



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενεργειακών  
τεχνολογιών και συστημάτων σε υπάρχον κτήριο.**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
της Αφροδίτης-Ειρήνης Μαχαίρα

Ερευνητική επιβλέπουσα:  
Μαρία Φούντη

Ακαδημαϊκός επιβλέπων:  
Μάριος Αναγνωστάκης

Αθήνα, Σεπτέμβριος, 2023

## Περίληψη

Το ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα προβλήματα στην εποχή μας. Οι κτηριακές κατασκευές, είτε πρόκειται για κατοικίες είτε για κτήρια του τριτογενή τομέα, είναι υπεύθυνες για ένα μεγάλο ποσοστό επί της συνολικής ενεργειακής κατανάλωση στην Ευρώπη, και συμβάλλουν σημαντικά στη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας, κυρίως εξαιτίας των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), που είναι υπεύθυνο για την αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή.

Στην κατεύθυνση αυτή κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός και η κατασκευή κτηρίων με μειωμένες ενεργειακές ανάγκες, ενώ είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν και παρεμβάσεις στα υφιστάμενα κτήρια ώστε να βελτιωθεί η ενεργειακή τους συμπεριφορά, επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας. Ταυτόχρονα, ο ενεργειακός αυτός σχεδιασμός πρέπει να στοχεύει και να διασφαλίζει τις καλύτερες εσωτερικές συνθήκες, ώστε να εξασφαλίζεται το αίσθημα της ικανοποιητικής θερμικής άνεσης στους ανθρώπους εντός των κτηρίων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού του κτηριακού κελύφους, ώστε να υπάρχει καλός φωτισμός κατά τη διάρκεια της ημέρας, να υπάρχουν ηλιακά κέρδη από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό των χώρων κατά τους χειμερινούς μήνες και να εξασφαλίζεται η απαραίτητη σκίαση κατά τους θερινούς μήνες, αλλά και από την κατάλληλη θερμομόνωση ώστε να περιορίζονται οι θερμικές απώλειες, εμποδίζοντας τη μεταφορά θερμότητας από το εσωτερικό του κτηρίου προς το εξωτερικό περιβάλλον την χειμερινή περίοδο και αντίστροφα το καλοκαίρι. Τέλος, η σωστή διαστασιολόγηση και λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης/ψύξης και αυτοματισμού εκτός από μείωση στη κατανάλωση ενέργειας μπορεί να ικανοποιήσει και καλύτερες εσωκλιματικές συνθήκες.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια συνδυαστική ενεργειακή, τεchnο-οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση ενεργειακών τεχνολογιών και συστημάτων σε υπάρχον κτήριο. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται διαφορετικά συστήματα τα θέρμανσης ψύξης, αλλά και φωτοβολταϊκά συστήματα, ενώ σε ότι αφορά το κέλυφος τοποθετούνται διαφορετικά πάχη μόνωσης και διαφορετικοί τύποι παραθύρων. Η μελέτη επικεντρώνεται σε τέσσερις Κρίσιμους Δείκτες Απόδοσης (KPIs). Την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των συστημάτων καθώς επίσης και τη θερμική άνεση εντός του κτηρίου. Τελικός στόχος της εργασίας είναι η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού των παραπάνω ενεργειακών συστημάτων μέσω της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE.

Η ενεργειακή ανάλυση και μοντελοποίηση του κτηρίου γίνεται με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος EnergyPlus. Οι διάφοροι τύποι παραθύρων, κατασκευάζονται και επιλέγονται από τις βιβλιοθήκες του λογισμικού WINDOW 7.6. Τέλος, η παραμετροποίηση των διαφόρων συνδυασμών των ενεργειακών συστημάτων γίνεται μέσω του λογισμικού JEPlus.

## Abstract

Energy saving is one of today's most critical issues. Buildings, whether residential or commercial, are currently the largest consumers of energy and major contributors to atmospheric pollution, mainly through the emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), which are responsible for the increase in the greenhouse effect and climate change.

In this direction, it is necessary to design buildings with reduced energy needs, while it is necessary to renovate the existing buildings in order to upgrade their energy performance, achieving maximum energy savings. At the same time, this energy design should aim for and provide the best possible indoor conditions to ensure satisfactory thermal comfort conditions for the residents of the buildings. This can be achieved through the appropriate design of the building providing good daylighting, solar gains from the incidence solar radiation within the building during the winter months and necessary shading during the summer months, and by also adequate thermal insulation, preventing heat losses from the building's envelope. Finally, the proper sizing and operation of heating and cooling systems not only reduce the energy consumption, but also can provide better indoor comfort conditions.

The present study, presents a combined energy, techno-economic and environmental assessment of energy technologies and systems in an existing building. In particular, different heating and cooling systems, and photovoltaic systems are considered, while different insulation thicknesses and different types of windows are installed in the building's envelope. The study focuses on four key performance indicators (KPIs); primary energy consumption, carbon dioxide emissions, installation and operating costs of the systems, and thermal comfort inside the building. The final objective of the project is to find the optimal combination of the above configurations, using the PROMETHEE multi-criteria methodology.

Energy analysis and modeling of the building is carried out using the EnergyPlus software. The types of the windows are specified from the WINDOS 7.6 software libraries. Finally, the various combinations of the energy systems are configured using the JEPLus software.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Φυσική και τεχνολογικές εφαρμογές».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την ερευνητική επιβλέπουσα καθηγήτρια Μαρία Φούντη, καταρχήν για την ευκαιρία της συνεργασίας μου με το εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, και επιπλέον για την εμπιστοσύνη της ως προς την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας.

Μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Δρ. Γιάννη Ατσόνιο και τον υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. Άρη Μανωλίτση για την άψογη συνεργασία, την πολύτιμη βοήθεια, τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μαζί τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλα τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης.

Αφροδίτη - Ειρήνη Μαχαίρα

Σεπτέμβριος 2023

## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	8
1.1	Ενεργειακή κατανάλωση στον κτηριακό τομέα.....	8
1.2	Η ελληνική πραγματικότητα .....	8
1.3	Πρόβλημα απόφασης .....	9
1.4	Σκοπός της παρούσας εργασίας .....	9
2	Συμβατικά και Καινοτόμα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας.....	10
2.1	Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας .....	10
2.1.1	Θερμική Αγωγιμότητα.....	10
2.1.2	Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή .....	10
2.1.3	Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία .....	10
2.2	Θερμική Μόνωση.....	10
2.2.1	Βασικές Έννοιες Θερμομόνωσης .....	11
2.2.2	Θερμομονωτικά Υλικά.....	12
2.3	Υαλοπίνακες.....	15
2.3.1	Θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων.....	15
2.3.2	Μεταφορά θερμότητας σε υαλοπίνακες.....	16
2.3.3	Οπτικές ιδιότητες .....	17
2.3.4	Τεχνολογίες παραθύρων .....	18
2.4	Ενεργειακά συστήματα.....	21
2.4.1	Επίδραση συστημάτων αυτοματισμού και ελέγχου στην ενεργειακή απόδοση κτηρίων 22	
2.4.2	Φωτοβολταϊκά συστήματα .....	23
2.4.3	Σύστημα Θέρμανσης.....	24
2.4.4	Σύστημα Ψύξης.....	27
3	Δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs).....	29
3.1	Πρωτογενής ενέργεια .....	29
3.2	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα - Εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	31
3.3	Κόστος.....	32
3.3.1	Βασικές οικονομικές έννοιες .....	32
3.3.2	Οικονομικές Παραδοχές .....	33
3.4	Θερμική άνεση.....	35
3.4.1	Δείκτης Προβλεπόμενης Μέσης Ψήφου: PMV (Predicted Mean Vote).....	36
3.4.2	Δείκτης PPD- Predicted Percent of Dissatisfied People (Δείκτης δυσαρέσκειας των ανθρώπων).....	37
4	Μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων Multi- Criteria decision -making (MCDA) ....	38

4.1	Προβλήματα απόφασης .....	38
4.2	Η μέθοδος PROMETHEE.....	39
5	Λογισμικά.....	41
5.1	Το λογισμικό SketchUp.....	41
5.2	Το λογισμικό WINDOW .....	41
5.3	Το λογισμικό OpenStudio.....	43
5.4	Το λογισμικό ENERGYPLUS (EP)+.....	44
5.5	Το λογισμικό JEPius .....	46
6	Μελέτη περίπτωσης .....	47
6.1	Γεωμετρία κτιρίου.....	47
6.1.1	Διαχωρισμός του κτιρίου σε θερμικές ζώνες.....	48
6.1.2	Σχεδιασμός της γεωμετρίας του κτηριακού κελύφους .....	49
6.2	Υλικά – Κέλυφος.....	50
6.2.1	Στοιχείων του κτηριακού κελύφους.....	50
6.3	Υαλοπίνακες.....	51
6.3.1	Υλικά κατασκευής υαλοπινάκων.....	51
6.3.2	Πλαίσια παραθύρων.....	51
6.3.3	Σκίαση παραθύρων.....	52
6.4	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	52
6.4.1	Σύστημα Θέρμανσης 1.....	53
6.4.2	Σύστημα Θέρμανσης 2.....	54
6.4.3	Σύστημα Ψύξης.....	54
6.4.4	Φωτοβολταικά .....	55
6.4.5	Σύστημα διαχείρισης ενέργειας .....	55
6.5	Παραδοχές .....	56
6.5.1	Προγράμματα λειτουργίας .....	56
6.6	Παραμετροποίηση μοντέλου.....	61
7	Αποτελέσματα.....	62
7.1	Ενεργειακή Αξιολόγηση Στοιχείων Κελύφους .....	62
7.2	Ενεργειακή Αξιολόγηση κτηρίου .....	62
7.3	Περιβαλλοντική Αξιολόγηση.....	68
7.4	Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση .....	70
7.5	Αξιολόγηση Θερμικής άνεσης.....	73
7.6	Πολυκριτηριακή ανάλυση.....	75
8	Συμπεράσματα.....	78
8.1	Συμπεράσματα αξιολόγησης ενεργειακής αναβάθμισης του κτηρίου .....	78

8.2	Προτάσεις για μελλοντική εργασία .....	78
9	References.....	80

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ενεργειακή κατανάλωση στον κτηριακό τομέα

Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις για τα μελλοντικών κτήρια είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε όλες τις φάσεις της ζωής τους, από την κατασκευή έως την κατεδάφιση. Το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment Programme – UNEP) εκτιμά ότι τα κτήρια καταναλώνουν περίπου το 40% της παγκόσμιας ενέργειας, 25% του παγκόσμιου νερού και 40% των παγκόσμιων πόρων. Ο κτηριακός τομέας είναι επίσης υπεύθυνος για το 1/3 περίπου των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε ολόκληρο τον πλανήτη. Παρόμοιες τιμές παρατηρήθηκαν από μελέτες που διεξήχθησαν από το Αμερικάνικο Υπουργείο Ενέργειας (U.S. Department of Energy – DOE) και από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. [1]

Ο ευρωπαϊκός οικοδομικός τομέας αντιπροσωπεύει το 39,6% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), εκ των οποίων  $34 \times 10^{11} kWh$  από κτίρια κατοικιών και  $17 \times 10^{11} kWh$  από κτήρια του τριτογενούς τομέα. Τα κράτη μέλη της ΕΕ- με την υψηλότερη τελική κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των κτηρίων είναι η Γερμανία, η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ιταλία. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του ευρωπαϊκού κτηριακού αποθέματος αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των προσπαθειών για την άμβλυση της εξάρτησης της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας, η οποία σήμερα ανέρχεται περίπου στο 53,4% ώστε να επιτευχθεί η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία η οποία έχει σαν απώτερο στόχο την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. [2]

Στην Ευρώπη, η κατάσταση αυτή ενθάρρυνε τον ορισμό διαφόρων περιβαλλοντικών πολιτικών: οι σημαντικότερες είναι η οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD) και η οδηγία για την ενεργειακή απόδοση (EED). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτίμησε ότι οι δράσεις αυτές θα συμβάλουν στη μείωση της ζήτησης ενέργειας για σκοπούς θέρμανσης και ψύξης κατά, 12% το 2030 και 17% το 2050 σε σύγκριση με τα δεδομένα του 2005.

## 1.2 Η ελληνική πραγματικότητα

Ο ελληνικός κτηριακός τομέας παρουσιάζει έντονο αντίκτυπο στον τομέα της ενέργειας και του περιβάλλοντος λόγω της χρήσης πρωτογενών υλικών, της εκμετάλλευσης φυσικών πόρων και της εκπομπής ρύπων και αποβλήτων. Τα ελληνικά κτήρια λόγω της περιόδου κατασκευής τους και της έλλειψης σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα,. Πολλά από αυτά αντιμετωπίζουν προβλήματα, όπως:

1. Έλλειψη θερμομόνωσης: Τα περισσότερα κτίρια κατασκευάστηκαν πριν από το 1979 διαθέτοντας ανεπαρκή έως τελείως ανεπαρκή θερμική μόνωση.
2. Παλαιά παράθυρα: Οι τεχνολογίες παραθύρων είναι παλαιές και αναποτελεσματικές.
3. Έλλιπης ηλιοπροστασία: Τα νότια και δυτικά μέρη των κτιρίων δεν προστατεύονται επαρκώς από την ηλιακή ακτινοβολία.
4. Μη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας: Το υψηλό ηλιακό δυναμικό δεν αξιοποιείται επαρκώς.
5. Παλαιά και ανεπαρκή συντηρημένα συστήματα θέρμανσης και ψύξης: Τα ενεργειακά αυτά συστήματα λειτουργούν με χαμηλή απόδοση.

Ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων, μπορούμε να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας κατά περίπου 5% έως 6% και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 5%.



Εκτιμάται ότι τα νέα κτήρια μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση κατά 20% έως 50% μέσω σχεδιαστικών παρεμβάσεων στο κτηριακό κέλυφος. [3]

### 1.3 Πρόβλημα απόφασης

Γενικά, ένα πρόβλημα απόφασης είναι ένα πρόβλημα στο οποίο εξετάζουμε ένα σύνολο Α πιθανών ενεργειών (πιθανές λύσεις, εφικτές αποφάσεις) μεταξύ των οποίων πρέπει:

1. είτε να επιλέξουμε μια μοναδική ενέργεια που θεωρείται ως "η καλύτερη",
2. είτε να επιλέξουμε ένα υποσύνολο ενεργειών που θεωρούνται "καλές",
3. ή να διατάξουμε τις ενέργειες από τις καλύτερες προς τις χειρότερες.

Το σύνολο Α μπορεί να οριστεί με απ αριθμητικό τρόπο (δηλ. με έναν κατάλογο) ή μέσω μαθηματικών περιορισμών, μπορεί να είναι πεπερασμένο ή άπειρο, σταθερό ή εξελισσόμενο (δηλ. πιθανό να τροποποιηθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας). Πριν από την έλευση της πολυκριτηριακής ανάλυσης, ο ορισμός των "καλών" ή "βέλτιστων" δράσεων γινόταν σύμφωνα με μια ενιαία άποψη γενικά. Στο πλαίσιο αυτό, τα προβλήματα λήψης αποφάσεων είναι σαφώς καθορισμένα μαθηματικά. Ωστόσο, είναι σπάνιο να βρεθούν συγκεκριμένες εφαρμογές όπου μία και μόνη οπτική γωνία αρκεί για να περιλάβει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τη σύγκριση των στοιχείων Α συνόλου. Ο στόχος της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η μελέτη προβλημάτων λήψης αποφάσεων στα οποία πολλά σημεία απόψεις πρέπει να ληφθούν υπόψη. [4]

### 1.4 Σκοπός της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια συνδυαστική ενεργειακή, τεχνο-οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση ενεργειακών τεχνολογιών και συστημάτων σε υπάρχον κτήριο. Τα σενάρια που παραμετροποιούνται αφορούν συστήματα θέρμανσης/ψύξης, διαφορετικά είδη και πάχη θερμομόνωσης καθώς επίσης και διαφορετικά συστήματα υαλοπινάκων. Επιπλέον εξετάζεται η περίπτωση εγκατάστασης ή μη φωτοβολταϊκών συστημάτων μεταβάλλοντας ταυτόχρονα την επιφάνεια τους..

Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται τρία βασικά διαφορετικά συστήματα θέρμανσης, με λέβητα πετρελαίου, λέβητα αερίου και λέβητα βιομάζας. Ταυτόχρονα εξετάζεται ο συνδυασμός τους δυο διαφορετικά συστήματα τερματικών μονάδων, εξαναγκασμένης ροής (Fan-Coils) και σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Εξετάζονται επίσης δύο διαφορετικά θερμομονωτικά υλικά, η διογκωμένη πολυστερίνη(Expanded Polystyrene- EPS) και ο πετροβάμβακας (Mineral Wool - MW) σε πάχη 5, 10, 15 και 20 εκατοστά αντίστοιχα. Παραμετροποιούνται επίσης και τέσσερις περιπτώσεις υαλοπινάκων, μονών, 2-πλων και 3-πλών και αντίστοιχα 2-πλων και 3-πλων ηλεκτροχρωμικών. Επιπλέον, μελετώνται τέσσερις περιπτώσεις επιφάνειας φωτοβολταϊκών συστοιχιών, 0 τ.μ., 10 τ.μ., 20 τ.μ. και 30 τ.μ. αντίστοιχα. Τέλος εξετάζονται και τα σενάρια κατά τα οποία ο θερμοστάτης θέρμανσης των εσωτερικών χώρων ρυθμίζεται σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες 20°C, 21°C και 22°C αντίστοιχα. Ο συνολικός αριθμός των σεναρίων που παραμετροποιούνται είναι 2304.

Η μελέτη επικεντρώνεται στην ενεργειακή αξιολόγηση των σεναρίων, το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, την τεχνοοικονομική τους αξιολόγηση και την θερμική άνεση εντός των θερμικών ζωνών. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται επιλέγοντας τέσσερις Κρίσιμους Δείκτες Απόδοσης (KPIs), την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, το Καθαρό Παρόν Κόστος (NPC) της εγκατάστασης και λειτουργίας των συστημάτων και τέλος τις ώρες κατά τις οποίες μη θερμικής άνεσης εντός των θερμικών ζωνών. Θερμική άνεση. Τελικός στόχος της εργασίας είναι η επιλογή του βέλτιστου σεναρίου, αξιολογώντας τα παραπάνω KPIs μέσω της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης PROMETHEE.

## 2 Συμβατικά και Καινοτόμα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας

### 2.1 Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις διακριτούς τρόπους:

- αγωγιμότητα ή αγωγή (conduction)
- συναγωγιμότητα ή συναγωγή (convection) και
- ακτινοβολία (radiation)

#### 2.1.1 Θερμική Αγωγιμότητα

Θερμική Αγωγιμότητα (thermal conduction) ορίζεται ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από μία περιοχή (ή σύστημα) υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη (ή άλλο) χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία), λόγω της φυσικής επαφής. Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται είτε με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερα ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους, με χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, είτε μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, στα καθαρώς μεταλλικά στερεά. Ένα παράδειγμα ροής θερμότητας με αγωγιμότητα είναι οι θερμικές απώλειες από τις αδιαφανείς επιφάνειες των κτιρίων το χειμώνα.

#### 2.1.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι αποτέλεσμα των μεγαλύτερης κλίμακας κινήσεων ενός ρευστού, είτε αυτό είναι υγρό ή αέριο. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα της ροής του ρευστού, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Για παράδειγμα, απώλεια θερμότητας με συναγωγή παρουσιάζεται όταν κρύος άνεμος φυσά πάνω από το δέρμα ενός ανθρώπου και αφαιρεί θερμότητα από αυτό.

#### 2.1.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι η μεταφορά ενέργειας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Για τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτείται κανένα υλικό μέσο. Η μόνη προϋπόθεση είναι η παρουσία δύο επιφανειών σε διαφορετική θερμοκρασία.

### 2.2 Θερμική Μόνωση

Η θερμική προστασία αποτελεί την βασική προϋπόθεση για τη σωστή θερμική συμπεριφορά οποιουδήποτε κτιρίου. Η θερμομόνωση αποτελεί βασική αρχή θερμικής προστασίας, μειώνοντας τις ανταλλαγές θερμότητας μεταξύ του κτιρίου και του περιβάλλοντος. Με τη λήψη μέτρων για θερμομόνωση του κελύφους ενός κτιρίου επιδιώκεται η μείωση του ρυθμού ροής θερμότητας μέσα από τα τοιχώματα που χωρίζουν περιοχές ή χώρους με διαφορετική θερμοκρασία. Η θερμομόνωση συνίσταται από ένα σύνολο στοιχείων (υλικά, διαδικασίες και μέθοδοι κατασκευής) και συνδέεται άμεσα με το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του κτιρίου.

Ένα προσεκτικά μονωμένο κτίριο με την απαιτούμενη από τους ισχύοντες κανονισμούς θερμομόνωση, καλύπτει τις ανάγκες ενός σωστά σχεδιασμένου από ενεργειακή άποψη κτιρίου, αρκεί πραγματοποιείται η μόνωση όλων των δομικών στοιχείων και να αποφεύγονται οι θερμογέφυρες

(αμόνωτα ή περιορισμένης μονωτικής ικανότητας στοιχεία του κελύφους), οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν «ευαίσθητα» σημεία στην οικοδομή, ακόμα και τη συμπύκνωση υδρατμών.

Η θερμομόνωση του κτιρίου συνεισφέρει θετικά στη θερμική προστασία του κτιρίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ιδιαίτερα εφ' όσον συνδυάζεται με τον απαιτούμενο αερισμό. Όταν δεν υπάρχει επαρκής αερισμός του κτιρίου, η αυξημένη μόνωση του κελύφους, πέραν της προβλεπόμενης από τους κανονισμούς, επιβαρύνει τη θερμική λειτουργία του το καλοκαίρι, καθώς εμποδίζει την «αποφόρτιση» του κτιρίου από τη συσσωρευμένη θερμότητα. [5]

## 2.2.1 Βασικές Έννοιες Θερμομόνωσης

Οι βασικές έννοιες που συναντάμε κατά την μελέτη της θερμικής μόνωσης ενός κτιρίου είναι το κέλυφος του κτηρίου, ο θερμαινόμενος χώρος, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η θερμική αντίσταση και ο συντελεστής θερμοπερατότητας. [6]

### Κέλυφος κτηρίου

Το κέλυφος του κτιρίου είναι το σύνολο των επιφανειών των δομικών στοιχείων που διαχωρίζουν τον θερμαινόμενο χώρο από το εξωτερικό περιβάλλον (αέρα, έδαφος ή νερό) ή από εφραπτόμενα κτίρια ή μη θερμαινόμενους χώρους.

### Θερμαινόμενος χώρος

Θερμαινόμενος χώρος είναι η κλειστή περιοχή για την οποία απαιτείται ενέργεια για επίτευξη και διατήρηση συνθηκών θερμικής άνεσης (θέρμανση, ψύξη).

### Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, είναι ένας παράγοντας ο οποίος εκφράζει την ικανότητα των υλικών να διαχέουν θερμότητα διαμέσου αυτών, έχει μονάδες W/mK ή W/m°C και συνήθως συμβολίζεται με k.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται τόσο από το υλικό όσο και από την θερμοκρασία. Για τα περισσότερα υλικά μπορούμε να πάρουμε την παραδοχή ότι είναι ομοιογενή και επομένως να θεωρήσουμε ότι ο συντελεστής k είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας. Σε ακόμα πιο ειδικές περιπτώσεις ισχύει η παραδοχή ότι για μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές υπάρχει ανεξαρτησία και από την θερμοκρασία.

### Θερμική Αντίσταση

Η θερμική αντίσταση και, συνεπώς, η θερμομονωτική ικανότητα του κάθε δομικού στοιχείου εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού και αυξάνεται με το πάχος του. Εν γένει, συνιστάται τα θερμομονωτικά υλικά να τοποθετούνται εξωτερικά ή ενδιάμεσα στις τοιχοποιίες, οροφές και δάπεδα, έτσι ώστε να μην αδρανοποιείται η θερμική μάζα (θερμοχωρητικότητα) του κελύφους.

### Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U (U-factor)

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο για την ποσοτικοποίηση της μονωτικής ικανότητας ενός στοιχείου, αφού υποδεικνύει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος του συγκεκριμένου στοιχείου. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας αποτελεί ουσιαστικά τον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω μιας επιφάνειας, εκφράζεται σε W/ m<sup>2</sup>·K και περιλαμβάνει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία για ένα δεδομένο σύνολο περιβαλλοντικών συνθηκών. Συνεπώς, αντιπροσωπεύει τη ροή θερμότητας ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον εκφρασμένη σε W, μέσω ενός τετραγωνικού μέτρου επιφάνειας για θερμοκρασιακή διαφορά 1°C. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή

θερμοπερατότητας ενός υλικού, τόσο μικρότερη είναι η ροή θερμότητας διαμέσου του. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι ανάλογος της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού και αντιστρόφως ανάλογος του πάχους του υλικού.

$$U = \frac{k}{d} \quad [1]$$

Όπου:

k = ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

d = το πάχος του υλικού

Συμπερασματικά, όσο μεγαλύτερο το πάχος της μόνωσης, τόσο μικρότερη η u-value της επιφάνειας, άρα τόσο μικρότερη η ροή θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος.

### 2.2.2 Θερμομονωτικά Υλικά

Η επιλογή του κατάλληλου θερμομονωτικού υλικού αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους κατά την διαδικασία της ενεργειακής μελέτης ενός κτηρίου. Τα θερμομονωτικά υλικά οφείλουν την μονωτική τους ιδιότητα κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη πόρων (μικρών κυψελίδων εγκλωβισμένου αέρα) στο εσωτερικό τους. Ο εγκλωβισμένος και κατ' επέκταση ακίνητος αέρας παρουσιάζει την μικρότερη γνωστή τιμή θερμικής αγωγιμότητας. Η παρουσία σημαντικού αριθμού κυψελίδων αέρα στο εσωτερικό ενός υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρού φαινομένου βάρους, το οποίο είναι χαρακτηριστικό όλων των θερμομονωτικών υλικών.

Οι θερμομονωτικές ιδιότητες ενός υλικού επηρεάζονται από την θερμοκρασία και την υγρασία. Η υγρασία αποτελεί σημαντικό πρόβλημα αφού εκτοπίζοντας τον αέρα μπορεί να γεμίσει τους πόρους του υλικού προκαλώντας προσωρινά ή μόνιμα την καταστροφή της μονωτικής ικανότητάς του. Η αναζήτηση αδιάβροχων μονωτικών υλικών είναι τεχνολογικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη. Γι' αυτό το λόγο συνήθως αναζητούνται υλικά τα οποία εμφανίζουν μικρή τάση απορρόφησης νερού (υγροσκοπικότητα) ή εφαρμόζονται κατασκευαστικές τεχνικές προστασίας των μονωτικών υλικών από την υγρασία (υγρομόνωση) [6]

Άλλες ιδιότητες των μονωτικών υλικών είναι:

- Η μηχανική τους αντοχή σε θλιπτικά φορτία
- Η σταθερότητα του όγκου τους
- Η ανθεκτικότητά τους στις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές
- Η διάρκεια ζωής τους, η οποία κατά περίπτωση μπορεί να είναι ανάλογη αυτής των δομικών υλικών

Τα μονωτικά υλικά χωρίζονται σε:

- Ανόργανα ή οργανικά, ανάλογα με την προέλευση και την σύστασή τους.
- Φυσικής προέλευση ή τεχνητά, ανάλογα με τον βαθμό επεξεργασίας που υφίστανται πριν διατεθούν στην κατανάλωση
- Ανοιχτών ή κλειστών κυψελών ή πόρων αέρα

- Μεγάλου ή μικρού φαινομένου βάρους , δηλαδή διακρίνονται σε βαριά (πχ ελαφρό σκυρόδεμα) και σε ελαφρά (πχ υαλοβάμβακας)

Σήμερα υπάρχει μεγάλη ποικιλία θερμομονωτικών υλικών όπως: Εξηλασμένη πολυστερίνη, Διογκωμένη πολυστερίνη, Υαλοβάμβακας, Πολυουρεθάνη, Αφρώδες Γυαλί, Περλιτοειδή, Πετροβάμβακας, Φελλός, PVC, Κυψελωτό σκυρόδεμα, Θερμομονωτικά τούβλα, κ.α.

#### 2.2.2.1 Πετροβάμβακας (Mineral Wool)

Πετροβάμβακας ονομάζεται ένα ινώδες μονωτικό υλικό (Εικόνα 2-1) το οποίο χρησιμοποιείται στις κατασκευές αλλά και σε τεχνικές εφαρμογές. Ο πετροβάμβακας αποτελείται από ίνες οξειδίου πυριτίου - αλουμινίου ενώ οι κύριες χημικές ενώσεις που συναντώνται στις διάφορες παραλλαγές του είναι τα οξείδια του πυριτίου, του αλουμινίου, του ασβεστίου, του μαγνησίου και του σιδήρου. Τα προϊόντα πετροβάμβακα έχουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ( $k$ ) μεταξύ 0,03 και 0,04 W/mK σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχει επίσης και ηχομονωτικές ιδιότητες, σε αντίθεση με άλλα οικοδομικά θερμομονωτικά υλικά που δεν παρέχουν τόσο καλή ηχομόνωση όπως η εξηλασμένη και η διογκωμένη πολυστερίνη. Είναι άκαυστος και μπορεί να αντέξει σε θερμοκρασία μέχρι 1000 °C, ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιείται κεραμοβάμβακας. Αν υποβληθεί σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 1000 °C δεν καίγεται, αλλά αρχίζει και λιώνει. [7]

Στα πλεονεκτήματα του πετροβάμβακα περιλαμβάνονται τα εξής:

- Ο πετροβάμβακας είναι ένα υλικό που αντέχει στην υγρασία. Διατηρεί τις μονωτικές του ιδιότητες ακόμα και όταν βραχεί.
- Έχει άριστες θερμομονωτικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται στην θερμομόνωση των κτιρίων αλλά και δικτύων σωληνώσεων υψηλών θερμοκρασιών. Επίσης χρησιμοποιείται και για την θερμομόνωση μηχανολογικού εξοπλισμού όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες όπως λέβητες, δοχεία παραγωγής κ.α.
- Έχει την ιδιότητα να απορροφά τον ήχο και χρησιμοποιείται κατά κόρον στο εσωτερικό των κτιρίων για ηχομόνωση.
- Είναι άκαυστος μέχρι και στους 1000°C. Η μόνωση με πετροβάμβακα πολλές φορές λειτουργεί και σαν πυροφραγή καθυστερώντας την εξάπλωση της φωτιάς.

Τα μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι:

- η επικινδυνότητα του υλικού καθώς κατά την φάση της κατασκευής μικρές ίνες του υλικού αποκολλούνται και μπορεί να προσκολληθούν στο δέρμα και να εισέρθουν στους πνεύμονες ενώ σε περίπτωση εισπνοής των ινών του πετροβάμβακα μπορεί να δημιουργήσουν αναπνευστικά προβλήματα.
- η τιμή του είναι πιο ακριβή από άλλα υλικά θερμομόνωσης.



Εικόνα 2-1 Πετροβάμβακας – Mineral Wool

#### 2.2.2.2 Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)

Η Διογκωμένη πολυστερίνη ή EPS (Expanded Polystyrene) (Εικόνα 2-2) ή αίρπορ ή όπως είναι γνωστή στην Ελλάδα «φελιζόλ», είναι ένα υλικό, από τα πλέον διαδεδομένα διεθνώς, που χρησιμοποιείται στην κατασκευαστική βιομηχανία από τα θεμέλια ως την οροφή. Πρόκειται για ένα ελαφρύ δύσκαμπτο μονωτικό υλικό πλαστικού αφρού, το οποίο παράγεται από συμπαγείς κόκκους πολυστερίνης, οι οποίοι είναι θερμοπλαστικοί. Με τη διόγκωσή τους, οι κόκκοι μεγαλώνουν και γίνονται σφαιρίδια, τα οποία διογκώνονται περισσότερο και κολλούν μεταξύ τους. Η διογκωμένη πολυστερίνη παράγεται σε μεγάλα μπλοκ, τα οποία κόβονται σε πλάκες ή από καλούπια απευθείας στη μορφή του καλουπιού, όπως κιβώτια. [8]

Τα προϊόντα διογκωμένης πολυστερίνης EPS μεταξύ άλλων:

- Προσφέρουν άριστες θερμομονωτικές ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα έχουν πολύ μικρό βάρος καθώς αποτελούνται από 98% εγκλωβισμένο αέρα.
- Έχουν δομική σταθερότητα και δεν αποσυντίθενται. Η σταθερότητα του EPS δεν επηρεάζεται με την πάροδο του χρόνου.
- Παρουσιάζουν μικρές τιμές στον συντελεστή αντίστασης στη διάχυση υδρατμών, και έχουν την ιδιότητα να "αναπνέουν" αποτρέποντας το φαινόμενο σχηματισμού συμπύκνωσης υδρατμών.
- Συνεργάζονται με τα περισσότερα οικοδομικά υλικά (τσιμέντο, γύψος, οργανικά και ανόργανα κονιάματα).
- Μπορούν να συμβάλλουν στην ακουστική μόνωση τόσο των αερόφερτων όσο και των κτυπογενών ήχων.
- Παράγονται για κτηριακές χρήσεις ως αυτοσβεννήμενα (self-extinguishing SE) καθώς περιέχουν στη μάζα τους επιβραδυντή καύσης.
- Προσφέρουν άριστη αναλογία τιμής- απόδοσης και συμφέρουν οικονομικά.
- Είναι πλήρως ανακυκλώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον.



Εικόνα 2-2 Διογκωμένη Πολυστερίνη - EPS

## 2.3 Υαλοπίνακες

### 2.3.1 Θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων

#### 2.3.1.1 Συντελεστής θερμοπερατότητας παραθύρου

Σε ένα γυάλινο παράθυρο, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών που απαρτίζουν το παράθυρο, καθώς και από τις καιρικές συνθήκες όπως η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος και η ταχύτητα του ανέμου. Το NFRC (Εθνικό Συμβούλιο Αξιολόγησης Υαλοπινάκων) έχει καθορίσει τις πρότυπες συνθήκες περιβάλλοντος για τις οποίες υπολογίζεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας, προκειμένου να αξιολογηθούν οι διαθέσιμοι εμπορικοί υαλοπίνακες. Οι προκαθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος είναι οι εξής:

- Ταχύτητα ανέμου 5,5 m/s
- Εσωτερική θερμοκρασία του αέρα 21 °C
- Εξωτερική θερμοκρασία του αέρα -18 °C

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας για το σύνολο του παραθύρου προκύπτει από τη συνδυασμένη ικανότητα μόνωσης των γυάλινων πάνελ, τα φαινόμενα που εμφανίζονται στην περιφέρεια του παραθύρου (φαινόμενα στοιχείων περιμέτρου) και τη μονωτική ικανότητα του πλαισίου και των κρυστάλλων του παραθύρου. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας που αφορά αποκλειστικά τα γυάλινα πάνελ επηρεάζεται κυρίως από τον συνολικό αριθμό των γυάλινων πάνελ στο παράθυρο, τις αποστάσεις μεταξύ τους, τον τύπο του αερίου που βρίσκεται στα διαστήματα μεταξύ τους και τα χαρακτηριστικά των επιστρώσεων που μπορεί να υπάρχουν στις διάφορες επιφάνειες. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των υαλοπινάκων συχνά αναφέρεται και ως "center-of-glass U-factor"

#### 2.3.1.2 Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους

Ο συντελεστής ηλιακής θερμικής εισροής (Solar Heat Gain Coefficient - SHGC) αναπαριστά το ηλιακό θερμικό φορτίο του συστήματος σε σύγκριση με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Αν και μπορεί να υπολογιστεί για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης, συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή που αντιστοιχεί σε κάθετη πρόσπτωση. Ο συντελεστής ηλιακής θερμικής εισροής αναφέρεται στην ενεργειακή απόδοση του συνόλου του υαλοπίνακα και αποτελεί ακριβή ένδειξη του ηλιακού θερμικού φορτίου υπό μια ευρεία ποικιλία συνθηκών. Εκφράζεται ως ένας αδιάστατος αριθμός από το 0 έως το 1, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο μεγαλύτερη αναμένεται η θερμική εισροή από την ηλιακή ακτινοβολία. [9]

### 2.3.1.3 Συντελεστής σκίασης

Ο συντελεστής σκίασης (Shading Coefficient-SC) αντιπροσωπεύει τον ρυθμό ηλιακού θερμικού κέρδους που εισέρχεται στο σύστημα σε σύγκριση με την περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης σε διαφανές γυαλί πάχους 3 mm.

### 2.3.2 Μεταφορά θερμότητας σε υαλοπίνακες

Η συνολική ενεργειακή ροή μέσω ενός υαλοπίνακα αποτελεί μια συνάρτηση τριών βασικών παραγόντων:

1. Μεταφορά θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς (Temperature-driven heat transfer):

Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος προκαλεί τη μεταφορά θερμότητας μέσω του υαλοπίνακα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της συνδυασμένης επίδρασης των φαινομένων αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Το αντίστοιχο μέγεθος εκφράζεται μέσω του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-factor) του γυάλινου πάνελ.

2. Ηλιακή εισροή (solar gain):

Ανεξάρτητα από την εξωτερική θερμοκρασία, μπορούν να προκύψουν ενεργειακά κέρδη μέσω των υαλοπινάκων από την άμεση ή διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Το μέγεθος της ηλιακής εισροής αναφέρεται ως συντελεστής ηλιακής θερμικής εισροής (Solar Heat Gain Coefficient - SHGC) του υαλοπίνακα.

3. Διείσδυση αέρα (Infiltration):

Θερμικές απώλειες ή κέρδη μπορούν να παρουσιαστούν λόγω της ενδεχόμενης διείσδυσης αέρα μέσα από τις ρωγμές του παραθύρου. Αυτό το φαινόμενο μετριέται ανάλογα με τη ροή αέρα που εισχωρεί μέσω μιας συγκεκριμένης επιφάνειας του παραθύρου σε συγκεκριμένες πίεσης συνθήκες. Η διείσδυση του αέρα συνεισφέρει επίσης στο ψυκτικό φορτίο του καλοκαιριού σε ορισμένα κλίματα, καθώς αυξάνει την εσωτερική υγρασία.

Αν δεν ληφθούν υπόψη οι μεταβολές στην υγρασία και η διείσδυση του αέρα, σύμφωνα με τον οδηγό της ASHRAE, η ενεργειακή ροή μέσω ενός υαλοπίνακα υπολογίζεται με την Εξίσωση 2.

$$q = U * A_{pf} * (T_{out} - T_{in}) + (SGHC * A_{pf} * E_t) \quad [2]$$

Όπου:

$q$  = η στιγμιαία θερμοροή σε W

$U$  = ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (U-factor) σε W/ m<sup>2</sup>·K

$T_{in}$  = η εσωτερική θερμοκρασία αέρα σε °C

$T_{out}$  = η εξωτερική θερμοκρασία αέρα σε °C

$A_{pf}$  = η συνολική προβαλλόμενη επιφάνεια υαλοπίνακα σε m<sup>2</sup>

SHGC = ο συνολικός συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους, ο οποίος είναι αδιάστατος

$E_t$  = η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε W /m<sup>2</sup>



Η παραπάνω εξίσωση αποδεικνύει ότι οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας U και της ηλιακής θερμικής εισροής SHGC αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή ροή μέσω ενός παραθύρου.

### 2.3.3 Οπτικές ιδιότητες

Οι βασικές ιδιότητες ενός υαλοπίνακα που επηρεάζουν τη μεταφορά της ηλιακής ενέργειας είναι η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (Visible Transmittance-VT), η ανακλαστικότητα (reflectance) και η απορροφητικότητα (absorptance).

#### 2.3.3.1 Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (Visible Transmittance-VT)

Η ιδιότητα της διαπερατότητας στην ορατή ακτινοβολία αναφέρεται στο ποσοστό της ορατής ακτινοβολίας που διέρχεται μέσα από έναν υαλοπίνακα και εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου. Αν και δεν επηρεάζει απευθείας τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των γυάλινων επιφανειών. Η διαπερατότητα μπορεί να υπολογιστεί για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή που αντιστοιχεί σε κάθετη πρόσπτωση. Αυτή η ιδιότητα εξαρτάται από τον τύπο του γυαλιού, τον αριθμό των γυάλινων στρωμάτων και τυχόν επιστρώσεις που μπορεί να έχουν προστεθεί. Η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία μπορεί να κυμαίνεται από ποσοστά μεγαλύτερα του 90% για διαφανές γυαλί έως και ποσοστά μικρότερα του 10% για γυαλί με έντονες ανακλαστικές επιστρώσεις ή χρωματισμένα γυαλιά.

Αυτή η ιδιότητα επηρεάζει σημαντικά τη διαθέσιμη ποσότητα φυσικού φωτισμού, την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, την ιδιωτικότητα και τον έλεγχο της θάμβωσης. Αυτές οι επιδράσεις μπορεί να είναι αντιφατικές. Για παράδειγμα, μια υψηλή διαπερατότητα είναι επιθυμητή για τον επαρκή φυσικό φωτισμό, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει θάμβωση. Συνήθως πρακτική είναι η χρήση υαλοπινάκων με υψηλή διαπερατότητα σε συνδυασμό με κατάλληλες σκίαστρα ή περσίδες, προκειμένου να ρυθμιστεί η διαπερατότητα ανάλογα με τις ανάγκες και τις συνθήκες.

#### 2.3.3.2 Ανακλαστικότητα (Reflectance)

Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός γυάλινου παραθύρου, ένα ποσοστό της ακτινοβολίας αυτής ανακλάται πίσω στο εξωτερικό περιβάλλον. Η ανακλαστικότητα του γυαλιού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποιότητα της επιφάνειάς του, η παρουσία επιστρώσεων και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Σήμερα, τα περισσότερα είδη γυαλιού που κατασκευάζονται είναι από τύπο επίπλευσης (float glass) και έχουν παρόμοια ανακλαστικότητα.

Η ανακλαστικότητα του γυαλιού μπορεί να τροποποιηθεί εφαρμόζοντας διάφορες μεταλλικές επιστρώσεις στην επιφάνειά του. Οι συνηθέστερες επιστρώσεις ανακλούν όλο το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν καταφέρει να αναπτύξουν επιστρώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε γυαλί ή πλαστικό και ανακλούν μόνο σε συγκεκριμένα εύρη μήκους κύματος. Η ικανότητα να ανακλάται επιλεκτικά η ακτινοβολία σε διάφορα εύρη μήκους κύματος ήταν η βάση για τη δημιουργία επιστρωμάτων χαμηλής εκπομπής (low-e), που είναι κατάλληλα για κρύα κλίματα, καθώς και για την κατασκευή επιστρωμάτων χαμηλής εκπομπής με επιλεκτική ανακλαστική συμπεριφορά, ιδίως για θερμότερα κλίματα.

### 2.3.3.3 Απορροφητικότητα (Absorptance)

Η ηλιακή ακτινοβολία που δεν περνά μέσα από το γυαλί και δεν ανακλάται από την επιφάνειά του απορροφάται από το υλικό. Αυτή η απορρόφηση της ακτινοβολίας μετατρέπει την ενέργεια της σε θερμότητα, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού.

Συγκεκριμένα, το συνηθισμένο διαφανές γυαλί με πάχος 3 mm απορροφά μόλις το 4% της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω του. Η απορροφητικότητα του γυαλιού μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας χημικά που απορροφούν την ηλιακή ενέργεια. Εάν τα υλικά αυτά απορροφούν ορατή ακτινοβολία, το γυαλί εμφανίζεται σκούρο, ενώ αν απορροφούν υπεριώδη ή κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία, η εμφάνισή του δεν αλλάζει σημαντικά.

### 2.3.4 Τεχνολογίες παραθύρων

Τα υαλοστάσια μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες βάσει της ικανότητάς τους να προσαρμόζουν τις οπτικές τους ιδιότητες: σε υαλοστάσια σταθερών ή μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων.

**Υαλοστάσια Σταθερών Οπτικών Ιδιοτήτων:** Τα υαλοστάσια αυτά έχουν σταθερές οπτικές ιδιότητες που δεν αλλάζουν ανάλογα με εξωτερικούς παράγοντες όπως η εποχή ή η θερμοκρασία. Οι συντελεστές ανάκλασης, απορρόφησης και διαπερατότητας έχουν σταθερές τιμές, και δεν μπορούν να ρυθμιστούν δυναμικά για να ανταποκριθούν στις ανάγκες των χρηστών.

**Έξυπνα Παράθυρα:** Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υαλοστάσια που μπορούν να προσαρμόζουν τις οπτικές τους ιδιότητες με ακρίβεια ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες. Αυτό μπορεί να συμπεριλαμβάνει την αλλαγή της θερμικής διαπερατότητας ή της διαπερατότητας στην ορατή ακτινοβολία, προκειμένου να ελέγξουν τον φυσικό φωτισμό ή την ηλιακή θερμική ενέργεια.

Οι επιλογές για παράθυρα εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος του κτιρίου, οι κλιματικές συνθήκες και οι προτιμήσεις των χρηστών. Σήμερα, υπάρχουν διάφορα είδη υαλοστασίων διαθέσιμα, όπως μονής επίπεδης επιφάνειας χαμηλού κόστους, διπλά ή τριπλά υαλοστάσια με υψηλή μόνωση, υαλοστάσια με επιστρώσεις ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας όπως τα υαλοστάσια low-e, καθώς και τα καινοτόμα "έξυπνα παράθυρα" που μπορούν να ρυθμίσουν δυναμικά τις οπτικές τους ιδιότητες. Σε αυτή την τελευταία κατηγορία ανήκουν επίσης τα υαλοστάσια με χρωμογενετικά υλικά, τα οποία μπορούν να αλλάξουν τις οπτικές τους ιδιότητες με βάση τις συνθήκες. Τα χρωμογενετικά υλικά μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: τα ηλεκτροχρωμικά, τα θερμοχρωμικά, τα φωτοχρωμικά και τα αεριοχρωμικά υλικά.

#### 2.3.4.1 Διπλοί υαλοπίνακες

Οι διπλοί υαλοπίνακες παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά τη θερμομόνωση, την ενεργειακή απόδοση και την άνεση των κτιρίων. Η δομή τους, που αποτελείται από δύο φύλλα γυαλιού με ένα διάκενο αέρα ή ευγενές αέριο μεταξύ τους, είναι αποτελεσματική στη μείωση των θερμικών απωλειών και της αντανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το γεγονός ότι το εσωτερικό φύλλο γυαλιού απορροφά και ανακλά μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας βοηθά στον έλεγχο της θερμικής εισόδου και οδηγεί σε βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση. Η χρήση ευγενών αερίων (όπως το αργό) ανάμεσα στα φύλλα γυαλιού μπορεί να βελτιώσει ακόμη περισσότερο τις θερμομονωτικές ιδιότητες. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι, ενώ οι διπλοί υαλοπίνακες παρέχουν καλή θερμομόνωση, η κατάλληλη επιλογή του πάχους του διακένου είναι σημαντική. Όπως έχει αναφερθεί, ο συντελεστής θερμοπερατότητας U μειώνεται με την αύξηση του πάχους του διακένου για πάχη μέχρι 16 mm. Αυτό συμβαίνει επειδή το πάχος του διακένου επηρεάζει την θερμική αντίσταση του υαλοπίνακα, προσφέροντας καλύτερη μόνωση.

Στην Ελλάδα, με βάση τον Κανονισμό Θερμομόνωσης του 1979, είναι υποχρεωτική η χρήση διπλών υαλοπινάκων σε νέα κτίρια. Για τα παλαιά κτίρια, τα οποία κτίστηκαν πριν το 1979, η αντικατάσταση των μονών υαλοπινάκων με διπλούς και η αντικατάσταση των κουφωμάτων αποτελούν μία σημαντική τεχνική εξοικονόμηση ενέργειας. Η αντικατάσταση των παλιών παραθύρων με νέα, αν και παρουσιάζει κάποιο κόστος, μπορεί να αλλάξει κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό την κακή ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, με πολλαπλά ενεργειακά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας οι διπλοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, όπως:

- Μείωση της ακτινοβολίας από ή προς τον εσωτερικό χώρο του κτιρίου, καθώς παρουσιάζουν επιφανειακή θερμοκρασία πλησιέστερη με αυτή των άλλων επιφανειών του χώρου
- Περιορισμό των ρευμάτων αέρα κοντά στο παράθυρο, με αποτέλεσμα την εξασφάλιση βελτιωμένων συνθηκών θερμικής άνεσης
- Αποτροπή της συμπύκνωσης υδρατμών στην επιφάνειά τους κατά τη χειμερινή περίοδο
- Μείωση του θορύβου [11]

#### 2.3.4.2 Τριπλοί υαλοπίνακες

Οι τριπλοί υαλοπίνακες, που αποτελούνται από ένα σύστημα τριών φύλλων γυαλιού, προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη θερμομονωτική απόδοση σε σύγκριση με τους διπλούς υαλοπίνακες. Η παρουσία ενός επιπλέον φύλλου γυαλιού μεταξύ των διακενων συμβάλλει στην αύξηση της αντίστασης στη θερμική αγωγιμότητα, μειώνοντας έτσι τις θερμικές απώλειες.

Ένας τριπλός υαλοπίνακας παρουσιάζει στη γενική περίπτωση μεγαλύτερη θερμομόνωση από έναν διπλό. Ωστόσο, ένας τριπλός υαλοπίνακας με το ίδιο πάχος στρωμάτων γυαλιού και το ίδιο συνολικό πάχος με έναν διπλό θα παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή θερμοπερατότητας και συνεπώς μεγαλύτερες θερμικές απώλειες συγκριτικά με τον διπλό. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αέρας, ο οποίος θα καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο στην περίπτωση του διπλού υαλοπίνακα παρουσιάζει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με το γυαλί. Συνεπώς, η επιλογή του πάχους των φύλλων γυαλιού και του αέρα ανάμεσά τους σε έναν τριπλό υαλοπίνακα πρέπει να γίνεται με προσοχή προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη θερμομονωτική απόδοση.

Ωστόσο, ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν είναι το αυξημένο βάρος λόγω του επιπλέον φύλλου γυαλιού. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τη γενική αντοχή των κουφωμάτων στα οποία εφαρμόζονται.

#### 2.3.4.3 Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (Low-emittance glazing)

Οι επιστρώσεις υαλοπινάκων σχεδιάζονται με σκοπό την παρεμπόδιση της εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μείωση των ψυκτικών φορτίων, με αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των κτιρίων.

Οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής (low-e) αναπτύχθηκαν με σκοπό την ελαχιστοποίηση της υπέρυθρης και υπεριώδους ακτινοβολίας που διαπερνούν τους υαλοπίνακες, χωρίς ταυτόχρονα να μειώνεται η διερχόμενη ορατή ακτινοβολία. Όταν η θερμική ή φωτεινή ενέργεια προσπίπτει σε έναν υαλοπίνακα μπορεί να ανακλαστεί προς το εξωτερικό περιβάλλον, να διέλθει μέσα από τη μάζα του υαλοπίνακα ή να απορροφηθεί από αυτήν. Η απορροφούμενη ακτινοβολία στη συνέχεια μπορεί να διεισδύσει στο παράθυρο μέσω της αγωγής στο γυαλί και το πλαίσιο, μέσω συναγωγής στο κενό αέρα μεταξύ των γυάλινων επιφανειών ή μέσω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας από την επιφάνεια του γυαλιού. Καθώς η ακτινοβολία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τρόπους μεταφοράς θερμότητας στα παράθυρα, η μείωση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία ή περισσότερες από τις επιφάνειες των υαλοπινάκων βελτιώνει σημαντικά τις μονωτικές ικανότητες του παραθύρου και

μειώνει τον συντελεστή θερμοπερατότητας του. Από άποψη μόνωσης εκτιμάται ότι η προσθήκη μίας επίστρωσης low-e είναι περίπου ισοδύναμη με την προσθήκη ενός επιπλέον υαλοπίνακα. [12]

Το γυαλί low-e περιλαμβάνει μία λεπτή, διαφανή επίστρωση μετάλλου ή οξειδίου μετάλλου που ανακλά την υπεριώδη ακτινοβολία με μεγάλο μήκος κύματος. Συχνά ενσωματώνεται σε άλλα συστήματα, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσής τους. Ορισμένα γυαλιά low-e ανακλούν σημαντικά ποσοστά υπέρυθρης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη διέλευση της ορατής ακτινοβολίας. [13]

Εκτός από τη μείωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, οι επιστρώσεις low-e που σχεδιάζονται για θερμά κλίματα μειώνουν σημαντικά και τη διάβαση της υπέρυθρης ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου του παραθύρου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς οι επιστρώσεις low-e ανακλούν την ακτινοβολία στο εσωτερικό του κτιρίου και εκπέμπουν μικρό ποσοστό ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται τους θερινούς μήνες, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου που μπορεί να προκαλέσει δυσφορία. [14]

#### 2.3.4.4 Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες με πλήρωση αερίων (Gas filled glazing)

Η χρήση ευγενών αερίων και επιστρώσεων low-e αποτελεί σημαντικό τρόπο για τη βελτίωση της θερμομονωτικής απόδοσης των υαλοπινάκων, επιτρέποντας την μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value) και βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Τα ευγενή αέρια, όπως το αργό, με τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν τον αέρα μεταξύ των υαλοπινάκων, με στόχο τη μείωση των θερμικών απωλειών μέσω συναγωγής. Το πιο διαδεδομένο αέριο που χρησιμοποιείται γι' αυτόν τον σκοπό είναι το αργό, με θερμική αγωγιμότητα 0,018 W/m K, το οποίο θα πρέπει να καταλαμβάνει τουλάχιστον το 90 % του όγκου του διακένου. Η πλήρωση με αργό πρέπει να παραμένει για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του υαλοπίνακα και να μη χάνεται περισσότερο από 5 % αυτής σε μία χρονική περίοδο 25 ετών. [15]

Τα αέρια αυτά παρουσιάζουν μικρότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τον αέρα και μεγαλύτερη πυκνότητα, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, αφού η κίνηση του αερίου είναι δυσκολότερη. Η χρήση κάποιου τέτοιου αερίου επηρεάζει ελάχιστα τον SHGC και οριακά καθόλου τον συντελεστή VT .

Συνολικά, συνηθισμένη περίπτωση αποτελεί ο συνδυασμός υαλοστασίου που περιέχει ευγενές αέριο και μεμβράνη low-e. Τα παράθυρα αυτά παρουσιάζουν εκτός από θερμική μόνωση και ηχομόνωση, και ασφάλεια σε περίπτωση θραύσης.

#### 2.3.4.5 Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες (Electrochromic glazing)

Το ηλεκτροχρωμικό φαινόμενο αναφέρεται σε υλικά που μπορούν να αλλάξουν το χρώμα τους με βάση την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διεργασιών οξειδωσης και αναγωγής, που προκαλούν απώλεια ή απόκτηση ηλεκτρονίων και αλλαγή της ηλεκτρικής κατάστασης των υλικών. Αυτό το φαινόμενο επιτρέπει την αλλαγή της διαπερατότητας του υλικού στο φως, προκαλώντας αλλαγές στο χρώμα και την αντίθεση του υλικού. Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία για να επιτρέπουν τον έλεγχο της διαπερατότητας του φωτός μέσα από το παράθυρο. Σε διαφανή κατάσταση, επιτρέπουν τη διέλευση του ηλιακού φωτός, ενώ σε αποχρωματισμένη κατάσταση περιορίζουν τη διαπερατότητα του φωτός. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ρυθμίζει την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός κτιρίου. Ανεξάρτητα με την ένταση του χρωματισμού των παραθύρων υπάρχει πάντα οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον.

Όταν ένα ηλεκτροχρωμικό παράθυρο βρίσκεται σε διαφανή-αποχρωματισμένη κατάσταση ένα ποσοστό της ορατής ακτινοβολίας το διαπερνά. Η αρχική αυτή τιμή της διαπερατότητας εξαρτάται από το είδος και το πάχος των διάφορων στρωμάτων υλικών, το είδος του ηλεκτρολύτη και το είδος των κρυστάλλων. Κατά την αλλαγή φάσης παρατηρείται μείωση της διαπερατότητας, η οποία μπορεί να φθάσει το 90 %, ανάλογα με τα επιμέρους χαρακτηριστικά της διάταξης. Επιπλέον, ένα ποσοστό της προσπίπτουσας θερμικής ακτινοβολίας ανακλάται από τα υμένα και τα κρύσταλλα του συστήματος προς το εξωτερικό περιβάλλον. Στην αδιαφανή-χρωματισμένη του κατάσταση το ηλεκτροχρωμικό υμένιο απορροφά σημαντικό ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του. Αυτό συντελεί στην αύξηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του παραθύρου, ενώ τις θερμές καλοκαιρινές ημέρες υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του λόγω υπερθέρμανσης. Συνεπώς, για την εξασφάλιση μεγάλης διάρκειας ζωής του ηλεκτροχρωμικού υαλοπίνακα, αλλά και για τον περιορισμό των θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο, απαιτείται η χρήση επιστρώσεων με χαμηλό συντελεστή εκπομπής (low-e coatings). [16]

Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα παρουσιάζουν μία πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν:

- Ενεργό έλεγχο της εισερχόμενης στο κτίριο ηλιακής ακτινοβολίας με αυτόματο τρόπο, μέσω του κεντρικού συστήματος ελέγχου του κτιρίου, με μικρή ενεργειακή κατανάλωση
- Συμβολή στην εξασφάλιση κατάλληλου μικροκλίματος στο εσωτερικό των κτιρίων
- Παρεμπόδιση της εισόδου τόσο της άμεσης, όσο και της διάχυτης ακτινοβολίας, σε αντίθεση με τα παθητικά συστήματα σκίασης
- Εξοικονόμηση ενέργειας σε θερμά κλίματα μέσω της μείωσης των αναγκών ψύξης και αποφυγή του κινδύνου της υπερθέρμανσης είτε απευθείας, είτε μέσω του συνδυασμού με διαφανή μονωτικά υλικά
- Αποτελεσματικό έλεγχο της εισερχόμενης φωτεινής ακτινοβολίας και περιορισμός της θάμβωσης, χωρίς ταυτόχρονα να παρεμποδίζεται η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον
- Μηδαμινό κόστος συντήρησης λόγω της έλλειψης κινητών μερών
- Δυνατότητα επίτευξης όλων των ενδιάμεσων καταστάσεων ανάμεσα στην πλήρως διαφανή και την πλήρως χρωματισμένη κατάσταση
- Αισθητικά οφέλη λόγω της δυναμικής αλλαγής της όψης του κτιρίου
- Ενίσχυση της ιδιωτικότητας
- Προώθηση καινοτόμων ιδεών στον κτηριακό τομέα και συμβολή στην προσπάθεια δημιουργίας κτιρίων μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης

## 2.4 Ενεργειακά συστήματα

Η χρήση αποδοτικών ενεργειακών συστημάτων, έχει ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, την εξασφάλιση συνθηκών άνεσης αλλά και την πλήρη αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού για κάθε κτήριο σε κάθε τόπο. Η μέγιστη αξιοποίηση του δυναμικού μέσω ενός βέλτιστου συνδυασμού τεχνολογιών και συστημάτων, επιφέρει ιδιαίτερη μείωση στις ενεργειακές ανάγκες ενός κτηριακού συνόλου. Παράλληλα, μειώνεται η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων για θέρμανση, ψύξη, αερισμό και φωτισμό, με αποτέλεσμα την μικρότερη διαστασιολόγηση τους, μείωση στο κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, μειωμένο ηλεκτρικό φορτίο αιχμής κατά τη διάρκεια περιόδων με ιδιαίτερα δύσκολα καιρικά φαινόμενα, και

ταυτόχρονη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από ρύπους σε επίπεδο κτηρίου και σε επίπεδο δικτύου.

Τα ενεργειακά αυτά συστήματα, επίσης μπορούν να αξιοποιήσουν τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) με αποτέλεσμα την βελτίωση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών συνθηκών ενός τόπου. Η συνθήκη αυτή, αποτελεί σημαντική συμβολή στην αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος χωρίς να επιβαρύνεται το περιβάλλον, συμβάλλοντας και με τεχνοοικονομικά οφέλη σε μια αιεφόρο ανάπτυξη τόσο σε τοπικό όσο σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.

Με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός κτηρίου, ο ενεργειακός του σχεδιασμός βασίζεται στην εξής μεθοδολογία

- Ελαχιστοποίηση των ενεργειακών αναγκών ενός κτηρίου με κατάλληλο σχεδιασμό συστημάτων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.
- Βελτιστοποίηση σε επίπεδο σχηματισμού, λειτουργίας και εγκατάστασης των ενεργειακών συστημάτων με ταυτόχρονη μέγιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων ΑΠΕ.
- Ενεργειακή διαχείριση σε επίπεδο παραγωγής ενέργειας και τελικής χρήσης (demand and supply sides).

Ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτηρίου, επιτυγχάνεται και με τον κατάλληλο βιοκλιματικό σχεδιασμό του, ενσωματώνοντας τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, κατάλληλα παθητικά ηλιακά συστήματα, συστήματα φυσικού φωτισμού και ηλιοπροστασίας, φυσικού αερισμού και τεχνικές παθητικού δροσισμού. Συγχρόνως η εγκατάσταση και ορθολογική χρήση ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης αλλά και συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης, συμβάλουν σημαντικά στη μείωση των ενεργειακών αναγκών, για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό, ενός κτηρίου.

Τέλος, η χρήση συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης κτηρίων (ΣΔΚ), εξασφαλίζει τη μέγιστη απόδοση των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων ενός κτηρίου και τη βέλτιστη αποδοτική λειτουργία όλων των ενεργειακών του συστημάτων. [17]

#### 2.4.1 Επίδραση συστημάτων αυτοματισμού και ελέγχου στην ενεργειακή απόδοση κτηρίων

Η εγκατάσταση συστημάτων αυτοματισμού και ελέγχου των ενεργειακών συστημάτων ενός κτηρίου, για θέρμανση, ψύξη, αερισμό, ζεστό νερό χρήσης και φωτισμό, ευνοεί κατά πολύ την εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτά. Ταυτοχρόνως, τα Συστήματα Διαχείρισης Κτηρίων (ΣΔΚ), παρακολουθούν και ελέγχουν την λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων, λαμβάνοντας και αναλύοντας συνεχώς δεδομένα, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης τους με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από αυτά.

Η εγκατάσταση ενός συστήματος ενεργειακής διαχείρισης (Building Energy Management System – BEMS) έχει σκοπό την επιτήρηση ή και τον αυτόματο έλεγχο των ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών εγκαταστάσεων ενός κτιρίου, ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση παραμέτρων και η ανάλυση δεδομένων όλων των εγκαταστάσεων από ένα σταθμό ελέγχου. Παράλληλα, είναι δυνατή η παρακολούθηση και καταγραφή της ενεργειακής συμπεριφοράς των συστημάτων που είναι εγκατεστημένα στο κτίριο, καθώς και η δημιουργία αρχείου με στατιστικά στοιχεία.

Τα σημαντικότερα συστήματα που μπορεί να παρακολουθεί και να ελέγχει ένα σύστημα ενεργειακής διαχείρισης σε ένα κτίριο είναι τα εξής:

- Συστήματα Κλιματισμού – θέρμανσης
- Παθητικά συστήματα (αίθρια, αερισμός κλπ.)
- Εγκατάσταση φωτισμού
- Συστήματα δροσισμού
- Ηλεκτρικές καταναλώσεις
- Ποιότητα αέρα
- Εγκαταστάσεις ασφαλείας

Το σύστημα αποτελείται από ένα Κεντρικό Σταθμό Παρακολούθησης και Ελέγχου, τα αισθητήρια όργανα, τις συσκευές εκτέλεσης εντολών, καθώς και τις συνδετήριες καλωδιώσεις. Ο προγραμματισμός και ο χειρισμός του συστήματος γίνεται μέσω του κεντρικού σταθμού ελέγχου [18].

## 2.4.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά (Photovoltaic - PV) συστήματα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων που μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα κτήριο, ανάλογα τη χρήση και τη διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης. Για τον υπολογισμό της συνεισφοράς ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, καταγράφονται τα απαραίτητα δεδομένα από τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή, καθώς και από την επιθεώρηση της εγκατάστασης. Τα απαιτούμενα δεδομένα είναι: [19]

- Η απόδοση του PV συστήματος ή συντελεστής ηλιακής αξιοποίησης, ανάλογα τον τύπο του συστήματος: μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό κ.ά.
- Η εγκατεστημένη επιφάνεια των PV πλαισίων ( $m^2$ ),
- Οι παράμετροι θέσης εγκατάστασης, ο προσανατολισμός και η κλίση των PV. Οι πιο πάνω παράμετροι λαμβάνονται από την μελέτη διαστασιολόγησης και σχεδιασμού ενός PV συστήματος στο κτήριο, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή και την επιθεώρηση των συστημάτων.

### 2.4.2.1 Συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας από PV

Ο μέσος ετήσιος συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας δείχνει τη μέση ετήσια απόδοση, με την οποία το PV μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μέση ετήσια απόδοση μιας PV εγκατάστασης συνεκτιμάται από:

- Την ονομαστική απόδοση των PV στοιχείων που δίνει ο κατασκευαστής και αναφέρεται σε συνθήκες εργαστηρίου, δηλαδή σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $1000 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία PV στοιχείου συνήθως  $25^\circ\text{C}$ . Η ονομαστική απόδοση είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κάθετης πρόσπτωσης στο PV πλαίσιο. Η ηλεκτρική απόδοση εξαρτάται από τον τύπο των PV στοιχείων: μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό κ.ά.
- Τις πιθανές απώλειες εγκατάστασης λόγω παλαιότητας των PV στοιχείων.
- Τη συνολική ονομαστική απόδοση της PV εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένων και των βοηθητικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται όπως διανομείς, μετατροπείς, μπαταρίες κ.ά.
- Τις πιθανές απώλειες εγκατάστασης λόγω κακής συντήρησης, υψηλών θερμοκρασιών περιοχής, κακού αερισμού των PV στοιχείων κ.ά. Η μέση πραγματική απόδοση των PV στοιχείων σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος για τα κλιματικά δεδομένα της Ελλάδας, όπως έχει καταγραφεί σε

διάφορες εγκαταστάσεις, κυμαίνεται περίπου 15% χαμηλότερα από την ονομαστική απόδοση του κατασκευαστή. Το συνολικό ποσοστό απωλειών ορίζεται ως το άθροισμα των επί μέρους συντελεστών μείωσης, λόγω παλαιότητας, τρόπου σύνδεσης και συνθηκών λειτουργίας του PV. Για τους υπολογισμούς της ενεργειακής απόδοσης του κτηρίου, ο μέσος ετήσιος συντελεστής αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας (μέση ετήσια απόδοση) του PV λαμβάνεται ίσος με τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης μειωμένο κατά το συνολικό ποσοστό απωλειών.

#### 2.4.2.2 Παράμετροι θέσης εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Οι βασικές παράμετροι θέσης εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ο προσανατολισμός τους ως προς τον νότο, η κλίση της επιφάνειάς τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο και ο συντελεστής σκίασης.

Ο προσανατολισμός (αζιμούθιο  $\gamma$ ) τοποθέτησης του PV στοιχείου είναι η απόκλιση του από τον νότο της περιοχής εγκατάστασης. Ο βέλτιστος προσανατολισμός για τα PV είναι ο νότιος με μικρή απόκλιση  $\pm 5^\circ$ . Σύμφωνα με την μεθοδολογία ορίζεται:

- για νότιο προσανατολισμό των PV  $\gamma=180^\circ$ ,
- για ανατολικό προσανατολισμό  $\gamma= 90^\circ$  και
- για δυτικό προσανατολισμό  $\gamma=270^\circ$ .

Η κλίση του PV στοιχείου ορίζεται ως προς το οριζόντιο επίπεδο εγκατάστασης και απαιτείται για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει επάνω στο PV. Για κάθετη τοποθέτηση επιφάνειας PV η κλίση είναι  $90^\circ$ , ενώ για οριζόντια τοποθέτηση η κλίση είναι  $0^\circ$ .

### 2.4.3 Σύστημα Θέρμανσης

#### 2.4.3.1 Λέβητες (boiler)

Ένας συνήθης λέβητας και ένας λέβητας συμπύκνωσης είναι δύο διαφορετικοί τύποι θερμαντικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμότητας σε κτίρια και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Και οι δύο λέβητες λειτουργούν με τη χρήση καυσίμων, όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ή άλλα καύσιμα, για να παράγουν θερμότητα, αλλά η διαδικασία και ο τρόπος λειτουργίας τους διαφέρουν.

- **Συνήθης Λέβητας**

Ο συνήθης λέβητας λειτουργεί με τον τρόπο της καύσης του καυσίμου σε έναν χώρο καύσης. Η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της καύσης μεταφέρεται στο νερό ή το άλλο θερμαινόμενο υγρό που βρίσκεται στο εσωτερικό του λέβητα. Η θερμότητα μεταφέρεται από τον χώρο καύσης στο νερό μέσω των τοιχωμάτων του λέβητα και στη συνέχεια διανέμεται μέσω ενός αγωγού θερμότητας στους θερμαινόμενους χώρους.

- **Λέβητας Συμπύκνωσης**

Ο λέβητας συμπύκνωσης είναι πιο αποδοτικός από ενεργειακή άποψη σε σχέση με τον συνήθη λέβητα. Λειτουργεί με τον ίδιο βασικό τρόπο, δηλαδή καίγοντας καύσιμο για τη δημιουργία θερμότητας. Ωστόσο, η βασική διαφορά είναι ότι ο λέβητας συμπύκνωσης αξιοποιεί και τη θερμότητα των καυσαερίων που παράγονται κατά τη διάρκεια της καύσης, πράγμα που δεν γίνεται πλήρως στον συνήθη λέβητα.

Στον λέβητα συμπύκνωσης, τα καυσαέρια κρυώνουν περισσότερο από ό,τι σε έναν συνήθη λέβητα, και αυτό επιτρέπει την συλλογή της επιπλέον θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία



της συμπύκνωσης των καυσαερίων. Αυτό σημαίνει ότι ο λέβητας συμπύκνωσης μπορεί να εκμεταλλευτεί την ενέργεια περισσότερο αποτελεσματικά και να παράγει περισσότερη θερμότητα από το ίδιο ποσό καυσίμου σε σύγκριση με τον συνήθη λέβητα.

Ο λέβητας συμπύκνωσης είναι ένας πιο σύγχρονος και αποδοτικός τύπος θερμαντικού συστήματος, αλλά συνήθως απαιτεί υψηλότερο κόστος εγκατάστασης σε σύγκριση με τον συνήθη λέβητα.

#### 2.4.3.2 Ενδοδαπέδια θέρμανση

Η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι μία μορφή κεντρικής θέρμανσης η οποία επιτυγχάνει έλεγχο του έσω κλίματος για θερμική άνεση χρησιμοποιώντας αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Ο όρος radiant heating χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει αυτή την προσέγγιση, επειδή η ακτινοβολία είναι υπεύθυνη για ένα σημαντικό ποσοστό του αποτελέσματος της θερμικής άνεσης. Σαν όρος είναι τεχνικά σωστός όταν η ακτινοβολία αποτελεί μεγαλύτερο ποσοστό από το 50% της θερμικής συναλλαγής μεταξύ του δαπέδου και υπόλοιπου χώρου.

Η ενδοδαπέδια θέρμανση αφορά τη θέρμανση του χώρου, μέσα από ένα σύστημα σωληνώσεων που βρίσκεται εντός του δαπέδου και μέσα στο οποίο κυκλοφορεί θερμό νερό. Η θέρμανση δαπέδου με θερμό νερό είναι αυτή που έχει επικρατήσει περισσότερο με ποσοστό κοντά στο 95% στη χώρα μας έναντι άλλων συστημάτων ενδοδαπέδιας θέρμανσης (π.χ. ηλεκτρικής αντίστασης).

Η διαδικασία λειτουργίας της ενδοδαπέδιας θέρμανσης έχει ως εξής: Το θερμό νερό όντας στην κατάλληλη θερμοκρασία από κάποια άλλη πηγή θερμότητας (π.χ. λέβητα, αντλία θερμότητας, ηλιακό συγκρότημα κ.τ.λ.) διαρρέοντας στο σύστημα των σωληνώσεων του δαπέδου (Εικόνα 2-3) θερμαίνει το θερμομοπετόν, το οποίο συσσωρεύει τη θερμότητα, αυξάνει τη θερμοκρασία του και θερμαίνει το χώρο είτε ακτινοβολώντας θερμότητα (65%) είτε με μεταφορά (35%).

Η ενδοδαπέδια θέρμανση λειτουργεί με νερό χαμηλής θερμοκρασίας, από 30°C έως 45°C. [20]



Εικόνα 2-3 Σωληνώσεις ενδοδαπέδιας θέρμανσης

#### Πλεονεκτήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης

- Ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Δεν υπάρχουν θέματα συχνής συντήρησης και περισσότερη προσοχή συγκριτικά με άλλα σώματα θέρμανσης. Τα ποσοστά αποτυχίας ενός τέτοιου συστήματος και παρουσίας αστοχίας και μάλιστα μεγάλης είναι σχεδόν μηδαμινά, ωστόσο δεν παύει να χρήζει ετήσιου ελέγχου και τυχόν διόρθωσης τόσο ο λέβητας όσο και ο καυστήρας καθώς το μοναδικό σημείο

στο οποίο διαφέρει από ένα κοινό καλοριφέρ είναι πως στο συγκεκριμένο σύστημα, οι σωληνώσεις αντί να καταλήγουν στο κυρίως σώμα του καλοριφέρ, καταλήγουν στο δάπεδο.

- Το δάπεδο ακτινοβολεί θερμότητα, αυτό σημαίνει ότι δεν μεταφέρονται μικρόβια και δεν προκαλούνται ρεύματα αέρα.

### Μειονεκτήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης

- Ίσως το πιο σημαντικό μειονέκτημα του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι ότι αποτελεί ένα σύστημα μεγάλης αδράνειας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι είναι αναγκαίο να παρέλθει ένα χρονικό διάστημα μετά από την ενεργοποίηση, με σκοπό να αποδώσει. Βέβαια, όπως σε πολλές άλλες συσκευές έτσι και στην ενδοδαπέδια χρησιμοποιείται θερμοστάτης ώστε να εξισορροπείται η σχέση μεταξύ απόδοσης και οικονομίας.
- Ιδιαίτερα υψηλό κόστος εγκατάστασης
- Δεν προτείνεται η τοποθέτηση μοκέτας ή χαλιού [21]

#### 2.4.3.3 Σώματα βεβιασμένη κυκλοφορίας αέρα θέρμανσης και Ψύξης (Fan Coils- FCUs)

Τα FCUs (Εικόνα 2-4) είναι μονάδες θέρμανσης ή ψύξης που συνδέονται σε ένα κύκλωμα νερού. Μια μονάδα fan coil αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας, έναν ανεμιστήρα και ένα φίλτρο. Ο ανεμιστήρας φυσάει στη διεύθυνση της κοιλότητας, μέσω του οποίου υπάρχουν σωλήνες στους οποίους υπάρχει υψηλής θερμοκρασίας υγρό που μεταφέρεται. Στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία του υγρού υπερβαίνει τη θερμοκρασία δωματίου, το υγρό θα αυξήσει τη θερμοκρασία του αέρα που κυκλοφορεί, διαφορετικά, εάν η θερμοκρασία είναι μικρότερη, τότε θα προκαλέσει μείωση αυτής. Έτσι, το υγρό στους σωλήνες είτε θα θερμανθεί είτε θα ψυχθεί από μια εξωτερική μονάδα ανάλογα με την επιλογή του καταναλωτή.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα από τη χρήση των FCUs σε σχέση με τα συμβατικά σώματα:

- Σε συνδυασμό με μία αντλία θερμότητας μπορούμε να έχουμε θέρμανση και ψύξη με ένα μόνο σύστημα.
- Αυξημένη απόδοση στη θέρμανσης και στη ψύξη, ακόμα και σε πολύ χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες.
- Η κατανάλωση ρεύματος είναι ελάχιστη και ανάλογη της ταχύτητας των ανεμιστήρων.
- Εύκολη τοποθέτηση.
- Δυνατότητα αυτονομίας ανά κλιματιζόμενο χώρο με την χρήση θερμοστατών ανά δωμάτιο.
- Μπορούν να συνδεθούν εύκολα με συστήματα Smart Home για απομακρυσμένο έλεγχο, ακρίβεια στη ρύθμιση και σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.
- Μπορούν να τοποθετηθούν σε εμφανή αλλά και κρυφά σημεία του χώρου.



Εικόνα 2-4- Επιδαπέδιο Fan Coil

#### 2.4.4 Σύστημα Ψύξης

Για τη ψύξη- κλιματισμό ενός χώρου, υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες συστημάτων. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν αέρα για τη θέρμανση και ψύξη κτηρίων και αυτά που χρησιμοποιούν νερό και αέρα. Ο αέρας που χρησιμοποιείται από τα συστήματα της πρώτης κατηγορίας, είναι σταθερός ή μεταβλητής παροχής κατάλληλα επεξεργασμένος και κλιματισμένος, ενώ για τα συστήματα της δεύτερης κατηγορίας, χρησιμοποιείται νερό σε κατάλληλη θερμοκρασία και παροχή που κυκλοφορεί σε δίκτυο σωληνώσεων, μεταφέροντας ή απάγοντας ποσά θερμότητας σε έναν χώρο, με τη βοήθεια τοπικών εναλλακτών επεξεργασίας αέρα (coils).

Ένα σύστημα ψύξης, έχει την εξής δομή.

- Μια κεντρική μονάδα παραγωγής ψύξης.
- Το Σύστημα διανομής ψύξης .
- Τα τερματικά σώματα.
- Τη μονάδα ελέγχου.

Τα συστήματα αυτά, έχουν το πλεονέκτημα πως παρουσιάζουν δυνατότητα προσαρμογής στις απαιτήσεις μερικού (ψυκτικού ή θερμικού) φορτίου, καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια, λειτουργούν με σημαντική αυτονομία και ευελιξία επιτυγχάνοντας καλή ρύθμιση των συνθηκών σε χώρους που είναι χωρισμένοι σε θερμικές ζώνες, ενώ ενσωματώνουν και αξιοποιούν αποτελεσματικά τις δυνατότητες των συγχρόνων τεχνολογιών.

##### 2.4.4.1 Κλιματισμός με αποκλειστικό σύστημα εξωτερικού αέρα – Outdoor Air (OA) System DOAS

Ένα αποκλειστικό σύστημα εξωτερικού αέρα (DOAS) είναι ένας τύπος συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) που αποτελείται από δύο παράλληλα συστήματα: ένα αποκλειστικό σύστημα για την παροχή εξωτερικού αέρα εξαερισμού που διαχειρίζεται τόσο τα λανθάνοντα όσο και τα αισθητά φορτία κλιματισμού του αέρα εξαερισμού, και ένα παράλληλο σύστημα για τη διαχείριση των (κυρίως αισθητών θερμικών) φορτίων που παράγονται από πηγές εσωτερικού χώρου και εκείνων που διέρχονται από το περιβάλλον του κτιρίου.

Τα παραδοσιακά συστήματα HVAC, όπως τα συστήματα μεταβλητού όγκου αέρα (VAV) που εξυπηρετούν πολλαπλές ζώνες, έχουν πιθανά προβλήματα όσον αφορά την κακή θερμική άνεση και την πιθανή μικροβιακή μόλυνση. Ανάλογα με το περιβάλλον και το εμπλεκόμενο παράλληλο σύστημα, σε μια εγκατάσταση DOAS το σύστημα εξωτερικού αέρα θα χειριστεί μέρος του αισθητού φορτίου επιπλέον του λανθάνοντος φορτίου και το παράλληλο σύστημα θα χειριστεί το υπόλοιπο αισθητό φορτίο.

Για ένα τυπικό σύστημα εξαερισμού DOAS, το σύστημα εξωτερικού αέρα μπορεί να φιλοξενήσει περίπου το 0-30% του αισθητού φορτίου του χώρου. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα άνετο εσωτερικό περιβάλλον, το υπόλοιπο των αισθητών φορτίων του χώρου πρέπει να καλύπτεται από πολλές άλλες επιλογές προαιρετικού εξοπλισμού ως εξής:

- Πάνελ ακτινοβολούμενης οροφής
- Παράλληλα συστήματα μεταβλητού όγκου αέρα (VAV)
- Unitary source αντλίες θερμότητας
- Συστήματα μεταβλητής ροής ψυκτικού μέσου (VRF)
- Μονάδες fan coil [22]

#### 2.4.4.2 Αντλία θερμότητας

Οι συσκευές που μεταφέρουν θερμότητα από έναν χώρο ή μέσο χαμηλού θερμοκρασιακού επιπέδου, σε έναν χώρο ή μέσο υψηλότερης θερμοκρασίας, ώστε να αξιοποιηθεί σε αυτόν, είτε με την μορφή θέρμανσης ή ψύξης, ονομάζονται αντλίες θερμότητας. Λειτουργούν σαν μηχανές άντλησης ενέργειας από το περιβάλλον, παράγοντας θερμότητα ή ψύξη, καταναλώνοντας ένα πολύ μικρό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας, γύρω στο 20% ~ 40% της ονομαστικής τους ισχύος, αντλώντας την υπόλοιπη ενέργεια από αυτό.

Εξαιτίας της συναλλαγής ενέργειας με το περιβάλλον, ο βαθμός απόδοσης τους δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές συνθήκες του περιβάλλοντος. Η αποδοτικότητα μιας αντλίας θερμότητας, είναι αντιστρόφως ανάλογη με την εξωτερική θερμοκρασία. Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πέσει κάτω από τους 0°C, η αποδοτικότητας της μειώνεται γι' αυτό ο μελετητής ενός ενεργειακού συστήματος με αντλία θερμότητας θα πρέπει να εξασφαλίζει τη θερμική άνεση ενός χώρου, είτε αυξάνοντας την ονομαστική ισχύ της μονάδας, είτε σχεδιάζοντας επικουρικά συστήματα για σχετική ενισχυτική λειτουργία (back-up).

Ο βαθμός απόδοσης (συντελεστής συμπεριφοράς – coefficient of performance - COP) μιας αντλίας, αποτελεί ένα μέτρο αποδοτικότητας σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα, μια αντλία θερμότητας με COP=4, αποδίδει 4kWh ενέργειας, καταναλώνοντας 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Αντλίες θερμότητας με βαθμό απόδοσης, μεγαλύτερο από 3.3, χαρακτηρίζονται ως υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας, εντάσσονται στις ανανεώσιμες μορφές παραγωγής θερμότητας ενώ θεωρούνται πως αποτελούν καθαρή μορφή θέρμανσης και ψύξης με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Μια αντλία θερμότητας με συντελεστή συμπεριφοράς COP=3, για 1kWh θερμότητας έχει το μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα σε σχέση με τα υπόλοιπα ενεργειακά συστήματα.

Λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η πηγή και ο αποδέκτης, δηλαδή με βάση τους τύπους των εναλλακτών, οι αντλίες θερμότητας χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- **Αντλίες Θερμότητας αέρα/αέρα:** Πρόκειται για τον πιο συνηθισμένο τύπο αντλίας θερμότητας και χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και τη ψύξη χώρων. Είναι κοινώς τα κλιματιστικά μηχανήματα διαιρούμενου τύπου (split type). Και οι δυο εναλλάκτες είναι αέρα ψυκτικού μέσου
- **Αντλίες θερμότητας αέρα/νερού:** Οι αντλίες αυτές, χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα κεντρικού κλιματισμού μεγάλων κτηρίων και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου και οι χώροι είναι χωρισμένοι σε θερμικές ζώνες και απαιτούνται διαφορετικές θερμοκρασίες σε αυτές. Το μέσο που θερμαίνεται ή ψύχεται είναι το νερό και αυτό πραγματοποιείται μέσω ενός εναλλάκτη ψυκτικού μέσου/νερού. Ο δεύτερος εναλλάκτης πρόκειται για αέρα/ψυκτικού μέσου και βρίσκεται στο περιβάλλον, μαζί με το συμπιεστή.
- **Αντλία θερμότητας νερού/αέρα:** Οι αντλίες αυτές, χρησιμοποιούν σαν πηγή και αποδέκτη θερμότητας το νερό, σταθερής θερμοκρασίας, ενώ ο αέρας μεταφέρει ή απάγει θερμότητα από τον χώρο που πρόκειται να κλιματιστεί. Συνεπώς, ο ένας εναλλάκτης είναι ψυκτικού μέσου/αέρα, ενώ ο δεύτερος εναλλάκτης είναι νερού/ψυκτικού μέσου. [17]

Σε ότι αφορά τους αυτοματισμούς, μια αντλία θερμότητας διαθέτει ηλεκτρονικές πλακέτες που επιτηρούν τη λειτουργία των τμημάτων της, όπως αισθητήρια που μετράνε τη θερμοκρασία και την πίεση του ψυκτικού μέσου κατά την είσοδο και την έξοδο από τον συμπιεστή, εκτελούν τις απαιτούμενες ρυθμίσεις βάνες ανάμειξης, τις εκτονωτικές βαλβίδες και ρυθμίζουν τις στροφές των ανεμιστήρων.

### 3 Δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs)

Οι δείκτες απόδοσης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης των κρίσιμων στόχων του έργου και θεωρούνται ιδιαίτερα χρήσιμοι για την αντιμετώπιση σύνθετων περιπτώσεων, όπως η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των κατασκευαστικών έργων. Επιπλέον, δεδομένης της δυνατότητας εφαρμογής τους για την αξιολόγηση των επιδόσεων των κτιρίων που έχουν αναβαθμιστεί, η προσέγγιση των KPIs γίνεται γρήγορα ένα από τα πιο πολύτιμα εργαλεία για την ποσοτικοποίηση των οφελών από την εφαρμογή της αναβάθμισης. Με βάση κριτικές των υφιστάμενων μελετών και μοντέλων, η παρούσα έρευνα αναπτύσσει ένα πλαίσιο δεικτών αναφοράς (KPIs) για την αξιολόγηση των οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην μελέτη διάφορων περιπτώσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίου. [23]

Ένας από τους πιο κρίσιμους δείκτες απόδοσης σε ότι αφορά την ενεργειακή αξιολόγηση των κτηριακών σεναρίων είναι η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, δηλαδή η ενέργεια που δεν έχει υποβληθεί σε οποιαδήποτε διαδικασία μετατροπής ή μετασχηματισμού. Ο δείκτης αυτός αποτελεί σημαντικό μέτρο στο πλαίσιο της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD - οδηγία 2010/31/ΕΕ) και αφορά τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται ετησίως για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης (ZNX). [24]

Οι υπολογισμοί της ενεργειακής απόδοσης είναι απαραίτητοι για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των εκπομπών. Οι βασικοί δείκτες μέτρησης που σχετίζονται με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έχουν επίσης συμπεριληφθεί στα πλαίσια λήψης αποφάσεων για το σχεδιασμό κατασκευών και στις αξιολογήσεις των επιδόσεων κατασκευών. Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και η μείωση των εκπομπών σε παγκόσμια κλίμακα είναι ζωτικής σημασίας. Επιπλέον, τα ενεργειακά μοντέλα στη φάση του σχεδιασμού πρέπει να επικυρωθούν και πρέπει να εξεταστούν οι πιθανές ανασταλτικές επιδράσεις της αναβάθμισης, οι οποίες αποτελούν βασικά εμπόδια για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. Έτσι, οι KPIs που σχετίζονται με την ενέργεια και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έχουν ενσωματωθεί ως βασικές κατηγορίες KPIs στο πλαίσιο που αναπτύχθηκε.

Η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης αποτελεί αντικειμενική συνάρτηση στο σχεδιασμό και στη μελέτη περιπτώσεων ενεργειακής αξιολόγησης κτηρίων. Το κόστος επένδυσης θεωρείται σημαντικός KPI, ενώ άλλοι οικονομικοί KPI που επικρατούν στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν την περίοδο απόσβεσης και την καθαρή παρούσα αξία (ή το καθαρό παρόν κόστος).

Η βελτίωση της άνεσης των χρηστών έχει αναφερθεί ως κοινωνικό όφελος της αναβάθμισης των κτιρίων. Πολλές μελέτες έχουν αξιολογήσει τις βελτιώσεις της θερμικής άνεσης που προκύπτουν από την αναβάθμιση των κτιρίων, τόσο σε αξιολογήσεις πριν και μετά την αναβάθμιση, όσο και σε μελέτες αξιολόγησης μετά τη χρήση. Οι μελέτες αυτές αξιολόγησαν τη θερμική άνεση χρησιμοποιώντας είτε μετρούμενα δεδομένα αισθητήρων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, είτε έρευνες κατοίκων, είτε συνδυασμό και των δύο. Επιπλέον, οι παράμετροι θερμικής άνεσης συμπεριλαμβάνονται συχνά σε μοντέλα λήψης αποφάσεων για το σχεδιασμό κτηρίων και θεωρούνται ως ένας προσιτός KPI που μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητός από τους καταναλωτές [23].

#### 3.1 Πρωτογενής ενέργεια

Η ενεργειακή απόδοση των κτηρίων προσδιορίζεται με βάση τη συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας. Η μεθοδολογία υπολογισμού θα πρέπει να περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον τα παρακάτω στοιχεία:

- την πραγματική κύρια χρήση του κτιρίου ή της κτηριακής μονάδας, τις επιθυμητές συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, αερισμό), τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τον αριθμό χρηστών,
- τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής του κτιρίου ή της κτηριακής μονάδας (θερμοκρασία, σχετική και απόλυτη υγρασία, ταχύτητα ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία),
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτηριακού κελύφους (μορφή του κτιρίου, διαφανείς και μη επιφάνειες, σκίαστρα κ.ά.), σε σχέση με τον προσανατολισμό και τα χαρακτηριστικά των εσωτερικών δομικών στοιχείων (χωρίσματα κ.ά.),
- τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτηριακού κελύφους (θερμοπερατότητα, θερμική μάζα, απορροφητικότητα ηλιακής ακτινοβολίας, διαπερατότητα κ.ά.),
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Η/Μ συστημάτων για ΘΨΚ και ΖΝΧ (τύπος συστημάτων, δίκτυο διανομής, απόδοση συστημάτων κ.α.),
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης γενικού φωτισμού (στα κτίρια τριτογενή τομέα),
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διατάξεων αυτομάτου ελέγχου και ρύθμισης λειτουργίας των Η/Μ συστημάτων,
- το μηχανικό και φυσικό αερισμό, που περιλαμβάνει και την αεροστεγανότητα,
- τα παθητικά και υβριδικά ηλιακά συστήματα και την ηλιακή προστασία,
- την παθητική θέρμανση και δροσισμό,
- τις κλιματικές συνθήκες εσωτερικού χώρου, λαμβάνοντας υπόψη και τις συνθήκες σχεδιασμού εσωτερικού κλίματος,
- τα εσωτερικά φορτία.

Στους υπολογισμούς ενεργειακής απόδοσης λαμβάνεται υπόψη η θετική επίδραση των κατωτέρω παραγόντων:

- των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων και άλλων συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, ΖΝΧ και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασιζόμενων σε ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ),
- της ωφέλιμης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης με συμπαραγωγή (ΣΗΘ) και των συστημάτων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης σε κλίμακα περιοχής ή οικοδομικού τετραγώνου, του φυσικού φωτισμού.

Επίσης στη μεθοδολογία υπολογισμού συνεκτιμάται κατά περίπτωση η θετική επίδραση των ακόλουθων συστημάτων:

- των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων και άλλων συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, ΖΝΧ και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασιζόμενων σε ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ),
- της ωφέλιμης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης με συμπαραγωγή (ΣΗΘ) και των συστημάτων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης σε κλίμακα περιοχής ή οικοδομικού τετραγώνου,
- του φυσικού φωτισμού [19]

Η αναγωγή της υπολογιζόμενης τελικής κατανάλωσης καυσίμου σε πρωτογενή γίνεται με τη χρήση των συντελεστών μετατροπής του Πίνακα 3-1

Πίνακας 3-1 Συντελεστές μετατροπής σε πρωτογενή ενέργεια

Πηγή ενέργειας	Συντελεστής μετατροπής σε πρωτογενή ενέργεια
Φυσικό αέριο	1.05
Πετρέλαιο θέρμανσης	1.10
Βιομάζα	1.00
Ηλεκτρική ενέργεια	2.9

Ο συντελεστής μετατροπής σε πρωτογενή ενέργεια της βιομάζας είναι ο ίδιος τόσο για την ακατέργαστη βιομάζα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα κ.ά.) όσο και για την τυποποιημένη βιομάζα όπως τα συσσωματώματα (pellets) κ.ά.

Βάσει της τελικής ανηγμένης σε πρωτογενή ενέργεια κατανάλωσης του κτηρίου, καθορίζεται και η κατηγορία της ενεργειακής απόδοσής του και εκδίδεται το «πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης κτηρίου - Π.Ε.Α.».

### 3.2 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα- Εκπομπές CO<sub>2</sub>

Ο παγκόσμιος πληθυσμός που ζει στις πόλεις φτάνει το 55% και το ποσοστό αυτό αναμένεται να φθάσει το 68% το 2050. Επιπλέον, το 75% των εκπομπών CO<sub>2</sub> παράγεται στις πόλεις. Ειδικότερα, το 36% της ενέργειας καταναλώνεται και το 40% των εκπομπών παράγεται στα κτίρια. Η συνήθης μορφή κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια είναι ως ηλεκτρική ενέργεια και ως φυσικό αέριο για θερμική κατανάλωση. Για το λόγο αυτό, κάθε μέτρο που επηρεάζει την μείωση των εκπομπών του έχει πολλαπλασιαστικό αποτέλεσμα και θα έχει πολύ ευνοϊκό αντίκτυπο στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μελέτη του CO<sub>2</sub> εκπομπών από τα κτίρια είναι τόσο σημαντική. [25]

Με αποδεδειγμένες και εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες, η κατανάλωση ενέργειας τόσο σε νέα όσο και σε υφιστάμενα κτίρια μπορεί να μειωθεί κατά περίπου 30-50% χωρίς σημαντική αύξηση του κόστους επένδυσης. Σύμφωνα με το σενάριο του ενεργειακού τομέα για το 2050 που προβλέπει ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> των κτιρίων αναμένεται να μειωθούν κατά δύο τρίτα μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, της ενεργειακής απόδοσης και της μετάβασης σε τεχνολογίες χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα.

Προκειμένου να προσδιοριστούν στρατηγικές μετριασμού, είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί η τρέχουσα απόδοση του κτιρίου όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Καθώς οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου, η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (AKZ) θεωρείται η καλύτερη προσέγγιση για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ερευνητές και οργανισμοί, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες, έχουν εισαγάγει διάφορα συστήματα αξιολόγησης των εκπομπών CO<sub>2</sub> στον κύκλο ζωής των κτιρίων. Κατά την ανάπτυξή τους χρησιμοποιήθηκαν διάφορες πηγές δεδομένων, όπως υπάρχουσες βάσεις δεδομένων, πρότυπα, κώδικες και εκθέσεις της εκάστοτε χώρας.

Σύμφωνα με τον KENAK οι συντελεστές εκπομπής CO<sub>2</sub> για τα διάφορα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην μελέτη των περιπτώσεων στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2. [19]

Πίνακας 3-2 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για διάφορα καύσιμα

Καύσιμο	Συντελεστής εκπομπής CO <sub>2</sub> (kg/kWh)
Πετρέλαιο	0.264
Φυσικό αέριο	0.196
Βιομάζα	0
Ηλεκτρισμός	0.989

Όσον αφορά τη χρήση βιομάζας ως καυσίμου παρατηρείται πως ο συντελεστής εκπομπής CO<sub>2</sub> είναι μηδενικός, άρα το ανθρακικό αποτύπωμα (carbon footprint) είναι μηδενικό. Αυτό δεν προκύπτει απ' το γεγονός ότι δεν εκλύουν κατά την καύση τους διοξείδιο του άνθρακα, καθώς κάτι τέτοιο είναι αδύνατο για οποιαδήποτε καύση ένωσης που περιέχει άνθρακα. Η φιλικότητα της βιομάζας για το περιβάλλον απορρέει από το γεγονός ότι για την παραγωγή της χρησιμοποιούνται φυσικές πρώτες ύλες όπως υπολείμματα υλοτομίας, πριονίδι, ειδικές καλλιέργειες, που για την ανάπτυξή τους απορροφούν ίση ποσότητα CO<sub>2</sub> με εκείνη που εκλύουν κατά την καύση τους, άρα το συνολικό ισοζύγιο μεταφοράς διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι μηδενικό. [26]

### 3.3 Κόστος

#### 3.3.1 Βασικές οικονομικές έννοιες

##### 3.3.1.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (Κ.Π.Α- NPV)

Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) είναι το άθροισμα των παρουσών αξιών των εισερχόμενων και εξερχόμενων ταμειακών ροών κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Μετράει το πλεόνασμα ή την έλλειψη ταμειακών ροών, σε όρους παρούσας αξίας, σε σχέση με το κόστος κεφαλαίων που χρησιμοποιήθηκαν για μια επένδυση. Η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) είναι ένα χρήσιμο εργαλείο που χρησιμοποιείται στην οικονομική επιστήμη, στα χρηματοοικονομικά και στη λογιστική για να καθοριστεί αν μια επένδυση ή ένα έργο κρίνεται συμφέρον για να χρηματοδοτηθεί ή όχι. Η παρούσα αξία των αναμενόμενων ταμειακών ροών υπολογίζεται με την προεξόφληση τους χρησιμοποιώντας το κατάλληλο προεξοφλητικό επιτόκιο.

#### Καθαρή Παρούσα Αξία = Παρούσα Αξία – Κόστος επένδυσης

- ΚΠΑ > 0 Η επένδυση γίνεται αποδεκτή
- ΚΠΑ = 0 Η επένδυση θεωρείται οριακή (αδιάφορος επενδυτής)
- ΚΠΑ < 0 Η επένδυση δεν πρέπει να γίνει αποδεκτή

Ο τύπος της καθαρής παρούσας αξίας είναι ο εξής:

$$NPV = \frac{cash\ flow}{(1+i)^t} - initial\ investment \quad [3]$$

Όπου:

i = απαιτούμενη απόδοση ή προεξοφλητικό επιτόκιο

t = χρονική περίοδος



Εάν αναλύεται ένα μακροπρόθεσμο έργο με πολλαπλές ταμειακές ροές, τότε ο τύπος για την ΚΠΑ του έργου έχει ως εξής:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad [4]$$

Όπου:

$R_t$  = καθαρές ταμειακές εισροές-εκροές κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Η ΚΠΑ είναι μία από τις δύο τεχνικές προεξόφλησης ταμειακών ροών (η άλλη είναι ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης) που χρησιμοποιούνται στη συγκριτική αξιολόγηση επενδυτικών προτάσεων, όπου η ροή του εισοδήματος διαφέρει στην πάροδο του χρόνου. Αποτελεί μια τυποποιημένη μέθοδο που χρησιμοποιεί την έννοια της χρονικής αξίας του χρήματος για την εκτίμηση μακροπρόθεσμων επενδύσεων. Η χρονική αξία του χρήματος στα χρηματοοικονομικά, υπαγορεύει ότι ο χρόνος έχει επιπτώσεις στην αξία των ταμειακών ροών. Αν, για παράδειγμα, υπάρχει μία χρονική περίοδος πανομοιότυπων ταμειακών ροών ίσης ονομαστικής αξίας, οι ταμειακές ροές στο παρόν έχουν μεγαλύτερη πραγματική αξία από ταμειακές ροές ίσης ονομαστικής στο μέλλον, με κάθε μελλοντική ταμειακή ροή να γίνεται όλο και λιγότερο πολύτιμη από τις προηγούμενες. Συνεπώς, μεταξύ δυο όμοιων επενδύσεων, υψηλότερο κίνδυνο έχει αυτή με την μεγαλύτερη διάρκεια. Για κάθε επιπλέον χρονική περίοδο, η παρούσα αξία των μεταγενέστερων μελλοντικών ταμειακών ροών μειώνεται, καθώς ο κίνδυνος αυτής της επένδυσης αυξάνεται, ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης αβεβαιότητας και κινδύνου που υπάρχει για την τελική ολοκλήρωση του έργου/επένδυσης. [27]

### 3.3.1.2 Καθαρό Παρόν Κόστος (Κ.Π.Κ.-N.P.C.)

Στην οικονομική μηχανική υπάρχουν ορισμένα είδη έργων στα οποία, λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών τους, δεν υπάρχουν πωλήσεις ή έσοδα. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η παράμετρος καθαρό παρόν κόστος (ΚΠΚ), η οποία μπορεί να προκύψει μέσω της εξίσωσης

$$NPC = \sum_{t=0}^N \frac{AA_{TC}}{(1+i)^t} + I_{CC} \quad [5]$$

Όπου:

$AA_{TC}$  = προσαρμοσμένο ετήσιο συνολικό κόστος

$i$  = απαιτούμενη απόδοση ή προεξοφλητικό επιτόκιο

$t$  = χρονική περίοδος

$I_{CC}$  = αρχικό κόστος κεφαλαίου

Στην ανάλυση NPC οι ετήσιες συνολικές δαπάνες ή κόστη (AATC) δίνονται ως θετικά μεγέθη (σε αντίθεση με την NPV) και, συνεπώς, η NPC στο τέλος της διάρκειας ζωής του συστήματος θα είναι θετική. Όταν αξιολογούνται δύο ή περισσότερα συστήματα για την ίδια χρονική περίοδο, θα πρέπει να επιλέγεται το σύστημα με τη χαμηλότερη NPC. [28]

### 3.3.2 Οικονομικές Παραδοχές

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση του Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC), καθώς δεν υπάρχουν σημαντικά έσοδα στη μελέτη που έγινε. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε το κόστος της συνολικής επένδυσης, κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας των συστημάτων, στη

διάρκεια 25 ετών και ως έσοδο υπολογίστηκε το κόστος πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Το κόστος επένδυσης περιλαμβάνει:

1. Κόστος συστημάτων θέρμανσης / ψύξης και φωτοβολταϊκών
2. Κόστος θερμομόνωσης
3. Κόστος εγκατάστασης όλων των συστημάτων και της θερμομόνωσης
4. Λειτουργικό κόστος, το οποίο αφορά το ενεργειακό κόστος ( ευρώ/kWh )
5. Κόστος συντήρησης των συστημάτων για διάρκεια 25 ετών

Εφαρμόζοντας την Εξίσωση 5 ως αρχικό κόστος κεφαλαίου υπολογίστηκε ως:

$I_{cc} = \text{Κόστος Συστήματος Θέρμανσης} + \text{Κόστος Συστήματος Ψύξης} + \text{Κόστος Φωτοβολταϊκών} + \text{Κόστος Θερμομόνωσης} + \text{Κόστος Εγκατάστασης Συστημάτων} + \text{Κόστος Υαλοπινάκων}$

$\text{Κόστος Συστήματος Θέρμανσης} = \text{Λέβητας} + \text{Fan coil} + \text{Κυκλοφορητής} + \text{Σωληνώσεις} + \text{Δοχείο Αποθήκευσης}$

$\text{Κόστος Συστήματος Ψύξης} = \text{Αντλία Θερμότητας} + \text{Fan coil}$

Ως προσαρμοσμένο συνολικό κόστος υπολογίστηκε:

$AA_{TC} = \text{Λειτουργικό Κόστος Συστημάτων} + \text{Κόστος Συντήρησης} - \text{Κόστος Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας}$

$\text{Λειτουργικό Κόστος} = \text{Κατανάλωση Ενέργειας (kWh)} * \text{Κόστος Καυσίμου (ευρώ/kWh)}$

Το προεξοφλητικό επιτόκιο ισούται με  $i = 0.06$

Η χρονική περίοδος υπολογισμού του NPC είναι  $t = 25$  χρόνια

Τα κόστη για τις διάφορες περιπτώσεις που μελετάμε φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 3-3 Κόστη συστημάτων θέρμανσης/ψύξης

	Κόστος
Λέβητας συμπύκνωσης Φυσικού Αερίου	1600 €
Λέβητας Πετρελαίου	1200 €
Λέβητας Βιομάζας	2100 €
Αντλία Θερμότητας	4000 €
Fancoil	300 €
Κυκλοφορητής	150 €
Σωληνώσεις	2.7 €/m <sup>2</sup>
Δοχείο αποθήκευσης	606 €

Πίνακας 3-4 Κόστος θερμομονωτικών υλικών

	Κόστος
EPS	103.3 €/m <sup>2</sup>
MW	166.67 €/m <sup>2</sup>

Κόστος εγκατάστασης μόνωσης = 30 €/m<sup>2</sup>

Κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών = 188 €/m<sup>2</sup>

Κόστος συντήρησης σωληνώσεων και συστημάτων = 180 €/χρόνο

Πίνακας 3-5 Κόστος υαλοπινάκων

	Κόστος
2-πλοι απλοί υαλοπίνακες	6030.4 €
3-πλοι απλοί υαλοπίνακες	6726.2 €
2-πλοι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες	8497.4 €
3-πλοι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες	9193.2 €

Το κόστος των υαλοπινάκων αφορά το συνολικό κόστος για τα 2 παράθυρα και τις 2 μπαλκονόπορτες του κτηρίου.

Πίνακας 3-6 Κόστος καυσίμων

	Κόστος
Φυσικό Αέριο	0.14 €/kWh
Πετρέλαιο	0.129 €/kWh
Βιομάζα	0.253 €/kWh
Ηλεκτρισμός	0.167 €/kWh

Κόστος πώλησης ηλεκτρική ενέργειας = 0.087 €/kWh

### 3.4 Θερμική άνεση

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός ενός κτιρίου έγκειται τόσο στην ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας όσο και στην προσπάθεια βελτιστοποίησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο εσωτερικό του. Οι παράμετροι αυτές οριοθετούν και την θερμική άνεση στο εσωτερικό του κτιρίου.

Η θερμική άνεση είναι η κατάσταση του νου που εκφράζει την ικανοποίηση από το θερμικό περιβάλλον. Επειδή υπάρχουν μεγάλες διαφορές, τόσο φυσιολογικά όσο και ψυχολογικά, από άτομο σε άτομο, είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν όλοι σε έναν χώρο. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που απαιτούνται για την άνεση δεν είναι ίδιες για όλους. Ωστόσο, εργαστηριακά και πραγματικά δεδομένα έχουν συλλεχθεί που παρέχουν τα απαραίτητα στατιστικά δεδομένα για τον καθορισμό των συνθηκών που ένα συγκεκριμένο ποσοστό των επιβατών θα θεωρούν θερμικά άνετες. Υπάρχουν έξι πρωταρχικοί παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται για τον καθορισμό των συνθηκών θερμικής άνεσης. Ένας αριθμός άλλων, δευτερευόντων παραγόντων επηρεάζουν την άνεση σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι έξι πρωταρχικοί παράγοντες παρατίθενται παρακάτω. [29]

1. Μεταβολικός ρυθμός
2. Μόνωση ενδυμάτων
3. Θερμοκρασία αέρα
4. Θερμοκρασία ακτινοβολίας

5. Ταχύτητα αέρα

6. Υγρασία

Η θερμική ισορροπία του σώματος είναι μια δυναμική κατάσταση μεταξύ της παραγόμενης θερμότητας, ως αποτέλεσμα του ανθρώπινου μεταβολισμού, και της θερμότητας που μεταδίδεται με μεταφορά, αγωγή, ακτινοβολία και εξάτμιση από ή προς το περιβάλλον. Για τον υπολογισμό της θερμικής άνεσης που μπορεί να επιτευχθεί σε έναν χώρο μετρώντας ή γνωρίζοντας τις παραπάνω φυσικές παραμέτρους έχουν προταθεί αρκετά εργαλεία υπολογισμού με ευρύτερα διαδεδομένο αυτό του P.O. Fanger (1970). [30]

Με βάση αυτό το θερμικό ισοζύγιο ανάμεσα στο ανθρώπινο σώμα και το περιβάλλον ρυθμίζεται από τη Εξίσωση 5:

$$M - W = H + EC + Cres + Eres \quad [6]$$

Όπου:

- M: ρυθμός μετατροπής της χημικής ενέργειας σε θερμότητα και μηχανικό έργο, μέσω αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών μέσα στο σώμα [ $W/m^2$ ].
- W: το ωφέλιμο μηχανικό έργο [ $W/m^2$ ].
- H: οι απώλειες ενέργειας υπό την μορφή θερμότητας από την επιφάνεια του σώματος μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας [ $W/m^2$ ].
- EC: το ποσό της θερμότητας που απάγεται λόγω εξάτμισης σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας [ $W/m^2$ ].
- Cres: το πόσο της θερμότητας που απάγεται με αγωγή κατά την αναπνοή [ $W/m^2$ ].
- Eres: το ποσό της θερμότητας που απάγεται λόγω εξάτμισης κατά την αναπνοή [ $W/m^2$ ].

Η ικανοποίηση της εξίσωσης θερμικής άνεσης είναι μία συνθήκη για την επίτευξη θερμικής ευεξίας. Ωστόσο, η εξίσωση παρέχει μόνο πληροφορίες για το πως οι παράμετροι πρέπει να συνδυαστούν ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες θερμικής ευεξίας στο εσωκλίμα. Ως εκ τούτου, δεν είναι κατάλληλη άμεσα για την εξακρίβωση της αίσθησης ενός τυχαίου θερμικού περιβάλλοντος από τους χρήστες των κτιρίων όπου οι παράμετροι δεν ικανοποιούν την εξίσωση θερμικής άνεσης.

Για τον παραπάνω λόγο, ο P.O. Fanger ακολούθησε μια πειραματική διαδικασία με στόχο τη δημιουργία ενός απλού δείκτη για τον χαρακτηρισμό των θερμικών συνθηκών ενός χώρου. Συγκεκριμένα, ανέπτυξε το δείκτη της μέσης προβλεπόμενης τιμής ψηφοφορίας PMV (Predicted Mean Vote), και το δείκτη δυσαρέσκειας των ανθρώπων ή αλλιώς δείκτη PPD (Predicted Percent of Dissatisfied people). Οι δύο αυτοί δείκτες, ως συνέχεια της θεωρίας του P.O. Fanger, κάνουν εύκολη την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αίσθηση του θερμικού περιβάλλοντος που επικρατεί σε έναν χώρο. Οι δύο αυτοί δείκτες είναι σύνθετες μαθηματικές σχέσεις που λαμβάνουν υπόψη ένα πλήθος παραμέτρων.

### 3.4.1 Δείκτης Προβλεπόμενης Μέσης Ψήφου: PMV (Predicted Mean Vote)

Ο δείκτης PMV είναι ένας δείκτης που προβλέπει τη μέση τιμή των ψήφων μιας μεγάλης ομάδας ατόμων σε κλίμακα θερμικής αίσθησης 7 σημείων (Πίνακας 3-7), με βάση το θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος. Το θερμικό ισοζύγιο επιτυγχάνεται όταν η εσωτερική παραγωγή θερμότητας στο σώμα είναι ίση με την απώλεια θερμότητας προς το περιβάλλον. Σε ένα περιβάλλον, το

ανθρώπινο θερμορυθμιστικό σύστημα θα προσπαθήσει αυτόματα να τροποποιήσει τη θερμοκρασία του δέρματος και την έκκριση ιδρώτα για να διατηρήσει τη θερμική ισορροπία. [31]

Πίνακας 3-7 Κλίμακα δείκτη PMV

Thermal sensation	vote
+3	Hot
+2	Warm
+1	Slightly warm
0	Neutral
-1	Slightly cool
-2	Cool
-3	Cold

Ο δείκτης PMV μπορεί να υπολογιστεί για διαφορετικούς συνδυασμούς μεταβολικού ρυθμού, μόνωσης του ρουχισμού, θερμοκρασίας αέρα, μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας, ταχύτητας αέρα και υγρασίας αέρα.

Ο δείκτης πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για τιμές PMV μεταξύ -2 και +2.

### 3.4.2 Δείκτης PPD- Predicted Percent of Dissatisfied People (Δείκτης δυσαρέσκειας των ανθρώπων)

Ο δείκτης PMV προβλέπει τη μέση τιμή των θερμικών ψήφων μιας μεγάλης ομάδας ανθρώπων που εκτίθενται στην ίδια περιβάλλον. Όμως οι μεμονωμένες ψήφοι είναι διάσπαρτες γύρω από αυτή τη μέση τιμή και είναι χρήσιμο να μπορούμε να προβλέψουμε τον αριθμό των ατόμων που είναι πιθανό να αισθάνονται άβολα ζεστά ή δροσερά.

Ο δείκτης PPD είναι ένας δείκτης που καθορίζει μια ποσοτική πρόβλεψη του ποσοστού των θερμικά δυσαρεστημένων ατόμων που αισθάνονται πολύ δροσερά ή πολύ ζεστά. Το υπόλοιπο ποσοστό ατόμων θα αισθάνεται θερμικά ουδέτερα, ελαφρώς ζεστά ή ελαφρώς δροσερά.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.217 \cdot PMV^2) \quad [7]$$

Πίνακας 3-8 Εξίσωση δείκτη PPD και κλίμακα

Category	Thermal state of the body as a whole	
	PPD (%)	Predicted Mean Vote
I	<6	-0.2<PMV<+0.2
II	<10	-0.5<PMV<+0.5
III	<15	-0.7<PMV<+0.7
IV	>15	PMV<-0.7 or +0.7<PMV

## 4 Μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων Multi- Criteria decision-making (MCDA)

Τα προβλήματα λήψης αποφάσεων, όπως τα προβλήματα κατάταξης, επιλογής και ταξινόμησης, είναι συχνά πολύπλοκα, καθώς συνήθως περιλαμβάνουν πολλά κριτήρια. Οι άνθρωποι δεν εξετάζουν πλέον μόνο ένα κριτήριο (π.χ. κόστος) όταν λαμβάνουν μια απόφαση. Για να οικοδομήσουν μακροπρόθεσμες σχέσεις, να λάβουν βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον αποφάσεις, οι εταιρείες λαμβάνουν υπόψη τους πολλαπλά κριτήρια στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Τις περισσότερες φορές, δεν υπάρχει μια τέλεια επιλογή που να ταιριάζει σε όλα τα κριτήρια: μια "ιδανική" επιλογή δεν υπάρχει συνήθως, και επομένως πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορες προσεγγίσεις, όπως ένα απλό σταθμισμένο άθροισμα. Το σταθμισμένο άθροισμα αποτελεί ειδική περίπτωση μιας πιο σύνθετης μεθόδου και μπορεί να εφαρμοστεί μόνο με τις κατάλληλες προφυλάξεις (σωστή φάση κανονικοποίησης, ανεξάρτητα κριτήρια κ.λπ.) για να επιτρέψει λογικές εξόδους.

Οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (MCDA) έχουν αναπτυχθεί για να υποστηρίξουν τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων στη μοναδική και προσωπική διαδικασία λήψης αποφάσεων. Οι μέθοδοι MCDA παρέχουν βήματα και τεχνικές για την εξεύρεση συμβιβαστικής λύσης. Έχουν τη διάκριση ότι τοποθετούν τον λήπτη αποφάσεων στο κέντρο της διαδικασίας και ενώ είναι αυτοματοποιήσιμες μέθοδοι που οδηγούν στην ίδια λύση για κάθε λήπτη απόφασης, ενσωματώνουν υποκειμενικές πληροφορίες. Οι υποκειμενικές πληροφορίες, γνωστές και ως πληροφορίες προτίμησης, παρέχονται από τον αποφασίζοντα, οι οποίες οδηγούν στη συμβιβαστική λύση. Η εφαρμογή τους είναι ακόμη ευρύτερη, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος όπου πρέπει να ληφθεί μια σημαντική απόφαση. Οι αποφάσεις αυτές μπορεί να είναι είτε τακτικές είτε στρατηγικές, ανάλογα με τη χρονική προοπτική των συνεπειών. [32]

### 4.1 Προβλήματα απόφασης

Η λήψη αποφάσεων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ανθρώπινης ζωής καθώς καθημερινά αντιμετωπίζουμε μια πληθώρα καθημερινών και σημαντικών αποφάσεων. Η διαδικασία αυτή δεν είναι πάντα απλή και συχνά αντιμετωπίζεται με πολυπλοκότητα και προκλήσεις. Τα προβλήματα λήψης αποφάσεων αναδεικνύουν τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουμε καθημερινά κατά την προσπάθεια επιλογής των καλύτερων δυνατών επιλογών ανάμεσα σε ποικίλες εναλλακτικές. Οι Brans, Mareschal και Vinke, ήταν από τους πρωτοπόρους που ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα για την υποστήριξη λήψης αποφάσεων και τις μεθόδους υπεροχής, αναπτύσσοντας ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που επιτρέπει την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών. [33]

#### 1. Το πρόβλημα της επιλογής.

Ο στόχος είναι να επιλεγεί η μοναδική καλύτερη επιλογή ή να μειωθεί η ομάδα επιλογών σε ένα υποσύνολο ισοδύναμων ή ασύγκριτων "καλών" επιλογών.

#### 2. Το πρόβλημα ταξινόμησης.

Οι επιλογές ταξινομούνται σε διατεταγμένες και προκαθορισμένες ομάδες, που ονομάζονται κατηγορίες. Στόχος είναι στη συνέχεια να αναδιοργανωθούν οι επιλογές με παρόμοια συμπεριφορά ή χαρακτηριστικά για περιγραφικούς, οργανωτικούς ή προγνωστικούς λόγους. Με βάση αυτές τις ταξινομήσεις, μπορούν να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα. Οι μέθοδοι

ταξινόμησης είναι χρήσιμες για επαναλαμβανόμενη ή αυτόματη χρήση. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αρχική διαλογή για να μειωθεί ο αριθμός των επιλογών που πρέπει να εξεταστούν σε ένα επόμενο βήμα.

### 3. Το πρόβλημα της κατάταξης.

Οι επιλογές ταξινομούνται από την καλύτερη προς τη χειρότερη με τη βοήθεια βαθμολογίας ή συγκρίσεων ανά ζεύγη κ.λπ. Η σειρά μπορεί να είναι μερική εάν εξετάζονται μη συγκρίσιμες επιλογές ή πλήρης.

### 4. Το πρόβλημα της περιγραφής.

Ο στόχος είναι να περιγράψουμε τις επιλογές και τις συνέπειές τους. Αυτό γίνεται συνήθως στο πρώτο βήμα για την κατανόηση των χαρακτηριστικών του προβλήματος απόφασης. Πρόσθετοι τύποι προβλημάτων έχουν επίσης προταθεί για τις μεθόδους MCDA:

### 5. Πρόβλημα εξάλειψης.

Το πρόβλημα της εξάλειψης είναι ένα κομβικό θέμα στον τομέα της πολυκριτηριακής ανάλυσης και της λήψης αποφάσεων. Προτάθηκε από τον Carlos Bana e Costa το 1996, και αποτελεί μία επέκταση του προβλήματος της αξιολόγησης και κατάταξης εναλλακτικών, εστιάζοντας στην εύρεση μιας καλύτερης εναλλακτικής προς εξάλειψη. Στο πρόβλημα της εξάλειψης, έχουμε ένα σύνολο από εναλλακτικές επιλογές και θέλουμε να εντοπίσουμε την εναλλακτική που θα εξαλειφθεί, δηλαδή να μην επιλεγεί για υλοποίηση. Συνήθως, υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί ή κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή της εναλλακτικής προς εξάλειψη. [34]

### 6. Πρόβλημα σχεδιασμού.

Ένα από τα βασικά προβλήματα στον πολυκριτηριακό σχεδιασμό είναι πως πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες και να εξεταστούν πολλά δυνατά σενάρια για την επίλυση ενός προβλήματος. Ο στόχος είναι να προσδιοριστεί ή να δημιουργηθεί μια νέα δράση, η οποία θα ικανοποιεί τους στόχους και τις προσδοκίες του λήπτη της απόφασης. Το 1992 ο Ralph L. Keeney παρουσίασε την προσέγγιση της "Value Focused Thinking - VFT", η οποία αποτελεί μια μεθοδολογία για την λήψη απόφασης με βάση τις αξίες και τους στόχους που είναι σημαντικοί για τον λήπτη των αποφάσεων. [35]

## 4.2 Η μέθοδος PROMETHEE

Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων έχει αναπτυχθεί για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων. Η ανάπτυξη αυτή συνεχίζεται (Wallenius et al. 2008) και ο αριθμός των ακαδημαϊκών δημοσιεύσεων που σχετίζονται με την MCDA αυξάνεται σταθερά.

Η μέθοδος PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), είναι μια μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης που χρησιμοποιείται για τη λήψη αποφάσεων σε πολύπλοκα προβλήματα πολλών κριτηρίων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση των προτιμήσεων και στην αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με πολλά κριτήρια. Συγκρίνονται δηλαδή οι εναλλακτικές λύσεις μεταξύ τους βάσει διαφόρων κριτηρίων και προτιμήσεων των λήπτη των αποφάσεων.

Οι μέθοδοι που ανήκουν στην οικογένεια PROMETHEE θεωρούνται σχετικά απλές μέθοδοι Πολυκριτηριακής Ανάλυσης και ανήκουν στις μεθόδους Υπεροχής. Οι μέθοδοι PROMETHEE απαιτούν τον καθορισμό μιας ορισμένης συνάρτησης προτίμησης για κάθε κριτήριο. Υπολογίζουν θετικές ροές προτίμησης οι οποίες εκφράζουν κατά πόσο μία εναλλακτική είναι η κυρίαρχη ως προς τις άλλες και

αρνητικές ροές προτίμησης οι οποίες εκφράζουν κατά πόσο κυριαρχείται μία εναλλακτική από τις άλλες. Το πρώτο στάδιο της ανάπτυξης της σχέσης υπεροχής ξεκινάει με τον προσδιορισμό του δείκτη προτίμησης (preference index)  $\pi(x_i, x_j)$  για κάθε ζεύγος εναλλακτικών δραστηριοτήτων  $x_i$  και  $x_j$ , που ορίζεται ως:

$$\pi(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^n w_k p_k(x_i, x_j)$$

$$p_k(x_i, x_j) = \begin{cases} 0, & x_{ik} < x_{jk} \\ H_k(x_{ik} - x_{jk}), & x_{ik} \geq x_{jk} \end{cases}$$

Ο μερικός δείκτης προτίμησης  $p_k(x_i, x_j)$  για το κριτήριο  $x_k$  ορίζεται σε συνάρτηση της διαφοράς  $x_{ik} - x_{jk}$  μεταξύ των επιδόσεων δύο εναλλακτικών λύσεων στο κριτήριο  $x_k$ .

Οι μέθοδοι PROMETHEE αποτελούν μεθόδους διμερούς σύγκρισης των εναλλακτικών. Συγκεκριμένα, οι εναλλακτικές οδηγούνται σε μερική κατάταξη (partial ranking) μέσω της PROMETHEE I ή σε ολική κατάταξη (complete ranking) μέσω της PROMETHEE II.

Η μέθοδος χωρίζεται σε τρία βασικά βήματα:

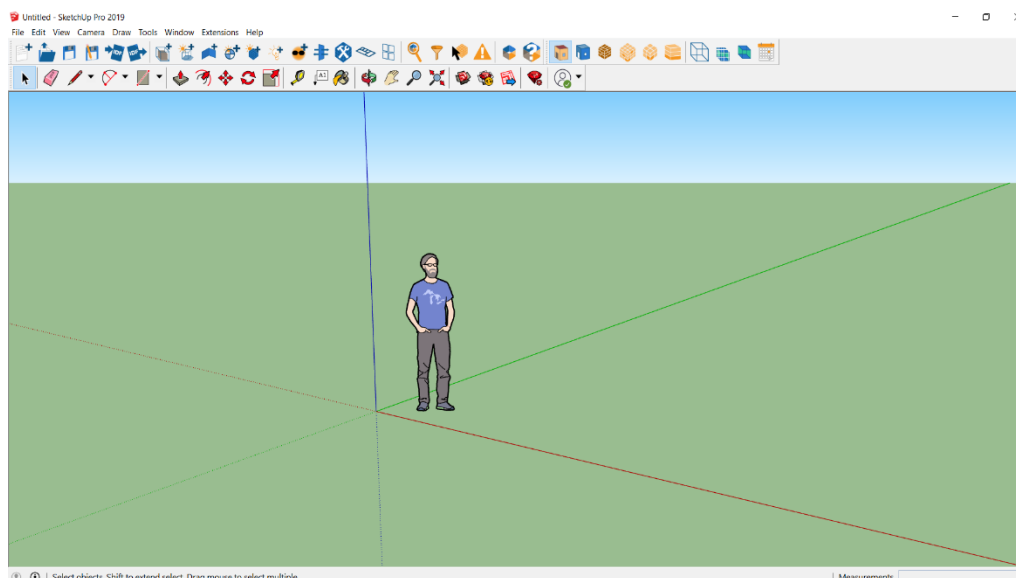
1. τον υπολογισμό των βαθμών προτίμησης για κάθε διατεταγμένο ζεύγος ενεργειών για κάθε κριτήριο,
2. τον υπολογισμό των ροών για ένα κριτήριο,
3. τον υπολογισμό των συνολικών ροών. [32]



## 5 Λογισμικά

### 5.1 Το λογισμικό SketchUp

Το Google SketchUp ή αλλιώς SketchUp κυκλοφόρησε το 2000 και είναι μια δημοφιλής εφαρμογή λογισμικού σχεδίασης 3D μοντέλων που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Last Software και αργότερα αγοράστηκε από την Google. Είναι ένα εύχρηστο και δυνατό λογισμικό που καλύπτει μία ευρεία γκάμα αναγκών σχεδιαστικής 3D, από αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και διακόσμηση εσωτερικών χώρων μέχρι τοπογραφικές διατάξεις και πρότυπα μοντελοποίησης. Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-1. Η χρήση του SketchUp για εφαρμογές που σχετίζονται με το EnergyPlus είναι ευρέως διαδεδομένη. Η συνεργασία μεταξύ των δύο προγραμμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσθήκης στο SketchUp κατάλληλου plug-in που επιτρέπει την εξαγωγή του αρχείου του κτιρίου σε μορφή αρχείου IDF, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασικό αρχείο εισόδου στο EnergyPlus. Θα πρέπει πάντα να εξασφαλίζεται η συμβατότητα του plug-in και της έκδοσης του SketchUp που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκε το plug-in Openstudio 1.13.0.



Εικόνα 5-1 Το περιβάλλον εργασίας του SketchUp.

Ο διαχωρισμός των θερμικών ζωνών είναι απαραίτητος στη μοντελοποίηση ενός κτιρίου στο SketchUp για να μπορέσει κανείς να διεξαγάγει αποτελεσματικά αναλύσεις και υπολογισμούς σχετικούς με τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου και την εσωτερική άνεση.

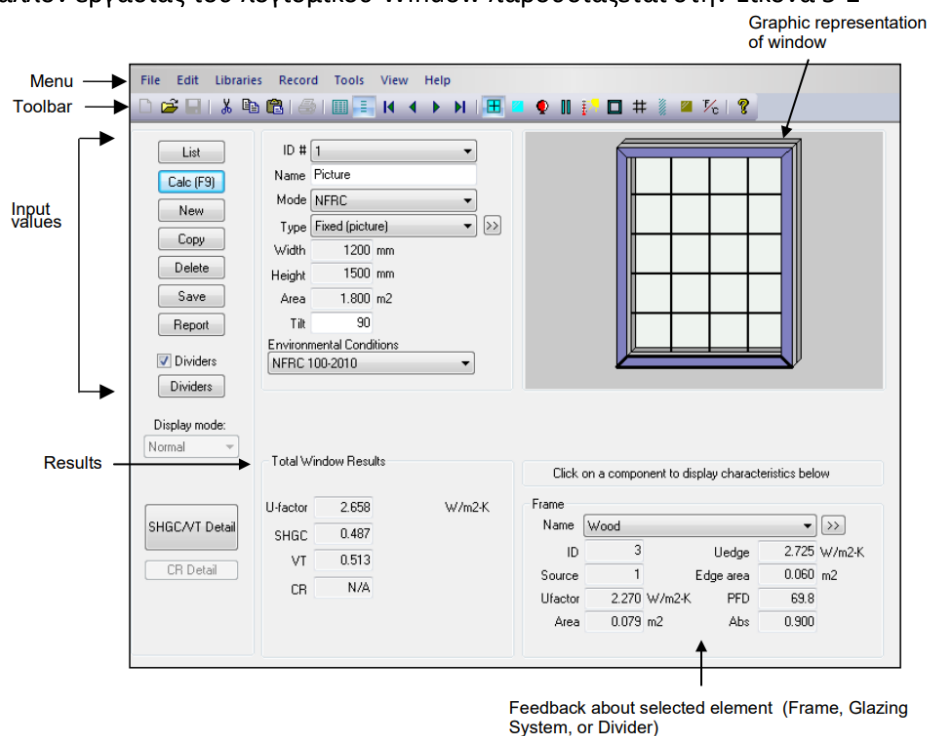
### 5.2 Το λογισμικό WINDOW

Το λογισμικό Window είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο το οποίο στηρίζεται προγραμματιστικά στο λογισμικό των Microsoft Windows και αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) των ΗΠΑ με στόχο τον εύκολο υπολογισμό των οπτικών και θερμοφυσικών ιδιοτήτων συστημάτων παραθύρων και υαλοπινάκων από επαγγελματίες, μηχανικούς και εκπαιδευτικούς φορείς.

Μεταξύ των δυνατοτήτων που προσφέρει στον χρήστη, χαρακτηριστικά αναφέρουμε:

- Την δυνατότητα υπολογισμού του ισοδύναμου συντελεστή θερμοπερατότητας (U-factor), του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC) καθώς και της ισοδύναμης οπτικής διαπερατότητας ( $T_{vis}$ ) ενός απλού ή σύνθετου συστήματος υαλοπινάκων.
- Την δυνατότητα μοντελοποίησης αρκετά σύνθετων συστημάτων υαλοπινάκων-κουφωμάτων-διαχωριστικών-παραπετασμάτων-ειδικών επιστρώσεων (π.χ Venetian blinds, roller shades, cellular/honeycomb shades, fritted glass, storm panels, applied films)
- Την δυνατότητα μοντελοποίησης με βάση τους πλέον σύγχρονους αλγορίθμους, οι οποίοι είναι συμβατοί με τα πρότυπα ASHRAE SPC142 και ISO 15099.
- Την δυνατότητα παρουσίασης ολοκληρωμένου θερμικού χάρτη.
- Την δυνατότητα επεξεργασίας αρχείων προγραμμάτων άλλων λογισμικών θερμικών ή οπτικών υπολογισμών (THERM, RESFEN, AERCalc, IGBD κ.α) και εξαγωγής αντίστοιχων επεξεργάσιμων αρχείων (πχ την δυνατότητα εξαγωγής αρχείου .idf για την επεξεργασία από το EnergyPlus).
- Τον μεγάλο όγκο δεδομένων για τα τυποποιημένα στοιχεία (υλικά, διατάξεις υαλοπινάκων κ.α) που δίνεται από τις βιβλιοθήκες του προγράμματος. [36]

Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Window παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-2



Εικόνα 5-2 Περιβάλλον εργασίας λογισμικού Window

Η διαδικασία κατασκευής ξεκινάει από το Glazing System Library (F5) στο οποίο πρέπει να εισαχθεί ένα όνομα και ο αριθμός των στρώσεων γυαλιού και να οριστούν οι συνθήκες περιβάλλοντος. Επιλέχθηκε το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 673:2011. [37]

Κάθε παράθυρο σχεδιάζεται ως ένα σύνολο από διαδοχικά στρώματα γυαλιού και διακένων με κατάλληλο αέριο. Οι επιλογή τύπου γυαλιού και αερίου γίνεται μέσω της βιβλιοθήκης του WINDOW μαζί με τις οπτικές και θερμικές ιδιότητες, αλλά και το πάχος των επιμέρους στρώσεων γυαλιού που χρησιμοποιούνται για τη δόμηση των παραθύρων. Το λογισμικό WINDOW καθορίζει επιπλέον το πλαίσιο και τα διαχωριστικά του παραθύρου. Τέλος, υπολογίζει τις ιδιότητες του παραθύρου μέσω του Calc (F9) και μέσω του Report εξάγει τα αποτελέσματα σε μορφή .idf αρχείου για εισαγωγή στο EnergyPlus.

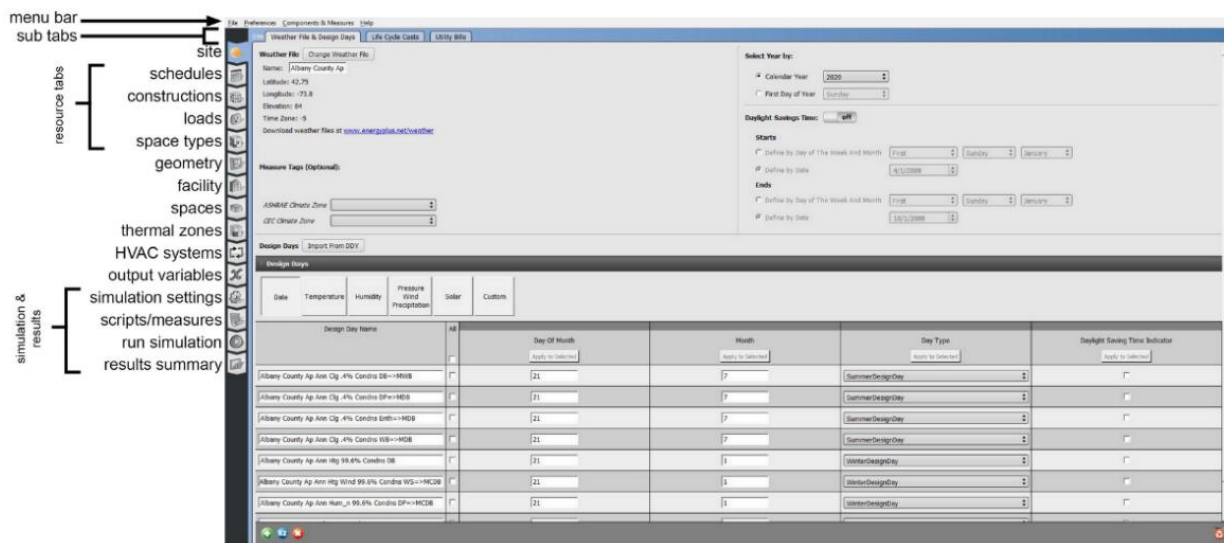
### 5.3 Το λογισμικό OpenStudio

Το OpenStudio, Εικόνα 5-3 είναι ένα ανοιχτού κώδικα λογισμικό προσομοίωσης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό, την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, επιτρέποντας στους χρήστες να αναλύσουν πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και την άνεση των ανθρώπων μέσα στο κτίριο. Αν και δημιουργήθηκε αρχικά για την προσομοίωση κτιρίων με το λογισμικό EnergyPlus, το OpenStudio παρέχει ένα πιο χρήσιμο και ευέλικτο περιβάλλον εργασίας.

Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά και λειτουργίες του OpenStudio περιλαμβάνουν:

1. **Σχεδιασμός Κτιρίων:** Το OpenStudio διαθέτει γραφικό περιβάλλον όπου οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν το σχέδιο ενός κτιρίου, περιλαμβάνοντας τους χώρους, τους διαχωριστικούς τοίχους, τα παράθυρα, τα συστήματα HVAC και άλλα.
2. **Προσομοίωση Ενεργειακής Απόδοσης:** Οι χρήστες μπορούν να προσομοιώσουν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου τους, αξιολογώντας την κατανάλωση ενέργειας, τις θερμοκρασίες εντός του χώρου και άλλες ενδείξεις.
3. **Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού:** Οι χρήστες μπορούν να αναζητήσουν βέλτιστες λύσεις για την ενεργειακή απόδοση, τροποποιώντας διάφορες παραμέτρους του κτιρίου και των συστημάτων.
4. **Ανάλυση Ενέργειας:** Το λογισμικό παρέχει λεπτομερείς αναλύσεις για την κατανάλωση ενέργειας, τις ημερήσιες και ετήσιες εκτιμήσεις, και τις αναλύσεις των διαφόρων συστημάτων.
5. **Εξαγωγή Αποτελεσμάτων:** Οι χρήστες μπορούν να εξαγάγουν αναλυτικά αποτελέσματα και γραφήματα για την ενεργειακή απόδοση και την άνεση των ανθρώπων.
6. **Συμβατότητα με Άλλα Εργαλεία:** Το OpenStudio είναι συμβατό με διάφορα άλλα λογισμικά, συμπεριλαμβανομένου του EnergyPlus, για προηγμένες αναλύσεις ενεργειακής απόδοσης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση OpenStudio 1.13.0 η οποία είναι συμβατή με την αντίστοιχη έκδοση του SketchUp 2019 με σκοπό το σχεδιασμό των Η/Μ συστημάτων του κτιρίου που μελετάμε.



Εικόνα 5-3 Περιβάλλον εργασίας λογισμικού OpenStudio

Το OpenStudio δίνει τη δυνατότητα να εισαχθεί ένα idf αρχείο το οποίο περιέχει ήδη όλα τα δεδομένα για του κτιριακού κελύφους και έτσι απομένει μόνο ο σχεδιασμός των συστημάτων ψύξης, θέρμανσης και αερισμού. .

#### 5.4 Το λογισμικό ENERGYPLUS (EP)+

Το EP είναι ένα από τα βασικότερα προγράμματα ενεργειακής ανάλυσης, προσομοίωσης και υπολογισμού των θερμικών φορτίων αλλά και άλλων ενεργειακών καταναλώσεων μίας θερμικής εγκατάστασης ή ενός κτιρίου. Βασίζεται στη ταυτόχρονη λειτουργία πολλών υποπρογραμμάτων τα οποία έχουν σαν σκοπό να υπολογίσουν μια πληθώρα μεταβλητών όπως τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης και ψύξης για την θερμική ισορροπία του κτιρίου, οι θερμοκρασίες των θερμικών ζωνών και των επιφανειών, η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου κλπ. Οι πληροφορίες οι οποίες απαιτούνται για την εκκίνηση της προσομοίωσης θα πρέπει να εισαχθούν από τον χρήστη και αφορούν την αναλυτική περιγραφή των γεωμετρικών και δομικών χαρακτηριστικών του κτιρίου καθώς επίσης και των συστημάτων ψύξης, θέρμανσης και κλιματισμού (HVAC Systems-Heating Ventilation and Air-condition Systems). Για την υλοποίηση της κτηριακής προσομοίωσης το Energy Plus παρέχει, μεταξύ άλλων, τα υποπρογράμματα: IDF Editor και EP-Launch τα οποία αντίστοιχα εξυπηρετούν στη δημιουργία/επεξεργασία αρχείων εισόδου και την εκτέλεση προσομοιώσεων. Η προσομοίωση όπως επίσης και οι υπολογισμοί στηρίζονται στις θεμελιώδεις αρχές της μεταφοράς θερμότητας. Πρόκειται επίσης για ένα ελεύθερο λογισμικό (freeware), ανοιχτού κώδικα (open source) και ανεξάρτητο πλατφόρμας (cross-platform) υλοποιημένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++ (ή στην Fortran90 σε παλαιότερες εκδόσεις) , το οποίο εκδόθηκε από το τμήμα ενέργειας της Αμερικάνικης κυβέρνησης το 2001 και έχει τις ρίζες του στα προγεννέστερα προγράμματα BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) και DOE-2. Τα προγράμματα αυτά αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του '70 ως εργαλεία ενεργειακής προσομοίωσης, με σκοπό να συμβάλουν στην σχεδίαση κτιρίων και εγκαταστάσεων με βελτιστοποιημένη ενεργειακή απόδοση και μάλιστα σε μία περίοδο έντονης ανησυχίας για το ενεργειακό ζήτημα όπως αυτό διαμορφώθηκε μετά την πετρελαϊκή κρίση των αρχών του '70. Πολλά από τα χαρακτηριστικά του EP στηρίζονται στα δύο αυτά προγράμματα, αλλά προφανώς πρόκειται για μία βελτιωμένη έκδοση η οποία υπερβαίνει τις ελλειμματικές των προκατόχων της (πολυπλοκότητα στον κώδικα, αδυναμία ανατροφοδότησης με τα συστήματα HVAC και τις συνθήκες των θερμικών ζωνών, διαδοχικές προσομοιώσεις χωρίς την δυνατότητα ανάδρασης, χρήση απαρχαιωμένης γλώσσας προγραμματισμού κ.α).

Μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρει το EnergyPlus είναι οι ακόλουθες:

- Ολοκληρωμένη, ταυτόχρονη επίλυση κατά την οποία η απόκριση του κτιρίου και τα κύρια και δευτερεύοντα συστήματα είναι σφικτά συζευγμένα. Όταν είναι αναγκαίο, πραγματοποιούνται επαναλήψεις.
- Χρονικά βήματα, υποπολλαπλάσια της ώρας, που καθορίζονται από τον χρήστη (με προεπιλεγμένη τιμή τα 15 λεπτά) για την αλληλεπίδραση μεταξύ των θερμικών ζωνών και του περιβάλλοντος. Μεταβλητά χρονικά βήματα για αλληλεπιδράσεις μεταξύ των θερμικών ζωνών και των συστημάτων HVAC, τα οποία μεταβάλλονται αυτόματα για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της λύσης.
- Χρήση αρχείων καιρού, εισόδου και εξόδου σε μορφή κειμένου ASCII που περιλαμβάνουν σε ωριαία ή συχνότερη βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις τυποποιημένες και προσδιορισμένες από τον χρήστη αναφορές αντίστοιχα.
- Μέθοδος επίλυσης βασισμένη στον ισολογισμό θερμότητας του κτιρίου που επιτρέπει ταυτόχρονο υπολογισμό των επιδράσεων της ακτινοβολίας και της συναγωγής, τόσο στις εσωτερικές όσο και στις εξωτερικές επιφάνειες σε κάθε χρονικό βήμα.

- Αγωγή θερμότητας σε μεταβατική κατάσταση μέσω των δομικών στοιχείων, όπως τοίχοι, οροφές, δάπεδα κ.λπ. χρησιμοποιώντας κατάλληλες συναρτήσεις μεταφοράς θερμότητας.
- Βελτιωμένη μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος μέσω συνδέσεων με τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και απλουστευμένες αναλυτικές τεχνικές.
- Συνδυασμένο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας που υπολογίζει την απορρόφηση/εκρόφηση είτε μέσω της ενσωμάτωσης κάθε στρώματος στις συναρτήσεις μεταφοράς θερμότητας με αγωγή είτε μέσω ενός αποτελεσματικού μοντέλου βάθους διείσδυσης υγρασίας (Effective Moisture Penetration Depth Model-EMPD).
- Μοντέλα θερμικής άνεσης που βασίζονται στη δραστηριότητα, την εσωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού, την υγρασία κ.λπ.
- Προηγμένοι υπολογισμοί υαλοπινάκων, συμπεριλαμβανομένων ελεγχόμενων περσίδων παραθύρων, ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, ισολογισμών θερμότητας σε κάθε διαδοχικό στρώμα που επιτρέπουν τον σωστό υπολογισμό της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από τους υαλοπίνακες.
- Έλεγχος φωτισμού ημέρας (daylight control), συμπεριλαμβανομένων υπολογισμών φωτισμού εσωτερικού χώρου, προσομοίωσης και ελέγχου θάμβωσης, ελέγχου φωτιστικών και υπολογισμού της επίδρασης του μειωμένου τεχνητού φωτισμού στη θέρμανση και την ψύξη.
- Συστήματα HVAC (συμβατικά και λαμβάνοντας υπόψη την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας) που βασίζονται σε επαναληπτικό υπολογισμό και επιτρέπουν 79 στους χρήστες να μοντελοποιούν τυπικά και ελαφρώς τροποποιημένα συστήματα χωρίς να ανασυνθέτουν τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος.
- Υπολογισμοί ατμοσφαιρικής ρύπανσης με ικανότητα πρόβλεψης των σωματιδίων CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO και της παραγωγής υδρογονανθράκων τόσο για την επιτόπια όσο και για την απομακρυσμένη μετατροπή ενέργειας.
- Δυνατότητα σύνδεσης με άλλα δημοφιλή περιβάλλοντα προσομοίωσης και εργαλεία όπως το WINDOW και το DElight με σκοπό την λεπτομερέστερη ανάλυση των συστατικών στοιχείων του κτιρίου [38]

Το EnergyPlus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μίας ενεργειακής προσομοίωσης κτηρίου μέσω της άμεσης προσέγγισης. Περιληπτικά, τα βήματα που θα πρέπει να ακολουθηθούν για τη δημιουργία και τη χρήση ενός τέτοιου μοντέλου είναι τα ακόλουθα:

1. Απόκτηση των δεδομένων που αφορούν τον σχεδιασμό του κτιρίου (διαστάσεις, μορφή, προσανατολισμός κ.α.)
2. Σχεδιασμός του κτιρίου με τη βοήθεια κατάλληλου σχεδιαστικού προγράμματος που μπορεί να συζευχθεί με το EnergyPlus και εξαγωγή του αντίστοιχου αρχείου IDF
3. Απόκτηση των δεδομένων που αφορούν την κατασκευή του κτιρίου (υλικά κατασκευής, θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες) και ενσωμάτωσή τους μέσω του EnergyPlus
4. Απόκτηση των αρχείων κλιματικών δεδομένων που αφορούν την περιοχή που βρίσκεται το υπό μελέτη κτίριο και των γεωγραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής (γεωγραφικό μήκος και πλάτος, ζώνη ώρας και υψόμετρο) και ενσωμάτωσή τους στο αρχείο
5. Επιλογή του τύπου και των χαρακτηριστικών του συστήματος HVAC και καθορισμός των απαραίτητων ρυθμίσεων λειτουργίας του
6. Καθορισμός των διαφόρων «προγραμμάτων λειτουργίας του κτιρίου» που μπορεί να αφορούν τη συμπεριφορά των ενοίκων, τη λειτουργία των συστημάτων φωτισμού και του ηλεκτρικού εξοπλισμού κ.ά.
7. Επιλογή των επιθυμητών μεταβλητών εξόδου και του χρονικού βήματος υπολογισμού
8. Εκτέλεση της ενεργειακής προσομοίωσης για την επιθυμητή χρονική περίοδο

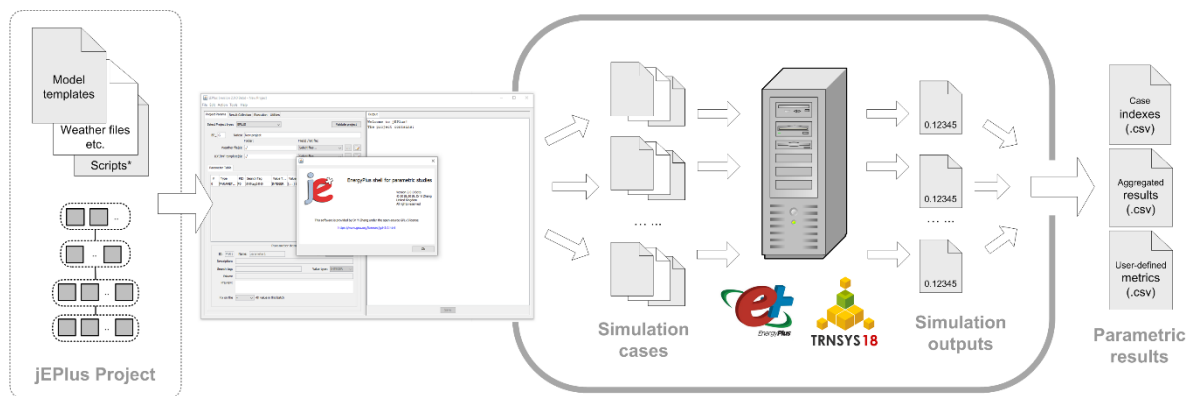
## 9. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας

Η έκδοση του λογισμικού EnergyPlus που χρησιμοποιήθηκε είναι η 23.1.

### 5.5 Το λογισμικό JEPlus

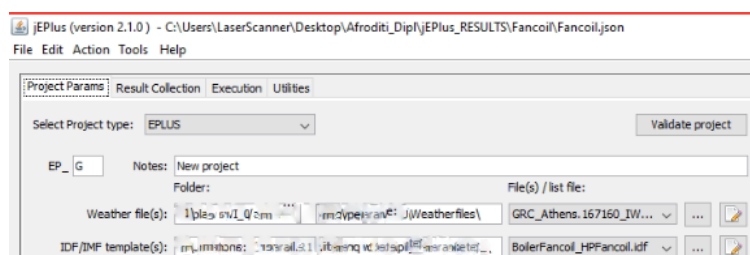
Το JEPlus είναι ένα λογισμικό παραμετροποίησης που σχετίζεται με το EnergyPlus. (Εικόνα 5-4) Το JEPlus αποτελεί ένα πρόσθετο εργαλείο για το EnergyPlus που επιτρέπει να εκτελεστούν αυτοματοποιημένες παραμετρικές αναλύσεις. Συνήθως, οι αναλύσεις αυτού του είδους αφορούν τη δοκιμή ποικίλων σεναρίων με διαφορετικές παραμέτρους, όπως μοντέλα μόνωσης, συστήματα θέρμανσης και ψύξης, παράθυρα κ.λπ., προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στην ενεργειακή απόδοση του κτηρίου. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι χρονοβόρα με το να JEPlus διευκολύνεται η εκτέλεση αυτών των αναλύσεων.

Με το JEPlus, μπορούν να καθοριστούν μια σειρά παραμέτρων για παραμετροποίηση, να καθοριστούν οι τιμές τους με το λογισμικό να εκτελεί αυτόματα πλέον όλες τις αναλύσεις συλλέγοντας ταυτοχρόνως τα αποτελέσματα.



Εικόνα 5-4 Λειτουργία JEPlus

Ξεκινώντας τη λειτουργία του JEPlus (Εικόνα 5-5), ορίζεται το αρχείο καιρού που θα χρησιμοποιηθεί όπως και το αρχείο idf του EnergyPlus στο οποίο ορίζονται οι μεταβλητές που πρόκειται να θα παραμετροποιηθούν.



Εικόνα 5-5 Αρχική σελίδα JEPlus

## 6 Μελέτη περίπτωσης

Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων (building energy simulation) ονομάζεται η χρήση μεθόδων και μοντέλων προσομοίωσης με την βοήθεια κατάλληλων λογισμικών Η/Υ για την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου. Πρόκειται για μία ολοκληρωμένη υπολογιστική διαδικασία η οποία προσφέρει μια προσεγγιστική εικόνα της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου σε πραγματικές συνθήκες. Οι βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για την εκκίνηση των λογισμικών αυτών αναφέρονται παρακάτω:

- Τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής του κτιρίου (weather file data) στα οποία περιλαμβάνονται η θερμοκρασία, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου, η ατμοσφαιρική πίεση, κ.α., ιδανικά θα πρέπει να αναφέρονται στην περίοδο ενός χρόνου και οι τιμές τους να έχουν κατά το δυνατόν ελάχιστο βήμα (π.χ. ωριαίο)
- Τα χαρακτηριστικά του κτηριακού κελύφους (γεωμετρία, προσανατολισμός, κατασκευή) με τον παράλληλο διαχωρισμό του κτιρίου σε θερμικές ζώνες (thermal zones) και τον ορισμό χρονικού προγράμματος λειτουργίας (Schedules) για:
  - Τα εσωτερικά θερμικά κέρδη από τις εγκατεστημένες ηλεκτρικές συσκευές, τον τεχνητό φωτισμό, τους ανθρώπους
  - Την ανανέωση του αέρα του εσωτερικού χώρου με φυσικό αερισμό (ventilation) αλλά και την διείσδυση ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικό (infiltration)
- Τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC Systems Heating Ventilation and Air-condition Systems) και τις επιθυμητές συνθήκες στο εσωτερικό που καθορίζουν την λειτουργία τους.
- Την τυχούσα ύπαρξη άλλων ενεργειακών συστημάτων (πχ ενεργειακά ηλιακά σύστημα)
- Τις διάφορες παραμέτρους που καθορίζουν την λειτουργία και τους υπολογισμούς του λογισμικού, την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την επικοινωνία με τον χρήστη . Ο μηχανισμός προσομοίωσης περιλαμβάνει την ανάλυση τεσσάρων αλληλοεπηρεαζόμενων βασικών μοντέλων: το μοντέλο του κτηριακού κελύφους, το μοντέλο του συστήματος κλιματισμού, το μοντέλο εγκαταστάσεων κλιματισμού που προκύπτει και το μοντέλο αυτομάτου ελέγχου.

### 6.1 Γεωμετρία κτιρίου

Το υπό μελέτη κτήριο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-1 και προσομοιώνεται ως ένα μικρό γραφείο. Τα χαρακτηριστικά του κτηρίου αποτυπώνονται στον Πίνακα 6-1. Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ), ορίζονται οι συνθήκες λειτουργίας του κτηρίου ενώ καθορίζονται επίσης και οι επιθυμητές εσωτερικές συνθήκες των χώρων. Το κτήριο βρίσκεται εντός του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην περιοχή της Αθήνας, συνεπώς σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Β'. [19]





Εικόνα 6-1 Εξωτερική πρόσοψη του υπό μελέτη κτηρίου

Πίνακας 6-1 Περιγραφή του υπό μελέτη κτηρίου

Περιγραφή	Τιμές
Τύπος	Γραφείο
Τοποθεσία	Αθήνα
Επιφάνεια δαπέδων	65,03 m <sup>2</sup>
Επιφάνεια οροφής	65,03 m <sup>2</sup>
Επιφάνεια τοιχοποιίας	107,03 m <sup>2</sup>
Επιφάνεια παραθύρων	7,05 m <sup>2</sup>

### 6.1.1 Διαχωρισμός του κτιρίου σε θερμικές ζώνες

Ο σκοπός κάθε συστήματος θέρμανσης ή κλιματισμού είναι η επίτευξη θερμικής άνεσης στους χώρους διαμονής και δραστηριότητας των χρηστών κάθε κτιρίου. Η θερμική άνεση επηρεάζεται από μία σειρά παραμέτρων και συνθηκών, οι σημαντικότερες των οποίων είναι: [19]

- Η θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα
- Η ένδυση και δραστηριότητα των χρηστών
- Η ταχύτητα των εσωτερικών ρευμάτων αέρα

Μέσω της μοντελοποίησης και προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου είναι δυνατό να ελεγχθεί ότι εξασφαλίζονται οι απαραίτητες συνθήκες άνεσης για τους ενοίκους σε όλη τη διάρκεια του έτους, αλλά και να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή του απόδοση.

Κάθε κτίριο μπορεί να χωριστεί σε διάφορες θερμικές ζώνες, οι οποίες περιγράφουν περιοχές με διαφορετικά ενεργειακά χαρακτηριστικά. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω διαφορετικών χρήσεων, διατάξεων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κτιρίου. Κάποια παραδείγματα θερμικών ζωνών μπορεί να είναι:

1. Εσωτερικοί χώροι: Οι εσωτερικοί χώροι όπως γραφεία, αίθουσες συνεδριάσεων και αίθουσες παραγωγής μπορεί να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά θερμικής άνεσης.
2. Εξωτερικές επιφάνειες: Οι εξωτερικές τοιχοποιίες, παράθυρα και πόρτες είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.
3. Εσωτερικές διαχωριστικές επιφάνειες: Οι εσωτερικοί τοίχοι, κατασκευές και πόρτες που χωρίζουν τους εσωτερικούς χώρους μπορεί να επηρεάσουν τη ροή της θερμότητας.

Με τον διαχωρισμό των θερμικών ζωνών, μπορεί κανείς να εφαρμόσει διαφορετικά υλικά, μόνωση, τύπους γυάλινων επιφανειών κ.λπ. για κάθε ζώνη. Αυτό επιτρέπει να διεξαχθούν ενεργειακοί



υπολογισμοί και μοντελοποιήσεις προσομοιώσεων για κάθε ζώνη ξεχωριστά, προσφέροντας πιο ακριβή αποτελέσματα και εντοπίζοντας πιθανά προβλήματα που θα μπορούσαν να προκύψουν μετά την κατασκευή του κτιρίου.

Επίσης, ο διαχωρισμός των θερμικών ζωνών είναι απαραίτητος για την εφαρμογή των διαφόρων κανονιστικών και πιστοποιητικών προτύπων που αφορούν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, όπως σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. και το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13790:2009.

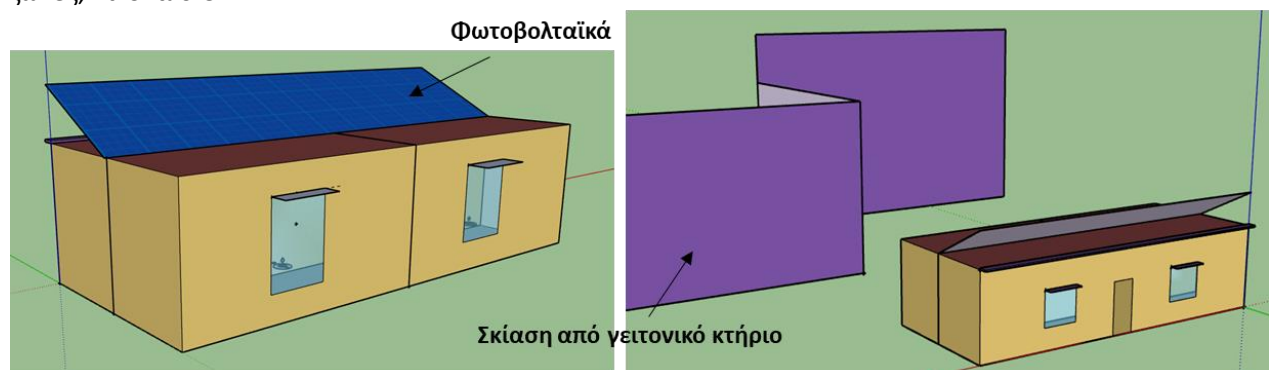
Στα περισσότερα κτηριακά μοντέλα συνιστάται ο διαχωρισμός του κτιρίου στον ελάχιστο δυνατό αριθμό θερμικών ζωνών, προκειμένου να επιτυγχάνεται οικονομία στο πλήθος των δεδομένων εισόδου και στον υπολογιστικό χρόνο. [19]

Στην παρούσα εργασία αποφασίστηκε ο διαχωρισμός του κτηριακού μοντέλου σε τρεις θερμικές ζώνες (Πίνακας 6-2), αντίστοιχες με τους ξεχωριστούς χώρους του κτηρίου.

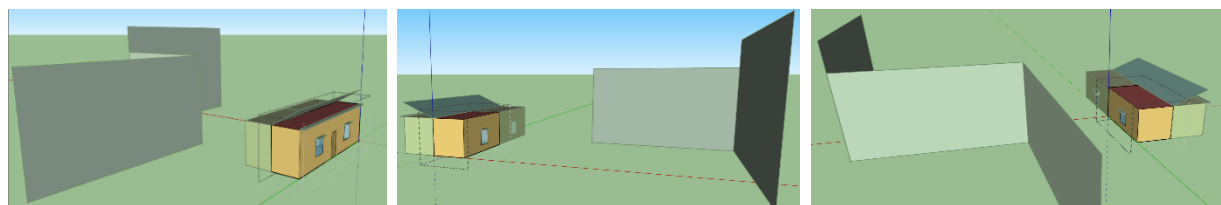
Πίνακας 6-2 Θερμικές Ζώνες κτηρίου

	Επιφάνεια (m <sup>2</sup> )
Θερμική Ζώνη 1	32.51
Θερμική Ζώνη 2	16.26
Θερμική Ζώνη 3	16.26
Σύνολο	65.03

Ο σχεδιασμός του κτηριακού μοντέλου πραγματοποιείται μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος SketchUp 2019, και παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-2. Το κτήριο χωρίζεται συνολικά σε τρεις θερμικές ζώνες, Εικόνα 6-3.



Εικόνα 6-2 Προσομοίωση κτηρίου στο SketchUp.



Εικόνα 6-3 Θερμικές Ζώνες

### 6.1.2 Σχεδιασμός της γεωμετρίας του κτηριακού κελύφους

Μετά από τη δημιουργία κάθε θερμικής ζώνης μέσω του κατάλληλου εργαλείου του SketchUp, οι επιμέρους χώροι κάθε ορόφου σχεδιάζονται ως ορθογώνιοι παραλληλεπίπεδοι χώροι στο εσωτερικό της αντίστοιχης θερμικής ζώνης. Σχεδιάστηκαν όλοι οι χώροι με ύψος 3.273 m. Η θερμική ζώνη 1

σχεδιάζεται με μήκος 12.48m και πλάτος 2.60m και έναν πρόβολο στην οροφή με μήκος 0.32m προς τα έξω. Οι θερμικές ζώνες 2 και 3 σχεδιάζονται με μήκος 6.24m και πλάτος 2.60m. Μετά από τον σχεδιασμό των εξωτερικών τοίχων, της οροφής και των δαπέδων σχεδιάζονται η πόρτα και τα παράθυρα στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου. Η πόρτα τοποθετείται στο κέντρο της βόρειας πρόσοψης του κτηρίου με μήκος 0.86m και πλάτος 2.02m. Συνολικά σχεδιάζονται 4 υαλοπίνακες στο κτηριακό κέλυφος. Στη βόρεια πρόσοψη είναι τοποθετημένα δύο δίφυλλα παράθυρα με συνολικό μήκος 1.363m και ύψος 1.35m σε απόσταση 1.73m δεξιά και αριστερά της πόρτας αντίστοιχα. Στη νότια πρόσοψη είναι τοποθετημένα δύο μονόφυλλα παράθυρα με ίδιο μήκος και πλάτος με τα δίφυλλα παράθυρα. Σχεδιάζονται και 4 πρόβολοι αντίστοιχα για κάθε παράθυρο με μήκος 0.32m προς τα έξω. Ακόμα, σχεδιάζονται εσωτερικές πόρτες που συνδέουν τους χώρους του κτηρίου που ανήκουν σε διαφορετικές θερμικές ζώνες. Οι πόρτες αυτές έχουν ίδιες διαστάσεις με την εξωτερική πόρτα και τοποθετήθηκαν στο κέντρο των θερμικών ζωνών 2 και 3.

Επιπλέον, σχεδιάστηκε μια επιφάνεια σκίασης απέναντι από τη νότια πρόσοψη του κτηρίου και σε απόσταση 7.4m από αυτήν προσομοιώνοντας έτσι το κτήριο που βρίσκεται απέναντι από το υπό μελέτη κτήριο που έχουμε.

## 6.2 Υλικά – Κέλυφος

### 6.2.1 Στοιχείων του κτηριακού κελύφους

Στα πλαίσια της προσομοίωσης του κτηρίου, πρέπει να καθοριστεί η δομή όλων των επιφανειών του κτηριακού κελύφους, δηλαδή των εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων, της οροφής, του δαπέδου, των εσωτερικών πορτών που συνδέουν τις τρεις θερμικές ζώνες, της εξωτερικής πόρτας και των 4 παραθύρων.

Τα στρώματα υλικών παρουσιάζονται με τη μορφή λίστας, ξεκινώντας από το εξωτερικό στρώμα και προχωρώντας προς το εσωτερικό (Πίνακας 6-3).

Πίνακας 6-3 Δομή επιφανειών κτηριακού κελύφους

	Εξωτερικός τοίχος	Εσωτερικός τοίχος	Οροφή	Δάπεδο
<b>Εξωτερικό στρώμα</b>	Επίχρισμα	Επίχρισμα	Κυματοειδής πάνελ οροφής	Γυψοσανίδα
<b>Στρώμα 2</b>	EPS /MW	Γυψοσανίδα	Υγρομόνωση	Πολυουρεθάνη
<b>Στρώμα 3</b>	Τσιμεντοσανίδα	Πολυουρεθάνη	EPS / MW	EPS /MW
<b>Στρώμα 4</b>	Ατσάλι	Γυψοσανίδα	Πολυουρεθάνη	Στρώση ενδοδαπέδιας θέρμανσης
<b>Στρώμα 5</b>	Πολυουρεθάνη	Επίχρησμα	OSB	Γυψοσανίδα
<b>Στρώμα 6</b>	OSB		Γυψοσανίδα	Πλακάκι
<b>Στρώμα 7</b>	Γυψοσανίδα			

Επιπλέον, πρέπει να οριστούν τα στρώματα υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων, της οροφής και του δαπέδου. Για κάθε στρώμα υλικού θα πρέπει να οριστεί το πάχος του, η ειδική θερμική αγωγιμότητά του, η πυκνότητά του και η ειδική θερμοχωρητικότητά του.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο είδη θερμομονωτικών υλικών, η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και ο πετροβάμβακας (MW). Επιπλέον, εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις πάχους της μόνωσης, τα 5, 10, 15 και 20 εκατοστά αντίστοιχα και γι' αυτό το πεδίο αυτό έμεινε κενό στον Πίνακα 6-4.

Πίνακας 6-4 Σύσταση δομικών στοιχείων κτηρίου

Όνομα	Επίχρισμα	Τσιμέντο	EPS	MW	Ατσάλι	Πολυουρεθάνη	OSB	Γύψος
<b>Πάχος (m)</b>	0.004	0.012			0.000028	0.05	0.012	0.012
<b>Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)</b>	0.87	0.16	0.035	0.035	50	0.25	0.13	0.18
<b>Πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>)</b>	150	600	21	127	7800	1200	650	600
<b>Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK)</b>	1000	1090	1250	850	450	1800	1700	1000

### 6.3 Υαλοπίνακες

Στο υπό μελέτη κτήριο χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις περιπτώσεις παραθύρων. Οι πρώτες δύο περιπτώσεις αφορούν διπλούς και τριπλούς απλούς υαλοπίνακες πάχους 4mm. Η πλήρωση των διάκενων αερίου έγιναν με αργό 90% και πάχους 16mm. Οι επόμενες δύο περιπτώσεις αφορούν διπλούς και τριπλούς ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες πάχους 3.85mm, με μονή ή διπλή επίστρωση υαλοπίνακα χαμηλής εκπομπής (low-e), πάχους 1cm αντίστοιχα. Η πλήρωση των διάκενων σ αυτές τις περιπτώσεις έγιναν με αργό 95%, πάχους 20mm.

#### 6.3.1 Υλικά κατασκευής υαλοπινάκων

Κάθε παράθυρο σχεδιάζεται ως ένα σύνολο από διαδοχικά στρώματα γυαλιού και διακένων με κατάλληλο αέριο (Πίνακας 6-5). Επιπλέον, με τη βοήθεια του λογισμικού WINDOW καθορίζονται οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες, αλλά και το πάχος των επιμέρους στρώσεων γυαλιού που χρησιμοποιούνται για τη δόμηση των παραθύρων.

Πίνακας 6-5 Δομή υαλοπινάκων για κάθε περίπτωση μελέτης

	2-πλα	3-πλα	2-πλα EC	3-πλα EC
<b>1<sup>η</sup> επίστρωση</b>	Καθαρό Τζάμι	Καθαρό Τζάμι	Ηλεκτροχρωμικό Τζάμι	Ηλεκτροχρωμικό Τζάμι
<b>1<sup>ο</sup> διάκενο</b>	Αργό 90%	Αργό 90%	Αργό 95%	Αργό 95%
<b>2<sup>η</sup> επίστρωση</b>	Καθαρό Τζάμι	Καθαρό Τζάμι	Low_E Τζάμι	Low_E Τζάμι
<b>2<sup>ο</sup> διάκενο</b>		Αργό 90%		Αργό 95%
<b>3<sup>η</sup> επίστρωση</b>		Καθαρό Τζάμι		Low_E Τζάμι

#### 6.3.2 Πλαίσια παραθύρων

Ένα πλαίσιο περιβάλλει τον υαλοπίνακα σε ένα παράθυρο. Θεωρείται ότι όλα τα χαρακτηριστικά του πλαισίου -όπως το πλάτος, η αγωγιμότητα και η ηλιακή απορροφητικότητα- είναι τα ίδια για τα άνω,

κάτω και πλευρικά στοιχεία του πλαισίου. Τα δεδομένα αυτά βρέθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού WINDOW.

### 6.3.3 Σκίαση παραθύρων

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των παραθύρων είναι απαραίτητο να οριστεί κάποιου είδους σκίαση είτε εξωτερική ("exterior shades"), είτε εσωτερική ("interior shades"), είτε μεταξύ των υαλοπινάκων ("between-glass shades") και να καθοριστούν οι ιδιότητες της. Οι ιδιότητες ανάκλασης και εκπομπής θεωρούνται ίδιες και στις δύο πλευρές του σκιάστρου. Τα σκιάστρα θεωρούνται τέλειοι διαχυτές (όλη η εκπεμπόμενη και ανακλώμενη ακτινοβολία είναι ημισφαιρικά διάχυτη) με διαπερατότητα και ανακλαστικότητα ανεξάρτητες από τη γωνία πρόσπτωσης. Όταν βρίσκεται στη θέση του, το σκιάστρο θεωρείται ότι καλύπτει όλον τον υαλοπίνακα του παραθύρου, συμπεριλαμβανομένων των διαχωριστικών, αλλά δεν καλύπτει το πλαίσιο του παραθύρου, εάν υπάρχει. Το επίπεδο του σκιάστρου θεωρείται ότι είναι παράλληλο με το τζάμι. [39]

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε εσωτερική σκίαση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-4 της αντίστοιχης καρτέλας του λογισμικού EnergyPlus.

Field	Units	Obj1
Name		Roller Shade
Solar Transmittance	dimensionless	0.05
Solar Reflectance	dimensionless	0.5
Visible Transmittance	dimensionless	0.05
Visible Reflectance	dimensionless	0.8
Infrared Hemispherical Emissivity	dimensionless	0.9
Infrared Transmittance	dimensionless	0
Thickness	m	0.003
Conductivity	W/m-K	0.1
Shade to Glass Distance	m	0.05
Top Opening Multiplier		0.15
Bottom Opening Multiplier		0.15
Left-Side Opening Multiplier		0
Right-Side Opening Multiplier		0
Airflow Permeability	dimensionless	

Εικόνα 6-4 Καρτέλα WindowMaterial:Shade

## 6.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η χρήση αποδοτικών ενεργειακών συστημάτων, έχει ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, την εξασφάλιση συνθηκών άνεσης αλλά και την πλήρη αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού για κάθε κτήριο σε κάθε τόπο. Η μέγιστη αξιοποίηση του δυναμικού μέσω ενός βέλτιστου συνδυασμού τεχνολογιών και συστημάτων, επιφέρει ιδιαίτερη μείωση στις ενεργειακές ανάγκες ενός κτηριακού συνόλου. Παράλληλα, μειώνεται η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων για θέρμανση, ψύξη, αερισμό και φωτισμό, με αποτέλεσμα την μικρότερη διαστασιολόγησή τους, μείωση στο κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, μειωμένο ηλεκτρικό φορτίο αιχμής κατά τη διάρκεια περιόδων με ιδιαίτερα δύσκολα καιρικά φαινόμενα, και ταυτόχρονη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από ρύπους σε επίπεδο κτηρίου και σε επίπεδο δικτύου.

Οι χώροι του κτηρίου, καθορίζουν τις ενεργειακές ανάγκες. Με τα απαραίτητα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, θα πρέπει να εξασφαλίζονται οι κατάλληλες συνθήκες θερμικής άνεσης σε ότι αφορά, την θερμοκρασία, την υγρασία, τον αερισμό αλλά και τον φωτισμό.

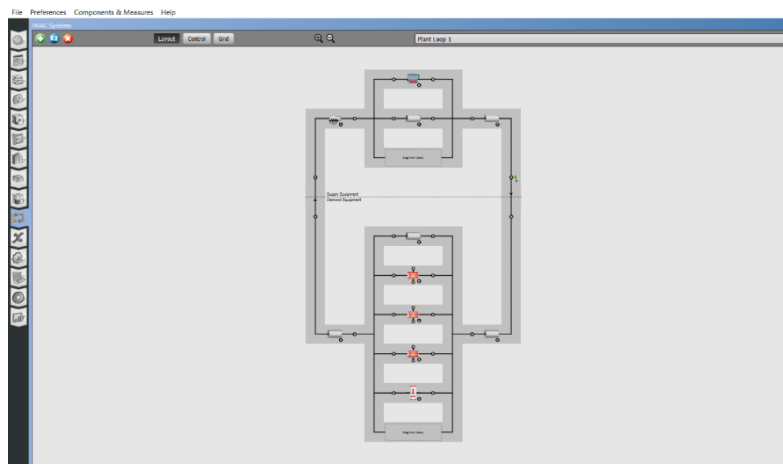
Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν δύο συστήματα θέρμανσης και ένα σύστημα ψύξης.

### 6.4.1 Σύστημα Θέρμανσης 1

Στο πρώτο σύστημα θέρμανσης, μέσω του κυκλοφορητή θα σταλεί το νερό του κυκλώματος θέρμανσης, θα περάσει μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας και θα ζεστάνει το νερό το οποίο έρχεται από το δίκτυο. Στη συνέχεια, το νερό χρήσης θα διοχετευτεί σε υδρονικές μονάδες, fan coils, που αποτελούν τις τερματικές εσωτερικές μονάδες ενός συστήματος κλιματισμού (ψύξης, θέρμανσης ή αερισμού).

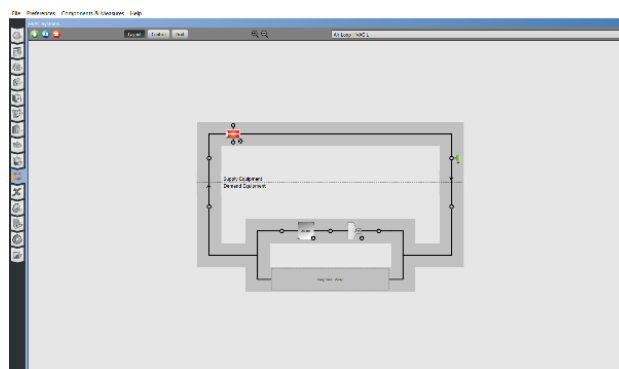
Στο OpenStudio στο supply equipment, χρησιμοποιήθηκε μία αντλία θερμότητας, ένα μπόιλερ και ένα schedule manager. Το schedule manager είναι ένα component το οποίο ορίζει πότε θα λειτουργήσει το μπόιλερ σύμφωνα με το αν έχει φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία το νερό. Χρησιμοποιήθηκαν αδιαβατικές σωληνώσεις ώστε να μην χάνεται θερμότητα προς το περιβάλλον.

Στο demand equipment χρησιμοποιήθηκαν 3 fan coils, ένα για κάθε θερμική ζώνη του κτηρίου και μία δεξαμενή αποθήκευσης, για τη βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση θερμότητας. (Εικόνα 6-5)



Εικόνα 6-5 Προσομοίωση συστήματος θέρμανσης 1

Στο OpenStudio η μοντελοποίηση των fan coils έγινε από 3 heating coils στο plant loop τα οποία συνδέονται με 3 air loops αντίστοιχα στα οποία τοποθετήθηκε ένα VAV air terminal και ένα component που ορίζει τις 3 θερμικές ζώνες αντίστοιχα. (Εικόνα 6-6) Τα VAV systems τίθενται σε λειτουργία με βάση έναν αισθητήρα θερμοκρασίας του χώρου και γι' αυτό τοποθετήθηκαν 3 ακόμα schedule managers στα 3 air loops αντίστοιχα.

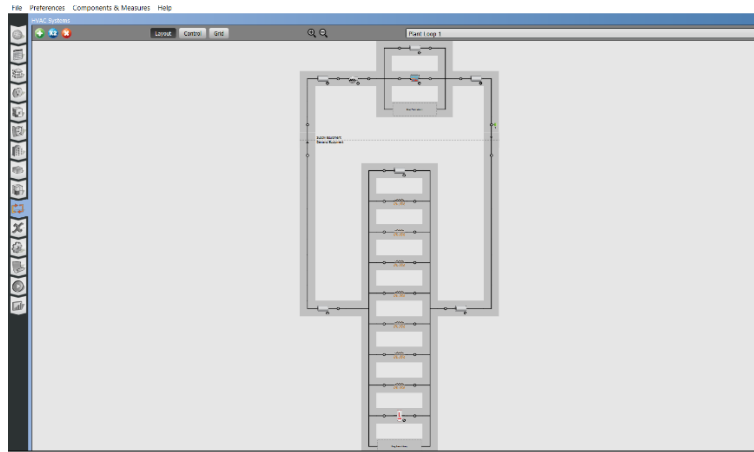


Εικόνα 6-6 Μοντελοποίηση fan coil για τη θερμική ζώνη 1

## 6.4.2 Σύστημα Θέρμανσης 2

Στο δεύτερο σύστημα θέρμανσης, στο supply equipment, χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτή την περίπτωση μια αντλία θερμότητας, ένα μπόιλερ και ένα schedule manager.

Στο demand equipment ωστόσο δεν χρησιμοποιήθηκαν fan coils αλλά ενδοδαπέδια θέρμανση.



Εικόνα 6-7 Προσομοίωση συστήματος θέρμανσης 2

Η μοντελοποίηση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης πραγματοποιείται με τα Low Temperature Radiant: Variable Flow components όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-7.

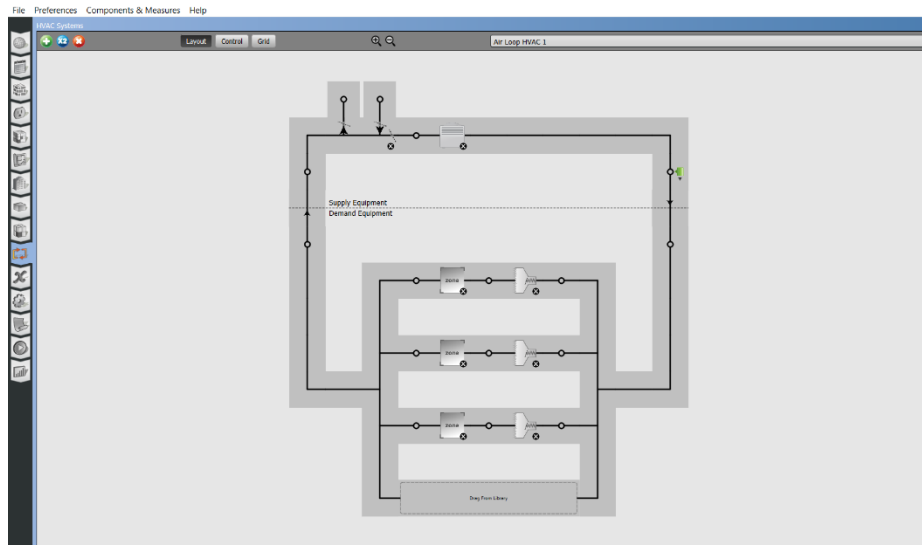
Αρχικά δημιουργούμε ένα Construction Internal Source αντικείμενο, επιλέγουμε την επιφάνεια που θέλουμε να τοποθετήσουμε την παραπάνω πηγή, στην περίπτωσή μας τα πατώματα του κτηρίου και τέλος αντιστοιχούμε τα Low Temperature Radiant: Variable Flow αντικείμενα στις 3 θερμικές ζώνες του κτηρίου.

## 6.4.3 Σύστημα Ψύξης

Το σύστημα ψύξης (Εικόνα 6-8) είναι ίδιο και για τα δύο συστήματα και αποτελείται από ένα Outdoor Air System (OA), ένα Unitary System ψύξης, ένα schedule manager και 3 VAV Systems για τις 3 ζώνες του κτηρίου.

Ως Unitary System νοείται η αντλία θερμότητας κεντρικού κλιματισμού που αποτελείται από ένα ή περισσότερα εργοστασιακά κατασκευασμένα συγκροτήματα, συμπεριλαμβανομένου ενός εσωτερικού πηνίου κλιματισμού, ενός συμπιεστή και ενός εξωτερικού πηνίου, το οποίο παρέχει λειτουργία θέρμανσης ή ψύξης.

Η αντλία θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι αέρα/αέρα με συντελεστή απόδοσης COP = 3.



Εικόνα 6-8 Προσομοίωση συστήματος ψύξης

#### 6.4.4 Φωτοβολταϊκά

Το αντικείμενο Generator: Photovoltaic χρησιμοποιείται για την περιγραφή μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών μονάδων και τον τρόπο μοντελοποίησής τους. [39]

Το αντικείμενο PhotovoltaicPerformance:Simple περιγράφει ένα απλό μοντέλο φωτοβολταϊκών που είναι χρήσιμο για την ανάλυση σχεδιασμού σε πρώιμο στάδιο. Σε αυτό το μοντέλο ο χρήστης έχει άμεση πρόσβαση στην απόδοση με την οποία οι επιφάνειες μετατρέπουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και δεν χρειάζεται να προσδιορίσει συστοιχίες συγκεκριμένων μονάδων. Χρησιμοποιείται το πλήρες γεωμετρικό μοντέλο για την ηλιακή ακτινοβολία, συμπεριλαμβανομένης της σκίασης και των ανακλάσεων, για τον προσδιορισμό του προσπίπτοντος ηλιακού πόρου. Αυτό το μοντέλο προορίζεται να είναι χρήσιμο για σκοπούς σχεδιασμού, ώστε να αποκτήσετε γρήγορα μια ιδέα των επιπέδων για την ετήσια παραγωγή και την ισχύ αιχμής. Το μοντέλο μπορεί επίσης να δεχτεί αυθαίρετες αποδόσεις μετατροπής και δεν απαιτεί τη δοκιμή πραγματικών μονάδων παραγωγής για την απόκτηση συντελεστών απόδοσης.

Το αντικείμενο ElectricLoadCenter:Generators χρησιμοποιείται για την παροχή ενός καταλόγου των γεννητριών που θα συμπεριληφθούν στην προσομοίωση. Ο κατάλογος περιλαμβάνει τα ονόματα και τους τύπους όλων των γεννητριών μαζί με ξεχωριστά χρονοδιαγράμματα διαθεσιμότητας, την ονομαστική ισχύ εξόδου και τον λόγο θερμικής προς ηλεκτρική ισχύ για κάθε μία.

Το αντικείμενο εισόδου Electric Load Center: Inverter: Simple χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της μετατροπής από συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε ένα ηλεκτρικό κέντρο φορτίου που περιέχει φωτοβολταϊκές μονάδες. Ένα τέτοιο κέντρο φορτίου διαθέτει μια συστοιχία φωτοβολταϊκών μονάδων που τροφοδοτούν έναν αντιστροφέα με συνεχές ρεύμα και ο αντιστροφέας παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα. Αυτό το αντικείμενο εισόδου αφορά το απλούστερο μοντέλο αντιστροφέα και χρησιμοποιεί σταθερή απόδοση. Χρησιμοποιήθηκε η default τιμή απόδοσης του EnergyPlus 0.98.

#### 6.4.5 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας

Το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System - EMS) είναι μία από τις μεθόδους ελέγχου υψηλού επιπέδου που είναι διαθέσιμες στο λογισμικό EnergyPlus. Ένα EMS είναι σε θέση να

έχει πρόσβαση σε μια ευρεία ποικιλία δεδομένων αισθητήρων και να χρησιμοποιεί τα δεδομένα αυτά για να κατευθύνει διάφορους τύπους ενεργειών ελέγχου. Η ιδέα είναι να εξομοιωθούν, μέσα στο EnergyPlus, οι τύποι ελέγχου που είναι δυνατοί με τα ψηφιακά συστήματα διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε πραγματικά κτίρια.

Το EMS αναπαράγει τη λειτουργικότητα πολλών από τα υπάρχοντα αντικείμενα ελέγχου υψηλού επιπέδου στο EnergyPlus. Το EMS μπορεί να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί αντλίες και ανεμιστήρες, τα φώτα και τον ηλεκτρικό εξοπλισμό και να αλλάζει τα σημεία ρύθμισης στους θερμοστάτες ζώνης, μπορεί να αλλάξει τα σημεία ρύθμισης σε κόμβους του συστήματος και να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί εξοπλισμό θέρμανσης, ψύξης και απόρριψης θερμότητας από την πλευρά της παροχής, δηλαδή λέβητες, ψυγεία, πύργους ψύξης κ.λπ. Τέλος, το EMS μπορεί να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί εξοπλισμό παραγωγής επί τόπου.

Το EMS χρησιμοποιεί τη γλώσσα εκτέλεσης EnergyPlus Runtime Language (Erl) για τον προσαρμοσμένο προγραμματισμό των ρουτινών ελέγχου. [39]

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το EMS με σκοπό τον έλεγχο του μπόιλερ. Ο σένσορας ελέγχει τη θερμοκρασία του χώρου με αποτέλεσμα όταν η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 22 °C να ενεργοποιείται το μπόιλερ.

## 6.5 Παραδοχές

### 6.5.1 Προγράμματα λειτουργίας

Το ωράριο λειτουργίας ενός κτηρίου, που αποτελεί ανεξάρτητη θερμική ζώνη, εξαρτάται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- από τη χρήση του κτηρίου,
- από τον ανθρώπινο παράγοντα, δηλαδή από τις ιδιαιτερότητες που προσδίδουν σε κάθε γενική χρήση κτηρίου οι επιλογές και οι συνήθειες των χρηστών του,
- από τις τοπικές συνθήκες, κλιματικές, λειτουργικές (ωράρια λειτουργίας) κ.ά.

Για τις ανάγκες εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης ενός κτηρίου καθορίζεται ένα τυπικό ωράριο λειτουργίας κάθε κτηρίου, ανάλογα με τη γενική χρήση του. Το ίδιο ισχύει και για τμήμα κτηρίου, που αποτελεί ανεξάρτητη θερμική ζώνη υπολογισμού, με διαφορετική χρήση. Σε περιπτώσεις κτηρίων με πολλές παράλληλες χρήσεις, όταν οι χρήσεις αυτές αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητες θερμικές ζώνες, το τυπικό ωράριο και οι εσωτερικές θερμικές συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία, αερισμός, εσωτερικά φορτία κ.ά.), καθορίζονται για κάθε χρήση και ανεξάρτητα από τη βασική κατηγορία και τη γενική χρήση του κτηρίου (π.χ. οι χώροι γραφείων των νοσοκομείων, αντιμετωπίζονται ως γραφεία). Ωστόσο η μηνιαία περίοδος λειτουργίας για όλες τις επί μέρους παράλληλες χρήσεις καθορίζεται από τη γενική χρήση του κτηρίου (π.χ. οι χώροι γραφείων ενός σχολικού κτηρίου, δεν λειτουργούν τους θερινούς μήνες που το κτήριο θεωρείται ότι είναι εκτός 25 λειτουργίας).

Για τους υπολογισμούς των θερμικών και ψυκτικών φορτίων ενός κτηρίου, λαμβάνονται συγκεκριμένες περίοδοι για τη θέρμανση και ψύξη ανάλογα με την κλιματική ζώνη:

- Για τη ζώνη Α' και Β' η περίοδος θέρμανσης είναι από την 1η Νοεμβρίου μέχρι και τις 15 Απριλίου και η περίοδος ψύξης από τις 15 Μαΐου μέχρι και τις 15 Σεπτεμβρίου.



- Για τη ζώνη Γ' και Δ' η περίοδος θέρμανσης είναι από την 15 Οκτωβρίου μέχρι και τις 30 Απριλίου και η περίοδος ψύξης από την 1η Ιουνίου μέχρι και τις 31 Αυγούστου.

Επίσης για τα συστήματα μηχανικού αερισμού, ανεξαρτήτως των περιόδων θέρμανσης και ψύξης ανά κλιματική ζώνη, η περίοδος λειτουργίας τους λαμβάνεται συνεχής για το τυπικό ωράριο λειτουργίας του κτηρίου όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-6. [19]

Πίνακας 6-6 Τυπικό ωράριο λειτουργίας κτηρίου σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ

Κατηγορία κτηρίου	Ώρες λειτουργίας	Ημέρες λειτουργίας ανά βδομάδα	Περίοδος λειτουργίας σε μήνες
<b>Γραφείο</b>	10	5	12

Η λειτουργία Schedule:Compact του EnergyPlus επιτρέπει στον χρήστη τον καθορισμό προγραμμάτων λειτουργίας που σχετίζονται με διάφορα είδη φορτίων του κτιρίου, όπως είναι η δραστηριότητα των εργαζομένων του κτιρίου, ο φωτισμός και ο υπόλοιπος ηλεκτρικός εξοπλισμός. Τα προγράμματα ορίζονται με τη μορφή ποσοστού ως προς το μέγιστο δυνατό φορτίο σε κάθε περίπτωση στην καρτέλα Schedule:Compact.

Ακόμα, δημιουργήθηκαν δύο απαραίτητα προγράμματα λειτουργίας για τη λειτουργία του θερμοστάτη του κτιρίου. Συγκεκριμένα, για τη χειμερινή περίοδο δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα που εξασφαλίζει ότι όταν το σύστημα θέρμανσης βρίσκεται σε λειτουργία, τότε θα λειτουργεί με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε κάθε θερμική ζώνη στους 20 °C. Αντίστοιχα, κατά τη θερινή περίοδο το σύστημα ψύξης λειτουργεί με σκοπό τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας στους 26 °C. [19]

#### 6.5.1.1 Εσωτερικά κέρδη

Η παραγόμενη / εκλυόμενη θερμότητα στο εσωτερικό των κτηρίων επηρεάζει την εσωτερική θερμοκρασία των χώρων και κατά συνέπεια τα πραγματικά φορτία θέρμανσης και ψύξης. Σε ό,τι αφορά στη διαστασιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης, για λόγους ασφαλείας των υπολογισμών αυτά τα εσωτερικά κέρδη αγνοούνται πλήρως στη συντριπτική πλειοψηφία των προτύπων υπολογισμού φορτίων θέρμανσης. Ωστόσο, στο πλαίσιο της προσπάθειας για εξοικονόμηση ενέργειας, όταν αυτά τα κέρδη ή μέρος τους είναι σταθερά και μόνιμα λόγω της λειτουργίας του κτηρίου, τότε στη διαστασιολόγηση του συστήματος θέρμανσης το σταθερό και μόνιμο τμήμα των εσωτερικών κερδών θα πρέπει να συνυπολογίζεται. Ανάλογα με το είδος των εσωτερικών κερδών και τη χρήση του κτηρίου, επιλέγεται ο αντίστοιχος συντελεστής ετεροχρονισμού. Ο συντελεστής ετεροχρονισμού εκφράζει το ποσοστό του λειτουργικού χρόνου του κτηρίου, κατά τον οποίο τα εσωτερικά κέρδη πράγματι υπάρχουν. Τα εσωτερικά κέρδη συμπεριλαμβάνουν τρεις βασικές κατηγορίες, ως ακολούθως: [19]

- την έκλυση θερμότητας από τους ανθρώπους (αισθητά και λανθάνοντα κέρδη, η αναλογία των οποίων είναι συνάρτηση της δραστηριότητας των ανθρώπων)
- τον ηλεκτροφωτισμό (αισθητά κέρδη)
- τον εξοπλισμό (κατά μεγάλο ποσοστό αισθητά κέρδη στην πλειοψηφία των εφαρμογών)

### 6.5.1.2 Φορτία ατόμων

Κάθε άτομο ανάλογα τη δραστηριότητα του, εκλύει θερμότητα υπό τη μορφή αισθητού και λανθάνοντος φορτίου. Το αισθητό φορτίο οφείλεται στην ακτινοβολία του σώματός του και τη μεταφορά θερμότητας από το σώμα του στον αέρα. Η αναλογία ακτινοβολίας / μεταφοράς είναι περίπου 50%-50% και φυσικά εξαρτάται από την ένδυση και τη δραστηριότητα του ατόμου. Ωστόσο, για τους απλούς υπολογισμούς στο πλαίσιο της εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης ενός κτηρίου, η αναλογία αυτή δεν επηρεάζει ουσιαστικά και συνήθως δεν υπεισέρχεται στους υπολογισμούς. Το λανθάνον φορτίο οφείλεται στην αναπνοή και στην εφίδρωση κάθε ανθρώπου και είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο αυξάνεται η δραστηριότητα του ατόμου. Ο συνυπολογισμός της έκλυσης θερμότητας στα φορτία του κτηρίου θα πρέπει να γίνεται βάσει συντελεστή ετεροχρονισμού (μέσου συντελεστή παρουσίας χρηστών), μέσω του οποίου αντιστοιχίζεται η πραγματική –κατά μέσο όρο– παρουσία των ατόμων στους χώρους, κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ημέρας.

Στον Πίνακα 6-7 καθορίζονται οι μέσες τυπικές τιμές έκλυσης θερμότητας ανά άτομο, λαμβάνοντας υπόψη την αντίστοιχη μέση δραστηριότητα των χρηστών στις διάφορες κατηγορίες κτηρίων, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13790:2009 και ΕΛΟΤ EN 13779:2008. Στον ίδιο πίνακα δίνεται και η εκπομπή θερμικής ισχύος ανά μονάδα μεικτής επιφάνειας κτηρίου ( $W/m^2$ ) και ο μέσος συντελεστής παρουσίας χρηστών, ο οποίος ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου, κατά το οποίο είναι παρόντες οι χρήστες στο χώρο (εκτιμάται από το χρόνο λειτουργίας του κτηρίου).

Πίνακας 6-7 Φορτία ατόμων

Κατηγορία κτηρίου	Θερμική ισχύς ανά άτομο [ $W/άτομο$ ]	Θερμική ισχύς ανά μονάδα δομημένης επιφάνειας [ $W/m^2$ ]	Μέσος συντελεστής παρουσίας
<b>Γραφείο</b>	80	8	0.30

Στη καρτέλα People του EnergyPlus τα φορτία από άτομα εκφράζονται σε άτομα ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου θερμικής ζώνης. Συνεπώς, η τιμή που θα χρησιμοποιηθεί είναι

$$\frac{8 \frac{W}{m^2}}{80 \frac{W}{άτομο}} = 0.1 \frac{άτομα}{m^2}$$

### 6.5.1.3 Φορτία τεχνητού φωτισμού

Σε κάθε χώρο πρέπει να παρέχεται ο φωτισμός που εξασφαλίζει στους χρήστες οπτική άνεση, δηλαδή ένα περιβάλλον με την απαιτούμενη ποσότητα και ποιότητα φωτισμού, που επιτρέπει την ευχάριστη διαμονή και την άσκηση προβλεπόμενης δραστηριότητά τους, χωρίς φαινόμενα που να οδηγούν στην οπτική δυσφορία ή κόπωση.

Σύμφωνα με τον KENAK δίνονται λεπτομερώς τα συνιστώμενα επίπεδα φωτισμού ανά χρήση χώρου, καθώς και επιπρόσθετες πληροφορίες που σχετίζονται με τον σχεδιασμό του συστήματος φωτισμού και τη χρήση επιφανειών εκτέλεσης εργασίας, περιβάλλουσες και υπόβαθρου. Στο υπό μελέτη κτήριο που έχει μοντελοποιηθεί ως γραφείο η στάθμη φωτισμού παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-8

Πίνακας 6-8 Επιτρεπόμενη στάθμη φωτισμού σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ

Κατηγορία κτηρίου	Στάθμη φωτισμού [lx]
<b>Γραφείο</b>	500

Σε κάθε θερμική ζώνη του κτηρίου θα καταγράφονται οι ζώνες τεχνητού φωτισμού που θα δημιουργούνται από την ομαδοποίηση των χώρων του κτηρίου ανάλογα με τις απαιτούμενες στάθμες του τεχνητού φωτισμού που καθορίζονται από το πρότυπο EN12464-1 ανάλογα με τη χρήση των χώρων. Η κάθε ζώνη τεχνητού φωτισμού θα αντιστοιχεί σε καθορισμένο ποσοστό κάλυψης σε σχέση με το συνολικό εμβαδό της κάθε θερμικής ζώνης του κτηρίου. Στη συνέχεια θα συσχετίζονται τα ποσοστά κάλυψης με τα αντίστοιχα όρια της εγκατεστημένης ισχύος φωτισμού ( $W/m^2$ ) ανά θερμική ζώνη με σκοπό τη δημιουργία ενός μέσου ορίου εγκατεστημένης ισχύος φωτισμού ( $W/m^2$ ) που θα είναι μοναδικό για κάθε θερμική ζώνη και κτήριο και θα συσχετίζεται με τις ανάγκες φωτισμού των χώρων του σύμφωνα με τον Πίνακας 6-9.

Πίνακας 6-9 Στάθμη φωτισμού

Ζώνες τεχνητού φωτισμού / Στάθμη φωτισμού [lx]	Ισχύς για κτήριο αναφοράς [ $W/m^2$ ]	Ισχύς ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης κτιρίων [ $W/m^2$ ]	για
<b>500</b>	16	14.0	

#### 6.5.1.4 Φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού

Η εκλυόμενη θερμική ισχύς από ηλεκτρικό εξοπλισμό (ηλεκτρικές συσκευές) αλλά και δευτερευόντως από άλλες συσκευές, είναι η τρίτη βασική κατηγορία εσωτερικών κερδών στα κτήρια. Αυτή η ισχύς εκλύεται με ακτινοβολία και μεταφορά όπως συμβαίνει και με τις άλλες κατηγορίες εσωτερικών κερδών, σε αναλογία που εξαρτάται από το είδος της συσκευής. Στη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών αυτά τα κέρδη εισέρχονται στο χώρο υπό τη μορφή αισθητής θερμότητας. Λόγω της αύξησης των εφαρμογών ηλεκτρικών συσκευών και ειδικότερα της πληροφορικής και των επικοινωνιών, τα εσωτερικά κέρδη από συσκευές είναι ιδιαίτερα σημαντικά, κυρίως σε χρήσεις κτηρίων εμπορικών και διοικητικών δραστηριοτήτων (γραφεία, υπηρεσίες κ.ά.).

Ο συνυπολογισμός του εξοπλισμού στα φορτία του κτηρίου γίνεται βάσει του συντελεστή ετεροχρονισμού, μέσω του οποίου αντιστοιχίζεται η πραγματική –κατά μέσο όρο– λειτουργία των συσκευών στους χώρους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ημέρας. Σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN ISO 13790:2009 εκτιμήθηκαν και δίνονται στον Πίνακας 6-10 οι μέσες τιμές ισχύος ηλεκτρικών συσκευών σε ένα γραφείο, ο μέσος συντελεστής ετεροχρονισμού, καθώς και η μέση ετεροχρονισμένη ισχύς εξοπλισμού και ο μέσος συντελεστής πραγματικού χρόνου λειτουργίας του κτηρίου και κατά συνέπεια των ηλεκτρικών συσκευών.

Πίνακας 6-10 Φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού σύμφωνα με τον KENAK

Κατηγορία κτηρίου	Ισχύς εξοπλισμού [W/m <sup>2</sup> ]	Μέσος συντελεστής ετερ/σμού	Ετεροχρον. ισχύς εξοπλ. [W/m <sup>2</sup> ]	Μέσος συντελεστής λειτουργίας
Γραφείο	15	0.3	4.5	0.3

Τα φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού υπολογίζονται από τη σχέση:

**Φορτία εξοπλισμού = (Ισχύς εξοπλισμού) · (Μέσος συντελεστής ετερ/σμού) · (Μέσος συντελεστής λειτουργίας)**

Με βάση τα παραπάνω, η τιμή ρύθμισης των φορτίων ηλεκτρικού εξοπλισμού στη καρτέλα Electric Equipment του EnergyPlus είναι

$$15 \frac{W}{m^2} * 0.3 * 0.3 = 1.35 \frac{W}{m^2}$$

#### 6.5.1.5 Εξασφάλιση φυσικού φωτισμού

Το επίπεδο φυσικού φωτισμού αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο για την ενεργειακή κατανάλωση ενός κτηρίου γραφείων, καθώς καθορίζει τα επίπεδα τεχνητού φωτισμού που είναι αναγκαία για την εξασφάλιση της οπτικής άνεσης των εργαζομένων. Γι' αυτόν τον λόγο, το συγκεκριμένο κτήριο μοντελοποιήθηκε κατάλληλα, ώστε να λαμβάνεται υπόψη κάθε χρονική στιγμή το επίπεδο του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου και με βάση αυτό να ρυθμίζεται η ένταση του τεχνητού φωτισμού. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας, αφού τα φώτα απενεργοποιούνται όταν δεν είναι απαραίτητη η λειτουργία τους.

Στο στάδιο της προσομοίωσης καθορίζονται οι θερμικές ζώνες στις οποίες είναι επιθυμητός ο έλεγχος του επιπέδου φυσικού φωτισμού, καθώς και η ελάχιστη ισχύς εξόδου του τεχνητού φωτισμού πριν τα φώτα απενεργοποιηθούν πλήρως, η οποία ορίστηκε να έχει την (προεπιλεγμένη για το EnergyPlus) τιμή, 20% της ονομαστικής ισχύος εξόδου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-9.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Thermal Zone 1 DaylightingControls	Thermal Zone 2 DaylightingControls	Thermal Zone 3 DaylightingControls
Zone or Space Name		Thermal Zone 1	Thermal Zone 2	Thermal Zone 3
Daylighting Method				
Availability Schedule Name				
Lighting Control Type		Continuous	Continuous	Continuous
Minimum Input Power Fraction for Continuous or Center				
Minimum Light Output Fraction for Continuous or Center				
Number of Stepped Control Steps				
Probability Lighting will be Reset When Needed in Main				
Glare Calculation Daylighting Reference Point Name		Daylighting Control 1	Daylighting Control 3	Daylighting Control 4
Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clock deg		90	90	90
Maximum Allowable Discomfort Glare Index		22	22	22
Light Griding Resolution	m2			
Daylighting Reference Point 1 Name		Daylighting Control 1	Daylighting Control 3	Daylighting Control 4
Fraction of Lights Controlled by Reference Point 1		1	1	1
Illuminance Setpoint at Reference Point 1	lux	500	500	500
Daylighting Reference Point 2 Name		Daylighting Control 2		
Fraction of Lights Controlled by Reference Point 2		0		
Illuminance Setpoint at Reference Point 2	lux	500		

Εικόνα 6-9 Καρτέλα Daylighting: Controls

Ακόμα, ορίστηκαν τα σημεία αναφοράς κάθε θερμικής ζώνης, στα οποία πραγματοποιείται έλεγχος του επιπέδου φυσικού φωτισμού και η επιθυμητή στάθμη φωτισμού, η οποία είναι 500 lux σύμφωνα με τον Πίνακα 6-8. Για κάθε θερμική ζώνη χρησιμοποιήθηκαν τόσα σημεία ελέγχου όσα τα παράθυρα της ζώνης.

#### 6.5.1.6 Φορτία ανανέωσης αέρα

Για την εξασφάλιση συνθηκών υγιεινής στο εσωτερικό κάθε κτιρίου και κάθε ανεξάρτητου τμήματος κτιρίου απαιτείται η ανανέωση του αέρα, δηλαδή η αντικατάσταση του εσωτερικού αέρα από νωπό

αέρα περιβάλλοντος. Οι απαιτήσεις σε νωπό αέρα περιβάλλοντος καθορίζονται ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου και το πλήθος των ατόμων στο εσωτερικό του. [19] Για ένα κτίριο γραφείων οι απαιτήσεις νωπού αέρα περιβάλλοντος παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-11

Πίνακας 6-11 Φορτία ανανέωσης αέρα σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ

Κατηγορία κτηρίου	Άτομα / 100 m <sup>2</sup> επιφ. δαπέδου	Νωπός αέρας [m <sup>3</sup> /h/άτομο]	Νωπός αέρας [m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> ]
<b>Γραφείο</b>	10	30	3.00

Η ρύθμιση των φορτίων ανανέωσης αέρα γίνεται στην καρτέλα Zone Ventilation: Design Flow Rate. Η ροή αέρα ανά m<sup>2</sup> δαπέδου ορίζεται ως εξής:

$$3 \frac{m^3}{h * m^2} * \frac{1h}{3600s} = 0,000833 \frac{m^3}{s * m^2}$$

## 6.6 Παραμετροποίηση μοντέλου

Στην παρούσα εργασία θέλουμε να παραμετροποιήσουμε 6 μεταβλητές. Η πρώτη μεταβλητή αφορά τον τύπο μόνωσης. Επιλέχθηκαν 2 τιμές, η διογκωμένη πολυστερίνη, EPS, και ο πετροβάμβακας, MW. Η επιλογή αυτή αφορά το εκάστοτε στρώμα μόνωσης του πατώματος, της οροφής και των τοίχων του κτηρίου. Η δεύτερη μεταβλητή αφορά το πάχος μόνωσης με τις διακριτές τιμές 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 . Η τρίτη μεταβλητή αφορά το είδος των παραθύρων. Οι τύποι υαλοπινάκων που εξετάζονται είναι τα απλά 2-πλα ή 3-πλα απλά παράθυρα και τα ηλεκτροχρωμικά 2-πλα ή 3-πλα αντίστοιχα. Κάθε φορά που αλλάζει ο υαλοπίνακας αλλάζουν παράλληλα η σκίαση του παραθύρου, ο τύπος σκίασης και το σημείο ρύθμισης για το πότε θα υπάρξει σκίαση και τότε όχι σύμφωνα με τη θάμβωση του παραθύρου. Η τέταρτη μεταβλητή αφορά την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών, με ποσοστά 0%, 15.34%, 30.70% και 46.05% που αντιστοιχούν σε μη ύπαρξη φωτοβολταϊκού και σε επιφάνεια φωτοβολταϊκού 10m<sup>2</sup>, 20m<sup>2</sup>, 30m<sup>2</sup>. Η πέμπτη μεταβλητή αφορά το είδος καυσίμου και την απόδοσή του μπόιλερ που χρησιμοποιήσαμε στο σύστημα θέρμανσης του κτηρίου. Επιλέχθηκαν ως καύσιμα το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και η βιομάζα. Αντίστοιχα με το είδος καυσίμου του λέβητα ορίζεται και η απόδοσή του. Οι λέβητες φυσικού αερίου έχουν απόδοση 98%, οι λέβητες πετρελαίου έχουν 87% και οι λέβητες βιομάζας μόλις 78%. Θεωρήθηκε ότι ο λέβητας φυσικού αερίου είναι λέβητας συμπίκνωσης. [40] Η τελευταία μεταβλητή αφορά την θερμοκρασία στην οποία επιλέγουμε να ανοίξει το μπόιλερ για τη θέρμανση του κτηρίου. Ελέγχονται 3 περιπτώσεις, η περίπτωση η λειτουργία του μπόιλερ να ξεκινάει μόλις η θερμοκρασία των χώρων πέσει κάτω από τους 20 °C , τους 21 °C και τους 22 °C. Συνολικά οι περιπτώσεις που εξετάζονται ανέρχονται στα 2304.

## 7 Αποτελέσματα

### 7.1 Ενεργειακή Αξιολόγηση Στοιχείων Κελύφους

Η ενεργειακή προσομοίωση του κτηρίου πραγματοποιήθηκε για 4 διαφορετικά είδη υαλοπινάκων. Στον Πίνακα 7-1 παρουσιάζονται ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους και η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία, όπως υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού WINDOW:

Πίνακας 7-1 Συντελεστές u-value, SHGC, VT για κάθε περίπτωση μελέτης υαλοπίνακα

	U-value	SHGC	VT
<b>2-πλα</b>	1.479	0.596	0.801
<b>3-πλα</b>	0.693	0.406	0.542
<b>2-πλα EC</b>	1.444	0.423 – 0.156	0.602 – 0.153
<b>3-πλα EC</b>	0.711	0.324 – 0.102	0.552 – 0.140

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 7-1 ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας των παραθύρων μειώνεται κατά 52% με την προσθήκη επιπλέον στρώσεων γυαλιού και ειδικών επιστρώσεων, με αποτέλεσμα μικρότερες θερμικές απώλειες. Ταυτόχρονα μειώνονται και ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους και η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία έως 30% μειώνοντας τα ηλιακά κέρδη. Επιπλέον, παρατηρούνται παρόμοιες τιμές u-value στην περίπτωση σύγκρισης απλών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, ενώ οι συντελεστές SHGC και VT μειώνονται μέχρι 30%. Οι δύο τιμές όσων αφορά τους συντελεστές SHGC και VT των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων αντιστοιχούν στην πλήρως διαφανή και πλήρως σκουρόχρωμη κατάσταση του παραθύρου.

Η ενεργειακή προσομοίωση του κτηρίου πραγματοποιήθηκε για 2 διαφορετικά θερμομονωτικά υλικά και για 4 διαφορετικά πάχη μόνωσης. Τα 2 υλικά, EPS και MW, έχουν ίδιο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και κατ' επέκταση τα δομικά στοιχεία του κτηρίου δεν παρουσιάζουν διαφορά στον συντελεστή u-value.

Ωστόσο, για τα 4 διαφορετικά πάχη οι τιμές των συντελεστών u-value των τοίχων, του δαπέδου και της οροφής παρουσιάζονται στο Πίνακα 7-2. Παρατηρείται πως όσο αυξάνουμε το πάχος της θερμομόνωσης τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων, άρα τόσο περισσότερο μονωμένο είναι το κτήριο χωρίς θερμικές απώλειες.

Πίνακας 7-2 Συντελεστής θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων κτηρίου

U-value	0.05m	0.1m	0.15m	0.2m
<b>Εξωτερικός τοίχος</b>	0.496	0.290	0.205	0.159
<b>Δάπεδο</b>	0.390	0.251	0.184	0.146
<b>Οροφή</b>	0.433	0.268	0.194	0.152

### 7.2 Ενεργειακή Αξιολόγηση κτηρίου

Σε αυτή την ενότητα γίνεται η ενεργειακή αξιολόγηση επιλεγμένων σεναρίων σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας του καυσίμου για θέρμανση και ηλεκτρισμού για ψύξη, καθώς επίσης και ο υπολογισμός της πρωτογενούς ενέργειας. Για την αξιολόγηση κάθε παραμέτρου χρησιμοποιούνται σενάρια όπου όλες οι υπόλοιπες παράμετροι είναι οι ίδιοι. Σε κάθε περίπτωση που μελετήθηκε

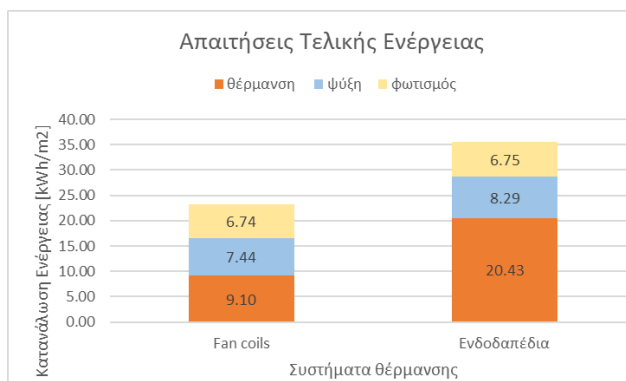
λήφθηκε υπόψιν και η κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό του κτηρίου καθώς το κτήριο προσομοιώθηκε ως γραφείο.

### Σύστημα θέρμανσης

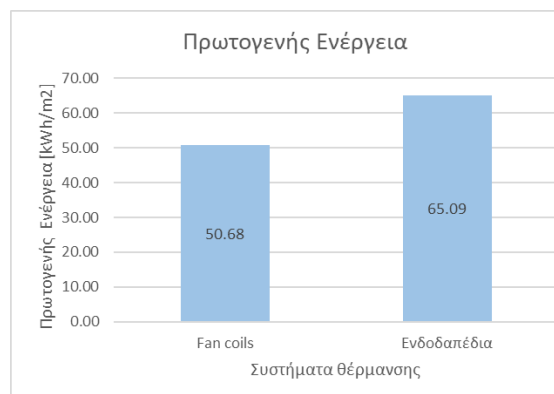
Για την ενεργειακή σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων θέρμανσης, στη μία περίπτωση το σύστημα με έξοδο τα fan coils και στη δεύτερη περίπτωση το σύστημα με έξοδο την ενδοδαπέδια, επιλέχθηκαν δύο περιπτώσεις με το ίδιο υλικό μόνωσης, το EPS, με πάχος 0.15m και 3-πλους υαλοπίνακες. Οι δύο περιπτώσεις δεν έχουν φωτοβολταϊκά, το καύσιμο του λέβητα είναι το φυσικό αέριο και ο θερμοστάτης του χώρου ορίστηκε στους 22°C.

Από τη σύγκριση αυτή παρατηρείται (Εικόνα 7-1) ότι υπάρχει σχεδόν διπλάσια κατανάλωση στο σύστημα με την ενδοδαπέδια θέρμανση. Αυτό αναμένεται, καθώς η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι ένα σύστημα με μεγάλη αδράνεια άρα χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για να αποδώσει. Ένας ακόμα λόγος για την διαφορά αυτή εικάζεται να είναι η υπερδιαστασιολόγηση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης στη διάρκεια της προσομοίωσης της στο EnergyPlus.

Η μικρή διαφορά που παρατηρείται στην Εικόνα 7-1 στην κατανάλωση για ψύξη οφείλεται στο γεγονός ότι στις μεταβατικές περιόδους ,δηλαδή τον Οκτώβρη και τον Μάρτιο, απαιτούνται περισσότερες kWh/m<sup>2</sup> για ψύξη. Το σύστημα θέρμανσης με την ενδοδαπέδια λόγω μεγάλης αδράνειας αυξάνει τη θερμοκρασία του κτηρίου και πάνω από 26°C σ' αυτές τις περιόδους με αποτέλεσμα το σύστημα ψύξης να χρειάζεται να καταναλώσει περισσότερες kWh, ώστε να πέσει η θερμοκρασία του κτηρίου.



Εικόνα 7-1 Σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας για τα δύο συστήματα θέρμανσης



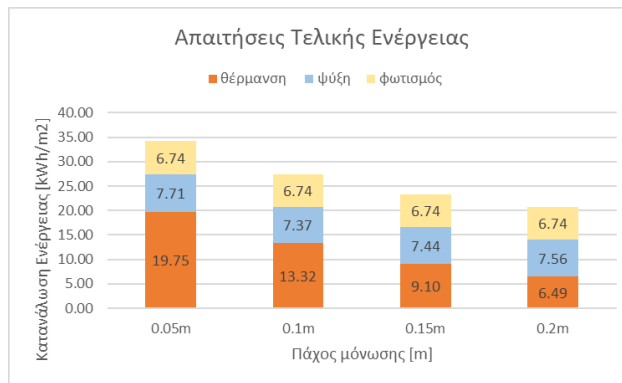
Εικόνα 7-2 Πρωτογενής ενέργεια για τα δύο συστήματα θέρμανσης

### Πάχος μόνωσης

Για τη σύγκριση των καταναλώσεων ενέργειας σε σχέση με το πάχος της μόνωσης του κτηρίου επιλέχθηκε ως σύστημα θέρμανσης το σύστημα 1 με τα fan coils, ως θερμομονωτικό υλικό το EPS, οι υαλοπίνακες είναι 3-πλοι απλοί, το καύσιμο του λέβητα είναι φυσικό αέριο και η θερμοκρασία του θερμοστάτη έχει οριστεί στους 22°C.

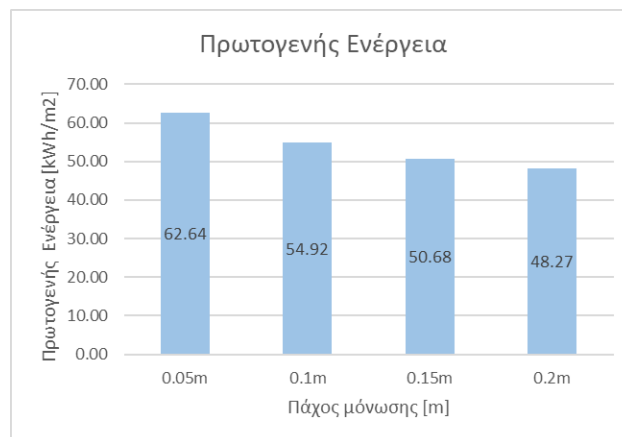
Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνα 7-3 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης τόσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται για θέρμανση. Αντίθετα, από τα 10 εκατοστά πάχος και πάνω χρειάζονται περισσότερες kWh για ψύξη. Αυτό συμβαίνει διότι όσο αυξάνεται η μόνωση τόσο λιγότερη θερμότητα από τα εσωτερικά και ηλιακά κέρδη εκλύεται προς το εξωτερικό περιβάλλον, άρα υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση για ψύξη του εσωτερικού του κτηρίου.





Εικόνα 7-3 Σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας για τα τέσσερα πάχη μόνωσης

Όσον αφορά την πρωτογενή ενέργεια, Εικόνα 7-4, μεταξύ 0.05m και 0.1m πάχους μόνωσης υπάρχει μείωση 12.3%, από 0.1m σε 0.15m υπάρχει επιπλέον μείωση 7.8%, ενώ από 0.15m σε 0.2m υπάρχει επιπλέον μείωση της τάξης του 4.7%. Συμπερασματικά, η πρωτογενής ενέργεια όπως ήταν αναμενόμενο μειώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της θερμομόνωσης, αλλά με μειωμένο ρυθμό.



Εικόνα 7-4 Πρωτογενής ενέργεια για τα τέσσερα πάχη μόνωσης

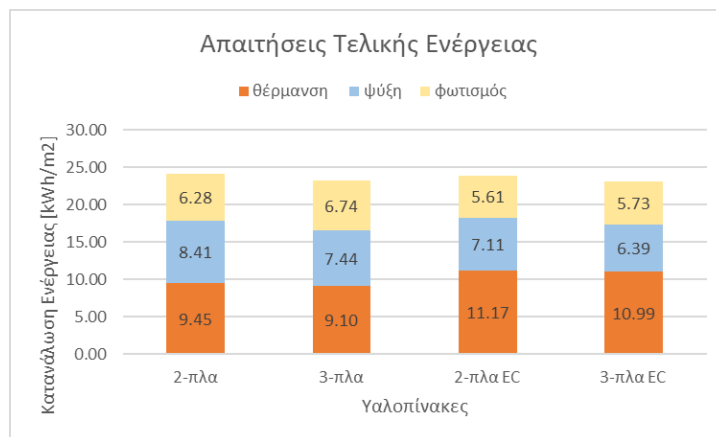
### Υαλοπίνακες

Για τη σύγκριση των απαιτήσεων ενέργειας για κάθε περίπτωση υαλοπίνακα επιλέχθηκε ως σύστημα θέρμανσης το σύστημα 1 με τα fan coils, ως θερμομονωτικό υλικό το EPS, με πάχος 0.15m, το σύστημα δεν έχει φωτοβολταϊκά, το καύσιμο του λέβητα είναι φυσικό αέριο και η θερμοκρασία του θερμοστάτη έχει οριστεί στους 22°C.

Στο διάγραμμα της Εικόνα 7-5 παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού για ψύξη μεταξύ 2-πλων απλών και 2-πλων ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, σε ποσοστό 18.2%, ενώ στην ίδια σύγκριση μεταξύ 3-πλων υαλοπινάκων το αντίστοιχο ποσοστό φτάνει το 16.4%. Αντίθετα, υπάρχει αύξηση στην κατανάλωση φυσικού αερίου για θέρμανση. Αυτό οφείλεται στον αυξημένο συντελεστή SHGC των απλών υαλοπινάκων, όπου όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής SHGC, τόσα περισσότερα κέρδη υπάρχουν λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, άρα τόσο λιγότερες οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και τόσο περισσότερες για ψύξη. Συνολικά όμως, οι απαιτήσεις ενέργειας εξαιτίας των ηλεκτροχρωμικών είναι μεγαλύτερες από τα απλά σε ποσοστό 1% για τους 2-πλους υαλοπίνακες και 0.7% για τους 3-πλους.



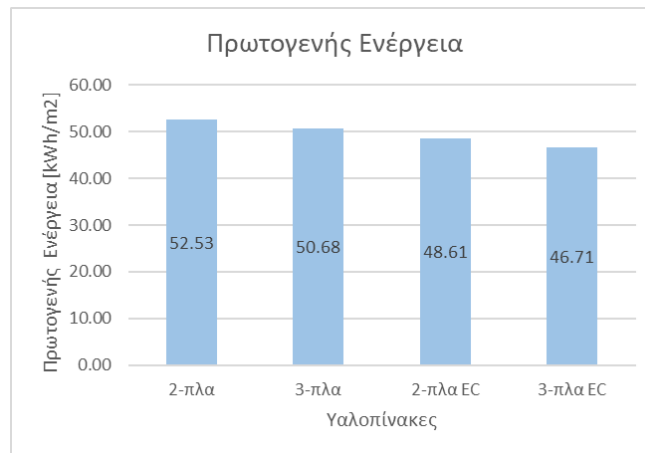
Στην περίπτωση σύγκρισης της κατανάλωσης ενέργειας για τα τέσσερα σενάρια υαλοπινάκων συμπεριλήφθηκε στο διάγραμμα και η κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό. Παρατηρείται πως η προσθήκη ενός υαλοπίνακα επιφέρει αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για φωτισμό κατά 2.1% - 7.3% στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών και απλών υαλοπινάκων αντίστοιχα, γεγονός που οφείλεται στην μείωση του συντελεστή VT των υαλοπινάκων (Πίνακας 7-1). Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ορατής ακτινοβολίας των υαλοπινάκων τόσο λιγότερος είναι ο φυσικός φωτισμός με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης για τεχνητό φωτισμό του κτηρίου. Επιπλέον παρατηρείται ότι η χρήση ηλεκτροχρωμικών μειώνει την κατανάλωση για φωτισμό κατά 10.6% - 15% για την περίπτωση διπλών και τριπλών υαλοπινάκων αντίστοιχα, η οποία οφείλεται στην σκίαση των απλών παραθύρων. Τα απλά παράθυρα έχουν εσωτερική σκίαση ενώ στα ηλεκτροχρωμικά χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο «Meet daylight illuminance», σύμφωνα με το οποίο η κατάσταση του ηλεκτροχρωμικού προσαρμόζεται ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή στάθμη φωτεινότητας (500 lux).



Εικόνα 7-5 Σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας για τις τέσσερις περιπτώσεις παραθύρων

Παρατηρείται στο διάγραμμα της Εικόνα 7-6 ότι μεταξύ των 2-πλών και 3-πλών απλών παραθύρων υπάρχει μείωση της πρωτογενούς ενέργειας κατά 3.5%, ενώ μεταξύ 2-πλών και 3-πλών ηλεκτροχρωμικών υπάρχει μείωση της πρωτογενούς ενέργειας κατά 3.9%. Η μείωση αυτή είναι αναμενόμενη σε κάθε περίπτωση καθώς ένας παραπάνω υαλοπίνακας ισοδυναμεί με μείωση του U-value και του SHGC του παραθύρου, με αποτέλεσμα η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη να μειώνεται.

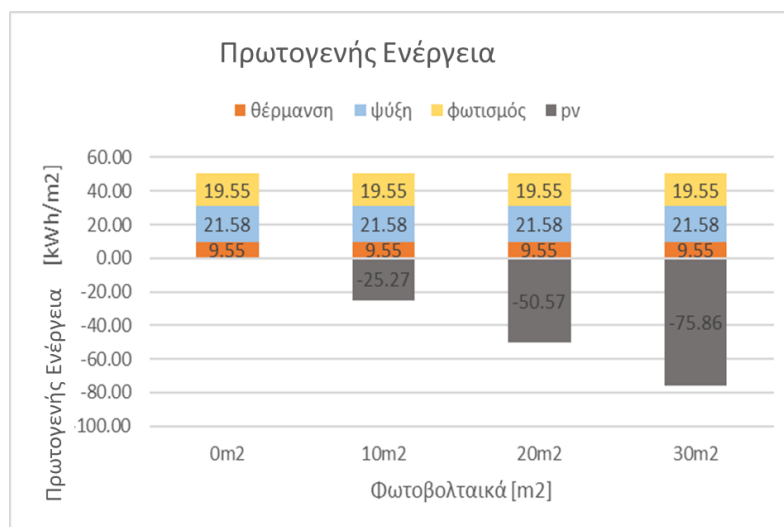
Επιπλέον, μεταξύ απλών και ηλεκτροχρωμικών 2-πλων υαλοπινάκων υπάρχει μείωση της πρωτογενούς ενέργειας κατά 7.4% και στην ίδια σύγκριση μεταξύ 3-πλων υαλοπινάκων υπάρχει μείωση 7.8% (Εικόνα 7-6). Η πρωτογενής ενέργεια μειώνεται ενώ οι απαιτήσεις σε φυσικό αέριο για θέρμανση αυξάνονται, ενώ σε ηλεκτρισμό για ψύξη και φωτισμό μειώνονται. Η διαφορά οφείλεται στους συντελεστές πρωτογενούς ενέργειας ηλεκτρισμού (2.9) και φυσικού αερίου (1.05) (Πίνακας 3-1)



Εικόνα 7-6 Πρωτογενής ενέργεια για κάθε περίπτωση υαλοπίνακα

### **Φωτοβολταϊκά**

Στο διάγραμμα της Εικόνα 7-7 απεικονίζεται η ενέργεια για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και φωτοβολταϊκά συναρτήσε της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών του υπό μελέτη κτηρίου. Στις περιπτώσεις που μελετώνται, το σύστημα θέρμανσης είναι τα fan coils, το θερμομονωτικό υλικό είναι η διογκωμένη πολυστερίνη με πάχος 15 εκατοστά και οι υαλοπίνακες είναι τριπλοί. Επιπλέον, το καύσιμο του λέβητα είναι το φυσικό αέριο και η θερμοκρασία του θερμοστάτη είναι οι 22°C. Παρατηρείται πως κοντά στα 20m<sup>2</sup> το κτήριο γίνεται σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης.

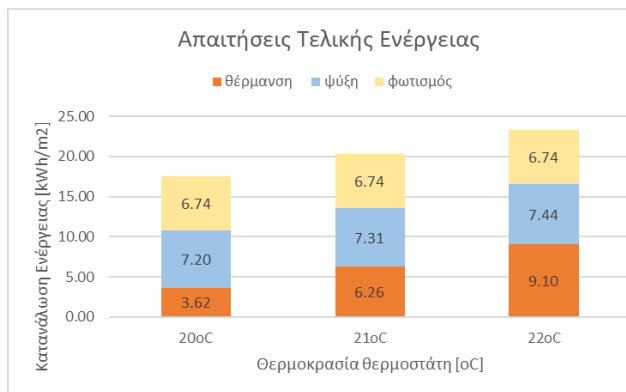


Εικόνα 7-7 Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας συναρτήσε της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών

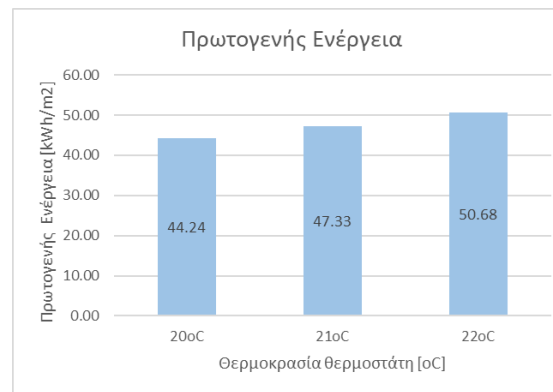
### **Θερμοκρασία θερμοστάτη χώρου**

Οι Εικόνα 7-8 και Εικόνα 7-9 αποτυπώνουν τις απαιτήσεις ενέργειας και πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και ψύξη για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες του θερμοστάτη θέρμανσης. Όταν επιλέγουμε να ανοίγει κάτω από τους 22°C, συνεπάγεται ότι το σύστημα θέρμανσης λειτουργεί περισσότερες ώρες, άρα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για θέρμανση. Επιπλέον, στους 22°C σε αντίθεση με τις μικρότερες θερμοκρασίες, η θερμοκρασία του χώρου έχει περισσότερες

διακυμάνσεις φτάνοντας πάνω από τους 22°C απαιτώντας έτσι και περισσότερες kW/m<sup>2</sup> για ψύξη του κτηρίου.



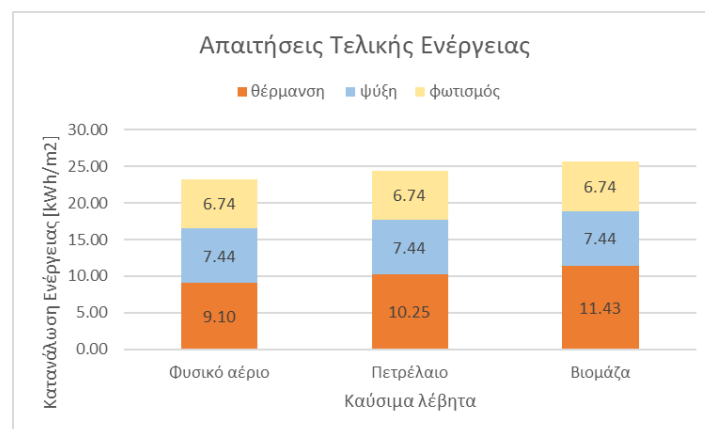
Εικόνα 7-8 Σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την θερμοκρασία του θερμοστάτη του χώρου



Εικόνα 7-9 Πρωτογενής ενέργεια σε σχέση με την θερμοκρασία του θερμοστάτη του χώρου

### Καύσιμα λέβητα

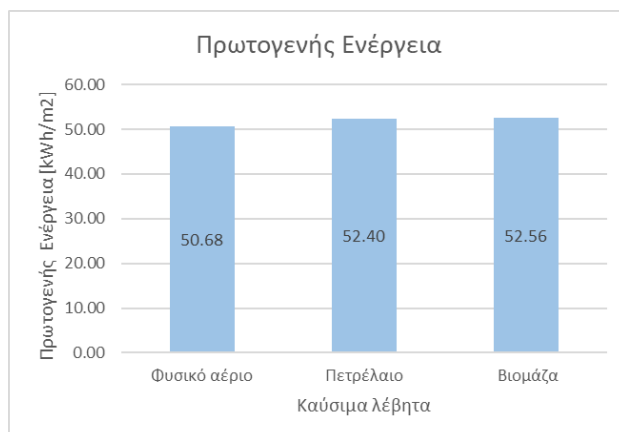
Η Εικόνα 7-10 δείχνει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη για τρία διαφορετικά καύσιμα του λέβητα θέρμανση: φυσικό αέριο, πετρέλαιο και βιομάζα. Παρατηρείται πως μεταξύ φυσικού αερίου και πετρελαίου υπάρχει αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση σε ποσοστό 12.6%, ενώ μεταξύ φυσικού αερίου και βιομάζας το ποσοστό φτάνει το 25.6%. Αιτία για τις διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας αποτελεί το γεγονός πως η απόδοση του λέβητα φυσικού αερίου φτάνει το 98%, του πετρελαίου το 87% ενώ της βιομάζας μόλις το 78%. καθώς η απόδοση του λέβητα φυσικού αερίου φτάνει το 98%, ενώ του λέβητα πετρελαίου και βιομάζας είναι 87% και 78% αντίστοιχα.



Εικόνα 7-10 Κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση/ψύξη συναρτήσει των καυσίμων του λέβητα

Στο διάγραμμα της Εικόνα 7-11 παρατηρείται πως παρά το γεγονός ότι η βιομάζα έχει το μικρότερο συντελεστή πρωτογενούς ενέργειας, σημαντικό ρόλο παίζει ο συντελεστής απόδοσης του λέβητα και

γι' αυτό οι ενεργειακές ανάγκες αυξάνονται από το φυσικό αέριο στο πετρέλαιο και στη βιομάζα όπως ήταν αναμενόμενο.



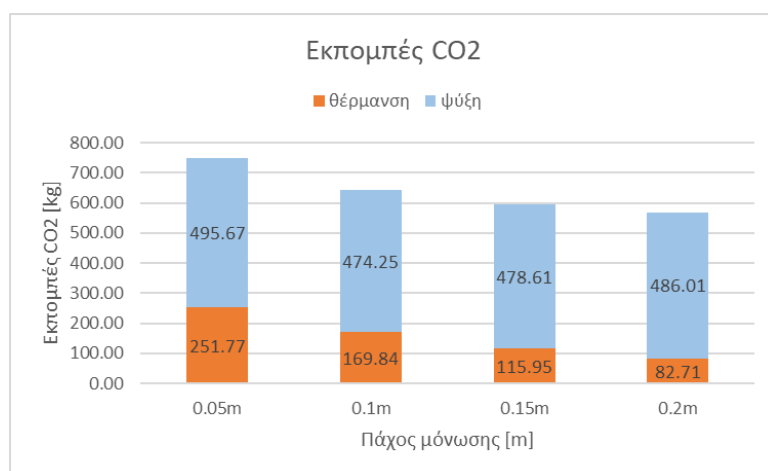
Εικόνα 7-11 Πρωτογενής ενέργεια συναρτήσει των καυσίμων στα συστήματα θέρμανσης/ψύξης

### 7.3 Περιβαλλοντική Αξιολόγηση

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των διαφόρων σεναρίων εξετάζεται με τον υπολογισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα λόγω των διαφόρων καυσίμων στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Θεωρώντας ως σύστημα θέρμανσης το σύστημα 1 με έξοδο τα fan coils, ως θερμομονωτικό υλικό το EPS με πάχος 0.15m, ως υαλοπίνακες τους 3-πλους απλούς και το θερμοστάτη στους 22oC, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνα 7-14.

#### Πάχος μόνωσης

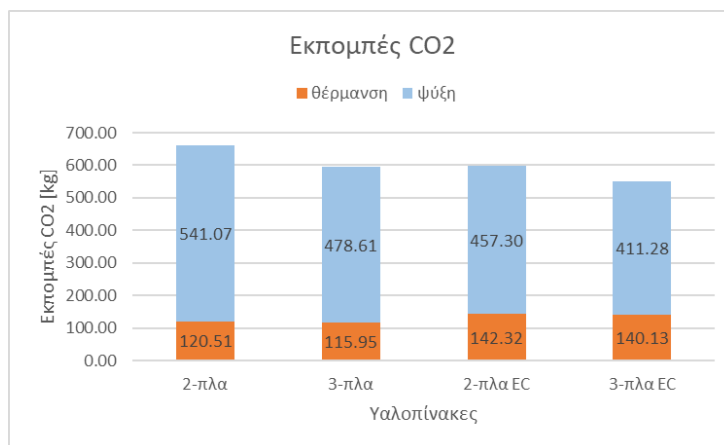
Στο διάγραμμα της Εικόνα 7-12 παρατηρείται πως καθώς το πάχος μόνωσης αυξάνεται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μειώνονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς το πάχος μόνωσης αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση μειώνεται όπως παρουσιάστηκε και στο διάγραμμα της Εικόνα 7-3. Επιπλέον, παρατηρείται μικρή αύξηση στις εκπομπές CO<sub>2</sub> που επηρεάζονται από το σύστημα ψύξης. Όπως φάνηκε στην Εικόνα 7-3 από τα 10 εκατοστά μόνωσης και πάνω η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη αυξάνεται καθώς λιγότερη θερμότητα από τα εσωτερικά και ηλιακά κέρδη εκλύεται προς το εξωτερικό περιβάλλον.



Εικόνα 7-12 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει του πάχους μόνωσης

## Υαλοπίνακες

Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνα 7-13 υπάρχει μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 8% - 10.2% με την προσθήκη ενός επιπλέον τζαμιού, με τη μεγαλύτερη μείωση να οφείλεται σε ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ απλών και ηλεκτροχρωμικών παραθύρων σε ποσοστό 7.1% - 9.3% με τη μεγαλύτερη μείωση να αφορά τα διπλά παράθυρα. Η μείωση αυτή υπάρχει παρά το γεγονός ότι αυξάνονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που οφείλονται στο σύστημα της θέρμανσης, καθώς ο συντελεστής εκπομπής του φυσικού αερίου είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο συντελεστή του ηλεκτρισμού (Πίνακας 3-2).

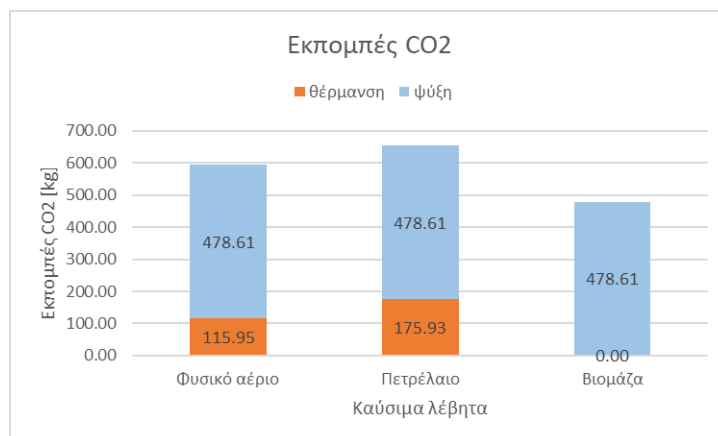


Εικόνα 7-13 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για κάθε τεχνολογία υαλοπίνακα

## Καύσιμα λέβητα

Το σύστημα θέρμανσης στο οποίο χρησιμοποιήθηκε λέβητας φυσικού αερίου εκπέμπει λιγότερα κιλά CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με τον λέβητα πετρελαίου. Αποτέλεσμα που οφείλεται στο γεγονός πως ο συντελεστής εκπομπής CO<sub>2</sub> του φυσικού αερίου είναι μικρότερος και μόλις 0.196 σε σχέση με του πετρελαίου που φτάνει το 0.264. Οι μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub> για θέρμανση όταν επιλεγθεί ως καύσιμο η βιομάζα οφείλονται στο γεγονός ότι η βιομάζα έχει μηδενικό συντελεστή εκπομπής σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ.

Το σύστημα ψύξης εκπέμπει 478kg CO<sub>2</sub> στη διάρκεια ενός χρόνου, σε κάθε περίπτωση, καθώς η λειτουργία του οφείλεται στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 7-14 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει του καυσίμου του συστήματος θέρμανσης

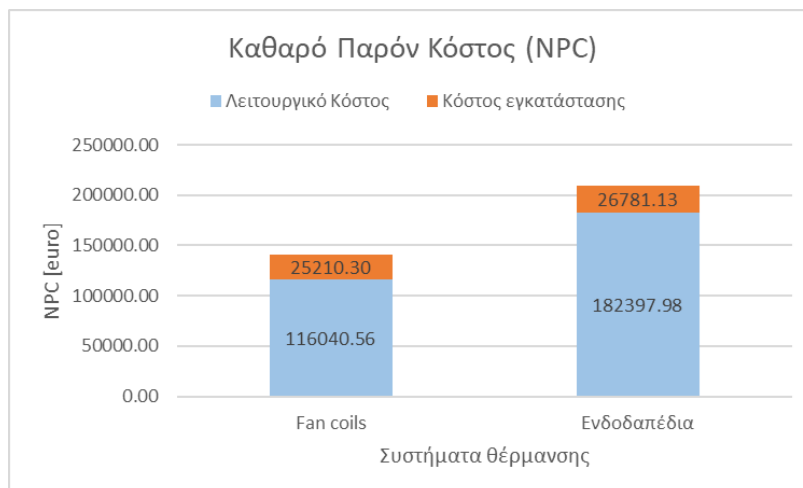
## 7.4 Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση

Για την τεχνοοικονομική ανάλυση των διαφόρων σεναρίων που μελετήθηκαν επιλέχθηκε ο υπολογισμός του δείκτη Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC).

### Συστήματα Θέρμανσης

Για το διάγραμμα της Εικόνα 7-15 παρουσιάζεται το NPC για τα δύο υπό μελέτη συστήματα θέρμανσης, ενώ κρατήθηκαν σταθερές οι παράμετροι της θερμομόνωσης (EPS) και του πάχους 0.15m, των υαλοπινάκων (3-πλοι απλοί), του καυσίμου του λέβητα (φυσικό αέριο) και του θερμοστάτη (22oC).

Σύμφωνα με τον υπολογισμό του καθαρού παρόντος κόστους, το σύστημα θέρμανσης με την ενδοδαπέδια έχει κατά 48% μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με το σύστημα με τα fan coils. Αποτέλεσμα που οφείλεται στο γεγονός ότι για την ενδοδαπέδια θέρμανση το κόστος των σωληνώσεων είναι μεγαλύτερο και όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενα διαγράμματα το σύστημα αυτό καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για θέρμανση του κτηρίου, άρα έχει και μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος.

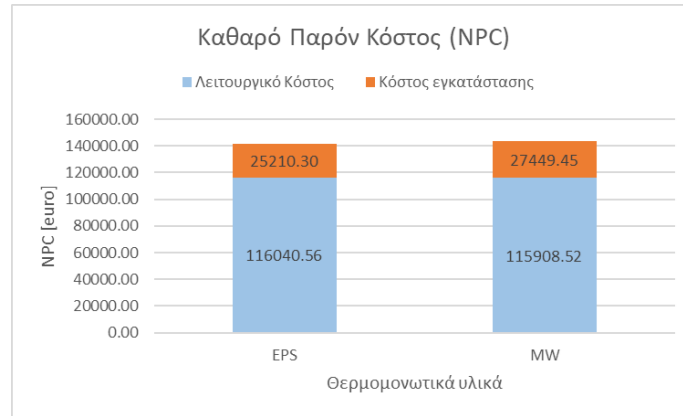


Εικόνα 7-15 Καθαρό Παρόν Κόστος για κάθε σενάριο θέρμανσης

### Θερμομονωτικά υλικά

Το διάγραμμα της Εικόνα 7-16 δείχνει το NPC για δύο περιπτώσεις με διαφορετικό υλικό μόνωσης ενώ οι υπόλοιποι παράμετροι είναι οι ίδιοι. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα θέρμανσης 1, με πάχος θερμομονωτικού υλικού τα 0.15m, 3-πλοι υαλοπίνακες, φυσικό αέριο στον λέβητα και ο θερμοστάτης στους 22°C.

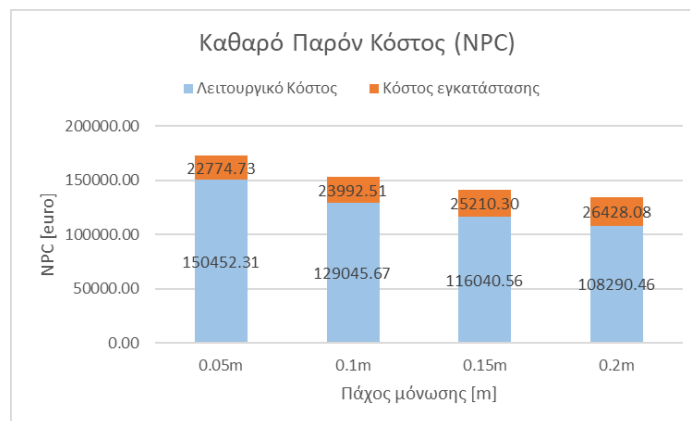
Η τοποθέτηση μόνωσης με πετροβάμβακα αυξάνει το NPC κατά 2.3% σε σχέση με την διογκωμένη πολυστερίνη, καθώς έχει μεγαλύτερο κόστος αγοράς.



Εικόνα 7-16 Καθαρό Παρόν Κόστος για κάθε σενάριο θερμομονωτικού υλικού

### Πάχος μόνωσης

Το διάγραμμα της Εικόνα 7-17, απεικονίζει το γεγονός πως αν αυξήσουμε το πάχος της μόνωσης τόσο μικρότερο γίνεται το καθαρό παρόν κόστος, κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους. Παρόλο που το μεγαλύτερο πάχος μόνωσης κοστίζει περισσότερο, το λειτουργικό κόστος των συστημάτων μειώνεται λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, συνεπώς μειώνεται και το συνολικό καθαρό παρόν κόστος. Παρουσιάστηκε και στο διάγραμμα της Εικόνα 7-4 πως η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται όσο πιο καλά μονωμένες είναι οι θερμικές ζώνες του κτηρίου.

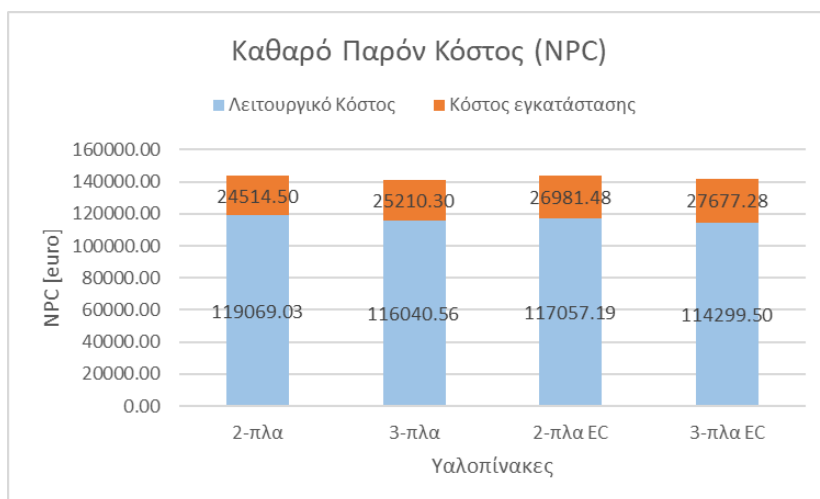


Εικόνα 7-17 Καθαρό Παρόν Κόστος για κάθε σενάριο πάχους θερμομόνωσης

### Υαλοπίνακες

Στο διάγραμμα της Εικόνα 7-18 παρατηρείται πως μεταξύ 2-πλων και 3-πλων απλών υαλοπινάκων υπάρχει μείωση του κόστους κατά 1.6%, ενώ μεταξύ 2-πλων και 3-πλων ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων υπάρχει αντίστοιχη μείωση της τάξης του 1%. Παρά το γεγονός ότι μια επιπλέον στρώση στον υαλοπίνακα κοστίζει περισσότερο, η μείωση του λειτουργικού κόστους ενέργειας λόγω μεγαλύτερης θερμομόνωσης του κτηρίου αποτελεί τον σημαντικότερο λόγο για μείωση του συνολικού καθαρού παρόντος κόστους σε βάθος 25ετίας. Επιπλέον, η χρήση των ηλεκτροχρωμικών αυξάνει το NPC κατά 0.31% για τα 2-πλα και 0.51% για τα 3-πλα εξαιτίας του υψηλού κόστους.

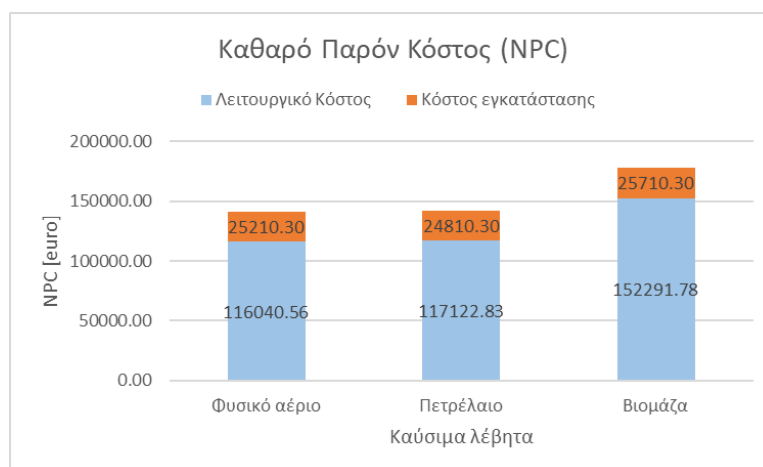
Για αυτό το διάγραμμα θεωρήθηκε ως σύστημα θέρμανσης το 1, ως θερμομονωτικό υλικό το EPS με πάχος 0.15m, ως καύσιμο λέβητα το φυσικό αέριο και ο θερμοστάτης ορίστηκε στους 22°C.



Εικόνα 7-18 Καθαρό Παρόν Κόστος για κάθε σενάριο μελέτης υαλοπίνων

### Καύσιμο λέβητα

Στο διάγραμμα της Εικόνα 7-19 παρατηρείται πως η επιλογή της βιομάζας στον λέβητα του συστήματος θέρμανσης συνεπάγεται υψηλότερο καθαρό παρόν κόστος. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος πως ο λέβητας βιομάζας κοστίζει κατά περίπου 31.2% περισσότερο από τον λέβητα συμπύκνωσης φυσικού αερίου και κατά 75% περισσότερο από τον λέβητα πετρελαίου. Επιπλέον, το λειτουργικό κόστος της χρήσης βιομάζας είναι μεγαλύτερο καθώς το καύσιμο κοστίζει σχεδόν την διπλάσια τιμή ανά kWh σε σχέση με το πετρέλαιο και επιπλέον, ο λέβητας βιομάζας έχει τη μικρότερη απόδοση από τους τρεις, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μόλις 78%.

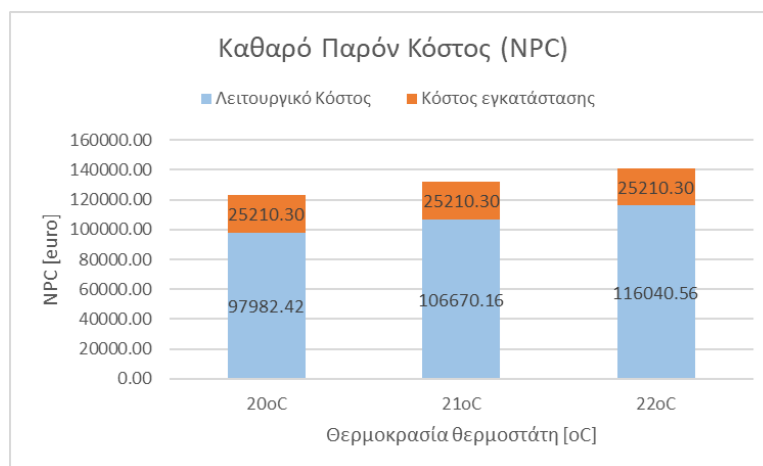


Εικόνα 7-19 Καθαρό Παρόν Κόστος για κάθε περίπτωση καυσίμου στον λέβητα θέρμανσης

### Θερμοκρασίες θερμοστάτη χώρου

Το διάγραμμα της Εικόνα 7-20 δείχνει το NPC για τρεις θερμοκρασίες του θερμοστάτη χώρου. Όταν ο θερμοστάτης του χώρου επιλέγεται να λειτουργεί στους 22°C, οι ώρες θέρμανσης του κτηρίου αυξάνονται σε σχέση με το να λειτουργούσε μόνο όταν η θερμοκρασία του κτηρίου έφτανε τους 20°C. Αυξανόμενων των ωρών θέρμανσης αυξάνονται οι kWh που απαιτούνται για λειτουργία των συστημάτων, άρα κατ' επέκταση το λειτουργικό κόστος στους 22°C είναι κατά 18.4% μεγαλύτερο σε σχέση με τους 20°C.





Εικόνα 7-20 Καθαρό Παρόν Κόστος για κάθε σενάριο θερμοκρασίας του θερμοστάτη

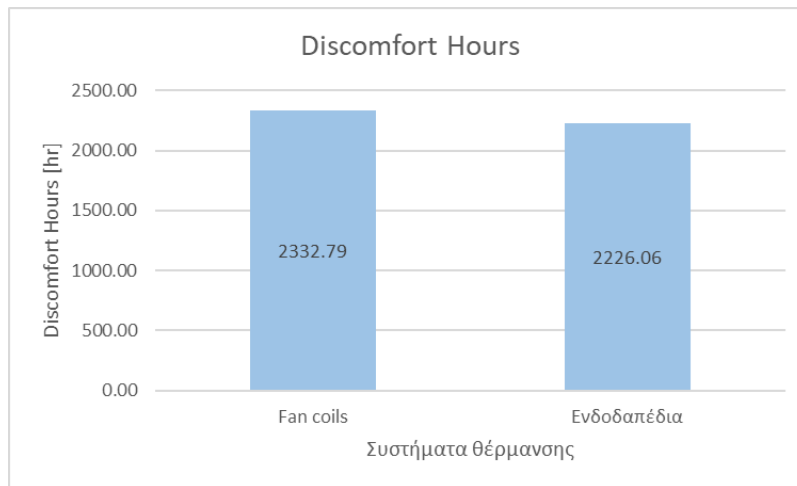
## 7.5 Αξιολόγηση Θερμικής άνεσης

Σε κάθε περίπτωση που μελετήθηκε το σύστημα ψύξης παραμένει ίδιο και η θερμοκρασία του θερμοστάτη που αλλάζει αφορά τους χειμερινούς μήνες. Γι' αυτούς τους λόγους στην αξιολόγηση της θερμικής άνεσης παρατηρούνται διαφορές κατά τους χειμερινούς μήνες και κατ' επέκταση οι ώρες μη άνεσης των ενοίκων οφείλονται στο γεγονός πως μπορεί να κρυώνουν ανάλογα με τον ρουχισμό τους.

### Σύστημα θέρμανσης

Για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης μεταξύ των δύο συστημάτων θέρμανσης, στη μία περίπτωση το σύστημα με έξοδο τα fan coils και στη δεύτερη περίπτωση το σύστημα με έξοδο την ενδοδαπέδια, επιλέχθηκε ένα υλικό μόνωσης, το EPS, με πάχος 0.15m και οι υαλοπίνακες είναι 3-πλοι απλοί. Το σύστημα δεν έχει φωτοβολταϊκά, το καύσιμο του λέβητα είναι το φυσικό αέριο και ο θερμοστάτης του χώρου ορίστηκε στους 22°C.

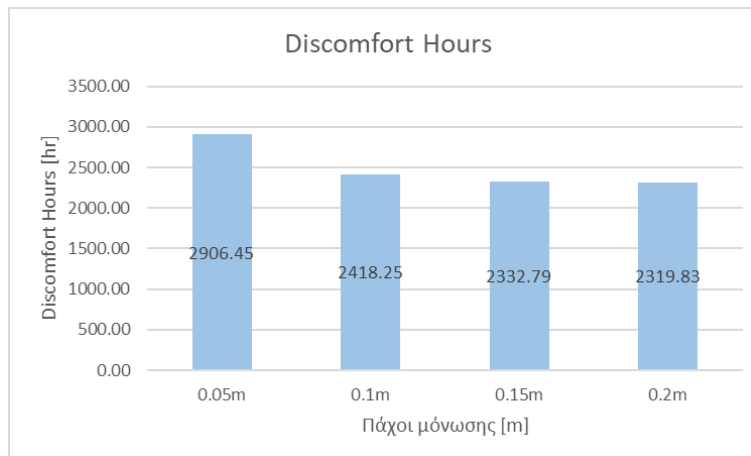
Παρατηρείται στο διάγραμμα της Εικόνα 7-21 ότι οι ώρες μη άνεσης των ενοίκων είναι κατά 4.5% περισσότερες στην περίπτωση της θέρμανσης με fan coils. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενδοδαπέδια θέρμανση παρέχει μια ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στον χώρο εξασφαλίζοντας έτσι καλύτερες συνθήκες άνεσης. Επιπλέον, η διαφορά αυτή είναι απόρροια της ταχύτητας του αέρα που ορίστηκε στη διάρκεια της προσομοίωσης και στις διακυμάνσεις που παρατηρούνται στη θερμοκρασία του χώρου στο σύστημα με τα fan coils.



Εικόνα 7-21 Αξιολόγηση θερμικής άνεσης για τις περιπτώσεις των συστημάτων θέρμανσης

### Πάχος μόνωσης

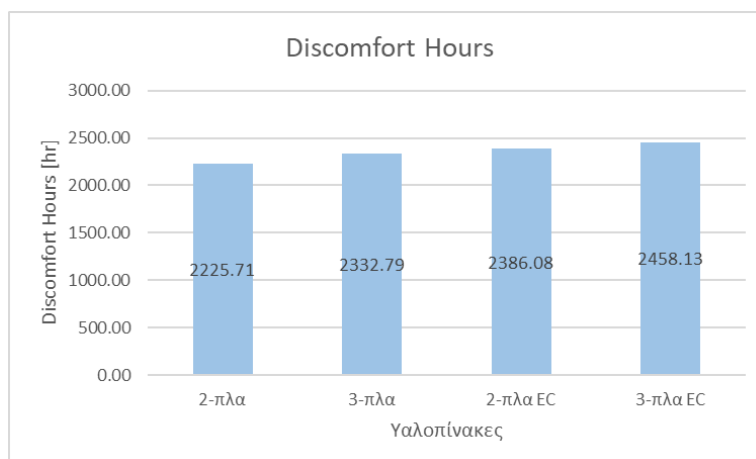
Στο διάγραμμα της Εικόνα 7-22 εντοπίζει κανείς πως όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης τόσο λιγότερες είναι οι ώρες μη άνεσης των ενοίκων του κτηρίου. Καθώς η μόνωση βελτιώνεται, τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης λειτουργούν αποδοτικότερα χωρίς πολλές απώλειες θερμότητας στον χώρο, άρα η θερμοκρασία του χώρου είναι σταθερότερη με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ώρες άνεσης.



Εικόνα 7-22 Αξιολόγηση θερμικής άνεσης για τις διάφορες περιπτώσεις πάχους του θερμομονωτικού υλικού

### Υαλοπίνακες

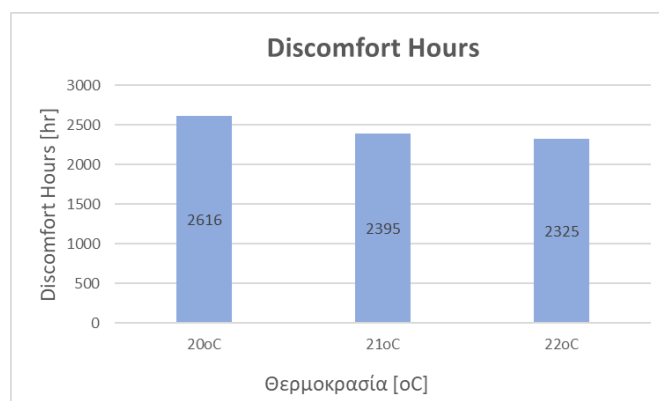
Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνα 7-23 παρατηρείται αύξηση των ωρών μη άνεσης κατά 3% - 4.8% με την προσθήκη ενός υαλοπίνακα για την περίπτωση των απλών και ηλεκτροχρωμικών παραθύρων αντίστοιχα. Αυτή η αύξηση οφείλεται στον αυξημένο συντελεστή SHGC (Πίνακας 7-1) των διπλών παραθύρων έναντι των τριπλών. Όσο μικραίνει ο συντελεστής SHGC τόσο λιγότερα είναι τα θερμικά ηλιακά κέρδη άρα οι ένοικοι του κτηρίου μπορεί να νιώθουν κάποιες ώρες κρύο κατά τους χειμερινούς μήνες ανάλογα με τον ρουχισμό τους. Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση στις ώρες μη άνεσης μεταξύ απλών και ηλεκτροχρωμικών παραθύρων κατά 5.3% - 7% για την περίπτωση των τριπλών και διπλών υαλοπινάκων αντίστοιχα. Αυτή η διαφορά οφείλεται και πάλι στον μικρότερο συντελεστή SHGC των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων καθώς και στο γεγονός πως τα απλά παράθυρα έχουν εσωτερική σκίαση η οποία περιορίζει την αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου λόγω ακτινοβολίας.



Εικόνα 7-23 Αξιολόγηση θερμικής άνεσης για τις διάφορες τεχνολογίες υαλοπινάκων

### Θερμοκρασίες θερμοστάτη χώρου

Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνα 7-24, όταν ο θερμοστάτης του λέβητα του συστήματος θέρμανσης είναι στους 20oC, συνεπάγεται πως οι ένοικοι του κτιρίου ανάλογα με τον ρουχισμό τους μπορεί να αισθάνονται κρύο σε θερμοκρασίες κάτω των 22oC. Για τον λόγο αυτό οι ώρες μη άνεσης στους 20oC είναι περισσότερες κατά ποσοστό 9.23% σε σχέση με τους 21oC και κατά 12.52% σε σχέση με τους 22oC.



Εικόνα 7-24 Αξιολόγηση θερμικής άνεσης για κάθε περίπτωση θερμοκρασίας του θερμοστάτη

## 7.6 Πολυκριτηριακή ανάλυση

Τα προηγούμενα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει εξεταζόμενη περίπτωση που να έχει ταυτόχρονα τη μικρότερη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, το μικρότερο Καθαρό Παρόν Κόστος (NPC), τις λιγότερες εκπομπές σε Kg CO<sub>2</sub> και τις λιγότερες ώρες μη θερμικής άνεσης. Γι' αυτό επιλέχθηκε η χρήση μιας μεθοδολογίας πολυκριτηριακής ανάλυσης, η μέθοδος PROMETHEE. Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι η επιλογή εναλλακτικών λύσεων. Ως εναλλακτικές λύσεις εισάγονται 2304 cases, δηλαδή όλες οι εναλλακτικές που αφορούν τα 2 συστήματα θέρμανσης, τα 2 θερμομονωτικά υλικά, τις 4 εναλλακτικές του πάχους μόνωσης και τους 4 υαλοπινάκες. Επιπλέον, αφορούν την ύπαρξη ή όχι φωτοβολταϊκών στο κτήριο και πόσα τετραγωνικά μέτρα καταλαμβάνουν και τέλος αφορούν την επιλογή καυσίμου στον λέβητα και την θερμοκρασία του θερμοστάτη λειτουργίας του. Δεύτερο βήμα είναι η επιλογή κριτηρίων, κατά το οποίο επιλέχθηκαν Key Point Indicators που εξετάζουν σε κάθε περίπτωση την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, τις εκπομπές

CO2 στην ατμόσφαιρα, το καθαρό παρόν κόστος και τη θερμική άνεση. Ως τελευταίο βήμα πρέπει να προσδιοριστούν τα βάρη για κάθε κριτήριο που ορίστηκε. Για τον προσδιορισμό των βαρών που χρησιμοποιήθηκαν στην πολυκριτηριακή μέθοδο αποφασίστηκαν τέσσερις εναλλακτικές περιπτώσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-3.

Για τον προσδιορισμό των βαρών στο 1<sup>ο</sup> σενάριο του Πίνακα 7-3 χρησιμοποιήθηκε ερωτηματολόγιο, το οποίο περιέχει ερωτήσεις για την αξιολόγηση των κριτηρίων του συνόλου των επεμβάσεων που εξετάστηκαν. Το ερωτηματολόγιο αναπτύχθηκε και συμπληρώθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου PLURAL (No 958218). Τα συμπεράσματα του ερωτηματολογίου δείχνουν πως σημαντικότερος δείκτης είναι η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων (41.3%), ενώ ο αμέσως επόμενος αφορά την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (22.7%).

Στο 2<sup>ο</sup> σενάριο όλοι οι Δείκτες Απόδοσης (KPIs) θεωρήθηκαν το ίδιο σημαντικοί, άρα με βάρος 25% ο καθένας.

Για το 3<sup>ο</sup> σενάριο θέλοντας να δοθεί μεγαλύτερο βάρος στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος τέθηκε το βάρος αυτού του Δείκτη Απόδοσης στο 40%. Τα υπόλοιπα KPI's θεωρήθηκαν ίσης σημαντικότητας σε ποσοστό 20%.

Για το 4<sup>ο</sup> σενάριο ερώτημα που εγέρθηκε ήταν ποια θα είναι η βέλτιστη λύση στην περίπτωση που τεθεί μεγαλύτερο βάρος στην θερμική άνεση που νιώθουν οι ένοικοι του κτηρίου. Με αυτό το σκοπό το βάρος του Thermal Comfort τέθηκε στο 35%. Το κόστος είναι δεύτερο όσον αφορά το βάρος με 25%, ενώ τέθηκε σε ίδιο επίπεδο σημαντικότητας η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και η περιβαλλοντική αξιολόγηση με ποσοστό 20% αντίστοιχα.

Πίνακας 7-3 Προσδιορισμός βαρών μεθόδου Promethee

Weights	Energy	CO2 emissions	NPC	Thermal Comfort
1 <sup>ο</sup> σενάριο	22.7%	18.7%	41.3%	17.4%
2 <sup>ο</sup> σενάριο	25%	25%	25%	25%
3 <sup>ο</sup> σενάριο	20%	40%	20%	20%
4 <sup>ο</sup> σενάριο	20%	20%	25%	35%

Αφού προσδιορίστηκαν τα βάρη, δημιουργήθηκε κώδικας στη MATLAB για τον προσδιορισμό του βέλτιστου case. Δημιουργήθηκε ένας ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ μεγέθους 2304x4, για τις 2304 περιπτώσεις που μελετάμε και 4 κριτήρια επιλογής και έπειτα κανονικοποιήθηκε με βάση τον ορισμό των Non-Beneficial Criteria της Εξίσωσης 7 :

$$R_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad [8]$$

Σύμφωνα με την μέθοδο PROMETHEE τα Non-Beneficial Criteria χρησιμοποιούνται όταν η καλύτερη λύση αφορά τη μικρότερη τιμή μιας παραμέτρου, σε αντίθεση με τα Beneficial Criteria, η οποία χρησιμοποιείται για την μεγιστοποίηση των επιλεγμένων κριτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, το καλύτερο σενάριο στα πλαίσια της ενέργειας είναι αυτό που αφορά τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, αντίστοιχα και για τα υπόλοιπα KPI's τα καλύτερα σενάρια αφορούν τη μικρότερη εκπομπή CO<sub>2</sub>, το μικρότερο καθαρό παρόν κόστος της επένδυσης και τις λιγότερες ώρες μη άνεσης των ενοίκων.

### Αποτελέσματα Μεθόδου Promethee

Σύμφωνα με τις πολυκριτηριακές μεθοδολογίες υπάρχει ένα βέλτιστο σενάριο με βάση τα βάρη που ορίζονται από ένα σύνολο ανθρώπων. Με τη μέθοδο PROMETHEE στο 1<sup>ο</sup> σενάριο προέκυψε ως βέλτιστο σενάριο ένα σύστημα θέρμανσης με έξοδο fan coils. Το θερμομονωτικό υλικό σ αυτή την περίπτωση είναι η διογκωμένη πολυστερίνη EPS με πάχος 20 εκατοστά. Οι υαλοπίνακες είναι 2-πλοι απλοί και τα φωτοβολταϊκά με επιφάνεια 30m<sup>2</sup>. Το καύσιμο του λέβητα είναι το φυσικό αέριο, ενώ ο θερμοστάτης τέθηκε στους 21°C.

Στο 2<sup>ο</sup> σενάριο έχοντας την ίδιο ποσοστό σημαντικότητας για κάθε ΚΡΙ προέκυψε η εξής βέλτιστη λύση. Το σύστημα θέρμανσης είναι το 1<sup>ο</sup> με έξοδο τα fan coils. Ως θερμομονωτικό υλικό προέκυψε το EPS με πάχος 0.2m. Οι υαλοπίνακες είναι 2-πλοι απλοί, ενώ θεωρήθηκε σύστημα φωτοβολταϊκών με επιφάνεια 30m<sup>2</sup>. Ως καύσιμο του λέβητα προέκυψε η βιομάζα, ενώ η πιο συμφέρουσα λύση για τη θερμοκρασία του θερμοστάτη είναι οι 21 °C.

Για το 3<sup>ο</sup> σενάριο, ενώ το βάρος του περιβαλλοντικού αποτυπώματος έφτασε το 40%, στο αποτέλεσμα της μεθόδου PROMETHEE προέκυψε ως βέλτιστο σενάριο ένα σύστημα θέρμανσης με έξοδο fan coils, θερμομονωτικό υλικό τον πετροβάμβακα σε πάχος 20 εκατοστά και παράθυρα τριπλά ηλεκτροχρωμικά. Επιπλέον το καύσιμο του λέβητα θέρμανσης προέκυψε η βιομάζα, τα φωτοβολταϊκά στα 30m<sup>2</sup> και ο θερμοστάτης του χώρου στους 21 °C.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7-3 το 4<sup>ο</sup> σενάριο αφορά το μεγαλύτερο βάρος να είναι στη θερμική άνεση των ενοίκων του κτηρίου. Ως αποτέλεσμα της μεθόδου PROMETHEE προέκυψε το σύστημα θέρμανσης 2 με έξοδο την ενδοδαπέδια θέρμανση. Το θερμομονωτικό υλικό στην περίπτωση αυτή είναι το MW με πάχος 20 εκατοστά. Οι υαλοπίνακες είναι 2-πλοι απλοί. Υπάρχει σύστημα φωτοβολταϊκών με επιφάνεια 30m<sup>2</sup>, το καύσιμο του λέβητα είναι η βιομάζα, ενώ ο θερμοστάτης ορίστηκε στους 20 °C.

Πίνακας 7-4 Αποτελέσματα Μεθόδου PROMETHEE

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
<b>Σύστημα θέρμανσης</b>	Fan coil	Fan coil	Fan coil	Ενδοδαπέδια
<b>Υλικό μόνωσης</b>	EPS	EPS	MW	MW
<b>Πάχος μόνωσης</b>	0.2m	0.2m	0.2m	0.2m
<b>Υαλοπίνακας</b>	2-πλα	2-πλα	3-πλα EC	2-πλα
<b>Καύσιμο λέβητα</b>	Φυσικό αέριο	Βιομάζα	Βιομάζα	Φυσικό αέριο
<b>Φωτοβολταϊκά</b>	30 m <sup>2</sup>	30 m <sup>2</sup>	30 m <sup>2</sup>	30 m <sup>2</sup>
<b>Θερμοκρασία θερμοστάτη</b>	21°C	21 °C	21 °C	20 °C

## 8 Συμπεράσματα

### 8.1 Συμπεράσματα αξιολόγησης ενεργειακής αναβάθμισης του κτηρίου

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μια συνδυαστική ενεργειακή, τεχνο-οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση ενεργειακών τεχνολογιών και συστημάτων σε υπάρχον κτήριο, εξετάζοντας εναλλακτικές περιπτώσεις για το σύστημα θέρμανσης, τον τύπο του λέβητα βάσει του καυσίμου λειτουργίας του, το υλικό και το πάχος της μόνωσης, διαφορετικούς τύπους υαλοπινάκων, την εγκατάσταση ή μη φωτοβολταϊκών συστημάτων και τη χρήση του θερμοστάτη της θέρμανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες ρύθμισης. Συνολικά προέκυψαν 2304 περιπτώσεις οι οποίες αξιολογούνται, ως προς την ενεργειακή απόδοση, τη περιβαλλοντική συμπεριφορά, την οικονομική βιωσιμότητα και την ύπαρξη συνθηκών θερμικής άνεσης. Για την αξιολόγησή τους ορίστηκαν 4 δείκτες απόδοσης, πρωτογενής ενέργεια, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, Καθαρό Παρόν Κόστος - NPC και ώρες μη θερμικής άνεσης. Ο υπολογισμός αυτών των δεικτών όλων των εναλλακτικών με τη χρήση του λογισμικού EnergyPlus.

Από την ενεργειακή αξιολόγηση των σεναρίων πρόκυψε ότι λιγότερη κατανάλωση ενέργειας απαιτεί ένα σύστημα θέρμανσης με θερματικά fan coils (54.6%) έναντι αυτού με την ενδοδαπέδια θέρμανση. Επιπλέον, εξοικονόμηση ενέργειας προκύπτει με την αύξηση του πάχους της θερμομόνωσης ή την προσθήκη ενός επιπλέον γυαλιού στους υαλοπίνακες (5.12% - 8.18%). Συγκεκριμένα για τις περιπτώσεις των υαλοπινάκων διαπιστώθηκε ότι η χρήση ηλεκτροχρωμικών αύξησε την τελική κατανάλωση για θέρμανση αλλά μείωσε την τελική κατανάλωση για ψύξη και φωτισμό, με αποτέλεσμα να είναι προτιμότερα σε ότι αφορά το δείκτη πρωτογενούς ενέργειας. Σε ότι αφορά τα δύο θερμομονωτικά υλικά EPS και MW, δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη διαφορά στην κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη, εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμικής αγωγιμότητας. Παρατηρήθηκε επίσης πως πάνω από τα 10m<sup>2</sup> φωτοβολταϊκών το κτήριο γίνεται σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης. Τέλος, ο λέβητας φυσικού αερίου λόγω μεγάλης απόδοσης είναι η καλύτερη λύση ενεργειακά με μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 12.6% σε σχέση με τον λέβητα πετρελαίου.

Στα πλαίσια της περιβαλλοντικής αξιολόγησης προέκυψαν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για θέρμανση στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο η βιομάζα, εξαιτίας του μηδενικού συντελεστή εκπομπών. Στην σύγκριση μεταξύ φυσικού αερίου και πετρελαίου, φιλικότερο προς το περιβάλλον είναι το φυσικό αέριο εξαιτίας της καλύτερης απόδοσης και του μικρότερου συντελεστή εκπομπών. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνεται το πάχος μόνωσης τόσο λιγότερες είναι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα καθώς οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι ανάλογες της κατανάλωσης ενέργειας η οποία μειώνεται καθώς το πάχος μόνωσης αυξάνεται.

Η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση των εναλλακτικών περιπτώσεων μέσω του υπολογισμού του Καθαρού Παρόντος Κόστους έδειξε πως η επιλογή της ενδοδαπέδιας θέρμανσης δεν είναι η πιο συμφέρουσα καθώς παρατηρείται αύξηση του συνολικού κόστους κατά 48% σε σχέση με το σύστημα με τα fan coils. Ωστόσο ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι η μείωση του κόστους στην περίπτωση των 3-πλων υαλοπινάκων έναντι των 2-πλων τόσο στην περίπτωση των απλών τζαμιών (1.6%) όσο και στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών (1%). Το συμπέρασμα αυτό αναδεικνύει την σημαντικότητα της μείωσης του λειτουργικού κόστους έναντι του αυξημένου κόστους εγκατάστασης. Τέλος, αναδείχθηκε ως η πιο συμφέρουσα λύση ο λέβητας φυσικού αερίου στο σύστημα θέρμανσης.

Στα πλαίσια της αξιολόγησης της θερμικής άνεσης των διαφόρων σεναρίων το πιο αξιοσημείωτο συμπέρασμα που προέκυψε είναι πως το σύστημα με την ενδοδαπέδια προσφέρει μεγαλύτερη θερμική άνεση στους χρήστες του κτηρίου. Επιπλέον, οι ώρες μη άνεσης των χρηστών είναι λιγότερες όταν ο θερμοστάτης του χώρου είναι στους 22°C και μάλιστα 12.52% λιγότερες σε σχέση με τους 20°C.

Τέλος, η παραπάνω ανάλυση οδήγησε στην εφαρμογή μιας πολυκριτηριακής μεθοδολογίας για την ανάδειξη της βέλτιστης εναλλακτικής από τις 2304 που μελετήθηκαν. Επιλέχθηκε η μέθοδος Promethee, χρησιμοποιώντας τέσσερα διαφορετικά σενάρια βαρών. Μετά την εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας προέκυψε πως πιο οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον είναι το σύστημα θέρμανσης με έξοδο τα fan coils, ενώ αντίθετα μεγαλύτερη θερμική άνεση προσφέρει το σύστημα με την ενδοδαπέδια θέρμανση. Σε κάθε σενάριο προέκυψαν οι διπλοί απλοί υαλοπίνακες ως βέλτιστη λύση, καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη θερμική άνεση, εκτός από την περίπτωση που μεγαλύτερο βάρος έχει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στην περίπτωση αυτή προέκυψαν τα τριπλά ηλεκτροχρωμικά παράθυρα. Ως τύπος λέβητα προέκυψε ο λέβητας φυσικού αερίου όταν το βάρος είναι στο οικονομικό κριτήριο, καθώς έχει το χαμηλότερο κόστος αγοράς και λειτουργίας λόγω μεγάλης απόδοσης του λέβητα, αλλά ο λέβητας βιομάζας ως φιλικότερος προς το περιβάλλον. Τέλος, προέκυψε σε κάθε σενάριο ως βέλτιστο πάχος μόνωσης τα 20 εκατοστά, καθώς προσφέρει τη μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση με το μικρότερο κόστος, τις λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τη μεγαλύτερη θερμική άνεση στους ενοίκους του κτηρίου και επιπλέον σε κάθε σενάριο προέκυψε το σύστημα των φωτοβολταϊκών με επιφάνεια 30m<sup>2</sup> γιατί είναι η πιο συμφέρουσα λύση οικονομικά.

## 8.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η παρούσα εργασία, μπορεί να αποτελέσει αφορμή για επιπλέον εξέταση παραμέτρων στην κατεύθυνση της ενεργειακής αναβάθμισης του κτηρίου.

Σε ότι αφορά την ενεργειακή, τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική του μελέτη θα μπορούσαν να εφαρμοστούν κι άλλες περιπτώσεις πιο καινοτόμων θερμομονωτικών υλικών, όπως υπερ-μονωτικά υλικά. Ταυτόχρονα, θα μπορούσαν να εξεταστούν και άλλες περιπτώσεις υαλοπινάκων όπως οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες και η επίδραση της επένδυσης low-e υαλοπινάκων σε απλούς υαλοπίνακες και όχι ηλεκτροχρωμικούς. Θα μπορούσαν ακόμα να εξεταστούν και διαφορετικές καιρικές συνθήκες, όπως ένα αρχείο καιρού μιας βόρειας χώρας. Τέλος, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και άλλες πολυκριτηριακές μέθοδοι για την εύρεση του βέλτιστου σεναρίου για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτηρίου.

Πέρα από την ενεργειακή μελέτη, όσων αφορά την περιβαλλοντική αξιολόγηση στον κτηριακό τομέα, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση σε ότι αφορά τον κύκλο ζωής του κτηρίου. Η ανάλυση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment) είναι η κατάλληλη μεθοδολογία για το σκοπό αυτό.

## 9 References

- [1] Francesco Asdrubali, Francesco D'Alessandro, Samuele Schiavoni (July 2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials.
- [2] “[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en),” [Online].
- [3] Δασκαλάκη Ε., Δρουτσα Κ, Κοντογιαννίδης Σ., (2014). Αποτύπωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των ελληνικών κτιρίων μέσω των ενεργειακών πιστοποιητικών
- [4] Roy, B., & Vincke, P. (1981). Multicriteria analysis: Survey and new directions. *European Journal of Operational Research*, 8(3)
- [5] ΚΑΠΕ. (1999). Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας μέσω θερμομονώσης
- [6] Υπηρεσία Ενέργειας, Υπουργείο Εμπορίου. (2010). Οδηγός θερμομονώσης κτιρίων (2η έκδοση) [Vol. 2].
- [7] [Online]. Available: <https://greenbuilding.gr/thermomonose/πετροβάμβακας/>.
- [8] [Online]. Available: <https://www.styropan.gr/proionta/thermomonotika/diogkomeni-polisterini/ti-einai>.
- [9] L. B. N. Laboratory, vol. THERM 6.3, no. WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual, 2013.
- [10] ASHRAE, “Handbook of Fundamentals,” 2001.
- [11] [Online]. Available: <https://www.eurodomica.gr/proionta/yalopinakes>.
- [12] Jeffrey Rissman, Hallie Kennan (March 2013). Case studies on the government’s role in energy technology innovation: Low-Emissivity Windows. American Energy Innovation Council.
- [13] [Online]. Available: <http://glassed.vitroglazings.com/topics/how-Low-e-glass-works>.
- [14] Δέτση Μικαέλα, (2019) Ενεργειακή προσομοίωση θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων σε κτίριο γραφείων με μεγάλη εξωτερική γυάλινη επιφάνεια
- [15] Jelle, Bjørn Petter, Andrew Hynd, Arlid Gustavsen, Dariush K. Arasteh, Howdy Goudey, Robert Hart (January 2012). Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96
- [16] Carl M. Lampert, (2004) Chromogenic smart materials, *Materials Today*, 3(7)
- [17] Μανωλίτσης Άρης, (2019) Ενεργειακή Ανάλυση σε ριζική ανακαίνιση υφιστάμενου κτηρίου κατοικιών με προκατασκευασμένα συστήματα ξηράς δόμησης και υπερμονωτικά υλικά, στην κατεύθυνση δημιουργίας κτηρίου σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nZEB)
- [18] [Online]. Available: [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/energeiaki\\_diaxeirisi\\_systymata.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/energeiaki_diaxeirisi_systymata.htm).



- [19] “ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ,” Α' έκδοση, Αθήνα, 2017.
- [20] Φαίδωνα-Ηλία Π. Κεφαλέα,(2012) “Αντλίες θερμότητας και ενδοδαπέδια θέρμανση: εφαρμογές σε συστήματα θέρμανσης κτιρίων κατοικιών”.
- [21] ΝΤΑΛΤΑΣ ΑΓΓΕΛΟΣ,(2022) “ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ,” ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.
- [22] Mumma, Stanley A. (2010). DOAS & Building Pressurization. ASHRAE Journal.
- [23] Orlaith McGinley, Moran Paul, Goggins Jamie, (2022). An assessment of the key performance indicators (KPIs) of energy efficient retrofits to existing residential buildings. *Energies*, 15(1).
- [24] Manolitsis A., Zacharis A., Atsonios I., Detsi M., Bonou A., Stamatiadou M., Mandilaras I. and Founti M., (2022) Energy – Comfort – Environment: What matters most? A multi-criteria assessment of a residential apartment, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (1078).
- [25] Pedro J. Zarco-Periñán 1 , Fco Javier Zarco-Soto , Irene M. Zarco-Soto , José L. Martínez-Ramos, Rafael Sánchez-Durán,(2022), CO2 Emissions in Buildings: A Synopsis of Current Studies.
- [26] Δρ. Εμμανουήλ Κακαράς, Δρ. Σωτήριος Καρέλλας , Δρ. Παναγιώτης Βουρλιώτης , Δρ. Διονύσιος Γιαννακόπουλος, Δρ. Παναγιώτης Γραμμέλης, Πλάτων Πάλλης, Εμμανουήλ Καραμπίνης, “Δείκτες εκπομπών ανά τύπο καυσίμου & τεχνολογία,” 29 Μαρτίου 2013.
- [27] ΙΩΑΝΝΗΣ. Δ. ΜΑΝΔΗΛΑΡΑΣ, “ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗΣ ΟΙΚΙΑΣ ΜΕ ΕΛΑΦΡΟΒΑΡΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΣΚΕΛΕΤΟ ΚΑΙ ΞΗΡΑ ΔΟΜΗΣΗ ΜΟΝΩΜΕΝΗ ΜΕ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΠΑΝΕΛ ΚΕΝΟΥ,” ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.
- [28] I. Pilatowsky, Romero R.J, Isaza C.A, Gamboa S.A, Sebastian P.J, (2011). Profitability Assessment of the Cogeneration System. In: Cogeneration Fuel Cell-Sorption Air Conditioning Systems. Green Energy and Technology. Springer, London.
- [29] ASHRAE STANDARD, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy,” no. 55, 2004.
- [30] Fanger P.O., Thermal Comfort Analysis and Applications in Environment Engineering, 1970.
- [31] ISO.7730, (2005) Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [32] Alessio Ishizaka, Philippe Nemery (2013, June 27). Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software
- [33] J.P. Brans, Ph. Vincke, B. Mareschal, "How to select and how to rank projects: The Promethee method", *European Journal of Operational Research*, Volume 24, Issue 2, 1986, Pages 228-238

- [34] C. Bana e Costa, "Preference Modelling and Decision Support: A Socio-Technical Interaction Perspective," *European Journal of Operational Research*, vol. 1, no. 92, pp. 147-164, 1996.
- [35] R. L. Keeney, "Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decision Making," *Harvard University Press*, 1992.
- [36] ΥΠ.Ε.Κ.Α, "Πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης Κτιρίων, Στατιστική ανάλυση για το έτος 2017," 2018.
- [37] BS EN 673:2011. (2011). Glass in building - Determination of thermal transmittance (U value) - Calculation method. British Standards Institution.
- [38] ENERGYPLUS, "VERSION 8.6 DOCUMENTATION," 30 September 2016.
- [39] [Online]. Available: <https://bigladdersoftware.com/>.
- [40] Δ. Ε. Κακαράς, Δ. Σ. Καρέλλας, Δ. Π. Βουρλιώτης, Δ. Π. Γραμμέλης, Δ. Π. Πάλλης, Ε. Καραμπίνης and Σ. Θανόπουλος, "Σύγκριση κόστους θέρμανσης από διάφορες τεχνολογίες," 2021.
- [41] C. Balaras, E. Dascalaki, K. Droutsas, S. Kontoyiannidis, R. Guruz, G. Gudnason, (January 2015) "Energy and other Key Performance Indicators for Buildings," *Examples for Hellenic Buildings* .
- [42] ΠΡΑΣΣΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ,(2015) "ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΧΑΜΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ (ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ) ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ TRNSYS," ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.
- [43] Roy, B., & Vincke, P. (1981). Multicriteria analysis: Survey and new directions. *European Journal of Operational Research*, 7(3), 198-206.