ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – Τηλ. 210-7723655, Fax 210-7723565

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Δυναμική προσομοίωση ηλιακού συστήματος θέρμανσης με εποχιακή αποθήκευση»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Οδυσσέα Κάλλη

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής,

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2022

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	**«Δυναμική προσομοίωση ηλιακού συστήματος θέρμανσης με εποχιακή αποθήκευση»**
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	**Κάλλης Οδυσσέας**
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	**Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών**
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	**2021-22**

Σύνοψη

Οι συνεχώς αυξανόμενες παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις, τόσο λόγω της πληθυσμιακής αύξησης, όσο και λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου, απαιτούν δράσεις για απεξάρτηση από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και στροφή σε καθαρότερες μορφές ενέργειας. Απώτερος στόχος φυσικά, είναι ο περιορισμός της ανόδου της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της Γης, σε επίπεδα χαμηλότερα των 2 ^{o}C, σε σχέση με τα αντίστοιχα της προβιομηχανικής περιόδου. Στον κτηριακό τομέα, ο οποίος αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο ποσοστό των τελικών ενεργειακών καταναλώσεων σε παγκόσμια κλίμακα, η προσπάθεια αυτή δεν έχει γνωρίσει μέχρι στιγμής μεγάλη ανάπτυξη. Οι περισσότερες λύσεις στοχεύουν είτε σε παθητικά μέτρα (πχ. μόνωση κτηριακού κελύφους), για μείωση των καταναλώσεων, είτε σε τοπικά ηλιακά συστήματα (φωτοβολταϊκά ή ηλιοθερμικοίσυλλέκτες), με την απόδοση των συστημάτων να είναι πλήρως εξαρτημένη από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα συστήματα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας αποτελούν μια βασική τεχνολογία για την επίλυση του προβλήματος, προσφέροντας τη δυνατότητα ετεροχρονισμένης διάθεσης της ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των θερμικών αναγκών καθ΄ όλη τη διάρκεια του έτους.

Η παρούσα εργασία, αποσκοπεί στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός τέτοιου συστήματος, οικιακής κλίμακας, με σκοπό τη διαστασιολόγησή των κυρίων υποσυστημάτων του, και την αναγνώριση των βασικότερων συνθηκών επηρεασμού του. Το σύστημα, η καινοτομία του οποίου εντοπίζεται στη χρήση προσροφητικού υλικού ως μέσου αποθήκευσης θερμότητας, κάνει χρήση δύο διαφορετικών διατάξεων, στοχεύοντας στην απρόσκοπτη λειτουργία του σε χώρες τόσο της κεντρικής όσο και της βόρειας Ευρώπης.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της μελέτης, το υπό εξέταση σύστημα εμφανίζει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, απαιτώντας παράλληλα μεγάλη συλλεκτική επιφάνεια για την κάλυψη των θερμικών αναγκών κατοικίας nZEB.

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε η δυναμική συμπεριφορά ενός ηλιακά τροφοδοτούμενου, καινοτόμου συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία της προσρόφησης. Το σύστημα, το οποίο μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό TRNSYS, αποτελεί προϊόν μελέτης και ανάπτυξης του ευρωπαϊκού προγράμματος SWS-Heating. Ως αποτέλεσμα πολλά από τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωσή του, δεν παρουσιάζονται για λόγους εμπιστευτικότητας.

Τα κύρια μέρη του συστήματος αποτελούν:

- Η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας (STES)
- Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού (ETCs)
- Ο λέβητας συμπύκνωσης φυσικού αερίου και
- Το δοχείο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας κενού

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με στόχο την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και ΖΝΧ μίας κατοικίας nZEB, σε ποσοστό τουλάχιστον ίσο με 60%, με κύριους παράγοντες διαστασιολόγησης του συστήματος την συνολική μάζα προσροφητικού υλικού καθώς και τη συνολική συλλεκτική επιφάνεια.

Το σύστημα περιλαμβάνει δύο διατάξεις, οι οποίες αφορούν τη μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας και συγκεκριμένα το τμήμα του συμπυκνωτή/ατμοποιητή της, λόγω των λειτουργικών θερμοκρασιακών περιορισμών που αυτός εμφανίζει. Συγκεκριμένα, η πρώτη διάταξη κάνει χρήση εναλλάκτη αέρα/νερού και μονάδας υλικού αλλαγής φάσης, με τη δεύτερη να αξιοποιεί διάταξη γεωθερμικού εναλλάκτη. Σκοπός και των δύο διατάξεων είναι η παροχή νερού κατάλληλης θερμοκρασίας στο παραπάνω τμήμα της εγκατάστασης, με τον γεωθερμικό εναλλάκτη εν γένει να χρησιμοποιείται σε πόλεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από χειμώνες μακράς διάρκειας με θερμοκρασίες υπό το μηδέν.

Η αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος, επικεντρώνεται σε πόλεις της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα ηλιοφάνειας κατά την χειμερινή περίοδο. Ως κύριες αντιπροσωπευτικές πόλεις, επιλέγονται η Νυρεμβέργη στη Γερμανία και η Στοκχόλμη στη Σουηδία, στις οποίες γίνεται χρήση της πρώτης και δεύτερης διάταξης αντίστοιχα.

Το σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας προσομοιώνεται από διακριτές υπομονάδες, με δεδομένη μάζα προσροφητικού μέσου, οι οποίες εμφανίζουν εκθετικές καμπύλες και φορτία φόρτισης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ανάπτυξη του μοντέλου πραγματοποιήθηκε ώστε να επιτρέπει τόσο σειριακή όσο και παράλληλη φόρτιση των υπομονάδων του συστήματος, με απώτερο σκοπό η απαίτηση σε φορτίο να διατηρείται σχεδόν σταθερή, και ικανή να καλυφθεί από τους ηλιακούς συλλέκτες, με παράλληλη αποφυγή μεγάλων θερμοκρασιακών πτώσεων.

Ο σωστός προσδιορισμός του συνδυασμού της συνολικής μάζας του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας και της επιφάνειας των συλλεκτών κενού, γίνεται ώστε να μειώνεται κατά το δυνατόν η αχρησιμοποίητη μάζα αυτού (dead volume), αποφεύγοντας παράλληλα την ηλιακή υποβοήθηση του συστήματος, που θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης της αποθήκευσης θερμότητας στην κάλυψη των απαιτούμενων φορτίων. Παράλληλα, η μείωση απαίτησης φορτίου κατά το τέλος των περιόδων φόρτισης και αποφόρτισης, θέτει ένα άνω όριο στην μέγιστη συλλεκτική επιφάνεια, για την αποφυγή φαινομένων υπερθέρμανσης.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος στις δύο πόλεις αναφοράς (Νυρεμβέργη και Στοκχόλμη), αποκαλύπτει την χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα που διακρίνει το υπό εξέταση σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας. Οι αναγκαίες μεγάλες μάζες προσροφητικού υλικού, οι οποίες σε κάθε περίπτωση υπερβαίνουν τους δύο τόνους, για την επίτευξη του επιθυμητού ηλιακού κλάσματος, αντιστοιχούν ωστόσο στο 30%-40% της συνολικής ηλιακής ενέργειας που παρέχεται στο σύστημα. Παράλληλα αυξημένη είναι και η συλλεκτική επιφάνεια η οποία είναι αναγκαία για την φόρτιση του συστήματος (>8 m^2), δεδομένου ότι για την επίτευξη αυτού είναι απαραίτητες θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 80 ^oC, .

Για την πλήρη κατανόηση λειτουργίας του συστήματος, μελετήθηκε η επίδραση της αλλαγής της τοποθεσίας της εγκατάστασης και συνεπώς των περιβαλλοντικών συνθηκών, στην μονοσήμαντη σχέση που φαίνεται να καθορίζει την συνολική μάζα προσροφητικού υλικού και συλλεκτικής επιφάνειας. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν πόλεις οι οποίες εκτείνονται σε μεγάλο μέρος της βόρειας και κεντρικής Ευρώπης, τόσο σε ορεινές όσο και σε παραθαλάσσιες γεωγραφικές τοποθεσίες. Πλην των δύο βασικών, μελετήθηκαν επιπλέον η Ζυρίχη στην Ελβετία, το Βουκουρέστι στη Ρουμανία, το Δουβλίνο στην Ιρλανδία και η Βαρσοβία στην Πολωνία.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης, έγινε φανερή η άμεση συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η οποία ως επί το πλείστον καθορίζει τις θερμικές απαιτήσεις της οικίας, με την συνολική μάζα προσροφητικού υλικού, η οποία είναι κάθε φορά απαραίτητη για την επίτευξη του επιθυμητού ηλιακού κλάσματος. Αντίστοιχα, όπως ήταν αναμενόμενο, η συλλεκτική επιφάνεια εξαρτάται, κυρίως από τα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, που διακρίνουν κάθε περιοχή, ορίζοντας σχεδόν μονοσήμαντα, την επικράτηση είτε της αποθήκευσης ή είτε της ηλιακής υποβοήθησης, στην λειτουργία του συστήματος. Το υπό μελέτη σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, φαίνεται να αποδίδει καλύτερα, σε χώρες της κεντρικής Ευρώπης, που χαρακτηρίζονται από μέσες προς υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ παράλληλα διακρίνονται από σχεδόν σταθερά, μέσα προς χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους. Κατά αυτόν τον τρόπο αναδεικνύεται σαφώς ο χαρακτήρας εποχιακής αποθήκευσης του συστήματος, με αποφυγή υπερθερμάνσεων στο τμήμα των ηλιακών συλλεκτών και επίτευξη υψηλών ποσοστών αξιοποίησης της χρησιμοποιούμενης μάζας του συστήματος.

POST-GRADUATE THESIS:	**«Dynamic modelling of a solar-driven heating system with seasonal storage»**
STUDENT:	**Kallis Odysseas**
SUPERVISOR:	**Karellas Sotirios, Professor, School of Mechanical Engineering**
ACADEMIC YEAR:	**2021-22**

Abstract

The non-stopping population growth, combined with the enhancement of the living standards, have resulted in continuously increasing energy demands, that require targeted actions to reduce our dependency on fossil fuels, while at the same time signaling a turn to renewable energy sources. The main purpose, is to limit global warming to well below 2°C, compared to pre-industrial levels. In the residential sector however, who represents a great portion of the final global energy consumption, such actions haven't met significant growth. The majority of the technologies implemented, are either of passive nature (e.g. external thermal insulation) aiming in a reduction of the residence's thermal needs, or make use of renewable energy sources at a local scale, with their performance being left subject to environmental conditions. Seasonal thermal energy storage systems, are a key technology that can tackle this problem, providing delayed availability to the energy harvested from renewable sources, shifting the production curve appropriately to meet the demands of the system.

The present study aims to dynamically model and evaluate the performance of such a system, for domestic scale application, providing proper sizing to its more crucial subsystems while at the same time identifying the main environmental factors that affect it. Its operability is tested in central and northern European cities, utilizing two different layouts, to meet the technological barriers, that its innovative adsorbent material, poses.

From the results of the study, a high adsorbent mass, showcasing a low energy density, as well as a large aperture area for the solar collectors, is deemed necessary to sufficiently cover a large percentage of the thermal energy demands of a nZEB house.

Summary

In the current master's thesis, the dynamic behavior, of a solar driven seasonal thermal energy storage system, that utilizes an innovative adsorbent bed is studied. The system that has been modelled in the TRNSYS software, is developed in the scope of the European project SWS-Heating. As a result, many of the data that were used in the simulation, cannot be presented in the current thesis, due to confidentiality issues.

The main parts of the system are listed below and include:

- The seasonal thermal energy storage unit (STES)
- Evacuated tube collectors (ETCs)
- A natural gas condensing boiler and
- A sensible heat storage tank

The main goal of the analysis performed, was to achieve a solar fraction of at least 60%, covering the thermal and DHW needs of an nZEB house, using the total adsorbent's mass and solar collectors' aperture area, as the crucial sizing parameters.

The system and specifically the seasonal thermal energy storage unit, makes use of two different layouts, for its evaporator/condenser part, to overcome the temperature limitations that the adsorbent material imposes. The first layout, makes use of an air-water HEX and a PCM tank, while the second utilizes a borehole HEX. Their main purpose, is to provide the evaporator/condenser part with water of suitable temperature, with the second layout generally used in areas that experience long term winters with sub-zero temperatures.

The initial sizing of the system is focused in central and northern European cities, that are characterized by low solar irradiance levels during the winter period. Nuremberg and Stockholm are selected as the basic representatives, making use of the first and second layout, respectively.

The seasonal thermal energy storage system is modelled with discrete sub-units, with a predefined adsorbent mass, characterized by exponential charging and load curves respectively. In the current thesis, the model was programmed to allow both serial and parallel charging of these sub-units, aiming in keeping the load demand steady, while at the same time avoiding high temperature drops in the solar collectors.

The correct combination of total adsorbent mass and evacuated solar collectors' area was performed, so as to decrease as possible the dead volume of the system, without greatly affecting the impact of thermal storage in covering the heating and DHW loads. At the same time, an upper bound is set to the maximum solar collectors' area that can be used, so as to avoid overheating of the system, given that there is a substantial load demand decrease, at the end of both the charging and discharging periods.

The resulted sizing of the system for the base scenarios' cities (Nuremberg and Stockholm), reveals a low energy density of the STES. The large mass of adsorbent material, necessary to achieve the desired solar fraction, which in any case exceeds two tons, covers however about 30%-40% of the total solar energy that is supplied to demand. At the same time the continuous need for high outlet temperatures from the solar collectors (>80°C) results in equally large aperture areas (> 8 m^2).

In order for the system's behavior to be fully understood, the effect of different geographic locations and as a result different weather conditions, on the relationship that governs the sizing of the STES and solar collectors's area, was studied. Besides the two base scenarios cities, Zurich, Bucharest, Dublin and Warsaw, were selected, to cover a large portion of central and northern Europe, in high altitude and near sea locations.

From the results of the study, the direct relationship between adsorbent mass and outdoor temperature was made clear, given that the second parameter dictates the thermal loads of the house. At the same time, as expected, the solar collectors' area is directly related to the solar irradiance levels of each location, governing also the impact that the STES system has in achieving the desired solar fraction.
The current STES system is favored, in cities that are located in central Europe, and are characterized by medium to high energy demands and low to medium irradiance levels that are kept steady throughout the year. In those cases, its impact is highly increased, achieving not only a smooth operation, without overheating of the solar collectors, but also low dead volume levels.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας» του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα, ο οποίος με εμπιστεύθηκε και μου ανέθεσε την εργασία, δίνοντάς μου την ευκαιρία να εργαστώ σε αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ευστράτιο Βαρβαγιάννη, για τη συμβολή του στην πρόοδο και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σύνοψη i

Περίληψη ii

Abstract iv

Summary v

ΠΡΟΛΟΓΟΣ vii

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ix

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ xii

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ xvi

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ xvii

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Αποθήκευση Ενέργειας 4

1.2 Αποθήκευση Θερμότητας 5

1.2.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας 6

1.2.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας 11

1.2.3 Χημική αποθήκευση θερμότητας 15

1.3 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες 17

1.3.1 Μη - Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες 18

1.3.1.1 Επίπεδοι Συλλέκτες 18

1.3.1.2 Συλλέκτες Κενού 19

1.3.1.3 Υβριδικοί Συλλέκτες 21

1.3.2 Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες 22

1.3.2.1 Μη απεικονιστικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες 23

1.3.2.2 Απεικονιστικοί Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες 24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Περιγραφή Συστήματος 27

2.1 Σύστημα Εποχιακής Αποθήκευσης Θερμότητας 27

2.1.1 Αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης 27

2.1.1.1 Διάταξη εναλλάκτη αέρα – νερού και δοχείου αδρανείας 28

2.1.1.2 Διάταξη γεωθερμικού εναλλάκτη 28

2.1.2 Περιγραφή των υπομονάδων της εγκατάστασης 29

2.1.2.1 Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας 29

2.1.2.2 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες Κενού 31

2.1.2.3 Δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας κενού 32

2.1.2.4 Δοχείο αδράνειας (με υλικά αλλαγής φάσης - PCM) 33
2.1.2.5 Εφεδρικός Λέβητας Φυσικού Αερίου 33
2.1.2.6 Λοιπά Συστήματα 35
2.1.3 Μονογραμμική απεικόνιση συστημάτων 35
2.2 Κτηριακή Μονάδα 38
2.2.1 Αρχιτεκτονική Βορειοευρωπαϊκών Χωρών 38
2.2.2 Κτηριακό μοντέλο 39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Δυναμική Μοντελοποίηση 41
3.1 Εισαγωγή στο TRNSYS 41
3.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση 44
3.2.1 Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού 44
3.2.2 Δεξαμενή Αποθήκευσης Θερμότητας Κενού 47
3.2.3 Λέβητας Φυσικού Αερίου 50
3.2.4 Δοχείο Αδρανείας (PCM) 51
3.2.5 Υδραυλικά Στοιχεία 52
3.2.6 Στοιχεία Ελέγχου 54
3.2.7 Ζεστό Νερό Χρήσης 55
3.2.8 Σύστημα Εποχιακής Αποθήκευσης Θερμότητας 57
3.2.8.1 Υπάρχον Μοντέλο 57
3.2.8.2 Βελτιωμένο Μοντέλο 59
3.3 Προσομοίωση οικίας στο TRNBUILD 64
3.3.1 Θερμοκρασία προσαγωγής νερού σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης 65
3.4 Συνολική απεικόνιση συστήματος 66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Αποτελέσματα 69
4.1 Νυρεμβέργη 71
4.1.1 Διαστασιολόγηση του συστήματος 71
4.1.2 Συνολική λειτουργία του συστήματος 79
4.2 Στοκχόλμη 83
4.2.1 Διαστασιολόγηση του συστήματος 83
4.2.2 Συνολική λειτουργία του συστήματος 89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ευρωπαϊκός Χάρτης 93
5.1 Νυρεμβέργη 93
5.2 Στοκχόλμη 95

5.3 Δουβλίνο 96
5.4 Άμστερνταμ 97
5.5 Βουκουρέστι 98
5.6 Ζυρίχη 100
5.7 Βαρσοβία 101
5.8 Σύγκριση και συμπεράσματα 102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συμπεράσματα και Βελτιώσεις 109
6.1 Συμπεράσματα μελέτης 109
6.2 Προτάσεις και βελτιώσεις του συστήματος 111
6.2.1 Δυναμική μοντελοποίηση 111
6.2.2 Αξιολόγηση συστήματος 111
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 113

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ. 1.1: Παγκόσμια τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα [4]....1
Εικ. 1.2: Παγκόσμια συνολική παραγωγή ενέργειας ανά είδος [4]....2
Εικ. 1.3: Συνολική παραγωγή ενέργειας ανά είδος – Ευρωπαϊκή Ενωση [4]....3
Εικ. 1.4: Ποσοστιαία κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του οικιακού τομέα στην ΕΕ ανά είδος καυσίμου [6]....3
Εικ. 1.5: Θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης θερμότητας [18]....6
Εικ. 1.6: (α) Σύστημα υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα – ATES (β) Σύστημα γεώτρησης – BTES (γ) Σύστημα υπόγειων φρεατίων – PTES (δ) Σύστημα υπόγειων δεξαμενών – TTES [20]....8
Εικ. 1.7: Διάταξη πολυσωλήνιου συστήματος σε δεξαμενή νερού για επίτευξη θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης [25]....9
Εικ. 1.8: Σχεδιαγραμματική απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης και καθώς και διάταξης για εκμετάλλευση αποθηκευμένης θερμότητας σε ηλιακή λίμνη [28]....10
Εικ. 1.9: Διατάξεις σταθερής κλίνης με πληρωτικό υλικό (α) σε άμεση επαφή με το εργαζόμενο μέσο (β) με χρήση διάταξης σωληνώσεων [29]....11
Εικ. 1.10: Κατηγοριοποίηση υλικών αλλαγής φάσης [34]....12
Εικ. 1.11: Υλικό αλλαγής φάσης σε διάταξη σταθερού σχηματισμού....13
Εικ. 1.12: Συγκριτική απεικόνιση υλικών αλλαγής φάσης σε (α) Διάταξη σταθερού σχηματισμού με μεταλλικό κυψελοειδή σκελετό (β) Διάταξη σταθερού σχηματισμού [37]....14
Εικ. 1.13: Διάταξη μεταφοράς θερμότητας συστημάτων με χρήση υλικών αλλαγής φάσης....14
Εικ. 1.14: Κατηγοριοποίηση ηλιοθερμικών συλλεκτών [14]....17
Εικ. 1.15: Βασικά τμήματα επίπεδου συλλέκτη (1) Κάλυμμα (2) Πλάκα απορρόφησης (3) Σύστημα αγωγών (4) Μόνωση (5) Πλαίσιο συλλέκτη Πηγή: [47]....18
Εικ. 1.16: Βασικά τμήματα και διαμόρφωση συλλέκτη κενού θερμικού σωλήνα....20
Εικ. 1.17: Διαμορφώσεις συλλεκτών κενού άμεσης ροής (a) Ομοαξονικού σωλήνα (β) Τύπου U (γ) Θερμοσιφωνικού σωλήνα. Πηγή: [53, 54]....21
Εικ. 1.18: Διατάξεις υβριδικών ηλιακών συλλεκτών με εργαζόμενο μέσο νερό (α) Σωλήνα – ελάσματος (β) Καναλιού (γ) Ελεύθερης ροής (δ) Διπλού απορροφητή [56]....22
Εικ. 1.19: Διατάξεις υβριδικών ηλιακών συλλεκτών με εργαζόμενο μέσο τον αέρα (α) Αυλακώσεων (β) Κυματοειδούς ελάσματος (γ) Σωλήνων / αγωγών [57]....22
Εικ. 1.20: Διαμορφώσεις παραβολικού συλλέκτη (α) Επίπεδου απορροφητή (β) Διπολικού απορροφητή (γ) Πρισματικού απορροφητή (δ) Σωληνοειδή απορροφητή [58]....23
Εικ. 1.21: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύνθετου παραβολικού συλλέκτη επίπεδου απορροφητή [61]....24
Εικ. 1.22: Απεικονιστικοί Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες (α) Παραβολικού κατόπτρου (β) Γραμμικών Ανακλαστήρων Frensel (γ) Ηλιακού πύργου (δ) Ηλιακού δίσκου [66]....25
Εικ. 2.1: Σχηματική απεικόνιση του υπό μελέτη συστήματος....29
Εικ. 2.2: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης και λειτουργίας της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας....30
Εικ. 2.3: Αποθήκευση και ανάκτηση θερμότητας σε υδατικά υλικά ρόφησης [69]....30

Εικ. 2.4: Ηλιακοί συλλέκτες κενού (Αριστερά) Εμπορικός συλλέκτης της εταιρίας AkoTec Produktions GmbH (Δεξιά) Συλλέκτης που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες του έργου SWS-Heating 31
Εικ. 2.5: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών απόδοσης – θερμοκρασίας για τους υπό μελέτη συλλέκτες 31
Εικ. 2.6: Δοχείο αποθήκευσης θερμότητας κενού της εταιρίας Sirch GmbH & Co. 32
Εικ. 2.7: Δοχείο αδρανείας (α) Υλικό αλλαγής φάσης ενθυλακωμένο σε πλάκες κατάλληλης διαμόρφωσης (β) Εσωτερική διαμόρφωση δοχείου αδρανείας (γ) Τελική μορφή δοχείου αδρανείας – Εξωτερική απεικόνιση 33
Εικ. 2.8: Λέβητας συμπύκνωσης φυσικού αερίου RIELLO του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων ΕΜΠ 34
Εικ. 2.9: Σχηματική απεικόνιση συστήματος με χρήση εναλλάκτη αέρα και δοχείου αδράνειας 36
Εικ. 2.10: Σχηματική απεικόνιση συστήματος με χρήση γεωθερμικού εναλλάκτη 37
Εικ. 2.11: Συντελεστής Θερμικής Διαπερατότητας Εξωτερικής Τοιχοποιίας [78] 39
Εικ. 2.12: Αρχιτεκτονική βορειοευρωπαϊκών χωρών (α) Γερμανία (β) Σουηδία 39
Εικ. 2.13: Τρισδιάστατη απεικόνιση της κτηριακής μονάδας στο λογισμικό SketchUp™ 40
Εικ. 3.1: Περιβάλλον Προσομοίωσης TRNSYS 42
Εικ. 3.2: Διασύνδεση εισόδων – εξόδων των επιμέρους μοντέλων στο λογισμικό TRNSYS 42
Εικ. 3.3: Διάταξη σε περιβάλλον TRNSYS για συγκριτικό έλεγχο λειτουργίας των μοντέλων Type71, Type538 και Type1288_EvacTube 46
Εικ. 3.4: Συγκριτκά αποτελέσματα λειτουργίας των μοντέλων TRNSYS, Type71, Type538 .... και Type1288_EvacTube 46
Εικ. 3.5: Διάταξη σε περιβάλλον TRNSYS για έλεγχο της επίδρασης του πλήθους κόμβων στη δυναμική της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού 48
Εικ. 3.6: Απεικόνιση καμπυλών χρόνου-θερμοκρασίας στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού για διαφορετικό πλήθος κόμβων 49
Εικ. 3.7: Επίδραση του πλήθους κόμβων στη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού 50
Εικ. 3.8: Γραφική απεικόνιση της καμπύλης ενθαλπίας – θερμοκρασίας για το υλικό αλλαγής φάσης 52
Εικ. 3.9: Λογική λειτουργίας ελεγκτών ON/OFF 54
Εικ. 3.10: Λογική λειτουργίας ελεγκτών με ανάδραση 55
Εικ. 3.11: Μονογραμμική απεικόνιση διάταξης για παραγωγή ZNX επιθυμητής θερμοκρασίας 56
Εικ. 3.12: Απεικόνιση μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας σε περιβάλλον TRNSYS (α) Συμπτυγμένη μακροεντολή (β) Εσωτερικά στοιχεία μακροεντολής 59
Εικ. 3.13: Διατάξεις βελτιωμένου μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας σε περιβάλλον TRNSYS (α) Διάταξη σταθερών συνθηκών εισόδου (β) Δυναμικό σύστημα 60
Εικ. 3.14: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών φόρτισης παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας για σταθερές συνθήκες εισόδου 61

Εικ. 3.15: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών φορτίου προσροφητή παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας για σταθερές συνθήκες εισόδου 62
Εικ. 3.16: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών αποθηκευμένης ενέργειας για σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης για δυναμικές συνθήκες εισόδου 63
Εικ. 3.17: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών επιπέδου φόρτισης για σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης για δυναμικές συνθήκες εισόδου 63
Εικ. 3.18: Περιβάλλον πολυζωνικού κτηρίου TRNBUILD 65
Εικ. 3.19: Αποτύπωση διάταξης εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας με PCM και εναλλάκτη αέρα 66
Εικ. 3.20: Αποτύπωση διάταξης εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας με γεωθερμικό εναλλάκτη 67
Εικ. 4.1: Ηλιακό κλάσμα και μέγιστο επίπεδο φόρτισης συστήματος STES –Νυρεμβέργη 72
Εικ. 4.2:Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 1- Νυρεμβέργη 73
Εικ. 4.3:Θερμοκρασία εξόδου συλλεκτών και καμπύλη φόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 1 – Νυρεμβέργη 74
Εικ. 4.4: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 6- Νυρεμβέργη 75
Εικ. 4.5: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 7- Νυρεμβέργη 75
Εικ. 4.6:Καμπύλες λειτουργίας STES-PCM – Σενάριο 6α – Νυρεμβέργη 77
Εικ. 4.7:Καμπύλες λειτουργίας STES-PCM – Σενάριο 6γ – Νυρεμβέργη 77
Εικ. 4.8: Καμπύλες λειτουργίας STES-PCM – Σενάριο 6β – Νυρεμβέργη 78
Εικ. 4.9: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Διετές Σενάριο – Νυρεμβέργη 79
Εικ. 4.10: Θερμοκρασία προσαγωγής νερού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης (Πάνω), Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Κάτω) – Νυρεμβέργη 80
Εικ. 4.11: Θερμοκρασία αέρα θερμαινόμενων χώρων οικίας nZEB – Νυρεμβέργη 80
Εικ. 4.12: Θερμοκρασίαk παροχής ΖΝΧ προς καταναλώσεις – Νυρεμβέργη 81
Εικ. 4.13: Θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση δοχείου αποθήκευσης αισθητής θερμότητας – Νυρεμβέργη 82
Εικ. 4.14: Ηλιακό κλάσμα και μέγιστο επίπεδο φόρτισης συστήματος STES – Στοκχόλμη 84
Εικ. 4.15: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 4- Στοκχόλμη 85
Εικ. 4.16: Καμπύλη θερμοκρασίας – επιπέδων φόρτισης – Σενάριο 7 – Παράλληλη φόρτιση για SoC>70% - Στοκχόλμη 86
Εικ. 4.17: Καμπύλη θερμοκρασίας – επιπέδων φόρτισης – Σενάριο 7 – Παράλληλη φόρτιση για SoC>50% - Στοκχόλμη 87
Εικ. 4.18: Καμπύλη θερμοκρασίας – επιπέδων φόρτισης – Σενάριο 7 – Παράλληλη φόρτιση για SoC>60% - Στοκχόλμη 88
Εικ. 4.19: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Διετές Σενάριο – Στοκχόλμη 89
Εικ. 4.20: Θερμοκρασία προσαγωγής νερού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης (Πάνω), Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Κάτω) – Στοκχόλμη 90
Εικ. 4.21: Θερμοκρασία αέρα θερμαινόμενων χώρων οικίας nZEB – Στοκχόλμη 90
Εικ. 4.22: Θερμοκρασίαk παροχής ΖΝΧ προς καταναλώσεις – Νυρεμβέργη 91

Εικ. 4.23: Θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση δοχείου αποθήκευσης αισθητής θερμότητας - Στοκχόλμη 92
Εικ. 5.1: Θερμοκρασιακά προφίλ Νυρεμβέργης 94
Εικ. 5.2:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Νυρεμβέργης 94
Εικ. 5.3: Θερμοκρασιακά προφίλ Στοκχόλμης 95
Εικ. 5.4:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Στοκχόλμης 95
Εικ. 5.5: Θερμοκρασιακά προφίλ Δουβλίνου 96
Εικ. 5.6:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Δουβλίνου 97
Εικ. 5.7: Θερμοκρασιακά προφίλ Άμστερνταμ 97
Εικ. 5.8:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Άμστερνταμ 98
Εικ. 5.9: Θερμοκρασιακά προφίλ Βουκουρεστίου 99
Εικ. 5.10:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Βουκουρεστίου 99
Εικ. 5.11: Θερμοκρασιακά προφίλ Ζυρίχης 100
Εικ. 5.12:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Ζυρίχης 101
Εικ. 5.13: Θερμοκρασιακά προφίλ Βαρσοβίας 101
Εικ. 5.14:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Βαρσοβίας 102
Εικ. 5.15: Καμπύλες διάρκειας ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για τις υπό εξέταση πόλεις 103
Εικ. 5.16: Ηλιακά κέρδη οικίας για την περίοδο Οκτωβρίου – Μαϊου στις υπό μελέτη πόλεις. 103
Εικ. 5.17:Διαγραμματική απεικόνιση ενεργειακών απαιτήσεων - μάζας προσροφητικού υλικού (STES) 105
Εικ. 5.18: Διαγραμματική απεικόνιση ενεργειακών απαιτήσεων – συλλεκτικής επιφάνειας..... 106
Εικ. 5.19:Ευρωπαϊκός Χάρτης εφαρμογής του υπό εξέταση συστήματος..... 107

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πιν. 1.1: Ποσοστιαία κάλυψη ενεργειακών αναγκών κτηριακού τομέα, ανά είδος καυσίμου και κατηγορία κατανάλωσης [6] 4
Πιν. 1.2: Κατηγορίες τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [10, 11] 5
Πιν. 1.3: Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται ως υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας [18, 19] 7
Πιν. 1.4: Οικονομοτεχνικά στοιχεία υπόγειων συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας [20] 9
Πιν. 1.5: Κατηγορίες αντιδράσεων ρόφησης για αποθήκευση θερμότητας [41] 15
Πιν. 1.6: Κατηγορίες χημικών αντιδράσεων για αποθήκευση θερμότητας [40] 16
Πιν. 2.1: Χαρακτηριστικά δοχείου αποθήκευσης θερμότητας κενού της εταιρίας Sirch GmbH & Co. 32
Πιν. 2.2: Συντελεστής Θερμικής Διαπερατότητας Εξωτερικής Τοιχοποιίας [78] 38
Πιν. 3.1: Συνθήκες προσομοίωσης για έλεγχο της επίδρασης του πλήθους κόμβων στη δυναμική της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού 49
Πιν. 3.2: Συντελεστές θερμοπερατότητας κτηριακού κελύφους 64
Πιν. 3.3: Εσωτερικά θερμικά φορτία οικίας 64
Πιν. 4.1:Σενάρια διαστασιολόγησης συστήματος STES – Νυρεμβέργη 71
Πιν. 4.2:Σενάρια για επιλογή μάζας PCM - Νυρεμβέργη 76
Πιν. 4.3: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης και προσομοίωσης του συστήματος – Νυρεμβέργη78
Πιν. 4.4: Σενάρια διαστασιολόγησης συστήματος STES – Στοκχόλμη 83
Πιν. 4.5: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης και προσομοίωσης του συστήματος – Στοκχόλμη.. 87
Πιν. 5.1: Πόλεις υπό εξέταση 93
Πιν. 5.2: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Νυρεμβέργης 94
Πιν. 5.3: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Στοκχόλμης 96
Πιν. 5.4: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Δουβλίνου 97
Πιν. 5.5: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Άμστερνταμ 98
Πιν. 5.6: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Βουκουρεστίου 100
Πιν. 5.7: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Ζυρίχης 101
Πιν. 5.8: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Βαρσοβίας 102
Πιν. 5.9: Αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης για τις υπό εξέταση πόλεις 104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A	*Επιφάνεια*	*m²*
C	*Θερμοχωρητικότητα*	J/K
C_f	*Γεωμετρικός λόγος*	*(-)*
C_p	*Ειδική θερμοχωρητικότητα*	J/kgK
CS	*Σήμα ελέγχου*	*(-)*
E	*Ενέργεια*	J
E_L	*Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος λ>3 μm*	W/m^2
ε	*Αποτελεσματικότητα Εναλλάκτη*	*(-)*
F'	*Παράγων απόδοσης συλλέκτη*	*(-)*
F_R	*Παράγων θερμικής απολαβής συλλέκτη*	*(-)*
f	*Συντελεστής διαμοιρασμού απωλειών*	*(-)*
G	*Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο*	W/m^2
G^*	*Ένταση ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ημισφαιρίου*	W/m^2
H	*Ύψος*	m
h	*Ενθαλπία*	J/kg
h_{ev}	*Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης*	J/kg
k	*Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με αγωγή*	W/mK
K_θ	*Διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης*	*(-)*
L	*Μήκος*	m
$\dot{m}$	*Παροχή μάζας*	kg/s
P	*Ισχύς*	W
Q	*Θερμική Ισχύς*	W
$\dot{Q}_u$	*Απορροφούμενη ισχύς από ηλιοθερμικό συλλέκτη*	W
T	*Θερμοκρασία*	K
t	*Χρόνος*	s
u	*Περιρρέουσα ταχύτητα ανέμου*	m/s
U	*Συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών*	W/m^2K
U_L	*Συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών συλλέκτη*	W/m^2K
w	*Αναλογία μάζας νερού/προσροφητικού μέσου*	kg_w/kg
<u>*Ελληνικά Σύμβολα*</u>		
ΔT	*Θερμοκρασιακή διαφορά*	K
ΔT_{lm}	*Μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά*	K
Δt	*Χρονική διαφορά*	s
η	*Βαθμός απόδοσης,*	*(-)*
η_h	*Υδραυλικός βαθμός απόδοσης*	*(-)*
η_m	*Μηχανικός βαθμός απόδοσης*	*(-)*
θ	*Γωνία πρόσπτωσης/αποδοχής ηλιακής ακτινοβολίας*	*(°)*
$(\tau\alpha)$	*Ολικό γινόμενο εκπεμπτικότητας – απορροφητικότητας*	*(-)*
<u>*Δείκτες*</u>		

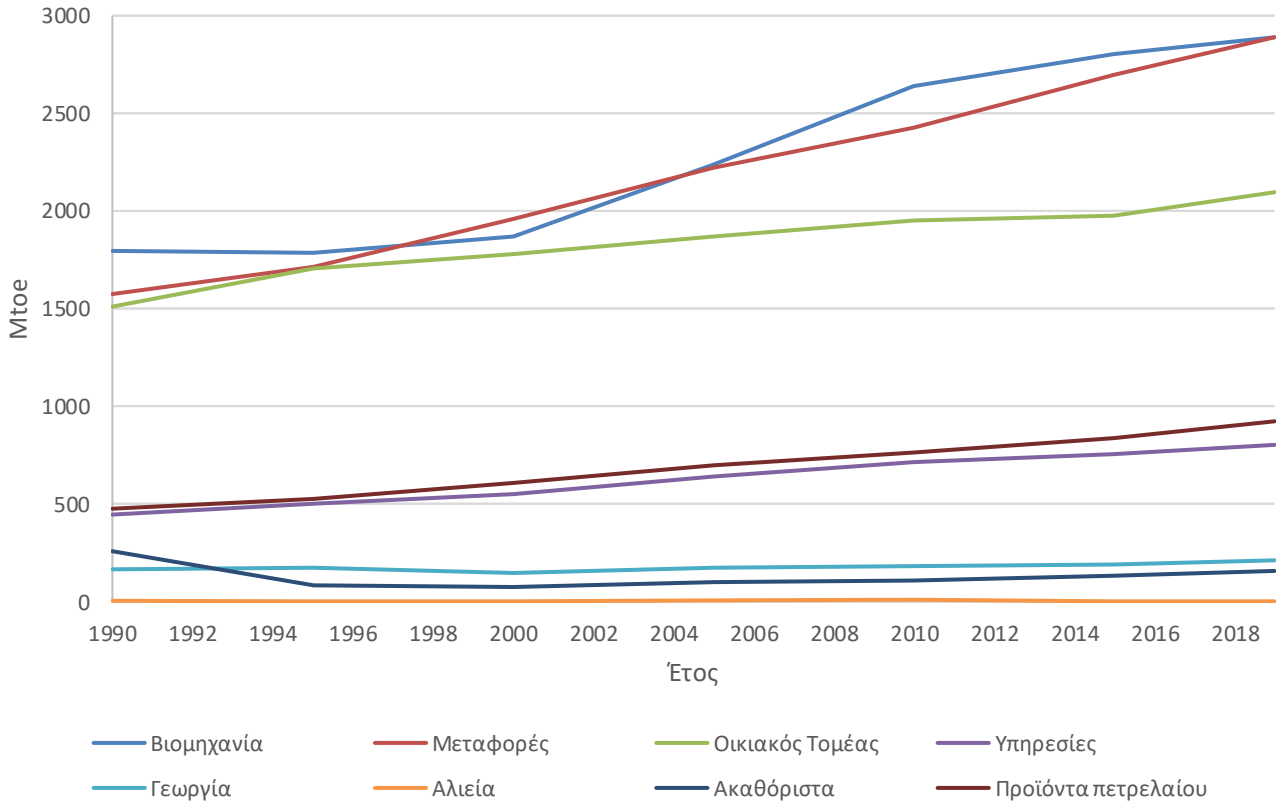
a	*Περιβάλλον (Ambient)*
ads	*Προσροφητής*
av	*Μέση τιμή (average)*
b	*Άμεση (για ηλιακή ακτινοβολία)*
c	*Κρύο*
col	*Ηλιακοί συλλέκτες*
d	*Διάχυτη (για ηλιακή ακτινοβολία)*
g	*Ανακλώμενη (για ηλιακή ακτινοβολία)*
h	*Ζεστό*
i	*Είσοδος (Input)*
$long$	*Διαμήκης (longitudinal)*
max	*Μέγιστο*
min	*Ελάχιστο*
n	*Κάθετο σε επιφάνεια (normal)*
o	*Έξοδος (Output)*
R	*Return*
S	*Supply*
sc	*Ηλιακοί Συλλέκτες - Solar Collectors*
set	*Στόχος*
$shaft$	*Στρόφαλος*
T	*Κεκλιμένο επίπεδο (για ηλιακή ακτινοβολία)*
tot	*Συνολικό*
$trans$	*Εγκάρσιος (transversal)*
w	*Νερό*
Y	*Παρακολουθούμενη μεταβλητή*
Α/Σ	*Ατμοποιητής/Συμπυκνωτής*
Π/Ε	*Προσροφητής/Εκροφητής*
<u>Ακρωνύμια</u>	
AIPOs	*Aluminophosphates*
ATES	*Aquifer thermal energy storage*
BTES	*Borehole thermal energy storage*
CP	*Capacity Factor*
CPC	*Compound Parabolic Collector*
CSPP	*Concentrated Solar Power Plants*
CTR	*Central Tower Receivers*
DLL	*Dynamic Link Library*
ETC	*Evacuated Tube Collectors*
EU	*European Union*
FPC	*Flat Plate Collectors*
HDPE	*High Density Polyethylene*
HEX	*Heat Exchanger*
HTF	*Heat Transfer Fluid*
GHG	*Green House Gas*

IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
LCZ	*Lower convective zone*
LFR	*Linear Fresnel Reflectors*
NCZ	*Non-convective zone*
NPV	*Net Present Value*
NTU	*Number of Transfer Units*
nZEB	*nearly Zero Energy Building*
PBP	*Payback Period*
PCM	*Phase Change Material*
PDR	*Paraboloidal Dish Reflectors*
PLR	*Part Load Ratio*
PTC	*Parabolic Through Collectors*
PTES	*Pit thermal energy storage*
PV	*Photovoltaic*
PV/T	*Photovoltaic – Thermal*
QDT	*Quasi Dynamic Test method*
SAPOs	*Silica Aluminophosphates*
SoC	*State of Charge*
STES	*Seasonal Thermal Energy Storage*
SWS	*Selective Water Sorbent*
TES	*Thermal Energy Storage*
TRL	*Technical Readiness Level*
TTES	*Tank thermal energy storage*
UCZ	*Upper convective zone*
UDL	*Universitat de Lleida*
UTES	*Underground Thermal Energy Storage*
ΑΚΖ	*Ανάλυση Κύκλου Ζωής*
ΑΠΕ	*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*
ΖΝΧ	*Ζεστό Νερό Χρήσης*
Φ/Β	*Φωτοβολταϊκά*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

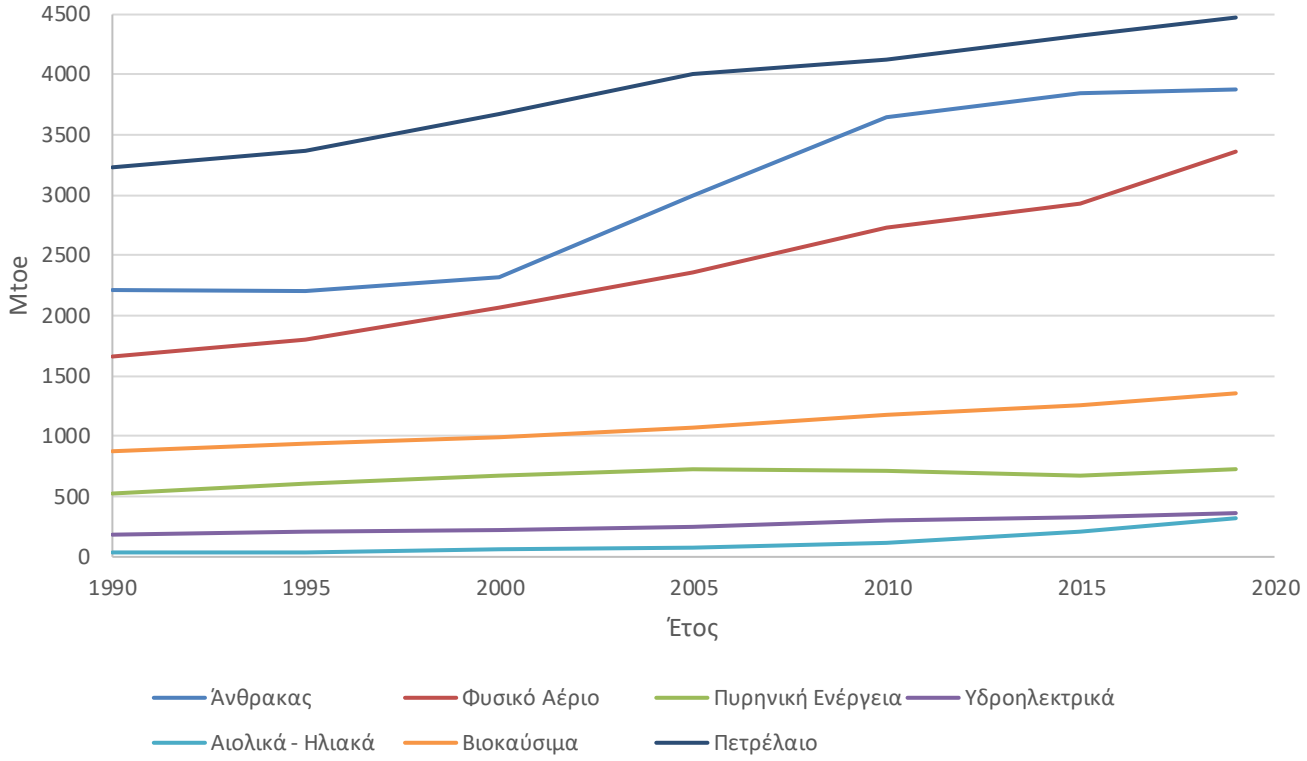
Το 2015 περισσότερες από 200 χώρες σε όλο τον κόσμο δεσμεύτηκαν, μέσω της συνθήκης του Παρισιού, να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases – GHG), ώστε να περιοριστεί η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης, σε επίπεδα χαμηλότερα των 2ºC, σε σχέση με τα επίπεδα της προβιομηχανικής περιόδου. Απότερος στόχος, ήδη από το 2015, ήταν ο περιορισμός αυτής στον 1.5ºC [1]. Το 2021, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), αναγνωρίζοντας την σημασία επίτευξης του, τόσο για την οικονομική όσο και για την περιβαλλοντολογική προστασία κυρίως των αδύναμων χωρών, επεσήμανε πως ο στόχος των 1.5ºC, συνεχίζει να παραμένει υλοποιήσιμος. Προϋπόθεση είναι η λήψη κατάλληλων δράσεων σε παγκόσμιο επίπεδο, ώστε οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου να περιοριστούν στο μισό μέχρι το έτος 2030, με στόχο να μηδενιστούν μέχρι το έτος 2050[2, 3].

Οι στόχοι αυτοί ωστόσο έρχονται αντιμέτωποι με την συνεχή παγκόσμια αύξηση σε τελική κατανάλωση ενέργειας. Όπως παρατηρείται και στην Εικ. 1.1, όλοι οι τομείς ανθρώπινης δραστηριότητας εμφανίζουν ανοδική πορεία για την περίοδο 1990-2019.



Εικ. 1.1: Παγκόσμια τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα [4]

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και τα βιοκαύσιμα καλύπτουν μέρος της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας, με τα ορυκτά καύσιμα ωστόσο να συνεχίζουν να έχουν κυρίαρχο ρόλο σε παγκόσμιο επίπεδο.

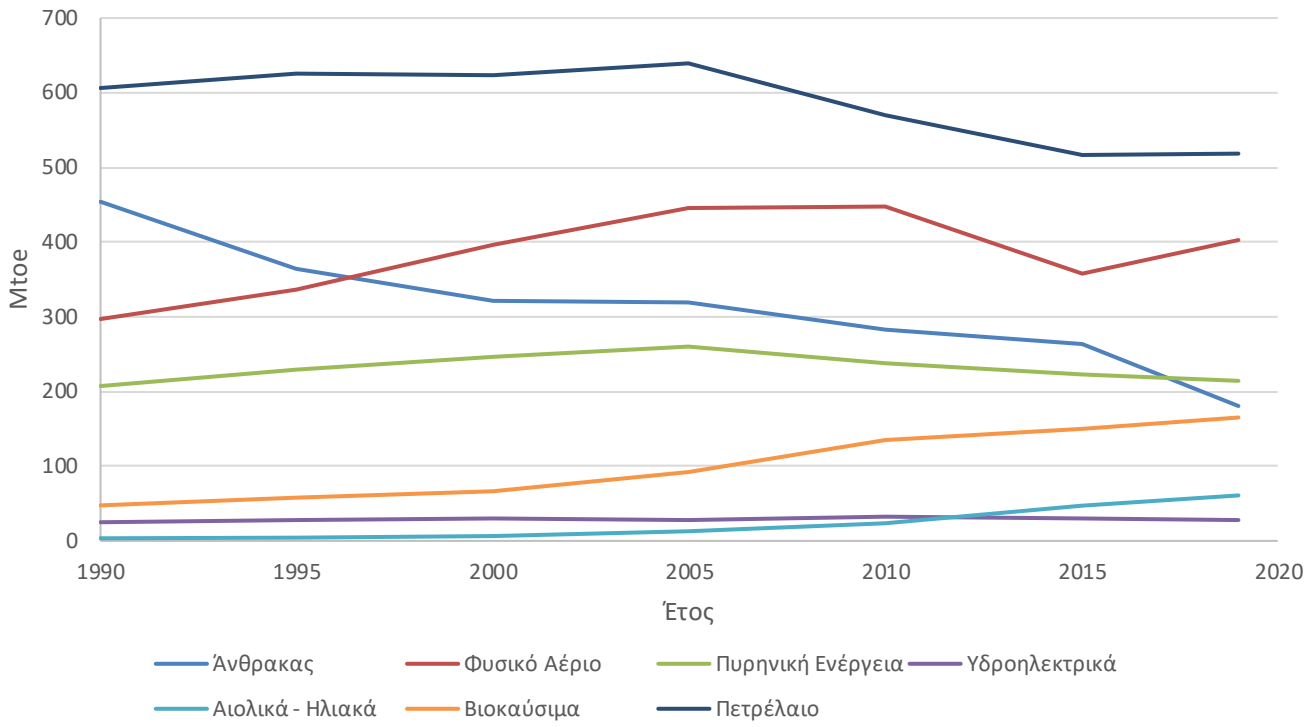


Εικ. 1.2: Παγκόσμια συνολική παραγωγή ενέργειας ανά είδος [4]

Η συνεχιζόμενη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, καθώς και η αδράνεια ορισμένων χωρών στην εφαρμογή κατάλληλων μέτρων περιορισμού των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), έχει οδηγήσει σε συνεχή αύξηση αυτών. Ήδη το έτος 2019, οι εκπομπές σε παγκόσμιο επίπεδο ανήλθαν σε 33621.5 Mt CO_2, αντιστοιχώντας σε αύξηση 3.89% σε σχέση με το έτος 2015 (32362.4 Mt CO_2), και σε συνολική αύξηση 63.92% σε σχέση με το έτος 1990 (20511.1 Mt CO_2) [4].

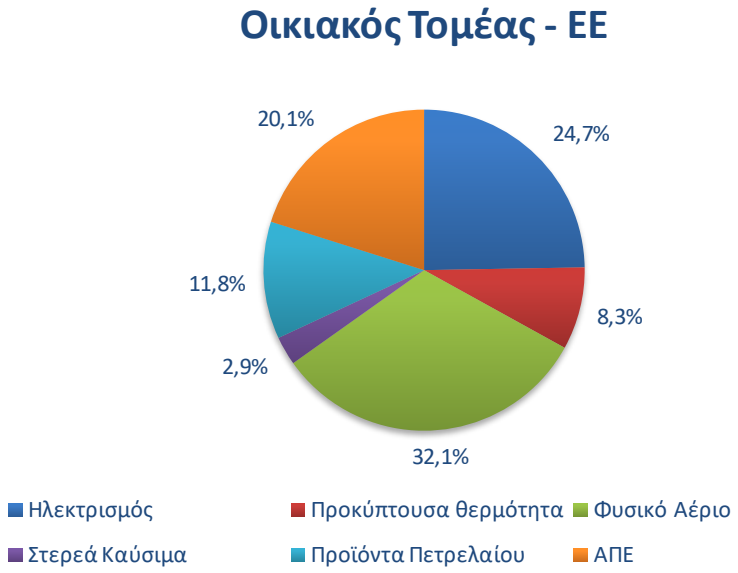
Πλήρως διαφορετική ωστόσο, είναι η εικόνα που εμφανίζουν οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αναδεικνύοντας την δυνατότητα επίτευξης βιώσιμης ανάπτυξης. Η δραματική αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή) στο ενεργειακό μίγμα η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό ίσο με 30,63% το έτος 2019 σε σχέση με το έτος 2015, καθώς και η στροφή σε λιγότερο ρυπογόνες μορφές άνθρακα (φυσικό αέριο), όπως φαίνεται στην Εικ. 1.3, έχουν οδηγήσει σε ελάττωση των συνολικών εκπομπών στους 2699.3 Mt CO_2, επιτυγχάνοντας μείωση 16,16% σε σχέση με τα επίπεδα του 2015.

Οι κύριοι καταναλωτές ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, σε αντιστοιχία και με τα παγκόσμια δεδομένα, συνεχίζουν να είναι η βιομηχανία, οι μεταφορές και ο κτηριακός τομέας, ο οποίος αντιστοιχεί στο 24.33% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας[4], καθώς και στο 11% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [5].



Εικ. 1.3: Συνολική παραγωγή ενέργειας ανά είδος – Ευρωπαϊκή Ενωση [4]

Πρωταγωνιστικό ρόλο στην κάλυψη των αναγκών του κτηριακού τομέα συνεχίζει να έχει το φυσικό αέριο και ο ηλεκτρισμός, αντιστοιχώντας στο 32.1% και 24.7% αντίστοιχα της συνολικής κατανάλωσης για το έτος 2019, με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να αντιστοιχούν μόλις στο 20.1% αυτής.



Εικ. 1.4: Ποσοστιαία κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του οικιακού τομέα στην ΕΕ ανά είδος καυσίμου [6]

Η θέρμανση χώρων καθώς και η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ), αναδεικνύονται ως οι μεγαλύτεροι καταναλωτές ενέργειας, αντιστοιχώντας σε ποσοστά ίσα με 63.6% και 14.8% της συνολικής. Παράλληλα στον Πιν. 1.1, γίνεται μια λεπτομερέστερη ανάλυση της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, ανά είδος καυσίμου και κατηγορία κατανάλωσης.

Πιν. 1.1: Ποσοστιαία κάλυψη ενεργειακών αναγκών κτηριακού τομέα, ανά είδος καυσίμου και κατηγορία κατανάλωσης [6]

	Συνολική κατανάλωση στον οικιακό τομέα	***Θέρμανση Χώρων***	***Ψύξη Χώρων***	***Παραγωγή ΖΝΧ***	***Μαγείρεμα***	***Φωτισμός και Συσκευές***	***Άλλες χρήσεις***
Ηλεκτρισμός	24.7	3.4	0.4	3.0	3.0	14.1	0.8
Προκύπτουσα θερμότητα	8.3	6.4	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0
Φυσικό Αέριο	32.1	24.2	0.0	6.1	1.9	0.0	0.0
Στερεά Καύσιμα	2.9	2.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
Προϊόντα Πετρελαίου	11.8	9.2	0.0	1.7	0.8	0.0	0.1
ΑΠΕ	20.1	17.7	0.0	1.9	0.3	0.0	0.1
Σύνολο	***100.0***	***63.6***	***0.4***	***14.8***	***6.1***	***14.1***	***1.0***

Γίνεται επομένως αντιληπτό πως, υπάρχουν πολύ μεγάλα περιθώρια διείσδυσης νέων τεχνολογιών που κάνουν χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ώστε να επιτευχθεί σημαντική μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κτηριακού τομέα.

1.1 Αποθήκευση Ενέργειας

Στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον κτηριακό τομέα κατά 40% μέχρι το 2030. Η μείωση αυτή θα υποστηριχθεί, από την περαιτέρω αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ, αντιστοιχώντας σε κάλυψη περίπου 1800 TWh, σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Συγκεκριμένα η αιολική ενέργεια αναμένεται να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος αυτής, με περισσότερες από 800 TWh, με τα ηλιακά συστήματα να αντιστοιχούν περίπου στις 20 TWh από ηλιοθερμικά και στις 380 TWh από φωτοβολταϊκά [7]. Ωστόσο, ιδιαίτερα για τα ηλιακά συστήματα, οι παρόντες ρυθμοί αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος, δεν επιτρέπουν την επίτευξη αυτού του στόχου, παρόλο που η Ευρωπαϊκή αγορά τους αναμένεται να διπλασιαστεί μέχρι το 2024 [8].

Βασικό μειονέκτημα της πλειονότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι η άμεση εξάρτηση της παραγωγής τους από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ιδιαίτερα για τα ηλιακά συστήματα, η εξάρτηση αυτή οδηγεί σε πολύ χαμηλούς συντελεστές χρησιμοποίησης (capacity factor – CP) τάξης του 10% - 21%, με την κατάσταση να βελτιώνεται αισθητά στα αιολικά συστήματα, όπου οι αντίστοιχοι συντελεστές είναι της τάξης του 23% - 52% [9]. Σημαντική αύξηση των συντελεστών χρησιμοποίησης των παραπάνω τεχνολογιών, με παράλληλη βελτίωση της αξιοπιστίας του συνόλου της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, μπορεί να επιτευχθεί με την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας, καλύπτοντας το κενό μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης.

Η αποθήκευση ενέργειας χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

I. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας συχνά αναφέρεται στην βιβλιογραφία με τον όρο "Power to X". Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στους υπάρχοντες τρόπους αποθήκευσής της.

Πιν. 1.2: Κατηγορίες τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [10, 11]

Ηλεκτρική σε:			
Ηλεκτρική	Ηλεκτροχημική	Μηχανική	Θερμότητα
• Πυκνωτές • Υπεραγωγούς	• Μπαταρίες • Αέρια, πχ για την ηλεκτρόλυση H_2, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς	• Συστήματα πεπιεσμένου αέρα – Compressed Air Energy Systems (CAES) • Σφονδύλους • Αντλησιοταμίευση	• Συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας • Συστήματα αποθήκευσης υγροποιημένου αέρα

II. Αποθήκευση Θερμότητας – Thermal Energy Storage (TES), η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Οι παραπάνω τεχνολογίες αποθήκευσης έχουν υπάρξει αντικείμενο εκτενούς μελέτης και ανάπτυξης για σειρά ετών, βρίσκοντας πληθώρα εφαρμογών, ανάλογα με την πηγή της πλεονάζουσας ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική εστιάζει στα συστήματα εποχιακής αποθήκευσης ηλιοθερμικής ενέργειας.

1.2 Αποθήκευση Θερμότητας

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας κατηγοριοποιούνται σε δύο μεγάλες ομάδες ανάλογα με την περίοδο χρήσης τους, σε [12]:

I. Συστήματα Εποχιακής Αποθήκευσης Θερμότητας

Στα παραπάνω συστήματα η θερμότητα αποθηκεύεται κατά τους καλοκαιρινούς κυρίως μήνες, ώστε να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις σε θερμότητα το χειμώνα.

II. Συστήματα Βραχείας Αποθήκευσης Θερμότητας

Διακρίνονται από ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας, λίγων κιλοβατώρων (kWh), για την κάλυψη κυρίως βραδινών φορτίων, όπου δεν είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας που τα τροφοδοτεί (πχ ηλιακή ενέργεια). Η χρήση τους βελτιώνει τη λειτουργία και την απόδοση του συστήματος, καλύπτοντας το κενό μεταξύ παραγωγής και ζήτησης.

Παράλληλα ανάλογα με το σχεδιασμό τους, τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε [13]:

I. Ενεργητικά Συστήματα

Τα οποία χαρακτηρίζονται από εξαναγκασμένη συναγωγή θερμότητας, με το υλικό αποθήκευσης, το οποίο κυκλοφορεί στο σύστημα.

II. Παθητικά Συστήματα

Τα οποία αποτελούνται από το *εργαζόμενο μέσο* (Heat Transfer Fluid – HTF), το οποίο κυκλοφορεί στο σύστημα και είναι υπεύθυνο για την πρόσδοση ή απαγωγή θερμότητας από το *υλικό αποθήκευσης*, με το οποίο η θερμότητα αυτή συναλλάσσεται.

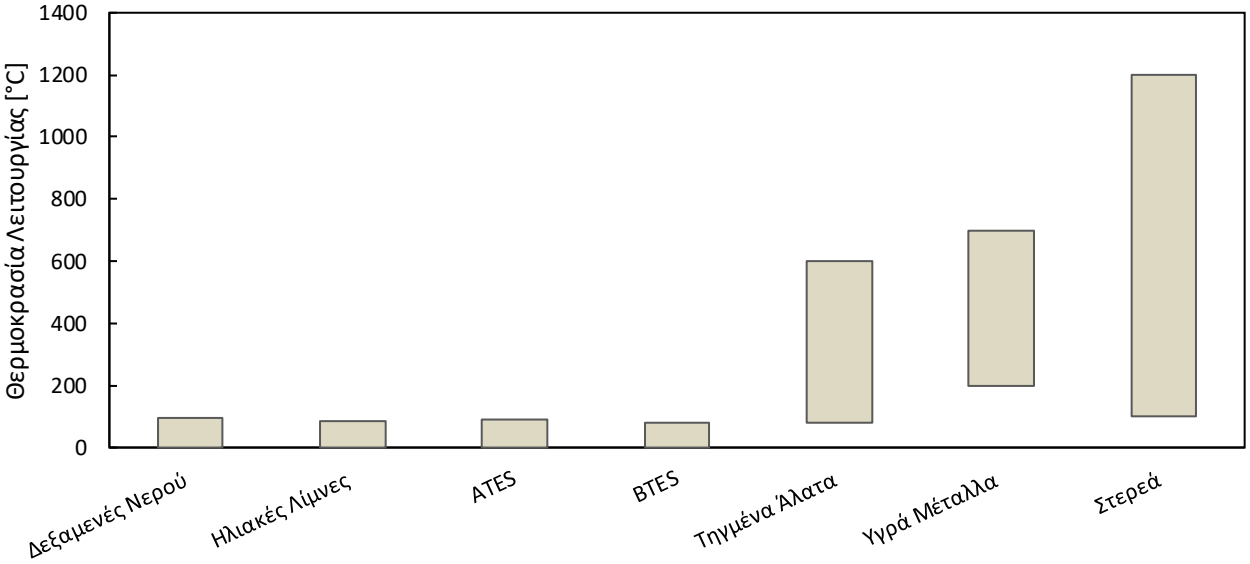
Τέλος, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας, διακρίνονται τρείς τρόποι αποθήκευσης θερμότητας [14]:

I. ***Αποθήκευση αισθητής θερμότητας***
II. ***Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας***
III. ***Χημική αποθήκευση θερμότητας***

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και συστήματος αποθήκευσης θερμότητας αποτελεί προϊόν πολυπαραμετρικής μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες κόστους, αποδοτικότητας, ασφάλειας, περιβαλλοντικών επιπτώσεων κ.α.[15]. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη ανάλυση των τριών τεχνολογιών αποθήκευσης θερμότητας.

1.2.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας, χαρακτηρίζεται από μεταβολή της θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης, ενώ η αποδοτικότητά της εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα, την θερμοχωρητικότητα, την θερμική αγωγιμότητα καθώς και την αντοχή του υλικού σε θερμικούς κύκλους φόρτισης [16]. Όπως φαίνεται και από τη μελέτη των Fernadez et al. [17], η πληθώρα των διαθέσιμων υλικών απαιτεί εις βάθος αξιολόγηση τους, για την ανάπτυξη κατάλληλων μεθοδολογιών επιλογής τους, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.
Ως μέσα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται τόσο στερεά όσο και υγρά υλικά, όπως το σκυρόδεμα, τα τηγμένα άλατα και το νερό, αξιοποιώντας διαφορετικά θερμοκρασιακά εύρη. Ενδεικτικά στοιχεία σχετικά με τις συνήθεις θερμοκρασίες αποθήκευσης των διαφόρων συστημάτων που θα επεξηγηθούν παρακάτω δίνονται στην Εικ. 1.5.



Εικ. 1.5: Θερμοκρασιακά εύρη λειτουργίας διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης θερμότητας [18]

Παράλληλα στον Πιν. 1.3 παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Πιν. 1.3: Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται ως υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας [18, 19]

Μέσο Αποθήκευσης	***Πυκνότητα – (kg/m³)***	***Ειδική Θερμοχωρητικότητα – (J/kg K)***	***Ειδική Ογκομετρική Θερμοχωρητικότητα – (MJ/m³ K)***
Λίθοι	2560	879	2.25
Άμμος	1700	1300	2.21
Τούβλα	1600	840	1.34
Σκυρόδεμα	1900 – 2300	880	1.67 – 2.02
Ενισχ. Σκυρόδεμα	2200	850	1.87
Χυτοσίδηρος	7200	560	4.03
Χυτοχάλυβας	7800	600	4.68
NaCl	2160	1150	2.48
Νιτρώδη Άλατα	1825	1500	2.74
Νιτρικά Άλατα	1870	1600	2.99
Νερό	1000	4190	4.19

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα, τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, χαρακτηρίζονται από χαμηλή ειδική ογκομετρική θερμοχωρητικότητα, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 1.34 – 4.68 MJ/ m^3K. Ο σχεδιασμός, συνεπώς των συστημάτων αυτών, στοχεύει στην μείωση των απωλειών θερμότητας από το περιβάλλον, μέσω της επίτευξης χαμηλών λόγων επιφάνειας ανά μονάδα όγκου [14].

Τα συστήματα αισθητής αποθήκευσης θερμότητας διακρίνονται στις εξής κατηγορίες [12]:

- ***Υπόγεια συστήματα αποθήκευσης θερμότητας – Underground thermal energy storage (UTES)***

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν την θερμοχωρητικότητα του υπεδάφους για να αποθηκεύσουν την προσδιδόμενη θερμότητα ή να μειώσουν τις ενεργειακές τους απώλειες, ενώ είναι κατάλληλα κυρίως για χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, συνήθως μέχρι 80°C. Αποτελούν κατά κύριο λόγο παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, με το εργαζόμενο μέσο να είναι συνήθως το νερό, το οποίο συναλλάσσει θερμότητα με αυτά, μέσω αγωγών. Διακρίνονται τέσσερις κατηγορίες υπόγειων συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας [20].

[1] <u>Συστήματα υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα – Aquifer thermal energy storage – ATES</u>
Στα συστήματα αυτά η θερμότητα συναλλάσεται μέσω φυσικών υπόγειων υδροφόρων οριζόντων, οι οποίοι περικλείονται σε κατάλληλα, πορώδη γεωλογικά στρώματα, με υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, τα οποία λειτουργούν ως το μέσο αποθήκευσης. Αποτελούνται από τουλάχιστον δύο γεωθερμικές γεωτρήσεις, κάθε μια εκ των οποίων είναι εξοπλισμένη με τα δικές της αντλίες και αγωγούς. Κατά την περίοδο φόρτισης τους, κρύο νερό αντλείται, θερμαίνεται από την εκάστοτε πηγή, και εγχέεται πίσω σε αυτά, με την διαδικασία να αντιστρέφεται, στις περιόδους αποφόρτισης.

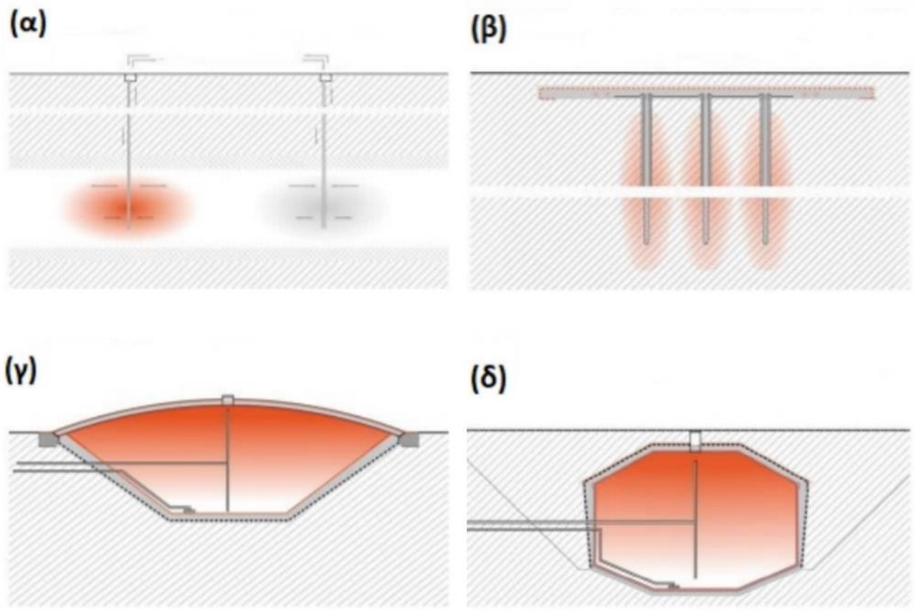
[2] <u>Συστήματα γεώτρησης – Borehole thermal energy storage – BTES</u>
Στα παραπάνω συστήματα, η θερμότητα αποθηκεύεται απευθείας στο υπέδαφος, σε βάθη από 20m - 300m, μέσω κλειστών κατακόρυφων αγωγών/εναλλακτών, τύπου U, με το νερό να αποτελεί το συνηθέστερο εργαζόμενο μέσο στις ευρωπαϊκές εφαρμογές [21]. Και σε αυτή την περίπτωση διακρίνονται δύο, περίοδοι λειτουργίας (φόρτισης και αποφόρτισης), με την ροή του εργαζόμενου μέσου, να αντιστρέφεται κατάλληλα σε κάθε περίπτωση. Η απόδοση του συστήματος επηρεάζεται άμεσα από τις θερμικές ιδιότητες του υπεδάφους

(θερμοχωρητικότητα και αγωγιμότητα), οι οποίες καθορίζουν και την απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων. Εν γένει τα πετρώδη ή τα υδατικά κορεσμένα χωμάτινα στρώματα, θεωρούνται τα πλέον κατάλληλα.

[3] Συστήματα υπόγειων φρεατίων – Pit thermal energy storage – PTES
Τα συστήματα αυτά, αποτελούνται από κατάλληλα θερμομονωμένες τεχνητές κλειστές πισίνες, θαμμένες μερικώς στο έδαφος σε βάθος 5m έως 15m. Στο εσωτερικό τους περιέχουν το υλικό αποθήκευσης θερμότητας, καθώς και νερό που χρησιμοποιείται ως το εργαζόμενο μέσο, για την φόρτιση και αποφόρτισή τους.

[4] Συστήματα υπόγειων δεξαμενών – Tank thermal energy storage – TTES
Τα συστήματα αυτά είναι τα μοναδικά ενεργητικά της υπό μελέτη κατηγορίας καθώς το εργαζόμενο μέσο και το μέσο αποθήκευσης είναι το νερό. Αποτελούνται από δεξαμενές κατασκευασμένες κατά κύριο λόγο από σκυρόδεμα, ενώ επικοινωνούν με τις πηγές και τις καταναλώσεις, μέσω κατάλληλου δικτύου, αγωγών και αντλιών. Είναι πλήρως θαμμένες στο έδαφος, σε βάθη από 5m έως 15m, με την θερμομονωτική προστασία τους να επιτυγχάνεται, μέσω στρώματος διογκωμένου γυαλιού, ενώ περικλείονται μεταξύ άλλων και από προστατευτικό στρώμα (protection fleece), για υγρομόνωση.

Οι παραπάνω τεχνολογίες απεικονίζονται συγκεντρωτικά στην Εικ. 1.6, ενώ στον Πιν. 1.4 παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία σχετικά με την αποθηκευτική ικανότητα και το κόστος τους.



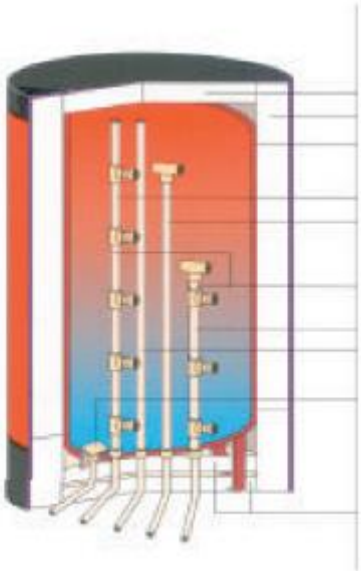
Εικ. 1.6: (α) Σύστημα υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα – ATES (β) Σύστημα γεώτρησης – BTES (γ) Σύστημα υπόγειων φρεατίων – PTES (δ) Σύστημα υπόγειων δεξαμενών – TTES [20]

Πιν. 1.4: Οικονομοτεχνικά στοιχεία υπόγειων συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας [20]

Τεχνολογία – UTES	*Αποθηκευτική Ικανότητα [kWh/m³]*	*Κόστος Επένδυσης [€/m³]*[1]
ATES	30 – 40	25
BTES	15 – 30	50 – 95
PTES	60 – 80	80 – 250
TTES	60 – 80	110 – 470

- ***Δεξαμενές Νερού (Water Tanks)***

Αποτελούν την πλέον διαδεδομένη μορφή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, με τεράστια εφαρμογή στα ηλιοθερμικά συστήματα. Τα υλικά κατασκευής των δεξαμενών αυτών μπορούν να ποικίλουν μεταξύ ανοξείδωτου χάλυβα, σκυροδέματος και πλαστικού, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στην μείωση των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον καθώς και στην επίτευξη κατάλληλης θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης, η οποία έχει βρεθεί να βελτιώνει την απόδοση ιδιαίτερα των ηλιοθερμικών συστημάτων [22-24]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πολυσωλήνιου συστήματος αγωγών το οποίο χρησιμοποιείται για την επίτευξη θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης δίνεται στην Εικ. 1.7.



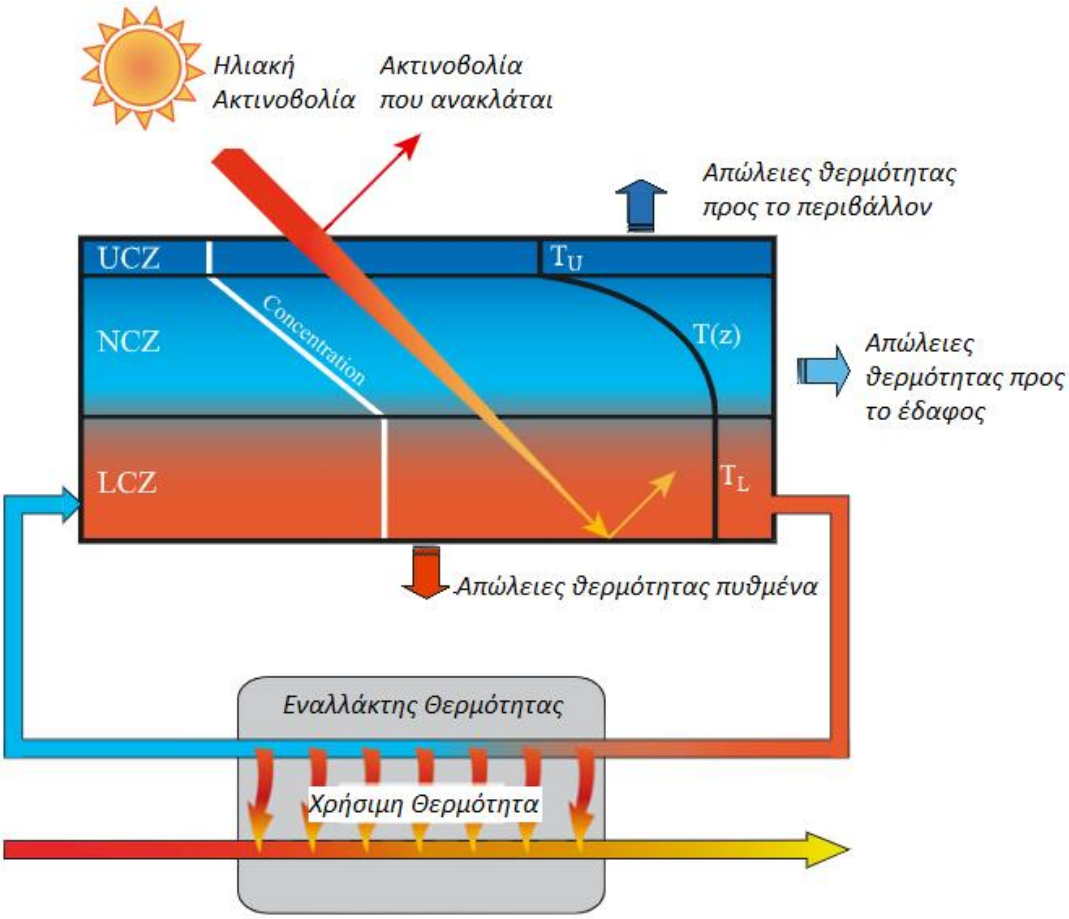
Εικ. 1.7: Διάταξη πολυσωλήνιου συστήματος σε δεξαμενή νερού για επίτευξη θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης [25]

- ***Ηλιακές Λίμνες (Salt-gradient solar ponds)***

Οι ηλιακές λίμνες, είναι τεχνητά θερμοκρασιακά διαστρωματωμένες λίμνες, οι οποίες επιτρέπουν την επίτευξη και διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών στον πυθμένα τους, αξιοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία. Η φυσική ροή της θερμότητας από τον πυθμένα στην ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης, εμποδίζεται, μετά την προσθήκη άλατος σε αυτήν, λόγω της διαφορετικής πυκνότητας η οποία προκύπτει στα διάφορα θερμοκρασιακά στρώματα τα οποία

[1] Ως όγκος αποθήκευσης, χρησιμοποιούνται τα ισοδύναμα κυβικά μέτρα νερού (water equivalent), ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών.

αναπτύσσονται. Συνήθως διακρίνονται τρεις ζώνες, i) ένα λεπτό συναγωγικό στρώμα (upper convective zone – UCZ), το οποίο βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της λίμνης, εμφανίζοντας χαμηλά επίπεδα αλατότητας, ii) μία μη συναγωγική ζώνη (non-convective zone – NCZ), με σταθερή βαθμίδα πυκνότητας και iii) μία πλήρως αναμεμιγμένη συναγωγική ζώνη αποθήκευσης θερμότητας (lower convective zone – LCZ) στον πυθμένα της λίμνης, με υψηλά ποσοστά αλατότητας [14, 26, 27]. Στην Εικ. 1.8, γίνεται μια απεικόνιση των τριών αυτών ζωνών καθώς και των προφίλ θερμοκρασίας και πυκνότητας σε καθεμία από αυτές. Παράλληλα συμπεριλαμβάνεται και μια απεικόνιση της διάταξης εκμετάλλευσης της αποθηκευμένης θερμότητας.

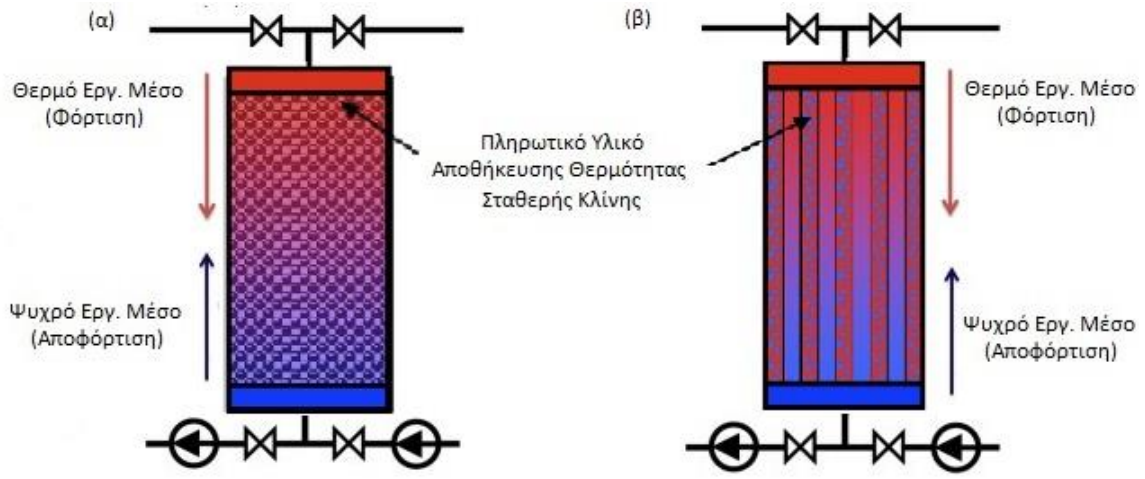


Εικ. 1.8: Σχεδιαγραμματική απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης και καθώς και διάταξης για εκμετάλλευση αποθηκευμένης θερμότητας σε ηλιακή λίμνη [28]

- ***Σταθερή κλίνη με πληρωτικό υλικό (Packed bed)***

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από δεξαμενές πληρωμένες με το υλικό αποθήκευσης, με τη θερμότητα να μεταφέρεται σε αυτό, μέσω του εργαζόμενου μέσου, το οποίο, είτε είναι σε άμεση επαφή με αυτό ή μεταφέρει τη θερμότητα μέσω σωληνώσεων οι οποίες διατρέχουν όλο το μήκος της δεξαμενής, όπως απεικονίζεται στην Εικ. 1.9. Η επιλογή της κατάλληλης διαμόρφωσης μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από το υλικό αποθήκευσης. Συγκεκριμένα, υλικά όπως τα τηγμένα άλατα, το σκυρόδεμα και η άμμος, τα οποία διακρίνονται από ψιλή κοκκομετρία, εντάσσονται στην δεύτερη κατηγορία ενώ τα στρώματα λίθων στην πρώτη. Η σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος σκοπεύει, στην ελλάτωση της πτώσης πίεσης που οφείλεται στη ροή του εργαζόμενου μέσου, καθώς και η βελτιστοποίηση του σχήματος της δεξαμενής, με σκοπό την

ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας. Αποτελέσματα μελετών έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα πως οι δεξαμενές κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους προς διάμετρο μεγαλύτερο της μονάδας ($L/D > 1$), εμφανίζουν τις υψηλότερες αποδόσεις, [12].



Εικ. 1.9: Διατάξεις σταθερής κλίνης με πληρωτικό υλικό (α) σε άμεση επαφή με το εργαζόμενο μέσο (β) με χρήση διάταξης σωληνώσεων [29]

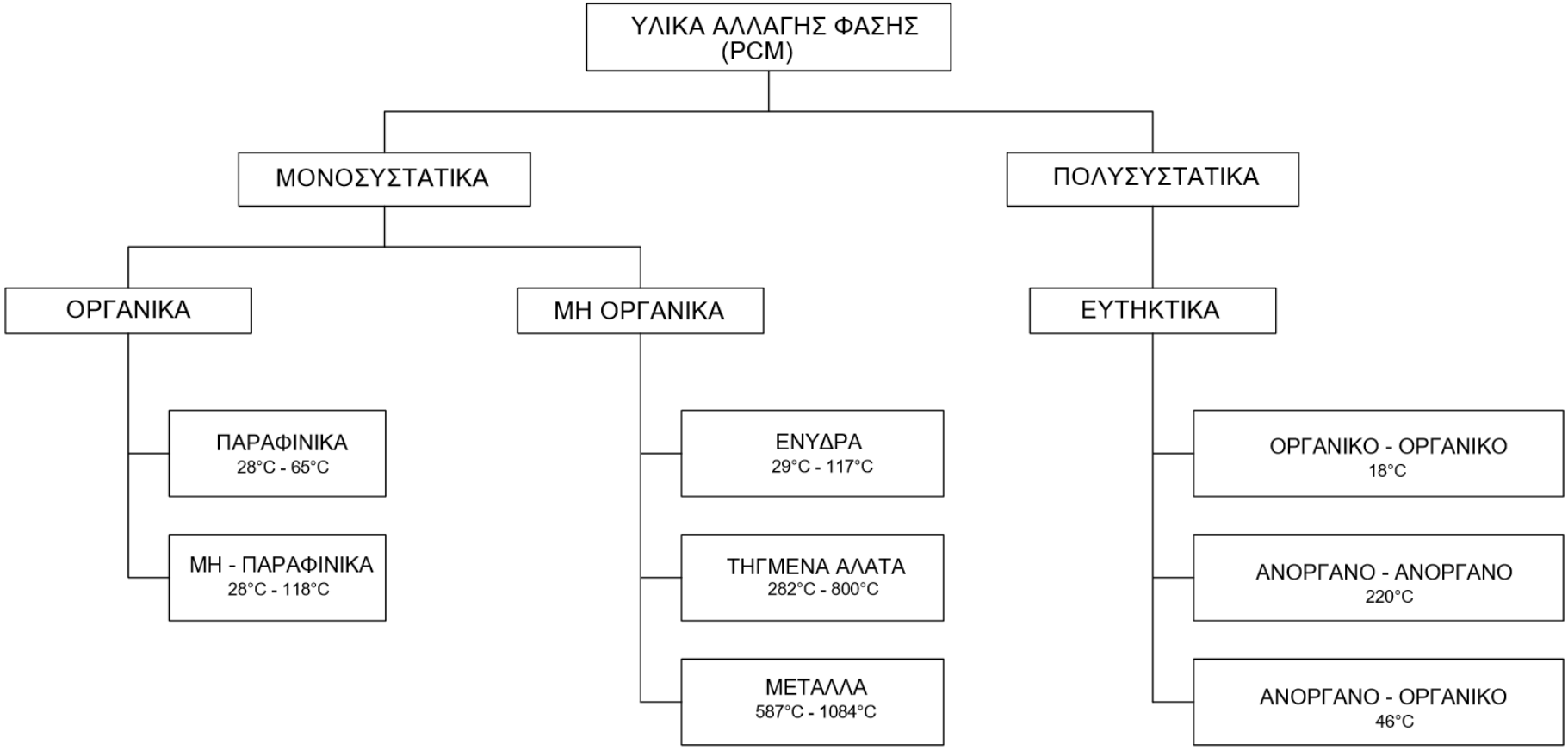
1.2.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην αντιστρέψιμη αλλαγή φάσης των υλικών της, εμφανίζοντας υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου σε σχέση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά (Phase Change Materials – PCM), καθορίζουν πλήρως τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η παραπάνω αλλαγή, με χαρακτηριστικά παραδείγματα ανά κατηγορία να δίνονται στην Εικ. 1.10. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού, εξαρτάται πέραν της επιθυμητής θερμοκρασίας αποθήκευσης θερμότητας και από ένα πλήθος παραγόντων όπως [30]:

- Θερμική αγωγιμότητα
- Αντοχή σε θερμικούς κύκλους φόρτισης
- Ειδική ογκομετρική θερμοχωρητικότητα
- Αναστρεψιμότητα φάσεων
- Τοξικότητα
- Αναφλεξιμότητα
- Εκρηκτικότητα και
- Κόστος

Ως τεχνολογία, εμφανίζει ακόμα χαμηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (Technical Readiness Level – TRL), με τις περισσότερες εφαρμογές να βρίσκονται στο στάδιο ανάπτυξης από εργαστηριακή σε εμπορική κλίμακα [31].

Μέχρι στιγμής η έρευνα πάνω στην αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, εστιάζεται κυρίως στην βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους των κτηρίων, στην μελέτη της συμπεριφοράς τους στην αποθήκευση θερμότητας από ηλιοθερμικά συστήματα, καθώς και στην συνεργασία τους με συστήματα θέρμανσης και ψύξης κατοικιών για μείωση των φορτίων αιχμής [32, 33].



Εικ. 1.10: Κατηγοριοποίηση υλικών αλλαγής φάσης [34]

Η ενσωμάτωσή τους στο κέλυφος του κτηρίου μπορεί να γίνει με έναν από τους παρακάτω τρόπους [35]:

- ***Απευθείας ενσωμάτωση - Direct Incorporation***

Στη μέθοδο αυτή, το υλικό αλλαγής φάσης, εισάγεται και αναμιγνύεται απευθείας με το δομικό υλικό. Αποτελεί τη φθηνότερη λύση, εμφανίζοντας ωστόσο προβλήματα διαρροών, κατά την φάση τήξης του υλικού αλλαγής φάσης.

- ***Εμβάπτιση – Immersion***

Στη μέθοδο αυτή, το πορώδες δομικό υλικό, εμβαπτίζεται μέσα στο υλικό αλλαγής φάσης το οποίο βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, ώστε να το απορροφήσει. Η μέθοδος αυτή δημιουργεί ωστόσο προβλήματα διαρροών, με συνεπαγόμενη διάβρωση της μεταλλικής ενίσχυσης της τοιχοποιίας μειώνοντας την διάρκεια ζωής της.

- ***Ενθυλάκωση – Encapsulation***

Για την αποφυγή των προβλημάτων διαρροής των παραπάνω τεχνολογιών, στην ενθυλάκωση, το υλικό αλλαγής φάσης, περιβάλλεται από κατάλληλο κέλυφος, μέσω του οποίου μπορεί παράλληλα να αυξηθεί και η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Το κέλυφος πρέπει να εμφανίζει κατάλληλες ιδιότητες, όπως να μην επιτρέπει τις διαρροές, να μην αντιδράει με το υλικό αποθήκευσης (PCM), καθώς και να μπορεί να απορροφήσει τις ογκομετρικές μεταβολές του τελευταίου.

Διακρίνονται δύο μέθοδοι, η μάκρο-ενθυλάκωση και η μίκρο-ενθυλάκωση, οι οποίες σχετίζονται με την κοκκομετρία του υλικού αλλαγής φάσης. Στη μάκρο-ενθυλάκωση το υλικό του κελύφους είναι συνήθως αλουμίνιο, χαλκός ή ανοξείδωτος χάλυβας, σε διαμορφώσεις όπως σωλήνες, δοχεία ή ελάσματα, σε αντίθεση με τη μίκρο-ενθυλάκωση όπου, χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα πολυμερή.

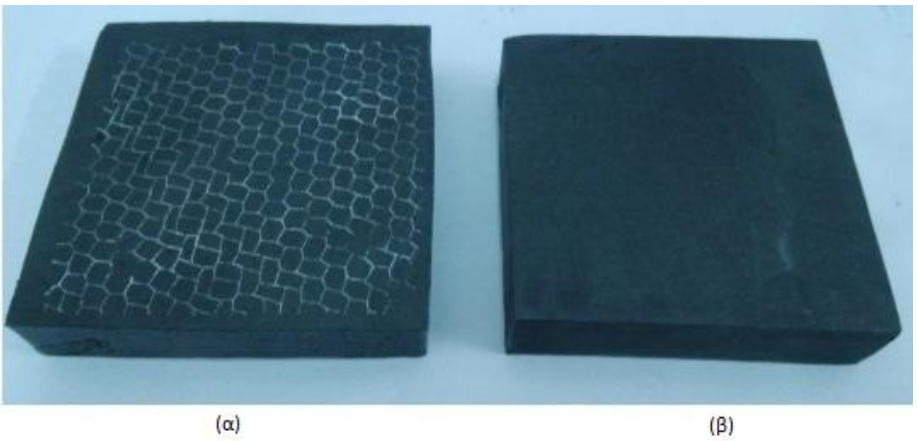
- ***Σταθεροί Σχηματισμοί PCM – Shape-stabilized PCM***

Στη μέθοδο αυτή το υλικό αλλαγής φάσης, αναμιγνύεται με ένα υλικό στήριξης, το οποίο του επιτρέπει να διατηρεί το σχήμα του σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας, με χαρακτηριστικό παράδειγμα να δίνεται στην Εικ. 1.11 [36]. Το τελικό αποτέλεσμα αποτελείται από 80% παραφίνη και 20% υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (High Density Polyethylene – HDPE), ως υποστηρικτικό υλικό. Τα PCM σταθερού σχηματισμού, χαρακτηρίζονται από βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα, μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα καθώς και υψηλή αντοχή σε θερμικούς κύκλους φόρτισης.

Εικ. 1.11: Υλικό αλλαγής φάσης σε διάταξη σταθερού σχηματισμού

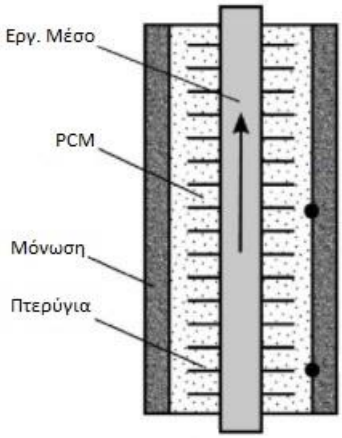
- ***Σύνθετα PCM σταθερού σχηματισμού – Form-stable PCM composites***

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει την τεχνολογία των σταθερών σχηματισμών PCM, με την ενσωμάτωση σε αυτά κατάλληλων διατάξεων ώστε να βελτιωθεί η μηχανική συμπεριφορά και η αγωγιμότητά τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής, αποτελεί η μελέτη των Biao Xie et al [37], στην οποία αξιολογήθηκε η ενσωμάτωση μεταλλικού κυψελοειδή σκελετού, σε PCM σταθερού σχηματισμού, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται και στην Εικ. 1.12.



Εικ. 1.12: Συγκριτική απεικόνιση υλικών αλλαγής φάσης σε (α) Διάταξη σταθερού σχηματισμού με μεταλλικό κυψελοειδή σκελετό (β) Διάταξη σταθερού σχηματισμού [37]

Στην αποθήκευση θερμότητας, αλλά και στο σύνολο των λοιπών ενεργητικών συστημάτων που βασίζονται σε αυτή, η επικρατέστερη μέθοδος είναι η ενθυλάκωση, με το υλικό αλλαγής φάσης να περιέχεται σε διαφόρων ειδών δοχεία, ράβδους ή σφαιρικές κάψουλες, κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα, πολυπροπυλένιο ή πολυολεφίνη. Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του υλικού αποθήκευσης θερμότητας και του εργαζόμενου μέσου, γίνεται μέσω διατάξεων που προσομοιάζουν εναλλάκτη κελύφους – αυλών, ενώ συχνά για την βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνται μεταλλικά πτερύγια όπως φαίνεται και στην Εικ. 1.13 [38].



Εικ. 1.13: Διάταξη μεταφοράς θερμότητας συστημάτων με χρήση υλικών αλλαγής φάσης

1.2.3 Χημική αποθήκευση θερμότητας

Πρόκειται για μια πρώιμη τεχνολογία, η οποία βασίζεται στην αντιστρέψιμη μετατροπή της θερμότητας σε χημική ενέργεια, μέσω ενδόθερμων χημικών αντιδράσεων ή αντιδράσεων θερμο-χημικής ρόφησης [39]. Η επιλογή των κατάλληλων υλικών, γίνεται με κριτήριο την αντοχή τους σε θερμικούς κύκλους φόρτισης, ιδιότητα άμεσα σχετιζόμενη με την αντιστρεψιμότητα της αντίδρασης, αλλά λαμβάνοντας υπόψη και παράγοντες όπως τον όγκο του συστήματος (ενεργειακή πυκνότητα), το κόστος, και φυσικά τις επιθυμητές θερμοκρασίες λειτουργίας (φόρτισης/αποφόρτισης).

- ***Αποθήκευση θερμότητας μέσω ενδόθερμων χημικών αντιδράσεων***

Οι αντιδράσεις οι οποίες περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία, περιγράφονται από την παρακάτω γενική χημική εξίσωση:

$$A + \Delta H \ \square(\leftrightarrow)\ B + C \qquad 1.1$$

Η ουσία A, διασπάται στις B και C, απορροφώντας θερμότητα, ενώ οι B,C αποθηκεύονται ξεχωριστά, ώστε να μειωθούν οι θερμικές απώλειες και ως αποτέλεσμα, να επιτευχθούν μεγάλοι χρόνοι αποθήκευσης.

Στον Πιν. 1.6 παρουσιάζεται ένα πλήθος χημικών αντιδράσεων οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, καθώς και αντίστοιχα χαρακτηριστικά μεγέθη [40]. Όπως παρατηρείται, η ενεργειακή πυκνότητα των παρακάτω συστημάτων είναι πολλαπλάσια σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής ή λανθάνουσας θερμότητας, με εξαίρεση τα συστήματα αερίου – αερίου, τα οποία απαιτούν μεγάλους όγκους λειτουργίας.

- ***Αποθήκευση θερμότητας μέσω θερμο-χημικής ρόφησης***

Στα συστήματα αυτά, ατμοί μια ουσίας (sorbate) ενσωματώνονται ως λεπτό στρώμα στην επιφάνεια ενός στερεού ή στο εσωτερικό ενός υγρού μέσου (sorbent), παράγοντας θερμότητα (ρόφηση). Με την αντιστροφή της διαδικασίας (εκρόφηση), θερμότητα απορροφάται, σπάζοντας τους φυσικούς και χημικούς δεσμούς, με τους ατμούς που παράγονται, στη συνέχεια να συμπυκνώνονται και να αποθηκεύονται ξεχωριστά ή να απορρίπτονται στο περιβάλλον, ανάλογα με το είδος του συστήματος. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες θερμο-χημικής ρόφησης, i) Απορρόφηση, ii) Προσρόφηση iii) Αντιδράσεις στερεού – αερίου, καθώς και δύο είδη συστημάτων i) Ανοιχτά ii) Κλειστά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα δίνονται στον Πιν. 1.5.

Πιν. 1.5: Κατηγορίες αντιδράσεων ρόφησης για αποθήκευση θερμότητας [41]

Κατηγορία Ρόφησης	***Ζεύγη Ρόφησης***	***Ενεργειακή Πυκνότητα***
Απορρόφηση	$H_2O - NaOH$ [42]	$0.54\ GJ/m^3$
Προσρόφηση	$H_2O - Zeolite$	$0.40 - 0.60\ GJ/m^3$
	$H_2O - AIPOs$	$0.86\ GJ/m^3$
	$H_2O - SAPOs$	$0.61\ GJ/m^3$
Στερεά – Αέρια	$H_2O - CaCl_2$	$0.18 - 0.63\ GJ/m^3$
	$H_2O - LiCl$	$0.20\ GJ/m^3$
	$H_2O - MgCl_2$	$0.56\ GJ/m^3$

Πιν. 1.6: Κατηγορίες χημικών αντιδράσεων για αποθήκευση θερμότητας [40]

Σύστημα	***Είδος Συστήματος***	***Αντίδραση***	***Θερμοκρασία Φόρτισης/ Αποφόρτισης (ºC)***	***Ενεργειακή Πυκνότητα (kWh/m³)***
Υδριδίου του μαγνησίου	Στερεού – Αερίου	$MgH_{2(s)} + \Delta H \leftrightarrow Mg_{(s)} + H_{2(g)}$	926 - 776	580
Υδριδίου του τιτανίου	Στερεού – Αερίου	$TiH_{2(s)} + \Delta H \leftrightarrow Ti_{(s)} + H_{2(g)}$	923 – 973	813
Ανθρακικού Μολύβδου	Στερεού – Αερίου	$PbCO_{3(s)} + \Delta H \leftrightarrow PbO_{(s)} + CO_{2(g)}$	996 – 846	303
Ανθρακικού ασβεστίου	Στερεού – Αερίου	$CaCO_{3(s)} + \Delta H \leftrightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$	1406 – 1429	692
Υδροξειδίου του ασβεστίου	Στερεού – Αερίου	$Ca(OH)_{2(s)} + \Delta H \leftrightarrow CaO_{(s)} + H_2O_{(g)}$	996 - 946	437
Αμμωνίας	Υγρού – Αερίου	$2NH_{3(g)} + \Delta H \leftrightarrow N_{2(g)} + 2H_{2(g)}$	996	745
Θειικού Αμμωνίου	Αερίου – Αερίου	$NH_4HSO_{4(l)} + \Delta H \leftrightarrow NH_{3(g)} + H_2O_{(g)} + SO_{3(g)}$	1473 – 973	860
Μεθανίου – Νερού	Αερίου – Αερίου	$CH_{4(g)} + H_2O_{(g)} + \Delta H \leftrightarrow 3H_{2(g)} + CO_{(g)}$	1496 - 1076	7.8
Μεθανίου – Διοξειδίου του άνθρακα	Αερίου – Αερίου	$CH_{4(g)} + CO_{2(g)} + \Delta H \leftrightarrow 2H_{2(g)} + 2CO_{(g)}$	1496 – 1076	7.7
Κυκλοεξανίου	Υγρού – Αερίου	$C_6H_{12(l)} + \Delta H \leftrightarrow C_6H_{6(g)} + 3H_{2(g)}$	863 – 943	530
Τριοξειδίου του θείου	Υγρού – Αερίου	$SO_{3(l)} + \Delta H \leftrightarrow SO_{2(g)} + 1/2\ O_{2(g)}$	1346 – 1546	646

1.3 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκαν συνοπτικά οι υπάρχοντες τρόποι αποθήκευσης θερμότητας, χωρίς ωστόσο να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην πηγή θερμότητας η οποία αξιοποιείται. Παρακάτω θα γίνει μία σύντομη αναφορά στα διάφορα ηλιοθερμικά συστήματα, τα οποία αξιοποιούν την πλέον ευρέως διαθέσιμη και άφθονη δυνητική πηγή θερμότητας, την ηλιακή ενέργεια.

Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες έχουν αποτελέσει εδώ και καιρό αντικείμενο μελέτης και εξέλιξης. Το εύρος της θερμοδυναμικής ποιότητας της παραγόμενης θερμότητάς, τα καθιστά κατάλληλα ως συστήματα για πλήθος εφαρμογών όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στην μελέτη του Σωτήριου Καλογήρου [43].

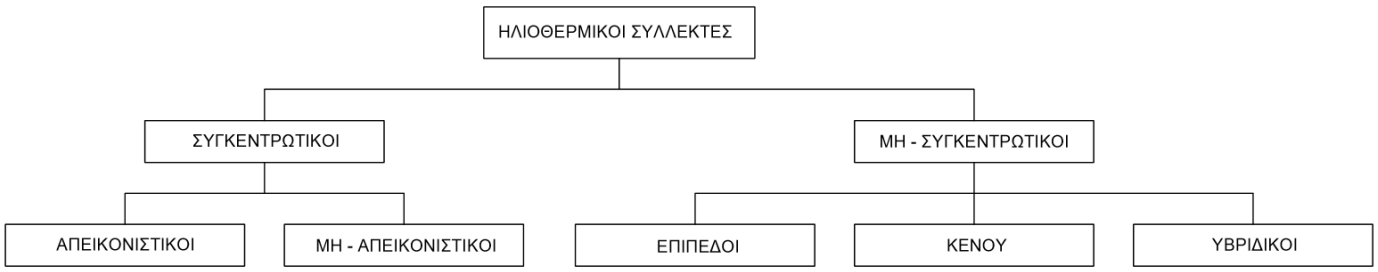
Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- Μη - συγκεντρωτικοί συλλέκτες
- Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Η διαφοροποίηση τους εντοπίζεται στο γεωμετρικό λόγο C_f της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία (A_α) προς την επιφάνεια στην οποία γίνεται η απορρόφηση της (A_r), όπως ορίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\mathrm{C_f} = \frac{A_a}{A_r} \qquad 1.2$$

Στους μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες οι επιφάνειες αυτές ταυτίζονται, οδηγώντας σε λόγους ίσους με τη μονάδα ($C_f = 1$). Αντίθετα στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, η ηλιακή ακτινοβολία διοχετεύεται μέσω κοίλων ανακλαστικών κατόπτρων σε μικρότερη επιφάνεια απορρόφησης (δέκτη), αυξάνοντας την πυκνότητα ροής ενέργειας και συνεπώς αντιστοιχώντας σε λόγους πολλαπλάσιους της μονάδας ($C_f > 1$). Στην Εικ. 1.14 γίνεται μία συνοπτική απεικόνιση των διαφόρων κατηγοριών ηλιοθερμικών συλλεκτών, όπως αυτές ορίζονται βιβλιογραφικά.



Εικ. 1.14: Κατηγοριοποίηση ηλιοθερμικών συλλεκτών [14]

1.3.1 Μη - Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες

1.3.1.1 Επίπεδοι Συλλέκτες

Οι επίπεδοι συλλέκτες (Flat-Plate Collector – FPC), αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο τύπο ηλιοθερμικού συλλέκτη, σχεδιασμένο να απορροφά τόσο την άμεση όσο και την έμμεση ηλιακή ακτινοβολία, για παραγωγή θερμότητας σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C, βρίσκοντας τεράστια εφαρμογή σε συστήματα παραγωγής ζεστού νερού χρήσης ή θέρμανσης χώρων, ενώ παράλληλα αυξημένο επιστημονικό ενδιαφέρον εμφανίζει η χρήση τους σε συστήματα ψύξης με προσρόφηση [44, 45].

Τα βασικά τμήματα ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη απεικονίζονται στην Εικ. 1.15 [46].

- *Πλάκα απορρόφησης ή απορροφητήρας*

Πρόκειται για μια μαύρη απορροφητική επιφάνεια, η οποία χρησιμοποιείται για την δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας, και την μεταφορά της θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο.

- *Κάλυμμα*

Αποτελείται από ένα ή περισσότερα διαφανή φύλλα, συνήθως κατασκευασμένα από γυαλί, τα οποία επιτρέπουν την διέλευση της ακτινοβολίας προς την πλάκα απορρόφησης, μειώνοντας παράλληλα της απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον.

- *Μόνωση*

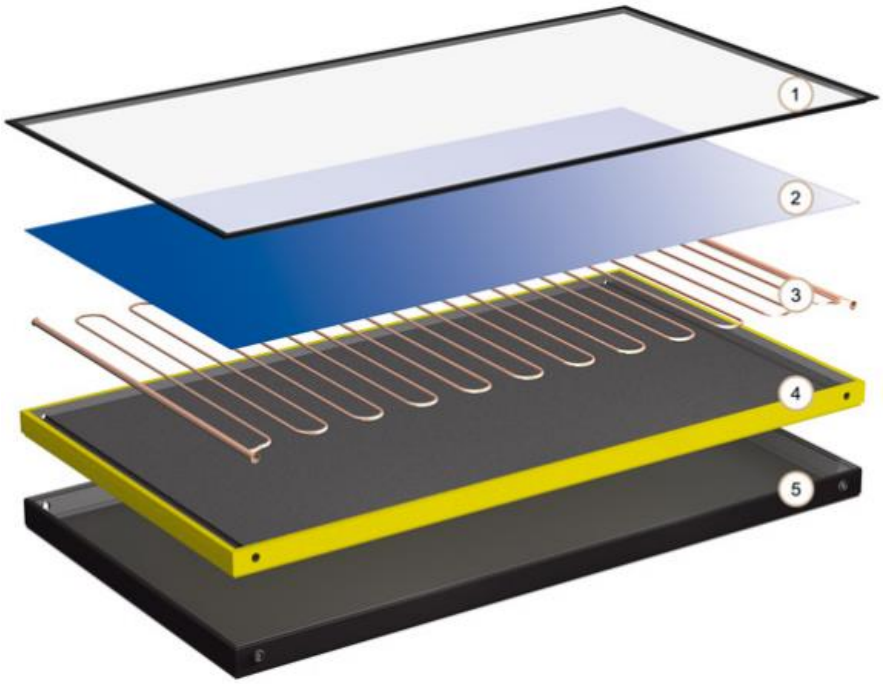
Χρησιμοποιείται για την μείωση των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον. Τοποθετείται στα πίσω μέρος της πλάκας απορρόφησης και στις παράπλευρες επιφάνειες του συλλέκτη.

- *Σύστημα μεταφοράς θερμότητας*

Αποτελείται από τις το σύνολο των αγωγών στους οποίους ρέει το εργαζόμενο μέσο, συναλάσοντας θερμότητα με την πλάκα απορρόφησης.

- *Πλαίσιο συλλέκτη*

Περιβάλλει το συλλέκτη προσφέροντας προστασία και δομική στήριξη.



Εικ. 1.15: Βασικά τμήματα επίπεδου συλλέκτη (1) Κάλυμμα (2) Πλάκα απορρόφησης (3) Σύστημα αγωγών (4) Μόνωση (5) Πλαίσιο συλλέκτη Πηγή: [47]

1.3.1.2 Συλλέκτες Κενού

Οι συλλέκτες κενού (Evacuated tube collectors - ETC), χαρακτηριστική διαμόρφωση των οποίων απεικονίζεται στην Εικ. 1.16, αποτελούν την εξέλιξη των επίπεδων συλλεκτών, επιτυγχάνοντας αυξημένο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας το οποίο αντιστοιχεί στους 50°C – 200°C. Σχεδιαστικά αποτελούνται από πλήθος παράλληλων υάλινων σωλήνων οι οποίοι είναι επικαλυμμένοι με μία ιδιαίτερα απορροφητική προς την ηλιακή ακτινοβολία επιφάνεια. Στο εσωτερικό τους υπάρχει το σύστημα μεταφοράς θερμότητας, ενώ η σύνδεσή τους επιτυγχάνεται μέσω ενός κοινού αγωγού συλλογής. Η παραπάνω διαμόρφωση επιτρέπει την αφαίρεση του αέρα από το εσωτερικό τους, δημιουργώντας συνθήκες κενού. Απώτερος σκοπός είναι η μείωση ή και ο μηδενισμός των απωλειών θερμότητας λόγω συναγωγής, προσφέροντας βελτιωμένη ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες, ιδιαίτερα σε συνθήκες μειωμένης ηλιοφάνειας ή χαμηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος [48]. Το ανώτερο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους, τους καθιστά ικανούς για τροφοδότηση συστημάτων οργανικού κύκλου Rankine (ORC) χαμηλών θερμοκρασιών, εμφανίζοντας ωστόσο αρνητικές οικονομικές αποδόσεις για συστήματα μικρής κλίμακας (<5kW$_{el}$)[49, 50].

Οι δύο κύριες κατηγοριοποιήσεις των συλλεκτών κενού, αφορούν το πλήθος των κελυφών των υάλινων σωλήνων καθώς και το σύστημα μεταφοράς θερμότητας. που χρησιμοποιείται. Αναφορικά με την πρώτη κατηγοριοποίηση διακρίνονται σε:

I. Συλλέκτες κενού με σωλήνα μονού κελύφους

II. Συλλέκτες κενού με σωλήνα διπλού κελύφους ή Dewar

Οι σωλήνες διπλού κελύφους, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν και τον συνηθέστερο τύπο, αποτελούνται από δύο ομόκεντρους υάλινους σωλήνες, οι οποίοι είναι συγκολλημένοι στο ένα τους άκρο, με το κενό να δημιουργείται στον ενδιάμεσο χώρο. Αντίθετα στους σωλήνες μονού κελύφους, το κενό επικρατεί σε ολόκληρο το εσωτερικό τους. Κάθε κατηγορία εμφανίζει αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, με τους σωλήνες διπλού κελύφους να επιτυγχάνουν αποτελεσματικότερη διατήρηση του κενού, σε αντίθεση με τους σωλήνες μονού κελύφους, που απαιτούν σφράγιση γυαλιού-μετάλλου. Στον αντίποδα, οι τελευταίοι απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, εμφανίζοντας βελτιωμένη απόδοση [51].

Αναφορικά με τα συστήματα μεταφοράς θερμότητας αυτά διακρίνονται σε:

I. Συστήματα θερμικού σωλήνα (Heat pipe ETC)

Τα παραπάνω συστήματα απεικονίζονται στην Εικ. 1.16. Ο θερμικός σωλήνας βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα κενού, σε επαφή με μεταλλικό έλασμα, η επιφάνεια του οποίου έχει επικαλυφθεί με υλικό υψηλής απορροφητικότητας και χαμηλής εκπεμπτικότητας. Το εσωτερικό του θερμικού σωλήνα, περιέχει ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας, χαμηλού σημείου βρασμού, για εκμετάλλευση της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησής του [52]. Ο ατμός του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, συναλλάσει θερμότητα με το εργαζόμενο μέσο του συλλέκτη (πχ νερό), στον συμπυκνωτή, ενώ ο κύκλος επαναλαμβάνεται με φυσική κυκλοφορία, λόγω διαφοράς πυκνότητας, μεταξύ συμπυκνώματος και ατμού.

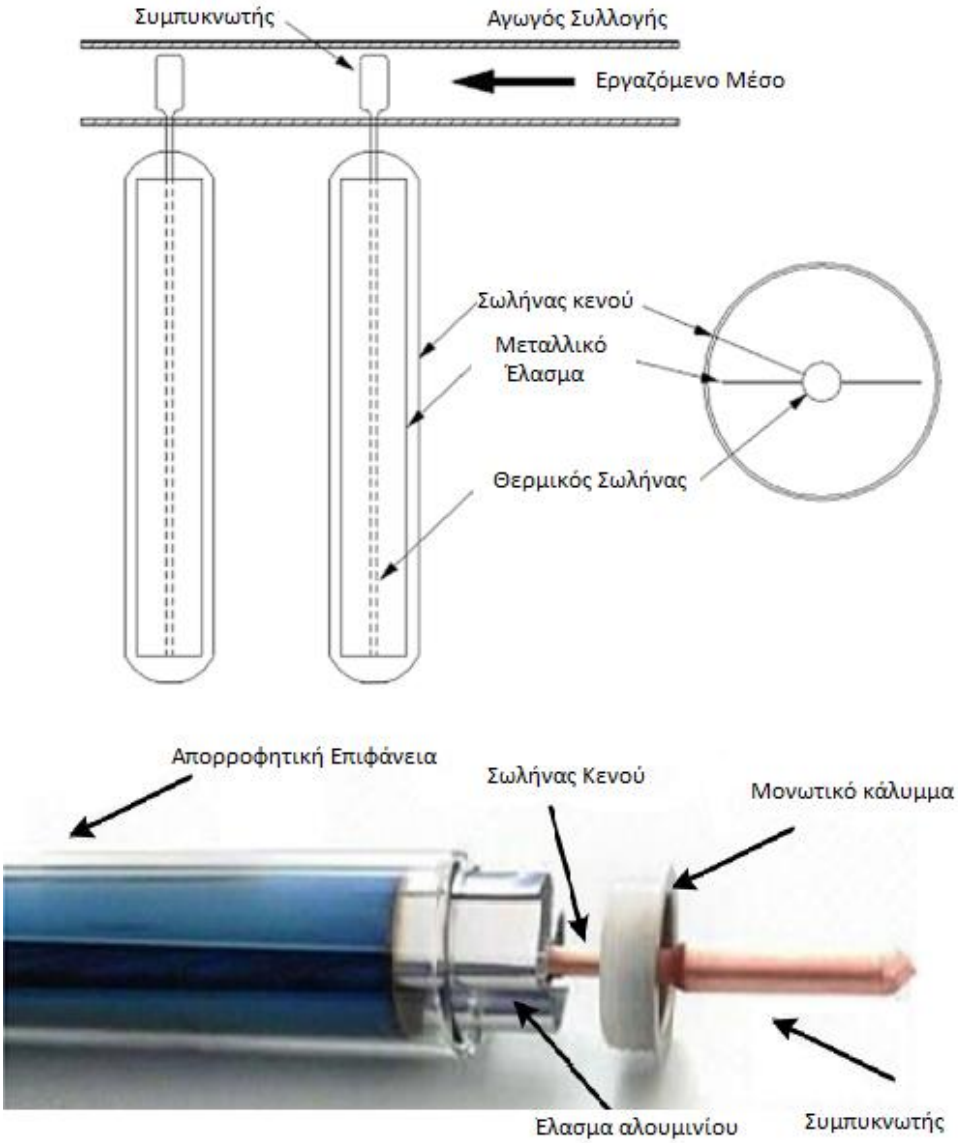
II. Συστήματα άμεσης ροής (Direct flow ETC)

Στα συστήματα άμεσης ροής το εργαζόμενο μέσο του συλλέκτη διέρχεται μέσα από τον απορροφητικό σωλήνα, ο οποίος και σε αυτή την περίπτωση, βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικό πτερύγιο με επιλεκτική επίστρωση. Ανάλογα με το σχήμα του σωλήνα,

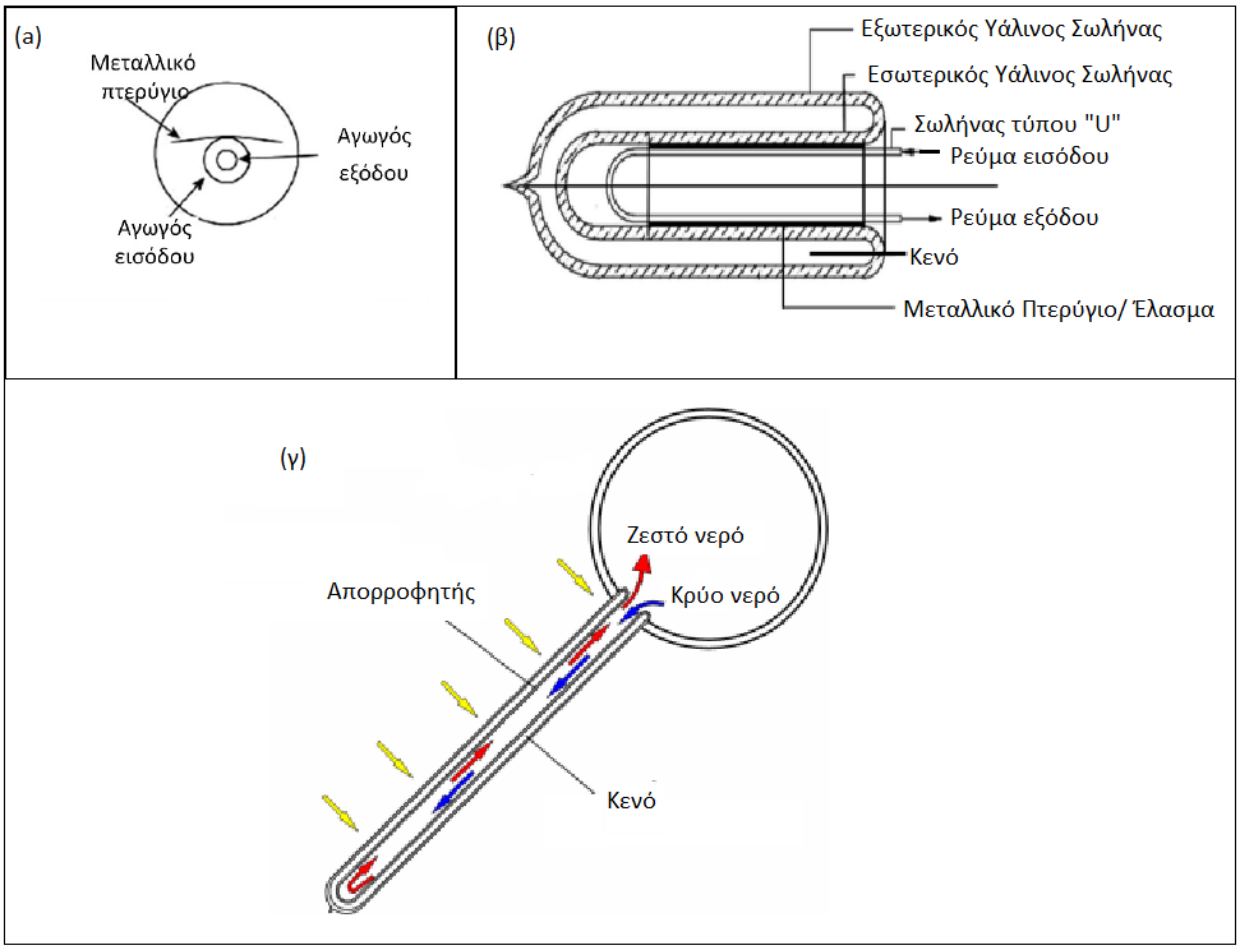
διακρίνονται και οι αντίστοιχες διατάξεις συστημάτων άμεσης ροής, οι οποίες διακρίνονται σε:

- Συστήματα ομοαξονικού σωλήνα
- Συστήματα σωληνώσεων τύπου U
- Συστήματα θερμοσιφωνικού σωλήνα.

Τα παραπάνω συστήματα απεικονίζονται στην Εικ. 1.17.



Εικ. 1.16: Βασικά τμήματα και διαμόρφωση συλλέκτη κενού θερμικού σωλήνα

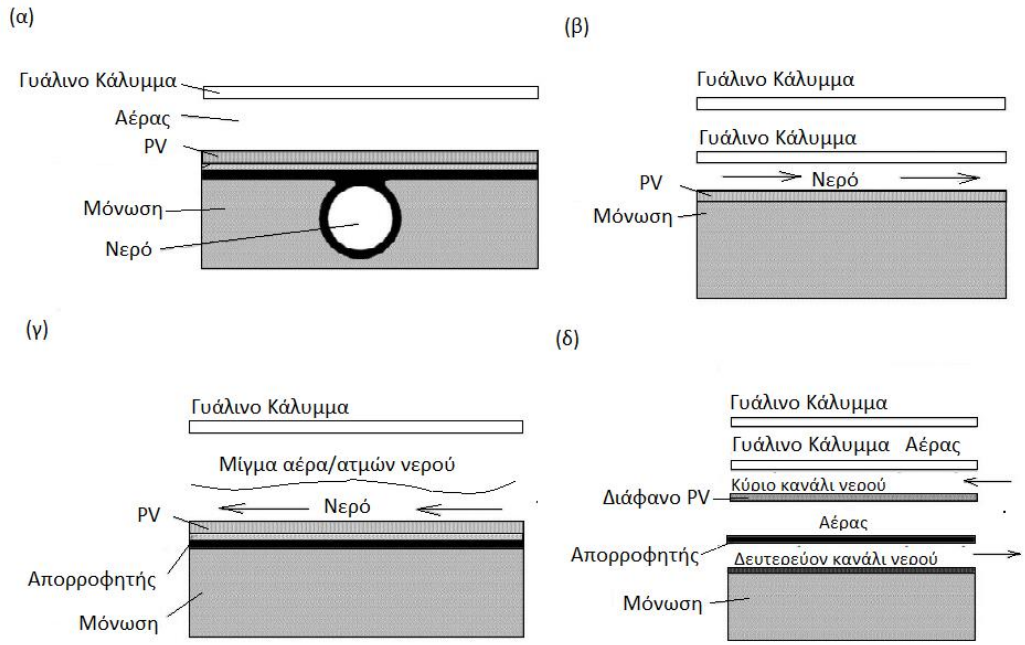


Εικ. 1.17: Διαμορφώσεις συλλεκτών κενού άμεσης ροής (α) Ομοαξονικού σωλήνα (β) Τύπου U (γ) Θερμοσιφωνικού σωλήνα. Πηγή: [53, 54]

1.3.1.3 Υβριδικοί Συλλέκτες

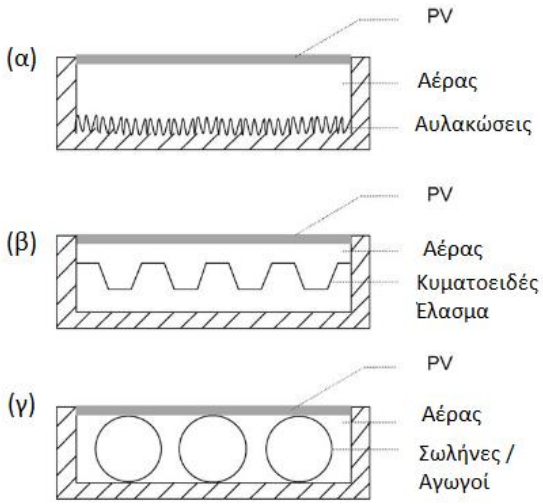
Οι υβριδικοί συλλέκτες (PV/T) αποτελούν ένα συνδυασμό φωτοβολταϊκών (photovoltaic – PV) και θερμικών (thermal – T) ηλιακών συλλεκτών, επιτρέποντας την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, μεγιστοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο την παραγωγή ωφέλιμης ενέργειας [55]. Η απόδοσή τους επηρεάζεται σαφώς από τη γεωμετρία και τον σχεδιασμό τους, καθώς και από το εργαζόμενο μέσο, το οποίο μπορεί να είναι νερό ή αέρας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα διαμορφώσεων υβριδικών ηλιακών συλλεκτών, δίνονται στις Εικ. 1.18 και Εικ. 1.19.

Συστήματα νερού



Εικ. 1.18: Διατάξεις υβριδικών ηλιακών συλλεκτών με εργαζόμενο μέσο νερό (α) Σωλήνα – ελάσματος (β) Καναλιού (γ) Ελεύθερης ροής (δ) Διπλού απορροφητή [56]

Συστήματα αέρα



Εικ. 1.19: Διατάξεις υβριδικών ηλιακών συλλεκτών με εργαζόμενο μέσο τον αέρα (α) Αυλακώσεων (β) Κυματοειδούς ελάσματος (γ) Σωλήνων / αγωγών [57]

1.3.2 Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες

Για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών, στην έξοδο των ηλιακών συλλεκτών, είναι απαραίτητη, η μείωση των απωλειών θερμότητας από τον απορροφητή. Στην προηγούμενη ενότητα, η μείωση αυτή εστιάστηκε στην ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω συναγωγής, με τη δημιουργία συνθηκών κενού.

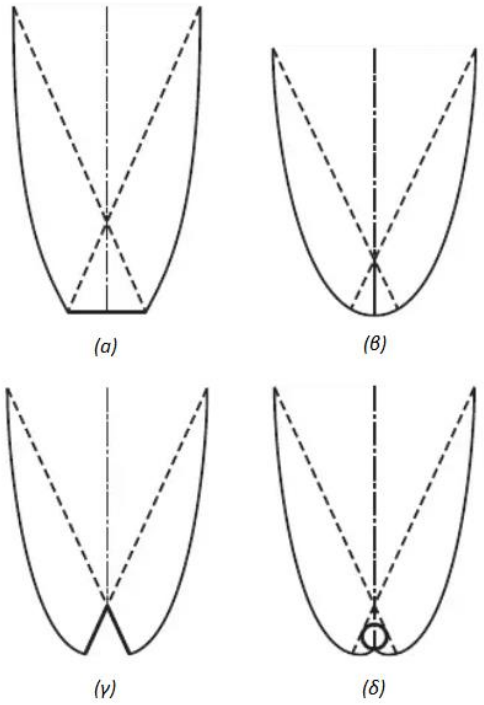
Ωστόσο η λύση αυτή δεν επιδρά στις απώλειες λόγω ακτινοβολίας, οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από την συνολική επιφάνεια του απορροφητή. Στην περίπτωση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών αυτή μειώνεται σημαντικά, με γεωμετρικούς λόγους (C_f) σημαντικά μεγαλύτερους

της μονάδας, λαμβάνοντας τιμές ακόμα και ίσες με C_f = 1500, για σημειακά εστιακά συστήματα όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.
Ως αποτέλεσμα μπορούν να λειτουργούν σε αυξημένο θερμοκρασιακό εύρος $20^oC \leq T \leq 1500^oC$ εμφανίζοντας βελτιωμένες αποδόσεις σε σχέση με τα συστήματα μη – συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών [58, 59].

1.3.2.1 Μη απεικονιστικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Οι μη απεικονιστικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες κάνουν χρήση τόσο της άμεσης όσο και της διάχυτης ακτινοβολίας. Κύριος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι ο σύνθετος παραβολικός συλλέκτης (Compound Parabolic Collector – CPC), ο οποίος κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη διαμόρφωση της επιφάνειας του απορροφητή του σε [58]:

- Επίπεδου απορροφητή
- Διπολικού απορροφητή (Bifacial)
- Πρισματικού απορροφητή
- Σωληνοειδή απορροφητή



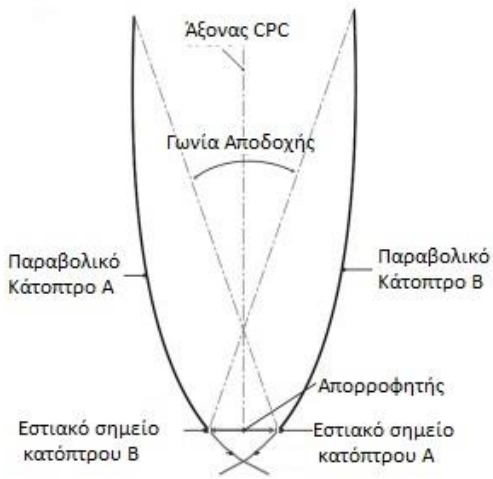
Εικ. 1.20: Διαμορφώσεις παραβολικού συλλέκτη (α) Επίπεδου απορροφητή (β) Διπολικού απορροφητή (γ) Πρισματικού απορροφητή (δ) Σωληνοειδή απορροφητή [58]

Ο σχεδιασμός τους, ανάλογα με την ύπαρξη ή μη, μηχανισμού παρακολούθησης του ηλίου, επιτρέπει την παραγωγή θερμότητας σε μέσες και υψηλές θερμοκρασίες, με χαρακτηριστικό εύρος λειτουργίας τους [60°C – 250°C] [60]. Στην πιο απλή τους μορφή αποτελούνται από δύο όμοια παραβολικά κάτοπτρα, με τον απορροφητή να βρίσκεται στην κατακόρυφο του μέσου της ευθείας που ενώνει τα εστιακά κέντρα του κάθε κατόπτρου. Λόγω της γεωμετρίας του, ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε αυτόν με γωνία (incidence angle – θ_{inc}) μεγαλύτερη του μισού της γωνίας αποδοχής (θ_{acc}), οδηγείται μέσω διαδοχικών ανακλάσεων εκτός του συλλέκτη χωρίς να εκμεταλλευθεί. Χαρακτηρίζονται από γεωμετρικούς λόγους μικρότερους του πέντε

(<5), με τον μέγιστο θεωρητικό γεωμετρικό λόγο να δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (για δισδιάστατη γεωμετρία):

$$C_{max} = 1/\sin(\theta_{acc}) \qquad 1.3$$

Παρακάτω απεικονίζεται συνοπτικά τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύνθετου παραβολικού συλλέκτη, επίπεδου απορροφητή.



Εικ. 1.21: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύνθετου παραβολικού συλλέκτη επίπεδου απορροφητή [61]

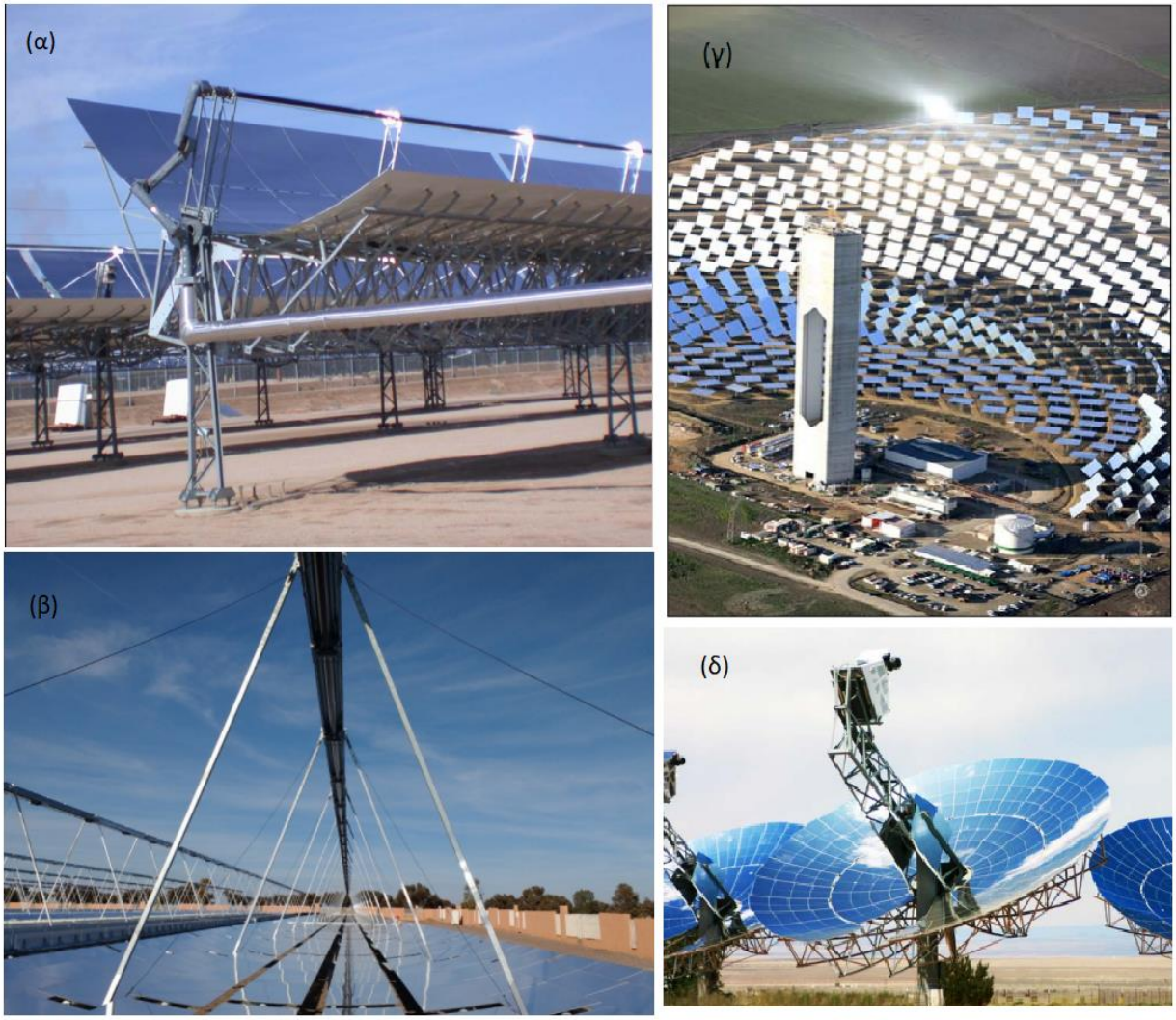
1.3.2.2 Απεικονιστικοί Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες

Οι απεικονιστικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες χαρακτηρίζονται από τους υψηλότερους γεωμετρικούς λόγους ανάμεσα σε όλα τα είδη ηλιακών συλλεκτών, επιτυγχάνοντας το μέγιστο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, με συνήθεις τιμές στην περιοχή των 200ºC – 500ºC [62].
Περιλαμβάνουν μηχανισμούς παρακολούθησης ηλίου μονού ή διπλού άξονα, ώστε να μεγιστοποιούν την εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ σε αντίθεση με τους μη – απεικονιστικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες, ο απορροφητής τους, είναι τοποθετημένος στο εστιακό σημείο (ή άξονα) του εκάστοτε κατόπτρου [14].
Οι πιο συνήθεις εμπορικοί και εξελιγμένοι τύποι αυτού του είδους, περιλαμβάνουν τους:

- Συλλέκτες Παραβολικού Κατόπτρου (Parabolic Through Collectors – PTC)
- Γραμμικούς Ανακλαστήρες Fresnel (Linear Fresnel Reflectors – (LFR)
- Ηλιακούς Πύργους (Central Tower Receivers – CTR)
- Ηλιακούς Δίσκους (Paraboloidal Dish Reflectors – PDR)

Παραδείγματα των οποίων απεικονίζονται συγκεντρωτικά στην Εικ. 1.22.
Η υψηλή θερμοδυναμική ποιότητα της παραγόμενης θερμότητας από τους απεικονιστικούς ηλιακούς συλλέκτες, τους καθιστά κατάλληλους για πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών, όπως παρουσιάζεται στη μελέτη του Zhang et al [63], με την κυριότερη εφαρμογή τους να εντοπίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Concentrated Solar Power Plants – CSPP, από κύκλους νερού – ατμού με θερμοκρασίες της τάξεως των 300ºC έως 600ºC. Ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον εμφανίζεται στη σύζευξη τους με μονάδες υλοποίησης οργανικού κύκλου Rankine

(ORC), οι οποίες ευνοούνται από το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους και την δυνατότητα παροχής θερμότητας υψηλής θερμοδυναμικής αξίας [64, 65].



Εικ. 1.22: Απεικονιστικοί Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες (α) Παραβολικού κατόπτρου (β) Γραμμικών Ανακλαστήρων Frensel (γ) Ηλιακού πύργου (δ) Ηλιακού δίσκου [66]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Περιγραφή Συστήματος

Στην παρούσα διπλωματική θα μελετηθεί ένα καινοτόμο σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, με ηλιακή τροφοδότηση, το οποίο κάνει χρήση ενός νέου προσροφητικού μέσου. Σκοπός του συστήματος είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, κτηρίων υψηλής ενεργειακής απόδοσης (nearly Zero Energy Buildings – nZEBs), οικιακής κλίμακας, σε θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης, επιτυγχάνοντας ηλιακό κλάσμα μεγαλύτερο του 60%. Η μελέτη θα εστιαστεί σε βορειοευρωπαϊκές χώρες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές ηλιοφάνειας, ιδίως τους χειμερινούς μήνες, αναδεικνύοντας την συμβολή της αποθήκευσης θερμότητας, στην ετεροχρονισμένη κάλυψη φορτίων. Η ανάπτυξη του συστήματος έγινε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SWS – Heating. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη περιγραφή των κυρίων συνιστωσών του συστήματος, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζονται τα πλήρη χαρακτηριστικά αυτού, για λόγους εμπιστευτικότητας.

2.1 Σύστημα Εποχιακής Αποθήκευσης Θερμότητας

2.1.1 Αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης

Το υπό μελέτη σύστημα θέρμανσης με αποθήκευση θερμότητας αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας (Seasonal Thermal Energy Storage – STES)
- Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού (ETCs)
- Δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας κενού (Vacuum Combi-Storage tank)
- Εφεδρικός λέβητας φυσικού αερίου (Natural Gas back-up boiler)

ενώ ανά περίπτωση, σύμφωνα με τους θερμοκρασιακούς περιορισμούς λειτουργίας της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, διακρίνονται δύο διατάξεις του συστήματος με χρήση είτε:

- Δοχείου αδρανείας (με υλικά αλλαγής φάσης) (PCM buffer tank) και εναλλάκτη Αέρα Νερού (AIR HEX)
- Γεωθερμικού εναλλάκτη (Borehole HEX)

Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης, εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος που εμφανίζει κάθε υπό μελέτη χώρα τους χειμερινούς μήνες, ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του συμπυκνωτή/ατμοποιητή της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας. Η απόρριψη ή η απαγωγή της θερμότητας στο περιβάλλον γίνεται μέσω ενσωματωμένου κυκλώματος νερού που κάνει χρήση της εκάστοτε διάταξης. Χώρες οι οποίες εμφανίζουν για μεγάλο χρονικό διάστημα θερμοκρασίες περιβάλλοντος κοντά στους 0° C, κάνουν χρήση του γεωθερμικού εναλλάκτη, με τη διάταξη εναλλάκτη αέρα – νερού και δοχείου αδρανείας να χρησιμοποιείται σε εν γένει πιο ζεστά κλίματα.

Το σύστημα εμφανίζει εποχιακή λειτουργία, ενώ ο προσδιορισμός της κατάλληλης περιόδου φόρτισης και αποφόρτισης, αποτελεί προϊόν βελτιστοποίησης, με κύρια κριτήρια την ελαχιστοποίηση της ανεκμετάλλευτης μάζας προσροφητικού μέσου και παράλληλα τη μεγιστοποίηση της ετεροχρονισμένης προσδιδόμενης θερμότητας, από το υπό μελέτη σύστημα.

Στην περίοδο φόρτισης, θερμότητα από τους ηλιοθερμικούς συλλέκτες, θερμοκρασίας χαμηλότερης των 70°C, χρησιμοποιείται για την μερική ή πλήρη κάλυψη των αναγκών σε ΖΝΧ,

διοχετευόμενη στη δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας κενού, που περιέχει νερό. Θερμότητα υψηλότερων θερμοκρασιών από τους συλλέκτες κενού, η οποία εν γένει αντιστοιχεί σε ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου μεγαλύτερη των 500 W/m^2, χρησιμοποιείται για την φόρτιση της μονάδας SWS – STES. Η φόρτιση της μονάδας αντιστοιχεί στην φάση εκρόφησης, απομακρύνοντας το νερό που έχει προσροφηθεί στην επιφάνειά του προσροφητικού μέσου. Στην περίοδο αποφόρτισης η λειτουργία του συστήματος εξαρτάται από την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη διάταξη.

2.1.1.1 Διάταξη εναλλάκτη αέρα – νερού και δοχείου αδρανείας

Σε αυτή τη διάταξη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας (10°C – 20°C), από τους συλλέκτες κενού, αντιστοιχώντας εν γένει σε τιμές ακτινοβολίας μικρότερες των 100 W/m^2 χρησιμοποιείται για την φόρτιση του δοχείου αδρανείας (PCM). Σε αντιστοιχία με την περίοδο φόρτισης, θερμότητα στο εύρος (30 ^{o}C < θ < 70 ^{o}C), διοχετεύεται στο δοχείο κενού, για την μείωση των φορτίων θέρμανσης και ΖΝΧ. Παράλληλα η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιείται για την κάλυψη των φορτίων του κτηρίου, με την μονάδα αποθήκευσης θερμότητας να βρίσκεται πλέον σε φάση προσρόφησης. Στην κατάσταση αυτή, ο συμπυκνωτής της μονάδας, λειτουργεί πλέον ως ατμοποιητής, εξατμίζοντας το νερό, που βρίσκεται σε συνθήκες κενού. Σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, όπου δεν είναι δυνατή η χρήση του εναλλάκτη αέρα – νερού, λόγω των θερμοκρασιακών περιορισμών που θέτει το εποχιακό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, γίνεται χρήση του δοχείου αδρανείας. Στην περίπτωση που και το δοχείο αδράνειας (PCM) είναι αφόρτιστο τότε, το σύστημα παραμένει ανενεργό.

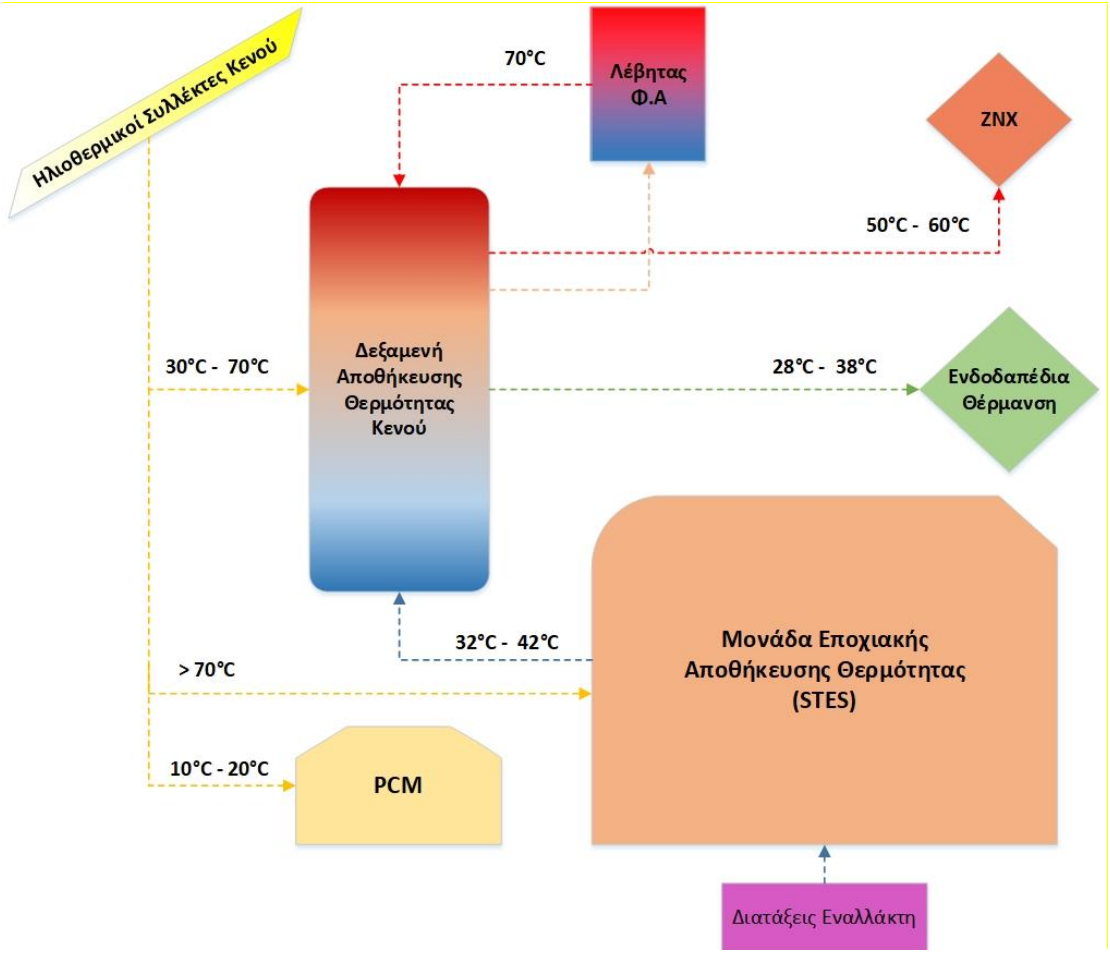
2.1.1.2 Διάταξη γεωθερμικού εναλλάκτη

Σε αυτή τη διάταξη, η θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας από τους συλλέκτες κενού (10°C – 20°C), χρησιμοποιείται στον ατμοποιητή της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, με τον γεωθερμικό εναλλάκτη να ενεργοποιείται, όταν η θερμότητα αυτή δεν είναι διαθέσιμη. Το πλεονέκτημα σε αυτή την διάταξη, είναι πως με κατάλληλο βάθος γεωθερμικού εναλλάκτη, επιτυγχάνεται απρόσκοπτη λειτουργία της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης, ανεξάρτητη των περιβαλλοντικών συνθηκών, ωστόσο με μεγαλύτερο κόστος. Η λοιπή λογική λειτουργίας είναι η ίδια με την διάταξη εναλλάκτη αέρα νερού και δοχείου αδρανείας, που περιεγράφηκε παραπάνω.

Σε όλα τα σενάρια λειτουργίας ο λέβητας φυσικού αερίου, χρησιμοποιείται για να διατηρεί σταθερή την θερμοκρασία κορυφής της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού, στα επίπεδα των 60 ^{o}C, ώστε να είναι πάντοτε δυνατή η παραγωγή ΖΝΧ.

Η θέρμανση του σπιτιού γίνεται με κατάλληλο ενδοδαπέδιο σύστημα με την θερμοκρασία εισαγωγής του ζεστού νερού να ρυθμίζεται ανάλογα την εξωτερική θερμοκρασία στο θερμοκρασιακό εύρος των 28 ^{o}C – 38 ^{o}C, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια.

Μια σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης των επιμέρους υποσυστημάτων δίνεται στην Εικ. 2.1.

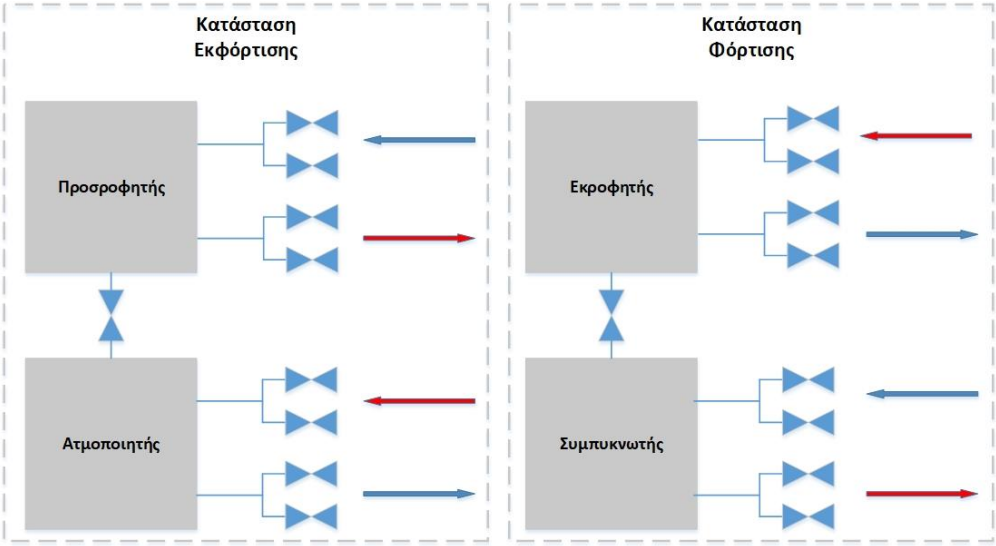


Εικ. 2.1: Σχηματική απεικόνιση του υπό μελέτη συστήματος

2.1.2 Περιγραφή των υπομονάδων της εγκατάστασης

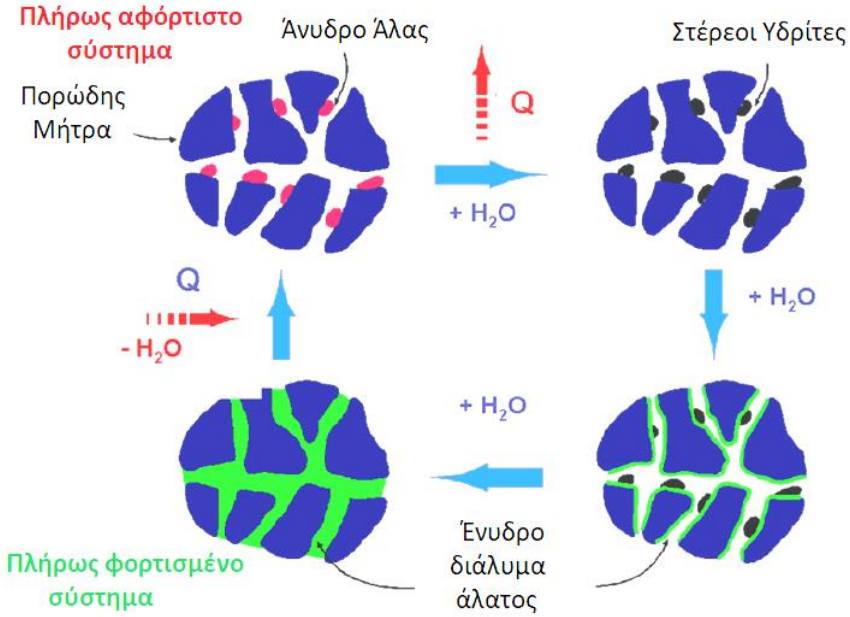
2.1.2.1 Μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας

Η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας αποτελεί τον πυρήνα του υπό μελέτη συστήματος. Συντίθεται από πλήθος υπομονάδων, κάθε μία εκ των οποίων υλοποιείται από ένα ζεύγος πλακοειδών εναλλακτών, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με μια βαλβίδα κενού. Το προσροφητικό υλικό βρίσκεται επικαλυμμένο σε μορφή «φίλμ», στις πλάκες ενός εκ των δύο εναλλακτών, με τον δεύτερο εναλλάκτη να λειτουργεί ως ατμοποιητής ή συμπυκνωτής, ανάλογα με την εκάστοτε λειτουργία του συστήματος, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικ. 2.2. Η συνολική μάζα του υλικού αποθήκευσης θερμότητας καθορίζεται από το πλήθος των εναλλακτών, αναδεικνύοντας την ανάγκη για χρήση υλικών με αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα.



Εικ. 2.2: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης και λειτουργίας της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας

Στην παρούσα εγκατάσταση το προσροφητικό υλικό, ανήκει στην κατηγορία των σύνθετων υλικών ρόφησης, γνωστά ως επιλεκτικά υδατικά υλικά ρόφησης (Selective Water Sorbents – SWSs). Αποτελούνται από μια πορώδη μήτρα, με μέγεθος πόρων στην περιοχή των 1,5 – 20 nm, στην οποία ενσωματώνεται ένα υγροσκοπικό άλας. Η τεχνολογία αυτή αυξάνει την συνολική δυνατότητα προσρόφησης, καθώς συνδυάζει την φυσική προσρόφηση στη μήτρα του υλικού με την χημική ρόφηση μεταξύ των ατμών νερού και του άλατος, ενώ παράλληλα βελτιώνει τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, οδηγώντας συνολικά σε μικρότερο όγκο συστήματος [67, 68]. Το ακριβές υλικό που χρησιμοποιείται δεν αναφέρεται για λόγους εμπιστευτικότητας. Στην Εικ. 2.3 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία προσρόφησης σε μήτρα SWS υλικού.



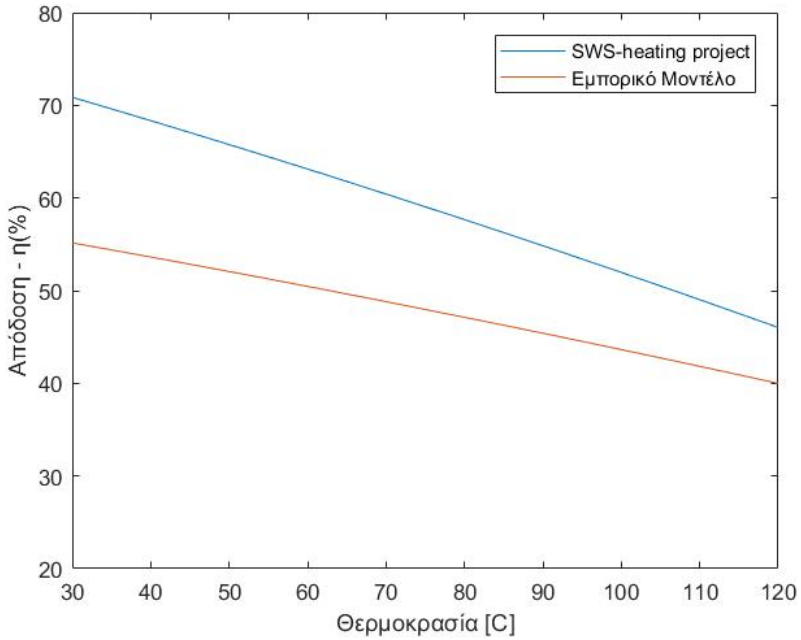
Εικ. 2.3: Αποθήκευση και ανάκτηση θερμότητας σε υδατικά υλικά ρόφησης [69]

2.1.2.2 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες Κενού

Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού που χρησιμοποιήθηκαν, αποτελούν προϊόν εξέλιξης εμπορικών προϊόντων της εταιρίας AkoTec Produktions GmbH [70]. Στόχος είναι η κάλυψη των αναγκών του έργου σε θερμότητα υψηλών θερμοκρασιών, ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη φόρτιση της μονάδας αποθήκευσης θερμότητας κατά τους θερινούς μήνες. Πρόκειται για συλλέκτες κενού άμεσης ροής, με διαμόρφωση ομοαξονικού σωλήνα, και εργαζόμενο μέσο, μη τοξικό γαλάκτωμα νερού υψηλής απορροφητικότητας. Η απόδοση καθώς και οι συμπεριφορά των συλλεκτών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του έργου, συγκρίθηκε με αντίστοιχη εμπορικών συλλεκτών, όπως απεικονίζονται στην Εικ. 2.4.

Εικ. 2.4: Ηλιακοί συλλέκτες κενού (Αριστερά) Εμπορικός συλλέκτης της εταιρίας AkoTec Produktions GmbH (Δεξιά) Συλλέκτης που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες του έργου SWS-Heating

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C και ακτινοβολία 1000 W/m^2, στην Εικ. 2.5, παρουσιάζονται οι καμπύλες απόδοσης των παραπάνω συλλεκτών.



Εικ. 2.5: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών απόδοσης – θερμοκρασίας για τους υπό μελέτη συλλέκτες

Παρατηρούμε πως οι καινούργιοι συλλέκτες εμφανίζουν σαφώς βελτιωμένη απόδοση, σε σχέση με τους υπάρχοντες εμπορικούς, η οποία διατηρείται και στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

2.1.2.3 Δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας κενού

Η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας κενού, αποτελεί το κύριο υποσύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την λειτουργία της εγκατάστασης, παρέχοντας την απαιτούμενη θερμική αδράνεια για την ομαλή λειτουργία και κάλυψη των θερμικών φορτίων. Πρόκειται για μια δεξαμενή νερού, της εταιρίας Sirch GmbH & Co. [71] χωρητικότητας 1000 lt, η οποία χρησιμοποιεί για μόνωση διογκωμένο περλίτη σε συνθήκες κενού, ανάμεσα στο εξωτερικό και εσωτερικό της τοίχωμα. Στόχος του σχεδιασμού της δεξαμενής, πέραν της ελαχιστοποίησης των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον, είναι και η επίτευξη κατάλληλης θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης, η οποία, θα επιτρέψει την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος, όπως αναφέρθηκε και στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

Για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της δεξαμενής, αλλά και της εξακρίβωση των συντελεστών απωλειών θερμότητας της, ένα μικρότερο μοντέλο, χωρητικότητας 535 lt, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικ. 2.6, μελετήθηκε στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων ΕΜΠ, με τα χαρακτηριστικά του να παρουσιάζονται στον Πιν. 2.1.

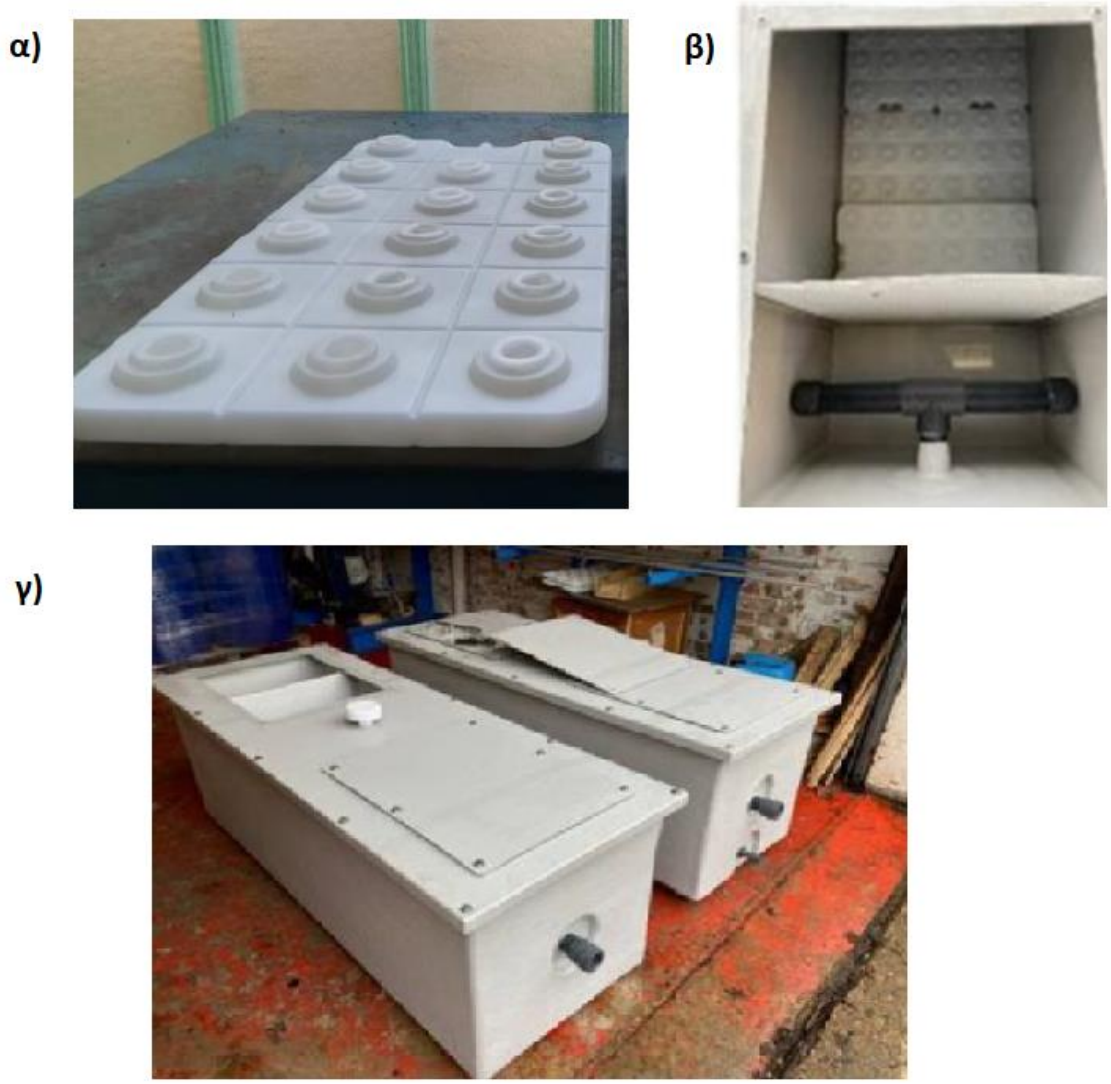
Εικ. 2.6: Δοχείο αποθήκευσης θερμότητας κενού της εταιρίας Sirch GmbH & Co.

Πιν. 2.1: Χαρακτηριστικά δοχείου αποθήκευσης θερμότητας κενού της εταιρίας Sirch GmbH & Co.

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδα Μέτρησης***
Χωρητικότητα	535	lt
Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας	3	bar
Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας	95	^{o}C
Ύψος	2555	mm
Εξωτερική Διάμετρος	1000	mm
Πάχος Μόνωσης	175	mm

2.1.2.4 Δοχείο αδράνειας (με υλικά αλλαγής φάσης - PCM)

Το δοχείο αδρανείας, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της παρούσας ενότητας, χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμότητας, χαμηλής θερμοκρασίας, ώστε να επιτρέπεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος κατά την αποφόρτιση. Αποτελείται από πλήθος πλαστικών πλακών, μέσα στις οποίες βρίσκεται το υλικό αλλαγής φάσης, οι οποίες τοποθετούνται εντός μονωμένου ορθογωνικού μεταλλικού δοχείου. Η γεωμετρία των πλακών είναι τέτοια, ώστε να επιτρέπει την αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας με το εργαζόμενο μέσο (νερό), εξασφαλίζοντας παράλληλα μειωμένο όγκο συστήματος. Η κατασκευή του υποσυστήματος, έγινε από την εταιρεία PCM Products Ltd [72], ενώ η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του υποσυστήματος πραγματοποιήθηκε από το Πανεπιστήμιο της Λιέδης (Universitat de Lleida – UDL). Στην Εικ. 2.7 παρουσιάζονται ορισμένα δομικά στοιχεία του υποσυστήματος.



Εικ. 2.7: Δοχείο αδρανείας (α) Υλικό αλλαγής φάσης ενθυλακωμένο σε πλάκες κατάλληλης διαμόρφωσης (β) Εσωτερική διαμόρφωση δοχείου αδρανείας (γ) Τελική μορφή δοχείου αδρανείας – Εξωτερική απεικόνιση

2.1.2.5 Εφεδρικός Λέβητας Φυσικού Αερίου

Κύρια χρήση του εφεδρικού λέβητα συμπύκνωσης φυσικού αερίου είναι η κάλυψη μέρους των φορτίων για θέρμανση και ΖΝΧ, κατά τους χειμερινούς μήνες όπου το σύνολο της παραγόμενης

θερμότητας από το ηλιοθερμικό πεδίο και την μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, είναι ανεπαρκές.

Οι λέβητες συμπύκνωσης εκμεταλλεύονται την λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης των υδρατμών στα καυσαέρια, οδηγώντας σε αυξημένες αποδόσεις σε σχέση με τους κοινούς λέβητες πετρελαίου, με τυπικές τιμές απόδοσης, στο εύρος , 94% - 109%[2] , όπως παρέχεται από διάφορους κατασκευαστές [73-75]. Δεδομένου πως η πειραματική εγκατάσταση του έργου, βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης, για λόγους πληρότητας, ως παράδειγμα εμπορικού λέβητα συμπύκνωσης φυσικού αερίου, παρουσιάζεται ο *RIELLO residence 25 KIS e* του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων ΕΜΠ, με βαθμό απόδοσης 98,6% και ονομαστική θερμική ισχύ 26,3 kW.

Εικ. 2.8: Λέβητας συμπύκνωσης φυσικού αερίου RIELLO του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων ΕΜΠ

[2] Οριζόμενοι βαθμοί απόδοσης βάση της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου.

2.1.2.6 Λοιπά Συστήματα

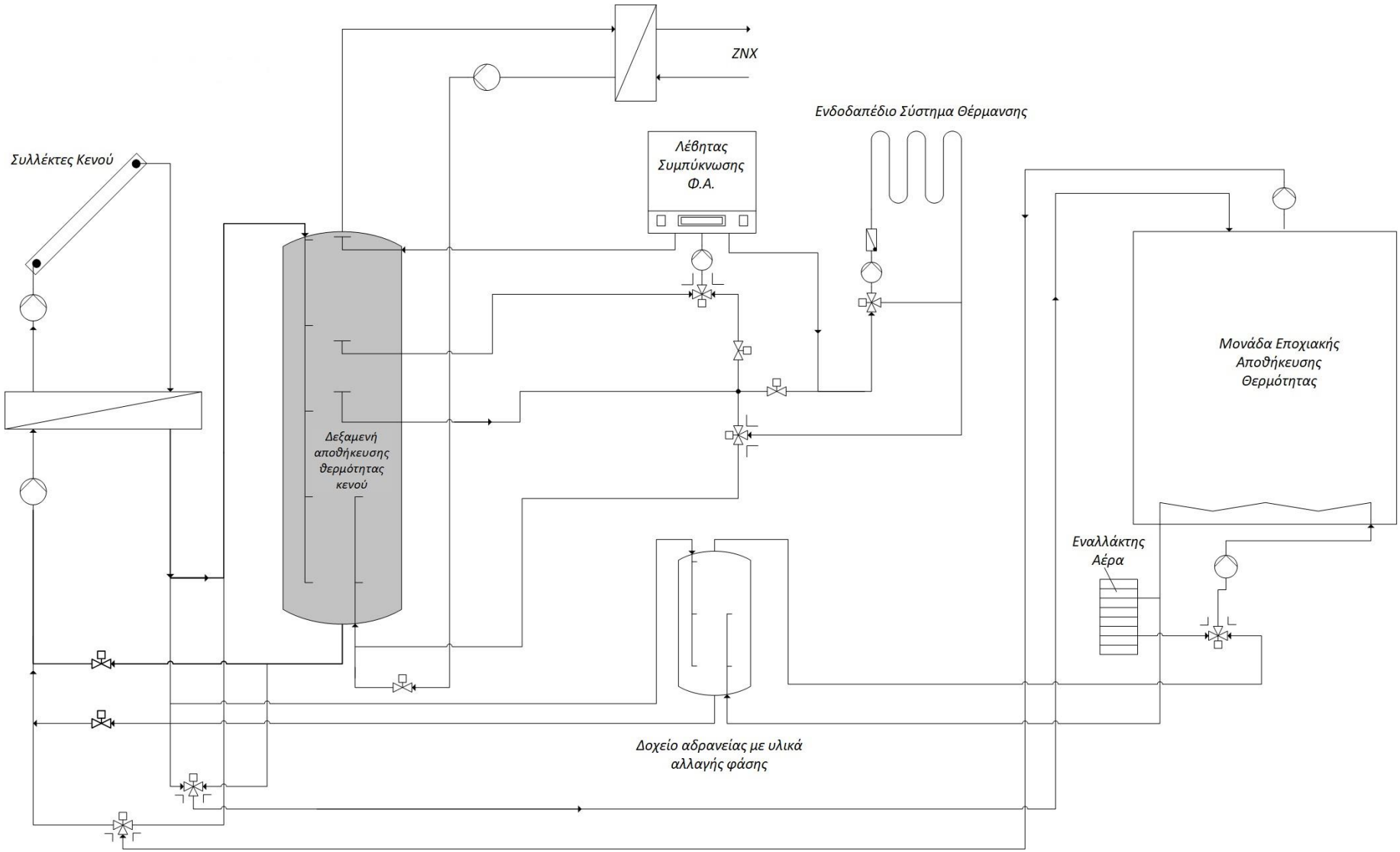
Δεδομένου πως η μονάδα πιλότος του συστήματος, βρίσκεται σε φάση εξέλιξης, δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα για τον γεωθερμικό εναλλάκτη και τον εναλλάκτη αέρα – νερού. Η παραπάνω συνθήκη ωστόσο, δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της δυναμικής προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος, δεδομένου πως στην παρούσα φάση δεν υπεισέρχονται περιορισμοί κόστους.

Για λόγους πληρότητας, παρακάτω παρουσιάζονται οι κυκλοφορητές οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών καταναλώσεων του συστήματος, με την επιλογή τους να είναι προϊόν τόσο των τεχνολογικών ορίων όσο και των βέλτιστων παροχών των εκάστοτε συστημάτων, όπως προσδιορίστηκαν κατά τη ανάπτυξη του δυναμικού μοντέλου [76, 77].

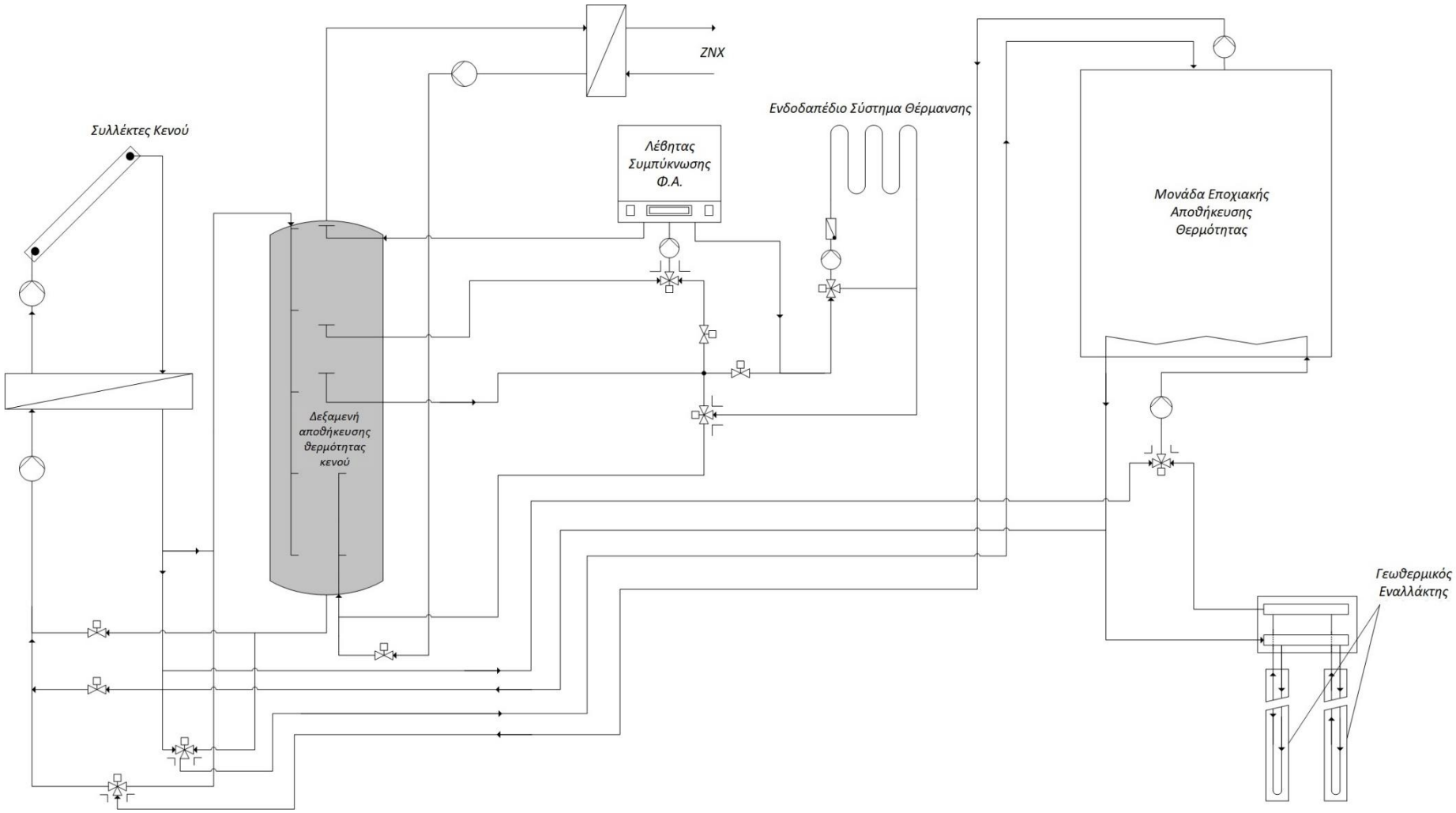
- Κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών: Grundfos SOLAR PML 25-145 180
- Κύκλωμα δοχείου αποθήκευσης: Wilo Yonos MAXO 25/0,5-10
- Κυκλοφορητής ΖΝΧ: Grundfos ALPHA2 15-40 130
- Κυκλοφορητής λέβητα και κυκλώματος θέρμανσης: Grundfos UPS2 32-80 180

2.1.3 Μονογραμμική απεικόνιση συστημάτων

Παρακάτω γίνεται μία λεπτομερής απεικόνιση της διασύνδεσης των επιμέρους υπομονάδων της εγκατάστασης, ανάλογα με την εκάστοτε διάταξη η οποία επιλέγεται. Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παρακάτω διαγράμματα, το σύστημα επιτρέπει πλήθος διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας, οι οποίες είναι ενταγμένες στην λογική ελέγχου του συστήματος, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση χρήσης του λέβητα Φ.Α. Οι παραπάνω καταστάσεις λειτουργίας ωστόσο, καθώς και οι παράμετροι ελέγχου αυτών δεν παρουσιάζονται για λόγους εμπιστευτικότητας.



Εικ. 2.9: Σχηματική απεικόνιση συστήματος με χρήση εναλλάκτη αέρα και δοχείου αδράνειας



Εικ. 2.10: Σχηματική απεικόνιση συστήματος με χρήση γεωθερμικού εναλλάκτη

2.2 Κτηριακή Μονάδα

2.2.1 Αρχιτεκτονική Βορειοευρωπαϊκών Χωρών

Για τη σωστή προσομοίωση της λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος, είναι απαραίτητος ο σαφής προσδιορισμός των φορτίων θέρμανσης κτηριακής μονάδας η οποία συμφωνεί με τα πρότυπα αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και ανθρώπινης δραστηριότητας βορειοευρωπαϊκών χωρών.

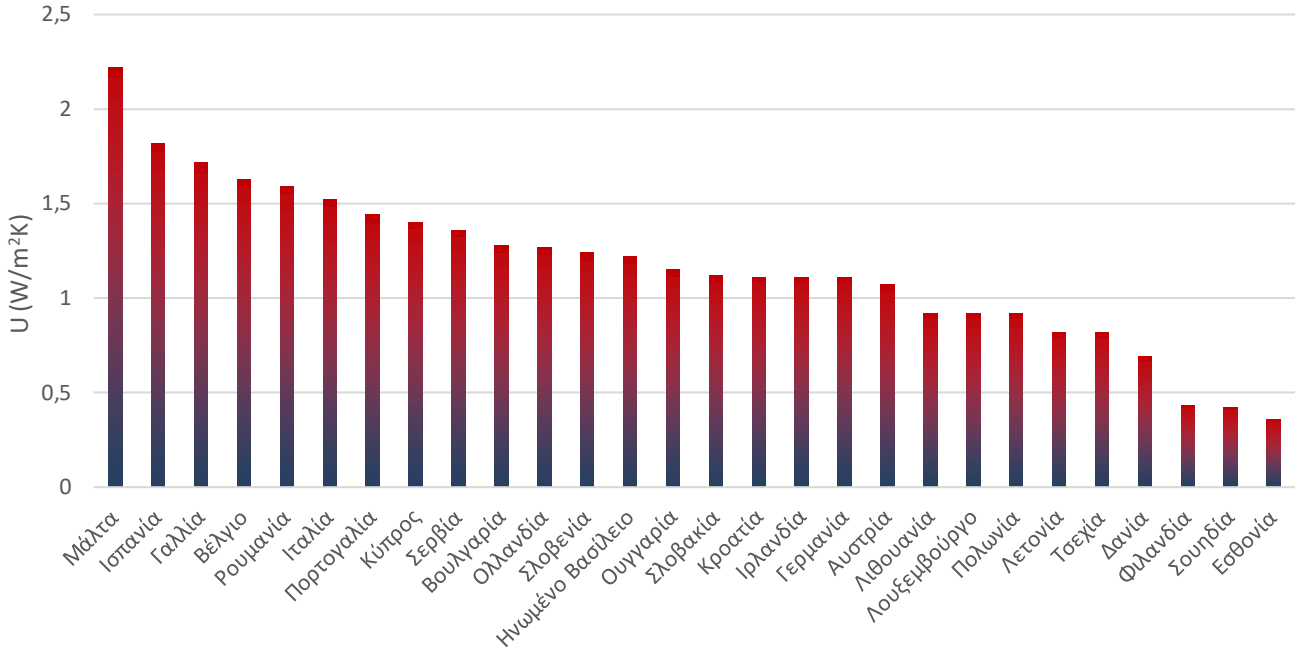
Δεδομένου πως οι παραπάνω χώρες χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος ακόμα και τους καλοκαιρινούς μήνες, οι ανάγκες σε ψύξη είναι αμελητέες, με πολλά κτίσματα να παρουσιάζουν έλλειψη σε αντίστοιχα ενεργητικά συστήματα. Αντίθετα η εκμετάλλευση των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μέσω κατάλληλης αρχιτεκτονικής είναι αρκετή για την επίτευξη συνθηκών άνεσης.

Τα συνήθη κτίσματα χαρακτηρίζονται από νότιο προσανατολισμό, μεγάλη επιφάνεια υαλοπινάκων διπλής ή τριπλής υάλωσης και σπάνια χρήση σκίαστρων, με στόχο την αύξηση των ηλιακών κερδών καθ΄όλη τη διάρκεια του έτους. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην αεροστεγανότητα του κελύφους, με την απόρριψη της πλεονάζουσας θερμότητας, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, να γίνεται με φυσικό αερισμό.

Η επιλογή των δομικών στοιχείων καθώς και της θερμομόνωσης οδηγεί σε χαμηλές τιμές θερμικής διαπερατότητας, σε σύγκριση με χώρες της νότιας Ευρώπης, όπως παρουσιάζεται στον Πιν. 2.2, όπου παρατηρούνται λόγοι τιμών θερμοπερατότητας μεγαλύτεροι του έξι ανάμεσα τους. Η πλήρης απεικόνιση των διαθέσιμων δεδομένων γίνεται διαγραμματικά στην Εικ. 2.11.

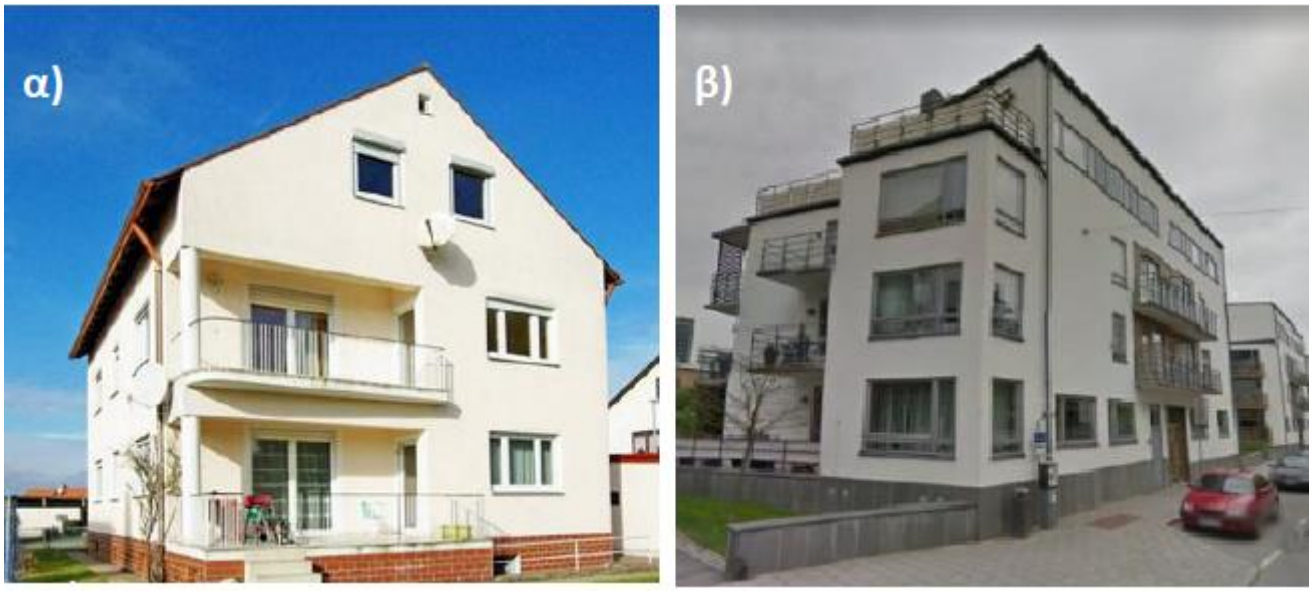
Πιν. 2.2: Συντελεστής Θερμικής Διαπερατότητας Εξωτερικής Τοιχοποιίας [78]

Χώρα	$\boldsymbol{U(W/m^2K)}$
Μάλτα	2,22
Ισπανία	1,82
Γαλλία	1,72
Ιταλία	1,52
Πορτογαλία	1,44
Σερβία	1,36
Βουλγαρία	1,28
Ολλανδία	1,27
Ουγγαρία	1,15
Γερμανία	1,11
Αυστρία	1,07
Πολωνία	0,92
Τσεχία	0,82
Δανία	0,69
Φιλανδία	0,43
Σουηδία	0,42
Εσθονία	0,36



Εικ. 2.11: Συντελεστής Θερμικής Διαπερατότητας Εξωτερικής Τοιχοποιίας [78]

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αρχιτεκτονικής βορειοευρωπαϊκών χωρών δίνονται στην Εικ. 2.12 για οικιακές κατοικίες στο Ρέγκενσμπουργκ (Γερμανία) και στη Στοκχόλμη (Σουηδία), όπου γίνεται εμφανές το μεγάλο ποσοστό κάλυψης της εξωτερικής τοιχοποιίας με υαλοπίνακες, καθώς και η έλλειψη σκιάστρων.



Εικ. 2.12: Αρχιτεκτονική βορειοευρωπαϊκών χωρών (α) Γερμανία (β) Σουηδία

2.2.2 Κτηριακό μοντέλο

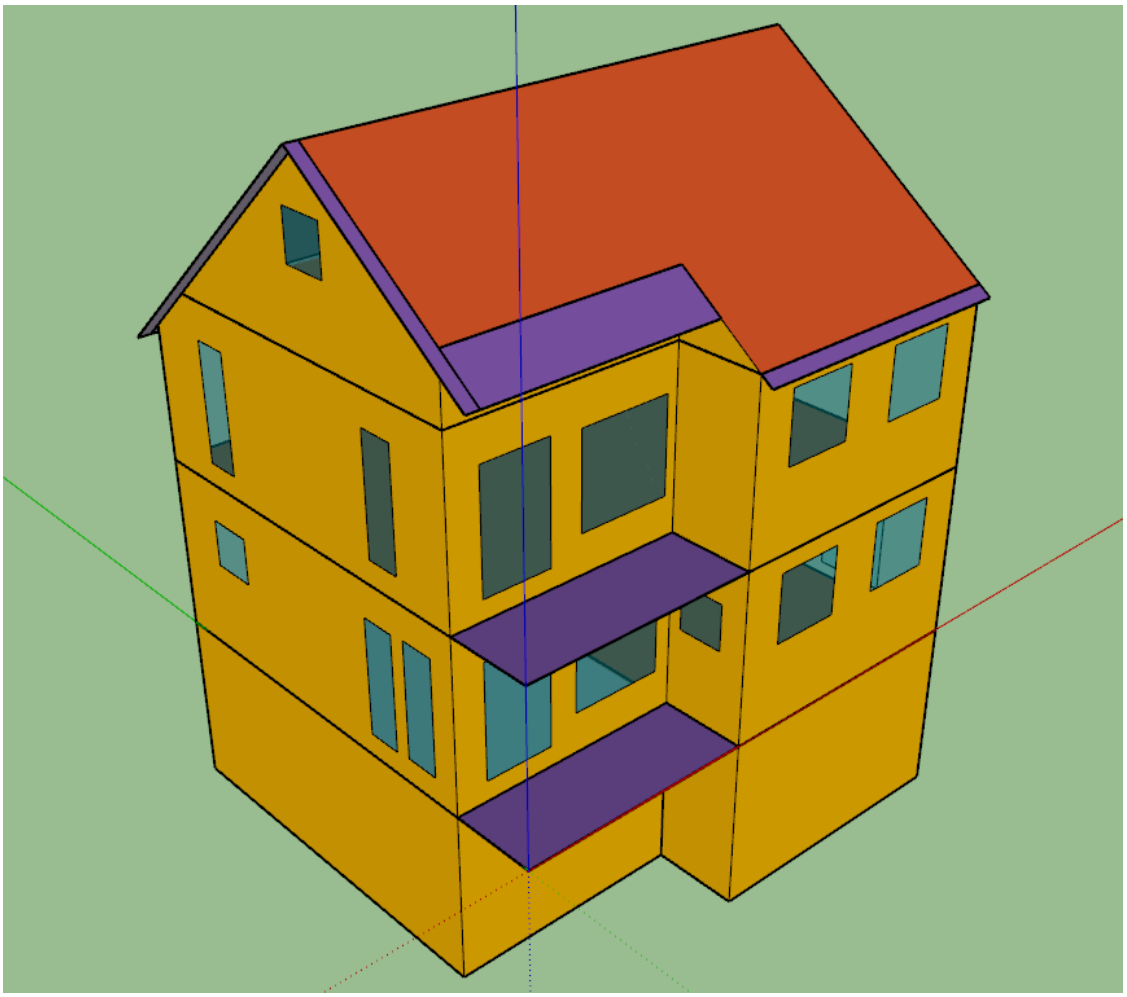
Σύμφωνα με την Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) 2010/31/EU [79], όλα τα καινούργια κτήρια πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας μέχρι το τέλος του 2020, με την εφαρμογή της οδηγίας να τίθεται σε ισχύ ήδη από το 2018 για τα νεόκτιστα δημόσια κτήρια.

Ως κτήριο με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας (nZEB), ορίζεται κάθε κτήριο υψηλής ενεργειακής απόδοσης, η οποία καθορίζεται από την ετήσια ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών του σε θέρμανση, ψύξη και ΖΝΧ ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη συνθηκών άνεσης. Παράλληλα η όποια κατανάλωση ενέργειας θα πρέπει να καλύπτεται σε σημαντικό βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σύμφωνα με τον Voss et al [80] τα κτήρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, μπορούν να περιγραφούν ως ο συνδυασμός ενεργειακής αποδοτικότητας κελύφους και κάλυψης φορτίων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για την επίτευξη ενός ισορροπημένου ενεργειακού προϋπολογισμού στην περίοδο ενός έτους.

Στο παρόν έργο το κτήριο που επιλέχθηκε, ικανοποιεί όλες τις παραπάνω προδιαγραφές ώστε να ανήκει στην παραπάνω κατηγορία, ενώ ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός του συμβαδίζει με τα πρότυπα των βορειοευρωπαϊκών χωρών.

Πρόκειται για ένα διώροφο κτήριο με σοφίτα και υπόγεια αποθήκη, ικανό για τη στέγαση τριών ατόμων, το οποίο σχεδιάστηκε στο λογισμικό SketchUp™ και απεικονίζεται στην Εικ. 2.13 [81].



Εικ. 2.13: Τρισδιάστατη απεικόνιση της κτηριακής μονάδας στο λογισμικό SketchUp™

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Δυναμική Μοντελοποίηση

Η προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος, πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό TRNSYS [82]. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται όλες οι επιμέρους συνιστώσες που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η αντίστοιχη μαθηματική τους μοντελοποίηση. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, η πλήρης παρουσίαση των δεδομένων των εκάστοτε υποσυστημάτων, δεν είναι δυνατή για λόγους εμπιστευτικότητας του έργου SWS-Heating.

3.1 Εισαγωγή στο TRNSYS

Το TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation program), είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης, χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων, ανταποκρινόμενο σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών οι οποίες περιλαμβάνουν:

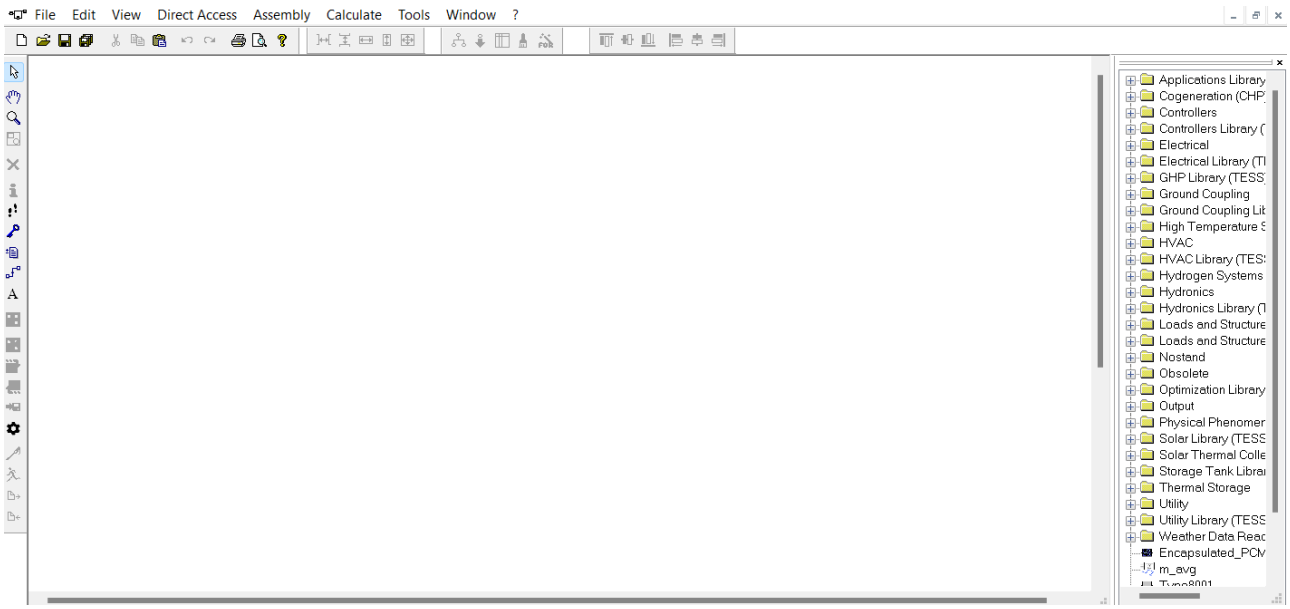
- Ηλιακά συστήματα (Φωτοβολταϊκά και Ηλιοθερμικά)
- Συστήματα θέρμανσης – ψύξης
- Συστήματα ΑΠΕ
- Συστήματα συμπαραγωγής
- Κυψέλες καυσίμου
- Κτηριακά πολυζωνικά μοντέλα καθώς και
- Πλήθος υποσυστημάτων (π.χ δοχεία αποθήκευσης), τα οποία χρήζουν δυναμικής μοντελοποίησης

Πρόκειται για ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα, με αρχιτεκτονική βασισμένη σε αρχεία βιβλιοθηκών δυναμικής σύνδεσης (Dynamic Link Library – DLL), το οποίο δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη τόσο να τροποποιεί κατάλληλα τα επιμέρους πηγαία μοντέλα ώστε να ικανοποιεί καλύτερα τις ανάγκες του, όσο και εισάγει δικά του μοντέλα χρησιμοποιώντας πλήθος γλωσσών προγραμματισμού (C, C++, Fortran κλπ.). Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα επικοινωνίας με διάφορα λογισμικά (Microsoft Excel, Matlab), για την εκτέλεση διεργασιών κατά τη δυναμική προσομοίωση [83].

Η διάρθρωσή του περιλαμβάνει μια σειρά υποπρογραμμάτων με διακριτές λειτουργίες τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

I. Περιβάλλον προσομοίωσης (Simulation Studio)

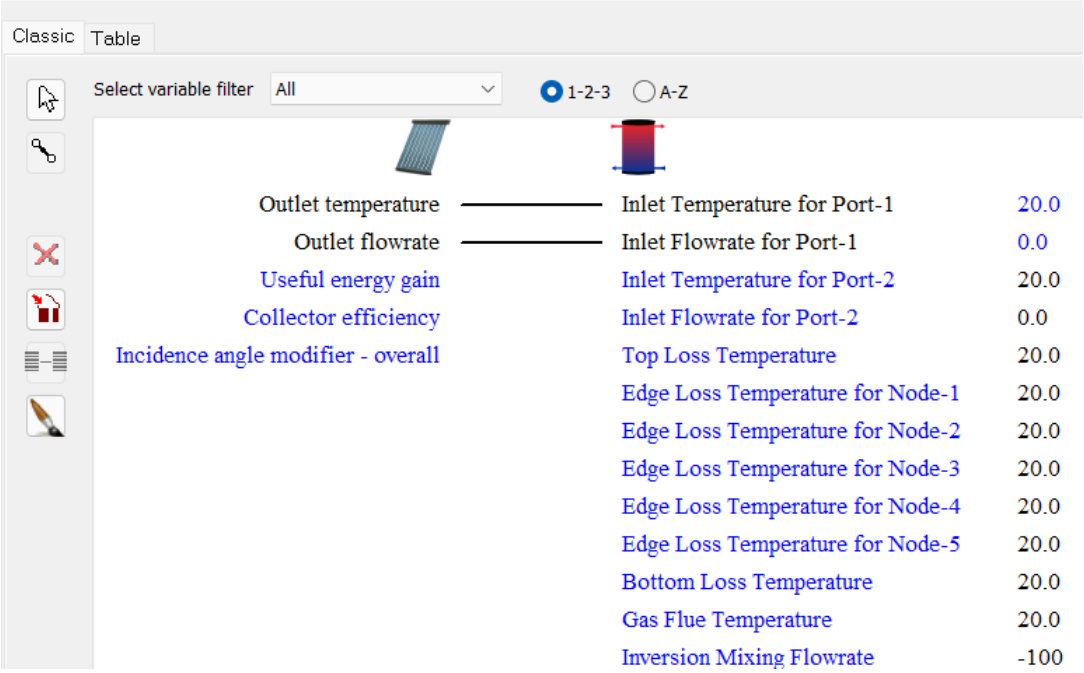
Αποτελεί το βασικό γραφικό περιβάλλον στο οποίο ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί ολοκληρωμένα συστήματα, χρησιμοποιώντας τα στοιχειώδη μοντέλα που παρέχει το TRNSYS. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της αρχικής επιφάνειας εργασίας απεικονίζεται στην Εικ. 3.1.



Εικ. 3.1: Περιβάλλον Προσομοίωσης TRNSYS

Το κάθε μοντέλο αντιμετωπίζεται αρχικά ως «μαύρο-κουτί», με τον χρήστη να επεμβαίνει τόσο στην επιμέρους διασύνδεση των εκάστοτε εισόδων (inputs) και εξόδων (outputs) στο σύνολο των χρησιμοποιούμενων συνιστωσών, όσο και στην κατάλληλη αρχικοποίηση αυτών, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.2.

Το σύνολο των πληροφοριών εισόδου ενός μοντέλου αποθηκεύεται τόσο σε κατάλληλο αρχείο συστήματος (TRNSYS project file - *.tpf), όσο και σε απλό αρχείο κειμένου (TRNSYS input file - *.txt) με κατάλληλη μορφοποίηση.



Εικ. 3.2: Διασύνδεση εισόδων – εξόδων των επιμέρους μοντέλων στο λογισμικό TRNSYS

II. Μηχανή προσομοίωσης TRNSYS (TRNSYS simulation engine)

Η μηχανή προσομοίωσης αποτελεί τον βασικό πυρήνα (kernel), ο οποίος εκτελεί τους δυναμικούς υπολογισμούς. Ο πηγαίος κώδικάς της είναι γραμμένος σε γλώσσα Fortran με την μεταγλώττιση του να γίνεται σε μία δυναμική βιβλιοθήκη TRNDll. Η μηχανή προσομοίωσης διαβάζει το αρχείο εισόδου (deck file - *.dck), καθορίζοντας το σύνολο των χρησιμοποιούμενων μοντέλων καθώς και τους τρόπους διασύνδεσης αυτών, όπως αυτοί ορίστηκαν από το χρήστη. Παράλληλα αντλεί δεδομένα από αρχεία καιρού και δημιουργεί τα αρχεία εξόδου. Η μηχανή προσομοίωσης καλείται από εκτελέσιμο αρχείο (TRN.exe), το οποίο ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη, παρέχει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των μεταβλητών εξόδου, σε πραγματικό χρόνο.

III. Περιβάλλον πολυζωνικού κτηρίου (Multi-zone Building Interface)

Το παρόν περιβάλλον χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση δυναμικής συμπεριφοράς κτηρίου, το οποίο αποτελείται από πλήθος θερμικών ζωνών. Η εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής του, τις οριακές συνθήκες εναλλαγής θερμότητας μεταξύ των διαφόρων θερμικών ζωνών, καθώς και τα θερμικά κέρδη/απώλειες από ανθρώπινη δραστηριότητα, εξοπλισμό, αερισμό κλπ, είναι εφικτή μέσω του εργαλείου TRNBuild, με την πλήρη περιγραφή του να αποθηκεύεται σε αρχείο (*.bui). Παράλληλα για την απλοποίηση εισαγωγής τρισδιάστατης γεωμετρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επέκταση Trnsys3d, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SketchUp^{TM}, με το σύνολο των πληροφοριών, να αποθηκεύεται σε αρχείο (*.idf). Η παρούσα προσθήκη επιτρέπει την άμεση και ασφαλή τροποποίηση των γεωμετρικών πληροφοριών του κτηρίου, παρέχοντας πλήρη εποπτεία των δεδομένων εισόδου.

IV. Εργαλεία TRNEdit/TRNSED

Το TRNEdit, παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα τόσο επέμβασης στα αρχεία εισόδου TRNSYS (*.dck), όσο και δημιουργία αναδιανεμητέων εφαρμογών (TRNSED applications), οι οποίες χρησιμοποιούνται ως απλοποιημένα προγράμματα προσομοίωσης από χρήστες που δεν διαθέτουν άδεια TRNSYS. Η χρήση τους αφορά εξειδικευμένους χρήστες.

3.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Σε αυτή την παράγραφο, γίνεται μια σύντομη αναφορά στο μαθηματικό υπόβαθρο των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του συστήματος, το μεγαλύτερο ποσοστό των οποίων παρέχεται από το λογισμικό TRNSYS.

3.2.1 Ηλιοθερμικοί συλλέκτες κενού

Η γενική εξίσωση που περιγράφει τη απόδοση ενός ηλιοθερμικού συλλέκτη, δίνεται από την εξίσωση των Hottel-Whillier[84].

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A\,G_T} = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A\,G_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L\left(\frac{T_i - T_a}{G_T}\right) \qquad 3.1$$

Η παραπάνω εξίσωση ωστόσο, δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της θερμοκρασιακής διαφοράς ($T_i - T_a$), στην τιμή του συντελεστή απωλειών συλλέκτη (U_L), με την ακριβέστερη μορφή της να παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L\left(\frac{T_i - T_a}{G_T}\right) - F_R U_{L/T}\left(\frac{(T_i - T_a)^2}{G_T}\right) \qquad 3.2$$

η οποία μπορεί να εκφραστεί και στην γενική μορφή:

$$\eta = \alpha_o - \alpha_1\left(\frac{\Delta T}{G_T}\right) - \alpha_2\left(\frac{\Delta T^2}{G_T}\right) \qquad 3.3$$

Η διαφορά θερμοκρασίας (ΔΤ), στην παραπάνω εξίσωση, αναφέρεται γενικώς, στην διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου του ρευστού και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ωστόσο, ανάλογα με τον εκάστοτε κατασκευαστή μπορεί να παρέχεται σε μια από τις παρακάτω μορφές:

$$\Delta T = \begin{cases} \Delta T_i = T_i - T_a \\ \Delta T_{av} = T_{av} - T_a \\ \Delta T_o = T_o - T_\alpha \end{cases} \qquad 3.4$$

Όπου, $\Delta T_{av} = (T_i + T_o)/2$, αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στον συλλέκτη. Ο πρώτος τρόπος επιλέγεται κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, με τον 2ο να εντοπίζεται κυρίως σε Ευρωπαϊκά έγγραφα.

Η μέτρηση της απόδοσης του συλλέκτη γίνεται με την ακτινοβολία να προσπίπτει στην κατακόρυφο του συλλέκτη, με αποτέλεσμα το γινόμενο εκπεμπτικότητας – απορροφητικότητας ($\tau\alpha$), να ταυτίζεται με το αντίστοιχο της κατακορύφου $(\tau\alpha)_n$. Για την κατάλληλη διόρθωση του παραπάνω συντελεστή, κατά τον υπολογισμό της απόδοσης του συλλέκτη, χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$K_\theta = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = \frac{G_{bT}\frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} + G_d\frac{(1+cos\beta)}{2}\frac{(\tau\alpha)_d}{(\tau\alpha)_n} + \rho_g G_T\left(\frac{1-cos\beta}{2}\right)\frac{(\tau\alpha)_g}{(\tau\alpha)_n}}{G_T} \qquad 3.5$$

και

$$K_\theta = \frac{G_{bT} K_{\theta b} + G_{dT} \frac{(1+cos\beta)}{2} K_{\theta d} + \rho_g G_T \left(\frac{1-cos\beta}{2}\right) K_{\theta g}}{G_T} \quad 3.6$$

Παράλληλα ιδιαίτερα στην περίπτωση των συλλεκτών κενού, ο αντίστοιχος λόγος για την άμεση ακτινοβολία, εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης θ, τόσο σε διαμήκη (longitudinal) όσο και εγκάρσια (transversal) κατεύθυνση. Για τον σκοπό αυτό παρέχεται από την εκάστοτε κατασκευάστρια εταιρεία, διορθωτικός συντελεστής, ο οποίος ορίζεται παρακάτω:

$$K_{\theta b}\ (\theta) = \frac{(\tau\alpha)_b(\theta)}{(\tau\alpha)_n} \quad 3.7$$

Και

$$K_{\theta b}\ (\theta) = K_{\theta b,trans}\ (\theta_{trans}) \cdot K_{\theta b,long}\ (\theta_{long}) \quad 3.8$$

Με την εισαγωγή του παραπάνω συντελεστή η απόδοση του συλλέκτη πλέον δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = F_R K_\theta (\tau\alpha)_n - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_T}\right) - F_R U_{L/T} \left(\frac{(T_i - T_a)^2}{G_T}\right) \quad 3.9$$

Για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου για την προσομοίωση των ηλιοθερμικών συλλεκτών στο παρόν σύστημα συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα από τρία διαθέσιμα μοντέλα συλλεκτών κενού που παρέχει το TRNSYS, συγκεκριμένα των “Type 71”, “Type 538” και “Type1288_EvacTube”. Ο πρώτος τύπος κάνει χρήση του μαθηματικού μοντέλου που περιεγράφηκε παραπάνω, σε αντίθεση με τα άλλα δύο που λαμβάνουν υπόψη και τη θερμοχωρητικότητα της μάζας του εργαζόμενου μέσου στον όγκο του συλλέκτη, στον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου. Ιδιαίτερα ο τύπος “Type1288_EvacTube”, μοντελοποιείται με βάση το πρότυπο EN12975-2 [85], στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση της απόδοσης του συλλέκτη, από την ταχύτητα του αέρα, την ακτινοβολία μεγάλου κύματος καθώς και τη μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών του, τόσο για άμεση όσο και για διάχυτη ακτινοβολία, ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης θ, επιτρέποντας μια ακριβέστερη μοντελοποίηση της λειτουργίας του, για πλήθος καιρικών συνθηκών [85, 86].

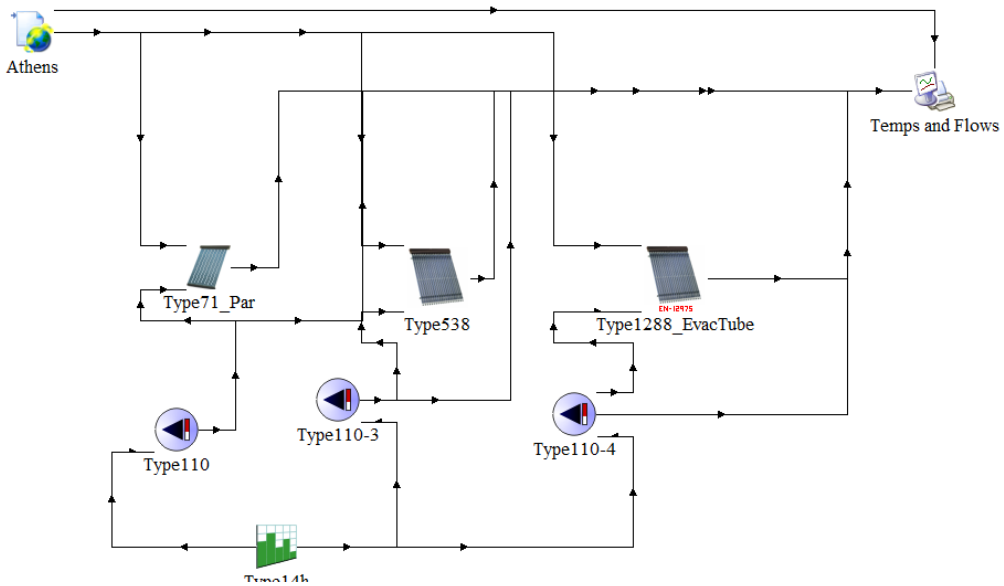
Σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο, το οποίο κάνει χρήση μιας ημι-δυναμικής μεθόδου (Quasi Dynamic Test method – QDT) για τον προσδιορισμό της απόδοσης του συλλέκτη, η προκύπτουσα χαρακτηριστική εξίσωση έχει την μορφή:

$$\frac{\dot{Q}_u}{A} = F_R(\tau\alpha)_n K_{\theta b} G_{bT} + F_R(\tau\alpha)_n K_{\theta d} G_{dT} - c_6 u G^* - c_1(T_{av} - T_a) - c_2(T_{av} - T_a)^2 - c_3 u(T_{av} - T_a) + c_4(E_L - \sigma T_\alpha^4) - c_5 \frac{dT_{av}}{dt} \quad 3.10$$

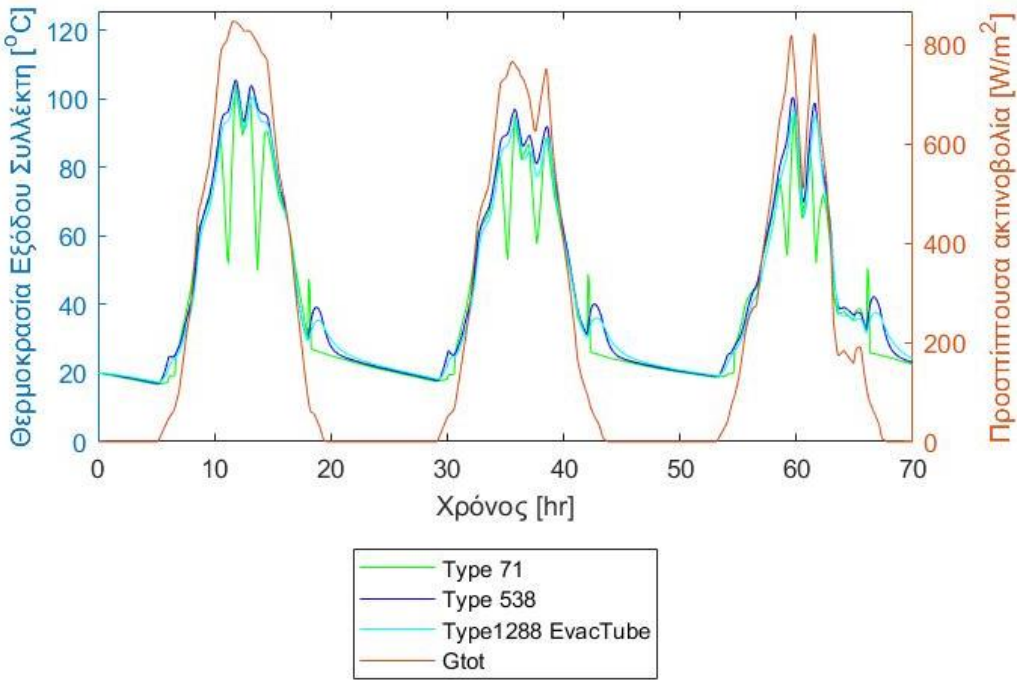
- $c_1 - c_3$: Συντελεστές απωλειών θερμότητας λόγω συναγωγής
- c_4: Συντελεστής απωλειών θερμότητας λόγω ακτινοβολίας συσχετιζόμενος με την θερμοκρασία ουρανού
- c_5: Συντελεστής συσχετιζόμενος με την θερμική αδράνεια του συλλέκτη

- c_6: Συντελεστής εξάρτησης απωλειών θερμότητας από την ταχύτητα του αέρα – (zero loss efficiency)

Στην Εικ. 3.3 απεικονίζεται το περιβάλλον που δημιουργήθηκε για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των παραπάνω μοντέλων, ενώ στην Εικ. 3.4 παρουσιάζεται η θερμοκρασία εξόδου νερού από κάθε συλλέκτη, με χρήση ίδιων οπτικών χαρακτηριστικών για το σύνολο των κοινών μεταξύ τους παραμέτρων. Για τις πρόσθετες παραμέτρους του μοντέλου "Type1288_EvacTube" χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές, όπως αυτές παρέχονται από το λογισμικό TRNSYS.



Εικ. 3.3: Διάταξη σε περιβάλλον TRNSYS για συγκριτικό έλεγχο λειτουργίας των μοντέλων Type71, Type538 και Type1288_EvacTube



Εικ. 3.4: Συγκριτικά αποτελέσματα λειτουργίας των μοντέλων TRNSYS, Type71, Type538 και Type1288_EvacTube

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω αποτελέσματα, η έλλειψη μοντελοποίησης της θερμικής αδράνειας του συλλέκτη, στο μοντέλο “Type 71”, οδηγεί σε μη ευσταθείς μεταβολές της θερμοκρασίας εξόδου, για απότομες μεταβολές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Παράλληλα, δεδομένου πως στόχος της μελέτης είναι ο προσδιορισμός του θερμικού φορτίου για πλήθος περιοχών με παρόμοιες καιρικές συνθήκες, η χρήση του μοντέλου “Type1288_EvacTube”, οδηγεί σε αποτελέσματα με περιορισμένο εύρος εφαρμογής. Ως αποτέλεσμα, για την παρούσα μελέτη, επιλέγεται το μοντέλο “Type 538”, για την επαρκή μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς των συλλεκτών κενού, του συστήματος.

3.2.2 Δεξαμενή Αποθήκευσης Θερμότητας Κενού

Η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας κενού, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα της εγκατάστασης, καθώς είναι υπεύθυνη για την συναλλαγή θερμότητας με όλα τα επιμέρους υποσυστήματα. Επομένως η άρτια μοντελοποίηση της είναι σημαντική για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “Type 534”, με προέκταση (“plug-in”), το οποίο προσομοιώνει τη συμπεριφορά κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής, στην οποία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει, τις ιδιότητες του μέσου αποθήκευσης, τους συντελεστές απωλειών θερμότητας καθώς και το πλήθος και τη γεωμετρία εναλλακτών θερμότητας στο εσωτερικό της δεξαμενής.

Η μοντελοποίηση της δεξαμενής βασίζεται σε μονοδιάστατη διακριτοποίηση σε N πλήθος κόμβων, με τον πρώτο κόμβο και ν-ιοστό κόμβο να αντιστοιχούν στην κορυφή και στον πυθμένα της αντίστοιχα.

Οι κόμβοι ανάλογα με την επιλογή του χρήστη μπορεί να συναλλάσουν θερμότητα μεταξύ τους με αγωγή σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{cond,j} = \frac{k_j A_j \left(T_j - T_{j+1}\right)}{L_{cond,j}} + \frac{k_{j-1} A_{j-1} \left(T_j - T_{j-1}\right)}{L_{cond,j-1}} \qquad 3.11$$

ενώ, σε περιπτώσεις θερμικής ανισορροπίας (ένας κόμβος έχει υψηλότερη θερμοκρασία από υψηλότερό του κόμβο), δίνεται η δυνατότητα ορισμού παροχής ανάμιξης, μεταξύ τους ώστε να προσομοιαστούν τα φαινόμενα, φυσικής συναγωγής.

$$Q_{mix,j} = \dot{m}_j Cp_j \left(T_j - T_{j+1}\right) + \dot{m}_{j-1} Cp_j \left(T_j - T_{j-1}\right) \qquad 3.12$$

Η είσοδος και η έξοδος των ρευμάτων από και προς το δοχείο, γίνεται συνήθως σε κόμβους που έχει ορίσει ο χρήστης (σταθερά σημεία εισόδου και εξόδου των ρευμάτων). Στο παρόν σύστημα ωστόσο, για την κατάλληλη μοντελοποίηση της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης η οποία επιτυγχάνεται λόγω της διαμόρφωσης του υπάρχοντος δοχείου, γίνεται χρήση επιλογής του προγράμματος, στην οποία τα ρεύματα εισόδου, εισάγονται στον πλησιέστερο θερμοκρασιακά σε αυτά κόμβο. Παράλληλα, το μοντέλο λαμβάνει τη θεώρηση πως υπάρχει πλήρης ανάμιξη μεταξύ του ρεύματος εισόδου και του αντίστοιχου κόμβου.

Ως αποτέλεσμα η μεταφορά θερμότητας λόγω της ροής του ρευστού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{flow_{i,j}} = \dot{m}_{i,j} Cp_j T_i + \dot{m}_{i,j-1} Cp_{j-1} T_{j-1} + \dot{m}_{i,j+1} Cp_{j+1} T_{j+1} - \dot{m}_{push} Cp_j T_i \qquad 3.13$$

Οι απώλειες θερμότητας από την κορυφή, τον πυθμένα και το πλευρικό τοίχωμα της δεξαμενής δίνονται σε αντιστοιχία από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Q_{loss,top,j} = \left(A_{top,j} U_{top}\right) \cdot \left(T_j - T_{a,top}\right) \qquad 3.14$$

$$Q_{loss,bottom,j} = \left(A_{bottom,j} U_{bottom}\right) \cdot \left(T_j - T_{a,bottom}\right) \qquad 3.15$$

$$Q_{loss,edge,j} = \left(A_{edges,j} U_{edges}\right) \cdot \left(T_j - T_{a,edges}\right) \qquad 3.16$$

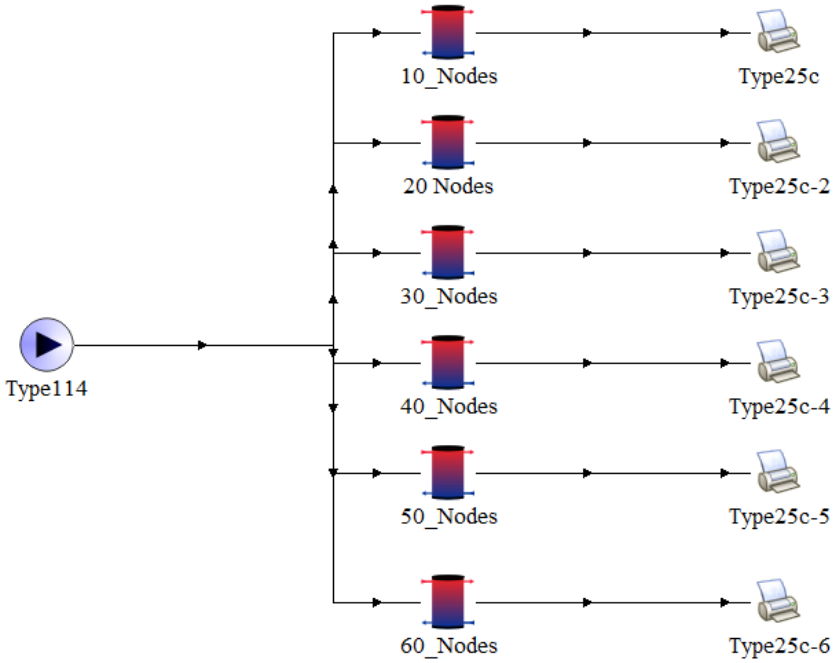
Με το σύνολο των παραπάνω εξισώσεων, η θερμοκρασιακή μεταβολή κάθε κόμβου ως συνάρτηση του χρόνου, περιγράφεται από την παρακάτω διαφορική:

$$\frac{dT_j}{dt} = -\frac{Q_{loss,top,j} + Q_{loss,bottom,j} + Q_{loss,edge,j} + Q_{flow,i,j} + Q_{mix,j}}{\dot{m}Cp_j} \qquad 3.17$$

Η επιλογή του αριθμού των κόμβων επηρεάζει την δυναμική του δοχείου, ενώ είναι απευθείας ανάλογή της πολυπλοκότητας του συστήματος, επηρεάζοντας σημαντικά τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

Γενικά η αύξηση του αριθμού των κόμβων είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμικής αδράνειας καθενός εξ' αυτών, όπως αναφέρεται και στη μελέτη των Nash, Badithela [87]. Βιβλιογραφικά εντοπίζεται πως ένας χαμηλός αριθμός κόμβων, μειώνει την ακρίβεια του μοντέλου, λόγω μη αποτελεσματικής προσομοίωσης των φαινομένων άνωσης, ενώ παράλληλα η αύξηση των κόμβων σε περισσότερους από 45, οδηγεί σε ελάχιστη βελτίωση της δυναμικότητας του. Τέλος, ένας αυξημένος αριθμός κόμβων (60) οδηγεί σε καλύτερα επίπεδα θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης από αυτά που παρατηρούνται στην πραγματικότητα [87, 88].

Για την επιλογή του κατάλληλου αριθμού κόμβων δημιουργήθηκε το μοντέλο που παρουσιάζεται στην Εικ. 3.5.

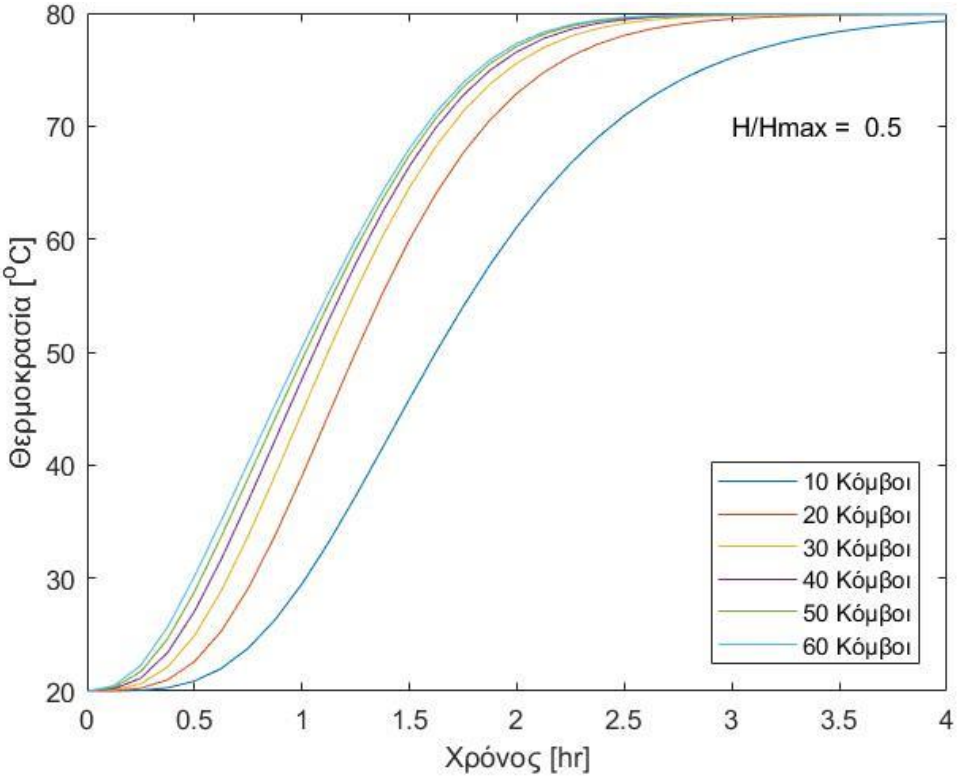


Εικ. 3.5: Διάταξη σε περιβάλλον TRNSYS για έλεγχο της επίδρασης του πλήθους κόμβων στη δυναμική της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού

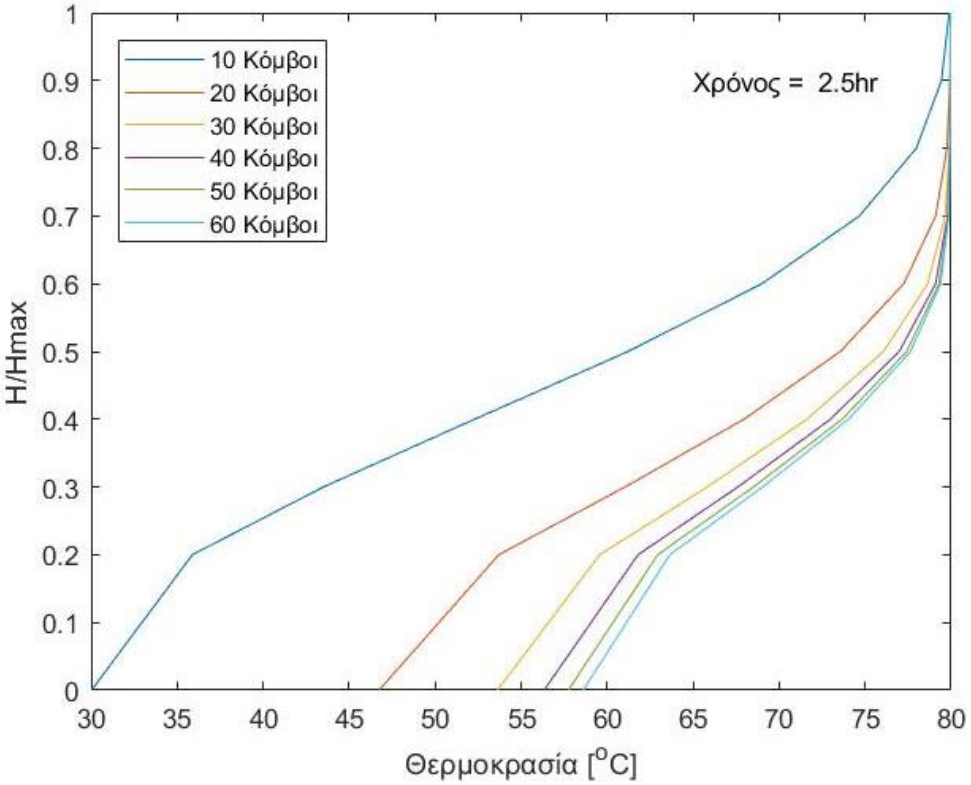
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για πλήθος διαφορετικών κόμβων στο υπό μελέτη δοχείο. Στον Πιν. 3.1, παρουσιάζονται οι συνθήκες προσομοίωσης.

Πιν. 3.1: Συνθήκες προσομοίωσης για έλεγχο της επίδρασης του πλήθους κόμβων στη δυναμική της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Παροχή	300	kg/h
Θερμοκρασία εισόδου	80	^oC
Αρχική θερμοκρασία δοχείου	20	^oC
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	20	^oC
Αριθμός ρευμάτων εισόδου	1	(-)
Σχετικό ύψος εισόδου (H_{in}/H_{max})	1	(-)
Σχετικό ύψος εξόδου (H_{out}/H_{max})	0	(-)



Εικ. 3.6: Απεικόνιση καμπυλών χρόνου-θερμοκρασίας στο μέσο της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού για διαφορετικό πλήθος κόμβων



Εικ. 3.7: Επίδραση του πλήθους κόμβων στη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω διαγράμματα, αύξηση του αριθμού των κόμβων σε πλήθος μεγαλύτερο του 50, οδηγεί σε αμελητέες διαφορές στα υπολογιζόμενα θερμοκρασιακά προφίλ, ενώ χαμηλό πλήθος κόμβων (10-30), προσομοιώνει αρκετά αργή κινητική. Αν και η ακριβής κινητική του δοχείου δεν είναι γνωστή, το πολυσωλήνιο σύστημα που βρίσκεται στο εσωτερικό του, επιτρέπει γρήγορη και αποτελεσματική θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση. Για το λόγο αυτό το πλήθος κόμβων επιλέγεται ίσο με 50.

3.2.3 Λέβητας Φυσικού Αερίου

Ο λέβητας φυσικού αερίου, μοντελοποιείται με χρήση του μοντέλου "Type 122", το οποίο υπολογίζει την απαραίτητη προσδισδόμενη στο ρευστό ισχύ ώστε να επιτύχει, την καθοριζόμενη από το χρήστη θερμοκρασία εξόδου. Ο χρήστης ορίζει επίσης τον συνολικό βαθμό απόδοσης, τη μέγιστη δυνατή προσδισδόμενη θερμική ισχύ καθώς και το κατώτατο λειτουργικό όριο ισχύος, ώστε να προσεγγιστεί μια όσο το δυνατόν, πλησιέστερη στη πραγματική λειτουργία, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται το υπολογιστικό κόστος. Παράλληλα η μέγιστη ισχύς του λέβητα μπορεί να περιοριστεί με κατάλληλο σήμα από τον χρήστη, επιτρέποντας μία σύνθετη λογική ελέγχου.

Η αναγκαία θερμική ισχύς για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας εξόδου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{Q}_{need} = \dot{m}Cp(T_{set} - T_i) \qquad 3.18$$

Παράλληλα υπολογίζεται ο λόγος φορτίου λειτουργίας (Part Load Ratio – PLR) ως:

$$PLR = \dot{Q}_{need}/\dot{Q}_{max} \qquad 3.19$$

Καθώς και η μέγιστη διαθέσιμη θερμική ισχύς ως:

$$\dot{Q}_{av} = CS \cdot \dot{Q}_{max} \qquad 3.20$$

όπου *CS*, είναι το σήμα ελέγχου (Control Signal).
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τελικά προσφερόμενη στο ρευστό θερμική ενέργεια υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_w &= \dot{Q}_{need}, \quad \gamma\iota\alpha\ \dot{Q}_{need} \leq CS \cdot \dot{Q}_{max} \\ \dot{Q}_w &= \dot{Q}_{av}, \quad \gamma\iota\alpha\ \dot{Q}_{need} > CS \cdot \dot{Q}_{max} \end{aligned} \qquad 3.21$$

3.2.4 Δοχείο Αδρανείας (PCM)

Το δοχείο αδρανείας, προγραμματίστηκε σε γλώσσα C++, και μεταγλωττίστηκε σε δυναμική βιβλιοθήκη (*.dll) για την εισαγωγή του στο TRNSYS. Η μαθηματική του μοντελοποίηση βασίστηκε σε μονοκομβική προσέγγιση συσσωρευμένων παραμέτρων, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω παραδοχές:

- Σταθερή θερμοκρασία αλλαγής φάσης
- Σταθερός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (U)
- Μηδενικές απώλειες θερμότητας προς περιβάλλον
- Αμελητέα αποθήκευση θερμότητας στα άλλα στοιχεία της μονάδας (πχ. τοιχώματα δεξαμενής)

Η θερμοκρασία εξόδου του νερού, από το δοχείο αδρανείας, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$T_{o,w} = T_{PCM} - \left(T_{PCM} - T_{i,w}\right) \cdot e^{-(U \cdot A)/\dot{m}_w Cp_{PCM}} \qquad 3.22$$

όπου T_{PCM}, η μέση θερμοκρασία του υλικού αλλαγή φάσης.
Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας καθώς και η συνολική επιφάνεια συναλλαγής, αποτελούν παραμέτρους του μοντέλου που μπορούν να οριστούν κατάλληλα από το χρήστη, ώστε η πειραματικά προσδιοριζόμενη συμπεριφορά της διάταξης, να αποτυπώνεται επαρκώς.
Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή του συστήματος, το δοχείο αδρανείας, φορτίζεται από τους ηλιακούς συλλέκτες και αποφορτίζεται από τον ατμοποιητή της διάταξης εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, όταν είναι αναγκαία η λειτουργία της σε χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες.
Η λειτουργία του μπορεί να είναι διακριτή (μόνο φόρτιση ή αποφόρτιση) ή κοινή (ταυτόχρονη φόρτιση και αποφόρτιση). Στην τελευταία περίπτωση, η θερμοκρασία εξόδου του νερού λαμβάνεται ίδια τόσο για τους ηλιακούς συλλέκτες όσο και για τη διάταξη εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, ενώ ως θερμοκρασία εισόδου, λαμβάνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των θερμοκρασιών των δύο ρευμάτων, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$T_{i,w} = \frac{T_{o,w,STES} \cdot \dot{m}_{o,w,STES} + T_{o,w,sc} \cdot \dot{m}_{o,w,sc}}{\dot{m}_{o,w,STES} + \dot{m}_{o,w,sc}} \qquad 3.23$$

Με γνωστή την θερμοκρασία εξόδου, η ισχύς η οποία συναλλάσσεται στο δοχείο αδρανείας, υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot C_{pw} \cdot (T_{o,w} - T_{i,w}) \qquad 3.24$$

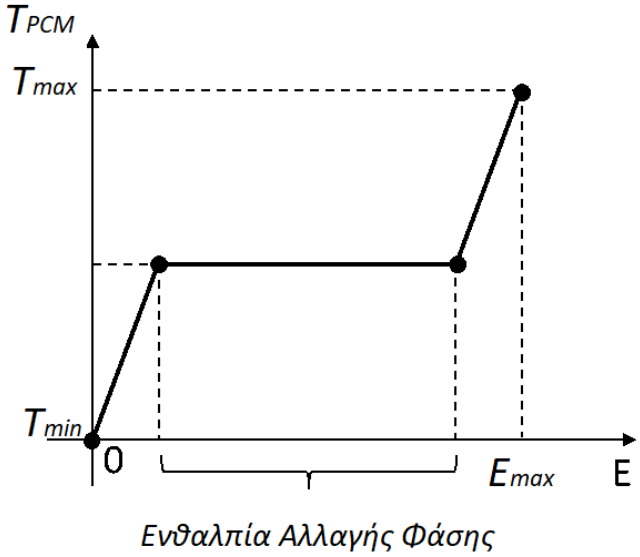
με το αντίστοιχο ποσό ενέργειας που είναι αποθηκευμένο σε αυτό να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_{t+\Delta t} = E_t + \dot{Q} \cdot \Delta t \qquad 3.25$$

Ανάλογα με το επίπεδα αποθηκευμένης ενέργειας υπολογίζεται η κατάσταση φόρτισης:

$$SoC_{t+\Delta t} = \frac{E_{t+\Delta t}}{E_{max}} \qquad 3.26$$

Τέλος η μέση θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης αποτελεί συνάρτηση της ενεργειακής στάθμης του δοχείου αδρανείας, όπως γραφικά απεικονίζεται στην παρακάτω Εικ. 3.8.



Εικ. 3.8: Γραφική απεικόνιση της καμπύλης ενθαλπίας – θερμοκρασίας για το υλικό αλλαγής φάσης

3.2.5 Υδραυλικά Στοιχεία

Ο καθορισμός των παροχών και θερμοκρασιών των ρευμάτων κάθε κυκλώματος, επιτυγχάνεται στην πλειονότητά του, με τη χρήση αντλιών μεταβλητών στροφών (παροχής) καθώς και τρίοδων βαλβίδων διαχωρισμού και ανάμιξης. Τα παραπάνω εξαρτήματα, προσομοιώνονται με τα μοντέλα “Type 110”, “Type 11f” και “Type 11h” αντίστοιχα.

Οι τρίοδες βαλβίδες ανάμιξης αποτελούν το απλούστερο εξάρτημα εκ των τριών, καθώς δεν λαμβάνουν σήμα ελέγχου για τη λειτουργία τους, ενώ η τελική παροχή και θερμοκρασία εξόδου να υπολογίζεται ως:

$$\dot{m}_{tot} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \qquad 3.27$$

και

$$T_{tot} = \frac{\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2}{\dot{m}_{tot}} \qquad 3.28$$

Αντίθετα οι τρίοδες βαλβίδες διαχωρισμού, χρειάζονται κατάλληλο σήμα ελέγχου ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός διαμοιρασμός της συνολικής παροχής μάζας, όπως περιγράφεται παρακάτω:

$$T_1 = T_2 = T_{tot} \quad 3.29$$

και

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{tot} \cdot (1 - CS), \quad \gamma\iota\alpha\ 0 \leq CS \leq 1 \quad 3.30$$
$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{tot} \cdot CS, \quad \gamma\iota\alpha\ 0 \leq CS \leq 1$$

Τέλος η παροχή μάζας από τις αντλίες μεταβλητών στροφών, υπολογίζεται γραμμικά, βάση κατάλληλου σήματος ελέγχου, μεταξύ της μηδενικής και μιας μέγιστης (ονομαστικής παροχής λειτουργίας), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\dot{m}_{out} = CS \cdot \dot{m}_{max} \quad 3.31$$

Παράλληλα, με την εισαγωγή του συνολικού (η_{tot}) και του μηχανικού βαθμού απόδοσης της αντλίας (η_m), καθώς και της καμπύλης ισχύος της, δίνεται η δυνατότητα για ακριβή υπολογισμό τόσο της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού, όσο και της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Η καμπύλη ισχύος της αντλίας εισάγεται ως πολυωνυμική συνάρτηση της ονομαστικής της ισχύος, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = P_{max} \cdot (a_1 + a_2 \cdot CS + a_3 \cdot CS^2 + \cdots + a_n CS^{n-1}), n \leq 25 \quad 3.32$$

Με γνωστό το μηχανικό βαθμό απόδοσης της αντλίας μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια που παρέχεται στην πτερωτή της αντλίας ως:

$$\mathrm{P}_{shaft} = P \cdot \eta_m \quad 3.33$$

Ανάλογα με την εκάστοτε διάταξη, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν η παραπάνω απώλεια ενέργειας μεταφέρθηκε στο περιβάλλον ή στο ρευστό, με την εισαγωγή του συντελεστή *f*, ο οποίος λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1.

Η ενέργεια που τελικά παρέχεται στο ρευστό από την διατομή εισόδου της αντλίας μέχρι την διατομή εξόδου, ισούται με τη ενέργεια που προσδίδει η πτερωτή μειωμένη κατά τις υδραυλικές απώλειες, ως αποτέλεσμα της ροής διαμέσου της μηχανής. Παράλληλα, καθώς στο μοντέλο αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη απώλειες ρευστού μεταξύ εισόδου και εξόδου (ογκομετρικός βαθμός ίσος με τη μονάδα), οι βαθμοί απόδοσης των παραπάνω μεγεθών συνδέονται σύμφωνα με τη σχέση [89]:

$$\eta_{tot} = \eta_m \cdot \eta_h \quad 3.34$$

Με βάση τα παραπάνω η ενέργεια που μεταφέρεται στο ρευστό με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του, δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q} = P \cdot (\eta_m \cdot (1 - \eta_h) + (1 - \eta_m) \cdot f) \quad 3.35$$

Με την θερμοκρασιακή αύξηση να υπολογίζεται ως:

$$T_o = T_i + \dot{Q}/\dot{m}_w \quad 3.36$$

Τέλος οι απώλειες ενέργειας προς το περιβάλλον υπολογίζονται ως:

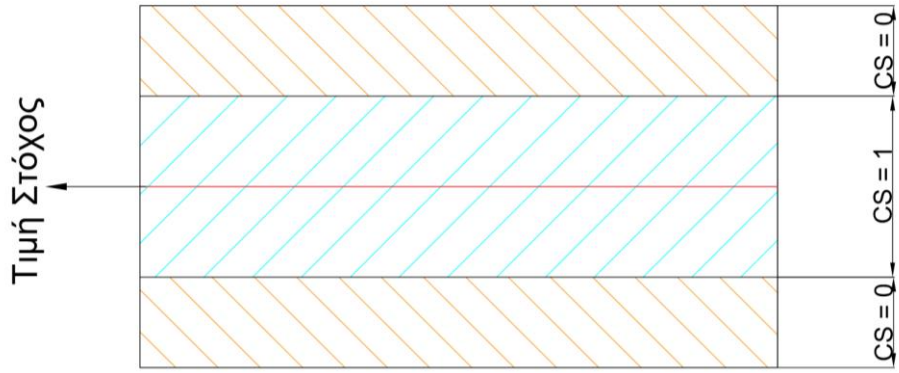
$$\dot{Q}_a = P \cdot (1 - \eta_m) \cdot (1 - f) \quad 3.37$$

3.2.6 Στοιχεία Ελέγχου

Για την υλοποίηση του ελέγχου της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε ένα πλήθος από ελεγκτές οι οποίοι επιτελούν μία από τις παρακάτω λειτουργίες:

- Δίνουν σήμα ON/OFF, ανάλογα με το αν μια μεταβλητή βρίσκεται μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος γύρω από μια τιμή στόχο (“Type 165” και “Type 2” – Διαφορικοί ελεγκτές).
- Δίνουν σήμα ON/OFF, ανάλογα με το αν μια μεταβλητή βρίσκεται μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος γύρω από μια τιμή στόχο, με την επιλογή για διατήρηση της τελευταίας τιμής του σήματος (ON ή OFF) για ελάχιστο χρονικό διάστημα, καθοριζόμενο από το χρήστη, ανεξάρτητα από την τιμή της μεταβλητής. (“Type 911” – Διαφορικοί ελεγκτές με αποκλεισμό (lock-out))
- Δίνουν σήμα στο εύρος [0,1], ανάλογα με την απόκλιση της ελεγχόμενης μεταβλητής από μια επιθυμητή τιμή στόχο (“Type 22” - Ελεγκτές με ανάδραση)

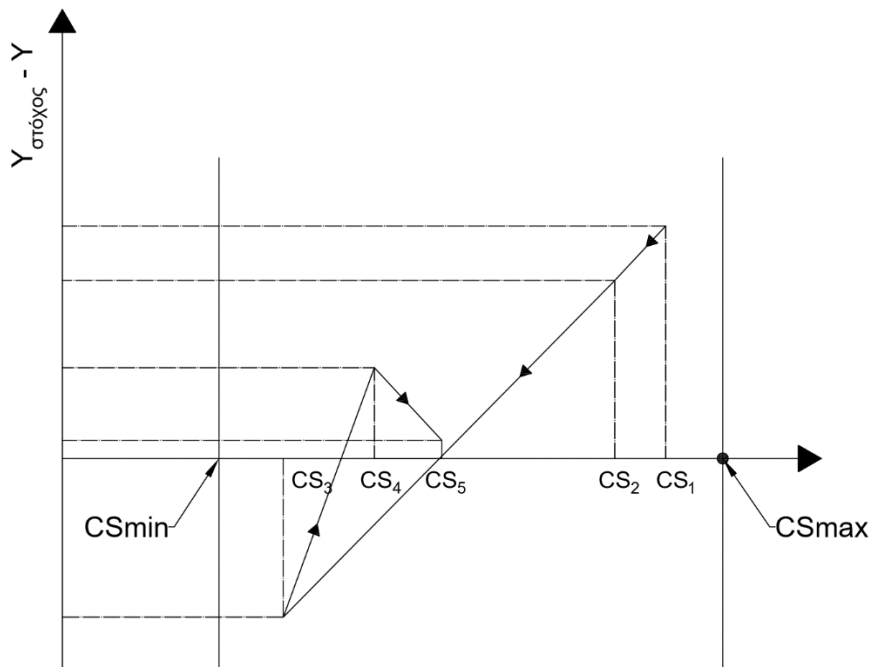
Η πρώτη κατηγορία ελεγκτών επιτυγχάνει τον απλούστερο έλεγχο, με την έξοδό της να χρησιμοποιείται συνήθως ως σήμα σε τρίοδες βαλβίδες ή ως απαραίτητη συνθήκη για την εκκίνηση ή σβέση των αντλιών μεταβλητών στροφών. Η λογική της, η οποία απεικονίζεται γραφικά στην Εικ. 3.9, μπορεί ωστόσο να οδηγήσει σε ασταθές σύστημα στην περίπτωση απότομων μεταβολών στην παρακολουθούμενη μεταβλητή, οι οποίες εμφανίζονται στα αρχικά στάδια φόρτισης ή αποφόρτισης των διαφόρων υποσυστημάτων (π.χ. μεγάλες θερμοκρασιακές πτώσεις).



Εικ. 3.9: Λογική λειτουργίας ελεγκτών ON/OFF

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, γίνεται χρήση της δεύτερης κατηγορίας ελεγκτών, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα στο σύστημα να ισορροπήσει αγνοώντας τα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα. Η επιλογή της χρονικής διάρκειας διατήρησης του σήματος ελέγχου, βασίζεται στην δυναμική του εκάστοτε υποσυστήματος και προσδιορίζεται επαναληπτικά.

Τέλος, η τρίτη κατηγορία ελεγκτών, χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της παροχής προς τα εκάστοτε υποσυστήματα, με σκοπό την επίτευξη κατάλληλης θερμοκρασιακής πτώσης/ανύψωσης (ΔΤ). Η λογική ελέγχου βασίζεται στον μηδενισμό του σφάλματος μεταξύ μετρούμενης και επιθυμητής τιμής (tracking error), χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η δυναμική της διεργασίας. Η εκκίνηση γίνεται με τυχαία επιλογή ενός σήματος ελέγχου ανάμεσα στην μέγιστη και ελάχιστη τιμή, που ορίζει ο χρήστης, και επαναληπτική μεταβολή αυτού, μέχρι την επίτευξη της παραπάνω συνθήκης. Η παραπάνω λογική απεικονίζεται γραφικά στην Εικ. 3.10.



Εικ. 3.10: Λογική λειτουργίας ελεγκτών με ανάδραση

3.2.7 Ζεστό Νερό Χρήσης

Για την παραγωγή ΖΝΧ, χρησιμοποιείται εναλλάκτης αντιρροής ο οποίος προσομοιώνεται με το μοντέλο "Type 5", τροφοδοτούμενος από την μια πλευρά με νερό από την κορυφή της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας κενού και από την άλλη από νερό δικτύου.

Πέραν των θερμοκρασιών και παροχών εισόδου, ως παράμετρος εισάγεται και το γινόμενο συνολικής θερμοπερατότητας και επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη (UA), με τις τελικές θερμοκρασίες εξόδου, να υπολογίζονται από μονοδιάστατο ισοζύγιο ενέργειας, σύμφωνα με τη μέθοδο NTU (Number of Transfer Units).

Συμβολίζοντας με *(h)* την πλευρά του θερμού ρεύματος και με *(c)* την πλευρά του ψυχρού ρεύματος η συνολική ενέργεια που συναλλάσσεται μεταξύ των δύο ρευμάτων ισούται με:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c Cp_c (T_{co} - T_{ci}) = \dot{m}_h Cp_h (T_{hi} - T_{ho}) = \varepsilon C \Delta T \qquad 3.38$$

Στην παραπάνω εξίσωση ε είναι η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη και ΔΤ η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά ίση με $\Delta T = T_{hi} - T_{ci}$.

Ορίζοντας τα γινόμενα:

- $C_c = \dot{m}_c Cp_c$
- $C_h = \dot{m}_h Cp_h$

καθώς και τα μεγέθη:

- $C_{min} = \min(C_c, C_h) = C$
- $C_{max} = \max(C_c, C_h)$

η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη αντιρροής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \cdot \frac{UA}{C_{min}}\right]}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} \cdot \exp\left[-\left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \cdot \frac{UA}{C_{min}}\right]} \qquad 3.39$$

Με γνωστή την αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη η θερμοκρασίες εξόδου των δύο ρευμάτων δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{ho} = T_{hi} - \frac{C_{min}}{C_h} \cdot \varepsilon \cdot (T_{hi} - T_{ci}) \qquad 3.40$$

και

$$T_{co} = T_{ci} + \frac{C_{min}}{C_c} \cdot \varepsilon \cdot (T_{hi} - T_{ci}) \qquad 3.41$$

Δεδομένου πως η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου του ZNX είναι ίση με 39 ^{o}C και για γνωστό προφίλ κατανάλωσης, ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του εναλλάκτη (γινόμενο UA), γίνεται μέσω της μεθόδου LMTD (Log Mean Temperature Difference Method).

Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο το ολικό ρεύμα θερμότητας που συναλλάσσεται είναι ίσο με:

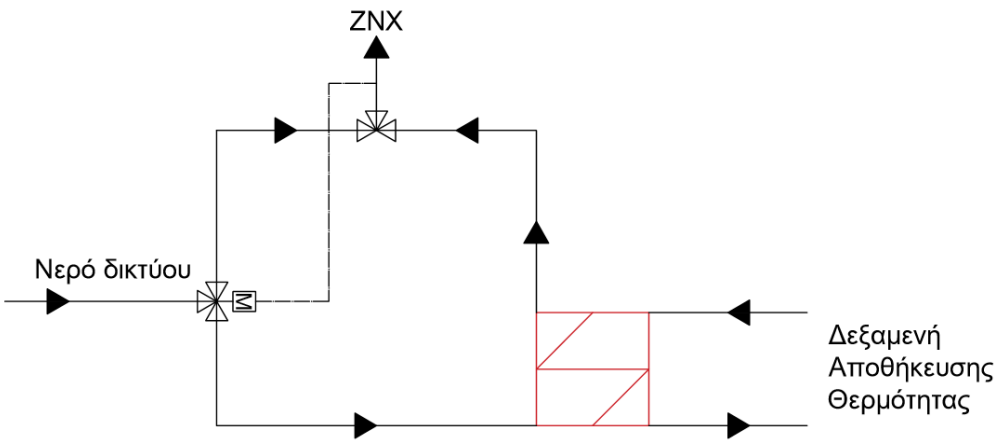
$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} \qquad 3.42$$

όπου ΔT_{lm} είναι η μέση λογαριθμική διαφορά των ρευστών στην είσοδο (ΔT_i) και έξοδο (ΔT_o) του εναλλάκτη, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(\Delta T_i - \Delta T_o)}{\ln\left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_o}\right)} \qquad 3.43$$

Με την παραδοχή πως η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρεύματος είναι ίση με τη θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος μειωμένη κατά δέκα βαθμούς (ίση με 29 ^{o}C), υπολογίζεται το γινόμενο UA για όλες τις υπό μελέτη πόλεις. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για τη Νυρεμβέργη αυτό προκύπτει ίσο με: 274 W/K.

Για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας των 39 ^{o}C, χρησιμοποιείται κατάλληλη διάταξη με παρακαμπτήριο κλάδο (bypass) στο νερό του δικτύου, η οποία αναμιγνύει το ρεύμα εξόδου από τον εναλλάκτη με το ρεύμα δικτύου. Οι παροχές ανάμιξης καθορίζονται κάθε φορά από τρίοδη βάνα με βάση τις αντίστοιχες θερμοκρασίες των παραπάνω ρευμάτων καθώς και τη θερμοκρασία στόχο. Η παραπάνω τρίοδη βάνα προσομοιώνεται με το μοντέλο “Type 11b”, ενώ η υλοποίηση του κυκλώματος αποτυπώνεται στην Εικ. 3.11.



Εικ. 3.11: Μονογραμμική απεικόνιση διάταξης για παραγωγή ZNX επιθυμητής θερμοκρασίας

3.2.8 Σύστημα Εποχιακής Αποθήκευσης Θερμότητας

Η αρχική μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης σε περιβάλλον TRNSYS, αποτέλεσε εργασία του Ιταλικού Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας (Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR) και του Ινστιτούτου προχωρημένης τεχνολογίας για την ενέργεια "Nicola Giordano" (Instituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano" – ITAE). Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής το υπάρχον μοντέλο βελτιώθηκε όπως θα περιγραφθεί παρακάτω.

3.2.8.1 Υπάρχον Μοντέλο

Το υπάρχον μοντέλο λαμβάνοντας ως εισόδους τις παροχές και τις θερμοκρασίες των δύο ρευμάτων, καθώς και πειραματικά προσδιοριζόμενους συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται τόσο από τις παραπάνω συνιστώσες όσο και από τη μάζα του προσροφητικού μέσου, παρέχει ως κύριες εξόδους τα παρακάτω μεγέθη:

- Τις θερμοκρασίες εξόδου των δύο ρευμάτων
- Την αναλογία μάζας νερού που έχει προσροφηθεί προς τη μάζα του προσροφητικού υλικού (adsorption uptake [kg/kg])
- Την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί σε αυτό, καθώς και
- Το επίπεδο φόρτισης (State of Charge – SoC)

Ο λόγος της μάζας του νερού προς τη μάζα του προσροφητικού μέσου *(w)* υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$w = \alpha - \mathrm{b} \cdot \exp(-\mathrm{c} \cdot \mathrm{t}) \qquad 3.44$$

όπου α,b,c, οι πειραματικά προσδιοριζόμενοι συντελεστές. Λαμβάνοντας ως αφετηρία την κατάσταση πλήρως εκφορτισμένου συστήματος (w_0), καθώς και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, κάθε επόμενη κατάσταση φόρτισης μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\mathrm{t}_0 = \frac{-\ln\left(\frac{\mathrm{a}-\mathrm{w}_0}{\mathrm{b}}\right)}{\mathrm{c}} \qquad 3.45$$

$$\rightarrow t_1 = t_0 + \Delta t$$

$$\rightarrow w_1 = -\mathrm{b} \cdot \exp(-\mathrm{c} \cdot \mathrm{t}_1) \text{ κ.ο.κ}$$

Το επίπεδο φόρτισης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την πειραματικά προσδιοριζόμενη μέγιστη και ελάχιστη τιμή προσροφημένης μάζας νερού ανά μονάδα μάζας του προσροφητικού υλικού, όπως περιγράφεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$SoC = \frac{w_{max} - w_n}{w_{max} - w_{min}} \qquad 3.46$$

Συμβολίζοντας με *Π/Ε* το τμήμα του προσροφητή/εκροφητή και με *Α/Σ* το τμήμα του ατμοποιητή/συμπυκνωτή και με γνωστή την μεταβολή στην προσροφημένη ποσότητα νερού, ο υπολογισμός της ενέργειας η οποία αποθηκεύεται/αποδίδεται, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\mathrm{d}w_n = w_n - w_{n-1} \qquad 3.47$$

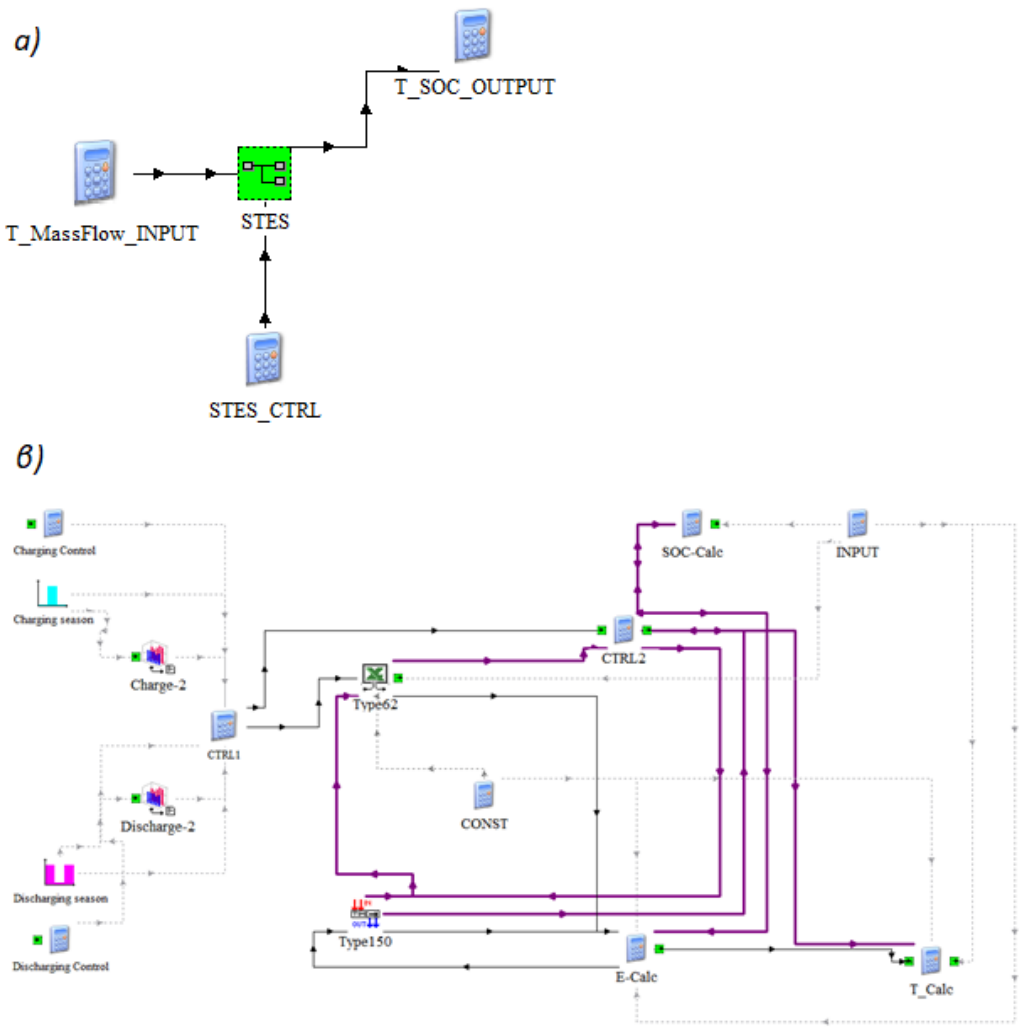
$$\rightarrow dE_{\Pi/E_n} = \left(h_{ev,w} + A\right) \cdot dw_n \cdot M_{SWS} \;\; \kappa\alpha\iota \;\; \dot{Q}_{\Pi/E_n} = dE_{\Pi/E_n}/dt$$
$$\rightarrow dE_{A/\Sigma_n} = -h_{ev} \cdot dw_n \cdot M_{SWS} \;\; \kappa\alpha\iota \;\; \dot{Q}_{A/\Sigma_n} = dE_{A/\Sigma_n}/dt \qquad 3.48$$

Στην παραπάνω εξίσωση, $h_{ev,w}$ είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του νερού, M_{SWS} είναι η συνολική μάζα του προσροφητικού μέσου και A ο συντελεστής που εκφράζει το δυναμικό προσρόφησης ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με το ισοζύγιο Dubinin-Astakhov, εφαρμογή του οποίου παρουσιάζεται στη μελέτη του Βασίλειου Ενγκλεζάκη [90].
Αντίστοιχα, οι θερμοκρασίες εξόδου από το σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας υπολογίζονται ως:

$$T_{\Pi/Eo} = T_{\Pi/Ei} + \frac{\dot{Q}_{\Pi/E_n}}{\dot{m}_{\Pi/E} \cdot Cp_w} \qquad 3.49$$

$$T_{A/\Sigma o} = T_{A/\Sigma i} + \frac{\dot{Q}_{A/\Sigma_n}}{\dot{m}_{A/\Sigma} \cdot Cp_w} \qquad 3.50$$

Στην παρούσα μορφή του συστήματος ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τόσο την συνολική μάζα προσροφητικού μέσου όσο και τους συντελεστές που περιγράφουν την κινητική του συστήματος, οι οποίοι έχουν προσδιοριστεί για διατάξεις από 500 kg έως 5000 kg προσροφητικού υλικού ανά υπομονάδα. Στο παραπάνω μοντέλο ωστόσο, δίνεται η δυνατότητα μόνο για παράλληλη φόρτιση των του συνόλου των υπομονάδων του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, δεδομένου πως η θερμοκρασία εξόδου λαμβάνει υπόψη τη συνολική μάζα του υλικού, όπως φαίνεται και από την εξίσωση *3.48*.
Όπως θα επεξηγηθεί και στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, η παραπάνω λογική, οδηγεί σε ασταθές και δύσκολα ελέγξιμο σύστημα, δεδομένων των θερμοκρασιακών περιορισμών που επιβάλλονται στο ρεύμα φόρτισής του. Συγκεκριμένα στα αρχικά στάδια της φόρτισης, δεδομένης της φύσης του συστήματος, οι ηλιακοί συλλέκτες καλούνται να καλύψουν υψηλά φορτία, τα οποία οδηγούν σε απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές καθώς και αναγκαία μεγάλη συλλεκτική επιφάνεια. Στον αντίποδα, στο τέλος της περιόδου φόρτισης, το πλεονάζον θερμικό φορτίο δεν μπορεί να απορριφθεί, με αποτέλεσμα την επίτευξη υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών, οι οποίες σε πραγματική λειτουργία καθιστούν επικίνδυνη την λειτουργία της εγκατάστασης.
Ένα άλλο βασικό πρόβλημα του υπάρχοντος μοντέλου είναι πως ο υπολογισμός διαφόρων παραμέτρων πραγματοποιείται εξωτερικά από το πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων Excel. Η λειτουργία αυτή αυξάνει δραματικά τον υπολογιστικό χρόνο, επιδρώντας παράλληλα θετικά και στην αύξηση του σφάλματος. Χαρακτηριστικά αναφέρεται, πως ο τυπικός χρόνος για την προσομοίωση δύο συναπτών ετών υπερβαίνει τις τρεις ώρες.
Επιπρόσθετα, αν ο χρήστης προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει το παραπάνω μοντέλο πολλαπλές φορές μέσα στο περιβάλλον προσομοίωσης, τότε θα πρέπει να ορίσει πέρα από την λογική ελέγχου για την φόρτιση των διαφόρων υποσυστημάτων και ένα μεγάλο πλήθος νέων μεταβλητών. Παράλληλα, θα αυξήσει κατακόρυφα τον υπολογιστικό χρόνο, ο οποίος για διπλή χρήση του μοντέλου, υπερβαίνει τις τέσσερις ώρες.
Η αποτύπωση του υπάρχοντος μοντέλου στο περιβάλλον TRNSYS δίνεται στην Εικ. 3.12



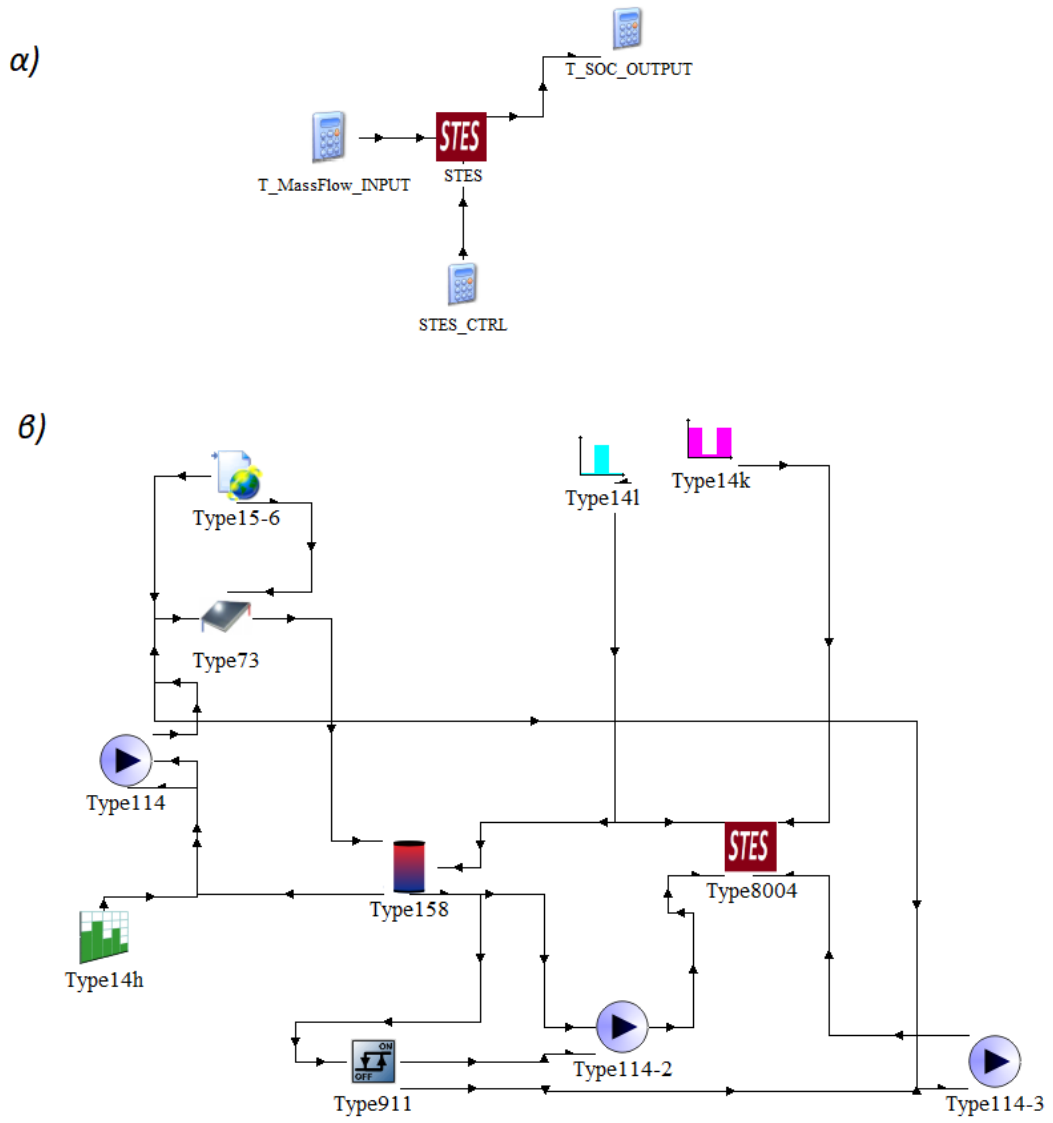
Εικ. 3.12: Απεικόνιση μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας σε περιβάλλον TRNSYS (α) Συμπτυγμένη μακροεντολή (β) Εσωτερικά στοιχεία μακροεντολής

3.2.8.2 Βελτιωμένο Μοντέλο

Η εύρεση κατάλληλων και σωστών λογικών ελέγχου ενός συστήματος, ώστε να επιτευχθεί η ευστάθειά του, αποτελεί το πιο χρονοβόρο κομμάτι μίας δυναμικής μοντελοποίησης. Πρώτος στόχος επομένως, ήταν η βελτίωση του υπάρχοντος μοντέλου του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, ώστε να επιτευχθεί μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκε αρχικά ένα καινούργιο μοντέλο (“Type”), το οποίο περιλαμβάνει το μαθηματικό υπόβαθρο του συστήματος καθώς και την προϋπάρχουσα εσωτερική λογική ελέγχου. Ο προγραμματισμός του μοντέλου έγινε σε γλώσσα Fortran, χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο από το TRNSYS εσωτερικό περιβάλλον (“Type Studio”) και μεταγλωττιστή (compiler).

Για τον έλεγχο της λειτουργίας του καινούργιου μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν τόσο σταθερές συνθήκες εισόδου Εικ. 3.13.α., ώστε να επαληθευτεί ο σωστός υπολογισμός των εξόδων του συστήματος για τις ίδιες συνθήκες εισόδου του μοντέλου αναφοράς, όσο και ένα πλήρως δυναμικό περιβάλλον Εικ. 3.13.β., το οποίο προσομοιώνει τη φόρτιση του συστήματος από ηλιακούς συλλέκτες, με σκοπό να ελεγχθεί η δυναμική του συμπεριφορά κυρίως στις

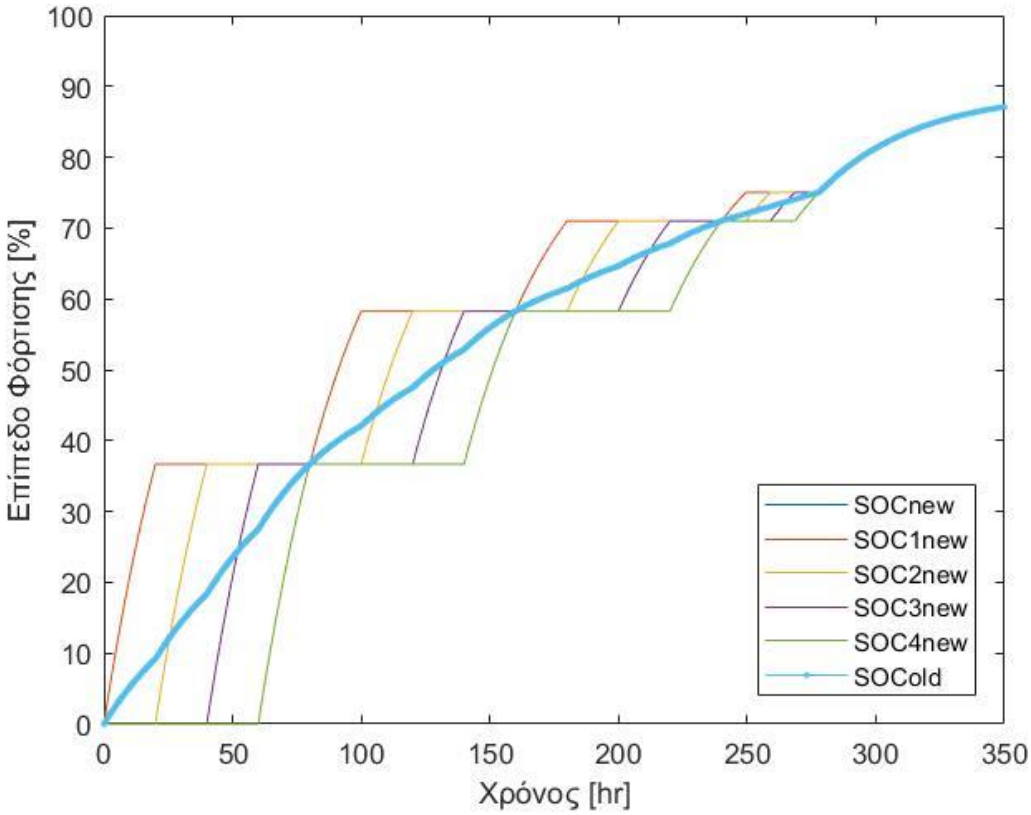
μεταβατικές λειτουργίες. Η εισαγωγή του νέου μοντέλου στο σύστημα, μείωσε τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο τουλάχιστον κατά 50%.



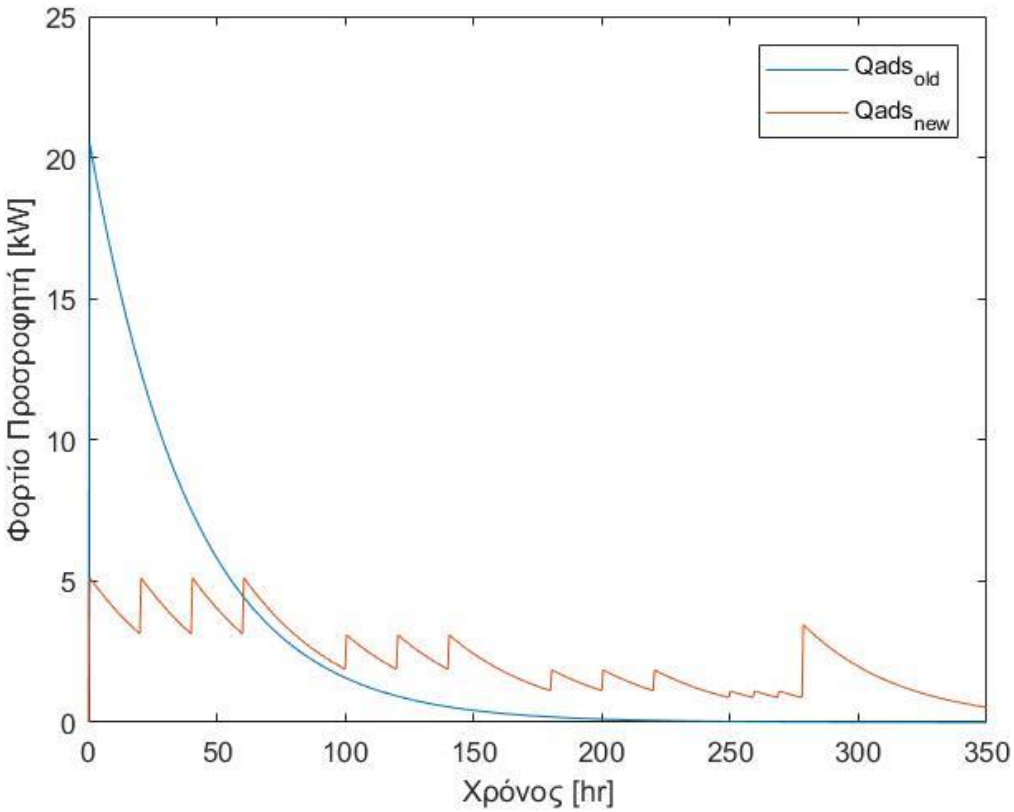
Εικ. 3.13: Διατάξεις βελτιωμένου μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας σε περιβάλλον TRNSYS (α) Διάταξη σταθερών συνθηκών εισόδου (β) Δυναμικό σύστημα

Επόμενος στόχος για την βελτίωση του μοντέλου, ήταν η εισαγωγή μιας λογικής ελέγχου η οποία επιτρέπει την ξεχωριστή φόρτιση των υπομονάδων του συστήματος, ώστε το μέγιστο φορτίο που καλούνται να καλύψουν οι ηλιακοί συλλέκτες να περιορίζεται στο μέγιστο απαιτούμενο από την κάθε υπομονάδα, επιτυγχάνοντας μία όσο το δυνατόν ομαλή καμπύλη φόρτισης.

Η λογική ελέγχου διαμορφώνεται ως εξής:
Ο χρήστης προσδιορίζει τη στοιχειώδη μάζα προσροφητικού υλικού της κάθε υπομονάδας για την οποία παρέχονται δεδομένα (πχ 500 kg), καθώς και την συνολική μάζα του συστήματος, η οποία αποτελεί ακέραιο πολλαπλάσιο αυτής.
Το μοντέλο εφαρμόζει σειριακή φόρτιση των εκάστοτε υπομονάδων, η οποία διαρκεί για προεπιλεγμένο από το χρήστη χρόνο φόρτισης (runtime). Όταν όλες οι υπομονάδες φτάσουν σε ένα δεδομένο επίπεδο φόρτισης, οριζόμενο από το χρήστη, όπου πλέον το απαιτούμενο φορτίο έχει μειωθεί σημαντικά, τότε εφαρμόζεται παράλληλη φόρτιση.
Στην περίοδο αποφόρτισης εφαρμόζεται εξαρχής παράλληλη τροφοδότηση των μονάδων, τόσο γιατί η αργή δυναμική του συστήματος, οδηγεί σε πιο ομαλοποιημένη καμπύλη ισχύος, η οποία τροφοδοτεί τη δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όσο και επειδή είναι αναγκαία η πλήρης αποφόρτιση του συστήματος, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό ηλιακό κλάσμα.
Στις Εικ. 3.14 και Εικ. 3.15 παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες φόρτισης και φορτίου με την παλιά και την καινούργια λογική ελέγχου για σταθερές τιμές εισόδου.

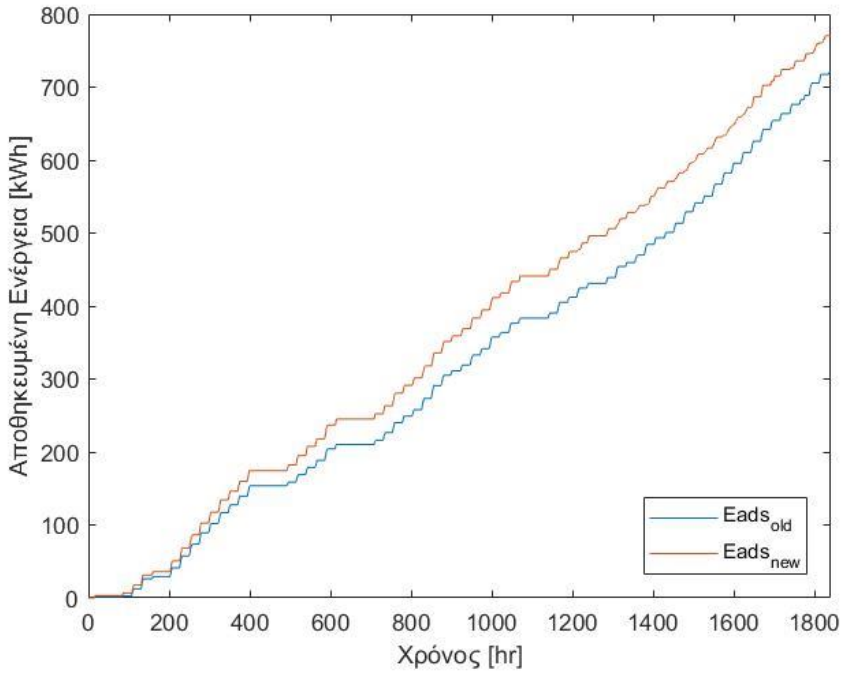


Εικ. 3.14: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών φόρτισης παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας για σταθερές συνθήκες εισόδου

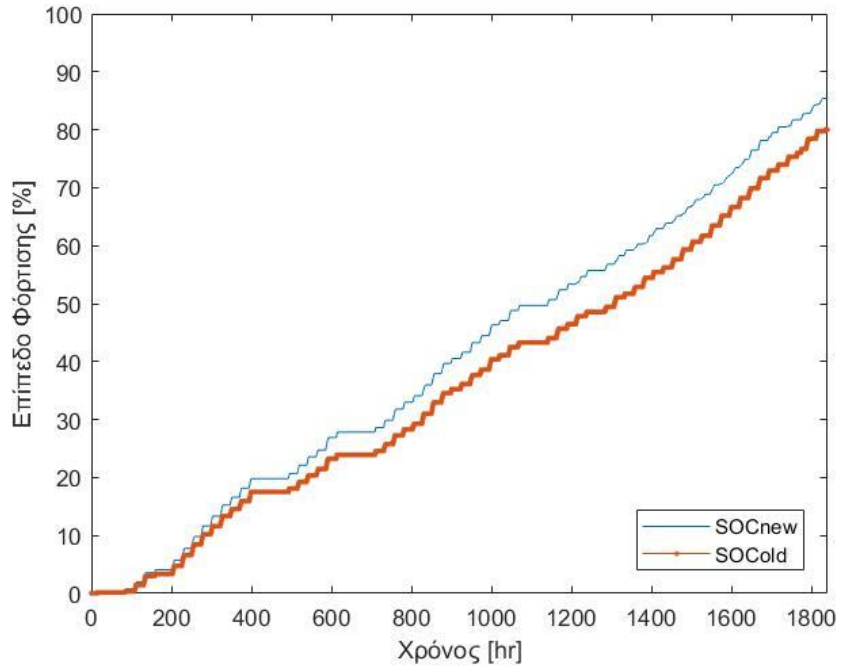


Εικ. 3.15: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών φορτίου προσροφητή παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας για σταθερές συνθήκες εισόδου

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω διαγράμματα, η λογική ελέγχου μειώνει σημαντικά το μέγιστο φορτίο που καλούνται να καλύψουν οι ηλιακοί συλλέκτες το οποίο είναι σαφώς μειωμένο σε σχέση με το συνολικό που προκύπτει από την παράλληλη φόρτιση. Παράλληλα η καμπύλη που απεικονίζει το μέσο επίπεδο φόρτισης στη νέα λογική ελέγχου, ταυτίζεται όπως ήταν αναμενόμενο με την παλιά, δεδομένου πως οι συνθήκες εισόδου παραμένουν σταθερές. Κάτι τέτοιο ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο σε ένα δυναμικό σύστημα, όπου το απαιτούμενο από τη μονάδα φορτίο, συνήθως διαφέρει από το μέγιστο που μπορούν να καλύψουν οι ηλιακοί συλλέκτες. Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται μέσω του μοντέλου που απεικονίζεται στην Εικ. 3.13, αποτελέσματα της προσομοίωσης του οποίου δίνονται στις Εικ. 3.16 και Εικ. 3.17. Στην παραπάνω περίπτωση, η νέα λογική ελέγχου, επιτρέπει την επιπλέον αποθήκευση περισσότερων από 50 θερμικών kWh, αντιστοιχώντας σε αύξηση μεγαλύτερη του 7% σε σχέση με τα προηγούμενα επίπεδα φόρτισης.



Εικ. 3.16: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών αποθηκευμένης ενέργειας για σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης για δυναμικές συνθήκες εισόδου



Εικ. 3.17: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών επιπέδου φόρτισης για σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας παλαιού και νέου μοντέλου προσομοίωσης για δυναμικές συνθήκες εισόδου

3.3 Προσομοίωση οικίας στο TRNBUILD

Όπως αναφέρθηκε και στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2, ο σχεδιασμός της οικίας πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον SketchUp™, χρησιμοποιώντας την επέκταση Trnsys3d του λογισμικού TRNSYS. Μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας του κτίσματος, το παραγόμενο αρχείο (*.idf), χρησιμοποιείται ως είσοδος στο περιβάλλον πολυζωνικού κτηρίου TRNBUILD, απεικόνιση της οποίας δίνεται στην Εικ. 3.18. Το κτηριακό κέλυφος προσομοιώνεται ώστε να ικανοποιεί τα κριτήρια θερμικής διαπερατότητας για κτήρια nZEB, χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στον Πιν. 3.2. Κάθε κατασκευή τοιχοποιίας αποτελείται από πλήθος στρωμάτων (layers), οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες στρώσεων:

1) Στρώμα μάζας (Massive layer)
2) Άυλο Στρώμα (Massless layer)
3) Ενεργό Στρώμα (Active layer)
4) Ψυχόμενη Οροφή (Chilled Ceiling)

Με την πρώτη κατηγορία μπορούν να μοντελοποιηθούν όλες οι κατηγορίες υλικών, προσδιορίζοντας βασικά χαρακτηριστικά τους όπως, την αγωγιμότητά, την θερμοχωρητικότητά και την πυκνότητά τους. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία ορίζονται συνήθως στρώματα αερίου (πχ αέρα), όπου αρκεί ο προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής τους αντίστασης (R). Οι τελευταίες δύο κατηγορίες στρωμάτων μοντελοποιούν ειδικά συστήματα, θέρμανσης ή ψύξης, με κατάλληλο προσδιορισμό της γεωμετρίας του δικτύου σωληνώσεών τους.

Πιν. 3.2: Συντελεστές θερμοπερατότητας κτηριακού κελύφους

Στοιχείο	***Τιμή***	***Μονάδα***
Εξωτερική Τοιχοποιία	0,110	W/m^2K
Δάπεδο	0,120	W/m^2K
Στέγη	0,05	W/m^2K
Εσωτερική Τοιχοποιία	1,700	W/m^2K
Πλάκα Οροφής	2,900	W/m^2K
Κουφώματα	0,710	W/m^2K

Παράλληλα ορίζονται τα εσωτερικά θερμικά φορτία, με κατάλληλα προγράμματα παρουσίας-χρήσης, τόσο σε ημερήσια όσο και σε εβδομαδιαία κλίμακα, οι μέγιστες τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον Πιν. 3.3.

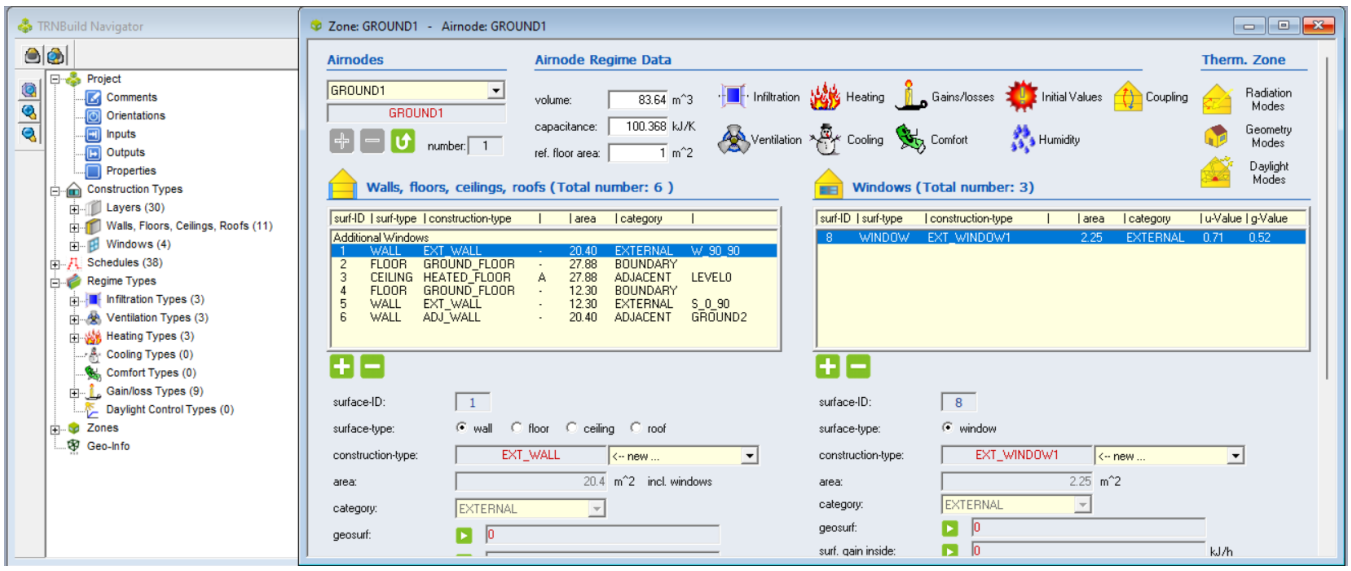
Πιν. 3.3: Εσωτερικά θερμικά φορτία οικίας

Στοιχείο	***Τιμή***	***Μονάδα***
Φυσικός Αερισμός	0,10	1/h
Μηχανικός Αερισμός	0,10	1/h
Φορτία Ανθρώπων	3,98	W/m^2
Φορτία Ηλεκτρικών Συσκευών	16,00	W/m^2
Φορτία Φωτισμού	6,00	W/m^2

Η μοντελοποίηση του ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης πραγματοποιείται με τη χρήση του ενεργού στρώματος, προσδιορίζοντας τα εξής στοιχεία:

- Αποστάσεις μεταξύ σωληνώσεων (κέντρο έως κέντρο)

- Εξωτερική διάμετρο σωλήνωσης
- Πάχος τοιχώματος σωλήνωσης
- Θερμική αγωγιμότητα τοιχώματος σωλήνωσης



Εικ. 3.18: Περιβάλλον πολυζωνικού κτηρίου TRNBUILD

Η παροχή εισόδου, ορίζεται σταθερή ίση με 10,79 $m^3/h/m^2$, ώστε να είναι ικανή να καλύψει το μέγιστο φορτίο που προκύπτει από τις θερμικές απαιτήσεις της οικίας, επιτυγχάνοντας σταθερή ταχύτητα ροής ίση με (0,8) m/s. Η θερμοκρασία κάθε θερμαινόμενης θερμικής ζώνης ορίζεται στους 20 °C, με το αντίστοιχο σήμα να παρέχεται από κατάλληλο διαφορικό ελεγκτή ON/OFF, με εύρος λειτουργίας $\pm\ 1\ K$.

3.3.1 Θερμοκρασία προσαγωγής νερού σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας προσαγωγής του νερού, προσδιορίζεται μέσω κατάλληλης συνάρτησης αντιστάθμισης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την εσωτερική θερμοκρασία κάθε θερμικής ζώνης, όσο και την θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a), όπως περιγράφεται παρακάτω:

$$T_s = T_{room} + (T_{HTFn} - T_{room}) \cdot \left(PLR(T_a)\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{2} \cdot PLR(T_a) \cdot (T_{Sn} - T_{Rn}) \qquad 3.51$$

$$T_{HTFn} = \frac{(T_{Sn} + T_{Rn})}{2} \qquad 3.52$$

$$PLR(T_a) = \frac{\dot{Q}_H(T_a)}{\dot{Q}_{Hn}(T_a)} = \left[\frac{T_{room} - T_a}{T_{room} - T_{an}}\right] \qquad 3.53$$

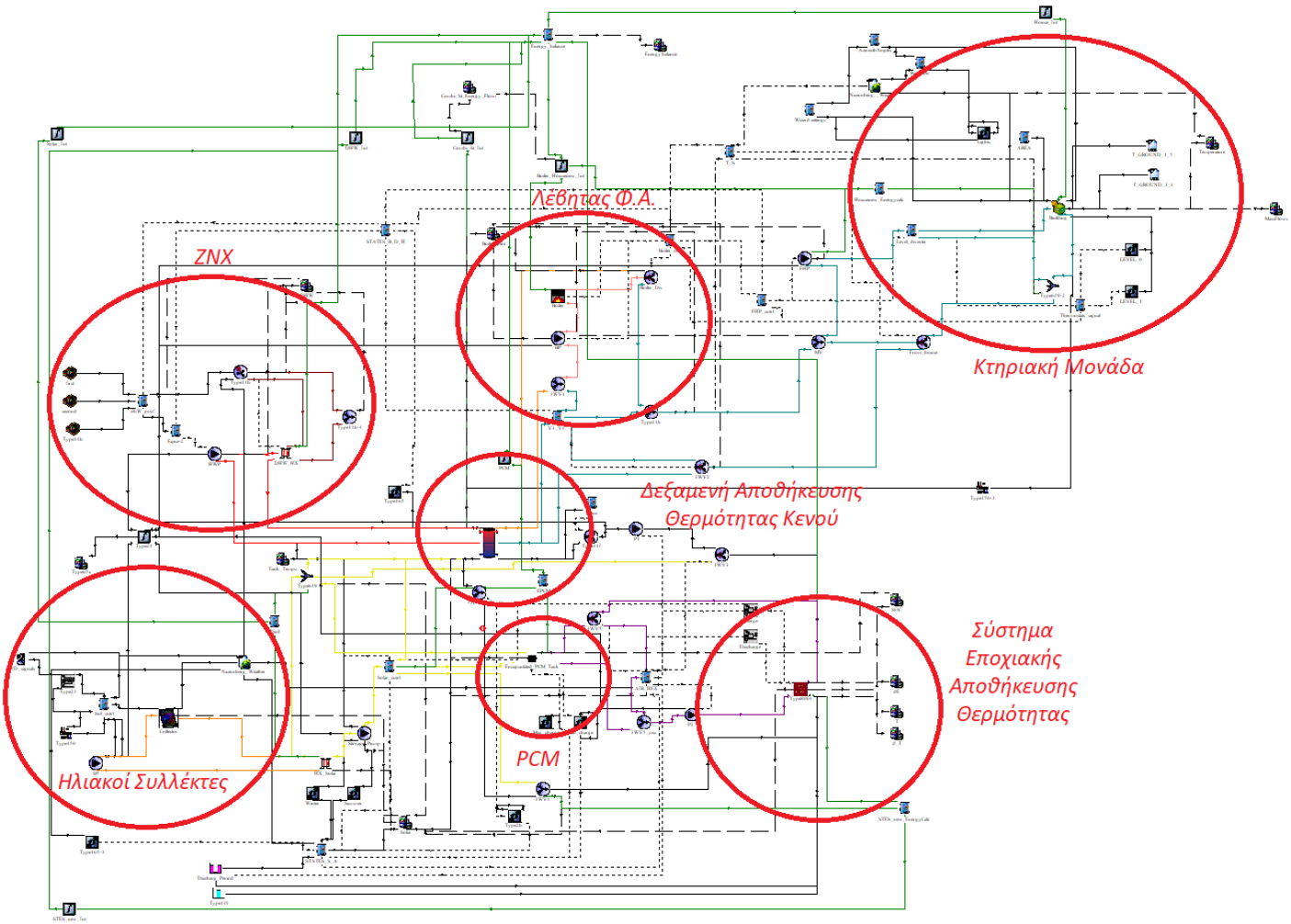
όπου, *PLR (Part Load Ratio)*, ο λόγος απαιτούμενης προς μέγιστη θερμική ισχύ. Με T_{Sn} και T_{Rn} συμβολίζονται οι ονομαστικές θερμοκρασίες προσαγωγής και απαγωγής (38 °C και 28 °C αντίστοιχα), οι οποίες ορίζονται για την ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία κάθε υπό εξέτασης πόλης (T_{an}). Η ελάχιστη θερμοκρασία προσαγωγής ταυτίζεται με την θερμοκρασία στόχο κάθε θερμικής ζώνης, με αποτέλεσμα μηδενική θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος τους ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης. Οι καμπύλες που συνδέουν τις μέγιστες και τις ελάχιστες

θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου, προσδιορίζονται κατάλληλα, μέσω του συντελεστή (*1/n*), καταλήγοντας σε γραμμικές εξισώσεις όταν αυτός λαμβάνει την τιμή (1,0).
Σε επίπεδο συστήματος η θερμοκρασία εισόδου, προκύπτει μέσω κατάλληλης ανάμιξης είτε ρεύματος από το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας, ή απευθείας από τον λέβητα φυσικού αερίου, με την έξοδο από το ενδοδαπέδιο σύστημα του σπιτιού. Η αναλογία ανάμιξης των παραπάνω ρευμάτων υπολογίζεται δυναμικά σε κάθε χρονική στιγμή (*t*), σύμφωνα με τον τύπο:

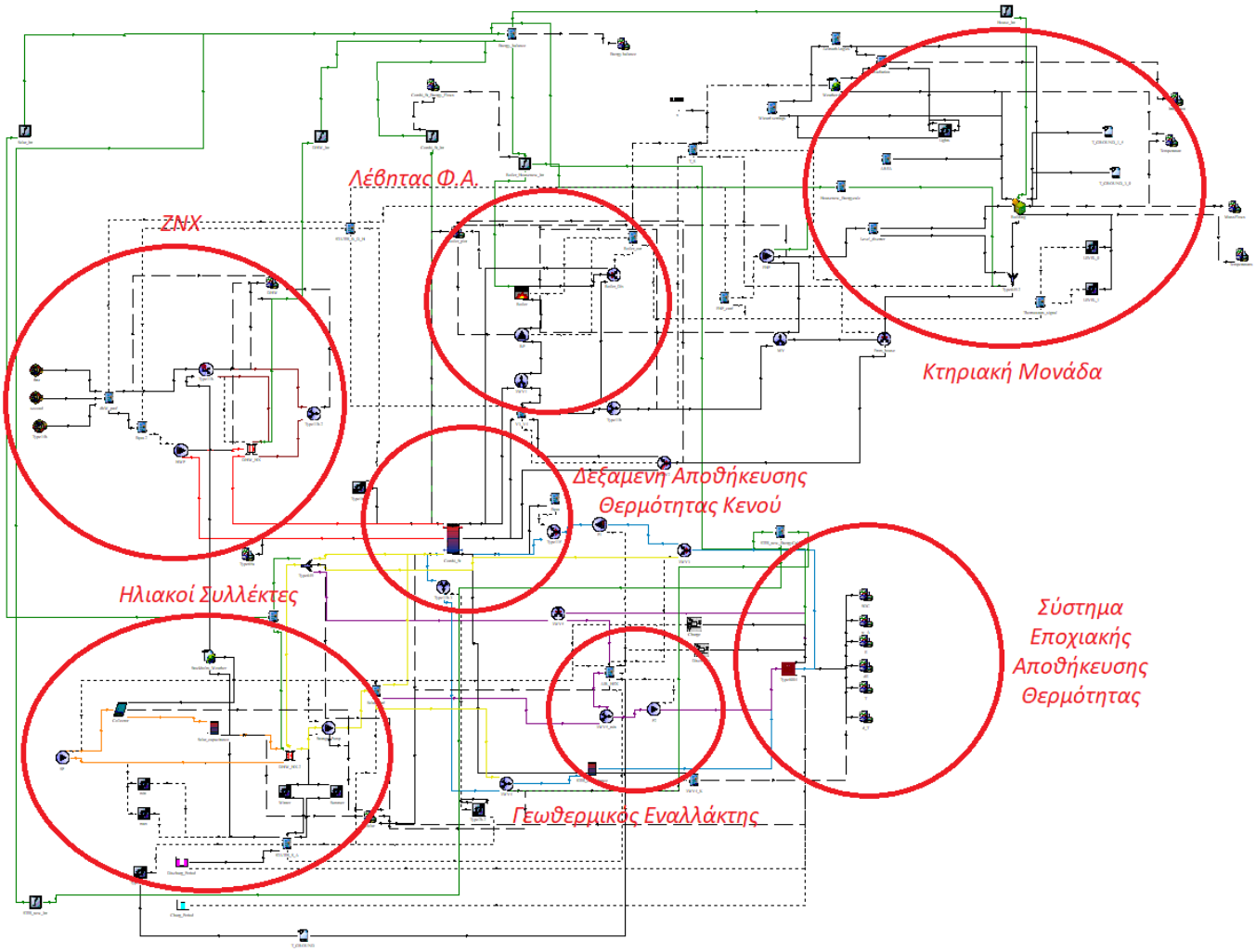
$$x = \frac{T_{h_t} - T_{R_{t-1}}}{T_{S_t}} \qquad 3.54$$

3.4 Συνολική απεικόνιση συστήματος

Στις Εικ. 3.19 και Εικ. 3.20 παρουσιάζεται το υπό μελέτη σύστημα, όπως αυτό αποτυπώθηκε στο περιβάλλον προσομοίωσης TRNSYS, για τις διαμορφώσεις που απεικονίζονται στις Εικ. 2.9 και Εικ. 2.10.



Εικ. 3.19: Αποτύπωση διάταξης εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας με PCM και εναλλάκτη αέρα



Εικ. 3.20: Αποτύπωση διάταξης εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας με γεωθερμικό εναλλάκτη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από παραμετρική μελέτη, για το υπό εξέταση σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, χρησιμοποιώντας το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Η εφαρμογή του συστήματος, επικεντρώνεται σε περιοχές της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης, που χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα ηλιοφάνειας κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ ως πόλεις αναφοράς επιλέγονται αντίστοιχα, η Νυρεμβέργη και η Στοκχόλμη. Η διαστασιολόγηση του, πραγματοποιείται με κύριες μεταβλητές τη συνολική μάζα του προσροφητικού υλικού (M_{STES}) και τη συνολική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών (A_{sol}), ενώ ειδικά για τη Νυρεμβέργη, εξετάζεται η επίδραση της μάζας του υλικού αλλαγής φάσης (M_{PCM}), στην επίδοση της λειτουργίας του.

Για να είναι δυνατή η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, λόγω της εμπιστευτικότητας του έργου, έχουν μεταβληθεί ορισμένα θερμοκρασιακά όρια, τα οποία επηρεάζουν τα σήματα ενεργοποίησης των διαφόρων υποσυστημάτων, καθώς και τις τελικές καταναλώσεις. Παράλληλα, η διαστασιολόγηση της συλλεκτικής επιφάνειας, γίνεται με τιμές οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στα ακριβή στοιχεία που παρέχει ο κατασκευαστής. Ωστόσο οι παραπάνω αλλαγές δεν επεμβαίνουν σημαντικά στους τελικούς υπολογισμούς, δεδομένου πως δεν υπεισέρχονται αλλαγές στο βασικότερο υπό μελέτη στοιχείο (STES) της εγκατάστασης, ενώ παράλληλα η μάζα του παρέχεται και μελετάται σε μονάδες των 500 kg, ανταποκρινόμενη στα πραγματικά στοιχεία που έχουν δοθεί.

Ωστόσο, επηρεάζονται στοιχεία, όπως τα επίπεδα φόρτισης, με τους αντίστοιχους αχρησιμοποίητους όγκους υλικού (dead volume), οι καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης, καθώς και στοιχεία, όπως η διαστρωμάτωση του δοχείου αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Στόχο για τη διαστασιολόγηση του συστήματος αποτελεί η ηλιακή κάλυψη των φορτίων θέρμανσης και Ζ.Ν.Χ, κατά ποσοστό ίσο με 60%, ενώ ορίζεται ως:

$$SF = \frac{Q_{sol,DHW} + Q_{sol,SH}}{Q_{DHW} + Q_{SH}} \qquad 4.1$$

Όπου $Q_{sol,DHW}$ και $Q_{sol,SH}$, αντιπροσωπεύουν, τα ηλιακά φορτία για την κάλυψη των απαιτήσεων ΖΝΧ και θέρμανσης χώρων (Space Heating – SH), αντίστοιχα.

Η ύπαρξη ωστόσο του δοχείου αποθήκευσης αισθητής θερμότητας κενού, αλλά και της γενικότερης διαρρύθμισης των σωληνώσεων του συστήματος, καθιστά αδύνατο τον ακριβή προσδιορισμό των παραπάνω προσδιδόμενων ενεργειακών φορτίων, τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης, όσο και στο πραγματικό σύστημα. Ως αποτέλεσμα ο προσδιορισμός του ηλιακού κλάσματος, ορίζεται ως:

$$SF = \frac{Q_{sol,tot} - Q_{sol,PCM} - Q_{sol,loss}}{Q_{DHW} + Q_{SH}} \qquad 4.2$$

Όπου $Q_{sol,loss}$ είναι η συνολικές απώλειες θερμότητας του συστήματος, οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στο δοχείο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, ενώ $Q_{sol,PCM}$, είναι η συνολική ηλιακή ενέργεια που τροφοδοτεί το PCM. Ο υπολογισμός των απωλειών θερμότητας που αντιστοιχεί στους ηλιακούς συλλέκτες, υπολογίζεται ως:

$$\frac{Q_{sol,loss}}{Q_{loss,tot}} = \frac{Q_{sol,in,tank}}{Q_{in,tank,tot}} \rightarrow Q_{sol,loss} = Q_{loss,tank} \cdot \frac{Q_{sol,in,tank}}{Q_{in,tank,tot}} \qquad 4.3$$

Στην παραπάνω εξίσωση, όλες οι ποσότητες μπορούν να υπολογιστούν απευθείας από ισοζύγια του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τους κατάλληλους κλάδους.
Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του συστήματος των αποτελεσμάτων του συστήματος, βασίζεται σε τρία βασικά ισοζύγια ενέργειας, τα οποία είναι τα:

1. Ισοζύγιο ενέργειας ZNX
2. Ισοζύγιο ενέργειας κυκλώματος θέρμανσης
3. Ολικό ισοζύγιο ενέργειας

Η μαθηματική διατύπωση των παραπάνω ισοζυγίων ορίζεται παρακάτω:
Ισοζύγιο ενέργειας ZNX

$$E_{err,DHW} = E_{tank,DHW} - E_{DHW,load} \qquad 4.4$$

Όπου $E_{tank,DHW}$, είναι η ενέργεια η οποία προσφέρεται από το δοχείο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας προς τον εναλλάκτη ZNX, ενώ αντίστοιχα $E_{DHW,load}$, αντιπροσωπεύει την καταναλισκόμενη στον εναλλάκτη ενέργεια από την πλευρά του φορτίου.
Ισοζύγιο ενέργειας κυκλώματος θέρμανσης

$$E_{err,heat} = E_{boiler} + E_{tank,SH} - E_{house} \qquad 4.5$$

Όπου E_{boiler}, είναι η συνολική ενέργεια που παρέχεται από τον καυστήρα, $E_{tank,SH}$ αντιπροσωπεύει την συνολική ενέργεια που παρέχεται από το δοχείο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας προς την οικία μέσω του ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ρεύματα εξόδου και εισόδου σε αυτό, ενώ E_{house}, αντιπροσωπεύει την κατανάλωση θερμότητας από την οικία, όπως αυτή υπολογίζεται τόσο από το TRNBuild.
Ολικό ισοζύγιο ενέργειας

$$E_{err,tot} = E_{boiler} + E_{sol} - E_{tank,DHW} - E_{tank,SH} \pm E_{STES} - E_{tank,stored} \qquad 4.6$$

Στο παραπάνω ισοζύγιο E_{STES}, είναι η συνολική ενέργεια που απορροφάται ή αποδίδεται από το σύστημα STES, ενώ ως $E_{tank,stored}$ ορίζεται η ενέργεια που αποθηκεύεται στο δοχείο ως θερμοκρασιακή διαφορά.

4.1 Νυρεμβέργη

Η Νυρεμβέργη, αποτελεί μια κλασσική πόλη της κεντρικής Ευρώπης, χαρακτηριζόμενη από μικρής σχετικά διάρκειας χειμώνες, με θερμοκρασίες υπό του μηδενός, επιτρέποντάς τη χρήση του συστήματος εναλλάκτη αέρα-νερού και PCM.

4.1.1 Διαστασιολόγηση του συστήματος

Στον Πιν. 4.1, παρουσιάζονται τα σενάρια που μελετήθηκαν για την αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος.

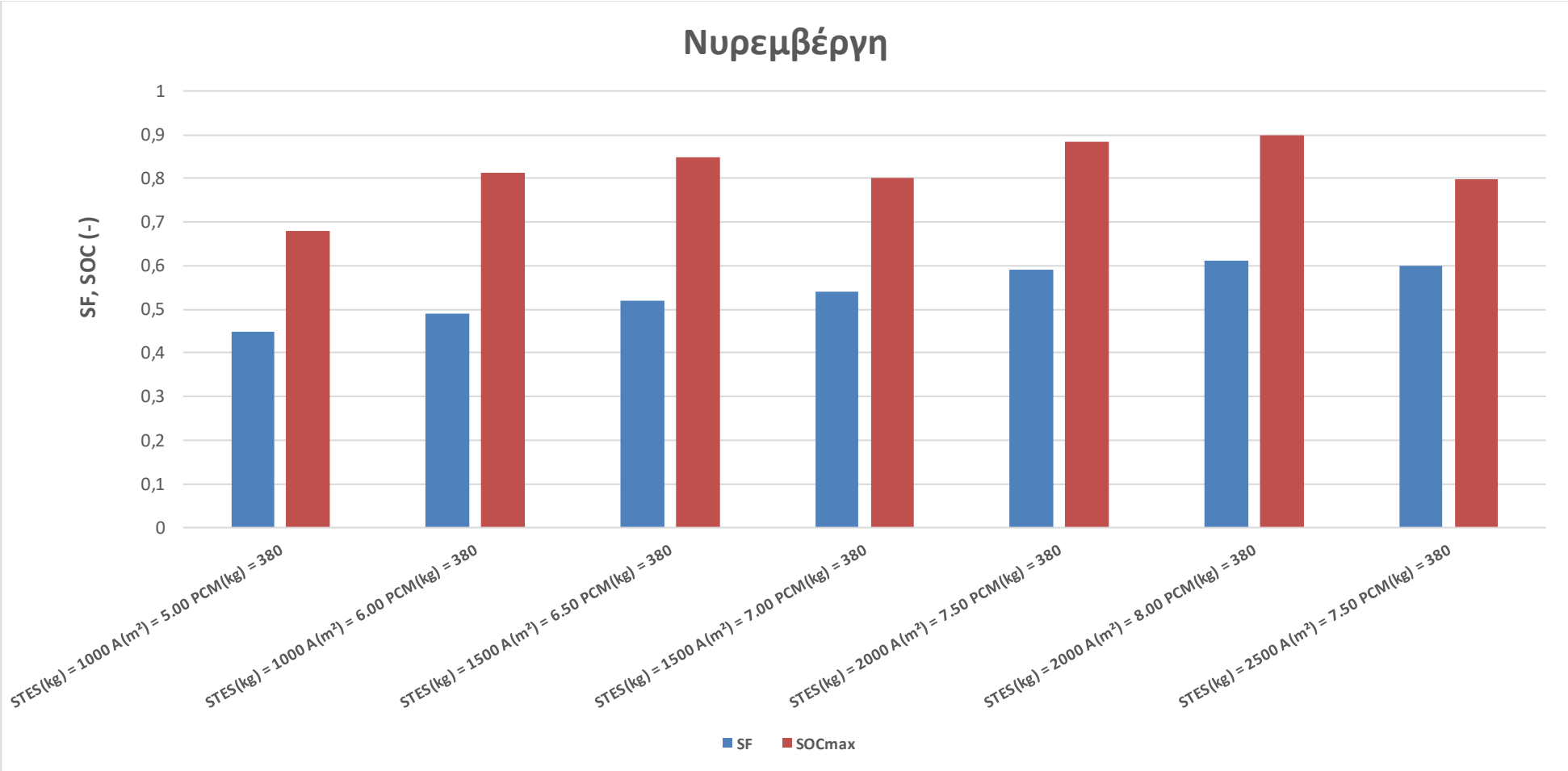
Πιν. 4.1:Σενάρια διαστασιολόγησης συστήματος STES – Νυρεμβέργη

Σενάριο	$M_{STES}\ (kg)$	$A_{sol}\ (m^2)$	$M_{PCM}\ (kg)$
1	1000	5.00	380
2	1000	6.00	380
3	1500	6.50	380
4	1500	7.00	380
5	2000	7.50	380
6	2000	8.00	380
7	2500	7.50	380

Σε όλες τις υπό μελέτη περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε μια μεγάλη μάζα υλικού αλλαγή φάσης, έτσι ώστε η αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος, να μην είναι αποτέλεσμα, αδυναμίας εκφόρτισης του.

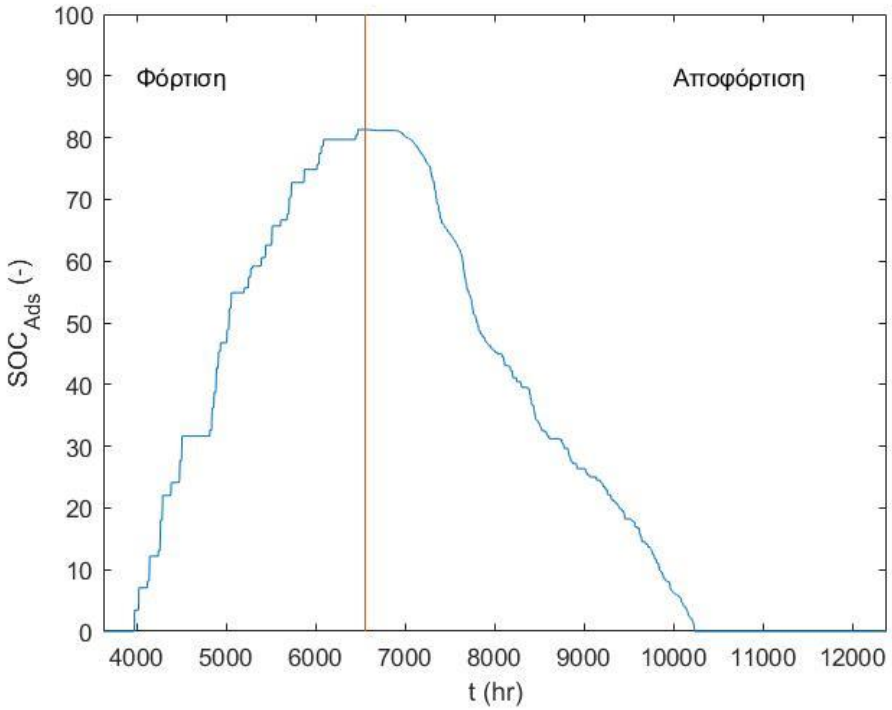
Στην Εικ. 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το ηλιακό κλάσμα καθώς και τα μέγιστα και ελάχιστα επίπεδα, φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης.

Όπως ήταν αναμενόμενο αύξηση της μάζας του προσροφητικού υλικού και της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών οδηγεί σε αύξηση του ηλιακού κλάσματος, ωστόσο με μειωμένο ρυθμό. Σε αυτή τη συμπεριφορά, πέραν της φυσικής κινητικής του συστήματος, συνεισφέρει και ο τρόπος ορισμού των απωλειών θερμότητας που αντιστοιχούν στην ηλιακή ενέργεια, δεδομένου πως αυτές αυξάνονται αναλογικά με την ηλιακά προσδισδόμενη ενέργεια στο σύστημα.



Εικ. 4.1: Ηλιακό κλάσμα και μέγιστο επίπεδο φόρτισης συστήματος STES –Νυρεμβέργη

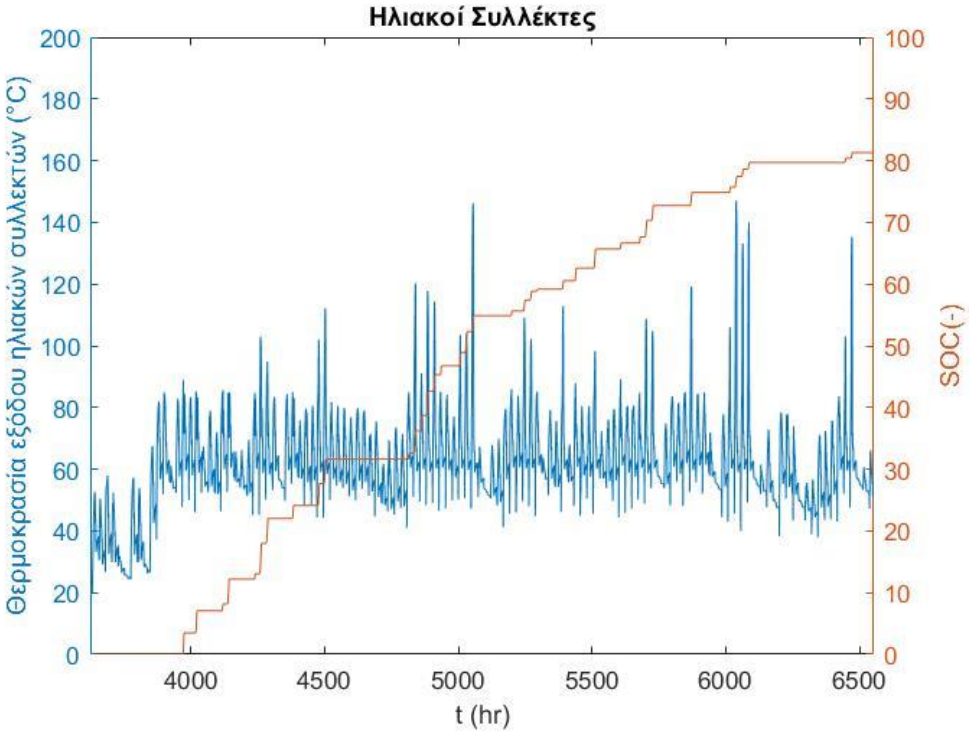
Όπως παρατηρείται και από τα δεδομένα του Πιν. 4.1, υπάρχει μια άμεση συσχέτιση μεταξύ της αύξησης της μάζας του προσροφητικού υλικού και της συλλεκτικής επιφάνειας στα υπό μελέτη σενάρια. Η παραπάνω συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα του μέγιστου επιπέδου φόρτισης που μπορεί να επιτευχθεί για δεδομένη επιφάνεια συλλεκτών κενού, καθώς και της προσπάθειας εξισορρόπησης των φορτίων που απαιτούνται από το σύστημα και αυτών που παρέχονται από τους ηλιακούς συλλέκτες. Παράλληλα, η ελάχιστη μάζα προσροφητικού υλικού επιλέγεται, έτσι ώστε να είναι μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα με θερμότητα, καθ'όλη τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Μία επεξήγηση της παραπάνω παρατήρησης είναι εφικτή παρατηρώντας την Εικ. 4.2.



Εικ. 4.2:Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 1- Νυρεμβέργη

Συγκεκριμένα, ενώ η συλλεκτική επιφάνεια είναι αρκετή για τη φόρτιση του συστήματος σε επίπεδα μεγαλύτερα του 80%, η μάζα του προσροφητικού υλικού αποφορτίζεται πλήρως πολύ πριν τη λήξη της αντίστοιχης περιόδου. Το επιπλέον κέρδος που θα πρόεκυπτε, στο επίπεδο φόρτισης, από μια αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας δεν είναι ικανό να αυξήσει σημαντικά την διάρκεια της αποφόρτισης, ενώ παράλληλα δημιουργεί προβλήματα υπερθέρμανσης των συλλεκτών, οφειλόμενα στο χαμηλό φορτίο ζήτησης που εμφανίζει το σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, σε υψηλά επίπεδα φόρτισης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα λανθασμένης διαστασιολόγησης συστήματος, απεικονίζεται χαρακτηριστικά στην Εικ. 4.3, για τον συνδυασμό μάζας προσροφητικού υλικού και συλλεκτικής επιφάνειας, του Σεναρίου 1.



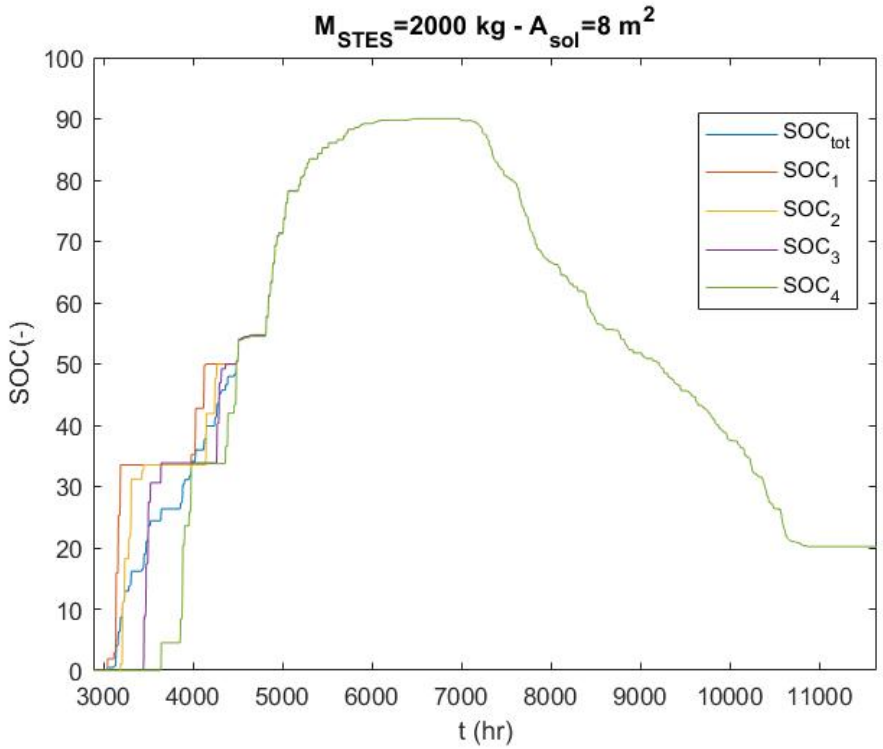
Εικ. 4.3:Θερμοκρασία εξόδου συλλεκτών και καμπύλη φόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 1 – Νυρεμβέργη

Όπως γίνεται αντιληπτό, ακόμα και σε επίπεδα φόρτισης της τάξεως του 70%, για την υπό μελέτη μάζα προσροφητικού υλικού, οι ηλιακοί συλλέκτες επιτυγχάνουν σταθερά θερμοκρασίες εξόδου μεγαλύτερες των 120ºC. Φυσικά το επίπεδο φόρτισης στο οποίο θα εμφανιστεί η συγκεκριμένη συμπεριφορά, είναι απόρροια τόσο της συλλεκτικής επιφάνειας, καθορίζοντας το μέγιστο ηλιακό φορτίο, όσο και της συνολικής μάζας προσροφητικού υλικού, καθορίζοντας το μέγιστο απαιτούμενο φορτίο του συστήματος.

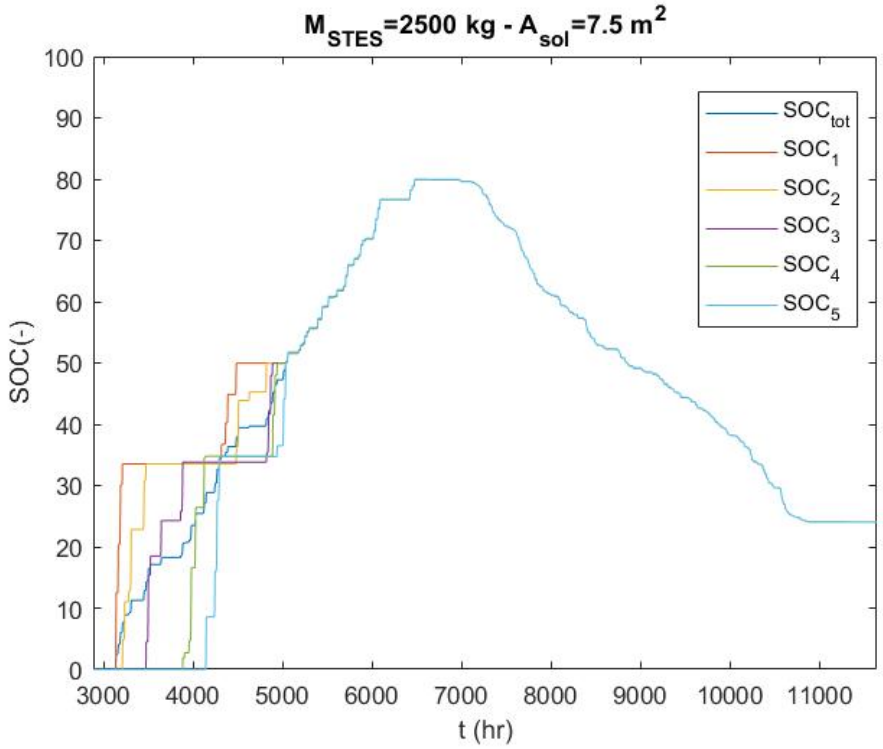
Σε ένα σωστά διαστασιολογημένο σύστημα, η θερμοκρασία εξόδου των συλλεκτών, πρέπει να παραμένει σε φυσιολογικά επίπεδα σε όλη την περίοδο φόρτισης του συστήματος.

Η συμπεριφορά αυτή του συστήματος περιορίζει τους πιθανούς συνδυασμούς των δύο κύριων συνιστωσών διαστασιολόγησής του, δεδομένου πως αύξηση της πρώτης θα οδηγήσει σε αύξηση της δεύτερης και αντίστροφα. Παρατηρώντας το γράφημα της Εικ. 4.1, γίνεται εμφανές πως το ηλιακό κλάσμα επιτυγχάνεται οριακά από το Σενάριο 5. Για την τελική επιλογή ωστόσο του κατάλληλου συνδυασμού μάζας προσροφητικού υλικού και συλλεκτικής επιφάνειας, μελετώνται δύο επιπλέον περιπτώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας για σταθερή μάζα προσροφητικού υλικού (Σενάριο 6) και σε αύξηση της μάζας του προσροφητικού υλικού για σταθερή συλλεκτική επιφάνεια (Σενάριο 7).

Τα επίπεδα ηλιακής κάλυψης που προέκυψαν είναι μεγαλύτερα του 60% και στις δύο περιπτώσεις, ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές παρατηρώντας τα αντίστοιχα διαγράμματα αποφόρτισής τους, τα οποία απεικονίζονται στις Εικ. 4.4 και Εικ. 4.5.



Εικ. 4.4: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 6- Νυρεμβέργη



Εικ. 4.5: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 7- Νυρεμβέργη

Συγκεκριμένα στην πρώτη περίπτωση, επιτυγχάνονται καλύτερα επίπεδα φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος, τα οποία ωστόσο αντιστοιχούν σε μικρότερη μάζα προσροφητικού υλικού. Ως συνέπεια το σύστημα, επιτυγχάνει το επιθυμητό ηλιακό κλάσμα, βασιζόμενο περισσότερο σε μια λογική ηλιακής υποβοήθησης, παρά εποχιακής αποθήκευσης συγκρινόμενο με τη δεύτερη περίπτωση.

Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση η επίτευξη του επιθυμητού ηλιακού κλάσματος βασίζεται στην αύξηση της ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στη μονάδα. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα που εντοπίζεται στη δεύτερη περίπτωση είναι πως η ωφέλιμη μάζα προσροφητικού υλικού, αντιστοιχεί μόλις στο 58% της συνολικά χρησιμοποιούμενης, ήτοι 1450 kg. Η τελική αύξηση σε σχέση με την ωφέλιμη μάζα του Σεναρίου 6, είναι μόλις 58 kg, δεδομένου πως αυτή αντιστοιχεί στο 70% της συνολικά χρησιμοποιούμενης. Το γεγονός αυτό σχετίζεται άμεσα με την κινητική που εμφανίζει το υπό μελέτη εποχιακό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, χαρακτηριζόμενο από εκθετικές καμπύλες φορτίου, που οδηγούν σε ταχύτατη αποφόρτιση των υψηλών στάθμεων φόρτισης. Συνεπώς για την μείωση του αναξιοποίητου υλικού, ως αρχική επιλογή για την διαστασιολόγηση του συστήματος επιλέγεται ο συνδυασμός $M_{STES} = 2000\ kg$, $A_{sol} = 8.00\ m^2$. Φυσικά, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της παρούσας ενότητας, η αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια σημαντικά μεγάλη μάζα υλικού αλλαγής φάσης, η οποία στην παρούσα φάση αντιστοιχεί στο 19% της μάζας του προσροφητικού υλικού.

Στον Πιν. 4.2 παρουσιάζονται τα σενάρια που ελέγχθηκαν για τον επηρεασμό που αυτή επιβάλλει στην επίτευξη του ηλιακού κλάσματος, καθώς και τα σχετικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω, γίνεται αντιληπτό πως για αυξημένη μάζα προσροφητικού μέσου, η μείωση της μάζας του υλικού αλλαγής φάσης θα οδηγήσει σε ακόμα μικρότερα ποσοστά ωφέλιμου όγκου. Επομένως, η εξέταση σεναρίων με σημαντικά μεγαλύτερη μάζα συστήματος αποθήκευσης θερμότητας και μειωμένη μάζα υλικού αλλαγής φάσης, δεν εμφανίζει ουσιαστικό ενδιαφέρον και δεν θα μελετηθεί.

Πιν. 4.2:Σενάρια για επιλογή μάζας PCM - Νυρεμβέργη

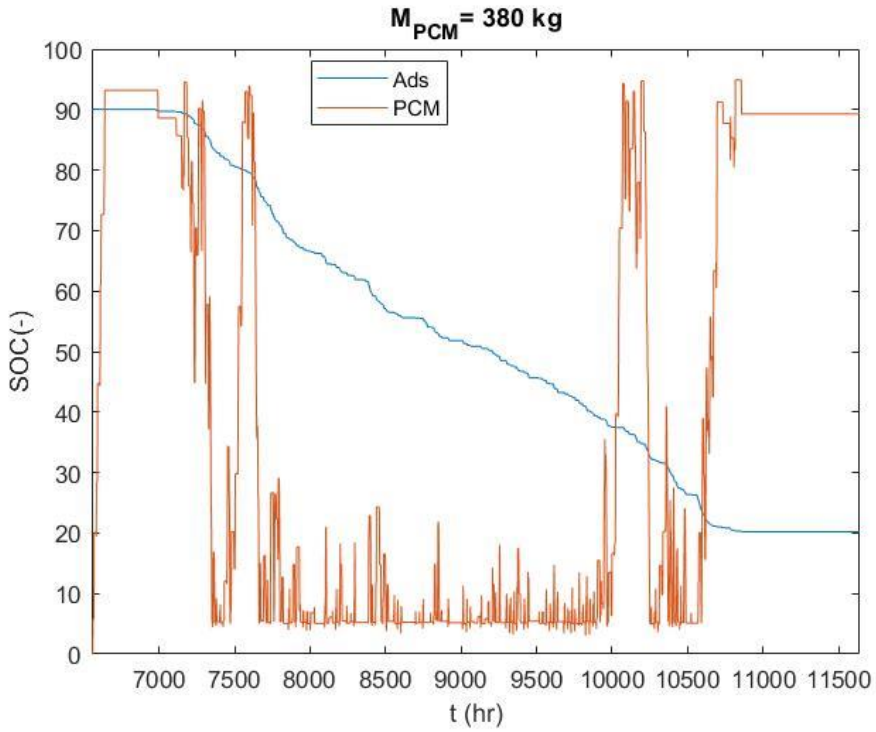
$M_{STES} = 2000\ kg - A_{sol} = 8.00\ m^2$				
Σενάριο	$M_{PCM}\ (kg)$	SOC_{left} (%)	ΔE (kWh)	SF (%)
6α	380	20.20	(-)	61.02
6β	190	22.91	19.8	60.64
6γ	90	25.98	50.8	60.06
6δ	45	30.22	83.0	59.46

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα δεδομένα του Πιν. 4.2, η αλλαγή στη μάζα του PCM επιδρά σημαντικά στην αποφόρτιση του συστήματος, αυξάνοντας μέχρι και 10% το ποσοστό της μη χρησιμοποιούμενης μάζας προσροφητικού υλικού. Ωστόσο η αλλαγή αυτή δεν έχει τον αντίκτυπο που αναμενόταν στο ηλιακό κλάσμα, τόσο λόγο της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας που διακρίνει το προσροφητικό υλικό, αλλά και λόγω της δυνατότητας που παρέχει το συγκεκριμένο υποσύστημα για παράλληλη φόρτιση και αποφόρτισή του. Ως αποτέλεσμα, για μεγάλο μέρος του χρόνου, η λειτουργία προσομοιάζει έναν εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ των ηλιακών συλλεκτών και του ατμοποιητή/συμπυκνωτή της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, ανεξάρτητο της τελικά χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού.

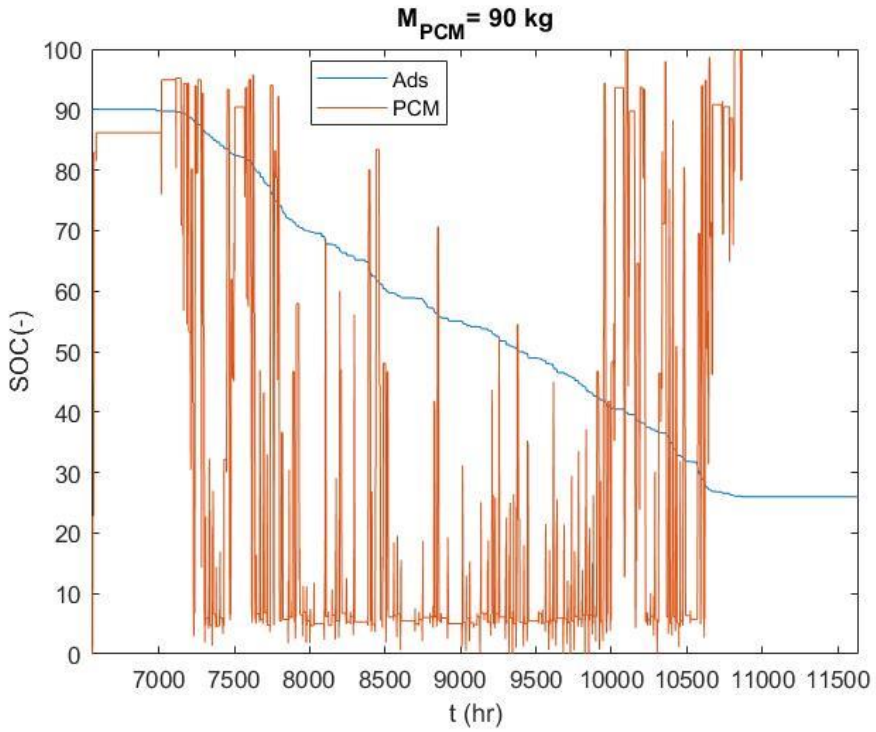
Φυσικά, η σημασία του γίνεται αισθητή, ιδιαίτερα κατά τις νυχτερινές ώρες και για θερμοκρασίες οι οποίες απαγορεύουν τη χρήση του εναλλάκτη αέρα/νερού. Υπό αυτές τις

συνθήκες, η θερμοχωρητικότητά του καθορίζει άμεσα το χρονικό διάστημα λειτουργίας του συστήματος.

Η συνολική του μάζα, σε αντιστοιχία με το σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, επηρεάζει σαφώς τα επίπεδα φόρτισης στα οποία αυτό λειτουργεί για δεδομένη διαθέσιμη συλλεκτική επιφάνεια. Η παραπάνω αντιστοιχία, γίνεται άμεσα εμφανής παρατηρώντας τα γραφήματα που παρουσιάζονται στις Εικ. 4.6 και Εικ. 4.7, για τις περιπτώσεις των 380kg και 90kg αντίστοιχα.



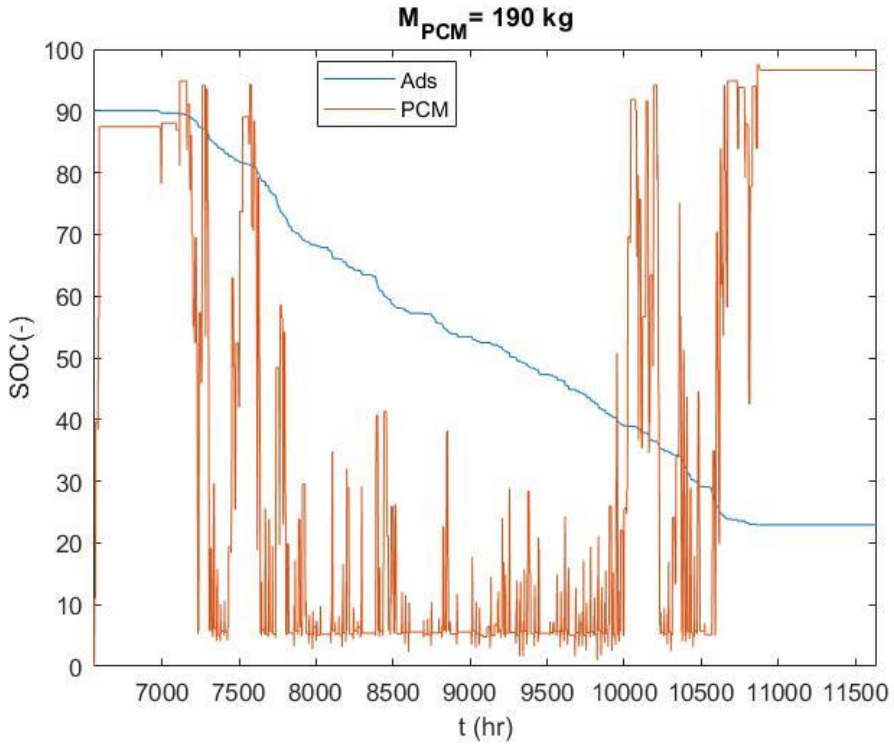
Εικ. 4.6:Καμπύλες λειτουργίας STES-PCM – Σενάριο 6α – Νυρεμβέργη



Εικ. 4.7:Καμπύλες λειτουργίας STES-PCM – Σενάριο 6γ – Νυρεμβέργη

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω γραφήματα, μία μεγάλη μάζα υλικού, λειτουργεί συχνά σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης, όταν οι ηλιακοί συλλέκτες δεν μπορούν να τη φορτίσουν επαρκώς γρήγορα, προσομοιάζοντας περισσότερο την λειτουργία ενός εναλλάκτη θερμότητας. Ως αποτέλεσμα, η επιλογή της κρίνεται ακατάλληλη, καθώς οδηγεί σε μεγάλα ποσοστά μη ωφέλιμου υλικού.

Στην παρούσα μελέτη επιλέγονται 190kg υλικού αλλαγής φάσης, ως η ελάχιστη ποσότητα, η οποία είναι ικανή για επίτευξη του επιθυμητού ηλιακού κλάσματος, λειτουργώντας παράλληλα συνεχώς σε μέσα επίπεδα φόρτισης, όπως φαίνεται και στην Εικ. 4.8. Η τελική διαστασιολόγιση του συστήματος, σε συνδυασμό με αποτελέσματα σχετικά με τη σύγκλιση της προσομοίωσης, δίνονται στον Πιν. 4.3.



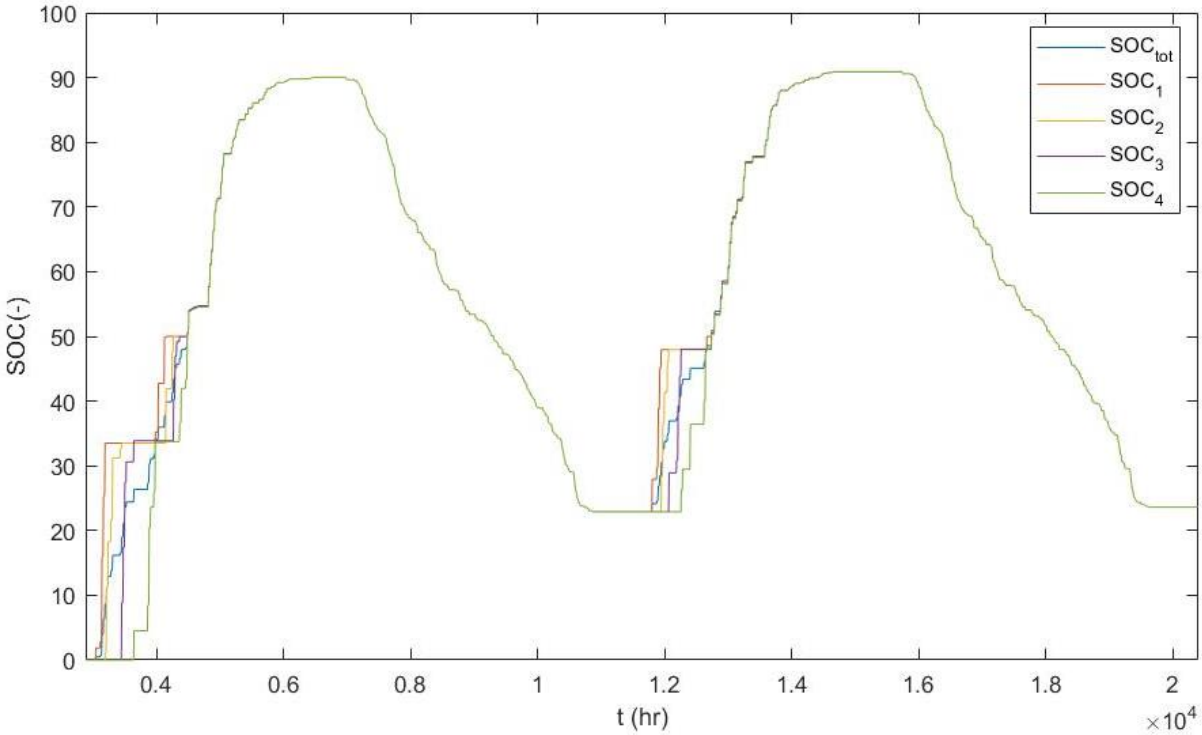
Εικ. 4.8: Καμπύλες λειτουργίας STES-PCM – Σενάριο 6β – Νυρεμβέργη

Πιν. 4.3: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης και προσομοίωσης του συστήματος – Νυρεμβέργη

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα
M_{STES}	2000.00	kg
A_{sol}	8.00	m^2
M_{PCM}	190.00	kg
Σχετική ανοχή σύγκλισης	1.00	%
Ποσοστό μη σύγκλισης	0.22	%
$E_{\sigma\varphi,ZNX}$	0.24	kWh
$E_{\sigma\varphi,\theta\acute{\varepsilon}\rho\mu\alpha\nu\sigma\eta\varsigma}$	1.66	kWh
$E_{\sigma\varphi,tot}$	121.00	kWh

Στην μέχρι στιγμής ανάλυση του συστήματος, για την παραγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, τόσο το σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, όσο και το δοχείο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, έχουν ληφθεί πλήρως αφόρτιστα στην αρχή του χρόνου. Είναι επομένως απαραίτητο να εξεταστεί, η συμπεριφορά του συστήματος, σε περίοδο

δύο ετών, ώστε πλέον οι αρχικές συνθήκες του δεύτερου έτους και ιδιαίτερα τα τελικά επίπεδα αποφόρτισης, να είναι απόρροια μιας τυπικής λειτουργίας, και όχι ενός ιδεατού συστήματος. Στην Εικ. 4.9, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης και συγκεκριμένα η καμπύλη φόρτισης του STES.



Εικ. 4.9: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Διετές Σενάριο – Νυρεμβέργη

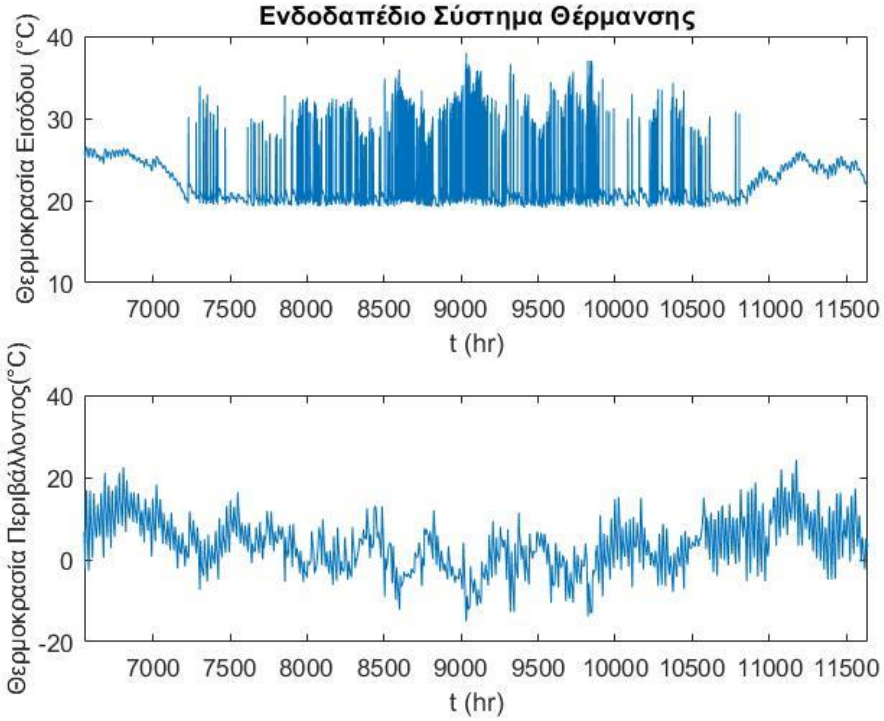
Όπως γίνεται αντιληπτό και από το γράφημα της Εικ. 4.9, το σύστημα συνεχίζει να συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο, ακόμα και όταν δεν έχει αποφορτιστεί πλήρως κατά το προηγούμενο έτος, επιτυγχάνοντας ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα φόρτισης, τα οποία ωστόσο δεν επηρεάζουν την τελική αποφόρτισή του. Το ηλιακό κλάσμα, αντιστοιχεί πλέον στο 59% των συνολικών θερμικών απαιτήσεων, αναδεικνύοντας τον χαρακτηρισμό της μη αποφορτιζόμενης μάζας του συστήματος ως 'dead volume'.

4.1.2 Συνολική λειτουργία του συστήματος

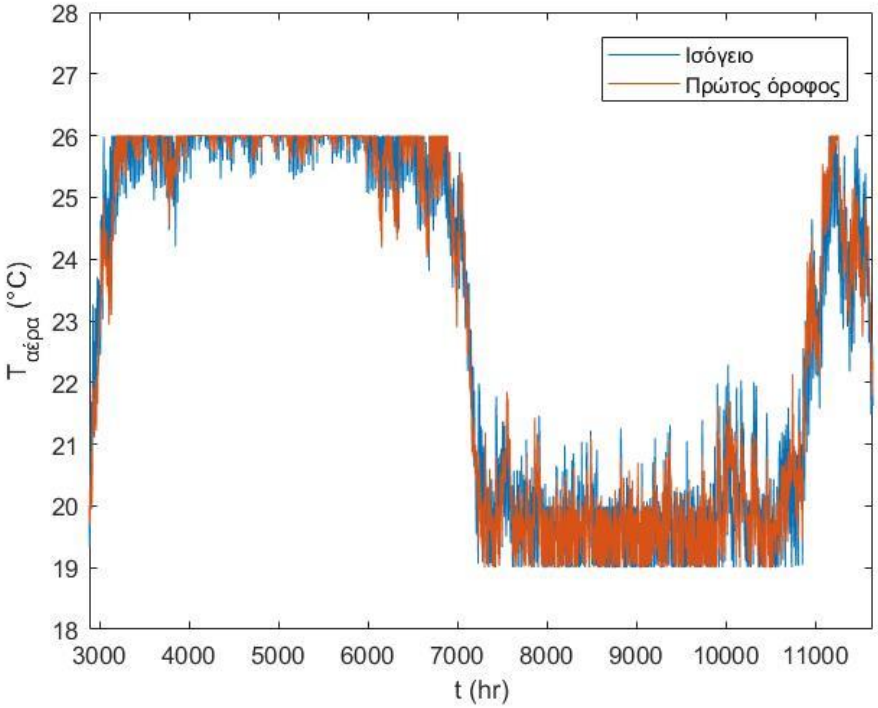
Στο παρόν τμήμα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το σύνολο των υπομονάδων του συστήματος οι οποίες ακόμα δεν έχουν εξεταστεί, όπως η λειτουργία του ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης, το κύκλωμα ZNX καθώς και η συμπεριφορά του δοχείου αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

Ο καθορισμός των φορτίων της οικίας, προκύπτει από απαίτηση για διατήρηση εσωτερικής θερμοκρασίας ίση με $20^oC \pm 1^oC$, η οποία ελέγχεται από κατάλληλο σύστημα θερμοστάτων για κάθε θερμαινόμενο χώρο και επιτυγχάνεται με τη χρήση του ενδοπέδιου συστήματος θέρμανσης. Η παροχή νερού προς τους θερμαινόμενους χώρους είναι σταθερή, με θερμοκρασία εισόδου ωστόσο η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στο εύρος $20^oC < T \leq 38^oC$, όπως απεικονίζεται στην Εικ. 4.10 και η οποία υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις *3.51-3.54*. Παράλληλα, κατά την καλοκαιρινή περίοδο η θερμοκρασία των χώρων διατηρείται σε επίπεδα χαμηλότερα των 26ºC, από ιδεατό σύστημα ψύξης. Για διάρκεια ενός έτους αυτή

απεικονίζεται στην Εικ. 4.11. Όπως γίνεται αντιληπτό, το σύστημα διατηρεί επιτυχώς τη θερμοκρασία του χώρου στα επιθυμητά επίπεδα ($> 19^oC$), με τις παρατηρούμενες αυξομειώσεις να είναι αποτέλεσμα, και της παράλληλης ανόδου της εξωτερικής θερμοκρασίας.

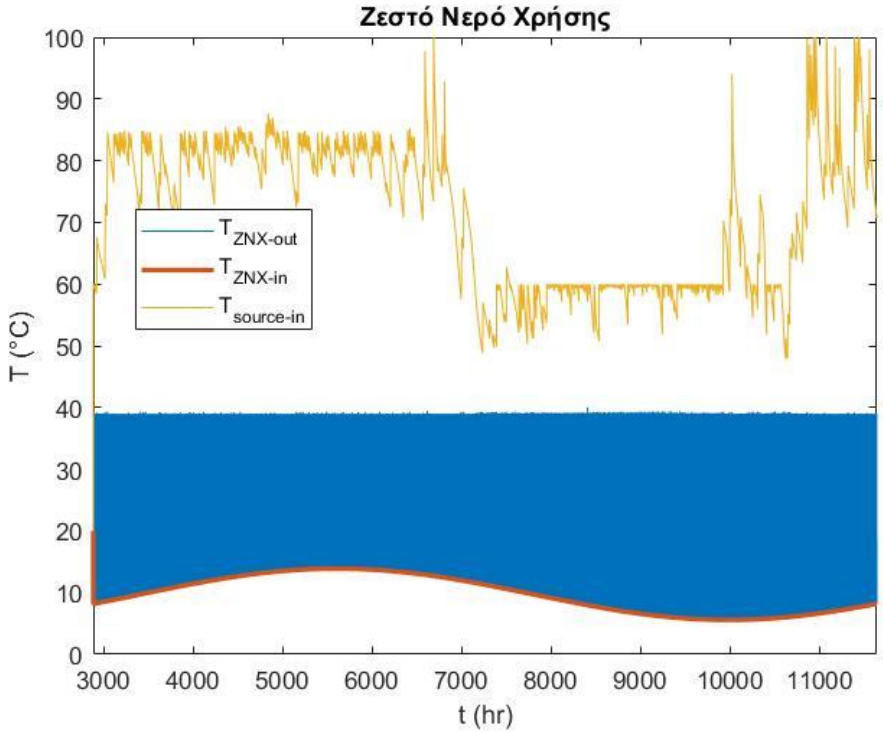


Εικ. 4.10: Θερμοκρασία προσαγωγής νερού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης (Πάνω), Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Κάτω) – Νυρεμβέργη



Εικ. 4.11: Θερμοκρασία αέρα θερμαινόμενων χώρων οικίας nZEB – Νυρεμβέργη

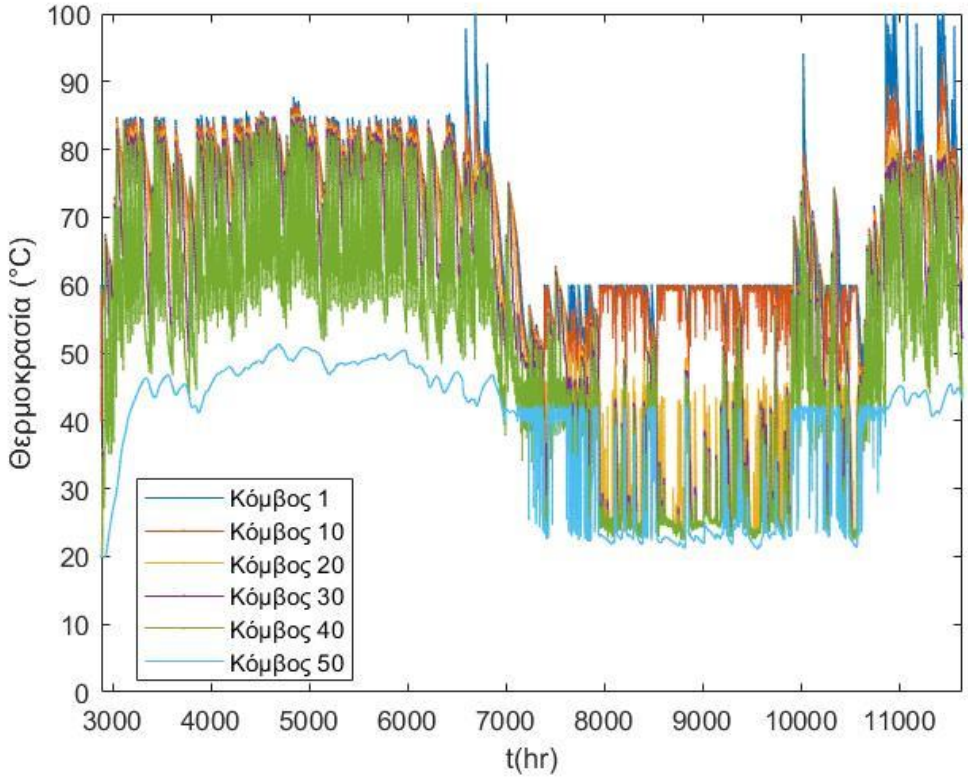
Στην Εικ. 4.12, απεικονίζεται η απαίτηση για ΖΝΧ, με την θερμοκρασία του να ρυθμίζεται σταθερή, στους 39°C, μέσω της τρίοδης ρυθμιστικής βαλβίδας.



Εικ. 4.12: Θερμοκρασίαk παροχής ZNX προς καταναλώσεις – Νυρεμβέργη

Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στη θερμοκρασία νερού δικτύου, ενώ η κίτρινη στη θερμοκρασία νερού με την οποία τροφοδοτείται ο εναλλάκτης ZNX, από το δοχείο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες παρατηρούνται κατά το τέλος της προσομοίωσης, είναι αποτέλεσμα της υψηλής συλλεκτικής επιφάνειας και της ανικανότητας του συστήματος να καταναλώσει την προσδιδόμενη ηλιακή ενέργεια. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, αυτή δεν διατηρείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα, επιτρέποντας την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Για την πληρότητα της παρουσίασης παρουσιάζεται και η διαστρωμάτωση η οποία επιτυχγάνεται στο δοχείο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, όπως αυτή απεικονίζεται για όλη τη διάρκεια του έτους στην Εικ. 4.13.



Εικ. 4.13: Θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση δοχείου αποθήκευσης αισθητής θερμότητας – Νυρεμβέργη

Οι κόμβοι στο παραπάνω υπόμνημα αυξάνονται από την κορυφή προς τον πυθμένα του δοχείου. Η παρούσα απεικόνιση δίνει μια πρώτη εικόνα της συμπεριφοράς του. Δεδομένου πως η έξοδος των ηλιακών έχει τοποθετηθεί στον κόμβο 40, παρατηρείται πως ο πυθμένας του δοχείου παραμένει σχετικά ανεπηρέαστος από τις ροές των υπόλοιπων ρευμάτων κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, καθώς θερμότητα συναλλάσεται με αυτόν μόνο με αγωγή. Η κινητική του μπορεί να χαρακτηριστεί σχετικά γρήγορη, δεδομένου πως επιτυγχάνει θερμοκρασιακή άνοδο τουλάχιστον 25°C, σε διάστημα 20 ημερών. Κατά τη χειμερινή περίοδο, η θερμοκρασία κορυφής διατηρείται σταθερή σε θερμοκρασιακά επίπεδα μεγαλύτερα των 50° C, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις σε ΖΝΧ. Παράλληλα από τον κόμβο 20 και κάτω, παρατηρείται πως εκείνη την περίοδο το χαμηλό επίπεδο ηλιοφάνειας, επιτρέπει την επίτευξη θερμοκρασιών, ελαφρά μεγαλύτερων των 40° C από τους ηλιακούς συλλέκτες. Η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, λαμβάνει νερό από τον πυθμένα του δοχείου, το οποίο και θερμαίνει, επιτυγχάνοντας θερμοκρασιακή ανύψωση ίση 5° C, μέσω κατάλληλης ρύθμισης της παροχής της αντλίας, βοηθώντας στην κάλυψη των απαιτήσεων του ενδοδαπέδιου συστήματος θερμότητας. Η παραπάνω θερμοκρασιακή ανύψωση, γίνεται αντιληπτή παρατηρώντας τους κόμβους 40 και 50.

4.2 Στοκχόλμη

Η Στοκχόλμη αντιπροσωπεύει μια κλασσική βορειοευρωπαϊκή πόλη, χαρακτηριζόμενη από χειμώνες μακράς διαρκείας, με θερμοκρασίες υπό του μηδενός. Για την αντιμετώπιση των θερμοκρασιακών περιορισμών που επιβάλλει η μονάδα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας και την επίτευξη απρόσκοπτης λειτουργίας του συστήματος επιλέγεται η διάταξη γεωθερμικού εναλλάκτη για τη μελέτη συμπεριφοράς του.

4.2.1 Διαστασιολόγηση του συστήματος

Στον Πιν. 4.4, παρουσιάζονται τα σενάρια που μελετήθηκαν για την διαστασιολόγηση του συστήματος.

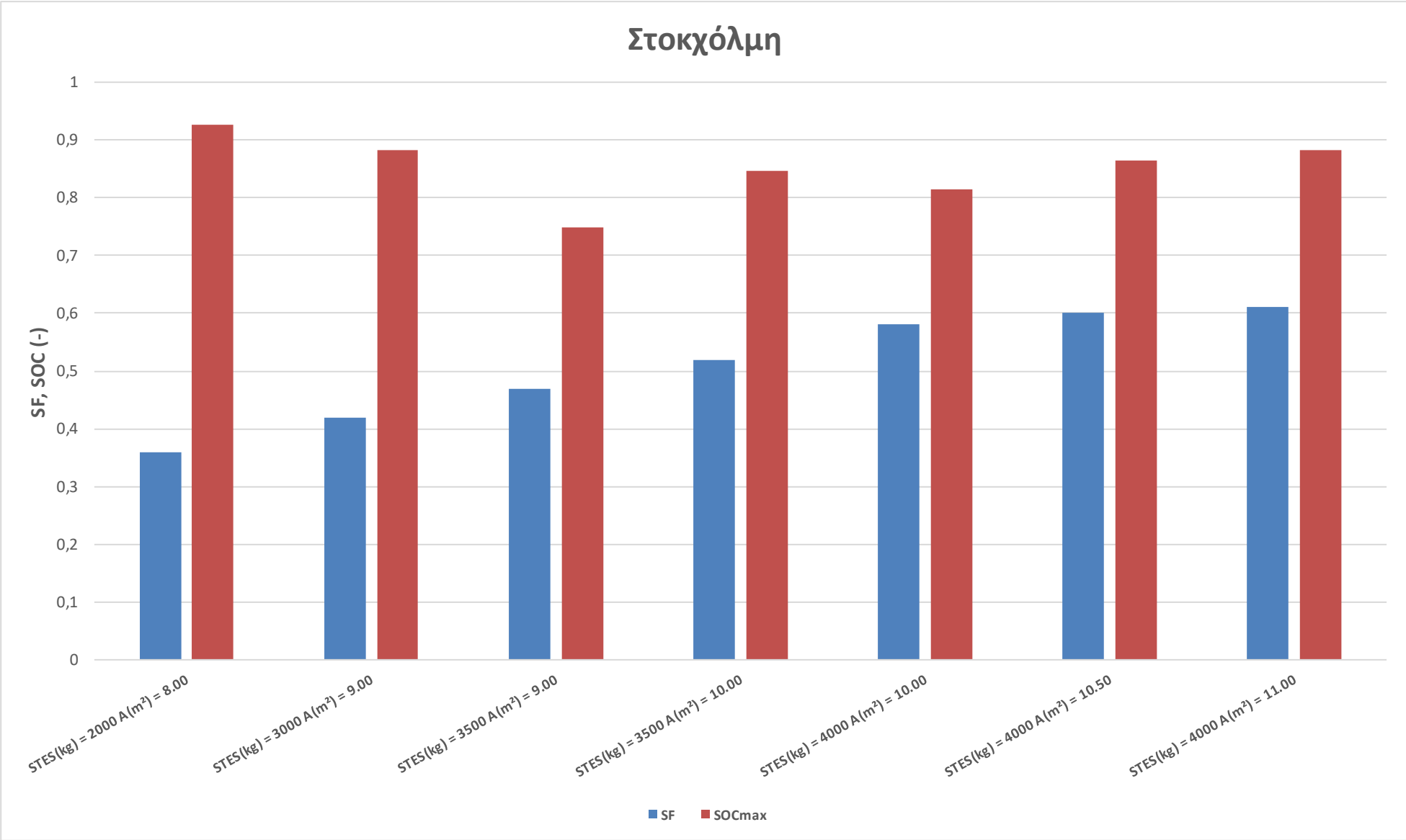
Πιν. 4.4: Σενάρια διαστασιολόγησης συστήματος STES – Στοκχόλμη

Σενάριο	M_{STES} (kg)	A_{sol} (m^2)
1	2000	8.00
2	3000	9.00
3	3500	9.00
4	3500	10.00
5	4000	10.00
6	4000	10.50
7	4000	11.00

Ως αρχικό σενάριο χρησιμοποιήθηκε εκείνο που έχει επιλεγεί ως κατάλληλο για το σύστημα της Νυρεμβέργης, ώστε να δωθεί μια πρώτη εκτίμηση του επιπέδου που πρέπει να αυξηθεί, τόσο η συλλεκτική επιφάνεια όσο και η συνολική μάζα προσροφητικού υλικού, για την επίτευξη του επιθυμητού ηλιακού κλάσματος.

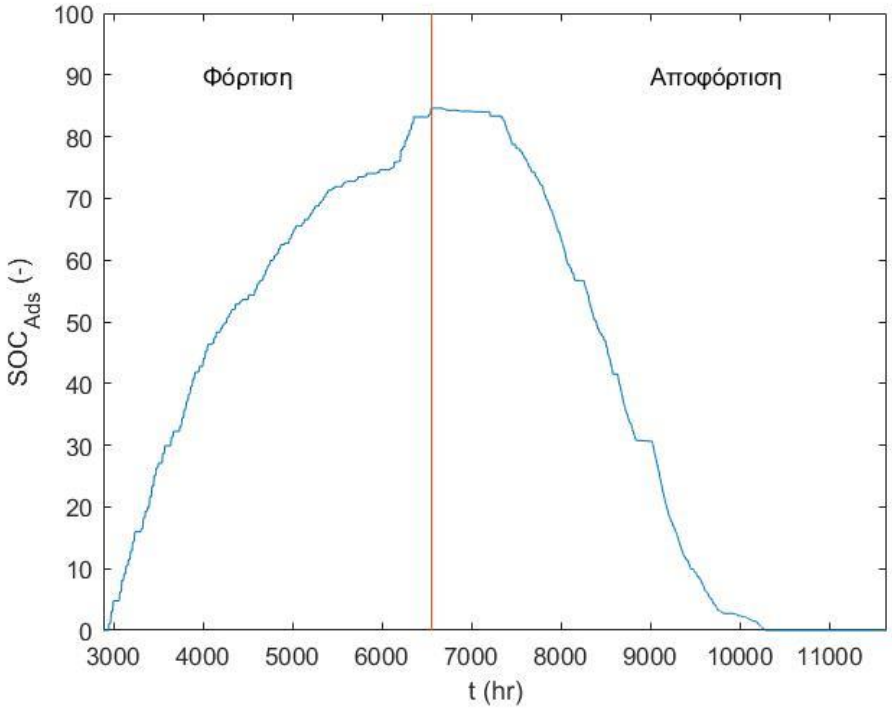
Στην Εικ. 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το ηλιακό κλάσμα καθώς και τα μέγιστα και ελάχιστα επίπεδα, φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης.

Όπως ήταν αναμενόμενο, και σε αυτήν την περίπτωση, η αύξηση της μάζας του προσροφητικού υλικού και της συλλεκτικής επιφάνειας, οδηγεί σε συνεχώς αυξανόμενα επίπεδα ηλιακού κλάσματος, ωστόσο με μειωμένο ρυθμό.



Εικ. 4.14: Ηλιακό κλάσμα και μέγιστο επίπεδο φόρτισης συστήματος STES – Στοκχόλμη

Σε αντιστοιχία με την περίπτωση της Νυρεμβέργης, μια ανεπαρκής αναλογικά με τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις μάζα προσροφητικού υλικού, παρότι οδηγεί σε υψηλά επίπεδα φόρτισης, αποφορτίζεται πλήρως, νωρίτερα του τέλους της περιόδου θέρμανσης, όπως γίνεται φανερό από το γράφημα της Εικ. 4.15.

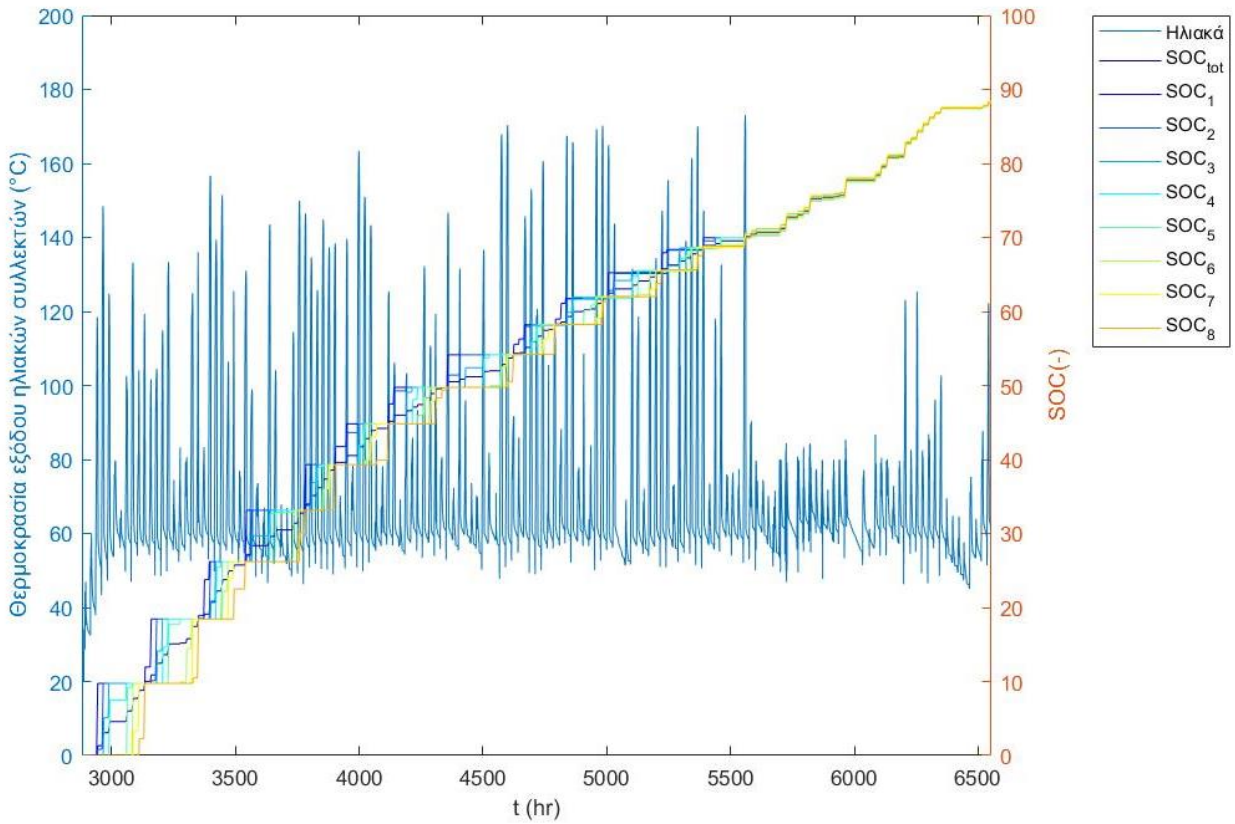


Εικ. 4.15: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Σενάριο 4- Στοκχόλμη

Η ταχεία αποφόρτιση που παρατηρείται στην παραπάνω εικόνα οφείλεται στη διάταξη του γεωθερμικού εναλλάκτη, ο οποίος παρέχει συνεχώς νερό κατάλληλης θερμοκρασίας στον ατμοποιητή της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, ώστε να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη λειτουργία της. Σε αντίθεση με την περίπτωση της Νυρεμβέργης, η διαστασιολόγηση του συστήματος γίνεται πιο άμεσα, λόγω της μείωσης των εμπλεκόμενων παραμέτρων και συγκεκριμένα της μάζας του υλικού αλλαγής φάσης. Σε αυτή την περίπτωση ωστόσο εισάγεται μια νέα έμμεση παράμετρος διαστασιολόγησης, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Η σειριακή φόρτιση των υπομονάδων του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, καταφέρνει να αποτρέψει την απαίτηση μεγάλων θερμικών φορτίων, οδηγώντας σε μια πιο ομαλή λειτουργία. Σε αντίθετη περίπτωση, για δεδομένη μέγιστη ογκομετρική παροχή, τόσο από την πλευρά των ηλιακών συλλεκτών όσο και από την πλευρά του κυκλώματος θέρμανσης, οι μεγάλες θερμοκρασιακές πτώσεις, θα οδηγούσαν σε συνεχή εναλλαγή των καταστάσεων λειτουργίας του συστήματος. Γίνεται επομένως αντιληπτό πως ακόμα και για την μικρότερη σε μάζα, διαθέσιμη υπομονάδα του συστήματος, υπάρχει μια ελάχιστη απαίτηση σε συλλεκτική επιφάνεια, ώστε να επιτευχθεί ομαλή λειτουργία, ιδιαίτερα κατά τα αρχικά στάδια φόρτισης.

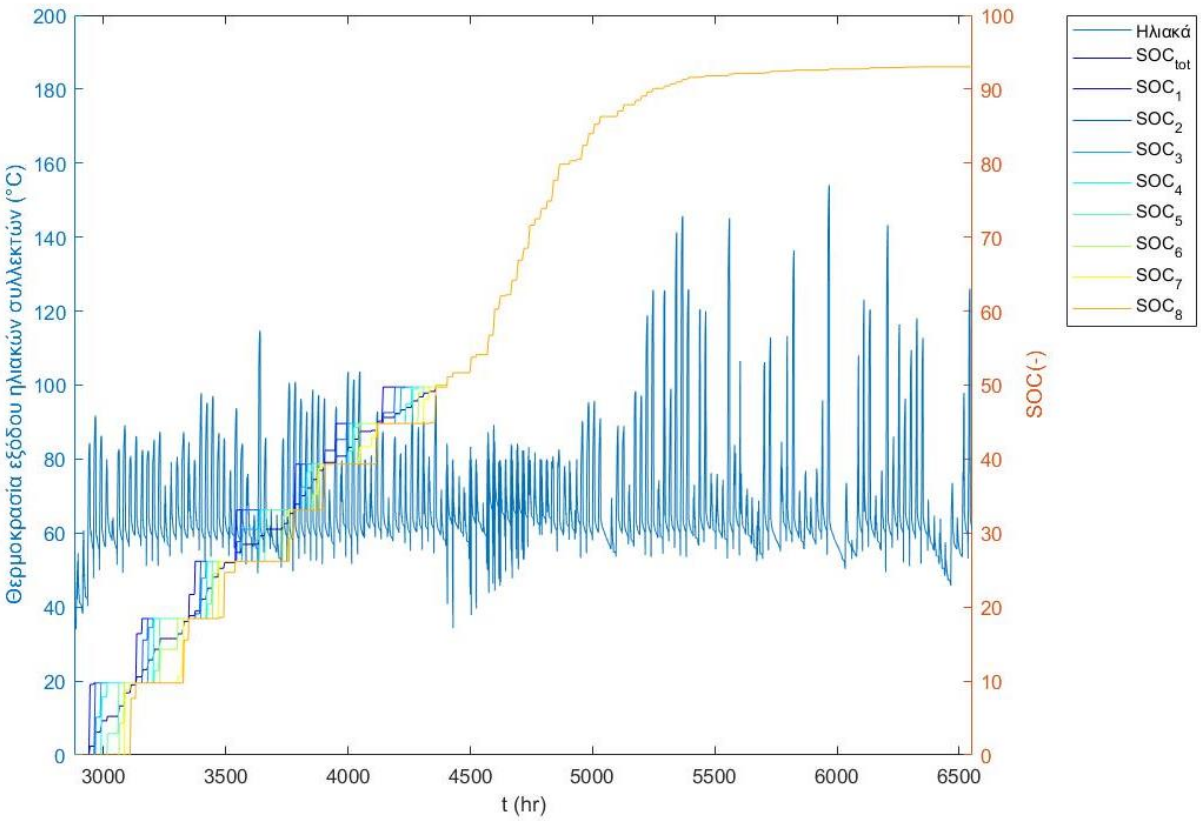
Ωστόσο, αν και η σειριακή φόρτιση λύνει το συγκεκριμένο πρόβλημα, δημιουργεί αντίστοιχα προβλήματα υπερθέρμανσης, όταν οι απαιτήσεις του συστήματος σε συλλεκτική επιφάνεια είναι αυξημένες, όπως στην περίπτωση της Στοκχόλμης. Συγκεκριμένα, μια μεγάλη αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας προσφέρει μεγαλύτερα θερμαντικά φορτία, από αυτά που μπορεί να απορροφήσει μια υπομονάδα του συστήματος, όπως γίνεται φανερό και στην Εικ. 4.16.



Εικ. 4.16: Καμπύλη θερμοκρασίας – επιπέδων φόρτισης – Σενάριο 7 – Παράλληλη φόρτιση για SoC>70% - Στοκχόλμη

Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί, στο παρόν μοντέλο με δοκιμές για την εύρεση του κατάλληλου επιπέδου φόρτισης, πέραν του οποίου το σύνολο των υπομονάδων τροφοδοτείται παράλληλα. Απώτερος σκοπός είναι η κατά το δυνατόν μείωση των υψηλών θερμοκρασιών που εμφανίζονται στο σύστημα, με παράλληλη διατήρηση των απαιτούμενων φορτίων σε επίπεδα που μπορούν να καλύψουν οι ηλιακοί συλλέκτες. Στην Εικ. 4.17, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από εφαρμογή παράλληλης τροφοδότησης των υπομονάδων, για επίπεδα φόρτισης μεγαλύτερα του 50%.

Όπως γίνεται αντιληπτό η παράλληλη φόρτιση όλων των υπομονάδων του συστήματος αντικατοπτρίζει μια αυξημένη ταχύτητα φόρτισης, η οποία ωστόσο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα παρατηρώντας την καμπύλη θερμοκρασίας εξόδου των ηλιακών συλλεκτών στο διάστημα $4300\,hr \leq t \leq 4800\,hr$, εντοπίζεται εύκολα η μεγάλη θερμοκρασιακή πτώση που δημιουργείται κάθε φορά που πραγματοποιείται φόρτιση του συστήματος, ως αποτέλεσμα του αυξημένου φορτίου που επιβάλλει το σύστημα. Για την τελική διαστασιολόγιση του συστήματος, η οποία παρουσιάζεται στον Πιν. 4.5, επιλέγεται κατάλληλο επίπεδο για την εφαρμογή παράλληλης φόρτισης όλων των υπομονάδων, τέτοιο ώστε να αποφεύγονται, οι ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές.

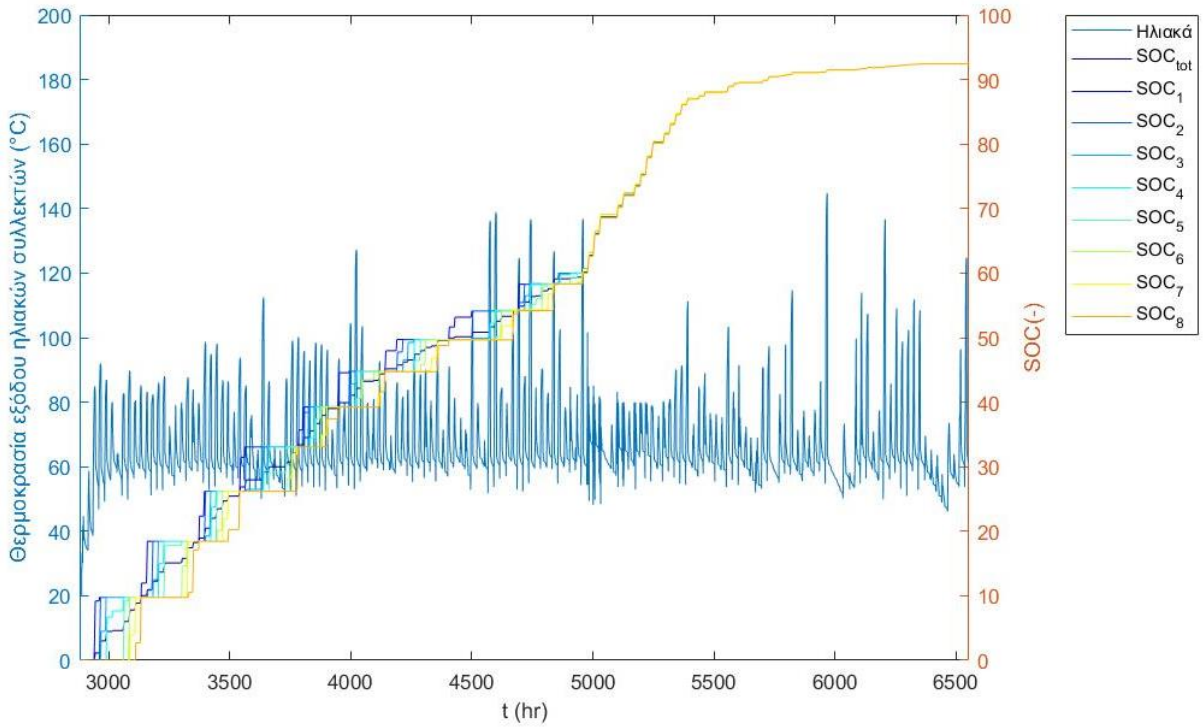


Εικ. 4.17: Καμπύλη θερμοκρασίας – επιπέδων φόρτισης – Σενάριο 7 – Παράλληλη φόρτιση για SoC>50% - Στοκχόλμη

Πιν. 4.5: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης και προσομοίωσης του συστήματος – Στοκχόλμη

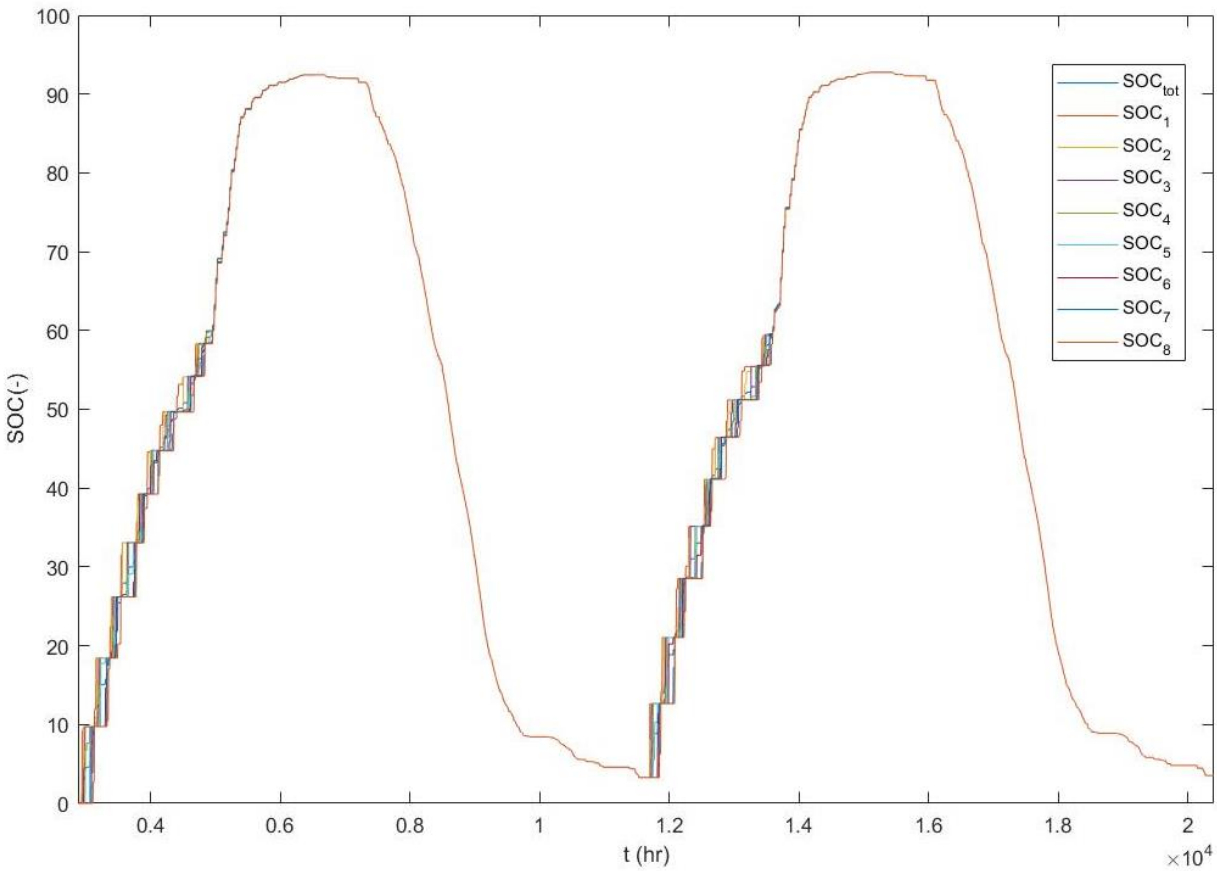
Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα
M_{STES}	4000.00	kg
A_{sol}	11.00	m^2
$SoC\ \pi\rho o\ \pi\alpha\rho\acute{\alpha}\lambda\lambda\eta\lambda\eta\varsigma\ \varphi\acute{o}\rho\tau\iota\sigma\eta\varsigma$	60.00	%
Σχετική ανοχή σύγκλισης	1.00	%
Ποσοστό μη σύγκλισης	0.38	%
$E_{\sigma\varphi,ZNX}$	0.45	kWh
$E_{\sigma\varphi,\theta\acute{\varepsilon}\rho\mu\alpha\nu\sigma\eta\varsigma}$	-13.70	kWh
$E_{\sigma\varphi,tot}$	250.00	kWh

Παράλληλα στην Εικ. 4.18 παρουσιάζεται η καμπύλη θερμοκρασίας συλλεκτών και επιπέδου φόρτισης για, την επιλεγμένη διαστασιολόγηση.



Εικ. 4.18: Καμπύλη θερμοκρασίας – επιπέδων φόρτισης – Σενάριο 7 – Παράλληλη φόρτιση για SoC>60% - Στοκχόλμη

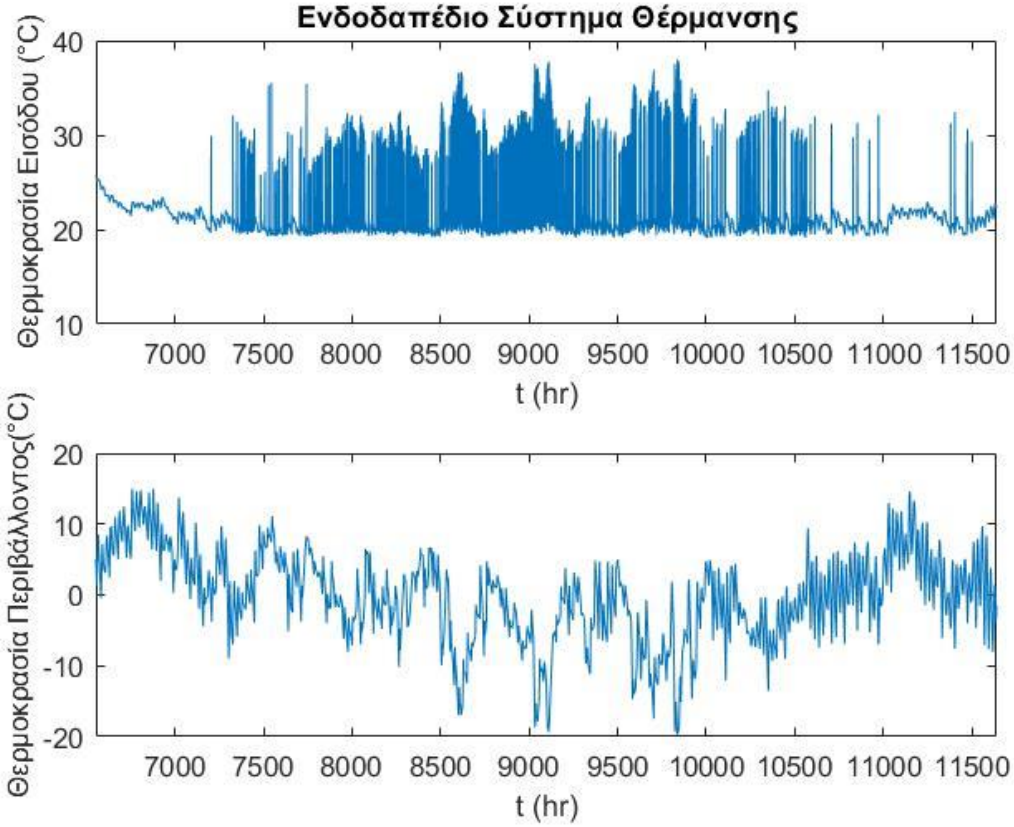
Όπως γίνεται αντιληπτό, υπάρχει σαφής μείωση του μέσου θερμοκρασιακού επιπέδου, στην έξοδο των ηλιακών συλλεκτών, με αποφυγή αιχμών οι οποίες υπερβαίνουν τους 140° C. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί, πως σημαντικό μέρος των παρατηρούμενων θερμοκρασιακών αιχμών, είναι αποτέλεσμα και της μη σύγκλισης των ελεγκτών του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, το σήμα ελέγχου μιας αντλίας μπορεί να τεθεί συχνά ίσο με το κατώτατο όριο, οδηγώντας σε πολύ μικρές παροχές και αντίστοιχα πολύ μεγάλες θερμοκρασιακές ανυψώσεις. Η παραπάνω συμπεριφορά είναι απόρροια και του επιλεγμένου χρονικού βήματος ($\Delta t = 0.1$ hr), το οποίο είναι σαφώς μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται σε ελεγκτές του εμπορίου. Συνεπώς στην πραγματική λειτουργία, αναμένεται μια πιο ομαλή μετάβαση στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος, καθώς και ένας σαφώς βελτιωμένος έλεγχος αυτού.
Για την πληρότητα της παρουσίασης των αποτελεσμάτων και σε αντιστοιχία με την Νυρεμβέργη στην Εικ. 4.19, παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σε προσομοίωση δύο συναπτών ετών.



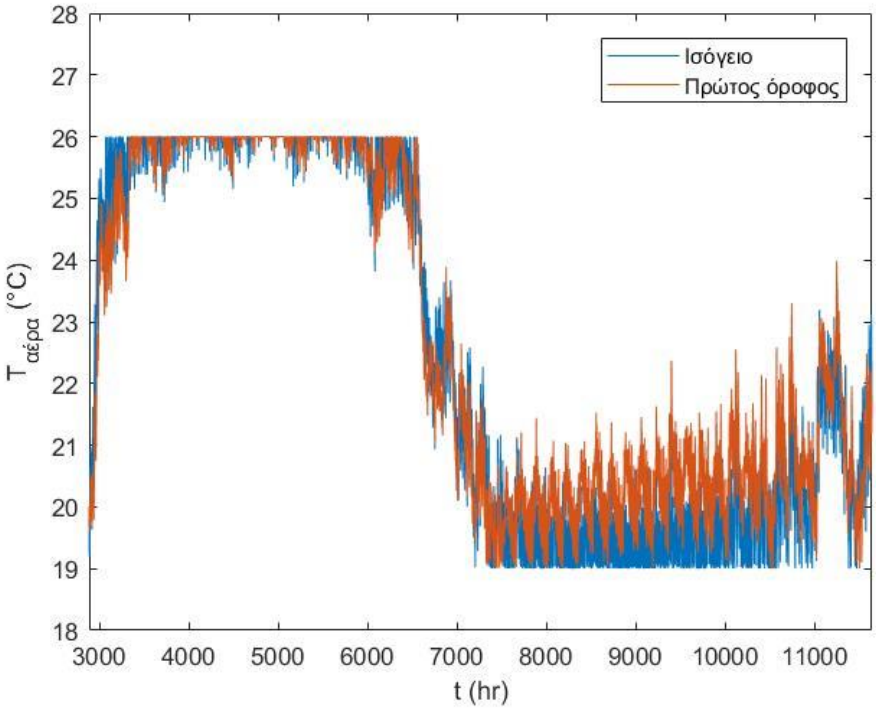
Εικ. 4.19: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης συστήματος STES – Διετές Σενάριο – Στοκχόλμη

4.2.2 Συνολική λειτουργία του συστήματος

Σε αντιστοιχία με τη Νυρεμβέργη, στην Εικ. 4.20 παρουσιάζεται η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης, η οποία και σε αυτή την περίπτωση ρυθμίζεται σύμφωνα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος στο εύρος $20^oC < T \leq 38^oC$. Αντίστοιχα στην Εικ. 4.21, παρουσιάζεται η εσωτερική θερμοκρασία των δύο θερμικών ζωνών της οικίας, όπως αυτή διαμορφώνεται από τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης και του ιδεατού συστήματος ψύξης. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε πως η θερμοκρασία του πρώτου κυρίως ορόφου, εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένη, προς το τέλος της περιόδου θέρμανσης, υποδηλώνοντας την ανάγκη για βελτίωση του συστήματος ελέγχου του ενδοδαπέδιου συστήματος της οικίας, με παράλληλο έλεγχο και της παροχής εισόδου. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, η παρατηρούμενη συμπεριφορά αποτελεί απόρροια και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπως γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικ. 4.20 για την αντίστοιχη χρονική περίοδο.

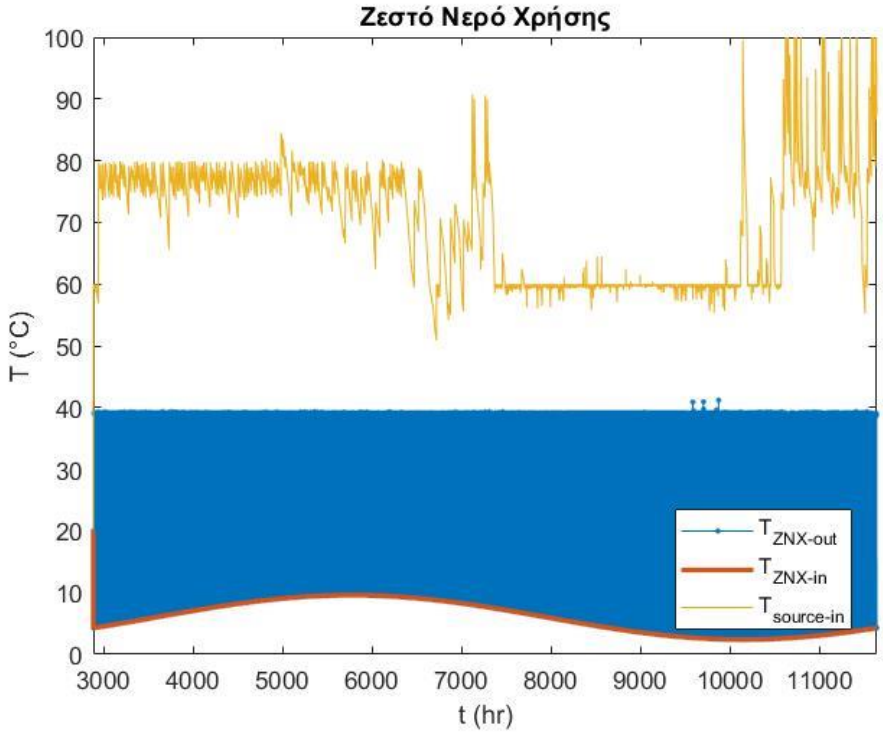


Εικ. 4.20: Θερμοκρασία προσαγωγής νερού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης (Πάνω), Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Κάτω) – Στοκχόλμη



Εικ. 4.21: Θερμοκρασία αέρα θερμαινόμενων χώρων οικίας nZEB – Στοκχόλμη

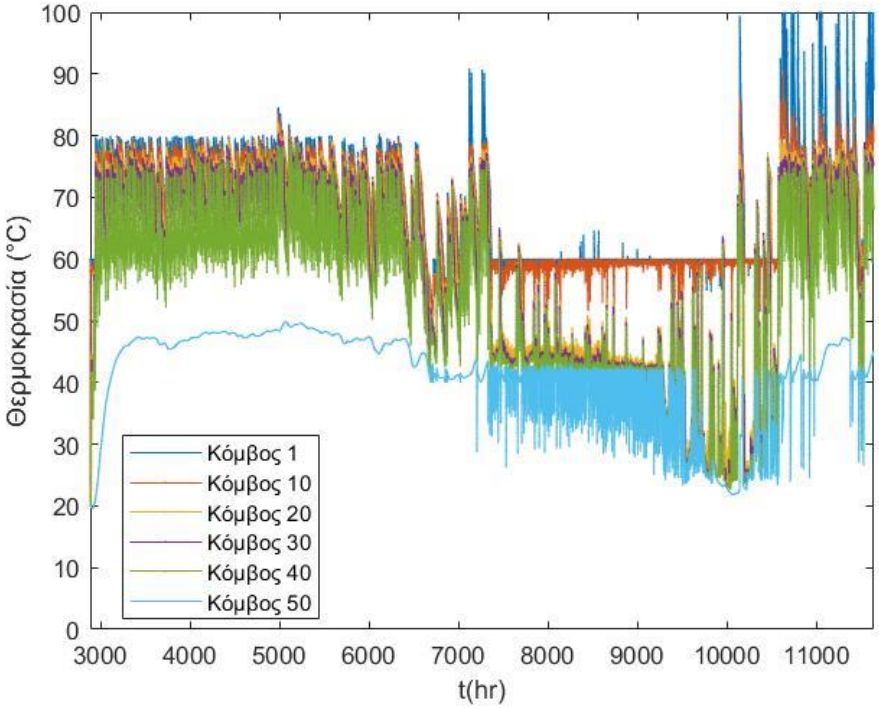
Η απαίτηση για ZNX, απεικονίζεται στην Εικ. 4.22 με την θερμοκρασία του να ρυθμίζεται και σε αυτή την περίπτωση, σταθερή στους 39ºC, μέσω της τρίοδης ρυθμιστικής βαλβίδας.



Εικ. 4.22: Θερμοκρασίαk παροχής ZNX προς καταναλώσεις – Νυρεμβέργη

Ο χρωματικός κώδικας παραμένει σταθερός, και ίδιος με την περίπτωση της Νυρεμβέργης, με την κόκκινη γραμμή να αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία του νερού δικτύου και τη κίτρινη, την θερμοκρασία εξόδου του νερού από το δοχείο λανθάνουσας θερμότητας. Οι υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται στο τέλος της περιόδου φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα, οφείλονται στην ανικανότητα του συστήματος για απόρριψη ή απορρόφηση του φορτίου των ηλιακών συλλεκτών. Στην παρούσα περίπτωση ωστόσο, η διάρκεια εμφάνισης υψηλών θερμοκρασιών είναι σημαντικά μεγαλύτερη, φανερώνοντας την επιπλέον αδυναμία του συστήματος, για ασφαλή λειτουργία όταν γίνεται χρήση μεγάλων συλλεκτικών επιφανειών.

Η παραπάνω κατάσταση γίνεται εμφανής και από το διάγραμμα της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης του δοχείου αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως αυτό απεικονίζεται στην Εικ. 4.23. Σε αντιστοιχία με την περίπτωση της Νυρεμβέργης, η αρχική θέρμανση του, πραγματοποιείται σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ παραμένει σχετικά σταθερή στο υπόλοιπο της περιόδου, καθοριζόμενη μόνο από φαινόμενα αγωγής και απωλειών πυθμένα, δεδομένου, πως η έξοδος των ηλιακών πραγματοποιείται σε υψηλότερη στάθμη. Αντίθετη πλήρως εικόνα, παρατηρείται κατά την περίοδο θέρμανσης, όπου πλέον η θερμοκρασία κορυφής καθορίζεται από τη λειτουργία του καυστήρα, με τη μέση θερμοκρασία εξόδου των ηλιακών, να εντοπίζεται στους 45ºC. Παράλληλα, επιβεβαιώνεται και η λειτουργία του δοχείου, με την είσοδο εκάστοτε ρεύματος να γίνεται στον πλησιέστερο θερμοκρασιακό κόμβο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ηλιακοί συλλέκτες, δεδομένου πως αυτή πραγματοποιείται στην κορυφή του δοχείου, κατά τη θερινή περίοδο, και στο μέσο ύψος αυτού κατά τους χειμερινούς μήνες (κόμβοι 20-30).



Εικ. 4.23: Θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση δοχείου αποθήκευσης αισθητής θερμότητας - Στοκχόλμη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ευρωπαϊκός Χάρτης

Οι πόλεις οι οποίες μελετήθηκαν μέχρι στιγμής (Νυρεμβέργη και Στοκχόλμη), δίνουν μια πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Ωστόσο για την καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της λειτουργίας του, είναι απαραίτητο να εξεταστεί ένα πλήθος πόλεων, ώστε να αναγνωριστούν οι κύριες παράμετροι επηρεασμού καθώς και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Το σύνολο των υπό εξέταση πόλεων δίνεται στον Πιν. 5.1.

Πιν. 5.1: Πόλεις υπό εξέταση

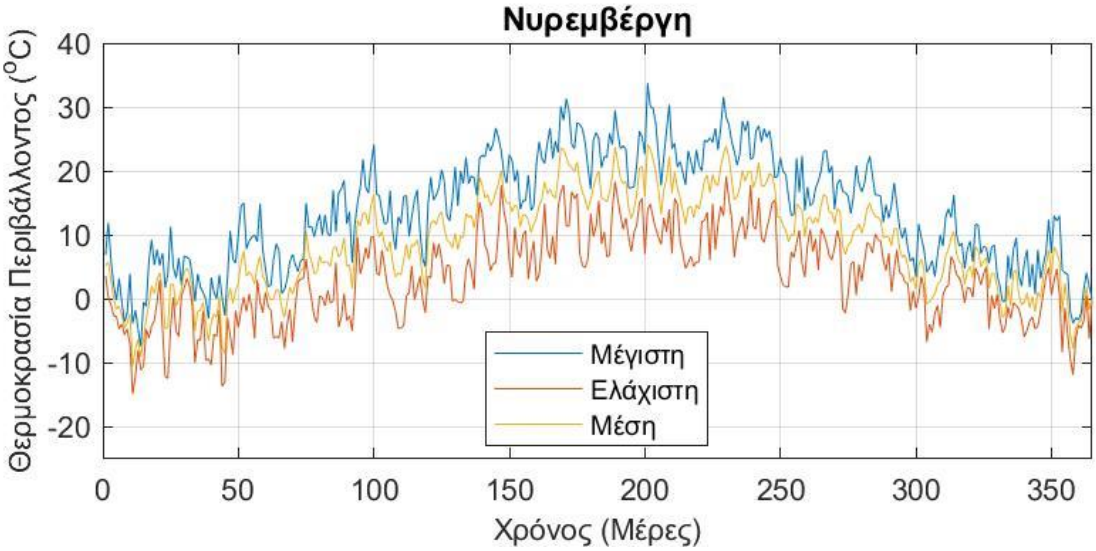
Χώρα	***Πόλη***
Γερμανία	Νυρεμβέργη
Ελβετία	Ζυρίχη
Ιρλανδία	Δουβλίνο
Ολλανδία	Άμστερνταμ
Πολωνία	Βαρσοβία
Ρουμανία	Βουκουρέστι
Σουηδία	Στοκχόλμη

Στη συνέχεια απεικονίζονται ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία για κάθε πόλη, όπως η μέση ημερήσια θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία, τα οποία αντλούνται από την μετεωρολογική βάση Meteonorm [91]. Για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης για τη λειτουργία του ατμοποιητή/προσροφητή της μονάδας, ελέγχεται η αλλαγή σε τελικό επίπεδο αποφόρτισης του συστήματος, μεταξύ των δύο διαθέσιμων, χρησιμοποιώντας και ως γνώμονα την διάρκεια εμφάνισης χαμηλών θερμοκρασιών ώστε να αποφεύγονται άσκοπες επαναλήψεις.

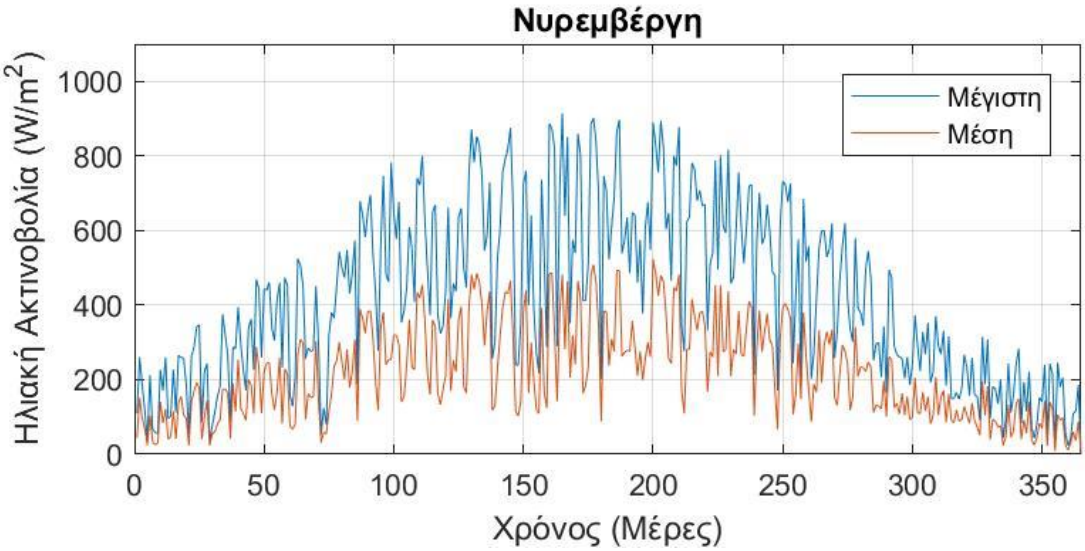
5.1 Νυρεμβέργη

Όπως απεικονίζεται και στην Εικ. 5.1 η Νυρεμβέργη χαρακτηρίζεται από χαμηλές θερμοκρασίες καθ'όλη τη διάρκεια του έτους, με ιδιαίτερη εμφάνιση κατά την χειμερινή περίοδο. Το γεγονός αυτό συνδυαζόμενο με τους θερμοκρασιακούς περιορισμούς που επιβάλλει η λειτουργία του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, καθώς και η θερμοχωρητικότητα του δοχείου αδρανείας, καθορίζουν άμεσα την συμπεριφορά αποφόρτισης καθώς και τις περιόδους αδράνειας του συστήματος. Ιδιαίτερα σε περιόδους, συνεχόμενων ημερών με θερμοκρασίες υπό του μηδενός, όπως στις αρχές Ιανουαρίου και τέλη Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου, η μάζα του PCM, η οποία προσδιορίστηκε στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4, καθορίζει πλήρως την διαθεσιμότητα του συστήματος.

Αντίθετα η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία απεικονίζεται στην Εικ. 5.2, επηρεάζει σαφώς την περίοδο φόρτισης του συστήματος, η οποία επιλέγεται για διάστημα στο οποίο η μέση τιμή της παραμένει υψηλή και σταθερή γύρω από τη μέγιστη τιμή της. Χαρακτηριστικά για την Νυρεμβέργη η περίοδος αυτή αντιστοιχεί σε διάστημα περίπου 150 ημερών, με αφετηρία την 1^{η} Μαϊου. Χαρακτηριστικά μεγέθη για τα κλιματολογικά δεδομένα της Νυρεμβέργης, δίδονται στον Πιν. 5.2.



Εικ. 5.1: Θερμοκρασιακά προφίλ Νυρεμβέργης



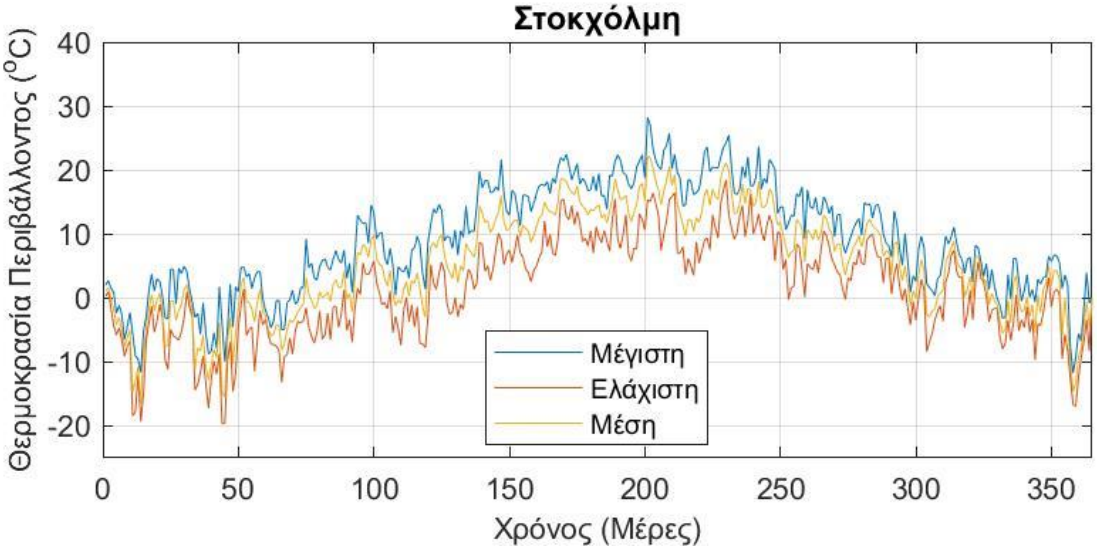
Εικ. 5.2:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Νυρεμβέργης

Πιν. 5.2: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Νυρεμβέργης

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Μέγιστη Θερμοκρασία	33,75	(ºC)
Ελάχιστη Θερμοκρασία	-14,90	(ºC)
Ποσοστό χρόνου με θερμοκρασίες υπό το μηδέν	16,74	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια	49,76	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια και επίπεδα ακτινοβολίας μεγαλύτερα των 500 W/m^2	14,32	(%)

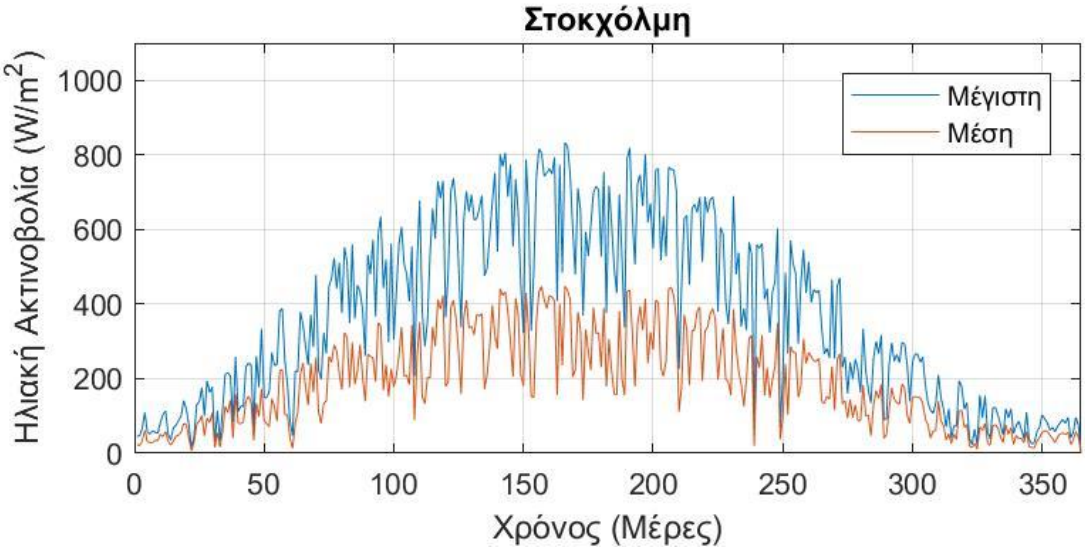
5.2 Στοκχόλμη

Η Στοκχόλμη είναι μια βορειο-ευρωπαϊκή πόλη, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλες περιόδους θερμοκρασιών υπό το μηδέν. Ως αποτέλεσμα, η επιλογή του συστήματος με χρήση της διαμόρφωσης εναλλάκτη αέρα και PCM, καθίσταται απαγορευτική, καθώς μειώνει υπερβολικά την διάρκεια λειτουργίας του πρώτου, επιβάλλοντας παράλληλα άμεση εξάρτηση της λειτουργίας του συστήματος από την συνολική αδράνεια της μάζας του υλικού αλλαγής φάσης. Συνεπώς η διάταξη με χρήση του γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας κρίνεται ως η πλέον κατάλληλη.



Εικ. 5.3: Θερμοκρασιακά προφίλ Στοκχόλμης

Αναφορικά με τα επίπεδα ακτινοβολίας η Στοκχόλμη εμφανίζει, από τα υψηλότερα μέσα ημερήσια κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, σε σχέση με το σύνολο των εξεταζόμενων πόλεων όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη σημαντική μείωση της περιόδου φόρτισης, του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας, η οποία παραμένει η ίδια σε σχέση με αυτήν της Νυρεμβέργης, για πολλαπλάσια ωστόσο μάζα προσροφητικού μέσου. Παράλληλα παρέχεται επαρκές διάστημα για την αποφόρτιση του, η οποία όπως έχει αναφερθεί χαρακτηρίζεται από αργότερη κινητική.



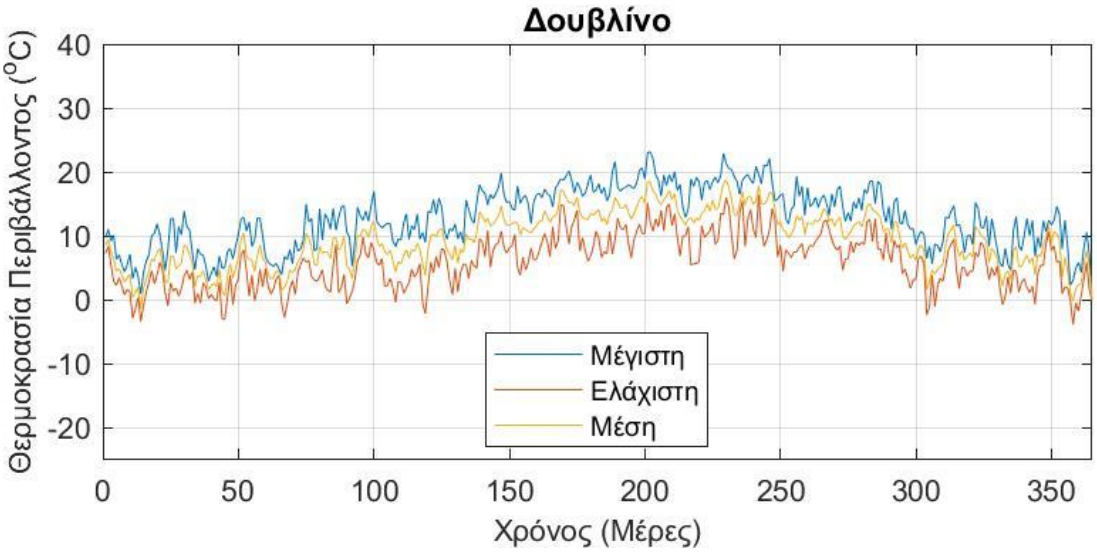
Εικ. 5.4:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Στοκχόλμης

Πιν. 5.3: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Στοκχόλμης

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Μέγιστη Θερμοκρασία	28,25	(ºC)
Ελάχιστη Θερμοκρασία	-19,65	(ºC)
Ποσοστό χρόνου με θερμοκρασίες υπό το μηδέν	29,65	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια	49,65	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια και επίπεδα ακτινοβολίας μεγαλύτερα των 500 W/m^2	12,88	(%)

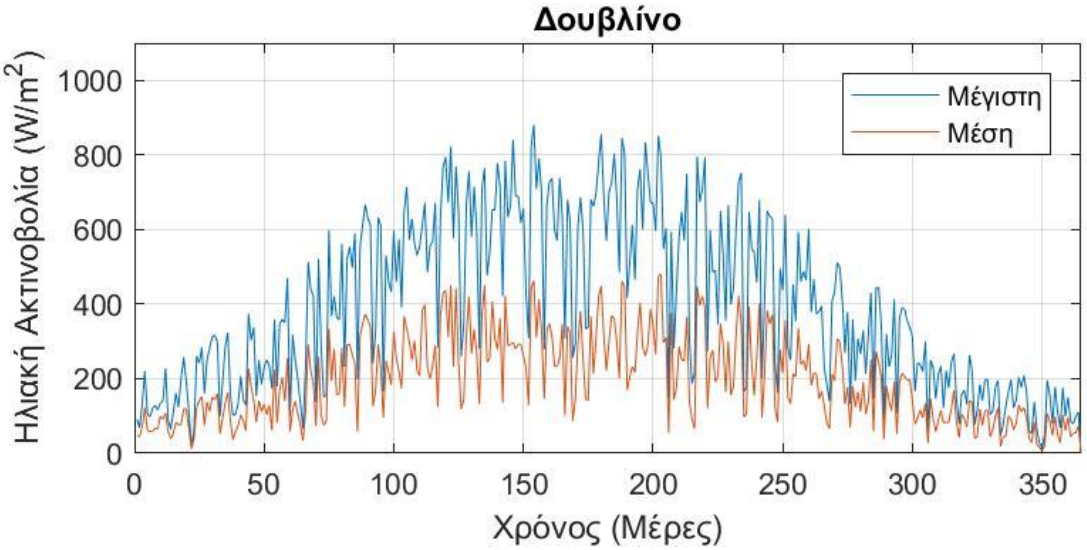
5.3 Δουβλίνο

Το Δουβλίνο είναι μια βορειο-ευρωπαϊκή πόλη, με θερμοκρασιακό προφίλ το οποίο εντοπίζεται σε πόλεις της κεντρικής Ευρώπης, λόγω της εγγύτητάς του με τον Ατλαντικό Ωκεανό. Χαρακτηρίζεται από ήπιες θερμοκρασίες και θερμοκρασιακές μεταβολές καθ'όλη την διάρκεια του έτους, οι οποίες οδηγούν σε μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις ως συνέπεια μάζα προσροφητικού υλικού.



Εικ. 5.5: Θερμοκρασιακά προφίλ Δουβλίνου

Η διάρκεια της περιόδου φόρτισής του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή σε σχέση με τις δύο προηγούμενες πόλεις υπό μελέτη, λόγω των χαμηλών επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας που επικρατούν καθ΄όλη τη διάρκεια του έτους. Οι εν γένει υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται κατά τη χειμερινή περίοδο, επιτρέπουν την απρόσκοπτη λειτουργία συστήματος εναλλάκτη αέρα-νερού και εναλλάκτη PCM, η οποία είναι και η διάταξη η οποία επιλέγεται. Χαρακτηριστικά κλιματολογικά δεδομένα για το Δουβλίνο παρέχονται στον Πιν. 5.4.



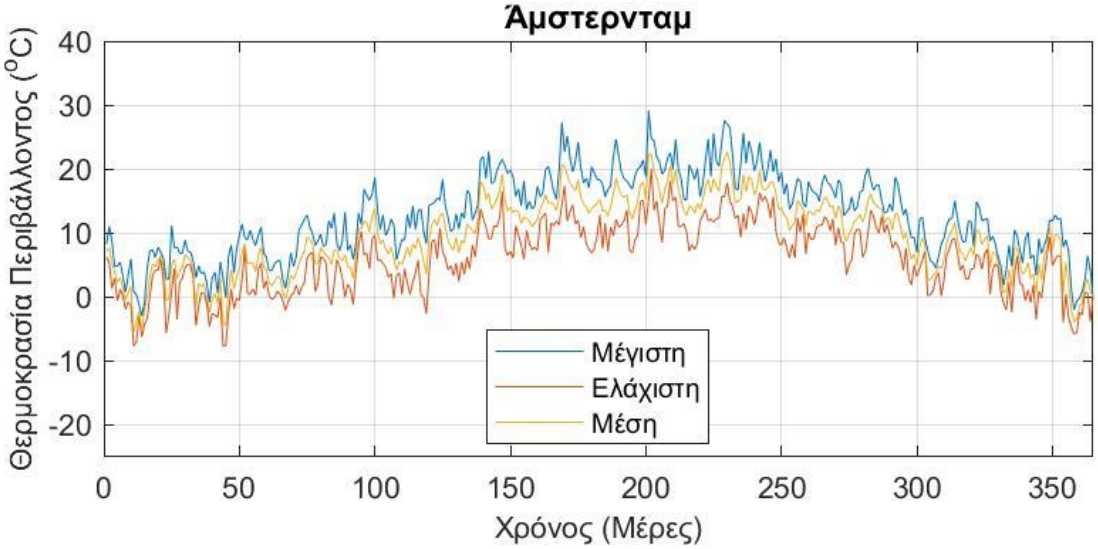
Εικ. 5.6:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Δουβλίνου

Πιν. 5.4: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Δουβλίνου

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Μέγιστη Θερμοκρασία	23,15	(ºC)
Ελάχιστη Θερμοκρασία	-3,85	(ºC)
Ποσοστό χρόνου με θερμοκρασίες υπό το μηδέν	1,85	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια	49,71	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια και επίπεδα ακτινοβολίας μεγαλύτερα των 500 W/m^2	11,56	(%)

5.4 Άμστερνταμ

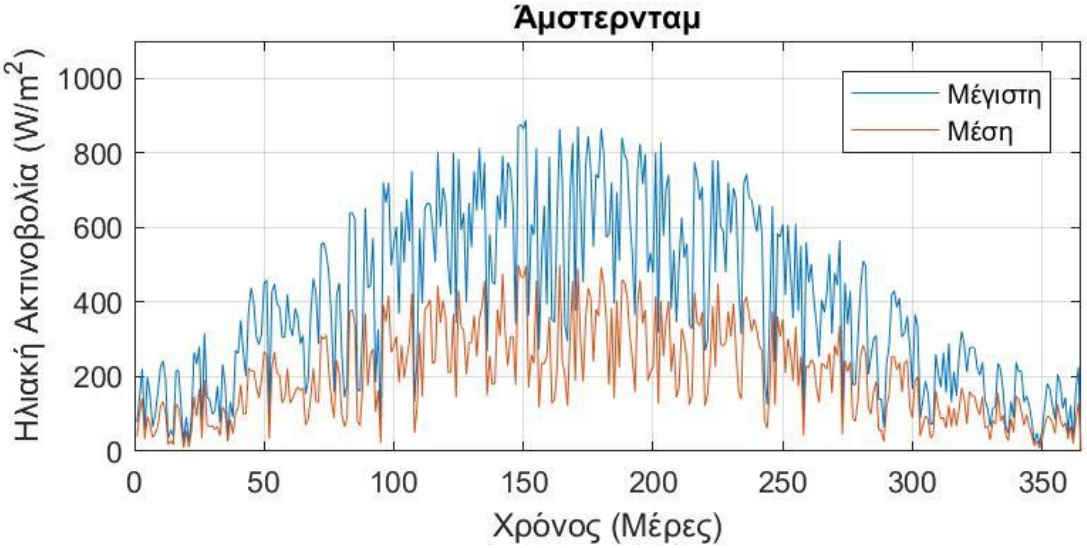
Σε αντιστοιχία με το Δουβλίνο, το Άμστερνταμ λόγω της εγγύτητάς του με τον Ατλαντικό Ωκεανό, εμφανίζει αυξημένα θερμοκρασιακά επίπεδα, σε σχέση με την Νυρεμβέργη παρότι βρίσκεται σε μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος. Οι μεγαλύτερες εν γένει θερμοκρασίες καθώς και οι μικρής διάρκειας περίοδοι με θερμοκρασίες υπό του μηδενός, καθιστούν προσφιλέστερη την χρήση της διάταξης εναλλάκτη αέρα-νερού / PCM.



Εικ. 5.7: Θερμοκρασιακά προφίλ Άμστερνταμ

Παράλληλα τα μέσα επίπεδα ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα αντίστοιχα της Νυρεμβέργης, όπως γίνεται αντιληπτό, συγκρίνοντας τα διαγράμματα στις Εικ. 5.2 και Εικ. 5.8.

Ο συνδυασμός των αυξημένων θερμοκρασιακών επιπέδων και των παρόμοιων επιπέδων ακτινοβολίας, μειώνει τις απαιτήσεις της οικίας για θέρμανση, και συνεπώς του απαραίτητου προσροφητικού υλικού, για την επίτευξη του στόχου ηλιακής κάλυψης, οδηγώντας σε μειωμένη περίοδο φόρτισης, η οποία πλέον περιορίζεται στις 120 μέρες.



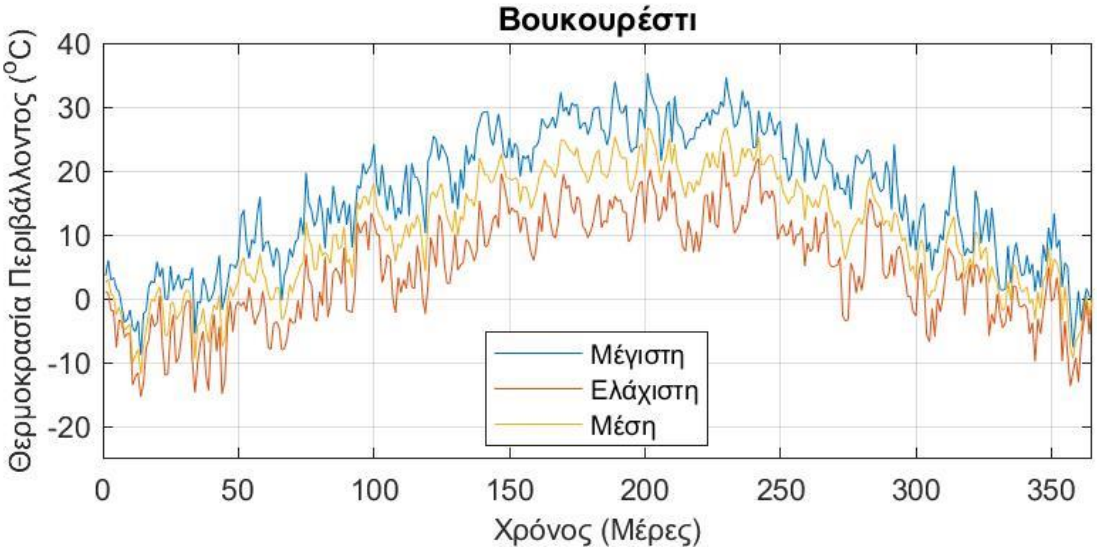
Εικ. 5.8:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Άμστερνταμ

Πιν. 5.5: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Άμστερνταμ

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Μέγιστη Θερμοκρασία	29,15	(ºC)
Ελάχιστη Θερμοκρασία	-7,75	(ºC)
Ποσοστό χρόνου με θερμοκρασίες υπό το μηδέν	6,82	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια	49,38	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια και επίπεδα ακτινοβολίας μεγαλύτερα των 500 W/m^2	12,75	(%)

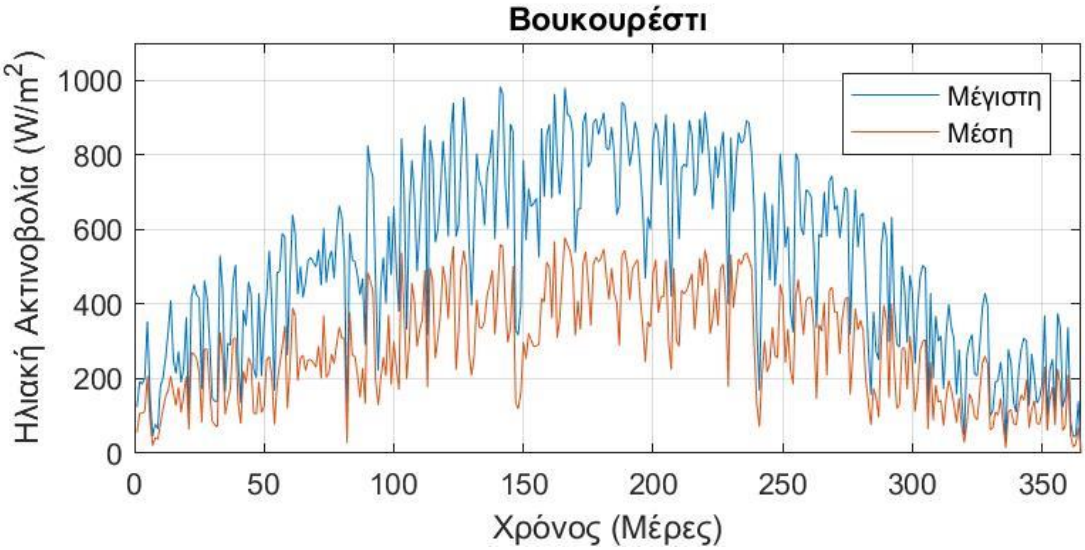
5.5 Βουκουρέστι

Το Βουκουρέστι εμφανίζει το θερμοκρασιακό προφίλ μιας κλασσικής πόλης της κεντρικής Ευρώπης, χαρακτηριζόμενο από μέσες προς υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, με μεγάλα διαστήματα θερμοκρασιών υπό το μηδέν κατά την χειμερινή περίοδο.



Εικ. 5.9: Θερμοκρασιακά προφίλ Βουκουρεστίου

Ωστόσο, η αρκετά υψηλή μέση ημερήσια ακτινοβολία, η οποία παραμένει σε υψηλά επίπεδα στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους, συνεισφέροντας σημαντικά σε ηλιακά κέρδη, οδηγεί σε μειωμένα σε σχέση με την Νυρεμβέργη, φορτία θέρμανσης, με εξαίρεση την περίοδο από μέσα Ιανουαρίου με τέλη Φεβρουαρίου. Παράλληλα, τα υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με την μικρότερη αναγκαία μάζα προσροφητικού μέσου σε σχέση με την Νυρεμβέργη, μειώνουν δραματικά την απαραίτητη για φόρτιση διάρκεια, η οποία πλέον περιορίζεται στις 60 μέρες, ενώ ευνοούν την γρήγορη φόρτιση του PCM, με τα τελικά επίπεδα αποφόρτισης του συστήματος, να μην εμφανίζουν ιδιαίτερη διαφορά σε σχέση με τη διάταξη του γεωθερμικού εναλλάκτη.



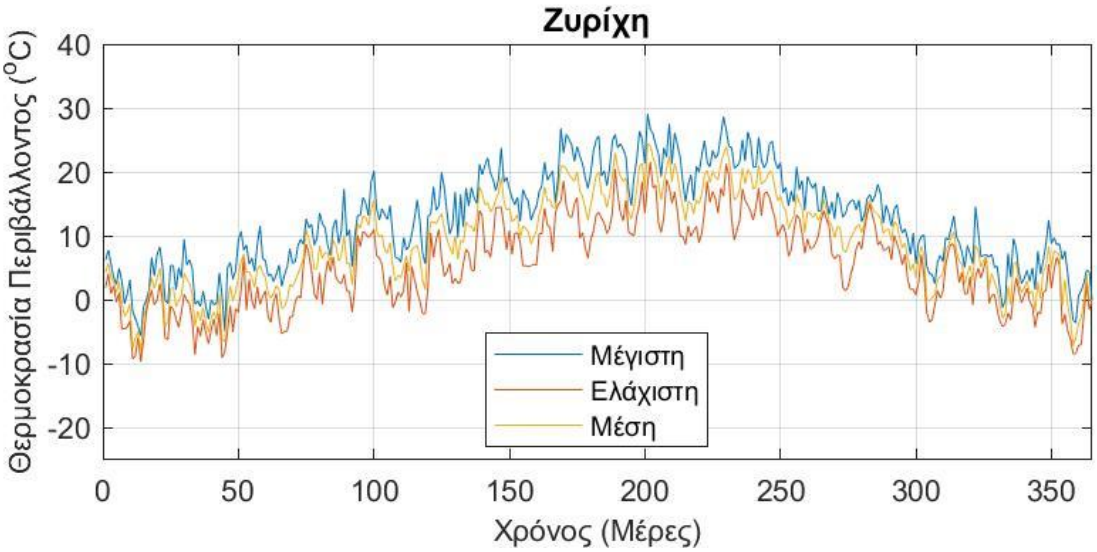
Εικ. 5.10:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Βουκουρεστίου

Πιν. 5.6: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Βουκουρεστίου

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Μέγιστη Θερμοκρασία	35,35	(ºC)
Ελάχιστη Θερμοκρασία	-15,30	(ºC)
Ποσοστό χρόνου με θερμοκρασίες υπό το μηδέν	17,24	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια	49,63	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια και επίπεδα ακτινοβολίας μεγαλύτερα των 500 W/m^2	22,88	(%)

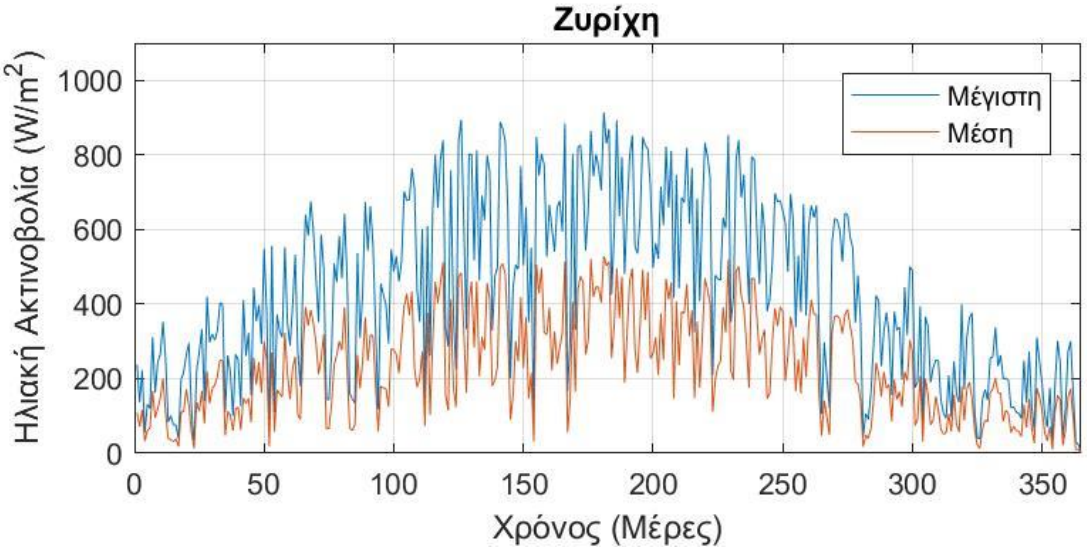
5.6 Ζυρίχη

Η Ζυρίχη είναι μια κεντρο-ευρωπαϊκή χώρα, αλλά το υψηλό της υψόμετρο και η εγγύτητά της σε σχέση με τις Άλπεις, οδηγεί σε χαμηλότερα θερμοκρασιακά προφίλ σε σχέση με το Βουκουρέστι, παρόλο που βρίσκονται στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος. Χαρακτηρίζεται από σημαντικές περιόδους με θερμοκρασίες υπό το μηδέν, ωστόσο τα επίπεδα μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας, σε αντίθεση με το Βουκουρέστι, παραμένουν χαμηλά ιδιαίτερα προς το τέλος του έτους, με αποτέλεσμα, το PCM, να μην μπορεί να φορτιστεί επαρκώς για μεγάλο μέρος της περιόδου αποφόρτισης. Ως αποτέλεσμα ως καταλληλότερη επιλέγεται η διάταξη του γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας, ώστε να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος.



Εικ. 5.11: Θερμοκρασιακά προφίλ Ζυρίχης

Αντίθετα, τα επίπεδα μέσης ημερήσια ακτινοβολίας, βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά του Βουκουρεστίου, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, με την τελική διάρκεια της περιόδου φόρτισης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας να περιορίζεται σε αυτούς.



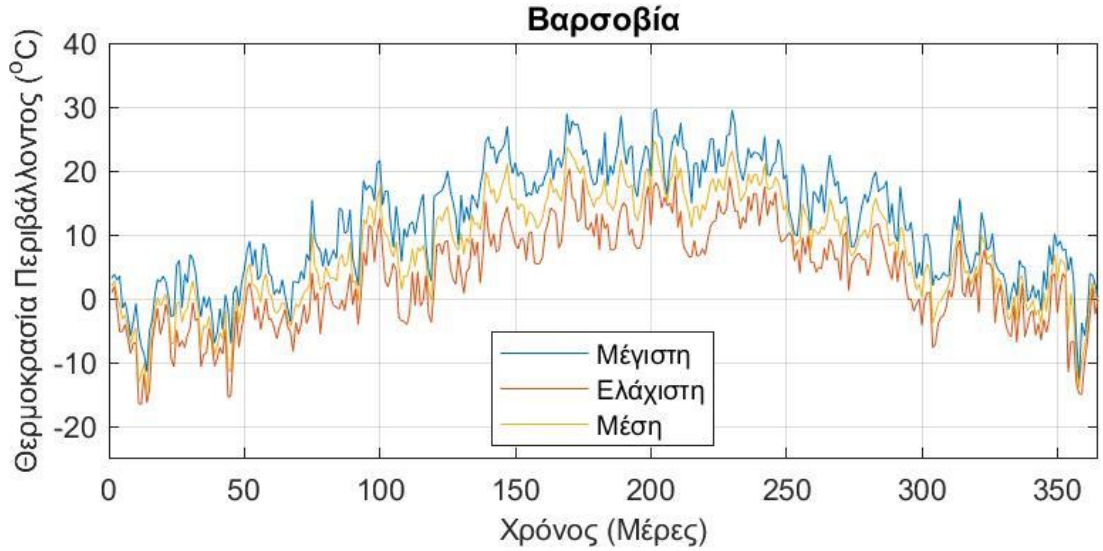
Εικ. 5.12:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Ζυρίχης

Πιν. 5.7: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Ζυρίχης

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Μέγιστη Θερμοκρασία	29,10	(°C)
Ελάχιστη Θερμοκρασία	-9,70	(°C)
Ποσοστό χρόνου με θερμοκρασίες υπό το μηδέν	13,30	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια	49,55	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια και επίπεδα ακτινοβολίας μεγαλύτερα των 500 W/m^2	15,90	(%)

5.7 Βαρσοβία

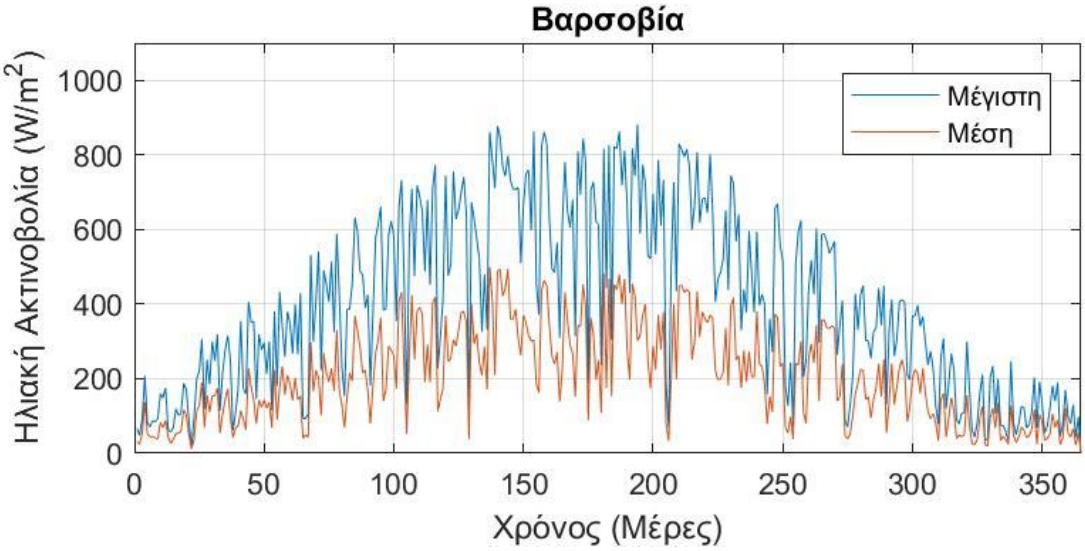
Η Βαρσοβία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια πόλη τόσο της κεντρικής όσο και της βόρειας Ευρώπης, με θερμοκρασιακό προφίλ παρόμοιο με αυτό της Στοκχόλμης, χαρακτηριζόμενο από θερμοκρασίες υπό του μηδενός, στη μεγαλύτερη διάρκεια των χειμερινών μηνών.



Εικ. 5.13: Θερμοκρασιακά προφίλ Βαρσοβίας

Ο συνδυασμός χαμηλών θερμοκρασιών και επιπέδων μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούν σε αυξημένη μάζα προσροφητικού υλικού, σε σχέση με τις χώρες της κεντρικής

Ευρώπης, για την επίτευξη του στόχου της ηλιακής κάλυψης. Ως αποτέλεσμα η περίοδος φόρτισης, αυξάνει σημαντικά, με συνολική διάρκεια 120 ημερών, ενώ ως προσφιλέστερη διάταξη επιλέγεται αυτή του γεωθερμικού εναλλάκτη.



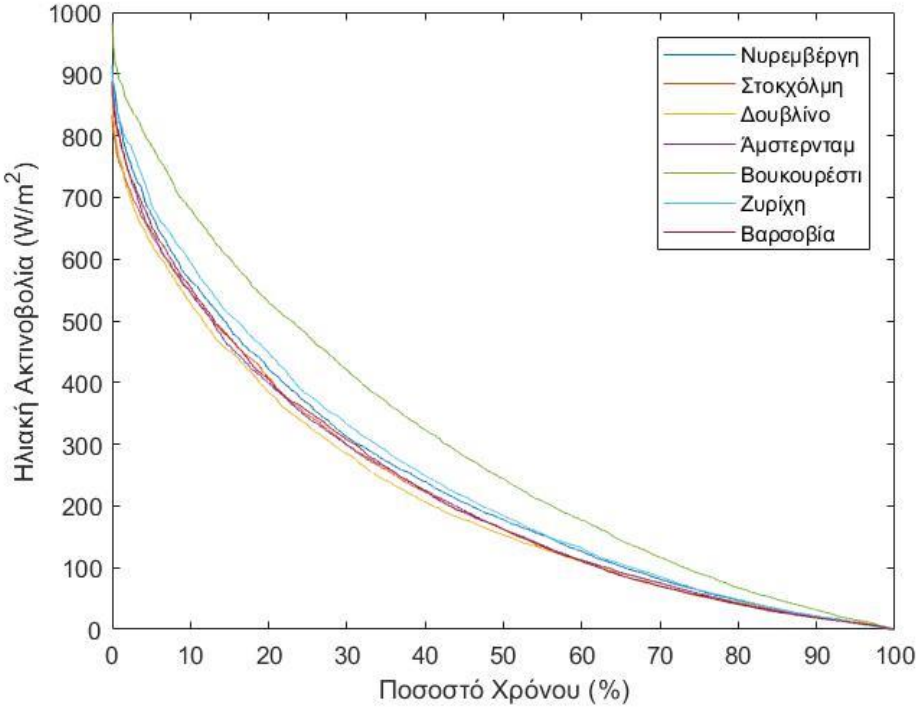
Εικ. 5.14:Προφίλ ολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου Βαρσοβίας

Πιν. 5.8: Χαρακτηριστικά καιρικά δεδομένα Βαρσοβίας

Μέγεθος	***Τιμή***	***Μονάδες***
Μέγιστη Θερμοκρασία	29,70	(ºC)
Ελάχιστη Θερμοκρασία	-16,50	(ºC)
Ποσοστό χρόνου με θερμοκρασίες υπό το μηδέν	22,10	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια	49,61	(%)
Ποσοστό χρόνου με ηλιοφάνεια και επίπεδα ακτινοβολίας μεγαλύτερα των 500 W/m^2	13,10	(%)

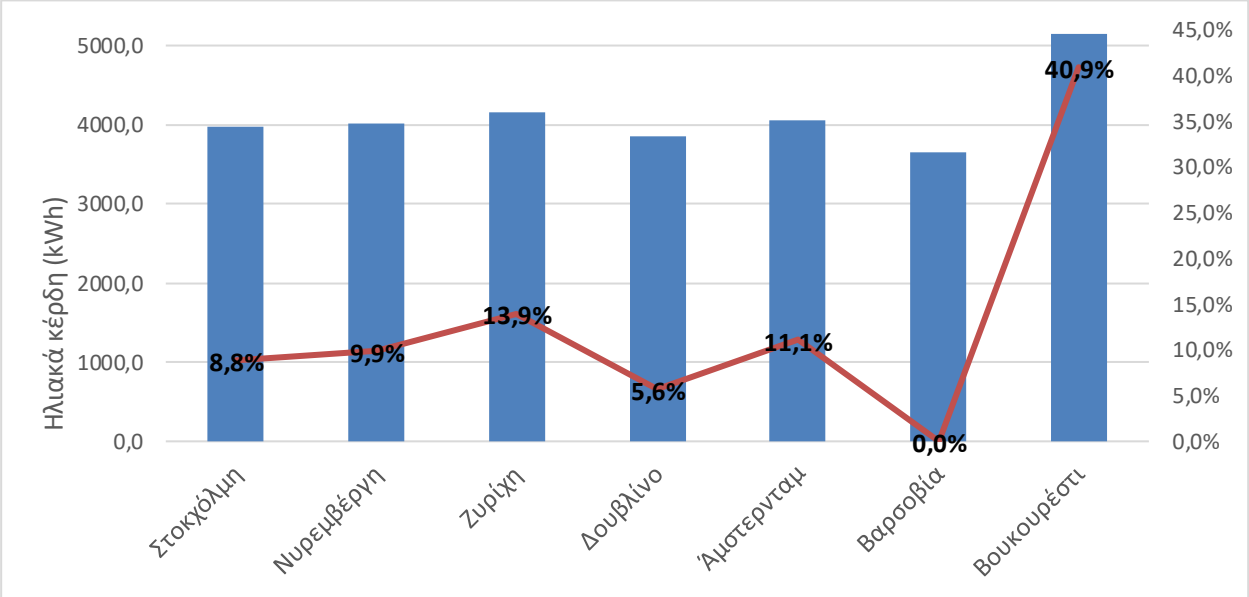
5.8 Σύγκριση και συμπεράσματα

Στην Εικ. 5.15, γίνεται μια απεικόνιση των καμπυλών διαρκείας ηλιακής ακτινοβολίας, για το σύνολο των εξεταζόμενων πόλεων. Όπως είχε παρουσιαστεί και προηγουμένως, το Βουκουρέστι, παρουσιάζει τα υψηλότερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με τις υπόλοιπες υπό μελέτη πόλεις, με την Ζυρίχη να εμφανίζει την αμέσως υψηλότερη, με σημαντικά ωστόσο μειωμένη διαφορά. Αντίθετα, τα χαμηλότερα επίπεδα εντοπίζονται στο Δουβλίνο και την Βαρσοβία, ως αποτέλεσμα του συνδυασμού του τοπικού κλίματος και του γεωγραφικού πλάτους στο οποίο βρίσκονται, με την Στοκχόλμη, την Νυρεμβέργη και το Άμστερνταμ να βρίσκονται ελαφρά υψηλότερα.



Εικ. 5.15: Καμπύλες διάρκειας ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για τις υπό εξέταση πόλεις

Στην μέχρι στιγμής ανάλυση, για την ποιοτική εξαγωγή οποιοδήποτε συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκαν ως παράγοντες μόνο, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και τα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η εξωτερική θερμοκρασία έχει άμεση επίπτωση στον καθορισμό των φορτίων θέρμανσης, δεδομένου πως σε όλες τις πόλεις πλέον του Βουκουρεστίου, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στα ηλιακά θερμικά κέρδη της οικίας όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα της Εικ. 5.16. Παράλληλα αντίστοιχη επίδραση, υπάρχει και στην απαιτούμενη συνολική μάζα του προσροφητικού υλικού, δεδομένου πως είναι αναγκαίο η αποθήκευση θερμότητας να καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό των τελικών καταναλώσεων.



Εικ. 5.16: Ηλιακά κέρδη οικίας για την περίοδο Οκτωβρίου – Μαΐου στις υπό μελέτη πόλεις

Ωστόσο για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου ηλιακής κάλυψης, σημαντική παράμετρο αποτελεί και η συνολική επιφάνεια των ηλιοθερμικών συλλεκτών. Φυσικά αυτή συνδέεται πάντα με την συνολική μάζα του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, επηρεάζοντας τόσο τα μέγιστα επίπεδα φόρτισης όσο και την παραμένουσα και πρακτικά αναξιοποίητη μάζα του τελευταίου, στους εποχιακούς κύκλους φόρτισης. Συγκεκριμένα μια μεγάλη υπολειπομένη μάζα προσροφητικού υλικού, αυξάνει την συνολική ταχύτητα φόρτισης και αποφόρτισης, καθώς το σύστημα δεν υπεισέρχεται στις αργές κινητικές που εντοπίζονται στα υψηλά και αντίστοιχα χαμηλά επίπεδα φόρτισης, ωστόσο σε πραγματικές συνθήκες μειώνει δραματικά την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα του.

Τέλος ένα βασικό κριτήριο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, είναι πως το υπό μελέτη σύστημα στοχεύει κυρίως στην ηλιοθερμική αποθήκευση θερμότητας και όχι στην ηλιοθερμική υποβοήθηση, για την επίτευξη του επιθυμητού ηλιακού κλάσματος. Συνεπώς, σε συνέχεια της προσοχής που πρέπει να δίνεται για αποφυγή υπερδιαστασιόλόγησης του συστήματος, αντίστοιχη προσοχή πρέπει να δίνεται στην υποδιαστασιολόγηση αυτού, όπου η κάλυψη των φορτίων θέρμανσης οφείλεται στην αυξημένη συλλεκτική επιφάνεια.

Στον Πιν. 5.9, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε υπό μελέτη πόλη, ύστερα από κατάλληλη ρύθμιση του μοντέλου, με κύριους παράγοντες τη συνολική μάζα του προσροφητικού υλικού καθώς και την επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών, στοχεύοντας στην άμεση και ετεροχρονισμένη ηλιακή κάλυψη τουλάχιστον 60% των θερμικών φορτίων σπιτιού και ΖΝΧ.

Πιν. 5.9: Αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης για τις υπό εξέταση πόλεις

Ευρωπαϊκή Πόλη	***STES (kg)***	***Ηλιακοί Συλλέκτες (m^2)***	***Ενεργειακές απαιτήσεις (kWh)***
Δουβλίνο	1000	6.50	2759.7
Άμστερνταμ	1500	7.00	3211.5
Βουκουρέστι	1500	7.00	3480.9
Ζυρίχη	1500	7.50	3656.7
Νυρεμβέργη	2000	8.00	4193.9
Βαρσοβία	4000	11.50	5153.4
Στοκχόλμη	4000	11.00	5904.2

Όπως αναμενόταν και από τα θερμοκρασιακά δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι πόλεις με τις υψηλότερες θερμοκρασίες κατά την χειμερινή περίοδο, όπως το Δουβλίνο και το Άμστερνταμ, χαρακτηρίζονται από τις χαμηλότερες απαιτήσεις θέρμανσης και ΖΝΧ. Στον αντίποδα, οι μεγάλης διάρκειας περίοδοι με θερμοκρασίες υπό του μηδενός, αυξάνουν σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις, όπως χαρακτηριστικά υποδηλώνουν πόλεις όπως η Στοκχόλμη και η Βαρσοβία.

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα διαγράμματα στις Εικ. 5.17 και Εικ. 5.18, υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών, της συνολικής μάζας προσροφητικού μέσου καθώς και των συνολικών θερμικών απαιτήσεων. Παράλληλα η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην αλληλεπίδραση των παραπάνω μεγεθών, γίνεται εμφανής στις παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

- Άμστερνταμ και Βουκουρέστι

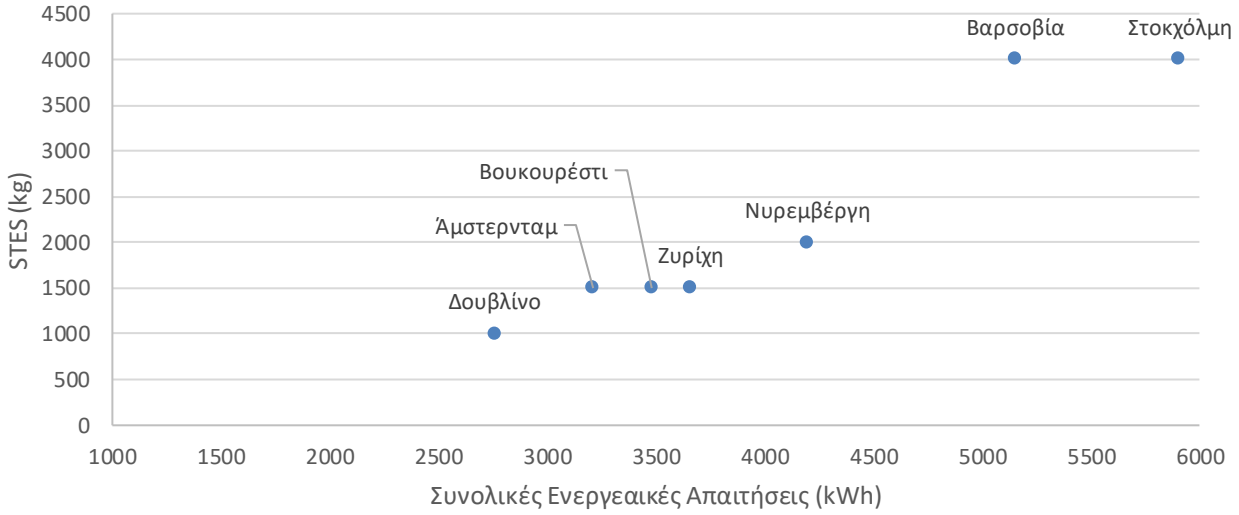
Παρότι το Βουκουρέστι έχει αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με το Άμστερνταμ, η συνολική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και προσροφητικού υλικού, δεν μεταβάλλεται, λόγω των υψηλότερων επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας. Φυσικά στην παραπάνω ανάλυση, σημαντική επίδραση έχει και η διαθέσιμη ελάχιστη ποσότητα προσροφητικού υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανά μονάδα, επιτυγχάνοντας διαφορετικά επίπεδα φόρτισης.

- Στοκχόλμη και Βαρσοβία

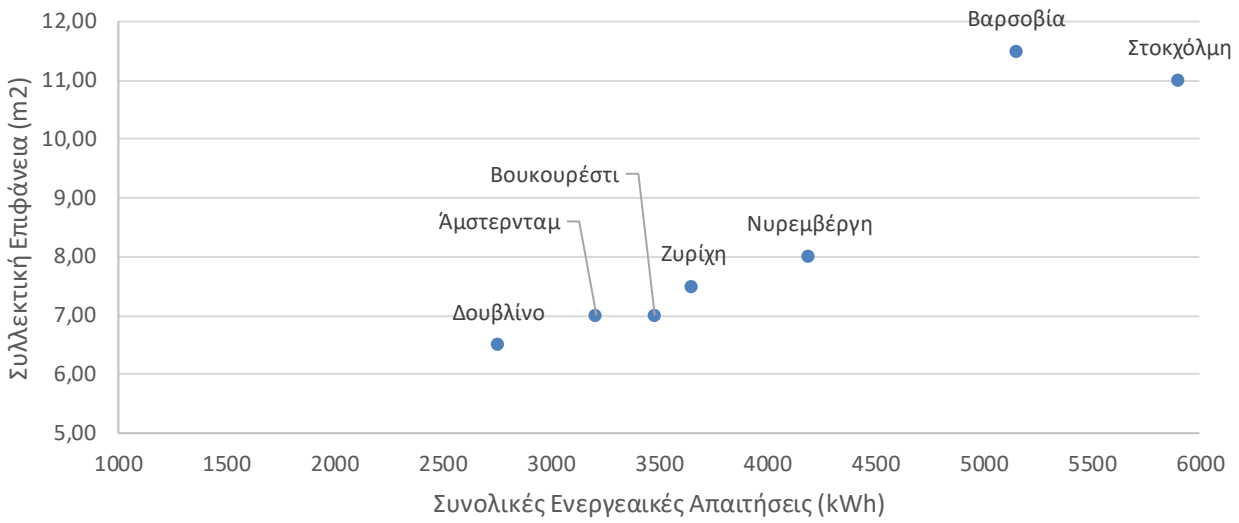
Στην παρούσα περίπτωση, η επίδραση των επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας στη διαστασιολόγηση του συστήματος, είναι άμεση. Συγκεκριμένα, παρόλο που η Στοκχόλμη έχει σημαντικά αυξημένες θερμικές καταναλώσεις σε σχέση με τη Βαρσοβία, οδηγείται σε χαμηλότερη αναγκαία συλλεκτική επιφάνεια για ίδια μάζα προσροφητικού υλικού, λόγω των υψηλότερων επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας που εμφανίζει.

- Δουβλίνο

Στην περίπτωση του Δουβλίνου, η συνολική συλλεκτική επιφάνεια, είναι ελαφρά μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες των αμέσων επόμενων πόλεων, παρότι οι ενεργειακές της απαιτήσεις είναι σημαντικά μειωμένες.



Εικ. 5.17:Διαγραμματική απεικόνιση ενεργειακών απαιτήσεων - μάζας προσροφητικού υλικού (STES)



Εικ. 5.18: Διαγραμματική απεικόνιση ενεργειακών απαιτήσεων – συλλεκτικής επιφάνειας

Στην Εικ. 5.19, παρουσιάζεται η διαστιασιολόγηση του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας σε Ευρωπαϊκό χάρτη, για το πλήθος των υπό εξέταση χωρών.

Εικ. 5.19:Ευρωπαϊκός Χάρτης εφαρμογής του υπό εξέταση συστήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συμπεράσματα και Βελτιώσεις

6.1 Συμπεράσματα μελέτης

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν μια από τις κυριότερες τεχνολογίες για την κάλυψη του κενού μεταξύ παραγωγής και ζήτησης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δεδομένης της αβεβαιότητας και στοχαστικότητας που τις διακρίνει. Στην παρούσα διπλωματική, προσομοιώθηκε και εξετάστηκε η λειτουργία ενός ηλιακά τροφοδοτούμενου, καινοτόμου συστήματος εποχιακής αποθήκευσης, με προσροφητικό μέσο, στοχεύοντας στην κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των απαιτήσεων θέρμανσης και ΖΝΧ, οικίας σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Η επιλογή της μελέτης του συστήματος, εστιάστηκε σε χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης, που διακρίνονται από ιδιαίτερα χαμηλές έως μηδενικές ανάγκες σε ψύξη, ώστε η τελική ηλιακή κάλυψη που επιτυγχάνεται να αντιστοιχεί στο σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεων της οικίας. Παράλληλα στις χώρες αυτές, η χαμηλή ηλιοφάνεια κατά τους χειμερινούς μήνες, τις καθιστά κατάλληλες για την επίδειξη της συμβολής της αποθήκευσης θερμότητας στην κάλυψη φορτίων.

Από τα πρώτα αποτελέσματα της μελέτης, έγινε εμφανές, πως το εν λόγω σύστημα, χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, οδηγώντας σε υψηλές απαιτήσεις μάζας προσροφητικού μέσου, τόσο για τη Νυρεμβέργη, όσο και για τη Στοκχόλμη, που αποτελούν τα βασικά σενάρια μελέτης. Παράλληλα, ο εκθετικός χαρακτήρας που χαρακτηρίζει την φόρτιση των υπομονάδων του συστήματος, δημιουργεί προβλήματα στην διαστασιολόγηση της απαραίτητης συλλεκτικής επιφάνειας. Συγκεκριμένα, ενώ τα αρχικά φορτία που επιβάλλει το σύστημα οδηγούν σε μεγάλη αναγκαία συλλεκτική επιφάνεια για την κάλυψή τους, αυτή, στο τέλος της περιόδου φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος, οδηγεί σε υπερθερμάνσεις των συλλεκτών κενού, λόγω ανικανότητας απόρριψης του πλεονάζοντος φορτίου. Μερική λύση στο πρόβλημα αυτό, δημιουργείται από κατάλληλη λογική ελέγχου η οποία αρχικά εφαρμόζει σειριακή φόρτιση των υπομονάδων ανά δεδομένα χρονικά διαστήματα, και εν συνεχεία παράλληλη φόρτιση αυτών, όταν το μερικό φορτίο γίνεται επαρκώς μικρό. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ομαλοποίηση της ζήτησης, προσομοιάζοντας μια κυματοειδή καμπύλη φορτίου.

Η μάζα προσροφητικού υλικού και η συλλεκτική επιφάνεια εμφανίζουν σχέση αλληλεξάρτησης, δεδομένου πως η δεύτερη διαστασιολογείται πρωταρχικά για την επίτευξη υψηλών επιπέδων φόρτισης της πρώτης. Όπως αναμενόταν, αύξηση των παραπάνω μεγεθών, αυξάνει το ηλιακό κλάσμα, ωστόσο με συνεχώς μειούμενο ρυθμό. Η παραπάνω μείωση, οφείλεται στην κινητική και τους θερμοκρασιακούς περιορισμούς που διακρίνουν το σύστημα, ιδιαίτερα κατά την περίοδο αποφόρτισης. Συγκεκριμένα, ακόμα και εάν χρησιμοποιηθεί μια πολύ μεγάλη μάζα προσροφητικού μέσου, με κατάλληλα μεγάλη συλλεκτική επιφάνεια, ο τελικός αχρησιμοποίητος όγκος υλικού, θα καθοριστεί τόσο από την ταχύτητα αποφόρτισης του συστήματος, κάτω από ιδεατές συνθήκες, όσο και από το ποσοστό του χρόνου που οι συνθήκες αυτές εντοπίζονται στην πραγματικότητα. Γίνεται επομένως αντιληπτό πως σε κάθε περίπτωση, το μέγιστο επιτεύξιμο ηλιακό κλάσμα, εξαρτάται προπαντός από το ίδιο το σύστημα και σε δεύτερο χρόνο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες της υπό μελέτη πόλης. Για την αποφυγή της παραπάνω εξάρτησης, δύο διαφορετικές διατάξεις μελετώνται, ώστε να επιτυγχάνεται απρόσκοπτη λειτουργία της μονάδας εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας.

Η λειτουργία και η απόδοση του συστήματος που κάνει χρήση της διάταξης εναλλάκτη αέρα/νερού και δοχείου αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και από τη συνολική μάζα του υλικού αλλαγής φάσης. Φυσικά σε αντιστοιχία με το σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, η μέγιστη χρησιμοποιούμενη, καθορίζεται και από τη διαθέσιμη συλλεκτική επιφάνεια, ώστε να ελαχιστοποιείται ο αδρανής όγκος υλικού, χωρίς να μειώνονται σημαντικά οι ώρες λειτουργίας του συστήματος. Αντίθετα η χρήση γεωθερμικού εναλλάκτη, σε κατάλληλο βάθος, επιτρέπει την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος, επιτυγχάνοντας συνεχώς θερμοκρασίες οι οποίες βρίσκονται εντός των θερμοκρασιακών ορίων που επιβάλλει το σύστημα. Ως αποτέλεσμα, ο μόνος περιορισμός ως προς την πλήρη αποφόρτιση του συστήματος, είναι η κινητική αυτού, δεδομένου πως πραγματοποιείται κάτω από ιδεατές συνθήκες.

Το σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, οι ηλιακοί συλλέκτες κενού αλλά και οι συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις θέρμανσης και ΖΝΧ, εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που διακρίνουν κάθε γεωγραφική περιοχή. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκε, η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, στην Ζυρίχη, το Δουβλίνο, το Άμστερνταμ, τη Βαρσοβία και το Βουκουρέστι, καλύπτοντας ένα μεγάλο μέρος της ηπειρωτικής αλλά και νησιωτικής Ευρώπης, τόσο σε ορεινές όσο και σε παραθαλάσσιες περιοχές. Δεδομένου πως στις περισσότερες από τις παραπάνω χώρες η ηλιακή ακτινοβολία βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα κατά τους χειμερινούς μήνες, δεν εντοπίζεται σημαντική διαφορά στα ηλιακά κέρδη της οικίας. Ως αποτέλεσμα ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τις θερμαντικές απαιτήσεις είναι η εξωτερική θερμοκρασία. Φυσικά, οι συνολικές θερμαντικές απαιτήσεις έχουν άμεση σχέση με την επιλογή κατάλληλης μάζας προσροφητικού υλικού, ώστε η συνεισφορά της αποθήκευσης στην κάλυψη των φορτίων να είναι σημαντική. Η δυναμική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο σύνολο των παραπάνω πόλεων, αποδεικνύει πως ένας απλός κανόνας μοχλού, δεν είναι κατάλληλος για τη διαστασιολόγηση του συστήματος, καθώς η υπέρδιαστασιολόγηση ή υποδιαστασιολόγηση ενός εκ των κύριων παραγόντων, επηρεάζει άμεσα και τους υπόλοιπους. Η ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής καθορίζει τη συμβολή των ηλιακών συλλεκτών στην κάλυψη των φορτίων θέρμανσης, η οποία ανάλογα με την ταχύτητα αποφόρτισης του συστήματος, κυμαίνεται στο 55%-65%, της συνολικής ηλιακά προσδιδόμενης ενέργειας στο σύστημα. Φυσικά αυτό το ποσοστό εξαρτάται και από την επιλογή της κατάλληλης διάταξης εναλλάκτη, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Συγκεκριμένα, σε πόλεις στις οποίες δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα τελικά επίπεδα αποφόρτισης του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας, μεταξύ των δύο διατάξεων εναλλακτών, χρησιμοποιείται το σύστημα εναλλάκτη αέρα/νερού και εναλλάκτη PCM, με τον γεωθερμικό εναλλάκτη να χρησιμοποιείται στις πόλεις όπου παρατηρείται μεγάλη αδράνεια του συστήματος, λόγω των θερμοκρασιακών περιορισμών που αυτό επιβάλλει.

6.2 Προτάσεις και βελτιώσεις του συστήματος

Η μοντελοποίηση του συστήματος, όπως πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής στο λογισμικό TRNSYS, αποτελεί μια βάση για την εξαγωγή των πρώτων χρήσιμων συμπερασμάτων, αναφορικά με τη λειτουργία και τη διαδικασία διαστασιολόγησης του, λαμβάνοντας υπόψη ένα πλήθος από παράγοντες επηρεασμού. Ωστόσο, υπάρχει αρκετός χώρος για μελλοντική εργασία.

6.2.1 Δυναμική μοντελοποίηση

Αρχικά στο κομμάτι της μοντελοποίησης του συστήματος, θα ήταν χρήσιμο να προσομοιωθεί κατάλληλα ο εναλλάκτης αέρα-νερού καθώς και ο γεωθερμικός εναλλάκτης, ώστε η λειτουργία του να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Ιδιαίτερα για το δεύτερο κομμάτι, αυτό θα εισήγαγε την εκλογή κατάλληλου βάθους τοποθέτησης ως ένα νέο παράγοντα, ο οποίος θα μπορούσε τόσο να ανταγωνιστεί οικονομικά την πρώτη διάταξη, όσο και να αναγνωρίσει πλήθος πόλεων ως ακατάλληλες, για το υπό μελέτη σύστημα.

Παράλληλα, απαραίτητη είναι και η παροχή καμπυλών φόρτισης υπομονάδων που περιέχουν μικρότερη μάζα προσροφητικού υλικού, με αναμενόμενη βελτίωση της αντίστοιχης κινητικής που τις διακρίνει. Ως αποτέλεσμα, θα είναι δυνατή η μείωση της περιόδου φόρτισης, με παράλληλη βελτίωση των επιπέδων αποφόρτισης. Φυσικά, η παραπάνω απαίτηση, εμφανίζει και την ανάγκη για βελτίωση του συστήματος ελέγχου, ώστε η καμπύλη φορτίου να εξομαλύνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου φόρτισης, με παράλληλη δυνατότητα να ακολουθεί τις απαιτήσεις θέρμανσης κατά την αποφόρτιση, λαμβάνοντας υπόψη πάντα τους δυναμικούς περιορισμούς που εμφανίζονται στον πραγματικό κόσμο (πχ. χρόνοι απόκρισης βαλβίδων on/off, τρίοδων βαλβίδων, θερμικής αδράνειας συστήματος κλπ).

Επιπλέον αναγκαίο είναι να επαληθευτούν τα υπολογιστικά δεδομένα με αντίστοιχα πειραματικά από τη μονάδα πιλότο. Η διαδικασία αυτή θα επιτρέψει την κατάλληλη προσαρμογή των μοντέλων, για την πρόβλεψη της λειτουργίας του συστήματος σε πλήθος πόλεων, ενώ θα αποκαλύψει κενά και λάθη στις στρατηγικές ελέγχου που έχουν επιλεχθεί σε επίπεδο προσομοίωσης και εμφανίζουν δυσκολία εφαρμογής στο πραγματικό σύστημα. Τέλος, ιδιαίτερα για το προσροφητικό υλικό, αναμένεται μια σημαντική βελτίωση, στην ενεργειακή πυκνότητα που αυτό εμφανίζει, βάση των ήδη διαθέσιμων δεδομένων, τα οποία δεν μπορούν να παρουσιαστούν για λόγους εμπιστευτικότητας του έργου.

6.2.2 Αξιολόγηση συστήματος

Η προτάσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα βελτιώσουν σημαντικά την αξιοπιστία του έργου, ενώ η παράλληλη αναμενόμενη βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας, θα οδηγήσει σε σαφώς μικρότερες μάζες προσροφητικού υλικού. Ωστόσο για την πλήρη αξιολόγηση του συστήματος είναι απαραίτητη η σύγκρισή του με, ήδη υπάρχοντα εμπορικά συστήματα, πχ αντλία θερμότητας.

Παράλληλα, σημαντικό ενδιαφέρον εμφανίζει και η μελέτη του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος. Ήδη από τα αποτελέσματα της μελέτης, έγινε εμφανές πως μια πολύ μεγάλη μάζα προσροφητικού μέσου, είναι απαραίτητη για την επίτευξη του επιθυμητού ηλιακού κλάσματος. Η μάζα αυτή ωστόσο αντιστοιχεί μόνο στο υλικό αποθήκευσης θερμότητας και όχι, στην συνολική μάζα του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη και το απαραίτητο μέταλλο, για τους

εναλλάκτες θερμότητας, γίνεται αντιληπτό πως η αναμενόμενη μάζα του συστήματος, υπερβαίνει σε κάθε περίπτωση του τρεις τόνους. Παράλληλα, στην ενεργειακή ανάλυση μέχρι στιγμής δεν έχουν συνυπολογιστεί και οι καταναλώσεις από τους κυκλοφορητές του συστήματος, οι οποίοι αναμένεται να λειτουργούν συνεχώς, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες. Επομένως στην περίπτωση αυτή, η διενέργεια μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, είναι απαραίτητη για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, για την περιβαλλοντική του επίδοση, τόσο συγκρινόμενο με ένα κλασσικό σύστημα λέβητα πετρελαίου, όσο και με μια σύγχρονη αντλία θερμότητας.

Παράλληλα ένα ακόμα κομμάτι που θα πρέπει να μελετηθεί, είναι η οικονομική του απόδοση. Η αυξημένες ανάγκες σε πρώτες ύλες, αναμένεται να οδηγήσουν σε ένα αυξημένο κόστος, το οποίο φυσικά είναι άμεσα εξαρτώμενο από τη ενεργειακή πυκνότητα του συστήματος εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας. Ως αποτέλεσμα η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, χρησιμοποιώντας δείκτες καθαρής παρούσας αξίας (Net Present Value – NPV) και χρόνων αποπληρωμής (PayBack Period – PBP), πρέπει να αξιολογηθεί. Και σε αυτήν την περίπτωση στους παραπάνω δείκτες, την εξοικονόμηση καυσίμου, ανταγωνίζονται τόσο οι αυξημένες απαιτήσεις σε αρχικό κεφάλαιο, όσο και αυξημένες ηλεκτρικές καταναλώσεις.

Κλείνοντας ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί, πως η παρούσα τεχνολογία βρίσκεται σε πολύ χαμηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL 3-4), δεδομένου πως η πιλοτική μονάδα βρίσκεται ακόμα σε φάση ανάπτυξης, με τους συντελεστές των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, μέχρι στιγμής να αντιστοιχούν σε συνδυασμό πειραματικών δεδομένων καθώς και αποτελεσμάτων από δυναμικά μοντέλα, σε αντίστοιχα πακέτα προσομοίωσης. Συμπερασματικά, σε πραγματική κλίμακα, αναμένονται σαφείς βελτιώσεις της λειτουργίας του, οι οποίες θα μειώσουν σημαντικά τις απαιτούμενες πρώτες ύλες, επιτυγχάνοντας περιβαλλοντικό αντίκτυπο, που θα συμβάλει στη μείωση των τελικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, προσφέροντας μια μακροχρόνια και σταθερή λύση θέρμανσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. United Nations, *Paris Agreement* in *Framework Convention on Climate Change*. 2015.
2. Allen, M.R., O.P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu, and K. Zickfeld 2018, *Framing and Context.*, in *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*

3. Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018, *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development*, in *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*

4. IEA. *Data and statistics*. Available from: https://www.iea.org/data-and-statistics.
5. statista. *Distribution of carbon dioxide emissions in the European Union* in 2019, by key source*. Available from: https://www.statista.com/statistics/999398/carbon-dioxide-emissions-sources-european-union-eu/.
6. eurostat. *Energy consumption in households by type of end-use*. Energy consumption in households Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use.
7. Huld, T., et al., *The Rooftop Potential for PV Systems in the European Union to deliver the Paris Agreement*. European Energy Innovation, 2018. **Spring 2018**: p. 12.
8. SolarPower Europe (2020). *EU Market Outlook for Solar Power 2020-2024.*; Available from: https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2020/12/3520-SPE-EMO-2020-report-11-mr.pdf?cf_id=23124.
9. IEA. *Average capacity factors by technology* 2018; Available from: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-annual-capacity-factors-by-technology-2018.
10. Hussain, F., et al., *Chapter 6 - Energy storage technologies*, in *Energy for Sustainable Development*, M.D. Hasanuzzaman and N.A. Rahim, Editors. 2020, Academic Press. p. 125-165.
11. Sauer, D.U., *Chapter 2 - Classification of Storage Systems*, in *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, P.T. Moseley and J. Garche, Editors. 2015, Elsevier: Amsterdam. p. 13-21.
12. Koçak, B., A.I. Fernandez, and H. Paksoy, *Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects.* Solar Energy, 2020. **209**: p. 135-169.
13. Sonar, D., *Chapter 4 - Renewable energy based trigeneration systems—technologies, challenges and opportunities*, in *Renewable-Energy-Driven Future*, J. Ren, Editor. 2021, Academic Press. p. 125-168.
14. Karellas, S., et al., *Solar cooling technologies*. 2018: CRC Press.
15. Dinçer, I. and M.A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. 2011: Wiley.
16. Gil, A., et al., *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(1): p. 31-55.

17. Fernández, A., et al., *Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage.* Solar energy materials and solar cells, 2010. **94**(10): p. 1723-1729.
18. Tian, Y. and C.Y. Zhao, *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications.* Applied Energy, 2013. **104**: p. 538-553.
19. Sarbu, I. and C. Sebarchievici, *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage.* Sustainability, 2018. **10**(1).
20. IEA-SHC Task 45 "Large solar heating/ cooling systems - seasonal storage - heat pumps", *Report on state of the art and necessary further R+D*, in *Seasonal thermal energy storage*, S. Dirk Mangold and Laure Deschaintre, Stuttgart, Germany Editor. 2015.
21. Ann Cruickshank, C. and C. Baldwin, *Chapter 15 - Sensible Thermal Energy Storage: Diurnal and Seasonal*, in *Storing Energy*, T.M. Letcher, Editor. 2016, Elsevier: Oxford. p. 291-311.
22. Haller, M.Y., et al., *Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – Review and theoretical comparison.* Solar Energy, 2009. **83**(10): p. 1847-1860.
23. Hollands, K. and M. Lightstone, *A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems.* Solar energy, 1989. **43**(2): p. 97-105.
24. Shukla, R., et al., *Recent advances in the solar water heating systems: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **19**(C): p. 173-190.
25. Faninger, G., *Solar Hot Water Heating Systems*. 2012. p. 419-447.
26. Dah, M.O., et al., *Study of temperature and salinity profiles development of solar pond in laboratory.* Desalination, 2005. **183**(1-3): p. 179-185.
27. Jaluria, Y., *Thermal Energy Storage and Extraction in Solar Ponds*. 1989. p. 163-190.
28. González, D., et al., *Constructal design of salt-gradient solar pond fields.* International Journal of Energy Research, 2016. **40**(10): p. 1428-1446.
29. Li, P., et al., *Similarity and generalized analysis of efficiencies of thermal energy storage systems.* Renewable Energy, 2012. **39**(1): p. 388-402.
30. Srinivasaraonaik, B., S. Sinha, and L.P. Singh, *Phase Change Materials for Renewable Energy Storage Applications*, in *Energy Storage Devices*. 2021, IntechOpen.
31. Aftab, W., et al., *Phase change material-integrated latent heat storage systems for sustainable energy solutions.* Energy & Environmental Science, 2021. **14**(8): p. 4268-4291.
32. Souayfane, F., F. Fardoun, and P.-H. Biwole, *Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review.* Energy and Buildings, 2016. **129**: p. 396-431.
33. Zavrl, E., et al., *Application of PCM in Building's Envelope of Lightweight Prefabricated Houses as an addition to a PV driven renovation cooling system by EU project HEART*. 2018. 1-9.
34. Nomura, T., N. Okinaka, and T. Akiyama, *Technology of Latent Heat Storage for High Temperature Application: A Review.* ISIJ International, 2010. **50**(9): p. 1229-1239.
35. Al-Yasiri, Q. and M. Szabó, *Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis*. Journal of Building Engineering, 2021. **36**: p. 102122.
36. Zhang, Y.P., et al., *Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings.* Energy and Buildings, 2006. **38**(10): p. 1262-1269.
37. Xie, B., W.-l. Cheng, and Z.-m. Xu, *Studies on the effect of shape-stabilized PCM filled aluminum honeycomb composite material on thermal control.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015. **91**: p. 135-143.
38. Kenisarin, M. and K. Mahkamov, *Solar energy storage using phase change materials.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(9): p. 1913-1965.
39. Yan, T., et al., *A review of promising candidate reactions for chemical heat storage.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **43**: p. 13-31.

40. Pelay, U., et al., *Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **79**: p. 82-100.
41. Scapino, L., et al., *Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale.* Applied Energy, 2017. **190**: p. 920-948.
42. Fumey, B., et al., *Closed Sorption Heat Storage based on Aqueous Sodium Hydroxide.* Energy Procedia, 2014. **48**: p. 337-346.
43. Kalogirou, S., *Solar Thermal Collectors and Applications.* Progress in Energy and Combustion Science, 2004. **30**: p. 231-295.
44. Roumpedakis, T.C., et al., *Performance Results of a Solar Adsorption Cooling and Heating Unit.* Energies, 2020. **13**(7): p. 1630.
45. Sarbu, I. and C. Sebarchievici, *Chapter 3 - Solar Collectors*, in *Solar Heating and Cooling Systems*, I. Sarbu and C. Sebarchievici, Editors. 2017, Academic Press. p. 29-97.
46. Κίμων Α. Αντωνόπουλος, *Θερμικά Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο* 2011, Αθήνα
47. Krarti, M., *Optimal design and retrofit of energy efficient buildings, communities, and urban centers*. 2018: Butterworth-Heinemann.
48. Kalogirou, S.A., et al., *Exergy analysis of solar thermal collectors and processes.* Progress in Energy and Combustion Science, 2016. **56**: p. 106-137.
49. Orosz, M. and R. Dickes, *16 - Solar thermal powered Organic Rankine Cycles*, in *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*, E. Macchi and M. Astolfi, Editors. 2017, Woodhead Publishing. p. 569-612.
50. Roumpedakis, T.C., et al., *Exergetic and economic analysis of a solar driven small scale ORC.* Renewable Energy, 2020. **157**: p. 1008-1024.
51. Hudon, K., *Solar Energy–Water Heating*, in *Future Energy*. 2014, Elsevier. p. 433-451.
52. Kumar, A., Z. Said, and E. Bellos, *An up-to-date review on evacuated tube solar collectors.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021. **145**(6): p. 2873-2889.
53. Budihardjo, I., G. Morrison, and M. Behnia, *Performance of single-ended evacuated tube solar water heaters*. 2004.
54. Naik, B.K. and P. Muthukumar, *Performance assessment of evacuated U-tube solar collector: a numerical study.* Sādhanā, 2019. **44**(1): p. 23.
55. Riffat, S.B. and E. Cuce, *A review on hybrid photovoltaic/thermal collectors and systems.* International Journal of Low-Carbon Technologies, 2011. **6**(3): p. 212-241.
56. Zondag, H.A., et al., *The yield of different combined PV-Thermal collector designs.* Solar Energy, 2003. **74**: p. 253-269.
57. Hasan, M.A. and K. Sumathy, *Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(7): p. 1845-1859.
58. Kalogirou, S., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition.* Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition, 2009.
59. Faisal Ahmed, S., et al., *Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review.* Thermal Science and Engineering Progress, 2021. **25**: p. 100981.
60. Jiang, C., et al., *A Review of the Compound Parabolic Concentrator (CPC) with a Tubular Absorber.* Energies, 2020. **13**(3): p. 695.
61. Suman, S., M.K. Khan, and M. Pathak, *Performance enhancement of solar collectors—A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **49**: p. 192-210.
62. Bellos, E. and C. Tzivanidis, *A review of concentrating solar thermal collectors with and without nanofluids.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019. **135**(1): p. 763-786.
63. Zhang, H.L., et al., *Concentrated solar power plants: Review and design methodology.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 466-481.

64. Gupta, P.R., A.K. Tiwari, and Z. Said, *Solar organic Rankine cycle and its poly-generation applications – A review.* Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022. **49**: p. 101732.
65. Sun, K., et al., *Comprehensive evaluation of concentrated solar collector and Organic Rankine cycle hybrid energy process with considering the effects of different heat transfer fluids.* Energy Reports, 2021. **7**: p. 362-384.
66. Mark S. Mehos, *Concentrating Solar Power (CSP) Overview* NREL - National Renewable Energy Laboratory - U.S. Department of Energy Efficiency and Renewable Energy operated by the Alliance for Sustainable Energy, Editor. 2007.
67. Gordeeva, L., et al., *Selective water sorbents for multiple applications, 5. LiBr confined in mesopores of silica gel: Sorption properties.* Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 1998. **63**: p. 81-88.
68. Dawoud, B. and Y. Aristov, *Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**: p. 273-281.
69. SWS-heating. Available from: http://www.swsheating.eu/.
70. GmbH, A.P.; Available from: https://www.akotec.eu/.
71. Sirch GmbH & Co.; Available from: https://www.sirch.com/start/.
72. PCM Products Ltd. Available from: https://www.pcmproducts.net/.
73. ARISTON. Available from: https://www.ariston.com/el-gr/.
74. DAIKIN. Available from: https://www.daikin.gr/
75. RIELLO. Available from: https://www.riello.com/international/.
76. GRUNDFOS. Available from: https://www.grundfos.com/.
77. WILO. Available from: https://wilo.com/gr/el/
78. Simona, P.L., P. Spiru, and I.V. Ion, *Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation.* Energy Procedia, 2017. **128**: p. 393-399.
79. The European Parliament and the Council of the European Union, *Energy Performance of Buildings Directive - EPBD 2010/31/EU.* 2010.
80. Voss, K., E. Musall, and M. Lichtmeß, *From Low-Energy to Net Zero-Energy Buildings: Status and Perspectives.* Journal of Green Building, 2011. **6**: p. 46-57.
81. SketchUp. Available from: https://www.sketchup.com/.
82. TRNSYS. Available from: https://www.trnsys.com/.
83. Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin-Madison, *TRNSYS 18 - a TRaNsient SYstem Simulation program - Getting Started* Vol. 1. 2017.
84. Beckman W.A and Duffie J.A., *Solar Engineering of Thermal Processes* Second ed. 1991, New York John Wiley & Sons, Inc, .
85. CEN - European Committee for Standardization, *EN 12975-2: 2006 - Thermal solar systems and components –Solar collectors – Part 2: Test methods*.
86. Technical Research Institute of Sweden - Peter Kovacs, *Quality Assurance in solar thermal heating and cooling technology – keeping track with recent and upcoming developments - A guide to the standard EN 12975*. 2012.
87. Nash, A.L., A. Badithela, and N. Jain, *Dynamic modeling of a sensible thermal energy storage tank with an immersed coil heat exchanger under three operation modes.* Applied Energy, 2017. **195**: p. 877-889.
88. Wischhusen, S. *An enhanced discretization method for storage tank models within energy systems*. in *Proc. of the 5-th International Modelica Conference*. 2006.
89. ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ - Καθηγητής Ε.Μ.Π., *Υδροδυναμικές μηχανές αντλίες υδροστρόβιλοι - Υδροδυναμικές μεταδόσεις (ασκήσεις - παραδείγματα)*. 2015, Σμύρνης 14 Ζωγράφου, 15772: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΣΟΤΡΑΣ.
90. Inglezakis, V.J., *Solubility-normalized Dubinin–Astakhov adsorption isotherm for ion-exchange systems.* Microporous and Mesoporous Materials, 2007. **103**(1): p. 72-81.

91. Meteonorm. Available from: https://meteonorm.com/en/.