

ΓΕΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΠΕΤΡΟΣ-ΑΝΤΩΝΗΣ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ
ΣΕ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Τομέας: Θερμότητα

Επιβλέπουσα: Φούντη Μαρία, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα 2021

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Γερογιάννης Πέτρος-Αντώνης

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
Abstract	7
Ευχαριστίες	8
1. Εισαγωγή	9
1.1 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων στην Ευρώπη	10
1.2 Ενεργειακή πολιτική και νομοθεσία στην Ευρώπη.....	11
1.2.1 Οδηγία ενεργειακής αποδοτικότητας κτιρίων (EPBD).....	12
1.2.2 Οδηγία ενεργειακής απόδοσης.....	13
1.2.3 Πρόσφατες αναθεωρήσεις του νομοθετικού πλαισίου στην Ευρώπη..	13
1.2.4 Κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (nZEB).....	14
1.3 Προκατασκευασμένα στοιχεία κελύφους.....	14
1.3.1 Πλεονεκτήματα και ιδιαιτερότητες προκατασκευασμένων συστημάτων	15
1.3.2 Παραδείγματα προκατασκευασμένων συστημάτων.....	16
1.4 Δυναμική μόνωση	17
1.5 Σκοπός εργασίας.....	18
2. Περιγραφή λογισμικού.....	19
2.1 Εισαγωγή στο TRNSYS18	19
2.1.1 Simulation Studio.....	19
2.1.2 TRNBuild	20
2.2 Συνεργαζόμενα προγράμματα	21
2.2.1 Trnsys3d-SketchUp	21
2.2.2 WINDOW 7.7.....	22
2.3 Εξισώσεις TRNSYS.....	23
3. Μοντελοποίηση και διαστασιολόγηση συστήματος	32
3.1 Δυναμική μόνωση	32
3.2 Μοντελοποίηση συστήματος υποστήριξης	38
3.2.1 Κύκλωμα θέρμανσης	38
3.2.2 Κύκλωμα ψύξης.....	42
3.2.3 Τελικό σύστημα θέρμανσης-ψύξης.....	46
3.3 Αυτοματοποίηση παραμέτρων	48
3.4 Διαστασιολόγηση συστήματος	50
4. Σενάριο μελέτης	55
4.1 Περιγραφή κτιρίου	55
4.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	56
4.1.2 Θερμικές ιδιότητες κτιριακού κελύφους	58
4.1.3 Θερμογέφυρες.....	59
4.2 Συνθήκες λειτουργίας κτιρίου	61
4.2.1 Εσωτερικά θερμικά κέρδη.....	62

4.2.2	Αερισμός.....	65
4.2.3	Θερμική άνεση	66
4.3	Κλίμα.....	67
4.4	Περιπτώσεις-Σενάρια	68
4.4.1	Κέλυφος.....	68
4.4.2	Συστήματα θέρμανσης/ψύξης	68
5.	Ενεργειακή ανάλυση	70
5.1	Βασικοί δείκτες απόδοσης συστήματος-KPIs.....	70
5.1.1	Βαθμός κάλυψης (coverage)	70
5.1.2	Βαθμός απόδοσης δυναμικού στρώματος (η_{AL})	71
5.1.3	Θερμικός βαθμός απόδοσης συνολικού συστήματος (η_{th})	72
5.1.4	Ηλεκτρικός δείκτης αποδοτικότητας συστήματος (η_{el})	72
5.1.5	Συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας (COP_{HP})	73
5.1.6	Συντελεστής συνεισφοράς ηλιοθερμικού συστήματος (CF_{ST})	73
5.1.7	Συντελεστής εξοικονόμησης Πρωτογενούς Ενέργειας (PES).....	74
5.2	Παραμετρική ανάλυση	78
5.2.1	Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών ($A_{συλλ}$).....	78
5.2.2	Πάχος εξωτερικής μόνωσης ($d_{μόνωσης}$).....	81
5.2.3	Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας περιόδου ψύξης ($T_{τροφ,ψ}$)	84
5.2.4	Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας περιόδου θέρμανσης ($T_{τροφ,θ}$).....	86
5.3	Τελικά αποτελέσματα.....	90
5.3.1	Τελικό Σενάριο I ($T_{τροφ,θ}=22^{\circ}C$)	90
5.3.2	Τελικό Σενάριο II ($T_{τροφ,θ}=24^{\circ}C$)	93
6.	Σχόλια-Προτάσεις	98
6.1	Σχολιασμός - Συμπεράσματα	98
6.2	Προτάσεις μελλοντικής εργασίας	100
7.	Κατάλογος Πινάκων.....	101
8.	Κατάλογος Σχημάτων	102
9.	Κατάλογος Εικόνων	103
10.	Βιβλιογραφία	104

Περίληψη

Καθώς η θηλιά της κλιματικής αλλαγής σφίγγει γύρω από το λαιμό της ανθρώπινης ύπαρξης κρίνεται ολοένα επιτακτικότερη ανάγκη η εύρεση δραστικών λύσεων στα ζητήματα εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των αέριων εκπομπών του θερμοκηπίου. Περιθώρια βελτίωσης παρουσιάζονται σε όλους τους τομείς, ωστόσο ο κτιριακός διαθέτει τη μερίδα του λέοντος στην πίτα της ενεργειακής κατανάλωσης (41.7% στην ΕΕ), εκλύοντας ένα επίσης σημαντικό ποσό διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο αποτελεί το βασικότερο αέριο ρύπο του θερμοκηπίου. Ωστόσο, αποτελεί ταυτόχρονα ελπιδοφόρο τομέα, καθώς εμφανίζει υψηλό δυναμικό ενεργειακής εξοικονόμησης. Με ολιστικές προσεγγίσεις ριζικής ανακαίνισης ή και απλές παρεμβάσεις στο κέλυφος υφιστάμενων κτιρίων γίνεται εφικτή η σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων. Η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων/συστημάτων δύναται να προσφέρει καίρια οφέλη στη στρατηγική ενεργειακής ανακαίνισης του κτιριακού δυναμικού, μειώνοντας το κόστος, τη διάρκεια των διαδικασιών αλλά και την προκαλούμενη αναστάτωση των κατοίκων.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μοντελοποίηση και ενεργειακή ανάλυση μιας καινοτόμας τεχνολογίας δυναμικής μόνωσης. Το υπό μελέτη σύστημα επιδιώκει τη συρρίκνωση των αναγκών θέρμανσης/ψύξης χώρου ενός κτιρίου διακινώντας νερό κατάλληλης θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής τοιχοποιίας και της εξωτερικής θερμομόνωσης. Η δυναμική μόνωση αποτελεί σύστημα που μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε τοιχοποιίες και να παραχθεί ως προκατασκευασμένο στοιχείο κελύφους, προσφέροντας τα σχετικά οφέλη.

Ως κτιριακό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επιλεγμένος όροφος τεσσάρων διαμερισμάτων μια τυπικής πολυκατοικίας, κατασκευασμένης στο Μόναχο πριν το 1960. Εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο αφορά στην υφιστάμενη περίπτωση, δεδομένα για την οποία λήφθηκαν από το πρόγραμμα TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment). Στο δεύτερο σενάριο εφαρμόστηκε εξωτερική θερμομόνωση στο κτιριακό κέλυφος, ενώ το τρίτο σενάριο, το οποίο αποτελεί και το βασικό αντικείμενο μελέτης της ανάλυσης, εμπλουτίστηκε με προσθήκη της διάταξης δυναμικής μόνωσης και του συστήματος τροφοδοσίας της.

Η ενεργειακή ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού TRNSYS18, ενώ για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν και επί μέρους προγράμματα όπως το TRNSYS3d, SketchUp και WINDOW7.7. Τα αποτελέσματα υπογράμμισαν την ευελιξία του συστήματος καταδεικνύοντας την αποδοτική λειτουργία του σε εύρος σημείων λειτουργίας. Στο τελικό σενάριο επιτυγχάνεται συνολική μείωση των θερμικών φορτίων θέρμανσης και ψύξης κατά 75%, με ταυτόχρονη εξοικονόμηση της καταναλισκόμενης πρωτογενούς ενέργειας κατά 74%.

Abstract

As the climate change issue escalates year by year and day by day, humanity is in urgent need of finding drastic and efficient solutions towards energy savings and greenhouse gas emission reduction issues. There is room for improvement in numerous areas, however the building sector possesses the lion's share of the energy consumption pie (41.7% in the EU), emitting a significant amount of carbon dioxide (CO₂), which is the main greenhouse gas pollutant. Additionally, it constitutes a promising sector, as it has high potential for energy savings. It is possible to significantly reduce energy consumption and greenhouse gasses, either with holistic schemes of refurbishment or by simply renovating the envelope of existing buildings. The use of prefabricated elements can offer key benefits to the strategy of upgrading the building stock, by cutting down on the cost and the duration of procedures as well as causing less inconvenience to residents.

In the present work, modeling and energy assessment of an innovative dynamic insulation system is carried out. The studied technology aims at minimizing the space heating / cooling needs of a building by circulating water of appropriate temperature between the masonry and the external thermal insulation. Active insulation is a system that can be easily integrated into and produced as a prefabricated element, offering the respective benefits.

A selected four-apartment floor of a typical block of flats, built in Munich before 1960, is used as a building model. Three different scenarios were considered. The first refers to the existing case, for which data were obtained from the TABULA program (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment). In the second scenario, external thermal insulation was applied to the building shell, while the third scenario, which is the main object of study, was enriched by adding the dynamic insulation layer and its supply system.

The energy assessment was performed using TRNSYS18 software, while other programs were used for creating the model such as TRNSYS3d, SketchUp and WINDOW7.7 were also used. The results underlined the flexibility of the system demonstrating its efficient operation in a range of operating points. In the final scenario, total heating and cooling demands are reduced by 75%, with simultaneous decrease in primary energy consumption by 74%.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια Μαρία Φούντη, που μου προσέφερε τη δυνατότητα εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και για την ανάθεση ενός μη τετριμμένου θέματος, σχετικού με τα ενδιαφέροντά μου και τις μελλοντικές μου φιλοδοξίες.

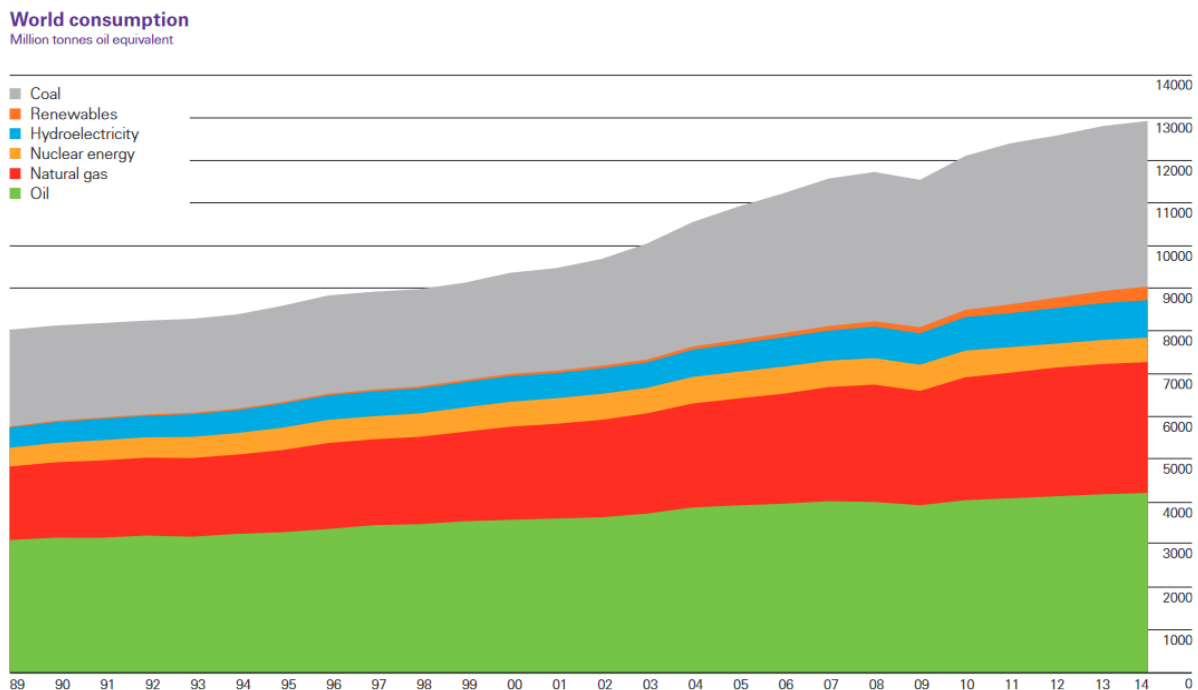
Ένα μεγάλο ευχαριστώ αποτελεί την ελάχιστη προσφορά μου στα πρόσωπα των διδασκόντων κ. Γιάννη Μανδηλαρά, κ. Γιάννη Ατσόνιου και του υποψήφιου διδάκτορα κ. Μάνου Κατσιγιάννη. Υπήρξαν κάτι παραπάνω από επιβλέποντες μου και η εκπόνηση της παρούσας εργασίας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη διαρκή καθοδήγηση και υποστήριξή τους ακόμη και σε τομείς πέραν του τεχνικού.

Βεβαίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλα τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, καθώς και τα παιδιά από το κτίριο Μ, που με τη διάθεση και το φιλικό κλίμα που δημιούργησαν κατέστησαν την καθημερινή ενασχόλησή μου με το θέμα ακόμη πιο ευχάριστη.

Προφανώς, δεν ξεχνάω ποτέ την οικογένεια μου και τα υπόλοιπα φιλικά μου πρόσωπα, που με την πολυδιάστατη στήριξή τους, την αγάπη τους και την ύπαρξή τους στη ζωή μου, καθιστούν δυνατή και αποδίδουν μεγαλύτερο νόημα στην επίτευξη των στόχων μου. Ειδική μνεία και στην Ag που προσφέρει κίνητρο και αποτελεί ώθηση μου στον διαρκή αγώνα προς αυτοβελτίωση.

1. Εισαγωγή

Ένα από τα πλέον κρίσιμα ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα, τη σύγχρονη εποχή, αποτελεί αυτό της ενεργειακής κατανάλωσης. Οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις, λόγω του υπερπληθυσμού και της βελτίωσης του μέσου βιοτικού επιπέδου, προκαλούν την εξάντληση των φυσικών πόρων του πλανήτη με φρενήρη ρυθμούς, διαταράσσοντας τις φυσικές ισορροπίες. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί σύσσωμες προσπάθειες καταστολής του προβλήματος, ωστόσο απαιτείται λήψη επιπλέον δραστικών πολιτικών αποφάσεων, καθώς οι οικονομικές επιπτώσεις βρίσκουν ήδη αντίκτυπο στην κοινωνία, ενώ οι περιβαλλοντικές απειλούν ακόμη και την ίδια την ανθρώπινη ύπαρξη. Τη στιγμή που υπολογίζεται αύξηση των αερίων θερμοκηπίου κατά 50% από το 1750 και άνοδος της μέσης θερμοκρασίας επιφανείας της γης κατά 0.89°C τα τελευταία 150 χρόνια [1], παρατηρείται αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, χρόνο με το χρόνο. Ενδεικτικά αναφέρεται πως το 2017 σημειώθηκε 2.2% αύξηση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, σχεδόν διπλάσια από αυτήν του 2016 και σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη του 2013 [2]. Προβλέψεις που πραγματοποιούνται με τα τωρινά δεδομένα, εκτιμούν αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης κατά ένα τρίτο έως το 2040 [3].



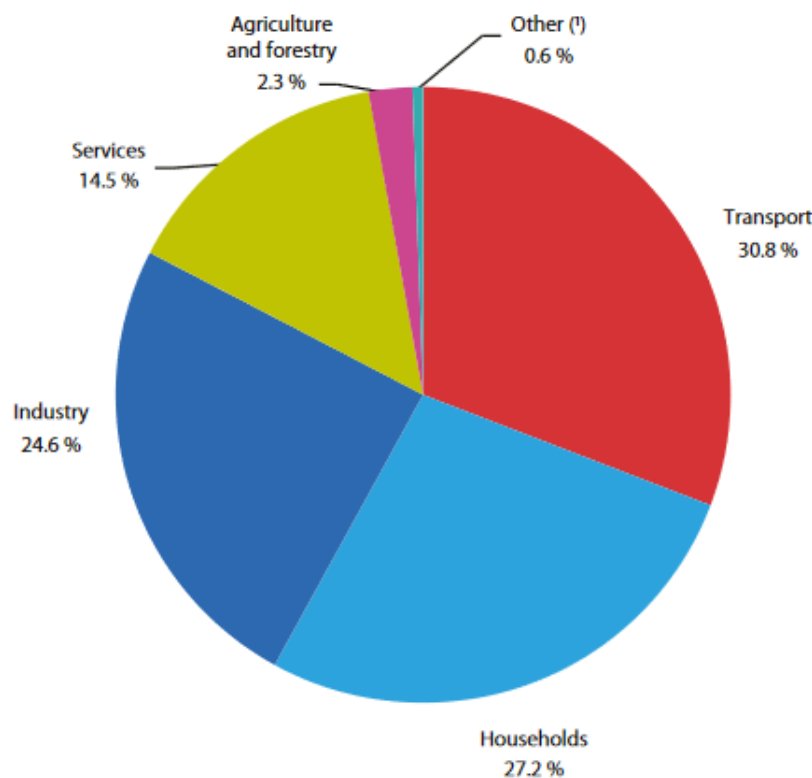
Εικόνα 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (1989-2014) σε Mtoe [2]

Καθίσταται δε κατανοητό, πως η παραγωγή ενέργειας από περιβαλλοντικά φιλικότερες πηγές, όπως οι ανανεώσιμες, αποτελεί αναγκαία, αλλά όχι ικανή συνθήκη ανάσχεσης της

κλιματικής αλλαγής. Συνεπώς, η ταυτόχρονη παραγωγή «πράσινης» ενέργειας και η σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε όλους τους τομείς της, αποτελεί πλέον μονόδρομο. Για την υλοποίηση του μακρόπνοου σχεδίου αντιμετώπισης, κρίνονται ως αδήριτες ανάγκες, επιπρόσθετα της πολιτικής βούλησης, η βελτίωση των υπάρχόντων και η ανάπτυξη νέων, αποδοτικότερων τεχνολογιών, οι οποίες τροφοδοτούμενες και από ΑΠΕ, θα αποσκοπούν στον περιορισμό της κατανάλωσης.

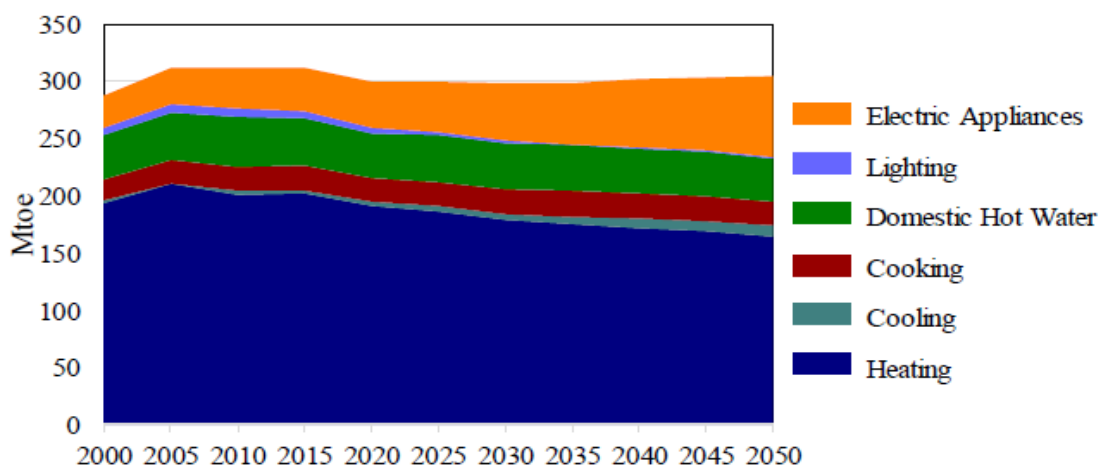
1.1 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων στην Ευρώπη

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, η αντιμετώπιση του ενεργειακού ζητήματος προϋποθέτει τον εντοπισμό των διαφορετικών τομέων κατανάλωσης και την λήψη δραστικών μέτρων, προς περιορισμό των ενεργειακών αναγκών σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Έτσι, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αποδοθεί σε τρεις κύριους παράγοντες, τη βιομηχανία, τον κλάδο των μεταφορών και τον κτιριακό τομέα. Στον τομέα των κτιρίων λογίζονται όλα τα οικοδομήματα, είτε πρόκειται για κατοικίες (Residential-Households) είτε για τριτογενούς τομέα (NonResidential-Services). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2 ο κτιριακός αποτελεί τον κρισιμότερο τομέα, καθώς ευθύνεται για το 41.7% (27.2% + 14.5%) της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στην ΕΕ, περισσότερο από τη βιομηχανία και τον κλάδο των μεταφορών.



Εικόνα 1.2: Κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ-28 εν έτη 2017 [4]

Σε ένα κτίριο καταναλώνεται ενέργεια για επί μέρους λειτουργίες, όπως για θέρμανση και ψύξη χώρων, ζεστό νερό χρήσης, φωτισμό, ηλεκτρικές συσκευές και για μαγείρεμα (Εικόνα 1.3). Οι παραπάνω καταναλώσεις ποικίλουν συναρτήσει του τύπου του κτιρίου, των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, της γεωμετρίας και του προσανατολισμού, την επιφάνεια των ανοιγμάτων, των κλιματικών συνθηκών, της λειτουργίας του κτιρίου, της απόδοσης των συστημάτων ΘΨΚ κ.α.



Εικόνα 1.3: Ανάγκες τελικής ενέργειας για κατοικίες, σε Mtoe [5]

Ένας ακόμη παράγοντας που διαφοροποιεί το κτιριακό απόθεμα, αποτελεί το έτος κατασκευής των υφιστάμενων κτιρίων. Στο Ευρωπαϊκό προσκήνιο ένα σημαντικό ποσό κτιρίων (40%) χρονολογείται πριν από το 1960, όπου κατά την μεταπολεμική περίοδο υπήρξαν τεράστιες ανάγκες ταχύτατης ανοικοδόμησης, ενώ σχεδόν όλα (90%) δημιουργήθηκαν πριν το 1990 [6]. Όπως είναι φυσικό, τα συγκεκριμένα κτίρια αποσκοπούσαν καθαρά στην κάλυψη της υψηλής ανάγκης στέγασης, χωρίς να δίνεται βάση στην ενεργειακή τους αποδοτικότητα. Συνεπώς, ο κτιριακός τομέας δεν αποτελεί απλά τον μεγαλύτερο κλάδο κατανάλωσης ενέργειας, αλλά συνιστά πιθανότατα και τον πιο ελπιδοφόρο, καθώς ακόμη και με στοιχειώδεις παρεμβάσεις δύναται να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό οι ενεργειακές του απαιτήσεις. Το βασικότερο και αποδοτικότερο μέτρο ενίσχυσης της θερμικής απόδοσης ενός κτιρίου, αποτελεί η ενίσχυση του κελύφους του, προσθέτοντας δηλαδή θερμομόνωση στις εξωτερικές επιφάνειες, αποκόπτοντας της απώλειες προς το περιβάλλον. Ωστόσο, η σοβαρότητα του ενεργειακού ζητήματος απαιτεί μια πιο ολιστική μέθοδο προσέγγισης με περισσότερα και δραστικότερα μέτρα.

1.2 Ενεργειακή πολιτική και νομοθεσία στην Ευρώπη

Παρότι σε ευρωπαϊκό επίπεδο αναγνωρίστηκε η ανάγκη λήψης μέτρων ήδη από το 1993 με την οδηγία SAVE 93/76/ΕΟΚ, η πρώτη διεθνής συνθήκη υιοθετήθηκε μόλις το 1997 με το

πρωτόκολλο του Κυότο, το οποίο ενστερνίστηκε και η ΕΕ. Έτσι, στην προσπάθεια αποτροπής της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη άνω των 2°C τον τρέχον αιώνα, δεσμεύτηκε για την μείωση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% την περίοδο 2008-2012 και κατά 20% μέχρι το 2020, συγκριτικά με αυτές του 1990. Ο κτιριακός τομέας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ευθύνεται για περισσότερο από το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο ποσοστό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), του κυριότερου αερίου του θερμοκηπίου. Στην κατεύθυνση επίτευξης των παραπάνω δεσμευτικών όρων, εκδόθηκαν από την ΕΕ δύο βασικές οδηγίες, σχετικά με την βελτίωση του ενεργειακού ζητήματος στον κτιριακό κλάδο, οι οποίες αναλύονται στις επόμενες υποενότητες.

1.2.1 Οδηγία ενεργειακής αποδοτικότητας κτιρίων (EPBD)

Η εν λόγω οδηγία (Energy Performance of Building Directive, EPBD – Directive 2002/91/EU) [7] και η αναθεώρησή της (EPBD recast, Directive 2010/31/EU) [8], αποβλέπουν στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων στην Ευρώπη, υφιστάμενων και νεόδμητων, λαμβάνοντας υπόψιν τις κλιματικές συνθήκες, τις εσωτερικές συνθήκες άνεσης και την ανάλυση κύκλου ζωής (lifecycle cost) υλικών και συστημάτων. Αποτελεί κοινοτική οδηγία που χρειάζεται προσαρμογή στα ξεχωριστά νομοθετικά πλαίσια του κάθε μέλους-κράτους. Οι κυριότερες απαιτήσεις που δεσμεύτηκαν να φέρουν εις πέρας οι χώρες τις ΕΕ, είναι:

- i. Υιοθέτηση μεθοδολογίας υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, ώστε να πραγματοποιηθεί και θέσπιση συστήματος πιστοποίησης της ενεργειακής τους αποδοτικότητας (Energy Performance Certificate-EPC). Ειδικότερα, το πιστοποιητικό (EPC) θα αναγράφει την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, ενώ θα περιλαμβάνει τιμές αναφοράς για άμεση και ευκολότερη σύγκριση, αλλά και το ποσοστό ενεργειακής κάλυψης από ΑΠΕ. Επιπρόσθετα, θα πρέπει, κατά τις διαδικασίες πώλησης ή ενοικίασης ενός ανοικοδομημένου ακινήτου, να επιδεικνύεται απαραίτητα και το αντίστοιχο πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης.
- ii. Καθορισμός των ελάχιστων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης τόσο για νεόδμητα όσο και για ανακαινίσεις υπαρχόντων κτιρίων, με γνώμονα την επίτευξη των οικονομικά βέλτιστων λύσεων. Τα αποφασισμένα επίπεδα ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης, θα πρέπει να αναθεωρούνται κάθε πενταετία και να λαμβάνουν υπόψιν τις ιδιαιτερότητες της κάθε τυπικής περίπτωσης (π.χ. νέα κτίρια, υφιστάμενα, ιστορικά, προσωρινά κ.α.).
- iii. Τακτική επιθεώρηση και συντήρηση των συστημάτων ΘΨΚ ενός κτιρίου ή λήψη μέτρων που θα αποφέρουν παρόμοια αποτελέσματα.
- iv. Θέσπιση ανεξάρτητων συστημάτων ελέγχου για τη χορήγηση των πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης και τη διένεξη των εκθέσεων επιθεωρήσεων.

- v. Χάραξη εθνικών σχεδίων προώθησης δημιουργίας κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (nearly Zero Energy Building-nZEB) και ανακαίνισης υφιστάμενων, έτσι ώστε να χαρακτηρίζονται από τον αυτό τίτλο. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης λογικής όλα τα νέα κτίρια θα πρέπει να ακολουθούν τη λογική του nZEB από τις 31 Δεκεμβρίου του 2020, ενώ για τα δημόσια κτίρια η αντίστοιχη ημερομηνία ορίστηκε στις 31 Δεκεμβρίου του 2018.
- vi. Λήψη μέτρων οικονομικής υποστήριξης για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων.

1.2.2 Οδηγία ενεργειακής απόδοσης

Η οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency Directive, EED-Directive 2012/27/EU) , στοχεύει στην εδραίωση ενός κοινού πλαισίου μέτρων προώθησης της ενεργειακής απόδοσης, εντός της Ευρωπαϊκής ζώνης. Συμμόρφωση με την παραπάνω οδηγία, εγγυάται η επίτευξη του βασικού στόχου εξοικονόμησης κατά 20% έως το 2020, προμηνύοντας ταυτόχρονα περαιτέρω βελτίωση τα ακόλουθα χρόνια. Μεταξύ άλλων τα σημεία κλειδιά της οδηγίας, είναι:

- i. Καθιέρωση μακροπρόθεσμων, εθνικών στρατηγικών ανακαίνισης του κτιριακού αποθέματος κάθε χώρας, στις οποίες περιλαμβάνεται η εύρεση οικονομικά βέλτιστων μεθόδων ανακαίνισης, αλλά και λήψη μέτρων χρηματικής υποστήριξης οικονομικώς αποδοτικών ριζικών ανακαινίσεων.
- ii. Δέσμευση αναβάθμισης τουλάχιστον 3% των δημόσιων κτιρίων ετησίως, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, όπως ορίστηκαν στην
- iii. Προώθηση ενεργειακών ελέγχων, που θα διενεργούνται από ειδικευμένους εμπειρογνώμονες
- iv. Εγκατάσταση μετρητών ενέργειας, έτσι ώστε να αντανακλάται η εικόνα της πραγματικής ενεργειακής κατανάλωσης, βασιζόμενη στην οποία οφείλει να αναθεωρηθεί η όποια επικρατούσα στρατηγική.

1.2.3 Πρόσφατες αναθεωρήσεις του νομοθετικού πλαισίου στην Ευρώπη

- Τροποποίηση της οδηγίας 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, πραγματοποιήθηκε με την αντίστοιχη οδηγία (ΕΕ) 2018/2012. Πλέον ορίζεται ως πρωτεύον στόχος ενεργειακής απόδοσης η εξοικονόμηση ενέργειας τουλάχιστον κατά 32.5% εντός ΕΕ, έως το έτος 2030.
- Το πλαίσιο της EPBD αναθεωρήθηκε από την οδηγία (ΕΕ) 2018/844, η οποία τέθηκε σε εφαρμογή στις 9 Ιουλίου του 2018. Με την αλλαγή αυτή, παρέχονται οδηγίες για τις μακροπρόθεσμες στρατηγικές ανακαίνισης του εθνικού, κτιριακού δυναμικού, αποσκοπώντας στη μετατροπή του σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης

(nZEB), απαλλαγμένα από ανθρακικές εκπομπές, έως το 2050. Οι εν λόγω στρατηγικές, προβλέπεται να χρηματοδοτηθούν από ευρωπαϊκούς υποστηρικτικούς μηχανισμούς.

1.2.4 Κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (nZEB)

Παρότι δεν έχει συμφωνηθεί ακόμη ο ακριβής ορισμός, ως κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (nZEB), χαρακτηρίζονται τα κτίρια πολύ υψηλής ενεργειακής απόδοσης, με μειωμένες ενεργειακές ανάγκες. Προσφέρουν τη μέγιστη άνεση για τους χρήστες τους, βασιζόμενα στην αρχή της ελαχιστοποίησης των θερμικών αναγκών σε τέτοιο βαθμό, ώστε να περιορίζεται σημαντικά η χρήση των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης να. Σημαντικό σημείο αναφοράς τους μπορεί να θεωρηθεί η μερική ή πλήρης κάλυψη των ενεργειακών του. Έτσι, τα κύρια χαρακτηριστικά ενός nZEB κτιρίου είναι τα εξής:

- Δομικά στοιχεία υψηλών ενεργειακών προδιαγραφών.
- Ηλεκτρομηχανολογικά ενεργειακά συστήματα πολύ υψηλής ενεργειακής απόδοσης
- Παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιτόπου στον κτιριακό χώρο ή σε πιο ομαδοποιημένο επίπεδο γειτονιάς.

Για την μετατροπή του κτιριακού αποθέματος σε nZEB, χρειάζεται εκτός από τον κατάλληλο σχεδιασμό των νεόδμητων κτιρίων και οι υλοποίηση καίριων παρεμβάσεων στο υφιστάμενο δυναμικό. Έτσι, μέσω ριζικών ανακαινίσεων ενισχύεται το κέλυφος με προσθήκη εξωτερικής θερμομόνωσης, αντικαθίστανται τα ενεργειακά συστήματα με νέα αποδοτικότερα ή αναβαθμίζονται όπου αυτό είναι δυνατό και προωθείται η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, με χρήση επί παραδείγματι ηλιακών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών διατάξεων.

Ωστόσο, τα περιβαλλοντικά περιθώρια παραμένουν τόσο στενά, ώστε οι κατά τόπους και διαστήματα παρεμβάσεις να μην κρίνονται αρκετές. Στο δρόμο της επίτευξης των Ευρωπαϊκών στόχων για την άμβλυση του ενεργειακού ζητήματος, απαιτείται ταχύτερος, οικονομικότερος και περιβαλλοντικά φιλικότερος τρόπος παρέμβασης. Οι ανακαινίσεις μαζικού χαρακτήρα, ενδεχομένως αποτελούν μια κάποια λύση στο συγκεκριμένο, χρονικά ευαίσθητο, πρόβλημα.

1.3 Προκατασκευασμένα στοιχεία κελύφους

Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναπτυχθεί, η αναβάθμιση του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος, αποτελεί όχι μόνο επιτακτική ανάγκη, αλλά και τον μεγαλύτερο και πιο ελπιδοφόρο τομέα για την οικονομικά αποδοτικότερη ανάλυση του ενεργειακού ζητήματος. Το γεγονός αυτό είναι πλέον ξεκάθαρο, εξάλλου ο ετήσιος ρυθμός ανακαίνισης στην ΕΕ πραγματοποίησε άλμα από 1.2% σε 2-3%, υπό την αιγίδα κεντρικά υποστηριζόμενων χρηματοδοτικών προγραμμάτων. Συνεπώς, επόμενο στόχο αποτελεί η

βελτίωση της ποιότητας και αύξηση της ποσότητας των ανακαινίσεων, ακόμη περισσότερο. Στα πλαίσια του συνολικού εγχειρήματος, η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων φαίνεται να παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής μεθόδου ανακαίνισης.

1.3.1 Πλεονεκτήματα και ιδιαιτερότητες προκατασκευασμένων συστημάτων

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια ροπή εκβιομηχάνισης της κατασκευαστικής διαδικασίας των κτιρίων. Ρίχνοντας βάρος στην κατασκευή έτοιμων συναρμολογημάτων και υποσυναρμολογημάτων, μακριά από το εργοτάξιο, σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον με χρήση αυτοματοποιημένων μηχανημάτων και γραμμών παραγωγής, μπορούν να παρατηρηθούν σημαντικά οφέλη, τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τη χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων, επεξηγούνται παρακάτω.

- ✓ Σημαντική μείωση του απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης των έργων, της τάξης του 40%.

Στην παραπάνω μείωση συνηγορούν κυρίως η μείωση της απαιτούμενης εργασίας στο εργοτάξιο, καθώς πλέον απαιτείται απλά η συναρμολόγηση των έτοιμων στοιχείων, αλλά και η δυνατότητα υλοποίησης παράλληλων δραστηριοτήτων κατά την κατασκευή των στοιχείων λόγω βιομηχανοποίησης της διαδικασίας [9].

- ✓ Μείωση του συνολικού κόστους.

Εξαιτίας της τυποποίησης του σχεδιασμού και της παραγωγής, της αγοράς υλών κατευθείαν από τους προμηθευτές, των περιορισμένων μεταφορών συνεργείων (εργατών και μηχανημάτων), την αποφυγή ακραίων καιρικών συνθηκών και τη μείωση του εργατικού κόστους κατά 75%, προσφέρεται η δυνατότητα εξοικονόμησης έως και 30% του αρχικού κόστους [10].

- ✓ Βελτίωση της ποιότητας και της ακρίβειας της κατασκευής.

Η εργασία για τα προκατασκευασμένα στοιχεία πραγματοποιείται ως επί το πλείστον σε ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον, μακριά από το εργοτάξιο, όπου υποβάλλονται σε αυστηρούς ελέγχους ποιότητας και η χρήση αυτοματοποιημένων μηχανημάτων προσυπογράφει την υψηλή ακρίβεια των κατασκευών.

- ✓ Μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η ακρίβεια στον προγραμματισμό του έργου, την αγορά πρώτων υλών και η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών συμβάλλουν στη σημαντική μείωση αποβλήτων και κατανάλωσης υλικών. Συνδυάζοντας το γεγονός της μειωμένης διάρκειας κατασκευής, των ελαχιστοποιημένων απαραίτητων διαδρομών και της μείωσης των

αναγκαίων υλικών, επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και του ανθρακικού αποτυπώματος [11].

✓ Ελαχιστοποίηση της όχλησης των κατοίκων.

Όχι μόνο έχει συρρικνωθεί η διάρκεια των απαιτούμενων εργασιών, οι οποίες έχουν πλέον περισσότερο συντονιστικό χαρακτήρα παρά κατασκευαστικό, αλλά πραγματοποιούνται, σχεδόν εξολοκλήρου, εξωτερικά του κτιρίου χωρίς να απαιτείται, τις περισσότερες φορές, στήσιμο σκαλωσιάς. Συνεπώς, μειώνεται η σκόνη και ο θόρυβος, ενώ οι χρήστες του κτιρίου μπορούν ακόμη και να βρίσκονται στο εσωτερικό του κτιρίου, χωρίς ιδιαίτερη προσαρμογή της συμπεριφοράς και των συνηθειών τους.

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό πως τα οφέλη των προκατασκευασμένων συστημάτων μεγιστοποιούνται κατά τη ριζική ανακαίνιση μεγάλης κλίμακας, όπου βασικά κριτήρια αποτελούν η οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα σε συνδυασμό με την ταχύτερη ολοκλήρωση των έργων.

1.3.2 Παραδείγματα προκατασκευασμένων συστημάτων

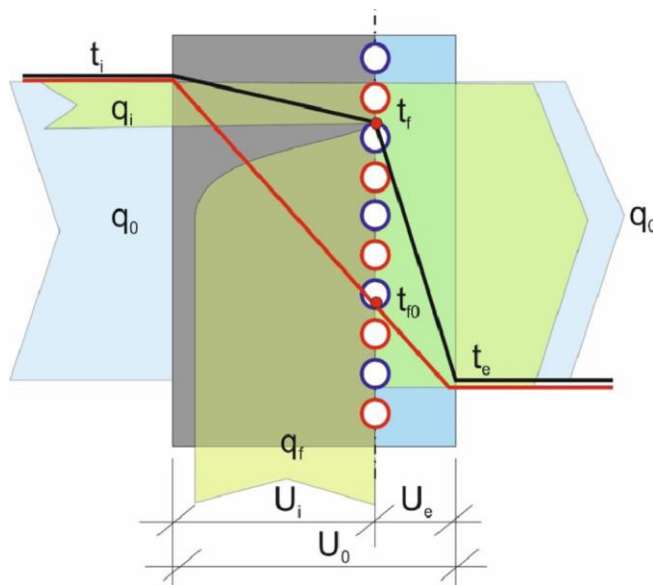
Η πρόκληση στον προκείμενο τομέα, έγκειται στην ενσωμάτωση συστημάτων διαφόρων λειτουργιών και δυνατοτήτων σε ένα προκατασκευασμένο στοιχείου κελύφους. Έτσι, σε ένα συναρμολόγημα μπορεί, μεταξύ άλλων, να εμπερικλείεται συνδυασμός κουφωμάτων, τοιχοποιίας, συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, ή ακόμη και μηχανικού αερισμού, με εξωτερική κάλυψη θερμικής μόνωσης. Με αυτή τη λογική προσεγγίζεται η ριζική ανακαίνιση ενός κτιρίου, παρεμβαίνοντας, ως επί το πλείστον, μόνο στις εξωτερικές του επιφάνειες. Σχετικά με το ανωτέρω εγχείρημα, έχουν ήδη πραγματοποιηθεί αρκετές απόπειρες εφαρμογών τέτοιων συστημάτων, κυρίως από Ευρωπαϊκά προγράμματα. Για την πλήρη κατανόηση της συγκεκριμένης ενότητας παρατίθενται συνοπτικά κάποια από αυτά.

- ❖ MORE-CONNECT: Αναπτύχθηκαν συναρμολογήματα οροφής με ενσωματωμένες τεχνολογίες ΑΠΕ και μονάδες θέρμανσης. Οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στην πόλη Χέρλεν της Ολλανδίας, κατά τη ριζική ανακαίνιση κατοικιών του 1960. Στις προσόψεις συμπεριλήφθηκαν συστήματα θέρμανσης και μηχανικού αερισμού [12].
- ❖ E2VENT: Ενσωματώθηκαν αεριζόμενες προσόψεις με ανάκτηση θερμότητας. Για την επίτευξη της ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν και υλικά αλλαγής φάσης (PCM) [13].
- ❖ 4rinEU: Τοποθετήθηκαν ξύλινες, προκατασκευασμένες προσόψεις, στις οποίες ενσωματώθηκαν τα νέα κουφώματα, συστήματα αερισμού και ηλιοθερμικών. Η επιλογή του ξύλου αποτελεί βιώσιμη λύση, καθώς μπορεί να ανακυκλωθεί μετά το πέρας της χρήσης του [14].

- ❖ iNSpire: Στο ξύλινο, προκατασκευασμένο σκελετό, του συγκεκριμένου προγράμματος εντάχθηκε μια μικρή αντλία θερμότητας αέρα-αέρα. Ενσωματώθηκαν επιπλέον, σωληνώσεις και καλώδια για ζεστό νερό χρήσης, θέρμανση, αερισμό, παροχή ηλεκτρισμού, αλλά και διατάξεων που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια. Τέλος, δεν παραλήφθηκαν, κατά τη διάρκεια της προκατασκευής του, ούτε τα νέα κουφώματα και οι απαραίτητες ηχοπαγίδες [15].

1.4 Δυναμική μόνωση

Η υπό μελέτη τεχνολογία της δυναμικής μόνωσης αφορά σε διάταξη σωληνώσεων η οποία τοποθετείται εξωτερικά της υπάρχουσας τοιχοποιίας, αποτελώντας ουσιαστικά ένα ενεργειακό σύστημα κελύφους. Διακινώντας ρευστό μέσο (εδώ νερό) ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας δια μέσου των σωλήνων, επιδιώκεται η επιβολή θερμοκρασιακής συνθήκης στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων, αποσκοπώντας στη μείωση των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία προστέθηκε εξωτερικά του δυναμικού στρώματος και ένα στρώμα τυπικής μόνωσης (EPS). Η ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία υποδεικνύει αποδοτικότερη λειτουργία παρόμοιων συστημάτων για περιοχές ψυχρών κλιμάτων με υψηλές απαιτήσεις θέρμανσης, όπως αυτές τις κεντρικής και βόρειας Ευρώπης. Συγκεκριμένα οι *T. Kisilewicz*, *M. Fedorczak-Cisaka*, *T. Barkanyi* μελέτησαν παρόμοιο σύστημα σωληνώσεων με προσθήκη μόνωσης (Styrofoam) και στις δύο πλευρές του στρώματος που περιείχε το διακινούμενο μέσο, για εφαρμογή του στην πόλη Νιρεγκιάσα της Ουγγαρίας. Η μείωση των θερμικών απωλειών που επιτεύχθηκε κυμαίνεται μεταξύ του 53% και 81% [16].



Εικόνα 1.4: Κατανομή θερμοκρασιών τοιχοποιίας με δυναμικό στρώμα [16]

Συνεπώς, το σύστημα της δυναμικής μόνωσης (σωλήνωση και στρώματα κάλυψής της) μπορεί να κατασκευαστεί και να χρησιμοποιηθεί μαζί με τη στρώση εξωτερικής μόνωσης (EPS) ως προκατασκευασμένο στοιχείο κελύφους. Με αυτόν τον τρόπο δύναται να προσφέρει όλα τα οφέλη που αναφέρθηκαν προηγουμένως, συμβάλλοντας στον αγώνα ενάντια της κλιματικής αλλαγής.

1.5 Σκοπός εργασίας

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται μοντελοποίηση και ενεργειακή ανάλυση ενός καινοτόμου συστήματος δυναμικής μόνωσης (Active Insulation). Η υπό μελέτη τεχνολογία αφορά σε διάταξη σωληνώσεων, η οποία τοποθετείται ανάμεσα στην εξωτερική θερμοπρόσοψη και στην τοιχοποιία του κτιριακού κελύφους. Η ανάλυση πραγματοποιείται αποσκοπώντας στη μείωση των θερμικών αναγκών του κτιρίου, αποκόβοντας τη ροή θερμότητας μεταξύ θερμαινόμενων χώρων και περιβάλλοντος και όχι στην αντικατάσταση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Διακινώντας νερό ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας διαμέσου των επιτοιχίων σωληνώσεων, καθίσταται εφικτή η ρύθμιση της θερμοκρασίας κατά μήκος των κάθετων δομικών στοιχείων, με τρόπο τέτοιο ώστε να επιβληθεί, πρακτικά, αδιαβατική συνθήκη μεταξύ του αέρα του εσωτερικού χώρου και των εξωτερικών τοίχων. Εξετάζονται τρία βασικά κτίρια με πυρήνα ένα υφιστάμενο κτίριο στην πόλη του Μονάχου της Γερμανίας, του οποίου η κατασκευή χρονολογείται μεταξύ 1950 και 1960. Η πρώτη περίπτωση αφορά στην υπάρχουσα, για την οποία συγκεντρώθηκε πλήθος δεδομένων από το διαδικτυακό εργαλείο TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment), ενώ στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση εξωτερικής θερμομόνωσης του κτιρίου. Ωστόσο, επίκεντρο της μελέτης αποτελεί το τρίτο σενάριο, κατά το οποίο τοποθετείται, επιπλέον της εξωτερικής μόνωσης, η διάταξη της δυναμικής μόνωσης και του συστήματος τροφοδοσίας της. Η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά και την απόδοση του συστήματος πραγματοποιείται με χρήση κάποιων βασικών δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs), ενώ η ενεργειακή προσομοίωση, καθώς και η δημιουργία του μοντέλου, υλοποιείται με χρήση του λογισμικού TRNSYS, προσφέροντας ολοκληρωμένη εικόνα για την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου και των επί μέρους συστημάτων. Ας υπογραμμιστεί επίσης, πως παρότι στην παρούσα μοντελοποίηση δεν προσομοιώνεται κάπως, η δυναμική μόνωση αποτελεί σύστημα που δύναται να ενσωματωθεί εύκολα σε συναρμολόγημα κελύφους, έτσι ώστε να παραδίδεται ως προκατασκευασμένο στοιχείο. Συνεπώς, συνδυάζοντας τα οφέλη της μείωσης των θερμικών απαιτήσεων ενός κτιρίου και των προκατασκευασμένων συστημάτων, αποτελεί ένα δυναμικό ισχυρό εργαλείο στη μάχη για την ανάσχεση της κλιματικής αλλαγής.

2. Περιγραφή λογισμικού

Για τη δημιουργία του μοντέλου και την ενεργειακή ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος, χρησιμοποιήθηκε κυρίως η τελευταία έκδοση (18) του λογισμικού δυναμικής ανάλυσης *TRNSYS* και σε μικρότερο βαθμό μερικά συνεργαζόμενα προγράμματα. Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται γενική περιγραφή του *TRNSYS18* με σύντομη παρουσίαση των δυνατοτήτων του, παράθεση των βασικών εξισώσεων που επιλύει, ενώ αναφέρονται και τα εξωτερικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν σε συνεργασία με το *TRNSYS*.

2.1 Εισαγωγή στο *TRNSYS18*

Το *TRNSYS* (TRaNsient SYstem Simulation program) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο και επεκτάσιμο περιβάλλον προσομοίωσης δυναμικής ανάλυσης συστημάτων. Χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία σαράντα χρόνια, από μηχανικούς και ερευνητές ανά την υφήλιο, για τη μοντελοποίηση από απλά οικιακά συστήματα ζεστού νερού μέχρι το σχεδιασμό και την προσομοίωση πολυώροφων κτιρίων, του εξοπλισμού τους, συμπεριλαμβανομένων στρατηγικών ελέγχου, συμπεριφορά κατοίκων, συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κ.α. Επιπλέον, συνιστά λογισμικό ανοιχτού κώδικα, καθώς οι χρήστες του διαθέτουν τον πηγαίο κώδικα (source code) του προγράμματος. Με αυτόν τον τρόπο προωθείται η διαφάνεια των υπολογισμών του, ενισχύεται η εμπιστοσύνη που αποπνέει, ενώ προσφέρεται η δυνατότητα επέκτασης και ρύθμισης των υπάρχοντων μοντέλων, έτσι ώστε να ικανοποιεί της ανάγκες του χρήστη.

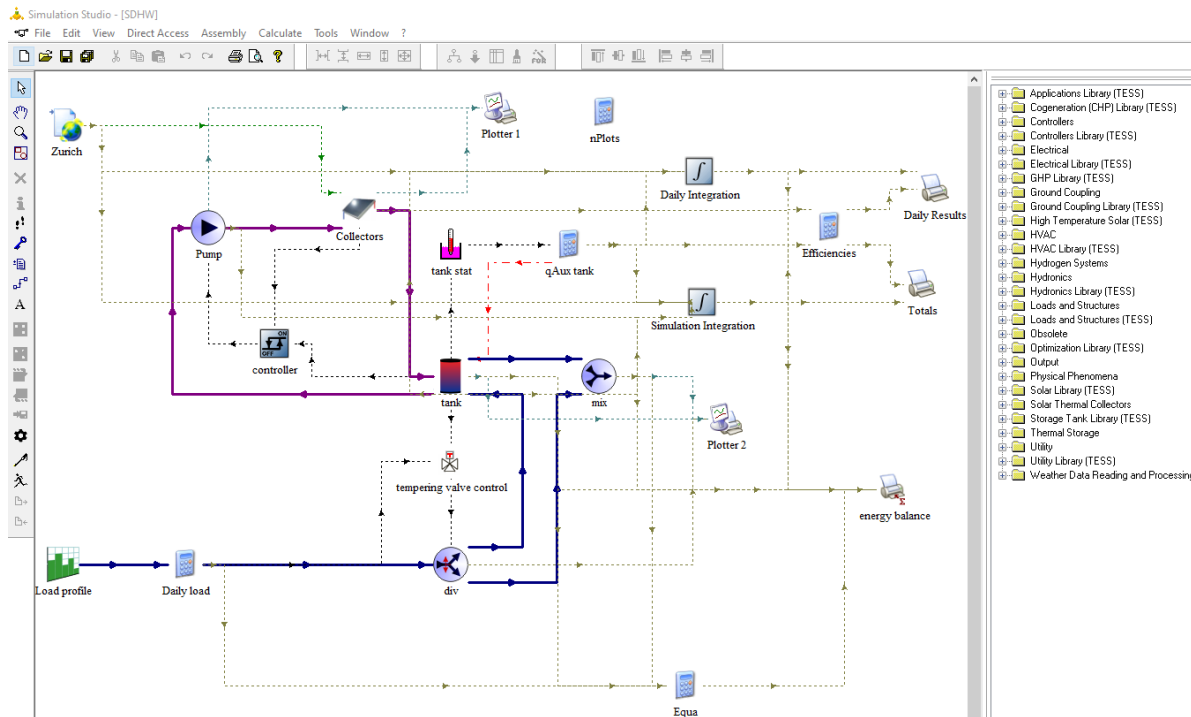
Στην πραγματικότητα το *TRNSYS* αποτελεί πακέτο επί μέρους υποπρογραμμάτων που επικοινωνούν και συνεργάζονται άμεσα. Ακολουθώς, περιγράφονται συνοπτικά τα δύο σημαντικότερα, όπου χρησιμοποιήθηκαν και κατά τη μελέτη της παρούσας εργασίας.

2.1.1 Simulation Studio

Στο περιβάλλον του *Simulation Studio* πραγματοποιείται η μοντελοποίηση και η δυναμική ανάλυση των διάφορων ενεργειακών συστημάτων. Ο χρήστης έχει πρόσβαση και δύναται να διαλέξει υπάρχουσα συστήματα-μοντέλα (Types) από ένα ευρύ πλήθος βιβλιοθηκών. Τα βασικότερα είδη τεχνολογιών που διατίθενται στις υπάρχουσες βιβλιοθήκες και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι:

- Ηλιακά συστήματα, όπως ηλιοθερμικά (solar thermal), φωτοβολταϊκά (PV) και ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά κελύφους (Building Integrated PV).
- Αξιοσημείωτη ποικιλία δοχείων αδρανείας (Storage Tank) με όλες τις απαραίτητες δυνατότητες
- Ηλεκτρομηχανολογικά μηχανήματα για Θέρμανση, ψύξη και κλιματισμό χώρων (ΘΨΚ-HVAC).

Επιπλέον στο *Simulation Studio* πραγματοποιείται η επικοινωνία του συνόλου των συστημάτων και λειτουργιών, συνδέοντας μεταβλητές εισόδου και εξόδου. Μια ακόμη χρήσιμη λειτουργία του συγκεκριμένου περιβάλλοντος, αποτελούν οι μεταβλητές προσομοίωσης (*Simulation Cards*), που βρίσκονται στις σύνθετες ρυθμίσεις. Εκεί, γίνεται να οριστούν σταθερά μεγέθη, μεταβλητές, συναρτήσεις και να πραγματοποιηθούν πράξεις μεταξύ αυτών. Αντιστοιχίζοντας τα εν λόγω μεγέθη με μεταβλητές εισόδων των διάφορων στοιχείων, επιτυγχάνεται η άμεση και ασφαλέστερη ρύθμιση των τιμών τους, από ένα μόνο σημείο. Η συγκεκριμένη λειτουργία αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη, ιδίως σε περιπτώσεις παραμετρικών αναλύσεων, ενώ περισσότερες λεπτομέρειες για το πως χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μοντελοποίηση δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο {3.3}. Στην **Εικόνα 2.1** φαίνεται ένα παράδειγμα του TRNSYS, μοντελοποίησης ενός απλού οικιακού συστήματος ζεστού νερού χρήσης (ZNX), ενώ παρουσιάζονται ταυτόχρονα το κύριο περιβάλλον του *Simulation Studio* και οι διαθέσιμες βιβλιοθήκες (στο δεξί μέρος). Λεπτομέρειες και απεικόνιση του υπό μελέτη συστήματος πραγματοποιείται σε επόμενο κεφάλαιο {3.2}.



Εικόνα 2.1: Κυρίως περιβάλλον *Simulation Studio*

2.1.2 TRNBuild

Στο περιβάλλον του *TRNBuild* ορίζεται το κτιριακό μοντέλο, οι συνθήκες λειτουργίας του, οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου κ.α. Ειδικότερα, είτε δημιουργούνται εντός του υποπρογράμματος θερμικές ζώνες και συνδυάζονται μεταξύ τους, είτε λαμβάνεται

τρισδιάστατη γεωμετρία κτιρίου εισάγοντας κατάλληλο αρχείο (.idf) από εξωτερικό πρόγραμμα. Μεταξύ άλλων, οι βασικές διεργασίες που πραγματοποιούνται εντός του συγκεκριμένου περιβάλλοντος είναι οι παρακάτω.

- Καθορισμός των μεταβλητών εισόδου και των υπολογιζόμενων, στην έξοδο, μεγεθών
- Δημιουργία πολυστρωματικών δομικών στοιχείων (π.χ. τοιχοποιία, εδαφόπλακα, οροφή), αλλά και των υλικών-στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν (π.χ. Μείγμα κονιαμάτων, οπλισμένο σκυρόδεμα, επιτοίχιο δυναμικό στρώμα)
- Εισαγωγή ανοιγμάτων
- Ορισμός συνθηκών λειτουργίας (π.χ. αερισμός, θέρμανση, ψύξη, εσωτερικά θερμικά κέρδη)
- Επεξεργασία θερμικών ζωνών

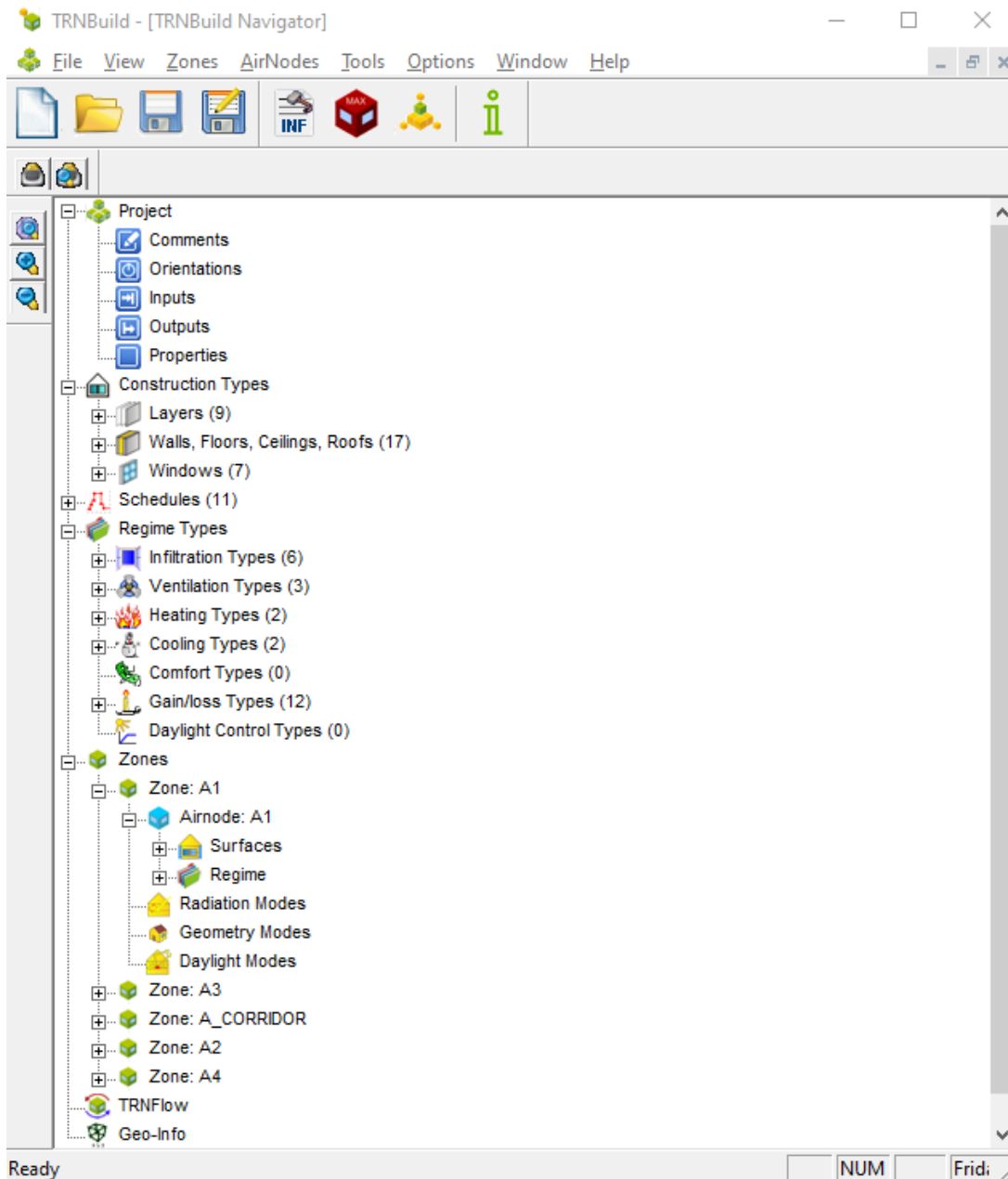
Εκτός από το γεγονός πως αποτελεί ένα πραγματικά φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον (**Εικόνα 2.2**), αποθηκεύοντας σε κατάλληλη μορφή αρχείου (π.χ. .b18), μπορεί να αντιστοιχηθεί άμεσα σε υπάρχον μοντέλο (Type56) στο *Simulation Studio*, ώστε να πραγματοποιηθεί η δυναμική του ανάλυση.

2.2 Συνεργαζόμενα προγράμματα

Το *TRNSYS* είναι συμβατό και προσφέρει τη δυνατότητα συνεργασίας με ποικιλία λογισμικών και γλωσσών προγραμματισμού. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά για το στήσιμο του κτιριακού μοντέλου, το *Trnsys3d-SketchUp* και το *Window 7.7*.

2.2.1 *Trnsys3d-SketchUp*

Το *Trnsys3d* αποτελεί επέκταση (plugin) του *TRNSYS* που επιτρέπει τη συνεργασία με το ευρέως γνωστό λογισμικό *SketchUp*. Είναι βασισμένο στο *OpenStudio*, ένα εγχείρημα συλλογής πρόσθετων λογισμικών (plugin) ανοιχτού κώδικα και επιτρέπει τον σχεδιασμό τρισδιάστατων θερμικών χώρων, επιλογή υλικών, δημιουργία σχέσεων σύζευξης μεταξύ επιφανειών και προσθήκη παραθύρων, στο περιβάλλον του *SketchUp*. Τέλος, μεταχειρίζεται κατάλληλα αρχεία (idf) για εισαγωγή της γεωμετρίας του κτιρίου στο *TRNBuild*, όπως περιγράφηκε και προηγουμένως. Το ίδιο το *SketchUp* αποτελεί λογισμικό τρισδιάστατου σχεδιασμού, χρησιμοποιείται κυρίως για κτιριακά μοντέλα, ενώ προσφέρει τη δυνατότητα απεικόνισης του ανάγλυφου του εδάφους και αναλυτικό υπολογισμό ηλιασμού του κτιρίου βάσει της κίνησης του ηλίου, της γεωμετρίας του μοντέλου και τις σκιάσεις από το περιβάλλοντα χώρο (π.χ. δέντρα ή κτίρια).



Εικόνα 2.2: Περιβάλλον TRNBuild

2.2.2 WINDOW 7.7

Το WINDOW αποτελεί ένα επίσης πολύ χρήσιμο εργαλείο, που δημιουργήθηκε από το εργαστήριο του πανεπιστημίου Berkeley της Καλιφόρνιας. Επιτρέπει τη δημιουργία υαλοπινάκων, πλαισίων και κουφωμάτων. Προσφέρει αρκετές επιλογές για υλικά πλαισίου, αερίων πλήρωσης (π.χ. αέρα, αργό, κρυπτό), ενώ διαθέτει μια ιδιαίτερα ενημερωμένη βιβλιοθήκη επιλογής υαλοπίνακα. Αφού δημιουργηθεί το επιθυμητό

παράθυρο, υπολογίζονται οι ιδιότητες του (g, U), βάσει των χρησιμοποιούμενων διαστάσεων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των διπλών και τριπλών παραθύρων της υφιστάμενης και μονωμένης κατάστασης αντίστοιχα. Η επικοινωνία των λογισμικών, στην προκειμένη περίπτωση, δεν είναι εύκολη στο χρήστη, καθώς χρειάζεται χειροκίνητη δημιουργία αρχείου κειμένου (txt) που εμπεριέχει την ανάλυση του παραθύρου, όπως προέκυψε από το WINDOW7.7 και προσθήκη του εν λόγω αρχείου στις βιβλιοθήκες παραθύρων του TRNSYS.

2.3 Εξισώσεις TRNSYS

Στη σχέση (2.1) φαίνεται η βασικότερη σχέση υπολογισμού της ροής θερμότητας στο εσωτερικό (δείκτης i) ενός θερμαινόμενου χώρου.

$$Q_i = Q_{surf,i} + Q_{inf,i} + Q_{vent,i} + Q_{g,c,i} + Q_{cplg,i} + Q_{solar,i} + Q_{ISHCCI,i} \quad (2.1)$$

Όπου:

- $Q_{surf,i}$: Η θερμότητα από τις εσωτερικές επιφάνειες του κελύφους
- $Q_{inf,i}$: Η ροή θερμότητας λόγω διεισδύσεις εξωτερικού αέρα
- $Q_{vent,i}$: Η ανταλλαγή θερμότητας λόγω ενδεχόμενου αερισμού
- $Q_{g,c,i}$: Η πρόσδοση θερμότητας λόγω εσωτερικών θερμικών κερδών (άνθρωποι, εξοπλισμός, φωτισμός)
- $Q_{cplg,i}$: Η θερμότητα λόγω ανταλλαγών αέρα μεταξύ θερμικών, ή και μη, χώρων
- $Q_{solar,i}$: Η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στη ζώνη από τα παράθυρα
- $Q_{ISHCCI,i}$: Η απορροφούμενη από εσωτερικές συσκευές σκίασης (π.χ. κουρτίνες) η οποία αποδίδεται ως θερμικό κέρδος στο εσωτερικό του χώρου

Για κάθε τοίχο, η μετάδοση θερμότητας στην εσωτερική και εξωτερική του επιφάνεια, δίνονται από τις σχέσεις (2.2) και (2.3) αντίστοιχα.

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (2.2)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,o}^k \quad (2.3)$$

Όπου:

- $q_{s,i}$: Η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου του κελύφους
- $q_{s,o}$: Η ροή θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου του κελύφους
- $T_{s,i}$: Η θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου του κελύφους
- $T_{s,o}$: Η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου του κελύφους

- k : Όρος χρονικού προσδιορισμού (π.χ. για $k=0$ λαμβάνονται τιμές της παρούσας χρονικής στιγμής, ενώ για $k=1$ της προηγούμενης)
- a_s, b_s, c_s, d_s : Οι συντελεστές ροής συνάρτησης μετάδοσης με αγωγή, ορίζονται εσωτερικά από το TRNBuild
- na_s, nb_s, nc_s, nd_s : Το πλήθος των προηγούμενων συντελεστών

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, κρίνεται προτιμότερη η παράθεση του τρόπου υπολογισμού των δυναμικών στοιχείων, από ότι η παρουσίαση περισσότερων, βασικών εξισώσεων. Έτσι, παρουσιάζεται ακολούθως η μεθοδολογία υπολογισμού και προσομοίωσης της δυναμικής μόνωσης.

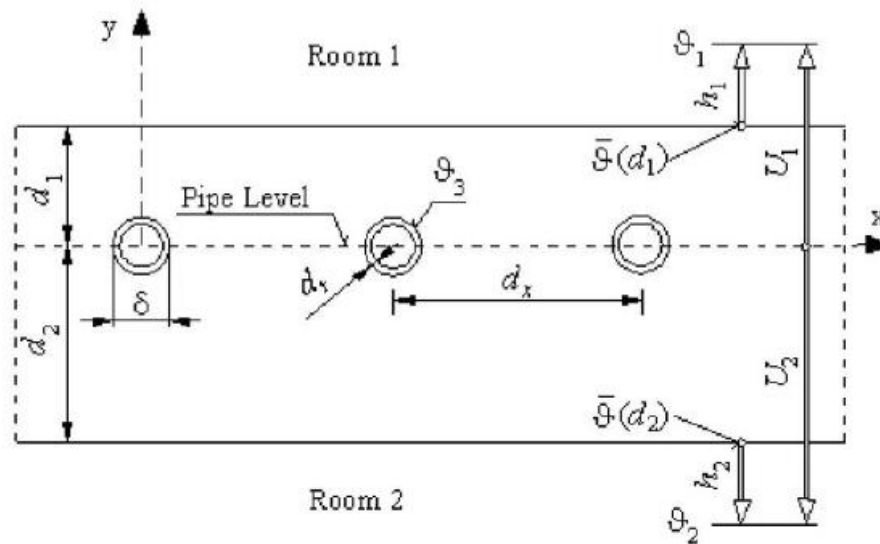
Στα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας πολλών διαστάσεων, χρησιμοποιούνται συνήθως μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως, χρειάζεται η δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος, όπου υπολογίζονται οι φυσικές ιδιότητες κάθε κελιού σε κάθε χρονικό βήμα, συναρτήσει των προηγούμενων. Για επίτευξη υψηλής ακρίβειας απαιτείται και αντίστοιχα πυκνό πλέγμα. Το τελευταίο γεγονός καθιστά τους υπολογισμούς πολύπλοκους οδηγώντας, συνήθως, σε μεγάλους χρόνους υπολογισμού. Επιπλέον, συνήθως είναι απαραίτητο και ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπειρίας για τη συλλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τη δημιουργία λειτουργικού και αποδοτικού πλέγματος. Συνεπώς, κάποιος που δεν διαθέτει την ανάλογη εμπειρία, ενδεχομένως να αντιμετωπίσει επιπλέον δυσκολίες. Για τους παραπάνω λόγους, αναπτύχθηκε μια ισχυρή και ενδιαφέρουσα εναλλακτική μέθοδος υπολογισμού των, θερμικά, δυναμικών δομικών στοιχείων (π.χ. δυναμική μόνωση), η οποία παρουσιάζεται ακολούθως.

Στην **Εικόνα 2.3** φαίνεται η δομή ενός δυναμικού στοιχείου και τα περισσότερα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στις σχέσεις υπολογισμού του, ενώ στην **Εικόνα 2.4** παρουσιάζεται η ροή θερμότητας σε τομή δυναμικού στοιχείου. Η σταθερή λύση της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας στον εσωτερικό χώρο (Room 1) δίνεται από την έκφραση **(2.4)**.

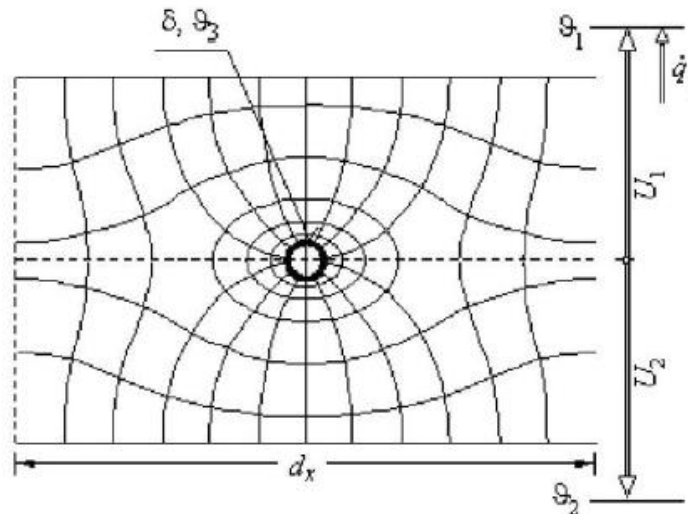
$$\dot{q}_1 = \Phi \cdot U_1(\theta_3 - \theta_1) + (1 - \Phi) \frac{U_1 \cdot U_2}{U_1 + U_2} (\theta_2 - \theta_1) \quad (2.4)$$

Όπου:

- \dot{q}_1 : Η θερμότητα προς το χώρο 1 (Εικόνα 2.3)
- U_1 : Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των στρωμάτων μεταξύ σωληνώσεων και χώρου 1
- U_2 : Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των στρωμάτων μεταξύ σωληνώσεων και χώρου 2
- θ_3 : Η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων
- θ_2 : Η θερμοκρασία στο χώρο 2
- θ_1 : Η θερμοκρασία στον χώρο 1
- Φ : Συντελεστής διόρθωσης των θερμικών ιδιοτήτων λόγω της διάταξης σωλήνων



Εικόνα 2.3: Τομή ενός θερμικά δυναμικού δομικού στοιχείου



Εικόνα 2.4: Ροή θερμότητας σε τομή ενός δυναμικού στοιχείου

Για τη διάταξη των σωλήνων υπολογίζεται ο συντελεστής διόρθωσης, όπως φαίνεται ακολούθως.

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_b \cdot \Gamma}{d_x \cdot (U_1 + U_2)} \quad (2.5)$$

Όπου:

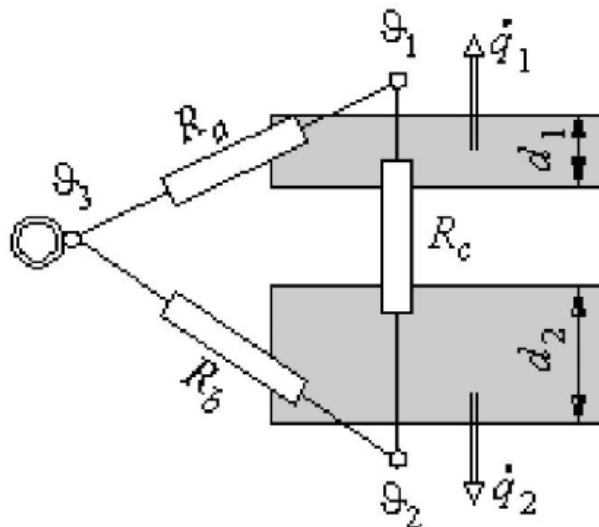
- d_x : Η εξωτερική διάμετρος των σωλήνων
- λ_b : Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού των σωλήνων
- Γ : Συντελεστής ο οποίος υπολογίζεται βάσει της (2.6)

$$\Gamma = \left[\ln \left(\frac{d_x}{\pi \cdot \delta} \right) + \frac{2\pi \cdot \lambda_b}{d_x \cdot (U_1 + U_2)} + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{g_1(s) + g_2(s)}{s} \right]^{-1} \quad (2.6)$$

Όμοια με την (2.4), υπολογίζεται και η ροή θερμότητας στο χώρο 2, από τη σχέση (2.7).

$$\dot{q}_2 = \Phi \cdot U_2(\theta_3 - \theta_2) + (1 - \Phi) \frac{U_1 \cdot U_2}{U_1 + U_2} (\theta_1 - \theta_2) \quad (2.7)$$

Οι εξισώσεις (2.4) και (2.7) μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα κύκλωμα θερμικών αντιστάσεων, διάταξης τριγώνου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.5**.



Εικόνα 2.5: Κύκλωμα αντιστάσεων, τριγωνικής διάταξης

Για τις θερμικές αντιστάσεις της τριγωνικής διάταξης, ισχύουν τα παρακάτω.

$$R_a = \frac{1}{\Phi \cdot U_1} \quad (2.8)$$

$$R_b = \frac{1}{\Phi \cdot U_2} \quad (2.9)$$

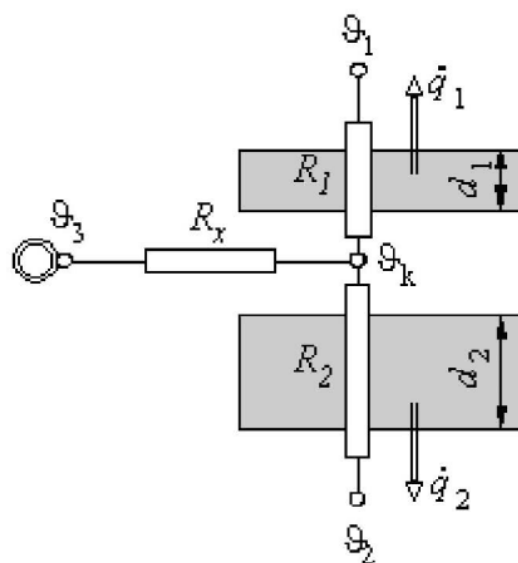
$$R_c = \frac{U_1 + U_2}{U_1 \cdot U_2(1 - \Phi)} \quad (2.10)$$

Το τριγωνικό κύκλωμα δύναται να μετασχηματιστεί σε αντίστοιχο κύκλωμα αστέρα (Εικόνα 2.6), χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις.

$$R_1 = \frac{R_a \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c} \Rightarrow R_1 = \frac{1}{U_1} \quad (2.11)$$

$$R_2 = \frac{R_b \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c} \Rightarrow R_2 = \frac{1}{U_2} \quad (2.12)$$

$$R_x = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_c} \Rightarrow R_x = \frac{(1 - \Phi)}{\Phi \cdot (U_1 + U_2)} \quad (2.13)$$



Εικόνα 2.6: Κύκλωμα αντιστάσεων, διάταξης αστέρα

Ο τελευταίος μετασχηματισμός είναι πολύ ουσιώδης, καθώς πλέον η επιρροή των σωληνώσεων μπορεί να εκφραστεί με μία αντίσταση (R_x). Ισοδύναμα, η αντίσταση κάθε δομικού στοιχείου εξαρτάται, τώρα, αποκλειστικά από τα θερμικά του χαρακτηριστικά (U). Παρά την πολυδιάστατη φύση του προβλήματος, αποδεικνύεται τελικά πως η μεταφορά θερμότητας και στα δύο μισά του κατασκευαστικού στοιχείου, γίνεται να υπολογιστούν με εξίσωση μονοδιάστατης θερμικής αγωγιμότητας.

Με αντικατάσταση της (2.5) στην (2.13) και έπειτα από μερικές μετατροπές προκύπτει:

$$R_x = \frac{d_x \cdot \left[\ln \left(\frac{d_x}{\pi \cdot \delta} \right) + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{g_1(s) + g_2(s)}{s} \right]}{2\pi \cdot \lambda_b} \quad (2.14)$$

Ο όρος αθροίσματος της (2.14), μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αμελητέος, όταν ισχύουν οι αναλογίες:

$$\frac{d_i}{d_x} > 0.3, \quad \frac{\delta}{d_x} > 0.2 \quad (2.15)$$

Τότε, η (2.14) απλοποιείται στην:

$$R_x = \frac{d_x \cdot \ln \left(\frac{d_x}{\pi \cdot \delta} \right)}{2\pi \cdot \lambda_b} \quad (2.16)$$

Τελικά, η αντίσταση R_x εξαρτάται μόνο από δύο γεωμετρικές μεταβλητές (εξωτερική διάμετρος δ και απόσταση μεταξύ των κέντρων γειτονικών σωλήνων d_x) και από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού (λ_b). Ο μετασχηματισμός του κυκλώματος από τρίγωνο σε αστέρα πρόσθεσε μια επιπλέον θερμοκρασία (θ_k) για κεντρικό σημείο του δικτύου αστέρα. Η τελευταία θερμοκρασία αντιπροσωπεύει τη μέση θερμοκρασία στο επίπεδο των σωλήνων ($y=0$) και ονομάζεται θερμοκρασία πυρήνα (Core Temperature).

Μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται, επίσης, μεταξύ διακινούμενου μέσου (νερό) και εσωτερικής επιφάνειας σωλήνα, μέσω συναγωγής και στα τοιχώματα της σωλήνωσης λόγω αγωγής. Οι δύο αντιστάσεις των τελευταίων ροών, δύναται να αδιαστατοποιηθούν ($d_x \cdot l$). Η θερμική αντίσταση σε συναγωγή, για κυλινδρικές επιφάνειες δίνεται από τον τύπο (2.17).

$$R_w = \frac{d_x}{h_w(\delta - 2d_r) \cdot \pi} \quad (2.17)$$

Όπου:

- R_w : Η αντίσταση στη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής μεταξύ διακινούμενου μέσου και σωλήνωσης
- d_r : Το πάχος των σωλήνων
- h_w : Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής. Για τυρβώδεις ροές υπολογίζεται, με επαρκή ακρίβεια, μέσω της σχέσης (2.18).

$$h_w = 2040(1 + 0.015 \cdot \theta_w) \cdot \frac{w^{0.87}}{(\delta - 2 \cdot d_r)^{0.13}}, \quad Re \geq 2300 \quad (2.18)$$

Έτσι, πραγματοποιώντας τις απαραίτητες αντικαταστάσεις (υπόθεση 20°C θερμοκρασίας νερού), προκύπτουν οι τιμές των δύο θερμικών αντιστάσεων, όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις.

$$R_w = \frac{d_x^{0.13}}{8.0 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{\delta - 2 \cdot d_r}{\dot{m}_{sp} \cdot l} \right)^{0.87} \quad (2.19)$$

$$R_r = \frac{d_x \cdot \ln \left(\frac{\delta}{\delta - 2 \cdot d_r} \right)}{2 \cdot \lambda_r \cdot \pi} \quad (2.20)$$

Όπου:

- R_w : Η αντίσταση στη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής μεταξύ διακινούμενου νερού και σωλήνωσης
- R_r : Η αντίσταση στη ροή θερμότητας λόγω αγωγής εντός του κελύφους των σωλήνων
- \dot{m}_{sp} : Η ειδική παροχή μάζας νερού, εντός του δυναμικού στρώματος. Ανηγμένη στην επιφάνεια (m^2) εγκατεστημένου δικτύου σωλήνων.
- λ_r : Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού

Όσες εκτιμήσεις πραγματοποιήθηκαν παραπάνω, αφορούν σε μία δισδιάστατη διατομή (x-y) του κατασκευαστικού στοιχείου, οπότε σε σταθερή θερμοκρασία νερού. Ωστόσο, η εν λόγω θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά μήκος της σωλήνωσης, καθώς αποβάλλει ή απορροφά θερμότητα. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν τα ανωτέρω, για τη θερμοκρασία του διακινούμενου μέσου, ισχύει:

$$\dot{m} \cdot C_{p_w} \cdot d\theta_w(z) = \frac{\Phi \cdot [U_1(\theta_w(z) - \theta_1) + U_2(\theta_w(z) - \theta_2)]}{1 + \Phi \cdot (U_1 + U_2) \cdot (R_w + R_r)} \cdot d_x \cdot d_z \quad (2.21)$$

Όπου:

- $d\theta_w(z)$: Η κλίση της θερμοκρασιακής μεταβολής του νερού, κατά τον διαμήκη άξονα (z)
- C_{p_w} : Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού
- \dot{m} : Η διακινούμενη ροή μάζας
- $\theta_w(z)$: Η θερμοκρασία του νερού συναρτήσει της θέσης (z)

Ολοκληρώνοντας την τελευταία, προκύπτει η μέση τιμή της θερμοκρασίας νερού, όπως φαίνεται στη (2.22). Επιπλέον, μπορεί να μοντελοποιηθεί και η αντίσταση κατά τον διαμήκη άξονα ροής του νερού (z), όπως φαίνεται στη σχέση (2.23).

$$\bar{\theta}_w = \frac{U_1 \cdot \theta_1 + U_2 \cdot \theta_2}{U_1 + U_2} + \Delta\theta_{lg} \quad (2.22)$$

$$R_z = \frac{1}{\dot{m}_{sp} \cdot C_{p_w} \left\{ 1 - \exp \left[-(\dot{m}_{sp} \cdot C_{p_w} \cdot R_{eq})^{-1} \right] \right\}} - R_{eq} \quad (2.23)$$

Όπου:

- $\bar{\theta}_w$: Η μέση θερμοκρασία του νερού στο δυναμικό στρώμα (z)
- $R_{eq} = \left(R_w + R_r + R_x + \frac{1}{U_1 + U_2} \right)$

Όλες οι αντιστάσεις μέχρι τη θερμοκρασία στο μέσο επίπεδο των σωλήνων (θ_k) συνδέονται σε σειρά, συνεπώς μπορούν να αθροιστούν σε μία συνολική αντίσταση. Έτσι, με χρήση της (2.23) προκύπτει η σχέση υπολογισμού της συνολικής αντίστασης (R_{tot}).

$$R_t = \frac{1}{\dot{m}_{sp} \cdot C_{p_w} \left\{ 1 - \exp \left[-(\dot{m}_{sp} \cdot C_{p_w} \cdot R_{eq})^{-1} \right] \right\}} - \frac{1}{U_1 + U_2} \quad (2.24)$$

Η ανωτέρω, φανερώνει εκθετική αλλαγή της θερμοκρασίας για χαμηλές τιμές ειδικής παροχής, ενώ σχεδόν γραμμική συμπεριφορά για ικανοποιητικά ψηλές τιμές. Ακόμη, ο όρος $\frac{1}{U_1 + U_2}$ αφορά σε στατική κατάσταση και απαιτεί περαιτέρω εμβάθυνση για πραγματοποίηση δυναμικής ανάλυσης. Ωστόσο, παραλείποντας, ως αμελητέο, τον προηγούμενο όρο, επιτυγχάνεται γραμμικοποίηση της (2.24) και δύναται να πραγματοποιηθεί δυναμική ανάλυση. Έτσι, η απλοποιημένη μορφή της συνολικής αντίστασης θα δίνεται από τη (2.25).

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot \dot{m}_{sp} \cdot C_{p_w}} + R_w + R_r + R_x \quad (2.25)$$

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, για να έχει νόημα η τελευταία απλοποίηση και να μην εισάγει σημαντικό σφάλμα στους υπολογισμούς, απαιτείται ο περιορισμός της ειδικής παροχής (\dot{m}_{sp}) από μία ελάχιστη επιτρεπτή τιμή. Έτσι, ορίστηκε έπειτα από σχετική μελέτη των δημιουργών του λογισμικού, η οριακή συνθήκη της (2.26), με ικανοποίηση της οποίας το σφάλμα δεν κρίνεται σημαντικό.

$$\dot{m}_{sp} \cdot C_{p_w} (R_w + R_r + R_x) \geq \frac{1}{2} \quad (2.26)$$

Σε περιπτώσεις που η παραπάνω δεν μπορεί να ικανοποιηθεί για μια εφαρμογή, χρειάζεται η διαίρεση του συστήματος σε μικρότερα τμήματα (n). Μια τέτοια κίνηση θα έλυne το πρόβλημα, καθώς για n αριθμό επί μέρους τμημάτων, η (2.26) μπορεί να μετασχηματιστεί στη (2.27).

$$\dot{m}_{sp} \cdot C_{p_w} \cdot n \cdot (R_w + R_r + R_x) \geq \frac{1}{2} \quad (2.27)$$

Ο περιορισμός στην ειδική παροχή μάζας του διακινούμενου ρευστού που περιγράφηκε ανωτέρω, χρειάστηκε να αντιμετωπιστεί και στην μοντελοποίηση της δυναμικής μόνωσης. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο δημιουργίας του μοντέλου δίνονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο {3}.

3. Μοντελοποίηση και διαστασιολόγηση συστήματος

Το παρόν κεφάλαιο επιδιώκει την κατανοητή περιγραφή της δημιουργίας του τελικού συστήματος, των σταδίων από τα οποία χρειάστηκε να περάσει, όπως και τυχόν αδυναμίες και ιδιαιτερότητές του. Με θεμέλιο το εν λόγω μοντέλο, δύναται να πραγματοποιηθούν αναλύσεις και να αποκτηθεί γνώση που ξεπερνά ακόμη και το σκοπό της παρούσας εργασίας. Ας σημειωθεί, πως η θέρμανση και ψύξη των χώρων πραγματοποιείται από ιδεατό και ιδανικό σύστημα, απεριόριστων θερμικών δυνατοτήτων, συνεπώς οι θερμαινόμενες ζώνες δεν ξεπερνούν καθόλου τα όρια θερμικής άνεσης. Σημαντικότερα σημεία της ενότητας, αποτελούν, η προσομοίωση του συστήματος μόνωσης, η δημιουργία της κυκλώματος τροφοδοσίας-υποστήριξης, ο συνδυασμός των ανωτέρω και η διαστασιολόγησή τους.

3.1 Δυναμική μόνωση

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η προς μελέτη τεχνολογία αφορά σε σύστημα επιτοίχιων σωληνώσεων, οι οποίες τοποθετούνται ανάμεσα στην εξωτερική θερμοπρόσοψη και στην τοιχοποιία του κτιριακού κελύφους. Απαραίτητη κρίνεται η κατανόηση πως η δυναμική μόνωση (Active Insulation) δεν μελετάται ως σύστημα θέρμανσης ή ψύξης του χώρου, αλλά ως μία μέθοδος επιπλέον θερμομόνωσης. Ως σκοπός της ορίζεται η αποκοπή της ροής θερμότητας μεταξύ θερμαινόμενων χώρων και εξωτερικού περιβάλλοντος, περιορισμός, δηλαδή, των θερμικών απωλειών και κατά επέκταση μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη. Από τη θεωρία μετάδοσης της θερμότητας, αλλά και από τη καθημερινή ζωή, έχει καταστεί γνωστό πως μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο μέσων πραγματοποιείται εφόσον υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά. Συνεπώς, η λογική της λειτουργίας του συστήματος βασίζεται στη δημιουργία αδιαβατικής συνθήκης στα κάθετα, αδιαφανή εξωτερικά, δομικά στοιχεία του κτιρίου. Ειδικότερα, διακινώντας νερό συγκεκριμένης θερμοκρασίας διαμέσου των σωλήνων, καθίσταται δυνατό να επιβληθεί θερμοκρασιακή βαθμίδα, τέτοια ώστε η εσωτερική επιφάνεια των εξωτερικών τοίχων και ο αέρας των αντίστοιχων θερμαινόμενων χώρων να χαρακτηρίζονται από την ίδια, με ενδεχόμενη μικρή απόκλιση, θερμοκρασία.

Εφόσον ο σκοπός και η λειτουργία της δυναμικής μόνωσης είναι πλέον κατανοητά, μπορεί να παρουσιασθεί και ο τρόπος μοντελοποίησής της. Η δημιουργία του μοντέλου και η ενεργειακή ανάλυσή του πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού *TRNSYS18*, το οποίο παρουσιάστηκε ικανοποιητικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο πυρήνας του εξεταζόμενου συστήματος προσομοιώνεται σχεδόν εξολοκλήρου στο *TRNBuild*, ένα από τα επί μέρους χρήσιμα λογισμικά του *TRNSYS18*, το οποίο προσφέρει την επιλογή δημιουργίας δυναμικού στοιχείου-στρώματος (*Active Layer*). Η συγκεκριμένη δυνατότητα υπάρχει στον κατάλογο των στρωμάτων (*Layers*) και δύναται, στη συνέχεια, να προστεθεί εξωτερικά, εσωτερικά ή ακόμη και σε ενδιάμεσο σημείο ενός πολυστρωματικού τοίχου του καταλόγου αδιαφανών στοιχείων (*Walls, Floors, Ceilings, Roofs*). Κατά τη δημιουργία του δυναμικού στοιχείου-

στρώματος (*Active Layer*) χρειάζεται να οριστούν από το χρήστη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης των σωλήνων. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.1**, προσδιορίζεται η απόσταση τοποθέτησης των σωλήνων (κέντρο από κέντρο), η εξωτερική διάμετρος, το πάχος και η αγωγιμότητα του υλικού που απαρτίζει τα τοιχώματα των αγωγών, η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρέοντος ρευστού (νερού) μπορεί να ληφθεί είτε ως σταθερή τιμή, είτε μεταβαλλόμενη, για παράδειγμα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Στο κατώτατο μέρος μπορεί να δοθούν προαιρετικά τα ποσά ανανεώσιμης και μη ανανεώσιμης ενέργειας εμποτισμένης στα υλικά. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη σε ανάλυση υλικών και ανθρακικού αποτυπώματος, αλλά δεν αφορά τη συγκεκριμένη μελέτη.

Layer Type Manager

layer type: ACTIVE_INSULATION

Definition

Massive Layer
 Massless Layer
 Active Layer
 Chilled Ceiling

specific heat coefficient of water: 4.18 kJ / kg K
 pipe spacing (center to center): 0.1 m
 pipe outside diameter: 0.017 m
 pipe wall thickness: 0.002 m
 pipe wall conductivity: 1.26 kJ / h m K

expert mode

Embodied Energy (optional data, not required for thermal simulation)

total renewable primary energy: 0 MJ / m²
 total non-renewable primary energy: 0 MJ / m²

Εικόνα 3.1: Παράθυρο δημιουργίας δυναμικού στρώματος (Active Layer)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης επηρεάζουν, όπως είναι λογικό, την ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος, τη διαστασιολόγησή του και τους υπολογιστικούς περιορισμούς που εισαγάγει το λογισμικό. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό πως στην περίπτωση δύο διαφορετικών διατάξεων με ίδια χαρακτηριστικά εισόδου (Θερμοκρασία και παροχή διακινούμενου ρευστού) το σύστημα με το πυκνότερο, εκ των δύο, πλέγμα τοποθέτησης θα διαθέτει τη δυνατότητα αποβολής ή

παραλαβής μεγαλύτερης ποσότητας προς ή από το θερμαινόμενο χώρο. Το μέγεθος της εξωτερικής διαμέτρου των αγωγών επηρεάζει άμεσα το πάχος του δομικού στοιχείου, αλλά και τις γραμμικές απώλειες πίεσης του δικτύου. Εν προκειμένω, το σημαντικότερο είναι να αποφευχθούν ακραίες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα θα μπορούσε να είναι ένα πολύ αραιό πλέγμα, το οποίο θα επέφερε ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιών στην εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου ή μια υψηλή τιμή εξωτερικής διαμέτρου που θα οδηγούσε σε αρκετά ογκώδες τοίχο και θα απαιτούσε μεγάλη αντλία κυκλοφορίας. Για την αποφυγή μιας τέτοιας περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές για εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης και πραγματοποιήθηκε σχετική παραμετρική ανάλυση, παρουσιαζόμενη σε επόμενο κεφάλαιο.

Αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία του δυναμικού στρώματος, τοποθετήθηκε εξωτερικά των στοιχείων που ορίζουν το κτιριακό κέλυφος. . Απαραίτητη θεωρείται η κάλυψη των σωλήνων από κατάλληλο υλικό και από τις δύο μεριές τους, τόσο κατά την εφαρμογή τους στην πραγματικότητα όσο και για τη μοντελοποίησή του, καθώς διαφορετικά το λογισμικό δεν επιτρέπει τον ορισμό του δυναμικού, πλέον, τοίχου. Η προαναφερθείσα επικάλυψη πραγματοποιείται συνήθως με κάποιο επίχρισμα σοβά, αλλά δεν απαγορεύεται να υλοποιηθεί και με άλλο μέσο. Επιπλέον, επιβάλλεται από το λογισμικό τα στρώματα επικάλυψης να αποτελούνται, εκατέρωθεν του δυναμικού στοιχείου, από το ίδιο υλικό. Περιορισμός τίθεται ακόμη και στη διάσταση των στρωμάτων επικάλυψης, καθώς χρειάζεται να διαθέτει αρκετό πάχος ώστε να καλυφθούν ικανοποιητικά οι σωληνώσεις, αλλά ταυτόχρονα να μην είναι και υπερβολικά ογκώδες, διαδραματίζοντας επιπλέον ρόλους εκτός της επικάλυψης. Η αριθμητική έκφραση του παραπάνω περιορισμού ποικίλει και ανάλογα με την διάταξη των σωλήνων, με συνηθέστερα εύρη αυτά των $[0.0085, 1]m$ και $[0.03, 1]m$. Στο εγχειρίδιο του *TRNSYS18* προτείνεται για αρχή το πάχος του στρώματος επικάλυψης να είναι μεγαλύτερο ή ίσο της απόστασης των σωλήνων, πολλαπλασιασμένης με τον συντελεστή 0.3 και τελικά να ρυθμίζεται το πάχος του στρώματος μεταξύ του δυναμικού στοιχείου και της μόνωσης ως μεγαλύτερο ή ίσο της εξωτερικής διαμέτρου σωλήνα, διαιρεμένη δια δύο.

Έτσι, δημιουργήθηκαν δύο τύποι τοιχοποιίας με δυναμικό στρώμα, ένας για τον φέρων οργανισμό του κτιρίου και ένας για τον μη φέρων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η αντιστοίχισή τους με τους εξωτερικούς τοίχους του κάθε θερμαινόμενου χώρου, δηλαδή του κάθε διαμερίσματος. Έπειτα, η διαδικασία ολοκληρώνεται ορίζοντας και την τροφοδοσία της δυναμικής μόνωσης, βάσει της θερμοκρασίας και της παροχής μάζας του νερού κατά την είσοδό του στο κάθετο δομικό στοιχείο. Για λόγους ευκολίας και ευελιξίας οι τιμές δεν δόθηκαν ως αριθμοί, αλλά ως μεταβλητές εισόδου, οριζόμενες εξωτερικά, έτσι ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία της παραμετρικής ανάλυσης (βλέπε ενότητα 3.3). Ο αριθμός των βρόχων δεν επηρεάζει την ενεργειακή ανάλυση και αφορά κυρίως στις απώλειες πίεσης. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.2**, εκτός από τη θερμοκρασία και την απόλυτη παροχή μάζας, ορίζεται και η ειδική παροχή μάζας (m''), ανηγμένη στα

τετραγωνικά μέτρα επιφάνειας εγκατεστημένου δυναμικού στρώματος (Active Layer) του εκάστοτε τοίχου.

Definition Active Layer - ACTIVE_INSULATION (surface: 2)

Definition Active Layer

inlet temperature: °C inlet mass flow rate: kg / h
 number of fluid loops: gain: kJ / h

Min. Inlet Mass Flowrate

total area of connected surfaces: m²

	specific value	absolute value
min. desired inlet mass flowrate (>0):	<input type="text" value="10"/> kg / h m ²	<input type="text" value="48.00"/> kg / h
min. allowed inlet mass flowrate (>0):	<input type="text" value="7.52"/> kg / h m ²	<input type="text" value="36.10"/> kg / h

Serial connection of surfaces with active layers

"Autosegmentation" subdivides the active surface into segments. Segment surfaces are created and connected in series automatically.

show calculation surface no. of segments:

contributed by: **EMPA** Materials Science & Technology

Εικόνα 3.2: Παράθυρο τροφοδοσίας του δυναμικού στρώματος (Active Layer)

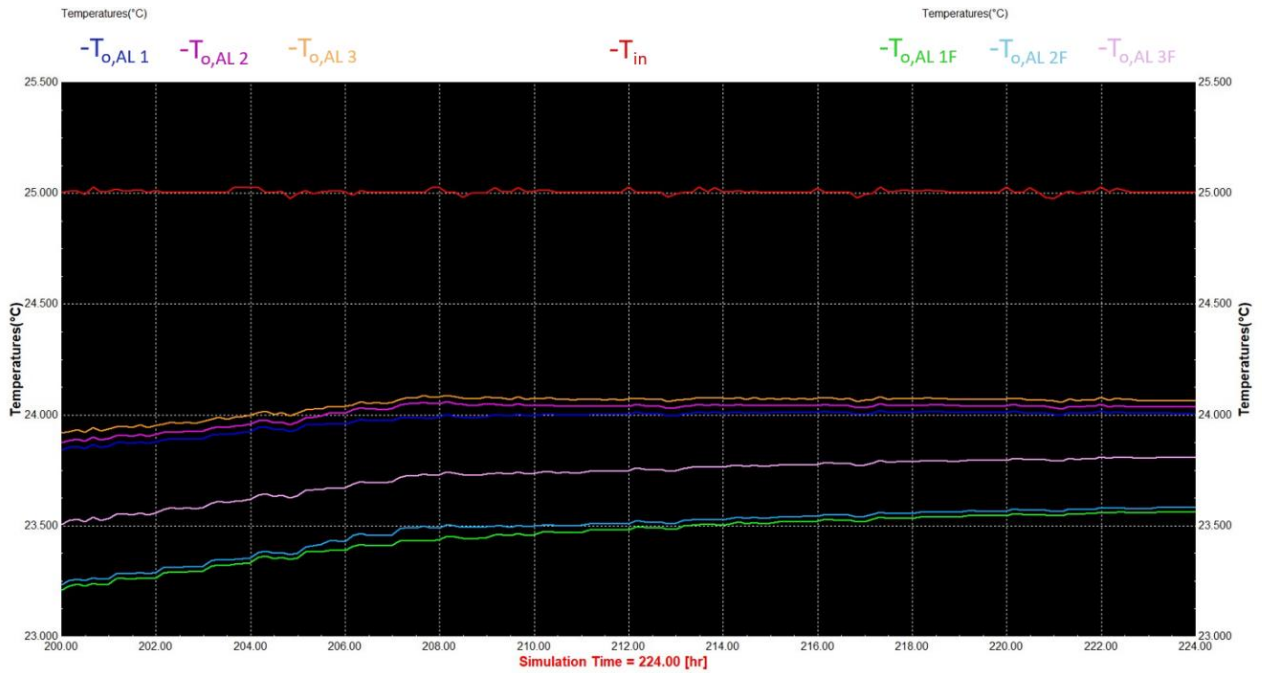
Η ειδική αυτή παροχή περιορίζεται σε ένα εύρος τιμών, μεγαλύτερων της ελάχιστης επιτρεπτής, την οποία υπολογίζει και εμφανίζει το ίδιο το λογισμικό. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της **Εικόνα 3.2**, η τιμή της ειδικής παροχής μάζας έχει υπολογιστεί στα $7.52 \frac{kg}{h \cdot m^2}$. Αξίζει να σημειωθεί πως ο συγκεκριμένος περιορισμός επιβάλλεται μόνο στην περίπτωση που χρειάζονται υπολογισμοί για τη δυναμική λειτουργία του στοιχείου. Έτσι, δεν δημιουργείται πρόβλημα για μηδενική παροχή μάζας, όπου δηλαδή δεν διακινείται νερό στους τοίχους και επικρατεί στατική κατάσταση. Από τη στιγμή όμως που θα αρχίσει το νερό να κυκλοφορεί, θα πρέπει αυτό να γίνεται με ειδική παροχή μάζας μεγαλύτερη της ελάχιστης επιτρεπτής. Ο προαναφερθείς περιορισμός δεν έχει κάποια σπουδαία φυσική σημασία, αλλά αφορά στην υπολογιστική μέθοδο που ακολουθεί το λογισμικό, προς επίλυση του δυναμικού συστήματος. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται και στο εγχειρίδιο επιβάλλεται ελάχιστη επιτρεπτή τιμή της ειδικής παροχής, έτσι ώστε να διαβεβαιωθεί εγγυημένα η δυνατότητα γραμμικοποίησης της εκθετικής καμπύλης ανάμεσα στην θερμοκρασία εισόδου και εξόδου από το δυναμικό στρώμα. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις εξισώσεις και μεθόδους επίλυσης του λογισμικού, καθώς και τις παραδοχές και περιορισμούς του παρουσιάζονται στο προηγούμενο, περί *TRNSYS*, κεφάλαιο {Error! Reference source not found.2.3}. Άλλη μια ένδειξη που συνηγορεί στην αδυναμία

απόδοσης φυσικής σημασίας στον παραπάνω περιορισμό, αποτελεί η δυνατότητα ουσιαστικής εξάλειψής του, μέσω κατάτμησης του δομικού στοιχείου, μειώνοντας έτσι τα τετραγωνικά μέτρα αναφοράς. Στην πραγματικότητα προσφέρεται από το ίδιο το πρόγραμμα η δυνατότητα αυτόματης υποδιαίρεσης του τοίχου σε μικρότερα τμήματα και σύνδεσής τους σε σειρά. Δυστυχώς για την περίπτωση μας, η συγκεκριμένη λειτουργία είναι απενεργοποιημένη, καθώς τα δεδομένα της γεωμετρίας και τοπογραφίας του κτιρίου εισάχθηκαν από αρχείο προγράμματος τρισδιάστατης (3D) απεικόνισης. Η κατάτμηση των επιφανειών και η σύνδεσή τους σε σειρά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χειροκίνητα, αλλά εκτός από το υψηλό φόρτο εργασίας που θα προσέθετε, θα καθιστούσε αυτόματα το ίδιο το μοντέλο πολλαπλάσια πιο περίπλοκο, δύσχρηστο, ενώ θα στοίχιζε σημαντικά και σε υπολογιστικό κόστος. Εφόσον, λοιπόν, το θερμικό αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις θα ήταν το ίδιο (το κάθε τμήμα θα συνδεόταν σε σειρά με το προηγούμενο και το επόμενο του), προτιμήθηκε η αύξηση της διακινούμενης παροχής σε τιμή ουσιαστικά ίση με της ελάχιστης επιτρεπτής. Παραμετρική μελέτη σχετικά με την διακινούμενη παροχή, παρουσιάζεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο {5.2}.

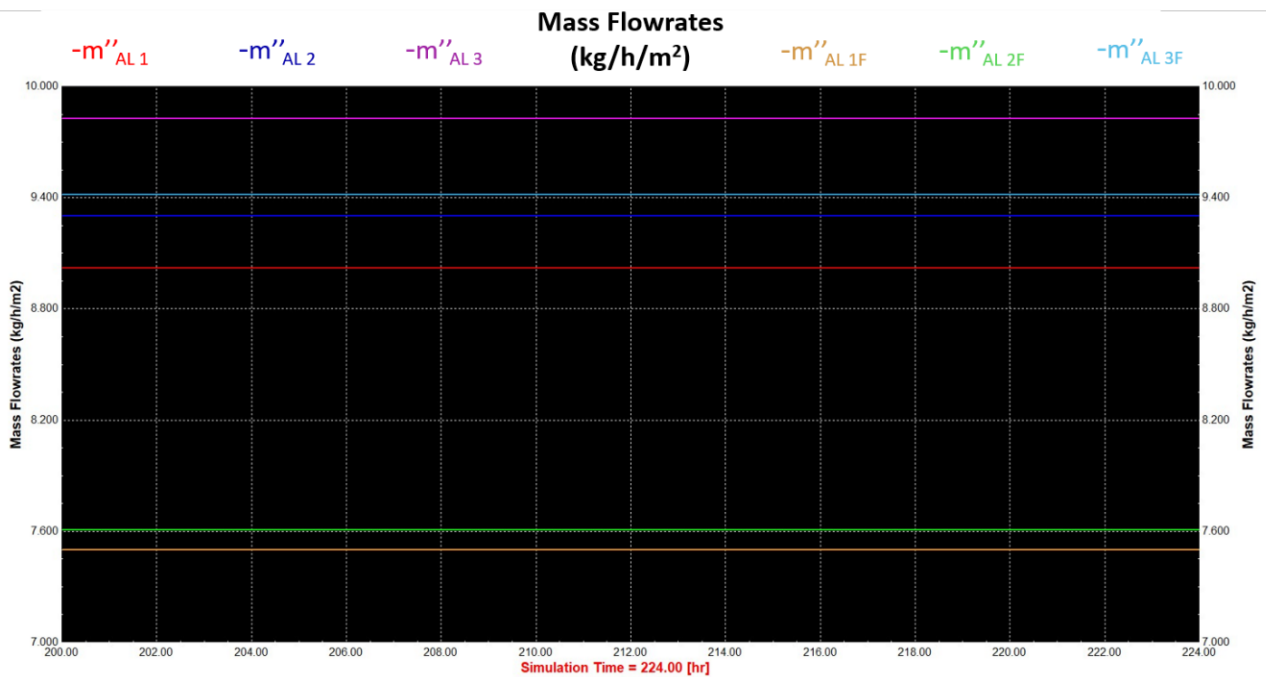
Ας διευκρινιστεί πως η θερμοκρασία του νερού εισόδου στις σωληνώσεις είναι κοινή για όλους τους τοίχους όλων των διαμερισμάτων. Αν και η ειδική παροχή μάζας νερού (ανηγμένη στα εγκατεστημένα τετραγωνικά) ήταν κοινή σε όλες τις περιπτώσεις, τότε θα αναμενόταν και σχεδόν ίδια θερμοκρασία νερού στην έξοδό του από το δυναμικό στρώμα. Εν προκειμένω, οι υπολογιζόμενες τιμές της ελάχιστης επιτρεπόμενης παροχής μάζας διαφέρουν για κάθε δομικό στοιχείο εφαρμογής του συστήματος. Στο

Σχήμα 3.1 φαίνονται οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού (σε °C), από κάθε δυναμικό στρώμα ενός διαμερίσματος, όπως αυτές απεικονίζονται στο διάγραμμα του λογισμικού Simulation Studio. Στα εικονιζόμενα αποτελέσματα παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά, θερμοκρασιών εξόδου, μικρότερη του 0.5°C, για μια τυπική μέρα Ιανουαρίου. Όπως, ήδη, προαναφέρθηκε, οι αποκλίσεις αυτές προκύπτουν κυρίως λόγω διαφορετικών ειδικών παροχών μάζας, αλλά και εξαιτίας των διαφορετικών θερμικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας. Έτσι, για ίδιες ειδικές παροχές, οι τοίχοι με φέρων οργανισμό (1F, 2F, 3F) χαρακτηρίζονται από υψηλότερη τιμή συντελεστή θερμοπερατότητας (U), προκαλώντας μεγαλύτερη ροή θερμότητας μεταξύ θερμικής ζώνης και δομικού στοιχείου, η οποία με τη σειρά της επιφέρει μια σχετικά μεγαλύτερη θερμοκρασιακή πτώση στην έξοδο του νερού. Αντίστοιχα, για ίδιο δομικό στοιχείο, συνεπώς και ίδια ροή θερμότητας, μεγαλύτερη τιμή ειδικής παροχής μάζας θα μεταφραζόταν σε σχετικά χαμηλότερη θερμοκρασιακή πτώση στο νερό εξόδου, καθώς τα δύο μεγέθη συνδέονται αντιστρόφως ανάλογα. Για λόγους πληρότητας, στο

Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι προαναφερθείσες τιμές ανηγμένης παροχής μάζας (σε kg/h/m²) για κάθε τοίχο του διαμερίσματος, κατά την ίδια τυπική ημέρα Ιανουαρίου. Λαμβάνοντας υπόψιν τις δύο προαναφερθείσες μεταβλητές (U, m²), εξηγείται λογικά και κατανοείται η θερμοκρασιακή απόκριση στην έξοδο του νερού από τα κάθετα δομικά στοιχεία.



Σχήμα 3.1: Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από το δυναμικό στρώμα(Active Layer)



Σχήμα 3.2: Ειδική παροχή μάζας (kg/h/m²) του κάθε τοίχου

Έπειτα από τον καθορισμό των ανωτέρω, η μοντελοποίηση του συστήματος δυναμικής μόνωσης ολοκληρώνεται, λαμβάνοντας όμως ιδανικές συνθήκες στην είσοδό του ($T_{\text{εις,ΔΜ}}, m_{\text{εις,ΔΜ}}$). Έτσι, τα επόμενα βήματα αποτελούνται από την ανάπτυξη ηλεκτρομηχανολογικού συστήματος υποστήριξης, το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία του δυναμικού στρώματος με τις επιθυμητές τιμές θερμοκρασιών και παροχών μάζας. Το σύστημα υποστήριξης απαρτίζεται από δύο κυκλώματα, τα οποία παρουσιάζονται ξεχωριστά στις επόμενες υποενότητες, αυτό της θέρμανσης και αυτό της ψύξης, με κύριο κοινό τους σύστημα μια αντλία θερμότητας.

3.2 Μοντελοποίηση συστήματος υποστήριξης

Ως σύστημα υποστήριξης, ή τροφοδοσίας, ορίζεται το σύνολο των ηλεκτρομηχανολογικών εξαρτημάτων, των υδραυλικών, των ελεγκτών (Controllers) και όλων των υπόλοιπων στοιχείων (Types) του μοντέλου, που έχει ως σκοπό την τροφοδοσία της δυναμικής μόνωσης με νερό της επιθυμητής θερμοκρασίας. Για την ολοκληρωμένη μοντελοποίησή του χρειάζονται τρία βήματα. Αρχικά, η δημιουργία του επί μέρους κυκλώματος θέρμανσης, έπειτα το αντίστοιχο κύκλωμα ψύξης και τέλος ο συνδυασμός τους.

3.2.1 Κύκλωμα θέρμανσης

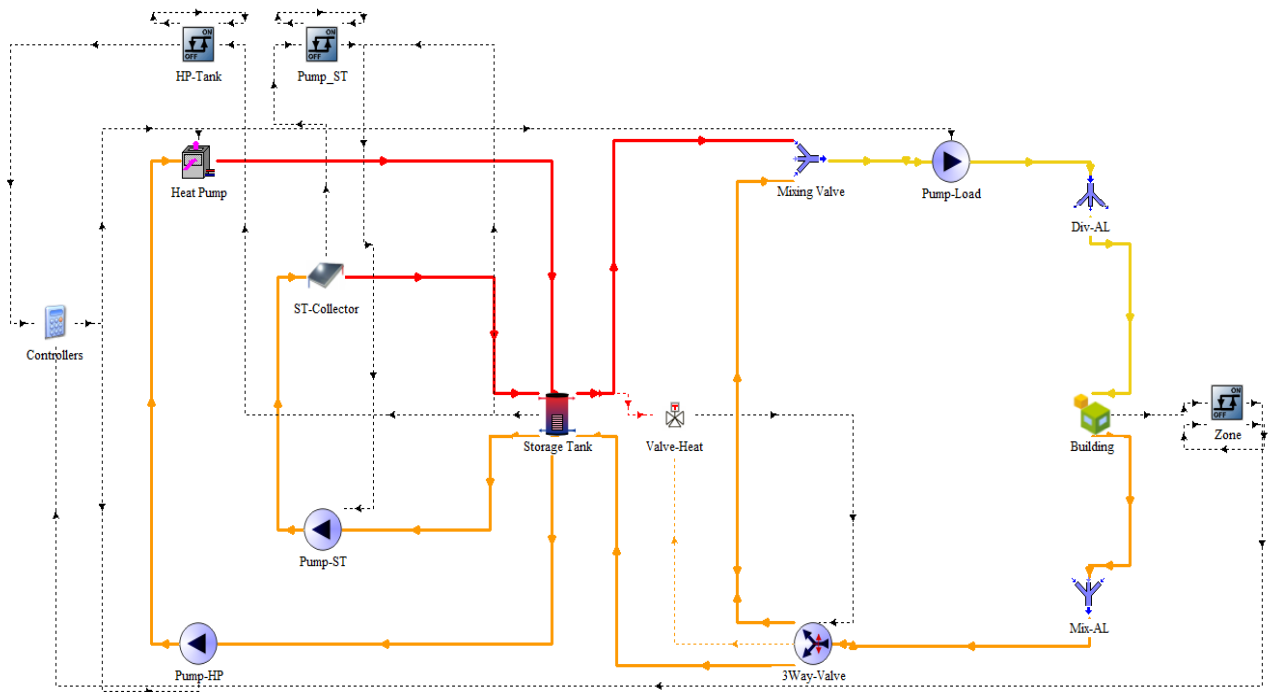
Τονίζεται για ακόμη μια φορά πως η προς μελέτη τεχνολογία της δυναμικής μόνωσης δεν αναλαμβάνει το ρόλο ενός συστήματος θέρμανσης χώρου, αλλά λειτουργεί βοηθητικά αποκόπτοντας σημαντικό μέρος των θερμικών απωλειών. Έτσι, οι όροι όπως για παράδειγμα, σύστημα θέρμανσης, κύκλωμα θέρμανσης, βαθμός απόδοσης θέρμανσης και άλλα, δεν αφορούν σε θέρμανση χώρου, αλλά στη λειτουργία τους δυναμικού στρώματος και του συστήματος υποστήριξής του κατά την περίοδο θέρμανσης. Ωστόσο θα χρησιμοποιούνται, εν μέρει εκβιαστικά, οι απλουστευμένοι όροι για λόγους ευκολίας και αμεσότητας.

Στην **Εικόνα 3.3** απεικονίζεται απλουστευμένα το σύστημα θέρμανσης, όπως αυτό μοντελοποιήθηκε στο περιβάλλον του *Simulation Studio*. Ως θερμοκρασία αναφοράς ορίζεται η θερμοκρασία του νερού εισόδου στη δυναμική μόνωση. Με αυτή τη λογική χρησιμοποιήθηκαν τρία χρώματα για διάκριση των ρευμάτων θερμοκρασίας υψηλότερης, μικρότερης και ίσης θερμοκρασίας. Έτσι, με «κόκκινο» συμβολίζονται τα ρεύματα με θερμοκρασία υψηλότερη της αναφοράς, με «πορτοκαλί» οι ροές χαμηλότερης, ενώ ότι έχει χρωματιστεί με «κίτρινο» χρώμα διαρρέεται από νερό θερμοκρασίας αναφοράς.

Το σύστημα θέρμανσης διαιρείται με τη σειρά του σε τρία διακριτά κυκλώματα, αυτό του φορτίου-κατανάλωσης (Load) στο δεξί μέρος και αυτό της πηγής (Source) στα αριστερά, χωρισμένο στα επί μέρους κυκλώματα της αντλίας θερμότητας (Heat Pump) και των ηλιοθερμικών (ST). Οι τρεις διαφορετικές κυκλοφορίες δεν είναι, βέβαια, ανεξάρτητες, αλλά επικοινωνούν μεταξύ τους λόγω του ενδιάμεσου δοχείου αδρανείας (Buffer Tank).

Έτσι, πριν αναλυθούν περισσότερο τα διακριτά κυκλώματα, κρίνεται σημαντικότερη η περιγραφή της λειτουργίας και της χρησιμότητας του δοχείου αδρανείας.

- Type534-Coiled, (Storage Tank) είναι ο τύπος-μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ενός διαστρωματωμένου δοχείου αδρανείας. Στην πραγματικότητα ένα δοχείο αποθήκευσης δεν παρουσιάζει σταθερή θερμοκρασία σε όλο τον όγκο του εσωτερικού του, αλλά ένα θερμοκρασιακό εύρος, όπου λόγω φυσικής κυκλοφορίας τα θερμότερα, άρα και ελαφρύτερα, στοιχεία ρευστού οδηγούνται αβίαστα προς τα υψηλότερα σημεία του δοχείου. Το συγκεκριμένο μοντέλο, δύναται να προσομοιώσει το φαινόμενο αυτό μέσω μέχρι και είκοσι ισοθερμικών κόμβων. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκαν πέντε κόμβοι για λόγους επάρκειας και οικονομίας υπολογιστικού κόστους. Βυθισμένος μέσα στο νερό του δοχείου βρίσκεται και ένας εναλλάκτης θερμότητας τύπου κουλούρας, στον οποίο θα συνδεθεί το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών. Φυσικά, μπορούν να οριστούν ακόμη όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι συντελεστές απωλειών προς το περιβάλλον, ο αριθμός εισόδων και εξόδου ρευστού (μέχρι δέκα), καθώς και ο κόμβος στον οποίο συνδέεται η εκάστοτε είσοδος και έξοδος. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης βοηθητικής πηγής θέρμανσης, όπως είναι μια ηλεκτρική αντίσταση, αλλά στη μοντελοποίησή μας δεν χρησιμοποιήθηκε, καθώς το δοχείο συνδέεται άμεσα με αντλία θερμότητας για τον ίδιο σκοπό. Όπως ήδη αναφέρθηκε το θερμό ρεύμα των ηλιακών συλλεκτών εισέρχεται στον άνω κόμβο του δοχείου μέσω του εναλλάκτη θερμότητας, όπου προσδίδει ενέργεια σε μορφή θερμότητας στο αποθηκευμένο νερό, εξέρχεται ψυχρότερο και οδηγείται από τον κυκλοφορητή του (Pump-ST) στη διάταξη των συλλεκτών (ST-Collector) για αναθέρμανση. Το κύκλωμα των ηλιοθερμικών επιλέχθηκε να συνδέεται έμμεσα, μέσω του εναλλάκτη, με το νερό του δοχείου, καθώς στην πληθώρα των περιπτώσεων το διακινούμενο ρευστό του αποτελείται από μίγμα νερού και αντιψυκτικού, για λόγους προστασίας της διάταξης. Αντίθετα, τα ρεύματα των κυκλωμάτων της αντλίας θερμότητας και της κατανάλωσης επικοινωνούν άμεσα με το νερό του δοχείου αδρανείας, άρα και μεταξύ τους. Συνεχίζοντας, όταν οι ηλιακοί συλλέκτες δεν επαρκούν για τη θέρμανση του νερού στα επιθυμητά επίπεδα, τότε λειτουργεί και η αντλία θερμότητας, αυξάνοντας άμεσα τη θερμοκρασία του νερού καλύπτοντας έτσι την ενεργειακή ανάγκη που είχε δημιουργηθεί. Το εισερχόμενο θερμό ρεύμα ανακατεύεται με το υπόλοιπο νερό του πάνω κόμβου, ενώ ένα ίδιο ποσό εξέρχεται από το χαμηλότερο σημείο και οδηγούμενο από τον αντίστοιχο κυκλοφορητή (Pump_HP) οδηγείται ξανά στην αντλία θερμότητας για αναθέρμανση. Τέλος, το κύκλωμα της κατανάλωσης, απορρίπτει το ψυχρό ρεύμα στον κατώτατο κόμβο του δοχείου και αναρροφά ίδιο ποσό, αλλά υψηλότερης θερμοκρασίας από τον πρώτο κόμβο.



Εικόνα 3.3: Απλοποιημένο κύκλωμα θέρμανσης

➤ Κύκλωμα κατανάλωσης (Load Side)

Το παρόν κύκλωμα διαθέτει κλάδο ανακυκλοφορίας, μέσω του οποίου μπορεί να επιτύχει ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού στο σημείο ανάμιξης. Ένας θερμοκρασιακός ελεγκτής (Type2d) ελέγχει αν το διαμέρισμα χρειάζεται θέρμανση, βάσει της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα. Μόλις υπάρξει ανάγκη θέρμανσης, στέλνεται σήμα στον κυκλοφορητή του συστήματος (Pump-Load), ο οποίος ενεργοποιεί το σύστημα θέρμανσης διακινώντας νερό. Τα βασικότερα σημεία αναφοράς στην πλευρά της κατανάλωσης του συστήματος θέρμανσης περιγράφονται αναλυτικά ακολούθως.

- Type56, (Building) είναι πιθανότατα ο πιο σημαντικός τύπος-μοντέλο του συστήματος, καθώς εισάγει στο *Simulation Studio* όλα όσα έχουν, σε προηγούμενο χρόνο, οριστεί στο *TRNBuild*, περιλαμβανομένων των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών, της τρισδιάστατης γεωμετρίας, αλλά και του συστήματος δυναμικής μόνωσης. Με αυτόν τον τρόπο και σε συνεργασία με αρχείο καιρού (Type15-6), πραγματοποιούνται αναλυτικά οι υπολογισμοί σκίασης και ηλιασμού βάσει των τρισδιάστατων δεδομένων. Επιπλέον, παρέχεται και η δυνατότητα άμεσης σύνδεσης των μεταβλητών εισόδου του δυναμικού στρώματος με εξόδους κάποιου άλλου τύπου-μοντέλου, προς δημιουργία κλειστού κυκλώματος.

- Type953, (Valve-Heat) αποτελεί στοιχείο κλειδί στη ρύθμιση της θερμοκρασίας εισόδου της δυναμικής μόνωσης. Παρότι η λειτουργία του είναι απλή και ο ρόλος του συμπληρωματικός, η σημαντικότητά του κάθε άλλο μπορεί να χαρακτηριστεί, παρά ευκαταφρόνητη. Ελέγχοντας, λοιπόν τη θερμοκρασία της πηγής (πρώτος κόμβος δοχείου αδρανείας) και τη θερμοκρασία του νερού επιστροφής (αφού έχει ψυχραθεί από την κατανάλωση), υπολογίζει τον λόγο παροχών των δύο ρευμάτων που πρέπει να αναμειχθούν, έτσι ώστε στο τέλος της ανάμειξης να επικρατεί η επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου της δυναμικής μόνωσης. Στη συνέχεια, ο παραπάνω υπολογισμός στέλνεται ως σήμα ελέγχου στην τρίοδη ρυθμιστική βαλβίδα (Type11f), με χρήση της οποίας οδηγείται, πλέον, η απαραίτητη παροχή νερού στον κλάδο ανακυκλοφορίας, ενώ το υπόλοιπο οδηγείται στο ψυχρό μέρος του δοχείου αδρανείας. Ίδιο ποσό νερού, στη μονάδα του χρόνου, εξέρχεται από τον θερμό κόμβο του δοχείου και οδηγείται στην αναμεικτική βαλβίδα (Type649) για ρύθμιση θερμοκρασίας.

➤ Κύκλωμα ηλιοθερμικού συστήματος

Το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών αποτελεί την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα, θερμαίνοντας άμεσα το διακινούμενο ρευστό μετατρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Γίνεται εύκολα κατανοητό, πως όσο μεγαλύτερη η ενεργειακή συνεισφορά του, τόσο πιο αποδοτικό, συμφέρον και περιβαλλοντικά φιλικό θα καταστεί το συνολικό σύστημα. Ίδανικά, θα ήταν επιθυμητό η ανάγκη θέρμανσης του νερού να επιτυγχάνεται εξ ολοκλήρου από την ανανεώσιμη πηγή του ηλίου, αλλά κάτι τέτοιο είναι εμφανώς αδύνατο, ειδικά σε κλίματα με χαμηλή ηλιοφάνεια. Όπως ήδη έχει αναφερθεί προηγουμένως, το θερμό ρευστό εξόδου του συλλέκτη ζεσταίνει περαιτέρω το αποθηκευμένο νερό του δοχείου μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (κουλούρα), ο οποίος συνδέει ενεργειακά το σύστημα με τα άλλα δύο κυκλώματα και το κοινό τους δοχείο αδρανείας. Τις βραδινές ώρες η θερμοκρασία στο συλλέκτη μειώνεται σημαντικά. Έτσι, κατά τη νύχτα ή της ώρες με χαμηλή ηλιοφάνεια όπου οι συλλέκτες αδυνατούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία του ρευστού πάνω από αυτή του δοχείου, ο κυκλοφορητής παύει να λειτουργεί, μηδενίζοντας τη ροή και αποκόβοντας ενεργειακά το κύκλωμα από το υπόλοιπο σύστημα. Το κατάλληλο σήμα στέλνεται στην αντλία κυκλοφορίας από θερμοκρασιακό ελεγκτή (Type2d), ο οποίος συγκρίνει συνεχώς τη θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη με αυτήν του νερού στο δοχείο.

➤ Κύκλωμα αντλίας θερμότητας

Η αντλία θερμότητας καλείται να καλύψει την ενεργειακή αδυναμία του ηλιοθερμικού συστήματος. Έτσι, όταν ο εναλλάκτης δεν επαρκεί για την επιθυμητή θέρμανση του νερού στο δοχείο, λειτουργεί η αντλία θερμότητας καλύπτοντας το θερμικό έλλειμα. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, αποτελεί το κύριο μέσο θέρμανσης και οι ηλιακοί συλλέκτες αναλαμβάνουν να παραλάβουν μέρος του θερμικού φορτίου,

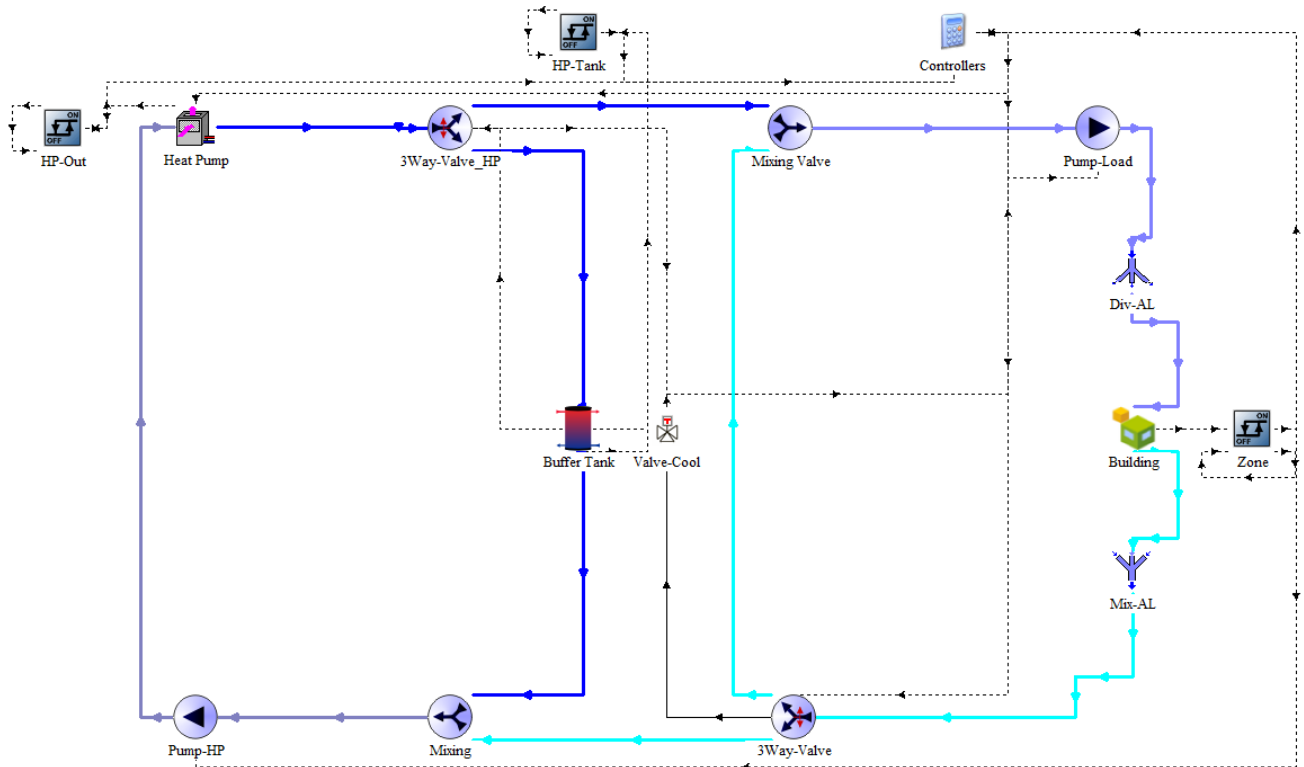
εξοικονομώντας ηλεκτρική ενέργεια. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, ενώ έχει κατοχυρώσει τη θέση της σχεδόν σε κάθε νεόδμητη κατοικία. Το κύριο πλεονέκτημά της, εκτός από τον υψηλό συντελεστή μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική (COP), έγκειται στο γεγονός πως μπορεί με αντιστροφή του ψυκτικού της κύκλου να λειτουργήσει τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη. Ιδανικότερη αντλία θερμότητας, για το προκείμενο μοντέλο, κρίνεται η τεχνολογία αέρα - νερού. Έτσι, εκμεταλλευόμενη μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας του εξωτερικού αέρα, την επιστρέφει πολλαπλάσια στο ρεύμα νερού που οδηγείται στη δυναμική μόνωση. Για τη λειτουργία της συνδυάζεται το σήμα δύο θερμοκρασιακών ελεγκτών (Type2d). Ο ένας ελέγχει τη θερμοκρασία του διαμερίσματος και την ανάγκη θέρμανσης, ενώ ο άλλος ενεργοποιείται εφόσον η θερμοκρασία στο δοχείο πέσει κάτω από μια επιθυμητή τιμή. Συνδυάζοντας το σήμα των δύο ελεγκτών με την πράξη της λογικής πρόσθεσης (and), δημιουργείται ένα νέο σήμα, το οποίο θέτει την αντλία θερμότητας σε λειτουργία μόνο όταν ικανοποιούνται και οι δύο προηγούμενες συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η αλόγιστη και ασύμφορη χρήση της όταν δεν υπάρχει ανάγκη θέρμανσης του διαμερίσματος ή όταν το δοχείο αδρανείας διαθέτει αρκετό, αποθηκευμένο, θερμικό φορτίο ώστε να καλύψει την ανάγκη αυτή. Αξίζει να σημειωθεί, πως μια αντλία θερμότητας μεταβλητών στροφών θα εγγυόταν την πιο εύρυθμη λειτουργία του συστήματος, περιορίζοντας τις εναλλαγές λειτουργίας της (Start/Stop), προσαρμόζοντας τη λειτουργία της στις ανάγκες του συστήματος και θα επέτρεπε μείωση στο μέγεθος του δοχείου αδρανείας, καθώς ο υποστηρικτικός του ρόλος θα υποβαθμιζόταν σημαντικά. Δυστυχώς, οι βιβλιοθήκες του TRNSYS18 δεν διαθέτουν έτοιμο μοντέλο για αντλία θερμότητας, αέρα νερού, μεταβλητών στροφών. Εμφανώς, η εκ του μηδενός δημιουργία μοντέλου της επιθυμητής τεχνολογίας που αναφέρθηκε προηγουμένως, δεν έγκειται στο πεδίο ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Έτσι, επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε έτοιμος τύπος αντλίας θερμότητας αέρα - νερού, σταθερών όμως στροφών (Type941, Heat Pump).

3.2.2 Κύκλωμα ψύξης

Τονίζεται ξανά, πως η προς μελέτη τεχνολογία της δυναμικής μόνωσης δεν αναλαμβάνει το ρόλο ενός συστήματος ψύξης χώρου, αλλά λειτουργεί βοηθητικά αποκόπτοντας σημαντικό μέρος των θερμικών απωλειών. Έτσι, οι όροι όπως για παράδειγμα, σύστημα ψύξης, κύκλωμα ψύξης, βαθμός απόδοσης ψύξης και άλλα, δεν αφορούν σε ψύξη χώρου, αλλά στη λειτουργία τους δυναμικού στρώματος και του συστήματος υποστήριξής του κατά την περίοδο ψύξης. Ωστόσο θα χρησιμοποιούνται, εν μέρει εκβιαστικά, οι απλουστευμένοι όροι για λόγους ευκολίας και αμεσότερης κατανόησης.

Στην **Εικόνα 3.4** απεικονίζεται απλουστευμένα το σύστημα ψύξης, όπως αυτό μοντελοποιήθηκε στο περιβάλλον του *Simulation Studio*. Ως θερμοκρασία αναφοράς ορίζεται η θερμοκρασία του νερού εισόδου στο δυναμικό στρώμα. Με αυτή τη λογική δημιουργούνται τρία βασικά θερμοκρασιακά επίπεδα. Με σκούρο «μπλε» απεικονίζεται το

ψυχρότερο ρεύμα που εξέρχεται από την αντλία θερμότητας, με ανοιχτό «σιέλ» το θερμότερο ρεύμα στην έξοδο της κατανάλωσης (Building). Το τρίτο βασικό επίπεδο (γκρι) είναι αυτό της ανάμειξης των δύο προηγούμενων ροών, το οποίο ρυθμίζεται κατάλληλα και οδηγείται στο δυναμικό στρώμα της τοιχοποιίας.



Εικόνα 3.4: Απλοποιημένο κύκλωμα ψύξης

Το ίδιο το κύκλωμα ψύξης, μπορεί απλουστευτικά να υποδιαιρεθεί σε δύο διακριτά κυκλώματα, αυτό του φορτίου-κατανάλωσης στο δεξί μέρος και σε αυτό της πηγής στο αριστερά μέρος. Σημαντικό κομμάτι του συστήματος αποτελεί και ο διάυλος επικοινωνίας των δύο επί μέρους κυκλωμάτων, που από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως τετράοδη βάννα. Κατόπιν, θα αναλυθούν περισσότερο τα τρία αυτά διακριτά μέρη.

➤ Κύκλωμα κατανάλωσης (Load Side)

Συγκρίνοντας την **Εικόνα 3.4** με την **Εικόνα 3.3** δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφορά στο κύκλωμα κατανάλωσης των δύο περιπτώσεων. Συνεπώς η περιγραφή του κυκλώματος κατανάλωσης για ψύξη μπορεί να αγνοηθεί εφόσον έχει ήδη κατανοηθεί το αντίστοιχο τμήμα του συστήματος θέρμανσης.

➤ Κύκλωμα πηγής (Source Side)

Το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι υπεύθυνο για την ψύξη νερού, του οποίου κατάλληλη ποσότητα οδηγείται σε αναμεικτική βαλβίδα προς ρύθμιση θερμοκρασίας. Διαθέτει κλάδο ανακυκλοφορίας με τον οποίο διατηρείται το νερό της πηγής σε επιθυμητά θερμοκρασιακά επίπεδα. Κατόπιν, παρουσιάζονται τρία σημαντικά σημεία του παρόντος κυκλώματος.

- Λειτουργία αντλίας κυκλοφορίας

Ιδανικά, ο κυκλοφορητής του κυκλώματος (Type114, Pump-HP) θα λειτουργούσε μόνο εφόσον υπήρχε ανάγκη ψύξης του νερού από την αντλία θερμότητας, ωστόσο, για υπολογιστικούς λόγους, το κύκλωμα πηγής δεν έπρεπε να μένει αδρανές κατά τη περίοδο ψύξης. Συγκεκριμένα, όταν στο μέρος της πηγής δεν διακινείται νερό (αδρανές), τότε τα στοιχεία του (Types) «διαβάζουν» στην είσοδό τους μια πλασματική, θερμοκρασία η οποία δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Παρότι αφού το κύκλωμα είναι απενεργοποιημένο, η εν λόγω θερμοκρασία δεν επηρεάζει το ενεργειακό ισοζύγιο του συνολικού συστήματος, προκαλεί δυσλειτουργία της ρυθμιστικής βαλβίδας (Type953, Valve-Cool). Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, έστω και πλασματικής, στο αριστερά κύκλωμα, η ρύθμιση ουσιαστικά απενεργοποιείται, καθώς δίνει σήμα συνεχούς ανακυκλοφορίας στο κύκλωμα της κατανάλωσης. Το δυσνόητο αυτό πρόβλημα αντιμετωπίστηκε εφαρμόζοντας το σήμα του ελεγκτή θερμοκρασίας χώρου (Type2d, Zone) στον κυκλοφορητή. Έτσι, αποκαθίσταται η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος ψύξης με μια μικρή υποεκτίμησή του, αφού η αντλία διακινεί νερό στο κύκλωμα πηγής ακόμη κι αν κάποιες φορές θεωρητικά δεν ήταν απαραίτητο, καταναλώνοντας ένα μικρό, επιπλέον ποσό ηλεκτρικής ενέργειας.

- Αντλία θερμότητας

Η αντλία θερμότητας περιγράφηκε προηγουμένως στο κύκλωμα θέρμανσης. Συγκρίνοντας με την περίπτωση της ψύξης δεν εμφανίζονται κομβικές διαφορές. Συγκεκριμένα, στην προκείμενη περίπτωση δεν υποστηρίζεται από κάποιο άλλο σύστημα (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες), συνεπώς καλύπτει εξ ολοκλήρου τις ψυκτικές ανάγκες του συστήματος. Επιπλέον, λόγω σημαντικής διαφοράς στα φορτία θέρμανσης και ψύξης, η ψυκτική ικανότητα της αντλίας θερμότητας διαστασιοποιείται σε χαμηλότερη τιμή συγκριτικά με της θέρμανσης, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα{3.4}.

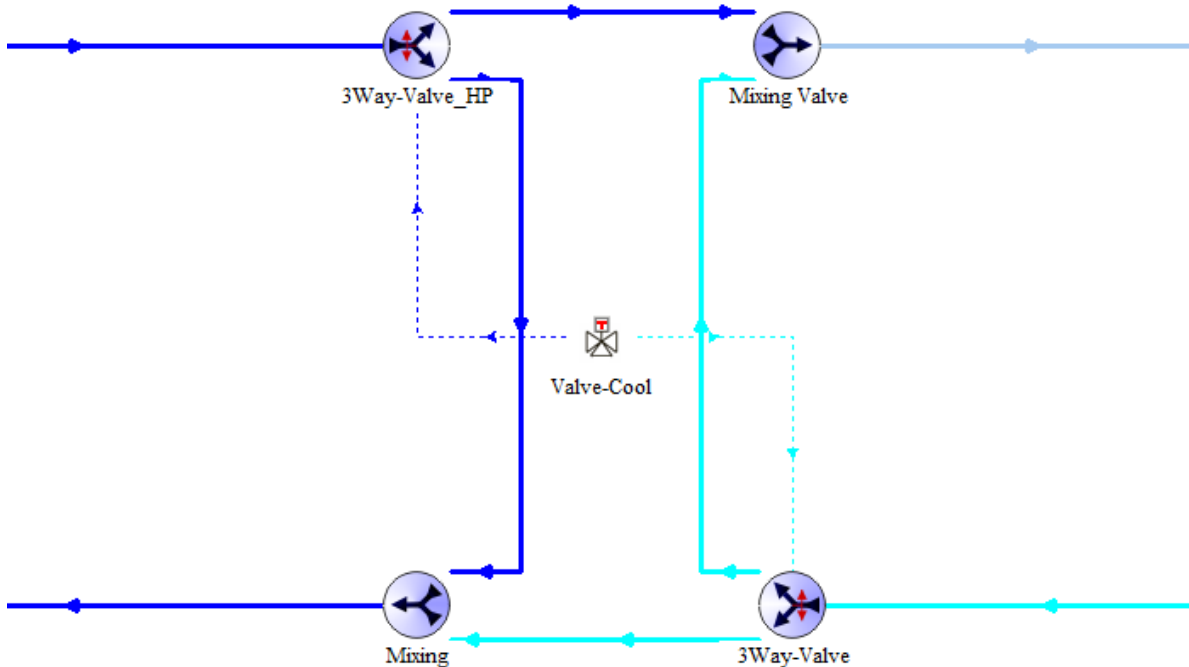
- Δοχείο αδρανείας

Όπως αναφέρθηκε λεπτομερώς και προηγουμένως, το αποθηκευτικό δοχείο (Type534-NoHX, Buffer Tank) τοποθετήθηκε, ώστε να εγγυηθεί την εύρυθμη και ομαλή λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Ο ρόλος του, λοιπόν, μπορεί να

χαρακτηριστεί υποστηρικτικός, αλλά ταυτόχρονα εξαιρετικά σημαντικός. Όσον αφορά στο ίδιο το δοχείο, δεν διαθέτει εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας, καθώς θα περίττεινε, η διαστρωμάτωση του εσωτερικού του έχει μοντελοποιηθεί, όμοια με πριν, από πέντε ισοθερμικούς κόμβους, ενώ το μέγεθός του είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του συστήματος θέρμανσης, αφού και οι ψυκτικές ανάγκες είναι λιγότερες.

➤ Τετράοδη βάνα

Πριν την τοποθέτηση του δοχείου αδρανείας υπήρχε έντονη ανάγκη επικοινωνίας των δύο κυκλωμάτων (πηγής και κατανάλωσης) με ρύθμιση των παροχών ανακυκλοφορίας και της θερμοκρασίας τροφοδοσίας της δυναμικής μόνωσης. Ιδανικά, μια τετράοδη βάνα θα μπορούσε να ελέγξει με ένα σήμα τις τέσσερις ροές, δύο εισόδους και δύο εξόδους. Δυστυχώς, στις βιβλιοθήκες του *Simulation Studio* δεν υπήρχε έτοιμο μοντέλο (Type) για αυτή τη λειτουργία, συνεπώς χρειαζόταν να δημιουργηθεί. Στην **Εικόνα 3.5** παρουσιάζεται η μοντελοποίηση μιας τετράοδης βάνας με χρήση δύο τριόδων και δύο αναμεικτικών.



Εικόνα 3.5: Μοντέλο τετράοδης βάνας

Ένας ελεγκτής (Type953, Valve-Cool), όμοιος με του συστήματος θέρμανσης, ελέγχει τις θερμοκρασίες του ρεύματος πηγής (Source) και του ρεύματος ανακυκλοφορίας μετά την κατανάλωση (Load) και υπολογίζει στο σήμα εξόδου του το ποσοστό ανάμειξης των δύο ρευμάτων, το οποίο θα επιφέρει την επιθυμητή θερμοκρασία στη ζητούμενη θέση (Mixing Valve). Στη γενική περίπτωση οι διακινούμενες, στα δύο κυκλώματα, παροχές δεν είναι ίσες, συνεπώς αν το ίδιο σήμα εφαρμοζόταν και στις δύο τρίοδες βάνες (3Way-Valve_HP, 3Way-Valve) δεν θα επαληθευόταν το ισοζύγιο μάζας. Για να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο εμπόδιο, αρκεί να εφαρμοστεί το σήμα του ελεγκτή στην τρίοδη της οποίας το κύκλωμα δεν διακινεί τη μεγαλύτερη παροχή, ενώ στην δεύτερη να εφαρμοστεί το ίδιο σήμα μειωμένο κατά ένα συντελεστή. Ο μειωτικός συντελεστής αποτελεί δείκτη σύγκρισης των δύο παροχών. Ορίζοντας, λοιπόν, το κύκλωμα μικρότερης παροχής ως κύκλωμα 1 και το άλλο ως 2, παρατίθενται παρακάτω οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως.

$$C = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}, \quad \dot{m}_1 \leq \dot{m}_2 \quad (3.1)$$

$$f_1 = f, \quad f_2 = C \cdot f, \quad C \leq 1 \quad (3.2)$$

Στη σχέση (3.1) ορίζεται ο μειωτικός συντελεστής, συναρτήσε των παροχών μάζας στα δύο κυκλώματα, ενώ στην (3.2) τα σήματα ελέγχου των δύο τρίοδων βανών αντίστοιχα, συναρτήσε του σήματος ελέγχου στην έξοδο του ελεγκτή (Valve-Cool). Όπως φαίνεται και στις εξισώσεις, η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί άρτια και στην περίπτωση όπου τα δύο κυκλώματα διακινούν νερό ίδια παροχής. Ρυθμίζοντας, έτσι, τα σήματα ελέγχου, έχει δημιουργηθεί ένα μικρό σύστημα, που μοντελοποιεί πιστά τη λειτουργία μιας τετράοδης βάνας, στο οποίο ισχύει και η διατήρηση της συνέχειας. Το μόνο που αλλάζει η μετέπειτα προσθήκη του δοχείου αδρανείας είναι η θερμοκρασιακή αναντιστοιχία, μεταξύ εξόδου της τρίοδης στο κύκλωμα πηγής (3Way-Valve_HP) και της εισόδου από ανακυκλοφορία στην αναμεικτική πηγής (Mixing). Η διαφορά, αυτή, δεν επηρεάζει στο ελάχιστο τη λειτουργία της τετράοδης, καθώς ο έλεγχος και η ρύθμιση θερμοκρασίας πραγματοποιείται για την αναμεικτική του κυκλώματος κατανάλωσης (Mixing Valve), τις οποίας τα ρεύματα εισόδου παρέμειναν ίδια. Έτσι, επιτυγχάνεται τελικά η ρύθμιση θερμοκρασίας στο νερό που εισέρχεται στα στρώματα δυναμικής μόνωσης, κατά την περίοδο ψύξης.

3.2.3 Τελικό σύστημα θέρμανσης-ψύξης

Για να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη μοντελοποίηση και ενεργειακή ανάλυση, χρειάζεται τα κυκλώματα θέρμανσης και ψύξης να συνδεθούν με το ίδιο σύστημα δυναμικής μόνωσης, άρα και με το ίδιο κτιριακό μοντέλο (Type56, Building). Επειδή, όμως, ως είσοδος ενός στοιχείου του περιβάλλοντος *Simulation Studio* δεν μπορούν να οριστούν έξοδοι από διαφορετικά στοιχεία ή ακόμη και από διαφορετικούς εξόδους του ίδιου στοιχείου, απαιτείται, σε επίπεδο μοντελοποίησης τουλάχιστον, ο συνδυασμός των δύο

κυκλωμάτων. Οι πιθανές λύσεις ποικίλουν, αλλά δύο είναι οι επικρατέστερες. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται σε μαθηματικές πράξεις, κυρίως λογικές, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς τις περιόδους θέρμανσης και ψύξης. Έτσι, χρησιμοποιώντας στοιχεία υπολογισμών (**Εικόνα 3.6**), γίνεται να πραγματοποιηθεί οποιοσδήποτε επιθυμητός συνδυασμός εξόδων, σε ένα μοναδικό σήμα, τροφοδοτώντας το επόμενο στοιχείο με όποια έξοδο αντιστοιχεί στο κάθε χρονικό σημείο (π.χ. σε περίοδο θέρμανσης θα λαμβάνονται οι τιμές του κυκλώματος θέρμανσης).

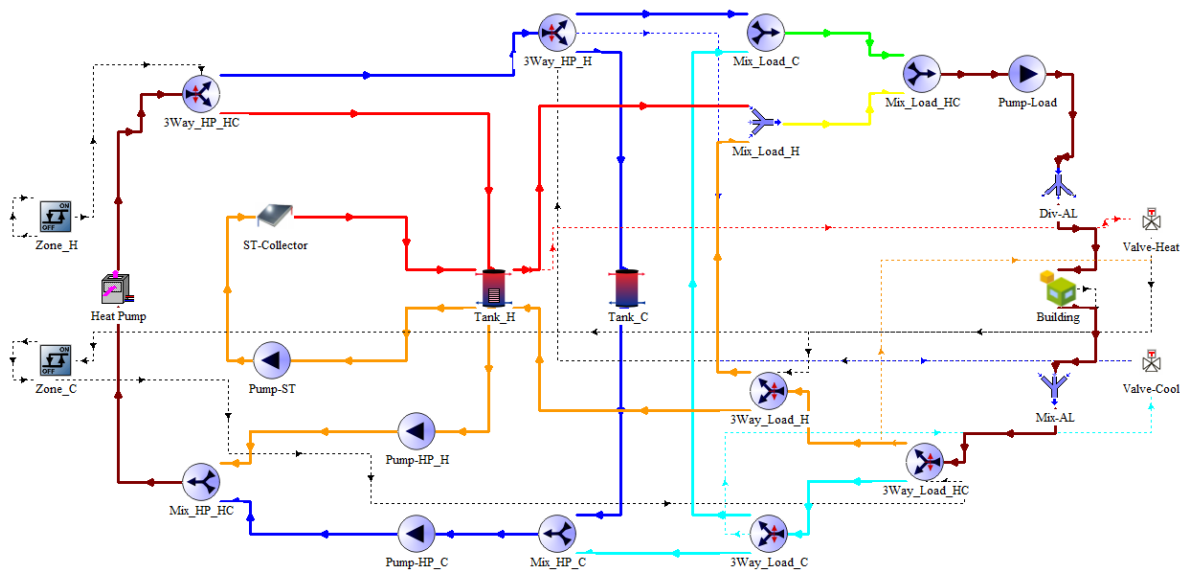


Equa

Εικόνα 3.6: Οπτικοποίηση στοιχείου υπολογισμών, σε περιβάλλον *Simulation Studio*

Η δεύτερη κυρίαρχη λύση βασίζεται σε χρήση περισσότερων υδραυλικών, υδρονικών στοιχείων, όπως είναι οι τρίοδες βάνες. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της προηγούμενης. Συγκεκριμένα, είναι πιο αληθοφανής, προσομοιώνοντας καλύτερα μια πραγματική εγκατάσταση, συνεισφέρει στην ταχύτερη και ευκολότερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος και παραμένει ευπαρουσίαστη όντας προτιμότερη της προηγούμενης και βάσει αισθητικών κριτηρίων. Για αυτούς τους λόγους επιλέγεται η λύση των υδραυλικών, των οποίων η λειτουργία είναι ήδη γνωστή από τη μοντελοποίηση των δύο βασικών κυκλωμάτων.

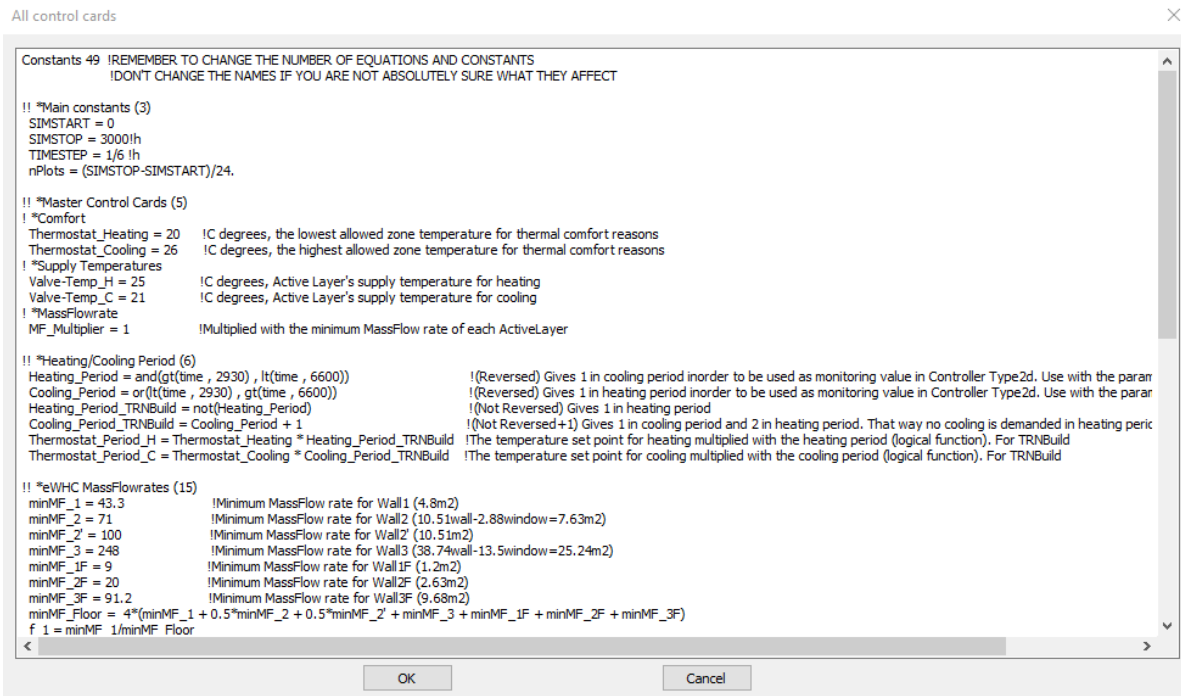
Ο συνδυασμός των δύο επί μέρους κυκλωμάτων απεικονίζεται απλουστευμένα στην **Εικόνα 3.7**. Στην ουσία για την επικοινωνία των δύο συστημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί δύο επιπλέον τρίοδες βάνες (3Way_HP_HC, 3Way_Load_HC) και δύο απλά αναμεικτικά στοιχεία (Mix_HP_HX, Mix_Load_HC), μοιρασμένα εξίσου στη μεριά της πηγής (Source Side) και σε αυτή της κατανάλωσης (Load Side). Η μόνη παρέμβαση που απαιτείται είναι η τροφοδοσία των δύο τρίοδων με το κατάλληλο σήμα ελέγχου. Έτσι, όταν δέχονται σήμα για ανάγκη θέρμανσης από τον ελεγκτή της θερμαινόμενης ζώνης, «ανοίγουν» πλήρως ως προς τη μία μόνο κατεύθυνση επιτρέποντας τη ροή ρευστού στο κύκλωμα θέρμανσης και απενεργοποιώντας, παράλληλα, αυτό της ψύξης. Όταν ο χώρος έχει ανάγκη ψύξης, ακολουθείται η ακριβώς αντίστροφη διαδικασία, ενεργοποιώντας το σύστημα ψύξης και αδρανοποιώντας το κύκλωμα θέρμανσης. Αξίζει να σημειωθεί πως η πολυπλοκότητα του μοντέλου έχει αυξηθεί τόσο, ώστε αρκετές φορές να χρειάζονται έως και 12.000 επαναλήψεις των υπολογιστικών εξισώσεων, έως ότου τα δεδομένα συγκλίνουν, με σχετική ακρίβεια 0.001.



Εικόνα 3.7: Απλοποιημένο κύκλωμα θέρμανσης και ψύξης

3.3 Αυτοματοποίηση παραμέτρων

Με την πολυπλοκότητα του μοντέλου να αυξάνεται και τις μεταβλητές που επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος να πληθαίνουν, ο χειροκίνητος προσδιορισμός των παραμέτρων σε κάθε διαφορετικό στοιχείο κρίνεται εξαιρετικά ασύμφορος και ιδιαίτερα επικίνδυνος προς πιθανά λάθη. Έτσι, θα ήταν βολικότερο να υπάρχει ένα κύριο «κέντρο ελέγχου», από το οποίο να συντονίζονται τα τυχόν συνεργαζόμενα προγράμματα (π.χ. *TRNBuild*, *Simulation Studio*) και να ρυθμίζονται κατάλληλα όλες οι παράμετροι και οι κύριες μεταβλητές του συστήματος. Το *TRSNSYS18* προσφέρει μια πραγματικά χρήσιμη λειτουργία, που πετυχαίνει σε μεγάλο βαθμό το σκοπό και τη χρησιμότητα της επιθυμητής αυτοματοποίησης. Η συγκεκριμένη δυνατότητα βρίσκεται στις ρυθμίσεις για προχωρημένους (advanced settings) του *Simulation Studio* υπό την ονομασία «Μεταβλητές προσομοίωσης» (Simulation cards). Πρόκειται για ένα παράθυρο ελεύθερου κειμένου, όπου μπορούν να οριστούν σταθερές, μεταβλητές, συναρτήσεις και να πραγματοποιηθούν τόσο αριθμητικές όσο και λογικές πράξεις με αριθμούς, αλλά και μεταξύ των προηγουμένως ορισμένων μεταβλητών. Η πρώτη λειτουργία του λογισμικού πριν από κάθε προσομοίωση, είναι να διαβάσει το συγκεκριμένο κείμενο αναγνωρίζοντας ό,τι έχει οριστεί στο περιεχόμενό του και να το αντιστοιχίσει όπου αυτό χρειάζεται. Στην **Εικόνα 3.8** φαίνεται το εν λόγω παράθυρο ελεύθερου κειμένου και ένα μέρος των συναρτήσεων και μεταβλητών που έχουν οριστεί και χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του μοντέλου δυναμικής μόνωσης.



Εικόνα 3.8: Κέντρο ελέγχου προσομοίωσης (Simulation cards)

Η συνάρτηση «Heating_Period» (Εικόνα 3.8) αποτελεί εξαιρετικό παράδειγμα, καθώς συνδυάζει πληθώρα των δυνατοτήτων που προαναφέρθηκαν. Χρησιμοποιεί λογική πράξη (and), εμπεριέχει μεταβλητή συστήματος (time), συγκρίνει μεγέθη (gt=greater than, lt=less than), ενώ σε επίπεδο μοντελοποίησης χρησιμοποιείται τόσο στο μέρος του *Simulation Studio* όσο και στο *TRNBuild*. Ας σημειωθεί πως με χρήση του θαυμαστικού, ο χρήστης μπορεί να σημειώσει κάποιο σχόλιο με το οποίο θα εξηγείται η μεταβλητή, ο ορισμός της και τα σημεία εφαρμογής της, είτε σε τρίτο πρόσωπο που ενδεχομένως χρησιμοποιήσει το συγκεκριμένο μοντέλο, είτε στον ίδιο του τον εαυτό, σε περίπτωση που με το πέρασ του χρόνου κάτι δεν του είναι πλέον το ίδιο σαφές. Δύο σημεία χρήζουν προσοχής κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία.. Πρώτο και κυριότερο, στην πρώτη γραμμή του κειμένου να αναγράφεται πάντα το πλήθος των μεταβλητών που ορίζονται στο υπόλοιπο κείμενο. Δεύτερον, τυχόν αλλαγές σε ονομασίες να προσεγγίζονται με ιδιαίτερη προσοχή και από πρόσωπο που διαθέτει πλήρη επίγνωση του μοντέλου, ή τουλάχιστον της προς αλλαγή μεταβλητής, καθώς η αντιστοίχιση της σε εισόδους ή λειτουργίες των διάφορων στοιχείων-συστημάτων έχει πραγματοποιηθεί με την συγκεκριμένη ονομασία και δεν ενημερώνεται αυτόματα. Στην Εικόνα 3.9 φαίνεται πως γίνεται η αντιστοίχιση της μεταβλητής ελέγχου του προηγούμενου παραδείγματος (Heating_Period) βάσει ονομασίας, σε ένα από τα στοιχεία της προσομοίωσης.

(Example) Zone_H

Parameter Input Output Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Upper input value	0	any	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2		Lower input value	20	any	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3		Monitoring value	Heating_Period	variable name	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4		Input control function	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5		Upper dead band	A1_H_UDB	variable name	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6		Lower dead band	A1_H_LDB	variable name	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 3.9: Αντιστοίχιση μεταβλητής ελέγχου σε υπάρχον στοιχείο

Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη λογική για σχεδόν όλες τις μεταβλητές και παραμέτρους του μοντέλου (π.χ. δεν γίνεται να αυτοματοποιηθούν οι θερμικές ιδιότητες των υλικών στο *TRNBuild*), αποκομίζονται πολλά οφέλη. Αρχικά, με ένα απλό έγγραφο κειμένου (.txt) γίνεται να οριστεί πλήρως το σύστημα και οι παράμετροί του, επιταχύνοντας και απλουστεύοντας τις διαδικασίες της διαστασιολόγησης και τις ενεργειακής, παραμετρικής ανάλυσης. Επιπλέον, προσφέρει μια άμεση και συνοπτική εποπτεία του συστήματος και των χαρακτηριστικών του, γεγονός που διευκολύνει την εύρεση τυχόν λαθών και αναντιστοιχιών. Τέλος, προσθέτοντας και μερικά σχόλια όπου κρίνεται απαραίτητο, αποτελεί έναν πολύ σύντομο, αλλά περιεκτικό, οδηγό του συστήματος, ο οποίος θα υπενθυμίζει στο χρήστη το στήσιμο και τη λειτουργία του μοντέλου, ενώ μπορεί να συνεισφέρει στην κατανόηση και μεταχείριση του μοντέλου και από τρίτο πρόσωπο.

3.4 Διαστασιολόγηση συστήματος

Για να πραγματοποιηθεί η ενεργειακή ανάλυση του συστήματος, με τη μέθοδο της παραμετρικής προσέγγισης, απαιτείται εκτός από τη μοντελοποίηση και η διαστασιολόγηση των κυριότερων στοιχείων που απαρτίζουν το μοντέλο. Στα σημαντικότερα σημεία της εν λόγω διαδικασίας συγκαταλέγονται, η αντλία θερμότητας, τα

δοχεία αδρανείας και οι επιθυμητές θερμοκρασίες διατήρησης του νερού στο εσωτερικό τους. Η μεθοδολογία διαστασιολόγησης θα ακολουθηθεί όμοια στο κύκλωμα θέρμανσης και στο κύκλωμα ψύξης. Συγκεκριμένα, το σύστημα χρειάζεται να μπορεί να ανταπεξέλθει και στις δυσμενέστερες συνθήκες, κατά τις οποίες οι απαιτήσεις θερμικού και ψυκτικού φορτίου μεγιστοποιούνται, με ενδεχόμενη ταυτόχρονη μείωση της απόδοσης του. Ωστόσο, κατά την παραμετρική ανάλυση οι ανωτέρω τιμές, αλλά και τα σημεία εμφάνισής τους, αναμένεται να διαφοροποιούνται σε ένα βαθμό. Για το λόγο αυτό, κρίνεται φρόνιμο, η διαστασιολόγηση να εμπεριέχει μια σχετική ασφάλεια, αποφεύγοντας την οριακή κάλυψη των θερμικών αναγκών. Ακόμη κι έτσι, κατά τη διαδικασία της ανάλυσης, θα χρειαστεί να ελέγχεται συνεχώς κατά πόσο το σύστημα μπόρεσε να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις, ακόμη και στις δυσμενέστερες περιπτώσεις. Περισσότερα, σχετικά με το συγκεκριμένο θέμα, αναφέρονται στο κεφάλαιο της παραμετρικής ανάλυσης {5}. Η ολοκλήρωση της κύριας διαστασιολόγησης θα υλοποιηθεί σε τρία βήματα.

1. Αρχικά, πρέπει να αντιστοιχηθούν τυπικές τιμές σε όλες τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Οι περισσότερες τιμές φαίνονται συνοπτικά στον **Πίνακα 3.1**, ενώ όσες δεν αναφέρονται λήφθηκαν επίσης τυπικά, από συστήματα εμπορίου ή διατηρήθηκαν οι προτεινόμενες, από το *TRNSYS18*, τιμές.

Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές των βασικότερων παραμέτρων

Αντλία θερμότητας				Δοχείο αδρανείας				Ηλιακοί συλλέκτες	Κυκλοφορητές
Θέρμανση		Ψύξη		Θέρμανση		Ψύξη			
Q _{th} (kW)	Pel (kW)	Q _{th} (kW)	Pel (kW)	V (L)	T _{min} (°C)	V (L)	T _{max} (°C)	A (m ²)	Pel (W)
7	1.82	6	1.56	500	33	300	15	3	20-40

2. Στο δεύτερο στάδιο θα εξεταστεί η τιμή θερμοκρασίας του νερού στο εσωτερικό του δοχείου για την οποία καλύπτονται οι θερμικές ανάγκες και είναι ταυτόχρονα η ενεργειακά οικονομικότερη, δηλαδή πιο κοντά στην τιμή της απαιτούμενης θερμοκρασίας τροφοδοσίας. Η μεθοδολογία ελέγχου θα πραγματοποιηθεί με παρόμοιο τρόπο και για τα δύο κυκλώματα, θέρμανσης και ψύξης.

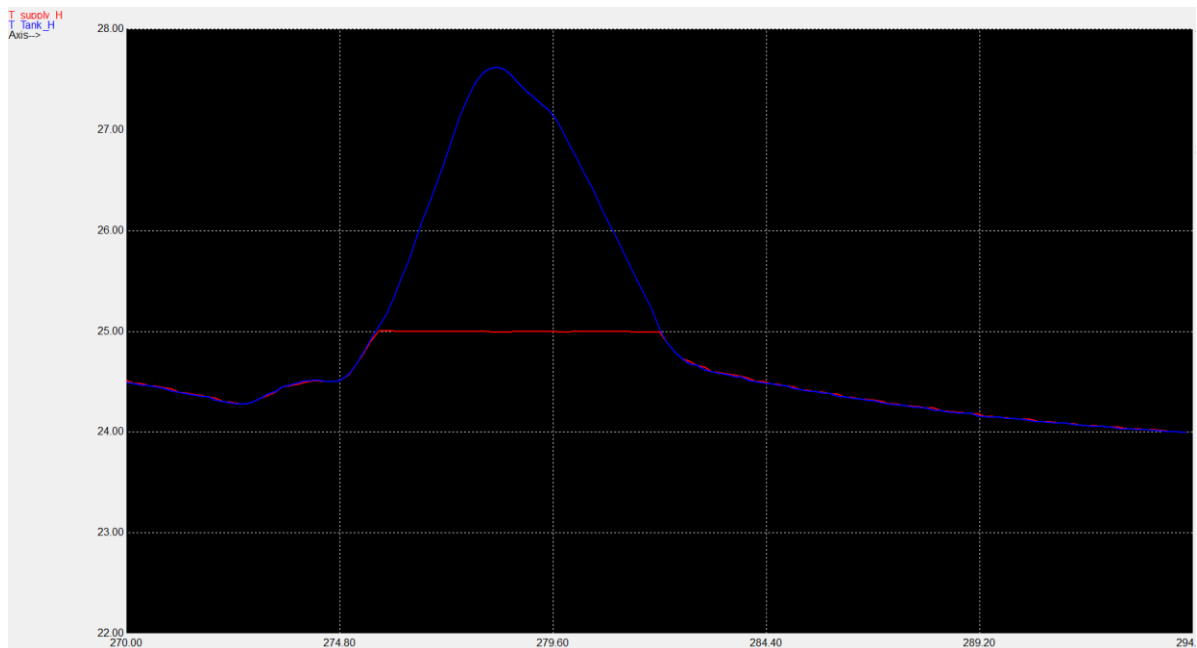
Για το σύστημα θέρμανσης και με δεδομένη θερμοκρασία τροφοδοσίας της δυναμικής μόνωσης, θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη παραμετρική ανάλυση μειώνοντας, σταδιακά, τη θερμοκρασία του δοχείου. Σκοπό της διαστασιολόγησης, αποτελεί ο προσδιορισμός της χαμηλότερης θερμοκρασίας του δοχείου για την οποία επιτυγχάνεται, πάντα, η ρύθμιση της θερμοκρασίας τροφοδοσίας στην επιθυμητή τιμή. Ας υπενθυμιστεί, πως η αντλία θερμότητας είναι υπεύθυνη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στο δοχείο υψηλότερη, ή ίση, με την τιμή της θερμοκρασίας που έχει οριστεί για αυτό και διερευνάται στην παρούσα φάση.

Από τα αποτελέσματα φάνηκε, πως με θερμοκρασιακή απόκλιση ενός βαθμού Κελσίου, μεταξύ δοχείου και τροφοδοσίας των δυναμικών στρωμάτων, επιτυγχάνεται άριστα η ρύθμιση της τελευταίας. Για λόγους ασφαλείας, η διερεύνηση δεν

συνεχίστηκε για μικρότερες διαφορές, οι οποίες ενδεχομένως προκαλούσαν αστάθειες στην απόκριση του συστήματος, κατά την παραμετρική του ανάλυση.

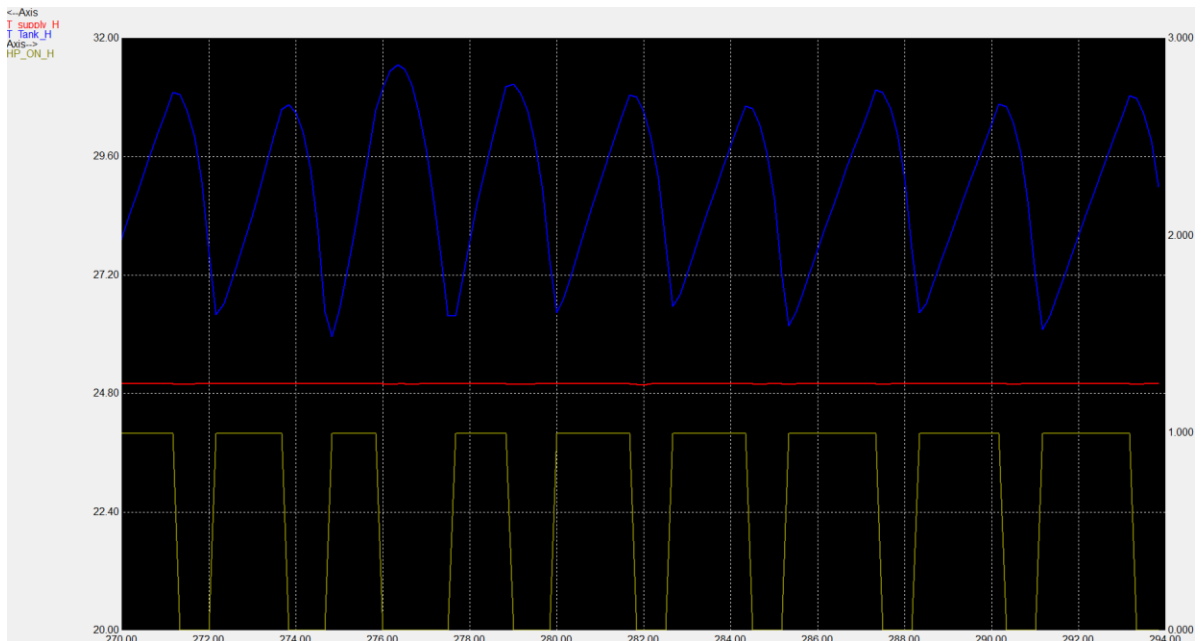
Η ίδια λογική ακολουθείται και για το κύκλωμα ψύξης, μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιείται αυξάνοντας σταδιακά τη θερμοκρασία του δοχείου, αντί μειώνοντάς την. Τα συμπεράσματα προέκυψαν επίσης όμοια, καθώς φάνηκε να μην προκαλείται αδυναμία ρύθμισης της θερμοκρασίας τροφοδοσίας ακόμη και για θερμοκρασία δοχείου μόλις ένα βαθμό Κελσίου μικρότερη της τελευταίας. Ομοίως, για λόγους ασφαλείας δεν κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω μείωση της μεταξύ τους θερμοκρασιακής διαφοράς.

3. Το επόμενο βήμα αφορά στη διαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας. Γνωρίζοντας από το προηγούμενο στάδιο τις θερμοκρασίες δοχείων που χρειάζεται να επιτευχθούν, κατά την περίοδο θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα, αρκεί να μειώνεται η ονομαστική ισχύς της αντλίας μέχρι το σημείο, όπου καταφέρνει να διατηρήσει, οριακά, τις προαναφερθείσες θερμοκρασίες. Μόλις εντοπιστεί το παραπάνω σημείο λειτουργίας, θα λάβει χώρα μια μικρή υπερδιαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας, ώστε να προσφέρει ασφάλεια σε τυχόν παραμετρικές αλλαγές, κατά την ενεργειακή ανάλυση. Ξεκινώντας από τις τυπικές τιμές του πρώτου σκέλους, μειώθηκε η ονομαστική ισχύς της μέχρι τις τιμές των $4kW$ και $1kW$, για λειτουργία θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα, στις οποίες η ρύθμιση θερμοκρασίας απέτυχε. Στο **Σχήμα 3.3** φαίνονται οι θερμοκρασίες στο δοχείο (μπλε γραμμή) και στην τροφοδοσία (κόκκινη γραμμή), μία τυπική ημέρα περιόδου θέρμανσης, κατά την οποία η ρύθμιση απέτυχε να διατηρήσει την επιθυμητή τιμή των $25^{\circ}C$ στην είσοδο της δυναμικής μόνωσης.

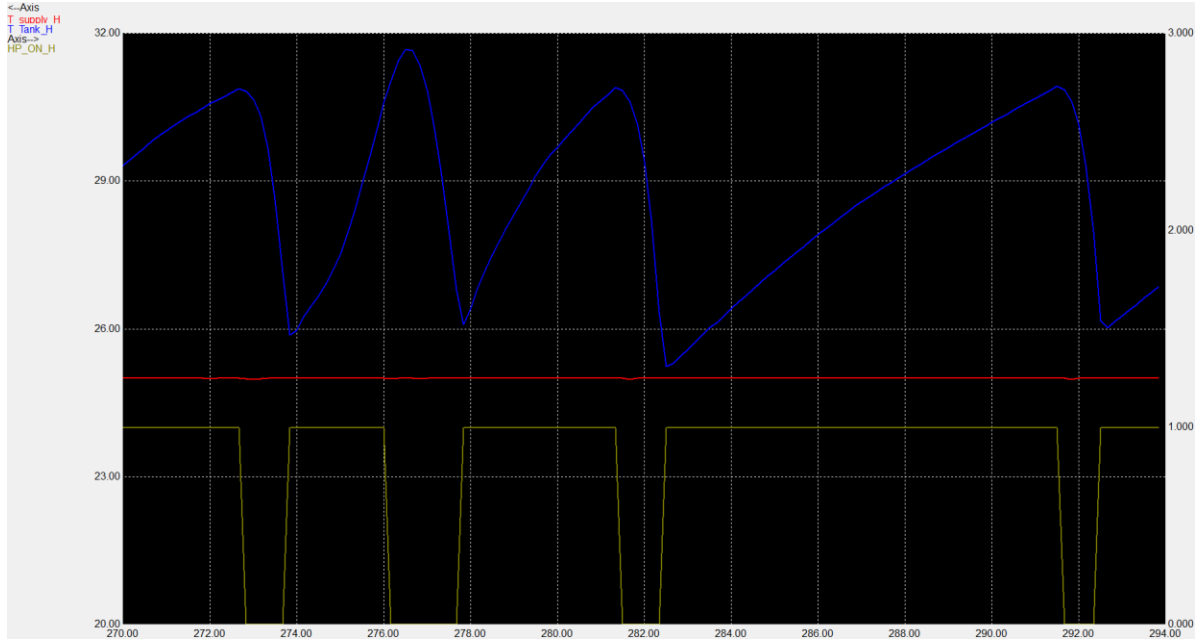


Σχήμα 3.3: Αδυναμία ρύθμισης θερμοκρασίας, από την αντλία θερμότητας

Για ονομαστική ισχύ θέρμανσης $5kW$ και ψύξης $2kW$, η αντλία επιτυγχάνει το σκοπό της ακόμη και στις δυσμενέστερες περιπτώσεις. Επαυξάνοντας κατά έναν ισχύ ασφαλείας $0.5kW$, ορίζονται, τελικά, οι τιμές θερμικής ισχύος της αντλίας θερμότητας σε $5.5kW$ και $2.5kW$, για λειτουργία θέρμανσης και ψύξης, αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 3.4** και στο **Σχήμα 3.5** φαίνονται στον αριστερό άξονα οι θερμοκρασίες τροφοδοσίας και δοχείου, ενώ στον δεξιό άξονα τυπώνεται το σήμα λειτουργίας της αντλίας θερμότητας, για περίοδο θέρμανσης. Συγκεκριμένα το **Σχήμα 3.4** αφορά στις τυπικές τιμές του **Πίνακα 3.1**, ενώ το **Σχήμα 3.5** παρουσιάζει τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας, αφού έχει πρώτα διαστασιολογηθεί. Έτσι και για τις δύο περιπτώσεις με «μπλε» απεικονίζεται η θερμοκρασία στο δοχείο, με «κόκκινο» η θερμοκρασία τροφοδοσίας και με κίτρινο οι επανεκκινήσεις λειτουργίας της αντλίας θερμότητας (ON/OFF). Εύκολα διαπιστώνεται η διαφορά στα δύο σήματα, καθώς στην πρώτη περίπτωση, οι επανεκκινήσεις (Start/Stop) της αντλίας συμβαίνουν σημαντικά συχνότερα σχετικά με τη δεύτερη. Το γεγονός αυτό και η εύρυθμη λειτουργία που προδίδει το **Σχήμα 3.5** υπογραμμίζει τα θετικά αποτελέσματα που προσέφερε η διαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας. Αξίζει να σημειωθεί, πως το στοιχείο της αντλίας θερμότητας (Type941, Heat Pump) λαμβάνει αρχείου εισόδου (Input File), το οποίο υπαγορεύει την απόδοσή της σε αδιάστατη μορφή, ανηγμένη δηλαδή ως προς το μέγεθος της ονομαστικής ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η μέθοδος της διαστασιολόγησης, καθώς κάθε μεταβολή ονομαστικού σημείου δεν χρειάζεται νέο χάρτη λειτουργίας, παρά μόνο μετατροπή των ονομαστικών τιμών θερμικής ισχύος θέρμανσης και ψύξης.



Σχήμα 3.4: Σήμα λειτουργίας αντλίας θερμότητας, πριν τη διαστασιολόγηση



Σχήμα 3.5: Σήμα λειτουργίας αντλίας θερμότητας, έπειτα από διαστασιολόγηση

Εντέλει, οι αρχικές τυπικές τιμές (Πίνακας 3.1), άλλαξαν μερικώς σε αυτές που ορίστηκαν από τη μέθοδο της διαστασιολόγησης (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά συστήματος, κατόπιν διαστασιολόγησης

Αντλία θερμότητας				Δοχείο αδρανείας				Ηλιακοί συλλέκτες	Κυκλοφορητές
Θέρμανση		Ψύξη		Θέρμανση		Ψύξη			
Qth (kW)	Pel (kW)	Qth (kW)	Pel (kW)	V (L)	Tmin (°C)	V (L)	Tmax (°C)	A (m2)	Pel (W)
7.5	1.95	3	0.78	500	T _{supply} +1	300	T _{supply} -1.5	3	20-40

Αρκετές παράμετροι δεν αναφέρονται ή δεν διαφοροποιήθηκαν από τις τυπικές τους τιμές, επειδή είτε δεν επηρεάζουν σημαντικά το σύστημα και την απόκρισή του, είτε διότι η [17]επιρροή τους θα εξεταστεί διεξοδικότερα στο κεφάλαιο της παραμετρικής ανάλυσης {5}. Ας σημειωθεί, ξανά, πως κατά τη διάρκεια της παραμετρικής ανάλυσης οι παραπάνω τιμές, θα ελεγχθούν και θα αλλαχθούν καταλλήλως.

4. Σενάριο μελέτης

Η τεχνολογία της δυναμικής μόνωσης, αποτελεί ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα και κατά συνέπεια δύναται να εφαρμοστεί σε ποικίλες κλιματικές ζώνες (θερμή, ψυχρή, εύκρατη κ.ο.κ.), σε κτίρια που εμφανίζουν διαφορές στη χρήση τους (κατοικίες, γραφεία, βιομηχανίες κ.α.), στη γεωμετρία και στον προσανατολισμό τους, καθώς και στις ιδιότητες των δομικών του στοιχείων (ελαφριά/βαριά τοιχοποιία). Επιπλέον, θα μπορούσε κάλλιστα να συνεργαστεί και με διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας (λέβητας πετρελαίου, καυστήρας φυσικού αερίου, ενεργειακό τζάκι κ.α.). Όπως συμβαίνει με κάθε τεχνολογία, έτσι και η δυναμική μόνωση δεν θα είναι το ίδιο αποδοτική και συμφέρουσα σε όλο το εύρος των πιθανών εφαρμογών της, αλλά αυτό μένει να εξεταστεί στο παρακάτω κεφάλαιο {5}. Ωστόσο, η κάθε ανάλυση συστήματος χρειάζεται και ένα σενάριο στο οποίο τοποθετείται και λειτουργεί. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το κτίριο αναφοράς και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, ενώ το σύστημα τροφοδοσίας μοντελοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα {3.2}.

4.1 Περιγραφή κτιρίου

Παρότι η ερευνώμενη τεχνολογία δεν βρίσκεται σε ώριμο στάδιο ακόμη, οι πρώτες ενδείξεις προβλέπουν αποδοτικότερη λειτουργία της σε βόρειες χώρες, ψυχρότερων κλιμάτων. Έτσι, για το σενάριο μελέτης επιλέχθηκε ένα τυπικό κτίριο πολυκατοικίας του Μονάχου, στη Γερμανία, με χρονολογία κατασκευής περίπου το 1949 με 1957. Ο επιλεγμένος τύπος οικοδομήματος, αποτελεί μεταπολεμική πολυώροφη κατοικία, αρχιτεκτονικά επαναλαμβανόμενη λόγω της επιτακτικής ανάγκης ανοικοδόμησης της εποχής, ενώ ταυτόχρονα συναντάται σε χώρα της κεντρικής-βόρειας Ευρώπης. Όλα τα ανωτέρω το συνιστούν ιδανική περίπτωση στόχου μαζικής, ριζικής ανακαίνισης, κατά την οποία το σύστημα της δυναμικής μόνωσης, πιθανότατα αποδειχθεί αποτελεσματικό. Πληθώρα των δεδομένων του κτιρίου αναφοράς, αντλήθηκε από το διαδικτυακό εργαλείο (WebTool) του *TABULA* [17].

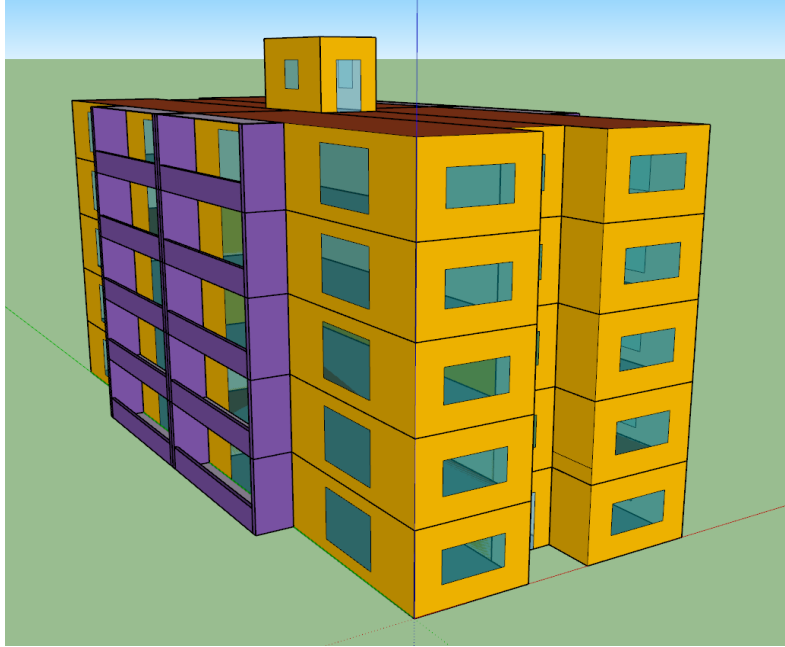
Το *TABULA*, χρηματοδοτούμενο από το πρόγραμμα “*Intelligence Energy Europe*” της Ε.Ε., αποτέλεσε ένα φιλόδοξο και επιτυχημένο εγχείρημα καταγραφής και κατηγοριοποίησης του Ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος. Η ομαδοποίηση υλοποιήθηκε, μεταξύ άλλων παραμέτρων, βάσει χώρας εντοπισμού, μεγέθους και χρονολογίας κατασκευής. Για την κάθε κατηγορία παρέχεται πλήθος στοιχείων, μεταξύ των οποίων απαντώνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι θερμικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων και τα υλικά από τα οποία συντελούνται, καθώς και κάποιοι ενδεικτικοί υπολογισμοί των θερμικών τους αναγκών κατά την υφιστάμενη κατάσταση, σε περίπτωση συνήθους ανακαίνισης και για σενάριο ριζικής ανακαίνισης. Αρχικά, μελετήθηκαν και αρχειοθετήθηκαν στοιχεία για δεκατρείς Ευρωπαϊκές χώρες, ενώ πλέον βρίσκει κανείς στο διαδικτυακό τους εργαλείο (*Tabula WebTool*) δεδομένα για περισσότερες των είκοσι, χώρες.

Με παρόμοιο σκεπτικό, θα πραγματοποιηθεί ενεργειακή ανάλυση για τρεις διαφορετικές καταστάσεις του κτιρίου. Πρώτη περίπτωση, συνιστά η υφιστάμενη κατάσταση, δεδομένα για την οποία λήφθηκαν ως επί το πλείστον από το *Tabula*. Η δεύτερη συνθήκη αφορά στην τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης, ενώ στο τρίτο επίπεδο πραγματοποιείται εφαρμογή και του συστήματος δυναμικής μόνωσης. Επίκεντρο της ανάλυσης αποτελεί, φυσικά, η τρίτη περίπτωση, ενώ οι υπόλοιπες δύο συνιστούν, κυρίως, σημεία σύγκρισης και αναφοράς. Τέλος, ως αναφερθεί πως θερμαινόμενοι χώροι θεωρούνται μόνο τα διαμερίσματα, σε αντίθεση με τους διαδρόμους και το κλιμακοστάσιο.

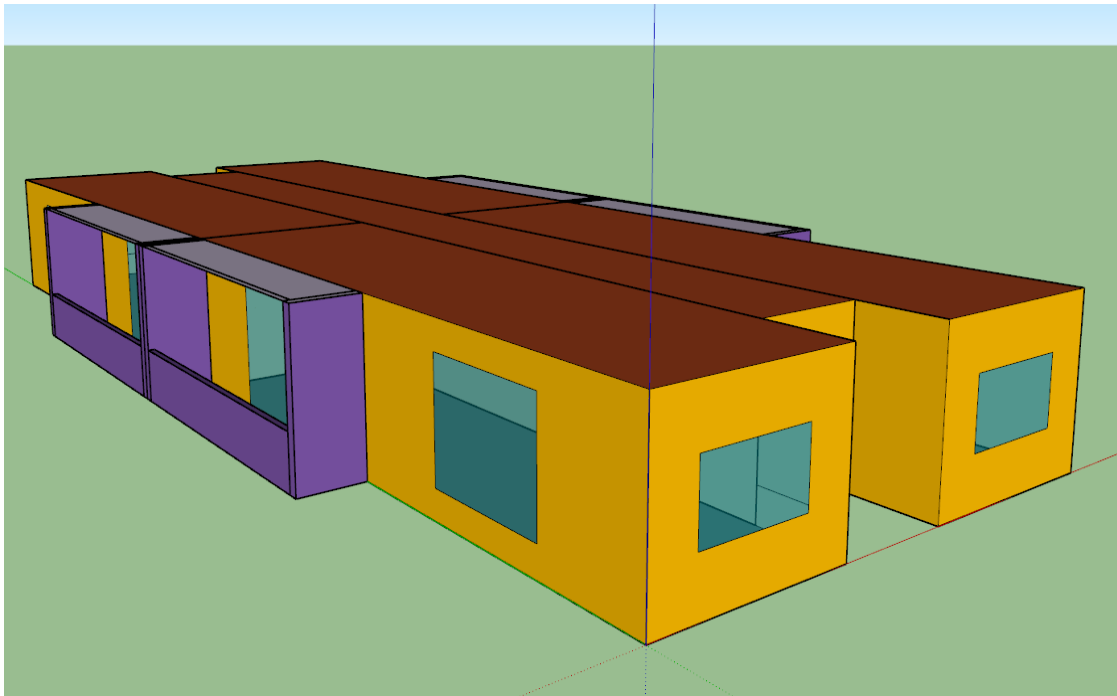
4.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Ως κτιριακό μοντέλο της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε ένας τυπικός όροφος μιας πενταόροφης πολυκατοικίας, κτισμένης στην πόλη του Μονάχου της Γερμανίας πριν το 1957. Η συγκεκριμένη απόφαση πάρθηκε βασισμένη στη μεγάλη μείωση του υπολογιστικού χρόνου και στην εξαγωγή ευστοχότερων και σχετικότερων με το σύστημα της δυναμικής μόνωσης, αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Ειδικότερα, επιλέγεται ένας από τους ενδιάμεσους ορόφους, για δύο λόγους. Πρώτον, επειδή αποτελεί χαρακτηριστικότερο δείγμα του κτιρίου, καθώς συναντάται σε αυτό τρεις φορές συχνότερα, από ότι το πρώτο ή το τελευταίο πάτωμα. Δεύτερον, διότι η γειτνίασή του με θερμαινόμενους χώρους στα οριζόντια δομικά του στοιχεία (πάτωμα, ταβάνι), επιφέρει, πρακτικά, μηδενικές θερμικές απώλειες κάθετα στις εν λόγω επιφάνειες. Η τελευταία λεπτομέρεια είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να παραφραστεί με την πρόταση, πως ροή θερμότητας μεταξύ θερμικής ζώνης και περιβάλλοντος θα υφίσταται μόνο διαμέσου των κάθετων δομικών στοιχείων (τοιχοποιία, κουφώματα). Η πολυκατοικία αποτελείται από πέντε κατοικήσιμους ορόφους (ισόγειο συν τέσσερα επιπλέον επίπεδα) και μια μικρή απόληξη κλιμακοστασίου. Ο κάθε όροφος αποτελείται από τέσσερα διαμερίσματα και ένα διάδρομο που τα ενώνει μεταξύ τους και με τις σκάλες, ενώ ή εξωτερική είσοδος βρίσκεται στην νότια όψη της πολυκατοικίας. Μεγάλα ανοίγματα υπάρχουν στη Δυτική και Ανατολική όψη, μικρότερα με νότιο προσανατολισμό, ενώ στη βόρεια πλευρά έχουν τοποθετηθεί πολύ μικρά παράθυρα μόνο στους διαδρόμους, για λόγους φυσικού φωτισμού. Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται η γεωμετρία της πολυκατοικίας, όπως δημιουργήθηκε σε περιβάλλον *SketchUp*, με χρήση του *TRNSYS3D plugin*. Οι τρεις από τους πέντε ορόφους γειτνιάζουν στην πάνω και κάτω πλευρά τους με άλλα διαμερίσματα, άρα με θερμαινόμενους χώρους, ενώ το πρώτο και το τελευταίο επίπεδο διαθέτουν μια επιπλέον συντοριακή συνθήκη προς έδαφος και περιβάλλον, αντίστοιχα. Εφόσον η δυναμική μόνωση τοποθετείται εξωτερικά μόνο στους τοίχους, ενδεχόμενες απώλειες από πάτωμα και οροφή θα κρίνονταν ανεπιθύμητες, καθώς θα δυσχέραιναν την εξαγωγή συμπερασμάτων αποκλειστικά για το υπό μελέτη σύστημα. Ωστόσο, ακόμη κι έτσι τα αποτελέσματα επηρεάζονται και από τα παράθυρα στα οποία δεν τοποθετείται δυναμικό στρώμα. Στην **Εικόνα 4.2** απεικονίζεται ο τυπικός όροφος μελέτης που χρησιμοποιήθηκε στην προκειμένη μοντελοποίηση, όπως δημιουργήθηκε σε περιβάλλον *SketchUp*, με χρήση του *TRNSYS3D plugin*.

Στο περιεχόμενο του παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 4.1**) παρουσιάζονται τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους, όπως ο λόγος της επιφάνειας παραθύρων προς των τοίχων. Όλες οι τιμές αφορούν σε θερμαινόμενους χώρους και μόνο.



Εικόνα 4.1: Οπτική απεικόνιση πολυκατοικίας



Εικόνα 4.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση του ορόφου μελέτης

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κελύφους

ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ				
Όγκος (m ³)	Δάπεδο (m ²)	Τοιχοποιία (m ²)	Κουφώματα (m ²)	Ποσοστό ανοιγμάτων
212.1	70.69	67.56	16.38	24%
ΌΡΟΦΟΣ				
Όγκος (m ³)	Δάπεδο (m ²)	Τοιχοποιία (m ²)	Κουφώματα (m ²)	Ποσοστό ανοιγμάτων
848.3	282.78	270.56	59.76	22%

4.1.2 Θερμικές ιδιότητες κτιριακού κελύφους

Αντλώντας δεδομένα από τις βιβλιοθήκες του *TABULA* προσδιορίζουμε τα θερμικά χαρακτηριστικά τριών δομικών στοιχείων και τα υλικά που τα αποτελούν. Αναφορικά, τα παραπάνω αφορούν στα στοιχεία του δαπέδου, της οροφής και των κατακόρυφων τοίχων. Συγκεκριμένα, τα κύρια στρώματα των προηγούμενων είναι οι τσιμεντόλιθοι, το οπλισμένο σκυρόδεμα και οι οπτόπλινθοι, αντίστοιχα. Δεδομένα για τις θερμικές ιδιότητες των υλικών αντλήθηκαν από τον συγκεντρωτικό *Πίνακα 1* της *T.O.T.E.E. 20701-1/2017* του *Κ.Εν.Α.Κ [2]*. Πληροφορίες λήφθηκαν και για τη δημιουργία των εξωτερικών πορτών, χωρίς να επηρεάζουν άμεσα τους θερμαινόμενους χώρους. Ωστόσο, χρειάστηκε η δημιουργία ενός ακόμη στοιχείου, αυτού του φέροντος οργανισμού (κολώνα), το οποίο επωμίζεται τα στατικά φορτία του οικοδομήματος. Στην προκειμένη περίπτωση, η αποτύπωση του δεν είναι εφικτή, συνεπώς ακολουθείται συμβατικός υπολογισμός του εμβαδού που καταλαμβάνουν οι κολώνες ως ποσοστό επί της εξωτερικής όψης. Συγκεκριμένα, η εν λόγω αναλογία προσεγγίστηκε μέσω του *Πίνακα 3.1* της *T.O.T.E.E. 20701-1/2017* του *Κ.Εν.Α.Κ. [3]*. Παρουσίαση των προαναφερθέντων τιμών πραγματοποιείται παρακάτω (**Πίνακας 4.2**). Το κτίριο αναφοράς αντιστοιχεί ξεκάθαρα στην πρώτη γραμμή τιμών, ενώ ως πενταόροφο ομαδοποιείται, οριακά, στην τρίτη στήλη. Επειδή όμως ο **Πίνακας 4.2** έχει δημιουργηθεί για την Ελλάδα, μια σεισμογενή χώρα και δεν συμπεριλαμβάνει ξεχωριστές τιμές για χρονολογίες κατασκευής πριν το 1960, επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε, εντέλει, το ποσοστό της δεύτερης στήλης τιμών, δηλαδή 20% φέροντος οργανισμού επί της επιφάνειας όψης.

Τα δομικά πολυστρωματικά στοιχεία, ο συντελεστής διαπερατότητας (U) τους και το τελικό πάχος (d), παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω (**Πίνακας 4.3**).

Πίνακας 4.2: Ποσοστό φέρων οργανισμού στην εξωτερική επιφάνεια

Έτος έκδοσης οικοδομικής άδειας	Πλήθος ορόφων		
	έως 2	2 < όροφοι < 5	≥5
Προ του 1980	15%	20%	23%
1980 έως 1999	18%	23%	28%

Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3].

Πίνακας 4.3: Συντελεστής θερμοπερατότητας (U) και πάχος (d) δομικών στοιχείων

	Εξωτερικός τοίχος	Δάπεδο	Οροφή	Κολώνα
U (W/m ² K)	1.21	1.31	1.59	1.84
d (m)	0.314	0.326	0.448	0.314

Η περίπτωση των ανοιγμάτων δεν διαφέρει. Στο υφιστάμενο κτίριο υπάρχουν τοποθετημένα παράθυρα διπλού υαλοπίνακα (*TABULA*), τα οποία αντικαθίστανται στη συνέχεια από τριπλά παράθυρα, των οποίων οι βασικές ιδιότητες παρατίθενται ακολούθως (Πίνακας 4.4). Ο συντελεστής *g-value* δείχνει το ποσοστό της προσπίπτουσας, ακτινοβολίας στον υαλοπίνακα, το οποίο το διαπερνά και διαχέεται στον εσωτερικό χώρο.

Πίνακας 4.4: Συντελεστής θερμοπερατότητας (U) και ηλιακός συντελεστής (g), παραθύρων υφιστάμενης και ανακαινισμένης περίπτωσης

Παράθυρα	Παλιά	Νέα
U (W/m²)	3.36	0.61
g value	0.772	0.5

4.1.3 Θερμογέφυρες

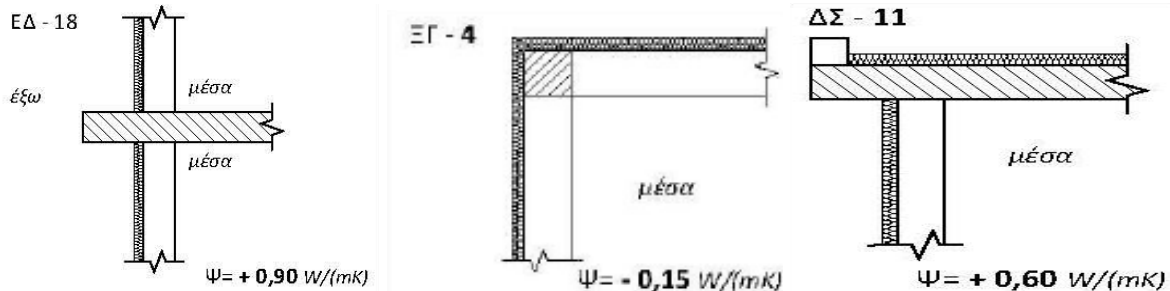
Ο ορισμός σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017 του Κ.Εν.Α.Κ. [2], αναφέρει πως «Θερμογέφυρες ονομάζονται οι θέσεις στο κέλυφος ενός κτηρίου, στις οποίες εμφανίζεται

σε σχέση με τις γειτονικές τους διαφοροποίηση στη θερμική αντίσταση των δομικών στοιχείων είτε λόγω ασυνέχειες της στρώσης θερμομόνωσης είτε λόγω διαφοροποίησης του υλικού κατά μήκος του δομικού στοιχείου είτε λόγω αλλαγής της γεωμετρίας της διατομής. Σε αυτές τις θέσεις παρατηρείται μεταβολή στη ροή θερμότητας και στην εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία σε σχέση με τις γειτονικές τους». Συνεπώς, αποτελούν αδύναμα σημεία του κελύφους, επηρεάζοντας τη συμπεριφορά του κτιρίου, ενώ συνήθως εισάγουν έναν απρόβλεπτο παράγοντα στους ενεργειακούς υπολογισμούς. Επιπλέον, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην υποβάθμιση της αίσθησης θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του χώρου και στην πρόκληση φθορών και ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως η υγραποίηση και η εμφάνιση μούχλας. Όπως αναφέρεται και στην *T.O.T.E.E. 20701-2/2017* του *Κ.Εν.Α.Κ. [3]*, μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, στις γραμμικές και στις σημειακές. Οι σημειακές (π.χ. καρφή κορνίζας σε τοίχο) δεν εμφανίζονται σε κάποια διάσταση, αλλά σε ένα μόνο σημείο του χώρου, ενώ η επιρροή τους κρίνεται ουσιαστικά αμελητέα και δεν συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς. Οι γραμμικές θερμογέφυρες, αντίθετα, παρουσιάζουν σταθερή διατομή, κατά την έννοια μιας διάστασης, εκτείνονται κατά ένα μήκος, κάθετο στην ομοιόμορφη διατομή, ενώ δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης θέσεων έντονης εμφάνισης δισδιάστατων φαινομένων μετάδοσης θερμότητας. Η παραδοχή μονοδιάστατης ροής δεν μπορεί να εφαρμοστεί και για αυτό το λόγω η επίδραση τους στις θερμικές ανταλλαγές προσεγγίζεται. Αναλυτικότερα, οι γραμμικές θερμογέφυρες κατηγοριοποιούνται σε δύο επί μέρους τύπους, στις γεωμετρικές και της κατασκευαστικές, ενώ γίνεται να υπάρξει και συνδυασμός των ανωτέρω. Οι πρώτες απαντώνται σε σημεία γεωμετρικών ασυνεχειών (π.χ. γωνίες), ενώ οι κατασκευαστικές σε θέσεις που εμφανίζονται ανομοιομορφίες και ασυνέχειες στα υλικά και τις θερμικές τους ιδιότητες (π.χ. ένωση δοκαριού, τοίχου και θερμομόνωσης), κατά μήκος ενός δομικού στοιχείου. Η μεθοδολογία υπολογισμού των απωλειών λόγω θερμογεφυρών, βασίζεται στην εφαρμογή του τύπου **(4.1)**.

$$Q_{\text{θερμ/ρών}} = \Psi \cdot l \quad [\text{W/K}] \quad (4.1)$$

Ως “*l*” ορίζεται το μήκος στο οποίο εκτείνεται η λεπτομέρεια της θερμογέφυρας (κάθετο στην ομοιόμορφη διατομή), ενώ “*Ψ*” είναι ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας σε [*W/m · K*] που χαρακτηρίζει τον κάθε διαφορετικό τύπο θερμογέφυρας. Ο ακριβής υπολογισμός του συντελεστή *Ψ* απαιτεί χρήση ειδικού λογισμικού δισδιάστατης ή και τρισδιάστατης ανάλυσης. Ωστόσο, υπάρχουν, σε διάφορες πηγές, πίνακες τιμών για πολλές συχνώς εμφανιζόμενες θερμογέφυρες με συνήθη υλικά. Τελικά, κρίθηκε σκοπιμότερη η χρήση τυπικών τιμών, συντελεστών γραμμικής θερμοπερατότητας, από τον Πίνακα 15 της *T.O.T.E.E. 20701-2/2017* του *Κ.Εν.Α.Κ. [2]*. Οι κυριότερες θερμογέφυρες στο παρόν σενάριο, εμφανίζονται στην εδαφόπλακα, στην οροφή (πρόβολος), στις εξωτερικές γωνίες, στα διάφορα ανοίγματα και στις θέσεις ύπαρξης μπαλκονιού. Στην **Εικόνα 4.3** παρουσιάζονται τρεις σημαντικές περιπτώσεις θερμογεφυρών του κτιρίου αναφοράς και οι τιμές του συντελεστή *Ψ*, όπως αυτά αναγράφονται στην *T.O.T.E.E. 20701-2/2017* του *Κ.Εν.Α.Κ. [2]*. Τέλος, ως αναφερθεί πως μερικές περιπτώσεις (π.χ. εξωτερικές γωνίες, ΞΓ-4) εμφανίζουν

αρνητικό συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας. Στα συγκεκριμένα σημεία η ύπαρξη των θερμογεφυρών συνεισφέρει θετικά στην αποκοπή των απωλειών προς το περιβάλλον. Οι τύποι των θερμογεφυρών εμφανίζουν τέτοια συμπεριφορά, εξαρτάται από το αν στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται εξωτερικές ή εσωτερικές διαστάσεις.



Εικόνα 4.3: Τυπικές τιμές συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ

Εφόσον, διατίθεται πλέον μια υπολογιστική προσέγγιση των θερμογεφυρών, αρκεί να τις προσομοιώσουμε στο μοντέλο. Για τη συγκεκριμένη διαδικασία το *TRNSYS18* διαθέτει μια νέα, χρήσιμη λειτουργία. Συγκεκριμένα, προσφέρεται η δυνατότητα εισαγωγής μιας θερμογέφυρας στο περιβάλλον του *TRNBuild* ως εσωτερικό θερμικό κέρδος, επιλέγοντας την αντίστοιχη κατηγορία. Έτσι, δημιουργείται ένας διαφορετικός τύπος εσωτερικού κέρδους για κάθε διαφορετική κατηγορία θερμογέφυρας (διαφορετικός συντελεστής Ψ) και εισάγεται στην εκάστοτε θερμικής ζώνη, πολλαπλασιαζόμενος με το αντίστοιχο μήκος θερμογέφυρας (l). Κανονικά, θα χρειαζόταν να δημιουργηθεί, από το χρήστη, μια νέα μεταβλητή για τη θερμοκρασιακή διαφορά κάθε ζώνης με το περιβάλλον, που θα πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή θερμοπερατότητας (Ψ) και το μήκος θερμογέφυρας (l). Ωστόσο, ορίζοντας το θερμικό κέρδος ως θερμογέφυρα, αναγνωρίζεται και πολλαπλασιάζεται αυτομάτως, από το ίδιο το πρόγραμμα, με τη θερμοκρασιακή διαφορά, απλοποιώντας και διευκολύνοντας σημαντικά την όλη διαδικασία.

4.2 Συνθήκες λειτουργίας κτιρίου

Οι απαιτήσεις, οι καταναλώσεις και η απόκριση ενός κτιρίου, διαφέρουν ανάλογα με τις λειτουργίες που επιτελεί και τη χρήση του. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα μιας ενεργειακής ανάλυσης θα επηρεάζονται από συνθήκες όπως είναι ο αερισμός, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη και οι συνθήκες θερμικής άνεσης. Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται προσδιορισμός και αιτιολόγηση επιλογής των συγκεκριμένων συνθηκών λειτουργίας. Υπενθυμίζεται, πως το κτίριο αναφοράς λογίζεται ως κατοικία.

4.2.1 Εσωτερικά θερμικά κέρδη

Όπως προδίδει και η ονομασία τους, ως εσωτερικά θερμικά κέρδη λογίζονται οι πηγές θερμότητας που βρίσκονται στο εσωτερικό της θερμαινόμενης ζώνης, προσδίδοντας, ακούσια, θερμότητα στο χώρο, χωρίς αυτό να αποτελεί αυτοσκοπό τους. Συνήθη θερμικά κέρδη αποτελούν οι διάφορες συσκευές (κυρίως ηλεκτρικές), ο φωτισμός, αλλά ακόμη και οι ίδιοι οι άνθρωποι, ενώ το σύστημα θέρμανσης, σύμφωνα και με τον προηγούμενο ορισμό, δεν χαρακτηρίζεται ως τέτοιο. Επομένως, παρουσιάζονται ξεχωριστά ο καθένας από τους τρεις κύριους τύπους κερδών.

1. Άνθρωποι

Οι ίδιοι οι άνθρωποι, όπως και κάθε τι επεξεργάζεται ενέργεια, αποτελούν μια εν δυνάμει θερμική μηχανή, ενώ φυσικά η ισχύς τους ποικίλει. Για παράδειγμα, σε ένα χώρο γυμναστηρίου, όπου η φυσική δραστηριότητα είναι ιδιαίτερα αυξημένη θα υπάρχουν και τα ανάλογα μεγαλύτερα θερμικά κέρδη, συγκριτικά με ένα αναγνώστηριο, όπου η κίνηση είναι περιορισμένη στο ελάχιστο. Ακόμη, μια παράμετρος, προφανώς αποτελεί και το πλήθος των ατόμων στο χώρο. Έτσι, μια αίθουσα εκδηλώσεων θερμαίνεται γρηγορότερα από ότι ένας χώρος του πρωτογενούς τομέα. Το κτίριο αναφοράς αποτελεί κατοικία, συνεπώς χρειάζεται να προσδιοριστεί το πλήθος ατόμων που του αναλογεί και το επίπεδο της φυσικής τους δραστηριότητας. Ένας επιπλέον παράγοντας, που μπορεί εύκολα να ξεχαστεί, είναι το τυπικό ωράριο λειτουργίας του κτιρίου. Για παράδειγμα ένα νηπιαγωγείο και ένα νοσοκομείο δεν έχουν το ίδιο ωράριο, άρα πιθανότατα εμφανίζουν και διαφορετικό συντελεστή παρουσίας, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψιν στους ενεργειακούς υπολογισμούς. Έτσι, οι τρεις προαναφερθείσες τιμές λαμβάνονται από σχετικούς πίνακες της *T.O.T.E.E. 20701-1/2017* του *Κ.Εν.Α.Κ. [3]*. Για λόγους πληρότητας, παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν, όπως αυτές δίνονται στους πίνακες της τεχνικής οδηγίας (**Πίνακας 4.5** και **Πίνακας 4.6**).

Πίνακας 4.5: Πλήθος ατόμων και ανάγκη αερισμού σε κατοικία

Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Άτομα / 100 m ² επιφ. δαπέδου	Νωπός αέρας [m ³ /h/άτομο]	Νωπός αέρας [m ³ /h/m ²]
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	5	15	0,75

Πηγή: *T.O.T.E.E. 20701-1/2017 [3]*

Πίνακας 4.6: Θερμική ισχύς ατόμων και μέσος συντελεστής παρουσίας

Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Θερμική ισχύς ανά άτομο [W/άτομο]	Θερμική ισχύς ανά μονάδα δομημένης επιφάνειας [W/m ²]	Μέσος συντελεστής παρουσίας
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	80	4	0,75

Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]

2. Εξοπλισμός

Για τον υπολογισμό της θερμικής προσφοράς από τις διάφορες συσκευές προαπαιτείται ο συνδυασμός, παρόμοια με προηγούμενως, τριών συνιστωσών. Αρχικά, της εγκατεστημένης ισχύς ανά επιφάνεια δαπέδου, έπειτα του γνωστού πλέον μέσου συντελεστή λειτουργίας/παρουσίας και ενός επιπλέον συντελεστή ετεροχρονισμού. Ο τελευταίος αποτελεί δείκτη του ποσού εγκατεστημένης ισχύς που πραγματικά χρησιμοποιείται κατά τις ώρες λειτουργίας. Συνεπώς, το θερμικό κέρδος ισούται με το γινόμενο των τριών, αυτών, μεγεθών. Αριθμητικές υποθέσεις λαμβάνονται από σχετικούς πίνακες της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]. Για λόγους πληρότητας, απεικονίζονται παρακάτω οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν, όπως δίνονται σε πίνακα της τεχνικής οδηγίας (**Πίνακας 4.7**).

Πίνακας 4.7: Εκτιμώμενη θερμική ισχύς εξοπλισμού και συντελεστής ετεροχρονισμού

Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Ισχύς εξοπλισμού [W/m ²]	Μέσος συντελεστής ετερ/σμού	Ετεροχρον. ισχύς εξοπλ. [W/m ²]	Μέσος συντελεστής λειτουργίας
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	4	0,5	2	0,75

Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]

3. Φωτισμός

Όμοια με τον εξοπλισμό, έτσι και ο φωτισμός, με τη λειτουργία του προσδίδει ένα ποσό θερμότητας στον φωτιζόμενο χώρο. Για τους απαραίτητους υπολογισμούς, χρειάζονται, εκτός από το συντελεστή λειτουργίας (0.75) και τον

συντελεστή ετεροχρονισμού για τις διατάξεις φωτός (0.1), η στάθμη γενικού φωτισμού για κατοικία και η εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού, ανάλογη της στάθμης φωτισμού. Το θερμικό αποτέλεσμα της διάταξης φωτισμού ισούται με γινόμενο των ανωτέρω όρων, όμοιο με προηγούμενως. Υποθέσεις για τα εν λόγω μεγέθη λαμβάνονται από σχετικούς πίνακες της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]. Για λόγους πληρότητας, παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν, όπως αυτές δίνονται στους πίνακες της τεχνικής οδηγίας (Πίνακας 4.8 και Πίνακας 4.9).

Πίνακας 4.8: Στάθμη γενικού φωτισμού

Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Στάθμη φωτισμού [lx]	Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m]	Δείκτης θάμβωσης UGR	Ομοιομορφία φωτισμού U _o (min/μέση τιμή)
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	200	0,8	-	-

Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]

Πίνακας 4.9: Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού ανάλογα της στάθμης φωτισμού

Ζώνες τεχνητού φωτισμού / Στάθμη φωτισμού [lx]	Ισχύς για κτήριο αναφοράς [W/m ²]	Ισχύς για ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης κτιρίων [W/m ²]
1000	32	28,0
500	16	14,0
400	12,8	11,2
300	9,6	8,4
250	8,0	7,0
200	6,4	5,6
100	3,2	2,8

Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]

4.2.2 Αερισμός

Οι άνθρωποι, κατά τη λειτουργία της αναπνοής, καταναλώνουν οξυγόνο εκπνέοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Υψηλές συγκεντρώσεις, του τελευταίου, στον αέρα γίνονται αντιληπτές, καθώς προκαλούν συνήθως αισθήματα δυσφορίας, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις ακόμη και ζαλάδες και λιποθυμίες. Έτσι, κάθε χώρος που φιλοξενεί ανθρώπους, ή γενικά έμβια όντα, χρειάζεται να αντικαθιστά τον αέρα στο εσωτερικό του με νωπό, από το περιβάλλον. Ο ρυθμός εναλλαγών, εξαρτάται από το πλήθος εντός του χώρου και της δραστηριότητάς του. Η διαδικασία του αερισμού πραγματοποιείται με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά, με το άνοιγμα των παραθύρων, οπότε ονομάζεται φυσικός αερισμός, αφού στοιχεία αέρα ρέουν αυθόρμητα από το εξωτερικό περιβάλλον προς το χώρο και αντίστροφα. Ο μηχανικός αερισμός, δεύτερον, αποτελεί την μόνη μελετημένη και αριθμητικά ακριβή μέθοδο αερισμού, καθώς αφορά σε μηχανικό σύστημα απαγωγής και προσαγωγής συγκεκριμένης ποσότητας αέρα, από πιθανά επιμέρους δωμάτια της ζώνης. Σε αντίθεση με τον φυσικό αερισμό που είναι απρόβλεπτος, καθώς εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα αέρα) και από το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων, ο μηχανικός αερισμός όντας ευστοχότερος στην ποσότητα απαιτούμενου αέρα αποτελεί, θερμικά, οικονομικότερη λύση, ενώ προσφέρει τη δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας, με χρήση ενός εναλλάκτη που συνδέει, θερμικά, τα ρεύματα εισαγωγής και απαγωγής. Η τρίτη περίπτωση, πρόκειται για την ανεξέλεγκτη και ανεπιθύμητη διείσδυση αέρα (infiltration), από εσοχές και χαραμάδες, όπως για παράδειγμα από τη συναρμογή ανοιγμάτων και τοίχων. Πρόβλεψη και περιορισμός της τελευταίας ποσότητας πραγματοποιείται σε μεγάλο βαθμό με την βελτίωση των επιπέδων αεροστεγανότητας (καλύτερες συναρμογές, επιστρώσεις αεροστεγανών υλικών κ.α.) και προτείνεται για ακριβέστερα αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης και πιο ελεγχόμενης συμπεριφοράς του κτιρίου. Ένα επιπλέον στοιχείο, αποτελεί η επικοινωνία της ζώνης με γειτονικούς χώρους, αλλά δεν λογίζεται στο κομμάτι του αερισμού, αφού η ανταλλαγές δεν αφορούν σε φρέσκο αέρα.

Η ανάγκη αερισμού του κάθε διαμερίσματος προσδιορίζεται βάσει των τετραγωνικών δαπέδου (70.69m²) και τη χρήση του χώρου, ή με αντίστοιχο τρόπο βάσει αριθμού ατόμων (**Πίνακας 4.5**). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι εναλλαγές αέρα, λόγω διεισδύσεων αέρα (infiltration), σύμφωνα με τις υποταγές της *T.O.T.E.E. 20701-1/2017 [3]*. Το πλαίσιο των παραθύρων είναι συνθετικό και οι τιμές της αεροστεγανότητας φαίνονται παρακάτω (**Πίνακας 4.10**). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, προέκυψε πως οι διεισδύσεις, αρκούν για να καλύψουν της ανάγκες αερισμού στο χώρο, συνεπώς δεν απαιτείται ούτε φυσικός, ούτε μηχανικός αερισμός. Ωστόσο, για ευκολότερη επίτευξη των επιθυμητών θερμοκρασιών χώρου και πρόβλεψης της συμπεριφοράς των κατοίκων, μοντελοποιήθηκε φυσικός αερισμός, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος ανήκει στο θερμοκρασιακό εύρος άνεσης και απέχει τουλάχιστον έναν βαθμό Κελσίου από τα όρια της.

Πίνακας 4.10: Διείσδυση αέρα από κουφώματα

Είδος ανοίγματος (υαλοστάσια, πόρτες κ.ά.)	Διείσδυση του αέρα	
	Πόρτα	Παράθυρο
	[m ³ /h/m ²]	[m ³ /h/m ²]
Κουφώματα με μεταλλικό ή συνθετικό πλαίσιο χωρίς πιστοποίηση		
Κούφωμα με μονό υαλοπίνακα, μη αεροστεγές, χωνευτό, επάλληλο, ανοιγόμενο. Κούφωμα χωρίς υαλοπίνακα (πόρτα) και χωρίς αεροστεγανότητα.	7,4	8,7
Κούφωμα με διπλό υαλοπίνακα, επάλληλα συρόμενο, με ψήκτρες, χωνευτό. Ανοιγόμενο κούφωμα, με διπλό υαλοπίνακα, χωρίς πιστοποίηση. Κούφωμα χωρίς υαλοπίνακα (πόρτα), με αεροστεγανότητα μη πιστοποιημένη.	5,3	6,8

Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]

4.2.3 Θερμική άνεση

Οι συνθήκες άνεσης ενός χώρου, εξαρτώνται από διάφορα μεγέθη, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, τα επίπεδα φωτεινότητας και η συγκέντρωση σωματιδίων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Όταν στη ζώνη διατηρούνται τα απαιτούμενα εύρη τιμών, για τα προαναφερθέντα μεγέθη, η εμφάνιση αισθημάτων δυσφορίας των χρηστών της, μειώνονται σημαντικά, ενώ δεν γίνεται η απόλυτη εξάλειψή της, καθώς οι συνθήκες άνεσης διαφέρουν από άτομο σε άτομο. Στα πλαίσια της παρούσας ενεργειακής ανάλυσης, προκύπτει ενδιαφέρον ορισμού μόνο των θερμοκρασιακών επιπέδων άνεσης. Για την Ελλάδα οι καθοριζόμενες θερμοκρασίες για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου, ορίζονται στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3] και παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 4.11).

Πίνακας 4.11: Θερμοκρασιακές συνθήκες άνεσης για την Ελλάδα

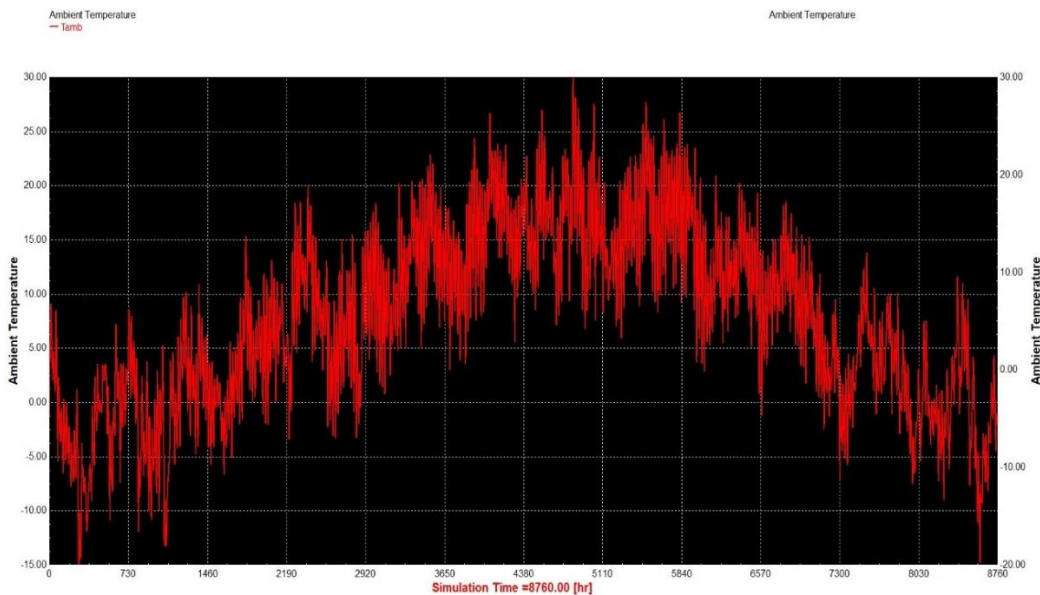
Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Θερμοκρασία [°C]	
	Χειμερινή περίοδος	Θερινή περίοδος
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	20	26

Πηγή: Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 [3]

Ωστόσο, για εφαρμογή στην περιοχή του Μονάχου της Γερμανίας, θα εφαρμοστεί θερμοκρασιακή ανοχή μικρότερη κατά ένα βαθμό Κελσίου, τη θερινή περίοδο. Έτσι, ο αέρας στο εσωτερικό της θερμαινόμενης ζώνης θα χαρακτηρίζεται, πάντα, από θερμοκρασία στο εύρος [20, 25].

4.3 Κλίμα

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το σενάριο της παρούσας εργασίας, αφορά σε κτίριο της πόλης του Μονάχου. Όπως είναι γνωστό, η Γερμανία χαρακτηρίζεται από ψυχρό κλίμα, που παρουσιάζει πολλές διαφορές με το κλίμα της Ελλάδας (π.χ. Αθήνα). Οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του περιβάλλοντος, επηρεάζουν άμεσα και σε μεγάλο βαθμό τη μοντελοποίηση σε επίπεδο στησίματος, διαστασιολόγησης, αλλά και στην ενεργειακή συμπεριφορά, λόγω απωλειών προς το περιβάλλον. Στην **Εικόνα 4.4** φαίνεται η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα στο Μόναχο. Φαίνεται να κυμαίνεται στο εύρος [-15, 30] βαθμών κελσίου. Επιπλέον, εμφάνιση θερμοκρασιών υψηλότερων των 25°C πραγματικά σπανίζει. Το τελευταίο γεγονός προδίδει ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο, κατά το οποίο υπάρχει ανάγκη ψύξης του χώρου λόγω εσωτερικών θερμικών κερδών, παρότι η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη της μέγιστης επιτρεπτής στη ζώνη. Έτσι, κατά ένα σημαντικό διάστημα της περιόδου ψύξης, θερμότητα θα ρέει από το εσωτερικό του διαμερίσματος προς το περιβάλλον, όπως γίνεται στην περίοδο θέρμανσης. Η ιδιαιτερότητα, αυτή, επιφέρει αύξηση των φορτίων ψύξης της μέρες εκείνες εφόσον έχει μονωθεί το κτίριο. Συνεπώς, ενδέχεται οι συνολικές απαιτήσεις ψύξης στην υφιστάμενη περίπτωση να είναι λιγότερες από ότι στην μονωμένη κατάσταση. Περισσότερες λεπτομέρειες και σχόλια στο κεφάλαιο της ενεργειακής ανάλυσης (5).



Εικόνα 4.4: Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Μόναχο

4.4 Περιπτώσεις-Σενάρια

Για τους σκοπούς της ενεργειακής ανάλυσης, μελετώνται και συγκρίνονται διαφορετικά σενάρια. Διακρίνονται περιπτώσεις ανάλογα το κέλυφος του κτιρίου και των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης του.

4.4.1 Κέλυφος

Βάσει του κτιριακού κελύφους διακρίνονται τρεις περιπτώσεις.

➤ Σενάριο 0 – Υφιστάμενο

Πρόκειται για την περίπτωση του υφιστάμενου, αμόνωτου κτιρίου για την οποία λήφθηκαν δεδομένα από το πρόγραμμα *TABULA* [17].

➤ Σενάριο 1 – Εξωτερική μόνωση

Στο προκείμενο σενάριο προστίθεται στρώμα εξωτερικής μόνωσης διογκωμένης πολυστερίνης (EPS). Με την συμβατική αυτή παρέμβαση επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας (U) της τοιχοποιίας.

➤ Σενάριο 2 – Δυναμική μόνωση

Αποτελεί το βασικό σενάριο μελέτης της παρούσας εργασίας, καθώς αφορά στην προσθήκη και του συστήματος δυναμικής μόνωσης. Έτσι, τα αδιαφανή κάθετα δομικά στοιχεία του κελύφους αποτελούνται από τον υφιστάμενο πολυστρωματικό τοίχο, το στρώμα δυναμικής μόνωσης, αλλά και την εξωτερική μόνωση (EPS). Ας υπογραμμιστεί πως ένα προκατασκευασμένο στοιχείο μπορεί να συνίσταται από το στρώμα δυναμικής και συμβατικής μόνωσης, καθώς και από διάφορες άλλες επιστρώσεις (Εικόνα 4.5).

4.4.2 Συστήματα θέρμανσης/ψύξης

Βάσει των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης χώρων του κτιρίου, διακρίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Κατατοπιστική είναι η Εικόνα 4.6.

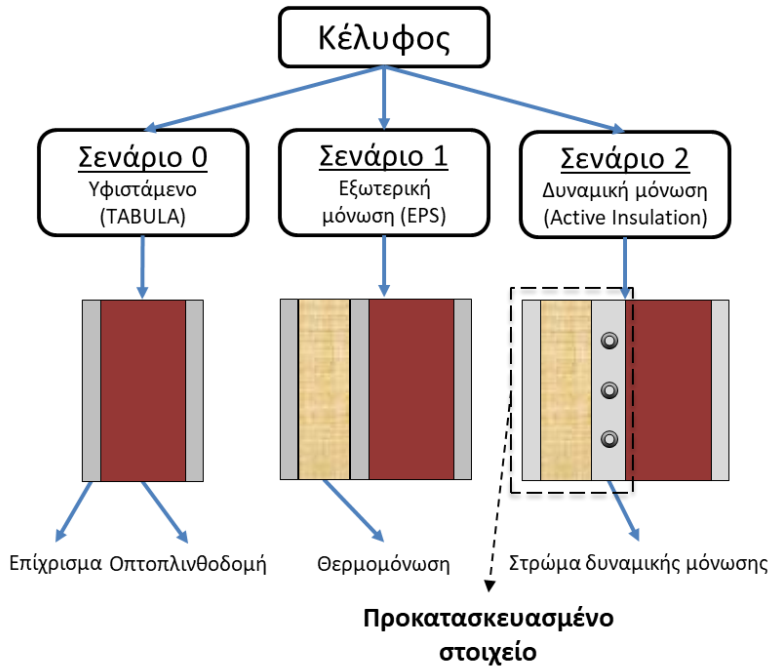
• Σενάριο a – υφιστάμενο

Αφορά στα υπάρχοντα συστήματα χωρίς καμία παρέμβαση. Συγκεκριμένα, για τη θέρμανση χώρων χρησιμοποιείται λέβητας πετρελαίου, ενώ για την ψύξη κλιματιστικά διαιρούμενου τύπου (Split).

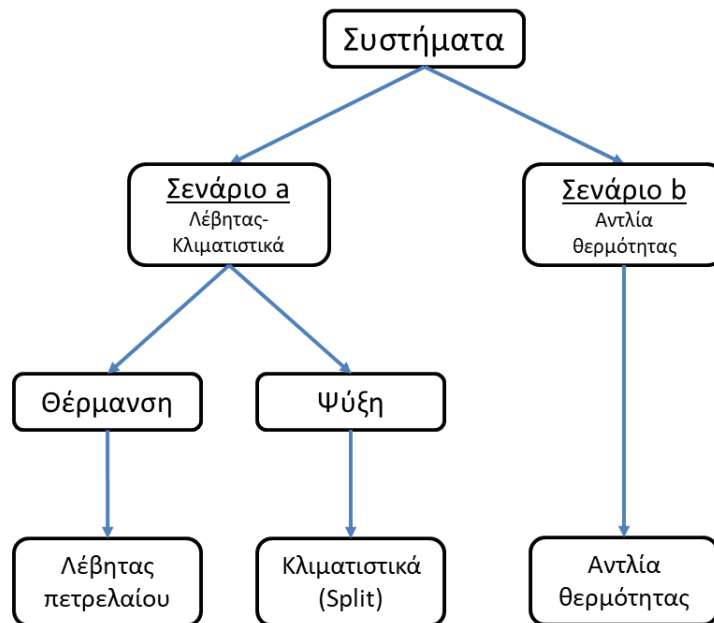
• Σενάριο b – Αντλία Θερμότητας

Πραγματοποιείται αντικατάσταση των υφιστάμενων συστημάτων με αντλία θερμότητας τύπου αέρα-αέρα. Για την απόδοση της συγκεκριμένης αντλίας

χρησιμοποιήθηκε, απλουστευτικά, ο συντελεστής απόδοσης (COP) της αντλίας θερμότητας αέρα-νερού που χρησιμοποιείται στο σύστημα τροφοδοσίας.



Εικόνα 4.5: Διακριτά σενάρια βάσει κελύφους



Εικόνα 4.6: Διακριτά σενάρια συστημάτων θέρμανσης/ψύξης

5. Ενεργειακή ανάλυση

Όπως κάθε τεχνολογία, έτσι και η δυναμική μόνωση, διαθέτει ευρύ πεδίο συνθηκών στο οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί. Αναμενόμενα, η απόδοση και η οικονομικότητά της επηρεάζονται από άφθονο πλήθος παραμέτρων, συνεπώς μεταβάλλονται από εφαρμογή σε εφαρμογή. Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η ενεργειακή ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος, σύμφωνα με τη μεθόδου παραμετρικής διερεύνησης. Με τον τρόπο αυτόν, επιδιώκεται η βαθύτερη κατανόηση της τεχνολογίας, της επιρροής των επί μέρους παραμέτρων στην απόκριση της και ο προσδιορισμός των συνθηκών εκείνων που ευνοούν τη λειτουργία της.

5.1 Βασικοί δείκτες απόδοσης συστήματος-KPIs

Για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος χρειάζεται να οριστούν ενδεικτικοί αριθμητικοί συντελεστές. Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται βασικοί δείκτες απόδοσης (key performance indicators-KPIs), καθώς συμβάλουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων από την ενεργειακή ανάλυση και στον προσδιορισμό των ευνοϊκότερων, για το σύστημα, συνθηκών λειτουργίας. Έχει ήδη αναφερθεί σε παραπάνω κεφάλαιο {4}, πως μελετώνται τρία διαφορετικά σενάρια σχετικά με το κέλυφος του κτιρίου.

- Σενάριο 0: Υφιστάμενη, αμόνωτη περίπτωση.
- Σενάριο 1: Προσθήκη εξωτερικής θερμομόνωσης.
- Σενάριο 2: Επιπλέον τοποθέτηση συστήματος δυναμικής μόνωσης

Φυσικά, αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί το σενάριο 2, ενώ το σενάριο 0 αποτελεί, απλά και μόνο, το πρωταρχικό σημείο αναφοράς. Με χρήση του σεναρίου 1, ορίζονται οι προηγούμενοι συντελεστές και εξάγονται συμπεράσματα για το δυναμικό στρώμα, με τρόπο τέτοιο ώστε να μην επηρεάζονται άμεσα από την εξωτερική θερμομόνωση. Έτσι, ορίζονται τελικά οι βασικοί δείκτες απόδοσης του συστήματος, επεξήγηση των οποίων πραγματοποιείται στις επόμενες υποενότητες. Ας σημειωθεί, πως η απόδοση του συστήματος εξετάζεται ξεχωριστά για θέρμανση και ψύξη, συνεπώς και οι βασικοί δείκτες υπολογίζονται για τις δύο περιπτώσεις. Υπάρχει δυνατότητα συμψηφισμού των δύο καταστάσεων με χρήση σταθμισμένου αθροίσματος, προς τελική αξιολόγηση του συστήματος. Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο χάνεται πληροφορία για την επί μέρους λειτουργία σε περίοδο θέρμανσης και ψύξης.

5.1.1 Βαθμός κάλυψης (coverage)

Ο βαθμός κάλυψης (**Coverage**) δείχνει την ποσοστιαία μείωση των αναγκών θέρμανσης/ψύξης που επιτυγχάνεται, δηλαδή την εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας. Για το συγκεκριμένο δείκτη, χρειάζονται οι τιμές των θερμικών αναγκών του κτιρίου στο

σενάριο 1 και στο σενάριο 2. Ορίζεται, συναρτήσει των προηγούμενων μεγεθών, σύμφωνα με τον τύπο **(5.1)**.

$$Coverage = \frac{Q_i - Q_2}{Q_i} \quad (5.1)$$

Όπου:

- Q_i : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο i , $i=0, 1$
- Q_2 : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο 2
- Coverage: Ο περιγραφόμενος δείκτης κάλυψης

Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα μέγεθος, το οποίο δείχνει τι ποσοστό του αρχικού θερμικού φορτίου καλύφθηκε από τη διάταξη δυναμικής μόνωσης. Αποτελεί, ένα εκ των σημαντικότερων δεικτών απόδοσης, καθώς σηματοδοτεί την εξοικονόμηση που πραγματοποιείται από την υπό μελέτη τεχνολογία. Συνεπώς, τυχόν χαμηλές τιμές του, καθιστούν το σύστημα ασύμφορο και αντίστροφα.

5.1.2 Βαθμός απόδοσης δυναμικού στρώματος (η_{AL})

Όπως κάθε βαθμός απόδοσης, έτσι και ο συγκεκριμένος αποτελεί ενδεικτικό μέγεθος των απωλειών. Δείχνει, δηλαδή, το ποσοστό της προσδιδόμενης ενέργειας που προσφέρθηκε για θέρμανση/ψύξη του χώρου. Έτσι, ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση **(5.2)**.

$$\eta_{AL} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_3} \quad (5.2)$$

Όπου:

- Q_1 : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο 1
- Q_2 : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο 2
- Q_3 : Η θερμική ενέργεια που αποδίδει ή απορροφά η δυναμική μόνωση κατά τη θέρμανση ή ψύξη αντίστοιχα
- η_{AL} : Ο βαθμός απόδοσης του δυναμικού στρώματος

Στον αριθμητή της **(5.2)** τοποθετείται η εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας, ενώ στον παρονομαστή η συνολική συναλλαγή θερμότητας του δυναμικού στρώματος. Συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται μεταξύ δυναμικής μόνωσης και εσωτερικού χώρου, αλλά και μεταξύ δυναμικής μόνωσης και εξωτερικού περιβάλλοντος. Η δεύτερη, συνιστά τις άμεσες απώλειες του στρώματος, ενώ κατανοώντας εις βάθος τον προηγούμενο ορισμό, γίνεται αντιληπτό πως υπάρχουν και έμμεσες. Συγκεκριμένα, το σύστημα λειτουργεί για ένα μικρό, αλλά όχι μηδενικό, εύρος θερμοκρασιών δωματίου (π.χ. 0.5°C), συνεπώς συνεχίζει να θερμαίνει ακόμη και όταν η θερμοκρασία του χώρου είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης επιτρεπτής (20°C). Έτσι, ένα μέρος της θερμικής ροής από το δυναμικό στρώμα προς τον θερμαινόμενο χώρο, δεν μεταφράζεται άμεσα σε εξοικονόμηση ενέργειας, αφού

συμβάλει στη βελτίωση των συνθηκών άνεσης, ενώ θεωρητικά δεν χρειάζεται. Το άθροισμα του τελευταίου μεγέθους και του θερμικού ρεύματος προς το περιβάλλον, συντελούν το σύνολο των απωλειών που λαμβάνονται υπόψιν.

5.1.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης συνολικού συστήματος (η_{th})

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης φανερώνει το ποσοστό της θερμικής ενέργειας που παράγεται από το σύστημα, το οποίο μεταφράζεται σε μείωση των θερμικών απαιτήσεων του κτιρίου. Αναμένεται να είναι αριθμητικά μικρότερος του προηγούμενου, αφού συμπεριλαμβάνει τις απώλειες του δυναμικού στρώματος, καθώς και τις απώλειες του συστήματος τροφοδοσίας. Οι σημαντικότερες απώλειες του υποστηρικτικού συστήματος, εντοπίζονται στα δοχεία αδρανείας, όπου δημιουργείται ροή θερμότητας μεταξύ περιβάλλοντος και του αποθηκευμένου νερού.

$$\eta_{th} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_{th}} \quad (5.3)$$

Όπου:

- Q_1 : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο 1
- Q_2 : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο 2
- Q_{th} : Η θερμική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα τροφοδοσίας
- η_{th} : Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συνολικού συστήματος

Στο σύνολο της θερμικής ενέργειας που μεταχειρίζεται το σύστημα, συνεισφέρει η αντλία θερμότητας, οι διάφοροι κυκλοφορητές όπου λόγω μη ιδανικής λειτουργίας θερμαίνουν το διακινούμενο ρευστό και η διάταξη ηλιακών συλλεκτών (θέρμανση). Στην περίπτωση της θέρμανσης οι αντλίες κυκλοφορίας συνεισφέρουν στην παραγωγή ενέργειας, θερμαίνοντας το νερό. Αντίθετα, κατά τη λειτουργία ψύξης δρουν ανασταλτικά, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του ρέοντος ρευστού.

5.1.4 Ηλεκτρικός δείκτης αποδοτικότητας συστήματος (η_{el})

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο **{3}**, μοναδική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας αποτελεί η διάταξη των ηλιακών συλλεκτών, που απαντάται μάλιστα μόνο στο κύκλωμα θέρμανσης. Είναι ξεκάθαρο, πλέον, πως το λειτουργικό κόστος του συστήματος δεν είναι μηδενικό, καθώς κύριο σύστημα θέρμανσης/ψύξης του νερού συνιστά η αντλία θερμότητας. Για αυτόν τον λόγο, ορίζεται στον τύπο **(5.4)** ο ηλεκτρικός δείκτης αποδοτικότητας του συστήματος.

$$\eta_{el} = \frac{Q_i - Q_2}{P_{el}} \quad (5.4)$$

Όπου:

- Q_i : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο i , $i=0, 1$
- Q_2 : Η ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου στο σενάριο 2
- P_{el} : Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στο σύστημα
- η_{el} : Ο ηλεκτρικός δείκτης αποδοτικότητας του συστήματος

Ουσιαστικά δείχνει πόση εξοικονόμηση πραγματοποιείται στη μονάδα της ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή, καταναλώνοντας $1kWh$ ηλεκτρικής ενέργειας μειώνονται οι θερμικές ανάγκες του κτιρίου κατά η_{el} . Στην καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (P_{el}) λογίζονται, η κατανάλωση της αντλίας θερμότητας, αλλά και των διάφορων αντλιών κυκλοφορίας. Ο η_{el} μπορεί, απλουστευτικά, να περιγραφεί ως συνδυασμός του συντελεστή απόδοσης της αντλίας θερμότητας (COP) και του θερμικού βαθμού απόδοσης του συστήματος (η_{th}), λαμβάνοντας υπόψιν και την κατανάλωση των κυκλοφορητών.

5.1.5 Συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας (COP_{HP})

Ας υπενθυμιστεί πως ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της δυναμικής μόνωσης, αποτελεί η πιθανή μεταβολή της ώρας μέσα στην ημέρα, όπου εμφανίζονται υψηλές θερμικές ανάγκες. Συγκεκριμένα, εκμεταλλευόμενης της θερμικής μάζας των τοίχων, μπορεί οι υψηλές απαιτήσεις θέρμανσης να συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ χωρίς το δυναμικό στρώμα εμφανίζονταν τις νυχτερινές ώρες. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες εντός της ημέρας, εγγυόνται αποδοτικότερη λειτουργία της αντλίας θερμότητας, για την περίοδο θέρμανσης. Για τη λειτουργία ψύξης ισχύουν τα αντίστροφα. Για αυτόν τον λόγο, ο συντελεστής απόδοσης (COP_{HP}), ως βασικός δείκτης του συστήματος, φανερώνει κατά πόσο η αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται, το δυνατόν, σε ευνοϊκότερες συνθήκες λειτουργίας, άρα έμμεσα κατά πόσο επιτυγχάνεται και η χρονική μετατόπιση των θερμικών απαιτήσεων.

5.1.6 Συντελεστής συνεισφοράς ηλιοθερμικού συστήματος (CF_{ST})

Σε αντίθεση με τον ηλεκτρικό δείκτη αποδοτικότητας του συστήματος (η_{el}), ο παρόν συντελεστής δείχνει πόση θερμική ενέργεια παράχθηκε, από το σύστημα τροφοδοσίας, στη μονάδα της ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον ορισμό του εν λόγω δείκτη, θα χρειαστεί να εισαχθεί ένα ακόμη μέγεθος (COP_{hyp}). Για τη βέβαιη κατανόησή του, κρίνεται χρήσιμο να διακριθούν δύο διαφορετικά σενάρια. Στην πρώτη περίπτωση το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται, αποκλειστικά, από την αντλία θερμότητας, άρα το νερό θερμαίνεται, απλουστευτικά, με το συντελεστή απόδοσης της (COP_{HP}), όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη υποενότητα **{5.1.5}**. Στο δεύτερο σενάριο ως σύστημα τροφοδοσίας χρησιμοποιείται, αποκλειστικά, μια νέα αντλία θερμότητας, της οποίας η ενεργειακή συμπεριφορά θα είναι ίδια με του συστήματος του υπό μελέτη σεναρίου. Ειδικότερα, θα καταναλώνει ίδια ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή ίδιας θερμικής ενέργειας με το

σύστημα που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο {3.2}. Έτσι, ορίζουμε το συντελεστή απόδοσης της αντλίας θερμότητας του υποθετικού σεναρίου στην (5.5).

$$COP_{hyp} = \frac{Q_{th}}{P_{el}} \quad (5.5)$$

Όπου:

- Q_{th} : Η θερμική ενέργεια που «παράγεται» από το σύστημα τροφοδοσίας
- P_{el} : Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στο σύστημα
- COP_{hyp} : Ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας του υποθετικού σεναρίου

Ο COP_{hyp} αποτελεί ουσιαστικά προσαύξηση του COP_{HP} , καθώς λαμβάνει υπόψιν και τη θερμική παραγωγή των ηλιακών συλλεκτών, οι οποίοι δεν επιβαρύνουν ουσιαστικά την ηλεκτρική κατανάλωση. Συνεπώς, η προαναφερθείσα αύξηση αποτελεί ενδεικτικό μέγεθος της συνεισφοράς τους στο θερμικό ισοζύγιο. Για διευκόλυνση των συγκρίσεων και της εξαγωγής συμπερασμάτων, πραγματοποιείται αδιαστατοποίηση της προαναφερθείσας προσαύξησης. Έτσι, ορίζεται από τον τύπο (5.6) ο επιθυμητός δείκτης απόδοσης του συστήματος.

$$CF_{ST} = \frac{COP_{hyp} - COP_{HP}}{COP_{HP}} \quad (5.6)$$

Όπου:

- COP_{hyp} : Ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας του υποθετικού σεναρίου
- COP_{HP} : Ο συντελεστής απόδοσης της χρησιμοποιούμενης αντλίας θερμότητας
- CF_{ST} : Ο βαθμός συνεισφοράς (Contribution Factor) του ηλιοθερμικού συστήματος

Γίνεται εύκολα κατανοητό, πως εφόσον ο παρόν δείκτης απόδοσης αφορά στη διάταξη των ηλιακών συλλεκτών, δεν έχει νόημα ύπαρξης στη διαδικασία ψύξης.

5.1.7 Συντελεστής εξοικονόμησης Πρωτογενούς Ενέργειας (PES)

Η σπουδαιότητα του συγκεκριμένου δείκτη απόδοσης είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς θα αποτελέσει βασικό κριτήριο σύγκρισης των παραμετρικών αποτελεσμάτων και επιλογής της βέλτιστης τιμής για το εκάστοτε, υπό μελέτη, μέγεθος. Εφόσον, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν πραγματοποιήθηκε τεχνοοικονομική μελέτη, απαιτείται η ανάδειξη ενός διαφορετικού, ενεργειακού κριτηρίου, βάσει του οποίου καθίσταται δυνατή η λήψη τελικών αποφάσεων. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται απλουστευτικά, χωρίς δυναμική ανάλυση, σενάρια διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης χώρου. Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης {3}, η θέρμανση και η ψύξη των χώρων πραγματοποιείται από ένα ιδεατό, χωρίς φυσική

υπόσταση, σύστημα το οποίο χαρακτηρίζεται από μηδενική αδράνεια και ικανότητα μεταχείρισης άπειρου θερμικού φορτίου. Λαμβάνοντας τις θερμικές απαιτήσεις του κτιρίου από το εν λόγω μαθηματικό μοντέλο, εξετάζονται περιπτώσεις κάλυψής τους από διαφορετικά συστήματα. Για την άμεση και αντικειμενική σύγκρισή τους, όλα τα αποτελέσματα θα αναχθούν σε τιμές πρωτογενούς ενέργειας. Με τον όρο πρωτογενής ενέργεια (ΠΕ) εννοείται η φυσική μορφή ενέργειας, η οποία δεν έχει υποβληθεί σε διαδικασία μετατροπής λόγω κάποιας ανθρώπινης κατεργασίας. Ειδικότερα, η χημική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στα διάφορα καύσιμα (π.χ. ορυκτά), η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα μορφών ΠΕ. Για τη διεξαγωγή των απαραίτητων υπολογισμών, λαμβάνονται υπόψιν τυπικές τιμές για το κάθε σύστημα ξεχωριστά. Για το σύστημα της Γερμανίας ο συντελεστής μετατροπής της θερμικής ενέργειας, πετρελαίου θέρμανσης (Heizöl), σε πρωτογενή ισούται με μονάδα, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 5.1**. Η τιμή για τον αντίστοιχο συντελεστή μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία το 2019 προσδιορίστηκε ως 1.55, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.1** (Πηγή: IINAS-Kurzstudie 2020 zur Stromerzeugung in Deutschland). Ας σημειωθεί πως ο τελευταίος συντελεστής μειώνεται όσο εισάγονται στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμης πηγές ενέργειας. Για τους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε, τελικά για την μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε πρωτογενή, η τιμή 1.5, υποεκτιμώντας σε ένα βαθμό τα συστήματα που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, όπως αυτό μιας αντλίας θερμότητας.

Πίνακας 5.1: Συντελεστής μετατροπής ενέργειας πετρελαίου θέρμανσης σε πρωτογενή ενέργεια

Συντελεστές μετατροπής	Πετρέλαιο, Αέριο, Ορυκτά	Βιομάζα	Απορριπτόμενη θερμότητα	Ηλεκτρική ενέργεια	Ηλιακή ενέργεια, Γεωθερμία
f_{PE} [kWh _{ΠΕ} /kWh _{ΤΕ}]	1,0	0,7	0,7	2,0	0,0

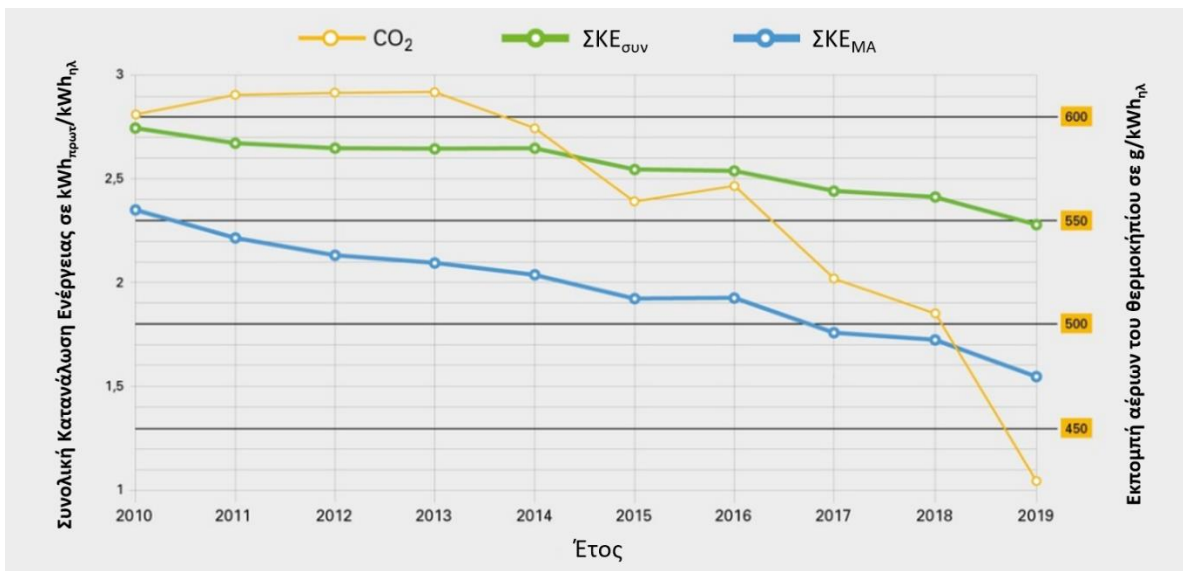
Πηγή: Gebäude-Energieausweis der Kantone (GEAK)/Konferenz Kantonaler Energiedirektoren (ENDK 2009)

- **Σενάριο a:** Αφορά στην υφιστάμενη περίπτωση. Τη θέρμανση χώρου αναλαμβάνει κεντρικό σύστημα καυστήρα πετρελαίου, ενώ την ψύξη μικρά κλιματιστικά χώρου διαιρούμενου τύπου (Split). Για τον λέβητα λήφθηκε τυπικός βαθμός απόδοσης $\eta_b=0.65$, ενώ για τα κλιματιστικά τυπικός συντελεστής απόδοσης $EER_{spl}=2.5$. Έτσι, για την αναγωγή σε πρωτογενή ενέργεια ακολουθείται η μεθοδολογία της σχέσης **(5.7)**.

$$Q_{Pr,a} = 1 \cdot \frac{Q_{i,H}}{\eta_b} + 1.5 \cdot \frac{Q_{i,C}}{EER_{spl}} \Rightarrow Q_{Pr,a} = \frac{Q_{i,H}}{0.65} + 0.6 \cdot Q_{i,C} \quad (5.7)$$

Όπου:

- η_b : Ο βαθμός απόδοσης του καυστήρα πετρελαίου
- EER_{spl} : Ο συντελεστής απόδοσης των κλιματιστικών
- $Q_{i,H}$: Οι ανάγκες θέρμανσης του μονωμένου κτιρίου για το σενάριο i , $i=0, 1$
- $Q_{i,C}$: Οι ανάγκες ψύξης του μονωμένου κτιρίου για το σενάριο i , $i=0, 1$
- $Q_{Pr,a}$: Η απαιτούμενη πρωτογενής ενέργεια για θέρμανση/ψύξη του μονωμένου κτιρίου, για το σενάριο a



Σχήμα 5.1: Διακύμανση συντελεστή μετατροπής ηλεκτρικής σε πρωτογενή ενέργεια στη Γερμανία (IINAS-Kurzstudie 2020 zur Stromerzeugung in Deutschland)

- Σενάριο b: Στην προκειμένη περίπτωση, τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης των διαμερισμάτων αναλαμβάνει, εξολοκλήρου, μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα, που, απλουστευτικά, λειτουργεί με τον συντελεστή απόδοσης της αντλίας θερμότητας αέρα-νερού (COP_{HP}) του συστήματος τροφοδοσίας. Έτσι, για αναγωγή σε πρωτογενή ενέργεια χρησιμοποιείται ο τύπος (5.8).

$$Q_{Pr,b} = 1.5 \cdot \left(\frac{Q_{1,H}}{SCOP_{HP}} + \frac{Q_{1,C}}{EER_{HP}} \right) \quad (5.8)$$

Όπου:

- $Q_{i,H}$: Οι ανάγκες θέρμανσης του μονωμένου κτιρίου, για το σενάριο i , $i=0, 1$
 - $Q_{i,C}$: Οι ανάγκες ψύξης του μονωμένου κτιρίου, για το σενάριο i , $i=0, 1$
 - $SCOP_{HP}$: Ο μέσος συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας, κατά την περίοδο θέρμανσης
 - EER_{HP} : Ο μέσος συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας, κατά την περίοδο ψύξης
 - $Q_{Pr,b}$: Η απαιτούμενη πρωτογενής ενέργεια για θέρμανση/ψύξη του μονωμένου κτιρίου, για το σενάριο b
- Σενάριο μελέτης - 2: Αποτελεί την περίπτωση όπου έχει τοποθετηθεί η δυναμική μόνωση και το σύστημα τροφοδοσίας. Για την κάλυψη των μειωμένων θερμικών αναγκών του χώρου, προβλέπεται χρήση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα, όμοια με το προηγούμενο σενάριο. Έτσι, η τελική πρωτογενής ενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση (5.9) ως άθροισμα της καταναλισκόμενης ενέργειας για το σύστημα θέρμανσης/ψύξης και του συστήματος τροφοδοσίας του δυναμικού στρώματος.

$$Q_{Pr} = 1.5 \left(\frac{Q_{2,H}}{SCOP_{HP}} + \frac{Q_{2,C}}{EER_{HP}} + P_{el} \right) \quad (5.9)$$

Όπου:

- $Q_{2,H}$: Οι ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου με τη δυναμική μόνωση
- $Q_{2,C}$: Οι ανάγκες ψύξης του κτιρίου με τη δυναμική μόνωση
- $SCOP_{HP}$: Ο μέσος συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας, για λειτουργία θέρμανσης
- EER_{HP} : Ο μέσος συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας για λειτουργία ψύξης
- P_{el} : Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στο σύστημα τροφοδοσίας
- Q_{Pr} : Η απαιτούμενη πρωτογενής ενέργεια για τροφοδοσία της δυναμικής μόνωσης και θέρμανση/ψύξη κτιρίου

Συνδυασμός των ανωτέρω, επιτρέπει τον ορισμό ενός μεγέθους που θα φανερώνει σε τι βαθμό η μείωση των θερμικών αναγκών των διαμερισμάτων μεταφράζεται σε εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Έτσι, κατά κάποιον τρόπο, αποτελεί ένα τεχνοοικονομικό κριτήριο, που λαμβάνει όμως υπόψιν μόνο το λειτουργικό κόστος σε ενέργεια και όχι την αρχική επένδυση. Σε περίπτωση αρνητικών τιμών του δείκτη, συμπεραίνεται αμέσως πως η εγκατάσταση του συστήματος δυναμικής μόνωσης δεν αποτελεί ενεργειακά συμφέρουσα λύση και κατά πάσα πιθανότητα ούτε οικονομικά. Εντέλει, θα δημιουργηθούν δύο συντελεστές εξοικονόμησης ΠΕ, αποσκοπώντας σε σύγκριση του υπό μελέτη σεναρίου με τα άλλα δύο, ξεχωριστά. Στις σχέσεις (5.10) και (5.11) ορίζεται ο παρόν βασικός δείκτης απόδοσης για τις περιπτώσεις των δύο σεναρίων.

$$PES_a = \frac{Q_{Pr,a} - Q_{Pr}}{Q_{Pr,a}} \quad (5.10)$$

$$PES_b = \frac{Q_{Pr,b} - Q_{Pr}}{Q_{Pr,b}} \quad (5.11.)$$

Όπου:

- PES_a : Ο συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ του σεναρίου a (λέβητας πετρελαίου)
- PES_b : Ο συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ του σεναρίου b (αντλία θερμότητας αέρα-αέρα)

Συνοψίζοντας, ο συγκεκριμένος δείκτης απόδοσης χρησιμοποιείται για την εύρεση των βέλτιστων παραμετρικών συνθηκών λειτουργίας, θέτοντας ως κριτήριο την ενεργειακή εξοικονόμηση.

5.2 Παραμετρική ανάλυση

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης του μοντέλου. Για την ευπαρουσίαση παράθεσή τους και την διευκόλυνση εξαγωγής συμπερασμάτων, αναλύονται τα αποτελέσματα της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά. Κατά την εξέταση της κάθε μεταβλητής τα υπόλοιπα μεγέθη διατηρούνται σταθερά. Κατανοείται πως δεν είναι πρακτική, αλλά και εφικτή, η παραμετρική ανάλυση του κάθε τεχνικού χαρακτηριστικού του συστήματος. Συνεπώς, επιλέγονται και μελετώνται τα σημαντικότερα μεγέθη που επηρεάζουν την απόκριση του μοντέλου, όπως παρουσιάζονται ακολούθως.

5.2.1 Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών ($A_{\text{συλλ}}$)

Το ηλιοθερμικό σύστημα προσφέρει θερμική ενέργεια στο κύκλωμα, εκμεταλλευόμενο την ηλιακή ακτινοβολία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Για αυτό το λόγο η συνολική συνεισφορά του χαρακτηρίζει το μοντέλο. Ας σημειωθεί πως η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε συναρτήσει δύο διαφορετικών δοχείων αποθήκευσης, όγκου 500 λίτρων (L) και ενός κυβικού μέτρου (m^3), τα αποτελέσματα των οποίων συμβολίζονται με τους δείκτες 0.5 και 1 αντίστοιχα.

Οι βασικοί δείκτες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην παρούσα υποενότητα είναι ο συντελεστής συνεισφοράς ηλιοθερμικού συστήματος (CF_{ST}) και ο συντελεστής εξοικονόμησης Πρωτογενούς Ενέργειας (PES). Παρότι οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν κανονικά για τη διάρκεια ενός έτους, όπως είναι λογικό παρατίθενται αποτελέσματα μόνο για την περίοδο θέρμανσης, όπου συμβάλει η διάταξη ηλιακών συλλεκτών. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για τιμές της επιφάνειας συλλέκτη από $10m^2$ έως και $60m^2$ και αφορά στα 4 διαφορετικά διαμερίσματα του υπό μελέτη ορόφου. Για την πεντάροφη πολυκατοικία που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο {4.1} υπολογίζεται η επιφάνεια

οροφής που αντιστοιχεί σε κάθε όροφο ως $68 \frac{m^2}{\text{όροφο}}$. Επομένως, η μελέτη μεγαλύτερης των $60m^2$ επιφάνειας συλλεκτών κρίνεται περιττή, καθώς η εφαρμογή της καθίσταται πρακτικά αδύνατη. Βάσει αποτελεσμάτων κάποιων πρώιμων αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, επιλέγονται τιμές για τις βασικές παραμέτρους μελέτης του συστήματος και διατηρούνται σταθερές κατά τη διάρκεια της παρούσας διερεύνησης (Πίνακας 5.2). Συγκεκριμένα, με $T_{\text{τροφ},\theta}$ και $T_{\text{τροφ},\psi}$ συμβολίζονται η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας στην είσοδο της δυναμικής μόνωσης για θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα, ενώ με $d_{\text{μόνωσης}}$ το πάχος της εξωτερικής θερμομόνωσης.

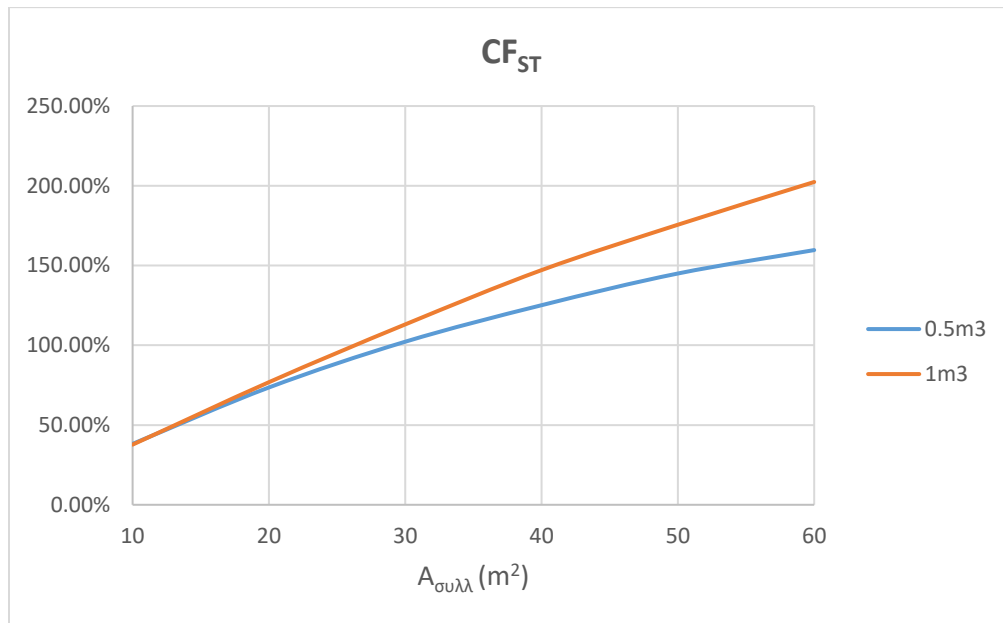
Πίνακας 5.2: Τιμές κύριων παραμέτρων

$T_{\text{τροφ},\theta}$ (°C)	$T_{\text{τροφ},\psi}$ (°C)	$d_{\text{μόνωσης}}$ (cm)	$A_{\text{συλλ}}$ (m ²)
23	21	15	10÷60

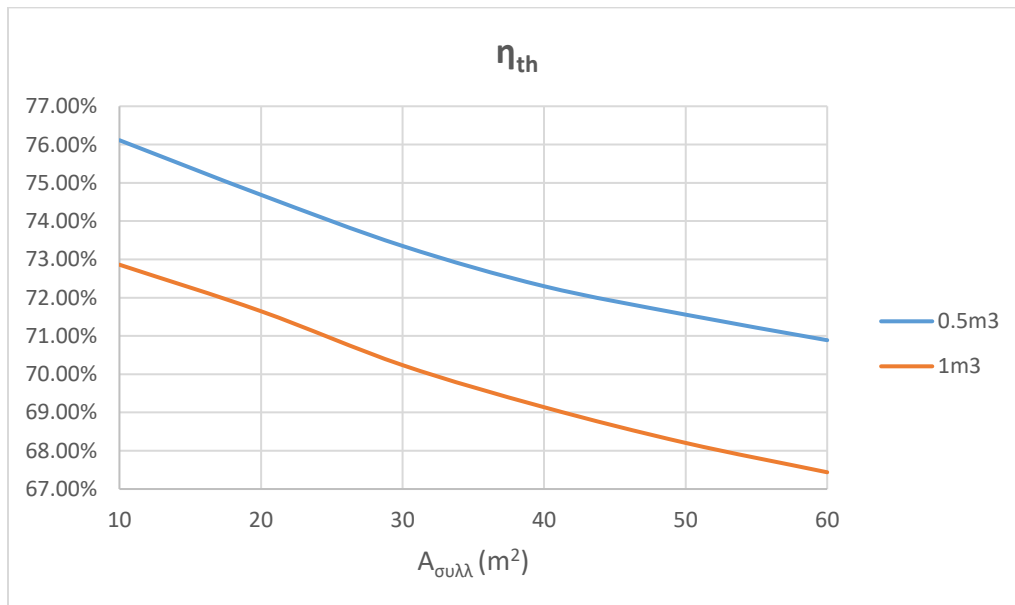
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, όπου στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών σε τετραγωνικά μέτρα (m²), ενώ στον κατακόρυφο το αντίστοιχο μέγεθος απόδοσης. Όπως προαναφέρθηκε προηγουμένως μελετώνται δύο περιπτώσεις διαφορετικών δοχείων, έτσι με μπλε σχεδιάστηκαν οι καμπύλες για δοχείο μισού κυβικού (0.5m³) και με πορτοκαλί για δοχείο ενός κυβικού μέτρου (1m³).

Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η αναμενόμενη αύξηση του συντελεστή συνεισφοράς της διάταξης ηλιακών συλλεκτών με αύξηση της επιφάνειάς τους. Η μπλε καμπύλη φαίνεται να χαρακτηρίζεται από πολυωνυμική μορφή, που μάλιστα τείνει να σταθεροποιηθεί για μεγάλες επιφάνειες συλλέκτη, προκαλώντας ενδεχόμενο κορεσμό του συστήματος. Αντίθετα, η καμπύλη του μεγαλύτερου δοχείου διατηρεί μια γραμμική μορφή πρακτικά σταθερής κλίσης για το εξεταζόμενο εύρος. Έτσι, το δεύτερο δοχείο φαίνεται να παρουσιάζει ευνοϊκότερη συμπεριφορά για επιφάνειες συλλέκτη μεγαλύτερες των 20m²

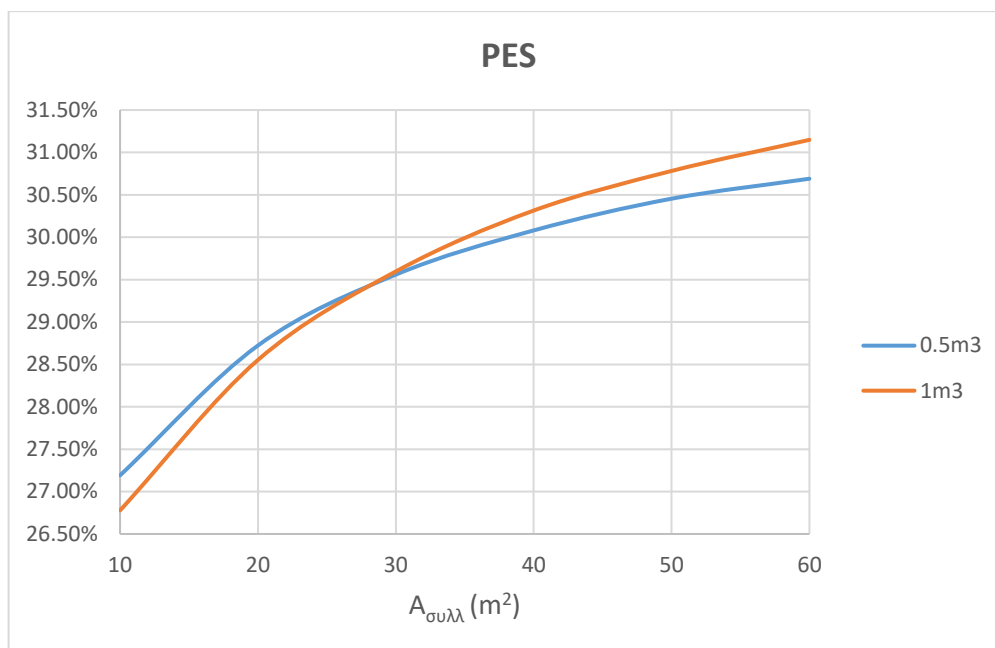
Στο Σχήμα 5.3 αποτυπώνεται η μονότονη μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης του συστήματος, αυξανόμενης της επιφάνειας των ηλιοθερμικών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις θερμικές απώλειες του δοχείου αποθήκευσης. Συγκεκριμένα και σε αντίθεση με την αντλία θερμότητας που διατηρεί το νερό του δοχείου σε ένα ελάχιστο θερμοκρασιακό εύρος, το ηλιοθερμικό σύστημα προσδίδει θερμότητα ανάλογα με την ηλιοφάνεια της κάθε ημέρας, αυξάνοντας τη θερμοκρασία σε ακόμη υψηλότερες τιμές. Έτσι, οι αυξημένες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του δοχείου επιφέρουν και αντίστοιχα μεγαλύτερες απώλειες προς το περιβάλλον.



Σχήμα 5.2: Συντελεστής συνεισφοράς ηλιοθερμικού συστήματος (CF_{ST}) συναρτήσει της επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών



Σχήμα 5.3: Θερμικός βαθμός απόδοσης συστήματος (η_{th}) συναρτήσει της επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών



Σχήμα 5.4: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσει της επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών

Τέλος, στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται η μονότονη αύξηση του συντελεστή εξοικονόμησης ΠΕ συναρτήσει της επιφάνειας συλλεκτών, ωστόσο η μεταβολή δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη, κυρίως λόγω του χαμηλού ηλιακού δυναμικού της πόλης του Μονάχου. Ναι μεν η προσθήκη επιπλέον συλλεκτών μειώνει την πρωτογενή ενέργεια, ωστόσο η επένδυσή τους από τεχνοοικονομικής άποψης είναι αμφισβητήσιμη και πιθανώς ασύμφορη. Ένα επιπλέον ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του τελευταίου διαγράμματος αποτελεί το σημείο τομής των δύο καμπυλών. Παρατηρείται πως για επιφάνεια συλλεκτών μικρότερη των 30m^2 συμφέρει η χρήση του μικρότερου δοχείου και αντίστροφα.

Εντέλει, για τη διερεύνηση των υπόλοιπων παραμέτρων επιλέγεται το μεγαλύτερο δοχείο (1m^3) συνδεδεμένο με $A=30\text{m}^2$ επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών.

5.2.2 Πάχος εξωτερικής μόνωσης ($d_{\text{μόνωσης}}$)

Όπως έχει αποδειχθεί, η τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης αποτελεί την πιο συμφέρουσα και πρακτικά εύκολη παρέμβαση κατά τη διαδικασία ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων. Συνεπώς, αποτελεί ορόσημο της κάθε εφαρμογής και κομβική παράμετρο της ενεργειακής ανάλυσης του μοντέλου της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, διαφορετικές τιμές για το πάχος μόνωσης μπορούν να αλλάξουν τη συμπεριφορά του συστήματος μεταβάλλοντας αντίστοιχα το βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

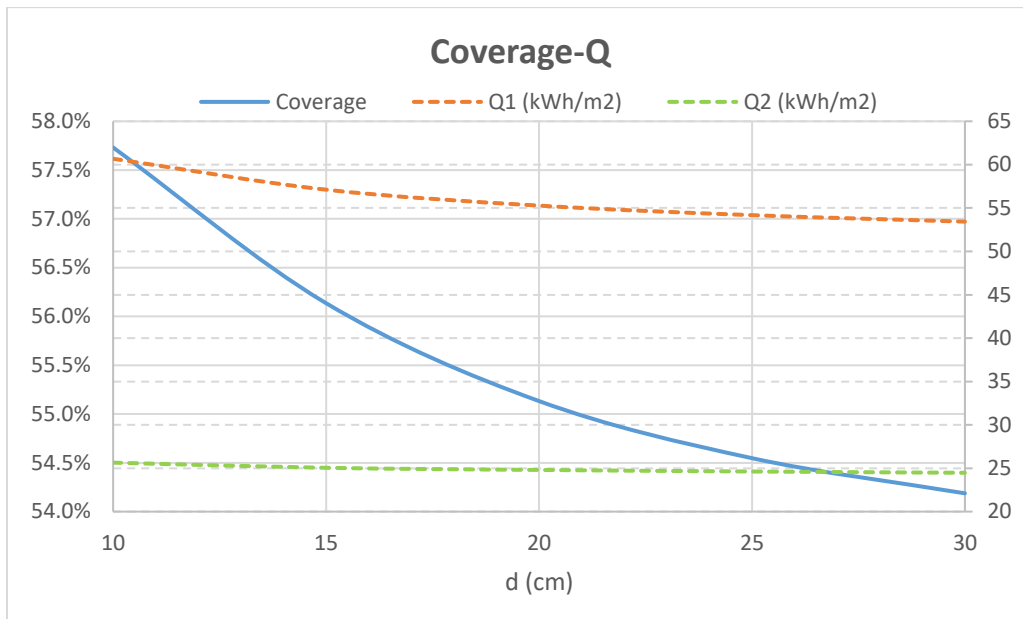
Το πάχος εξωτερικής μόνωσης διερευνήθηκε για τιμές στο εύρος [10, 30]cm, με σταθερό βήμα 5cm. Χαμηλότερες τιμές κρίθηκαν ανεπαρκείς για την περίπτωση της Γερμανίας, ενώ η μελέτη μεγαλύτερων τιμών θεωρήθηκε υπερβολική, καθώς το υπό μελέτη δυναμικό σύστημα συνεισφέρει στο κτίριο με επιπρόσθετη θερμομόνωση. Παρακάτω, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των βασικών παραμέτρων (Πίνακας 5.3), που διατηρούνται σταθερές κατά την παρούσα ανάλυση, καθώς και το εύρος τιμών του υπό μελέτη μεγέθους.

Πίνακας 5.3: Τιμές παραμέτρων ανάλυσης

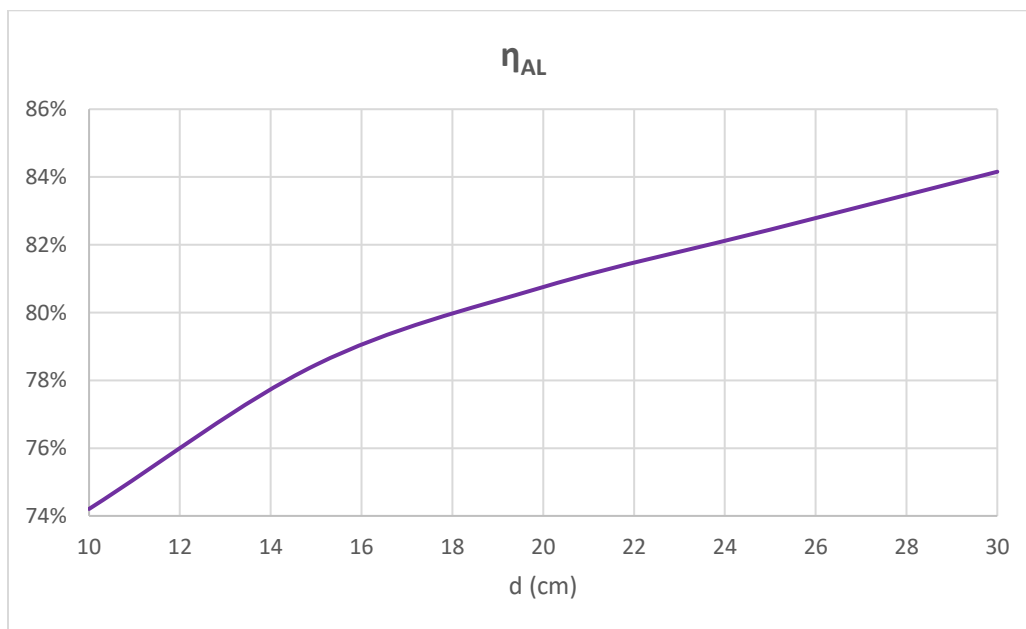
$T_{\text{τροφ}, \theta}$ (°C)	$T_{\text{τροφ}, \psi}$ (°C)	$d_{\text{μόνωσης}}$ (cm)	$A_{\text{συλλ}}$ (m ²)	$V_{\text{δοχ}}$ (m ³)
26	21	10÷30	30	1

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης παρουσιάζονται με τη βοήθεια των παρακάτω διαγραμμάτων. Όλα τα μεγέθη, συμπεριλαμβανομένων των δεικτών απόδοσης, αφορούν στην ετήσια λειτουργία του κτιρίου, συνδυάζοντας τις περιόδους θέρμανσης και ψύξης. Τα τελικά μεγέθη υπολογίζονται όπου χρειάζεται με το μέσο όρο των δύο επί μέρους λειτουργιών ή με σταθμισμένο άθροισμα αυτών.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται ο βαθμός κάλυψης, όπως ορίστηκε προηγουμένως {5.1.1}, καθώς και οι συνολικές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου για τις καταστάσεις της μονωμένης περίπτωσης (Q_1) και του υπό μελέτη σεναρίου (Q_2), όπως ορίστηκαν επίσης ανωτέρω {5.1}. Τα δύο θερμικά φορτία μετρούνται σε μονάδες ενέργειας ανηγμένες στην επιφάνεια δαπέδου (kWh/m²). Για το σενάριο 1 παρατηρείται αναμενόμενη πτωτική τάση των θερμικών αναγκών, παρότι για μεγάλα πάχη μόνωσης η κλίση τείνει να μηδενιστεί. Τα θερμικά φορτία του σεναρίου 2 μειώνονται επίσης, αλλά όπως φαίνεται και από το κοινό τους διάγραμμα σχετικά πιο αργά, συγκεκριμένα οι ρυθμοί μεταβολής των δύο μεγεθών διαφέρουν σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους. Το παραπάνω γεγονός συνηγορεί στην πτωτική συμπεριφορά που εμφανίζει και ο βαθμός κάλυψης (coverage), καθώς η διαφορά των θερμικών αναγκών στις δύο περιπτώσεις μειώνεται διαρκώς με αύξηση του πάχους εξωτερικής μόνωσης. Από φυσική σκοπιά η παραπάνω απόκριση εξηγείται από την ύπαρξη ανοιγμάτων στο κέλυφος. Ειδικότερα, διατηρώντας τις θερμικές ιδιότητες των παραθύρων σταθερές ενώ βελτιώνεται η θερμική συμπεριφορά των αδιαφανών δομικών στοιχείων, ισοδυναμεί με σχετική ενίσχυση της θερμικής ροής δια μέσου των διαφανών στοιχείων. Απλούστερα, ο λόγος θερμικών απωλειών των παραθύρων προς τον αντίστοιχο των τοίχων, θα αυξάνεται. Κατά επέκταση, θα αναμενόταν σταθεροποίηση του βαθμού κάλυψης για ένα κτίριο «κουτί» χωρίς καθόλου ανοίγματα.



Σχήμα 5.5: Βαθμός κάλυψης (Coverage) και θερμικά φορτία για την μονωμένη (Q1) και την υπό μελέτη περίπτωση (Q2)

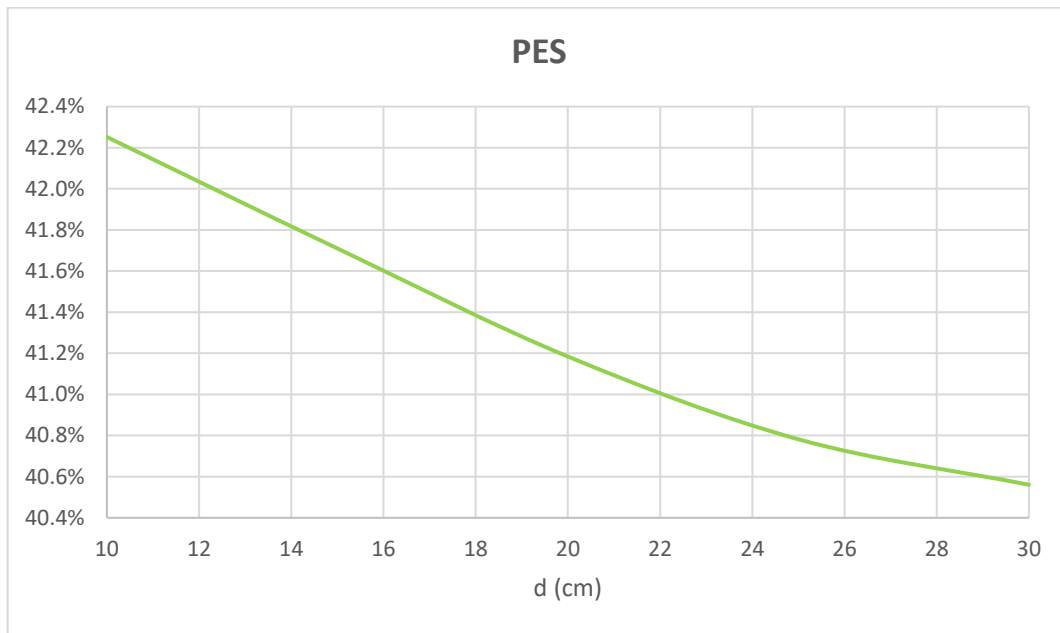


Σχήμα 5.6: Βαθμός απόδοσης δυναμικού στρώματος (η_{AL}) συναρτήσει πάχους μόνωσης

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται ο βαθμός απόδοσης του δυναμικού στρώματος, ο οποίος αποτελεί βασικό δείκτη των απωλειών θερμότητας της διάταξης δυναμικής μόνωσης. Όπως

είναι αναμενόμενο, αύξηση του πάχους εξωτερικής μόνωσης επιφέρει αντίστοιχη βελτίωση του η_{AL} , καθώς περιορίζει σημαντικά τη θερμικής ροή από το δυναμικό στρώμα προς το εξωτερικό περιβάλλον. Ενδιαφέρον, στο συγκεκριμένο διάγραμμα, παρουσιάζει η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης στην τιμή των 15cm. Βάσει αυτού, φαίνεται πως οι επιπλέον 5 πόντοι μόνωσης είναι πιο αποτελεσματικοί κατά την μετάβαση από 10cm στα 15cm, από ότι κατά την αύξηση από 15cm σε 20cm και μεγαλύτερα πάχη.

Ο συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (Σχήμα 5.7) παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με τον βαθμό κάλυψης, η οποία επεξηγείται μάλιστα με τον ίδιο τρόπο. Συνεπώς, αποτελεί ενδεικτικό μέγεθος χωρίς να βοηθάει ιδιαίτερα στην επιλογή τιμής για το πάχος μόνωσης.



Σχήμα 5.7: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσει πάχους μόνωσης

Σύμφωνα με τις παραπάνω ενδείξεις, αλλά και με παραβολή πραγματικών εφαρμογών η τιμή που επιλέγεται για το πάχος εξωτερικής μόνωσης σε συνδυασμό με τη λειτουργία του στρώματος δυναμικής μόνωσης είναι $d=15cm$. Η συγκεκριμένη τιμή είναι λογική και παρότι φαίνεται να προσφέρει κάποια οφέλη στην πραγματικότητα θα χρειαζόταν οικονομοτεχνική μελέτη για τη λήψη της τελικής απόφασης.

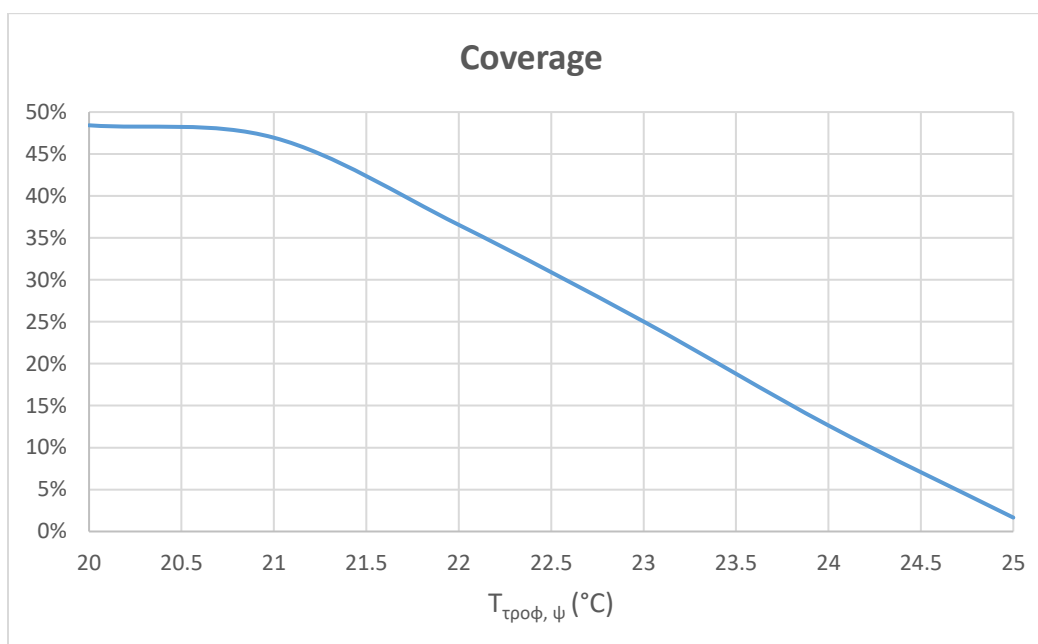
5.2.3 Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας περιόδου ψύξης ($T_{τροφ,ψ}$)

Η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο της δυναμικής μόνωσης είναι το βασικό μέγεθος που χαρακτηρίζει το βαθμό αποκοπής των θερμικών απωλειών και την μείωση των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, κατά την περίοδο ψύξης. Η μελέτη του προαναφερθέντος μεγέθους πραγματοποιήθηκε για το θερμοκρασιακό εύρος $[20, 25]^{\circ}C$ με βήμα $1^{\circ}C$. Ακολούθως, παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τιμές των βασικών παραμέτρων

(Πίνακας 5.4) που διατηρούνται σταθερές κατά την παρούσα ανάλυση, καθώς και το εύρος τιμών του υπό μελέτη μεγέθους.

Πίνακας 5.4: Τιμές παραμέτρων ανάλυσης

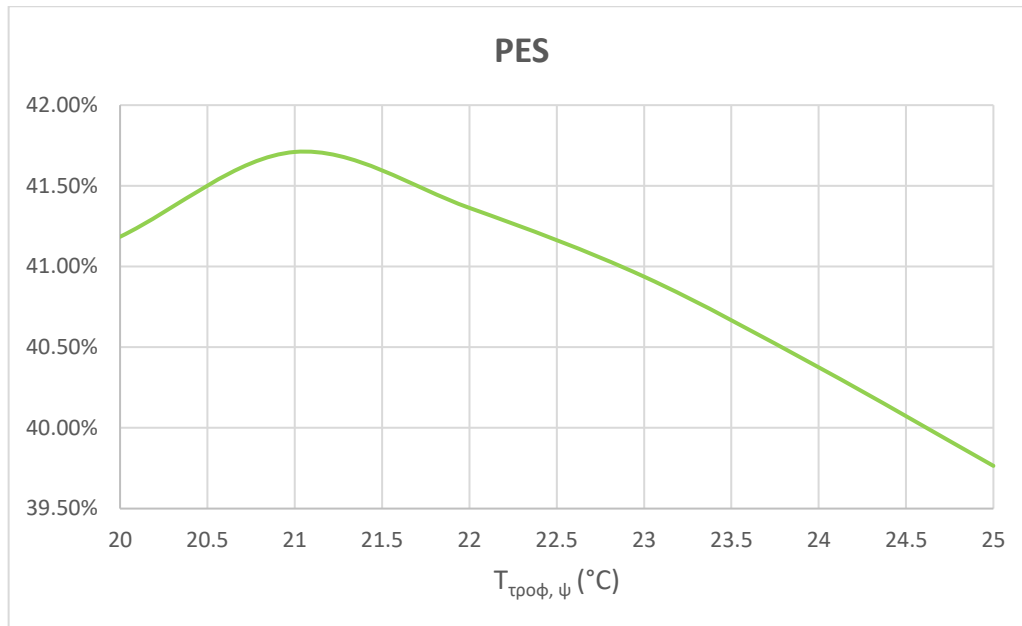
$T_{\text{τροφ, } \theta}$ (°C)	$T_{\text{τροφ, } \psi}$ (°C)	$d_{\text{μόνωσης}}$ (cm)	$A_{\text{συλλ}}$ (m ²)	$V_{\text{δοχ}}$ (m ³)
26	20÷25	15	30	1



Σχήμα 5.8: Βαθμός κάλυψης (Coverage) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για ψύξη ($T_{\text{τροφ, } \psi}$)

Ανωτέρω (Σχήμα 5.8) φαίνεται η αναμενόμενη φθίνουσα απόκριση του βαθμού κάλυψης, αυξανόμενης της θερμοκρασίας τροφοδοσίας. Ωστόσο, ενδιαφέρον παρουσιάζει η αλλαγή κλίσης της καμπύλης που εμφανίζεται στο σημείο των 21°C. Συγκεκριμένα, η αριθμητική πτώση του Coverage πραγματοποιείται με σημαντικά μικρότερο ρυθμό στο πρώτο βήμα (20°C→21°C), από ότι στα επόμενα. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να καθορίσει την επιλογή τιμής για τη συγκεκριμένη παράμετρο. Ας σημειωθεί επίσης και σε αντιπαραβολή με το Σχήμα 5.10, πως το σύστημα φαίνεται πιο αποδοτικό στην περίπτωση της θέρμανσης έναντι της ψύξης, όπου ο βαθμός κάλυψης είναι γενικά μικρότερος και φθίνει γρηγορότερα συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου. Ως αποτέλεσμα, για θερμοκρασία ρέοντος νερού ίση με αυτήν της οριακής θερμοκρασίας άνεσης για περίοδο ψύξης (25°C), το σύστημα δεν

αποδίδει ουσιαστικά καθόλου παρέχοντας κάλυψη 1.65% των αναγκών ψύξης, όταν ο coverage του αντίστοιχου σημείου για τη θέρμανση ισούται με 14.24% (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.9: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσεως της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για ψύξη ($T_{\text{τροφ,}\psi}$)

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 5.9 είναι ξεκάθαρα και σε συμφωνία με το Σχήμα 5.8. Η καμπύλη του συντελεστή εξοικονόμησης ΠΕ εμφανίζει ακρότατο και συγκεκριμένα μέγιστο για θερμοκρασία εισόδου 21°C. Έτσι, η εν λόγω συνθήκη αποτελεί την πιο συμφέρουσα επιλογή, μεγιστοποιώντας την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας που αφορά στις θερμικές ανάγκες του κτιριακού μοντέλου. Παρατηρείται επίσης πως οι αποκρίσεις του συστήματος ψύξης φθίνουν πολύ πιο απότομα συναρτήσεως της θερμοκρασίας σε σχέση με το σύστημα θέρμανσης. Ενδεικτικό πειστήριο αυτού αποτελεί το γεγονός πως στην περίπτωση της θέρμανσης επιλέχθηκε τελικά θερμοκρασία τροφοδοσίας 22°C {5.2.4}, δηλαδή 2 βαθμούς πέραν της οριακής θερμοκρασίας άνεσης (20°C), ενώ για την ψύξη η θερμοκρασία τροφοδοσίας αποφασίστηκε στους 21°C, δηλαδή 4 βαθμούς χαμηλότερη του αντίστοιχου ορίου θερμικής άνεσης (25°C).

5.2.4 Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας περιόδου θέρμανσης ($T_{\text{τροφ,}\theta}$)

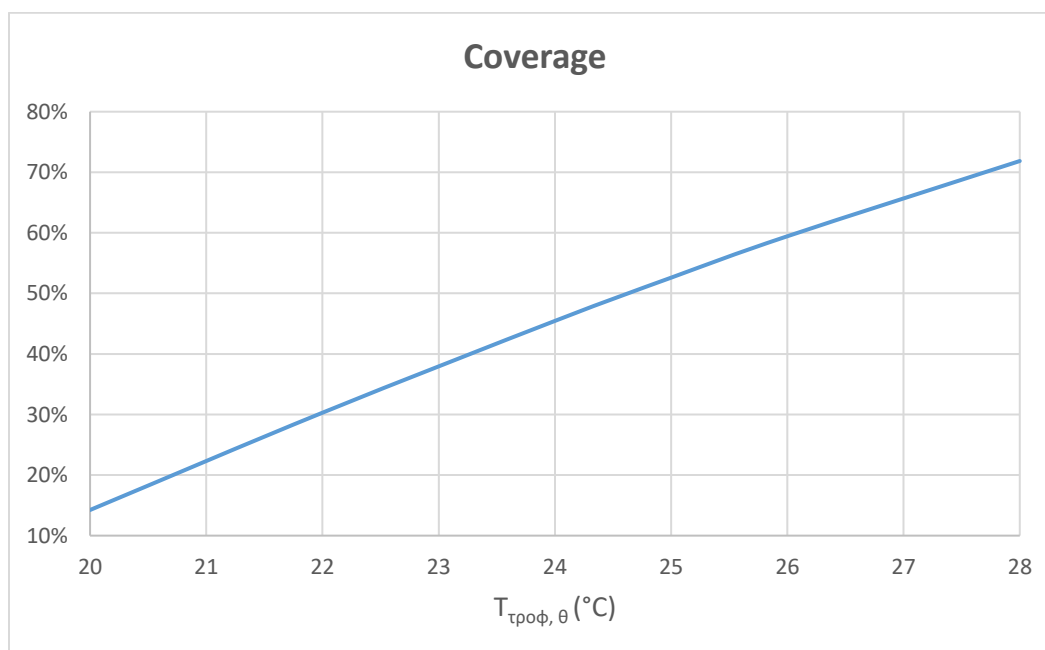
Η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο της δυναμικής μόνωσης είναι το βασικό μέγεθος που χαρακτηρίζει το βαθμό αποκοπής των θερμικών απωλειών και την μείωση των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, κατά την περίοδο θέρμανσης. Σε αντίθεση με τα συστήματα θέρμανσης το νερό δεν διακινείται σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά σε τιμές μικρότερες των 35°C. Έτσι, διερευνάται η θερμοκρασία τροφοδοσίας για τιμές εντός των

[20, 28]°C. Το βήμα μεταβολής του αναλυόμενου μεγέθους ισούται γενικά με 2°C, ενώ όπου παρουσιάστηκε μεγαλύτερο ενδιαφέρον μειώθηκε επιπλέον, λαμβάνοντας περισσότερες τιμές. Παρακάτω, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των βασικών παραμέτρων (Πίνακας 5.5), που διατηρούνται σταθερές κατά την παρούσα ανάλυση, καθώς και το εύρος τιμών του υπό μελέτη μεγέθους.

Πίνακας 5.5: Τιμές παραμέτρων ανάλυσης

$T_{\text{τροφ}, \theta}$ (°C)	$T_{\text{τροφ}, \psi}$ (°C)	$d_{\text{μόνωσης}}$ (cm)	$A_{\text{συλλ}}$ (m ²)	$V_{\text{δοχ}}$ (m ³)
20÷28	21	15	30	1

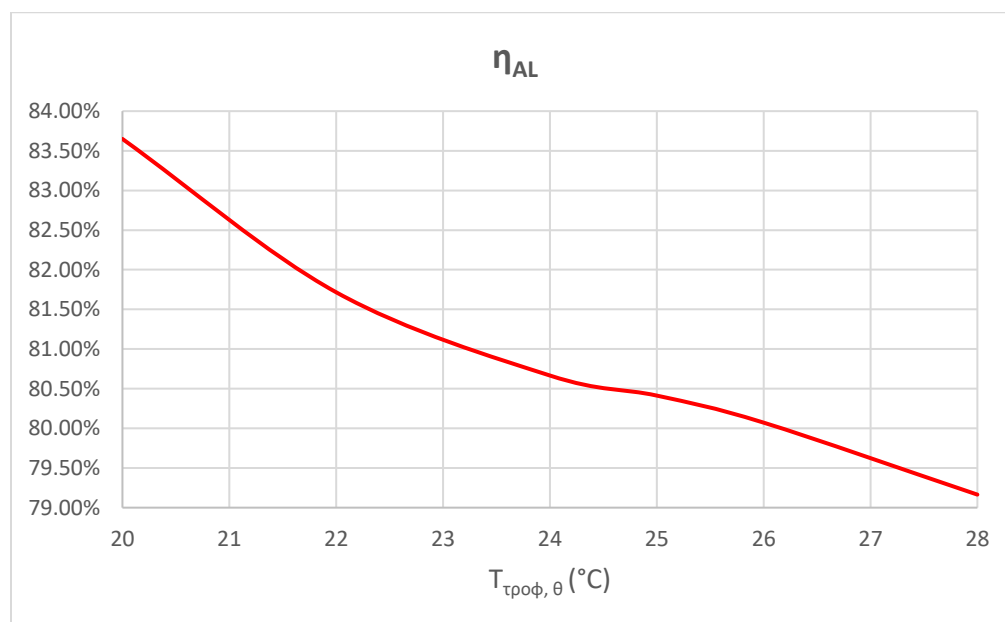
Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζεται η τεράστια επιρροή που ασκεί η θερμοκρασία στην είσοδο του δυναμικού στρώματος, στην κάλυψη των θερμικών αναγκών και κατά επέκταση στο βαθμό κάλυψης. Συγκεκριμένα για θερμοκρασίες 20°C και 28°C πραγματοποιείται μείωση του θερμικού φορτίου κατά 14.24% και 71.85% αντίστοιχα. Όπως γίνεται αντιληπτό για μεγάλες τιμές της θερμοκρασίας πραγματοποιείται πολλές φορές εκτός της αποκοπής των θερμικών απωλειών και μερική θέρμανση του χώρου, από το ίδιο το σύστημα δυναμικής μόνωσης.



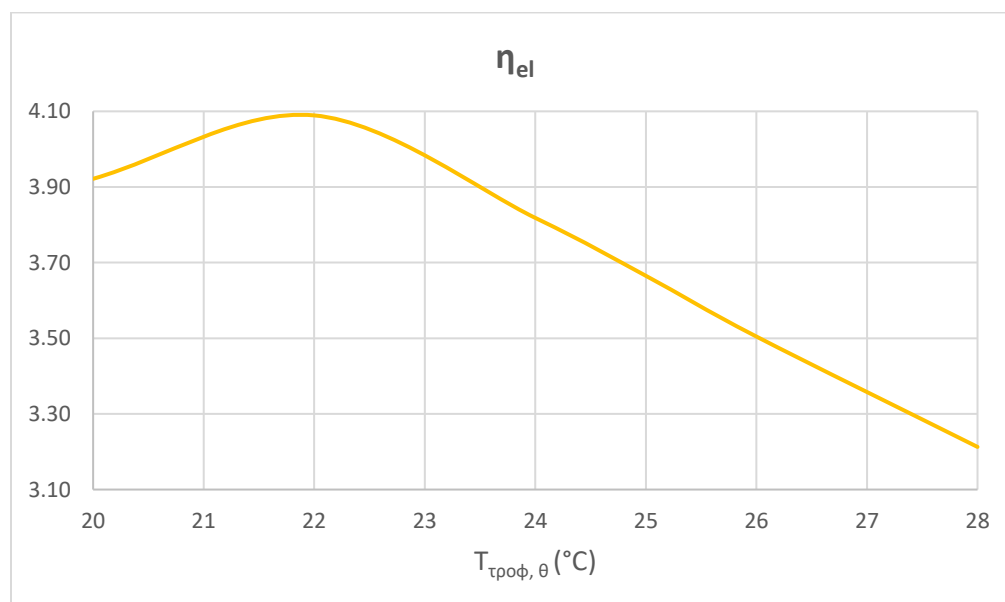
Σχήμα 5.10: Βαθμός κάλυψης (Coverage) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{\text{τροφ}, \theta}$)

Επιπρόσθετα, από το Σχήμα 5.11 γίνεται αντιληπτό πως για υψηλότερες θερμοκρασίες του διακινούμενου νερού προκύπτουν και αυξημένες θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον.

Συνεπώς, ο βαθμός απόδοσης του δυναμικού στρώματος μειώνεται μονότονα με την θερμοκρασία τροφοδοσίας κατά την περίοδο θέρμανσης.

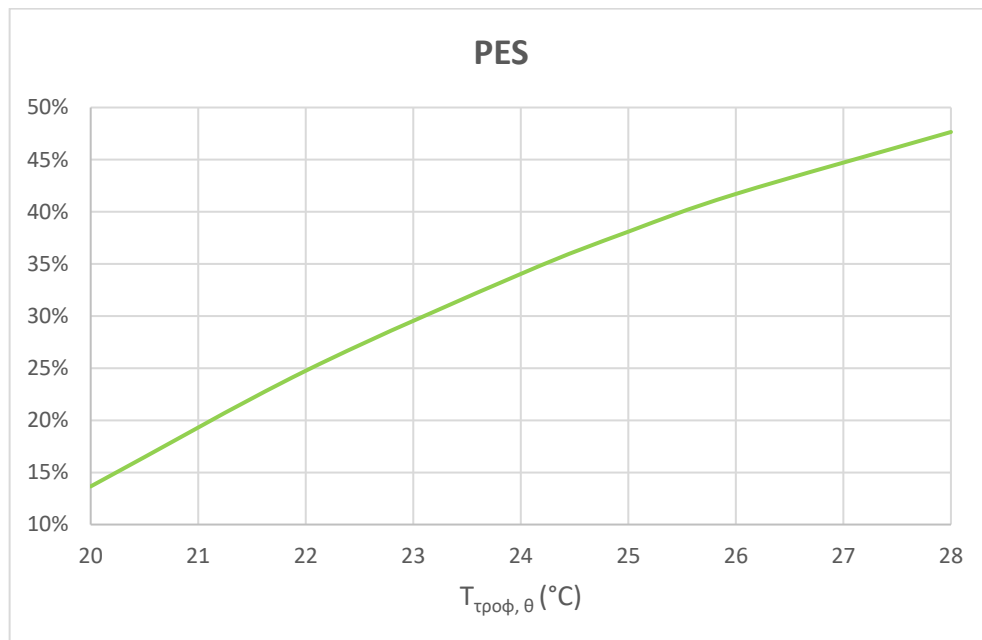


Σχήμα 5.11: Βαθμός απόδοσης δυναμικού στρώματος (η_{AL}) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{\text{τροφ},\theta}$)



Σχήμα 5.12: Ηλεκτρικός δείκτης αποδοτικότητας συστήματος ($\eta_{\text{ελ}}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{\text{τροφ},\theta}$)

Το σημαντικότερο διάγραμμα της υπό μελέτη παραμέτρου είναι το ανωτέρω (Σχήμα 5.12). Ο ηλεκτρικός δείκτης αποδοτικότητας το ποσό του θερμικού φορτίου που εξοικονομήθηκε με την κατανάλωση μιας μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, συνιστά ενδεικτικό μέγεθος της σχετικής κατανάλωσης. Η καμπύλη του η_{el} παρουσιάζει ακρότατο στην τιμή των 22°C, ενώ σημειώνει πτώση με μεγάλη κλίση στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Συνεπώς, με κριτήριο την ηλεκτρική κατανάλωση φαίνεται πως η κυκλοφορία νερού 22°C αποτελεί την πιο συμφέρουσα περίπτωση.



Σχήμα 5.13: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{\text{τροφ},\theta}$)

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.13 για υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας τροφοδοσίας κατά την περίοδο θέρμανσης επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Με μια πρώτη ματιά τα αποτελέσματα των δύο τελευταίων μεγεθών έρχονται σε αντίθεση. Εμβαθύνοντας περισσότερο όμως δύναται να βρεθεί εξήγηση. Συγκεκριμένα, η μονότονη αύξηση του PES συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου στο δυναμικό στρώμα καταδεικνύει τη σημαντική ενεργειακή υστέρηση του υπάρχοντος συστήματος θέρμανσης. Εξαιτίας, λοιπόν, της χαμηλής απόδοσης του υφιστάμενου συστήματος, η ενεργειακή ανάλυση συμπεραίνει πως από άποψη πρωτογενούς ενέργειας συμφέρει ένα μεγάλο μέρος των θερμικών αναγκών να καλύπτεται από το ίδιο το σύστημα δυναμικής μόνωσης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα και υπό τα πλαίσια ριζικής ανακαίνισης πιθανότατα να συμφέρει η αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης, από ενεργειακή αλλά ενδεχομένως και

τεχνοοικονομική σκοπιά. Τελικώς, με γνώμονα όσα ειπώθηκαν προηγουμένως, επιλέχθηκε για τη θερμοκρασία τροφοδοσίας του δυναμικού στρώματος σε περίοδο θέρμανσης η τιμή $T_{\text{τροφ},\theta}=22^{\circ}\text{C}$.

5.3 Τελικά αποτελέσματα

Για λόγους πληρότητας εξετάζονται δύο τελικά σενάρια. Το πρώτο αφορά στις συνθήκες που επιλέχθηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση, ενώ στο δεύτερο χρησιμοποιούνται ίδιες τιμές πλην αυτής της θερμοκρασίας εισόδου στο δυναμικό στρώμα για περίοδο θέρμανσης.

5.3.1 Τελικό Σενάριο I ($T_{\text{τροφ},\theta}=22^{\circ}\text{C}$)

Σύμφωνα με την παραμετρική ανάλυση της προηγούμενης ενότητας {5.2} επιλέχθηκαν τιμές για τα κυριότερα μεγέθη που επηρεάζουν την απόκριση του μοντέλου, προς δημιουργία ενός σεναρίου με τις ευνοϊκότερες για το σύστημα συνθήκες. Τα εν λόγω αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω (Πίνακας 5.6). Αξίζει να υπενθυμιστεί πως οι επιλογές γίνανε κατά κύριο λόγο με ενεργειακά και όχι τεχνοοικονομικά κριτήρια.

Πίνακας 5.6: Τιμές βασικών παραμέτρων του τελικού σεναρίου I

$T_{\text{τροφ},\theta}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{τροφ},\psi}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$d_{\text{μόνωσης}}$ (cm)	$A_{\text{συλλ}}$ (m^2)	$V_{\text{δοχ}}$ (m^3)
22	21	15	30	1

Όπως έγινε ξεκάθαρο στο κεφάλαιο της παραμετρικής ανάλυσης, οι τιμές των βασικών δεικτών απόδοσης μεταβάλλονται σημαντικά συναρτήσει των βασικών μεγεθών που μελετήθηκαν. Για παράδειγμα στην περίπτωση της περιόδου θέρμανσης ο βαθμός κάλυψης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 14.24% και 71.86% για θερμοκρασίες τροφοδοσίας από 20°C έως 28°C . Συνοψίζοντας τα βασικά σημεία των αποτελεσμάτων, προκύπτει μείωση των συνολικών θερμικών αναγκών του κτιρίου της τάξης του Coverage=34.8%, καταναλώνοντας σχετικά 4 φορές λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια ($\eta_{\text{el}}=4.09$), με απώτερη εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας κατά $\frac{1}{4}$ ($\text{PES}_a=24.75\%$). Εμβαθύνοντας λίγο περισσότερο παρατηρείται πως το αποδοτικότερο σημείο λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης αφορά σε μικρότερη κάλυψη θερμικού φορτίου (Coverage) συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές για ψύξη. Στο γεγονός αυτό συνηγορούν δύο κυρίως λόγοι. Αφενός, η απόδοση της αντλίας θερμότητας εξασθενεί σημαντικά για υψηλότερες θερμοκρασίες νερού κοστίζοντας τόσο στην απόλυτη ηλεκτρική κατανάλωση όσο και στην σχετική (η_{el}). Αφετέρου, παρότι σε επίπεδο δυναμικού στρώματος οι 15 πόντοι εξωτερικής μόνωσης φαίνεται να επιτυγχάνουν μια ικανοποιητική αποκοπή των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον ($\eta_{\text{AL},\theta}=81.72\%$), το σύστημα τροφοδοσίας παρουσιάζει σημαντικές θερμικές απώλειες ($\eta_{\text{th},\theta}=67.17\%$). Βελτίωση του συγκεκριμένου ζητήματος θα μπορούσε να

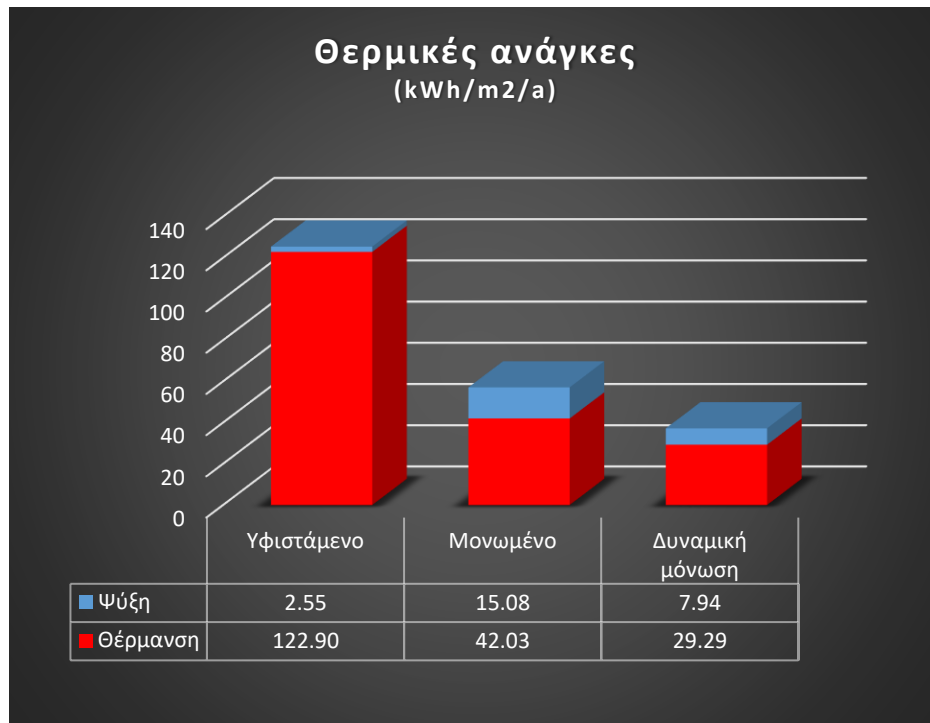
επιτευχθεί με επιπλέον πρόβλεψη των απωλειών στο κύκλωμα τροφοδοσίας ή τοποθέτηση μέρος αυτού σε κάποιο μη θερμαινόμενο χώρο, μειώνοντας την έκθεση του στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Για εποπτικούς κυρίως λόγους στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 5.14, Σχήμα 5.15) απεικονίζονται τα θερμικά φορτία ψύξης και θέρμανσης και η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για τα 3 σενάρια όπως ορίστηκαν προηγουμένως {5.1}. Συγκρίνοντας το τρίτο σενάριο της υπό μελέτη περίπτωσης (δυναμική μόνωση) με τις άλλες δύο συμπεραίνονται όπως είναι αναμενόμενο, ελαφρώς διαφορετικές τιμές στη μείωση των θερμικών αναγκών και της εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας. Συγκεκριμένα, με σημείο αναφοράς την υφιστάμενη περίπτωση επιτυγχάνεται συρρίκνωση των θερμικών αναγκών του κτιρίου κατά 70% και της καταναλισκόμενης πρωτογενούς ενέργειας κατά 71%. Επιπλέον, συγκρίνοντας με την μονωμένη κατάσταση επιτυγχάνεται μια σχετική μείωση των θερμικών φορτίων του κτιρίου κατά 35% και εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και ψύξη χώρου ύψους 25%. Στον Πίνακα 5.7 παρατίθενται οι συνολικές θερμικές ανάγκης και καταναλώσεις πρωτογενούς για τις 3 καταστάσεις.

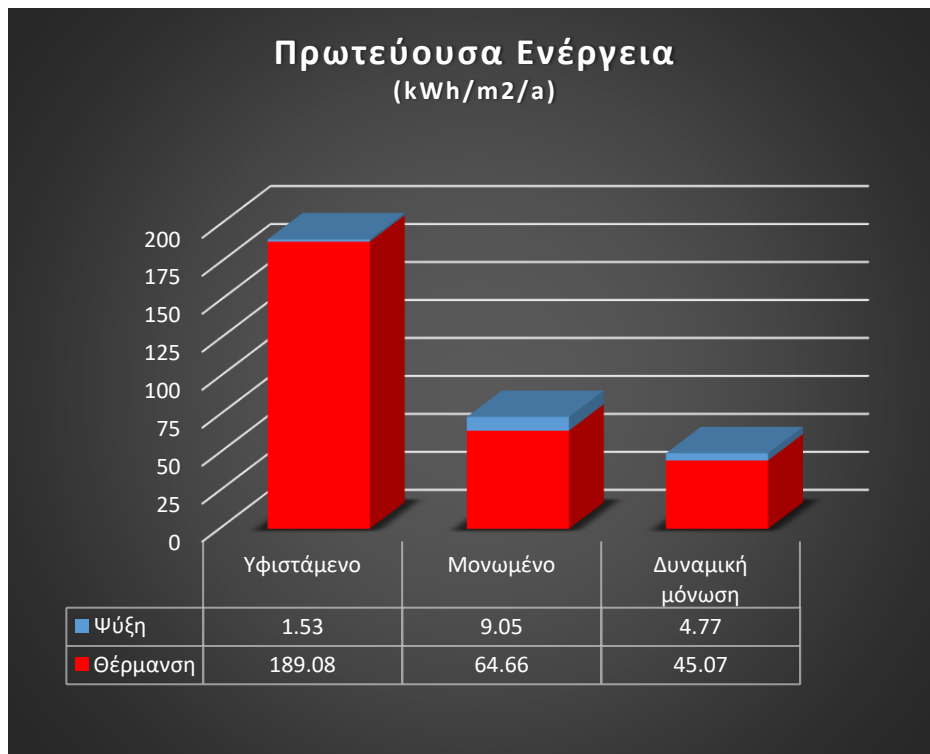
Πίνακας 5.7: Συνολικά θερμικά φορτία και καταναλώσεις πρωτογενούς για τις 3 καταστάσεις

	Υφιστάμενο	Μονωμένο	Δυναμική μόνωση
Θερμικό φορτίο ($\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$)	125.45	57.12	37.24
Πρωτογενής ενέργεια ($\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$)	190.61	73.71	55.47

Τέλος, παρατηρείται πως ακόμη και η περίπτωση τοποθέτησης και της δυναμικής μόνωσης δεν δύναται να συναγωνιστεί ενεργειακά του σεναρίου b, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.1.7, καθώς στο πλήρες εύρος της παραμετρικής ανάλυσης ο δείκτης απόδοσης PES_b λαμβάνει αρνητικές τιμές και μάλιστα υψηλές. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση του τελικού σεναρίου παίρνει την τιμή $PES_b = -175.9\%$. Υπενθυμίζεται πως το σενάριο b αφορά σε ανακαίνιση του κτιρίου παρεμβαίνοντας με προσθήκη εξωτερικής μόνωσης, αλλά και αντικατάσταση των υπάρχοντων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με νέα, ενεργειακά αποδοτική αντλία θερμότητας. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ξεκάθαρο. Η δυναμική μόνωση προσφέρει σημαντικά οφέλη λειτουργώντας συμπληρωματικά των συστημάτων θέρμανσης/ψύξης, ενώ φαίνεται πως δεν συμφέρει να χρησιμοποιείται ως κύριο σύστημα.



Σχήμα 5.14: Ανάγκες θέρμανσης και ψύξης (ΤΣ Ι)



Σχήμα 5.15: Καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και ψύξη (ΤΣ Ι)

5.3.2 Τελικό Σενάριο II ($T_{\text{τροφ},\theta}=24^{\circ}\text{C}$)

Παρότι κατά την παραμετρική ανάλυση της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση προέκυψε ακρότατο του η_{el} για $T_{\text{τροφ},\theta}=22^{\circ}\text{C}$, το σημαντικότερο μέγεθος είναι αυτό της πρωτογενούς ενέργειας και της εξοικονόμησής της (PES_a). Έτσι, μελετάται και το συγκεκριμένο σενάριο αύξησης του PES. Η παραμετρική ανάλυση της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για ψύξη θα χρησιμοποιηθεί ως οδηγός. Συγκεκριμένα, ο δείκτης αποδοτικότητας εμφάνισε μέγιστο για $T_{\text{τροφ},\psi}=21^{\circ}\text{C}$, δηλαδή 4°C διαφορά από το όριο θερμικής άνεσης των 25°C . Έτσι, παρουσιάζεται το σενάριο όπου και για την περίπτωση της θέρμανσης επιλέγεται το αντίστοιχο σημείο λειτουργίας, δηλαδή $T_{\text{τροφ},\theta}=24^{\circ}\text{C}$. Οι συνθήκες λειτουργίας συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8: Τιμές βασικών παραμέτρων του τελικού σεναρίου II

$T_{\text{τροφ},\theta}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{τροφ},\psi}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$d_{\text{μόνωσης}}$ (cm)	$A_{\text{συλλ}}$ (m^2)	$V_{\text{δοχ}}$ (m^3)
22	21	15	30	1

Τα αποτελέσματα των δύο τελικών σεναρίων (ΤΣ I, ΤΣ II) παρουσιάζονται ταυτόχρονα για λόγους σύγκρισης στους παρακάτω πίνακες

Πίνακας 5.9: Θερμικές απαιτήσεις τελικών σεναρίων

Θερμικά φορτία	Υφιστάμενο	Μονωμένο	Δυναμική μόνωση
ΤΣ I	$Q_0=125.45\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$Q_1=57.12\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$Q_2=37.24\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$
ΤΣ II	$Q_0=125.45\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$Q_1=57.12\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$Q_2=30.90\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$

Πίνακας 5.10: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας τελικών σεναρίων

Primary Energy	Υφιστάμενο	Μονωμένο	Δυναμική μόνωση
ΤΣ I	$190.61\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$73.71\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$55.47\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$
ΤΣ II	$190.61\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$73.71\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$	$48.62\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\cdot\text{a}}\right)$

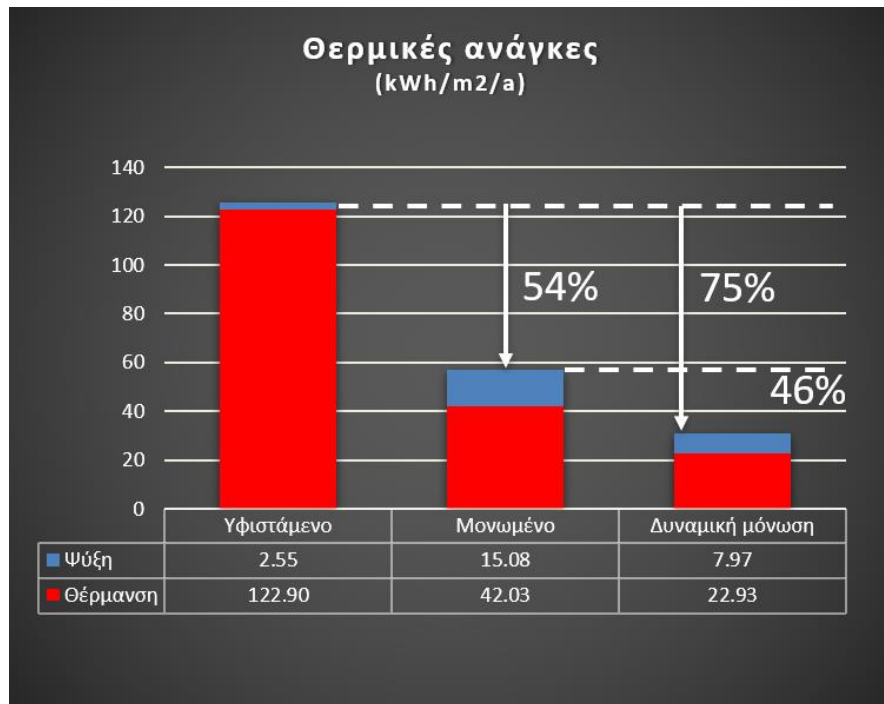
Πίνακας 5.11: Ποσοστό μείωσης απαιτήσεων θέρμανσης/ψύξης τελικών σεναρίων

Coverage	Υφιστάμενο	Μονωμένο
ΤΣ Ι	70%	35%
ΤΣ ΙΙ	75%	46%

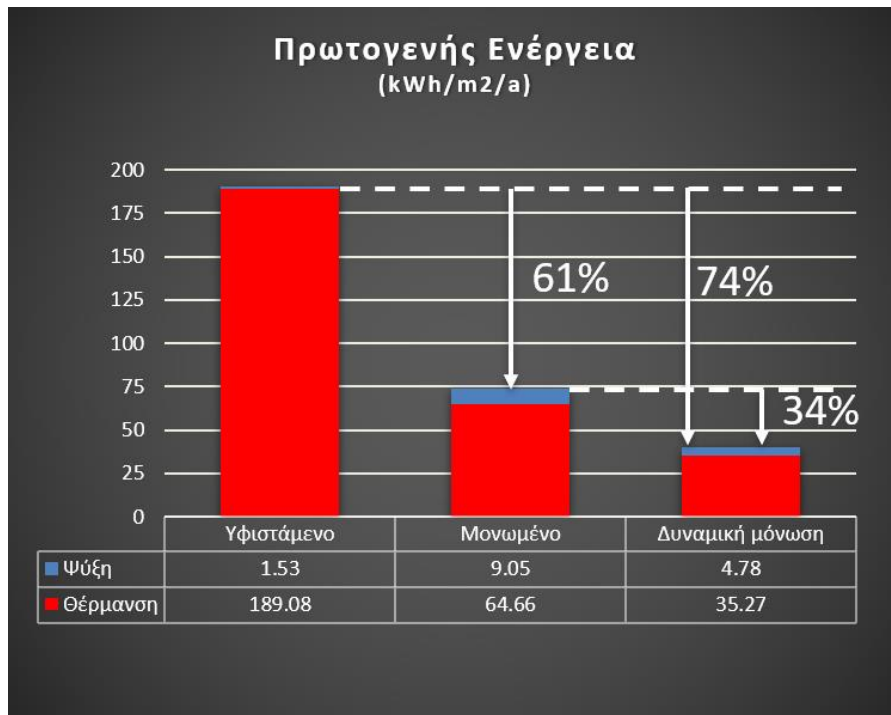
Πίνακας 5.12: Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας τελικών σεναρίων

PES _a	Υφιστάμενο	Μονωμένο
ΤΣ Ι	71%	25%
ΤΣ ΙΙ	74%	34%

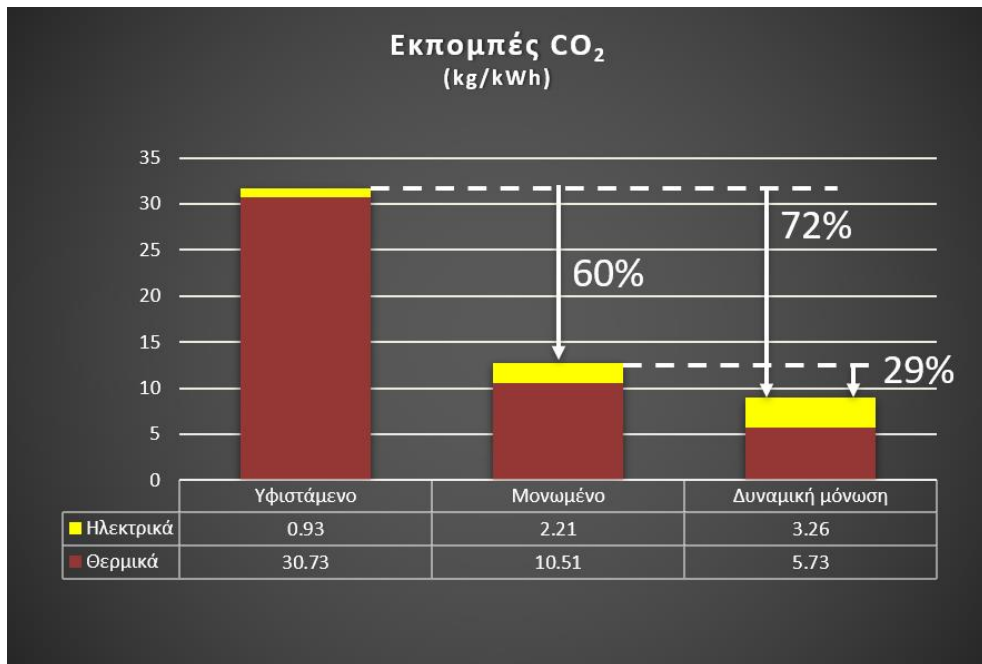
Στο **Σχήμα 5.16** απεικονίζονται οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου για τις τρεις περιπτώσεις του δεύτερου τελικού σεναρίου (ΤΣ ΙΙ). Απεικονίζεται επίσης η ποσοστιαία εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων. Στο **Σχήμα 5.17** απεικονίζεται η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για τις τρεις επί μέρους περιπτώσεις του δεύτερου τελικού σεναρίου. Φαίνεται, ακόμη, το ποσοστό εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τα διαφορετικά σενάρια. Τέλος, στο **Σχήμα 5.18** παρουσιάζονται οι εκπομπές αέριου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που οφείλονται στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη χώρων του κτιρίου. Απεικονίζεται ακόμη η μείωση των εκπεμπόμενων αέριων του θερμοκηπίου που επιτυγχάνεται με χρήση της δυναμικής μόνωσης.



Σχήμα 5.16: Ανάγκες θέρμανσης και ψύξης (ΤΣ II)

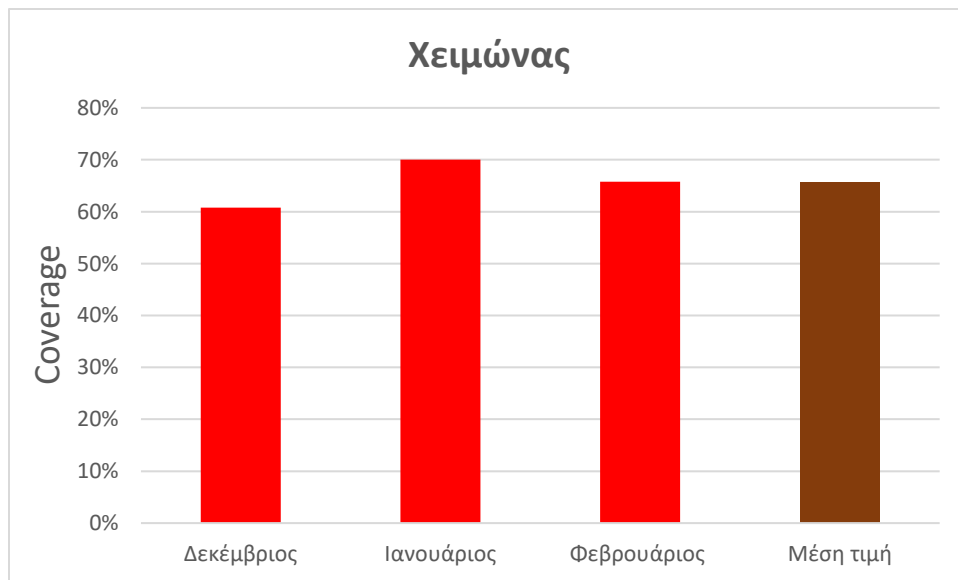


Σχήμα 5.17: Καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και ψύξη (ΤΣ II)



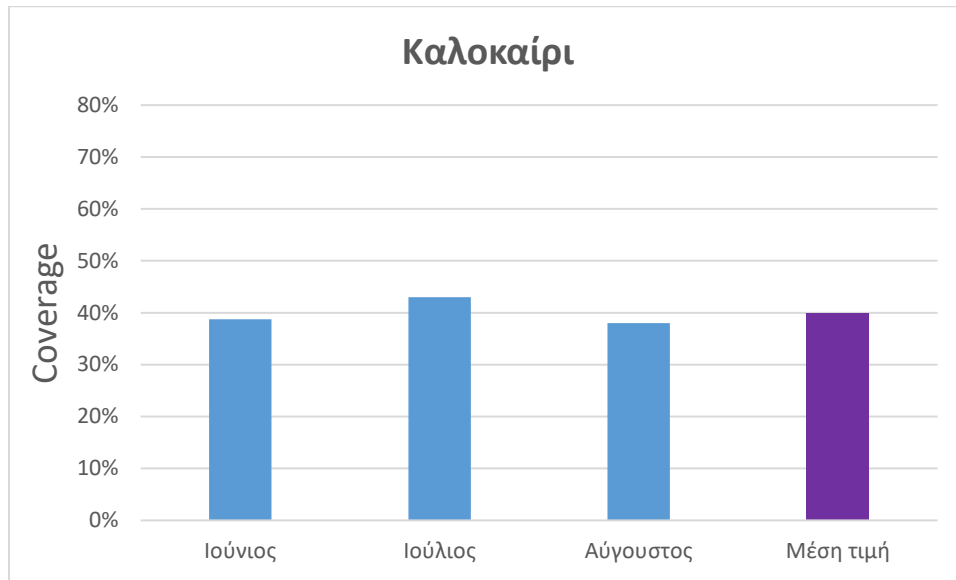
Σχήμα 5.18: Εκπομπή αέριων ρύπων CO₂ (ΤΣ II)

Παρότι η ετήσια κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων δεν είναι πολύ υψηλή αν εξετασθεί ξεχωριστά ένας μήνας χειμώνα με υψηλές ανάγκες θέρμανσης παρατηρείται πως η δυναμική μόνωση μπορεί να επιτύχει μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων έως και 70%, με μέση τιμή κάλυψης 66% το χειμώνα ().



Σχήμα 5.19: Μηνιαία κάλυψη αναγκών θέρμανσης το χειμώνα

Το αντίστοιχο διάγραμμα για λειτουργία ψύξης κατά το καλοκαίρι φαίνεται στο Σχήμα 5.20, όπου επιτυγχάνεται μείωση των αναγκών ψύξη έως 43% και μέση τιμή ίση με 40%.



Σχήμα 5.20: Μηνιαία κάλυψη αναγκών ψύξης το καλοκαίρι

6. Σχόλια-Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της καινοτόμας τεχνολογίας δυναμικής μόνωσης, επιχειρώντας την κατανόηση του συστήματος, της απόκρισής του, των ιδιοτήτων του και των οφελών που δύναται να προσφέρει στον αγώνα ανάσχεσης της κλιματικής αλλαγής. Παρά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη συγκεκριμένη ανάλυση, για τη βαθύτερη κατανόηση της τεχνολογίας κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της δυναμικής μόνωσης σε πληθώρα σεναρίων και υπό διαφορετικές γωνίες προσέγγισης.

6.1 Σχολιασμός - Συμπεράσματα

Η εμπειρία και οι γνώσεις που αποκτήθηκαν κατά την ενεργειακή ανάλυση είναι πολύτιμες, καθώς επιτυγχάνουν μια πρώτη εξοικείωση με την τεχνολογία δυναμικής μόνωσης. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου εξάγονται τα εξής συμπεράσματα.

- Συγκρίνοντας τις δύο λειτουργίες του συστήματος κατά την περίοδο θέρμανσης και ψύξης, κρίνεται αποδοτικότερο στην πρώτη περίπτωση. Συγκεκριμένα, για ίδια σχετική διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) μεταξύ του εσωτερικού χώρου και του διακινούμενου ρευστού, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση των θερμικών αναγκών (Coverage) κατά τη λειτουργία θέρμανσης έναντι αυτής της ψύξης. Η μέση διαφορά θερμοκρασίας του διακινούμενου νερού και του εξωτερικού περιβάλλοντος λαμβάνει υψηλότερες τιμές για την περίπτωση θέρμανσης συγκριτικά με αυτή της ψύξης, που επιφέρει αντίστοιχα μεγαλύτερες θερμικές απώλειες. Ωστόσο, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη ανατρέπουν το προβάδισμα που χάριζε στη λειτουργία ψύξης η προαναφερθείσα συνθήκη. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας του κλίματος του Μονάχου, όπου ακόμη και το καλοκαίρι δεν εμφανίζονται συχνά θερμοκρασίες υψηλότερες του άνω ορίου θερμικής άνεσης (εδώ 25°C), φαίνεται οι ανάγκες ψύξης να οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στις εσωτερικές πηγές θερμότητας του χώρου και όχι τόσο λόγω της εξωτερικής θερμοκρασίας. Έτσι, σε ένα μεγάλο ποσοστό της περιόδου ψύξης η ροή θερμότητας έχει κατεύθυνση από το εσωτερικό των διαμερισμάτων προς το εξωτερικό περιβάλλον, ίδια δηλαδή με αυτήν της περιόδου θέρμανσης. Συνεπώς, για εκείνες τις μέρες η θερμομόνωση του κελύφους δρα ανασταλτικά, κάτι που φαίνεται και από την αύξηση των αναγκών ψύξης από την υφιστάμενη κατάσταση στην περίπτωση τοποθέτησης εξωτερικής μόνωσης. Με οδηγό την ιδιαιτερότητα αυτή, αναδείχθηκε από την ενεργειακή ανάλυση ως πιο συμφέρουσα επιλογή η κυκλοφορία νερού σχετικά χαμηλότερης θερμοκρασίας (21°C). Έτσι, η λειτουργία του συστήματος ανατράπηκε και από αποκοπή των θερμικών απωλειών προέκυψε σε ψύξη χώρου, έχοντας το παρατηρούμενο αρνητικό αντίκτυπο στην απόδοση του.

- Η προαναφερθείσα ιδιαιτερότητα του συστήματος συνηγορεί στην αρχική πρόβλεψη, που ήθελε την τεχνολογία να αποδίδει καλύτερα σε ψυχρά κλίματα. Παρότι οι πρώτες αυτές αναλύσεις υποδεικνύουν ευνοϊκότερη απόκριση σε εφαρμογές με σχετικά υψηλότερες ανάγκες θέρμανσης από ότι ψύξης, χρειάζεται να εξετασθεί η συμπεριφορά της δυναμικής μόνωσης και σε αντίστοιχα σενάρια θερμότερων κλιματικών ζωνών. Υπογραμμίζοντας το συγκεκριμένο συμπέρασμα, υπενθυμίζεται πως αν και η μόνωση ενδεχομένως διαθέτει τη μερίδα του λέοντος της απάντησης στην ερώτηση της θέρμανσης χώρων, για την περίπτωση της ψύξης μπορεί ανάλογα το κλίμα να υπάρξει αναγκαία αλλά ποτέ ικανή συνθήκη.
- Συνιστά υποστηρικτικό σύστημα. Η δυναμική μόνωση δεν δύναται να προσφέρει από μόνη της τα ενεργειακά οφέλη που θα προσέφερε η αντικατάσταση ή η αναβάθμιση του συστήματος θέρμανσης. Η χαμηλή απόδοση του υπάρχοντος λέβητα θέρμανσης οδήγησε τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης, στο να προτείνουν ως συμφέρουσα λύση την παραλαβή και κάλυψη των αναγκών θέρμανσης από το ίδιο το σύστημα δυναμικής μόνωσης. Ωστόσο, το συγκεκριμένο εγχείρημα δεν μπορεί να εφαρμοστεί, καθώς υστερεί κατά κράτος σε σύγκριση με σενάριο αντικατάστασης των υφιστάμενων συστημάτων θέρμανσης/ψύξης με μια νέα ενεργειακά αποδοτική αντλία θερμότητας. Παρότι το υπό μελέτη μοντέλο δεν μπορεί να μας γλιτώσει από αντικατάσταση των παλιών συστημάτων, δύναται να μειώσει τα θερμικά φορτία τόσο ώστε να αρκεί για την κάλυψή τους μια μικρή αντλία θερμότητας που θα μπορούσε να ενταχθεί σε ένα προκατασκευασμένο στοιχείο κελύφους. Μια τέτοια δυνατότητα έχει να επιδείξει πολλά οφέλη τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και στην πρακτικότητα της εφαρμογής γλιτώνοντας σημαντικό μέρος των αναγκαίων έργων, της διάρκειας ανακαίνισης και της αναταραχής των κατοίκων.
- Μπορεί να δώσει λύσεις σε προβλήματα ανακαίνισης κτιρίων με αρχιτεκτονικές ιδιαιτερότητες. Η υπό μελέτη τεχνολογία αποτελεί δυναμικό σύστημα προσφέροντας μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη στη μονάδα του όγκου σε σχέση με τη συμβατική εξωτερική μόνωση. Συνεπώς, μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην ελαχιστοποίηση του προστιθέμενου πάχους στις εξωτερικές τοιχοποιίες ενός κτιρίου κατά τη διαδικασία ανακαίνισης με παρέμβαση στο κελύφος του. Έτσι, πιθανώς να αποτελέσει λύση μονόδρομο σε περιπτώσεις που χρήζουν γεωμετρικών περιορισμών, όπου δεν επιτρέπεται η πέραν του μέτρου αύξηση των εξωτερικών διαστάσεων. Ακόμη και σε εφαρμογές που δεν απαγορεύεται κατηγορηματικά η αλλοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, πάντα θα εκτιμάται από αρχιτεκτονικής σκοπιάς αλλά και από τους ίδιους τους κατοίκους ο ελεύθερος χώρος που μπορεί να προσφέρει το δυναμικό στρώμα.

6.2 Προτάσεις μελλοντικής εργασίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παρούσα εργασία αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση του συστήματος δυναμικής μόνωσης, συνεπώς υπάρχουν πολλά περισσότερα που μπορούν να γίνουν για να αποκτηθεί πληρέστερη κατανόηση της τεχνολογίας και των δυνατοτήτων της. Συνοπτικά αναφέρονται μερικές ιδέες για μελλοντική έρευνα του υπό μελέτη συστήματος.

- Ανεξαρτητοποίηση του συστήματος για κάθε διαμέρισμα. Για παράδειγμα με χρήση ξεχωριστών θερμοκρασιακών ελεγκτών για κάθε χώρο και κυκλοφορητών μεταβλητής ταχύτητας.
- Χρήση αντλίας θερμότητας μεταβλητών στροφών (inverter). Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η απόδοση της αντλίας, ενώ χρειάζεται πλέον σημαντικά μικρότερα δοχεία αδρανείας που συνεπάγονται και μικρότερες απώλειες θερμότητας.
- Μελέτη σεναρίου για θερμότερα κλίματα. Θα παρουσίαζε πραγματικά ενδιαφέρον η ανάλυση ενός κτιρίου στην Αθήνα, αλλά και σε κάποιο μέρος της βορειότερης Ελλάδας όπου συνδυάζει βαριούς χειμώνες, άρα και μεγάλες ανάγκες θέρμανσης, με την αυξημένη ηλιοφάνεια που χαρακτηρίζει τη χώρα μας.
- Ένταξη και του ζεστού νερού χρήσης με σκοπό το σχεδιασμό κτιρίου nZEB.
- Ένα επίσης τρομερά ενδιαφέρον εγχείρημα θα μπορούσε να είναι η προσπάθεια βελτιστοποίησης του συστήματος, έτσι ώστε να τροφοδοτείται το δυναμικό στρώμα με νερό μεταβλητής θερμοκρασίας ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κάτι τέτοιο εμφανώς χρειάζεται εκτός από πολύ κόπο και βαθύτατη κατανόηση της τεχνολογίας.
- Τέλος, πολύ χρήσιμη κρίνεται η προσθήκη και ενός τεχνοοικονομικού κριτηρίου. Ωστόσο, επειδή το κόστος κατασκευής και παραγωγής της δυναμικής μόνωσης ενταγμένης σε προκατασκευασμένο στοιχείο κελύφους δεν μπορεί να προσεγγιστεί εύκολα, καθώς δεν υφίσταται ακόμη.

7. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές των βασικότερων παραμέτρων	51
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά συστήματος, κατόπιν διαστασιολόγησης.....	54
Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κελύφους.....	58
Πίνακας 4.2: Ποσοστό φέρων οργανισμού στην εξωτερική επιφάνεια.....	59
Πίνακας 4.3: Συντελεστής θερμοπερατότητας (U) και πάχος (d) δομικών στοιχείων	59
Πίνακας 4.4: Συντελεστής θερμοπερατότητας (U) και ηλιακός συντελεστής (g), παραθύρων υφιστάμενης και ανακαινισμένης περίπτωσης	59
Πίνακας 4.5: Πλήθος ατόμων και ανάγκη αερισμού σε κατοικία	62
Πίνακας 4.6: Θερμική ισχύς ατόμων και μέσος συντελεστής παρουσίας	63
Πίνακας 4.7: Εκτιμώμενη θερμική ισχύς εξοπλισμού και συντελεστής ετεροχρονισμού ...	63
Πίνακας 4.8: Στάθμη γενικού φωτισμού	64
Πίνακας 4.9: Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού ανάλογα της στάθμης φωτισμού	64
Πίνακας 4.10: Διείσδυση αέρα από κουφώματα	66
Πίνακας 4.11: Θερμοκρασιακές συνθήκες άνεσης για την Ελλάδα	66
Πίνακας 5.1: Συντελεστής μετατροπής ενέργειας πετρελαίου θέρμανσης σε πρωτογενή ενέργεια.....	75
Πίνακας 5.2: Τιμές κύριων παραμέτρων	79
Πίνακας 5.3: Τιμές παραμέτρων ανάλυσης.....	82
Πίνακας 5.4: Τιμές παραμέτρων ανάλυσης.....	85
Πίνακας 5.5: Τιμές παραμέτρων ανάλυσης.....	87
Πίνακας 5.6: Τιμές βασικών παραμέτρων του τελικού σεναρίου I.....	90
Πίνακας 5.7: Συνολικά θερμικά φορτία και καταναλώσεις πρωτογενούς για τις 3 καταστάσεις	91
Πίνακας 5.8: Τιμές βασικών παραμέτρων του τελικού σεναρίου II.....	93
Πίνακας 5.9: Θερμικές απαιτήσεις τελικών σεναρίων	93
Πίνακας 5.10: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας τελικών σεναρίων	93
Πίνακας 5.11: Ποσοστό μείωσης απαιτήσεων θέρμανσης/ψύξης τελικών σεναρίων	94
Πίνακας 5.12: Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας τελικών σεναρίων	94

8. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1: Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από το δυναμικό στρώμα(Active Layer)....	37
Σχήμα 3.2: Ειδική παροχή μάζας (kg/h/m ²) του κάθε τοίχου.....	37
Σχήμα 3.3: Αδυναμία ρύθμισης θερμοκρασίας, από την αντλία θερμότητας.....	53
Σχήμα 3.4: Σήμα λειτουργίας αντλίας θερμότητας, πριν τη διαστασιολόγηση.....	54
Σχήμα 3.5: Σήμα λειτουργίας αντλίας θερμότητας, έπειτα από διαστασιολόγηση.....	54
Σχήμα 5.1: Διακύμανση συντελεστή μετατροπής ηλεκτρικής σε πρωτογενή ενέργεια στη Γερμανία (IINAS-Kurzstudie 2020 zur stromerzeugung in Deutschland).....	76
Σχήμα 5.2: Συντελεστής συνεισφοράς ηλιοθερμικού συστήματος (CF _{ST}) συναρτήσει της επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών.....	80
Σχήμα 5.3: Θερμικός βαθμός απόδοσης συστήματος (η_{th}) συναρτήσει της επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών.....	80
Σχήμα 5.4: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσει της επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών.....	81
Σχήμα 5.5: Βαθμός κάλυψης (Coverage) και θερμικά φορτία για την μονωμένη (Q ₁) και την υπό μελέτη περίπτωση (Q ₂).....	83
Σχήμα 5.6: Βαθμός απόδοσης δυναμικού στρώματος (η_{AL}) συναρτήσει πάχους μόνωσης.....	83
Σχήμα 5.7: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσει πάχους μόνωσης.....	84
Σχήμα 5.8: Βαθμός κάλυψης (Coverage) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για ψύξη ($T_{τροφ,ψ}$).....	85
Σχήμα 5.9: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για ψύξη ($T_{τροφ,ψ}$).....	86
Σχήμα 5.10: Βαθμός κάλυψης (Coverage) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{τροφ,θ}$).....	87
Σχήμα 5.11: Βαθμός απόδοσης δυναμικού στρώματος (η_{AL}) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{τροφ,θ}$).....	88
Σχήμα 5.12: Ηλεκτρικός δείκτης αποδοτικότητας συστήματος (η_{el}) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{τροφ,θ}$).....	88
Σχήμα 5.13: Συντελεστής εξοικονόμησης ΠΕ (PES) συναρτήσει της θερμοκρασίας τροφοδοσίας για θέρμανση ($T_{τροφ,θ}$).....	89
Σχήμα 5.14: Ανάγκες θέρμανσης και ψύξης (ΤΣ I).....	92
Σχήμα 5.15: Καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και ψύξη (ΤΣ I).....	92
Σχήμα 5.16: Ανάγκες θέρμανσης και ψύξης (ΤΣ II).....	95
Σχήμα 5.17: Καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και ψύξη (ΤΣ II).....	95
Σχήμα 5.18: Εκπομπή αέριων ρύπων CO ₂ (ΤΣ II).....	96
Σχήμα 5.19: Μηνιαία κάλυψη αναγκών θέρμανσης το χειμώνα.....	96
Σχήμα 5.20: Μηνιαία κάλυψη αναγκών ψύξης το καλοκαίρι.....	97

9. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (1989-2014) σε Mtoe [2]	9
Εικόνα 1.2: Κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ-28 εν έτη 2017 [4]	10
Εικόνα 1.3: Ανάγκες τελικής ενέργειας για κατοικίες, σε Mtoe [5].....	11
Εικόνα 1.4: Κατανομή θερμοκρασιών τοιχοποιίας με δυναμικό στρώμα [16]	17
Εικόνα 2.1: Κυρίως περιβάλλον Simulation Studio.....	20
Εικόνα 2.2: Περιβάλλον TRNBuild.....	22
Εικόνα 2.3: Τομή ενός θερμικά δυναμικού δομικού στοιχείου	25
Εικόνα 2.4: Ροή θερμότητας σε τομή ενός δυναμικού στοιχείου	25
Εικόνα 2.5: Κύκλωμα αντιστάσεων, τριγωνικής διάταξης.....	26
Εικόνα 2.6: Κύκλωμα αντιστάσεων, διάταξης αστέρα	27
Εικόνα 3.1: Παράθυρο δημιουργίας δυναμικού στρώματος (Active Layer)	33
Εικόνα 3.2: Παράθυρο τροφοδοσίας του δυναμικού στρώματος (Active Layer)	35
Εικόνα 3.3: Απλοποιημένο κύκλωμα θέρμανσης	40
Εικόνα 3.4: Απλοποιημένο κύκλωμα ψύξης	43
Εικόνα 3.5: Μοντέλο τετράοδης βάννας	45
Εικόνα 3.6: Οπτικοποίηση στοιχείου υπολογισμών, σε περιβάλλον <i>Simulation Studio</i>	47
Εικόνα 3.7: Απλοποιημένο κύκλωμα θέρμανσης και ψύξης.....	48
Εικόνα 3.8: Κέντρο ελέγχου προσομοίωσης (Simulation cards).....	49
Εικόνα 3.9: Αντιστοίχιση μεταβλητής ελέγχου σε υπάρχον στοιχείο	50
Εικόνα 4.1: Οπτική απεικόνιση πολυκατοικίας	57
Εικόνα 4.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση του ορόφου μελέτης.....	57
Εικόνα 4.3: Τυπικές τιμές συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ	61
Εικόνα 4.4: Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Μόναχο	67
Εικόνα 4.5: Διακριτά σενάρια βάσει κελύφους.....	69
Εικόνα 4.6: Διακριτά σενάρια συστημάτων θέρμανσης/ψύξης.....	69

10. Βιβλιογραφία

- [1] «Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016,» European Environment Agency, 2017.
- [2] «BP Statistical Review of World Energy June 2015,» BP, London, 2015.
- [3] «BP Energy Outlook 2040,» BP, London, 2018.
- [4] «Energy, transport and environment statistics,» Eurostat, 2019.
- [5] «Transport and GHG Emissions, Trends to 2050,» European Commission, EU Energy, 2013.
- [6] European Commission - Buildings.
Available on: <https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings>.
- [7] «Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.»
- [8] «EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.»
- [9] R. E. Smith, «Prefab architecture: a guide to modular design and construction,» New Jersey, 2011.
- [10] W. R. F. Carl T. Hass, «Preliminary research on prefabrication, pre-assembly, modularization and off-site fabrication in construction,» July 2002.
- [11] N. G. D. Peter J. Cameron, «Piecing together modular: understanding the benefits and limitations of modular construction methods for multifamily development,» Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [12] R. Rovers, «A GUIDE INTO RENOVATION PACKAGE CONCEPTS FOR MASS RETROFIT OF DIFFERENT TYPES OF BUILDINGS WITH PREFABRICATED ELEMENTS FOR (N)ZEB PERFORMANCE,» MORE-CONNECT, 2018.
Available: <https://www.more-connect.eu/>.
- [13] «Energy Efficient Ventilated Façades for Optimal Adaptability and Heat Exchange enabling novel NZEB architectural concepts for the refurbishment of existing

buildings,» E2VENT, 2014.

Available on: <http://www.e2vent.eu/>.

[14] «4RinEU management to implement deep renovation,» 4RinEU,

Available on: <https://4rineu.eu/>.

[15] «D9.13 Guidebook for the Implementation of the Systemic Packages,» iNSPire, 2016.

Available on: www.inspirefp7.eu/

[16] M. F.-C. T. B. Tomasz Kisilewicz, «Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls,» *Energy and Buildings*, 2019.

[17] «TABULA WebTool,»

Available: <https://webtool.building-typology.eu/#bm>.