (αριστερά) και αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη με άνθρακα (δεξιά) (www.fibran.gr , www.banarta.com)

Η πολύ χαμηλή απορροφητικότητα καθιστά το υλικό ιδανικό για συνθήκες με αυξημένη υγρασία ή συνεχή επαφή με νερό (π.χ. θεμελιώσεις, ανεστραμμένες στέγες, δώματα). Η αντοχή σε θλίψη φθάνει τα 200–500 kPa, επιτρέποντας τη χρήση του σε επιφάνειες που υφίστανται μεγάλα σημειακά φορτία. Παρουσιάζει, ωστόσο, ευπάθεια στην υπεριώδη ακτινοβολία και πρέπει να προστατεύεται με στρώσεις κονιαμάτων ή πλακιδίων.

Πλεονεκτήματα

- Εξαιρετική μηχανική αντοχή και σταθερότητα διαστάσεων.
- Αμελητέα απορρόφηση υγρασίας, πλήρης αντοχή σε παγετό και βροχή.
- Υψηλή θερμομονωτική ικανότητα σε μικρό πάχος.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής και χημική σταθερότητα.
- Εύκολη κοπή, μεταφορά και τοποθέτηση.

Μειονεκτήματα

- Εύφλεκτο υλικό, απαιτείται προστασία με μη καύσιμες επιστρώσεις.

- Ευαισθησία στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV) — γι' αυτό πρέπει να καλύπτεται σύντομα μετά την τοποθέτηση.
- Ασυμβατότητα με ορισμένους οργανικούς διαλύτες.
- Μη διαπερατότητα σε υδρατμούς, γεγονός που μπορεί να απαιτεί ειδική μελέτη διάχυσης.

Ενδεικτικά Πεδία Εφαρμογής

Η εξηλασμένη πολυστερίνη χρησιμοποιείται σε:

- Αντεστραμμένα δώματα και επίπεδες στέγες,
- Θεμελιώσεις και περιμετρικές μονώσεις,
- Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος,
- Ψυκτικούς θαλάμους και αποθήκες,
- Συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης (ETICS) υψηλών μηχανικών απαιτήσεων.

Η συμπεριφορά της XPS σε υγρασία και μηχανική φόρτιση την καθιστά ιδανική για ενεργειακές αναβαθμίσεις κτηρίων σε περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις ή παγετό, αλλά και για επιφάνειες με μεγάλες καταπονήσεις.

Περιβαλλοντική Συμπεριφορά

Η παραγωγή της απαιτεί περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το EPS, ωστόσο η μεγαλύτερη αντοχή και διάρκεια ζωής της εξισορροπούν εν μέρει την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η εξηλασμένη πολυστερίνη είναι πλήρως ανακυκλώσιμη, και οι σύγχρονες εκδόσεις χρησιμοποιούν διογκωτικά μέσα χωρίς CFC ή HCFC, μειώνοντας δραστικά τις εκπομπές που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

3.3 Ποιοτική αξιολόγηση θερμομονωτικών υλικών

Η ποιοτική αξιολόγηση των θερμομονωτικών υλικών αποτελεί κρίσιμο στάδιο του ενεργειακού και περιβαλλοντικού σχεδιασμού των κτηρίων, καθώς η επιλογή ενός υλικού δεν βασίζεται αποκλειστικά στις θερμοφυσικές του ιδιότητες, αλλά και στην περιβαλλοντική του συμπεριφορά, τη διάρκεια ζωής, την ανακυκλωσιμότητα και το οικολογικό του αποτύπωμα. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) παρέχει την πληρέστερη μεθοδολογία αξιολόγησης, εξετάζοντας το

σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το στάδιο παραγωγής έως τη διάθεση του υλικού στο τέλος της ζωής του (EN ISO 14040:2006, EN ISO 14044:2006).

Η αξιολόγηση των θερμομονωτικών υλικών πραγματοποιείται βάσει τριών κύριων αξόνων:

1. Ενεργειακή απόδοση: η ικανότητα του υλικού να περιορίζει τη ροή θερμότητας μέσω του κελύφους, η οποία εκφράζεται από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ [$\text{W/m}\cdot\text{K}$].
2. Περιβαλλοντική συμπεριφορά: οι εκπομπές CO_2 και άλλων αερίων κατά την παραγωγή, μεταφορά, χρήση και διάθεση του υλικού.
3. Ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής: η σταθερότητα των ιδιοτήτων του υλικού με την πάροδο του χρόνου και υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες υγρασίας ή θερμοκρασίας.

3.3.1 Ενεργειακή και Τεχνική Απόδοση

Η ενεργειακή αποτελεσματικότητα των θερμομονωτικών υλικών εξαρτάται κυρίως από τη θερμοφυσική τους συμπεριφορά, όπως αυτή καθορίζεται από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ), τη θερμοχωρητικότητα (C) και τη διάχυση υδρατμών (μ). Ανόργανα υλικά, όπως ο πετροβάμβακας και ο υαλοβάμβακας, παρουσιάζουν σταθερή απόδοση σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και πολύ καλή συμπεριφορά στη φωτιά, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για πυροπροστατευτικές εφαρμογές. Αντίθετα, τα αφρώδη οργανικά υλικά (διογκωμένη και εξηλασμένη πολυστερίνη) χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα και, επομένως, μεγαλύτερη θερμομονωτική ικανότητα για το ίδιο πάχος, αλλά εμφανίζουν ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολία UV, καθώς και χαμηλότερη πυραντοχή (TOTEE 20701-2, 2017).

Η ανθεκτικότητα των υλικών στον χρόνο εξαρτάται επίσης από τη μηχανική τους συμπεριφορά και την αντίσταση στην υγρασία. Ο πετροβάμβακας και η εξηλασμένη πολυστερίνη παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη σταθερότητα διαστάσεων και αντοχή σε γήρανση, ενώ το EPS και ο υαλοβάμβακας απαιτούν προστασία από υγρασία ή συμπύκνωση υδρατμών. Η σωστή τοποθέτηση και η στεγανοποίηση των υλικών είναι καθοριστικές για τη διατήρηση των θερμομονωτικών τους ιδιοτήτων.

3.3.2 Περιβαλλοντική Απόδοση και Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των θερμομονωτικών υλικών βασίζεται στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση και στις εκπομπές ρύπων που παράγονται σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής τους (LCA):

- Στάδιο παραγωγής: αφορά την εξόρυξη πρώτων υλών, την κατεργασία και την κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγική διαδικασία.
- Στάδιο χρήσης: σχετίζεται με τη διάρκεια ζωής του υλικού, τη συντήρησή του και την εξοικονόμηση ενέργειας που επιφέρει κατά τη λειτουργία του κτηρίου.
- Στάδιο απόρριψης ή ανακύκλωσης: περιλαμβάνει τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης και την περιβαλλοντική επιβάρυνση της τελικής διάθεσης.

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες (Αραβαντινός, 2024⁺, TOTEE 20701-2, 2017), τα ανόργανα ινώδη υλικά (πετροβάμβακας, υαλοβάμβακας) απαιτούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες τήξης για την παραγωγή τους, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την ενσωματωμένη ενέργεια (embodied energy) και τις εκπομπές CO₂. Ωστόσο, παρουσιάζουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής και μηδενική εκπομπή τοξικών ουσιών κατά τη χρήση, αντισταθμίζοντας εν μέρει την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Αντίθετα, τα οργανικά αφρώδη υλικά (EPS, XPS) κατασκευάζονται από παράγωγα πετρελαίου και απαιτούν λιγότερη ενέργεια στην παραγωγή, αλλά εμφανίζουν υψηλότερες συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της προέλευσης των πρώτων υλών τους και της χρήσης διογκωτικών ή προωθητικών αερίων. Παρότι οι σύγχρονες τεχνολογίες έχουν εξαλείψει τη χρήση CFC και HCFC, τα οποία συνέβαλαν στην καταστροφή της στιβάδας του όζοντος, εξακολουθεί να υφίσταται περιβαλλοντικό κόστος από τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων και το δύσκολο στάδιο απόρριψης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενεργειακή εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια ζωής ενός θερμομονωτικού υλικού υπερβαίνει κατά πολύ την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του καθώς τα περισσότερα θερμομονωτικά υλικά «επαναποσβένουν» την ενσωματωμένη τους ενέργεια μέσα στα πρώτα 12–18 μήνες λειτουργίας του κτηρίου, γεγονός που τα καθιστά περιβαλλοντικά ωφέλιμα σε βάθος χρόνου.

3.3.3 Υγειονομικές και Ανακυκλωτικές Πτυχές

Από υγειονομική σκοπιά, τα περισσότερα θερμομονωτικά υλικά είναι χημικά αδρανή και μη τοξικά κατά τη χρήση τους, ωστόσο η διαδικασία παραγωγής ή κοπής τους ενδέχεται να απελευθερώνει ίνες ή πτητικές ενώσεις. Ο υαλοβάμβακας και ο πετροβάμβακας, για παράδειγμα, πρέπει να εγκαθίστανται με μέσα ατομικής προστασίας (μάσκες, γάντια) ώστε να αποφεύγεται η εισπνοή μικροϊνών, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν μηχανικό ερεθισμό, χωρίς όμως να τεκμηριώνεται καρκινογόνος δράση.

Από πλευράς ανακυκλωσιμότητας, τα ανόργανα υλικά έχουν περιορισμένες δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης, καθώς είναι δύσκολο να διαχωριστούν μετά τη χρήση. Αντίθετα, το EPS και το XPS είναι πλήρως ανακυκλώσιμα, είτε μέσω μηχανικής επαναλειτουργίας (κοκκοποίηση και αναδιαμόρφωση), είτε μέσω ενεργειακής αξιοποίησης (θερμική ανάκτηση). Παρόλα αυτά, η απόρριψη ανεπεξέργαστων οργανικών μονωτικών σε χωματερές παραμένει πρόβλημα λόγω του μεγάλου όγκου και της μακροχρόνιας βιοαποδόμησης.

3.3.4 Συγκριτική αξιολόγηση θερμομονωτικών υλικών

Η συνολική ποιοτική αξιολόγηση των θερμομονωτικών υλικών συνοψίζεται ενδεικτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Κριτήριο	Πετροβάμβακας	Υαλοβάμβακας	EPS	XPS
Θερμική αγωγιμότητα λ (W/m·K)	0.033 – 0.041	0.033 – 0.041	0.031 – 0.041	0.030 – 0.038
Πυραντοχή	Πολύ υψηλή (A1)	Πολύ υψηλή (A1)	Μέτρια (E)	Μέτρια (E)
Αντοχή σε υγρασία	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια	Πολύ υψηλή
Μηχανική αντοχή	Μέτρια	Χαμηλή	Καλή	Πολύ καλή
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλό	Μέτριο–Υψηλό
Ανακυκλωσιμότητα	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Καλή	Πολύ καλή
Διάρκεια ζωής	>50 έτη	>40 έτη	30–50 έτη	>50 έτη

Πίνακας 2 : Συγκριτική αξιολόγηση θερμομονωτικών υλικών

Συνολικά, η επιλογή θερμομονωτικού υλικού δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνικό ζήτημα, αλλά πολυπαραγοντική διαδικασία που συνδυάζει ενεργειακές, οικονομικές και

περιβαλλοντικές πτυχές. Ο πετροβάμβακας και ο υαλοβάμβακας υπερέχουν σε όρους πυροπροστασίας και θερμικής σταθερότητας, καθιστώντας τους ιδανικούς για κτήρια με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας. Αντίθετα, η διογκωμένη και η εξηλασμένη πολυστερίνη προσφέρουν υψηλή θερμομονωτική απόδοση με χαμηλό κόστος, γεγονός που εξηγεί τη μεγάλη τους διείσδυση στην αγορά, παρά τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Η τελική επιλογή θα πρέπει να βασίζεται σε ανάλυση κόστους–οφέλους και στην περιβαλλοντική αποδοτικότητα σε βάθος κύκλου ζωής, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση με τον ελάχιστο δυνατό περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

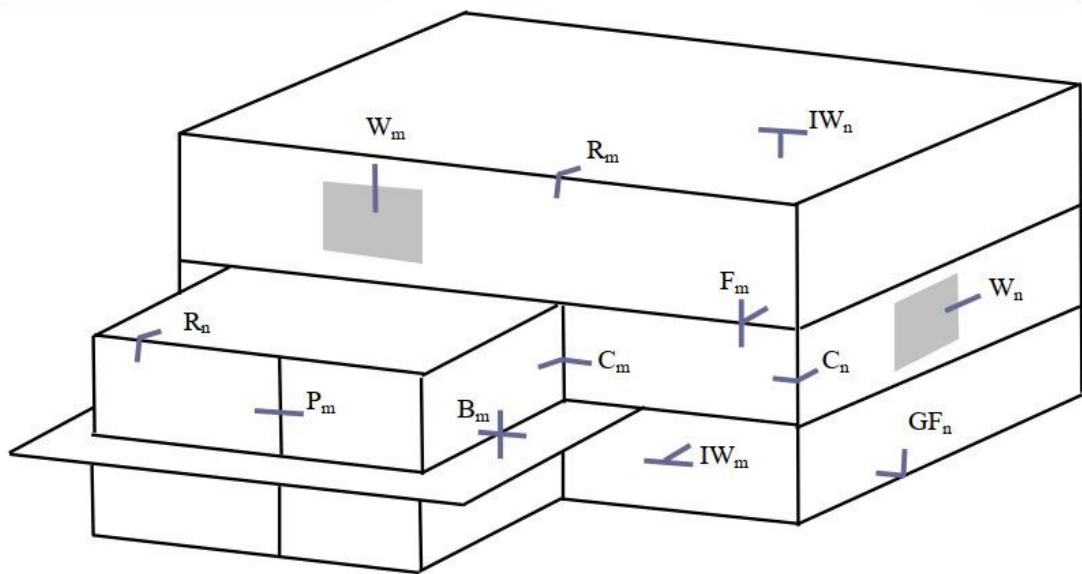
4. Οι θερμογέφυρες του κτιριακού κελύφους

4.1 Ο ορισμός της θερμογέφυρας και οι λόγοι εμφάνισής της

Τα σημεία των θερμογεφυρών, αδιαμφισβήτητα, αποτελούν το μεγαλύτερο πρόβλημα στην θερμομόνωση του κτιριακού κελύφους. Ως θερμογέφυρες χαρακτηρίζονται εκείνα τα τμήματα του κτιριακού κελύφους, των οποίων η θερμομονωτική προστασία υπολείπεται σημαντικά αυτής του υπόλοιπου κελύφους, με αποτέλεσμα η θερμική αντίσταση στα σημεία αυτά να είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με την υπόλοιπη θερμομονωμένη επιφάνεια και επομένως να παρατηρούνται έντονες μεταβολές στη ροή θερμότητας (Papadopoulos, 2016). Η μειωμένη θερμική αντίσταση στα σημεία αυτά οφείλεται κατά κύριο λόγο είτε στην αλλαγή της γεωμετρίας του δομικού στοιχείου, είτε στη διαφοροποίηση των υλικών και τη χρήση υλικών διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας, είτε στην ασυνέχεια ή στην αλλαγή του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης, λόγω κατασκευαστικών αστοχιών, αμέλειας ή/και κακοτεχνίας κατά τη φάση κατασκευής ή και στη φθορά που συντελείται στα υλικά με την πάροδο του χρόνου.

4.2 Κατηγορίες & θέσεις θερμογεφυρών

Οι δύο βασικές κατηγορίες θερμογεφυρών είναι οι γραμμικές και οι σημειακές. Οι γραμμικές θερμογέφυρες, εκτείνονται σε μία διεύθυνση κατά μήκος μιας γραμμής, χαρακτηρίζονται από μια συνεχή ροή θερμότητας κατά μήκος αυτής της γραμμής και εμφανίζονται σε σημεία στα οποία συνενώνονται διαφορετικά, ή ίδια, δομικά στοιχεία διαφορετικού πάχους ή σε σημεία που πραγματοποιείται αλλαγή στο πάχος της θερμομονωτικής στρώσης. Κατά μήκος των γραμμικών θερμογεφυρών η ροή θερμότητας παρουσιάζει έντονα δισδιάστατη φύση με αποτέλεσμα η παραδοχή της μονοδιάστατης ροής θερμότητας να μην έχει ισχύ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα γραμμικής θερμογέφυρας αποτελεί η ακμή στην ένωση ενός εξώστη (οριζόντιο στοιχείο) με την εξωτερική τοιχοποιία (κάθετο στοιχείο) ή το σημείο ένωσης μεταξύ δοκού και οπτοπλινθοδομής.



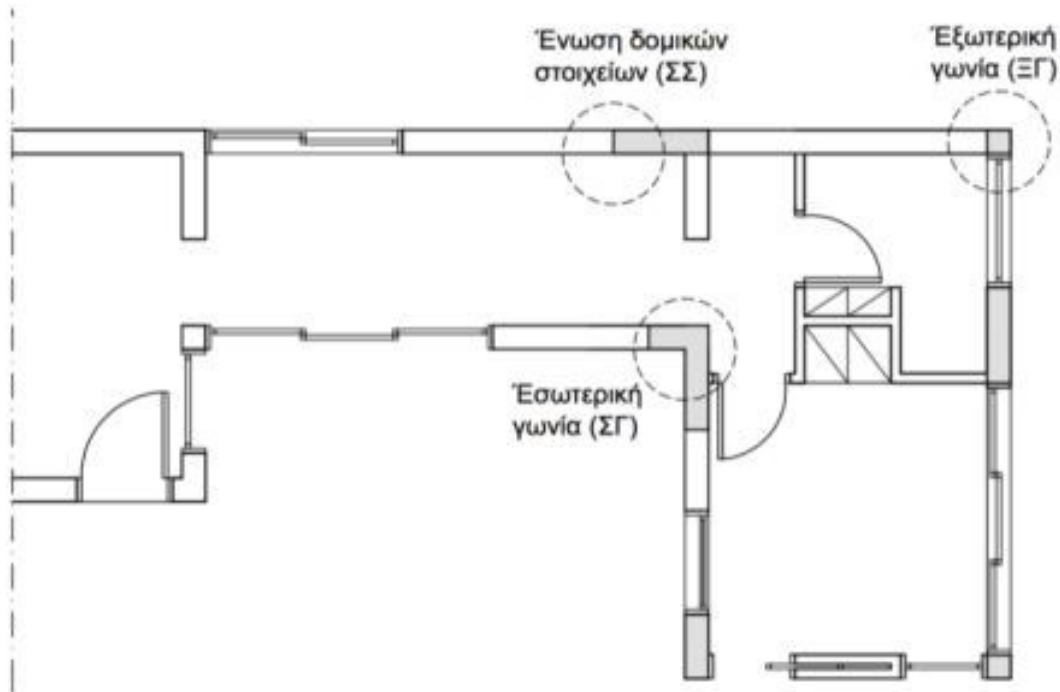
Εικόνα 7 : Τύποι γραμμικών θερμογεφυρών στο κτιριακό κέλυφος (TOTEE 20701-1/2017)

Εν αντιθέσει με τις γραμμικές, στις σημειακές θερμογέφυρες δεν υπάρχει συνεχόμενη ροή θερμότητας κατά μήκος μιας γραμμής, αφού αυτές αναπτύσσονται τοπικά σε σημεία του κτιριακού κελύφους στα οποία η θερμική αντίσταση διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με το περιβάλλον τους. Κατά βάση, οι σημειακές θερμογέφυρες, εμφανίζονται σε ενώσεις γραμμικών θερμογεφυρών. Αυτού του είδους οι θερμογέφυρες, παρουσιάζουν πολύ μικρότερη επίδραση στη ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου σε σχέση με τις γραμμικές θερμογέφυρες, αφού πρακτικά η επιρροή τους στην ανταλλαγή θερμότητας θεωρείται αμελητέα.

Εκτός από την κατηγοριοποίηση σε γραμμικές και σημειακές, οι θερμογέφυρες ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη θέση εμφάνισής τους στο κτιριακό κέλυφος. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την TOTEE 20701-2/2017, οι θερμογέφυρες μπορούν να εμφανιστούν:

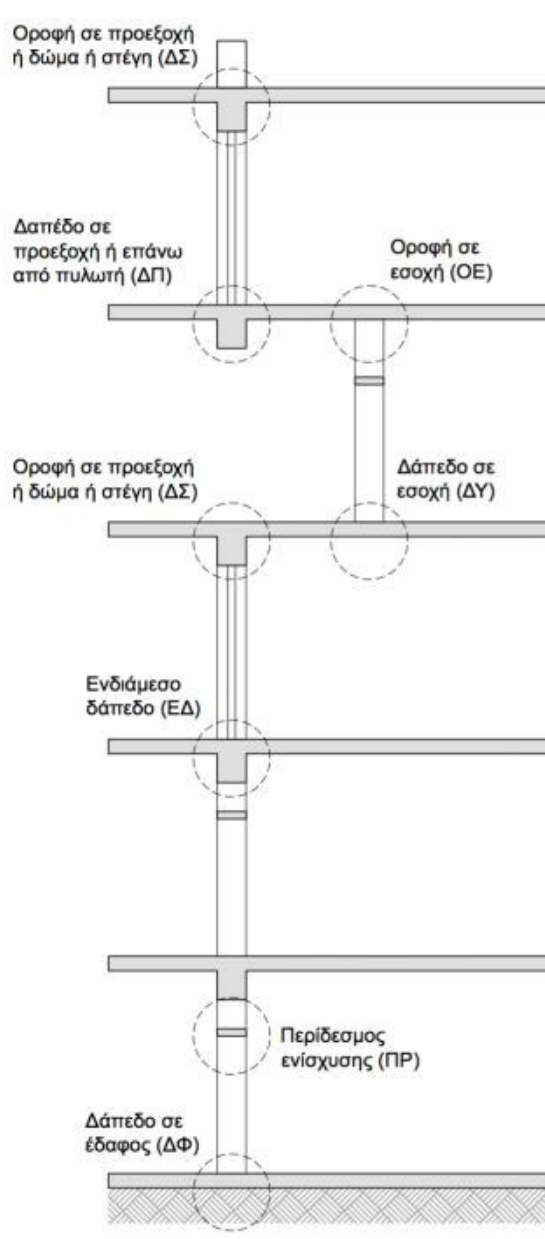
- Στη συναρμογή των κατακόρυφων δομικών στοιχείων του κελύφους (κατακόρυφες θερμογέφυρες). Η κύρια διάσταση των κατακόρυφων θερμογεφυρών αναπτύσσεται καθ' ύψος με το μήκος τους να μετράται χρησιμοποιώντας τα σχέδια των τομών του κτιρίου, ενώ ο εντοπισμός τους πραγματοποιείται στις κατόψεις του κτιρίου. Σύμφωνα με την TOTEE 20701-2/2017, ο συγκεκριμένος τύπος θερμογεφυρών κατατάσσεται σε 3 υποκατηγορίες ως ακολούθως:
 - Θερμογέφυρες εξωτερικών γωνιών.

- ο Θερμογέφυρες εσωτερικών γωνιών.
- ο Θερμογέφυρες ένωσης δομικών στοιχείων.



Εικόνα 8 : Υποκατηγορίες κατακόρυφων θερμογεφυρών (TOTEE 20701-2/2017)

- Στη συναρμογή των κατακόρυφων δομικών στοιχείων με τα οριζόντια δομικά στοιχεία του κελύφους (οριζόντιες θερμογέφυρες). Η κύρια διάσταση των οριζόντιων θερμογεφυρών αναπτύσσεται κατά μήκος των δομικών στοιχείων με το μήκος τους να μετράται χρησιμοποιώντας τα σχέδια των κατόψεων του κτιρίου, ενώ ο εντοπισμός τους πραγματοποιείται στα σχέδια των τομών. Σύμφωνα με την TOTEE 20701-2/2017, ο συγκεκριμένος τύπος θερμογεφυρών κατατάσσεται σε 7 υποκατηγορίες ως ακολούθως:
 - ο Θερμογέφυρες δώματος ή στέγης ή οροφής σε προεξοχή.
 - ο Θερμογέφυρες δαπέδου σε προεξοχή ή δαπέδου επάνω από πυλωτή.
 - ο Θερμογέφυρες οροφής σε εσοχή.
 - ο Θερμογέφυρες δαπέδου σε εσοχή.
 - ο Θερμογέφυρες ενδιάμεσου δαπέδου.
 - ο Θερμογέφυρες δαπέδου που εδράζεται σε έδαφος.
 - ο Θερμογέφυρες περίδεσμου ενίσχυσης (σενάζ).



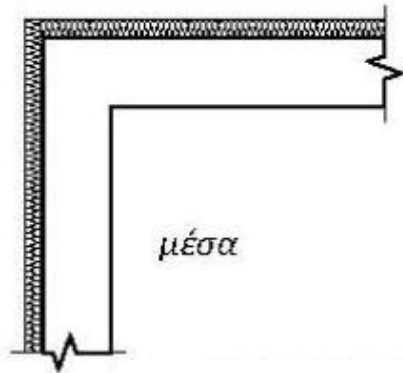
Εικόνα 9 : Υποκατηγορίες οριζόντιων θερμογεφυρών (TOTEE 20701-2/2017)

- Στη συναρμογή των κουφωμάτων με τα συμπαγή δομικά στοιχεία του κελύφους (θερμογέφυρες κουφωμάτων). Οι συγκεκριμένες θερμογέφυρες εντοπίζονται στα σημεία συναρμογής των κουφωμάτων με τα περιμετρικά συμπαγή δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους, με το μήκος τους να προκύπτει από τις περιμετρικές διαστάσεις των ανοιγμάτων. Σύμφωνα με την TOTEE 20701-2/2017, ο συγκεκριμένος τύπος θερμογεφυρών κατατάσσεται σε 2 υποκατηγορίες ως ακολούθως:
 - ο Θερμογέφυρες στο λαμπά του κουφώματος.

- ο Θερμογέφυρες στο ανωκάσι / κατωκάσι του κουφώματος.

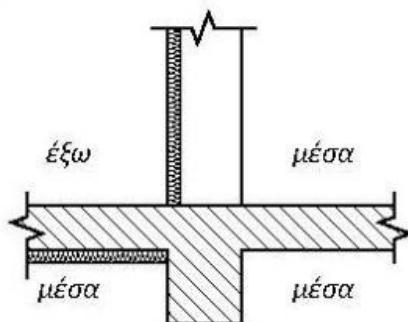
Τέλος, οι θερμογέφυρες διακρίνονται με βάση την αιτία δημιουργίας τους σε τρεις τύπους:

- Γεωμετρικές θερμογέφυρες. Αυτός ο τύπος θερμογεφυρών εντοπίζεται στα σημεία του κτιριακού κελύφους όπου λόγω της γεωμετρίας του, δηλαδή της διαμόρφωσης των δομικών στοιχείων, παρατηρείται αυξημένη ροή θερμότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες επιφάνειες. Στα σημεία αυτά, παρά το γεγονός ότι οι στρώσεις των υλικών παραμένουν ομοιόμορφες και της μη διακοπής της θερμομονωτικής στρώσης, αναπτύσσονται έντονα φαινόμενα δισδιάστατης ροής θερμότητας καθώς η γεωμετρία του δομικού στοιχείου δεν είναι πλέον γραμμική, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφορά μεταξύ της συνολικής εξωτερικής επιφάνειας από την εσωτερική.



Εικόνα 10: Γεωμετρική θερμογέφυρα (TOTEE 20701-2/2017)

- Κατασκευαστικές θερμογέφυρες. Ο συγκεκριμένος τύπος θερμογεφυρών αναπτύσσεται στα σημεία του κτιριακού κελύφους στα οποία υπάρχει διακοπή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης η οποία προκαλεί έντονα φαινόμενα δισδιάστατης ροής θερμότητας που οδηγεί σε αυξημένες ροές θερμότητας και ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου.



Εικόνα 11 : Κατασκευαστική θερμογέφυρα (TOTEE 20701-2/2017)

- Θερμογέφυρες από το συνδυασμό των δύο ανωτέρω τύπων. Οι πιο συνήθεις τύποι θερμογεφυρών που συναντώνται στις κατασκευές είναι ο συνδυασμός γεωμετρικών και κατασκευαστικών θερμογεφυρών. Αντίστοιχα και σε αυτές τις περιπτώσεις, εμφανίζονται έντονα φαινόμενα δισδιάστατης ροής θερμότητας, αυξημένες θερμικές απώλειες και μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του στοιχείου.

4.3 Οι επιπτώσεις των θερμογεφυρών

Τα κρίσιμα σημεία του κτιριακού κελύφους στα οποία εμφανίζονται οι θερμογέφυρες αποτελούν ουσιαστικά τα «ασθενή» σημεία του κτιρίου, αφού μέσω των θερμογεφυρών αυξάνει η θερμική ροή, άρα και οι θερμικές απώλειες του κτιρίου λειτουργώντας επιβαρυντικά στην προστασία και τη λειτουργικότητα του κτιρίου και προκαλώντας διάφορα προβλήματα τόσο στο ίδιο το κτίριο όσο και στους χρήστες του.

Ακολούθως παρουσιάζονται οι πιο σοβαρές επιπτώσεις των θερμογεφυρών, οι οποίες είναι οι εξής:

- Επιπτώσεις στην ενεργειακή συμπεριφορά και απόδοση του κτιρίου. Στη σημεία των θερμογεφυρών παρατηρείται αρκετά πιο αυξημένη ροή θερμότητας σε σύγκριση με τις μονωμένες γειτονικές περιοχές του κτιριακού κελύφους, με αποτέλεσμα να καταγράφονται υψηλότερες θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και υψηλότερα θερμικά κέρδη κατά τη θερινή περίοδο. Αυτές οι αυξημένες θερμικές ροές οδηγούν σε αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών απαιτήσεων, μειώνοντας την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας του και υποβαθμίζοντας την ενεργειακή του κλάση.

- Επιπτώσεις στη θερμική άνεση των χρηστών. Η αυξημένη ροή θερμότητας από τα σημεία των θερμογεφυρών οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου κατά τη χειμερινή περίοδο. Η θερμοκρασία επιφανείας των σημείων αυτών σε σχέση με τη θερμοκρασία των γειτονικών σημείων και τη θερμοκρασία του αέρα μπορεί να είναι δυσανάλογα χαμηλότερη. Η ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας που προκαλείται από τις θερμογέφυρες οδηγεί σε τοπική ψυχρή ακτινοβολία, επηρεάζοντας αρνητικά την αντιλαμβανόμενη θερμική άνεση των χρηστών (EN ISO 7730, 2005). Ακόμη και μικρές διαφορές 2–3 °C στις εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες μπορούν να γίνουν αισθητές ως δυσφορία, ιδιαίτερα κοντά σε γωνίες ή ψυχρά δάπεδα.
- Συμπύκνωση Υδρατμών – Ανάπτυξη μούχλας. Εκτός από τις ενεργειακές απώλειες, οι θερμογέφυρες συνδέονται στενά με υγροθερμικές παθολογίες, όπως η επιφανειακή και διαστρωματική συμπύκνωση. Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, κατά την περίοδο θέρμανσης, στα σημεία των θερμογεφυρών η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου μπορεί να είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τη θερμοκρασία στα γειτονικά σημεία και αρκετές φορές μπορεί να είναι χαμηλότερη και από το σημείο δρόσου του εσωτερικού αέρα με αποτέλεσμα να παρατηρείται επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών. Οι υγροποιήσεις των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου προκαλούν βλάβες στο δομικά υλικά του εσωτερικού του κελύφους, όπως για παράδειγμα αποφλοιώσεις χρωμάτων ή και αποκόλληση των επιχρισμάτων καθώς και μεγάλες πιθανότητες ανάπτυξης μούχλας με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία των χρηστών του κτιρίου, όπως είναι οι αλλεργίες, τα αναπνευστικά προβλήματα, το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου.
- Επιπτώσεις στη δομική ακεραιότητα του κτιρίου. Η πτώση της θερμοκρασίας στα σημεία των θερμογεφυρών σε τιμές μικρότερες από το σημείο δρόσου του εσωτερικού αέρα, οδηγεί σε συμπυκνώσεις υδρατμών τόσο στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου, όσο και στις ενδιάμεσες στρώσεις του. Οι συμπυκνώσεις και η παραμένουσα υγρασία σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να ευνοήσει την εξέλιξη της διάβρωσης του οπλισμού, ιδίως όταν η προστατευτική παθητική στρώση έχει ήδη διαταραχθεί λόγω ενανθράκωσης, χλωριόντων ή ρηγμάτων. Η οξείδωση του οπλισμού προκαλεί με τη σειρά της διόγκωση του οπλισμού λόγω συσσώρευσης σκουριάς και εμφάνιση ρωγμών κατά μήκος του κύριου οπλισμού (διαμήκειες ρωγμές) και του

οπλισμού των εγκάρσιων συνδετήρων (εγκάρσιες ρωγμές) καθώς και απώλεια διατομής του δομικού μέλους λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης του οπλισμού των φερόντων στοιχείων. Παράλληλα η οξείδωση οδηγεί σε μείωση της ενεργούς διατομής του οπλισμού καθώς και στην απώλεια συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. Όλα τα ανωτέρω προκαλούν πτώση της αντοχής των φερόντων στοιχείων του κτιρίου και οδηγούν σε σημαντική υποβάθμιση της δομικής ακεραιότητας και της ασφάλειας του κτιρίου.

4.4 Τυπολογίες θερμογεφυρών στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα

Στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα, οι θερμογέφυρες αποτελούν ένα ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο, ιδίως σε κτίρια που έχουν ανεγερθεί μετά την εφαρμογή του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων ή σε κτίρια στα οποία έχει εφαρμοστεί πλημμελώς στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους τους. Η παρουσία τους συνδέεται τόσο με τη γεωμετρία των δομικών στοιχείων του κτιρίου όσο και με τον τρόπο κατασκευής της θερμομονωτικής στρώσης του φέροντος οργανισμού και του κελύφους. Στα υφιστάμενα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και πλήρωση με οπτοπλινθοδομή, τα οποία αποτελούν μεγάλο μέρος της ελληνικής οικοδομικής πρακτικής, η ασυνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης εμφανίζεται κυρίως στα σημεία συναρμογής μεταξύ τοιχοποιίας, πλακών, δοκών, υποστυλωμάτων, εξωστών, δωμάτων και δαπέδων σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα ή με μη θερμαινόμενους χώρους.

Οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους, όπως η εφαρμογή συστημάτων εξωτερικής θερμομόνωσης, η θερμομόνωση δωμάτων και η αντικατάσταση κουφωμάτων, συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση των θερμικών απωλειών του κτιρίου. Ωστόσο, όταν οι επεμβάσεις αυτές δεν συνοδεύονται από ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των κρίσιμων κατασκευαστικά σημείων, οι θερμογέφυρες ενδέχεται να διατηρηθούν ή να αποκτήσουν μεγαλύτερη σχετική βαρύτητα στη συνολική θερμική συμπεριφορά του κελύφους. Με άλλα λόγια, όσο βελτιώνεται η θερμομονωτική ικανότητα των δομικών στοιχείων, τόσο μεγαλύτερη σημασία αποκτούν οι περιοχές ασυνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης.

Μία από τις συχνότερες τυπολογίες θερμογεφυρών αφορά τη συναρμογή της εξωτερικής τοιχοποιίας με τους οριζόντιους εξώστες. Στην ελληνική κατασκευαστική πρακτική οι εξώστες αποτελούν, κατά κανόνα, συνέχεια της πλάκας οπλισμένου

σκυροδέματος του εσωτερικού χώρου. Ακόμη και όταν εφαρμόζεται σύστημα θερμοπρόσοψης στην εξωτερική τοιχοποιία, η πλάκα του εξώστη συχνά παραμένει αμόνωτη στην άνω και κάτω παρειά της. Η διακοπή αυτή της θερμομονωτικής στρώσης δημιουργεί μία έντονη γραμμική θερμογέφυρα, μέσω της οποίας διατηρείται η ροή θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το εξωτερικό περιβάλλον.



Εικόνα 12 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - εξώστη

Αντίστοιχα σημαντική είναι η θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στη συναρμογή της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δώμα. Στις περιπτώσεις ύπαρξης στηθαίου, η θερμομόνωση συχνά δεν συνεχίζεται σε όλες τις παρειές του, με αποτέλεσμα το στηθαίο και η πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος του δώματος να λειτουργούν ως ζώνες αυξημένης θερμικής ροής. Αντίστοιχο πρόβλημα εμφανίζεται και στις περιπτώσεις δωματίων με προεξοχή, όπου η κάτω παρειά του προεξέχοντος οριζόντιου δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα παραμένει συχνά αμόνωτη. Οι λεπτομέρειες αυτές είναι χαρακτηριστικές περιπτώσεις στις οποίες η θερμομονωτική στρώση διακόπτεται σε σημεία αλλαγής γεωμετρίας του κελύφους.

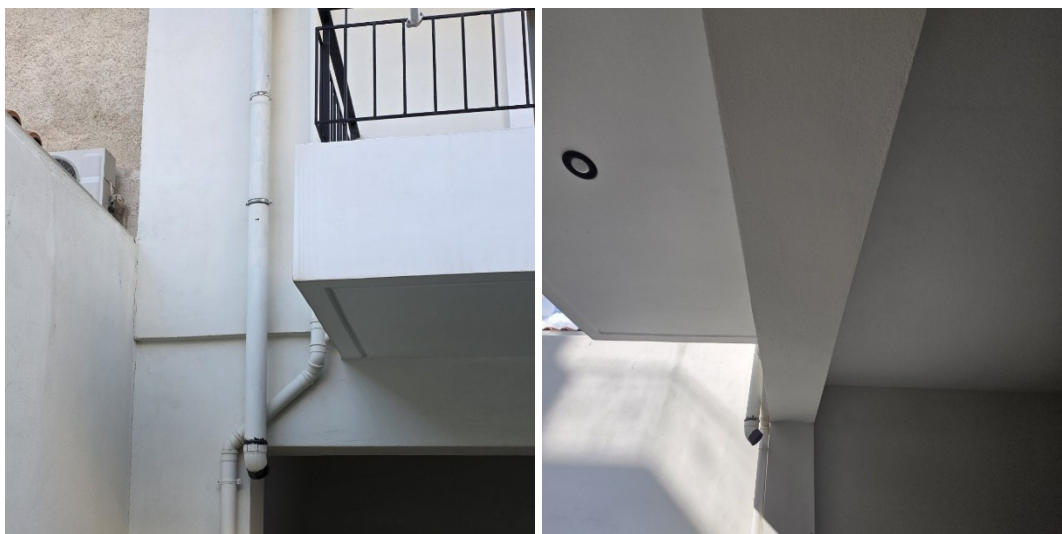


Εικόνα 13 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με στηθαίο



Εικόνα 14 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με προεξοχή

Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι θερμογέφυρες σε δάπεδα προς pilotis ή προς ανοιχτούς ημιυπαίθριους χώρους. Σε πολλές πολυκατοικίες του ελληνικού κτιριακού αποθέματος, η pilotis αποτελεί τμήμα του ισογείου που βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον εξωτερικό αέρα. Το δάπεδο του υπερκείμενου θερμαινόμενου χώρου, καθώς και οι δοκοί που το στηρίζουν, εκτίθενται σε χαμηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες. Ακόμη και όταν προβλέπεται θερμομόνωση στην κάτω επιφάνεια της πλάκας, η περιοχή των δοκών συχνά παραμένει χωρίς θερμομονωτική προστασία με αποτέλεσμα να δημιουργείται ασυνέχεια στη θερμομονωτική στρώση.



Εικόνα 15 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - pilotis

Σημαντικές σημεία ανάπτυξης θερμογεφυρών εντοπίζονται επίσης στη βάση του κτιρίου, και ειδικότερα στη συναρμογή της εξωτερικής τοιχοποιίας με το εσωτερικό δάπεδο που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Η τυπολογία αυτή απαντάται συχνά στο υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα, κυρίως λόγω πλημμελούς τοποθέτησης της θερμομόνωσης στο κατώτερο τμήμα του κελύφους. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν τόσο οι διαμορφώσεις όπου η στάθμη του δαπέδου βρίσκεται αρκετά ψηλότερα από τη στάθμη εδάφους του περιβάλλοντος χώρου και η εξωτερική θερμομόνωση τερματίζει στη στάθμη του δαπέδου, όσο και οι περιπτώσεις όπου η στάθμη εδάφους του περιβάλλοντος χώρου βρίσκεται στην ίδια στάθμη με το έδαφος κάτω από το δάπεδο. Και στις δύο διαμορφώσεις, η μη επαρκής συνέχιση της θερμομονωτικής στρώσης προς τα περιμετρικά στοιχεία θεμελίωσης από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να δημιουργήσει αυξημένη ροή θερμότητας, επηρεάζοντας τόσο απώλειες όσο και την εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία στο κατώτερο τμήμα της εξωτερικής τοιχοποιίας.



Εικόνα 16 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - πλάκα δαπέδου σε επαφή με έδαφος

Πέρα από τις παραπάνω βασικές κατηγορίες, στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα απαντώνται συχνά και άλλου είδους θερμογέφυρες, όπως αυτές που αναπτύσσονται σε περιοχές γύρω από τα ανοίγματα, όπως λαμπάδες, πρέκια, ποδιές παραθύρων και σημεία σύνδεσης κουφωμάτων με την τοιχοποιία. Μετά την αντικατάσταση κουφωμάτων, η ενεργειακή απόδοση του ανοίγματος βελτιώνεται σημαντικά, ωστόσο εάν δεν αντιμετωπιστεί σωστά ο τρόπος τοποθέτησης του κουφώματος, μπορεί να δημιουργηθούν τοπικές ασυνέχειες στη θερμομονωτική στρώση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη των θερμογεφυρών και την καταγραφή χαμηλών εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών.

Συνολικά, οι θερμογέφυρες που εμφανίζονται μετά από παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους δεν αποτελούν απαραίτητα μόνο νέες κατασκευαστικές ατέλειες, αλλά συχνά αποτελούν προϋπάρχουσες αδυναμίες οι οποίες καθίστανται πλέον σημαντικότερες μέσα σε ένα βελτιωμένο θερμικά κέλυφος. Η αποτελεσματική αντιμετώπισή τους απαιτεί τη συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης στις κρίσιμες αυτές περιοχές, την προσεκτική διαμόρφωση των κατασκευαστικών λεπτομερειών και την αποφυγή άμεσης έκθεσης των δομικών στοιχείων στις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη των θερμογεφυρών αποτελεί απαραίτητο στάδιο για την αξιολόγηση της πραγματικής απόδοσης των επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης και για τη βελτίωση της υδροθερμικής συμπεριφοράς των υφιστάμενων κτιρίων.

5. Μαθηματικός υπολογισμός θερμογεφυρών.

Οι θερμογέφυρες αποτελούν κρίσιμη συνιστώσα της ενεργειακής και υγραθερμικής συμπεριφοράς των κτιριακών κατασκευών, επηρεάζοντας άμεσα τόσο τις θερμικές απώλειες όσο και τις συνθήκες υγιεινής και άνεσης στους εσωτερικούς χώρους. Η μελέτη τους καθίσταται ολοένα και σημαντικότερη στο σύγχρονο σχεδιασμό κτιρίων υψηλής ενεργειακής απόδοσης, όπου η βελτιωμένη θερμική προστασία των επιμέρους δομικών στοιχείων μειώνει τη συμμετοχή τους στη συνολική θερμική ροή, αυξάνοντας κατ' αντιστοιχία τη σχετική επίδραση των θερμογεφυρών.

Η διερεύνηση των θερμογεφυρών απαιτεί ακριβή προσδιορισμό της δισδιάστατης ή τρισδιάστατης θερμικής ροής σε περιοχές σύνθετης γεωμετρίας και ετερογένειας υλικών. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση βασίζεται σε διεθνή και εθνικά πρότυπα όπως τα ISO 10211, ISO 14683, ISO 13788 και η TOTEE 20701-2/2017, τα οποία καθορίζουν τόσο τη μεθοδολογία υπολογισμού όσο και τις ελάχιστες απαιτήσεις επιδόσεων, επιτρέποντας την τεκμηριωμένη αξιολόγηση των θερμογεφυρών.

Πέραν της καθαρής ενεργειακής διάστασης, οι θερμογέφυρες συνδέονται στενά με την υγραθερμική συμπεριφορά του κελύφους. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας στους “ψυχρούς κόμβους” του κελύφους μπορεί να οδηγήσει σε υγραποιώσεις επιφανειακής ή ενδοστρωματικής μορφής, δημιουργώντας συνθήκες για ανάπτυξη μούχλας και μικροβιακών αποικιών, καθώς και για επιτάχυνση φαινομένων διάβρωσης και φθοράς του δομικού φορέα. Το παρόν κεφάλαιο αναπτύσσει αναλυτικά το θεωρητικό και υπολογιστικό πλαίσιο αποτίμησης των θερμογεφυρών, παρουσιάζοντας τις κρίσιμες παραμέτρους, τις εξισώσεις και τα κριτήρια απόδοσης που καθορίζουν την αξιολόγηση και τον τεχνικό σχεδιασμό τους.

5.1 Πρότυπα και μεθοδολογικό πλαίσιο υπολογισμού θερμογεφυρών

5.1.1 ISO 10211:2017

Το πρότυπο ISO 10211:2017, αποτελεί ένα από τα βασικά διεθνή πρότυπα για την αναλυτική μελέτη των θερμογεφυρών στο κτιριακό κέλυφος. Αντικείμενό του είναι ο καθορισμός των απαιτήσεων και των παραδοχών που πρέπει να τηρούνται κατά την αριθμητική προσομοίωση κατασκευαστικών κόμβων, με σκοπό τον υπολογισμό των

θερμικών ροών και των ελάχιστων επιφανειακών θερμοκρασιών. Η σημασία του προτύπου είναι ιδιαίτερη στις περιπτώσεις όπου η θερμική συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς μέσω μονοδιάστατης ροής θερμότητας, όπως συμβαίνει σε σημεία ασυνέχειας της θερμομόνωσης, ενώσεις δομικών στοιχείων, γωνίες, εξώστες, στηθαία, δάπεδα σε επαφή με εξωτερικό ή μη θερμαινόμενο χώρο και λοιπούς σύνθετους κατασκευαστικούς κόμβους.

Κεντρική θεματολογία του προτύπου είναι η δισδιάστατη και τρισδιάστατη ροή θερμότητας. Στη συνήθη μονοδιάστατη θεώρηση, η θερμότητα θεωρείται ότι μεταδίδεται κάθετα προς την επιφάνεια ενός ομοιογενούς ή στρωματοποιημένου δομικού στοιχείου. Η παραδοχή αυτή είναι αποδεκτή για εκτεταμένα επίπεδα στοιχεία, όπως ένας απλός τοίχος ή ένα δώμα μακριά από τις ακμές και τις ενώσεις. Αντίθετα, στις θερμογέφυρες η θερμική ροή αποκλίνει από τη μονοδιάστατη διεύθυνση και αναπτύσσεται σε δύο ή περισσότερες κατευθύνσεις, λόγω γεωμετρικών μεταβολών ή διαφοροποιήσεων στη θερμική αγωγιμότητα των υλικών. Για τον λόγο αυτό, το πρότυπο εισάγει λεπτομερή μεθοδολογία αριθμητικού υπολογισμού, ώστε η πραγματική κατανομή των θερμοκρασιών και των θερμικών ροών να αποδίδεται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στην περίπτωση της δισδιάστατης ανάλυσης, ο υπό εξέταση κόμβος προσομοιώνεται σε τομή, θεωρώντας ότι η γεωμετρία και οι θερμοφυσικές ιδιότητες παραμένουν σταθερές κατά την τρίτη διεύθυνση. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για γραμμικές θερμογέφυρες, όπως το σημείο σύνδεσης της εξωτερικής τοιχοποιίας με την πλάκα δαπέδου, δώματος ή εξώστη. Το πρότυπο καθορίζει τις απαιτήσεις για τη διαμόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου, τα όρια του υπολογιστικού πεδίου, τις θερμικές συνοριακές συνθήκες, τις θερμικές ιδιότητες των υλικών και τη διακριτοποίηση του μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η εξασφάλιση αξιόπιστων και συγκρίσιμων αποτελεσμάτων, ανεξάρτητα από το λογισμικό ή την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιείται.

Βασικό αποτέλεσμα της δισδιάστατης ανάλυσης είναι ο υπολογισμός της γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ , η οποία εκφράζει την πρόσθετη θερμική απώλεια που προκαλείται από τη θερμογέφυρα σε σχέση με την αντίστοιχη μονοδιάστατη θεώρηση των επιμέρους δομικών στοιχείων. Ο υπολογισμός του συντελεστή Ψ προκύπτει από τη σύγκριση της συνολικής θερμικής ροής του δισδιάστατου μοντέλου με τις θερμικές ροές που θα αναπτύσσονταν στα επιμέρους στοιχεία εάν αυτά λειτουργούσαν ανεξάρτητα και

μονοδιάστατα. Συνεπώς, η τιμή της Ψ αποτελεί κρίσιμο δείκτη για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της θερμογέφυρας στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου.

Εξίσου σημαντική είναι η δυνατότητα υπολογισμού της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας. Η παράμετρος αυτή συνδέεται άμεσα με την υδροθερμική συμπεριφορά του κελύφους, καθώς οι χαμηλές επιφανειακές θερμοκρασίες μπορούν να οδηγήσουν σε επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών ή σε ανάπτυξη μούχλας, ακόμη και όταν ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων ικανοποιεί τις κανονιστικές απαιτήσεις. Επομένως, το ISO 10211 δεν περιορίζεται μόνο στην ενεργειακή αποτίμηση των θερμογεφυρών, αλλά παρέχει και τη βάση για την αξιολόγηση της υγιεινής και της λειτουργικής επάρκειας των εσωτερικών επιφανειών.

Συνολικά, το ISO 10211:2017 αποτελεί απαραίτητο εργαλείο για την τεκμηριωμένη ανάλυση θερμογεφυρών, ιδιαίτερα σε μελέτες ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων κτιρίων, όπου συχνά παρατηρούνται ασυνέχειες ή πλημμελής εφαρμογή της θερμομονωτικής στρώσης. Η εφαρμογή της διδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης επιτρέπει την ακριβέστερη εκτίμηση των θερμικών απωλειών, την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων κατασκευαστικών λύσεων και τον εντοπισμό περιοχών αυξημένου κινδύνου ως προς τη συμπύκνωση και την ανάπτυξη μούχλας. Με τον τρόπο αυτό, το πρότυπο λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος μεταξύ της ενεργειακής απόδοσης και της υδροθερμικής ασφάλειας του κτιριακού κελύφους.

5.1.2 ISO 14683

Το ISO 14683 παρέχει τυποποιημένες τιμές και απλουστευμένες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό θερμογεφυρών σε συνηθισμένους κατασκευαστικούς κόμβους. Παρότι το πρότυπο διευκολύνει την ταχεία αποτίμηση της θερμικής επίπτωσης θερμογεφυρών, η χρήση του περιορίζεται σε προκαθορισμένες γεωμετρίες και υλικά, γεγονός που το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για έργα υψηλής ενεργειακής απόδοσης ή έργα όπου απαιτείται αυξημένη ακρίβεια.

Στην πράξη, το ISO 14683 χρησιμοποιείται συμπληρωματικά και κυρίως σε προκαταρκτικό στάδιο, ενώ σε τελικό στάδιο τεχνικού σχεδιασμού προκρίνεται η ανάλυση κατά ISO 10211.

5.1.3 TOTEE 20701-2

Η TOTEE 20701-2/2017 αποτελεί την επίσημη ελληνική προσαρμογή του ευρωπαϊκού πλαισίου για τον υπολογισμό των θερμογεφυρών. Περιλαμβάνει:

- καθορισμό μεθοδολογίας εκτίμησης Ψ .
- πίνακες τυπικών τιμών για συνήθεις κόμβους.
- κριτήρια ελάχιστης θερμικής προστασίας.
- απαιτήσεις υπολογισμού για κτίρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης.
- συσχετισμό με ελέγχους συμπύκνωσης και fRsi.

Επιπλέον, επισημαίνεται ότι σε νέες κατασκευές και έργα υψηλής απόδοσης η προσομοίωση κατά ISO 10211 αποτελεί **υποχρεωτική σχεδόν πρακτική επιλογή**, ενώ οι πίνακες χρησιμοποιούνται κυρίως σε υφιστάμενα κτίρια ή προκαταρκτικές μελέτες.

5.2 Η δισδιάστατη ροή θερμότητας

Η ροή θερμότητας στην πραγματικότητα αποτελεί ένα τρισδιάστατο μέγεθος. Στις μελέτες ενεργειακής απόδοσης, κατά παραδοχή, θεωρείται ότι αποτελεί ένα μονοδιάστατο μέγεθος με τη διεύθυνση της να είναι κάθετη προς την επιφάνεια του υπό εξέταση δομικού στοιχείου του κτιριακού κελύφους και προκύπτει από τον τύπο:

$$q = U * \Delta\theta$$

Όπου:

q [W/m²], η μονοδιάστατη ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του δομικού στοιχείου

U [W/m²K], ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου

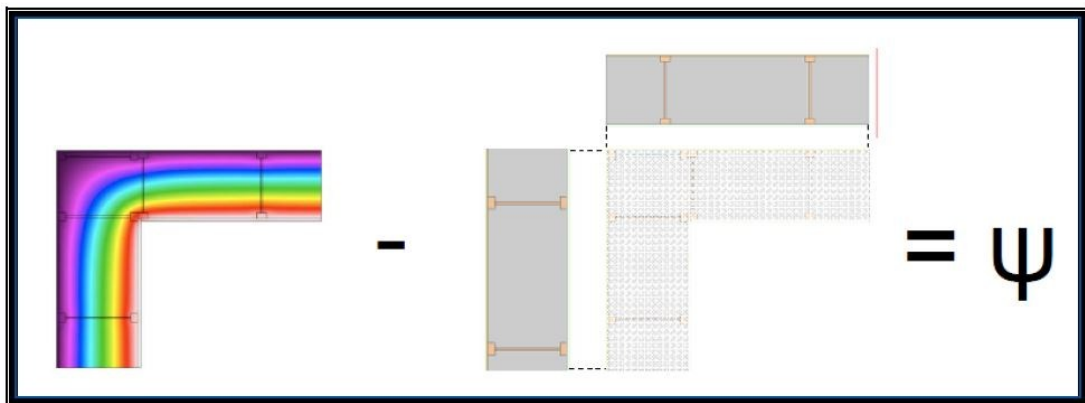
$\Delta\theta$ [K], η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής όψης του υπό μελέτη δομικού στοιχείου

Η μονοδιάστατη ροή θερμότητας θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητη από το χρόνο, με σταθερό θερμοκρασιακό πεδίο, με τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του υλικού να παραμένει σταθερή με την πάροδο του χρόνου και τα υλικά που διαμορφώνουν τις διαδοχικές στρώσεις του κάθε δομικού στοιχείου να θεωρούνται ομογενή και ισότροπα και ευρισκόμενα σε τέλεια μεταξύ τους θερμική επαφή. Αν και οι παραπάνω παραδοχές της μονοδιάστατης ροής δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατάσταση, σε επίπεδο κτιρίου οι αποκλίσεις των υπολογισμών διαφοροποιούνται ελάχιστα σε σχέση με το πραγματικό

αποτέλεσμα. Αντιθέτως, κατά τη μελέτη ενός μεμονωμένου δομικού στοιχείου, τα αποτελέσματα των υπολογισμών της μονοδιάστατης ροής μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τα πραγματικά.

Στα σημεία ενός δομικού στοιχείου ή σε ενδιάμεσες θέσεις στις οποίες μπορεί να συντελείται μεταβολή στην ομοιογένεια του, όπως για παράδειγμα σε σημεία διακοπής της θερμομονωτικής στρώσης ή σε σημεία αλλαγής γεωμετρίας του στοιχείου, εκτός από τη ροή θερμότητας κάθετη στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου, αναπτύσσονται ταυτόχρονα και σημαντικές πλευρικές ροές με κατεύθυνση από τις περιοχές με υψηλότερη θερμοκρασία προς περιοχές με χαμηλότερη θερμοκρασία, οι οποίες δεν εξισορροπούνται από άλλες γειτονικές ροές. Στα σημεία αυτά εμφανίζεται μια βαθμιαία μεταβολή της θερμοκρασίας εντός του δομικού στοιχείου, από τις περιοχές με επαρκή θερμομονωτική προστασία προς τα σημεία με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, δηλαδή τη θέση της θερμογέφυρας. Αντίστοιχη εικόνα με τη θερμοκρασιακή μεταβολή, παρουσιάζει και η μεταβολή της ροής θερμότητας.

Προκειμένου, λοιπόν, να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της δισδιάστατης ροής θερμότητας στις θέσεις των θερμογεφυρών, χρησιμοποιείται ο γραμμικός συντελεστής θερμοπερατότητας ψ , μέσω του οποίου διορθώνονται οι υπολογισμοί της μονοδιάστατης ροής θερμότητας εκατέρωθεν των σημείων της θερμογέφυρας.



Εικόνα 17 : Ο γραμμικός συντελεστής ψ ως αποτέλεσμα της διαφοράς στη ροή θερμότητας του μονοδιάστατου μοντέλου από το δισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού (Passive House Conference, 2010)

5.3 Υπολογισμός του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας ψ

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι θερμογέφυρες έχουν αρκετά μεγάλη επιρροή στις συνολικές ροές θερμότητας διαμέσου του κτηριακού κελύφους και κατ' επέκταση στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Γι' αυτό το λόγο, προκειμένου να είναι ακριβέστερος ο υπολογισμός του ενεργειακού ισοζυγίου και η ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου, θα πρέπει, κατά την εκτέλεση των μελετών ενεργειακής απόδοσης, να συνυπολογίζονται στις συνολικές απώλειες του κτιρίου. Ο υπολογισμός του συντελεστή μετάδοσης διαμέσου των θερμογεφυρών προκύπτει από τον τύπο:

$$\psi * l$$

Όπου:

ψ [W/mK], ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας

l [m], το μήκος της θερμογέφυρας

Μέσω του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας ψ [W/mK], εκφράζεται η επιρροή των θερμογεφυρών στο ενεργειακό ισοζύγιο, έτσι ώστε να είναι εφικτός ο ποσοτικός προσδιορισμός της επίδρασής τους στη συνολική ροή θερμότητας διαμέσου του κτηριακού κελύφους.

Σύμφωνα με το ISO 10211:2017, ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας προκύπτει από τον τύπο:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^N (U_j * L_j)$$

Όπου:

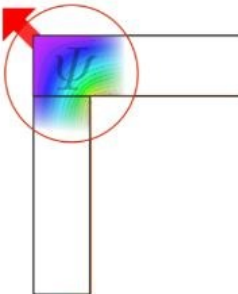
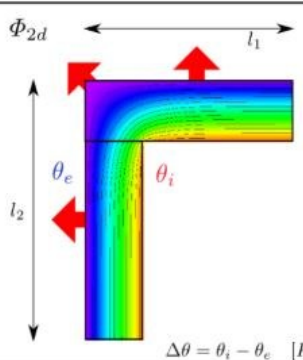
L_{2D} [W/mK], ο συντελεστής θερμικής σύζευξης που προκύπτει ύστερα από ανάλυση της θερμογέφυρας με χρήση λογισμικού δισδιάστατης ροής θερμότητας

U_j [W/m²K], ο συντελεστής θερμοπερατότητας κάθε δομικού στοιχείου j υπολογισμένος με θεώρηση μονοδιάστατης ροής θερμότητας

L_j [m], το μήκος του δομικού στοιχείου για το οποίο υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμοπερατότητας U_j

N_j [-], το πλήθος των δομικών στοιχείων

Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας ψ αντιπροσωπεύει την πρόσθετη ροή θερμότητας, διαμέσου μιας θερμογέφυρας, η οποία αγνοείται κατά την θεώρηση μονοδιάστατης ροής θερμότητας. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής ψ λειτουργεί ως διόρθωση στους υπολογισμούς της ροής θερμότητας και ισοδυναμεί με τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής απώλειας θερμότητας λόγω της δισδιάστατης ροής θερμότητας και της ροής θερμότητας μετρούμενη με το μονοδιάστατο μοντέλο υπολογισμού, διαμέσου του δομικού στοιχείου. Αυτή η διαφορά στη ροή θερμότητας μπορεί να δημιουργείται από παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του κτιριακού κελύφους ή λόγω ασυνεχειών ή κακοτεχνιών στη θερμομονωτική στρώση, οι οποίες δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της μονοδιάστατης ροής. Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας ψ , μπορεί να έχει είτε θετικές, είτε αρνητικές, είτε και μηδενικές τιμές. Οι θετικές τιμές δηλώνουν ότι η πραγματική απώλεια θερμότητας, που υπολογίζεται μέσω της δισδιάστατης ροής, είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από το μονοδιάστατο μοντέλο υπολογισμού. Αντιθέτως, οι αρνητικές τιμές, δηλώνουν ότι η ροή θερμότητας έχει υπερεκτιμηθεί, αφού η πραγματική ροή είναι μικρότερη σε σχέση με τα αποτελέσματα των υπολογισμών της μονοδιάστατης ροής. Οι μηδενικές τιμές του συντελεστή ψ , δηλώνουν ότι δεν υπάρχει υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση στους υπολογισμούς της ροής θερμότητας.

Differenz / Störung Difference / disturbance	Wärmestrom Simulation (2d) Heat flow simulation (2d)	U-Wert Berechnung (1d) U-value calculation (1d)
$\Delta\Phi$ 	Φ_{2d}  $\Delta\theta = \theta_i - \theta_e \text{ [K]}$	$\sum \Phi_i$ 
$\Delta\Phi = \Phi_{2d} - \sum \Phi_i \quad [\text{W/m}]$	Φ_{2d}	$\sum \Phi_i = \sum (U_i \cdot l_i \cdot \Delta\theta)$
$\psi = L_{2d} - L_0 = \frac{\Delta\Phi_{2d}}{\Delta\theta} \quad [\text{W}/(\text{mK})]$	$L_{2d} = \frac{\Phi_{2d}}{\Delta\theta}$	$L_0 = \sum (U_i \cdot l_i)$
$\Psi = \underbrace{L_{2d}}_{\text{2d-Simulation}} - \underbrace{\sum (U_i \cdot l_i)}_{L_0 \text{ aus U-Werte}} \quad [\text{W}/(\text{mK})]$		

Εικόνα 18 : Υπολογισμός του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας ψ (Passive House Institute)

Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας ψ , είναι απαραίτητο να προσδιορίζονται οι διαστάσεις που χρησιμοποιούνται (εσωτερικές ή εξωτερικές του δομικού στοιχείου), καθώς για διάφορους τύπους θερμογεφυρών η τιμή του Ψ διαφοροποιείται ανάλογα με τις παραδοχές μέτρησης των διαστάσεων. Ο υπολογισμός του συντελεστή ψ είναι δυνατός μόνο με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού για την επίλυση του δισδιάστατου μοντέλου θερμικής ροής. Με τα λογισμικά αυτά, υπολογίζεται η ροή θερμότητας Φ , στην οποία περιλαμβάνεται και η επίδραση της θερμογέφυρας.

Ο συντελεστής θερμικής σύζευξης ισούται με:

$$L_{2D} = \frac{\Phi_{2D}}{\theta_i - \theta_{out}}$$

Όπου:

Φ_{2D} [W/m], η ροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους

θ_i [°C], η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα

θ_{out} [°C], η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα

5.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή ψ

Η τιμή του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ επηρεάζεται από διάφορους τεχνικούς και γεωμετρικούς παράγοντες, οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο στον ενεργειακό όσο και στον κατασκευαστικό σχεδιασμό του κτιρίου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης. Η εξωτερική θερμομόνωση θεωρείται γενικά πιο αποτελεσματική σε σχέση με την εσωτερική ή την ενδιάμεση, καθώς περιβάλλει τα δομικά στοιχεία και τον φέροντα οργανισμό περιορίζοντας τις ασυνέχειες της θερμομονωτικής στρώσης. Αντίθετα, διακοπές ή κενά στη θερμομόνωση οδηγούν σε αυξημένη ροή θερμότητας μέσα από τον κόμβο, σε μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών και των σημείων των θερμογεφυρών και, τελικά, σε υψηλότερες τιμές του Ψ .

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης τα υλικά που συμμετέχουν στη διαμόρφωση του κόμβου, ιδίως όταν πρόκειται για υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Οπλισμοί, μεταλλικά στοιχεία, στηρίξεις ή δοκοί που διακόπτουν ή διαπερνούν τη θερμομονωτική στρώση μπορούν να ενισχύσουν το φαινόμενο της θερμογέφυρας. Για τον περιορισμό της επίδρασής τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν θερμοδιακοπές,

θερμομονωτικά ένθετα ή ειδικές κατασκευαστικές διατάξεις, οι οποίες μειώνουν τη μεταφορά θερμότητας στα κρίσιμα σημεία.

Τέλος, καθοριστική είναι και η γεωμετρία του κόμβου. Περιοχές όπως ακμές, γωνίες, προεξοχές και εξώστες παρουσιάζουν πιο σύνθετη θερμική συμπεριφορά, καθώς η ροή θερμότητας δεν αναπτύσσεται μόνο σε μία διεύθυνση. Για τον λόγο αυτό, η σωστή μελέτη των κατασκευαστικών λεπτομερειών, η κατάλληλη διάταξη των υλικών και η επιλογή τεχνικών λύσεων που εξασφαλίζουν τη συνέχεια της θερμομόνωσης συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση της τιμής του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ .

5.5 ISO 13788 - Υπολογισμός του συντελεστή fR_{si}

Οι επιπτώσεις των θερμογεφυρών στην ενεργειακή συμπεριφορά και απόδοση του κτιρίου μπορούν εύκολα να υπολογιστούν μέσω του προσδιορισμού του γραμμικού συντελεστή ψ όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3. Εκτός όμως από τις επιπτώσεις στην ενεργειακή απόδοση, οι θερμογέφυρες μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις τόσο στο κτιριακό κέλυφος, όσο και στην άνεση των χρηστών του χώρου αλλά και την υγεία τους λόγω των υγραποιώσεων καθώς και την ανάπτυξη μούχλας.

Σε αντίθεση με ότι ισχύει στα δομικά στοιχεία του κελύφους, στις θέσεις των θερμογεφυρών η πυκνότητα ροής θερμότητας αλλάζει και συνήθως οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο επειδή η κυκλοφορία του αέρα στις γωνίες και τις άκρες είναι περιορισμένη. Τα διάφορα αντικείμενα που είναι τοποθετημένα εντός των κτιρίων, όπως οι ντουλάπες και άλλα έπιπλα, όχι μόνο διαταράσσουν τη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής αλλά περιορίζουν και την ανταλλαγή ακτινοβολίας με το περιβάλλον. Έτσι, επειδή το ποσοστό υδρατμών που μπορεί να συγκρατηθεί από τον αέρα είναι πεπερασμένο και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του, στα ευαίσθητα σημεία των θερμογεφυρών, όπου καταγράφονται θερμοκρασίες αρκετά μικρότερες από αυτές του εσωτερικού αέρα, μπορεί να εμφανιστούν υγραποιήσεις υδρατμών (συμπύκνωση). Η συμπύκνωση που αναπτύσσεται μπορεί να διεισδύσει περαιτέρω στο εσωτερικό της κατασκευής λόγω της τριχοειδούς απορρόφησης των δομικών υλικών με αποτέλεσμα στο δομικό στοιχείο να καταγράφονται υψηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας και να είναι σχεδόν κορεσμένο.

Το ISO 13788 καθορίζει τη μεθοδολογία αξιολόγησης του κινδύνου συμπύκνωσης υδρατμών και ανάπτυξης μούχλας στις εσωτερικές επιφάνειες των δομικών στοιχείων. Το

πρότυπο εισάγει τον κρίσιμο συντελεστή f_{Rsi} , ο οποίος εκφράζει την ικανότητα ενός σημείου του κελύφους να διατηρεί ικανοποιητική θερμοκρασία για την αποτροπή συμπύκνωσης. Ο προσδιορισμός του συντελεστή προκύπτει από τον τύπο:

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{si} - \theta_{out})}{(\theta_i - \theta_{out})}$$

Όπου:

θ_{si} [°C], η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου

θ_i [°C], η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα

θ_{out} [°C], η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα

Για τον περιορισμό του κινδύνου ανάπτυξης μούχλας στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου, η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου θ_{si} θα πρέπει να παραμένει υψηλότερη από την κρίσιμη τιμή που προκύπτει για τις εκάστοτε συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Στην παρούσα ανάλυση, λαμβάνεται ως ενδεικτικό όριο αναφοράς $f_{Rsi} > 0,70$. Τιμές f_{Rsi} μικρότερες από την τιμή αυτή υποδηλώνουν αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης συμπυκνώσεων και ανάπτυξης μούχλας στην εσωτερική επιφάνεια, χωρίς όμως το όριο $f_{Rsi} = 0,70$ να αποτελεί απόλυτη γενική τιμή, καθώς εξαρτάται από τις συνθήκες εσωτερικής υγρασίας, τη θερμοκρασία και το κλιματικό σενάριο. Το πρότυπο εστιάζει στη συμπληρωματική υγραθερμική αξιολόγηση που πρέπει να συνοδεύει τον υπολογισμό θερμογεφυρών, ώστε η ενεργειακή αποδοτικότητα να συνδυάζεται με εξασφάλιση υγιεινού εσωτερικού μικροκλίματος.

6. Ανασκόπηση βιβλιογραφικών αναφορών & σύνθεση ερευνητικών ερωτημάτων.

Η ανασκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών αποτελεί αναπόσπαστο και θεμελιώδες τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς συνεισφέρει στην ανάπτυξη του θεωρητικού πλαισίου και καθορίζει τη θέση της παρούσας έρευνας στο ευρύτερο σώμα της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται σε βάθος οι σημαντικότερες επιστημονικές μελέτες που αφορούν στη μελέτη των θερμογεφυρών και τις επιπτώσεις τους τόσο στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, όσο και στην υδροθερμική τους συμπεριφορά. Από την ανάλυση της επιστημονικής βιβλιογραφίας εξάγονται τα ερευνητικά ερωτήματα τα οποία καλείται να απαντήσει η παρούσα εργασία. Η ανασκόπηση δεν περιορίζεται στην απλή παρουσίαση των επιμέρους μελετών, αλλά επιχειρεί να αναδείξει τα κοινά συμπεράσματα της βιβλιογραφίας, τα σημεία στα οποία παραμένουν ερευνητικά κενά και τη σύνδεσή τους με τη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας.

6.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορών.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται η ανασκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Οι αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν ασχολούνται με ένα μεγάλο εύρος θεματολογίας σχετικά με τις θερμογέφυρες όπως είναι η κατηγοριοποίηση των θερμογεφυρών, οι επιπτώσεις τους στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, οι επιπτώσεις τους στην υδροθερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων, τη δημιουργία υγρασιών και ανάπτυξης υγρασίας και μούχλας στις εσωτερικές επιφάνειες.

- **Κατηγοριοποίηση θερμογεφυρών.**

Σύμφωνα με τους (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2018) οι θερμογέφυρες **ταξινομούνται σε κατηγορίες** (γεωμετρικές και κατασκευαστικές θερμογέφυρες) ανάλογα με την αιτία που τις δημιουργεί.

- **Επίδραση των θερμογεφυρών στην ενεργειακή απόδοση.**

Αρκετές από τις μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν ασχολούνται με τον ποσοτικό προσδιορισμό των θερμικών απωλειών που προκαλούνται λόγω της ύπαρξης των θερμογεφυρών. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4 οι θερμογέφυρες παρουσιάζουν σημαντικές επιπτώσεις στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, γεγονός που επαληθεύεται και από τις βιβλιογραφικές αναφορές (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2018, Bergero et al., 2018, Capozzoli et al., 2013, el Saied et al., 2022, Evola & Gagliano, 2024, Jedidi & Benjeddou, 2018, Kotti et al., 2017, Theodosiou & Papadopoulos, 2008, Theodosiou et al., 2021, Qi et al., 2024).

Συγκεκριμένα οι (Capozzoli et al., 2013) αναφέρουν πως η ύπαρξη των θερμογεφυρών στο κτιριακό κέλυφος μπορεί να επιφέρει αύξηση στην απαίτηση θέρμανσης έως και 30%, ενώ σε άλλη δημοσίευση αναφέρεται πως οι απώλειες ενέργειας του κτιρίου λόγω της ύπαρξης των θερμογεφυρών εκτιμώνται από 10% - 40% ανάλογα το επίπεδο μόνωσης του κελύφους (Jedidi & Benjeddou, 2018). Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα της δημοσίευσης των (Bergero et al., 2018), σύμφωνα με τα οποία οι απώλειες λόγω θερμογεφυρών στην περιοχή ενός συστήματος κουφώματος - εξωτερικού τοίχου – εξώστη με επαρκή θερμομονωτική προστασία των δομικών μερών μπορεί να φτάσουν μέχρι και το 61% των συνολικών απωλειών. Αντίστοιχα και στην εργασία τους οι (Kotti et al., 2017) αναφέρουν πως η επίδραση των θερμογεφυρών στο συνολικό φορτίο θέρμανσης μιας μονοκατοικίας στην Ελλάδα εκτιμάται, κατά μέσο ετήσιο όρο, σε 13%.

Στην εργασία τους οι (Qi et al., 2024) μελετούν τους τρόπους βελτίωσης της θερμικής απόδοσης των θερμογεφυρών σε κτίρια με ελαφρύ μεταλλικό φέροντα οργανισμό (Lightweight Steel-Framed – LSF) καθώς οι θερμογέφυρες αποτελούν σημαντική πηγή θερμικών απωλειών και κινδύνου συμπύκνωσης, με αποτέλεσμα αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση και υποβάθμιση της άνεσης και ανθεκτικότητας του κελύφους. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τέσσερις κρίσιμοι κόμβοι του κελύφους (σύνδεση εξωτερικού τοίχου–δοκού, εξωτερική γωνία τοίχου, εσωτερική γωνία τοίχου, γείσο (cornice)) για διάφορα μονωτικά υλικά (ετροβάμβακας (RW), διογκωμένη (EPS), εξηλασμένη (XPS) και πολυουρεθάνη (PU)) και μέσω αριθμητικής προσομοίωσης με το πρόγραμμα THERM υπολογίστηκε ο γραμμικός συντελεστής θερμοπερατότητας ψ και ελέγχθηκε εάν πληροί τα κριτήρια που ορίζονται από το πρότυπο του παθητικού κτιρίου για “thermal bridge free” σχεδιασμό. Από

την έρευνα προέκυψε ότι η μείωση των θερμογεφυρών οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση των εκπομπών CO₂, όπως επίσης ότι η συνέχεια της μόνωσης σε σημεία σύνδεσης (γείσο, δοκός) είναι κρίσιμη για την επίτευξη “thermal bridge free” κελύφους.

Οι (Theodosiou & Papadopoulos, 2008) μελέτησαν τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις θερμομονωτικής προστασίας του δομικού στοιχείου εξωτερική τοιχοποιία – φέρων οργανισμός Ο/Σ που εμφανίζονται πιο συχνά στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα κυρίως μετά το 1980 έως και το 2010. Από τη μελέτη της προέκυψε πως οι απώλειες ενέργειας είναι κατά μέσο όρο 35% υψηλότερες σε σχέση με αυτές που είχαν αρχικά υπολογιστεί την περίοδο μελέτης των κτιρίων λόγω της μη εφαρμογής επαρκούς θερμομονωτικής προστασίας κατά τη φάση κατασκευής των κτιρίων και της αγνόησης των θερμογεφυρών κατά τη φάση της μελέτης. Ακόμα και στις περιπτώσεις όπου είχε εφαρμοστεί επακριβώς η μελέτη θερμομόνωσης, οι πραγματικές απώλειες ήταν 30% υψηλότερες σε σχέση με αυτές που είχαν αρχικά υπολογισθεί λόγω του μη συνυπολογισμού των θερμογεφυρών κατά τη φάση μελέτης.

Οι (Theodosiou et al., 2021) προχώρησαν σε συγκριτική μελέτη μεταξύ των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού της ροής θερμότητας διαμέσου θερμογεφυρών για διάφορα επίπεδα θερμομονωτικής επάρκειας του κελύφους. Από τη μελέτη προέκυψε πως οι σταθερές τιμές τους συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας ψ που προτείνονται στον KENAK και στο EN ISO14683 για τους διάφορους τύπους θερμογεφυρών υπερεκτιμούν τη ροή θερμότητας σε ποσοστό 34% και 55% αντίστοιχα σε σχέση με την αναλυτική μέθοδο υπολογισμού σύμφωνα με το ISO 10211. Από την μεριά οι μέθοδοι ISO 13790 και ISO 13789 λαμβάνουν υπόψη τις θερμογέφυρες μέσω προσαύξησης του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας του κτιρίου. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η μέθοδος ISO 13790 βγάζει αρκετά χαμηλότερες τιμές ροής θερμότητας, υποεκτιμώντας ουσιαστικά την επίδραση των θερμογεφυρών σε ποσοστό από 20% έως 60% αναλόγως το επίπεδο μόνωσης του κτιρίου. Η μέθοδος ISO 13789 φαίνεται πως είχε αρκετά παραπλήσια αποτελέσματα με την αναλυτική μέθοδο ISO 10211 σε ποσοστό απόκλισης μόλις 3%. Ωστόσο αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να λάβει υπόψη τη σημαντική επίπτωση των θερμογεφυρών στη ροή θερμότητας σε σύνθετα σημεία (όπως π.χ. οι εξώστες) στα οποία η επίδραση των θερμογεφυρών είναι μεγαλύτερη.

Για την ορθή εκτίμηση των συνολικών απωλειών ενέργειας διαμέσου των θερμογεφυρών των δομικών στοιχείων, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας ψ . Οι (Carozzoli et al., 2013) παρουσιάζουν τους διαθέσιμους τρόπους υπολογισμού της συνεισφοράς των θερμογεφυρών στις συνολικές απώλειες. Πιο συγκεκριμένα οι (Carozzoli et al., 2013), μέσω της ανάλυσης 36 θερμογεφυρών, σύμφωνα με το ISO 10211, προτείνουν τις αντίστοιχες εξισώσεις για τον υπολογισμό του ψ για κάθε τύπο θερμογέφυρας, συναρτήσει παραμέτρων όπως το πάχος και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ των επιμέρους δομικών μερών και μονωτικών υλικών του υπό εξέταση στοιχείου.

Συνολικά, οι παραπάνω μελέτες επιβεβαιώνουν ότι οι θερμογέφυρες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το ενεργειακό ισοζύγιο των κτιρίων, ιδιαίτερα σε καλά μονωμένα κελύφη, όπου η σχετική συμμετοχή των θερμικών απωλειών από τους κατασκευαστικούς κόμβους γίνεται εντονότερη. Παράλληλα, αναδεικνύεται η ανάγκη αναλυτικού υπολογισμού του συντελεστή ψ , καθώς οι απλουστευμένες μέθοδοι ή οι τυπικές τιμές πινάκων μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις. Η διαπίστωση αυτή τεκμηριώνει την επιλογή της παρούσας εργασίας να βασιστεί σε δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση κατά ISO 10211 για την αξιολόγηση χαρακτηριστικών θερμογεφυρών ενεργειακής αναβάθμισης.

- **Επίδραση των θερμογεφυρών στη θερμοκρασιακή κατανομή των δομικών στοιχείων και στη δημιουργία συνθηκών που ευνοούν την εμφάνιση υγρασίας, επιφανειακών συμπυκνώσεων και ανάπτυξης μούχλας.**

Εκτός από τις επιπτώσεις στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, οι θερμογέφυρες έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην άνεση των χρηστών λόγω της επίδρασης των θερμογεφυρών στην θερμοκρασία και την εμφάνιση υγραποιήσεων και ανάπτυξης μούχλας στην εσωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων (el Saied et al., 2022, Evola & Gagliano, 2024, Fantucci et al., 2017, Jedidi & Benjeddou, 2018, Miasik & Licholai, 2018, Ilomets & Kalamees, 2016, Smoczyk et al., 2025, Recart & Dossick, 2022).

Η έρευνα των (Recart & Dossick, 2022) αποτέλεσε ανασκόπηση διαφόρων ερευνών που μελέτησαν τις υδροθερμικές επιπτώσεις των παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης σε κατοικίες, με έμφαση κυρίως στις ανεπιθύμητες συνέπειες μετά την ανακαίνιση, προκειμένου να διερευνηθεί πώς η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης επηρεάζει τη

θερμική και υγρασιακή συμπεριφορά του κελύφους, την ποιότητα του εσωτερικού αέρα και την άνεση των ενοίκων. Από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της μελέτης ήταν πως σε περιπτώσεις αναβάθμισης της θερμομονωτικής στρώσης του κτιριακού κελύφους παρουσιάστηκαν προβλήματα συσσώρευσης υγρασίας, συμπύκνωσης υδρατμών και ανάπτυξης μούχλας κυρίως σε σημεία εμφάνισης θερμογεφυρών λόγω κακής τοποθέτησης ή ανεπαρκούς εφαρμογής της θερμομονωτικής στρώσης.

Οι (Miasik & Lichołai, 2018) έδειξαν ότι στην εσωτερική γωνία της γεωμετρικής θερμογέφυρας εξωτερικής γωνίας τοιχοποιίας καταγράφονται οι μικρότερες θερμοκρασίες επιφάνειας με κίνδυνο την ανάπτυξη υγρασιών και την εμφάνιση μούχλας ακόμα και στις περιπτώσεις μονωμένων δομικών στοιχείων. Στην εργασία του οι (el Saied et al., 2022) παρουσιάζουν τις επιπτώσεις της θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στην εδαφόπλακα ισόγειου στο σημείο σύνδεσης με το περιμετρικό τοιχίο θεμελίωσης, στην θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου, για δύο διαφορετικούς τρόπους θερμομονωτικής προστασίας.

Οι (Evola & Gagliano, 2024) μελετούν τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται σε ένα υποστύλωμα Ο/Σ με εκατέρωθεν τοιχοποιίες από blocks σκυροδέματος. Υπολογίζουν τη θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου, ενώ στην συνέχεια προτείνουν την εφαρμογή συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης για την εξάλειψη της θερμογέφυρας. Για διάφορα πάχη της εξωτερικής θερμομόνωσης από 6cm – 14cm υπολογίζουν τη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας και τη συγκρίνουν με αυτή του αμόνωτου στοιχείου. Από τη μελέτη παρουσιάζεται ότι η εφαρμογή του μικρότερου πάχους 6cm είναι ικανό να αυξήσει την εσωτερική θερμοκρασία από τους 14.3°C στους 16.0°C, απομακρύνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης μούχλας στο σημείο της θερμογέφυρας. Αξίζει να σημειωθεί πως η εφαρμογή μεγαλύτερου πάχους εξωτερικής θερμομόνωσης (14cm) αυξάνει την εσωτερική θερμοκρασία σε μόλις 16.4°C.

Οι (Jedidi & Benjeddou, 2018) μέσω του υπολογισμού του δείκτη fRsi διερευνούν τις επιπτώσεις της γεωμετρικής γραμμικής θερμογέφυρας σε εξωτερική γωνία τοιχοποιίας, στην ανάπτυξη μούχλας στην εσωτερική επιφάνεια. Ο υπολογισμός γίνεται για διάφορα πάχη θερμοπρόσοψης (50mm, 75mm, 100mm). Από την εργασία προκύπτει πως η αποφυγή εμφάνισης μούχλας εξασφαλίζεται για τιμές σχετικής υγρασίας της εσωτερικής επιφάνειας $RH < 80\%$ και για τιμές του $fRsi > 0.75$.

Οι (Iomets & Kalamees, 2016) προτείνουν μια μεθοδολογία εκτίμησης του “βαθμού κρισιμότητας” των θερμογεφυρών, μέσω συνδυασμένης χρήσης θερμογραφίας και στατιστικής ανάλυσης των εσωτερικών θερμοκρασιακών παραγόντων (temperature factor, $fRsi$). Στόχος ήταν να υπολογιστεί η πιθανότητα αστοχίας (δηλαδή επιφανειακής συμπύκνωσης ή ανάπτυξης μούχλας) τόσο σε μεμονωμένα διαμερίσματα όσο και στο σύνολο του κτιριακού αποθέματος της Εσθονίας. Από τα αποτελέσματα της μελέτης προέκυψε ότι κρίσιμες θερμογέφυρες υπάρχουν σε όλα τα είδη πολυκατοικιών, ιδίως στα προκατασκευασμένα. Οι πιο «επικίνδυνες» θέσεις είναι: η σύνδεση εξωτερικού τοίχου – παραθύρου/θύρας, η σύνδεση τοίχου – δαπέδου μη θερμαινόμενου υπογείου, οι γωνίες εξωτερικών τοίχων με τους εξώστες, οι οριζόντιες/κατακόρυφες ενώσεις προκατασκευασμένων πάνελ. Επίσης από τις αναλύσεις που πραγματοποιήσαν προέκυψε πως ο παράγοντας θερμοκρασίας $fRsi \geq 0.8$ θεωρείται ασφαλές όριο για αποφυγή μούχλας ενώ η προσθήκη θερμομόνωσης μεγάλου πάχους ($< 150\text{mm}$) μείωνε την πιθανότητα εμφάνισης μούχλας σε λιγότερο από 2%.

Οι (Smoczyk et al., 2025) μελετούν τη θερμική, υγροθερμική συμπεριφορά και την πιθανότητα ανάπτυξης υγραποιήσεων και μούχλας στο σημείο της θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στην τομή μεταξύ της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δάπεδο θερμαινόμενου χώρου που βρίσκεται πάνω από υπερυψωμένο μη θερμαινόμενο υπόγειο χώρο. Συγκεκριμένα μέσω αριθμητικών 2D και 3D αναλύσεων υπολογίζουν πέρα από την τιμή του συντελεστή ψ , την εσωτερική θερμοκρασία και το συντελεστή $fRsi$ στο σημείο τομής δαπέδου – εξωτερικής τοιχοποιίας για διάφορα σενάρια πάχους και βάθους της θερμομονωτικής προστασίας της εκτεθειμένης εξωτερικής τοιχοποιίας του μη θερμαινόμενου χώρου. Από την εργασία προκύπτει ότι η συμμόρφωση μόνο του θερμαινόμενου κελύφους με τα όρια του συντελεστή θερμοπερατότητας U που απαιτούν οι κανονισμοί δεν εγγυάται ότι αποτρέπεται ο κίνδυνος συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας στα σημεία σύνδεσης, αλλά απαιτείται ειδική κατασκευαστική διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης με επέκταση της εντός του εδάφους, προκειμένου να περιορίζονται οι θερμικές απώλειες και να επιτυγχάνεται αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας στο σημείο τομής.

Συνολικά, οι παραπάνω μελέτες δείχνουν ότι η αξιολόγηση των θερμογεφυρών δεν πρέπει να περιορίζεται αποκλειστικά στον υπολογισμό του συντελεστή γραμμικής

θερμοπερατότητας ψ . Η ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία και ο δείκτης fR_{si} αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την εκτίμηση του κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας. Παράλληλα, αναδεικνύεται ότι η συνέχεια και η σωστή διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης στα σημεία των κατασκευαστικών κόμβων είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για την ενεργειακή απόδοση όσο και για την επιφανειακή υδροθερμική συμπεριφορά του κελύφους.

- **Επίδραση των θερμογεφυρών στη δομική ακεραιότητα του κτιρίου**

Από την ανάλυση των δημοσιεύσεων δεν προέκυψε άμεση σύνδεση της ύπαρξης των θερμογεφυρών με την υποβάθμιση τη δομικής ακεραιότητας του κτιρίου. Αυτή η υποβάθμιση μπορεί να επέλθει έμμεσα ως αποτέλεσμα της αύξησης του ποσοστού σχετικής υγρασίας εντός των μερών του δομικού στοιχείου λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας στα σημεία των θερμογεφυρών ως αποτέλεσμα της ελλιπούς θερμομονωτικής προστασίας.

- **Προτεινόμενοι τρόποι κατασκευαστική διαμόρφωσης της θερμομονωτικής στρώσης στα σημεία των θερμογεφυρών.**

Σε αρκετές από τις βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν προτείνονταν διάφοροι κατασκευαστικοί τρόποι μέσω των οποίων επιτυγχάνεται κατά ένα ποσοστό η εξάλειψη των θερμογεφυρών και η μείωση της επίδρασής τους (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2018, Bergero et al., 2018, el Saied et al., 2022, Evola & Gagliano, 2024, Romero et al., 2021, Sadowska & Bieranowski, 2021).

Για παράδειγμα, οι (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2018) αναφέρουν διάφορους τρόπους μόρφωσης της θερμομονωτικής στρώσης σε διάφορα σημεία του κτηριακού κελύφους προκειμένου να μειωθεί η επίδραση των θερμογεφυρών, χωρίς ωστόσο να προχωρούν σε υπολογιστική αξιολόγηση των λύσεων. Στη δημοσίευσή τους ωστόσο ασχολούνται κυρίως με τη μελέτη ενός ειδικού συστήματος θερμοδιακοπής για την εξάλειψη της θερμογέφυρας του εξώστη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις κατασκευής νέων κτιρίων.

Οι (Bergero et al., 2018) από την άλλη ασχολούνται με την θερμομονωτική προστασία των δομικών μερών ενός συστήματος εξωτερικής τοιχοποιίας – φέροντος

οργανισμού- εξώστη – κουφώματος σε ένα υφιστάμενο κτίριο, μελετώντας την επίδραση της τοποθέτησης ενός aerogel panel πάχους 1,00 έως 3,00cm στην περιοχή του εξώστη – δοκού Ο/Σ – τοιχοποιία άνωθεν του εξώστη, εξώστη – δοκού Ο/Σ – κουφώματος άνωθεν του εξώστη και στο σημείο επαφής της κάθετης εξωτερικής τοιχοποιίας επί της δοκού Ο/Σ, για την μείωση της θερμογέφυρας με παράλληλη διατήρησης της όψης του κτιρίου.

Οι (Sadowska & Bieranowski, 2021) αναφέρουν ότι στις περιπτώσεις ύπαρξης εξώστη η επιλογή της μη θερμομόνωσης του εξώστη ή της θερμομόνωσης μόνο της κάτω παρειάς του, μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα συμπυκνώσεων εντός του δομικού στοιχείου. Γι' αυτό το λόγο προτείνουν τη θερμομόνωση του εξώστη και στις δύο παρειές του (άνω και κάτω) ή την κατασκευή μίας ανεξάρτητης αυτοφερόμενης κατασκευής εξώστη η οποία θα αγκυρώνεται σε ελάχιστα σημεία στο κτιριακό κέλυφος ελαχιστοποιώντας, σχεδόν μηδενίζοντας, έτσι τις θερμογέφυρες. Από τις 4 περιπτώσεις, η πρόταση για θερμομονωτική προστασία του εξώστη και στις δύο παρειές, εμφάνισε τον καλύτερο λόγο κόστους-οφέλους για το κτίριο, αφού πρόκειται για μια κατασκευαστική λύση που μπορεί σχετικά εύκολα να εφαρμοστεί σε υφιστάμενα κτίρια.

Οι (el Saied et al., 2022) ασχολούνται με τη θερμομονωτική προστασία και την εξάλειψη της θερμογέφυρας στο σημείο ένωσης της πλάκας εδάφους, με το περιμετρικό τοίχιο θεμελίωσης. Προτείνουν δυο διαμορφώσεις της θερμομονωτικής στρώσης (τύπου I και τύπου L) για τις οποίες αναλύουν τις επιπτώσεις τους στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση, καθώς και στην θερμοκρασία και σχετική υγρασία στην εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου στην περιοχή της θερμογέφυρας.

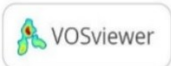
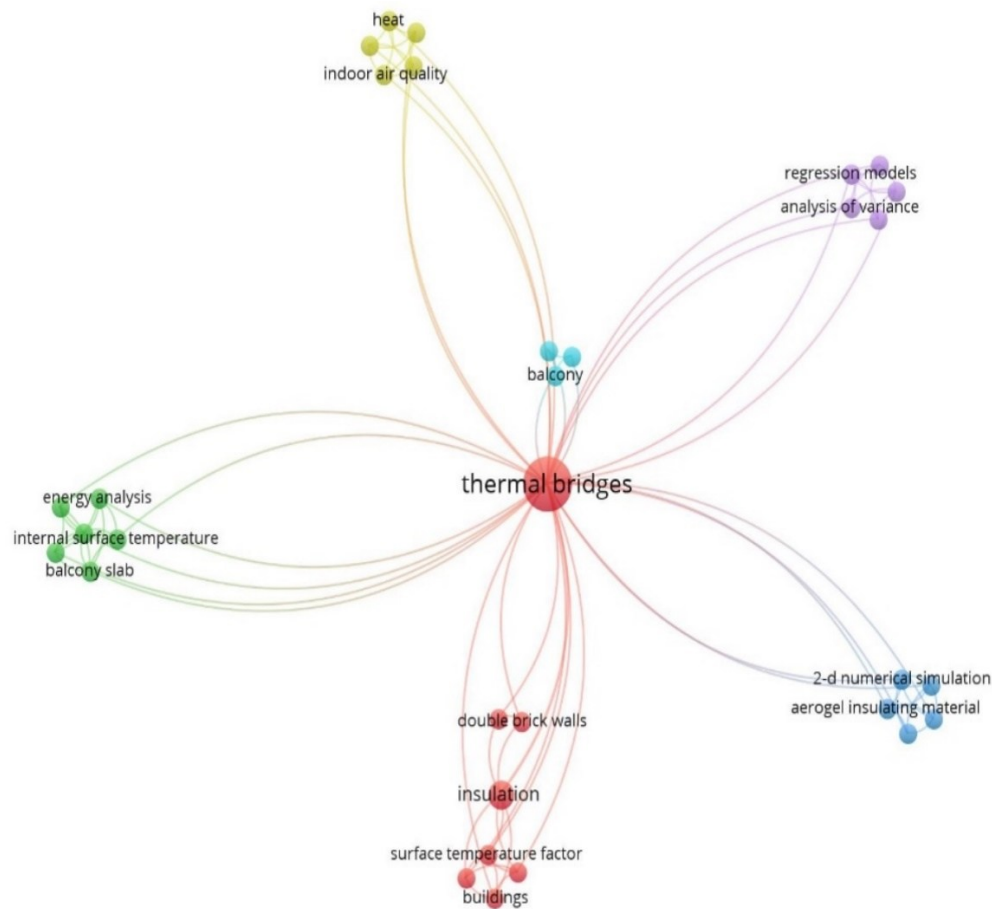
Οι (Evola & Gagliano, 2024) μελετούν τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται σε ένα υποστύλωμα Ο/Σ με εκατέρωθεν τοιχοποιίες από blocks σκυροδέματος και προτείνουν την εφαρμογή συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης για την εξάλειψη της θερμογέφυρας, υπολογίζοντας τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην εσωτερική επιφάνεια για διάφορα πάχη εξωτερικής θερμομόνωσης (6cm – 14cm).

Συνολικά, οι παραπάνω μελέτες δείχνουν ότι η αποτελεσματική αντιμετώπιση των θερμογεφυρών δεν εξαρτάται μόνο από την αύξηση του πάχους της θερμομόνωσης, αλλά κυρίως από τη σωστή κατασκευαστική διαμόρφωση και τη συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης στα κρίσιμα σημεία του κελύφους. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι κόμβοι στους οποίους εμφανίζονται στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, εξώστες, δοκοί, κουφώματα και επαφές με έδαφος ή μη θερμαινόμενους χώρους. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι κάθε

προτεινόμενη λύση πρέπει να αξιολογείται υπολογιστικά, καθώς η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από τη γεωμετρία του κόμβου, τα υλικά, τις συνοριακές συνθήκες και τη δυνατότητα εφαρμογής της σε υφιστάμενα ή νέα κτίρια.

6.2 Ανάλυση βιβλιογραφικών αναφορών με χρήση VOSviewer.

Για τη διερεύνηση της καταλληλότητας ή μη των επιλεγμένων βιβλιογραφικών αναφορών, πραγματοποιήθηκε ανάλυση και οπτικοποίηση τους με χρήση του λογισμικού VOSviewer. Μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού δημιουργήθηκε ο χάρτης της εικόνας 19 που παρουσιάζει τη συσχέτιση που αναπτύσσεται μεταξύ των λέξεων – κλειδιών των συγγραφέων στο ερευνητικό πεδίο των θερμογεφυρών και των επιπτώσεων τους στην απόδοση και τη συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους.



Εικόνα 19 : Χάρτης συνύπαρξης λέξεων-κλειδιών συγγραφέων σχετικά με τις θερμογέφυρες και την ενεργειακή/υγροθερμική συμπεριφορά του κελύφους

Από την ανάλυση του χάρτη προκύπτει ότι ο κεντρικός και μεγαλύτερος κόμβος είναι ο όρος Thermal bridges, υποδεικνύοντας ότι αποτελεί το βασικό θέμα της παρούσας μελέτης. Επιπλέον, από την ανάλυση του χάρτη προκύπτει πως οι συσχετισμένες λέξεις – κλειδιά δημιουργούν τις κάτωθι θεματικές ενότητες της έρευνας.

- Thermal bridges. Ο όρος “thermal bridges” αναφέρεται στις θερμογέφυρες που δημιουργούνται στο κτιριακό κέλυφος λόγω διακοπής ή/και μεταβολής του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης ή/και μεταβολής στη γεωμετρία των εξωτερικών επιφανειών του κτιρίου (π.χ. θερμογέφυρα εξώστη (balcony thermal bridge), θερμογέφυρα κάθετης εξωτερικής τοιχοποιίας – στηθαίου – πλάκας οροφής κλπ). Το μέγεθος των θερμογεφυρών εξαρτάται από την τιμή του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας

ψ , ο προσδιορισμός του οποίου πραγματοποιείται μέσω δισδιάστατων προσομοιώσεων των σημείων των θερμογεφυρών, και εξαρτάται από το είδος και το πάχος της θερμομονωτικής στρώσης και το είδος και το πάχος των επιμέρους δομικών στοιχείων. Η δημιουργία θερμογεφυρών έχει αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου (αυξημένες θερμικές απώλειες) αλλά και στο εσωτερικό περιβάλλον του (μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας, κίνδυνος εμφάνισης υγρασιών στα δομικά στοιχεία, κίνδυνος εμφάνισης υγρασίας και ανάπτυξης μούχλας κ.α).

- **Energy analysis.** Η βασική επίπτωση των θερμογεφυρών είναι η αύξηση των θερμικών ροών διαμέσου του κτιριακού κελύφους που οδηγεί στην αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου και στη μείωση της ενεργειακής του απόδοσης.
- **Indoor air quality.** Ο συγκεκριμένος όρος αναφέρεται στην ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων. Η επίδραση των θερμογεφυρών στην θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας των δομικών στοιχείων, στη σχετική τους υγρασία, στην υγραποίηση και την ανάπτυξη μούχλας έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, του εσωτερικού αέρα και στην άνεση των χρηστών του κτιρίου.
- **2-d numerical simulation.** Ο όρος “2-d numerical simulation” αναφέρεται στη δισδιάστατη ανάλυση των θερμογεφυρών με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Μέσω της συγκεκριμένης ανάλυσης πραγματοποιείται η επίλυση του δισδιάστατου μοντέλου θερμικής ροής και είναι δυνατός ο προσδιορισμός, με ακρίβεια, του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας ψ .

Μέσω της ανάλυσης του χάρτη μπορεί να επιτευχθεί ο εντοπισμός ενδεχόμενων κενών στην υπάρχουσα έρευνα και ακολούθως να προταθούν νέες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της ανάλυσης των θερμογεφυρών και των επιπτώσεών τους στην απόδοση και την υδροθερμική συμπεριφορά του κελύφους.

6.3 Ερευνητικά ερωτήματα.

Μέσω της διατύπωσης των κατάλληλων ερευνητικών ερωτημάτων προσδιορίζονται οι παράμετροι που θα πρέπει να εξετασθούν για την επίλυση του ερευνητικού θέματος της εργασίας. Όπως προκύπτει και από τον τίτλο της παρούσας εργασίας, το ευρύτερο ερευνητικό θέμα είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων των παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης κελύφους στην υδροθερμική συμπεριφορά του κτιρίου και συγκεκριμένα οι επιπτώσεις της μη ορθής διαμόρφωσης της θερμομονωτικής στρώσης των κτιρίων.

Το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως στα σημεία ασυνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης του κτηριακού κελύφους στα οποία δημιουργούνται θερμογέφυρες. Όπως προέκυψε και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του προηγούμενου υποκεφαλαίου, στα σημεία αυτά η θερμική αντίσταση του κελύφους είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το υπόλοιπο κτιριακό κέλυφος με αποτέλεσμα η θερμότητα να διαφεύγει από το εσωτερικό περιβάλλον προς το εξωτερικό ή να εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό (αναλόγως τις εξωτερικές συνθήκες) προκαλώντας αυξημένες θερμικές απώλειες, μείωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και παράλληλα αύξηση της ενεργειακής απαίτησης του κτιρίου. Επιπλέον, επηρεάζεται η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος με αρνητικές επιπτώσεις στη θερμική άνεση των χρηστών. Τέλος, μέσω των θερμογεφυρών μπορεί να προκληθούν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στις εσωτερικές επιφάνειες του κτιρίου που μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση υγρασίας, ανάπτυξης μούχλας και υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των στοιχείων πλήρωσης (τοιχοποιίες) και του φέροντος οργανισμού του κτιρίου.

Σκοπός της εργασίας είναι να προσομοιωθούν και να αναλυθούν τα σημεία αυτά, με χρήση του στατικού εργαλείου προσομοίωσης THERM και να προταθούν κατάλληλες κατασκευαστικές λύσεις προκειμένου να εξαλειφθούν οι θερμογέφυρες και κατ' επέκταση οι αρνητικές επιπτώσεις τους στο κτίριο. Η αξιολόγηση βασίζεται στον υπολογισμό της θερμικής ροής, του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας ψ , της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας, του δείκτη fR_{si} και της σύγκρισης με το σημείο δρόσου

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που προκύπτουν από την ανάλυση των βιβλιογραφικών αναφορών είναι τα ακόλουθα:

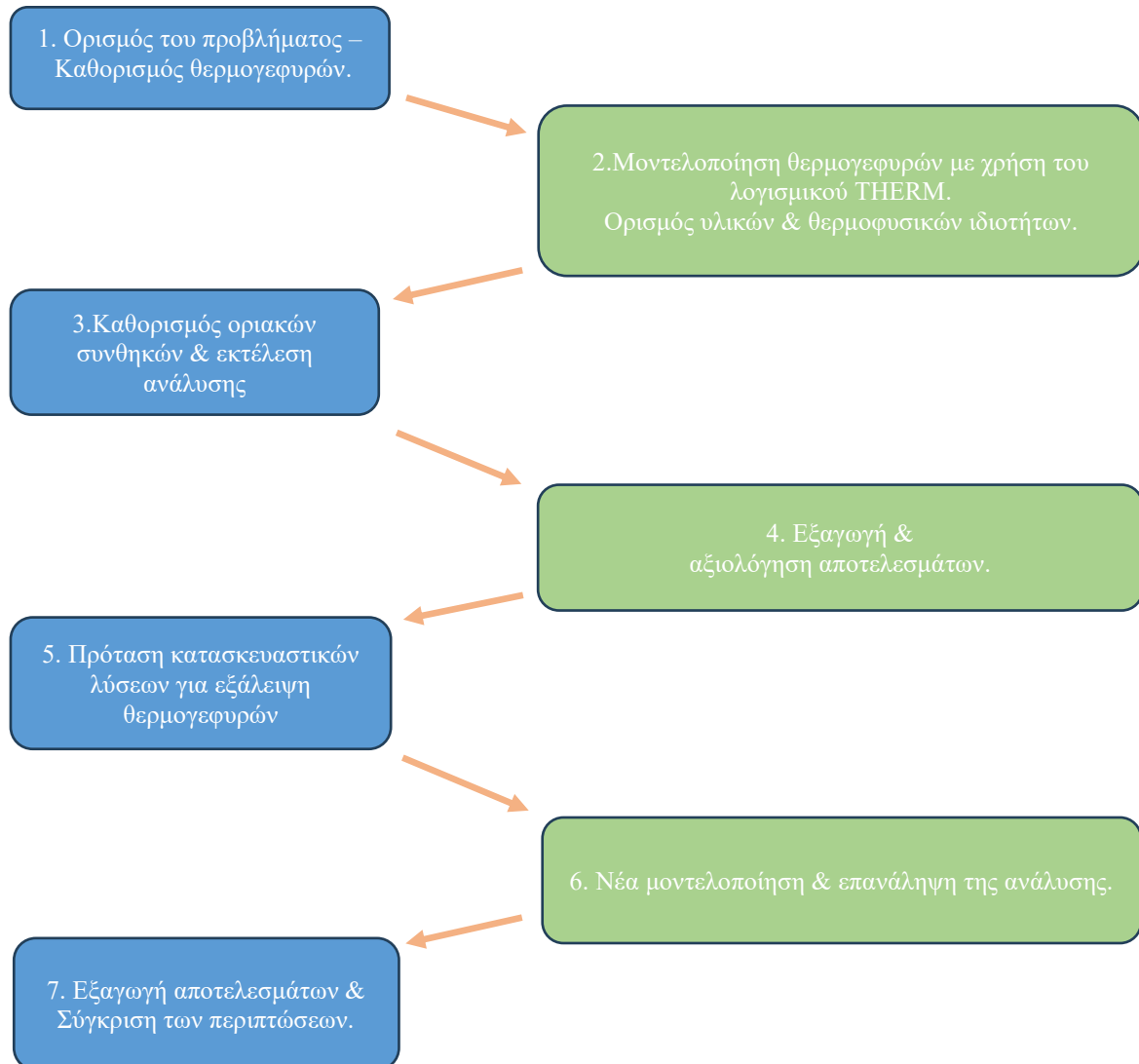
- 1) **Με ποιον τρόπο και σε ποιο βαθμό η κατασκευαστική διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης επηρεάζει τις θερμικές ροές και τον συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας ψ στα κρίσιμα σημεία του κτιριακού κελύφους;** Οι διαθέσιμες επιστημονικές έρευνες έχουν δείξει ότι ο τρόπος που διαμορφώνεται η θερμομονωτική στρώση του κτιριακού κελύφους μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες ροές θερμότητας διαμέσου των θερμογεφυρών που αναπτύσσονται στο κτιριακό κέλυφος και μείωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτιρίου (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2018, Bergero et al., 2018, Capozzoli et al., 2013, el Saied et al., 2022, Evola & Gagliano, 2024, Jedidi & Benjeddou, 2018, Theodosiou & Papadopoulos, 2008, Theodosiou et al., 2021, Qi et al., 2024).
- 2) **Πώς επηρεάζει η διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία, τον δείκτη fR_{si} και τον κίνδυνο επιφανειακής συμπύκνωσης ή ανάπτυξης μούχλας;** Οι επιστημονικές μελέτες έχουν δείξει ότι ο τρόπος διαμόρφωσης της θερμομόνωσης του κελύφους, στα πλαίσια στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης, πως επηρεάζει την υδροθερμική συμπεριφορά του κελύφους με εμφάνιση παθολογιών όπως οι συμπυκνώσεις και ανάπτυξη μούχλας κυρίως στα σημεία των θερμογεφυρών (el Saied et al., 2022, Evola & Gagliano, 2024, Fantucci et al., 2017, Jedidi & Benjeddou, 2018, Miasik & Lichołai, 2018, Ilomets & Kalamees, 2016, Smoczyk et al., 2025, Recart & Dossick, 2022).
- 3) **Ποιες κατασκευαστικές λύσεις διαμόρφωσης της θερμομονωτικής στρώσης μπορούν να περιορίσουν αποτελεσματικά τις θερμογέφυρες στις συναρμογές εξωτερικής τοιχοποιίας–εξώστη, εξωτερικής τοιχοποιίας–δώματος, εξωτερικής τοιχοποιίας–pilotis και εξωτερικής τοιχοποιίας–πλάκας επί εδάφους;** Από την ανάλυση των βιβλιογραφικών αναφορών προκύπτει ότι έχουν προταθεί διάφορες κατασκευαστικές λύσεις για τον περιορισμό των θερμογεφυρών, όπως η διατήρηση της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης, η χρήση θερμοδιακοπών και η ειδική διαμόρφωση των κόμβων σε περιοχές εξωστών, δωματίων, δαπέδων και στοιχείων σε επαφή με έδαφος ή μη θερμαινόμενους χώρους (Alhawari & Mukhopadhyaya, 2018, Bergero et al., 2018, el Saied et al., 2022, Evola & Gagliano, 2024, Romero et al., 2021, Sadowska & Bieranowski, 2021).
- 4) **Σε ποιο βαθμό η στατική δισδιάστατη θερμική ανάλυση με THERM μπορεί να υποστηρίξει προκαταρκτική εκτίμηση κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης και**

μούχλας σε θέσεις θερμογεφυρών; Στις περισσότερες από τις επιστημονικές εργασίες επιλέγεται η χρήση λογισμικού δυναμικής ανάλυσης αντί των απλούστερων στατικών εργαλείων προσομοίωσης (π.χ. THERM) αφού η δυναμική προσομοίωση προσεγγίζει καλύτερα τα πραγματικά δεδομένα και αποδίδει ρεαλιστικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα από τη χρήση στατικών εργαλείων προσομοίωσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν προκαταρκτική προσεγγιστική μέθοδος εκτίμησης των υγραερμικών παθολογιών (Cherrill et al., 2022)

6.4 Μεθοδολογική προσέγγιση – Διάγραμμα ροής.

Η απάντηση των ερωτημάτων που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα θα πραγματοποιηθεί μέσω της επιλογής της κατάλληλης μεθοδολογικής προσέγγισης. Συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί η επιλογή των κρίσιμων σημείων του κτιριακού κελύφους στα οποία θα καθορισθούν οι θέσεις και ο τύπος των θερμογεφυρών που θα αναλυθούν. Ακολούθως, με τη βοήθεια του λογισμικού THERM, θα πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση των θερμογεφυρών, ο καθορισμός του είδους και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών των στρώσεων που συνθέτουν τα δομικά στοιχεία στις θέσεις αυτές καθώς και ο καθορισμός των οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες της θερμικής προσομοίωσης στο THERM αφορούν τη θερμοκρασία του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, καθώς και τους αντίστοιχους συντελεστές θερμικής μετάβασης. Μετά τον καθορισμό των ανωτέρω, θα εκτελεστεί η ανάλυση του προγράμματος και θα εξαχθούν τα αποτελέσματα (τιμή της θερμικής ροής Φ , θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου). Ακολούθως χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα υπολογιστεί η τιμή του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας ψ . Τέλος θα προταθεί η κατασκευαστική λύση για την εξάλειψη της κάθε θερμογέφυρας που μελετάται, η οποία θα μοντελοποιηθεί εκ νέου στο λογισμικό, θα πραγματοποιηθεί επανεκτέλεση της ανάλυσης και τα τελικά αποτελέσματα που θα εξαχθούν θα αξιολογηθούν και θα συγκριθούν με αυτά της πρώτης επίλυσης. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων θα διαφανεί το κατά πόσο η κατασκευαστική λύση οδηγεί στον περιορισμό της έντασης της θερμογέφυρας, μειώνοντας τη θερμική ροή και βελτιώνοντας τις συνθήκες άνεσης στο εσωτερικό του κτιρίου και κατά πόσο προλαμβάνει την ανάπτυξη υγρασίας και μούχλας στην εσωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων του κελύφους. Στο σχήμα 1 που ακολουθεί παρουσιάζονται, μέσω του

διαγράμματος ροής (flow chart), τα επτά (-7-) βήματα της μεθοδολογικής προσέγγισης που θα ακολουθηθούν προκειμένου να απαντηθούν τα ερευνητικά ερωτήματα.



Σχήμα 1 : Διάγραμμα Ροής (Flow chart) της μεθοδολογικής προσέγγισης

7. Προσομοίωση θερμογεφυρών με χρήση του λογισμικού THERM.

Η θερμική ανάλυση θερμογεφυρών αποτελεί κρίσιμο εργαλείο στη σύγχρονη πρακτική ενεργειακού σχεδιασμού και υγροθερμικής αξιολόγησης κτιρίων. Η ορθή διερεύνηση των θερμογεφυρών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων κατασκευών, είναι ουσιώδης, καθώς επηρεάζει την ενεργειακή κατανάλωση, τις θερμικές απώλειες, τον κίνδυνο επιφανειακής συμπύκνωσης και την ανάπτυξη μικροοργανισμών.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης θερμογεφυρών μέσω του λογισμικού THERM, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Το THERM αποτελεί ένα από τα πλέον αξιόπιστα και διαδεδομένα εργαλεία 2D ανάλυσης, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο EN ISO 10211, επιτρέποντας την προσομοίωση γεωμετρικών και υλικών δυσκολιών σε κόμβους του κελύφους.

7.1 Περιγραφή του προγράμματος

Το THERM αποτελεί εξειδικευμένο λογισμικό ανάλυσης, το οποίο αναπτύχθηκε από το Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) με σκοπό τη διερεύνηση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στα δομικά στοιχεία των κατασκευών. Απευθύνεται σε ευρύ φάσμα χρηστών, όπως μηχανικούς, αρχιτέκτονες, ερευνητές, κατασκευαστές δομικών προϊόντων, εκπαιδευτικούς και φοιτητές, οι οποίοι επιθυμούν να μελετήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη θερμική συμπεριφορά των δομικών διατομών. Η βασική του χρησιμότητα εντοπίζεται στην ανάλυση δισδιάστατων φαινομένων μεταφοράς θερμότητας, σε περιπτώσεις δηλαδή, όπου η παρουσία των θερμογεφυρών επηρεάζει ουσιαστικά τη συνολική ενεργειακή απόδοση του στοιχείου.

Το λογισμικό χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς διαφόρων τύπων δομικών στοιχείων, όπως κουφώματα, υαλοστάσια, τοίχοι, στέγες, οροφές, θεμέλια και κατασκευαστικές συνδέσεις. Ιδιαίτερα χρήσιμο αποδεικνύεται σε εφαρμογές όπου η γεωμετρία είναι σύνθετη ή όπου απαιτείται λεπτομερής αποτύπωση των τοπικών επιδράσεων της θερμικής ροής. Μέσω της ανάλυσης αυτής καθίσταται δυνατή όχι μόνο η εκτίμηση του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός δομικού στοιχείου, αλλά και η διερεύνηση της κατανομής των θερμοκρασιών στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του. Η

πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς συνδέεται άμεσα με τον εντοπισμό περιοχών υψηλού κινδύνου για επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών, ανάπτυξη επιφανειακής υγρασίας/μούχλας και πιθανές μακροχρόνιες επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα των υλικών, οι οποίες όμως δεν αξιολογούνται υπολογιστικά στην παρούσα εργασία.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του THERM είναι το γραφικό του περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργεί και να επεξεργάζεται με σχετική ευκολία τις διατομές που πρόκειται να αναλυθούν. Η γεωμετρία του υπό εξέταση στοιχείου μπορεί να εισαχθεί είτε μέσω αρχείων τύπου DXF ή bitmap, είτε να σχεδιαστεί εξ αρχής μέσα στο πρόγραμμα, όταν οι διαστάσεις και η μορφή του στοιχείου είναι ήδη γνωστές. Η αναπαράσταση της διατομής γίνεται μέσω πολυγωνικών περιοχών, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο υλικό ή τμήμα της κατασκευής. Στη συνέχεια, σε κάθε πολύγωνο αποδίδονται οι κατάλληλες θερμοφυσικές ιδιότητες, ενώ ταυτόχρονα ορίζονται και οι συνοριακές συνθήκες που περιγράφουν το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται το δομικό στοιχείο.

Η υπολογιστική λειτουργία του THERM βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τη δισδιάστατη (2D) ανάλυση μεταφοράς θερμότητας στα δομικά στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τους μηχανισμούς της αγωγής και της ακτινοβολίας. Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου καθιστά δυνατή την προσομοίωση περίπλοκων γεωμετριών και ανομοιογενών διατάξεων υλικών, χαρακτηριστικά που απαντώνται συχνά σε κουφώματα, συνδέσεις δομικών στοιχείων και περιοχές ασυνέχειας της θερμομόνωσης. Για την επίλυση του προβλήματος, η διατομή χωρίζεται σε πλέγμα μη επικαλυπτόμενων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται αυτόματα από το πρόγραμμα με χρήση της μεθόδου Finite Quadtree, η οποία επιτρέπει την αποτελεσματική διακριτοποίηση της γεωμετρίας και την καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος σε περιοχές αυξημένης υπολογιστικής απαίτησης. Αφού καθοριστούν η γεωμετρία, τα υλικά και οι συνοριακές συνθήκες, το λογισμικό δημιουργεί το υπολογιστικό πλέγμα, εκτελεί την επίλυση, υπολογίζει το σχετικό σφάλμα, βελτιώνει το πλέγμα όπου απαιτείται και τελικά καταλήγει σε συγκλίνουσα λύση.

Οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να εισαχθούν είτε με επιλογή από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη του προγράμματος είτε με χειροκίνητη καταχώριση των σχετικών παραμέτρων από τον χρήστη. Η δυνατότητα αυτή προσδίδει ευελιξία στην ανάλυση, καθώς επιτρέπει τόσο την αξιοποίηση τυποποιημένων δεδομένων όσο και την εισαγωγή εξειδικευμένων τιμών, όταν αυτές είναι διαθέσιμες από πειραματικές μετρήσεις

ή τεχνικά φυλλάδια. Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή απόδοση των συνοριακών συνθηκών, καθώς αυτές επηρεάζουν καθοριστικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στις περιοχές της άνω και κάτω παρειάς της διατομής εφαρμόζονται συνήθως αδιαβατικές συνθήκες, ενώ στις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το εσωτερικό ή το εξωτερικό περιβάλλον εισάγονται συνθήκες που συνυπολογίζουν τη θερμική συναγωγή και την ακτινοβολία.

Ειδικότερα, για τον εσωτερικό χώρο ο υπολογισμός της συναγωγής βασίζεται στον συντελεστή θερμικής μετάβασης, ο οποίος εξαρτάται μεταξύ άλλων από τη θερμοκρασία της εξεταζόμενης επιφάνειας. Αντίστοιχα, για το εξωτερικό περιβάλλον ο συντελεστής αυτός σχετίζεται με την ταχύτητα του ανέμου, υπό την παραδοχή μόνιμης και σταθερής κατάστασης. Όσον αφορά την ακτινοβολία, το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο THERM θεωρεί ότι το εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον εμφανίζουν ομοιόμορφη θερμοκρασία, ενώ η εκπεμπιμότητα λαμβάνεται ίση με εκείνη ενός μέλανος σώματος, δηλαδή $\varepsilon = 1,0$. Παρότι η παραδοχή αυτή αποτελεί εξιδανίκευση, εξυπηρετεί τη σταθερή και συγκρίσιμη αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων διατομών.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρέχει το THERM είναι πολλαπλά και ιδιαίτερα χρήσιμα για την ερμηνεία της θερμικής συμπεριφοράς ενός δομικού στοιχείου. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα που εξάγονται από το λογισμικό μπορούν να προβληθούν ως:

- Συντελεστές θερμοπερατότητας U των δομικών στοιχείων,
- Ισοθερμικές καμπύλες,
- Έγχρωμες απεικονίσεις της θερμοκρασιακής κατανομής στα δομικά στοιχεία,
- Διαγράμματα διανυσμάτων ροής θερμότητας,
- Έγχρωμες απεικονίσεις γραμμών σταθερής ροής,
- Αναλυτικά δεδομένα θερμοκρασίας (τοπικές, μέσες, μέγιστες και ελάχιστες).

Η οπτικοποίηση αυτή των αποτελεσμάτων συμβάλλει ουσιαστικά στην κατανόηση της λειτουργίας του στοιχείου, επιτρέποντας τον σαφή εντοπισμό κρίσιμων περιοχών και διευκολύνοντας τη λήψη τεχνικών αποφάσεων τόσο κατά το στάδιο του σχεδιασμού όσο και κατά την αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών.

7.2 Περιπτώσεις μελέτης – βασικά μοντέλα προσομοίωσης

Για καθεμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις εκπονήθηκαν, με τη χρήση λογισμικού CAD, τα αντίστοιχα γεωμετρικά μοντέλα – προσομοιώματα, με στόχο την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των γραμμικών θερμογεφυρών. Σε κάθε περίπτωση μελέτης εξετάζεται αφενός η συνήθης κατασκευαστική διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης και αφετέρου η προτεινόμενη βελτιωμένη κατασκευαστική λύση, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της εκάστοτε διάταξης στη θερμική απόκριση των κρίσιμων σημείων του κελύφους.

Για τη συνήθη κατασκευαστική διάταξη αναλύονται δύο επιμέρους μοντέλα, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς το επίπεδο θερμομονωτικής προστασίας. Το πρώτο μοντέλο αντιστοιχεί στις ελάχιστες απαιτήσεις θερμομόνωσης για την Κλιματική Ζώνη Α, ενώ το δεύτερο στις αντίστοιχες ελάχιστες απαιτήσεις για την Κλιματική Ζώνη Δ. Ειδικότερα, για την εξωτερική τοιχοποιία λαμβάνεται πάχος θερμομονωτικής στρώσης 5 cm στην Κλιματική Ζώνη Α και 8 cm στην Κλιματική Ζώνη Δ. Αντίστοιχα, για το δώμα λαμβάνεται πάχος θερμομονωτικής στρώσης 6 cm για την Κλιματική Ζώνη Α και 9 cm για την Κλιματική Ζώνη Δ. Τα πάχη αυτά επιλέχθηκαν με κριτήριο την ικανοποίηση των ελάχιστων απαιτήσεων του KENAK για περιπτώσεις ριζικής ανακαίνισης υφιστάμενων κτιρίων. Οι κλιματικές ζώνες Α και Δ επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικές των δύο ακραίων κλιματικών συνθηκών που προβλέπονται στην TOTEE, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των θερμογεφυρών τόσο σε ηπιότερο όσο και σε δυσμενέστερο θερμικό περιβάλλον.

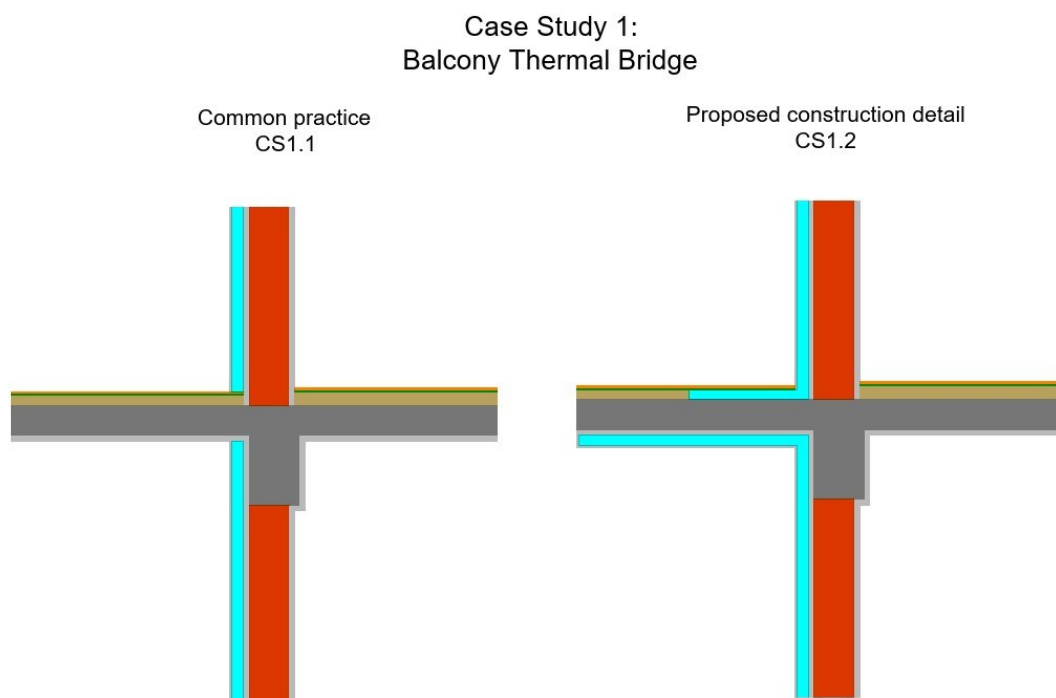
Η ίδια λογική ανάλυσης εφαρμόζεται και στις προτεινόμενες βελτιωμένες κατασκευαστικές διατάξεις, προκειμένου να καταστεί δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται όχι μόνο η συμμόρφωση των επιμέρους λύσεων με τις ελάχιστες κανονιστικές απαιτήσεις, αλλά και ο βαθμός στον οποίο η βελτιωμένη διάταξη μπορεί να περιορίσει τις θερμικές απώλειες και να βελτιώσει τη συμπεριφορά των θερμογεφυρών.

Οι θερμικές προσομοιώσεις στο THERM πραγματοποιούνται για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, ενώ εξετάζεται συμπληρωματικά και η περίπτωση εσωτερικής θερμοκρασίας 18°C, ώστε να προσεγγιστούν δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας των κατοικιών. Οι τιμές σχετικής υγρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος 40%, 70% και 80% δεν εισάγονται ως συνοριακές συνθήκες στο THERM, αλλά

χρησιμοποιούνται στο στάδιο της μετα-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό του σημείου δρόσου. Η πιθανότητα επιφανειακής συμπύκνωσης αξιολογείται μέσω σύγκρισης του σημείου δρόσου με την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία που προκύπτει από τις προσομοιώσεις. Το σενάριο με σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος ίση με 80% αποτελεί ακραία περίπτωση, η οποία συνδέεται συνήθως με την παρουσία πρόσθετων παθολογικών συνθηκών στη λειτουργία ή στην κατασκευή του κτιρίου, όπως ανεπαρκή αερισμό ή/και προβλήματα στεγάνωσης. Παρότι δεν αντιστοιχεί σε συνθήκες ορθής και ελεγχόμενης λειτουργίας της κατοικίας, συμπεριλαμβάνεται στα σενάρια ελέγχου, καθώς τέτοιες συνθήκες μπορούν να εμφανιστούν στην πράξη, ιδίως σε υφιστάμενα κτίρια με ανεπαρκή αερισμό ή υγρασιακές επιβαρύνσεις.

Τα μοντέλα προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν για τα επιμέρους σενάρια παρουσιάζονται στη συνέχεια:

7.2.1 Περίπτωση Μελέτης 1 (CS1) : Θερμογέφυρα εξώστη



Εικόνα 20 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 1 (CS1)

Η περίπτωση μελέτης CS1 αφορά τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με τον οριζόντιο εξώστη. Πρόκειται για μία χαρακτηριστική περίπτωση γραμμικής κατασκευαστικής θερμογέφυρας, καθώς η πλάκα

του εξώστη αποτελεί συνέχεια του οπλισμένου σκυροδέματος του φέροντος οργανισμού και διακόπτει τη συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης του εξωτερικού κελύφους. Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της διαμορφώθηκαν δύο δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αποτυπώνουν αφενός τη συμβατική κατασκευαστική πρακτική και αφετέρου την προτεινόμενη βελτιωμένη λύση.

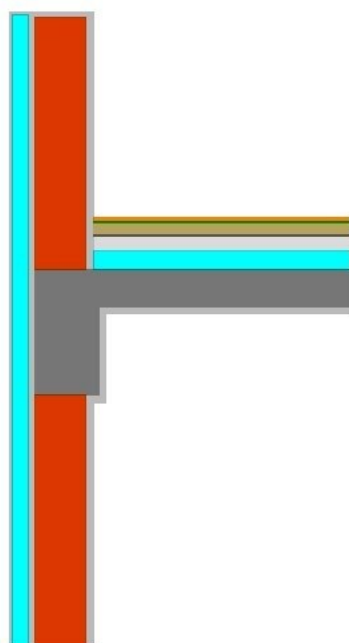
Το πρώτο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS1.1, αναπαριστά τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Στο μοντέλο αυτό η εξωτερική θερμομόνωση εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας, χωρίς να επεκτείνεται στις παρειές του εξώστη. Ως αποτέλεσμα, η πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος του εξώστη παραμένει θερμικά εκτεθειμένη και λειτουργεί ως αγωγή ζώνη μέσω της οποίας διευκολύνεται η ροή θερμότητας από τον εσωτερικό προς τον εξωτερικό χώρο. Η συγκεκριμένη διάταξη οδηγεί σε τοπική υποβάθμιση της θερμικής προστασίας του κελύφους και αποτελεί τυπικό παράδειγμα ασυνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης.

Το δεύτερο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS1.2, αποτυπώνει την προτεινόμενη κατασκευαστική λύση. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται η τοποθέτηση εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) πάχους 5 cm στην άνω και κάτω παρειά του εξώστη, ανεξάρτητα από την κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η μερική αποκατάσταση της θερμικής συνέχειας της εξωτερικής θερμομόνωσης στην περιοχή της συναρμογής και ο περιορισμός της θερμικής ροής μέσω της πλάκας του εξώστη. Η λύση δεν αναιρεί την κατασκευαστική ασυνέχεια της μόνωσης λόγω του στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος, ωστόσο συμβάλλει στη σημαντική μείωση της θερμικής ροής και των απωλειών που προκαλείται από την παρουσία του προβόλου.

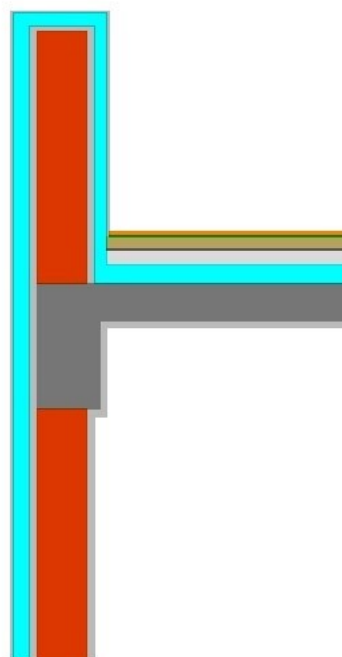
7.2.2 Περίπτωση Μελέτης 2 (CS2) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με ύπαρξη στηθαίου

Case Study 2: Roof to Wall Thermal Bridge

Common practice
CS2.1



Proposed construction detail
CS2.2



Εικόνα 21 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 2 (CS2)

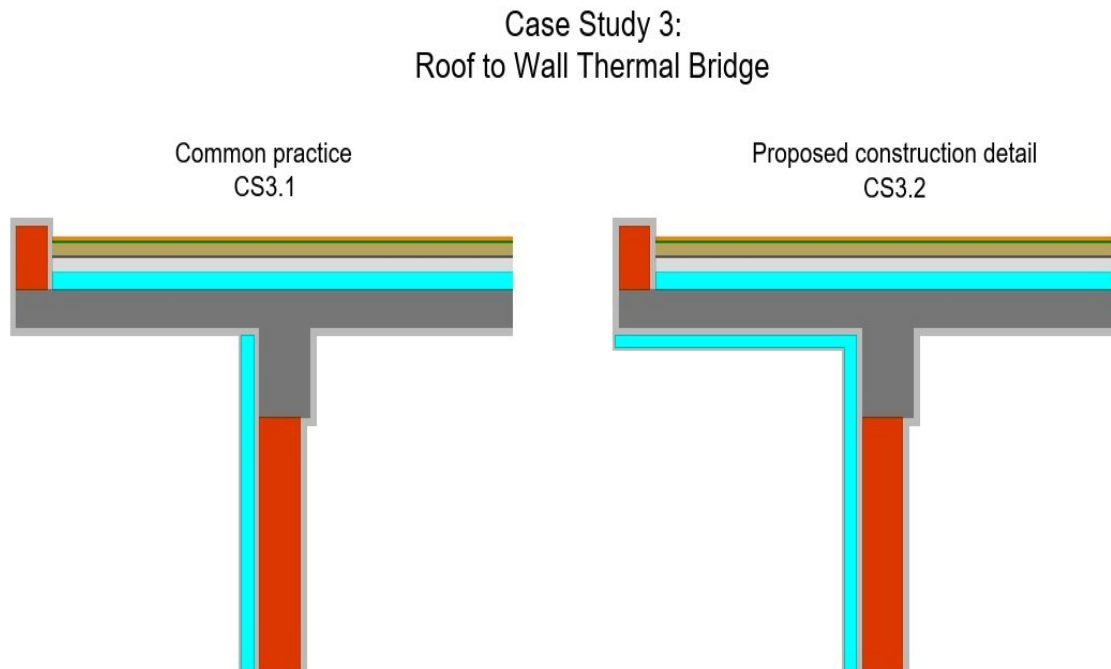
Η περίπτωση μελέτης CS2 αφορά τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με την πλάκα του δώματος και το στηθαίο. Πρόκειται για μία χαρακτηριστική περίπτωση γραμμικής θερμογέφυρας, καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση μεταβάλλεται η γεωμετρία του κελύφους και, ταυτόχρονα, διακόπτεται η συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης. Η παρουσία του στηθαίου, σε επαφή με την πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος του δώματος, δημιουργεί μία ζώνη αυξημένης θερμικής ροής θερμότητας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της συγκεκριμένης θερμογέφυρας διαμορφώθηκαν δύο δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αποτυπώνουν αφενός τη συμβατική κατασκευαστική πρακτική και αφετέρου την προτεινόμενη βελτιωμένη κατασκευαστική λύση.

Το πρώτο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS2.1, αναπαριστά τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Στο μοντέλο αυτό η θερμομονωτική στρώση της εξωτερικής τοιχοποιίας και η θερμομόνωση του δώματος δεν συνδέονται πλήρως στην περιοχή του στηθαίου. Ως αποτέλεσμα, η ζώνη συναρμογής μεταξύ τοιχοποιίας, πλάκας δώματος και στηθαίου εμφανίζει μειωμένη θερμική προστασία και λειτουργεί ως διαδρομή αυξημένων θερμικών απωλειών. Η ασυνέχεια αυτή καθιστά το συγκεκριμένο σημείο ιδιαίτερα ευάλωτο ως προς την ανάπτυξη θερμογέφυρας, καθώς το οπλισμένο σκυρόδεμα και εν συνεχεία το στηθαίο από οπτοπλινθοδομή συμβάλλουν στη μεταφορά θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Το δεύτερο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS2.2, αποτυπώνει την προτεινόμενη κατασκευαστική λύση. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται η πλήρης θερμομόνωση της επιφάνειας του στηθαίου με εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) πάχους 5 cm, ανεξάρτητα από την κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο. Με την εφαρμογή της λύσης αυτής επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης στη ζώνη σύνδεσης της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δώμα και το στηθαίο και παράλληλα, περιορίζεται η θερμική ροή μέσω των στοιχείων του οπλισμένου σκυροδέματος της πλάκας του δώματος και του στηθαίου από οπτοπλινθοδομή.

7.2.3 Περίπτωση Μελέτης 3 (CS3) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δώματος με προεξοχή



Εικόνα 22 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 3 (CS3)

Η περίπτωση μελέτης CS3 αφορά τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με την πλάκα του δώματος, στην περίπτωση όπου το δώμα παρουσιάζει προεξοχή. Και αυτή η περίπτωση αποτελεί μία χαρακτηριστική γραμμική θερμογέφυρα που απαντάται συχνά στο κτιριακό απόθεμα, καθώς η γεωμετρική ασυνέχεια του κελύφους, σε συνδυασμό με την παρουσία της πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος, δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη αυξημένης έντασης ροής θερμότητας.

Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της συγκεκριμένης κατασκευαστικής λεπτομέρειας διαμορφώθηκαν δύο δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αποτυπώνουν αφενός τη συμβατική κατασκευαστική πρακτική και αφετέρου την προτεινόμενη κατασκευαστική λύση.

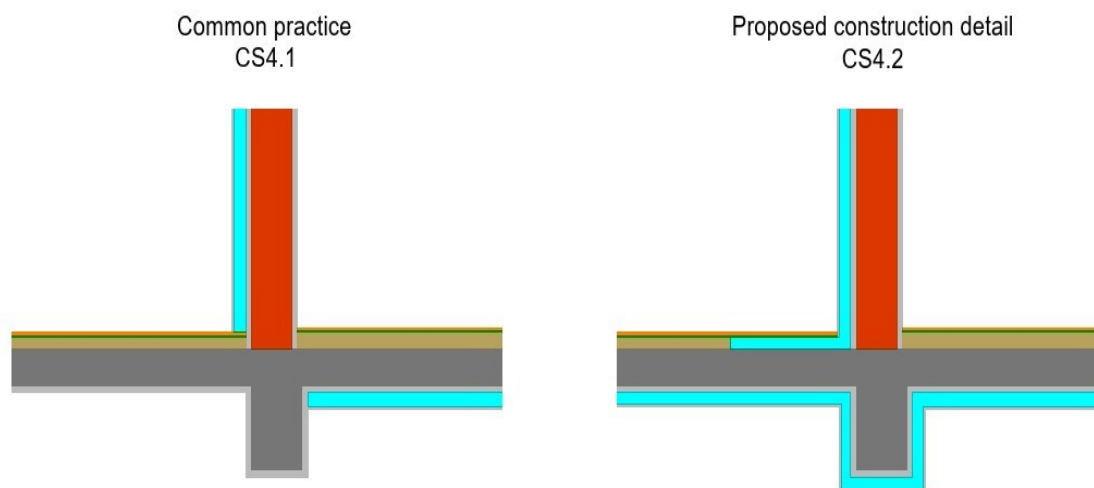
Το πρώτο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS3.1, αναπαριστά τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Στο μοντέλο αυτό η θερμομόνωση της εξωτερικής τοιχοποιίας και η θερμομόνωση του δώματος δεν εξασφαλίζουν πλήρη θερμική συνέχεια στην περιοχή της προεξοχής. Ως αποτέλεσμα, το σημείο συναρμογής της τοιχοποιίας με την πλάκα του

δώματος εμφανίζει μειωμένη θερμική προστασία, ενώ η προεξέχουσα πλάκα λειτουργεί ως διαδρομή αυξημένης ροής θερμότητας και θερμικών απωλειών προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Το δεύτερο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS3.2, αποτυπώνει την προτεινόμενη κατασκευαστική λύση. Στην περίπτωση αυτή η θερμομονωτική στρώση της εξωτερικής τοιχοποιίας συνεχίζει προς τον εξώστη μέσω τοποθέτησης εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) πάχους 5 cm στην κάτω παρειά της προεξοχής του δώματος, ανεξάρτητα από την κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο. Με την εφαρμογή της λύσης αυτής επιδιώκεται “εν μέρει” η αποκατάσταση της θερμικής συνέχειας στη ζώνη σύνδεσης της εξωτερικής τοιχοποιίας με την πλάκα του δώματος, καθώς και ο περιορισμός της θερμικής ροής μέσω της προεξοχής από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με τον τρόπο αυτό αναμένεται μείωση της έντασης της θερμογέφυρας και συνολική βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς.

7.2.4 Περίπτωση Μελέτης 4 (CS4) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – pilotis

Case Study 4: Pilotis Thermal Bridge



Εικόνα 23 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 4 (CS4)

Η περίπτωση μελέτης CS4 αφορά τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δάπεδο προς pilotis και τον οριζόντιο εξώστη. Πρόκειται για μία ιδιαίτερα σύνθετη κατασκευαστική λεπτομέρεια, καθώς στο ίδιο σημείο συνυπάρχουν στοιχεία του φέροντος οργανισμού από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως η πλάκα, η δοκός και ο εξώστης, τα οποία ευνοούν την αύξηση της ροής θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η συνέχεια των δομικών αυτών στοιχείων, σε συνδυασμό με τη γεωμετρική ασυνέχεια των στοιχείων του κελύφους, ενισχύει τη δισδιάστατη ροή θερμότητας και καθιστά τη συγκεκριμένη περιοχή ιδιαίτερα επιρρεπή στην ανάπτυξη έντονης θερμογέφυρας.

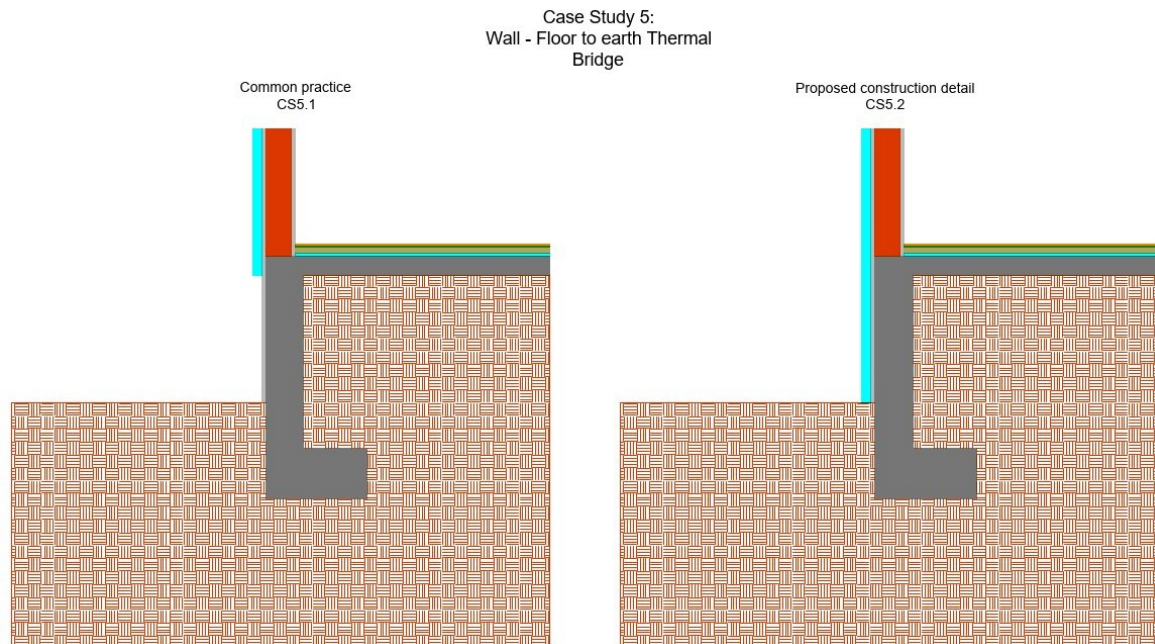
Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της συγκεκριμένης κατασκευαστικής λεπτομέρειας διαμορφώθηκαν δύο δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αποτυπώνουν αφενός τη συμβατική κατασκευαστική πρακτική και αφετέρου την προτεινόμενη βελτιωμένη λύση.

Το πρώτο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS4.1, αναπαριστά τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Στο μοντέλο αυτό η θερμομονωτική στρώση της εξωτερικής τοιχοποιίας και του δαπέδου προς pilotis δεν εξασφαλίζει πλήρη θερμική συνέχεια στην περιοχή της συναρμογής με τη δοκό και την πλάκα του εξώστη. Ως αποτέλεσμα, το σημείο

σύνδεσης της τοιχοποιίας με τα φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζει μειωμένη θερμική προστασία, ενώ η δοκός και η πλάκα του εξώστη λειτουργούν ως ζώνες ενισχυμένης θερμικής ροής προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η ασυνέχεια αυτή οδηγεί σε αυξημένες θερμικές απώλειες και επιβαρύνει τη συνολική θερμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Το δεύτερο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS4.2, αποτυπώνει την προτεινόμενη κατασκευαστική λύση. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται η τοποθέτηση θερμομόνωσης σε όλες της πλευρές της δοκού, καθώς και στην άνω και κάτω παρειά της πλάκας του εξώστη, με χρήση εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) πάχους 5 cm, ανεξάρτητα από την κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο. Με την εφαρμογή της λύσης αυτής επιδιώκεται εν μέρει η αποκατάσταση της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης στο κρίσιμο σημείο συναρμογής της τοιχοποιίας, της πλάκας δαπέδου και του εξώστη. Παράλληλα, περιορίζεται η θερμική ροή μέσω των εκτεθειμένων φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα οποία, λόγω της υψηλότερης θερμικής τους αγωγιμότητας, συμβάλλουν καθοριστικά στην ένταση του φαινομένου. Με τον τρόπο αυτό αναμένεται βελτίωση της συνολικής θερμικής συμπεριφοράς της κατασκευαστικής λεπτομέρειας και μείωση της έντασης της θερμογέφυρας στο εξεταζόμενο σημείο.

7.2.5 Περίπτωση Μελέτης 5 (CS5) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος.



Εικόνα 24 : Μοντέλο προσομοίωσης περίπτωσης μελέτης 5 (CS5)

Η περίπτωση μελέτης CS5 αφορά τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με την πλάκα δαπέδου επί εδάφους με τη στάθμη του δαπέδου να βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη εδάφους του περιβάλλοντος χώρου. Πρόκειται για μία χαρακτηριστική περίπτωση γραμμικής θερμογέφυρας, καθώς στην περιοχή της περιμετρικής σύνδεσης τοιχοποιίας και δαπέδου παρατηρείται μεταβολή της γεωμετρίας του κελύφους και ασυνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης. Η τοπική αυτή ασυνέχεια ευνοεί την ανάπτυξη ενισχυμένης δισδιάστατης ροής θερμότητας, με αποτέλεσμα την αύξηση των θερμικών απωλειών και την υποβάθμιση της θερμικής προστασίας στο κατώτερο τμήμα του κελύφους.

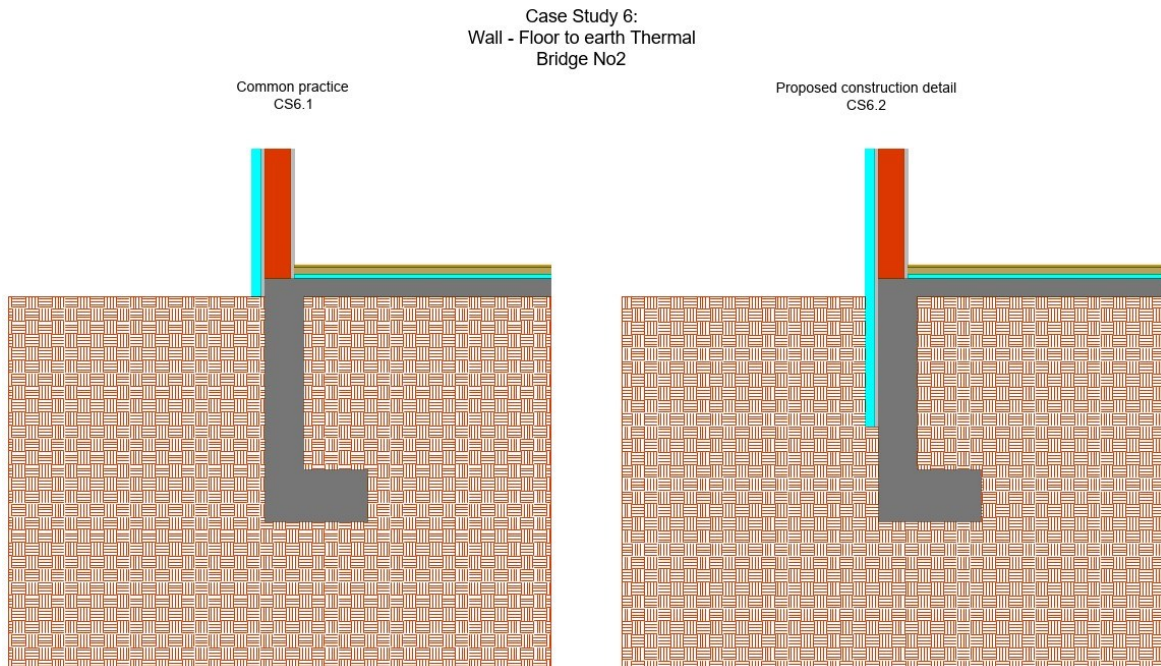
Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της συγκεκριμένης κατασκευαστικής λεπτομέρειας διαμορφώθηκαν δύο δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αποτυπώνουν αφενός τη συμβατική κατασκευαστική πρακτική και αφετέρου την προτεινόμενη βελτιωμένη λύση.

Το πρώτο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS5.1, αναπαριστά τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Στο μοντέλο αυτό η θερμομόνωση της εξωτερικής τοιχοποιίας και η θερμομονωτική στρώση του δαπέδου δεν εξασφαλίζουν πλήρη θερμική συνέχεια στην περιοχή της περιμετρικής επαφής με το έδαφος. Επιπλέον, συνήθως, η τοποθέτηση της

θερμομονωτικής στρώσης της τοιχοποιίας σταματά στο ύψος της δαπέδου και δεν συνεχίζει εξωτερικά των τοιγείων οπλισμένου σκυροδέματος που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος. Ως αποτέλεσμα, το σημείο σύνδεσης της τοιχοποιίας με το δάπεδο εμφανίζει μειωμένη θερμική προστασία, ενώ το δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα που έρχεται σε επαφή με το έδαφος λειτουργεί ως ζώνη αυξημένης ροής θερμότητας. Η ασυνέχεια αυτή εντείνει το φαινόμενο της θερμογέφυρας και συμβάλλει στην ανάπτυξη αυξημένων θερμικών απωλειών, και μείωση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας των δομικών στοιχείων στην περιοχή της ασυνέχειας.

Το δεύτερο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS5.2, αποτυπώνει την προτεινόμενη κατασκευαστική λύση. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται η επέκταση της θερμομόνωσης με εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) πάχους 5 cm στην εξωτερική παρειά των κατακόρυφων δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, έτσι ώστε να βελτιώνεται η θερμική συνέχεια στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δάπεδο. Με την εφαρμογή της λύσης αυτής επιδιώκεται ο περιορισμός της θερμικής ροής μέσω των περιμετρικών στοιχείων του δαπέδου και η μείωση της έντασης της θερμογέφυρας στη ζώνη επαφής με το έδαφος. Κατ' επέκταση, αναμένεται βελτίωση της συνολικής υγροθερμικής συμπεριφοράς της κατασκευής στο κρίσιμο αυτό σημείο.

7.2.6 Περίπτωση Μελέτης 6 (CS6) : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος Νο2



Η περίπτωση μελέτης CS6 αφορά τη θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με την πλάκα δαπέδου επί εδάφους με τη στάθμη εδάφους του περιβάλλοντος χώρου να βρίσκεται στην ίδια στάθμη με αυτή του εδάφους κάτω από την πλάκα του δαπέδου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το κατακόρυφο δομικό στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος και από τις δύο πλευρές του. Πρόκειται για μία χαρακτηριστική περίπτωση γραμμικής θερμογέφυρας, καθώς στην περιοχή της σύνδεσης της τοιχοποιίας με το δάπεδο και τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία που έρχονται σε επαφή με το έδαφος παρατηρείται ασυνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης. Στο σημείο της ασυνέχειας αυτής καταγράφεται αυξημένη ροή θερμότητας μέσω των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και της εδαφικής στρώσης προς τον εξωτερικό αέρα, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών και την τοπική υποβάθμιση της θερμικής προστασίας στο κατώτερο τμήμα του κελύφους.

Για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της συγκεκριμένης περίπτωσης διαμορφώθηκαν, αντίστοιχα, δύο δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αποτυπώνουν αφενός τη συμβατική κατασκευαστική πρακτική και αφετέρου την προτεινόμενη βελτιωμένη λύση.

Το πρώτο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS6.1, αναπαριστά τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Στο μοντέλο αυτό η θερμομόνωση της εξωτερικής τοιχοποιίας σταματά στη στάθμη εδάφους του περιβάλλοντος χώρου και δεν συνδέεται με τη θερμομονωτική στρώση που βρίσκεται στην κάτω παρειά της πλάκας του δαπέδου. Ως αποτέλεσμα, η ασυνέχεια της μόνωσης στο μη θερμομονωμένο κατακόρυφο δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα που βρίσκεται σε συνέχεια της τοιχοποιίας εντός του εδάφους δημιουργεί μια γραμμική θερμογέφυρα και προκαλεί αύξηση της ροής θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον, δρώντας επιβαρυντικά στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

Το δεύτερο μοντέλο, με κωδική ονομασία CS6.2, αποτυπώνει την προτεινόμενη κατασκευαστική λύση. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται η τοποθέτηση εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) πάχους 5cm στην εξωτερική παρειά του κατακόρυφου δομικού στοιχείου που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, ανεξάρτητα από την κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο. Με την εφαρμογή της λύσης αυτής επιδιώκεται η μείωση της θερμικής ροής μέσω του στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτό αναμένεται μείωση της έντασης της θερμογέφυρας και βελτίωση της συνολικής θερμικής συμπεριφοράς της κατασκευαστικής λεπτομέρειας.

Η γεωμετρική επέκταση των μοντέλων και ο καθορισμός των αποστάσεων από την περιοχή της θερμογέφυρας πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις γενικές αρχές του ISO 10211. Ως ελάχιστο μήκος των επιμέρους δομικών στοιχείων θεωρήθηκε το 1,00 m, ώστε να περιορίζεται η επίδραση των οριακών συνθηκών στην περιοχή της θερμογέφυρας. Οι τιμές του γραμμικού συντελεστή θερμοπερατότητας Ψ συγκρίνονται, όπου είναι δυνατόν, με ενδεικτικές τιμές του ISO 14683 ή της TOTEE. Στο λογισμικό THERM ο έλεγχος σύγκλισης του πλέγματος πραγματοποιείται σε σημαντικό βαθμό αυτόματα, καθώς το πρόγραμμα ενσωματώνει τοπικό εκτιμητή σφάλματος και δυνατότητα τοπικής πύκνωσης του πλέγματος. Η διαδικασία βασίζεται στο κριτήριο Error Energy Norm (EEN), μέσω του οποίου εντοπίζονται οι περιοχές του μοντέλου που απαιτούν μεγαλύτερη αριθμητική ακρίβεια. Σύμφωνα με το LBNL, η προεπιλεγμένη τιμή $EEN = 10\%$ έχει επιλεγεί έτσι ώστε η συνολική υπολογιστική ακρίβεια να είναι μικρότερη από το όριο του 1% που τίθεται από το ISO 10211.

7.3 Ιδιότητες των δομικών υλικών – Συνοριακές συνθήκες

Για τον προσδιορισμό της θερμικής ροής και, κατ' επέκταση, του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ μέσω δισδιάστατης προσομοίωσης, απαιτείται ο σαφής ορισμός των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για τα δομικά στοιχεία που περιλαμβάνονται σε κάθε εξεταζόμενο μοντέλο. Οι συνοριακές αυτές συνθήκες περιγράφουν το θερμικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το στοιχείο και περιλαμβάνουν δεδομένα όπως η θερμοκρασία του εσωτερικού και του εξωτερικού αέρα, εκφρασμένη σε $^{\circ}\text{C}$, καθώς και τις τιμές των συντελεστών θερμικής μετάβασης και των αντίστοιχων αντιστάσεων θερμικής μετάβασης του επιφανειακού στρώματος αέρα, οι οποίες εκφράζονται σε $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ και $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ αντίστοιχα.

Ο συντελεστής θερμικής σύζευξης $L2D$ προκύπτει από τον λόγο της συνολικής θερμικής ροής προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος για το υπό εξέταση δομικό στοιχείο. Αντίστοιχα, και ο συντελεστής θερμοπερατότητας U εκφράζεται σε σχέση με μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας, δηλαδή ανά Κέλβιν $[\text{K}]$. Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθεί ότι η διαφορά θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου είναι αριθμητικά ίση με τη διαφορά θερμοκρασίας σε Κέλβιν, δηλαδή ισχύει η σχέση $\Delta\theta (^{\circ}\text{C}) = \Delta T (\text{K})$.

Με βάση τις κατευθυντήριες οδηγίες της TOTEE 20701-2/2017 και ειδικότερα τον Πίνακα 2β, οι συνοριακές συνθήκες που προτείνονται για τις σχετικές προσομοιώσεις είναι οι ακόλουθες:

- Θερμοκρασία εσωτερικού χώρου θ_i : 20°C (τυπική θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος κατά τη χειμερινή περίοδο).
- Θερμοκρασία εξωτερικού χώρου:
- $\theta_a = 2^{\circ}\text{C}$, αντιπροσωπευτική τιμή για υπολογισμό των θερμικών απωλειών σε worst case scenario για την Κλιματική Ζώνη Α.
- $\theta_a = -8^{\circ}\text{C}$, αντιπροσωπευτική τιμή για υπολογισμό των θερμικών απωλειών σε worst case scenario για την Κλιματική Ζώνη Δ.
- Ταχύτητα ανέμου: 4 m/s (αντιπροσωπεύει μια τυπική εξωτερική συνθήκη σε αστικό περιβάλλον).
- Επιφανειακή αντίσταση θερμικής μετάβασης R_{si} και αντίστοιχος συντελεστής θερμικής μετάβασης h_{si} **για δομικά στοιχεία** σε επαφή με εξωτερικό αέρα (οριζόντια ροή

θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο): $R_{si}=0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$, $h_{si}=7,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

- Επιφανειακή αντίσταση θερμικής μετάβασης R_{si} και αντίστοιχος συντελεστής θερμικής μετάβασης h_{si} **για δώμα** (ανερχόμενη ροή θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο) $R_{si}=0,10 \text{ (m}^2\text{K)/W}$, $h_{si}=10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.
- Επιφανειακή αντίσταση θερμικής μετάβασης R_{si} και αντίστοιχος συντελεστής θερμικής μετάβασης h_{si} **για δάπεδο** σε επαφή με εξωτερικό αέρα ή επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο ή επαφή με έδαφος (κατερχόμενη ροή θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο) $R_{si}=0,17 \text{ (m}^2\text{K)/W}$, $h_{si}=5,88 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.
- Επιφανειακή αντίσταση θερμικής μετάβασης R_{se} και αντίστοιχος συντελεστής θερμικής μετάβασης h_{se} για δομικά στοιχεία σε επαφή με εξωτερικό αέρα (μετάδοση της θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον): $R_{se}=0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$, $h_{se}=25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. (TOTEE 20701-2, 2017).
- Επιφανειακή αντίσταση θερμικής μετάβασης R_{se} και αντίστοιχος συντελεστής θερμικής μετάβασης h_{se} για δομικά στοιχεία σε επαφή με έδαφος (μετάδοση της θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το έδαφος): $R_{se}=0,00 \text{ (m}^2\text{K)/W}$, $h_{se}= - \text{ W/(m}^2\text{K)}$. (TOTEE 20701-2, 2017). Για τις επιφάνειες σε άμεση επαφή με το έδαφος δεν εφαρμόζεται επιφανειακή αντίσταση εξωτερικού αέρα. Το έδαφος μοντελοποιείται ως στερεό υλικό με συγκεκριμένη θερμική αγωγιμότητα και η θερμική ανταλλαγή περιγράφεται μέσω αγωγής στο εδαφικό πεδίο.

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρικής διαμόρφωσης των μοντέλων, ακολουθεί το στάδιο της αριθμητικής επίλυσης στο λογισμικό THERM. Στο στάδιο αυτό αποδίδονται στα επιμέρους δομικά υλικά οι αντίστοιχες θερμοφυσικές ιδιότητες και ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του συστήματος, σύμφωνα με τις παραμέτρους που παρουσιάστηκαν ανωτέρω. Επισημαίνεται ότι η σχετική υγρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος δεν εισάγεται ως συνοριακή συνθήκη στο THERM, καθώς το λογισμικό επιλύει το πρόβλημα της θερμικής ροής και της θερμοκρασιακής κατανομής. Οι τιμές της σχετικής υγρασίας χρησιμοποιούνται αποκλειστικά, εκτός λογισμικού, για τον υπολογισμό του σημείου δρόσου και τη σύγκρισή του με την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία που προκύπτει από την ανάλυση.

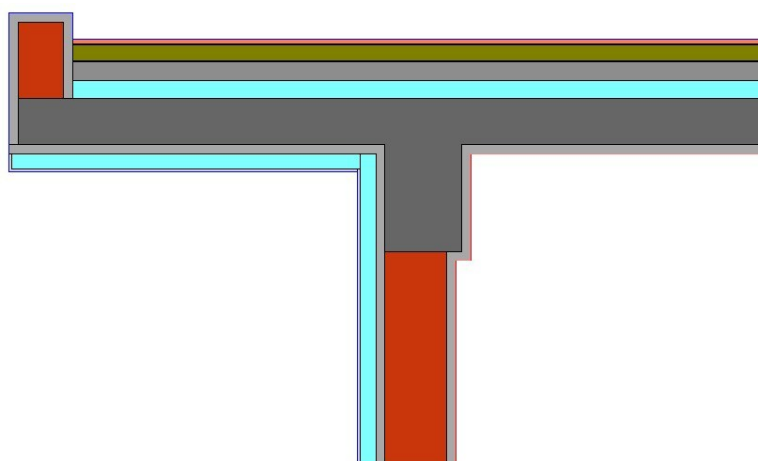
Ως προς τα υλικά, πραγματοποιείται επιλογή των κατάλληλων κατασκευαστικών στρώσεων από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη του λογισμικού. Για κάθε υλικό

λαμβάνονται υπόψη οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη θερμική ανάλυση, και ειδικότερα ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και ο συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας. Παράλληλα, σε κάθε υλικό αποδίδεται διακριτό χρώμα, ώστε να διευκολύνεται η αναγνώρισή του στο τελικό υπολογιστικό μοντέλο και να καθίσταται σαφέστερη η διάκριση των επιμέρους στρώσεων της κατασκευής.

Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί, παρουσιάζονται, συγκεντρωτικά, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μοντέλων, το χρώμα με το οποίο απεικονίζονται στο περιβάλλον του THERM, καθώς και οι τιμές των σχετικών συντελεστών. Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό μοντέλο προκειμένου να γίνει κατανοητή η αντιστοίχιση των δομικών υλικών. Οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ και του συντελεστή εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας καθορίστηκαν με βάση τις Τεχνικές Οδηγίες Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017 και Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, αντίστοιχα, ώστε τα μοντέλα να είναι συμβατά με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο.

Δομικό Υλικό	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (W / mK)	Συντελεστής εκπομπής ϵ	Χρωματική απεικόνιση υλικού
Οπτοπλινθοδομή	0,51	0,80	
Οπλισμένο σκυρόδεμα	2,50	0,80	
Επίσχισμα (ασβεστοτσιμεντοκονίαμα)	0,87	0,80	
Εξηλασμένη Πολυστερίνη (XPS)	0,035	0,80	
Επίσχισμα θερμοπρόσοψης	1,00	0,80	
Γαρμπιλοσκυρόδεμα	0,81	0,80	
Ασφαλτόπανο	0,23	0,80	
Τσιμεντοκονία	1,40	0,80	
Κόλλα πλακιδίων	1,84	0,80	
Κεραμικό πλακίδιο	1,84	0,80	

Πίνακας 3 : Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών



Εικόνα 25 : Απεικόνιση του μοντέλου της περίπτωσης μελέτης 3 (CS3)

8. Περιπτώσεις μελέτης – Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα υπολογιστικά μοντέλα, όπως αυτά διαμορφώθηκαν και προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού THERM, καθώς και τα βασικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης. Ειδικότερα, για κάθε μοντέλο παρατίθεται η υπολογιζόμενη τιμή της θερμικής ροής Φ , η οποία αποτελεί βασικό μέγεθος για την αποτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς της εκάστοτε κατασκευαστικής διάταξης.

Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, υπολογίζεται και παρουσιάζεται ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ για κάθε μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψη τις εξωτερικές διαστάσεις των δομικών στοιχείων, σύμφωνα με τα οριζόμενα στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017. Η τιμή του συντελεστή Ψ επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση της πρόσθετης θερμικής απώλειας που προκαλείται λόγω της παρουσίας της γραμμικής θερμογέφυρας και, επομένως, αποτελεί κρίσιμο δείκτη για τη σύγκριση μεταξύ της συμβατικής και της βελτιωμένης κατασκευαστικής λύσης.

Πέραν της θερμικής ροής και του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας, για κάθε μοντέλο προσομοίωσης υπολογίζεται η ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία στα σημεία των θερμογεφυρών, $T_{si,min}$. Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αποτυπώνει τις ψυχρότερες περιοχές της εσωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου, στις οποίες είναι αυξημένη η πιθανότητα εμφάνισης επιφανειακών συμπυκνώσεων ή/και ανάπτυξης μούχλας, ιδίως υπό συνθήκες αυξημένης εσωτερικής υγρασίας.

Παράλληλα, υπολογίζεται ο συντελεστής θερμοκρασίας εσωτερικής επιφάνειας fR_{si} , ο οποίος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της υγραθερμικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων και, ειδικότερα, για την εκτίμηση του κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας στις περιοχές των θερμογεφυρών. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τη σχέση μεταξύ της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας, της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος, παρέχοντας έναν συγκρίσιμο δείκτη αξιολόγησης της θερμικής επάρκειας της εσωτερικής επιφάνειας.

Επιπλέον, για την πληρέστερη διερεύνηση της πιθανότητας εμφάνισης επιφανειακών συμπυκνώσεων, προσδιορίζονται τα αντίστοιχα σημεία δρόσου για τιμές

εσωτερικής σχετικής υγρασίας 40%, 70% και 80%, τόσο για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C όσο και για θερμοκρασία 18°C. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{si,min}$ κάθε μοντέλου, προκειμένου να εκτιμηθεί εάν οι ψυχρότερες περιοχές της εσωτερικής επιφάνειας προσεγγίζουν ή υπολείπονται του σημείου δρόσου. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή όχι μόνο η θερμική, αλλά και η υγραθερμική αξιολόγηση των εξεταζόμενων κατασκευαστικών διατάξεων.

Τέλος, παρουσιάζεται η κατανομή της θερμικής ροής για κάθε μοντέλο προσομοίωσης, μέσω της οποίας διευκολύνεται η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και ο εντοπισμός των θερμικά ασθενέστερων περιοχών. Η οπτική απεικόνιση της θερμικής ροής συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των επιμέρους κατασκευαστικών λύσεων και αναδεικνύει με σαφήνεια τα σημεία στα οποία η παρουσία της θερμογέφυρας επηρεάζει δυσμενέστερα τη θερμική απόδοση του κελύφους.

8.1 Περίπτωση μελέτης CS1 : Θερμογέφυρα εξώστη

Για την περίπτωση μελέτης CS1 εξετάζεται η γραμμική θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στη συναρμογή της εξωτερικής τοιχοποιίας με τον εξώστη. Η ανάλυση πραγματοποιείται τόσο για τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική όσο και για την προτεινόμενη βελτιωμένη κατασκευαστική λύση, με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση της δεύτερης στη θερμική και υγραθερμική συμπεριφορά της συγκεκριμένης κατασκευαστικής λεπτομέρειας. Τα μοντέλα M1, M3, M5 και M7 αντιστοιχούν στη συνήθη λύση, ενώ τα μοντέλα M2, M4, M6 και M8 αποτυπώνουν την προτεινόμενη βελτιωμένη κατασκευαστική διάταξη. Στον πίνακα 4 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Model No	Zone	Case Study	Tout (°C)	Tin (°C)	Φ (W/m)	ψ - value (W/mK)	$T_{si,min}$ (°C)	R_{si}	Tdp (°C)		
									RH = 40%	RH = 70%	RH = 80%
M1	A	CS1.1	2	20	31.16	0.628	13.4	0.63	6	14.4	16.4
M2	A	CS1.2	2	20	24.52	0.259	15.8	0.77	6	14.4	16.4
M3	D	CS1.1	-8	20	40.95	0.692	10.6	0.66	6	14.4	16.4
M4	D	CS1.2	-8	20	30.69	0.326	14.1	0.79	6	14.4	16.4
M5	A	CS1.1	2	18	27.70	0.628	12.2	0.64	4.2	12.4	14.5
M6	A	CS1.2	2	18	21.80	0.259	14.2	0.76	4.2	12.4	14.5
M7	D	CS1.1	-8	18	38.02	0.692	9.3	0.67	4.2	12.4	14.5
M8	D	CS1.2	-8	18	28.50	0.326	12.6	0.79	4.2	12.4	14.5

Πίνακας 4 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 1 (CS1)

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η προτεινόμενη κατασκευαστική λύση συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση της θερμικής ροής Φ σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για την Κλιματική Ζώνη Α, η θερμική ροή μειώνεται από 31,16 W/m σε 24,52 W/m για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 27,70 W/m σε 21,80 W/m. Η μείωση αυτή ανέρχεται περίπου σε 21%, γεγονός που δείχνει ότι η βελτιωμένη διάταξη περιορίζει σημαντικά τις θερμικές απώλειες λόγω της θερμογέφυρας στη ζώνη συναρμογής της τοιχοποιίας με τον εξώστη.

Ακόμη μεγαλύτερη διαφοροποίηση παρατηρείται στην Κλιματική Ζώνη Δ, όπου οι δυσμενέστερες εξωτερικές συνθήκες οδηγούν σε αυξημένη θερμική καταπόνηση της κατασκευαστικής λεπτομέρειας. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, η θερμική ροή μειώνεται από 40,95 W/m σε 30,69 W/m, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 38,02 W/m σε 28,50 W/m. Στις περιπτώσεις αυτές η μείωση προσεγγίζει το 25%, αναδεικνύοντας ότι η αντιμετώπιση της θερμογέφυρας αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία σε περιοχές με ψυχρότερες κλιματικές συνθήκες.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η μεταβολή του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ . Στην Κλιματική Ζώνη Α, η τιμή του Ψ μειώνεται από 0,628 W/mK στη συνήθη κατασκευαστική λύση σε 0,259 W/mK στην προτεινόμενη διάταξη, παρουσιάζοντας μείωση περίπου 59%. Αντίστοιχα, στην Κλιματική Ζώνη Δ, ο συντελεστής Ψ μειώνεται από 0,692 W/mK σε 0,326 W/mK, δηλαδή κατά περίπου 53%. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη λύση περιορίζει ουσιαστικά την ένταση της θερμογέφυρας, χωρίς όμως να την εξαλείφει πλήρως, καθώς οι τιμές του Ψ παραμένουν θετικές.

Ως προς την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{in,min}$, η επίδραση της προτεινόμενης λύσης είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντική. Στην Κλιματική Ζώνη Α, για $T_{in} = 20^\circ\text{C}$, η $T_{si,min}$ αυξάνεται από 13,4°C σε 15,8°C, ενώ για $T_{in} = 18^\circ\text{C}$ αυξάνεται από 12,2°C σε 14,2°C. Αντίστοιχα, στην Κλιματική Ζώνη Δ, η ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{si,min}$ αυξάνεται από 10,6°C σε 14,1°C για $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ και από 9,3°C σε 12,6°C για $T_{in} = 18^\circ\text{C}$. Η αύξηση αυτή είναι ουσιώδης, καθώς οι χαμηλές επιφανειακές θερμοκρασίες στην περιοχή της θερμογέφυρας αποτελούν βασικό παράγοντα εμφάνισης επιφανειακών συμπυκνώσεων και, σε βάθος χρόνου, πιθανής ανάπτυξης μούχλας.

Η βελτίωση αποτυπώνεται καθαρά και στις τιμές του συντελεστή fRsi. Στα μοντέλα της συνήθους κατασκευαστικής λύσης οι τιμές του fRsi κυμαίνονται από 0,63 έως 0,67, δηλαδή παραμένουν χαμηλότερες από το όριο αναφοράς 0,70. Η ένδειξη αυτή υποδηλώνει αυξημένη ευαισθησία της συγκεκριμένης κατασκευαστικής λεπτομέρειας ως προς τον κίνδυνο ανάπτυξης μούχλας. Αντίθετα, στα μοντέλα της προτεινόμενης λύσης, ο συντελεστής fRsi αυξάνεται σε τιμές από 0,76 έως 0,79, γεγονός που δείχνει σαφή βελτίωση της υγροθερμικής συμπεριφοράς της εσωτερικής επιφάνειας.

Η σύγκριση της $T_{si,min}$ με τα αντίστοιχα σημεία δρόσου επιτρέπει την πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση του κινδύνου επιφανειακών συμπυκνώσεων. Για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C , τα σημεία δρόσου διαμορφώνονται σε $6,0^{\circ}\text{C}$ για $RH = 40\%$, $14,4^{\circ}\text{C}$ για $RH = 70\%$ και $16,4^{\circ}\text{C}$ για $RH = 80\%$. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση, με $T_{si,min} = 13,4^{\circ}\text{C}$, υπολείπεται του σημείου δρόσου για $RH = 70\%$ και $RH = 80\%$, γεγονός που υποδηλώνει πιθανότητα εμφάνισης επιφανειακών συμπυκνώσεων σε συνθήκες αυξημένης εσωτερικής υγρασίας. Η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $15,8^{\circ}\text{C}$, τιμή υψηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για το ακραίο σενάριο $RH = 80\%$. Επομένως, ο κίνδυνος περιορίζεται σημαντικά, χωρίς όμως να εξαλείφεται πλήρως σε συνθήκες πολύ υψηλής υγρασίας.

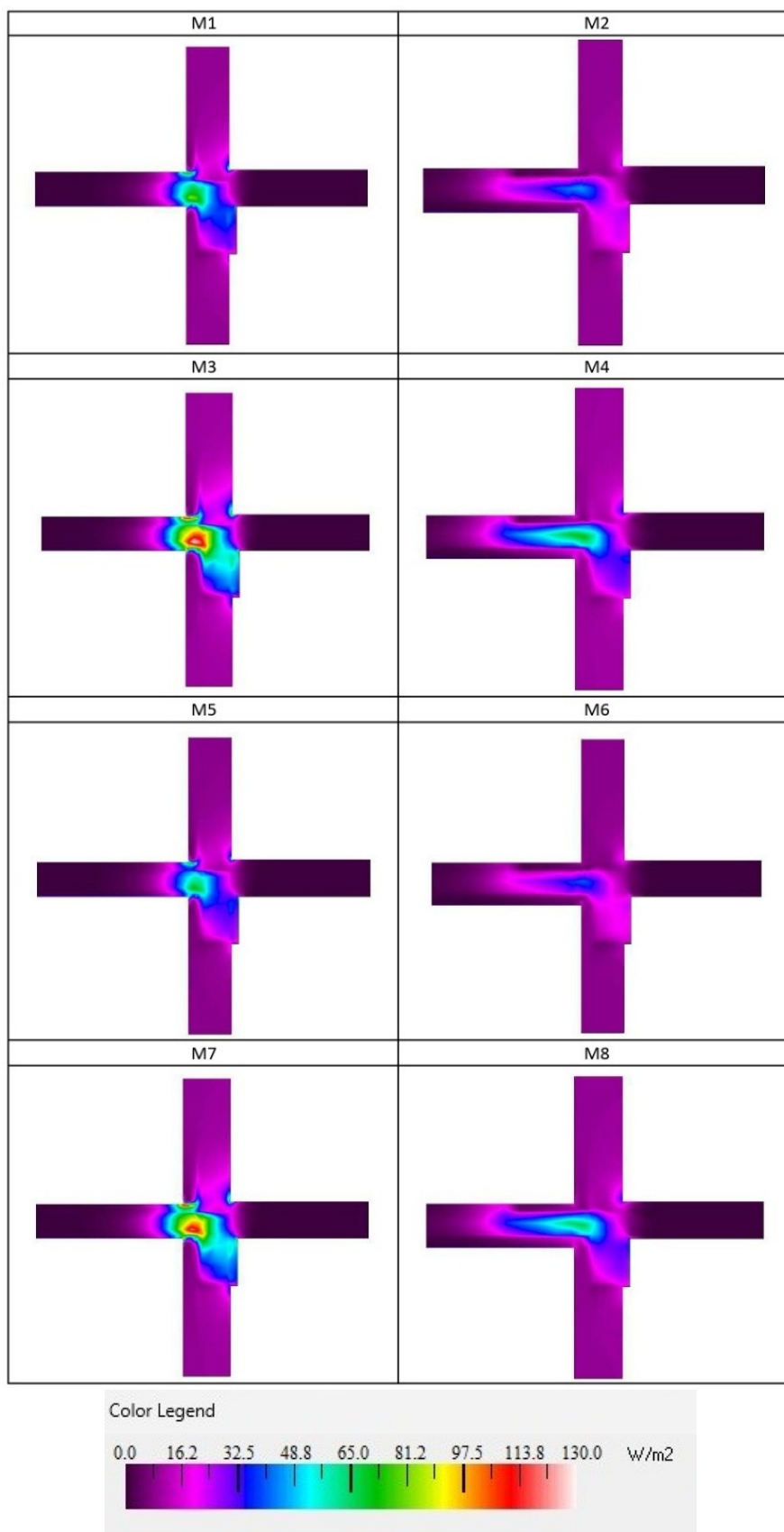
Στην Κλιματική Ζώνη Δ και για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$, η συνήθης λύση εμφανίζει $T_{si,min} = 10,6^{\circ}\text{C}$, δηλαδή τιμή αρκετά χαμηλότερη από τα σημεία δρόσου για $RH = 70\%$ και $RH = 80\%$. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει την αυξημένη επικινδυνότητα της συμβατικής διαμόρφωσης υπό δυσμενείς συνθήκες. Με την προτεινόμενη λύση, η $T_{si,min}$ αυξάνεται σε $14,1^{\circ}\text{C}$, προσεγγίζοντας το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, χωρίς όμως να το υπερβαίνει πλήρως, ενώ παραμένει χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για το ακραίο σενάριο $RH = 80\%$. Συνεπώς, στην Κλιματική Ζώνη Δ εξακολουθεί να απαιτείται προσοχή σε περιβάλλοντα με πολύ υψηλή εσωτερική σχετική υγρασία.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C . Στην περίπτωση αυτή, τα σημεία δρόσου είναι $4,2^{\circ}\text{C}$ για $RH = 40\%$, $12,4^{\circ}\text{C}$ για $RH = 70\%$ και $14,5^{\circ}\text{C}$ για $RH = 80\%$. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση παρουσιάζει $T_{si,min} = 12,2^{\circ}\text{C}$, τιμή οριακά χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$ και σαφώς χαμηλότερη από εκείνη για $RH = 80\%$. Η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $14,2^{\circ}\text{C}$, υπερβαίνοντας το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά παραμένοντας ελαφρώς χαμηλότερα από το σημείο δρόσου για $RH = 80\%$. Στην Κλιματική Ζώνη Δ, η

συμβατική λύση εμφανίζει την πιο δυσμενή συμπεριφορά, με $T_{si,min} = 9,3^{\circ}\text{C}$, ενώ η προτεινόμενη λύση αυξάνει την τιμή αυτή σε $12,6^{\circ}\text{C}$. Η βελτίωση είναι σημαντική, καθώς η ελάχιστη επιφανειακή θερμοκρασία υπερβαίνει πλέον το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, ωστόσο εξακολουθεί να υπολείπεται του σημείου δρόσου για το ακραίο σενάριο $RH = 80\%$.

Συνολικά, η περίπτωση μελέτης CS1 αναδεικνύει ότι η συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας και εξώστη αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμη κατασκευαστική λεπτομέρεια από πλευράς θερμογεφυρών. Η συνήθης κατασκευαστική λύση εμφανίζει αυξημένες θερμικές απώλειες, υψηλές τιμές του συντελεστή Ψ και χαμηλές εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες, οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις συνδέονται με κίνδυνο επιφανειακών συμπυκνώσεων και ανάπτυξης μούχλας. Η προτεινόμενη κατασκευαστική λύση βελτιώνει σημαντικά τη συμπεριφορά της λεπτομέρειας, μειώνοντας τη θερμική ροή και τον συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας και αυξάνοντας αισθητά την $T_{si,min}$ και τον fR_{si} . Παρότι σε συνθήκες πολύ υψηλής εσωτερικής υγρασίας, ιδίως $RH = 80\%$, ο κίνδυνος συμπυκνώσεων δεν εξαλείφεται πλήρως, η συνολική εικόνα της βελτιωμένης διάταξης είναι σαφώς ευνοϊκότερη και τεκμηριώνει την ανάγκη ουσιαστικής θερμομονωτικής αντιμετώπισης της θερμογέφυρας στη συγκεκριμένη συναρμογή.

Ακολουθώντας στην εικόνα 26 παρατίθεται η απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής των μοντέλων της περίπτωσης CS1 που αναλύθηκαν με χρήση του λογισμικού THERM.



Εικόνα 26 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS1

8.2 Περίπτωση μελέτης CS2 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με ύπαρξη στηθαίου

Η περίπτωση μελέτης CS2 αφορά τη γραμμική θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας και δώματος με ύπαρξη στηθαίου. Η θερμογέφυρα εξετάζεται σε δύο εκδοχές: στη συνήθη κατασκευαστική διαμόρφωση, η οποία αποτυπώνεται στα μοντέλα ΔΣ1, ΔΣ3, ΔΣ5 και ΔΣ7, και στην προτεινόμενη βελτιωμένη λύση, η οποία αποτυπώνεται στα μοντέλα ΔΣ2, ΔΣ4, ΔΣ6 και ΔΣ8. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται στον πίνακα 5 που ακολουθεί.

Model No	Zone	Case Study	Tout (°C)	Tin (°C)	Φ (W/m)	ψ - value (W/mK)	Tsi,min (°C)	fRsi	Tdp (°C)		
									RH = 40%	RH = 70%	RH = 80%
ΔΣ1	A	CS2.1	2	20	25.84	0.081	17	0.83	6	14.4	16.4
ΔΣ2	A	CS2.2	2	20	24.02	-0.020	17.4	0.86	6	14.4	16.4
ΔΣ3	D	CS2.1	-8	20	32.47	0.189	15.7	0.85	6	14.4	16.4
ΔΣ4	D	CS2.2	-8	20	28.19	0.036	16.7	0.88	6	14.4	16.4
ΔΣ5	A	CS2.1	2	18	22.97	0.081	15.3	0.83	4.2	12.4	14.5
ΔΣ6	A	CS2.2	2	18	21.35	-0.020	15.7	0.86	4.2	12.4	14.5
ΔΣ7	D	CS2.1	-8	18	30.15	0.189	14	0.85	4.2	12.4	14.5
ΔΣ8	D	CS2.2	-8	18	26.18	0.036	14.9	0.88	4.2	12.4	14.5

Πίνακας 5 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 2 (CS2)

Σε σχέση με άλλες περιπτώσεις μελέτης, η συγκεκριμένη λεπτομέρεια εμφανίζει ήδη σχετικά ικανοποιητική συμπεριφορά κατά τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Παρόλα αυτά, η προτεινόμενη διάταξη μειώνει τη θερμική ροή σε όλες τις εξεταζόμενες συνθήκες. Στη Ζώνη Α η τιμή της Φ μειώνεται από 25,84 W/m σε 24,02 W/m για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ και από 22,97 W/m σε 21,35 W/m για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$, με μείωση περίπου 7%. Στη Ζώνη Δ η μείωση είναι μεγαλύτερη, από 32,47 W/m σε 28,19 W/m για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ και από 30,15 W/m σε 26,18 W/m για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$, δηλαδή περίπου 13%.

Η σημαντικότερη διαφοροποίηση εντοπίζεται στον συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ. Στη Ζώνη Α η τιμή μεταβάλλεται από 0,081 W/mK σε -0,020 W/mK. Η αρνητική τιμή δείχνει ότι η συγκεκριμένη γραμμική θερμογέφυρα παύει πρακτικά να λειτουργεί επιβαρυντικά ως προς τις πρόσθετες θερμικές απώλειες υπό τη σύμβαση εξωτερικών διαστάσεων κατά ISO 10211. Στη Ζώνη Δ, ο συντελεστής Ψ μειώνεται από 0,189 W/mK σε 0,036 W/mK, δηλαδή περίπου κατά 81%, γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της λύσης.

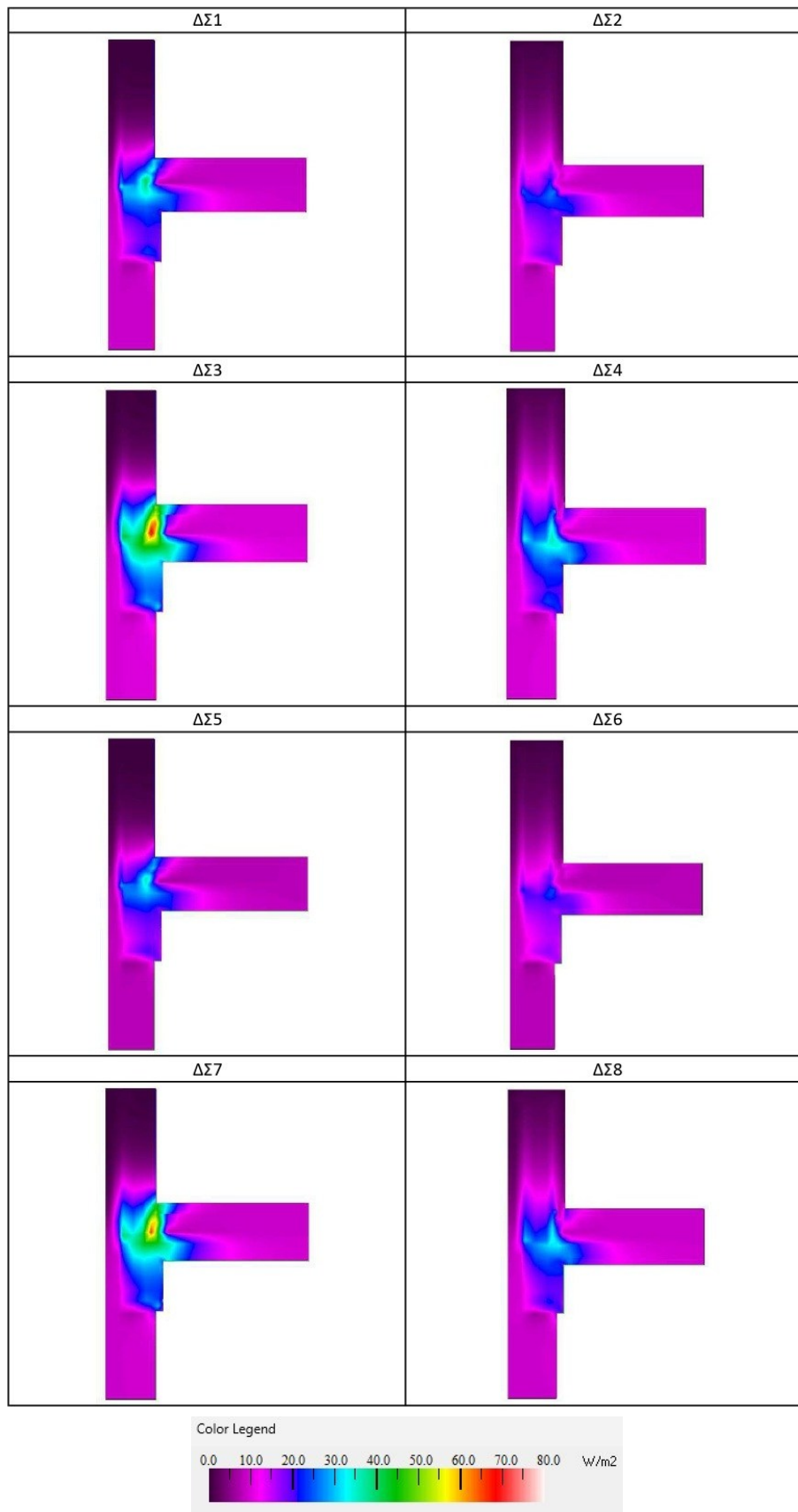
Η αύξηση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας $T_{si,min}$ είναι μικρότερη, αλλά ουσιαστική στις οριακές περιπτώσεις. Στη Ζώνη Α η τιμή αυξάνεται από $17,0^{\circ}\text{C}$ σε

17,4°C για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ και από 15,3°C σε 15,7°C για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$. Στη Ζώνη Δ αυξάνεται από 15,7°C σε 16,7°C και από 14,0°C σε 14,9°C αντίστοιχα. Οι τιμές του συντελεστή fR_{si} αυξάνονται από 0,83 σε 0,86 στη Ζώνη Α και από 0,85 σε 0,88 στη Ζώνη Δ. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές του συντελεστή παραμένουν υψηλότερες από το όριο 0,70, στοιχείο που δείχνει περιορισμένο κίνδυνο ανάπτυξης μούχλας.

Η σύγκριση με τα σημεία δρόσου επιβεβαιώνει ότι υπό συνήθεις συνθήκες σχετικής υγρασίας η λεπτομέρεια δεν παρουσιάζει σοβαρή υγραθερμική αστάθεια. Για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$, τόσο στη Ζώνη Α όσο και στη βελτιωμένη λύση της Ζώνης Δ, η $T_{si,min}$ υπερβαίνει τα κρίσιμα σημεία δρόσου, ακόμη και σε υψηλή υγρασία. Η μόνη οριακή περίπτωση εντοπίζεται στη Ζώνη Δ με τη συνήθη κατασκευαστική λύση για το ακραίο σενάριο με τιμή $RH = 80\%$, όπου η $T_{si,min} = 15,7^{\circ}\text{C}$ είναι χαμηλότερη από το σημείο δρόσου των $16,4^{\circ}\text{C}$. Αντίστοιχα, για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$, η βελτιωμένη λύση στη Ζώνη Δ αυξάνει την $T_{si,min}$ από $14,0^{\circ}\text{C}$ σε $14,9^{\circ}\text{C}$ και υπερβαίνει το σημείο δρόσου των $14,5^{\circ}\text{C}$ του ακραίου σεναρίου με τιμή $RH = 80\%$.

Συνολικά, η CS2 δεν αποτελεί την πιο δυσμενή περίπτωση από πλευράς εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών. Η αξία της προτεινόμενης κατασκευαστικής διάταξης εντοπίζεται κυρίως στον δραστικό περιορισμό του Ψ και στη βελτίωση των οριακών συνθηκών συμπύκνωσης, ιδίως στη Ζώνη Δ και σε περιβάλλοντα με πολύ υψηλή σχετική υγρασία.

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμικής ροής των μοντέλων της CS2, όπως προέκυψε από την προσομοίωση στο THERM.



Εικόνα 27 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS2

8.3 Περίπτωση μελέτης CS3 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - δώματος με προεξοχή

Στην περίπτωση μελέτης CS3 εξετάζεται η γραμμική θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δώμα, στην περίπτωση ύπαρξης προεξοχής. Η ανάλυση πραγματοποιείται τόσο για τη συνήθη κατασκευαστική διαμόρφωση όσο και για την προτεινόμενη βελτιωμένη κατασκευαστική λύση. Τα μοντέλα ΔΕ1, ΔΕ3, ΔΕ5 και ΔΕ7 αντιστοιχούν στη συνήθη κατασκευαστική πρακτική, ενώ τα μοντέλα ΔΕ2, ΔΕ4, ΔΕ6 και ΔΕ8 αποτυπώνουν την προτεινόμενη βελτιωμένη διάταξη. Στον πίνακα 6 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Model No	Zone	Case Study	Tout (°C)	Tin (°C)	Φ (W/m)	ψ - value (W/mK)	Tsi,min (°C)	Rsi	Tdp (°C)		
									RH = 40%	RH = 70%	RH = 80%
ΔΕ1	A	CS3.1	2	20	30.87	0.360	16	0.78	6	14.4	16.4
ΔΕ2	A	CS3.2	2	20	25.92	0.086	17.1	0.84	6	14.4	16.4
ΔΕ3	D	CS3.1	-8	20	39.46	0.439	14.5	0.80	6	14.4	16.4
ΔΕ4	D	CS3.2	-8	20	31.68	0.161	16.2	0.86	6	14.4	16.4
ΔΕ5	A	CS3.1	2	18	27.44	0.360	14.4	0.78	4.2	12.4	14.5
ΔΕ6	A	CS3.2	2	18	23.04	0.086	15.4	0.84	4.2	12.4	14.5
ΔΕ7	D	CS3.1	-8	18	36.65	0.439	12.9	0.80	4.2	12.4	14.5
ΔΕ8	D	CS3.2	-8	18	29.42	0.161	14.5	0.87	4.2	12.4	14.5

Πίνακας 6 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 3 (CS3)

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης οδηγεί σε σαφή μείωση της θερμικής ροής Φ σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για την Κλιματική Ζώνη Α, η θερμική ροή μειώνεται από 30,87 W/m σε 25,92 W/m για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 27,44 W/m σε 23,04 W/m. Η μείωση αυτή ανέρχεται περίπου σε 16%, γεγονός που δείχνει ότι η βελτιωμένη κατασκευαστική διάταξη συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό των θερμικών απωλειών στη ζώνη της συναρμογής.

Η μείωση της θερμικής ροής είναι εντονότερη στην Κλιματική Ζώνη Δ, όπου οι εξωτερικές συνθήκες είναι δυσμενέστερες και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, η θερμική ροή μειώνεται από 39,46 W/m σε 31,68 W/m, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 36,65 W/m σε 29,42 W/m. Στις περιπτώσεις αυτές η μείωση προσεγγίζει το 20%, γεγονός που αναδεικνύει τη

μεγαλύτερη σημασία της ορθής θερμομονωτικής αντιμετώπισης της λεπτομέρειας σε ψυχρότερες κλιματικές συνθήκες.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η μείωση του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ . Στην Κλιματική Ζώνη Α, η τιμή του Ψ μειώνεται από 0,360 W/mK στη συνήθη λύση σε 0,086 W/mK στην προτεινόμενη διάταξη, παρουσιάζοντας μείωση περίπου 76%. Αντίστοιχα, στην Κλιματική Ζώνη Δ, ο συντελεστής Ψ μειώνεται από 0,439 W/mK σε 0,161 W/mK, δηλαδή κατά περίπου 63%. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη λύση περιορίζει σημαντικά την ένταση της θερμογέφυρας, αν και δεν την εξαλείφει πλήρως.

Ως προς την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{si,min}$, η προτεινόμενη κατασκευαστική λύση οδηγεί σε εμφανή αύξηση της τιμής της. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η $T_{si,min}$ αυξάνεται από 16,0°C σε 17,1°C για $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ και από 14,4°C σε 15,4°C για $T_{in} = 18^\circ\text{C}$. Αντίστοιχα, στην Κλιματική Ζώνη Δ, η ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία αυξάνεται από 14,5°C σε 16,2°C για $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ και από 12,9°C σε 14,5°C για $T_{in} = 18^\circ\text{C}$. Η αύξηση αυτή είναι ουσιαστική, καθώς οι χαμηλές επιφανειακές θερμοκρασίες αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την εμφάνιση επιφανειακών συμπυκνώσεων, ιδιαίτερα σε συνθήκες αυξημένης εσωτερικής σχετικής υγρασίας.

Η βελτίωση αποτυπώνεται και στις τιμές του συντελεστή fR_{si} . Στην Κλιματική Ζώνη Α, ο συντελεστής αυξάνεται από 0,78 σε 0,84, ενώ στην Κλιματική Ζώνη Δ από 0,80 σε 0,86 για $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ και από 0,80 σε 0,87 για $T_{in} = 18^\circ\text{C}$. Οι τιμές αυτές βρίσκονται πάνω από το όριο αναφοράς $fR_{si} = 0,70$, γεγονός που δείχνει ότι, ακόμη και στη συνήθη κατασκευαστική λύση, δεν προκύπτει έντονη ένδειξη κινδύνου ανάπτυξης μούχλας. Παρ' όλα αυτά, η προτεινόμενη λύση βελτιώνει περαιτέρω τη συμπεριφορά της κατασκευής, καθώς αυξάνει τη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας.

Η σύγκριση της $T_{si,min}$ με τα αντίστοιχα σημεία δρόσου αναδεικνύει τις συνθήκες στις οποίες η συμπεριφορά της θερμογέφυρας καθίσταται πιο κρίσιμη. Για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, τα σημεία δρόσου διαμορφώνονται σε 6,0°C για RH = 40%, 14,4°C για RH = 70% και 16,4°C για RH = 80%. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση εμφανίζει $T_{si,min} = 16,0^\circ\text{C}$, τιμή υψηλότερη από το σημείο δρόσου για RH = 70%, αλλά ελαφρώς χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για το ακραίο σενάριο με RH = 80%. Η προτεινόμενη λύση, με $T_{si,min} = 17,1^\circ\text{C}$, υπερβαίνει και το σημείο δρόσου που αντιστοιχεί

στο ακραίο σενάριο $RH = 80\%$, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο επιφανειακής συμπύκνωσης ακόμη και σε συνθήκες υψηλής υγρασίας.

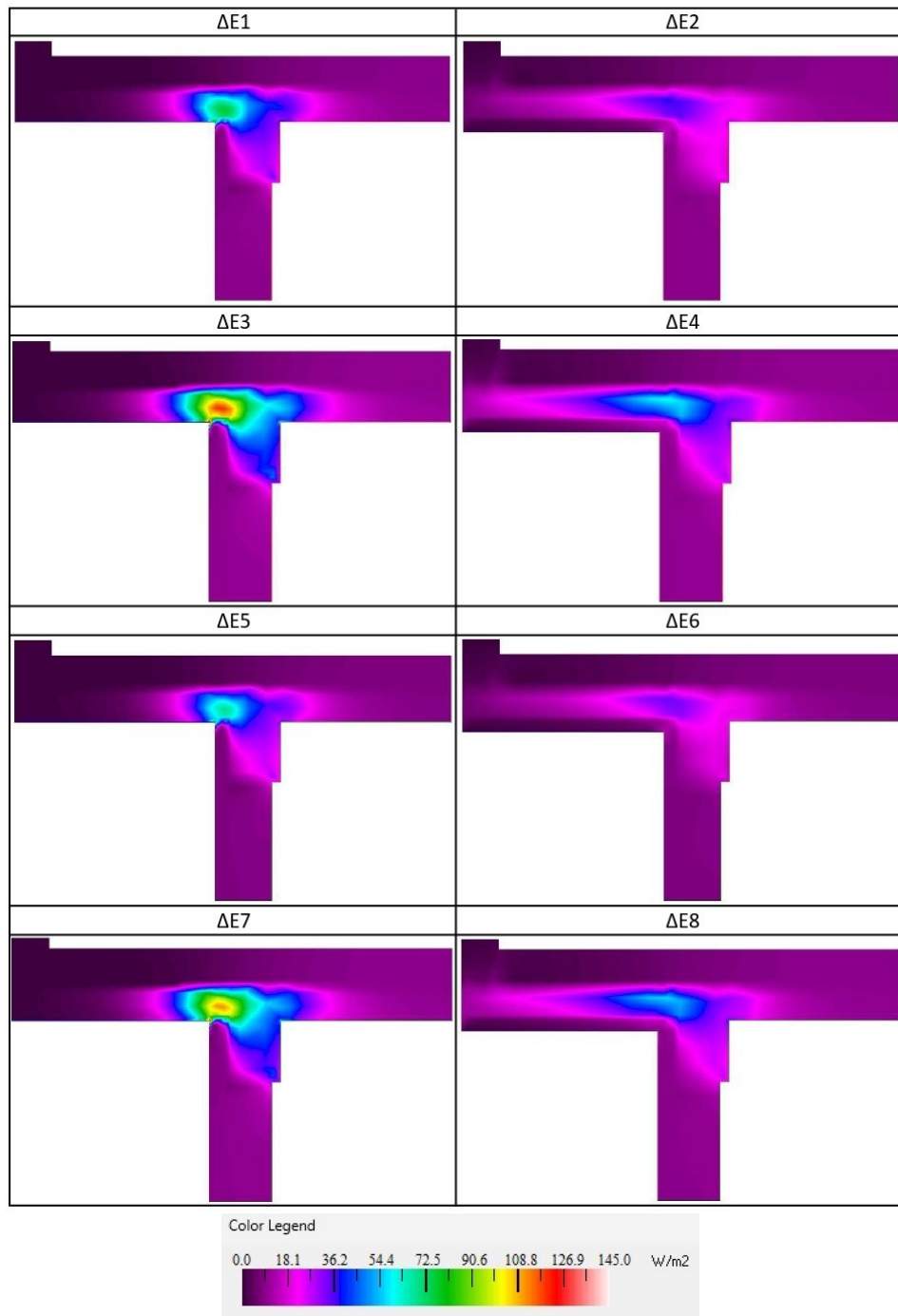
Στην Κλιματική Ζώνη Δ, για $T_{in} = 20^{\circ}C$, η συνήθης λύση παρουσιάζει $T_{si,min} = 14,5^{\circ}C$, τιμή οριακά υψηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 80\%$. Επομένως, σε περιβάλλον με πολύ αυξημένη εσωτερική σχετική υγρασία, η συμβατική διάταξη εμφανίζει πιθανότητα επιφανειακής συμπύκνωσης. Η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $16,2^{\circ}C$, τιμή που παραμένει οριακά χαμηλότερη από το σημείο δρόσου των $16,4^{\circ}C$ για το ακραίο σενάριο με $RH = 80\%$, ωστόσο περιορίζει σημαντικά τον σχετικό κίνδυνο σε σχέση με τη συνήθη λύση.

Αντίστοιχη εικόνα προκύπτει και για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος $18^{\circ}C$. Στην περίπτωση αυτή, τα σημεία δρόσου είναι $4,2^{\circ}C$ για $RH = 40\%$, $12,4^{\circ}C$ για $RH = 70\%$ και $14,5^{\circ}C$ για $RH = 80\%$. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση παρουσιάζει $T_{in,min} = 14,4^{\circ}C$, τιμή πρακτικά οριακή σε σχέση με το σημείο δρόσου για $RH = 80\%$. Αντίθετα, η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $15,4^{\circ}C$, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας έναντι συμπυκνώσεων. Στην Κλιματική Ζώνη Δ, η συνήθης λύση, με $T_{si,min} = 12,9^{\circ}C$, παραμένει υψηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά υπολείπεται του σημείου δρόσου για $RH = 80\%$. Η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $14,5^{\circ}C$, δηλαδή σε τιμή ίση με το σημείο δρόσου για το ακραίο σενάριο με $RH = 80\%$, γεγονός που υποδηλώνει οριακή συμπεριφορά υπό συνθήκες πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας.

Συνολικά, η περίπτωση μελέτης CS3 δείχνει ότι η θερμογέφυρα στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας και δώματος με προεξοχή παρουσιάζει μέτρια έως αυξημένη θερμική επιβάρυνση στη συνήθη κατασκευαστική της διαμόρφωση, χωρίς όμως να εμφανίζει τόσο δυσμενή συμπεριφορά ως προς τον κίνδυνο ανάπτυξης μούχλας, καθώς οι τιμές του fR_{si} παραμένουν άνω του ορίου αναφοράς. Η προτεινόμενη κατασκευαστική λύση επιφέρει σημαντική μείωση της θερμικής ροής και του συντελεστή Ψ , ενώ παράλληλα αυξάνει την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία. Η βελτίωση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε συνθήκες πολύ υψηλής εσωτερικής σχετικής υγρασίας, ιδίως για το ακραίο σενάριο με τιμή $RH = 80\%$, όπου η συνήθης λύση μπορεί να οδηγήσει σε οριακές ή δυσμενείς συνθήκες επιφανειακής συμπύκνωσης. Επομένως, η βελτιωμένη διάταξη συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό της θερμογέφυρας και στην ενίσχυση της

ασφάλειας έναντι συμπυκνώσεων στην εσωτερική επιφάνεια της κατασκευαστικής λεπτομέρειας.

Ακολουθώς στην εικόνα 28 παρατίθεται η απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής των μοντέλων της περίπτωσης CS3 που αναλύθηκαν με χρήση του λογισμικού THERM.



Εικόνα 28 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS3

8.4 Περίπτωση μελέτης CS4 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας - pilotis

Στην περίπτωση μελέτης CS4 εξετάζεται η θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής τοιχοποιίας με το δάπεδο σε επαφή με pilotis. Το συγκεκριμένο σημείο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η επαφή του θερμαινόμενου εσωτερικού χώρου με έναν ανοικτό υπόστυλο χώρο, όπως η pilotis, μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες θερμικές απώλειες και χαμηλές εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες. Και σε αυτή την περίπτωση, η ανάλυση πραγματοποιείται για τις δύο κατασκευαστικές διατάξεις (συνήθης πρακτική και προτεινόμενη λύση), με τα μοντέλα Π1, Π3, Π5 και Π7 να αντιστοιχούν στη συνήθη κατασκευαστική πρακτική, ενώ τα μοντέλα Π2, Π4, Π6 και Π8 να αποτυπώνουν την προτεινόμενη βελτιωμένη λύση. Στον πίνακα 7 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Model No	Zone	Case Study	Tout (°C)	Tin (°C)	Φ (W/m)	Ψ - value	Tsi,min (°C)	fRsi	Tdp (°C)		
									RH = 40%	RH = 70%	RH = 80%
Π1	A	CS4.1	2	20	33.80	0.613	13.6	0.64	6	14.4	16.4
Π2	A	CS4.2	2	20	26.00	0.180	15.8	0.77	6	14.4	16.4
Π3	D	CS4.1	-8	20	46.68	0.754	10.4	0.66	6	14.4	16.4
Π4	D	CS4.2	-8	20	33.89	0.298	13.9	0.78	6	14.4	16.4
Π5	A	CS4.1	2	18	30.05	0.613	12.3	0.64	4.2	12.4	14.5
Π6	A	CS4.2	2	18	23.11	0.180	14.3	0.77	4.2	12.4	14.5
Π7	D	CS4.1	-8	18	43.35	0.754	9.1	0.66	4.2	12.4	14.5
Π8	D	CS4.2	-8	18	31.47	0.298	12.4	0.78	4.2	12.4	14.5

Πίνακας 7 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 4 (CS4)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βελτιωμένη λύση επιδρά έντονα στη θερμική ροή που αναπτύσσεται στην περιοχή της θερμογέφυρας. Στη Ζώνη Α η Φ μειώνεται από 33,80 W/m σε 26,00 W/m για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ και από 30,05 W/m σε 23,11 W/m για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$, με μείωση περίπου 23%. Στη Ζώνη Δ η μείωση είναι ακόμη μεγαλύτερη, από 46,68 W/m σε 33,89 W/m και από 43,35 W/m σε 31,47 W/m, προσεγγίζοντας το 27%. Η απόκριση αυτή δείχνει ότι η λεπτομέρεια της pilotis επηρεάζεται έντονα από τις ψυχρές εξωτερικές συνθήκες.

Η τιμή του συντελεστή Ψ επιβεβαιώνει την ένταση της θερμογέφυρας στη συνήθη κατασκευή. Στη Ζώνη Α μειώνεται από 0,613 W/mK σε 0,180 W/mK, δηλαδή περίπου κατά 71%, ενώ στη Ζώνη Δ από 0,754 W/mK σε 0,298 W/mK, δηλαδή περίπου κατά 60%.

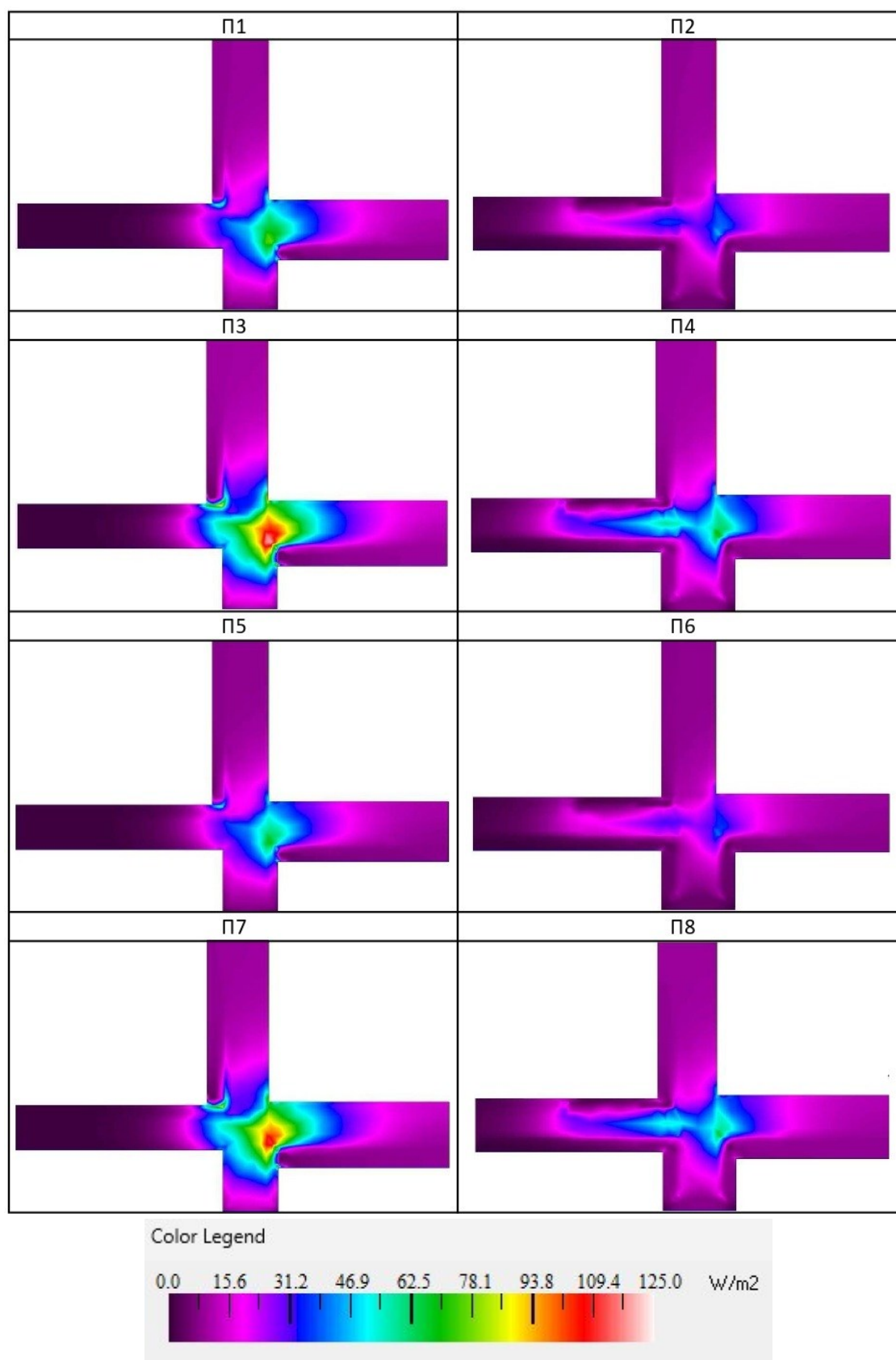
Παρότι οι τελικές τιμές παραμένουν θετικές, η μείωση είναι μεγάλη και δείχνει ουσιαστικό περιορισμό της πρόσθετης γραμμικής απώλειας.

Ακόμη πιο σημαντική είναι η βελτίωση στις εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες. Στη Ζώνη Α η $T_{si,min}$ αυξάνεται από $13,6^{\circ}\text{C}$ σε $15,8^{\circ}\text{C}$ για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ και από $12,3^{\circ}\text{C}$ σε $14,3^{\circ}\text{C}$ για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$. Στη Ζώνη Δ η αύξηση είναι από $10,4^{\circ}\text{C}$ σε $13,9^{\circ}\text{C}$ και από $9,1^{\circ}\text{C}$ σε $12,4^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Οι τιμές fR_{si} μεταβάλλονται από 0,64-0,66 στη συνήθη λύση σε 0,77-0,78 στη βελτιωμένη, υπερβαίνοντας πλέον το όριο αναφοράς 0,70.

Η σύγκριση με τα σημεία δρόσου δείχνει ότι η συνήθης λύση είναι ευάλωτη σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας. Για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$, στη Ζώνη Α η $T_{si,min} = 13,6^{\circ}\text{C}$ υπολείπεται των σημείων δρόσου για τιμές υψηλής σχετικής υγρασία $RH = 70\%$ και για το ακραίο σενάριο με $RH = 80\%$, ενώ στη Ζώνη Δ η $T_{si,min} = 10,4^{\circ}\text{C}$ είναι ακόμη πιο δυσμενής. Η βελτιωμένη λύση περιορίζει τον κίνδυνο, καθώς στη Ζώνη Α υπερβαίνει το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά όχι για $RH = 80\%$. Στη Ζώνη Δ η $T_{si,min} = 13,9^{\circ}\text{C}$ παραμένει οριακά χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$ και σαφώς χαμηλότερη από εκείνο για $RH = 80\%$. Για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$ η εικόνα είναι παρόμοια, με την προτεινόμενη λύση να φτάνει σε οριακή συμπεριφορά στη Ζώνη Δ για $RH = 70\%$.

Συνολικά, η θερμογέφυρα της CS4 αποτελεί μία από τις πιο απαιτητικές περιπτώσεις μελέτης. Η συνήθης λύση συνδυάζει υψηλές τιμές στο συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ , αυξημένη θερμική ροή και χαμηλές εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες. Η προτεινόμενη διάταξη βελτιώνει σημαντικά όλα τα μεγέθη, χωρίς όμως να αναιρεί πλήρως τον κίνδυνο συμπύκνωσης σε πολύ υψηλή σχετική υγρασία, ιδιαίτερα στην Κλιματική Ζώνη Δ. Επομένως, η συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας με δάπεδο προς *pilotis* απαιτεί ιδιαίτερα προσεκτικό θερμομονωτικό σχεδιασμό αλλά και έλεγχο τη εσωτερικής σχετικής υγρασίας μέσω σωστού αερισμού.

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμικής ροής για τα μοντέλα της CS4, όπως αποτυπώθηκε μετά την προσομοίωση στο THERM.



Εικόνα 29 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS4

8.5 Περίπτωση μελέτης CS5 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος

Στην περίπτωση μελέτης CS5 εξετάζεται η θερμογέφυρα στη συναρμογή της εξωτερικής τοιχοποιίας με δάπεδο σε επαφή με το έδαφος, με τη στάθμη του δαπέδου να βρίσκεται ψηλότερα σε σχέση με τη στάθμη εδάφους του περιβάλλοντος χώρου. Η ανάλυση πραγματοποιείται τόσο για τη συνήθη κατασκευαστική διαμόρφωση όσο και για την προτεινόμενη βελτιωμένη λύση, με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασής της στη θερμική και υγροθερμική συμπεριφορά της θερμογέφυρας. Τα μοντέλα ΕΔ1, ΕΔ3, ΕΔ5 και ΕΔ7 αντιστοιχούν στη συνήθη κατασκευαστική πρακτική, ενώ τα μοντέλα ΕΔ2, ΕΔ4, ΕΔ6 και ΕΔ8 αποτυπώνουν την προτεινόμενη βελτιωμένη διάταξη. Στον πίνακα 8 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Model No	Zone	Case Study	Tout (°C)	Tin (°C)	Φ (W/m)	ψ - value	Tsi,min (°C)	fRsi	Tdp (°C)		
									RH = 40%	RH = 70%	RH = 80%
ΕΔ1	A	CS5.1	2	20	36.54	0.108	14.7	0.71	6	14.4	16.4
ΕΔ2	A	CS5.2	2	20	28.55	-0.336	16.5	0.81	6	14.4	16.4
ΕΔ3	D	CS5.1	-8	20	44.71	0.359	12.7	0.74	6	14.4	16.4
ΕΔ4	D	CS5.2	-8	20	35.44	0.028	14.9	0.82	6	14.4	16.4
ΕΔ5	A	CS5.1	2	18	32.48	0.108	13.3	0.71	4.2	12.4	14.5
ΕΔ6	A	CS5.2	2	18	25.38	-0.336	14.9	0.81	4.2	12.4	14.5
ΕΔ7	D	CS5.1	-8	18	41.51	0.359	11.2	0.74	4.2	12.4	14.5
ΕΔ8	D	CS5.2	-8	18	32.91	0.028	13.3	0.82	4.2	12.4	14.5

Πίνακας 8 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 5 (CS5)

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης κατασκευαστικής λύσης οδηγεί σε σημαντική μείωση της θερμικής ροής Φ σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για την Κλιματική Ζώνη Α, η θερμική ροή μειώνεται από 36,54 W/m σε 28,55 W/m για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 32,48 W/m σε 25,38 W/m. Η μείωση αυτή είναι της τάξης του 22%, γεγονός που δείχνει ότι η βελτιωμένη διάταξη περιορίζει ουσιαστικά τις θερμικές απώλειες στη ζώνη της θερμογέφυρας.

Αντίστοιχη βελτίωση παρατηρείται και στην Κλιματική Ζώνη Δ. Για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, η θερμική ροή μειώνεται από 44,71 W/m σε 35,44 W/m, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 41,51 W/m σε 32,91 W/m. Στις περιπτώσεις αυτές η μείωση προσεγγίζει το 21%, επιβεβαιώνοντας ότι η προτεινόμενη λύση συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς της κατασκευαστικής λεπτομέρειας και στις δυσμενέστερες κλιματικές συνθήκες.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η μεταβολή του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ . Στην Κλιματική Ζώνη Α, η τιμή του Ψ μεταβάλλεται από 0,108 W/mK στη συνήθη κατασκευαστική λύση σε -0,336 W/mK στην προτεινόμενη διάταξη. Η αρνητική τιμή δείχνει ότι η συγκεκριμένη γραμμική θερμογέφυρα παύει πρακτικά να λειτουργεί επιβαρυντικά ως προς τις πρόσθετες θερμικές απώλειες υπό τη σύμβαση εξωτερικών διαστάσεων κατά ISO 10211. Αντίστοιχα, στην Κλιματική Ζώνη Δ, ο συντελεστής Ψ μειώνεται από 0,359 W/mK σε 0,028 W/mK, παρουσιάζοντας μείωση της τάξης του 92%. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει την ιδιαίτερα υψηλή αποτελεσματικότητα της βελτιωμένης λύσης ως προς τον περιορισμό της γραμμικής θερμογέφυρας.

Ως προς την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{si,min}$, η προτεινόμενη λύση οδηγεί επίσης σε αισθητή βελτίωση. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η $T_{si,min}$ αυξάνεται από 14,7°C σε 16,5°C για $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ και από 13,3°C σε 14,9°C για $T_{in} = 18^\circ\text{C}$. Αντίστοιχα, στην Κλιματική Ζώνη Δ, η ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία αυξάνεται από 12,7°C σε 14,9°C για $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ και από 11,2°C σε 13,3°C για $T_{in} = 18^\circ\text{C}$. Η αύξηση αυτή είναι ουσιαστική, καθώς μετατοπίζει τη θερμοκρασιακή στάθμη της εσωτερικής επιφάνειας σε ασφαλέστερα επίπεδα και περιορίζει την πιθανότητα εμφάνισης συμπυκνώσεων στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου.

Η βελτίωση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας αποτυπώνεται και στις τιμές του συντελεστή fR_{si} . Στα μοντέλα της συνήθους κατασκευαστικής λύσης, οι τιμές του fR_{si} κυμαίνονται από 0,71 έως 0,74. Οι τιμές αυτές βρίσκονται μεν πάνω από το όριο αναφοράς 0,70, ωστόσο στην Κλιματική Ζώνη Α η τιμή 0,71 είναι οριακή, γεγονός που δείχνει ότι η συνήθης λύση δεν διαθέτει ιδιαίτερα μεγάλο περιθώριο ασφαλείας έναντι ανάπτυξης μούχλας. Με την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης, ο συντελεστής fR_{si} αυξάνεται σε 0,81 για την Κλιματική Ζώνη Α και σε 0,82 για την Κλιματική Ζώνη Δ. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν σαφώς βελτιωμένη συμπεριφορά και μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας έναντι ανάπτυξης μούχλας στην εσωτερική επιφάνεια.

Η σύγκριση της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας με τα αντίστοιχα σημεία δρόσου επιτρέπει την πληρέστερη αξιολόγηση του κινδύνου επιφανειακών συμπυκνώσεων. Για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, τα σημεία δρόσου διαμορφώνονται σε 6,0°C για RH = 40%, 14,4°C για RH = 70% και 16,4°C για το ακραίο σενάριο με τιμή RH = 80%. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση εμφανίζει $T_{si,min} = 14,7^\circ\text{C}$, δηλαδή τιμή ελαφρώς υψηλότερη από το σημείο δρόσου για

$RH = 70\%$, αλλά χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για την ακραία περίπτωση με $RH = 80\%$. Επομένως, σε συνθήκες πάρα πολύ υψηλής εσωτερικής σχετικής υγρασίας υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης επιφανειακής συμπύκνωσης. Η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $16,5^{\circ}C$, τιμή που υπερβαίνει οριακά το σημείο δρόσου για $RH = 80\%$, περιορίζοντας ουσιαστικά τον σχετικό κίνδυνο ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις με πολύ πάρα πολύ υψηλή τιμή σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος.

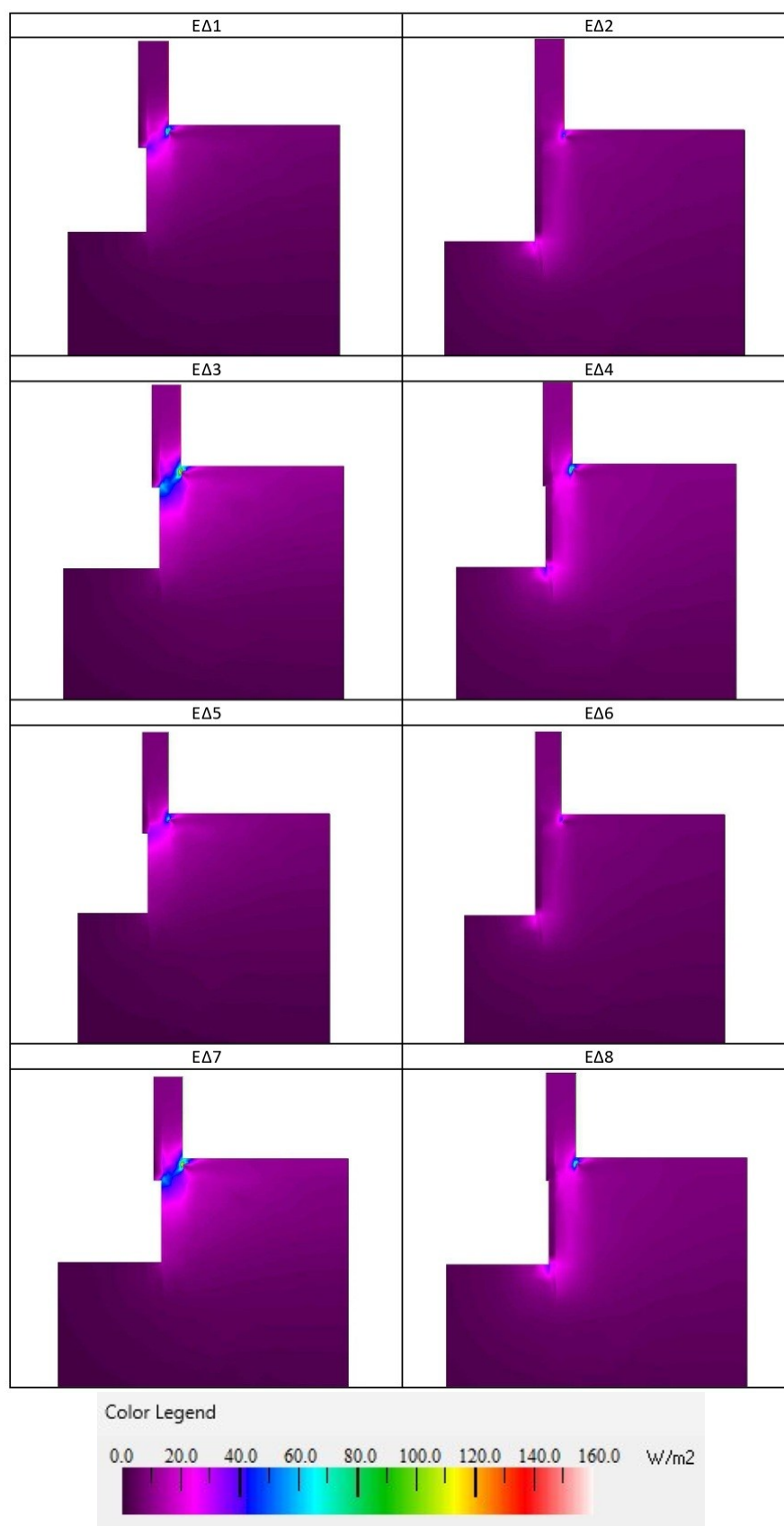
Στην Κλιματική Ζώνη Δ και για $T_{in} = 20^{\circ}C$, η συνήθης λύση παρουσιάζει $T_{si,min} = 12,7^{\circ}C$, τιμή χαμηλότερη τόσο από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$ όσο και από εκείνο για $RH = 80\%$. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει αυξημένη πιθανότητα επιφανειακών συμπυκνώσεων σε περιβάλλοντα με αρκετά αυξημένη εσωτερική υγρασία. Με την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης, η $T_{si,min}$ αυξάνεται σε $14,9^{\circ}C$, υπερβαίνοντας το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, χωρίς ωστόσο να υπερβαίνει το αντίστοιχο σημείο δρόσου για $RH = 80\%$. Συνεπώς, η βελτιωμένη διάταξη περιορίζει σημαντικά τον κίνδυνο, αλλά σε ακραίες συνθήκες πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας εξακολουθεί να απαιτείται προσοχή.

Αντίστοιχη εικόνα προκύπτει και για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος $18^{\circ}C$. Στην περίπτωση αυτή, τα σημεία δρόσου διαμορφώνονται σε $4,2^{\circ}C$ για $RH = 40\%$, $12,4^{\circ}C$ για $RH = 70\%$ και $14,5^{\circ}C$ για $RH = 80\%$. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση, με $T_{si,min} = 13,3^{\circ}C$, υπερβαίνει το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά υπολείπεται του σημείου δρόσου για $RH = 80\%$. Αντίθετα, η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $14,9^{\circ}C$, τιμή υψηλότερη από το σημείο δρόσου ακόμη και για $RH = 80\%$, εξασφαλίζοντας σαφώς ευνοϊκότερη συμπεριφορά. Στην Κλιματική Ζώνη Δ, η συνήθης λύση εμφανίζει $T_{si,min} = 11,2^{\circ}C$, δηλαδή τιμή χαμηλότερη από τα σημεία δρόσου για $RH = 70\%$ και $RH = 80\%$. Η προτεινόμενη λύση αυξάνει την ελάχιστη επιφανειακή θερμοκρασία σε $13,3^{\circ}C$, υπερβαίνοντας το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά παραμένοντας χαμηλότερα από το σημείο δρόσου για το ακραίο σενάριο με τιμή $RH = 80\%$.

Συνολικά, η περίπτωση μελέτης CS5 δείχνει ότι η θερμογέφυρα που αναπτύσσεται συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας με δάπεδο σε επαφή με το έδαφος παρουσιάζει σημαντική θερμική επιβάρυνση στη συνήθη κατασκευαστική της διαμόρφωση, ιδίως στην Κλιματική Ζώνη Δ. Η προτεινόμενη κατασκευαστική λύση βελτιώνει ουσιαστικά τη συμπεριφορά της λεπτομέρειας, μειώνοντας σημαντικά τη θερμική ροή και οδηγώντας σε δραστικό περιορισμό, της γραμμικής θερμογέφυρας με βάση την τιμή του συντελεστή Ψ. Παράλληλα, η αύξηση της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και του

συντελεστή f_{Rsi} ενισχύει την ασφάλεια της κατασκευής έναντι φαινομένων συμπύκνωσης και εμφάνισης μούχλας. Παρότι σε συνθήκες πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, κυρίως στην Κλιματική Ζώνη Δ, ο κίνδυνος επιφανειακών συμπυκνώσεων δεν εξαλείφεται πλήρως, η συνολική συμπεριφορά της προτεινόμενης λύσης είναι σαφώς βελτιωμένη και τεκμηριώνει την αποτελεσματικότητά της ως προς την αντιμετώπιση της συγκεκριμένης θερμογέφυρας.

Ακολουθώντας στην εικόνα 30 παρατίθεται η απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής των μοντέλων της περίπτωσης CS5 που αναλύθηκαν με χρήση του λογισμικού THERM.



Εικόνα 30 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS5

8.6 Περίπτωση μελέτης CS6 : Θερμογέφυρα εξωτερικής τοιχοποιίας – δαπέδου σε επαφή με έδαφος Νο2

Η περίπτωση μελέτης CS6 αφορά επίσης τη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας με δάπεδο σε επαφή με το έδαφος, εξετάζοντας όμως διαφορετική γεωμετρική και θερμομονωτική διαμόρφωση σε σχέση με την CS5, αφού στη συγκεκριμένη περίπτωση η στάθμη του εδάφους του περιβάλλοντος χώρου βρίσκεται στην ίδια στάθμη με το έδαφος κάτω από την πλάκα του δαπέδου. Αντίστοιχα και σε αυτή την περίπτωση συγκρίνονται η συνήθης κατασκευαστική λύση όσο και η προτεινόμενη κατασκευαστική διάταξη. Τα μοντέλα EM1, EM3, EM5 και EM7 αντιστοιχούν στη συνήθη κατασκευαστική πρακτική, ενώ τα μοντέλα EM2, EM4, EM6 και EM8 αποτυπώνουν την προτεινόμενη βελτιωμένη λύση. Στον πίνακα 9 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Model No	Zone	Case Study	Tout (°C)	Tin (°C)	Φ (W/m)	ψ - value	Tsi,min (°C)	fRsi	Tdp (°C)		
									RH = 40%	RH = 70%	RH = 80%
EM1	A	CS6.1	2	20	30.90	-0.205	15.8	0.77	6	14.4	16.4
EM2	A	CS6.2	2	20	25.85	-0.486	16.8	0.82	6	14.4	16.4
EM3	D	CS6.1	-8	20	38.14	0.124	14	0.79	6	14.4	16.4
EM4	D	CS6.2	-8	20	31.39	-0.117	15.6	0.84	6	14.4	16.4
EM5	A	CS6.1	2	18	27.47	-0.205	14.2	0.76	4.2	12.4	14.5
EM6	A	CS6.2	2	18	22.98	-0.486	15.2	0.83	4.2	12.4	14.5
EM7	D	CS6.1	-8	18	35.42	0.124	12.4	0.78	4.2	12.4	14.5
EM8	D	CS6.2	-8	18	29.14	-0.117	13.9	0.84	4.2	12.4	14.5

Πίνακας 9 : Αποτελέσματα υπολογισμών περίπτωσης μελέτης 6 (CS6)

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης οδηγεί σε μείωση της θερμικής ροής Φ σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για την Κλιματική Ζώνη Α, η θερμική ροή μειώνεται από 30,90 W/m σε 25,85 W/m για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 27,47 W/m σε 22,98 W/m. Η μείωση αυτή είναι της τάξης του 16%, γεγονός που δείχνει ότι η βελτιωμένη διάταξη περιορίζει τις θερμικές απώλειες στη ζώνη της συναρμογής, παρότι η συγκεκριμένη λεπτομέρεια δεν εμφανίζει ιδιαίτερα δυσμενή συμπεριφορά στην Κλιματική Ζώνη Α.

Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στην Κλιματική Ζώνη Δ. Για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C, η θερμική ροή μειώνεται από 38,14 W/m σε 31,39 W/m, ενώ για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C μειώνεται από 35,42 W/m σε 29,14 W/m. Στις περιπτώσεις αυτές η μείωση προσεγγίζει το 18%, επιβεβαιώνοντας ότι η

προτεινόμενη λύση συμβάλλει στη βελτίωση της θερμικής απόκρισης της κατασκευαστικής λεπτομέρειας και υπό δυσμενέστερες εξωτερικές συνθήκες.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ . Στην Κλιματική Ζώνη Α, ακόμη και η συνήθης κατασκευαστική λύση εμφανίζει αρνητική τιμή Ψ , ίση με $-0,205 \text{ W/mK}$, ενώ με την προτεινόμενη λύση η τιμή αυτή μεταβάλλεται σε $-0,486 \text{ W/mK}$. Η αρνητική τιμή δείχνει ότι η συγκεκριμένη γραμμική θερμογέφυρα παύει πρακτικά να λειτουργεί επιβαρυντικά ως προς τις πρόσθετες θερμικές απώλειες υπό τη σύμβαση εξωτερικών διαστάσεων κατά ISO 10211. Αντίθετα, στο πλαίσιο της υπολογιστικής αποτίμησης, η γεωμετρία και η θερμομονωτική διαμόρφωση της λεπτομέρειας εμφανίζονται ευνοϊκές σε σχέση με τη μονοδιάστατη θεώρηση των επιμέρους δομικών στοιχείων.

Στην Κλιματική Ζώνη Δ, η θερμογέφυρα που αναπτύσσεται στη συνήθη κατασκευαστική λειτουργεί επιβαρυντικά, καθώς ο συντελεστής Ψ λαμβάνει θετική τιμή ίση με $0,124 \text{ W/mK}$. Με την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης, η τιμή του Ψ μεταβάλλεται σε $-0,117 \text{ W/mK}$, γεγονός που υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη γραμμική θερμογέφυρα παύει πρακτικά να λειτουργεί επιβαρυντικά ως προς τις πρόσθετες θερμικές απώλειες υπό τη σύμβαση εξωτερικών διαστάσεων κατά ISO 10211. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς δείχνει ότι η βελτιωμένη διάταξη είναι αποτελεσματική κυρίως στη δυσμενέστερη περίπτωση της Κλιματικής Ζώνης Δ, όπου η συνήθης λύση εμφανίζει θετική τιμή θερμογέφυρας.

Ως προς την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{si,min}$, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές διατηρούνται γενικά σε ικανοποιητικό επίπεδο. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η $T_{si,min}$ αυξάνεται από $15,8^{\circ}\text{C}$ σε $16,8^{\circ}\text{C}$ για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ και από $14,2^{\circ}\text{C}$ σε $15,2^{\circ}\text{C}$ για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$. Αντίστοιχα, στην Κλιματική Ζώνη Δ, η ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία αυξάνεται από $14,0^{\circ}\text{C}$ σε $15,6^{\circ}\text{C}$ για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$ και από $12,4^{\circ}\text{C}$ σε $13,9^{\circ}\text{C}$ για $T_{in} = 18^{\circ}\text{C}$. Η προτεινόμενη λύση βελτιώνει επομένως τη θερμοκρασιακή στάθμη της εσωτερικής επιφάνειας, χωρίς όμως η συνήθης λύση να εμφανίζει εξαιρετικά δυσμενείς τιμές, όπως παρατηρήθηκε σε άλλες περιπτώσεις μελέτης.

Η σχετικά ευνοϊκή συμπεριφορά της συγκεκριμένης θερμογέφυρας επιβεβαιώνεται και από τις τιμές του συντελεστή fR_{si} . Στα μοντέλα της συνήθους κατασκευαστικής πρακτικής, οι τιμές κυμαίνονται από 0,76 έως 0,79, δηλαδή βρίσκονται πάνω από το όριο αναφοράς 0,70. Επομένως, δεν προκύπτει ένδειξη αυξημένου κινδύνου ανάπτυξης μούχλας.

Με την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης, ο συντελεστής fRsi αυξάνεται περαιτέρω, λαμβάνοντας τιμές από 0,82 έως 0,84, γεγονός που ενισχύει την ασφάλεια της εσωτερικής επιφάνειας έναντι ανάπτυξης μούχλας.

Η σύγκριση της $T_{si,min}$ με τα αντίστοιχα σημεία δρόσου επιτρέπει την πληρέστερη αξιολόγηση του κινδύνου επιφανειακών συμπυκνώσεων. Για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 20°C , τα σημεία δρόσου διαμορφώνονται σε $6,0^{\circ}\text{C}$ για $RH = 40\%$, $14,4^{\circ}\text{C}$ για $RH = 70\%$ και $16,4^{\circ}\text{C}$ για $RH = 80\%$. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση, με $T_{si,min} = 15,8^{\circ}\text{C}$, υπερβαίνει τα σημεία δρόσου για $RH = 40\%$ και $RH = 70\%$, αλλά υπολείπεται ελαφρώς του σημείου δρόσου για το ακραίο σενάριο με τιμή $RH = 80\%$. Η προτεινόμενη λύση, με $T_{si,min} = 16,8^{\circ}\text{C}$, υπερβαίνει ακόμη και το σημείο δρόσου για την ακραία περίπτωση με $RH = 80\%$, περιορίζοντας ουσιαστικά τον κίνδυνο επιφανειακής συμπύκνωσης.

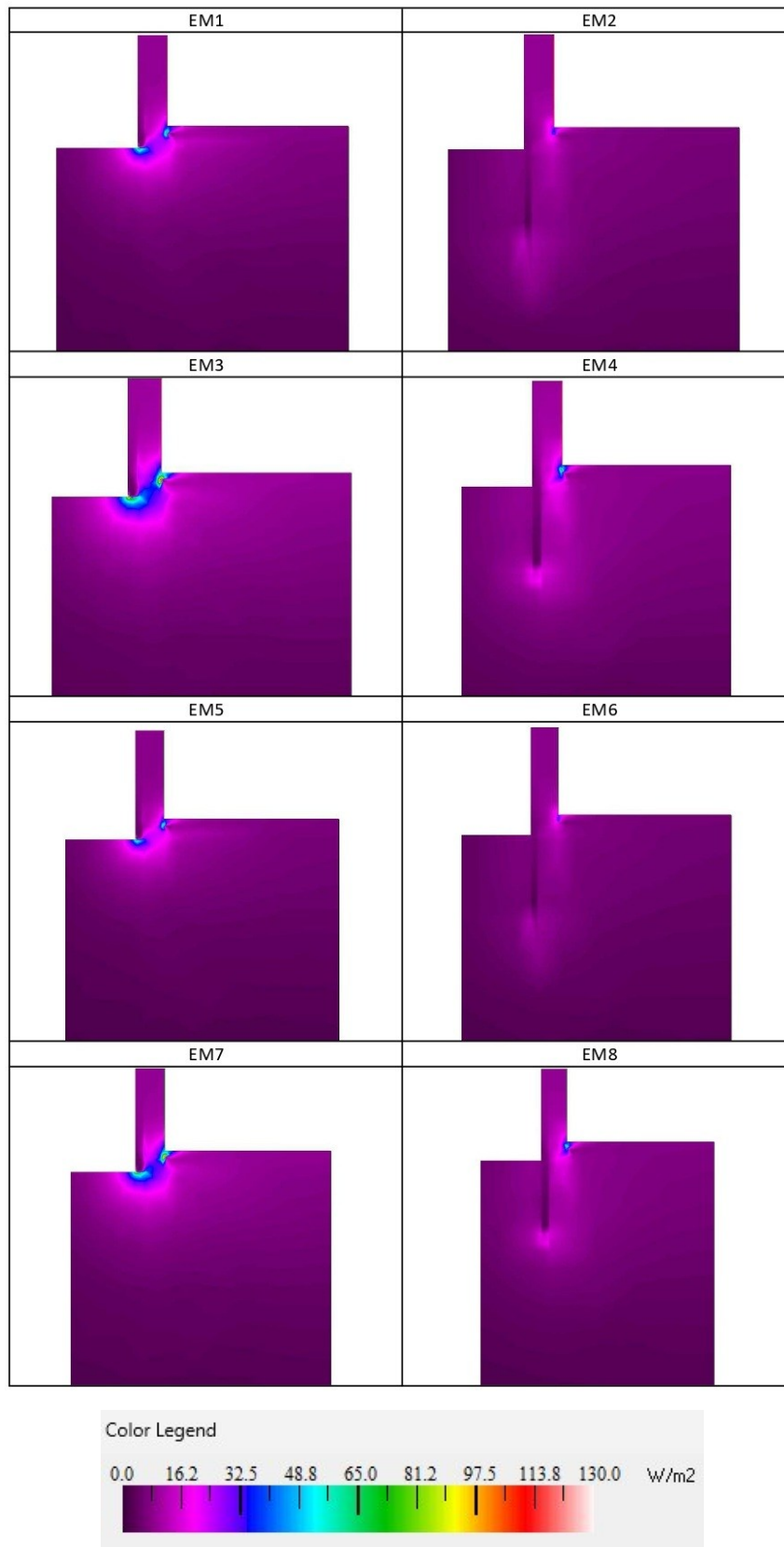
Στην Κλιματική Ζώνη Δ και για $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$, η συνήθης λύση εμφανίζει $T_{si,min} = 14,0^{\circ}\text{C}$, τιμή ελαφρώς χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$ και σαφώς χαμηλότερη από εκείνη για $RH = 80\%$. Ωστόσο, η απόκλιση από το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$ είναι μικρή και η περίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί οριακή. Με την προτεινόμενη λύση, η $T_{si,min}$ αυξάνεται σε $15,6^{\circ}\text{C}$, υπερβαίνοντας το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$, αλλά παραμένοντας χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για την ακραία περίπτωση με τιμή $RH = 80\%$. Συνεπώς, ο κίνδυνος συμπύκνωσης περιορίζεται σημαντικά και αφορά κυρίως συνθήκες πολύ υψηλής εσωτερικής σχετικής υγρασίας.

Αντίστοιχη εικόνα προκύπτει και για θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 18°C . Στην περίπτωση αυτή, τα σημεία δρόσου διαμορφώνονται σε $4,2^{\circ}\text{C}$ για $RH = 40\%$, $12,4^{\circ}\text{C}$ για $RH = 70\%$ και $14,5^{\circ}\text{C}$ για $RH = 80\%$. Στην Κλιματική Ζώνη Α, η συνήθης λύση, με $T_{si,min} = 14,2^{\circ}\text{C}$, βρίσκεται οριακά χαμηλότερα από το σημείο δρόσου για την ακραία περίπτωση με $RH = 80\%$, ενώ η προτεινόμενη λύση, με $T_{si,min} = 15,2^{\circ}\text{C}$, υπερβαίνει όλες τις εξεταζόμενες τιμές σημείου δρόσου. Στην Κλιματική Ζώνη Δ, η συνήθης λύση εμφανίζει $T_{si,min} = 12,4^{\circ}\text{C}$, τιμή ίση με το σημείο δρόσου για $RH = 70\%$ και χαμηλότερη από το σημείο δρόσου για $RH = 80\%$. Η προτεινόμενη λύση αυξάνει την $T_{si,min}$ σε $13,9^{\circ}\text{C}$, βελτιώνοντας την εικόνα έναντι του σεναρίου $RH = 70\%$, αλλά χωρίς να υπερβαίνει το σημείο δρόσου για $RH = 80\%$.

Συνολικά, η περίπτωση μελέτης CS6 παρουσιάζει σχετικά ευνοϊκή θερμική και συμπεριφορά. Η ουσιαστική επιβαρυντική δράση της θερμογέφυρας εντοπίζεται κυρίως

στη συνήθη κατασκευαστική λύση της Κλιματικής Ζώνης Δ, όπου ο συντελεστής Ψ λαμβάνει θετική τιμή. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, οι αρνητικές τιμές του Ψ δείχνουν ότι η συναρμογή δεν αυξάνει τις πρόσθετες θερμικές απώλειες, αλλά λειτουργεί ευνοϊκά στο πλαίσιο του συγκεκριμένου υπολογιστικού σχήματος. Παράλληλα, οι εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες και οι τιμές του fR_{si} βρίσκονται σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα, χωρίς να προκύπτει εμφανής κίνδυνος ανάπτυξης μούχλας. Ως προς τις επιφανειακές συμπυκνώσεις, ο κίνδυνος δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα έντονος υπό κανονικές συνθήκες εσωτερικής υγρασίας και περιορίζεται κυρίως στα δυσμενέστερα σενάρια πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, ιδίως στην Κλιματική Ζώνη Δ. Η προτεινόμενη κατασκευαστική λύση ενισχύει περαιτέρω τη συνολική συμπεριφορά της λεπτομέρειας, μειώνοντας τη θερμική ροή, βελτιώνοντας τις επιφανειακές θερμοκρασίες και εξαλείφοντας την πρόσθετη επιβάρυνση της θερμογέφυρας στην κρίσιμη περίπτωση της Κλιματικής Ζώνης Δ.

Στην εικόνα 31, που ακολουθεί, παρατίθεται η απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής των μοντέλων της περίπτωσης CS6 που αναλύθηκαν με χρήση του λογισμικού THERM.



Εικόνα 31 : Απεικόνιση της κατανομής της θερμικής ροής στα μοντέλα της περίπτωσης μελέτης CS6

9. Συμπεράσματα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η κατασκευαστική διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης στη θερμική συμπεριφορά χαρακτηριστικών συναρμογών του κτιριακού κελύφους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις γραμμικές θερμογέφυρες που εμφανίζονται σε συνήθεις κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ελληνικού κτιριακού αποθέματος, όπως η συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας με εξώστη, δώμα, pilotis και πλάκα επί εδάφους.

Σκοπός της εργασίας δεν αποτελούσε η πλήρης δυναμική υδροθερμική ανάλυση των δομικών στοιχείων. Η αξιολόγηση περιορίζεται στην επιφανειακή θερμοκρασιακή συμπεριφορά των εξεταζόμενων λεπτομερειών και στην προκαταρκτική εκτίμηση του κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης ή ανάπτυξης μούχλας, με βάση την $T_{si,min}$, τον δείκτη fR_{si} και τη σύγκριση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας με το σημείο δρόσου για συγκεκριμένες συνθήκες εσωτερικής σχετικής υγρασίας.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού THERM, μέσω του οποίου προσομοιώθηκε η στατική δισδιάστατη θερμική ροή σε έξι χαρακτηριστικές περιπτώσεις μελέτης. Για κάθε περίπτωση εξετάστηκε μία συνήθης κατασκευαστική διαμόρφωση και μία βελτιωμένη θερμομονωτική λύση, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασής τους στη θερμική ροή Φ , στον συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ , στην ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία $T_{si,min}$ και στον δείκτη fR_{si} . Τα βασικά αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 10 που ακολουθεί, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση μεταξύ των συμβατικών και των βελτιωμένων κατασκευαστικών διαμορφώσεων ως προς τα παραπάνω μεγέθη. Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του Πίνακα 10, πρέπει να επισημανθεί ότι ποσοστά μείωσης του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ μεγαλύτερα από 100% ή μεταβολές του προσήμου του δεν συνεπάγονται εξάλειψη της θερμογέφυρας. Αντίθετα, δείχνουν ότι, υπό τη σύμβαση εξωτερικών διαστάσεων κατά ISO 10211, η συγκεκριμένη γραμμική θερμογέφυρα παύει πρακτικά να λειτουργεί επιβαρυντικά ως προς τις πρόσθετες θερμικές απώλειες.

Case Study	Model No	Zone	T _{in} (°C)	Φ (W/m)	Μεταβολή (%)	ψ - value (W/mK)	Μεταβολή (%)	T _{si,min} (°C)	R _{si}	Σημείο Δρόσου T _{dr} (°C)		
										RH = 40%	RH = 70%	RH = 80%
CASE STUDY 1	M1	A	20	31.16	-21.31%	0.628	-58.70%	13.4	0.63	6	14.4	16.4
	M2	A	20	24.52		0.259		15.8	0.77	6	14.4	16.4
	M3	D	20	40.95	-25.04%	0.692	-52.93%	10.6	0.66	6	14.4	16.4
	M4	D	20	30.69		0.326		14.1	0.79	6	14.4	16.4
	M5	A	18	27.70	-21.31%	0.628	-58.70%	12.2	0.64	4.2	12.4	14.5
	M6	A	18	21.80		0.259		14.2	0.76	4.2	12.4	14.5
	M7	D	18	38.02	-25.04%	0.692	-52.93%	9.3	0.67	4.2	12.4	14.5
	M8	D	18	28.50		0.326		12.6	0.79	4.2	12.4	14.5
CASE STUDY 2	ΔΣ1	A	20	25.84	-7.06%	0.081	-124.48%	17	0.83	6	14.4	16.4
	ΔΣ2	A	20	24.02		-0.020		17.4	0.86	6	14.4	16.4
	ΔΣ3	D	20	32.47	-13.18%	0.189	-80.72%	15.7	0.85	6	14.4	16.4
	ΔΣ4	D	20	28.19		0.036		16.7	0.88	6	14.4	16.4
	ΔΣ5	A	18	22.97	-7.06%	0.081	-124.48%	15.3	0.83	4.2	12.4	14.5
	ΔΣ6	A	18	21.35		-0.020		15.7	0.86	4.2	12.4	14.5
	ΔΣ7	D	18	30.15	-13.18%	0.189	-80.72%	14	0.85	4.2	12.4	14.5
	ΔΣ8	D	18	26.18		0.036		14.9	0.88	4.2	12.4	14.5
CASE STUDY 3	ΔΕ1	A	20	30.87	-16.01%	0.360	-76.22%	16	0.78	6	14.4	16.4
	ΔΕ2	A	20	25.92		0.086		17.1	0.84	6	14.4	16.4
	ΔΕ3	D	20	39.46	-19.71%	0.439	-63.31%	14.5	0.80	6	14.4	16.4
	ΔΕ4	D	20	31.68		0.161		16.2	0.86	6	14.4	16.4
	ΔΕ5	A	18	27.44	-16.01%	0.360	-76.22%	14.4	0.78	4.2	12.4	14.5
	ΔΕ6	A	18	23.04		0.086		15.4	0.84	4.2	12.4	14.5
	ΔΕ7	D	18	36.65	-19.71%	0.439	-63.31%	12.9	0.80	4.2	12.4	14.5
	ΔΕ8	D	18	29.42		0.161		14.5	0.87	4.2	12.4	14.5
CASE STUDY 4	Π1	A	20	33.80	-23.09%	0.613	-70.72%	13.6	0.64	6	14.4	16.4
	Π2	A	20	26.00		0.180		15.8	0.77	6	14.4	16.4
	Π3	D	20	46.68	-27.40%	0.754	-60.55%	10.4	0.66	6	14.4	16.4
	Π4	D	20	33.89		0.298		13.9	0.78	6	14.4	16.4
	Π5	A	18	30.05	-23.09%	0.613	-70.72%	12.3	0.64	4.2	12.4	14.5
	Π6	A	18	23.11		0.180		14.3	0.77	4.2	12.4	14.5
	Π7	D	18	43.35	-27.40%	0.754	-60.55%	9.1	0.66	4.2	12.4	14.5
	Π8	D	18	31.47		0.298		12.4	0.78	4.2	12.4	14.5
CASE STUDY 5	ΕΔ1	A	20	36.54	-21.88%	0.108	-411.14%	14.7	0.71	6	14.4	16.4
	ΕΔ2	A	20	28.55		-0.336		16.5	0.81	6	14.4	16.4
	ΕΔ3	D	20	44.71	-20.73%	0.359	-92.27%	12.7	0.74	6	14.4	16.4
	ΕΔ4	D	20	35.44		0.028		14.9	0.82	6	14.4	16.4
	ΕΔ5	A	18	32.48	-21.88%	0.108	-411.14%	13.3	0.71	4.2	12.4	14.5
	ΕΔ6	A	18	25.38		-0.336		14.9	0.81	4.2	12.4	14.5
	ΕΔ7	D	18	41.51	-20.73%	0.359	-92.27%	11.2	0.74	4.2	12.4	14.5
	ΕΔ8	D	18	32.91		0.028		13.3	0.82	4.2	12.4	14.5
CASE STUDY 6	ΕΜ1	A	20	30.90	-16.34%	-0.205	136.66%	15.8	0.77	6	14.4	16.4
	ΕΜ2	A	20	25.85		-0.486		16.8	0.82	6	14.4	16.4
	ΕΜ3	D	20	38.14	-17.71%	0.124	-194.08%	14	0.79	6	14.4	16.4
	ΕΜ4	D	20	31.39		-0.117		15.6	0.84	6	14.4	16.4
	ΕΜ5	A	18	27.47	-16.34%	-0.205	136.66%	14.2	0.76	4.2	12.4	14.5
	ΕΜ6	A	18	22.98		-0.486		15.2	0.83	4.2	12.4	14.5
	ΕΜ7	D	18	35.42	-17.71%	0.124	-194.08%	12.4	0.78	4.2	12.4	14.5
	ΕΜ8	D	18	29.14		-0.117		13.9	0.84	4.2	12.4	14.5

Πίνακας 10 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι θερμογέφυρες αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την θερμική απόδοση του κελύφους. Ακόμη και όταν τα επιμέρους δομικά στοιχεία διαθέτουν επαρκή θερμομονωτική προστασία, η ασυνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης στα σημεία συναρμογής μπορεί να οδηγήσει σε τοπική αύξηση της θερμικής ροής και σε δυσμενέστερη κατανομή των εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους δεν πρέπει να αξιολογείται αποκλειστικά με βάση τους συντελεστές θερμοπερατότητας U των επιμέρους δομικών στοιχείων, αλλά και με βάση τη συνέχεια της θερμομόνωσης στις κρίσιμες κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

Η συγκριτική ανάλυση των συμβατικών και των βελτιωμένων λύσεων έδειξε ότι η ορθή διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης μπορεί να περιορίσει σημαντικά την ένταση των θερμογεφυρών. Η επίδραση αυτή αποτυπώθηκε τόσο στη μείωση της θερμικής ροής Φ όσο και στη μείωση του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ . Η βελτίωση ήταν εντονότερη στις περιπτώσεις όπου η συνήθης κατασκευαστική πρακτική παρουσιάζει σαφή ασυνέχεια της θερμομόνωσης, όπως στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας με εξώστη και στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας με δάπεδο προς pilotis. Αντίθετα, σε λεπτομέρειες όπου η γεωμετρία ή η θερμομονωτική διάταξη λειτουργεί ήδη ευνοϊκότερα, η επίδραση της βελτιωμένης λύσης ήταν ηπιότερη, χωρίς όμως να παύει να είναι τεχνικά σημαντική.

Η Κλιματική Ζώνη Δ αναδείχθηκε ως δυσμενέστερη ως προς τη θερμική καταπόνηση των εξεταζόμενων λεπτομερειών. Η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος οδηγεί σε αυξημένες τιμές θερμικής ροής και σε χαμηλότερες εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες σε σχέση με την Κλιματική Ζώνη Α. Η παρατήρηση αυτή δείχνει ότι η ίδια κατασκευαστική λεπτομέρεια μπορεί να αποκτά διαφορετική σημασία ανάλογα με την κλιματική ζώνη στην οποία βρίσκεται το κτίριο. Συνεπώς, στις ψυχρότερες περιοχές της χώρας η προσεκτική αντιμετώπιση των θερμογεφυρών είναι ακόμη πιο κρίσιμη.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η διάκριση μεταξύ θερμικής ροής Φ και συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ . Η θερμική ροή επηρεάζεται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Αντίθετα, ο συντελεστής Ψ αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της γραμμικής θερμογέφυρας και εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας και από τη θερμομονωτική συμπεριφορά των επιμέρους δομικών στοιχείων. Επομένως, όταν μεταβάλλονται μόνο οι θερμοκρασιακές συνθήκες και όχι η κατασκευαστική διάταξη ή τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών, η τιμή του Ψ παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη.

Ως προς την επιφανειακή θερμοκρασιακή συμπεριφορά, οι βελτιωμένες λύσεις οδήγησαν γενικά σε αύξηση της $T_{si,min}$ και σε βελτίωση του δείκτη fR_{si} . Η βελτίωση αυτή είναι σημαντική, καθώς οι χαμηλές εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες αποτελούν βασική ένδειξη αυξημένης πιθανότητας επιφανειακής συμπύκνωσης, ιδίως όταν συνδυάζονται με υψηλές τιμές εσωτερικής σχετικής υγρασίας. Σε συνθήκες $RH = 40\%$, οι

εξεταζόμενες λεπτομέρειες δεν παρουσίασαν ουσιαστική ένδειξη επιφανειακού κινδύνου. Αντίθετα, για υψηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος, κυρίως $RH = 70\%$ αλλά και στο ακραίο σενάριο με τιμή σχετικής υγρασίας $RH = 80\%$, ορισμένες συμβατικές λύσεις εμφάνισαν οριακή ή δυσμενή συμπεριφορά.

Το εύρημα αυτό αναδεικνύει ότι η θερμομονωτική βελτίωση των κρίσιμων συναρμογών πρέπει να συνδυάζεται με κατάλληλο έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας του εσωτερικού χώρου. Η διατήρηση χαμηλών επιπέδων σχετικής υγρασίας, μέσω επαρκούς και ελεγχόμενου αερισμού, συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση της πιθανότητας επιφανειακών συμπυκνώσεων στις ψυχρότερες περιοχές του κελύφους. Επομένως, η αντιμετώπιση των θερμογεφυρών δεν αποτελεί μόνο ζήτημα θερμικών απωλειών, αλλά συνδέεται και με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, την άνεση των χρηστών και την πρόληψη υγρασιακών παθολογιών.

Η συνοπτική αξιολόγηση των έξι περιπτώσεων μελέτης επιβεβαιώνει ότι οι λεπτομέρειες του εξώστη και της pilotis αποτελούν από τις πλέον ευαίσθητες περιπτώσεις. Στις συμβατικές τους διαμορφώσεις παρουσίασαν αυξημένες τιμές Ψ , χαμηλότερες τιμές $T_{si,min}$ και δυσμενέστερες τιμές fR_{si} , γεγονός που τις καθιστά κρίσιμες ως προς την πιθανότητα εμφάνισης επιφανειακών προβλημάτων σε συνθήκες αυξημένης εσωτερικής υγρασίας. Οι βελτιωμένες λύσεις, με επέκταση της θερμομονωτικής στρώσης στις παρειές των εξωστών, στις δοκούς και στα εκτεθειμένα στοιχεία της pilotis, περιόρισαν σημαντικά την ένταση των θερμογεφυρών και βελτίωσαν την επιφανειακή θερμοκρασιακή συμπεριφορά.

Στις συναρμογές εξωτερικής τοιχοποιίας με δώμα, τόσο στην περίπτωση ύπαρξης στηθαίου όσο και στην περίπτωση δώματος με προεξοχή, η συμπεριφορά ήταν συνολικά ευνοϊκότερη σε σχέση με τον εξώστη και την pilotis. Ωστόσο, η συνέχιση της θερμομονωτικής στρώσης στην περιοχή του στηθαίου ή της προεξοχής είχε σαφή θετική επίδραση στη μείωση του Ψ και στη βελτίωση της $T_{si,min}$. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ακόμη και σε λιγότερο δυσμενείς λεπτομέρειες, η ορθή θερμομονωτική διαμόρφωση αυξάνει το περιθώριο ασφάλειας έναντι επιφανειακών συμπυκνώσεων.

Στις συναρμογές εξωτερικής τοιχοποιίας με πλάκα επί εδάφους, η συμπεριφορά διαφοροποιήθηκε ανάλογα με τη γεωμετρία της λεπτομέρειας και τη θέση της στάθμης του περιβάλλοντος εδάφους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως στην Κλιματική Ζώνη Δ, η

συμβατική λύση εμφάνισε αξιόλογη θερμική επιβάρυνση. Η συνέχιση της θερμομονωτικής στρώσης προς την περιοχή των τοιχίων θεμελίωσης και της επαφής με το έδαφος περιόρισε την επιβαρυντική δράση της θερμογέφυρας και βελτίωσε τις εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες. Σε άλλες διαμορφώσεις, οι τιμές του Ψ ήταν χαμηλές ή ακόμη και αρνητικές, γεγονός που δείχνει ότι η αξιολόγηση των θερμογεφυρών πρέπει να γίνεται κατά περίπτωση και όχι με γενικευμένες παραδοχές.

Απαντώντας στα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας, μπορούν να διατυπωθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Με ποιον τρόπο και σε ποιο βαθμό η κατασκευαστική διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης επηρεάζει τις θερμικές ροές και τον συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ στα κρίσιμα σημεία του κτιριακού κελύφους;

Η κατασκευαστική διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης επηρεάζει καθοριστικά τόσο τη θερμική ροή όσο και την τιμή του συντελεστή Ψ . Όταν η θερμομόνωση διακόπτεται στα σημεία συναρμογής ή δεν ακολουθεί τη γεωμετρία των δομικών στοιχείων, η θερμική ροή συγκεντρώνεται τοπικά και η γραμμική θερμογέφυρα εντείνεται. Αντίθετα, όταν η θερμομονωτική στρώση συνεχίζεται και καλύπτει επαρκώς τα κρίσιμα σημεία, η θερμική ροή κατανέμεται ομαλότερα και η τιμή του Ψ μειώνεται.

Ο βαθμός της επίδρασης εξαρτάται από τη γεωμετρία της λεπτομέρειας, τη θέση της θερμομονωτικής στρώσης και το μέγεθος της αρχικής ασυνέχειας. Οι μεγαλύτερες βελτιώσεις παρατηρήθηκαν σε λεπτομέρειες με έντονη γεωμετρική και κατασκευαστική ασυνέχεια, όπως ο εξώστης και η *pilotis*. Σε πιο ευνοϊκές διαμορφώσεις, η μείωση του Ψ ήταν ηπιότερη, αλλά εξακολουθεί να επιβεβαιώνει τη σημασία της ορθής κατασκευαστικής διαμόρφωσης.

2. Πώς επηρεάζει η διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης την ελάχιστη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία, τον δείκτη fR_{si} και τον κίνδυνο επιφανειακής συμπύκνωσης ή ανάπτυξης μούχλας;

Η συνέχεια και η σωστή τοποθέτηση της θερμομονωτικής στρώσης οδηγούν σε αύξηση της ελάχιστης εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας $T_{si,min}$ και σε βελτίωση του δείκτη fR_{si} . Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η πιθανότητα οι εσωτερικές επιφάνειες να προσεγγίσουν το σημείο δρόσου, ιδίως στις ψυχρότερες περιοχές των θερμογεφυρών.

Ωστόσο, η βελτίωση της θερμομονωτικής διάταξης δεν μπορεί να αξιολογείται ανεξάρτητα από τις συνθήκες του εσωτερικού περιβάλλοντος. Σε χαμηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας, ο κίνδυνος επιφανειακής συμπύκνωσης εμφανίζεται περιορισμένος. Αντίθετα, σε υψηλές τιμές RH, ορισμένες λεπτομέρειες μπορεί να παραμένουν οριακές, ακόμη και μετά τη θερμομονωτική βελτίωση. Επομένως, η μείωση του επιφανειακού κινδύνου απαιτεί συνδυασμό κατάλληλης θερμομονωτικής διαμόρφωσης και ελέγχου της εσωτερικής υγρασίας.

3. Ποιες κατασκευαστικές λύσεις διαμόρφωσης της θερμομονωτικής στρώσης μπορούν να περιορίσουν αποτελεσματικά τις θερμογέφυρες στις συναρμογές εξωτερικής τοιχοποιίας–εξώστη, εξωτερικής τοιχοποιίας–δώματος, εξωτερικής τοιχοποιίας–pilotis και εξωτερικής τοιχοποιίας–πλάκας επί εδάφους;

Οι κατασκευαστικές λύσεις που αποδείχθηκαν αποτελεσματικές βασίζονται στην αρχή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης. Στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας–εξώστη, η θερμομόνωση πρέπει να επεκτείνεται στις άνω και κάτω παρειές του εξώστη, ώστε να περιορίζεται η θερμική διαφυγή μέσω της συνέχειας της πλάκας. Στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας–δώματος, κρίσιμη είναι η σύνδεση της θερμομόνωσης του δώματος με τη θερμομόνωση της τοιχοποιίας, καθώς και η κατάλληλη θερμομονωτική κάλυψη του στηθαίου ή της προεξοχής.

Στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας–pilotis, η θερμομονωτική προστασία δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στην οροφή της pilotis, αλλά να επεκτείνεται και στα δομικά στοιχεία που διακόπτουν τη συνέχεια της θερμομόνωσης, όπως οι παρειές δοκών και τα τμήματα εξώστη. Στη συναρμογή εξωτερικής τοιχοποιίας–πλάκας επί εδάφους, σημαντική είναι η συνέχιση της θερμομονωτικής στρώσης προς την περιοχή των τοιχίων θεμελίωσης και της επαφής με το έδαφος, ανάλογα με τη στάθμη του περιβάλλοντος χώρου.

Οι λύσεις αυτές δεν οδηγούν απαραίτητα σε πλήρη εξάλειψη της θερμογέφυρας, αλλά μπορούν να περιορίσουν σημαντικά την επιβαρυντική της επίδραση και να βελτιώσουν την επιφανειακή θερμοκρασιακή συμπεριφορά της λεπτομέρειας.

4. Σε ποιο βαθμό η στατική δισδιάστατη θερμική ανάλυση με THERM μπορεί να υποστηρίξει προκαταρκτική εκτίμηση κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης και μούχλας σε θέσεις θερμογεφυρών;

Η στατική δισδιάστατη θερμική ανάλυση με THERM μπορεί να υποστηρίξει προκαταρκτικά την αξιολόγηση του κινδύνου επιφανειακής συμπύκνωσης και ανάπτυξης μούχλας, κυρίως μέσω της ανάλυσης της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας και του συντελεστή fR_{si} . Μέσω του υπολογισμού της θερμικής ροής, του συντελεστή Ψ , της $T_{si,min}$ και του δείκτη fR_{si} , είναι δυνατός ο εντοπισμός των θερμικά ασθενέστερων περιοχών της κατασκευής και η σύγκριση διαφορετικών κατασκευαστικών λύσεων.

Παράλληλα, η σύγκριση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας με το σημείο δρόσου για διαφορετικές τιμές σχετικής υγρασίας επιτρέπει μια πρώτη εκτίμηση της πιθανότητας επιφανειακής συμπύκνωσης. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή έχει σαφή όρια. Το THERM δεν προσομοιώνει τη χρονική μεταβολή της υγρασίας στο εσωτερικό των δομικών στρώσεων, τη διάχυση υδρατμών, την τριχοειδή μεταφορά, τη συσσώρευση υγρασίας ή τη δυνατότητα ξήρανσης της κατασκευής. Για τέτοιου είδους διερεύνηση απαιτείται η χρήση πιο εξειδικευμένων λογισμικών δυναμικής υδροθερμικής προσομοίωσης, όπως το WUFI.

Συνεπώς, το THERM μπορεί να προσεγγίσει με επάρκεια το πρόβλημα των επιφανειακών υδροθερμικών παθολογιών που συνδέονται με τις θερμογέφυρες, ιδίως όταν η αξιολόγηση βασίζεται στην $T_{in,min}$, στον fR_{si} και στη σύγκριση με τα σημεία δρόσου. Δεν μπορεί όμως να αντικαταστήσει πλήρως μια δυναμική ενδοστρωματική υδροθερμική ανάλυση. Για τον λόγο αυτό, η χρήση του μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα κατάλληλη για αρχική αξιολόγηση και συγκριτική διερεύνηση κατασκευαστικών λύσεων, ενώ η χρήση δυναμικών εργαλείων, όπως το WUFI, μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια ή διερεύνηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς της κατασκευής.

Σε γενικό επίπεδο, η εργασία επιβεβαιώνει ότι η ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους δεν πρέπει να περιορίζεται στην αύξηση του πάχους της θερμομόνωσης ή στη συμμόρφωση των επιμέρους δομικών στοιχείων με τις ελάχιστες απαιτήσεις του κανονισμού. Απαιτείται παράλληλα προσεκτικός σχεδιασμός των κατασκευαστικών λεπτομερειών, ώστε η θερμομονωτική στρώση να διαμορφώνεται με συνέχεια στα σημεία συναρμογής και να περιορίζονται οι τοπικές θερμικές ασυνέχειες.

Τα αποτελέσματα έχουν ιδιαίτερη πρακτική σημασία για το ελληνικό κτιριακό απόθεμα, όπου συναντώνται συχνά λεπτομέρειες με έντονες θερμογέφυρες, όπως εξώστες, pilotis, στηθαία, προεξοχές δωματίων και περιοχές επαφής της τοιχοποιίας με το έδαφος. Σε

παρεμβάσεις εξωτερικής θερμομόνωσης, η μη αντιμετώπιση αυτών των σημείων μπορεί να περιορίσει τα αναμενόμενα οφέλη της ενεργειακής αναβάθμισης και να διατηρήσει τοπικές περιοχές με χαμηλότερες εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες.

Συμπερασματικά, η ορθή διαμόρφωση της θερμομονωτικής στρώσης στις κρίσιμες συναρμογές του κελύφους αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον ουσιαστικό περιορισμό των θερμογεφυρών. Οι βελτιωμένες λύσεις που εξετάστηκαν στην εργασία έδειξαν ότι η συνέχεια της θερμομόνωσης μπορεί να μειώσει τις θερμικές απώλειες, να βελτιώσει την $T_{si,min}$ και τον fR_{si} και να περιορίσει την πιθανότητα επιφανειακής συμπύκνωσης ή ανάπτυξης μούχλας. Παράλληλα, αναδείχθηκε ότι η θερμομονωτική παρέμβαση πρέπει να συνδυάζεται με τον έλεγχο της εσωτερικής σχετικής υγρασίας και την εξασφάλιση επαρκούς αερισμού, ώστε να επιτυγχάνεται πιο ολοκληρωμένη προστασία του κελύφους και καλύτερες συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος.

9.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με συγκεκριμένες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, σε δύο κλιματικές ζώνες, και συγκεκριμένα στην Κλιματική Ζώνη Α και στην Κλιματική Ζώνη Δ, καθώς και σε συγκεκριμένα σενάρια εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Τα αποτελέσματα προσφέρουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη θερμική συμπεριφορά χαρακτηριστικών γραμμικών θερμογεφυρών και για την προκαταρκτική εκτίμηση του επιφανειακού κινδύνου συμπύκνωσης ή ανάπτυξης μούχλας. Ωστόσο, μπορούν να αποτελέσουν αφετηρία για περαιτέρω διερεύνηση.

Μία πρώτη κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας αφορά τη διερεύνηση περισσότερων τύπων θερμομονωτικών υλικών και διαφορετικών παχών θερμομόνωσης. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν συγκεκριμένες λύσεις βελτίωσης, ωστόσο η μεταβολή του πάχους, της θερμικής αγωγιμότητας και της θέσης της θερμομονωτικής στρώσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο αναλυτικά συμπεράσματα ως προς τη βέλτιστη τεχνική λύση για κάθε τύπο θερμογέφυρας. Μια τέτοια διερεύνηση θα επέτρεπε τη συστηματικότερη αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ θερμομονωτικής απόδοσης, κατασκευαστικής εφαρμοσιμότητας και περιορισμού των πρόσθετων θερμικών απωλειών.

Επιπλέον, οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν με βάση συνήθη υλικά και τυπικές κατασκευαστικές διατάξεις που απαντώνται στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα, όπως οπλισμένο σκυρόδεμα για τις πλάκες, τις δοκούς και τα λοιπά

φέροντα στοιχεία, καθώς και επιχρισμένη οπτοπλινθοδομή για την εξωτερική τοιχοποιία. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για κατασκευές που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο μέρος των υφιστάμενων κτιρίων. Ωστόσο, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η πραγματοποίηση αντίστοιχων αναλύσεων και για άλλα δομικά συστήματα, όπως κτίρια με μεταλλικό φέροντα οργανισμό και στοιχεία ξηράς δόμησης, συστήματα ελαφριάς δόμησης ή προκατασκευασμένες κατασκευές. Η σύγκριση διαφορετικών δομικών συστημάτων θα μπορούσε να αναδείξει τον βαθμό στον οποίο η γεωμετρία, η θερμοχωρητικότητα, η διαστρωμάτωση και οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών επηρεάζουν την ανάπτυξη θερμογεφυρών, τη θερμική ροή και τις εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες.

Μία ακόμη κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας αφορά την επέκταση της παρούσας δισδιάστατης ανάλυσης σε τρισδιάστατα υπολογιστικά μοντέλα, ιδιαίτερα για κατασκευαστικές λεπτομέρειες με σύνθετη γεωμετρία. Στην παρούσα εργασία οι θερμογέφυρες εξετάστηκαν ως γραμμικές, μέσω στατικής δισδιάστατης θερμικής ανάλυσης, προσέγγιση η οποία είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της συμπεριφοράς τυπικών γραμμικών συναρμογών. Ωστόσο, σε περιοχές όπως οι εξώστες, οι προεξοχές και οι συναρμογές δαπέδου προς *pilotis*, η πραγματική θερμική ροή μπορεί να επηρεάζεται και από τοπικές τρισδιάστατες ή γωνιακές επιδράσεις, οι οποίες δεν αποτυπώνονται πλήρως σε ένα 2D μοντέλο. Όπως επισημαίνεται και από τους Theodosiou et al. (2021), η θερμική συμπεριφορά των θερμογεφυρών είναι σύνθετη, ενώ η διάκριση μεταξύ γραμμικών/δισδιάστατων και σημειακών/τρειςδιάστατων θερμογεφυρών είναι κρίσιμη για την ακριβέστερη αποτίμηση των θερμικών ροών. Συνεπώς, η μελλοντική ανάπτυξη τρισδιάστατων μοντέλων για τις πλέον σύνθετες λεπτομέρειες, όπως ο εξώστης και η *pilotis*, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πληρέστερη αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς και του επιφανειακού κινδύνου συμπίκνωσης ή ανάπτυξης μούχλας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η χρήση λογισμικών δυναμικής υδροθερμικής ανάλυσης, όπως το WUFI, για την περαιτέρω διερεύνηση των κατασκευαστικών λεπτομερειών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Η ανάλυση με το THERM παρέχει μια σαφή εικόνα της στατικής δισδιάστατης θερμικής ροής και των εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών, ωστόσο δεν εξετάζει με δυναμικό τρόπο τη μεταφορά και συσσώρευση υγρασίας στο εσωτερικό των επιμέρους στρώσεων. Η αξιοποίηση λογισμικών δυναμικής προσομοίωσης θα επέτρεπε την ενδοστροφική υδροθερμική αξιολόγηση των δομικών στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη μεταβαλλόμενες

εξωτερικές και εσωτερικές συνθήκες σε βάθος χρόνου. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί ακριβέστερη αποτίμηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των προτεινόμενων λύσεων ενεργειακής αναβάθμισης.

Τέλος, χρήσιμη θα ήταν η οικονομική αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων. Η διερεύνηση του κόστους εφαρμογής σε σχέση με τη μείωση των θερμικών απωλειών και τη βελτίωση της επιφανειακής θερμοκρασιακής συμπεριφοράς θα μπορούσε να συμβάλει στον προσδιορισμό των πιο αποδοτικών παρεμβάσεων. Μια τέτοια προσέγγιση θα ήταν χρήσιμη τόσο για τον μελετητή όσο και για τον ιδιοκτήτη του κτιρίου, καθώς θα συνέδεε την τεχνική αποτελεσματικότητα με την οικονομική βιωσιμότητα της ενεργειακής αναβάθμισης.

10. Βιβλιογραφία

- Alhawari, A., & Mukhopadhyaya, P. (2018). Thermal bridges in building envelopes - An overview of impacts and solutions. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(1), 31–40. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.1.5>
- Bergero, S., Cavalletti, P., & Chiari, A. (2018). The importance of thermal bridge correction in energy refurbishment of existing buildings. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 5(3), 197–204. <https://doi.org/10.18280/mmep.050310>
- Capozzoli, A., Gorrino, A., & Corrado, V. (2013). A building thermal bridges sensitivity analysis. *Applied Energy*, 107, 229–243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.045>
- Cherrill, G., Donn, M., Isaacs, N., & Mcneil, S. (2022). *Tools to assess internal surface mould growth: dynamic vs static*.
- el Saied, A., Maalouf, C., Bejat, T., & Wurtz, E. (2022). Thermal bridges numerical study in building retrofitting and ground model coupling with whole building energy software “EnergyPlus.” *Building Simulation Conference Proceedings*, 2211–2218. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30967>
- Evola, G., & Gagliano, A. (2024). Experimental and Numerical Assessment of the Thermal Bridging Effect in a Reinforced Concrete Corner Pillar. *Buildings*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/buildings14020378>
- Fantucci, S., Isaia, F., Serra, V., & Dutto, M. (2017). Insulating coat to prevent mold growth in thermal bridges. *Energy Procedia*, 134, 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.591>
- Ilomets, S., & Kalamees, T. (2016). Evaluation of the criticality of thermal bridges. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0005-6>
- Jedidi, M., & Benjeddou, O. (2018). Effect of Thermal Bridges on the Heat Balance of Buildings. In *International Journal of Scientific Research in Civil Engineering* © 2018 IJSRCE (Vol. 2, Issue 5). www.ijsrce.com
- Kotti, S., Teli, D., & James, P. A. B. (2017). Quantifying Thermal Bridge Effects and Assessing Retrofit Solutions in a Greek Residential Building. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.084>
- Miasik, P., & Lichołai, L. (2018). The influence of a thermal bridge in the corner of the walls on the possibility of water vapour condensation. *E3S Web of Conferences*, 49. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900072>
- Papadopoulos, A. M. (2016). Forty years of regulations on the thermal performance of the building envelope in Europe: Achievements, perspectives and challenges. *Energy and Buildings*, 127, 942–952. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.051>

- Qi, X., Tan, Y., Tan, J., & Li, X. (2024). Methods for improving the thermal performance of thermal bridges of lightweight steel-framed buildings. *PLoS ONE*, 19(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314634>
- Recart, C., & Sturts Dossick, C. (2022). Hygrothermal behavior of post-retrofit housing: A review of the impacts of the energy efficiency upgrade strategies. In *Energy and Buildings* (Vol. 262). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112001>
- Romero, M. J., Aguilar, F., & Vicente, P. G. (2021). Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façades and intermediate slabs for nZEB residential buildings in Spain. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103270>
- Sadowska, B., & Bieranowski, P. (2021). Efficiency of different balcony slab modernization method in retrofitted multi-family buildings. *Energies*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/en14206666>
- Smoczyk, M., Ksit, B., & Szymczak-Graczyk, A. (2025). Numerical analysis of heat transfer and surface condensation risk in the plinth zone of basement-included building. *Energy and Buildings*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116001>
- Theodosiou, T. G., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*, 40(11), 2083–2089. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>
- Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., Kontoleon, K., & Giarma, C. (2021). Assessing the accuracy of predictive thermal bridge heat flow methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110437>
- Αραβαντινός, Δ. (2024). Τα θερμομονωτικά υλικά και η θερμομονωτική προστασία των κτιρίων [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. *Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-281>
- Κοσμόπουλος, Π. (2019). Για ένα βιώσιμο οικιστικό περιβάλλον. *UNIVERSITY STUDIO PRESS*.
- Κοσμόπουλος, Π., & Περιβολάρης, Α. (2021). Κτίρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (2021st ed.). *UNIVERSITY STUDIO PRESS*.
- TOTEE 20701-1, Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, TEE.(2017).
- TOTEE 20701-2, Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, TEE. (2017).

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.