

ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΟΡΟΓΙΑΝΝΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Μελέτη οικιακού συστήματος
τριπαραγωγής με
φωτοβολταϊκούς θερμικούς
συλλέκτες (PV/T) και αντλία
θερμότητας

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

IOANNIS KOROGIANNOS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING



Study of a residential trigeneration system with photovoltaic thermal collectors (PV/T) and heat pump

Section: Thermal Engineering

Supervisor: Sotirios Karellas, Professor NTUA

Athens 2023

--- κενή σελίδα ---

Ευχαριστίες

Μέσω της διαδικασίας μελέτης και συγγραφής της παρούσας εργασίας μου δόθηκε η ευκαιρία να αποκτήσω γνώσεις και να εμβαθύνω σε ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον και απαιτητικό θέμα. Συνεπώς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Σωτήριο Καρέλλα για την ανάθεση και την επίβλεψή της.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Αντώνιο Χαραλαμπίδη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον και ειδικά τους γονείς μου, για τη συνεχή στήριξη και ώθησή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας, αλλά και των σπουδών μου συνολικά.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

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

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

Ιωάννης Κορογιάννος

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Σύνοψη.....	8
Abstract.....	9
Κατάλογος Συμβόλων	10
1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Γενικά.....	14
1.2 Ηλιακή Ενέργεια.....	15
1.3 Ηλιακά Θερμικά Συστήματα	16
1.4 Φωτοβολταϊκοί Συλλέκτες	18
1.5 Φωτοβολταϊκοί-Θερμικοί Συλλέκτες	19
1.6 Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας.....	21
1.7 Αντλίες Θερμότητας	23
1.8 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	25
1.9 Υπό μελέτη ενεργειακό σύστημα.....	29
1.10 Σκοπός εργασίας	31
2. Μεθοδολογία - Μοντελοποίηση.....	32
2.1 Φωτοβολταϊκοί-Θερμικοί Συλλέκτες	32
2.1.1 Κλιματικά δεδομένα.....	32
2.1.2 Θερμικό σύστημα.....	32
2.1.3 Φωτοβολταϊκό σύστημα	37
2.2 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας.....	43
2.3 Αντλία Θερμότητας	48
2.4 Παροχή θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης	53
2.4.1 Παροχή θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης από σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	53
2.4.2 Παροχή θέρμανσης από αντλία θερμότητας.....	56
2.4.3 Παροχή ψύξης και ζεστού νερού χρήσης	58
2.5 Κοστολόγηση διάταξης	61
2.5.1 Αρχικό κόστος επένδυσης.....	61
2.5.2 Λειτουργικό κόστος.....	62
2.6 Βασική μεθοδολογία	63
2.7 Διαδικασία βελτιστοποίησης.....	68
3. Αποτελέσματα προσομοίωσης	70
3.1 Βελτιστοποίηση	70
3.2 Οικονομικά αποτελέσματα	70
3.3 Ενεργειακά αποτελέσματα	74
3.3.1 Φωτοβολταϊκοί-Θερμικοί Συλλέκτες	74
3.3.2 Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	83
3.3.3 Αντλία θερμότητας.....	89
3.3.4 Συνολικός απολογισμός	94

4. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	95
4.1 Συμπεράσματα	95
4.2 Μελλοντική εργασία	97
Κατάλογος Σχημάτων.....	98
Κατάλογος Πινάκων	101
Κατάλογος Αναφορών	102

Σύνοψη

Τα τελευταία έτη η ανάγκη για μετάβαση στην παραγωγή πράσινης ενέργειας εμφανίζεται πιο επιτακτική από ποτέ. Η αντικατάσταση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ως πρώτη ύλη με ανανεώσιμες και άλλες πιο καθαρές πηγές ενέργειας εφαρμόζεται και στον κτιριακό τομέα, με κύριο στόχο τη μείωση της ρύπανσης και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύσσονται διαρκώς τεχνολογίες όπως η αντλία θερμότητας, αλλά και εκείνες που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο ήλιος και επιδοτούνται από πολλά κράτη παγκοσμίως.

Το σύστημα που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία συνδυάζει την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας με Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες (PV/T), τα οποία λειτουργούν μεταξύ τους ανεξάρτητα, για την παραγωγή θέρμανσης και ψύξης με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας κατοικίας της Αθήνας, αλλά και για την παραγωγή ηλεκτρισμού για ιδιοκατανάλωση του συστήματος. Για βελτιωμένη εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας ενσωματώθηκε σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η μελέτη ξεκίνησε από την ξεχωριστή μοντελοποίηση και διαστασιολόγηση των υποσυστημάτων. Αφού αναπτύχθηκαν τα απαραίτητα μοντέλα και κώδικες στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, συνδυάστηκαν σε έναν κεντρικό κώδικα, ο οποίος προσομοιώνει τη λειτουργία του συνολικού συστήματος για είκοσι έτη. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση του συστήματος, με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, ως προς την οικονομική και ενεργειακή αποδοτικότητά του, με παραμέτρους την επιφάνεια των συλλεκτών και τον όγκο της δεξαμενής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Για τη βέλτιστη λύση που προέκυψε παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της εικοσαετούς λειτουργίας της διάταξης.

Η βέλτιστη λύση ήταν αρκετά ικανοποιητική, καθώς για $12,7 \text{ m}^2$ επιφάνεια συλλεκτών και όγκο δεξαμενής 5 m^3 προέκυψε το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας ίσο με $0,0522 \text{ €/kWh}$. Αυτό καθιστά μια πιθανή επένδυση στην εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος ελκυστική, απαιτώντας, βέβαια, υψηλό αρχικό κεφάλαιο, ίσο με $\text{€}15.258$. Με τη συμμετοχή των PV/T στο πρόγραμμα του ενεργειακού συμψηφισμού και την κάλυψη των απαιτήσεων του συστήματος σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω της ηλεκτροπαραγωγής τους, μειώνονται σε υψηλό ποσοστό τα έξοδα για αγορά ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η θερμοπαραγωγή τους καλύπτει σε υψηλό βαθμό τα φορτία θερμικής ενέργειας της κατοικίας. Σχεδιάστηκε, συνεπώς, ένα απλό στην εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση σύστημα τριπαραγωγής, το οποίο είναι ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικό και συμβάλλει παράλληλα στην πράσινη ενεργειακή μετάβαση.

Abstract

The necessity to transition to the production of green energy in recent years has never been more pressing. In order to reduce pollution and combat climate change, the building industry is also implementing the replacement of fossil fuel usage as a raw material with renewable and other cleaner sources of energy. To this purpose, numerous nations throughout the world are continually developing and providing subsidies for technologies like the heat pump as well as those that make use of renewable energy sources like the sun.

The system under consideration in this study combines the installation of a heat pump with Photovoltaic-Thermal (PV/T) collectors, which work independently of one another, to generate power for the system's own use as well as heating and cooling for a home in Athens. To better utilize the energy generated, a thermal energy storage system was included. The independent modeling and sizing of the subsystems served as the study's foundation. A core code that replicates the functioning of the entire system for twenty years was created after the relevant models and codes were constructed in the Matlab programming environment. After that, the system's economic and energy efficiency were optimized using the genetic algorithm method, with the surface area of the collectors and the volume of the thermal energy storage tank serving as parameters. The findings of the setup's twenty-year operation were provided for the optimized solution found.

The Levelized Cost Of Energy was achieved equal to 0.0522 €/kWh for 12.7 m² of collector surface and 5 m³ of tank volume, making the ideal solution pretty satisfactory. This makes it appealing to consider investing in the installation of such a system, which naturally requires a large initial cost of €15,258. The expenses for purchasing electricity are greatly lowered by PV/T's involvement in the net metering program and the covering of the system's electricity needs by their electricity generation, while their thermal generation substantially covers the thermal energy loads of the residence. As a result, a tri-generation system that is easy to install, run, and maintain while also being energy and financially efficient was developed, contributing at the same time towards a green energy transition.

Κατάλογος Συμβόλων

a	Συντελεστής διάχυσης	m^2/s
A	Επιφάνεια	m^2
at	Θερμική τάση	V
Ai	Παράγοντας ιδεατότητας	-
b	Συντελεστής απορρόφησης	$J/m^2K^{1.5}$
C	Κόστος	€
COP	Συντελεστής συμπεριφοράς	-
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα	J/kgK
D	Διάμετρος	m
E	Ενέργεια	J
EER	Δείκτης ενεργειακής απόδοσης	-
FF	Παράγοντας πλήρωσης	-
G	Ακτινοβολία	W/m^2
h	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής	W/m^2K
H	Ύψος	m
I	Ρεύμα	A
k	Σταθερά Boltzmann	J/K
L	Μήκος	m
LCOE	Σταθμισμένο κόστος ενέργειας	€/kWh
m, M	Μάζα	kg
n, N	Πλήθος	-
P	Ισχύς	W
Q	Θερμότητα	J
R	Ηλεκτρική αντίσταση	Ω
r_d	Επιτόκιο προεξόφλησης	%

q	Φορτίο ηλεκτρονίου	C
t	Χρόνος	sec
T	Θερμοκρασία	K, °C
U	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής	W/m ² K
V	Τάση	V
Vol	Όγκος	m ³
W	Πλάτος	m

Ελληνικά Σύμβολα

(ατ) _{eff}	Προϊόν της αποδοτικής απορροφητικότητας και διαπερατότητας	-
α	Απορροφητικότητα	-
β	Συντελεστής (packing factor)	-
ε	Ενέργεια διάκενου	eV
η	Βαθμός απόδοσης	-
λ	Θερμική αγωγιμότητα	W/mK
μ	Συντελεστής θερμοκρασίας	A/K
ρ	Πυκνότητα	kg/m ³
τ	Διαπερατότητα	-

Δείκτες

amb	Περιβάλλον
bs	Πίσω κάλυμμα
c, cell	Ηλιακό κύτταρο
col	Συλλέκτης
ex	Πειραματικός

f	Ρευστό
fixed	Σταθερός
hx	Εναλλάκτης θερμότητας
i, in	Εισερχόμενος
inc	Προσπίπτον
G	Γυαλί
oc	Ανοιχτοκυκλώματος
o, out	Εξερχόμενο
I, L	Απώλεια
load	Φορτίο
max	Μέγιστος
mp	Στη μέγιστη ισχύ
net	Δικτύου
p	Απώλεια
P	Παράλληλα
ph	Φώτο-
ref	Αναφοράς
S	Σε σειρά
sc	Βραχυκυκλώματος
sensible	Αισθητός
st	Σύστημα αποθήκευσης
t	Ολικός
T	Tedlar
tank	Δεξαμενή
u	Ωφέλιμος

Συνομεύσεις

PV Φωτοβολταϊκό

PV/Τ, Φ/Θ Φωτοβολταϊκό/Θερμικό

1. Εισαγωγή

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται μια γενική εισαγωγή στο αντικείμενο που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία και ύστερα μια εισαγωγή στα επιμέρους συστήματα που αναλύονται σε αυτή. Έπειτα, ύστερα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρουσιάζεται το υπό μελέτη σύστημα και αναλύεται ο σκοπός της εργασίας.

1.1 Γενικά

Τα τελευταία έτη γίνεται μια μαζική προσπάθεια για ανανέωση στην πολιτική της παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως. Ο λόγος είναι η επιτακτική ανάγκη για αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων ως πηγή παραγωγής ενέργειας, τα οποία ευθύνονται για περισσότερο από το 84% της παραγωγής αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα. Φυσικά, στον τομέα της παραγωγής ενέργειας συμπεριλαμβάνονται και τα κτίρια, τα οποία καταναλώνουν 20-40% της παραγόμενης ενέργειας παγκοσμίως [1].

Πιο συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, σύμφωνα με στατιστική έρευνα του 2011-2012 [2], περίπου το 70% των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και περίπου το 50% των συνολικών ενεργειακών αναγκών στα νοικοκυριά καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα. Παράλληλα, από τις μόνιμες κατοικίες της χώρας, πάνω από το 80% έχει χτιστεί πριν το έτος 2000, γεγονός που έχει ως αναπόφευκτο αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Για αυτόν τον λόγο γεννήθηκαν χρηματοδοτικά προγράμματα όπως το «Εξοικονομώ», αλλά και ρυθμιστικά πλαίσια, τα οποία στοχεύουν στην ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων. Με αυτές τις κινήσεις, τεχνολογίες όπως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και οι Αντλίες Θερμότητας έγιναν βασικοί πυλώνες για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού. Βέβαια, υπάρχει έλλειψη της απαιτούμενης τεχνογνωσίας και εμπειρίας για την εφαρμογή αυτού του εγχειρήματος, καθώς και άλλα προβλήματα, όπως η κατανόηση από τους καταναλωτές για την αποδοτικότητα και την εξοικονόμηση χρημάτων που συνοδεύει την προσπάθεια αυτή. Φυσικά, η τωρινή εποχή της οικονομικής αβεβαιότητας αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα προς τους κατοίκους της Ελλάδας [1].

Ως αποτέλεσμα, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω ανάπτυξη των τεχνολογιών που θα αντικαταστήσουν τα συστήματα παραγωγής ενέργειας μέσω ορυκτών καυσίμων. Αυτό πρέπει να γίνει με τρόπο τέτοιο, ώστε να είναι αποδοτικές και να απαιτούν όσο το δυνατό μικρότερο επενδυτικό κόστος, εξυπηρετώντας, παράλληλα, τον στόχο της προστασίας του περιβάλλοντος. Οι αντλίες θερμότητας ικανοποιούν τις απαιτήσεις αυτές σε μεγάλο βαθμό, καθώς χαρακτηρίζονται από τα χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, από την ευκολία στη χρήση τους και την εκμετάλλευση πηγών ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας, όπως οι ανανεώσιμες πηγές και τα απορρίμματα. Λόγω των

σημαντικών πλεονεκτημάτων τους και των ταχέων ρυθμών ανάπτυξης και ένταξής τους, αναμένονται να συμμετέχουν με υψηλό μερίδιο στην Ευρωπαϊκή ενεργειακή αγορά τα επόμενα έτη και να συνεισφέρουν στην ευελιξία του δικτύου, διότι συνδέουν τα ηλεκτρικά δίκτυα με την κάλυψη της ζήτησης για θέρμανση και ψύξη [3].

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον συνδυασμό τέτοιων συστημάτων για την εφαρμογή τους σε κατοικία της Αθήνας, καθώς και τη βελτιστοποίηση κάποιων παραμέτρων του. Το συνολικό σύστημα αποτελείται από Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς (PV/T) συλλέκτες που θα παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα και θα θερμαίνουν ένα δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των θερμικών φορτίων, αλλά και από μια αντλία θερμότητας που θα λειτουργεί ως πηγή ψύξης και ως δευτερεύουσα πηγή θέρμανσης. Συνεπώς, τα υποσυστήματα αυτά αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα τριπαραγωγής για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της κατοικίας, το οποίο δεν θα λειτουργεί με καύση ορυκτών καυσίμων, αλλά θα εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια και θα τροφοδοτείται συμπληρωματικά μέσω ηλεκτρικού ρεύματος.

1.2 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι ένας όρος που αναφέρεται στη συνδυασμένη ακτινοβολία φωτός και θερμότητας από τον ήλιο, η οποία αξιοποιείται με τη χρήση διαφόρων τεχνολογιών μετατροπής και μεταφοράς ενέργειας, όπως το φωτοβολταϊκό στοιχείο και ο ηλιακός θερμικός συλλέκτης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι η πηγή της, ο ήλιος, είναι απεριόριστη και δεν δύναται να εξαντληθεί. Επιπλέον, ο ήλιος ακτινοβολεί σε όλη την επιφάνεια του πλανήτη, πράγμα που σημαίνει ότι οι τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας είναι μια βιώσιμη επιλογή για όλους. Το ενδιαφέρον στοιχείο που εισάγουν αυτές οι τεχνολογίες είναι το σχετικά μικρό βάρος και η βιωσιμότητα για οικιακή εγκατάσταση. Με απλά λόγια, δεν μπορεί ο καθένας να εγκαταστήσει ή να επενδύσει σε υδροηλεκτρική ενέργεια, ούτε να χρησιμοποιήσει ένα γεωθερμικό σύστημα στην πίσω αυλή και σίγουρα όχι την παλιρροϊκή ενέργεια. Από την άλλη, η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας είναι δυνατή, αλλά οι περιορισμοί μεγέθους και βάρους μπορεί να επηρεάσουν την ικανότητα εγκατάστασης του καταναλωτή, ενώ παράλληλα έχει το μειονέκτημα ότι δεν είναι οικονομικά αποδοτική σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου [4].

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια κατάλληλη πηγή ενέργειας για οικιακούς χρήστες επειδή μπορεί να εγκατασταθεί σε στέγες, να μετακινηθεί και ακόμη και να ρυθμιστεί με διάφορους τρόπους. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι οι τεχνολογίες αυτές δεν λειτουργούν τη νύχτα λόγω απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η ηλιακή ενέργεια μπορεί να διαφέρει ως προς την έντασή της από το ένα μέρος στο άλλο. Σε γενικές γραμμές, η ηλιακή ενέργεια χωρίζεται σε δύο διαδικασίες, οι οποίες είναι:

1. Η μετατροπή του ορατού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αναφέρεται ως φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.
2. Η αποθήκευση και η μεταφορά της θερμικής της συνιστώσας για σκοπούς θέρμανσης, η οποία αναφέρεται ως ηλιοθερμική ενέργεια.

Επιπλέον, οι τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας παράγουν λιγότερες εκπομπές και είναι απαλλαγμένες από μηχανικές κινήσεις και θόρυβο [4].

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη ηλιακής ακτινοβολίας, η άμεσος και η διάχυτος. Η άμεσος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Αν αυτές οι δύο ακτινοβολίες προστεθούν μαζί με την ανακλώμενη ακτινοβολία από παρακείμενες επιφάνειες, τότε γίνεται αναφορά στην ολική ακτινοβολία. Επιπλέον, η άμεσος ακτινοβολία μπορεί να προσπίπτει σε οριζόντιο ή κεκλιμένο επίπεδο, με τη γωνία πρόσπτωσης να εκφράζει τη γωνία μεταξύ των ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια.

Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σημαντική για την κατάλληλη διαστασιολόγηση των ηλιακών συστημάτων. Στην πράξη, οι μόνοι παράγοντες που μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία ενός συστήματος όπως και της συγκεκριμένης εργασίας είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία, δηλαδή τα ηλιακά δεδομένα. Άρα αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα στη σχεδίαση του συστήματος. Οι τρόποι μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι είτε με τη χρήση του πυρηλιόμετρου είτε με τη χρήση του πυρανόμετρου. Αυτά συλλέγουν δεδομένα ως προς τα διάφορα είδη ακτινοβολίας και τα καταγράφουν για μετέπειτα χρήση τους για ερευνητικούς ή εμπορικούς σκοπούς, στην όλο και περισσότερο αυξανόμενη αγορά των ηλιακών εφαρμογών.

1.3 Ηλιακά Θερμικά Συστήματα

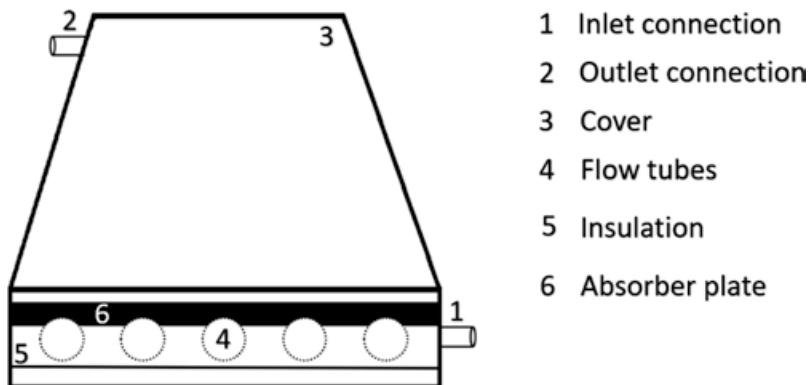
Ηλιακό θερμικό σύστημα είναι η συσκευή η οποία εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια για τη συλλογή θερμότητας. Απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρει θερμότητα σε κάποιο ρευστό μέσο, όπως το νερό ή ο αέρας. Το μέσο αυτό, έπειτα, μπορεί να θερμάνει άμεσα κάποιον εσωτερικό χώρο ή να αποθηκευτεί σε κάποια μονάδα αποθήκευσης.

Ως προς τα εργαζόμενα μέσα, ο αέρας έχει χαμηλότερο σημείο πήξης και ρίσκο διαρροής, καθώς και μειωμένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Από την άλλη, το νερό είναι πιο διαδεδομένο, λόγω της βελτιωμένης εκμετάλλευσης της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας [5]. Τα πιο σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν και άλλα πιο υψηλά αγωγίμα

μέσα για λειτουργία από χαμηλές θερμοκρασίες έως και 100 °C, όπως τα νανορευστά (nanofluids), τα οποία, όμως, αυξάνουν σημαντικά το κόστος του συστήματος.

Υπάρχουν διάφορα ηλιακά συστήματα που επιλέγονται ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας, απαιτείται χαμηλό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας και κατά προτίμηση χαμηλό κόστος και μικρή επιφάνεια εγκατάστασης. Ακριβώς αυτές τις προϋποθέσεις πληρούν οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες (Flat-Plate Collectors), οι οποίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι σε αστικές περιοχές και δύνανται να φθάσουν βαθμό απόδοσης έως και 70-87% [4]. Στο Σχήμα 1-1 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα ενός κοινού επίπεδου συλλέκτη, όπου κάποιο πλαίσιο που δεν φαίνεται στο σχήμα περικλείει και συγκρατεί τα εξής βασικά στοιχεία:

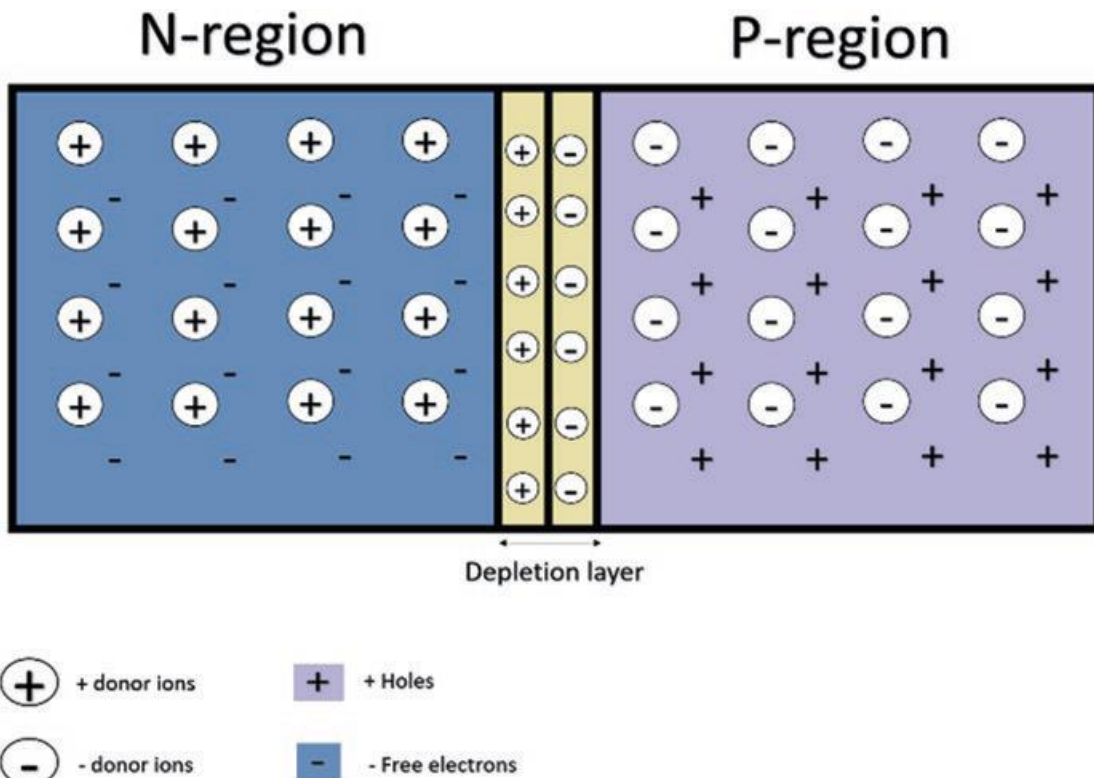
- 1 Είσοδος του ρευστού στον συλλέκτη.
- 2 Έξοδος του ρευστού από τον συλλέκτη.
- 3 Κάλυμμα το οποίο είναι κατασκευασμένο συνήθως από γυαλί ή πλαστικό. Συμβάλλει στη μείωση των θερμικών απωλειών λόγω συναγωγής ή ακτινοβολίας, ενώ παράλληλα επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να διέρχεται
- 4 Σωλήνες ροής οι οποίοι μεταφέρουν το ρευστό που θερμαίνεται μέσω του απορροφητήρα από την είσοδο στην έξοδο. Αν το ρευστό είναι κάποιο υγρό, όπως το νερό, η ύπαρξη σωλήνων είναι απαραίτητη, ενώ το ίδιο δεν ισχύει αν το εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας που μπορεί να έρχεται σε άμεση επαφή με τον απορροφητήρα.
- 5 Μόνωση η οποία τοποθετείται στο πίσω μέρος και πλάγια του συλλέκτη για να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες θερμότητας.
- 6 Απορροφητήρας που κατασκευάζεται από μεταλλικό (για παράδειγμα χαλκό ή χάλυβα) ή πλαστικό υλικό. Η επιφάνεια του επικαλύπτεται από κάποιο μαύρο υλικό (flat black material) με σκοπό την αύξηση της απορροφητικότητας.



Σχήμα 1-1: Επίπεδος συλλέκτης [4]

1.4 Φωτοβολταϊκοί Συλλέκτες

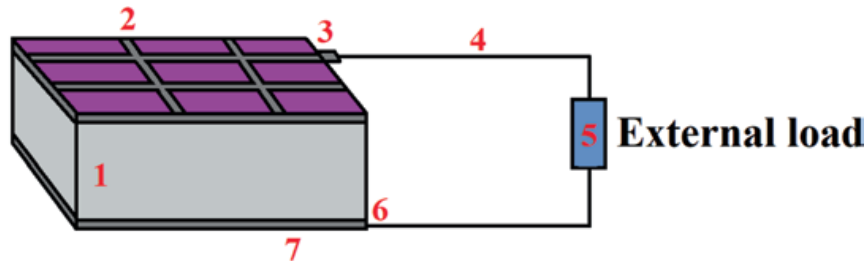
Το Φωτοβολταϊκό (Photovoltaic-PV) είναι μια ημιαγωγική συσκευή η οποία μετατρέπει το φως του ηλίου σε ηλεκτρισμό. Ο ημιαγωγός που αποτελεί το φωτοβολταϊκό είναι ουσιαστικά μία δίοδος p-n κατασκευασμένη από πυρίτιο (Si). Η δίοδος p-n αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου p, στον οποίο μπορούν να προστεθούν άτομα βορίου (B) με ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο από το πυρίτιο που έχει 4 και από έναν ημιαγωγό τύπου n, στον οποίο μπορούν να προστεθούν άτομα φωσφόρου (P) με ένα περισσότερο ηλεκτρόνιο από το πυρίτιο (Σχήμα 1-2). Όταν αυτοί οι δύο ημιαγωγοί τοποθετηθούν μαζί ξεκινά ροή ηλεκτρονίων από τον τύπο n στον τύπο p μέχρι να επιτευχθεί η ισορροπία. Μόλις επέλθει αυτή η κατάσταση, δημιουργείται ένα φράγμα δυναμικού που δεν επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρονίων ανάμεσα στους ημιαγωγούς. Όταν ο συλλέκτης απορροφήσει, όμως, φωτόνια, τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα να κινηθούν από τον τύπο p στον n χωρίς να μπορούν να επιστρέψουν. Έτσι προκαλείται αρνητικό φορτίο στον τύπο n, αφού υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων και θετικό φορτίο στον p, λόγω της περίσσειας από «τρύπες». Συνεπώς, αν δημιουργηθεί μέσω αγωγών ένα ηλεκτρικό κύκλωμα συνδεδεμένο με τη δίοδο p-n, θα κυκλοφορήσει ηλεκτρικό συνεχές ρεύμα (DC).



Σχήμα 1-2: Δίοδος p-n [4]

Ένα ηλιακό κύτταρο (solar cell) κατασκευάζεται από τη δίοδο p-n με το μπροστινό του μέρος να απαρτίζεται από μεταλλικές λωρίδες που συλλέγουν ηλεκτρόνια (Σχήμα 1-3). Το

πίσω μέρος κατασκευάζεται από αλουμίνιο ή μολυβδαίνιο και αποτελεί την αρνητική σύνδεση. Τα κελιά συνδέονται σε σειρά και φτιάχνουν τα πάνελ, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα, για αύξηση της τάσης ή του ρεύματος αντίστοιχα.



1. Two-level system (lower & upper state)
2. Transport (of energized carrier to contact)
3. Front Contact (first)
4. External circuit
5. Load (work)
6. Rear Contact (second)
7. Transport (of relaxed carrier back to Two-level system)

Σχήμα 1-3: Φωτοβολταϊκό κελί [4]

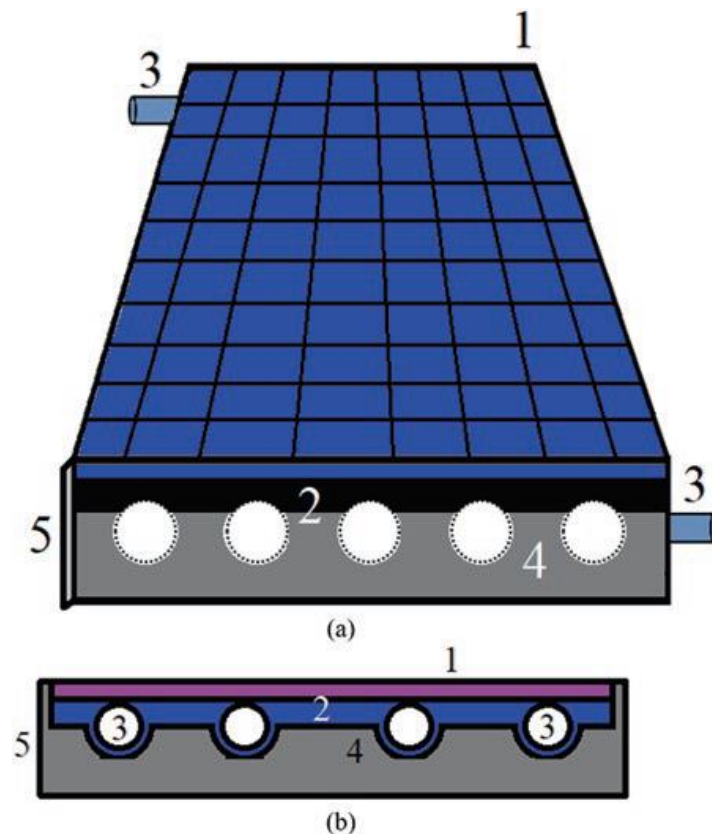
1.5 Φωτοβολταϊκοί-Θερμικοί Συλλέκτες

Οι φωτοβολταϊκοί-θερμικοί συλλέκτες (Photovoltaic/Thermal Collectors-PV/T) είναι υβριδικοί συλλέκτες που συνδυάζουν τη λειτουργία των ηλιακών θερμικών συστημάτων και των φωτοβολταϊκών πάνελ. Ο σκοπός κατασκευής τους και παράλληλα το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η ψύξη των φωτοβολταϊκών πάνελ μέσω μεταφοράς θερμότητας, χρησιμοποιώντας τη θερμότητα αυτή για την παραγωγή θερμικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για τη διατήρηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης σε υψηλά επίπεδα κατά τις ώρες με υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες τον μειώνουν σημαντικά. Συνεπώς, γίνεται λόγος για ένα σύστημα που αντικαθιστά τα φωτοβολταϊκά πάνελ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλότερο βαθμό απόδοσης, ενώ παράγει παράλληλα και θερμική ενέργεια.

Ένα πάνελ φωτοβολταϊκού-θερμικού συλλέκτη είναι ουσιαστικά ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, του οποίου το κάλυμμα έχει αντικατασταθεί με ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Τα μέρη που απαρτίζουν ένα τέτοιο πάνελ φαίνονται στο Σχήμα 1-4:

- 1 Φωτοβολταϊκό πάνελ
- 2 Θερμικός απορροφητήρας: προσκολλημένος στην πίσω πλευρά του φωτοβολταϊκού πάνελ, γενικά κατασκευασμένο από μέταλλο με υψηλή θερμική αγωγιμότητα όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο και ο γαλβανισμένος χάλυβας.

- 3 Συνδέσεις εισόδου και εξόδου: σωλήνες ή λάστιχα, είτε σκληρά είτε εύκαμπτα, συνδέονται στις δύο άκρες των σωλήνων ροής από όπου διαπερνά το υγρό.
- 4 Μόνωση: τοποθετημένη στο κάτω και στο πλάγιο μέρος του συλλέκτη με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής, ώστε να παραμείνει ο βαθμός απόδοσης του θερμικού-φωτοβολταϊκού συλλέκτη στα υψηλότερα δυνατά επίπεδα.
- 5 Πλαίσιο: συγκρατεί και προστατεύει όλα τα μέρη του συλλέκτη για ομαλή λειτουργία.



Σχήμα 1-4: Στοιχεία ενός τυπικού Φ/Θ συλλέκτη (a) 3-Δ (b) σε τομή [4]

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται μερικώς από το φωτοβολταϊκό πάνελ. Απώλειες προκύπτουν λόγω της αντανάκλασης του γυαλιού κάλυψης και του εσωτερικού φωτοβολταϊκού πάνελ. Το φωτοβολταϊκό απορροφά και μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία στη ηλεκτρική ισχύ, ενώ η θερμοκρασία των κελιών του αρχίζει να αυξάνεται λόγω των απωλειών και της θερμότητας της γύρω ατμόσφαιρας. Μέρος αυτής της θερμοκρασίας μεταφέρεται πίσω στη γύρω ατμόσφαιρα μέσω συναγωγής, ενώ το υπόλοιπο μεταφέρεται στον θερμικό απορροφητή μέσω αγωγής.

1.6 Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι απαραίτητα για αποδοτικότερη και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στον τομέα της παραγωγής θέρμανσης και ψύξης. Η παραγωγή θερμικής ενέργειας από τους ηλιακούς συλλέκτες παρουσιάζει ωριαίες, ημερήσιες και εποχιακές μεταβολές, οι οποίες δεν τους επιτρέπουν την άμεση κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης των χρηστών για όλα τα χρονικά διαστήματα της λειτουργίας τους. Αυτό το πρόβλημα καλούνται να λύσουν τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, με τα εξής πλεονεκτήματα:

- Συνεισφορά της παραγόμενης από τα ηλιακά θερμικής ενέργειας, ακόμα και σε περιόδους μη λειτουργίας τους.
- Αποφυγή απότομων μεταβολών στη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος με βάση τις μεταβολές ακτινοβολίας, οι οποίες επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων του συστήματος.
- Η περίσσεια ενέργειας χρησιμοποιείται, αντί να απορρίπτεται.
- Δυνατότητα μείωσης των διαστάσεων άλλων εξαρτημάτων, όπως συμπυκνωτή, ατμοποιητή, συμπιεστή και λέβητα.
- Βελτιωμένη λειτουργία ηλιακού συστήματος, με ταχύτερη εκκίνηση κύκλου και προθέρμανση.
- Κάλυψη ζήτησης αιχμής.

Ενώ υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την κατηγοριοποίηση των μέσων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ο συνηθέστερος είναι σε αυτές τις τρεις κατηγορίες:

1. Αποθήκευση αισθητής θερμότητας – με μεταβολές στη θερμοκρασία των υλικών αποθήκευσης.
2. Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας – με υλικά αλλαγής φάσης, συνήθως μεταξύ υγρής και αέριας, μέσω απορρόφησης ή απελευθέρωσης θερμότητας. Η θερμοκρασία παραμένει συνεχώς σταθερή.
3. Αποθήκευση θερμοχημικής θερμότητας – με χημικά συστατικά τα οποία αποθηκεύουν και απελευθερώνουν ενέργεια μέσω ενδόθερμων και εξώθερμων αντιστρεπτών χημικών αντιδράσεων.

Δύο σημαντικά μεγέθη για την αποθήκευση είναι ο συντελεστής διάχυσης a και ο συντελεστής απορρόφησης b (thermal diffusivity και thermal effusivity αντίστοιχα) των υλικών αποθήκευσης. Ο συντελεστής a όταν είναι υψηλός έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας στο μέσο, άρα γρηγορότερη φόρτιση-αποφόρτιση. Ο υψηλός συντελεστής b σημαίνει μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας. Περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.1) και (1.2), όπου λ είναι η θερμική αγωγιμότητα, ρ η πυκνότητα και c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού [6]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1.1)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (1.2)$$

Για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως η θέρμανση και η ψύξη κατοικίας, όπου το εύρος των απαιτούμενων θερμοκρασιών συμπεριλαμβάνεται στο εύρος 0-120 °C, η αποθήκευση αισθητής θερμότητας με μέσο το νερό είναι ο οικονομικότερος και απλούστερος τρόπος, ενώ παράλληλα είναι αρκετά αποδοτικός. Επιπλέον, το νερό εκτός από μέσο αποθήκευσης μπορεί να λειτουργήσει και ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Ο τρόπος αυτός μπορεί να επιτευχθεί είτε με μία είτε με δύο δεξαμενές αποθήκευσης. Τα ρευστά στις δύο δεξαμενές πρέπει να είναι σε διαφορετική θερμοκρασία και επίπεδο επιφάνειας. Στην περίπτωση της μιας δεξαμενής είναι θεμιτό να λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της θερμικής στρωματοποίησης, ώστε να υπάρχει πλευρά με υψηλή θερμοκρασία και πλευρά με χαμηλή θερμοκρασία. Με στερεά πληρωτικά υλικά εντός της δεξαμενής υποστηρίζεται περαιτέρω η στρωματοποίηση, η οποία με την πάροδο του χρόνου μπορεί να καταστραφεί.

Συγκεκριμένα το νερό έχει σχετικά υψηλό συντελεστή b , ίσο με $1,58 \times 10^3 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$. Από την άλλη έχει σχετικά χαμηλό συντελεστή a , ίσο με $0,142 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, κάτι το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα για το φαινόμενο της στρωματοποίησης εντός της δεξαμενής. Και οι δύο συντελεστές είναι υψηλότεροι από αρκετά υγρά που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας, όπως για παράδειγμα το έλαιο σιλικόνης ($a = 0.118 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $b = 0.49 \times 10^3 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$). Επιπλέον, το νερό αποθηκεύεται σε όλα τα είδη δοχείου, δεν απαιτεί εναλλάκτες θερμότητας και μπορεί να αναμειχθεί με αντιψυκτικά και αντιδιαβρωτικά υγρά, ώστε να αντιμετωπιστεί το μικρό εύρος λειτουργίας του (0-100 °C) και η διαβρωτικότητά του [6].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [7], από τους πιο ανταγωνιστικούς σχεδιασμούς για τη δεξαμενή αποθήκευσης είναι με εσωτερικά ενσωματωμένο εναλλάκτη θερμότητας μανδύα (mantle heat exchanger). Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός συνοδεύεται με απλότητα, μικρό μέγεθος και υψηλό επίπεδο στρωματοποίησης, σε σχετικά μικρό κόστος. Βέβαια, αυτός ο τύπος σχεδίασης δεν είναι απαραίτητος για την επίτευξη στρωματοποίησης, συνεπώς δεν θα χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Η αισθητή θερμότητα που αποθηκεύεται σε ένα υλικό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι τα υλικά έχουν μάζα και ειδική θερμοχωρητικότητα. Η μεταβολή στη θερμοκρασία του είναι ανάλογη της θερμότητας που αποθηκεύει, με βάση την εξίσωση (1.3) [6]:

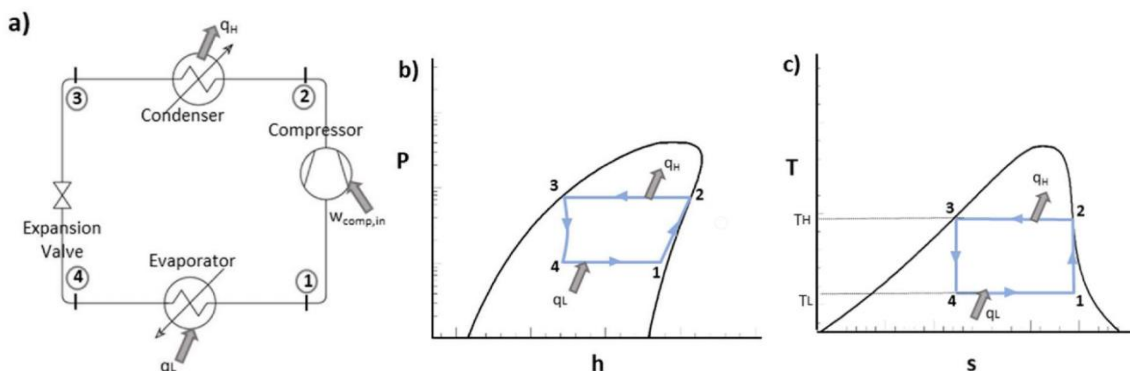
$$Q_{sensible} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (1.3)$$

Η T_1 είναι η θερμοκρασία στην αρχή της διαδικασίας αποθήκευσης θερμότητας και η T_2 στο τέλος.

1.7 Αντλίες Θερμότητας

Η αντλία θερμότητας (heat pump) είναι μία συσκευή η οποία μεταφέρει θερμότητα από μία πηγή σε μια άλλη μέσω ενός ψυκτικού κύκλου, με αντίστροφη ροή από την φυσική, δηλαδή εκείνη που υποδεικνύει ο 2^{ος} θερμοδυναμικός νόμος. Συνεπώς, μεταφέρει θερμότητα από χαμηλές θερμοκρασίες σε υψηλές, με τη συμβολή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το ψυκτικό υγρό, ή αλλιώς εργαζόμενο μέσο, συμπιέζεται σε υγρή φάση και εκτονώνεται πίσω σε αέρια φάση για την απορρόφηση και την αφαίρεση θερμότητας. Ενώ οι αντλίες θερμότητας διαχωρίζονται σε χημικές, απορρόφησης και συμπίεσης ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους [3], η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται αποκλειστικά τις αντλίες θερμότητας μηχανικής συμπίεσης.

Τα βασικά της μέρη της αντλίας θερμότητας μηχανικής συμπίεσης ατμού είναι οι δύο εναλλάκτες θερμότητας, δηλαδή ο ατμοποιητής (evaporator) και ο συμπυκνωτής (condenser), η εκτονωτική βαλβίδα (expansion valve) και ο συμπιεστής (compressor). Ένα απλό τέτοιο σύστημα, μαζί με τον ψυκτικό κύκλο Carnot (πλήρως αντιστρέψιμος) στον οποίο βασίζεται η λειτουργία της αντλίας θερμότητας, παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-5.



Σχήμα 1-5: α) Σχηματική απεικόνιση αντλίας θερμότητας, β) διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας ψυκτικού κύκλου Carnot, γ) διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας ψυκτικού κύκλου Carnot [8]

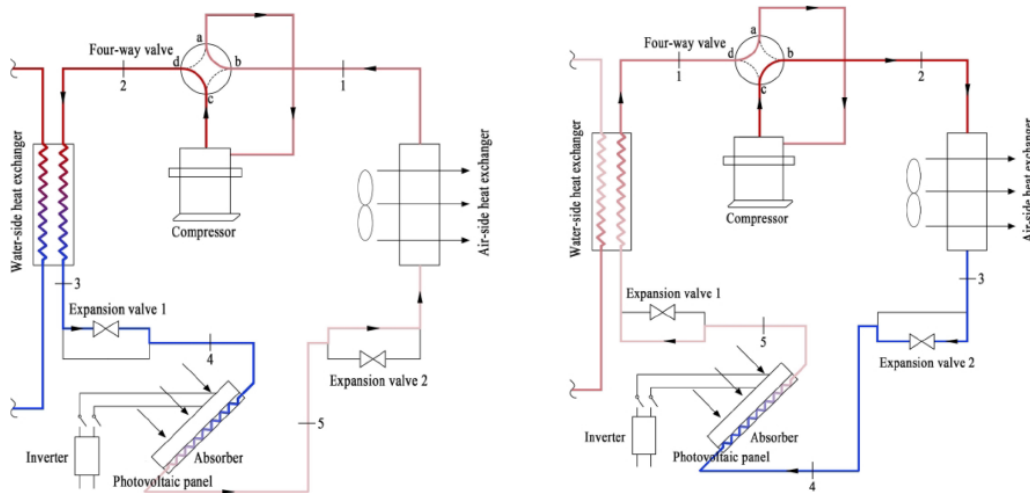
Η αντλία θερμότητας αποτελεί την πιο υποσχόμενη τεχνολογία για την παροχή θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης σε κτίρια κατοικιών, διαδραματίζοντας

πρωταγωνιστικό ρόλο στην προσπάθεια απανθρακοποίησης [9]. Τα βασικά της πλεονεκτήματα συνοψίζονται ως εξής:

- Μέσω της ίδιας συσκευής, της οποίας η λειτουργία μπορεί να αντιστραφεί εάν ο ατμοποιητής και ο συμπυκνωτής ανταλλάξουν ρόλους, παράγεται και θέρμανση τον χειμώνα και ψύξη το καλοκαίρι.
- Δύναται να εκμεταλλευτεί πηγές ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας.
- Λειτουργούν αδιάλειπτα και μπορούν να καλύψουν οποιοδήποτε ενεργειακό φορτίο, εάν έχει διαστασιολογηθεί κατάλληλα.
- Δεν παράγει αέρια του θερμοκηπίου.
- Μπορεί να συνδυαστεί με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Οι αντλίες θερμότητας διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τα μέσα μεταφοράς ενέργειας στους εναλλάκτες, οι οποίες είναι αέρα-αέρα, αέρα-νερού και νερού-νερού, ανάλογα με τα μέσα που διέρχονται από τους δύο εναλλάκτες. Γενικά, οι αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούν ως πηγή τον αέρα έχουν χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης, αφού η θερμοκρασία περιβάλλοντος συνεχώς μεταβάλλεται. Από την άλλη είναι φθηνότερες από εκείνες που έχουν ως πηγή το νερό, έχουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογής και ο αέρας ως μέσο δεν κινδυνεύει να παγώσει σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με το νερό. Οι αντλίες που χρησιμοποιούν ως πηγή το νερό είναι, κυρίως, εκείνες που χρησιμοποιούν γεωθερμικές πηγές ενέργειας.

Ως προς την αντιστροφή της ροής, ο συχνότερος τρόπος για να επιτευχθεί είναι η χρήση της τετραοδικής βαλβίδας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-6(α), το οποίο αποτελεί ένα σύστημα αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας με άμεση σύνδεση με τον Φωτοβολταϊκό-Θερμικό συλλέκτη, κατά τη χειμερινή λειτουργία ανοίγουν τα κανάλια a-b και c-d. Έτσι, ο ατμός χαμηλής πίεσης (κατάσταση 1) συμπιέζεται στον συμπιεστή και ο ατμός υψηλής πίεσης (κατάσταση 2) οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας που δρα ως συμπυκνωτής. Το υπόψυκτο ή κορεσμένο υγρό που εξέρχεται (κατάσταση 3) εκτονώνεται μέσω εκτονωτικής βαλβίδας για να δημιουργηθεί το μείγμα ατμού-υγρού χαμηλής πίεσης (κατάσταση 4) και να κατευθυνθεί προς τον Φωτοβολταϊκό-Θερμικό συλλέκτη για να ατμοποιηθεί (κατάσταση 5). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται με μια επιπρόσθετη εκτονωτική βαλβίδα και έναν εναλλάκτη που επαφίεται με το περιβάλλον και δρα ως ατμοποιητής (μαζί με τον συλλέκτη). Το καλοκαίρι, ανοίγουν τα άλλα δύο κανάλια, δηλαδή τα a-d και c-b. Η ροή αντιστρέφεται, όπως και οι ρόλοι των δύο εναλλακτών θερμότητας [10].



Σχήμα 1-6: α) Χειμερινή λειτουργία αντλίας θερμότητας, β) Θερινή λειτουργία αντλίας θερμότητας [10]

Η αντλία θερμότητας, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να συνδυαστεί εύκολα με πηγές ανανεώσιμης ενέργειας και κατά κύριο λόγο να εκμεταλλευτεί την ηλιακή ενέργεια. Όταν η αντλία θερμότητας συνδέεται με ηλιακό θερμικό σύστημα, η διάταξη μπορεί να ανήκει σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Οι αντλίες θερμότητας άμεσης εκτόνωσης (direct expansion) εντάσσουν το ηλιακό θερμικό σύστημα στον θερμοδυναμικό τους κύκλο ως ατμοποιητή, ενώ οι έμμεσης εκτόνωσης (indirect expansion) λειτουργούν ανεξάρτητα από το ηλιακό θερμικό σύστημα [5]. Επιπλέον, αν η αντλία θερμότητας χρησιμοποιεί μόνο τον ήλιο ως πηγή ενέργειας, αποκαλείται μονής πηγής (single source), ενώ αν χρησιμοποιεί και δευτερεύουσα πηγή ενέργειας, τον αέρα ή τη γεωθερμία, αποκαλείται διπλής πηγής (dual source) [9].

1.8 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ο Miglioli et. al [9] πραγματοποιώντας ανασκόπηση των εφαρμογών του συνδυασμού αντλιών θερμότητας με Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες σε κτίρια, αναφέρει ότι οι αντλίες θερμότητας μηχανικής συμπίεσης ατμού είναι οι πιο διαδεδομένες για την κάλυψη των κτιριακών θερμικών αναγκών, καθώς συμφέρουν ενεργειακά, οικονομικά και παράγουν λιγότερο CO₂. Επιπλέον, από όλα τα πιθανά συστήματα, καταλήγει ότι η πιο υποσχόμενη επιλογή είναι η έμμεση σύνδεση του συλλέκτη με την αντλία θερμότητας, αντί για την άμεση, όπου ο συλλέκτης λειτουργεί ως ο ατμοποιητής της αντλίας θερμότητας, καθώς και η χρήση δεύτερης πηγής, πέρα από την ηλιακή ενέργεια, όπως ο αέρας ή η γεωθερμία. Έτσι, το σύστημα γίνεται πιο ευέλικτο και φυσικά, μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης. Με την προσθήκη ενός μέσου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και με σύστημα ελέγχου, το

σύστημα γίνεται πιο αξιόπιστο και φθάνει υψηλότερα επίπεδα απόδοσης. Από την άλλη πλευρά, σημειώνει την ανάγκη για περισσότερες ολοκληρωμένες αναλύσεις κόστους τέτοιων συστημάτων, καθώς και περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα για πραγματικά δεδομένα της απόδοσής τους.

Ο Yang et. al [11] επισημαίνει ότι όταν ο συλλέκτης χρησιμοποιείται ως ατμοποιητής στον κύκλο της αντλίας θερμότητας, ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) της αυξάνεται, διότι επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες ατμοποίησης. Βέβαια, ένα τέτοιο σύστημα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψύξη, ούτε μπορεί να συνδυαστεί με άλλη πηγή, καθιστώντας το τελικά ασύμφορο. Επιπρόσθετα, υπογραμμίζει ότι η χρήση της ηλιακής ενέργειας παρόλο που αυξάνει την απόδοση της αντλίας θερμότητας, μειώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος, λόγω της κατανάλωσης των υπόλοιπων υποσυστημάτων. Τέλος, για την περίπτωση που η αντλία θερμότητας και ο συλλέκτης λειτουργούν ανεξάρτητα, με τη χρήση θερμικής αποθήκευσης, καταλήγει ότι είναι πιο ευρέως διαδεδομένη λόγω της απλότητας του συστήματος κι αν λειτουργεί κάποιες φορές σε χαμηλότερα επίπεδα απόδοσης.

Ο Lerch et. al [12] αναλύει τα αποτελέσματα μιας έρευνας για τα συστήματα που συνδυάζουν αντλία θερμότητας με εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας σε κατοικίες διαφόρων χωρών και αναφέρει ότι στο 70% των συστημάτων αυτών, η αντλία θερμότητας με το ηλιακό σύστημα βρίσκονται σε παράλληλη σύνδεση και αποδίδει το ποσοστό αυτό στην απλότητα των παράλληλων συστημάτων. Από την έρευνα αυτή προέκυψε, επίσης, ότι μόνο το 8% των συστημάτων αυτών περιλαμβάνει τους Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες. Εξετάζοντας, στη συνέχεια, έξι (6) διαφορετικά συστήματα με συνδυασμό αντλίας θερμότητας και ηλιακού συλλέκτη, προσομοιώνει τη μηνιαία λειτουργία τους σε τρία (3) κτίρια για παροχή θέρμανσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στα συστήματα στα οποία η δεξαμενή αποθήκευσης θερμαινόταν και από τις δύο πηγές, η αντλία θερμότητας δεν λειτούργησε καθόλου για τους θερινούς μήνες. Επιπλέον, σε συστήματα που το ρευστό του συλλέκτη εκτός από το να θερμαίνει τη δεξαμενή, χρησιμοποιήθηκε και για προθέρμανση του αέρα εισόδου στην αντλία θερμότητας ή σαν είσοδος σε δεύτερο ατμοποιητή εντός του κύκλου της, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται σε ποσοστό 1-2%, αποτέλεσμα που δεν καθιστά την εναλλακτική αυτή ελκυστικότερη από μια απλή παράλληλη διάταξη.

Ο Cui et. al [13] επέλεξε μια κατοικία του Ηνωμένου Βασιλείου για να αναλύσει την ενεργειακή απόδοση και το κόστος κύκλου ζωής μιας διάταξης αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιεί Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς Συλλέκτες για ατμοποίηση στον κύκλο. Η αντλία θερμότητας αναλαμβάνει την παροχή θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης στην κατοικία, ενώ όση ηλεκτρική ενέργεια δεν καταναλώνεται από το κτίριο, παρέχεται στο δίκτυο. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το μοντέλο των σταθερών εγγυημένων τιμών (Feed in Tariff) παρείχε τα βέλτιστα οικονομικά αποτελέσματα, με την περίοδο αποπληρωμής να

ανέρχεται στα 4,15 έτη και την Καθαρή Παρούσα Αξία να παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Ο μήνας Ιούνιος είχε την υψηλότερη παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, αλλά και την υψηλότερη ηλεκτρική κατανάλωση, με τις αποδόσεις να παραμένουν σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες. Επιπλέον, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν ήταν ικανή να καλύψει εξ ολοκλήρου τις ανάγκες της κατοικίας.

Ο Del Amo et. al [14] αναλύει και βελτιστοποιεί μια υπό κατασκευή εγκατάσταση Φωτοβολταϊκών-Θερμικών συλλεκτών, Φωτοβολταϊκών συλλεκτών και αντλίας θερμότητας στο πανεπιστήμιο της Σαραγόσα για θέρμανση χώρου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι τον χειμώνα υπήρχε υψηλότερη θερμική παραγωγή από το καλοκαίρι, καθώς είχε πραγματοποιηθεί υποδιαστασιολόγηση της δεξαμενής αποθήκευσης και δεν ήταν εφικτή η μέγιστη δυνατή αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Από τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το 13,8% καταναλώνεται από την αντλία θερμότητας, παρόλα αυτά δεν είναι εφικτό για τους συλλέκτες να καλύψουν τις απαιτήσεις της αντλίας σε όλη τη διάρκεια του έτους. Με παραμετρική μελέτη, αποδείχθηκε ότι με αρκετά μεγαλύτερη διαστασιολόγηση του αποθηκευτικού μέσου επιτυγχάνεται πολύ υψηλότερη συμμετοχή της ηλιακής ενέργειας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, αλλά με κόστος που ξεπερνούσε την επενδυτική δυνατότητα. Για τον εφαρμοζόμενο σχεδιασμό, η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης ανέρχεται στα 15,4 έτη, με εσωτερικό βαθμό απόδοσης ίσο με 4,1%.

Οι Bellos, Tzivanidis [15] μελέτησαν ένα σύστημα συμπαραγωγής με αντλία θερμότητας και Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες, του οποίου ο βασικός στόχος είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να καλύπτει τις ανάγκες της αντλίας θερμότητας. Ο συλλέκτης ήταν σειριακά συνδεδεμένος με το σύστημα. Έπειτα, βελτιστοποίησαν το σύστημα ως προς το εργαζόμενο μέσο και πραγματοποίησαν μια δυναμική μελέτη ως προς την εφαρμογή του στα κλιματικά δεδομένα της Αθήνας για τους μήνες Νοέμβριο έως Απρίλιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το εργαζόμενο μέσο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο ως προς την εστίαση στη θερμική ή την ηλεκτρική παραγωγή. Κατά τον μήνα Ιανουάριο, η ενεργειακή απόδοση ελαχιστοποιείται, ενώ, παράλληλα, η εξεργειακή απόδοση μεγιστοποιείται, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Ο μήνας Δεκέμβριος απέδωσε τις χαμηλότερες παραγωγές. Παρόμοιο σύστημα εξετάζει πειραματικά και ο Shao et. al [5] και τα αποτελέσματα των μετρήσεων απέδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα, τα οποία βασίζονταν σε μεγάλο βαθμό στην ηλιακή ακτινοβολία. Το καλοκαίρι η παραγωγή ενέργειας του συλλέκτη κάλυπτε τις ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά όχι και τον χειμώνα.

Ο Yang et. al [10] μοντελοποίησε και πραγματοποίησε αριθμητικές προσομοιώσεις σε ένα αντίστοιχο σύστημα, με την αντλία θερμότητας όμως να είναι αντιστρεπτή, μέσω μιας τετραοδικής βαλβίδας. Ο συλλέκτης αποτελούσε και πάλι μέρος του κύκλου της αντλίας θερμότητας και συνδυάστηκε με έναν εναλλάκτη που επικοινωνούσε με το περιβάλλον, ώστε να εξυπηρετείται η παραγωγή ψύξης. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η συνολική

επιφάνεια των συλλεκτών επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος και αν ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο επίπεδο, τότε τη μειώνει λόγω της μικρότερης δυνατότητας απορρόφησης της παραγόμενης θερμικής ενέργειας κατά τους θερινούς μήνες. Συγκρίνοντας την περίπτωση που το Φωτοβολταϊκό πάνελ ψύχεται από το εργαζόμενο μέσο και την περίπτωση που δεν ψύχεται, απέδειξε ότι στην πρώτη περίπτωση η ηλεκτρική απόδοση παραμένει διαρκώς υψηλότερη.

Ο Li et. al [16] μελετά ένα σύστημα τριπαραγωγής για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός ξενοδοχείου Κινεζικής πόλης. Ο Φωτοβολταϊκός-Θερμικός συλλέκτης παράγει ηλεκτρικό ρεύμα για την τροφοδότηση του μηχανικού συμπιεστή της αντλίας θερμότητας και του ξενοδοχείου. Επιπλέον, η θερμική ενέργεια που παράγει χρησιμοποιείται σε ένα υποσύστημα απορρόφησης (με LiBr), το οποίο χρησιμεύει στην υπόψυξη του εργαζόμενου μέσου πριν τη διέλευση από τον ατμοποιητή, για την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Το υποσύστημα αυτό συνδέεται με έναν πύργο ψύξης. Αναφέρει ότι η απορρόφηση είναι πιο συμφέρουσα για εφαρμογές σε κτίρια μεγάλης κλίμακας όπως αυτό, αλλά καταλήγει ότι η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα, ίσως και λόγω των χαμηλών επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίστοιχη εφαρμογή μελετά και ο Chen et. al [17], με διαφορετικές διατάξεις και σε τρεις διαφορετικές πόλεις της Κίνας. Καταλήγει σε αντίστοιχα αποτελέσματα, διότι αναφέρει ότι τα επίπεδα ακτινοβολίας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης.

Επίσης ενδιαφέρουσα εφαρμογή αποτελεί εκείνη που μελετάει ο Kong et. al [18], δηλαδή η εγκατάσταση δύο αντλιών θερμότητας με δύο δεξαμενές αποθήκευσης σε σύνδεση με Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες. Σκοπός του συστήματος αυτού είναι να καλύπτονται ταυτόχρονα ψυκτικά και θερμικά φορτία. Οι δύο θερμοδυναμικοί κύκλοι, ο χαμηλής και ο υψηλής θερμοκρασίας, συνδέονται μεταξύ τους με έναν εναλλάκτη θερμότητας, που λειτουργεί ως συμπυκνωτής για τον πρώτο και ως ατμοποιητής για τον δεύτερο. Βέβαια, δίνεται έμφαση κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή των συλλεκτών, οι οποίοι τροφοδοτούν τους συμπιεστές των αντλιών θερμότητας και δευτερευόντως παρέχουν ρεύμα στο δίκτυο.

Ο Πίνακας 1-1 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μελέτης που αναλύεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Πίνακας 1-1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Συγγραφέας	Ηλιακό Θερμικό Σύστημα	Ενεργειακό Φορτίο	Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας	Περιοχή	Τύπος Εφαρμογής	Τύπος Αντλίας Θερμότητας
Lerch et. al [12]	Ηλιακά	Θέρμανση	Ναι	-	Προσομοίωση σε Κτίρια	Διάφοροι

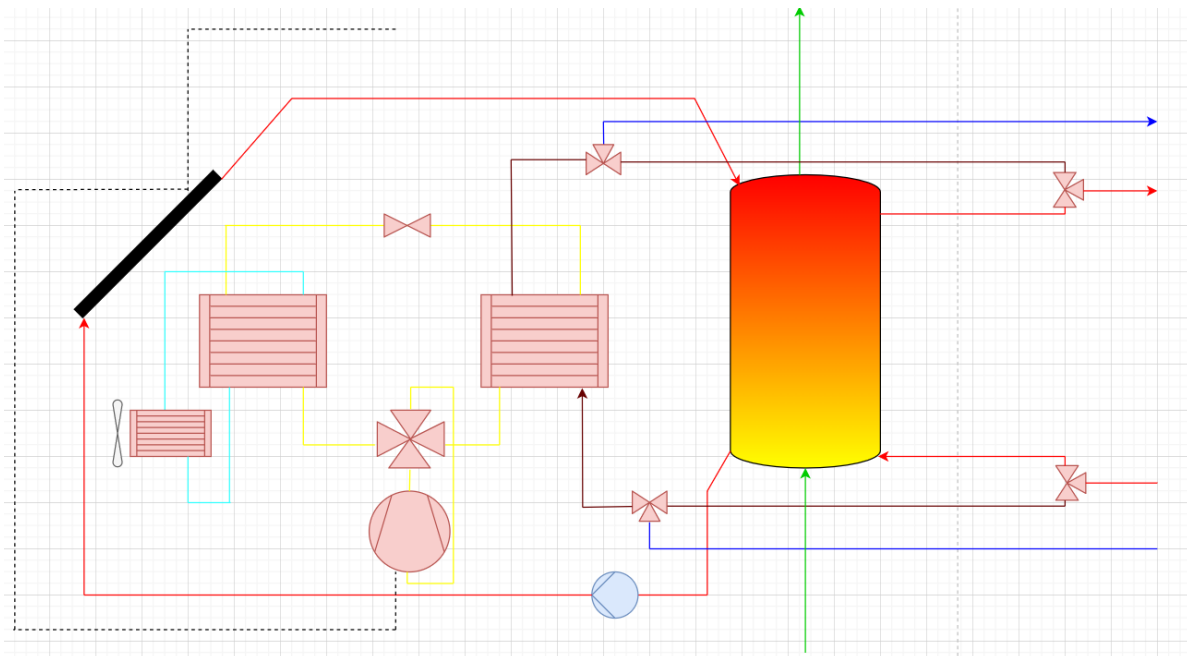
Cui et. al [13]	Φ-Θ	Θέρμανση + Ηλεκτρικό ρεύμα	Όχι	Ηνωμένο Βασίλειο	Προσομοίωση σε Κατοικία	Μονής πηγής άμεσης εκτόνωσης
Del Amo et. al [14]	Φ-Θ	Θέρμανση	Ναι	Ισπανία	Πείραμα σε Ακαδημαϊκό Κτίριο	Μονής πηγής έμμεσης εκτόνωσης
Bellos, Tzivanidis [15]	Φ-Θ	Θέρμανση + Ηλεκτρικό ρεύμα	Ναι	Ελλάδα	Προσομοίωση	Μονής πηγής έμμεσης εκτόνωσης
Shao et. al [5]	Φ-Θ	Θέρμανση + Ηλεκτρικό ρεύμα	Ναι	Κίνα	Πείραμα	Μονής πηγής έμμεσης εκτόνωσης
Yang et. al [10]	Φ-Θ	Θέρμανση + Ψύξη + Ηλεκτρικό ρεύμα	Όχι	Κίνα	Πείραμα	Διπλής πηγής άμεσης εκτόνωσης
Li et. al [16]	Φ-Θ	Θέρμανση + Ψύξη + Ηλεκτρικό ρεύμα	Ναι	Κίνα	Προσομοίωση σε ξενοδοχείο	Μονής πηγής έμμεσης εκτόνωσης
Chen et. al [17]	Φ-Θ	Θέρμανση + Ψύξη + Ηλεκτρικό ρεύμα	Ναι	Κίνα	Προσομοίωση	Μονής πηγής έμμεσης εκτόνωσης
Kong et. al [18]	Φ-Θ	Θέρμανση + Ψύξη + Ηλεκτρικό ρεύμα	Ναι	Κίνα	Προσομοίωση	Δύο Α.Θ. σε αλληλουχία μονής πηγής έμμεσης εκτόνωσης

1.9 Υπό μελέτη ενεργειακό σύστημα

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτουν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Αρχικά, υπάρχουν πολλές εφαρμογές που συνδυάζουν αντλία θερμότητας με ηλιακό θερμικό σύστημα και ειδικά Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες, όμως οι περισσότερες εξ αυτών δεν χρησιμοποιούνται για παραγωγή ψύξης, παρά μόνο για θέρμανση. Ακόμα και από αυτές που χρησιμοποιούνται για κάλυψη ψυκτικών φορτίων,

μόνο εκείνη του Yang et. al συμπεριλάμβανε αντιστροφή της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για την παραγωγή της ψύξης. Ο Kong et. al παρόλο που παρουσίασε ένα σύστημα που παράγει και ψύξη και θέρμανση, αυτό γίνεται με τη χρήση μιας σύνθετης και υψηλού κόστους εφαρμογής με χρήση δύο αντλιών θερμότητας.

Από την άλλη, ο Yang et. al μοντελοποίησε μια αντλία θερμότητας που συμπεριλάμβανε τους συλλέκτες στον θερμοδυναμικό της κύκλο για ατμοποίηση. Παρόλο που αυτό είναι μια αποδοτική λύση δεν προτιμάται, όπως προαναφέρθηκε, λόγω του υψηλότερου βαθμού πολυπλοκότητας. Συνεπώς, σε μια απλή οικιακή εφαρμογή, όπως αυτή που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, θα πρέπει να προτιμηθεί η ανεξάρτητη λειτουργία των Φωτοβολταϊκών-Θερμικών συλλεκτών και της αντλίας θερμότητας. Το σύστημα της εργασίας θα συνδυάζει τα δύο αυτά συστήματα για τριπαραγωγή, δηλαδή παραγωγή θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρισμού, σε κατοικία στην Αθήνα. Η λειτουργία των δύο συστημάτων είναι ανεξάρτητη και στο σύστημα εντάσσεται μέσω αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, που είναι απαραίτητο για την επέκταση της αποδοτικής λειτουργίας του συλλέκτη. Η αντλία θερμότητας είναι μονής πηγής (με αέρα), ώστε να καθίσταται δυνατή η αντιστροφή της λειτουργίας της και η παραγωγή ψύξης και θέρμανσης. Το ηλεκτρικό ρεύμα παράγεται μόνο από τους συλλέκτες και τροφοδοτεί τον συμπιεστή του συστήματος, με την περίσσεια αυτού να τροφοδοτεί το δίκτυο. Το υπό μελέτη σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-7.



Σχήμα 1-7: Υπό μελέτη σύστημα

Η ροή του νερού μεταξύ συλλέκτη και δεξαμενής πραγματοποιείται χάρη σε μια αντλία (κυκλοφορητή), ενώ η αντιστροφή της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας γίνεται με τη βοήθεια τετραοδικής βαλβίδας. Η επικοινωνία του ενός εναλλάκτη με το περιβάλλον γίνεται μέσω ενός δεύτερου εναλλάκτη. Τέλος, το ζεστό νερό χρήσης διέρχεται από τη δεξαμενή και λαμβάνει θερμότητα μέσω ενός εναλλάκτη σπειροειδούς σωλήνωσης (coiled tube heat exchanger). Η διάταξη θα εξεταστεί αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα της εργασίας.

1.10 Σκοπός εργασίας

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας, αρχικά, είναι η εύρεση κατάλληλης μεθοδολογίας για τη μοντελοποίηση των επιμέρους συστημάτων της παραπάνω διάταξης και η δημιουργία ενός συνολικού μοντέλου. Στην πορεία, πραγματοποιείται προσπάθεια βελτιστοποίησης του συστήματος, ως προς δύο από τις σημαντικότερες παραμέτρους του συστήματος, τη συνολική επιφάνεια των συλλεκτών, δηλαδή τον αριθμό των πάνελ που θα χρησιμοποιηθούν και του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Όλα τα παραπάνω πραγματοποιούνται με κώδικα υλοποιημένο στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Ένα μέρος του συνόλου των κωδικών υλοποιήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας, ενώ ένα άλλος μέρος λήφθηκε από το εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του ΕΜΠ (εφεξής «εργαστήριο»). Από το εργαστήριο λήφθηκαν, επίσης, και τα κλιματικά δεδομένα και τα φορτία θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης.

Ο σκοπός είναι να παρουσιαστεί ένα σύστημα που να πληροί στον μεγαλύτερο πιθανό βαθμό τρία βασικά κριτήρια: την ενεργειακή αποδοτικότητα, την εξοικονόμηση χρημάτων και την απλότητα εγκατάστασης και συντήρησης, μιας και γίνεται λόγος για μια διάταξη που θα εγκατασταθεί σε κατοικία. Η απλότητα έχει ήδη επιτευχθεί από την αρχική επιλογή του σχεδιασμού του συστήματος, μέσω της βιβλιογραφικής έρευνας, συνεπώς η βελτιστοποίηση έχει στόχο την εύρεση κατάλληλης ισορροπίας μεταξύ των άλλων δύο κριτηρίων, μιας και είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Η συνεισφορά στην εύρεση αποδοτικών οικιακών ενεργειακών συστημάτων μέσω μιας αναλυτικής παρουσίασης της διάταξης της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί επιτυχία, αλλά σημαντικό είναι η εργασία να πετύχει και έναν άλλον σκοπό, την παρουσίαση μιας ορθολογικής μεθοδολογίας και μοντελοποίησης. Ειδικά ως προς τους Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες, οι οποίοι είναι ένα όχι και τόσο διαδεδομένο σύστημα, η εργασία στοχεύει στην ενημέρωση του αναγνώστη ως προς τη λειτουργία και την απόδοσή τους.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση της μεθοδολογίας και των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα και συζητούνται τα συμπεράσματα και οι δυνατότητες και μελλοντική εξέλιξη του θέματος.

2. Μεθοδολογία - Μοντελοποίηση

2.1 Φωτοβολταϊκοί-Θερμικοί Συλλέκτες

2.1.1 Κλιματικά δεδομένα

Ο ήλιος αποτελεί τη βασική πηγή ενέργειας του συστήματος, συνεπώς η ενέργεια αυτή είναι και ένα από τα βασικά δεδομένα που απαιτούνται. Συγκεκριμένα, το ζητούμενο μέγεθος είναι η ακτινοβολία που φθάνει ανά ορισμένο χρονικό διάστημα στην επιφάνεια του συλλέκτη. Οι συλλέκτες δεν είναι οριζόντια τοποθετημένοι στη στέγη, αλλά έχουν την κλίση του γεωγραφικού πλάτους της Αθήνας, καθώς έτσι μεγιστοποιείται η απορροφώμενη ακτινοβολία. Συνεπώς, το δεδομένο που απαιτείται είναι η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, στην οποία συνεισφέρουν η άμεσος και η διάχυτος ακτινοβολία. Παρόλο που υπάρχει μέθοδος υπολογισμού της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, λαμβάνοντας ως δεδομένα τις ακτινοβολίες οριζοντίου επιπέδου, τα ηλιακά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία αφορούν κεκλιμένο επίπεδο με την κλίση να ισούται με το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας, δηλαδή $37,98^\circ$. Το χρονικό διάστημα επιλέγεται με βάση τις απαιτήσεις των υπολογισμών και στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η ωριαία ακτινοβολία ενός έτους, ξεκινώντας από την πρώτη ημέρα του έτους.

Ός προς τα υπόλοιπα κλιματικά δεδομένα, χρησιμοποιείται η θερμοκρασία ξηρού βολβού, δηλαδή η θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως μετρείται από ένα θερμόμετρο, της οποίας μέτρηση έχει ληφθεί ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους για την Αθήνα. Επιπλέον, απαιτείται και η θερμοκρασία του νερού του δικτύου διανομής της ΕΥΔΑΠ, η οποία λαμβάνεται ανά το ίδιο χρονικό διάστημα. Τα υπόλοιπα κλιματικά δεδομένα που βρίσκονται σε διαθεσιμότητα δεν είναι χρήσιμα για τη συγκεκριμένη εργασία.

2.1.2 Θερμικό σύστημα

Όπως έχει προαναφερθεί, οι υβριδικοί PV/T συλλέκτες που χρησιμοποιούνται έχουν δύο σκέλη, τον Θερμικό και τον Φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Η πρώτη αντιμετώπιση ήταν τα δύο αυτά σκέλη να αντιμετωπιστούν ως δύο ξεχωριστά εξαρτήματα, που απλά τοποθετούνται μαζί. Δηλαδή το θερμικό σύστημα να μοντελοποιηθεί ως επίπεδος ηλιακός συλλέκτης. Παρόλο που η γενική αρχή είναι ίδια και ισχύει ότι η ωφέλιμη θερμική ενέργεια προκύπτει μέσω της αφαίρεσης των θερμικών απωλειών από την απορροφώμενη ηλιακή ενέργεια, το σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι τα δύο αυτά σκέλη στην πραγματικότητα αλληλοεπιδρούν και το ένα επηρεάζει τη λειτουργία του άλλου.

Η θερμοκρασία των ηλιακών κυττάρων είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία του θερμικού απορροφητήρα και κατ' επέκταση με τη θερμοκρασία της ροής που εισέρχεται και εξέρχεται από το πάνελ. Η θεμελιώδης αυτή διαφορά διαχωρίζει τους

Φωτοβολταϊκούς-Θερμικούς συλλέκτες από τους συμβατικούς φωτοβολταϊκούς συλλέκτες, καθώς η θερμοκρασία στην οποία το κύτταρο λειτουργεί, συνεπώς και η ηλεκτρική απόδοσή του, εξαρτάται άμεσα από τη ροή στο θερμικό κύκλωμα [14]. Η αλληλοεπίδραση αυτή, επίσης, καθιστά αναπόφευκτο τον συμβιβασμό σε μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας, ή στην ισορροπία μεταξύ των δύο [4].

Η μοντελοποίηση του θερμικού συστήματος προέκυψε από χρήση εξισώσεων από τη βιβλιογραφία [19] [20]. Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας προκύπτει η εξίσωση (2.1) για τη θερμοκρασία T_{cell} στην οποία λειτουργούν τα ηλιακά κύτταρα του συλλέκτη:

$$T_{cell} = \frac{(\alpha\tau)_{eff}G + U_tG + U_T T_{bs}}{U_t + U_T} \quad (2.1)$$

όπου G η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, U_t ένας ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό κύτταρο στο περιβάλλον μέσω του καλύμματος, U_T ένας συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής από το ηλιακό κύτταρο στο νερό μέσω του υλικού tedlar, $(\alpha\tau)_{eff}$ το προϊόν της αποδοτικής απορροφητικότητας και διαπερατότητας και T_{bs} η θερμοκρασία του πίσω καλύμματος, η οποία δίνεται από την εξίσωση (2.2):

$$T_{bs} = \frac{h_{p1}(\alpha\tau)_{eff}G + U_{tT}T_{amb} + h_f T_{f,in}}{U_{tT} + h_f} \quad (2.2)$$

όπου h_{p1} συντελεστής απώλειας (penalty factor) λόγω ύπαρξης του γυάλινου καλύμματος, του υλικού των κυττάρων και του απορροφητήρα, U_{tT} ένας ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το γυάλινο κάλυμμα έως τον απορροφητήρα μέσω των κυττάρων, T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος, h_f ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του νερού με συναγωγή και $T_{f,in}$ η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη. Το $(\alpha\tau)_{eff}$ υπολογίζεται από την εξίσωση (2.3):

$$(\alpha\tau)_{eff} = \tau_G \{ \alpha_c \beta_c + \alpha_T (1 - \beta_c) - \eta_c \beta_c \} \quad (2.3)$$

όπου τ_G η διαπερατότητα του γυαλιού, α_c η απορροφητικότητα των κυττάρων, β_c ένας συντελεστής των κυττάρων (packing factor), α_T η απορροφητικότητα του υλικού tedlar και η_c ο βαθμός απόδοσης των κυττάρων. Η θερμοκρασία του νερού που εξέρχεται από τον συλλέκτη δίνεται από την εξίσωση (2.4):

$$T_{f,out} = \left(T_{amb} + \frac{h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff}G}{U_L} \right) \left[1 - \exp\left(\frac{-WU_L L}{\dot{m}c_p}\right) \right] + T_{f,in} \exp\left(\frac{-WU_L L}{\dot{m}c_p}\right) \quad (2.4)$$

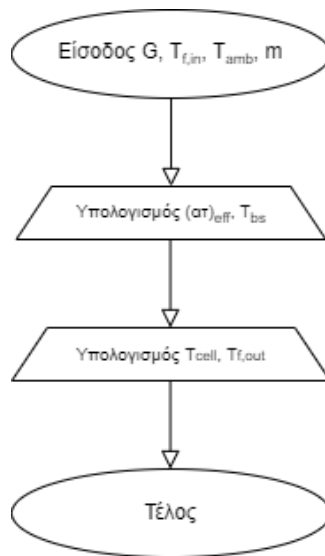
όπου h_{p2} συντελεστής απώλειας (penalty factor) λόγω ύπαρξης επιφάνειας μεταξύ tedlar και ρευστού, U_L ένας ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον συλλέκτη στο περιβάλλον, W το πλάτος του συλλέκτη, L το μήκος του, \dot{m} η παροχή μάζας και c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.

Ο τύπος Φ/Θ συλλεκτών που επιλέγεται είναι με επιπλέον επίστρωση υαλοπινάκων στο κάλυμμα και με επίστρωση του υλικού tedlar στον απορροφητήρα (glazed with tedlar). Ο Πίνακας 2-1 δίνει τις τιμές των συντελεστών των εξισώσεων. Οι τιμές των G , T_{amb} , \dot{m} λαμβάνονται από τα κλιματικά δεδομένα, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας του ρευστού εισόδου, είναι υπολογισμένη από τον κώδικα.

Πίνακας 2-1: Τιμές μεγεθών θερμικού συλλέκτη PV/T

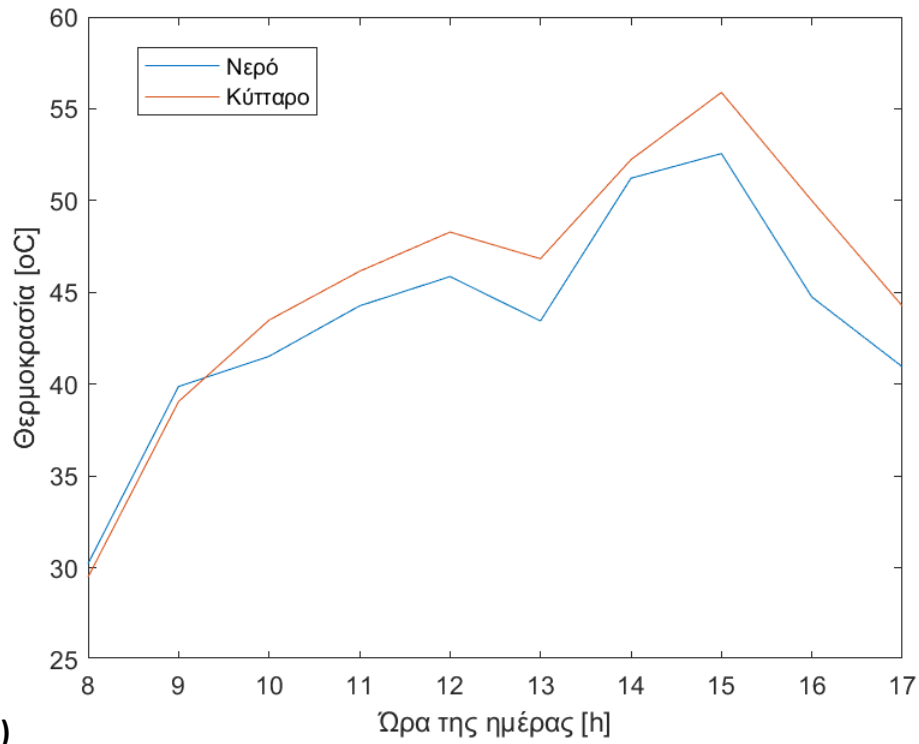
U_t (W/m ² K)	11,52
U_T (W/m ² K)	42,58
h_{p1} (-)	0,787
U_{tT} (W/m ² K)	9,07
h_f (W/m ² K)	1000
τ_G (-)	0,95x0,95
α_c (mA/°C)	0,85
β_c (V/°C)	0,83
α_T (mA/°C)	0,5
η_c (-)	0,12
h_{p2} (-)	0,376
U_L (W/m ² K)	4,18
W (m)	0,45
L (m)	1,2
c_p (J/kgK)	4187

Ο κώδικας που κατασκευάστηκε ακολουθεί το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 2-1.

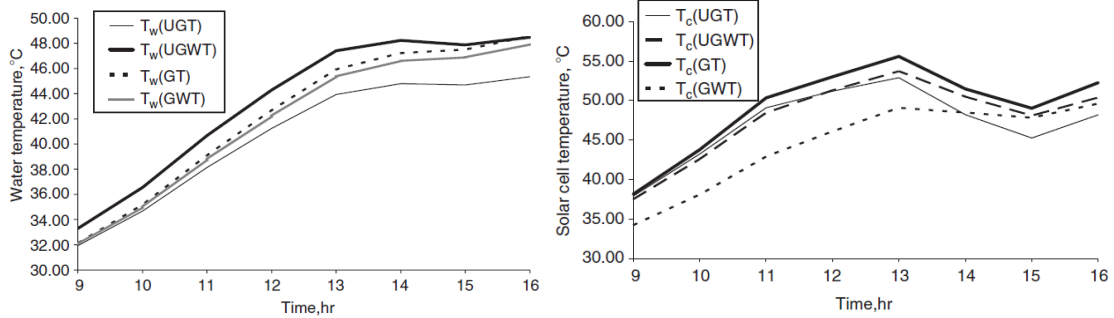


Σχήμα 2-1: Διάγραμμα ροής κώδικα θερμικής μοντελοποίησης PV/T

Στο Σχήμα 2-2 και Σχήμα 2-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κώδικα, τα οποία έχουν συγκριθεί με τη βιβλιογραφία [20] και πιστοποιούν τη σωστή λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, αποτυπώνονται οι μεταβολές στη θερμοκρασία του νερού που διέρχεται από τον συλλέκτη, αλλά και στη θερμοκρασία του κυττάρου, από τις 8 π.μ. έως τις 5 μ.μ. για μια τυπική ημέρα του Ιουλίου και του Ιανουαρίου. Το γεγονός ότι πριν το μεσημέρι το νερό είναι πιο θερμό από τα ηλιακά κύτταρα, πιθανώς οφείλεται στη μη λειτουργία του φωτοβολταϊκού εκείνες τις ώρες λόγω χαμηλών επιπέδων ακτινοβολιών. Όταν το φωτοβολταϊκό δεν λειτουργεί, τα ηλιακά κύτταρα, προφανώς, δεν θερμαίνονται σε υψηλά επίπεδα.

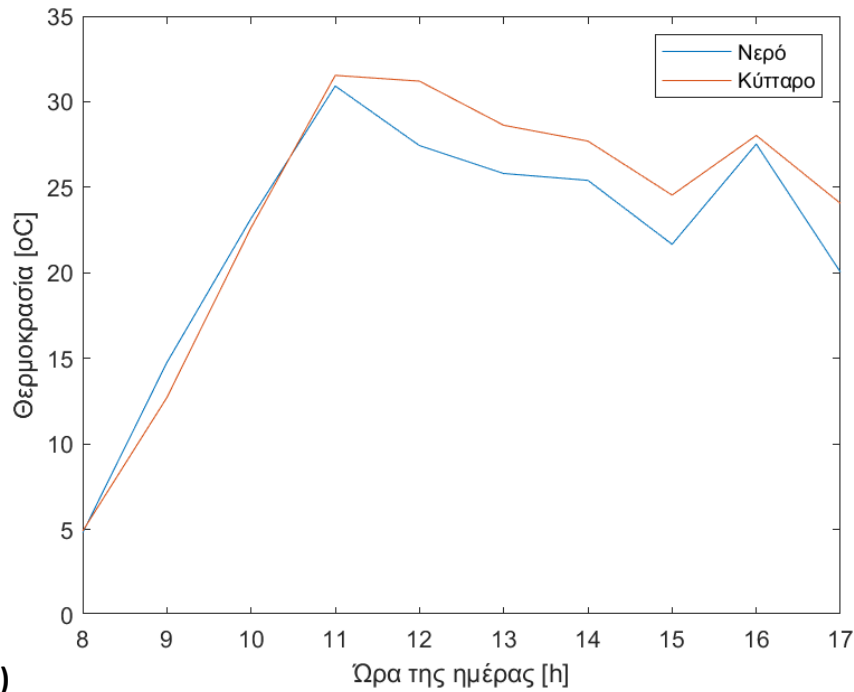


α)

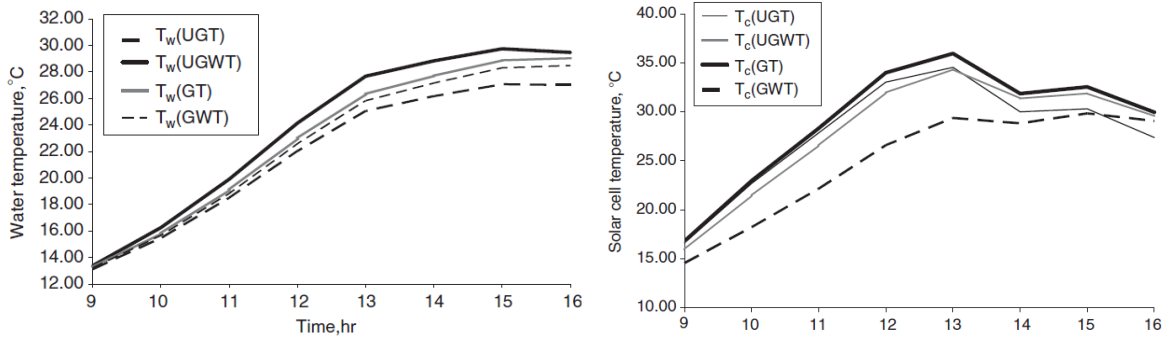


β)

Σχήμα 2-2: Θερμοκρασία νερού και κυττάρου συλλέκτη μια τυπική ημέρα του Ιουλίου
α) από τον κώδικα και β) από τη βιβλιογραφία [20].



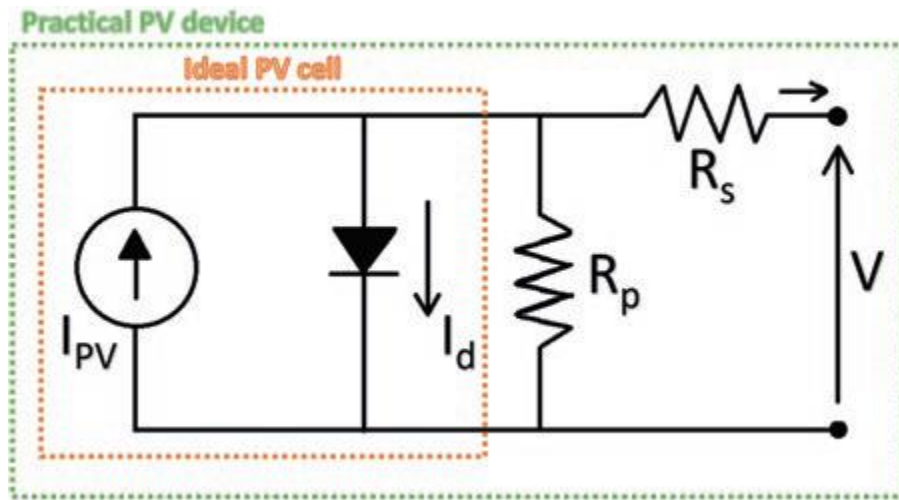
α)



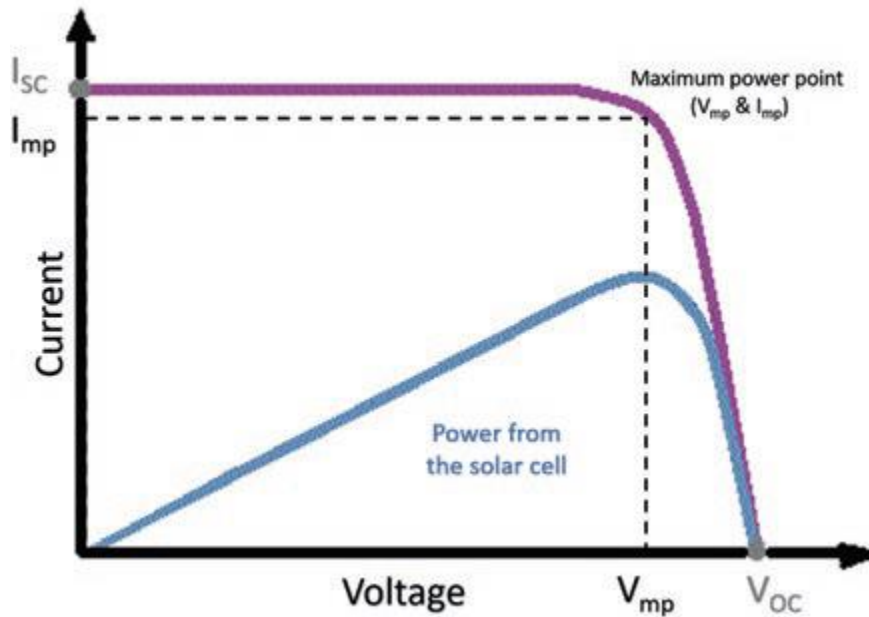
Σχήμα 2-3: Θερμοκρασία νερού και κυττάρου συλλέκτη μια τυπική ημέρα του Ιανουαρίου α) από τον κώδικα και β) από τη βιβλιογραφία [20].

2.1.3 Φωτοβολταϊκό σύστημα

Συνήθως τα ζητούμενα μεγέθη από ένα μοντέλο φωτοβολταϊκού είναι η τάση (V), το ρεύμα (I) και κατ' επέκταση η ισχύς (P) στην έξοδο των συλλεκτών. Αυτά χαρακτηρίζονται από την χαρακτηριστική καμπύλη I(V), η οποία είναι μια μη γραμμική καμπύλη με πολλές παραμέτρους που παρέχονται συνήθως από τον κατασκευαστή. Η σχηματική απεικόνιση του ισοδύναμου κυκλώματος μπορεί να γίνει χωρίς να ληφθούν υπόψη οι απώλειες, αλλά σε μια πρακτική εφαρμογή πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οπότε στο Σχήμα 2-4, με πράσινο περίγραμμα παρουσιάζεται το ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα με την πηγή και τη δίοδο, και με πράσινο το πρακτικό ισοδύναμο κύκλωμα όπου προστίθενται δύο αντιστάσεις, μία εν σειρά (R_s) και μία παράλληλη (R_p).



Σχήμα 2-4: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού [4]



Σχήμα 2-5: Χαρακτηριστική καμπύλη $I(V)$ και καμπύλη ισχύος [4]

Στο Σχήμα 2-5 η μωβ καμπύλη είναι η χαρακτηριστική και με μπλε είναι η καμπύλη ισχύος. Το σημείο στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται αποκαλείται σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point) και αντιστοιχεί σε στο ρεύμα μέγιστης ισχύος I_{mp} και στην τάση μέγιστης ισχύος V_{mp} . Η καμπύλη $I(V)$ ξεκινά από το ρεύμα βραχυκυκλώματος, δηλαδή το ρεύμα για μηδενική τάση που είναι το υψηλότερο δυνατό, όπως φαίνεται και στο σχήμα

και καταλήγει στην τάση ανοιχτοκυκλώματος, δηλαδή την τάση για μηδενικό ρεύμα που είναι και η υψηλότερη δυνατή. Η ισχύς υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό του ρεύματος με την τάση, αλλά η ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού δίνεται στην εξίσωση (2.5):

$$P_{max} = I_{mp}V_{mp} \quad (2.5)$$

Επίσης ορίζεται και ο παράγοντας πλήρωσης (fill factor) όπως στην εξίσωση (2.6):

$$FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2.6)$$

Τέλος, ως βαθμός απόδοσης θεωρείται ο λόγος της μέγιστης ισχύος ως προς την ισχύ που φθάνει στο φωτοβολταϊκό λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, σύμφωνα με την εξίσωση (2.7):

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (2.7)$$

Η μοντελοποίηση θα γίνει με βάση το πρακτικό ισοδύναμο κύκλωμα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [21], διότι σε μια τέτοια εφαρμογή πρέπει το μοντέλο να είναι ακριβές, άρα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι απώλειες. Η εξίσωση του ρεύματος υπολογίζεται από την εξίσωση (2.8):

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{at}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.8)$$

Το I_{ph} είναι το φωτορεύμα (photocurrent), δηλαδή αυτό που περνά από την πηγή και I_d είναι το ρεύμα που διέρχεται της διόδου, το οποίο δίνεται από τον δεύτερο όρο της εξίσωσης (2.8), με I_o να είναι το ρεύμα διαρροής και τον συντελεστή a να δίνεται από την εξίσωση (2.9):

$$at = \frac{N_s \cdot A_i \cdot k \cdot T_c}{q} \quad (2.9)$$

Ο συντελεστής at είναι σταθερός και αποκαλείται θερμική τάση. Το A_i είναι ο παράγοντας ιδεατότητας (ideality factor), που εξαρτάται από το υλικό. Επιπλέον, T_c είναι η θερμοκρασία του κυττάρου (K), k η σταθερά Boltzmann ίση με $1,381 \cdot 10^{23}$ J/K, q το φορτίο ηλεκτρονίου ($1,602 \cdot 10^{19}$ C) και N_s ο αριθμός των κυττάρων συνδεδεμένα σε σειρά. Οι άγνωστοι παράμετροι της εξίσωσης είναι οι δύο αντιστάσεις, το I_{ph} και το I_o για τα οποία

πρέπει να υπάρξει μεθοδολογία για να βρεθούν. Οι εξισώσεις (2.10), (2.11) και (2.12) χρησιμοποιούνται για τον λόγο αυτόν:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \mu_{sc} \Delta T) \quad (2.10)$$

$$I_0 = I_{sc,ref} \exp\left(-\frac{V_{oc,ref}}{at}\right) \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \times \exp\left[\left(\frac{q\varepsilon_G}{A \cdot k}\right) \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right] \quad (2.11)$$

$$R_p = \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s}{I_{sc,ref} - I_{sc,ref} \left\{ \exp\left[\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s - V_{oc,ref}}{at}\right] \right\} + I_{sc,ref} \left\{ \exp\left(-\frac{V_{oc,ref}}{at}\right) \right\} - \frac{P_{max,ex}}{V_{mp,ref}}} \quad (2.12)$$

όπου G_{ref} , $I_{ph,ref}$, μ_{sc} , $I_{sc,ref}$, $V_{oc,ref}$, $T_{c,ref}$, ε_G , $V_{mp,ref}$, $I_{mp,ref}$ και $P_{max,ex}$ είναι κατά σειρά η ακτινοβολία σε κανονικές συνθήκες, το φωτορεύμα αναφοράς, το ρεύμα βραχυκυκλώματος αναφοράς, η τάση ανοιχτοκυκλώματος αναφοράς, η θερμοκρασία κυττάρων αναφοράς, η ενέργεια διάκενου υλικού, η τάση μέγιστης ισχύος αναφοράς, το ρεύμα μέγιστης ισχύος αναφοράς και η μέγιστη ισχύς.

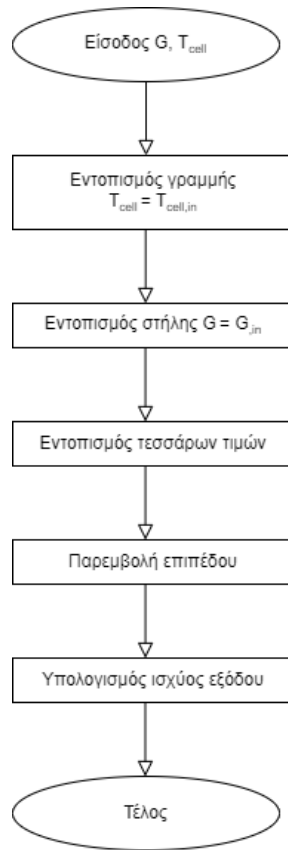
Ο αλγόριθμος ακολουθεί κάποια συγκεκριμένα βήματα, λαμβάνοντας, αρχικά, τη θερμοκρασία των ηλιακών κυττάρων και την ολική ακτινοβολία, καθώς και όλες τις σταθερές παραμέτρους. Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας, η R_s ξεκινά με μηδενική τιμή και αρχικοποιείται η αντίσταση R_p από την εξίσωση (2.12). Έπειτα υπολογίζονται το I_{ph} και το I_0 από τις εξισώσεις (2.10) και (2.11) αντίστοιχα. Με τις τιμές αυτές υπολογίζεται το νέο ρεύμα από τη (2.8) με τη βοήθεια αριθμητικής μεθόδου, αφού η εξίσωση είναι μη γραμμική, για συγκεκριμένο εύρος τάσεων. Έπειτα γίνονται επαναλήψεις στη διαδικασία, έως ότου βρεθεί η μέγιστη τιμή της ισχύος. Σύμφωνα με το μοντέλο, ολόκληρη η διαδικασία συνεχίζεται αυξάνοντας το R_s μέχρι η τιμή της μέγιστης ισχύος να ισούται με την πειραματική τιμή της μέγιστης ισχύος. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη εφαρμογή η αντίσταση R_s είναι προκαθορισμένη. Ο κώδικας έχει υλοποιηθεί από το εργαστήριο. Τις τιμές των παραμέτρων παραθέτει ο Πίνακας 2-2:

Πίνακας 2-2: Τιμές μεγεθών φωτοβολταϊκού συλλέκτη PV/T

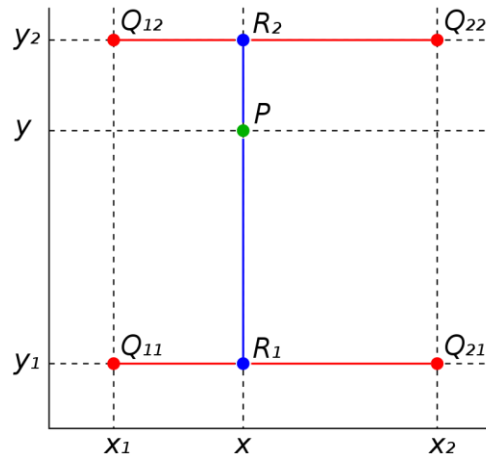
$N_s (-)$	36
$A (W/m^2K)$	1,3
$I_{sc,ref} (A)$	9,33
$\mu_{sc} (A/K)$	0,0013
$V_{oc,ref} (V)$	21,8
$\varepsilon_G (eV)$	1,12

R_s (Ω)	0,55
$V_{mp,ref}$ (V)	17
$I_{mp,ref}$ (A)	8,64
$P_{max,ex}$ (W)	147
$I_{ph,ref}$ (m)	9,33
$T_{c,ref}$ (K)	298
G_{ref} (W/m^2)	1000

Στην πράξη, ο κώδικας δεν χρησιμοποιήθηκε αυτούσιος, για εξοικονόμηση χρόνου επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, λήφθηκαν αποτελέσματα για διάφορα ζευγάρια εισόδων της θερμοκρασίας κυττάρων και ακτινοβολίας, για ολόκληρα τα πιθανά εύρη και με βήμα $1\text{ }^\circ\text{C}$ και 50 W/m^2 αντίστοιχα. Έπειτα δημιουργήθηκε ένας διδιάστατος πίνακας με τις διαφορετικές γραμμές να αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες και τις διαφορετικές στήλες σε διαφορετικές ακτινοβολίες. Ο κώδικας εντοπίζει τη γραμμή στην οποία αντιστοιχεί η τιμή εισόδου της θερμοκρασίας του κυττάρου αν στρογγυλοποιηθεί στην κοντινότερη χαμηλότερη μονάδα. Ο εντοπισμός πραγματοποιείται με τη βοήθεια της εντολής `find` του Matlab. Έπειτα βρίσκει την στήλη στην οποία αντιστοιχεί η τιμή εισόδου της ακτινοβολίας αν στρογγυλοποιηθεί στην κοντινότερη χαμηλότερη πενήντάδα. Παίρνει την τιμή που αντιστοιχεί στην παραπάνω στήλη και γραμμή, έστω $τιμή_1 = \text{πίνακας}(\gamma\rho, \sigma\tau)$. Μετά λαμβάνει και τις εξής τιμές: $τιμή_2 = \text{πίνακας}(\gamma\rho+1, \sigma\tau)$, $τιμή_3 = \text{πίνακας}(\gamma\rho, \sigma\tau+1)$, $τιμή_4 = \text{πίνακας}(\gamma\rho+1, \sigma\tau+1)$. Τέλος πραγματοποιεί παρεμβολή επιπέδου στις τέσσερις αυτές τιμές. Το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-6 και η εξίσωση της παρεμβολής επιπέδου είναι η εξίσωση (2.13) σε συνδυασμό με το Σχήμα 2-7 [22].



Σχήμα 2-6: Διάγραμμα ροής κώδικα ευρετηρίασης και παρεμβολής



Σχήμα 2-7: Σχήμα τιμών παρεμβολής επιπέδου [23]

$$f(x, y) = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} [x_2 - x_1 \quad x - x_1] \begin{bmatrix} f(Q_{11}) & f(Q_{21}) \\ f(Q_{12}) & f(Q_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_2 - y \\ y - y_1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.2 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο της δεξαμενής αποθήκευσης θα βασιστεί στο φαινόμενο της στρωματοποίησης. Για αυτόν τον λόγο, η δεξαμενή θα χωριστεί σε n ζώνες ανάμειξης κατά το ύψος της. Για κάθε ζώνη, θεωρείται ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας και εφαρμόζεται η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας στα όριά της. Ακολουθούν οι εξισώσεις για το πρώτο, τα ενδιάμεσα και το τελευταίο στοιχείο [24]. Αυτό που διαχωρίζει τα παραπάνω είναι η διαφορετική επιφάνεια, η οποία στο πρώτο και το τελευταίο στοιχείο είναι μεγαλύτερη, καθώς και οι εισοδοί ρών θερμότητας από το υπόλοιπο σύστημα.

Στοιχείο 1:

$$\begin{aligned} \frac{M_{st}}{n} c_p \frac{T_{st}(t, 1) - T_{st}(t-1, 1)}{\Delta t} &= \dot{m}_{col} \cdot c_p [T_{col,o} - T_{st}(t, 1)] + \\ \dot{m}_{load} \cdot c_p [T_{st}(t, 2) - T_{st}(t, 1)] &- U_l \cdot A_{st}(1) [T_{st}(t, 1) - T_{amb}] \\ - \frac{UA}{n} (T_{st}(t, 1) - T_{hx}(t, 1)) & \end{aligned} \quad (2.14)$$

Στοιχεία [j=2,3,...,n-1]:

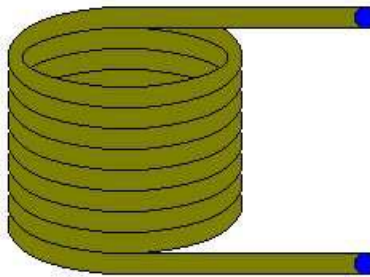
$$\begin{aligned} \frac{M_{st}}{n} c_p \frac{T_{st}(t, j) - T_{st}(t-1, j)}{\Delta t} &= \dot{m}_{col} \cdot c_p [T_{st}(t, j-1) - T_{st}(t, j)] + \\ \dot{m}_{load} \cdot c_p [T_{st}(t, j+1) - T_{st}(t, j)] &- U_l \cdot A_{st}(j) [T_{st}(t, j) - T_{amb}] \\ - \frac{UA}{n} (T_{st}(t, j) - T_{hx}(t, j)) & \end{aligned} \quad (2.15)$$

Στοιχείο n:

$$\begin{aligned} \frac{M_{st}}{n} c_p \frac{T_{st}(t, n) - T_{st}(t-1, n)}{\Delta t} &= \dot{m}_{col} \cdot c_p [T_{st}(t, n-1) - T_{st}(t, n)] + \\ \dot{m}_{load} \cdot c_p [T_{load,o} - T_{st}(t, n)] &- U_l \cdot A_{st}(n) [T_{st}(t, n) - T_{amb}] \\ - \frac{UA}{n} (T_{st}(t, n) - T_{hx}(t, n)) & \end{aligned} \quad (2.16)$$

Στις εξισώσεις (2.14) έως (2.16) όλοι οι όροι έχουν ληφθεί από τη βιβλιογραφία [24] εκτός από εκείνους με πράσινο χρώμα, οι οποίοι αφορούν στο ζεστό νερό χρήσης. Αναλυτικότερα, οι όροι M_{st} , n , T_{st} , c_p , t , Δt έχουν όλοι σχέση με τη δεξαμενή και είναι με τη σειρά η μάζα αποθηκευμένου μέσου σε αυτή, το πλήθος των κόμβων, η θερμοκρασία, η ειδική θερμοχωρητικότητα του μέσου, η χρονική στιγμή και το χρονικό βήμα. Έπειτα, m_{col} , m_{load} , είναι οι παροχές μάζας του νερού του συλλέκτη και του νερού θέρμανσης αντίστοιχα, U_i ο συντελεστής θερμικών απωλειών του συλλέκτη, A_{st} η επιφάνεια της ζώνης ανάμειξης, T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος και $T_{load,o}$ και $T_{col,o}$, οι θερμοκρασίες εξόδου από το φορτίο και από τον συλλέκτη αντίστοιχα (αυτές που εισάγονται στη δεξαμενή).

Οι πράσινοι όροι προστέθηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας και αντιστοιχούν στο ζεστό νερό χρήσης. Αποφασίστηκε η συγκεκριμένη ροή να μην αναμιγνύεται με το νερό της δεξαμενής για να διατηρείται τον νερό χρήσης καθαρό, όπως προέρχεται από το δίκτυο. Ο τρόπος που θερμαίνεται το νερό αυτό είναι μέσω ενός εναλλάκτη, ο οποίος διέρχεται μέσα από τη δεξαμενή. Ο εναλλάκτης ονομάζεται σπειροειδής (coiled tube heat exchanger) και είναι, ουσιαστικά, μία σωλήνωση σε μορφή πηνίου, όπως στο Σχήμα 2-8. Χωρίζεται και αυτός σε κόμβους και κάθε ένας από αυτούς ανταλλάσσει θερμότητα με τη δεξαμενή μέσω φυσικής συναγωγής μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του εναλλάκτη και του νερού της δεξαμενής. Χαρακτηρίζεται από έναν συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (UA).



Σχήμα 2-8: Σπειροειδής εναλλάκτης [25]

Ο συντελεστής UA δεν δίνεται από τους κατασκευαστές, αλλά μπορεί να υπολογιστεί από τα φύλλα χαρακτηριστικών της δεξαμενής με τον εναλλάκτη [26]. Στην παρούσα εργασία, υπολογίστηκε ο συντελεστής για κάθε μία από τις τρεις λειτουργίες εξόδου που δίνονται από τον κατασκευαστή, για 15 kW, 22 kW και 33 kW, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά που παρέχονται. Έπειτα βρέθηκε η μέση τιμή αυτών και χρησιμοποιήθηκε ως σταθερή τιμή. Η θερμότητα που ανταλλάσσεται μεταξύ του κόμβου j της δεξαμενής και του κόμβου k του εναλλάκτη δίνεται από την εξίσωση (2.17) [25]. Ο συντελεστής $UA_{j,k}$ αφορά μόνο στον κόμβο του οποίου η θερμότητα υπολογίζεται και το άθροισμα όλων των συντελεστών αυτών δίνει τον συνολικό UA. Πρακτικά, από τη στιγμή που επιλέχθηκε οι κόμβοι του εναλλάκτη να είναι όσοι και οι κόμβοι της δεξαμενής, ισχύει η εξίσωση (2.18).

$$Q_{hx,j \rightarrow k} = UA_{j,k}(T_{tank,j} - T_{hx,k}) \quad (2.17)$$

$$UA_{j,k} = \frac{UA}{n} \quad (2.18)$$

Βάσει των εξισώσεων (2.17) και (2.18) προστέθηκαν οι πράσινοι όροι στις εξισώσεις (2.14) έως (2.16). Φυσικά, οι θερμοκρασίες του εναλλάκτη πρέπει να θεωρηθούν ως δεδομένες. Ο τρόπος που πραγματοποιείται αυτό, είναι ότι χρησιμοποιείται μια θερμοστατική βαλβίδα στην έξοδο της ροής του εναλλάκτη, η οποία επιβάλλει τους 45 °C στο ζεστό νερό χρήσης. Έχοντας τη θερμοκρασία εισόδου από το δίκτυο γνωστή από τα κλιματικά δεδομένα, η θερμοκρασία των κόμβων υπολογίζεται μέσω μιας γραμμικής παρεμβολής, όπως στην εξίσωση (2.19). T_{net} είναι η θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται από το δίκτυο.

$$T_{hx,k} = T_{net} \cdot (45^{\circ}C - T_{net}) \cdot \frac{n - k}{n - 1} \quad (2.19)$$

Εάν το φορτίο ζεστού νερού χρήσης είναι μηδενικό και δεν υπάρχει ροή από το δίκτυο, ο συντελεστής UA θεωρείται μηδενικός ($UA=0$). Από την άλλη, εάν το θερμικό φορτίο της δεξαμενής δεν είναι ικανό να ικανοποιήσει τη ζήτηση από την κατοικία, δηλαδή το νερό δεν δύναται να φθάσει την τιμή των 45 °C στην έξοδο του εναλλάκτη, ενεργοποιείται μια ηλεκτρική αντίσταση με ισχύ εξόδου ίση με 9 kW. Αυτή είναι τοποθετημένη στον κεντρικό κόμβο της δεξαμενής και θερμαίνει, όποτε το απαιτούν οι συνθήκες, συμπληρωματικά το νερό της δεξαμενής.

Ο κώδικας είναι υλοποιημένος ώστε να λύνει σύστημα της μορφής $A \cdot x = B$, όπου A , B πίνακες, που συμπληρώνονται από τις εξισώσεις (2.22) έως (2.29). Όποιο στοιχείο του πίνακα δεν συμπεριλαμβάνεται στις εξισώσεις αυτές είναι μηδενικό, δηλαδή ο πίνακας A είναι τριδιαγώνιος. Το σύστημα που λύνεται είναι το σύστημα που σχηματίζεται από τις εξισώσεις (2.14) έως (2.16), με το διάνυσμα x να περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες στους κόμβους της δεξαμενής για τη χρονική στιγμή t . Μόλις λυθεί το σύστημα, η θερμοκρασία του νερού που κατευθύνεται προς τους συλλέκτες λαμβάνεται ίση με τη θερμοκρασία της δεξαμενής στο χαμηλότερο σημείο και η θερμοκρασία του νερού που κατευθύνεται προς την κατοικία ίση με τη θερμοκρασία της δεξαμενής στο υψηλότερο σημείο. Ως είσοδο λαμβάνονται η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία του νερού που προέρχεται από τους συλλέκτες και του νερού από την κατοικία, η θερμοκρασία του νερού δικτύου, οι θερμοκρασίες της δεξαμενής την προηγούμενη χρονική στιγμή, ο όγκος της, η μάζα του νερού εντός αυτής, οι παροχές μάζας των ροών και οι ειδικές θερμοχωρητικότητες και το φορτίο ζεστού νερού χρήσης (αν είναι μηδενικό, μηδενίζεται και το UA). Τις τιμές που είναι

σταθερές αναγράφει ο Πίνακας 2-3. Το H_{st} είναι το ύψος της δεξαμενής, θεωρείται για χωροταξικούς λόγους σταθερό και χρησιμοποιείται στην εξίσωση (2.20) για τον υπολογισμό της διαμέτρου, η οποία χρησιμοποιείται με τη σειρά της στην εξίσωση (2.21) για τον υπολογισμό της επιφάνειας κάθε κόμβου.

Πίνακας 2-3: Τιμές μεγεθών δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού

UA [W/K]	1410
U_l [W/ m ² K]	2,5
H_{st} [m]	1,8

$$D_{st} = 2 \sqrt{\frac{Vol_{st}}{\pi H_{st}}} \quad (2.20)$$

$$A_{st}(j) = \begin{cases} \frac{\pi D_{st} H_{st}}{n}, & j = 2, 3, \dots, n - 1 \\ \frac{\pi D_{st} H_{st}}{n} + \frac{\pi D_{st}^2}{4}, & j = 1, n \end{cases} \quad (2.21)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,i} & \dots & a_{n,n} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

$$factor = \frac{1}{\frac{M_{st} c_p}{n \Delta t}} \quad (2.22)$$

$$a_{i,i} = 1 + factor \left(\dot{m}_{col} \cdot c_p + \dot{m}_{load} \cdot c_p + U_l \cdot A_{st}(i) + \frac{UA}{n} \right), \quad i = 1, \dots, n \quad (2.23)$$

$$a_{i,i+1} = -factor \cdot \dot{m}_{load} \cdot c_p, \quad i = 1, \dots, n - 1 \quad (2.24)$$

$$a_{i,i-1} = -factor \cdot \dot{m}_{col} \cdot c_p, \quad i = 2, \dots, n \quad (2.25)$$

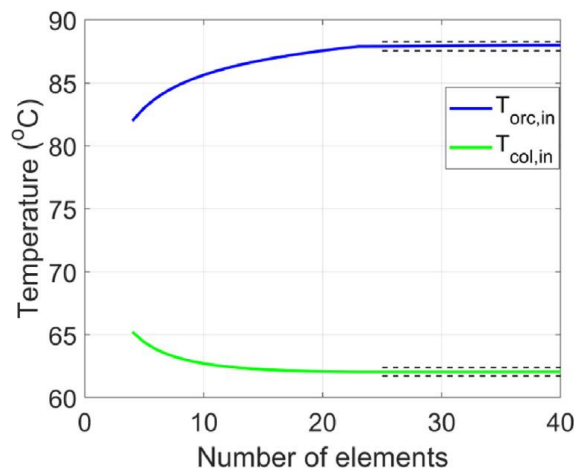
$$b_j = T_{st}(t-1, j) + factor \left(U_l \cdot A_{st}(j) \cdot T_{amb} + \frac{UA}{n} \cdot T_{hx}(t, j) \right), \quad j = \{2, n-1\} - \frac{n}{2} \quad (2.26)$$

$$b_1 = T_{st}(t-1, 1) + factor \left(U_l \cdot A_{st}(1) \cdot T_{amb} + \frac{UA}{n} \cdot T_{hx}(t, 1) + \dot{m}_{col} \cdot c_p \cdot T_{col,o} \right) \quad (2.27)$$

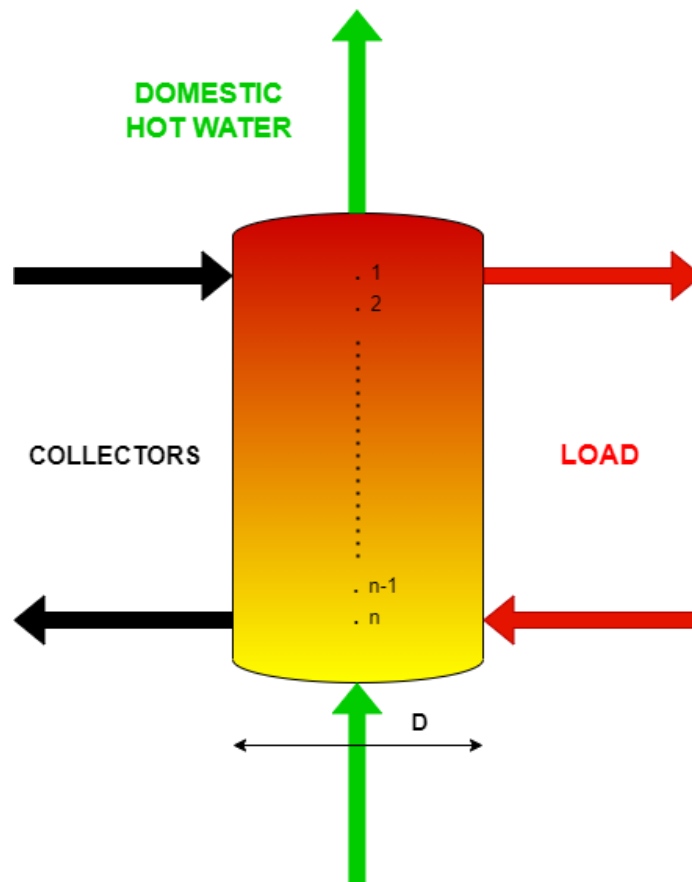
$$b_n = T_{st}(t-1, n) + factor \left(U_l \cdot A_{st}(n) \cdot T_{amb} + \frac{UA}{n} \cdot T_{hx}(t, n) + \dot{m}_{load} \cdot c_p \cdot T_{load,o} \right) \quad (2.28)$$

$$b_{n/2} = T_{st} \left(t-1, \frac{n}{2} \right) + factor \left(U_l \cdot A_{st} \left(\frac{n}{2} \right) \cdot T_{amb} + \frac{UA}{n} \cdot T_{hx} \left(t, \frac{n}{2} \right) + 9000 \right) \quad (2.29)$$

Στο Σχήμα 2-9 παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής του n , ενώ στο Σχήμα 2-10 φαίνεται η απεικόνιση της δεξαμενής με τους κόμβους και τις ροές από και προς σε αυτή, όπως ισχύει για τη συγκεκριμένη εργασία, για τις περιπτώσεις της θέρμανσης. Ο κώδικας λήφθηκε από το εργαστήριο και τροποποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας. Ως έξοδο, παρέχει τις θερμοκρασίες των κόμβων στη δεξαμενή στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα, καθώς και τις θερμοκρασίες των ρών που εξέρχονται. Πιο συγκεκριμένα, η ροή προς τους συλλέκτες έχει θερμοκρασία ίση με εκείνη του χαμηλότερου κόμβου, η ροή προς την κατοικία έχει τη θερμοκρασία του υψηλότερου κόμβου, ενώ η ροή ζεστού νερού χρήσης στην έξοδο από τη δεξαμενή έχει πάντα τη θερμοκρασία των 45 °C.



Σχήμα 2-9: Μελέτη επιρροής πλήθους ζωνών ανάμειξης στη σταθερότητα της λύσης [24]



Σχήμα 2-10: Δεξαμενή σε λειτουργία θέρμανσης

2.3 Αντλία Θερμότητας

Από το εργαστήριο λήφθηκε υλοποιημένος κώδικας για την αντλία θερμότητας, ο οποίος με τη χρήση του λογισμικού CoolProp εξήγαγε αποτελέσματα για τον κύκλο, όπως η ισχύς του συμπιεστή, η θερμική ή ψυκτική ισχύς που παράγεται, συντελεστές απόδοσης και άλλα, ανάλογα με τα δεδομένα που εισάγονται. Η πρώτη εργασία που πραγματοποιήθηκε είναι η επιλογή του εργαζόμενου μέσου, του συμπιεστή και του αριθμού πλακών των εναλλακτών. Πριν από αυτό, όμως, επιλέχθηκαν οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου στους εναλλάκτες.

Για τη θέρμανση, η θερμοκρασία εισόδου στον συμπυκνωτή είναι μόνιμα 40 °C και η θερμοκρασία εξόδου από αυτόν είναι μόνιμα 45 °C. Από την άλλη, η θερμοκρασία εισόδου στον ατμοποιητή είναι κατά δύο βαθμούς μικρότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και η θερμοκρασία εξόδου από αυτήν είναι κατά τρεις βαθμούς μειωμένη από την εισόδου. Ως προς τη λειτουργία ψύξης, η θερμοκρασία εισόδου στον συμπυκνωτή είναι δύο βαθμούς υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και η θερμοκρασία εξόδου

από αυτόν είναι κατά τρεις βαθμούς αυξημένη από την θερμοκρασία εισόδου. Στον ατμοποιητή οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου που επικρατούν είναι 12 °C και 7 °C αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι ο εναλλάκτης που επικοινωνεί με το περιβάλλον, μέσω ενός ακόμα εναλλάκτη, είναι αυτός που λειτουργεί ως ατμοποιητής στη θέρμανση και ως συμπυκνωτής στην ψύξη, αφού η θερμοκρασία του καθορίζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον, θεωρείται ότι και οι δύο εναλλάκτες προσφέρουν μια σταθερή μεταβολή θερμοκρασίας.

Αφού τα δεδομένα των θερμοκρασιών παραμένουν συνεχώς γνωστά, βάσει των δεδομένων, μένει να αποφασιστούν οι τρεις παράμετροι που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Αυτό θα γίνει μέσω δοκιμών και αξιολόγησης αποτελεσμάτων στο ονομαστικό φορτίο, δίνοντας ως φορτίο το μέγιστο θερμικό ή ψυκτικό. Επιλέγεται ένα από τα διαθέσιμα ψυκτικά υγρά, τα οποία είναι τα R1234ze(E), R1234yf και προπάνιο. Επιλέγεται, επίσης, ένας από τους διαθέσιμους συμπιεστές, για αρχή αυτός με τον μικρότερο όγκο εμβολισμού και τίθεται ο αριθμός πλακών των εναλλακτών ίσος με 60 και στους δύο. Τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται είναι:

- Ισχύς εξόδου κοντά στο φορτίο
- Ταχύτητα περιστροφής συμπιεστή χαμηλότερη από 3500 rpm.
- Βαθμός απόδοσης εναλλακτών μεγαλύτερος από 0,98 (ανάλογα με αριθμό πλακών).

Όποιος συνδυασμός πληροί αυτά τα κριτήρια και έχει υψηλούς συντελεστές απόδοσης σε θέρμανση και ψύξη (COP για θέρμανση, EER για ψύξη) θα προκριθεί ως η βέλτιστη λύση. Ο Πίνακας 2-4 και ο Πίνακας 2-5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Πίνακας 2-4: Αποτελέσματα δοκιμών κώδικα αντλία θερμότητας σε λειτουργία θέρμανσης

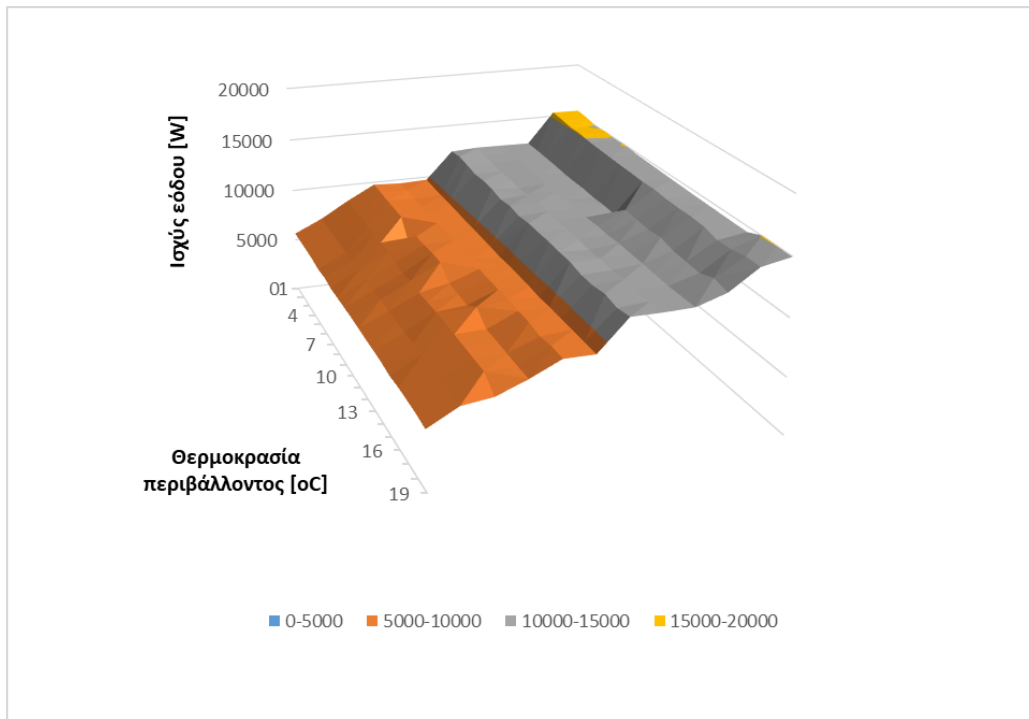
HEATING		Q	=	16472,5				
Fluid	Compressor	No of plates	Q_calc	N_cmp	evap.HEX_eff	cond.HEX_eff	COP	
R1234ze(E)	ZB29KCE	60-60	16474	4515	0,9998	1	6,1096	
R1234yf	ZB29KCE	60-60	16507	3629,9	0,9995	1	5,98	
Propane	ZB29KCE	60-60	16265	2718	1	1	5,6837	
Propane	ZB29KCE	65-65	16481	2755	1	1	5,7149	
R1234ze(E)	ZB45KCE	60-60	16434	2928,1	0,9997	1	6,5001	
R1234yf	ZB45KCE	60-60	16438	2414,8	0,9993	0,9694	5,95	
R1234yf	ZB45KCE	60-70	16455	2359,1	0,9994	1	6,3785	
Propane	ZB45KCE	60-60	16483	1797,5	0,9998	1	6,1468	
R1234ze(E)	ZB66KSE	60-60	16496	1999,4	0,9996	1	6,2408	
R1234yf	ZB66KSE	60-60	16516	1610,5	0,9993	1	6,1017	
Propane	ZB66KSE	60-60	16456	1228,9	0,9998	1	5,7885	
R1234ze(E)	ZB76KSE	60-60	16397	1747,3	0,9997	1	5,8964	
R1234ze(E)	ZB76KSE	65-65	16451	1783,8	0,9999	0,9771	5,6601	

Πίνακας 2-5: Αποτελέσματα δοκιμών κώδικα αντλία θερμότητας σε λειτουργία ψύξης

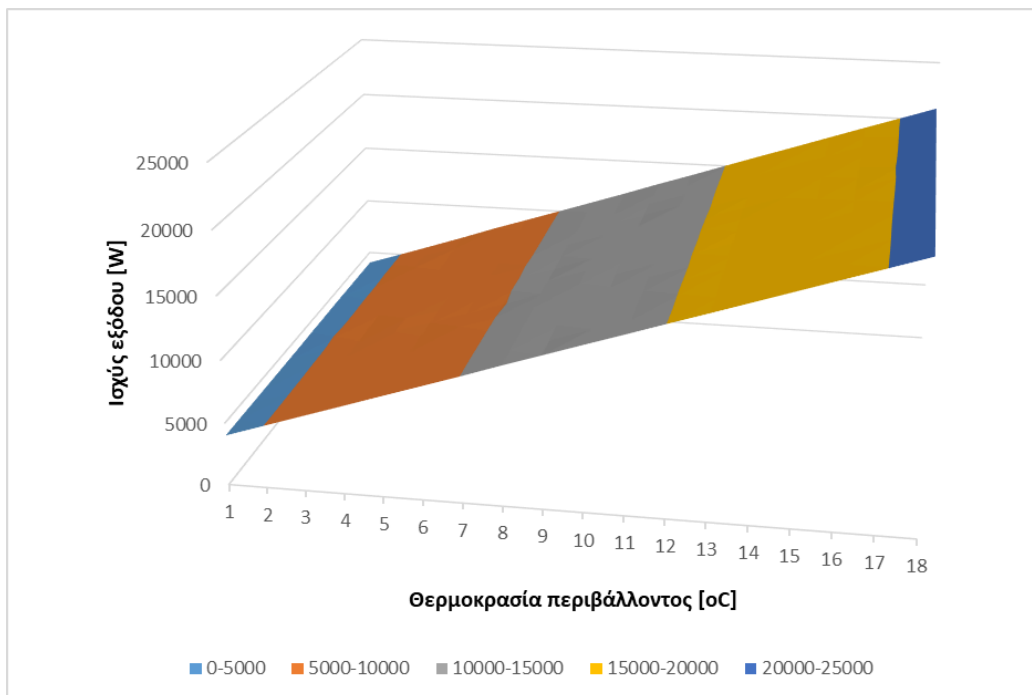
COOLING		Q	=	22668,8				
Fluid	Compressor	No of plates	Q_calc	N_cmp	evap.HEX_eff	cond.HEX_eff	EER	
R1234ze(E)	ZB29KCE	60-60	22684	10336	0,99	1	2,7405	
R1234yf	ZB29KCE	60-60	22677	8135,1	0,9874	0,9755	2,5841	
R1234yf	ZB29KCE	60-65	22661	7869,7	0,9884	1	2,8328	
Propane	ZB29KCE	60-60	22678	5935,5	0,9905	0,9746	2,5659	
Propane	ZB29KCE	60-65	22684	5942,7	0,9903	0,9853	2,5588	
Propane	ZB45KCE	60-60	22675	3758,1	0,9906	1	5,1357	
R1234ze(E)	ZB66KCE	60-60	22680	4409,8	0,9901	1	5,5157	
R1234yf	ZB66KCE	60-60	22642	3410	0,9885	1	5,45533	
Propane	ZB66KCE	60-60	22683	2578,8	0,9904	0,9782	4,9438	
R1234ze(E)	ZB76KCE	60-60	22687	3879,9	0,9902	1	5,4952	
R1234yf	ZB76KCE	60-60	22687	3091,9	0,9876	0,9694	4,9983	

Με κίτρινο χρώμα έχουν σημειωθεί τα νούμερα που δεν πληρούν τα κριτήρια. Με πράσινο χρώμα έχουν σημειωθεί οι συνδυασμοί με την καλύτερη συμπεριφορά ανά συμπιεστή και με πορτοκαλί είναι η τελική επιλογή συνδυασμού. Ο συμπιεστής ZB29KCE δεν μπορεί να επιλεγεί, διότι δουλεύει σε πολύ υψηλές στροφές για το ονομαστικό φορτίο. Το ίδιο και ο ZB45KCE στην ψύξη (δοκιμάστηκε μόνο το προπάνιο που γενικά παρουσίασε τη λειτουργία στις χαμηλότερες στροφές από τα υπόλοιπα ρευστά. Ο συμπιεστής ZB66KCE παρουσίασε ψηλότερους συντελεστές συμπεριφοράς από τον ZB76KCE, οπότε αποτελεί την καλύτερη δυνατή επιλογή, εάν πληρούνται και τα υπόλοιπα κριτήρια. Στην ψύξη αυτό συμβαίνει μόνο για τον συνδυασμό του με εργαζόμενο μέσο το R1234yf, ενώ οι 60 πλάκες ανά εναλλάκτη είναι ικανοποιητικές. Συνεπώς αυτός ο συνδυασμός εργαζόμενου μέσου και συμπιεστή προκρίνεται ως η καλύτερη λύση.

Από τη στιγμή που οι παράμετροι της αντλίας θερμότητας είναι πλέον αποφασισμένοι, τα μόνα μεγέθη που αλλάζουν και αποτελούν είσοδοι για τον κώδικά της είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και το φορτίο που καλείται να ικανοποιήσει. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι ο κώδικας της αντλίας θερμότητας αποτελεί ένα σύνθετο συνδυασμό πολλών κωδίκων και είναι πολύ χρονοβόρα η εκτέλεσή του. Συνεπώς, προτιμήθηκε να εξαχθούν αποτελέσματα για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς εισόδων και να καταγραφούν σε πίνακες, ώστε μετά ο κώδικας της εργασίας να λαμβάνει τα αποτελέσματα σε πολύ μειωμένο χρόνο. Για τη θέρμανση, η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για θερμοκρασίες περιβάλλοντος από -3 °C έως 15 °C με βήμα 1 °C, και για την ψύξη από 27 °C έως 40 °C με βήμα 1 °C. Ως προς τα φορτία, επιλέχθηκε διάστημα 4 kW έως 15 kW με βήμα 1 kW για τη θέρμανση και διάστημα 4 kW έως 21 kW με βήμα 1 kW για την ψύξη. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 2-11 και στο Σχήμα 2-12 για τη θέρμανση και την ψύξη αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η έξοδος στην ψύξη είναι γραμμική, όπως και η είσοδος, ενώ στη θέρμανση η έξοδος δεν ακολουθεί τόσο πιστά τη μεταβολή της εισόδου. Για κάθε ισχύ υπάρχει μια αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύς συμπιεστή και ένας συντελεστής συμπεριφοράς που λήφθηκαν από τον κώδικα.



Σχήμα 2-11: Καταγραφή αποτελεσμάτων ισχύος κώδικα αντλίας θερμότητας για θέρμανση



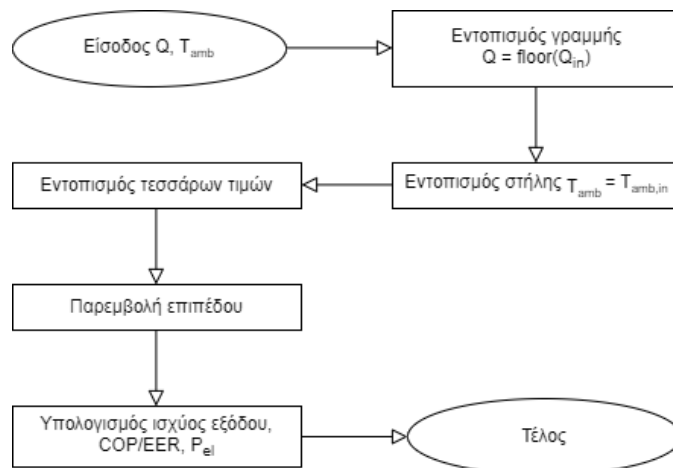
Σχήμα 2-12: Καταγραφή αποτελεσμάτων ισχύος κώδικα αντλίας θερμότητας για ψύξη

Έπειτα, πρέπει να βρεθεί ο τρόπος που θα αποκτούσε πρόσβαση στα αποτελέσματα αυτά ο κώδικας και θα τα χρησιμοποιούσε. Πρώτη σκέψη ήταν η προσέγγιση των δεδομένων αυτών με μία καμπύλη τριών διαστάσεων. Το Matlab πραγματοποιεί τη διαδικασία αυτή με δικό του πακέτο και δίνει τους συντελεστές των παραγόντων της συνάρτησης $z=f(x,y)$ για τον υπολογισμό της καμπύλης. Ενώ για την ψύξη, όπως ήταν αναμενόμενο, βρέθηκε ένα επίπεδο που προσέγγιζε αρκετά καλά τα περιεχόμενα του πίνακα αποτελεσμάτων, για τη θέρμανση δεν ισχύει το ίδιο. Υπήρχαν αποκλίσεις μεταξύ του της ισχύος εισόδου και της τιμής της καμπύλης μέχρι και 1,3 kW, κάτι το οποίο ήταν δυνατό να προκαλέσει αρκετά αναληθή αποτελέσματα στην πορεία. Συνεπώς, ως καλύτερη λύση επιλέχθηκε και πάλι ο κώδικας ευρετηρίασης. Οι εξισώσεις (2.30) και (2.31) είναι τα επίπεδα που υπολόγισε το Matlab ως βέλτιστη προσέγγιση στα δεδομένα της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα, όπου x είναι το φορτίο και y η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$$z = 11550 + 0,8194x - 31,72y \tag{2.30}$$

$$z = 28,44 + 1,001x - 0,0703y \tag{2.31}$$

Ο κώδικας ευρετηρίασης λειτουργεί όπως και στα φωτοβολταϊκά, με μικρές διαφοροποιήσεις. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια χιλιάδα Watt [W] φορτίου, συνεπώς το φορτίο εισόδου στρογγυλοποιείται στην κοντινότερη χιλιάδα (προς τα κάτω) και αναγνωρίζεται η γραμμή. Το ίδιο γίνεται και με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που αντιστοιχεί σε στήλες. Έπειτα, επιλέγεται ένα «τετράγωνο» γύρω τιμών, βάσει της περιγραφής που έχει ήδη γίνει από προηγούμενη ενότητα, και πραγματοποιείται η παρεμβολή επιπέδου μεταξύ αυτών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για την ισχύ εξόδου (Q_H ή Q_C), τον συντελεστή απόδοσης (COP ή EER) και την ισχύ του συμπιεστή (P_{el}). Το διάγραμμα ροής του κώδικα (προσαρμοσμένο σε θέρμανση και ψύξη) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-13, ενώ χρησιμοποιήθηκε και εδώ η εξίσωση (2.13).



Σχήμα 2-13: Κώδικας ευρετηρίασης για αντλία θερμότητας

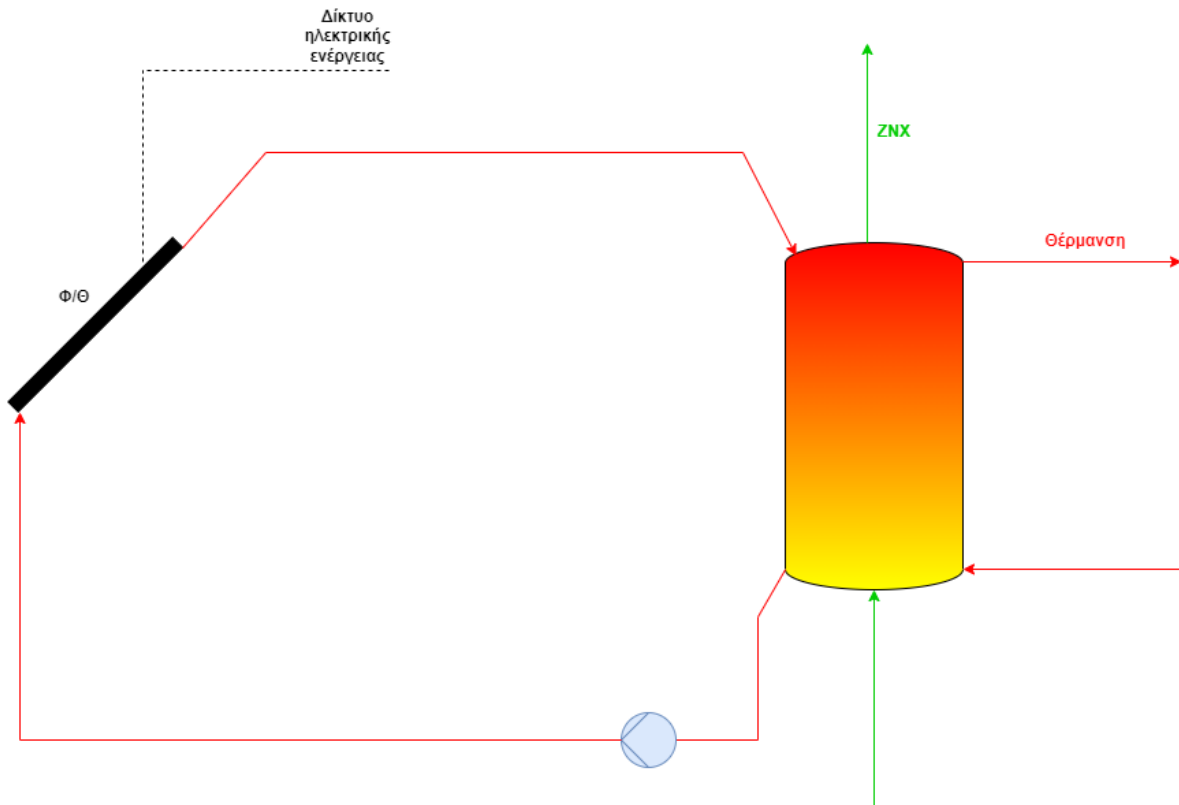
2.4 Παροχή θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης

Το συνολικό σύστημα έχει τρεις λειτουργίες οι οποίες ενεργοποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Αυτές είναι η ταυτόχρονη παροχή θέρμανσης από τη θερμότητα που παρέχει το σύστημα θερμικής αποθήκευσης, η παροχή θέρμανσης από την αντλία θερμότητας και η παροχή ψύξης από αντλία θερμότητας. Το νερό χρήσης θερμαίνεται αποκλειστικά από το σύστημα αποθήκευσης και μπορεί να ζητηθεί και στις τρεις λειτουργίες, ανάλογα με το ωριαίο φορτίο. Στον πρώτο τρόπο λειτουργίας η αντλία θερμότητας δεν χρησιμοποιείται, ενώ στον δεύτερο τρόπο πάντα παρέχει ισχύ ταυτόχρονα με τη ροή που διέρχεται από τη δεξαμενή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μην καλύψει το θερμικό φορτίο μόνη της αλλά να παρέχει την επιπρόσθετη ισχύ που χρειάζεται για να καλυφθεί. Σε αυτήν την περίπτωση, βέβαια, μπορεί να λειτουργήσει για φορτίο 4 kW και πάνω, που σημαίνει ότι το φορτίο μπορεί να υπερκαλυφθεί. Τέλος, θεωρείται ότι η αντλία θερμότητας δεν απαιτεί μεταβατικό χρόνο από τη στιγμή που ενεργοποιείται μέχρι την απαιτούμενη λειτουργία.

Να σημειωθεί ότι το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να παρέχει μόνο θερμική ισχύ για θέρμανση χώρου ή μόνο για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης. Από την άλλη ίσως να απαιτείται μόνο παροχή ψυκτικής ισχύος χωρίς ζεστό νερό χρήσης. Όλα αυτά αποτελούν, προφανώς, υποπεριπτώσεις των τριών λειτουργιών.

2.4.1 Παροχή θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης από σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Στην περίπτωση αυτή, όπως προαναφέρθηκε, δεν λειτουργεί η αντλία θερμότητας και τα φορτία θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης παρέχονται αποκλειστικά από την ισχύ της ροής που διέρχεται από την δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού. Φυσικά, το γεγονός αυτό προϋποθέτει η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή να είναι αρκετά υψηλή, ώστε η θερμότητα που προσφέρει να αρκεί για την ικανοποίηση των παραπάνω φορτίων. Προβλέπεται ότι αυτό θα συμβαίνει μέρες με υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά κυρίως χειμερινούς μήνες, αφού το καλοκαίρι δεν απαιτείται θέρμανση χώρου.



Σχήμα 2-14: Εγκατάσταση για λειτουργία παροχής θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης από σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Στο Σχήμα 2-14 παρουσιάζεται σχηματικά η λειτουργία αυτή. Η αντλία θερμότητας βρίσκεται εκτός λειτουργίας, συνεπώς θεωρείται πως δεν υπάρχει. Οι Φωτοβολταϊκοί-Θερμικοί συλλέκτες συλλέγουν θερμική ενέργεια μέσω της ροής νερού που διέρχεται από αυτούς, η οποία με τη σειρά της τη μεταφέρει στο ψηλότερο και θερμότερο σημείο της δεξαμενής. Έπειτα, με την ίδια παροχή, διαφεύγει νερό από τη δεξαμενή, μέσω της ροής που επιβάλλει η αντλία και επιστρέφει στους συλλέκτες για να θερμανθεί και πάλι. Οι Φ/Θ συλλέκτες παράγουν και ρεύμα, φυσικά, το οποίο παρέχεται απευθείας στο δίκτυο, με τρόπο που θα αναλυθεί αργότερα, από τη στιγμή που δεν υπάρχει το ηλεκτρικό φορτίο του συμπιεστή για να καλύψει.

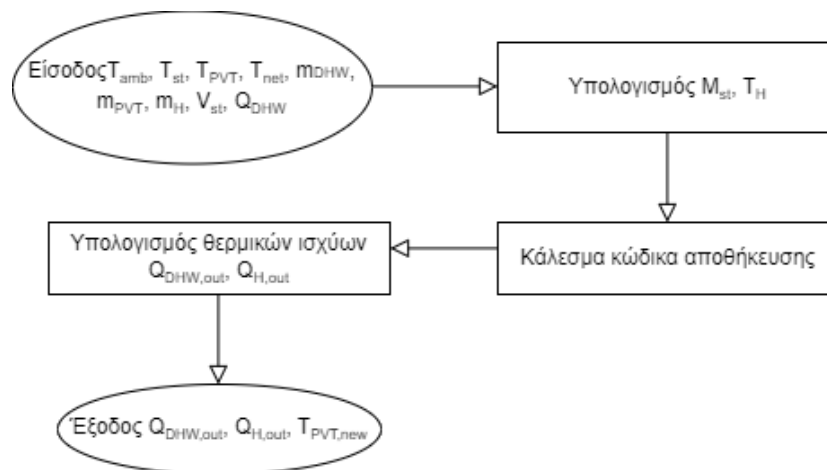
Οι άλλες δύο ροές που συναντώνται είναι η ροή του νερού χρήσης και του νερού θέρμανσης. Η πρώτη προέρχεται από το δίκτυο, διέρχεται από τη δεξαμενή μέσω του σπειροειδούς εναλλάκτη και καταλήγει στο υδραυλικό δίκτυο της κατοικίας προς οικιακή χρήση. Η δεύτερη εξέρχεται από τη δεξαμενή από το ψηλότερο και θερμότερο σημείο για να μεταφέρει τη θερμική ενέργεια που έχει παραχθεί διά μέσου Φ/Θ συλλεκτών. Αφού μεταφερθεί στον χώρο της κατοικίας από τον οποίο προέρχεται η ζήτηση θερμικού φορτίου, επιστρέφει στο χαμηλότερο επίπεδο της δεξαμενής, προφανώς με την ίδια

παροχή. Η θερμοκρασία με την οποία οδηγείται στην κατοικία είναι η θερμοκρασία του υψηλότερου κόμβου της δεξαμενής και η θερμοκρασία με την οποία επιστρέφει από αυτήν είναι κατά 5 °C χαμηλότερη, εάν λειτουργεί η θέρμανση.

Η λειτουργία αυτή, όπως και οι άλλες δύο, καλούνται ως ξεχωριστές συναρτήσεις από τον βασικό κώδικα. Όταν καλείται, λοιπόν, η συγκεκριμένη λειτουργία ως συνάρτηση από τον κώδικα, δέχεται ως εισόδους τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τη θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή από το προηγούμενο χρονικό βήμα, τη θερμοκρασία της ροής νερού που εξέρχεται από τους Φ/Θ συλλέκτες, τη θερμοκρασία του νερού δικτύου, τις παροχές των τριών ροών, το πλήθος κόμβων της δεξαμενής, τον όγκο της (V_{st}) και το φορτίο ζεστού νερού χρήσης. Αφού υπολογιστεί και η μάζα του νερού εντός δεξαμενής (M_{st}) από την εξίσωση (2.32) και η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης που προέχεται από την κατοικία, τότε καλείται ο κώδικας του συστήματος αποθήκευσης. Αυτός με τη σειρά του δίνει τις θερμοκρασίες στη δεξαμενή την επόμενη χρονική στιγμή, όπως έχει ήδη αναλυθεί. Η τελευταία εργασία που πραγματοποιεί η συνάρτηση είναι να υπολογίσει τη θερμική ισχύ για τη θέρμανση και για το ζεστό νερό χρήσης, αφού πλέον είναι γνωστές οι θερμοκρασίες, μέσω της εξίσωσης (2.33). Η ειδική θερμοχωρητικότητα είναι ίδια σε όλες τις ροές, αφού αποτελούνται και οι τρεις από νερό και ισούται με $c_p = 4187 \text{ J/kg K}$. Η συνάρτηση ως έξοδο, εκτός των δύο θερμικών ισχύων που αναφέρθηκαν, παρέχει και τη θερμοκρασία του νερού που κατευθύνεται προς του Φ/Θ συλλέκτες. Στο Σχήμα 2-15 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κώδικα της συγκεκριμένης λειτουργίας.

$$M_{st} = \rho_{νερού} V_{st} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot V_{st} \quad (2.32)$$

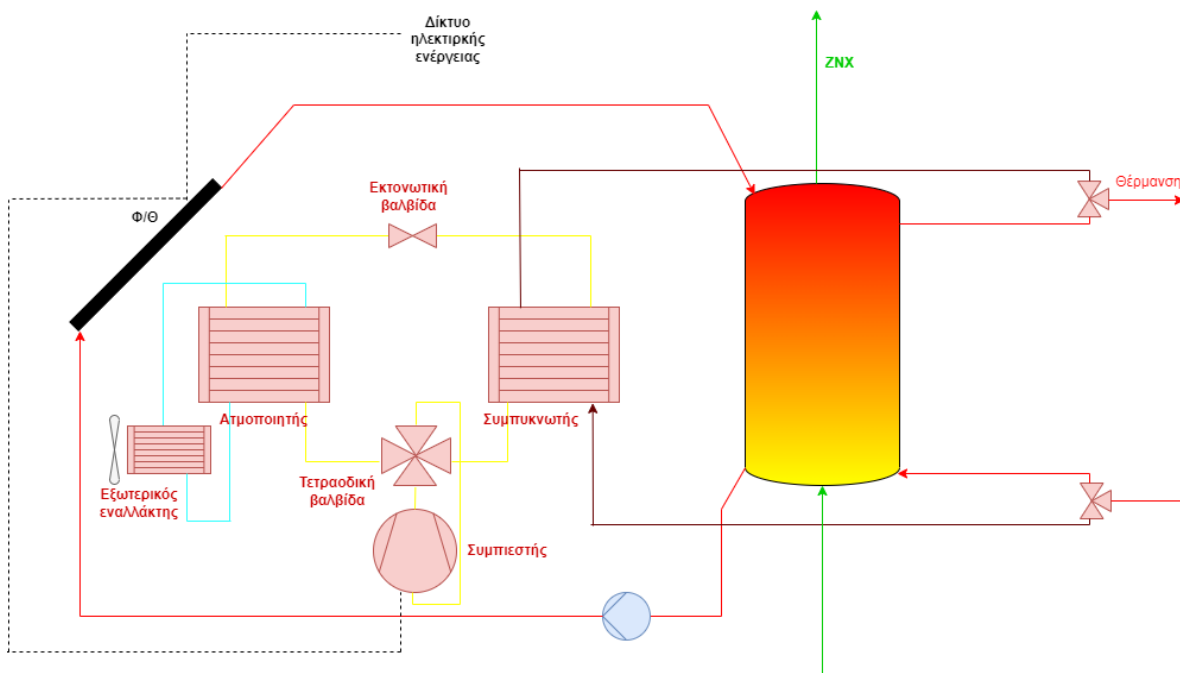
$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.33)$$



Σχήμα 2-15: Διάγραμμα ροής κώδικα λειτουργίας παροχής θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης από σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

2.4.2 Παροχή θέρμανσης από αντλία θερμότητας

Η συγκεκριμένη λειτουργία ενεργοποιείται μόνο εάν η θερμική ισχύς που παράχθηκε από τη δεξαμενή αποθήκευσης για θέρμανση χώρου δεν είναι αρκετή για την κάλυψη του θερμικού φορτίου. Συνεπώς, πάντοτε ενεργοποιείται μετά την πρώτη λειτουργία και ποτέ πριν από αυτή. Η αντλία συνεισφέρει στην κάλυψη του θερμικού φορτίου με παραγόμενη ισχύ ίση τουλάχιστον με 4 kW. Το ζεστό νερό χρήσης συνεχίζει να παράγεται από τη θέρμανση που παρέχει η δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού. Η λειτουργία αυτή αναμένεται να λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια ημερών του χειμώνα, όταν επικρατούν συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.



Σχήμα 2-16: Εγκατάσταση για λειτουργία παροχής επιπρόσθετης θέρμανσης από αντλία θερμότητας

Από το Σχήμα 2-16 περιγράφεται η συνδυαστική λειτουργία της αντλίας θερμότητας με τη δεξαμενή αποθήκευσης και τους Φ/Θ συλλέκτες. Η ροή του νερού από τους συλλέκτες και πάλι συλλέγει τη θερμική ενέργεια που αυτοί απορροφούν και τη μεταφέρει στον υψηλότερο κόμβο της δεξαμενής, καθώς και επιστρέφει σε αυτούς από τον χαμηλότερο κόμβο της δεξαμενής μέσω της κυκλοφορίας που επιβάλλει η αντλία. Το ρεύμα που οι συλλέκτες παράγουν σε αυτή τη φάση λειτουργίας τροφοδοτούν πρωταρχικά τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας. Όταν ο συμπιεστής δεν έχει ανάγκη το ολόκληρο το ποσό ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται, δηλαδή αυτή είναι υψηλότερη από την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται, τότε η περίσσεια οδηγείται και πάλι προς το δίκτυο. Επιπλέον,

οι ροές νερού θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης από τη δεξαμενή προς την κατοικία συνεχίζουν να υπάρχουν, παράλληλα με τη ροή νερού θέρμανσης που προέρχεται από τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας και συναντά τη ροή από τη δεξαμενή σε κάποιο σημείο πριν την κατοικία. Εκεί οι θερμικές ενέργειες από τις δύο πηγές αθροίζονται και οδηγούνται μαζί στο σύστημα θέρμανσης.

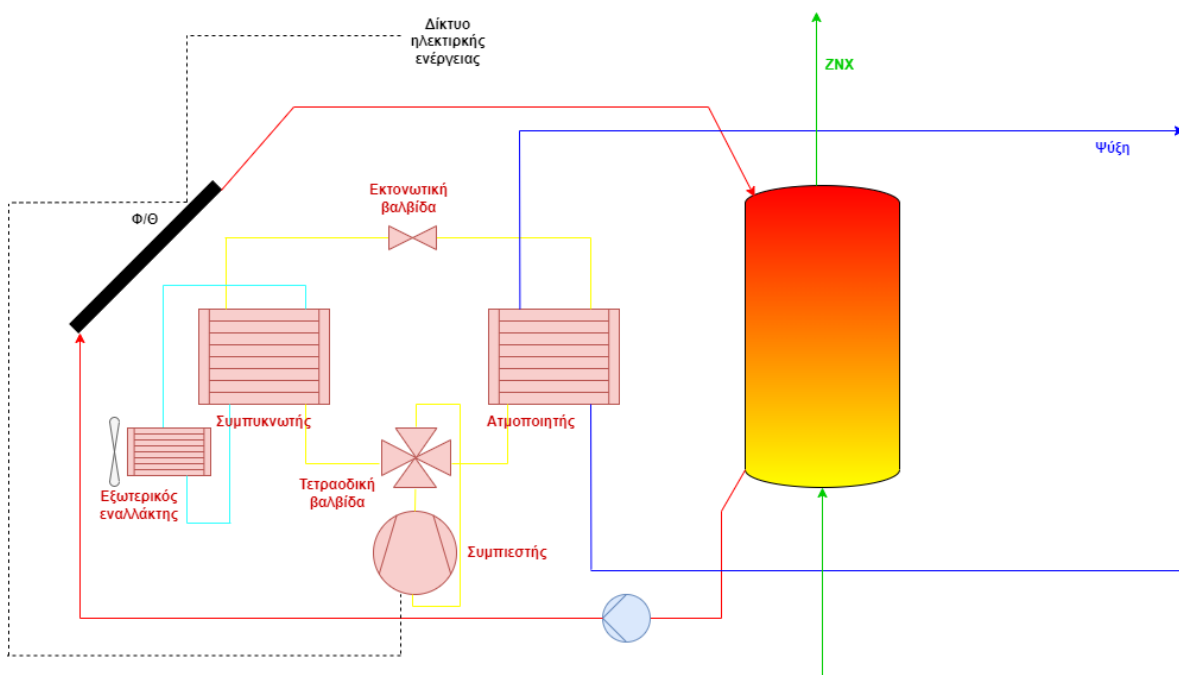
Ό,τι έχει προστεθεί στο Σχήμα 2-16 σε σχέση με το Σχήμα 2-14, εκτός φυσικά από το ρεύμα που τροφοδοτεί τον συμπιεστή, αποτελεί μέρος της αντλίας θερμότητας. Όπως ήδη έχει εξηγηθεί, η αντλία θερμότητας της παρούσας εργασίας είναι αντιστρέψιμη με πηγή τον αέρα και αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Τον συμπυκνωτή, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση τον εναλλάκτη που δεν επικοινωνεί έμμεσα με το περιβάλλον. Εδώ στο ψυκτικό μέσο πραγματοποιείται αλλαγή φάσης από ατμό σε υγρό και η θερμότητα που παράγεται θερμαίνει την άλλη ροή που διέρχεται από τον εναλλάκτη.
- Την εκτονωτική βαλβίδα, στην οποία πραγματοποιείται μια ισενθαλπική μεταβολή που μειώνει την πίεση του ψυκτικού υγρού, πραγματοποιώντας μια αλλαγή φάσης, δίνοντας μείγμα ατμού-υγρού.
- Τον ατμοποιητή, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση τον εναλλάκτη που επικοινωνεί έμμεσα με το περιβάλλον. Σε αυτόν το ψυκτικό μέσο πραγματοποιείται και πάλι αλλαγή φάσης και η υγρή συνιστώσα του μείγματος ατμοποιείται, λαμβάνοντας θερμότητα από το περιβάλλον.
- Τον συμπιεστή, στον οποίο πραγματοποιείται ισεντροπική μεταβολή αύξησης πίεσεως του ατμού. Η ροή διέρχεται από τον συμπιεστή αποκλειστικά μέσω της τετραοδικής βαλβίδας.
- Την τετραοδική βαλβίδα, η οποία, όπως έχει αναφερθεί, συμβάλλει στην αντιστροφή της ροής.
- Τον εξωτερικό εναλλάκτη, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση συνδέεται με τον ατμοποιητή του συστήματος. Αποτελεί το μέσο επικοινωνίας της αντλίας θερμότητας με το περιβάλλον, δηλαδή είναι η εξωτερική μονάδα. Σε αυτόν βρίσκεται ενσωματωμένη μία πτερωτή η οποία επιβάλλει την κυκλοφορία του αέρα.

Η συνάρτηση που καλείται για τη συγκεκριμένη λειτουργία είναι, ουσιαστικά, ο κώδικας της αντλίας θερμότητας σε λειτουργία θέρμανσης. Ως φορτίο εισόδου τοποθετείται η διαφορά του συνολικού θερμικού φορτίου που απαιτείται να καλυφθεί από την κατοικία με την παραγόμενη θερμική ισχύ από τη ροή που διέρχεται από τη δεξαμενή. Εάν η διαφορά αυτή είναι μικρότερη από 4 kW, τότε θεωρείται ίση με 4 kW. Η θερμική ισχύς που παράγεται από την αντλία θερμότητας προστίθεται σε αυτήν που έχει ήδη παραχθεί.

2.4.3 Παροχή ψύξης και ζεστού νερού χρήσης

Στη συγκεκριμένη περίπτωση δύναται να παρέχει η δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού θέρμανση για το ζεστό νερό χρήσης, ενώ η αντλία θερμότητας παρέχει ψυκτική ισχύ για την ψύξη του χώρου της κατοικίας. Φυσικά, μπορεί να λειτουργεί και μόνο η αντλία θερμότητας, εάν δεν υπάρχει φορτίο νερού χρήσης για να καλυφθεί. Γεγονός που είναι πιθανό για τους θερινούς μήνες, κυρίως στους οποίους θα λειτουργεί, κατά πάσα πιθανότητα, η αντλία θερμότητας σε λειτουργία ψύξης. Φυσικά, η παραγόμενη από τους Φ/Θ συλλέκτες θερμική ισχύς θα φθάνει το μέγιστο επίπεδο κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας, λόγω υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, αλλά, δυστυχώς, δεν είναι αναγκαία η εκμετάλλευσή της στον μέγιστο βαθμό.



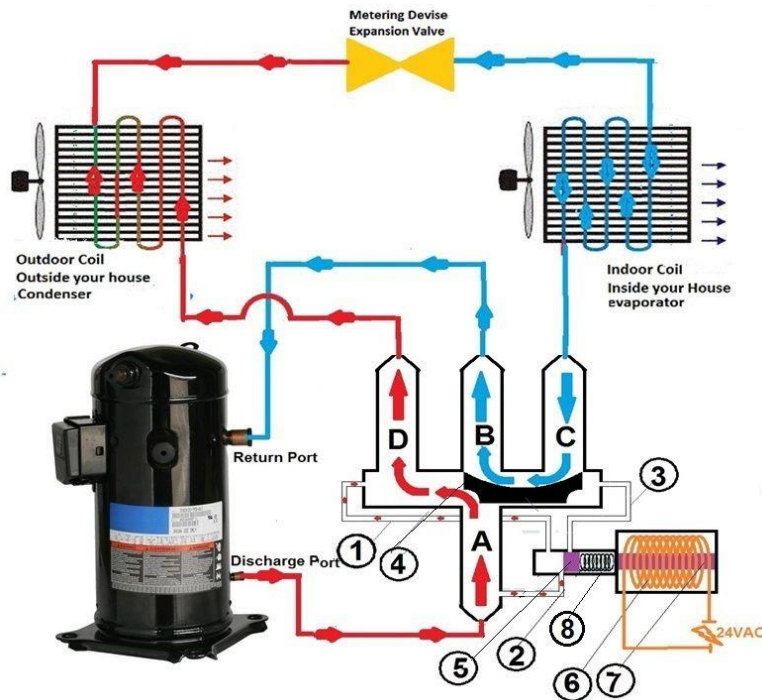
Σχήμα 2-17: Εγκατάσταση για λειτουργία παροχής ψύξης από αντλία θερμότητας παράλληλα με παροχή ζεστού νερού χρήσης

Στο Σχήμα 2-17 παρουσιάζεται η κατά κύριο λόγο καλοκαιρινή λειτουργία του συστήματος, με την αντλία θερμότητας να παρέχει ψυκτική ισχύ και τη δεξαμενή να θερμαίνει μόνο το ζεστό νερό χρήσης. Η ροή του νερού από τους συλλέκτες θερμαίνει και πάλι τη δεξαμενή, ενώ η ηλεκτρική παραγωγή της παρέχει και πάλι ρεύμα στον συμπιεστή και στο δίκτυο, με προτεραιότητα στον πρώτο. Η βασική διαφορά σε σχέση με τη δεύτερη λειτουργία είναι το κρύο νερό που καταλήγει στην κατοικία και μετά επιστρέφει από αυτήν. Αυτό διέρχεται από τον εσωτερικό εναλλάκτη της διάταξης, ο οποίος, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2-17, αυτή τη φορά λειτουργεί ως ατμοποιητής. Από την άλλη, ο

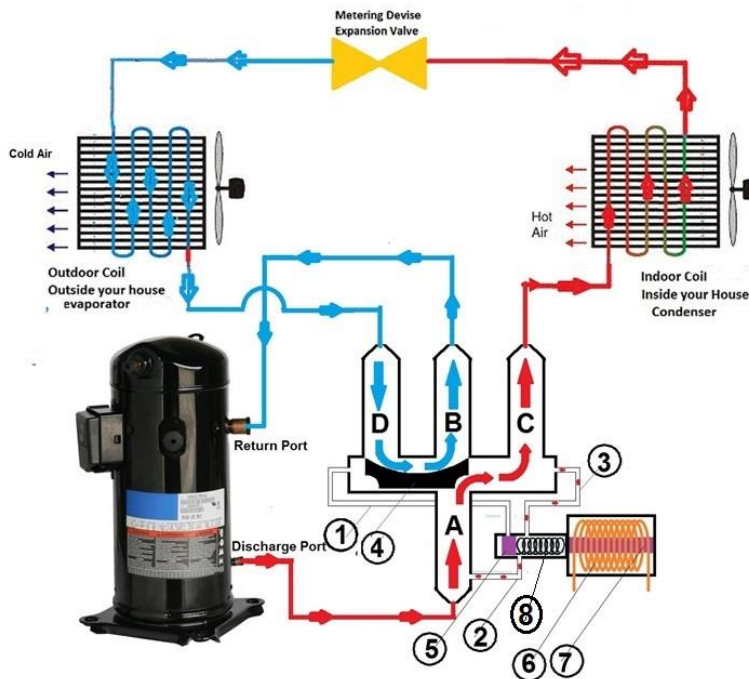
δεύτερος εναλλάκτης της αντλίας θερμότητας πλέον λειτουργεί ως συμπυκνωτής. Πιο αναλυτικά, η διάταξη αποτελείται από:

- Τον συμπυκνωτή, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση τον εναλλάκτη που επικοινωνεί έμμεσα με το περιβάλλον. Η λειτουργία του, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι να απορρίπτει θερμότητα προς το περιβάλλον, ή πιο σωστά προς τον εξωτερικό εναλλάκτη, ώστε το ρεύμα που διέρχεται από αυτόν να συμπυκνώνεται.
- Την εκτονωτική βαλβίδα.
- Τον ατμοποιητή, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση τον εναλλάκτη που δεν επικοινωνεί έμμεσα με το περιβάλλον. Εδώ αφαιρεί θερμότητα από το ψυκτικό μέσο που διέρχεται από αυτόν και αυτό με τη σειρά του οδηγείται προς την κατοικία για να παρέχει τη ζητούμενη ψυκτική ισχύ.
- Τον συμπιεστή.
- Την τετραοδική βαλβίδα.
- Τον εξωτερικό εναλλάκτη, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση συνδέεται με τον συμπυκνωτή του συστήματος. Το ρεύμα αέρα που εξέρχεται από αυτόν προς το περιβάλλον είναι θερμό, όπως προαναφέρθηκε.

Σε αυτό το σημείο, έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί πιο αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας της τετραοδικής βαλβίδας. Στο Σχήμα 2-18 παρατίθεται μια αντιστρεπτή αντλία θερμότητας με τετραοδική βαλβίδα, η οποία φαίνεται αναλυτικά σαν μηχανισμός. Διαθέτει τέσσερις οπές οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ως είσοδοι-έξοδοι, σχηματίζοντας 2 πιθανά ζευγάρια διαδρομών. Βάσει σχήματος, το ένα ζευγάρι είναι οι διαδρομές C-B και A-D, οι οποίες και εικονίζονται. Από τις θέσεις και τις λειτουργίες των δύο εναλλακτών, γίνεται κατανοητό ότι η συγκεκριμένη διαδρομή αφορά την ψύξη. Εάν η μαύρη πλατφόρμα (με νούμερο 4 στην εικόνα) μετακινηθεί αριστερά, με τη χρήση του μικρού ηλεκτρικού κινητήρα της διάταξης, τότε οι διαδρομές γίνονται D-B και A-C. Οι εναλλάκτες ανταλλάσσουν ρόλους και πλέον η αντλία θερμότητας παρέχει θέρμανση (Σχήμα 2-19).

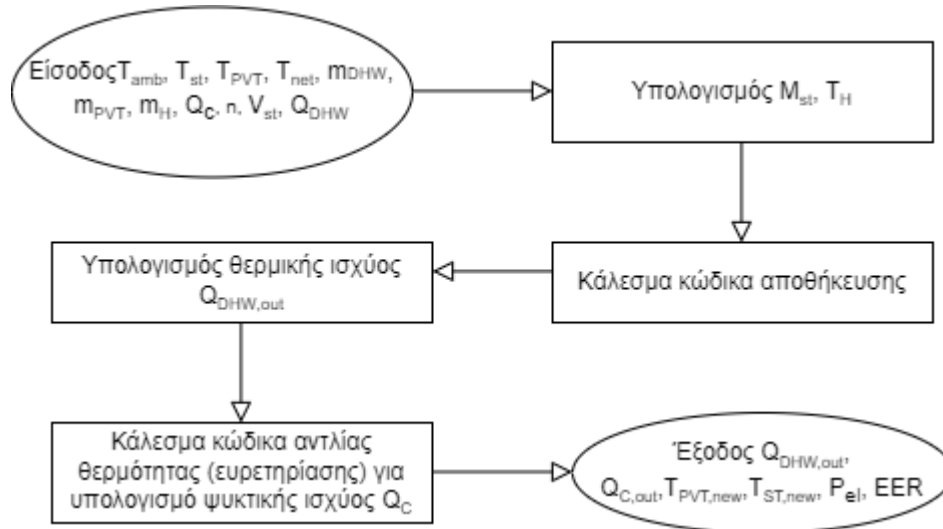


Σχήμα 2-18: Τετραοδική βαλβίδα σε θερινή λειτουργία [27]



Σχήμα 2-19: Τετραοδική βαλβίδα σε θερινή λειτουργία [27]

Ο κώδικας της θερινής λειτουργίας του συστήματος (Σχήμα 2-20) είναι αντίστοιχος με τη συνάρτηση της πρώτης λειτουργίας, για παροχή θέρμανσης και ζεστού νερού μέσω της θερμικής ενέργειας του νερού της δεξαμενής. Η μόνη διαφοροποίηση είναι ότι η ψυκτική ισχύς που παράγεται από την αντλία θερμότητας υπολογίζεται από τον αντίστοιχο κώδικα και όχι από την εξίσωση (2.33). Σαν είσοδοι προστίθενται επιπλέον το ψυκτικό φορτίο, για τον κώδικα της αντλίας θερμότητας, καθώς και οι πίνακες με τα δεδομένα στα οποία γίνεται η ευρετηρίαση.



Σχήμα 2-20: Διάγραμμα ροής κώδικα λειτουργίας παροχής ψύξης και ζεστού νερού χρήσης

2.5 Κοστολόγηση διάταξης

2.5.1 Αρχικό κόστος επένδυσης

Πίνακας 2-6: Κόστη εγκατάστασης

Φ/Θ συλλέκτες	418 [€/m ²]
Inverter	285 [€/W]
Σωληνώσεις	(0,89+0,28*Διάμετρος)*Μήκος [€]
Δεξαμενή	313*Όγκος δεξαμενής+232 [€]
Ηλεκτρική αντίσταση	50 [€]
Αντλία (Κυκλοφορητής)	730 [€]
Συμπιεστής	1,5*(225+170*(Όγκος συμπίεσης)) [€]
Εναλλάκτες	190+310*(Συνολική επιφάνεια εναλλακτών) [€]
Διάφορα	800 [€]
Κόστος εγκατάστασης	30% του συνολικού κόστους

Ο Πίνακας 2-6 παρουσιάζει τα κόστη για την εγκατάσταση της διάταξης. Τα χαρακτηριστικά των σωληνώσεων αναγράφει ο Πίνακας 2-7, από δεδομένα που έχουν δοθεί από το εργαστήριο, ενώ τα χαρακτηριστικά μεγέθη που απαιτούνται για τον υπολογισμό του κόστους κάθε εξαρτήματος παραθέτει ο Πίνακας 2-8. Για τον Πίνακα Χ2, πρέπει να σημειωθεί ότι γίνεται λόγος για πολυκατοικία πέντε (5) ορόφων με τους σωλήνες να έχουν διπλή διαδρομή (προσαγωγή-επιστροφή). Για κάθε όροφο, οι σωληνώσεις, πριν το νερό διαχωριστεί στα Fan-Coil, είναι 3 m για κάθε όροφο, ενώ αφού διαχωριστεί το νερό στα Fan-Coil, οι σωληνώσεις είναι 10 m για κάθε όροφο. Βάσει των μεγεθών αυτών, το συνολικό μήκος σωληνώσεων είναι 195 m. Ο τύπος που παραθέτει ο Πίνακας 2-6 εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε τύπο σωλήνωσης.

Πίνακας 2-7: Χαρακτηριστικά σωληνώσεων

Τύπος Σωλήνωσης	Διάμετρος [m]	Μήκος [m]
Έξοδος Ατμοποιητή Είσοδος Συμπιεστή	0,034925	5
Έξοδος Συμπιεστή Είσοδος Συμπυκνωτή	0,22225	5
Έξοδος Συμπυκνωτή Είσοδος Εκτονωτικής Βαλβίδας	0,22225	5
Έξοδος Εκτονωτικής Βαλβίδας Είσοδος Ατμοποιητή	0,034925	5
Νερό (πριν διαχωριστεί στα Fan-Coil)	0,035	30
Νερό (αφού διαχωριστεί στα Fan-Coil)	0,018	100
Μέσο Φ/Θ συλλεκτών	0,042	45

Πίνακας 2-8: Χαρακτηριστικά μεγέθη για κόστη

Επιφάνεια συλλεκτών	(Αριθμός πάνελ)*0,527*1,2 [m ²]
Όγκος συμπίεσης	147,7*10 ⁻⁶ [m ³]
Συνολική επιφάνεια εναλλακτών	2,4226 [m ²]

2.5.2 Λειτουργικό κόστος

Το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης είναι, ουσιαστικά, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας και από την ηλεκτρική αντίσταση που θερμαίνει, όποτε χρειάζεται, το νερό της δεξαμενής. Η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα θεωρείται σταθερά ίσο με 0,162 €/kWh_{el} [24]. Συνεπώς, η συνολική ισχύς που καταναλώνεται η διάταξη ανά ώρα, που είναι το επιλεγμένο χρονικό βήμα, πολλαπλασιάζεται με το κόστος αυτό και δίνεται το κόστος ανά

ώρα λειτουργίας. Και εκεί θα ολοκληρώνονταν οι υπολογισμοί, αν δεν υπήρχε η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τους Φ/Θ συλλέκτες. Το ποσό του ρεύματος που παράγεται από τους συλλέκτες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, καταναλώνεται πρωτίστως από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας. Στην περίπτωση, όμως, που η αντλία θερμότητας δεν λειτουργεί ή δεν καταναλώνει όλη την ενέργεια που παράγουν οι συλλέκτες, το ρεύμα που περισσεύει διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, με τη μέθοδο του ενεργειακού συμψηφισμού (net metering).

Ο ορισμός του ενεργειακού συμψηφισμού, σύμφωνα με τον Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ), είναι ο εξής: «Ως ενεργειακός συμψηφισμός νοείται ο συμψηφισμός της εγχεόμενης στο Δίκτυο ενέργειας από σταθμό παραγωγής με την απορροφώμενη ενέργεια στην εγκατάσταση κατανάλωσης του αυτοπαραγωγού. Αφορά σε σταθμό παραγωγής ο οποίος εγκαθίσταται στον ίδιο ή όμορο χώρο με την εγκατάσταση κατανάλωσης, που συνδέεται στο δίκτυο διανομής μέσω της ίδιας παροχής. Στον ενεργειακό συμψηφισμό η παραγόμενη ενέργεια δεν είναι απαραίτητο να ταυτοχρονίζεται με την καταναλισκόμενη.» [28].

Ο πρακτικός τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται η μέθοδος αυτή, είναι ότι δημιουργείται ένας ενεργειακός συμψηφισμός στο τέλος κάθε τριετίας. Ο καταναλωτής καλείται να πληρώσει στον λογαριασμό του ηλεκτρικού ρεύματος την ενέργεια που κατανάλωσε μείον την ενέργεια που παρήγαγε. Εάν η διαφορά αυτή είναι μηδενική, τότε δεν πληρώνει τίποτα, ενώ αν είναι αρνητική, πάλι δεν πληρώνει τίποτα. Στο τέλος της τριετίας επαναλαμβάνεται από την αρχή η διαδικασία υπολογισμού. Συνεπώς, το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιείται από τον καταναλωτή ως μια αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας. Βάσει των όρων που συνοδεύουν τον ενεργειακό συμψηφισμό κρίνεται απαραίτητη η κατάλληλη διαστασιολόγηση του συστήματος, κυρίως για να μην πραγματοποιείται σπατάλη πολύτιμης και υψηλού κόστους ενέργειας.

Τέλος, θεωρείται ότι υπάρχει και ένα κόστος συντήρησης της διάταξης, το οποίο τίθεται ίσο με το 1% του αρχικού κόστους επένδυσης [24]. Να σημειωθεί ότι το έργο του κυκλοφορητή στη ροή του νερού του PV/T, θεωρείται αμελητέο, καθώς επιλέγεται αντλία νερού με ηλεκτρική κατανάλωση ίση με 80 W, το οποίο μέγεθος θεωρείται αμελητέο σε σχέση με την ελάχιστη κατανάλωση της αντλίας θερμότητας που ισούται με 1.300 W ή τα 9.000 W της ηλεκτρικής αντίστασης. Το ίδιο ισχύει και για την πτερωτή του εξωτερικού εναλλάκτη της αντλίας θερμότητας, της οποίας η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς θεωρείται 100 W.

2.6 Βασική μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο κεντρικός κώδικας της εργασίας, ο οποίος αναπτύχθηκε για να συνδυάσει όλα τα μέρη που έχουν αναλυθεί έως τώρα και να

παράσχει τα ζητούμενα αποτελέσματα. Ξεκινά με μια αρχικοποίηση όλων των μεγεθών που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα, δίνονται ο αριθμός των Φ/Θ πάνελ, ο όγκος της δεξαμενής, ο αριθμός των κόμβων της δεξαμενής ίσος με 25, ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα τάσης (inverter) ίσος με 97% [29] και η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού ίση με 4187 J/kgK. Όλα τα μεγέθη που δεν παρέχονται από τα αρχεία των δεδομένων και δεν παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αρχικοποιούνται με μηδενικές τιμές, εκτός της θερμοκρασίας του νερού μέσα στη δεξαμενή, στην οποία δίνεται μία ομοιόμορφη τιμή σε όλο το ύψος ίση με 20 °C. Έπειτα διαβάζονται από τον κώδικα τα καιρικά δεδομένα, τα ενεργειακά φορτία της κατοικίας και οι πίνακες αποτελεσμάτων του κώδικα της αντλίας θερμότητας.

Στη συνέχεια ξεκινά η ετήσια προσομοίωση με ωριαίο βήμα (συνολικά 8760 βήματα). Σε κάθε χρονικό βήμα, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Αντιστοίχιση τιμής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, θερμοκρασίας νερού χρήσης από το δίκτυο, φορτίου θέρμανσης ή ψύξης χώρου και θερμικού φορτίου ζεστού νερού.
- Εάν η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη από 300 W/m², η τιμή της παροχής μάζας νερού από τους συλλέκτες θεωρείται μηδενική, για να αποφευχθούν οι απώλειες που προκαλούνται από χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας, δηλαδή για να μην αφαιρείται θερμότητα από το νερό της δεξαμενής. Εάν η συνθήκη αυτή δεν ισχύει, τότε η παροχή μάζας του νερού των συλλεκτών τίθεται ίση με την τιμή του κατασκευαστή, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση ίση με 0,06 kg/s και πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των πάνελ.
- Η τιμή της παροχής μάζας νερού ζεστού νερού χρήσης δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστή, αφού καθορίζεται από την θερμοστατική βαλβίδα, ενώ για να αποφασιστεί η τιμή της παροχής μάζας του νερού θέρμανσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα σώματα θέρμανσης, δηλαδή τα Fan Coil. Από τη βιβλιογραφία [30] και την εξίσωση (2.34), ο συντελεστής α [W x K^{1,3}] που εξαρτάται από το μέγεθος του Fan Coil, υπολογίζεται ίσος με 287,7, για μέγιστο θερμικό φορτίο ίσο με $P_{max}=16472$ W. Από την εξίσωση (2.35), λοιπόν, υπολογίζεται η παροχή νερού θέρμανσης. Η μέγιστη θερμοκρασία του νερού με την οποία μπορούν να λειτουργήσουν τα Fan Coil είναι 45 °C, άρα η επιθυμητή θερμοκρασία τίθεται πάντα ίση με αυτή, εάν η θερμοκρασία της δεξαμενής είναι μεγαλύτερη. Εάν είναι μικρότερη, λαμβάνεται αυτή ως θερμοκρασία λειτουργίας και εάν η παραγόμενη θερμική ισχύς είναι μικρότερη από το επιθυμητό, θα χρειαστεί να συμμετέχει η αντλία θερμότητας. Αυτό, βέβαια, ελέγχεται από τον κώδικα μεταγενέστερα.

$$factor = \frac{2,824 \cdot P_{max}}{50^{1,3}}$$

(2.34)

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{factor \cdot (T_{st,1} - T_{amb})^{1,3}}{c_p \cdot \Delta T} & , T_{st,1} < 45 \text{ } ^\circ C \\ \frac{factor \cdot (45 \text{ } ^\circ C - T_{amb})^{1,3}}{c_p \cdot \Delta T} & , T_{st,1} > 45 \text{ } ^\circ C \end{cases}$$

(2.35)

Στην εξίσωση (2.35), η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT είναι πάντα ίση με 5 K, όση η μεταβολή της θερμοκρασίας πριν και μετά τα Fan Coil.

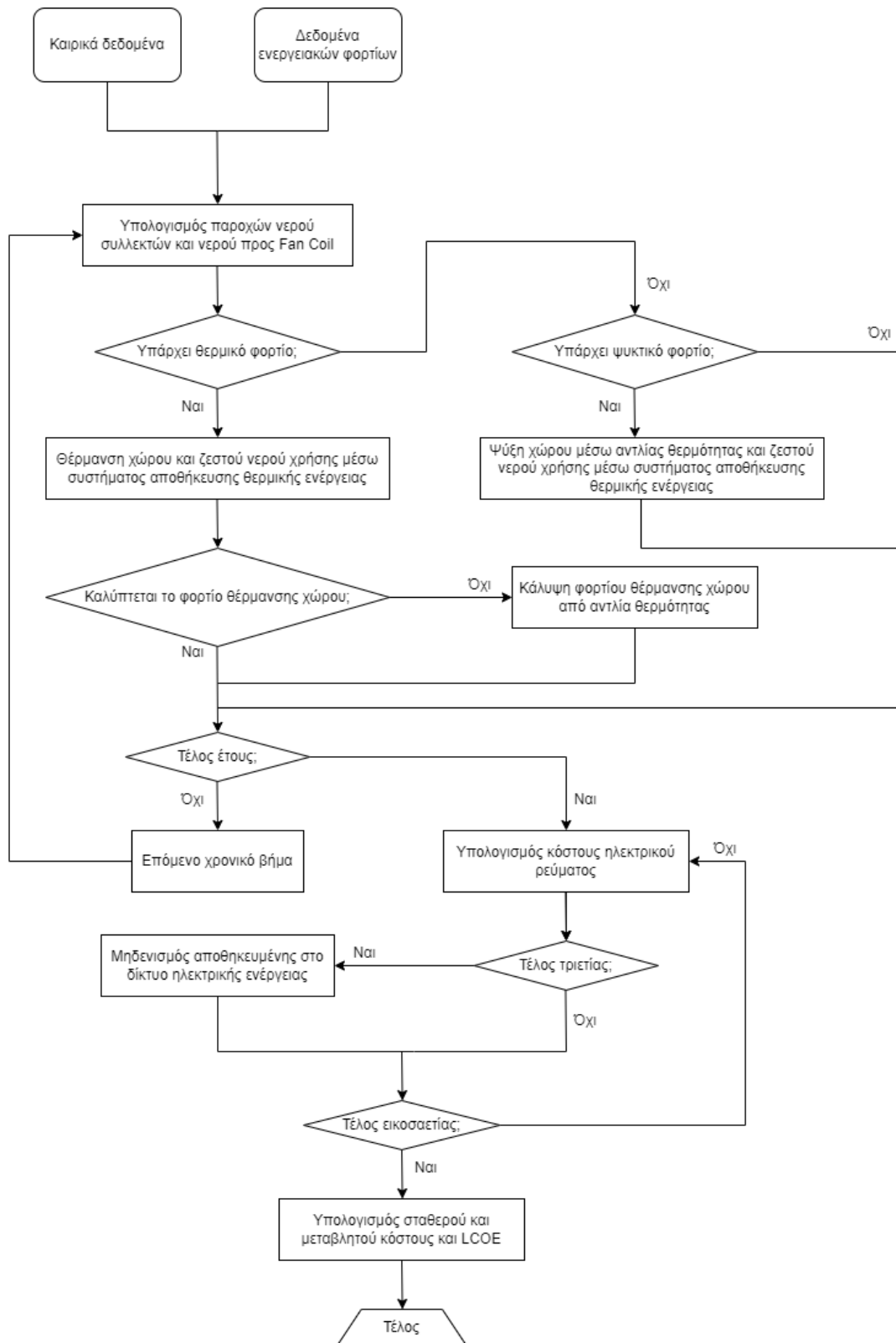
- Έπειτα καλείται η συνάρτηση της θερμικής συνιστώσας του Φ/Θ συλλέκτη για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του νερού και των ηλιακών κυττάρων. Με γνωστή τη δεύτερη καλείται και η συνάρτηση της ηλεκτρικής συνιστώσας του συλλέκτη, δίνοντας την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Αυτή, ύστερα, πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των πάνελ και τον βαθμό απόδοσης των αντιστροφών.
- Στη συνέχεια, εάν υπάρχει ζήτηση θέρμανσης χώρου, επικαλείται ο κώδικας της πρώτης λειτουργίας, δηλαδή παροχής θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης μέσω του νερού από τη δεξαμενή αποθήκευσης. Εάν η παραγόμενη θερμική ισχύς δεν είναι αρκετή για να καλυφθεί το θερμικό φορτίο της κατοικίας, καλείται ο κώδικας της αντλίας θερμότητας, αλλά μόνο για το φορτίο που δεν έχει καλυφθεί. Εάν αυτή η διαφορά είναι μικρότερη από 4 kW, τότε τίθεται ίση με αυτό το ποσό, καθώς σε διαφορετική περίπτωση η αντλία θερμότητας δεν λειτουργεί. Από την άλλη, εάν υπάρχει ζήτηση για ψύξη χώρου, ενεργοποιείται η τρίτη λειτουργία, δηλαδή ψύξη από την αντλία θερμότητας και παροχή ζεστού νερού χρήσης από τη δεξαμενή.
- Μόλις ολοκληρωθούν αυτά τα βήματα και καθορισθούν οι αρχικές τιμές των μεγεθών για το επόμενο χρονικό βήμα, όπως αυτές της θερμοκρασίας του νερού του Φ/Θ συλλέκτη και του νερού της δεξαμενής ανά κόμβο, τότε ολοκληρώνεται η επαναληπτική διαδικασία.
- Η επόμενη επαναληπτική διαδικασία αφορά τον υπολογισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης σε βάθος εικοσαετίας (20), για τον υπολογισμό της οικονομικής απόδοσης της επένδυσης. Συνεπώς υπάρχουν 8760 ωριαία βήματα ανά έτος επί 20 έτη. Εάν υπάρχει παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τους συλλέκτες αφαιρείται από την κατανάλωση, καθώς και η ισχύς που είναι αποθηκευμένη στο δίκτυο από τον ενεργειακό συμψηφισμό. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο δίκτυο είναι αρκετή για να καλύψει τη ζήτηση, τότε χρησιμοποιείται εξ ολοκλήρου και αν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ξεπερνά τη ζήτηση, τότε η περίσσεια

αποθηκεύεται στο δίκτυο. Υπενθυμίζεται ότι στο τέλος της τριετίας ο ενεργειακός συμψηφισμός ανανεώνεται.

- Τέλος, υπολογίζεται το κόστος επένδυσης και το λειτουργικό κόστος ανά έτος, καθώς και το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (Levelized Cost Of Energy – LCOE), βάσει της εξίσωσης (2.36) [31], το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως κριτήριο βελτιστοποίησης, διότι είναι το μέγεθος που εκφράζει ταυτόχρονα την ενεργειακή και οικονομική απόδοση της επένδυσης. Τίθενται, επίσης, κάποιιο περιορισμοί, ώστε το νερό της δεξαμενής να μην ξεπερνά τα όρια θερμοκρασίας 0-90 °C.

Στο Σχήμα 2-21 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του βασικού κώδικα της παρούσας εργασίας. Για την εξίσωση (2.36), το C_{fixed} είναι το αρχικό κόστος επένδυσης, C_n είναι το μεταβλητό κόστος ανά έτος, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση το κόστος συντήρησης και το κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, n είναι το έτος, r_d είναι το επιτόκιο προεξόφλησης (discount rate) και E_n είναι η καθαρή παραγόμενη ενέργεια ανά έτος.

$$LCOE = \frac{C_{fixed} + \sum_{n=1}^{20} \frac{C_n}{(1+r_d)^n}}{\sum_{n=1}^{20} \frac{E_n}{(1+r_d)^n}} \quad (2.36)$$



Σχήμα 2-21: Διάγραμμα ροής κεντρικού κώδικα

2.7 Διαδικασία βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με χρήση κατάλληλου εργαλείου του Matlab (Global Optimization Toolbox) και συγκεκριμένα, με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου. Ο γενετικός αλγόριθμος είναι μία μέθοδος βελτιστοποίησης που βασίστηκε στη φυσική γενετική, καθώς αναπτύχθηκε αρχικά για να προσομοιώσει την ανάπτυξη και τον εκφυλισμό των φυσικών οργανισμών σε φυσικό περιβάλλον. Ως τεχνική βελτιστοποίησης είναι σε θέση να βρει την ολικά βέλτιστη λύση ή να την πλησιάσει αρκετά. Ο τρόπος που λειτουργεί, είναι ότι επιλέγονται διάφορα τυχαία σημεία στο πεδίο βελτιστοποίησης, από τα οποία παράγονται κάποια νέα, τα οποία θα βρίσκονται κοντινότερα στη βέλτιστη λύση. Ο τρόπος αναπαραγωγής των σημείων είναι βασισμένος αποκλειστικά στο κριτήριο βελτιστοποίησης, χρησιμοποιεί απλούς χειρισμούς σειρών και επαναλαμβάνεται πολλαπλώς. Το γεγονός ότι η μόνη απαραίτητη πληροφορία είναι το πόσο βέλτιστο είναι κάθε σημείο στο πεδίο βελτιστοποίησης, καθιστά την τεχνική αρκετά ελκυστική [32].

Ως προς την υλοποίηση του στη συγκεκριμένη εφαρμογή, οι παράμετροι που βελτιστοποιούνται είναι το πλήθος των πάνελ των Φ/Θ συλλεκτών, δηλαδή η επιφάνειά τους και ο όγκος της δεξαμενής. Ως κριτήριο βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας, συνεπώς ο κυρίως κώδικας μετατρέπεται σε μία συνάρτηση, η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση προσαρμογής και λαμβάνει ως είσοδο τον αριθμό των πάνελ και τον όγκο της δεξαμενής, ενώ δίνει ως έξοδο το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας. Ο αριθμός των γενεών, δηλαδή του αριθμού επαναλήψεων της διαδικασίας, τίθεται ίσος με 10, ενώ ο πληθυσμός, δηλαδή ο αριθμός των σημείων κάθε γενιάς, τίθεται ίσος με 50.

Επιπλέον, γίνεται χρήση του εργαλείου παράλληλης επεξεργασίας του Matlab (Parallel Computing Toolbox) για μείωση του χρόνου επεξεργασίας. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται ταυτόχρονα η απόσταση από τη βέλτιστη λύση στο πεδίο βελτιστοποίησης τόσων σημείων, όσοι και οι πυρήνες του υπολογιστή. Τέλος, το πεδίο βελτιστοποίησης είναι από 1 έως 200 πάνελ και από 0,25 m³ έως 5 m³ για τον όγκο της δεξαμενής. Να σημειωθεί ότι δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής διαφόρων γραφημάτων και αποτελεσμάτων αναφορικά με τη βέλτιστη λύση, συμπεριλαμβανομένων, φυσικά, του βέλτιστου σημείου και της τιμής που λαμβάνει σε αυτό η συνάρτηση προσαρμογής. Στην παρούσα εφαρμογή δεν καθορίζεται καμία άλλη παράμετρος της βελτιστοποίησης.

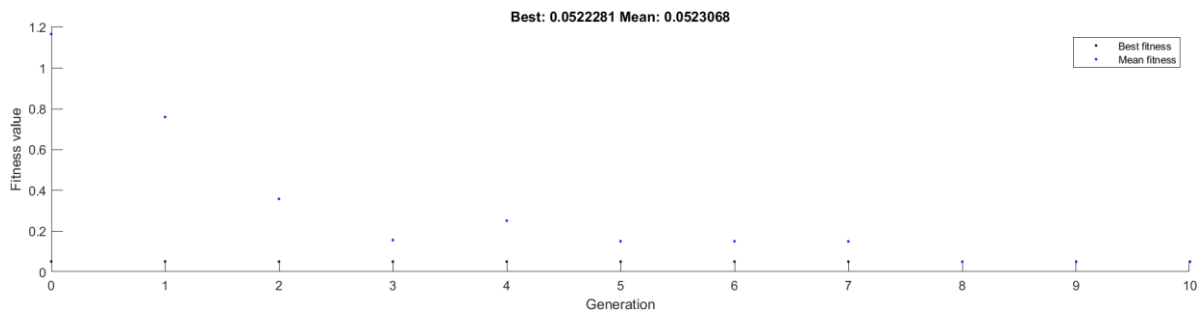
Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπογραμμιστεί ότι ναι μεν η βελτιστοποίηση των δύο προαναφερθέντων παραμέτρων με κριτήριο το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας θα δώσει τη βέλτιστη λύση για την επένδυση, ή μία λύση που να την πλησιάζει, ενεργειακά και οικονομικά, αλλά το γεγονός αυτό δεν σημαίνει ότι η επένδυση αυτή θα είναι και συμφέρουσα. Το LCOE απεικονίζει, θεμελιωδώς, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας ανά ένα καθορισμένο ποσό παραγόμενης ενέργειας από το σύστημα [33]. Συνεπώς, κρίνεται

απαραίτητο το LCOE να είναι μικρότερο από το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος, διαφορετικά η επένδυση θα είναι ζημιογόνος. Άρα η λύση που επιλέγεται μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης δεν λαμβάνεται αυτόματα ως συμφέρουσα, αλλά πρέπει να πληροί αυτό το πολύ βασικό κριτήριο.

3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

3.1 Βελτιστοποίηση

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο και τις ρυθμίσεις που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η μέθοδος συνέκλινε στη λύση των 20,15 πάνελ (επιφάνεια 12,74 m²) και των 4,94 m² για τον όγκο της δεξαμενής. Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται η σύγκλιση της μεθόδου, με τα μπλε σημεία να υποδηλώνουν τη μέση τιμή που έλαβε η συνάρτηση προσαρμογής για όλο τον πληθυσμό ανά γενιά, ενώ τα κόκκινα σημεία υποδηλώνουν την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής για το άτομο με την υψηλότερη βαθμολογία προσαρμογής. Είναι προφανές ότι μετά την 7^η γενιά η μέθοδος πλησίασε πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση. Στο τέλος της διαδικασίας, δηλαδή στη 10^η γενιά, η τιμή της συνάρτησης προσαρμογής που έλαβε το καλύτερο άτομο του πληθυσμού ήταν 0,0522, μετά από στρογγυλοποίηση. Αυτή είναι και η τιμή του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας για το συγκεκριμένου ζευγάρι παραμέτρων.



Σχήμα 3-1: Υψηλότερη και μέση βαθμολογία προσαρμογής ανά γενιά

Αρχικά να τονισθεί ότι η τιμή που έλαβε το LCOE, δηλαδή 0,0522 €/kWh είναι απόλυτα αποδεκτή, μιας και η τιμή του ρεύματος που θεωρήθηκε είναι περίπου τριπλάσια. Επιπλέον, ο αριθμός των πάνελ θεωρείται ίσος με την κοντινότερη ακέραια τιμή, δηλαδή 20, ενώ το κοντινότερο εμπορικά διαθέσιμο μοντέλο για τη δεξαμενή αποθήκευσης είναι 5 m². Λαμβάνοντας, λοιπόν, αυτές τις τιμές ως δεδομένα, ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος για 20 έτη, μέσω του βασικού κώδικα.

3.2 Οικονομικά αποτελέσματα

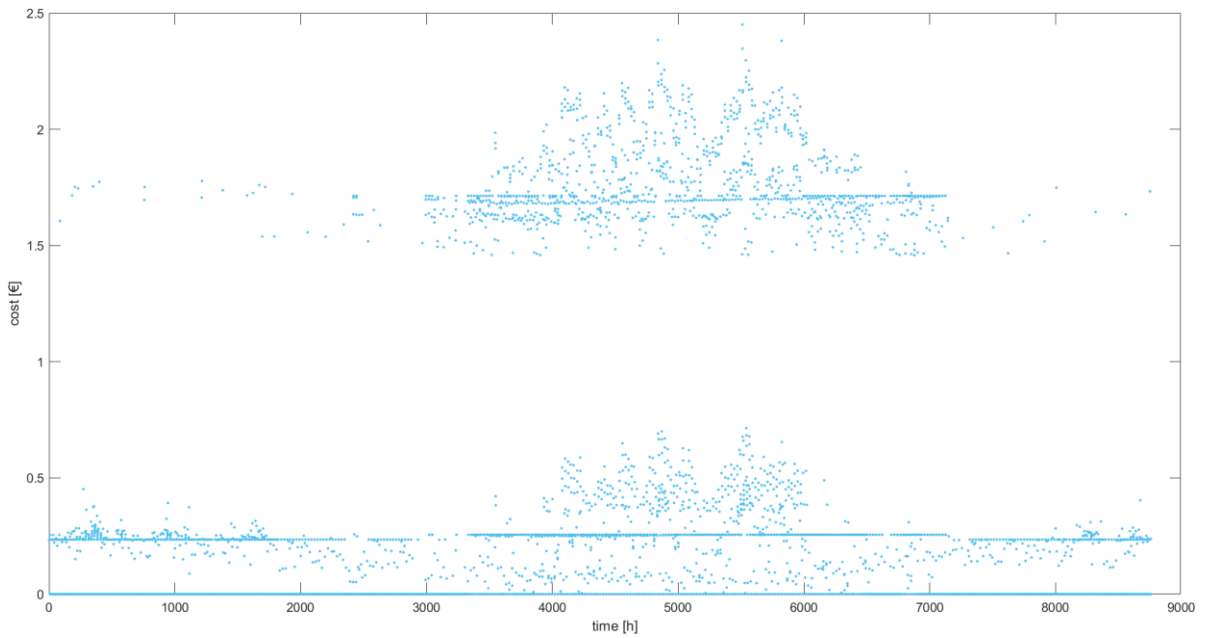
Η τιμή του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας, για το ζεύγος παραμέτρων που επιλέχθηκε είναι 0,0523 €/kWh. Βάσει αυτού του μεγέθους η επένδυση είναι απόλυτα αποδεκτή και σίγουρα μακροπρόθεσμα συμβάλλει σε εξοικονόμηση χρημάτων. Παρόλα αυτά δεν παύει να είναι μια ακριβή επένδυση, που απαιτεί υψηλό κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, απαιτούνται

περίπου 15,2 χιλιάδες ευρώ ως αρχικά έξοδα, η ανάλυση των οποίων παρουσιάζει ο Πίνακας 3-1.

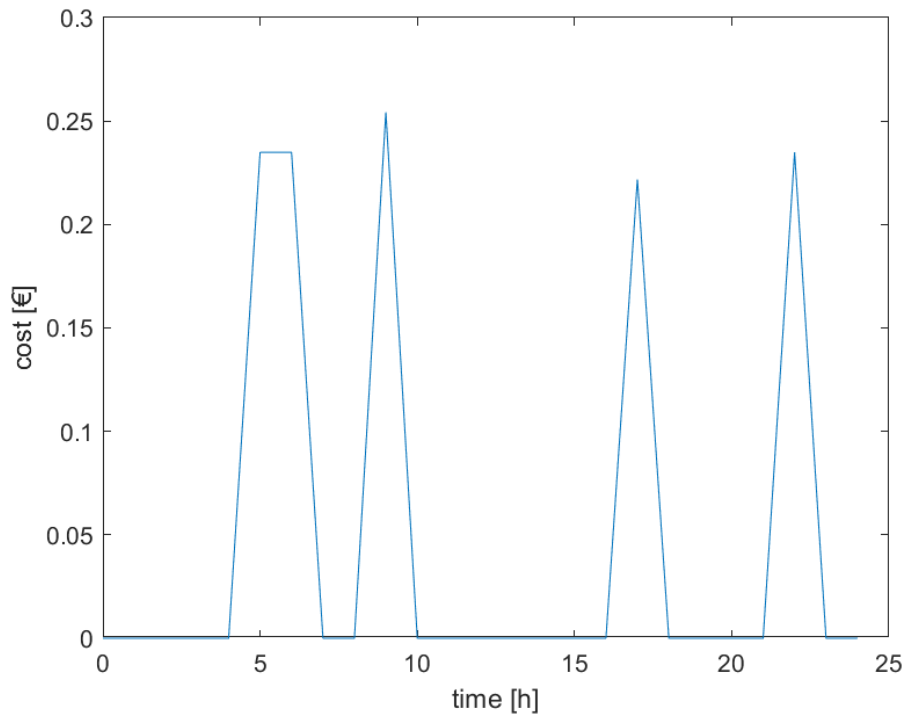
Πίνακας 3-1: Ανάλυση κόστους επένδυσης

Φ/Θ συλλέκτες	€5286,9
Inverter	€855
Σωληνώσεις	€175
Δεξαμενή	€1797
Ηλεκτρική αντίσταση	€50
Αντλία (Κυκλοφορητής)	€730
Συμπιεστής	€337,5
Εναλλάκτες	€1692
Διάφορα	€800
Κόστος εγκατάστασης	€3534,6
Συνολικό Κόστος	€15.258

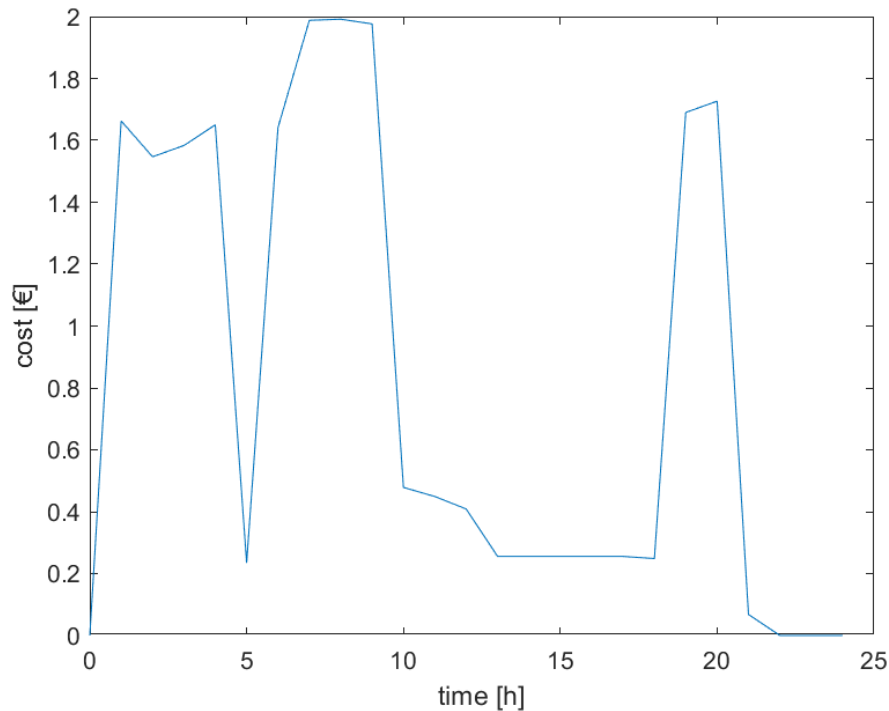
Το λειτουργικό κόστος ανά έτος είναι €3.053 και όταν πολλαπλασιαστεί επί 20 έτη δίνει το συνολικό λειτουργικό κόστος, το οποίο είναι €61.060. Το λειτουργικό κόστος παραμένει ίδιο κάθε έτος και αφού ο μόνος παράγοντας που μπορεί να το επηρεάσει αυτό είναι η αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο μέσω ενεργειακού συμψηφισμού, η μόνη εξήγηση είναι ότι την τελευταία ώρα του έτους αυτή είναι μηδενική, το οποίο πράγματι και συμβαίνει. Το λειτουργικό κόστος ανά έτος χωρίζεται στα έξοδα καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και στα έξοδα συντήρησης. Το δεύτερο μέγεθος ισούται σταθερά με το 1% του αρχικού κόστους επένδυσης, δηλαδή περίπου €153, ενώ το πρώτο ισούται κάθε έτος με €2.900. Έχει ενδιαφέρον, όμως, η πιο λεπτομερής ανάλυση των εξόδων για ηλεκτρικό ρεύμα. Στο Σχήμα 3-2 παρουσιάζεται το κόστος ηλεκτρικού ρεύματος ανά ώρα σε ένα ολόκληρο έτος, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τον ενεργειακό συμψηφισμό και την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Θ συλλεκτών. Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται η μεταβολή αυτού του κόστους στη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιανουαρίου και στο Σχήμα 3-4 στη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιουλίου.



Σχήμα 3-2: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα έτος



Σχήμα 3-3: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε μια τυπική μέρα Ιανουαρίου



Σχήμα 3-4: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε μια τυπική μέρα Ιουλίου

Και από τα τρία σχήματα προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα, το οποίο είναι ότι τον χειμώνα τα έξοδα για ηλεκτρική ενέργεια είναι λιγότερο από ότι το καλοκαίρι και αυτό έχει δύο εξηγήσεις. Η μία είναι ότι η χειμερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας, δηλαδή όταν παρέχει θέρμανση, κοστίζει λιγότερο, διότι ο συμπιεστής απαιτεί χαμηλότερη ηλεκτρική ισχύ. Η άλλη εξήγηση είναι ότι η αντλία θερμότητας παρέχει θέρμανση σε συνδυασμό με το ζεστό νερό που αποθηκεύεται στη δεξαμενή, το οποίο σε ημέρες υψηλής προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι δωρεάν.

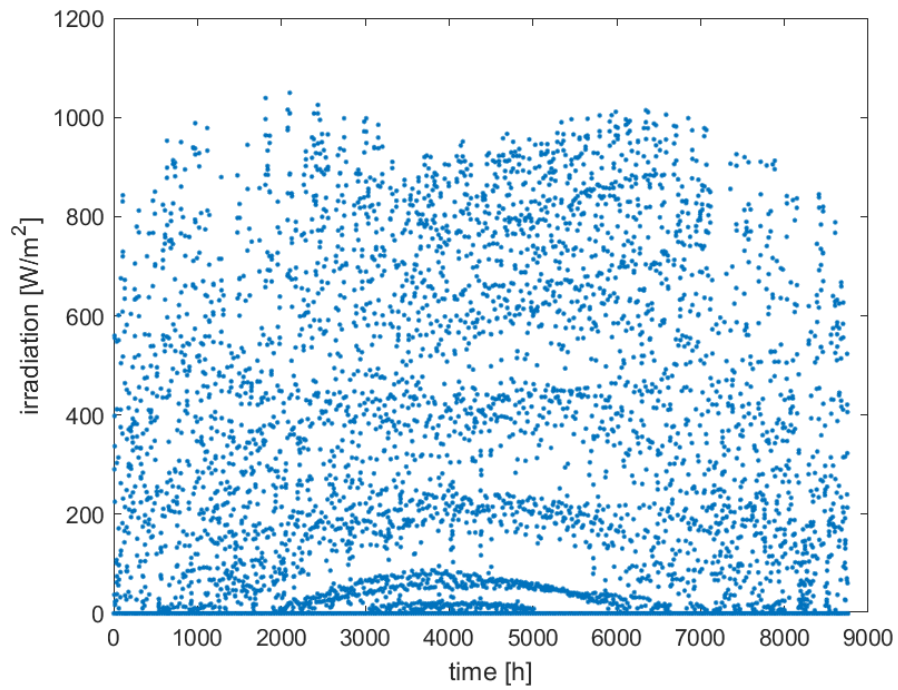
Επιπλέον, πρέπει να γίνει διερεύνηση ως προς το οικονομικό κέρδος που προσφέρει η ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Θ συλλεκτών. Στη διάρκεια ενός έτους, εάν το ρεύμα που καταναλώνεται πληρωνόταν εξ ολοκλήρου, τα έξοδα ηλεκτρικής ενέργειας για παροχή θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης θα ήταν €6.231, δηλαδή πάνω από τα διπλάσια από όσα εν τέλει πληρώνονται, τα 2.900 €/έτος. Με άλλα λόγια, με τη χρήση των Φ/Θ συλλεκτών πραγματοποιείται εξοικονόμηση κόστους ρεύματος για τους σκοπούς αυτούς κατά 53,5%.

3.3 Ενεργειακά αποτελέσματα

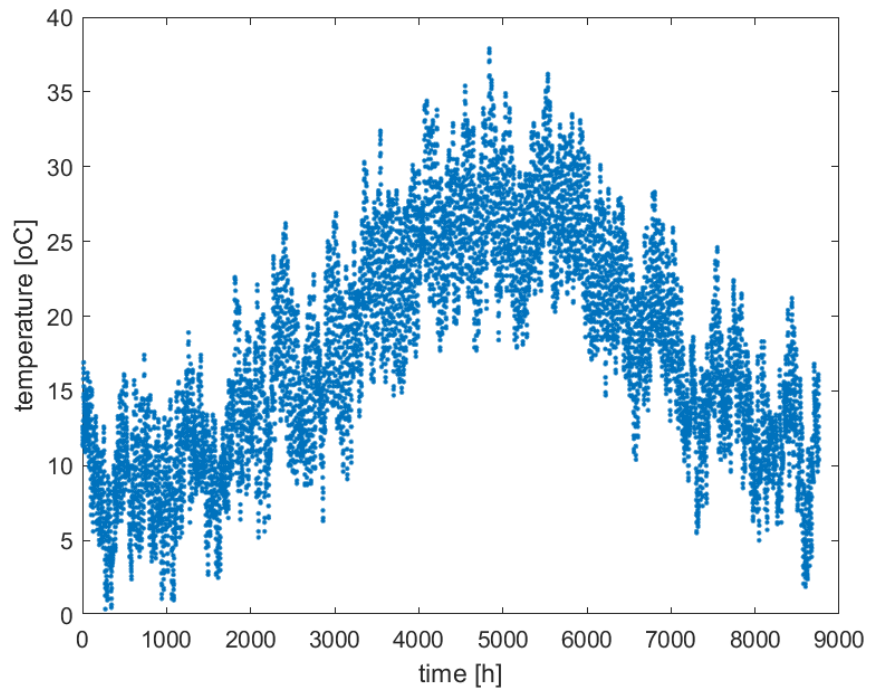
3.3.1 Φωτοβολταϊκοί-Θερμικοί Συλλέκτες

Στο Σχήμα 3-5 και στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζονται οι τιμές της προσπίπτουσας στο κεκλιμένο επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του έτους. Στο Σχήμα 3-7 παρατίθενται οι τιμές που λαμβάνει το νερό κατά την έξοδο από τους συλλέκτες κατά τη διάρκεια του έτους και στο Σχήμα 3-8 οι τιμές θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων στο ίδιο διάστημα. Το συμπέρασμα που δύναται να εξαχθεί από τη σύγκριση των τεσσάρων αυτών διαγραμμάτων είναι ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος επηρεάζει τη θερμοκρασία του νερού εξόδου από τους συλλέκτες και των ηλιακών κυττάρων. Από την άλλη, ενώ είναι γνωστό από την θεωρία ότι υψηλότερη ακτινοβολία συμβάλλει σε υψηλότερη θερμοκρασία νερού και κυττάρου, κάτι τέτοιο δεν γίνεται να συμπεραθεί με ασφάλεια από τα σχήματα αυτά. Για την ηλεκτροπαραγωγή στο Σχήμα 3-9, βέβαια, είναι εμφανής η εξάρτηση από την ακτινοβολία, αφού τα αποτελέσματα έχουν ακριβώς την ίδια μορφή.

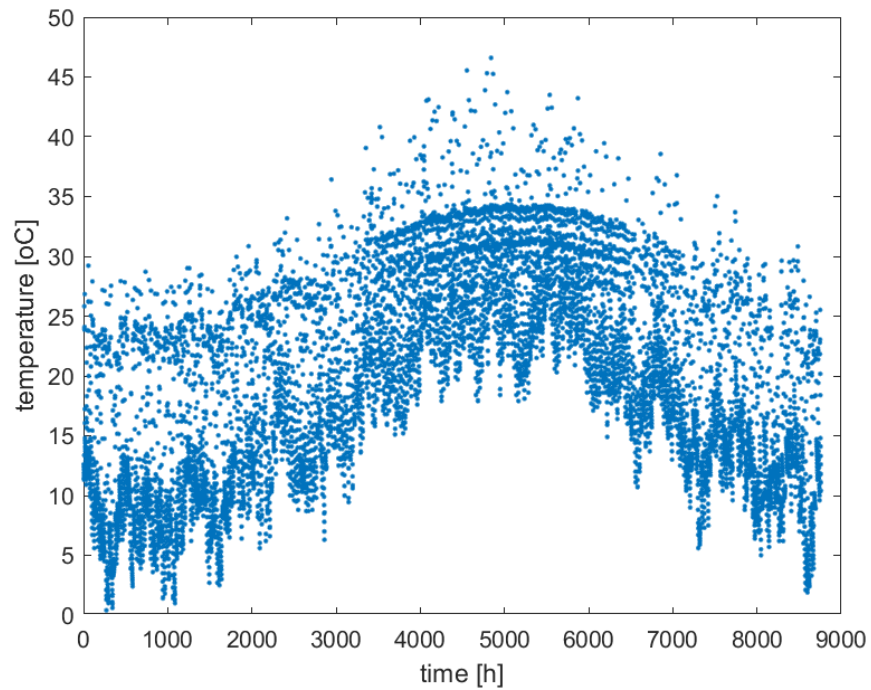
Αρκετό ενδιαφέρον προκαλεί η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας που λαμβάνουν τα ηλιακά κύτταρα. Όπως έχει προαναφερθεί, ένα ισχυρό πλεονέκτημα των Φ/Θ συλλεκτών είναι η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων, με αποτέλεσμα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης της ηλεκτροπαραγωγής. Η θερμοκρασία των κυττάρων ενός φωτοβολταϊκού συλλέκτη το καλοκαίρι μπορεί να φθάσει ακόμα και πάνω από 70 °C, με το διαδικτυακό εργαλείο υπολογισμού [34], για την υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος (38 °C), να δίνει εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας 50 έως 75 °C, ανάλογα με τον φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Στην περίπτωση, όμως, των συγκεκριμένων Φ/Θ συλλεκτών, η θερμοκρασία αυτή δεν ξεπερνά τους 45 °C, λόγω της ψύξης που προσφέρει η ροή του νερού.



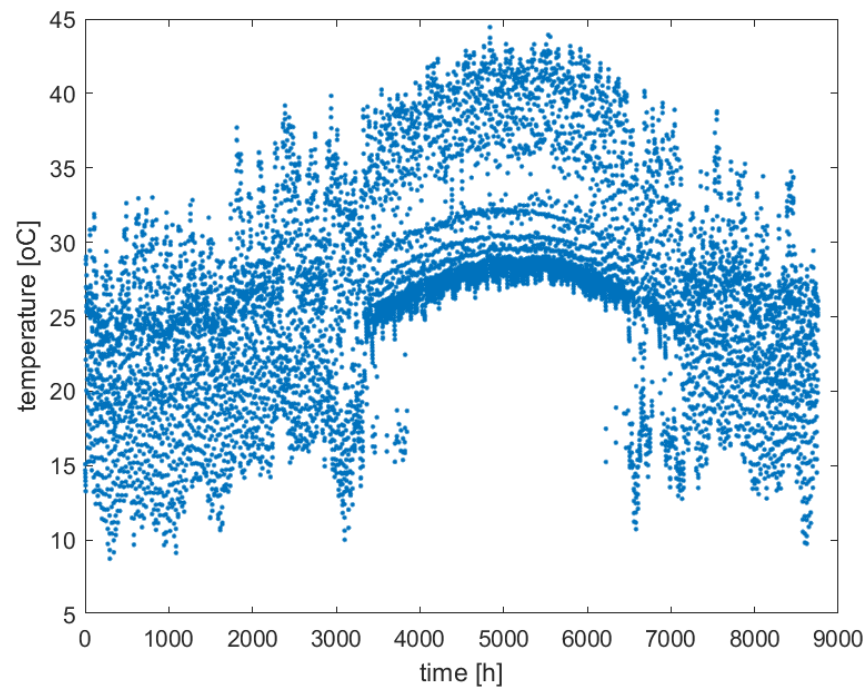
Σχήμα 3-5: Τιμές προσιπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους



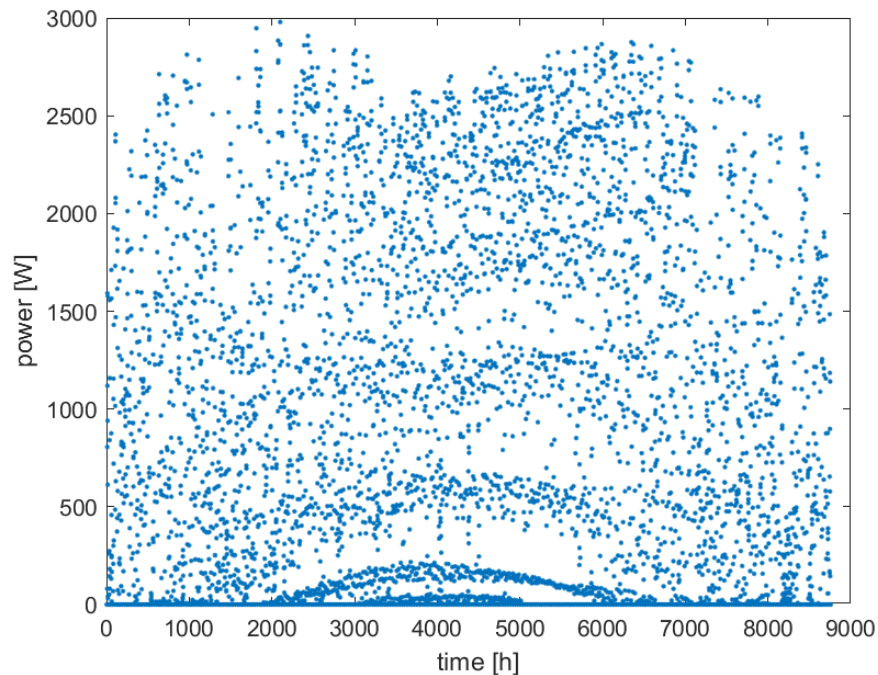
Σχήμα 3-6: Τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους



Σχήμα 3-7: Τιμές θερμοκρασίας νερού εξόδου συλλέκτη ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους

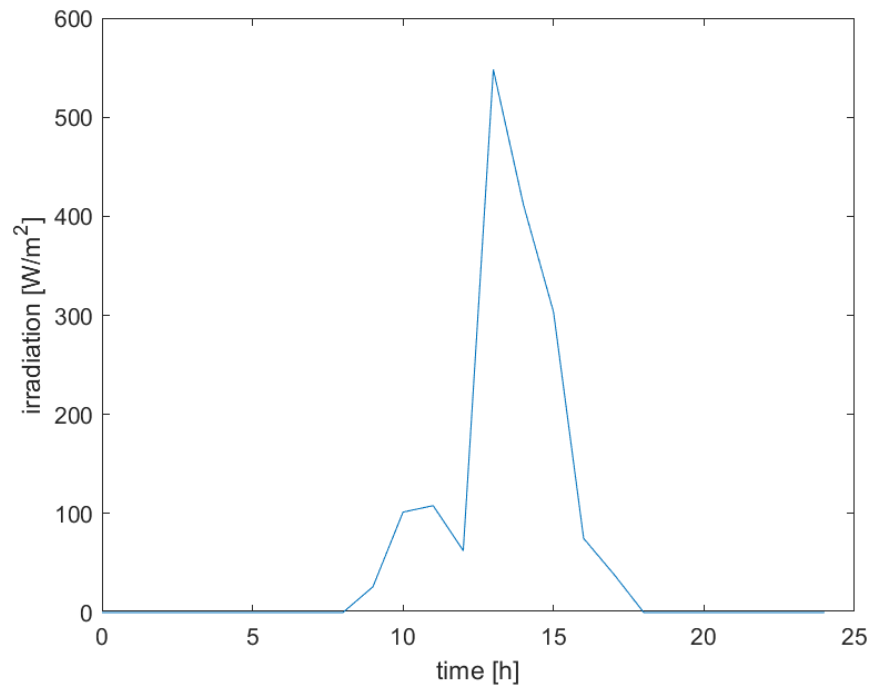


Σχήμα 3-8: Τιμές θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους

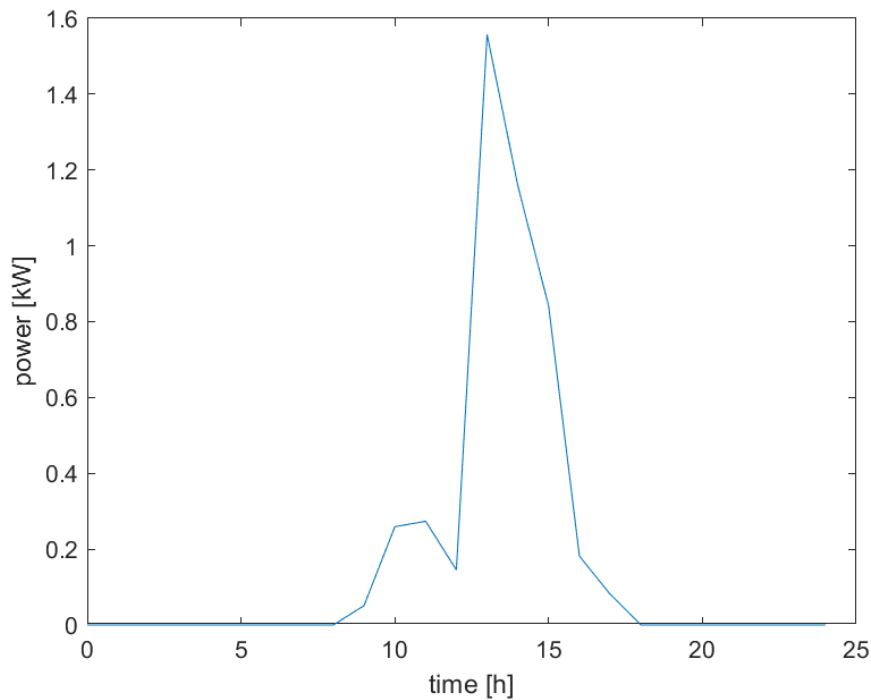


Σχήμα 3-9: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τους συλλέκτες ανά ώρα σε ένα έτος

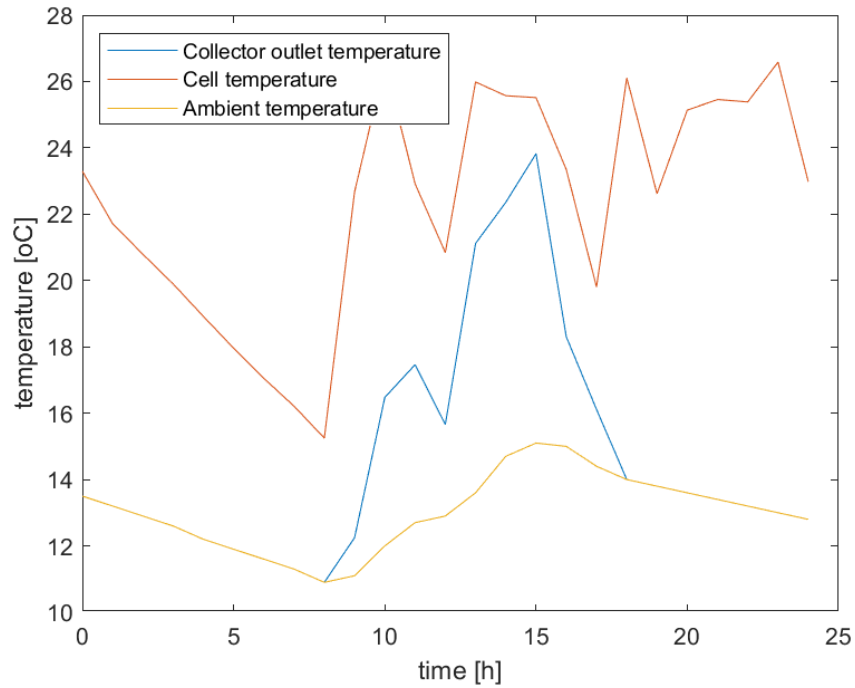
Αφού εξετάστηκαν τα συνολικά αποτελέσματα για ένα έτος, πρέπει να εξεταστούν και οι διακυμάνσεις εντός μίας ημέρας. Στο Σχήμα 3-10 και στο Σχήμα 3-13 φαίνεται η διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μια τυπική ημέρα του Ιανουαρίου και του Ιουλίου αντίστοιχα και οι καμπύλες αυτές έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες αυτές, όπως δείχνει το Σχήμα 3-11 και το Σχήμα 3-14. Στο Σχήμα 3-12 και στο Σχήμα 3-15 αποτυπώνονται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας νερού εξόδου από τον συλλέκτη, θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων και θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι θεωρητικά αναμενόμενες σχέσεις μεταξύ αυτών των μεγεθών είναι εμφανής. Η διακύμανση της ακτινοβολίας επηρεάζει τις θερμοκρασίες νερού και κυττάρου άμεσα. Από την άλλη, η θερμοκρασία περιβάλλοντος φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο τη θερμοκρασία του νερού, των οποίων οι μεταβολές είναι παρόμοιες. Φυσικά, τα επίπεδα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας είναι ανάλογα της εποχής.



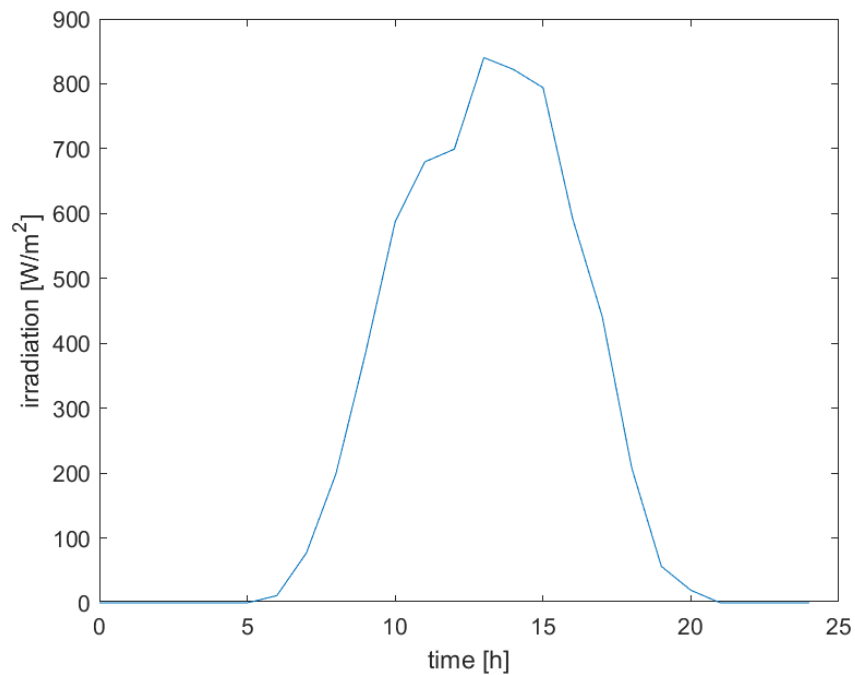
Σχήμα 3-10: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου



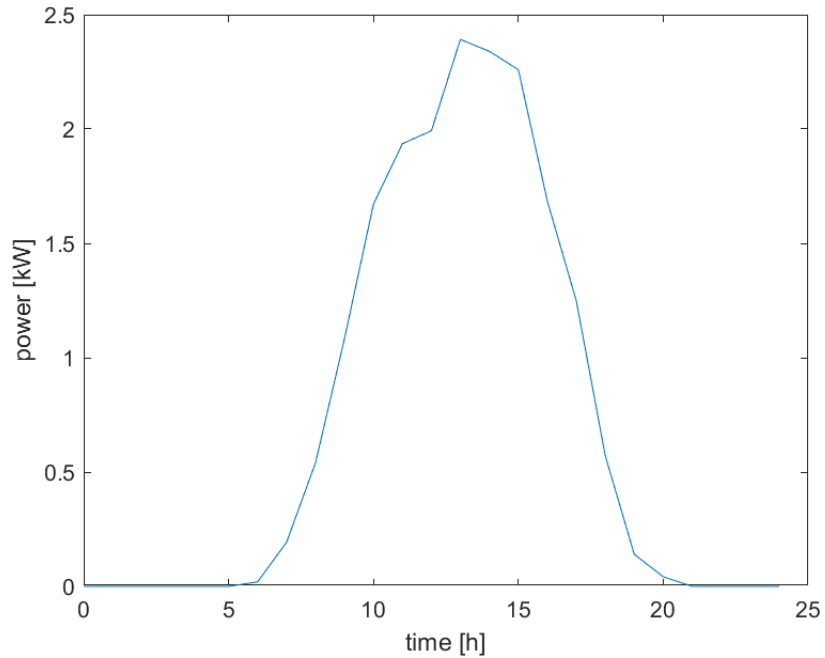
Σχήμα 3-11: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου



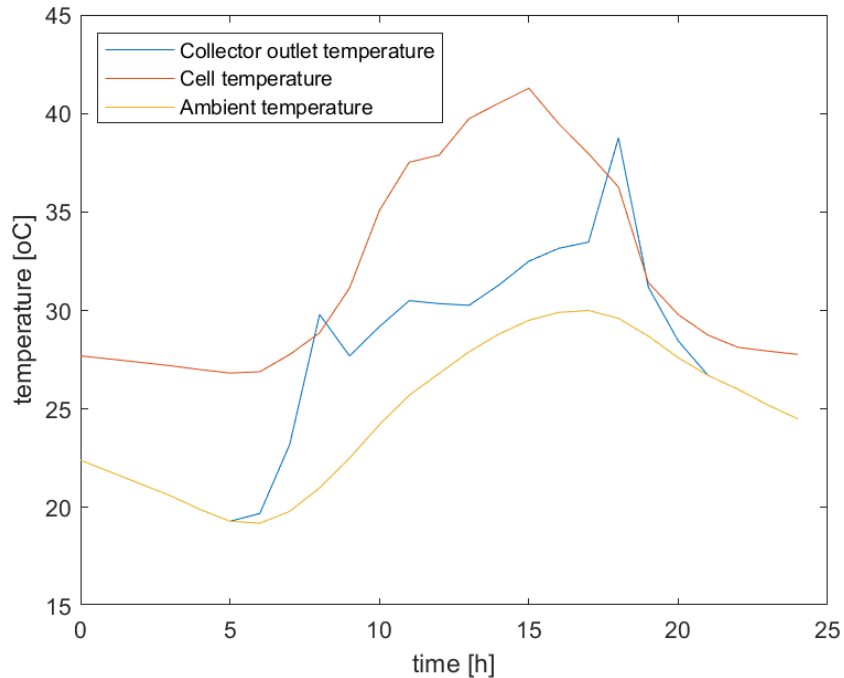
Σχήμα 3-12: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας νερού εξόδου από τον συλλέκτη, θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων και θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου



Σχήμα 3-13: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιουλίου

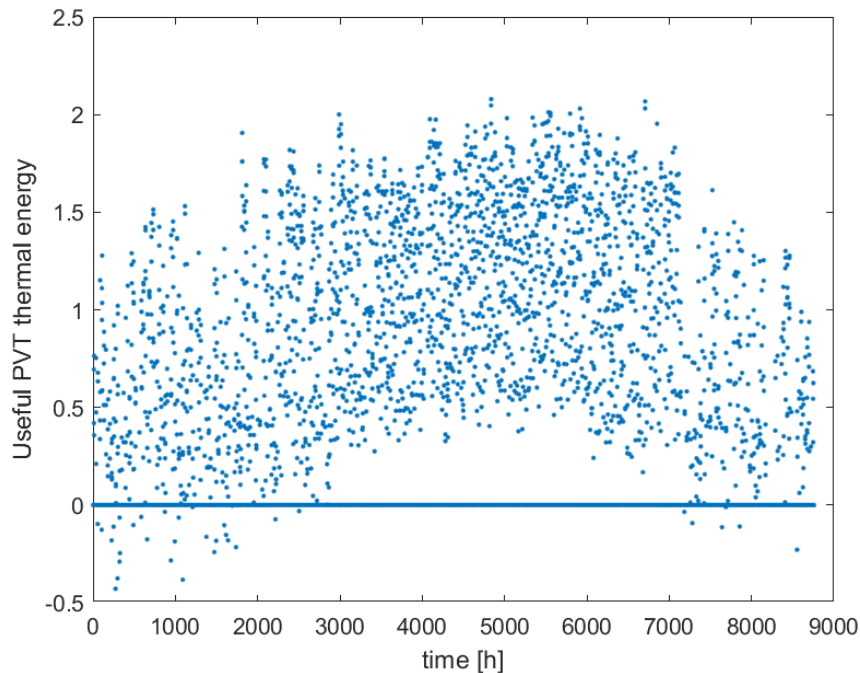


Σχήμα 3-14: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιουλίου



Σχήμα 3-15: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας νερού εξόδου από τον συλλέκτη, θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων και θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιουλίου

Στο Σχήμα 3-16 παρατίθεται η ωφέλιμη θερμική ενέργεια που παράγεται συνολικά από τους Φ/Θ συλλέκτες κατά τη διάρκεια του έτους. Είναι προφανές ότι το καλοκαίρι, λόγω των υψηλότερων τιμών θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας, το ποσό αυτό αυξάνεται. Από την άλλη, κάποιες μέρες του χειμώνα, η ωφέλιμη θερμική ενέργεια είναι αρνητική, καθώς λόγω χαμηλών επιπέδων θερμοκρασίας και ακτινοβολίας το νερό των συλλεκτών ψύχεται.



Σχήμα 3-16: Ωφέλιμη παραγόμενη θερμική ενέργεια από Φ/Θ συλλέκτες

Οι βαθμοί απόδοσης των συλλεκτών παρουσιάζονται στα Σχήματα 11 έως 12, για τυπικές ημέρες του Ιανουαρίου και του Ιουλίου. Ο τρόπος υπολογισμού για τον κάθε έναν έχει ως εξής [19]:

- Για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3.1):

$$\eta_{el} = 0.12 \cdot (1 - 0.0045(T_{cell} - 25^{\circ}C)) \quad (3.1)$$

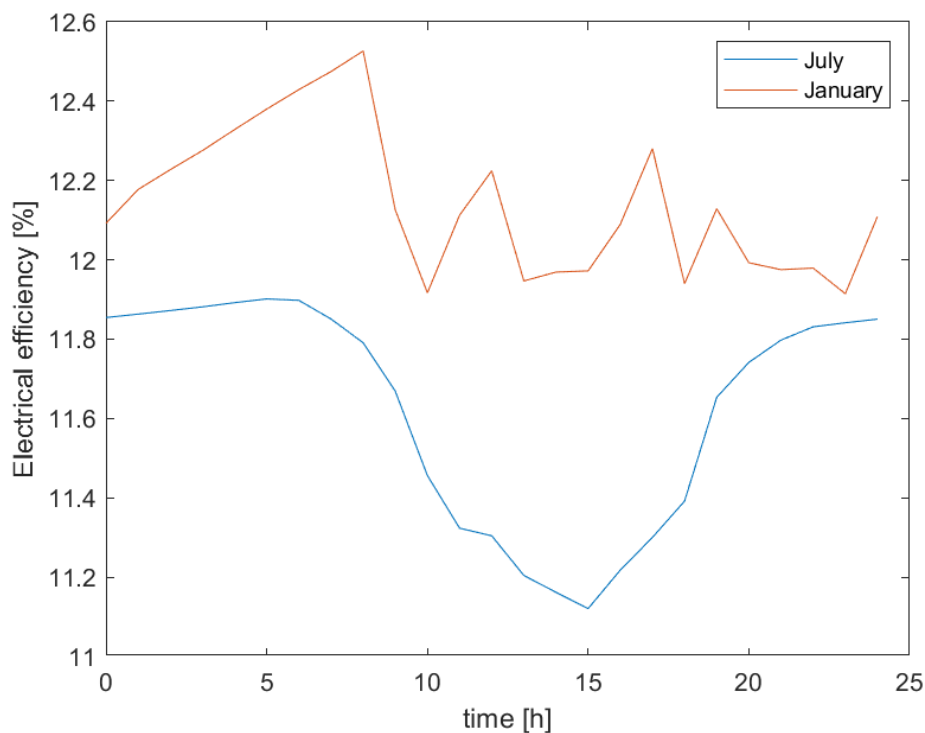
όπου T_{cell} η θερμοκρασία ηλιακού κυττάρου σε $^{\circ}C$.

- Για τον θερμικό βαθμό απόδοσης η εξίσωση (3.2):

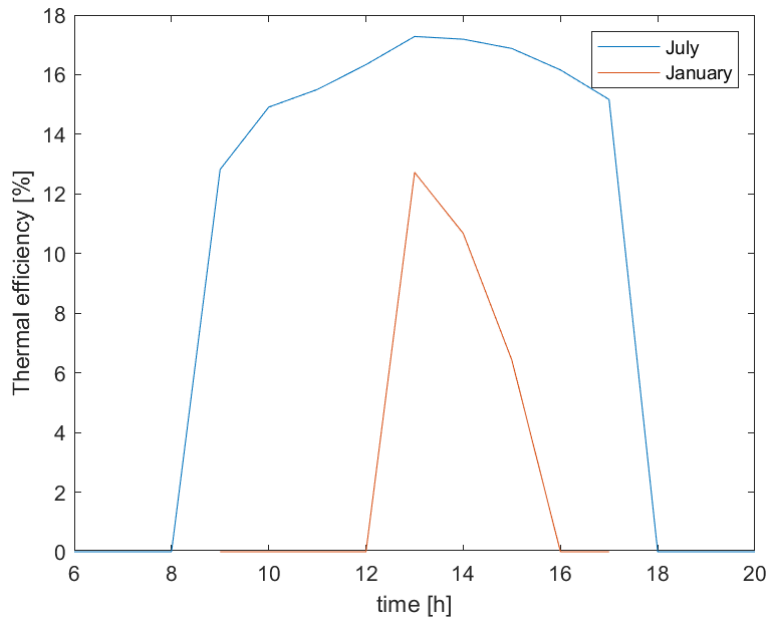
$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A \cdot G} \quad (3.2)$$

όπου A η επιφάνεια συλλέκτη [m^2], Q_u η ωφέλιμη θερμική ενέργεια [W] και G η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2].

Είναι γνωστό από τη θεωρία ότι οι υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μειώνουν τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης για τα φωτοβολταϊκά, κάτι το οποίο γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 3-17. Τον Ιανουάριο διατηρείται διαρκώς υψηλότερος ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Ακριβώς το αντίθετο ισχύει για τον θερμικό βαθμό απόδοσης (Σχήμα 3-18), ο οποίος τον Ιούλιο είναι αρκετά υψηλότερος, καθώς τα υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας τον ευνοούν. Εάν το νερό δεν έψυχε τα ηλιακά κύτταρα του φωτοβολταϊκού συλλέκτη, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη λογικά θα ήταν ακόμα χαμηλότερος.



Σχήμα 3-17: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Φ/Θ συλλέκτη κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιουλίου και του Ιανουαρίου.

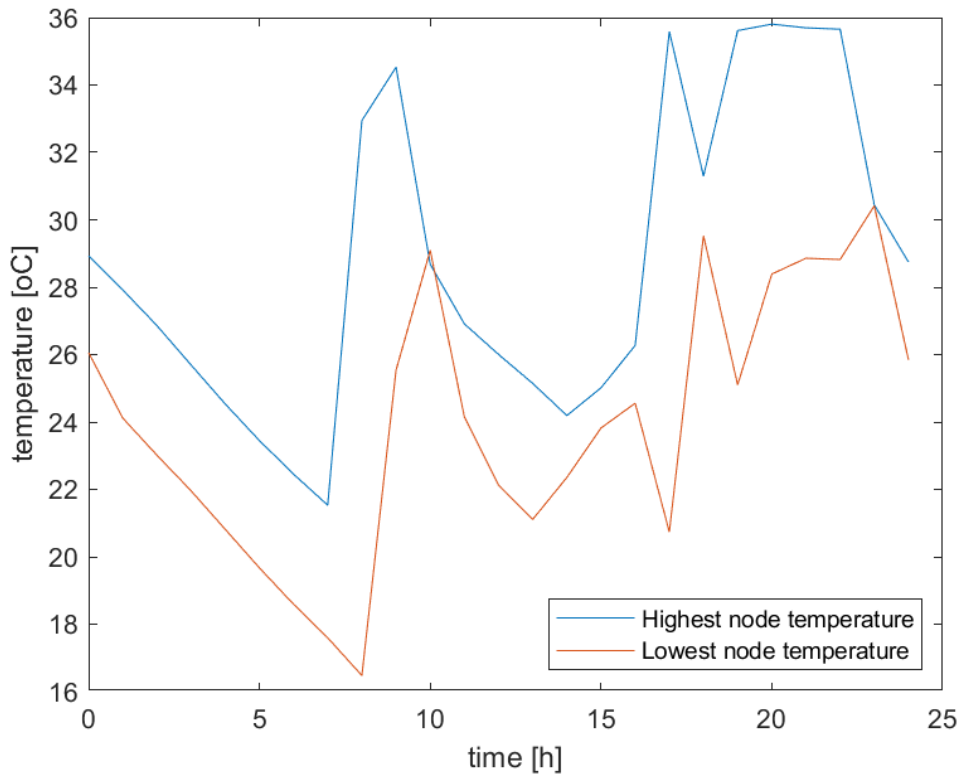


Σχήμα 3-18: Θερμικός βαθμός απόδοσης Φ/Θ συλλέκτη κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιουλίου και του Ιανουαρίου.

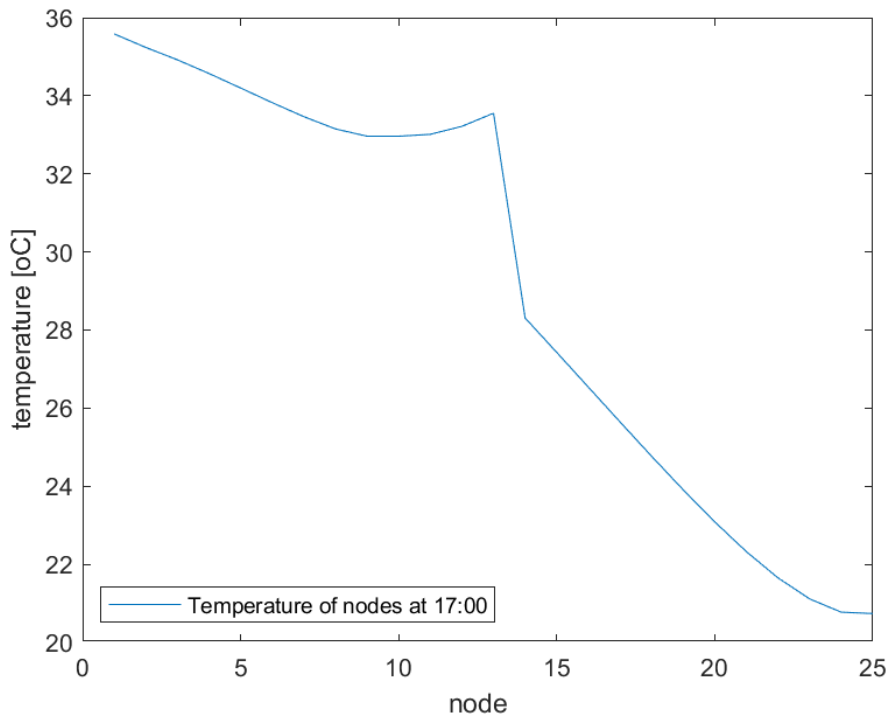
3.3.2 Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Στο Σχήμα 3-19 και στο Σχήμα 3-21 παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας του 1^{ου} και του 25^{ου} κόμβου, δηλαδή του ψηλότερου και του χαμηλότερου στη δεξαμενή, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου και του Ιουλίου αντίστοιχα. Το φαινόμενο της στρωματοποίησης είναι εμφανές, αφού η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του 1^{ου} και του 25^{ου} κόμβου είναι πάντα θετική ή σε λίγες περιπτώσεις κοντά στο μηδέν. Οι αυξήσεις στη θερμοκρασία μπορεί να προέρχονται είτε από το νερό του Φ/Θ συλλέκτη, είτε από την ηλεκτρική αντίσταση.

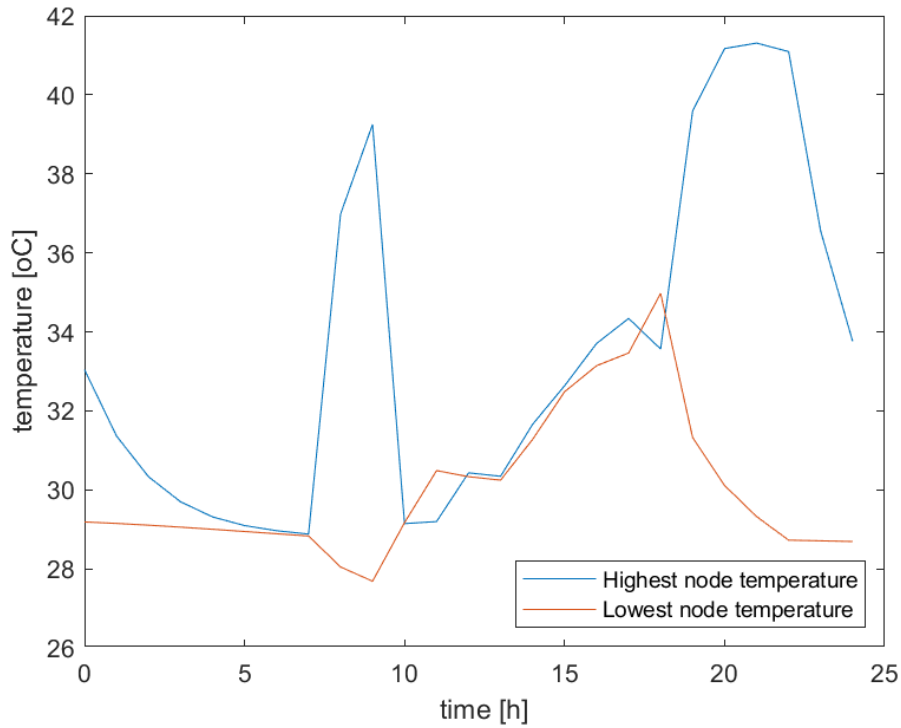
Στο Σχήμα 3-20 και στο Σχήμα 3-22 εμφανίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στους κόμβους της δεξαμενής για τις ίδιες ημέρες. Το φαινόμενο της στρωματοποίησης εδώ είναι ξεκάθαρα εμφανές, με τη μικρή ανωμαλία στους μεσαίους κόμβους να προέρχεται πιθανώς από την ενεργοποίηση της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία θερμαίνει τον κεντρικό κόμβο. Να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες ώρες επιλέχθηκαν διότι παρουσίαζαν μεγάλη διαφορά μεταξύ πρώτου και τελευταίου κόμβου, όπως συμπεραίνεται από το Σχήμα 3-19 και το Σχήμα 3-21.



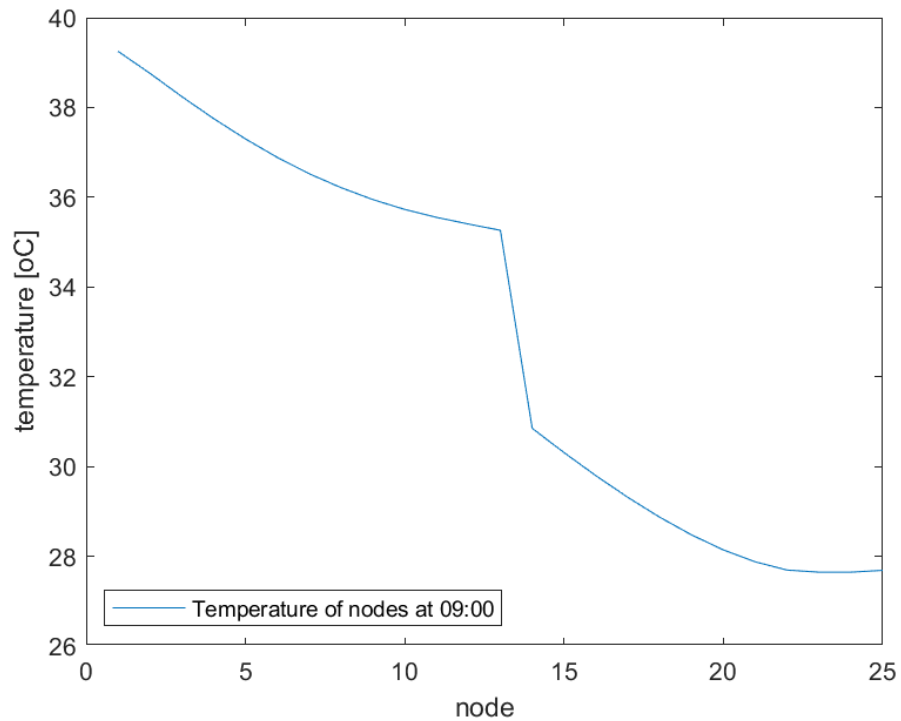
Σχήμα 3-19: Θερμοκρασία 1^{ου} και 25^{ου} κόμβου σε μια τυπική μέρα του Ιανουαρίου



Σχήμα 3-20: Θερμοκρασία κόμβων στις 5 μ.μ. σε μια τυπική μέρα Ιανουαρίου



Σχήμα 3-21: Θερμοκρασία 1^{ου} και 25^{ου} κόμβου σε μια τυπική μέρα του Ιουλίου

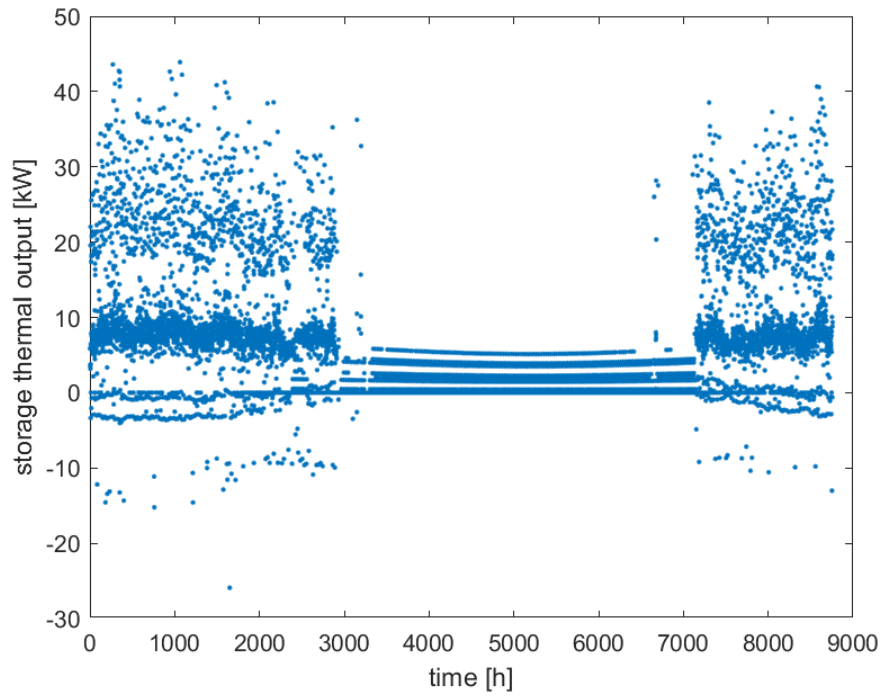


Σχήμα 3-22: Θερμοκρασία κόμβων στις 9 π.μ. σε μια τυπική μέρα Ιουλίου

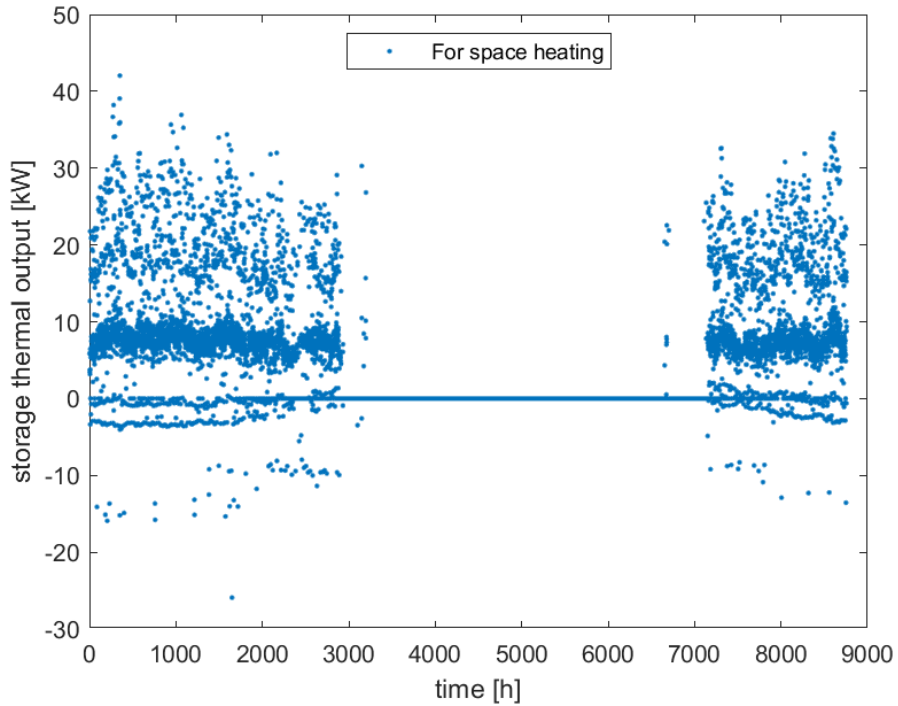
Στο Σχήμα 3-23 αποτυπώνεται η συνολική θερμική ισχύς που παρήγαγε το ζεστό νερό της δεξαμενής αποθήκευσης για σκοπούς παροχής θέρμανσης χώρου και ζεστού νερού χρήσης. Στο Σχήμα 3-24 φαίνεται πόση από αυτήν τη θερμική ισχύ αφιερώθηκε σε θέρμανση χώρου, στο Σχήμα 3-25 πόση από αυτή αφιερώθηκε για θέρμανση του νερού χρήσης, ενώ το Σχήμα 3-26 αφορά στο θερμικό φορτίο ζεστού νερού χρήσης.

Μελετώντας τα σχήματα αυτά, είναι εμφανές καταρχάς ότι τα υψηλά ποσά παραγόμενης θερμικής ενέργειας δεν αναλώνονται στο ζεστό νερό χρήσης, αλλά στη θέρμανση χώρου, λόγω της θερμοστατικής βαλβίδας. Το καλοκαίρι, φυσικά, δεν υπάρχει ζήτηση θερμικού φορτίου από την κατοικία και η ισχύς που παράγεται θερμαίνει μόνο το νερό χρήσης. Το φορτίο ζεστού νερού χρήσης καλύπτεται σε πλήρη βαθμό ως επί το πλείστον, με μερικά κενά να προκύπτουν, ίσως λόγω σφάλματος προσομοίωσης. Τέλος, ενδιαφέρον έχει ότι η παραγόμενη θερμική ισχύς φθάνει κάποιες φορές αρνητικές τιμές, το οποίο είναι λογικό να συμβεί, εάν το νερό του συλλέκτη ψύχει το νερό της δεξαμενής αντί να το θερμαίνει. Για την αποφυγή του γεγονότος αυτού τέθηκε το κατώτατο όριο ακτινοβολίας για ενεργοποίηση της λειτουργίας των Φ/Θ συλλεκτών, αλλά προφανώς η συνθήκη αυτή δεν ήταν ικανή να αποτρέψει την ψύξη του νερού σε όλες τις περιπτώσεις.

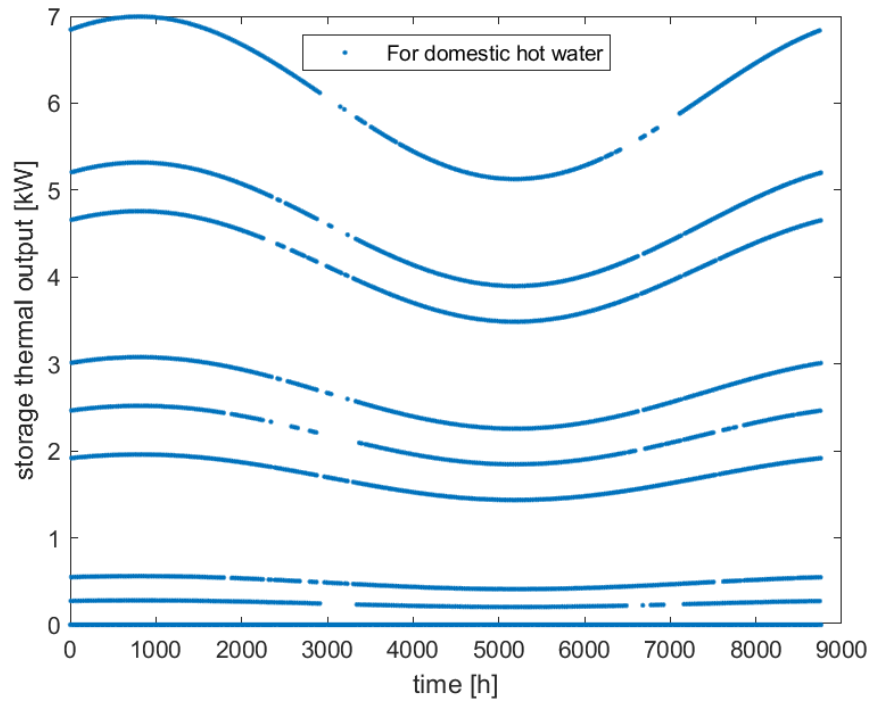
Από το συνολική θερμική ενέργεια που προέρχεται από το σύστημα αποθήκευσης, η οποία ισούται με 52,468 MWh, το 15,43% ή οι 8,096 MWh αναλώνονται στη θέρμανση του νερού χρήσης.



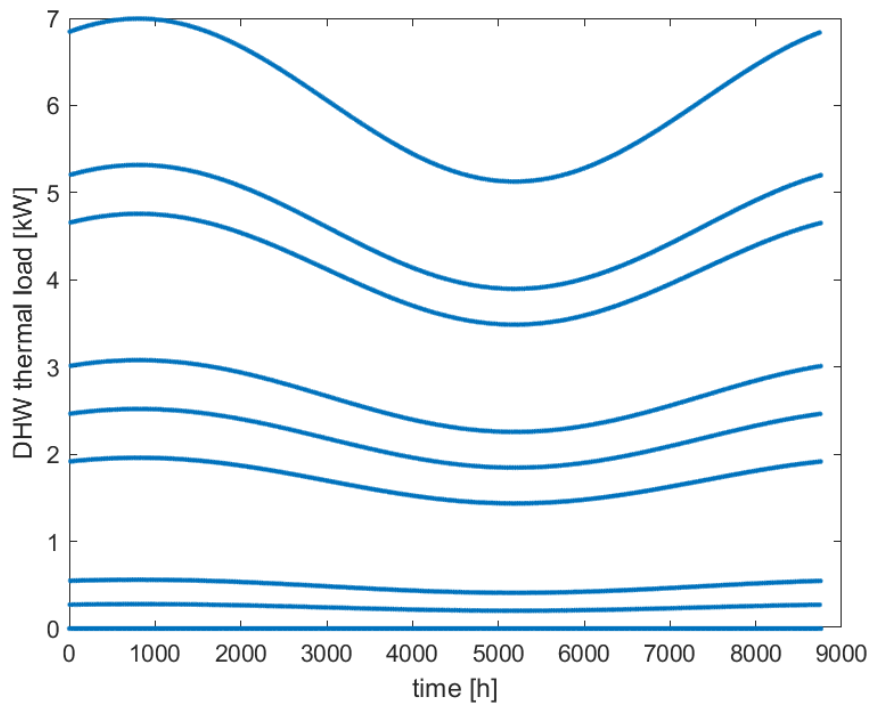
Σχήμα 3-23: Συνολική παραγόμενη θερμική ισχύς από τη δεξαμενή αποθήκευσης στη διάρκεια ενός έτους



Σχήμα 3-24: Παραγόμενη θερμική ισχύς από τη δεξαμενή αποθήκευσης προοριζόμενη για θέρμανση χώρου στη διάρκεια ενός έτους



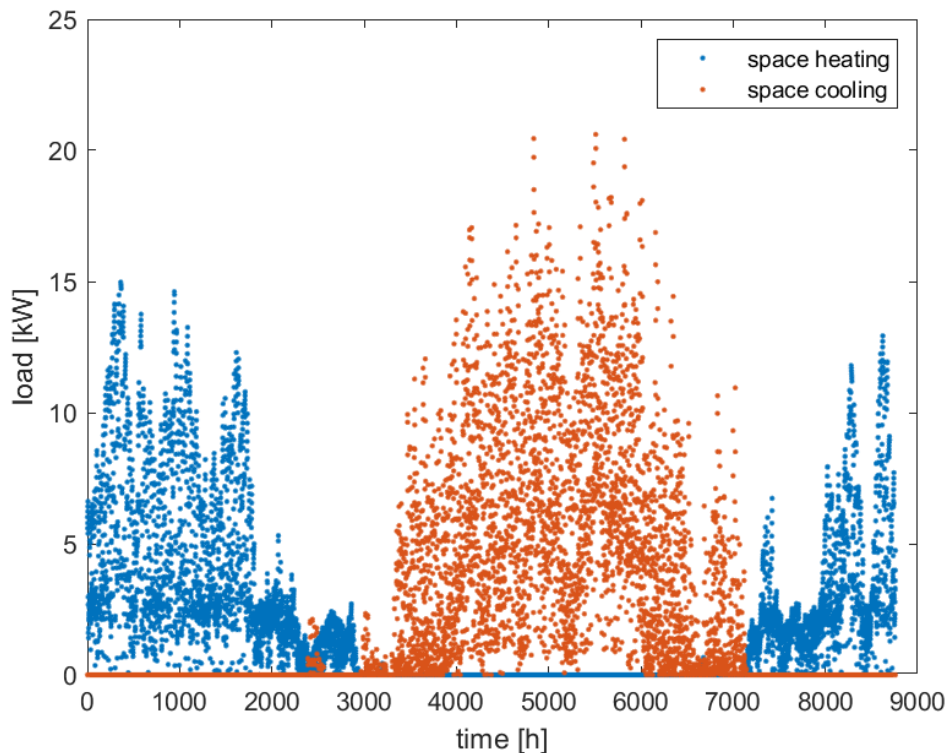
Σχήμα 3-25: Παραγόμενη θερμική ισχύς από τη δεξαμενή αποθήκευσης προοριζόμενη για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης στη διάρκεια ενός έτους



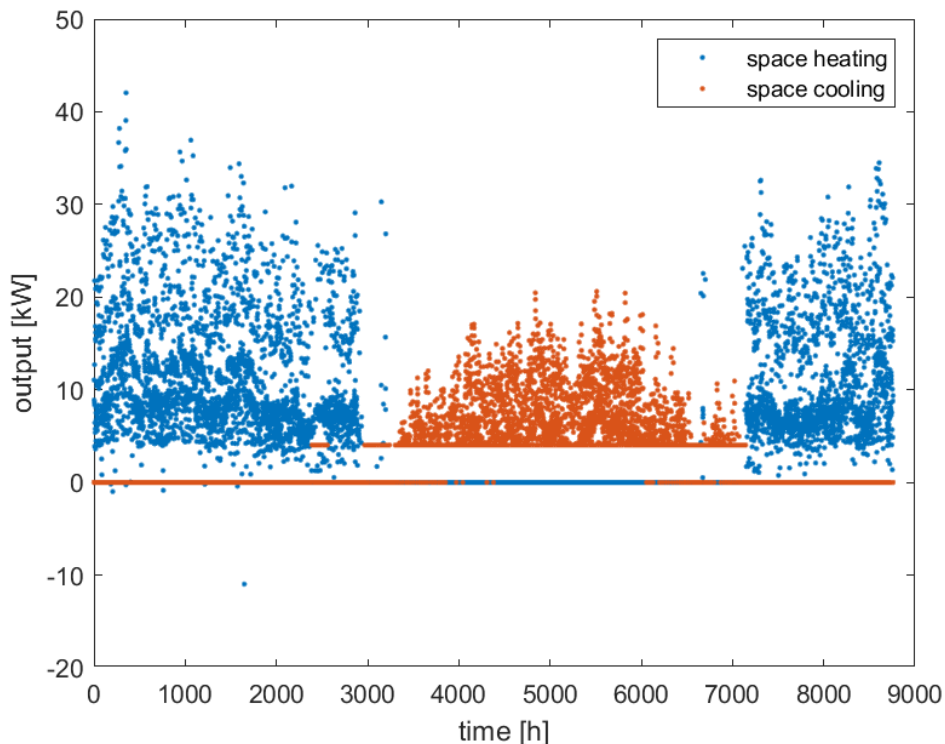
Σχήμα 3-26: Θερμικό φορτίο ζεστού νερού χρήσης

3.3.3 Αντλία θερμότητας

Στο Σχήμα 3-27 παρατίθενται τα φορτία θέρμανσης και ψύξης χώρου, με μπλε και πορτοκαλί χρώμα αντίστοιχα, ενώ στο Σχήμα 3-28 παρατίθεται η θερμική και η ψυκτική ισχύς που παρέχονται για την κάλυψη των φορτίων αυτών. Για την ψύξη, το φορτίο και η ισχύς εξόδου της αντλίας θερμότητας κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Ως προς τη θέρμανση, η ισχύς που παρέχεται φαίνεται να ξεπερνά κατά πολύ το φορτίο, γεγονός που εξηγείται από τη συμμετοχή του ζεστού νερού της δεξαμενής αποθήκευσης στην κάλυψή του. Επιπλέον, το καλοκαίρι, που το φορτίο καλύπτεται μόνο από την αντλία θερμότητας, είναι εμφανές ότι αυτή λειτουργεί με ελάχιστο όριο τα 4 kW.



Σχήμα 3-27: Φορτίο θέρμανσης και ψύξης χώρου

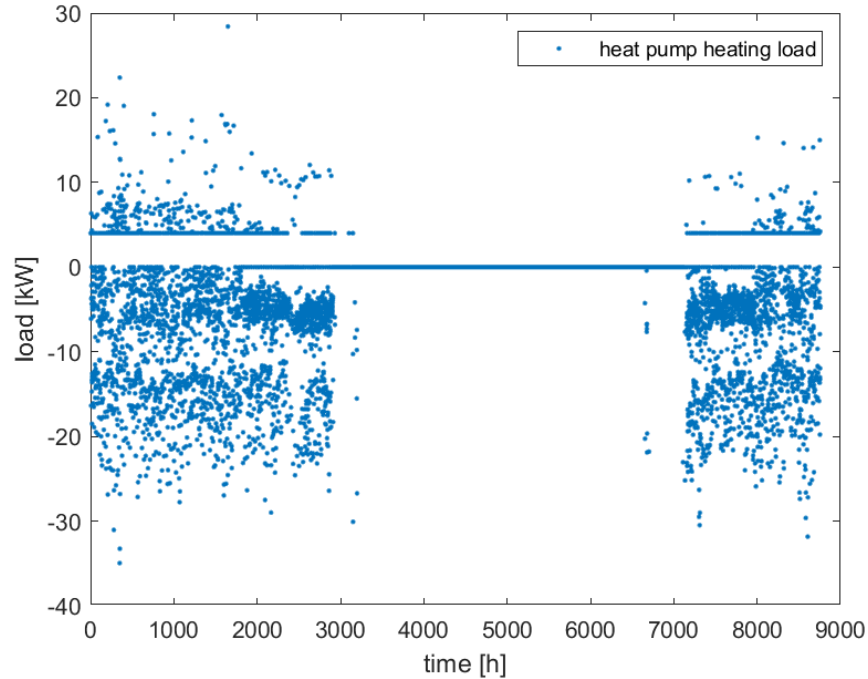


Σχήμα 3-28: Θερμική και ψυκτική ισχύς που παρέχεται για την κάλυψη των φορτίων

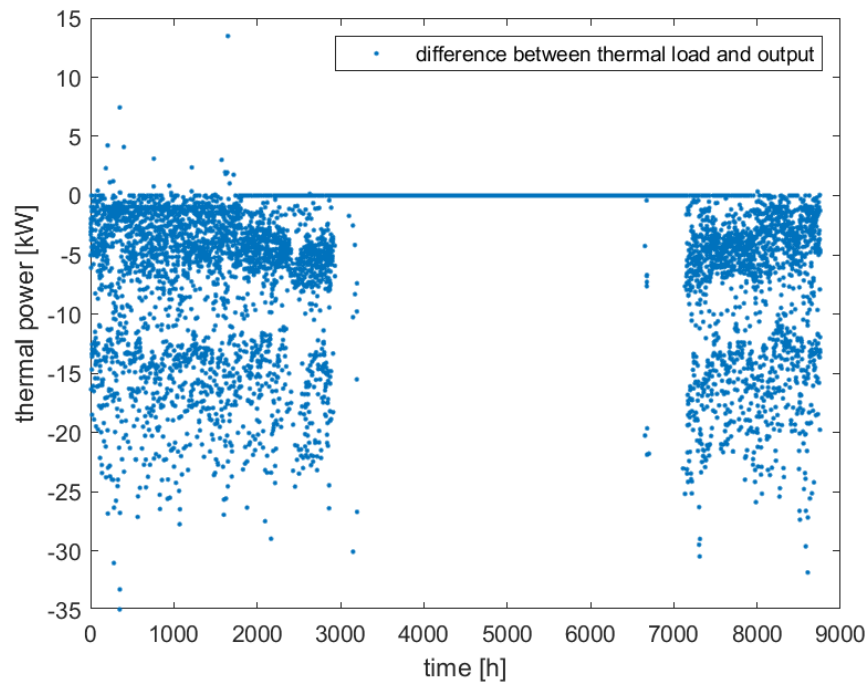
Η θερμική ισχύς που παρέχεται, ως γνωστόν, προέρχεται από δύο πηγές, τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και την αντλία θερμότητας. Συνεπώς, αφού παρουσιάστηκε η θερμική ισχύς που παρέχεται από τη δεξαμενή, πρέπει να αναλυθεί και η θερμική ισχύς που παρέχεται από την αντλία θερμότητας. Στο Σχήμα 3-29, αποτυπώνεται το θερμικό φορτίο εισόδου στην αντλία θερμότητας. Όπου είναι αρνητικό ή μηδενικό, προφανώς η αντλία θερμότητας δεν λειτουργεί, ενώ όπου είναι θετικό, ενεργοποιείται η αντλία θερμότητας για παροχή της επιπλέον απαραίτητης θερμικής ισχύος. Ο λόγος που φαίνονται και οι αρνητικές τιμές στο διάγραμμα, είναι για να είναι ξεκάθαρο η ποσότητα των ωρών μέσα στο έτος που η αντλία θερμότητας δεν λειτουργεί για παροχή θέρμανσης. Τέλος, είναι εμφανές και πάλι το κατώτατο όριο των 4 kW για την αντλία θερμότητας.

Σε ό,τι αναφορά στα συνολικά ποσά των ισχύων αυτών, η συνολική θερμική ενέργεια που παρέχεται σε ένα έτος ισούται με 49,87 MWh. Από το συνολικό αυτό ποσό, το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας παρέχει το 88,97%, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό καλύπτεται από την αντλία θερμότητας. Στο Σχήμα 3-30 και Σχήμα 3-31 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ φορτίου και ισχύος που παρέχεται για θέρμανση και ψύξη χώρου αντίστοιχα. Το ψυκτικό φορτίο καλύπτεται εξ ολοκλήρου από την αντλία θερμότητας, με τη μέγιστη διαφορά να είναι μικρότερη από 4 kW, δηλαδή το αναγκαστικό κατώτατο όριο. Από την άλλη, στη θέρμανση υπάρχουν πολύ μεγαλύτερες διαφορές λόγω των υψηλών

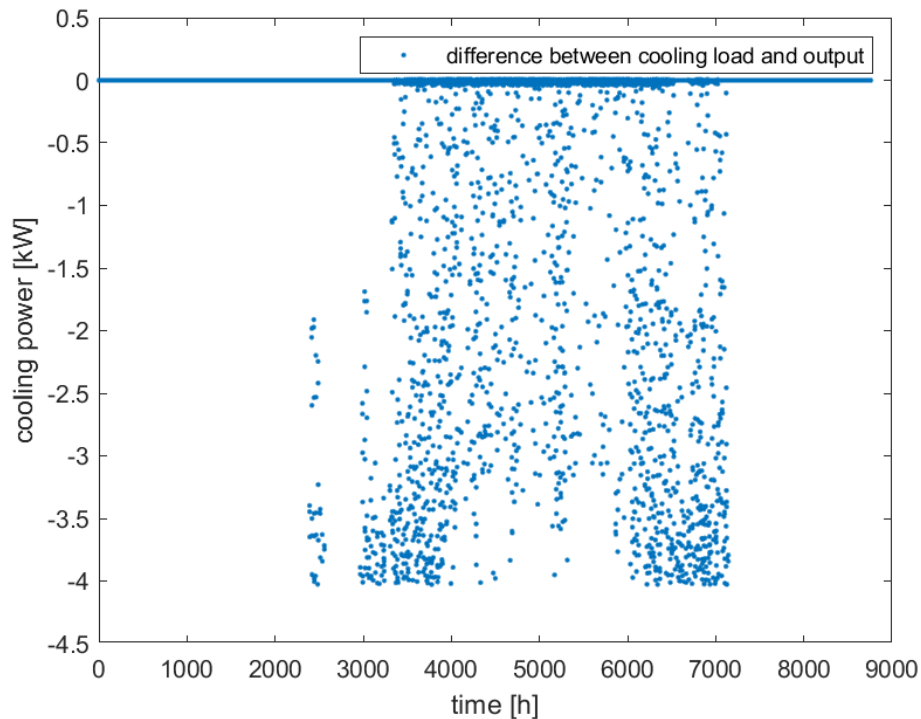
παραγόμενων ποσών από το ζεστό νερό της δεξαμενής. Επιπλέον, υπάρχουν και ελάχιστες θετικές διαφορές, δηλαδή φορτία που δεν καλύφθηκαν, ίσως από σφάλματα προσομοίωσης.



Σχήμα 3-29: Θερμικό φορτίο εισόδου αντλίας θερμότητας

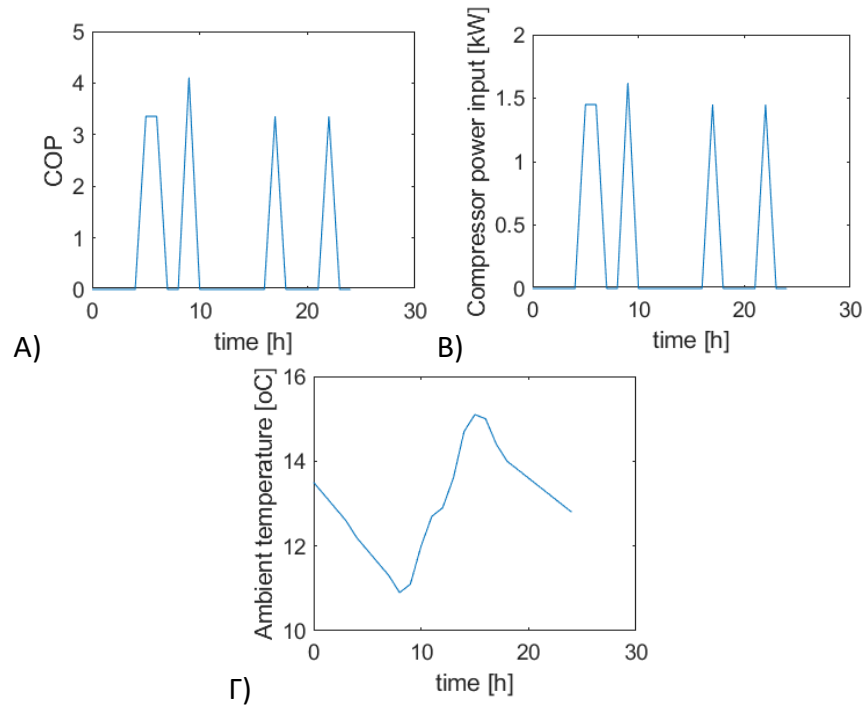


Σχήμα 3-30: Διαφορά θερμικού φορτίου και παρεχόμενης ισχύος

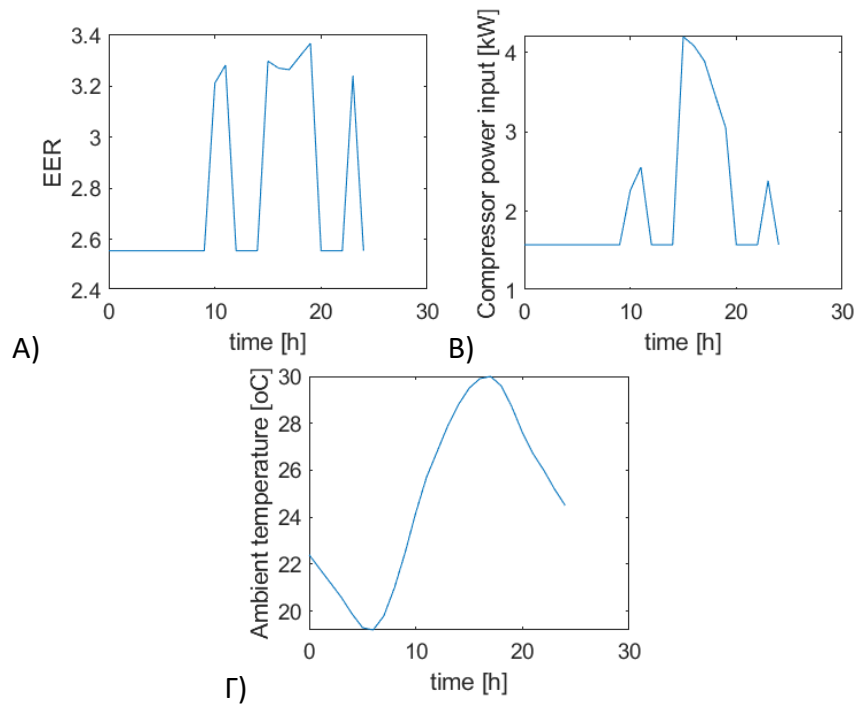


Σχήμα 3-31: Διαφορά ψυκτικού φορτίου και παρεχόμενης ισχύος

Όταν η αντλία θερμότητας λειτουργεί τον χειμώνα για θέρμανση, ο συντελεστής συμπεριφοράς COP (Coefficient of Performance) κινείται από 3,354 έως 5,414. Κατά το καλοκαίρι, με τη λειτουργία ψύξης, ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης EER (Energy Efficiency Ratio) κυμαίνεται από 2,554 έως 3,4172. Στο Σχήμα 3-32 παρουσιάζονται οι τιμές του COP κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου, μαζί με την ηλεκτρική κατανάλωση ισχύος του συμπιεστή και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού ξεκάθαρα είναι ανάλογη με τον συντελεστή απόδοσης, ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα. Από την άλλη, για μια τυπική μέρα του Ιουλίου (Σχήμα 3-33), ενώ και πάλι η ηλεκτρική κατανάλωση επηρεάζει άμεσα, φαίνεται η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος να μην επιτρέπει στον EER να φθάσει στα αναμενόμενα επίπεδα.



Σχήμα 3-32: Α) Συντελεστής απόδοσης, Β) ηλεκτρική ισχύς εισόδου αντλίας θερμότητας και Γ) θερμοκρασία περιβάλλοντος, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας Ιανουαρίου



Σχήμα 3-33: Α) Συντελεστής απόδοσης, Β) ηλεκτρική ισχύς εισόδου αντλίας θερμότητας και Γ) θερμοκρασία περιβάλλοντος, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας Ιουλίου

3.3.4 Συνολικός απολογισμός

Σε αυτό το σημείο, ολόκληρο το σύστημα θα αντιμετωπιστεί ως ένα σύνολο και θα αξιολογηθούν συνολικά τα αποτελέσματά του. Η διάταξη, λοιπόν, παρήγαγε συνολικά 80,52 MWh θερμικής και ψυκτικής ενέργειας ανά έτος, εκ των οποίων:

- 49,87 MWh παράχθηκαν για θέρμανση χώρου των κατοικιών, με ζητούμενο φορτίο 15,445 MWh, από το οποίο ποσό ενέργειας, οι 5,498 MWh παράχθηκαν από την αντλία θερμότητας
- 22,554 MWh παράχθηκαν για ψύξη χώρου των κατοικιών από την αντλία θερμότητας, με ζητούμενο φορτίο 18,891 MWh
- 8,096 MWh παράχθηκαν για θέρμανση νερού χρήσης, με ζητούμενο φορτίο 8,848 MWh

Για τις ηλεκτρικές ανάγκες λειτουργίας της αντλίας θερμότητας καταναλώθηκαν συνολικά 8,662 MWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος, από την οποία οι 4,876 MWh καλύφθηκαν από την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος των Φ/Θ συλλεκτών. Από το ποσό ενέργειας αυτό, οι 1,636 MWh αποθηκεύτηκαν στο ηλεκτρικό δίκτυο για μεταγενέστερη χρήση, μέσω ενεργειακού συμψηφισμού. Με άλλα λόγια, μέσω του ενεργειακού συμψηφισμού καταναλώθηκε το 33,55% της ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο διαφορετικά θα παρέμενε ανεκμετάλλευτο.

4. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

4.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα σύστημα τριπαραγωγής με φωτοβολταϊκούς-θερμικούς συλλέκτες και αντιστρέψιμη αντλία θερμότητας, με εφαρμογή σε κτίριο κατοικιών. Αφού μοντελοποιήθηκε κάθε μέρος του συστήματος ξεχωριστά, αναπτύχθηκε μια κεντρική μεθοδολογία για την προσομοίωση λειτουργίας του. Με τη χρήση πραγματικών δεδομένων και την αξιολόγηση αποτελεσμάτων σε βάθος 20 ετών, βελτιστοποιήθηκαν συγκεκριμένοι παράμετροι του συστήματος βάσει οικονομοτεχνικών κριτηρίων. Τέλος, εξετάστηκε το βελτιστοποιημένο σύστημα ως προς τα οικονομικά και ενεργειακά του αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν μοντέλα για τους συλλέκτες, το σύστημα θερμικής αποθήκευσης και την αντλία θερμότητας και υλοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Οι συλλέκτες με το σύστημα αποθήκευσης και τις σωληνώσεις ζεστού νερού χρήσης αποφασίστηκε να λειτουργούν ανεξάρτητα από την αντλία θερμότητας, έχοντας τη δυνατότητα, βέβαια, να συμβάλλουν ταυτόχρονα στην παροχή θέρμανσης χώρου. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτεί πρωτίστως τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας και δευτερευόντως διοχετεύει ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενεργειακού συμψηφισμού. Ως προς την αντλία θερμότητας, έγινε αρχικά επιλογή του εργαζόμενου μέσου και διαστασιολόγηση του συμπιεστή και των εναλλακτών με κριτήριο την απόδοσή της. Όσον αφορά στο συνολικό σύστημα, το πλήθος των πάνελ συλλεκτών και ο όγκος της δεξαμενής επιλέχθηκαν μέσα από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, με τη χρήση της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων. Κριτήριο επιλογής βέλτιστης λύσης ήταν το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας, ως μέτρο οικονομικής και ενεργειακής απόδοσης.

Το μέγεθος αυτό, λοιπόν, προέκυψε ίσο με 0,0522 €/kWh, τρεις φορές χαμηλότερο από την τιμή του ρεύματος που θεωρήθηκε ίση με 0,162 €/kWh. Το σύστημα που προέκυψε ως βέλτιστη λύση από τη διαδικασία βελτιστοποίησης απαιτεί περίπου 12,7 m² επιφάνεια για την εγκατάσταση 20 PV/T πάνελ, εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος περίπου 3 kW και δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού με ύψος 1,8 m και διάμετρο περίπου 1,56 m². Με τη χρήση των συλλεκτών εξοικονομείται 53,5% ρεύμα σε σύγκριση με το ίδιο σύστημα, χωρίς την ηλεκτροπαραγωγή, δηλαδή εάν γινόταν χρήση ηλιακών συλλεκτών. Η θερμοκρασία των ηλιακών κυττάρων διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα, επιβεβαιώνοντας ένα βασικό πλεονέκτημα των Φ/Θ συλλεκτών, δηλαδή τον υψηλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τους συμβατικούς Φωτοβολταϊκούς συλλέκτες. Η ηλεκτροπαραγωγή ακολουθεί κυρίως τις διακυμάνσεις της ακτινοβολίας, ενώ η παραγωγή θερμικής ενέργειας κυρίως τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Και οι δύο παραγωγές πάντως ήταν υψηλότερες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω των υψηλότερων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Ως προς το σύστημα αποθήκευσης με την ενσωματωμένη ηλεκτρική αντίσταση για συμπλήρωση θερμικής ισχύος, όποτε είναι απαραίτητο, καλύπτεται το φορτίο ζεστού νερού χρήσης, το οποίο καταναλώνει το 15,43% της παραγόμενης από τη δεξαμενή θερμικής ισχύος. Το συνολικό φορτίο θέρμανσης χώρου καλύπτεται από συνδυασμό δεξαμενής και αντλίας θερμότητας, με την τελευταία να χρειάζεται να καλύψει μόνο το 11,03% αυτού. Ο συντελεστής συμπεριφοράς COP της χειμερινής λειτουργίας της αντλίας θερμότητας διατηρήθηκε από 3,354 έως 5,414, ενώ για την παροχή ψυκτικής ισχύος από αυτήν προέκυψε ένα εύρος 2,554 έως 3,4172 για τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης EER.

Για επένδυση σε ένα τέτοιο σύστημα απαιτείται, σύμφωνα με την προσομοίωση, κεφάλαιο ίσο με €15.258 και σταθερό λειτουργικό κόστος ανά έτος ίσο με €3.053. Φυσικά, το συγκεκριμένο κόστος επένδυσης είναι υψηλό για μια οικιακή εφαρμογή, ειδικά από τη στιγμή που δεν έχουν υπολογιστεί άλλα κόστη, όπως το κόστος εγκατάστασης των Fan-Coil στις κατοικίες. Επιπλέον, ένα τέτοιο σύστημα δεν βρίσκει εφαρμογή σε κατοικίες οι οποίες δεν είναι θωρακισμένες πρωταρχικά από μονωτικά υλικά και κατάλληλα κουφώματα. Προϋπόθεση, αποτελεί η σύνδεση των εγκατεστημένων συλλεκτών με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω ενεργειακού συμψηφισμού (net metering). Η προσθήκη συσσωρευτών είναι δυνατή και ίσως απαραίτητη βάσει της πολιτικής της πράσινης ενεργειακής μετάβασης πανευρωπαϊκά.

Μια άλλη σημείωση ως προς τους συλλέκτες, είναι ότι η βέλτιστη λύση αφορά σε εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ πάνελ 3 kW. Το νούμερο αυτό αφορά αποκλειστικά στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου της αντλίας θερμότητας και όχι για χρήση οικιακών συσκευών. Συνεπώς, το κόστος ηλεκτρικού ρεύματος για όλες τις υπόλοιπες χρήσεις του στην κατοικία παραμένει ίδιο. Είναι πιθανό σε ένα τέτοιο σύστημα η προσθήκη φωτοβολταϊκών πάνελ, για παραγωγή επιπρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας, να ήταν αρκετά συμφέρουσα. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά ως προς την χρήση των PV/T, τα οποία αποτελούν μια τεχνολογία σχετικά ανώριμη και υψηλού κόστους. Μελλοντικά, όταν τα προβλήματα απώλειας τεχνογνωσίας και αυξημένου κόστους εξαλειφθούν, είναι βέβαιο ότι ο συγκεκριμένος τύπος συλλέκτη θα βρει ευρεία εφαρμογή. Βέβαια, υπάρχουν και άλλα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν, όπως οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εργαζόμενου μέσου σε σχέση με άλλα ηλιακά θερμικά συστήματα, όπως οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.

Τέλος, η παρούσα εργασία μπορεί να κριθεί επιτυχημένη ως προς την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν αρχικά. Μοντελοποιήθηκε ολοκληρωμένα ένα ενεργειακό σύστημα, βιώσιμο και αποδοτικό σαν επένδυση, με υψηλά ενεργειακά οφέλη. Κάθε μέρος του συστήματος αναλύθηκε σε ένα ικανοποιητικό βάθος, ενώ τα αποτελέσματα σε συνδυασμό με την απλότητα της εφαρμογής συμβάλλουν στην παρουσίαση μια ελκυστικής εικόνας για την εφαρμογή αυτή.

4.2 Μελλοντική εργασία

Ακολουθούν κάποιες προτάσεις για εξέλιξη του συγκεκριμένου θέματος ή μελέτη της εφαρμογής του σε άλλα πεδία:

- Παροχή θέρμανσης του νερού χρήσης και από την αντλία θερμότητας, για αφαίρεση της ηλεκτρικής αντίστασης που προσθέτει επιπλέον κόστος.
- Χρήση του συστήματος στην ολοκληρωμένη μελέτη κάποιου τύπου ενεργειακά αποδοτικού κτιρίου.
- Αξιολόγηση προσθήκης συσσωρευτών και επιπρόσθετων φωτοβολταϊκών πάνελ.
- Μελέτη χρήσης άλλων εργαζόμενων μέσων για τα PV/T, όπως αέρας και νανορευστά.
- Αξιολόγηση αντικατάστασης του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας της παρούσας εφαρμογής με ένα που να εκμεταλλεύεται υλικά αλλαγής φάσης.
- Εφαρμογή παρόμοιου συστήματος σε άλλους τύπους κτιρίων, όπως κτίρια γραφείων, όπου δεν χρειάζεται παροχή ζεστού νερού χρήσης, ή ακόμα μεγαλύτερης κλίμακας, όπως ξενοδοχεία. Στην τελευταία περίπτωση, μπορεί να γίνει περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος, με χρήση ψύκτη απορρόφησης, όπως στη βιβλιογραφία [16] [17].

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Επίπεδος συλλέκτης [4]	17
Σχήμα 1-2: Δίοδος p-n [4]	18
Σχήμα 1-3: Φωτοβολταϊκό κελί [4]	19
Σχήμα 1-4: Στοιχεία ενός τυπικού Φ/Θ συλλέκτη (α) 3-Δ (b) σε τομή [4]	20
Σχήμα 1-5: α) Σχηματική απεικόνιση αντλίας θερμότητας, b) διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας ψυκτικού κύκλου Carnot, c) διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας ψυκτικού κύκλου Carnot [8]	23
Σχήμα 1-6: α) Χειμερινή λειτουργία αντλίας θερμότητας, β) Θερινή λειτουργία αντλίας θερμότητας [10]	25
Σχήμα 1-7: Υπό μελέτη σύστημα	30
Σχήμα 2-1: Διάγραμμα ροής κώδικα θερμικής μοντελοποίησης PV/T	35
Σχήμα 2-2: Θερμοκρασία νερού και κυττάρου συλλέκτη μια τυπική ημέρα του Ιουλίου α) από τον κώδικα και β) από τη βιβλιογραφία [20]	36
Σχήμα 2-3: Θερμοκρασία νερού και κυττάρου συλλέκτη μια τυπική ημέρα του Ιανουαρίου α) από τον κώδικα και β) από τη βιβλιογραφία [20].	37
Σχήμα 2-4: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού [4]	38
Σχήμα 2-5: Χαρακτηριστική καμπύλη I(V) και καμπύλη ισχύος [4]	38
Σχήμα 2-6: Διάγραμμα ροής κώδικα ευρετηρίασης και παρεμβολής	42
Σχήμα 2-7: Σχήμα τιμών παρεμβολής επιπέδου [23]	42
Σχήμα 2-8: Σπειροειδής εναλλάκτης [25]	44
Σχήμα 2-9: Μελέτη επιρροής πλήθους ζωνών ανάμειξης στη σταθερότητα της λύσης [24]	47
Σχήμα 2-10: Δεξαμενή σε λειτουργία θέρμανσης	48
Σχήμα 2-11: Καταγραφή αποτελεσμάτων ισχύος κώδικα αντλίας θερμότητας για θέρμανση	51
Σχήμα 2-12: Καταγραφή αποτελεσμάτων ισχύος κώδικα αντλίας θερμότητας για ψύξη	51
Σχήμα 2-13: Κώδικας ευρετηρίασης για αντλία θερμότητας	52
Σχήμα 2-14: Εγκατάσταση για λειτουργία παροχής θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης από σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	54
Σχήμα 2-15: Διάγραμμα ροής κώδικα λειτουργίας παροχής θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης από σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	55
Σχήμα 2-16: Εγκατάσταση για λειτουργία παροχής επιπρόσθετης θέρμανσης από αντλία θερμότητας	56
Σχήμα 2-17: Εγκατάσταση για λειτουργία παροχής ψύξης από αντλία θερμότητας παράλληλα με παροχή ζεστού νερού χρήσης	58
Σχήμα 2-18: Τετραοδική βαλβίδα σε θερινή λειτουργία [27]	60
Σχήμα 2-19: Τετραοδική βαλβίδα σε θερινή λειτουργία [27]	60
Σχήμα 2-20: Διάγραμμα ροής κώδικα λειτουργίας παροχής ψύξης και ζεστού νερού χρήσης	61
Σχήμα 2-21: Διάγραμμα ροής κεντρικού κώδικα	67

Σχήμα 3-1: Υψηλότερη και μέση βαθμολογία προσαρμογής ανά γενιά	70
Σχήμα 3-2: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα έτος	72
Σχήμα 3-3: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε μια τυπική μέρα Ιανουαρίου.....	72
Σχήμα 3-4: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε μια τυπική μέρα Ιουλίου	73
Σχήμα 3-5: Τιμές προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους	75
Σχήμα 3-6: Τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους.....	75
Σχήμα 3-7: Τιμές θερμοκρασίας νερού εξόδου συλλέκτη ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους	76
Σχήμα 3-8: Τιμές θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων ανά ώρα στη διάρκεια ενός έτους..	76
Σχήμα 3-9: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τους συλλέκτες ανά ώρα σε ένα έτος.....	77
Σχήμα 3-10: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου.....	78
Σχήμα 3-11: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου.....	78
Σχήμα 3-12: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας νερού εξόδου από τον συλλέκτη, θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων και θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιανουαρίου	79
Σχήμα 3-13: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιουλίου	79
Σχήμα 3-14: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιουλίου	80
Σχήμα 3-15: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας νερού εξόδου από τον συλλέκτη, θερμοκρασίας ηλιακών κυττάρων και θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας του Ιουλίου	80
Σχήμα 3-16: Ωφέλιμη παραγόμενη θερμική ενέργεια από Φ/Θ συλλέκτες.....	81
Σχήμα 3-17: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Φ/Θ συλλέκτη κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιουλίου και του Ιανουαρίου.....	82
Σχήμα 3-18: Θερμικός βαθμός απόδοσης Φ/Θ συλλέκτη κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιουλίου και του Ιανουαρίου.....	83
Σχήμα 3-19: Θερμοκρασία 1 ^{ου} και 25 ^{ου} κόμβου σε μια τυπική μέρα του Ιανουαρίου.....	84
Σχήμα 3-20: Θερμοκρασία κόμβων στις 5 μ.μ. σε μια τυπική μέρα Ιανουαρίου	84
Σχήμα 3-21: Θερμοκρασία 1 ^{ου} και 25 ^{ου} κόμβου σε μια τυπική μέρα του Ιουλίου	85
Σχήμα 3-22: Θερμοκρασία κόμβων στις 9 π.μ. σε μια τυπική μέρα Ιουλίου.....	85
Σχήμα 3-23: Συνολική παραγόμενη θερμική ισχύς από τη δεξαμενή αποθήκευσης στη διάρκεια ενός έτους.....	87
Σχήμα 3-24: Παραγόμενη θερμική ισχύς από τη δεξαμενή αποθήκευσης προοριζόμενη για θέρμανση χώρου στη διάρκεια ενός έτους.....	87
Σχήμα 3-25: Παραγόμενη θερμική ισχύς από τη δεξαμενή αποθήκευσης προοριζόμενη για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης στη διάρκεια ενός έτους.....	88
Σχήμα 3-26: Θερμικό φορτίο ζεστού νερού χρήσης.....	88
Σχήμα 3-27: Φορτίο θέρμανσης και ψύξης χώρου	89

Σχήμα 3-28: Θερμική και ψυκτική ισχύς που παρέχεται για την κάλυψη των φορτίων ...	90
Σχήμα 3-29: Θερμικό φορτίο εισόδου αντλίας θερμότητας	91
Σχήμα 3-30: Διαφορά θερμικού φορτίου και παρεχόμενης ισχύος	91
Σχήμα 3-31: Διαφορά ψυκτικού φορτίου και παρεχόμενης ισχύος	92
Σχήμα 3-32: Α) Συντελεστής απόδοσης, Β) ηλεκτρική ισχύς εισόδου αντλίας θερμότητας και Γ) θερμοκρασία περιβάλλοντος, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας Ιανουαρίου .	93
Σχήμα 3-33: Α) Συντελεστής απόδοσης, Β) ηλεκτρική ισχύς εισόδου αντλίας θερμότητας και Γ) θερμοκρασία περιβάλλοντος, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας Ιουλίου	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση	28
Πίνακας 2-1: Τιμές μεγεθών θερμικού συλλέκτη PV/T	34
Πίνακας 2-2: Τιμές μεγεθών φωτοβολταϊκού συλλέκτη PV/T	40
Πίνακας 2-3: Τιμές μεγεθών δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού	46
Πίνακας 2-4: Αποτελέσματα δοκιμών κώδικα αντλία θερμότητας σε λειτουργία θέρμανσης	49
Πίνακας 2-5: Αποτελέσματα δοκιμών κώδικα αντλία θερμότητας σε λειτουργία ψύξης. 50	
Πίνακας 2-6: Κόστη εγκατάστασης	61
Πίνακας 2-7: Χαρακτηριστικά σωληνώσεων	62
Πίνακας 2-8: Χαρακτηριστικά μεγέθη για κόστη	62
Πίνακας 3-1: Ανάλυση κόστους επένδυσης	71

Κατάλογος Αναφορών

- [1] C. Tziogas, A. Papadopoulos and P. Georgiadis, "Policy implementation and energy-saving strategies for the residential sector: The case of the Greek Energy Refurbishment program," *Energy Policy*, 2021.
- [2] Ελληνική Στατιστική Αρχή, «Έρευνα Κατανάλωσης Ενέργειας στα Νοικοκυριά, 2011-2012,» Ελληνική Δημοκρατία, Πειραιάς, 2013.
- [3] E. Osterman και U. Stritih, «Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings,» *Journal of Energy Storage*, 2021.
- [4] A. H. A. Al-Waeli, Kazem, Chaichan και K. Sopian, Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2019.
- [5] N. Shao, L. Ma και J. Zhang, «Experimental investigation on the performance of direct-expansion roof-PV/T heat pump system,» *Energy*, 2020.
- [6] T. Bauer, W.-D. Steinmann, D. Laing και R. Tamme, «Thermal energy storage materials and systems,» *Annual Review of Heat Transfer*, 2012.
- [7] R. da Silva και J. Fernandes, «Hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems simulation with Simulink/Matlab,» *Solar Energy*, 2010.
- [8] K.-M. Adamson, T. G. Walmsley, J. K. Carson, Q. Chen, F. Schlosser, L. Kong και D. J. Cleland, «High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022.
- [9] A. Miglioli, N. Aste, C. Del Pero και F. Leonforte, «Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: Integration and design methods,» *Energy and Built Environment*, 2021.
- [10] H. Yang, X. Wang και S. Yao, «Thermodynamic analysis of a novel solar photovoltaic thermal collector coupled with switchable air source heat pump system,» *Applied Thermal Engineering*, 2023.
- [11] L. W. Yang, R. J. Xu, N. Hua, Y. Xia, W. B. Zhou, T. Yang, Y. Belyayev και H. S. Wang, «Review of the advances in solar-assisted air source heat pumps for the domestic sector,» *Energy Conversion and Management*, 2021.

- [12] W. Lerch, A. Heinz και R. Heimrath, «Direct use of solar energy as heat source for a heat pump in comparison to a conventional parallel solar air heat pump system,» *Energy and Buildings*, 2015.
- [13] Y. Cui, J. Zhu, S. Zoras, Y. Qiao και X. Zhang, «Energy performance and life cycle cost assessments of a photovoltaic/thermal assisted heat pump system,» *Energy*, 2020.
- [14] A. Del Amo, A. Martínez-Gracia, T. Pintanel, A. Bayod-Rújula και S. Torné, «Analysis and optimization of a heat pump system coupled to an installation of PVT panels and a seasonal storage tank on an educational building,» *Energy & Buildings*, 2020.
- [15] E. Bellos και C. Tzivanidis, «Multi-objective optimization of a solar assisted heat pump-driven by hybrid PV,» *Applied Thermal Engineering*, 2019.
- [16] Z. Li, H. Chen, Y. Xu και K. T. Ooi, «Comprehensive evaluation of low-grade solar trigeneration system by photovoltaic-thermal collectors,» *Energy Conversion and Management*, 2020.
- [17] H. Chen, Z. Li και Y. Xu, «Assessment and parametric analysis of solar trigeneration system integrating photovoltaic thermal collectors with thermal energy storage under time-of-use electricity pricing,» *Solar Energy*, 2020.
- [18] R. Kong, T. Deethayat, A. Asanakham και T. Kiatsiriroat, «Performance and economic evaluation of a photovoltaic/thermal (PV/T)-cascade heat pump for combined cooling, heat and power in tropical climate area,» *Journal of Energy Storage*, 2020.
- [19] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr και M. Mahdavi Adeli, «An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector,» *Applied Energy*, 2010.
- [20] A. Tiwari και M. Sodha, «Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: A parametric study,» *Renewable Energy*, 2006.
- [21] H. Bellia, R. Youcef και M. Fatima, «A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB,» *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2014.
- [22] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling και B. P. Flannery, *Numerical recipes in C : the art of scientific computing*, Cambridge: New York : Cambridge University Press, 1995.
- [23] «Bilinear interpolation,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear_interpolation.

- [24] T. C. Roumpedakis, G. Loumpardis, E. Monokrousou, K. Braimakis, A. Charalampidis και S. Karellas, «Exergetic and economic analysis of a solar driven small scale ORC,» *Renewable Energy*, 2020.
- [25] Solar Energy Laboratory, «TRNSYS 18 - Mathematical Reference,» University of Wisconsin-Madison, Madison, U.S.A., 2022.
- [26] Viessmann, «VITOCCELL 340-M/360-M Datasheet».
- [27] «Industrial Manufacturing Blog,» Inquip, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.inquip.com/blog/heat-pump-reversing-valve/>.
- [28] «ΔΧΔ/24.04.2015/1η Αναθ. 20.10.2015/2η Αναθ. 23.6.2017/3η Αναθ. 31.5.2019».
- [29] S. Abdul-Ganiyu, D. A. Quansah, E. W. Ramde, R. Seidu και M. S. Adaramola, «Techno-economic analysis of solar photovoltaic (PV) and solar photovoltaic thermal (PVT) systems using exergy analysis,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021.
- [30] E. Ruffino, B. Piga, A. Casasso και R. Sethi, «Heat Pumps, Wood Biomass and Fossil Fuel Solutions in the Renovation of Buildings: A Techno-Economic Analysis Applied to Piedmont Region (NW Italy),» *Energies*, 2022.
- [31] M. Rodrigues Fernandes και L. A. Schaefer, «Levelized cost of energy of hybrid concentrating photovoltaic-thermal systems based on nanofluid spectral filtering,» *Solar Energy*, 2021.
- [32] F. A. Boyaghchi και P. Heidarnejad, «Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application,» *Energy Conversion and Management*, 2015.
- [33] Comprehensive Energy Systems, Seven Volume Set, Ibrahim Dincer, 2018.
- [34] C. Honsberg και S. Bowden, «Nominal Operating Cell Temperature, PVEducation,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/nominal-operating-cell-temperature#footnote1_zwnxt6n.