



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Θεωρητική Διερεύνηση Λειτουργίας Ηλιακού
Συστήματος Ζεστού Νερού Χρήσης, υποβοηθούμενου από Αντλία
Θερμότητας»**

**«Theoretical investigation of the operation of a combined solar
thermal heat pump hot water system »**

ΧΡΗΣΤΟΣ ΒΛΑΧΟΣ

A.E.M.:1616

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΠΑΝΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Κοζάνη

2021

Περίληψη

Τη σημερινή εποχή οι ενεργειακές απαιτήσεις των ανθρώπων έχουν οδηγήσει σε μία καθημερινότητα ενεργειακά και περιβαλλοντικά μη βιώσιμη. Είναι λοιπόν επιτακτική ανάγκη η αποφυγή χρήσης ορυκτών πόρων και στροφή προς την ανανεώσιμη ενέργεια για την κάλυψη αυτών των αναγκών και σαν συνέπεια πρόληψη του προβλήματος. Το 2018 η κατανάλωση στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τον κτηριακό τομέα είχε φτάσει περίπου το 40% της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας. Ο κτιριακός τομέας ενδείκνυται για την χρήση συστημάτων που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οι οποίες είναι ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον. Ο τρόπος που αυτά τα συστήματα παρέχουν θέρμανση, ψύξη ή ζεστό νερό χρήσης μπορεί να βελτιωθεί και να γίνει αποδοτικότερος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται εμβάθυνση στα συστήματα που τροφοδοτούν τις κατοικίες με ζεστό νερό χρήσης και πως αυτά αποδίδουν.

Συγκεκριμένα γίνεται διερεύνηση για το πώς ένα σύστημα ηλιακής θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης, υποβοηθούμενο από αντλία θερμότητας μπορεί να αποδώσει στην περιοχή της Αττικής για την κάλυψη των αναγκών κατοικίας. Αρχικά γίνεται βιβλιογραφική μελέτη για διατάξεις που σκοπό έχουν την κάλυψη τέτοιων αναγκών. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια και πως μπορεί να εκμεταλλευτεί με την χρήση των ηλιακών συλλεκτών και παρουσιάζονται τα είδη των συλλεκτών και ο τρόπος λειτουργίας τους. Ακολουθεί ανάλυση της λειτουργίας των αντλιών θερμότητας, του θερμοδυναμικού τους κύκλου αλλά και παράθεση των διαθέσιμων ειδών αυτών.

Για την διαδικασία της διερεύνησης επιλέχθηκε η μεμονωμένη μελέτη των ηλιακών συλλεκτών και των αντλιών θερμότητας για την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης και εν συνεχεία ο συνδυασμός των δυο σε μία ενιαία διάταξη. Προέκυψαν έτσι τα εξής σενάρια προσομοίωσης:

- Σενάριο θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης με την χρήση ηλιακών συλλεκτών.
- Σενάριο θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης με την χρήση αντλιών θερμότητας.
- Σενάριο διερεύνησης ηλιακού συστήματος θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης υποβοηθούμενο από αντλία θερμότητας.

Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και κατόπιν παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας, στα οποία γίνεται αξιολόγηση των σεναρίων και πως συγκρίνονται μεταξύ τους. Τέλος, προτείνονται μελλοντικά θέματα διερεύνησης για την περαιτέρω εξέλιξη των παραπάνω μοντέλων.

Abstract

Nowadays, the energy requirements of people have led to an everyday life that is energy and environmentally unsustainable. It is therefore imperative to avoid the use of mineral resources and turn to renewable energy to meet these needs and consequently prevent the problem. In 2018, consumption in the European Union for the building sector had reached about 40% of total primary energy. The building sector is suitable for the use of systems that take advantage of renewable energy sources that are inexhaustible and environmentally friendly. The way these systems provide heating, cooling or domestic hot water can be improved and made more efficient. In this thesis, the systems that supply the houses with domestic hot water and how they perform are deepened.

Specifically, an investigation is being conducted into how a solar hot water heating system, assisted by a heat pump, can work in the Attica region to meet housing needs. Initially, a bibliographic study is made for devices that aim to meet such needs. Then there is an introduction to solar energy and how it can be exploited with the use of solar panels and the types of collectors and how they work are presented. The following is an analysis of the operation of heat pumps, their thermodynamic cycle and a list of available items.

For the investigation process, the individual study of solar panels and heat pumps for domestic hot water heating was selected, followed by the combination of the two in a single device. The following simulation scenarios emerged:

- Domestic hot water heating scenario with the use of solar panels.
- Domestic hot water heating scenario with the use of heat pumps.
- Scenario of exploration of a solar hot water heating system assisted by a heat pump.

A detailed presentation of the results is made and then the conclusions of the work are presented, in which the scenarios are evaluated and how they are compared with each other. Finally, future research topics are proposed for the further development of the above models.

Ευχαριστίες

Με την παράδοση της εργασίας αυτής, θέλω πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Γεώργιο Πανάρα για την ανάθεση του θέματος, καθώς και για τις ουσιώδεις υποδείξεις και το συνεχές ενδιαφέρον του για την πορεία της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα Λεωνίδα Ζουλούμη για τη συνεχή συνεργασία του και για την πολύτιμη βοήθειά του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αγάπη, την συμπαράσταση και την υπομονή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Abstract	iv
Ευχαριστίες.....	v
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	1
1.3 Ενέργεια και κτίρια	2
1.4 Σκοπός Διπλωματικής	2
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Έρευνα.....	5
2.1 Εισαγωγική	5
2.2 Εφαρμογές μόνο με Α/Θ για θέρμανση ZNX.	5
2.3 Εφαρμογές μόνο με ηλιακούς συλλέκτες για θέρμανση ZNX.....	5
2.4 Εφαρμογές ηλιακού συλλέκτη υποβοηθούμενου από αντλία θερμότητας (solar assisted heat pump) για θέρμανση ZNX.....	5
2.5 Υβριδικές διατάξεις με συμπαραγωγή θέρμανσης νερού-ηλεκτρισμού μέσω Φ/Β (PVT).....	6
Κεφάλαιο 3: Ηλιακή Ενέργεια και Ηλιακοί Συλλέκτες	9
3.1 Γενικά	9
3.2 Ηλιακή ακτινοβολία	9
3.3 Χρήση της ηλιακής Ενέργειας	10
3.3.1 Γενικά	10
3.1.1 Τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.....	10
3.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας.....	11
3.4 Ηλιακοί συλλέκτες	11
3.4.1 Γενικά	11
3.4.2 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης.....	12
3.4.3 Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού	13
3.5 Ηλιακή γεωμετρία και χρήσιμες σχέσεις.....	14
Κεφάλαιο 4: Αντλίες Θερμότητας	19
4.1 Αρχή λειτουργίας των Αντλιών Θερμότητας.....	19

4.2 Περιγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου της αντλίας θερμότητας	20
4.3 Κύκλος Carnot	22
4.4 Είδη αντλιών θερμότητας	24
4.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντλίας θερμότητας.....	26
Κεφάλαιο 5: Διερεύνηση σεναρίων	29
5.1 Γενικά	29
5.2 Σενάριο θέρμανσης ZNX με την χρήση ηλιακών συλλεκτών	30
5.2.1 Διάταξη	31
5.2.2 Μεθοδολογία υπολογισμών.....	33
5.2.3 Μαθηματικό μοντέλο.....	33
5.3 Σενάριο θέρμανσης ZNX με την χρήση A/Θ.....	37
5.3.1 Διάταξη	37
5.3.2 Μεθοδολογία υπολογισμών 2 ^ο σεναρίου	38
5.3.3 Μαθηματικό μοντέλο.....	38
5.4 Σενάριο διερεύνησης ηλιακού συστήματος θέρμανσης ZNX υποβοηθούμενο από A/Θ.....	41
5.4.1 Διάταξη	41
5.4.2 Μεθοδολογία υπολογισμών.....	41
5.4.3 Μαθηματικό μοντέλο.....	42
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων	47
6.1 Αποτελέσματα σεναρίου θέρμανσης ZNX με ηλιακούς συλλέκτες.....	47
6.2 Αποτελέσματα σεναρίου θέρμανσης ZNX με την χρήση A/Θ	57
6.3 Αποτελέσματα σεναρίου διερεύνησης ηλιακού συστήματος θέρμανσης ZNX υποβοηθούμενο από A/Θ.....	61
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα.....	65
Βιβλιογραφία.....	67
Παράρτημα	71
Π.1 Σενάριο θέρμανσης ZNX με ηλιακούς συλλέκτες.	71
Π.2 Σενάριο θέρμανσης ZNX με A/Θ.....	81
Π.3 Σενάριο διερεύνησης ηλιακού συστήματος θέρμανσης ZNX υποβοηθούμενο από A/Θ	84

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η εποχή που ζούμε αποτελεί μια από τις πιο κρίσιμες για το μέλλον της ανθρωπότητας. Τις τελευταίες δεκαετίες η καθημερινότητα που έχουν διαμορφώσει οι άνθρωποι οδηγεί συνεχώς σε αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας με σκοπό την κάλυψη των αναγκών τους. Έτσι η μη βιώσιμη ενεργειακά πραγματικότητα βασισμένη σε ορυκτούς πόρους απαιτεί λήψη δραστικών αποφάσεων για την επιτακτική αλλά και νομοθετικά πλέον υποχρεωτική αντιμετώπιση του προβλήματος.

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας το 2020 κατανέμεται σε πηγές ως εξής: 83,1% ορυκτά καύσιμα (31,2% πετρέλαιο, 27,2% άνθρακα, 24,7% φυσικό αέριο), 6,9% υδροηλεκτρικά, 4,3% πυρηνικά και 5,7% άλλα (γεωθερμία, ηλιακή, κυμάτων, αιολική, ξύλο, σκουπίδια)(BP, 2021).

Στις ενεργειακές ανάγκες λοιπόν της σύγχρονης κοινωνίας μεγάλο κομμάτι αυτών καταναλώνεται στα συστήματα των κτιριακών οικιακών δομών με ένα κομμάτι του ενεργειακού προβλήματος των κτιρίων να αποτελεί και η κάλυψη των φορτίων για ζεστό νερό χρήσης. Το κομμάτι ενεργειακής τροφοδοσίας των συστημάτων ζεστού νερού χρήσης με την χρήση ΑΠΕ αποτελεί μια προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας και κατά συνέπεια μείωση της χρήσης ορυκτών πόρων.

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας από φυσικές διεργασίες, χρησιμοποιούνται σήμερα για να καλύψουν τις συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις παγκοσμίως, αντικαθιστώντας τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας είναι πεπερασμένες και υπό εξάντληση. Αντίθετα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εμφανίζονται συνεχώς στο φυσικό περιβάλλον. Οι κύριες μορφές ΑΠΕ είναι η ηλιακή ενέργεια (ηλιακά θερμικά και φωτοβολταϊκά συστήματα), η αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες), η υδροηλεκτρική ενέργεια (υδροηλεκτρικοί σταθμοί), η γεωθερμική ενέργεια (γεωθερμικές αντλίες θερμότητας) και η βιομάζα (λέβητες). Πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο έχουν υιοθετήσει την εφαρμογή των ΑΠΕ προκειμένου να γίνουν ενεργειακά ανεξάρτητες (Gareiou et al., 2021).

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι:

Η παραγωγή ενέργειας από μια πηγή που είναι ανεξάντλητη και δε ρυπαίνει το περιβάλλον (εκτός από ορισμένες κατηγορίες βιομάζας). Παράλληλα οι Α.Π.Ε. μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα, και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλα για χρήση σε απομονωμένες περιοχές. Η χρήση των Α.Π.Ε. μειώνει την εξάρτηση μιας χώρας από τα συμβατικά καύσιμα (ΤΕΕ, 2011).

Βέβαια οι ΑΠΕ διαθέτουν και κάποια μειονεκτήματα, μερικά εκ' των οποίων είναι ότι έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Επίσης, απαιτείται μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης καθώς και διάθεση μεγάλης επιφάνειας γης. Επιπλέον, η παροχή και η απόδοση της αιολικής, ηλιακής και υδροηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, την τοποθεσία και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται (Ciucci, 2020).

Εντούτοις, η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) έχει θέσει ως στόχο έως το 2030 ένα μερίδιο 32% της κατανάλωσης ενέργειας της Ε.Ε. να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές έτσι για να ενθαρρύνει την χρήση των ΑΠΕ, δίνει επιχορηγήσεις με σκοπό να παροτρύνει τα κράτη μέλη της (Ciucci, 2020).

1.3 Ενέργεια και κτίρια

Το 2018 η κατανάλωση στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τον κτηριακό τομέα είχε φτάσει περίπου το 40% της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας (Eurostat,2021). Επίσης το 60% περίπου της καταναλισκόμενης οικιακής ενέργειας σχετίζεται με τις ανάγκες σε θέρμανση ή ψύξη του χώρου (Combe et al., 2012).

Ακόμα, στα κτίρια για κατοικίες χρησιμοποιούνται κυρίως το φυσικό αέριο, η ηλεκτρική ενέργεια και τα παράγωγα πετρελαίου για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τόσο στην Ελλάδα όσο και στην ευρωπαϊκή ένωση. Στην ευρωπαϊκή ένωση αντιστοιχεί το 35 % της ενέργειας που προέρχεται από φυσικό αέριο και το 25 % από ηλεκτρική ενέργεια, ενώ στην Ελλάδα το 33 % από παράγωγα πετρελαίου και το 34% από ηλεκτρική ενέργεια (Gaglia et al, 2019).

Η κατανάλωση ζεστού νερού, που προκύπτει από τις πρακτικές εστίασης και υγιεινής στα κτίρια, μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα πολύ μεγάλο μερίδιο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου, ανάλογα με το κλίμα, τον τύπο πληρότητας και τις κτιριακές εγκαταστάσεις. Η παραγωγή ζεστού νερού οικιακής χρήσης αντιπροσωπεύει περίπου το 18% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα στις ΗΠΑ και το 14% στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Perez and Lombard, 2013).

Αντίστοιχα σύμφωνα με την εργασία των Pezzutto S. et al., η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για την κάλυψη φορτίων ζεστού νερού χρήσης ανά επιφάνεια κατοικίας στην Ελλάδα ανέρχεται στις 21 kWh/m². (Pezutto et al., 2015) Συνεπώς ο λεπτομερής χαρακτηρισμός των ροών ZNX σε διαφορετικούς τύπους κτιρίων είναι σημαντικός για την αποτελεσματική εισαγωγή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και για τον κατάλληλο σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής ζεστού νερού (Bertrand et al., 2016).

Γίνεται προφανές ότι τα κτίρια καταναλώνοντας αρκετή ενέργεια, η οποία προέρχεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα, τα οποία συμβάλλουν στα περιβαλλοντικά προβλήματα. Επομένως, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων είναι ιδιαίτερα σημαντική και δύναται να συμβάλει στους στόχους της ευρωπαϊκής ένωσης για απεξάρτηση της οικονομίας από τον άνθρακα μέχρι το 2050 (Pallis, 2019).

1.4 Σκοπός Διπλωματικής

Με βάση τα παραπάνω, στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια να εξεταστεί πως μια διάταξη για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX) για οικιακή χρήση, βασισμένη στα συστήματα ΑΠΕ, μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις κάλυψης φορτίου ZNX στις κλιματικές συνθήκες της Αττικής.

Αρχικά, θα παρουσιαστεί βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με παρούσες διατάξεις κάλυψης φορτίων ζεστού νερού χρήσης, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των συστημάτων αλλά και τους αποδοτικότερους συνδυασμούς αυτών μεταξύ τους.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η βασική λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών και των αντλιών θερμότητας(A/Θ) καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Θα γίνει εμβάθυνση στα

διαθέσιμα είδη για κάθε σύστημα και στον τρόπο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις ενεργειακές ανάγκες μιας κατοικίας.

Έπειτα, παρουσιάζεται η μεθοδολογία διερεύνησης της αποδοτικότητας των ηλιακών συλλεκτών και των αντλιών θερμότητας για τη θέρμανση δεξαμενών ZNX. Πιο αναλυτικά, αξιολογούνται τρία διαφορετικά σενάρια διάταξης για θέρμανση δεξαμενής ZNX. Για κάθε σενάριο παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της διάταξης και του τρόπου λειτουργίας της, με την χρήση εξισώσεων φυσικών μοντέλων των υποσυστημάτων της διάταξης. Αναλύεται η μεθοδολογία με την οποία εξάγονται πληροφορίες σχετικές με την αποτελεσματικότητα ως προς την κάλυψη των απαιτούμενων θερμικών φορτίων ZNX, την κατανάλωση και την απόδοση των συστημάτων.

Τέλος θα ακολουθήσει η παράθεση των αποτελεσμάτων και θα σχολιασθούν σε ένα κεφάλαιο επιλόγου τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Έρευνα

2.1 Εισαγωγική

Ενώ τα κτίρια γίνονται πιο ενεργειακά αποδοτικά, το μερίδιο της ενέργειας για το ζεστό νερό αυξάνεται. Η ενέργεια που απαιτείται για την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης συχνά προσδιορίζεται ως η κύρια πηγή ευέλικτης χρήσης ενέργειας σε κτίρια. Γίνεται όλο και πιο σημαντικό να κατανοήσουμε τη χρήση ενέργειας και τις απώλειες ενέργειας που σχετίζονται με το ζεστό νερό (TaxtWalnum, 2021).

2.2 Εφαρμογές μόνο με Α/Θ για θέρμανση ZNX.

Με γνώμονα τις ανάγκες αυτές έχουν γίνει αρκετές έρευνες πάνω στις μεθόδους βελτιστοποίησης του τρόπου θέρμανσης του ζεστού νερού χρήσης. Ένας τρόπος κάλυψης των φορτίων ZNX είναι η χρήση αντλιών θερμότητας.

Ο εναλλάκτης θερμότητας ψυκτικού μέσου/υλικού αλλαγής φάσης τριών μέσων (RPW-HEX, refrigerant/phase change material (PCM) water heat exchanger) λειτουργεί ως από-υπερθερμαντήρας που αποθηκεύει την αισθητή ενέργεια που παρέχεται από το ζεστό αέριο κατά τη λειτουργία θέρμανσης και ψύξης για μετέπειτα μεταφορά της θερμότητας σε δεξαμενές αποθήκευσης (ZNX). Οι αντλίες θερμότητας με εναλλάκτη RPW-HEX, ενσωματωμένες στο θερμό υπερθερμασμένο τμήμα μετά τον συμπιεστή, έχουν πολλά υποσχόμενες δυνατότητες εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και επίτευξης υψηλότερης μέσης θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας για παραγωγή ζεστού νερού σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς RPW-HEX (Emhofer, 2021).

Για περισσότερες από δύο δεκαετίες οι αντλίες θερμότητας που υποστηρίζονται από ηλιακά συστήματα έχουν διερευνηθεί σε πολλές μελέτες. Συγκεκριμένα, πολλές ερευνητικές μελέτες ανέλυσαν τις επιδόσεις μεμονωμένων και καινοτόμων εξαρτημάτων του συστήματος. Για παράδειγμα στην έρευνα του ο M. Esen ανέπτυξε έναν εναλλάκτη θερμότητας εδάφους σε ένα σύστημα αντλίας θερμότητας με ηλιακή υποβοήθηση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Τεχνητού Νευρωνικού δικτύου και το προσαρμοστικό σύστημα Νευρο-Ασαφούς συμπερασμάτων (Esen, 2000).

2.3 Εφαρμογές μόνο με ηλιακούς συλλέκτες για θέρμανση ZNX.

Σε μια άλλη έρευνα του M. Esen γίνεται μια θεωρητική βελτιστοποίηση των επιδόσεων δύο δεξαμενών αποθήκευσης ZNX. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μοντέλα που περιγράφουν την ημερήσια παροδική συμπεριφορά της μονάδας αλλαγής φάσης. (Esen et al., 1998) Ο ίδιος συγγραφέας σε συνεργασία με των Ayhan διερεύνησε την απόδοση μιας δεξαμενής κυλινδρικής αποθήκευσης ZNX με ηλιακή υποβοήθηση. Ανέπτυξαν ένα μοντέλο που περιγράφει τη μεταβατική συμπεριφορά μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας αλλαγής φάσης (Esen and Ayhan, 1996).

2.4 Εφαρμογές ηλιακού συλλέκτη υποβοηθούμενου από αντλία θερμότητας (solar assisted heat pump) για θέρμανση ZNX

Η συνδυαστική διάταξη ηλιακού θερμικού συστήματος, υποβοηθούμενου από αντλία θερμότητας μπορεί να αξιοποιήσει την εκμετάλλευση του ηλιακού δυναμικού της περιοχής εγκατάστασης. Ταυτόχρονα, εξασφαλίζει τη συνεχή κάλυψη των θερμικών φορτίων σε περιόδους χαμηλής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, ή κατά τις νυχτερινές ώρες. Σε προσομοιώσεις λειτουργίας

των G. Panaras et al. (G. Panaras et al., 2013), σημαντική παράμετρος φαίνεται να αποτελεί η θερμοκρασία-στόχος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας, καθώς επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Στην ανάλυση των S. H. Razavi et al. (Razavi et al., 2018), αναφέρεται πως η εφαρμογή μιας τέτοιας εγκατάστασης μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση ως και 8.7%.

Μια ομάδα συγγραφέων παρουσίασαν μια μελέτη συνδυαστικού συστήματος αντλίας θερμότητας ηλιακής θερμικής και πηγής αέρα. Διαμόρφωσαν το σύστημα με βάση τα προϊόντα που διατίθενται στην αγορά. Διερεύνησαν διάφορες παραλλαγές συστήματος για να δείξουν την επίδραση του κύκλου της αντλίας θερμότητας, της δεξαμενής αποθήκευσης και της ενσωμάτωσης του συστήματος στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για δύο σπίτια στα κλίματα της Ζυρίχης και της Καρκασόν. (Poppi et al., 2016)

Ο F. Reda και ο S. Raiho εστίασαν την έρευνά τους στην εφαρμογή δύο λύσεων με ηλιακή βοήθεια για κτίριο γραφείων που βρίσκεται στη Φινλανδία και πιο συγκεκριμένα μια αντλία θερμότητας αέρα με ηλιακή απορρόφηση, η οποία χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες και τηλεθέρμανση ως κύρια πηγή θέρμανσης και ένα φωτοβολταϊκό (Reda et al., 2020).

2.5 Υβριδικές διατάξεις με συμπαραγωγή θέρμανσης νερού-ηλεκτρισμού μέσω Φ/Β (PVT)

Υβριδικά συστήματα ηλιακών συλλεκτών και αντλιών θερμότητας έχουν διερευνηθεί και σε άλλες έρευνες.

Σε άλλες μελέτες, οι αντλίες θερμότητας συνδυάζονται με διαφορετικές πηγές θερμότητας όπως λέβητες αερίου ή νεροχύτες εδάφους. Παρουσιάστηκε έτσι μια μέθοδος βελτιστοποίησης σχεδιασμού, ενός υβριδικού συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας υποστηριζόμενο από λέβητα αερίου. Με βάση τα αποτελέσματα, οι λέβητες αερίου μπορούν να μειώσουν το φορτίο αιχμής γεωθερμικών αντλιών (Wang et al., 2017).

Ο Di Perna διερεύνησε τον τρόπο εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης μιας υβριδικής μονάδας μέσω δυναμικών προσομοιώσεων, συγκρίνοντάς την με μια αντλία θερμότητας με ηλεκτρική ενσωμάτωση σε μονοκατοικία που χτίστηκε τη δεκαετία του 1970 και βρίσκεται στο Μιλάνο, επιλέχθηκε ένα υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από μια αντλία θερμότητας σε συνδυασμό με έναν λέβητα συμπύκνωσης (Di Perna et al., 2015).

Τα υβριδικά ηλιακά συστήματα με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες PV-Thermal (PVT), μπορεί να είναι μια ιδανική επιλογή δεδομένου ότι μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα ταυτόχρονα για να καλύψουν διαφορετικές τελικές χρήσεις. (Herez et al., 2020) Για παράδειγμα οι Jonas et al. παρουσίασαν στην έρευνα τους ένα νέο μοντέλο για την αξιολόγηση της απόδοσης PVT, συνέκριναν διαφορετικές προσεγγίσεις αναγνώρισης παραμέτρων και επικύρωσαν το μοντέλο και την εφαρμογή του στο περιβάλλον TRNSYS. Πέτυχαν μια καλή απόδοση προσομοιωμένης και μετρημένης θερμικής και ηλεκτρικής ισχύος για τους αναλυθέντες τύπους συλλεκτών PVT και τις υποτιθέμενες συνθήκες λειτουργίας (Jonas et al., 2019).

Σε μια έρευνα τους οι Dannemand, Perers και Furbo παρουσίασαν τον σχεδιασμό και την επίδειξη ενός συστήματος αντλίας θερμότητας με υποβοήθηση ηλιακού PVT, μια δεξαμενή αποθήκευσης κρύου ρυθμιστικού στην πλευρά της πηγής της αντλίας θερμότητας και μια δεξαμενή

αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης. Διαπίστωσαν ότι το σύστημα υπό δοκιμή λειτούργησε ως ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες σε ηλιόλουστες περιόδους και ως απορροφητές ενέργειας (εναλλάκτες θερμότητας με το περιβάλλον) σε περιόδους με ηλιακή ακτινοβολία κάτω από 50W/m^2 (Dannemand et al., 2019).

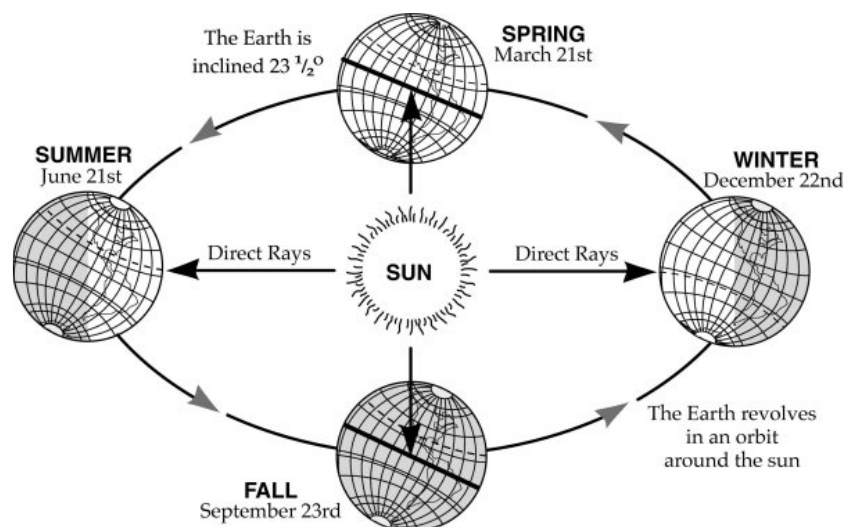
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση, προκύπτει η σημασία περαιτέρω διερεύνησης της αποδοτικότητας σχετικών συστημάτων. Ειδικότερα, στην παρούσα εργασία θα γίνει η αξιολόγηση της αποδοτικότητας συστήματος θέρμανσης ZNX, με τη χρήση διάταξης ηλιακών συλλεκτών, υποβοηθούμενης από αντλία θερμότητας και η σύγκρισή της με διατάξεις θέρμανσης, είτε μόνο με ηλιακούς συλλέκτες, είτε μόνο με αντλία θερμότητας. Η έρευνα λαμβάνει χώρα σε κλιματικές συνθήκες και δεδομένα του νομού Αττικής.

Κεφάλαιο 3: Ηλιακή Ενέργεια και Ηλιακοί Συλλέκτες

3.1 Γενικά

Για την καλύτερη κατανόηση λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών, σε αυτό το κεφάλαιο κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση πληροφοριών σχετικά με τη φύση της ηλιακής ενέργειας, αλλά και τον συστημάτων ηλιακών συλλεκτών

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και αποτελεί μια θερμή σφαίρα αερίων στο εσωτερικό της οποίας γίνονται θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Αποτέλεσμα των αντιδράσεων είναι η παραγωγή ενέργειας η οποία ύστερα από εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια φτάνει στην επιφάνεια του ήλιου και στη συνέχεια μόλις σε 8,3 λεπτά φτάνει στη Γη (NASA, 2008)

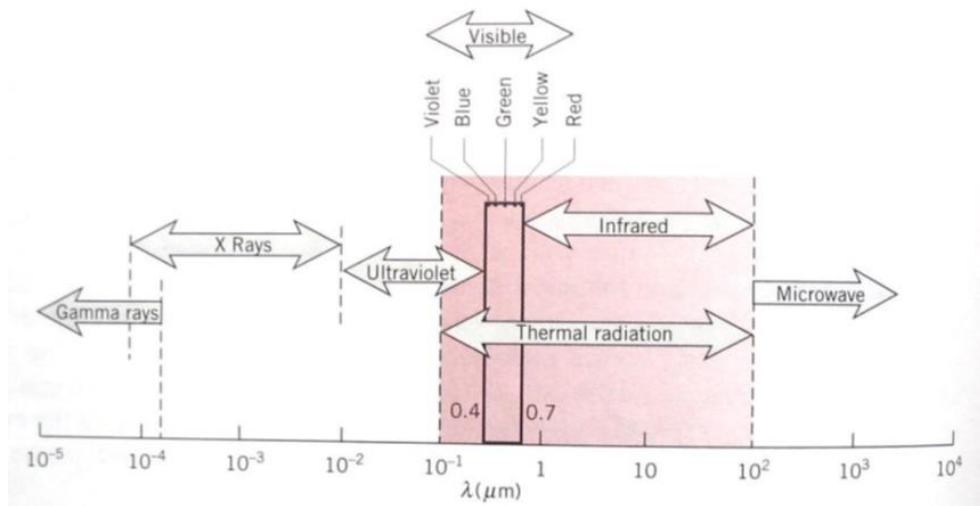


Εικόνα 3.1 Ετήσια περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο. (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019)

3.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ενέργεια που απελευθερώνεται στον Ήλιο ακτινοβολείται στο διάστημα και κάποια ποσότητα φθάνει στη Γη. Το ένα τρίτο της ακτινοβολίας που προσπίπτει στη Γη ανακλάται πίσω στο διάστημα. Η υπόλοιπη απορροφάτε και εκπέμπεται τελικά στο διάστημα ως υπέρυθη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Αντιλαμβανόμαστε την ηλιακή ακτινοβολία ως λευκό φως. Στην πραγματικότητα , διαδίδεται με ένα ευρύ φάσμα μήκους κυμάτων από την υπέρυθη έως την υπεριώδη ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, ο ήλιος εκπέμπει ισχύ της τάξης 10^{23} kW. Από αυτό το σύνολο, περίπου τα $1,8 \times 10^{14}$ kW φτάνουν στη γη και περίπου το 60% αυτής της ποσότητας ($\approx 1,08 \times 10^{14}$ kW) φτάνει στην επιφάνεια της γης. Η ποσότητα αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συνολική κατανάλωσης ενέργειας του κόσμου (World Energy Council, 2013).

Η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται με την εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος αλλά και την ώρα της ημέρας όπως θα δειχθεί και στο κεφάλαιο 3.4.



Εικόνα 3.2 Φάσμα ακτινοβολίας (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).

3.3 Χρήση της ηλιακής Ενέργειας

3.3.1 Γενικά

Σε αυτή τη ενότητα παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τους τρόπους αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.

3.1.1 Τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με τους παρακάτω τρόπους:

1) Για την παροχή θερμότητας, με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών

- για την παροχή ζεστού νερού χρήσης

Οι Duffie and Beckman επισημαίνουν πως η πιο συνήθης θερμοκρασιακή στάθμη των δοχείων ΖΝΧ αποτελεί το εύρος των 45-50 °C (Duffie and Beckman, 2013).

Μια διάταξη ηλιακού συλλέκτη 2 m² και δεξαμενής αποθήκευσης 120l για την ελληνική αγορά έχει αρχικό κόστος εγκατάστασης περίπου 600 ευρώ (Pelletton Co., 2021).

- για την αποθήκευση υπό μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό
- για συστήματα θέρμανσης χώρων
- για συστήματα ψύξης με απορρόφηση/προσρόφηση (solar cooling)

Η προσέγγιση αυτή εξαρτάται από την επεξεργασία της ηλιακής θερμικής ενέργειας από τους συλλέκτες για να επιφέρει ένα αποτέλεσμα ψύξης (Radwan et al., 2022).

- για ξήρανση προϊόντων, διαδικασίες απόσταξης, συστήματα αφαλάτωσης

2) Για τη άμεση παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών.

Το κόστος και οι τιμές για ένα σταθερό φωτοβολταϊκό σύστημα στην Ελληνική αγορά κυμαίνεται από 3.500 έως 5.500 ευρώ ανά kW. Φυσικά η αναλογία τιμή/Watt μειώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της εγκατάστασης (Selasenergy Co., 2021).

3.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα στη χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι:

- Είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και δε ρυπαίνει το περιβάλλον (TEE, 2011).
- Μηδενικό κόστος πρώτης ύλης(ήλιος)
- Συμβάλλει στην απεξάρτηση από τα ρυπογόνα συμβατικά καύσιμα αφού μπορεί να τα αντικαταστήσει. Όπως στην περίπτωση κάλυψης φορτίων ZNX.
- Επειδή είναι ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, το κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της εκμετάλλευσης της δεν μεταβάλλεται με τις διακυμάνσεις της οικονομίας (σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα).

Ωστόσο, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα της χρήσης ηλιακής ενέργειας, τα οποία είναι:

- Οι ηλιακοί συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή ισχύος απαιτούνται συχνά μεγάλες εγκαταστάσεις.
- Μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών ή φωτοβολταϊκών σε σχέση με άλλα συστήματα.
- Το ηλιακό δυναμικό δεν είναι ανά πάσα στιγμή διαθέσιμο, λόγω των μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την εγκατάσταση αποθηκευτικού μέσου της απομαστευόμενης ηλιακής ενέργειας, είτε σε μορφή θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας.

3.4 Ηλιακοί συλλέκτες

3.4.1 Γενικά

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι ένας ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας που συλλέγει ή συγκεντρώνει τη ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε θερμότητα. Δηλαδή μεταφέρει ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας από τον ήλιο σε ένα ρευστό.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου, εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και το φορτίο, δηλαδή την εφαρμογή και τις επιθυμητές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν 3 βασικοί τύποι ηλιακών συλλεκτών:

- Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης
- Συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης
- Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού

Συγκεκριμένα σε αυτή την ενότητα θα ασχοληθούμε με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και με τους ηλιακούς συλλέκτες με σωλήνες κενού.

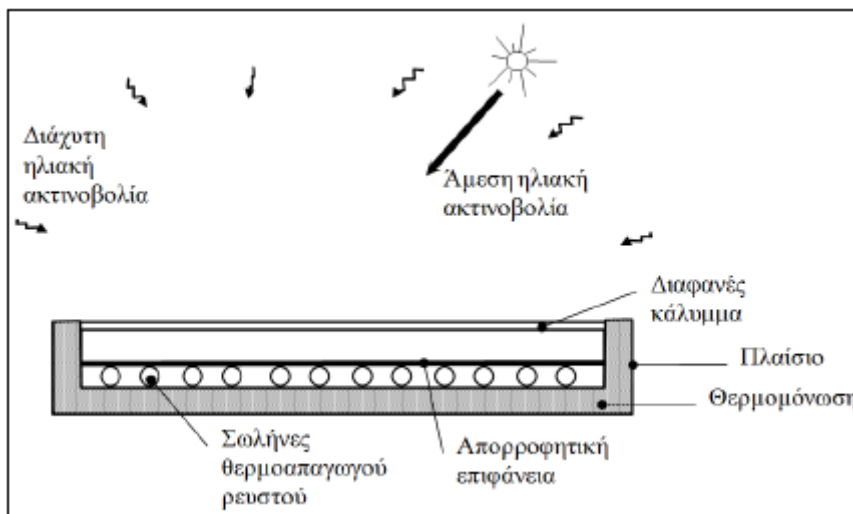
3.4.2 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

3.4.2.1 Γενικά

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι ο πλέον συνηθισμένος τύπος συλλέκτη που συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή ΖΝΧ (ηλιακός θερμοσίφωνας). Εκμεταλλεύονται την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (50-80°C) (ΤΕΕ, 2011).

Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη είναι:

- Το κάλυμμα, που αποτελείται από ένα ή περισσότερα καλύμματα και λειτουργεί σαν προστατευτικό μειώνοντας τις θερμικές απώλειες του απορροφητή (transparent cover). Συνήθως χρησιμοποιείται απλό τζάμι.
- Απορροφητής ή πλάκα απορρόφησης (absorber plate), που περιλαμβάνει την απορροφητική επιφάνεια και τους σωλήνες (αν πρόκειται για συλλέκτη θέρμανσης υγρού) ή τους αεραγωγούς (αν πρόκειται για θερμαντήρες αέρος) (Fluid conduit). Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι επικαλυμμένος με στρώμα μαύρου χρώματος.
- Θερμομόνωση, της πίσω και των παράπλευρων επιφανειών (side and back insulation)
- Πλαίσιο, που περιλαμβάνει τον συλλέκτη και πρέπει να είναι στεγανό και αντιαβρωτικό (frame).



Εικόνα 3.3 Τομή τυπικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη για παραγωγή ζεστού νερού (ΤΕΕ, 2011).

3.4.2.2 Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα

Ο ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα είναι ένας επίπεδος συλλέκτης ο οποίος δεν έχει κάλυμμα και θερμομόνωση στον απορροφητή του.

Επίσης οι απορροφητές του είναι κατασκευασμένοι από πλαστικό καθώς το χαμηλό εύρος λειτουργίας που τον διακρίνει δε χρειάζονται μεγάλη θερμοχωρητικότητα (Χριστοδουλάκη, 2008).

Αποτελεί την πλέον οικονομική κατασκευή και χρησιμοποιείται για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (μέχρι 30°C) όπως στην περίπτωση θέρμανσης νερού για πισίνες (ΤΕΕ, 2011).



Εικόνα 3.4 Πλαστικός απορροφητής ηλιακού συλλέκτη χωρίς κάλυμμα.(Sunbelt-solar)

3.4.2.3 Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης

Ο ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης είναι ένας επίπεδος συλλέκτης στον οποίο η επιφάνεια απορρόφησης είναι επιλεκτική.

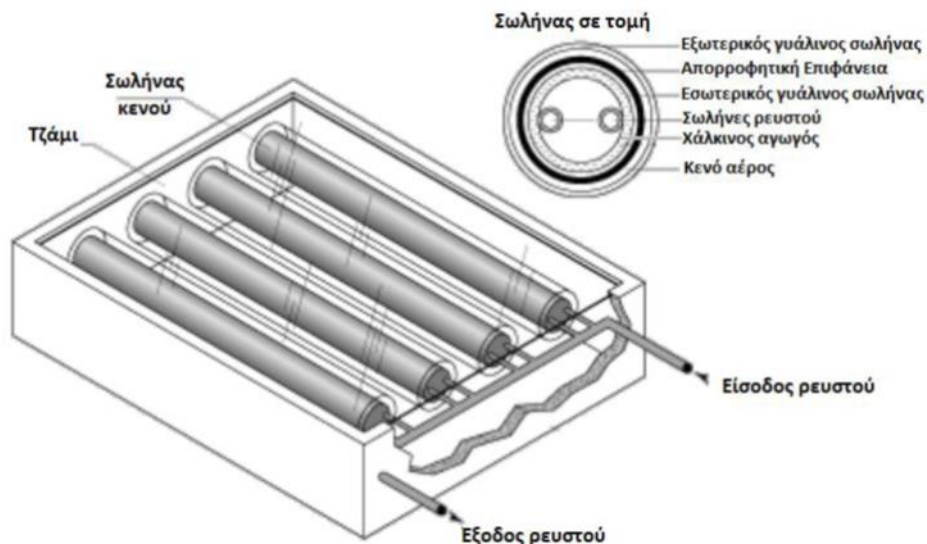
Μια επιλεκτική επιφάνεια έχει υψηλή απορροφητικότητα στη ηλιακή ακτινοβολία και μικρό συντελεστή εκπομπής στη μεγάλη κύματος ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια, μειώνοντας έτσι περαιτέρω τις θερμικές απώλειες. Ο επιλεκτικός συλλέκτης μπορεί να έχει μέχρι και 30% μεγαλύτερη απόδοση, σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες με απλή μαύρη βαφή εξαιτίας της μείωσης των απωλειών λόγω ανάκλασης (ΤΕΕ, 2011).

Παρόλο που επιλεκτικός συλλέκτης είναι πιο αποδοτικός, είναι και πιο ακριβός, για αυτό ανάλογα με τη εφαρμογή επιλέγεται το κατάλληλο είδος επιφάνειας απορρόφησης (ΤΕΕ, 2011).

3.4.3 Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού

Ο ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αποτελείται από συστοιχία παράλληλων γυάλινων σωλήνων, ο καθένας από τους οποίους περιέχει έναν χάλκινο απορροφητικό σωλήνα επικαλυμμένο με επιλεκτική βαφή. Ο εσωτερικός σωλήνας, αποτελεί το σωλήνα προσαγωγής του ρευστού. Το ρευστό που έχει θερμανθεί κυκλοφορεί μέσα στον εναλλάκτη ο οποίος βρίσκεται στο άνω μέρος του συλλέκτη, και δίνει τη θερμότητα αυτή στο νερό που υπάρχει συνήθως σε δεξαμενή αποθήκευσης (Μαρτινόπουλος και Τσιλιγκιρίδης, 2006).

Το θερμοαπαγωγό μέσο, νερό ή αέρας, που περνάει και έρχεται σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, απάγει την θερμότητα που έχει συλλεχθεί. Το κενό είναι πολύ καλό μονωτικό, αφού η θερμότητα από τον απορροφητήρα προς το γυάλινο κάλυμμα (και από εκεί προς το περιβάλλον) μεταδίδεται μόνο με ακτινοβολία. Συνεπώς, οι απώλειες θερμότητας των σωλήνων κενού προς το περιβάλλον είναι πολύ μικρές και ως εκ τούτου επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες στη δεξαμενή αποθήκευσης (ΤΕΕ, 2011).



Εικόνα 3.5 Τομή ηλιακού συλλέκτη με σωλήνες κενού (Alternative-Energy).

Επιπλέον χαρακτηριστικά των συλλεκτών κενού είναι:

- Εκμεταλλεύονται και την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία
- Επιτυγχάνονται υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και είναι ιδανικοί για ψυχρά κλίματα αφού έχουν μικρές απώλειες θερμότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη συλλεκτών.
- Έχουν υψηλές αποδόσεις σε σχέση με τους συλλέκτες μονού υαλοπίνακα.
- Έχουν μικρό βάρος και όγκο και μεγάλη αντοχή σε θερμοκρασίες έως μείον 40°C,

3.5 Ηλιακή γεωμετρία και χρήσιμες σχέσεις

Η ηλιακή ακτινοβολία σε κάθετο επίπεδο συμβολίζεται ως G (W/m^2)

Διόρθωση ακτινοβολίας για κεκλιμένο επίπεδο G_D (W/m^2), δίνεται από τη σχέση 3.1

$$G_D = \cos\theta \cdot G \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

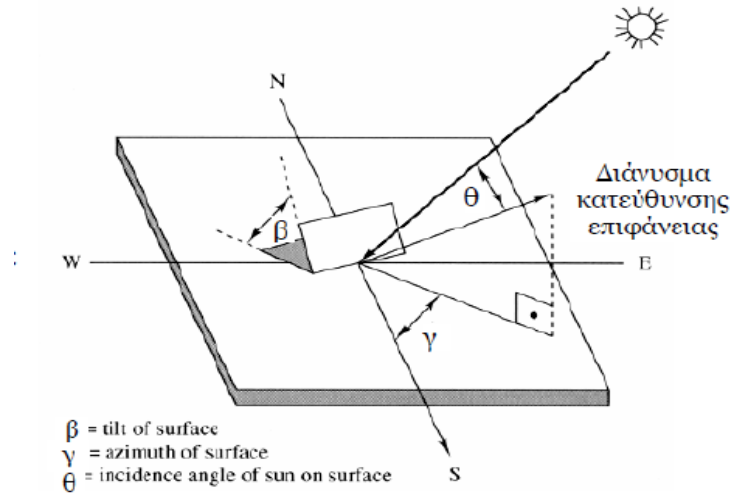
Ως θ ορίζουμε την γωνία πρόσπτωσης η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κάποια επιφάνεια όταν γνωρίζουμε την ισχύ της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Εφαρμογή σε δομικά στοιχεία, ηλιακούς συλλέκτες, φωτοβολταϊκά κλπ και υπολογίζεται από τη σχέση 3.2 (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).

$$\cos\theta = \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\gamma_c - \gamma) + \sin\alpha \cdot \cos\beta \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

Για τον προσδιορισμό της γωνίας πρόσπτωσης θ χρειάζεται να βρούμε τις παρακάτω γωνίες (Duffie and Beckman, 2013).

γ : γωνία αζιμούθιου

β : γωνία κλίσης επιφάνεια συλλέκτη



Εικόνα 3.6 Απεικόνιση γωνιών β , γ , θ (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).

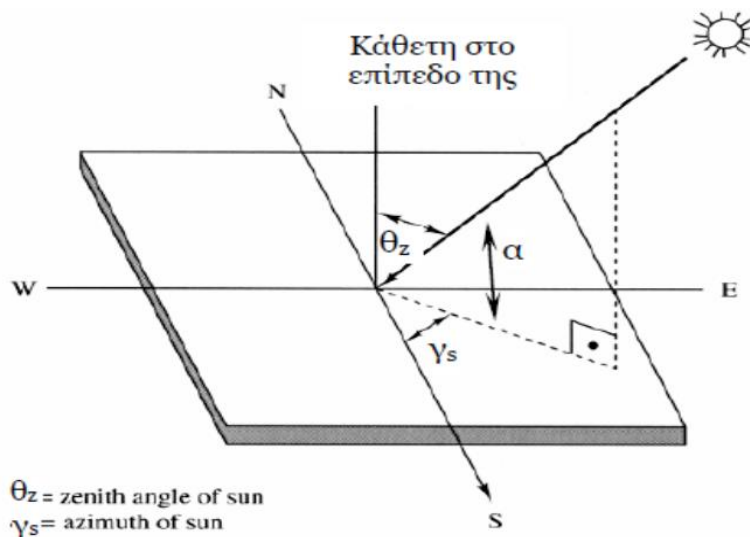
γ_s : γωνία ηλιακού αζιμουθίου η οποία δίνεται από την σχέση 3.3

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\sin \theta_z} = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (\text{Σχέση 3.3})$$

θ_z : γωνία ζενίθ και

α : ηλιακό ύψος οι οποίες προσδιορίζονται από τη σχέση 3.4

$$\sin \alpha = \cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (\text{Σχέση 3.4})$$



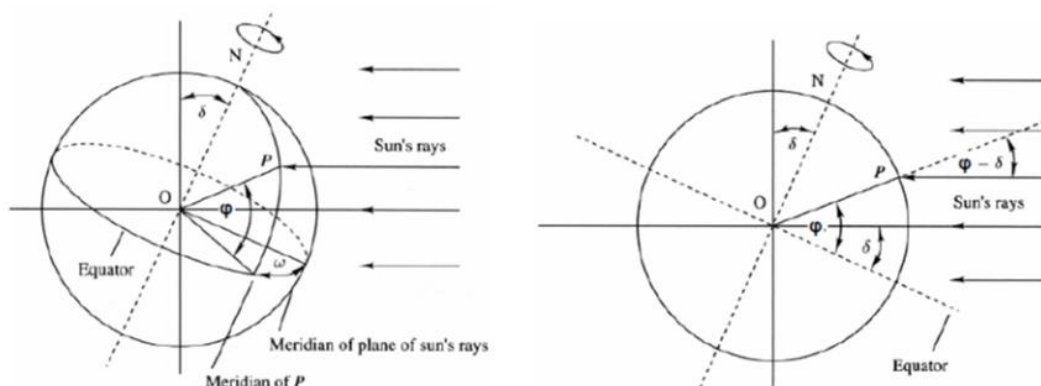
Εικόνα 3.7 Απεικόνιση γωνιών γ_s , θ_z (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).

Όπου,

φ : γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μας

δ : γωνία ηλιακής απόκλισης (σχέση 3.5)

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right] \quad (\text{Σχέση 3.5})$$



Εικόνα 3.8 Απεικόνιση γωνιών φ , δ (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).

ω : η ωριαία γωνία (σχέση 3.6)

$$\omega = \frac{(t_{\tau.\eta\lambda.\omega.} - 12:00) \cdot 360^\circ}{24} \quad (\text{Σχέση 3.6})$$

Επομένως αν γνωρίζουμε φ (γεωγ. πλάτος), n (ημέρα του χρόνου) δηλαδή τη γωνία απόκλισης δ και $t_{\tau.\eta\lambda.\omega.}$ (δηλαδή την ωριαία γωνία) μπορούμε από τις προηγούμενες σχέσεις να βρούμε τη γωνία γ_c και το α που προσδιορίζουν πλήρως τη θέση του ηλίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Duffie and Beckman, 2013).

Βλέπουμε ότι για τον προσδιορισμό της ωριαίας γωνίας ω χρειάζεται να γνωρίζουμε την τοπική ηλιακή ώρα $t_{\tau.\eta\lambda.\omega.}$.

$$t_{\tau.\eta\lambda.\omega.} = t_{\tau.\omega.\rho.} + \frac{\lambda_z - \lambda_{\tau\omega\rho}}{15^\circ} + \frac{E(t)}{60} \quad (\text{Σχέση 3.7})$$

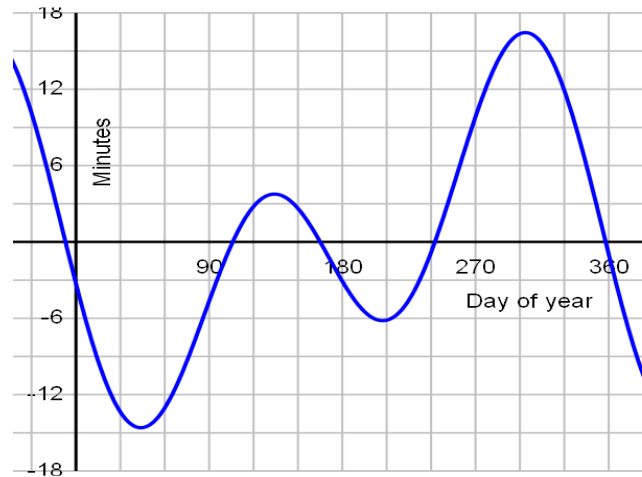
Όπου λ_z γεωγραφικό πλάτος και $\lambda_{\tau\omega\rho}$ γεωγραφικό μήκος.

Η τοπική ηλιακή ώρα εξαρτάται από την τοπική ώρα ρολογιού και από τις εξισώσεις χρόνου. Η τοπική ώρα ρολογιού είναι η πραγματική ώρα σε δεκαδική μορφή για την πραγματοποίηση των υπολογισμών ενώ οι εξισώσεις χρόνου E_t και B προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις (3.8 και 3.9 αντίστοιχα) (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).

$$E_t = 9.87 \cdot \sin 2B - 7.53 \cdot \cos B - 1.5 \cdot \sin B \quad (\text{Σχέση 3.8})$$

$$B = (n - 81) \frac{360}{364} \quad (\text{Σχέση 3.9})$$

Υπάρχει απόκλιση μεταξύ πραγματικής ώρας και τοπικής ηλιακής ώρας λόγω της ελλειπτικής τροχιάς και της κλίσης του άξονα της γης. Η απόκλιση λόγω ελλειπτικής τροχιάς διορθώνεται από την εξίσωση E_t ενώ η απόκλιση λόγω κλίση του άξονα της γης από την εξίσωση B (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).



Εικόνα 3.9 Διάγραμμα εξίσωσης E_t (Σουλιώτης και Πανάρας, 2019).

Γνωρίζοντας πλέον την πραγματική προσπίπτουσα ακτινοβολία για επιφάνεια με κλίση G_d μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη N_{sol} από τη σχέση 3.10 (Duffie and Beckman, 2013).

$$N_{sol} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{T_{st} - T_a}{G_d} \quad (\text{Σχέση 3.10})$$

Όπου αποδεικνύεται ότι $F_R \cdot (\tau\alpha) = K_{\tau\alpha} \cdot \eta_o$ και $F_R \cdot U_L = U_o$ (Duffie and Beckman, 2013).

η_o : Συντελεστής μηδενικών απωλειών [-].

U_o : Συντελεστής θερμικής απώλειας ηλιακού συλλέκτη [W/m²·K].

$K_{\tau\alpha}$: Διορθωτικός συντελεστής ο οποίος δίνεται από τη σχέση 3.11

$$K_{\tau\alpha} = 1 - b_o \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (\text{Σχέση 3.11})$$

b_o : Σταθερά που ονομάζεται συντελεστής τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης (Duffie and Beckman, 2013).

Έτσι έχοντας προσδιορίσει τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη μπορούμε να βρούμε το φορτίο του από την σχέση 3.12 (Duffie and Beckman, 2013).

$$Q_{sol} = N_{sol} \cdot G_d \cdot A_{sol} \quad (\text{Σχέση 3.12})$$

Κεφάλαιο 4: Αντλίες Θερμότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τον τρόπο λειτουργίας των αντλιών θερμότητας καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών. Επίσης θα αναφερθούμε στα είδη αντλιών θερμότητας που κυκλοφορούν στην αγορά και τον τρόπο που μπορούν να εκμεταλλευτούν.

4.1 Αρχή λειτουργίας των Αντλιών Θερμότητας

Σύμφωνα με το 2ο θερμοδυναμικό νόμο σε όλες τις αυθόρμητες (μη αντιστρεπτές) διεργασίες η εντροπία αυξάνεται, δηλαδή σε ένα σύστημα η θερμότητα μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σώμα χαμηλότερης και ποτέ προς την αντίθετη κατεύθυνση (McQuiston and Parker, 2003).

Για την αντίστροφη διεργασία απαιτείται πάντοτε κατανάλωση κάποιας μορφής έργου (ενέργειας). Επομένως, δίνοντας κάποιο ποσό ενέργειας (μηχανικό έργο ή θερμότητα) στην αντλία θερμότητας μπορούμε να έχουμε την αντίστροφη διεργασία, δηλαδή η αντλία θερμότητας μας επιτρέπει να έχουμε μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας. Έτσι για παράδειγμα, το χειμώνα η αντλία θερμότητας αφαιρεί (αντλεί) θερμότητα από το περιβάλλον (χαμηλή θερμοκρασία) και την διοχετεύει στο εσωτερικό του σπιτιού (υψηλότερη θερμοκρασία) προκειμένου να αυξήσει τη θερμότητα του εσωτερικού χώρου ενώ το καλοκαίρι γίνεται το αντίθετο (McQuiston and Parker, 2003).

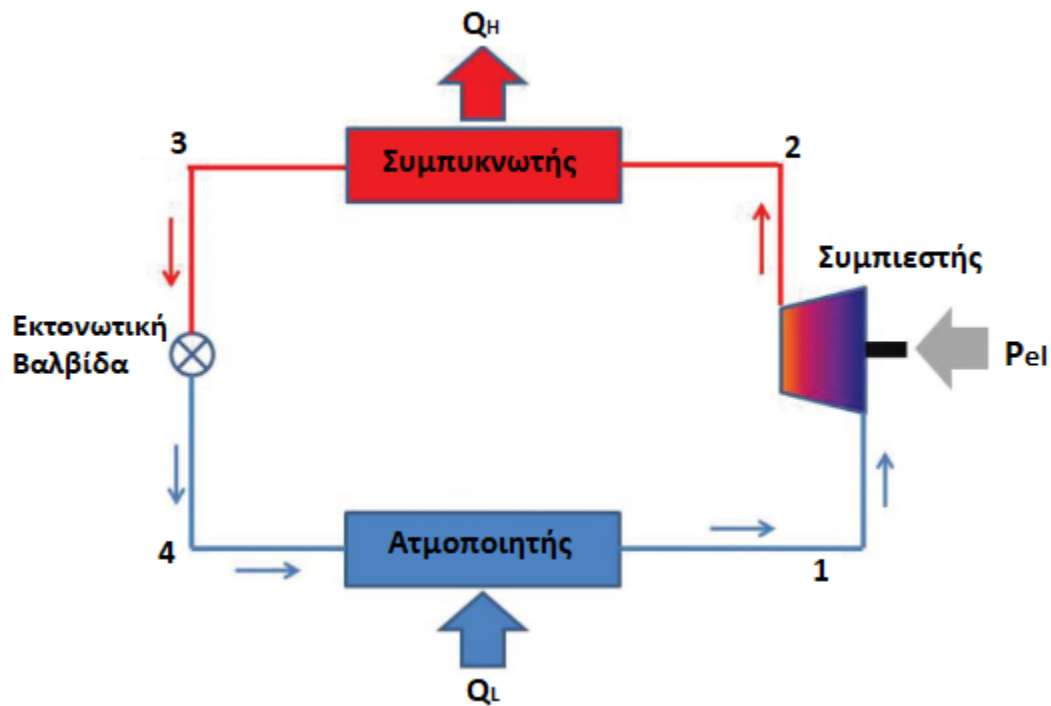
Επίσης ο τρόπος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας μπορεί να εκμεταλλευτεί με σκοπό την θέρμανση του νερού για οικιακή χρήση.

Βάσει της θερμοδυναμικής, τα πιο πάνω επιβεβαιώνονται από τη εξίσωση της εντροπίας

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{dq}{T} \quad (\text{Σχέση 4.1})$$

Η αντλία θερμότητας αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1 :

- ατμοποιητής
- συμπιεστή
- συμπυκνωτή
- βαλβίδα στραγγαλισμού

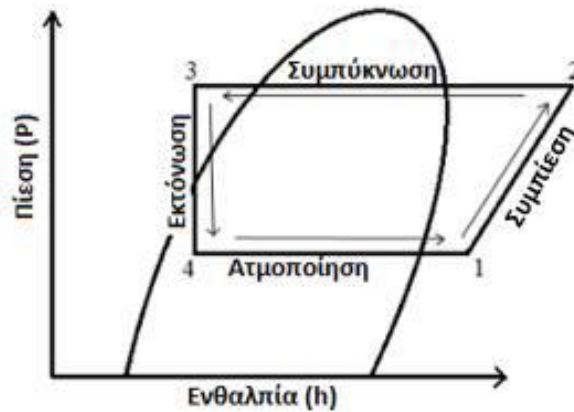


Εικόνα 4.1 Διάταξη αντλίας θερμότητας (Crall, 2015).

Η λειτουργία μιας αντλίας θερμότητας βασίζεται στη φυσική ιδιότητα, όπου το σημείο βρασμού ενός υγρού αυξάνεται με τη πίεση. Με τη μείωση της πίεσης, ένα μέσο μπορεί να ατμοποιηθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (κατά τη λειτουργία του ατμοποιητή) ενώ με την αύξηση της πίεσης θα οδηγήσει σε υψηλό σημείο βρασμού (κατά τη λειτουργία του συμπυκνωτή). Αυτό, γίνεται πιο κατανοητό στη περιγραφή του κύκλου της αντλίας θερμότητας (McQuiston and Parker, 2003).

4.2 Περιγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου της αντλίας θερμότητας

Αρχικά, περιγράφεται ο θερμοδυναμικός κύκλος της αντλίας θερμότητας για θέρμανση. Το εργαζόμενο μέσο που βρίσκεται σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία (κατάσταση 4), ατμοποιείται στον ατμοποιητή και γίνεται ατμός (κατάσταση 1). Σε αυτή τη διεργασία απαιτείται πρόσδοση θερμότητας στον ατμοποιητή. Στη συνέχεια, ο συμπιεστής συμπιέζει το εργαζόμενο μέσο αυξάνοντας τη θερμοκρασία και την πίεσή του και το οδηγεί μέσα στον συμπυκνωτή (κατάσταση 2) για να συμπυκνωθεί. Κατά τη συμπύκνωση του μέσου σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία, απελευθερώνεται θερμότητα, την οποία αξιοποιούμε και είναι 2,5 με 3,5 φορές περίπου μεγαλύτερη από την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε κατά την συμπίεση του εργαζόμενου μέσου. Τέλος, το εργαζόμενο μέσο (κατάσταση 3) οδηγείται στη εκτονωτική βαλβίδα όπου μειώνεται η πίεση και η θερμοκρασία του και μετατρέπεται σε ένα μείγμα από υγρό και ατμό (κατάσταση 4). Έτσι ολοκληρώνεται ο θερμοδυναμικός του κύκλος και στη συνέχεια μπορεί να ατμοποιηθεί ξανά μέσω του ατμοποιητή (Crall, 2015).

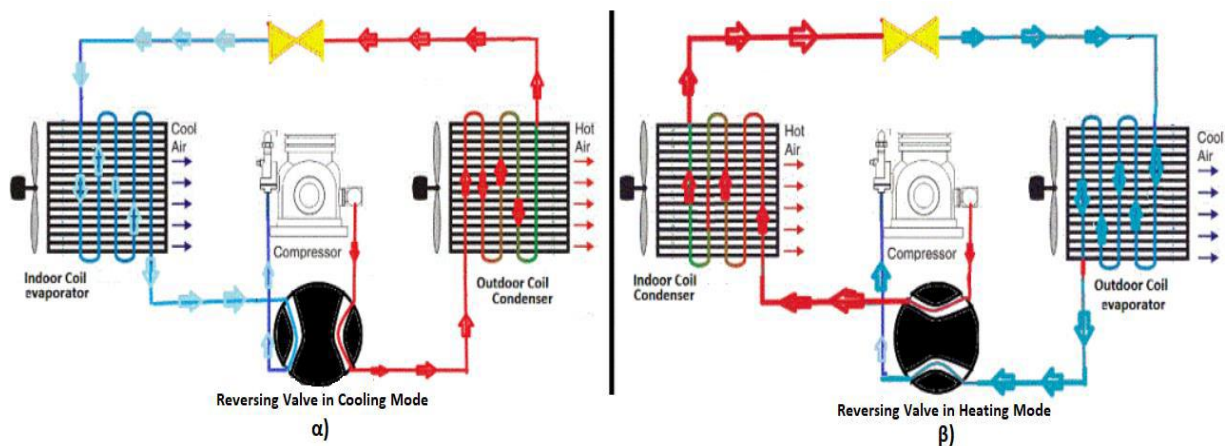


Εικόνα 4.2 Θερμοδυναμικός κύκλος αντλίας θερμότητας (Bolaaji, 2011).

Με λίγα λόγια, δαπανάται ένα ποσό ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε ένα ποσό θερμότητας να αποκτήσει καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, δηλαδή υψηλότερη θερμοκρασία και να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες για θέρμανση.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της αντλίας θερμότητας είναι ότι μπορεί να παρέχει το χειμώνα θέρμανση και παράλληλα η ίδια μονάδα το καλοκαίρι μπορεί να αναστρέφει τη λειτουργία της και να παρέχει ψύξη.

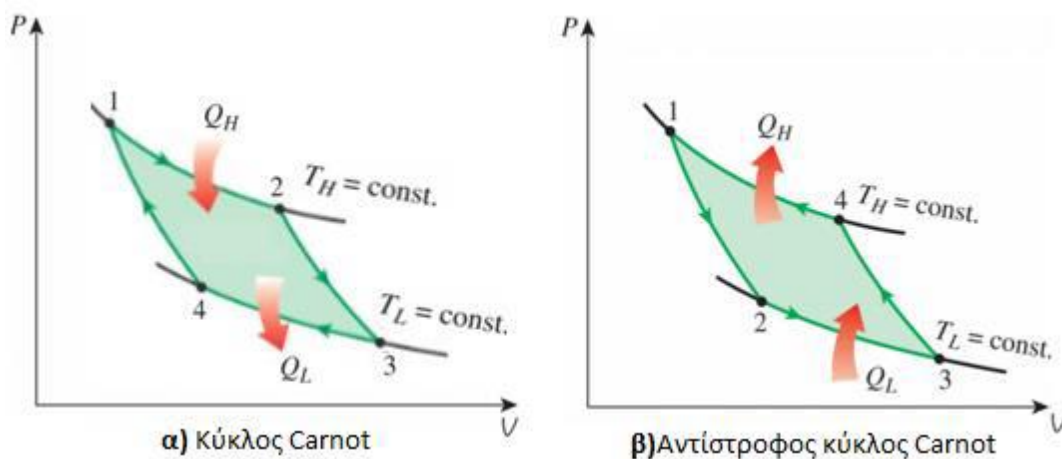
Ανάλογα με την λειτουργία που θέλουμε να πετύχουμε (ψύξη ή θέρμανση) ο συμπυκνωτής μετατρέπεται σε ατμοποιητή και αντίστροφα. Επειδή όμως, στο συμπιεστή η αναρρόφηση και η κατάθλιψη είναι συγκεκριμένες και δηλαδή το ρευστό δεν μπορεί να περάσει ανάποδα από μέσα του η αναστροφή του κύκλου επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μιας ειδικής τετράοδης βαλβίδας που είναι ενσωματωμένη στην αντλία θερμότητας. Έτσι, κατά τη λειτουργία της ψύξης (π.χ. το καλοκαίρι), η θερμότητα αναρροφάται από τον χώρο που απαιτείται να κλιματιστεί και αποδίδεται σε μία εξωτερική πηγή θερμότητας (αέρας, νερό, γη), ενώ κατά τη λειτουργία της θέρμανσης (π.χ. το χειμώνα) έχουμε αναστροφή του ψυκτικού κύκλου και έτσι η θερμότητα αναρροφάται από μία εξωτερική πηγή θερμότητας (αέρας, νερό, γη) και αποδίδεται στον χώρο που απαιτείται να θερμανθεί (Evatt, 2015).



Εικόνα 4.3 α) Λειτουργία της μονάδας σε Ψύξη β) Λειτουργία της μονάδας σε Θέρμανση (Evatt, 2015).

4.3 Κύκλος Carnot

Η αντλία θερμότητας είναι ουσιαστικά μια θερμική μηχανή που λειτουργεί όπως ο κύκλος Carnot αλλά με αντίθετη φορά. Η λειτουργία του αντίστροφου κύκλου Carnot αποτελείται από τέσσερις μεταβολές όπως και ο κύκλος Carnot, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές (ισεντροπικές), που εκτελούνται μεταξύ μιας θερμής δεξαμενής με θερμοκρασία T_H και μιας ψυχρής δεξαμενής με θερμοκρασία T_C (Μανωλάκος, 2020).



Εικόνα 4.4 α) Κύκλος Carnot β) Αντίστροφος κύκλος Carnot (Μανωλάκος, 2020).

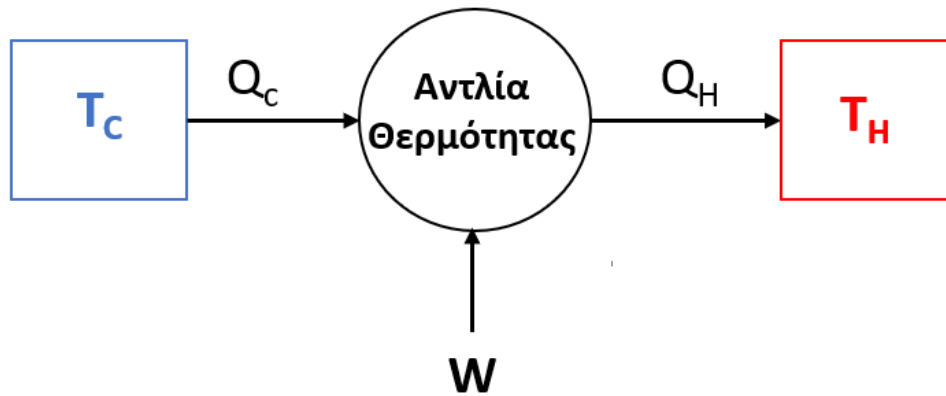
Στο αντίστροφο κύκλο Carnot έχουμε τις πιο κάτω μεταβολές:

- Μεταβολή 1-2: το εργαζόμενο μέσο υψηλής θερμοκρασίας T_H εκτονώνεται ισεντροπικά και οδηγείται σε χαμηλή θερμοκρασία T_L .

- Μεταβολή 2-3: Γίνεται ισοθερμικά πρόσδοση ποσού θερμότητας Q_L στο εργαζόμενο μέσο χαμηλής θερμοκρασίας, T_L .
- Μεταβολή 3-4: Το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται ισεντροπικά και οδηγείται σε υψηλή θερμοκρασία T_H .
- Μεταβολή 4-1: Το εργαζόμενο μέσο υψηλής θερμοκρασίας απορρίπτει ισοθερμικά ποσό θερμότητας Q_H . Κατά τη μεταβολή αυτή, το εργαζόμενο μέσο συμπυκνώνεται, δηλαδή από κορεσμένο ατμός γίνεται κορεσμένο υγρό.

Στις ιδανικές συνθήκες βαθμός απόδοσης του κύκλου Carnot δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (\text{Σχέση 4.2})$$



Εικόνα 4.5 Λειτουργία αντλίας θερμότητας (Μανωλάκος, 2020).

Εφαρμόζοντας το 1^ο θερμοδυναμικό αξίωμα (αρχή διατήρησης επίσης ενέργειας) γύρω από μία αντλία θερμότητας έχουμε:

$$Q_C + W = Q_H \quad (\text{Σχέση 4.3})$$

Έτσι ο αντίστοιχος θεωρητικός βαθμός απόδοσης αντλίας θερμότητας ορίζεται ως ο συντελεστής συμπεριφοράς COP και δίνεται από τη σχέση:

$$COP_{th} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (\text{Σχέση 4.4})$$

Δηλαδή ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται, όσο μειώνεται η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην πηγή και τον αποδέκτη θερμότητας.

Η πιο πάνω σχέση (4.4) δίνει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να έχει ο συντελεστής συμπεριφοράς σε μια αντλία θερμότητας.

Στην πραγματικότητα, ο συντελεστής συμπεριφοράς μιας αντλίας θερμότητας C.O.P (coefficient of performance) ορίζεται ως ο λόγος θερμικής ισχύος (Q_H) που αποδίδει η αντλία θερμότητας προς την ηλεκτρική ισχύ (Q_{el}) που καταναλώνει:

$$COP = \frac{Q_H}{Q_{el}} \quad (\text{Σχέση 4.5})$$

Από τα πιο πάνω γίνεται κατανοητό ότι όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής C.O.P, τόσο πιο αποδοτική η αντλία θερμότητας. Οι τιμές του C.O.P κυμαίνονται μεταξύ 2.8 και 5.2 ανάλογα με τον τύπο αντλίας θερμότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη λειτουργία θέρμανσης, το C.O.P μειώνεται όταν μειώνεται η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος

Τα αντίστοιχα ισχύουν για τη λειτουργία της ψύξης. Στη λειτουργία ψύξης, το αντίστοιχο του C.O.P είναι ο δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας E.E.R (Energy efficiency ratio), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$E.E.R. = \frac{Q_c}{Q_{el}} \quad (\text{Σχέση 4.6})$$

όπου Q_c : η ψυκτική ισχύς αντλίας θερμότητας [kW]

Επίσης, σε εγκαταστάσεις με ηλιακά ορίζεται ο ηλιακός συντελεστής συμπεριφοράς (Solar Coefficient of Performance) ως εξής:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{solar}} \quad (\text{Σχέση 4.7})$$

4.4 Είδη αντλιών θερμότητας

➤ Διάκριση αντλίας θερμότητας ανάλογα με το μέσο συναλλαγής (McQuiston and Parker, 2003).

Οι αντλίες θερμότητας, ανάλογα με το μέσο που συναλλάσσεται εξωτερικά του χώρου (εξωτερικός εναλλακτήρας) και το μέσο που συναλλάσσεται εσωτερικά επίσης χώρου (εσωτερικός εναλλακτήρας) κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα: Είναι ο πιο ευρέως διαδεδομένος τύπος αντλίας θερμότητας στη αγορά. Η εξωτερική μονάδα της αντλίας θερμότητας συναλλάσσεται με τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ η εσωτερική μονάδα συναλλάσσεται με τον αέρα του εσωτερικού χώρου. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αποτελούνται από δύο ή περισσότερες εσωτερικές μονάδες οι οποίες τοποθετούνται ξεχωριστά σε πολλούς κλιματιζόμενους χώρους του κτηρίου.
- Αντλίες θερμότητας αέρα-νερού: Το εξωτερικό στοιχείο της αντλίας θερμότητας συναλλάσσεται με τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ το εσωτερικό στοιχείο συναλλάσσεται με νερό που αξιοποιείται στο κτήριο. Συνήθως, αυτό το νερό κυκλοφορεί στο

υδραυλικό δίκτυο του κτηρίου και τελικά καταλήγει στις τερματικές μονάδες fan coils, ενδοδαπέδια θέρμανση ή δροσισμό. Χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μεγάλες εγκαταστάσεις κεντρικού κλιματισμού.

- Αντλίες θερμότητας νερού – αέρα: Το εξωτερικό στοιχείο της αντλίας θερμότητας αντλεί θερμότητα από το νερό ενώ η μεταφορά θερμότητας από και προς τον κλιματιζόμενο χώρο γίνεται μέσω του αέρα. Για παράδειγμα, η αντλία θερμότητας μπορεί να συναλλάσσει θερμότητα εξωτερικά με νερό το οποίο ζεσταίνεται μέσω της ηλιακής ενέργειας.
 - Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Αντλίες Θερμότητας νερού – νερού) Οι αντλίες αυτές συναλλάσσουν θερμότητα εξωτερικά με το έδαφος (είτε μέσω γεώτρησης, είτε από την θάλασσα, λίμνη) το οποίο έχει σχεδόν σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του χρόνου. Έτσι το καλοκαίρι απάγουν τη θερμότητα από το κτήριο και την αποδίδουν στο έδαφος, ενώ το χειμώνα απορροφούν τη θερμότητα από το έδαφος και την αποδίδουν στο κτήριο. Επειδή η θερμοκρασία του εδάφους είναι σταθερή, σε αντίθεση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα που έχει μεγάλες διακυμάνσεις, η γεωθερμική αντλία θερμότητας έχει πολύ καλύτερη απόδοση από τις αντλίες θερμότητας αέρα. Το μειονέκτημα τους είναι το μεγάλο αρχικό κόστος για τη κατασκευή της εγκατάστασης
- Τύποι αντλιών θερμότητας ανάλογα με τη θέση των υποσυστημάτων τους.
- Ενιαίες αντλίες θερμότητας ή αυτόνομες (τύπου MonoBlock ή compact) Όλα τα μέρη της συσκευής και οι μηχανισμοί βρίσκονται εγκατεστημένα σε ένα ενιαίο κέλυφος. Είναι κατασκευασμένες για εγκατάσταση σε εξωτερικό χώρο ώστε να αντλούν άμεσα ενέργεια από τον περιβάλλον-ατμοσφαιρικό αέρα και βρίσκονται κοντά στο σημείο όπου καταλήγουν οι κεντρικές σωληνώσεις του σπιτιού, οι οποίες κυκλοφορούν το νερό στα θερμαντικά σώματα.
 - Διαιρούμενες αντλίες θερμότητας (τύπου Split). Τα μέρη της συσκευής είναι διαχωρισμένα. Το ψυκτικό συγκρότημα το οποίο αντλεί ενέργεια από τον περιβάλλον-ατμοσφαιρικό αέρα βρίσκεται στη εξωτερική μονάδα ενώ στη εσωτερική μονάδα βρίσκεται το υδραυλικό συγκρότημα όπου είναι και το κομμάτι που συνδέονται οι σωλήνες σύνδεσης με τα θερμαντικά σώματα.
- Τύποι αντλιών θερμότητας ανάλογα με τον τρόπο που λειτουργούν:
- Τύπου inverter. Διαθέτουν έναν μηχανισμό που επιτρέπει να αυξομειώνουν τις στροφές του συμπιεστή και άρα κάθε στιγμή προσαρμόζουν την ισχύ ανάλογα με τις ανάγκες θέρμανσης ή ψύξης του χώρου με αποτέλεσμα την ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση κατά τη λειτουργία.
 - Τύπου on/off. Σε αντίθεση με τις τύπου inverter, λειτουργούν σε πλήρη ισχύ μέχρι να επιτευχθεί ο στόχος (θέρμανση ή ψύξη του χώρου επίσης) και μετά σταματούν (off) . Επανεκκινούν (on) όταν η θερμοκρασία του χώρου αποκλίνει και πάλι από την επιθυμητή.

Η ορθή επιλογή του κατάλληλου τύπου αντλίας γίνεται με βάση τις ανάγκες και απαιτήσεις του επενδυτή, με στόχο να έχει τη καλύτερη ενεργειακή απόδοση του συστήματος και με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

4.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντλίας θερμότητας

Η αντλία θερμότητας χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα (EN.E.EΠΙ.Θ.Ε., 2020) (The Renewable Energy Hub, 2020):

- Χαμηλό κόστος λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας των αντλιών θερμότητας εξαρτάται μόνο από την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος για την άντληση θερμότητας και συμπίεσης του ρευστού. Στις περισσότερες περιπτώσεις το κόστος αυτό είναι χαμηλότερο από το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μικρής εγκατάστασης συνηθισμένου συστήματος κεντρικής θέρμανσης με ζεστό νερό και θερμαντικά σώματα. Για παράδειγμα, αν αντλήσουμε 10kWh ενέργειας από το περιβάλλον συν 4kWh ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρειαστούμε για τη μετατροπή θα έχουμε συνολικά 14kWh ωφέλιμης θερμικής ενέργειας. Έτσι η εξοικονόμηση στο κόστος λειτουργίας φτάνει στο 50-75% σε σχέση με άλλα συστήματα θέρμανσης (π.χ. λέβητες)

- Είναι καθαρή και φιλική στο περιβάλλον ειδικά αν συνδυαστεί με γεωθερμική πηγή. (ASHRAE, 2020)

Το περισσότερο ποσό ενέργειας που χρειάζονται το αντλούν από το περιβάλλον. Οι αντλίες θερμότητας με υψηλό ονομαστικό βαθμό απόδοσης (επίσης και οι ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας) κατατάσσονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

- Εύκολη εγκατάσταση και πληθώρα επιλογών διαμόρφωσης. (ASHRAE, 2020)

Η εγκατάσταση της μονάδας είναι απλή τόσο για κάθετη όσο και για οριζόντια εγκατάσταση όπως και για κρυφές θέσεις, επίσης οι μονάδες είναι διαθέσιμες για πολλαπλές ηλεκτρικές διαμορφώσεις. Γενικά οι αντλίες θερμότητας είναι κατάλληλες για χώρους που απαιτούν πολλές ζώνες μεμονωμένου ελέγχου θερμοκρασίας.

- Χαμηλό κόστος συντήρησης και υψηλή ασφάλεια λειτουργίας.

Χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια και ενέργεια από το περιβάλλον χωρίς ορυκτά καύσιμα και καύσεις όπως σε άλλα συστήματα και δεν χρειάζονται κάθε χρόνο συντήρηση όπως συμβαίνει με τους λέβητες πετρελαίου και αερίου. Η λειτουργία τους μπορεί να συγκριθεί με αυτή ενός air condition και άρα έχει μηδαμινά έξοδα συντήρησης.

- Θέρμανση και δροσισμός με μία μόνο μονάδα αντιστρέφοντας τον κύκλο λειτουργίας επίσης αντλίας θερμότητας παράγεται θέρμανση ή δροσισμός αντίστοιχα.

- Μπορούν να συνδυαστούν αποδοτικά με τερματικές μονάδες χαμηλών θερμοκρασιών. Για παράδειγμα, μπορούν να συνδυαστούν με fan coils, ενδοδαπέδιο σύστημα και με άλλα θερμαντικά σώματα). Επίσης, μπορεί να παράγει ζεστό νερό χρήσης για όλη τη διάρκεια του έτους.

Μερικά από τα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις αντλίες θερμότητας είναι τα εξής:

- Έχουν υψηλό αρχικό κόστος, το οποίο επίσης αποσβένεται μετά από 2-3 χρόνια λειτουργίας (The Renewable Energy Hub, 2020).
- Οι αντλίες θερμότητας αέρα μπορεί να είναι θορυβώδεις λόγω του ανεμιστήρα που υπάρχει στην εγκατάστασή τους (ASHRAE, 2020).
- Οι αντλίες θερμότητας που έχουν ως πηγή άντλησης το έδαφος ή το νερό χρειάζονται χώρο για την εγκατάστασή τους (ASHRAE, 2020).
- Οι αντλίες που έχουν ως πηγή θερμότητας το αέρα του περιβάλλοντος, δεν μπορούν να δουλέψουν σε περιβάλλον με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 5 °C) (The Renewable Energy Hub, 2020).

Κεφάλαιο 5: Διερεύνηση σεναρίων

5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα τρία σενάρια διατάξεων. Η προσομοίωση έγινε στο Matlab, το οποίο είναι μία πλατφόρμα προγραμματισμού και μαθηματικών υπολογισμών που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεδομένων, την ανάπτυξη αλγορίθμων και τη δημιουργία μοντέλων. Για κάθε σενάριο αναφέρονται αναλυτικά τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν, οι μαθηματικές σχέσεις που τα διέπουν, η μεθοδολογία και το μαθηματικό μοντέλο που ακολουθήθηκε.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε σενάριο οι διατάξεις μελετήθηκαν σε θεωρητικό επίπεδο και για τους υπολογισμούς των φορτίων κατά την προσομοίωση έγιναν οι ακόλουθες υποθέσεις:

- Τα συστήματα που προσομοιώνονται βρίσκονται στην περιοχή της Αττικής.

Η πρώτη υπόθεση έγινε διότι κάποιες από τις εξισώσεις που περιγράφονται στη συνέχεια διαθέτουν όρους (θερμοκρασία αέρα, ηλιακή ακτινοβολία), οι οποίοι προέρχονται από τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής (Argiriou et al., 1999)

- Τα συστήματα βρίσκονται σε κτίριο που αποτελεί κατοικία και προορίζονται για οικιακή χρήση και κατοικούν 3 άτομα.

Η δεύτερη υπόθεση έγινε για τον υπολογισμό των απαιτούμενων φορτίων κατανάλωσης ZNX και την επιλογή των παραμέτρων των συστημάτων των διατάξεων από τον Κ.Εν.Α.Κ. (ΤΕΕ, 2017α).

- Για τους ωριαίους υπολογισμούς των φορτίων που απαιτούν την χρήση νερού δικτύου T_i χρησιμοποιήθηκε η μέση θερμοκρασία νερού δικτύου για κάθε μήνα με βάση το ΤΕΕ. (ΤΕΕ, 2017β)

Η υπόθεση έγινε γιατί κρίθηκε πως οι διαφορές στην πραγματική τιμή της θερμοκρασίας με την μέση είναι αμελητέες για τα ποσά της συγκεκριμένης διερεύνησης καθώς αναλύονται σε ετήσια βάση.

- Ως αντιπροσωπευτική ημέρα χαμηλής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας επιλέχθηκε η 20/1 και ως αντιπροσωπευτική ημέρα υψηλής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας επιλέχθηκε η 1/8 (Argiriou et al., 1999).

Για την επίτευξη του τελικού στόχου επιλέχθηκε να γίνει μελέτη τριών σεναρίων.

Αρχικά στο πρώτο σενάριο αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών, σκοπός είναι ναδειχθεί πως λειτουργούν στην διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία της Αττικής και ποιος είναι ο αποδοτικότερος για τις συνθήκες αναφοράς. Στη συνέχεια επεμβαίνοντας στη αναλογία λίτρων/τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη της διάταξης εξάγονται περαιτέρω συμπεράσματα για το πως αντιδρούν οι συλλέκτες σε διαφορετικό εύρος κάλυψης αναγκών. Σκοπός αλλαγής της αναλογίας είναι να μελετηθεί η αναγκαιότητα των συλλεκτών για χρήση βοηθητικής πηγής με σκοπό την κάλυψη τυχόν μη ικανοποιούμενων απαιτήσεων στη θερμοκρασία του ZNX.

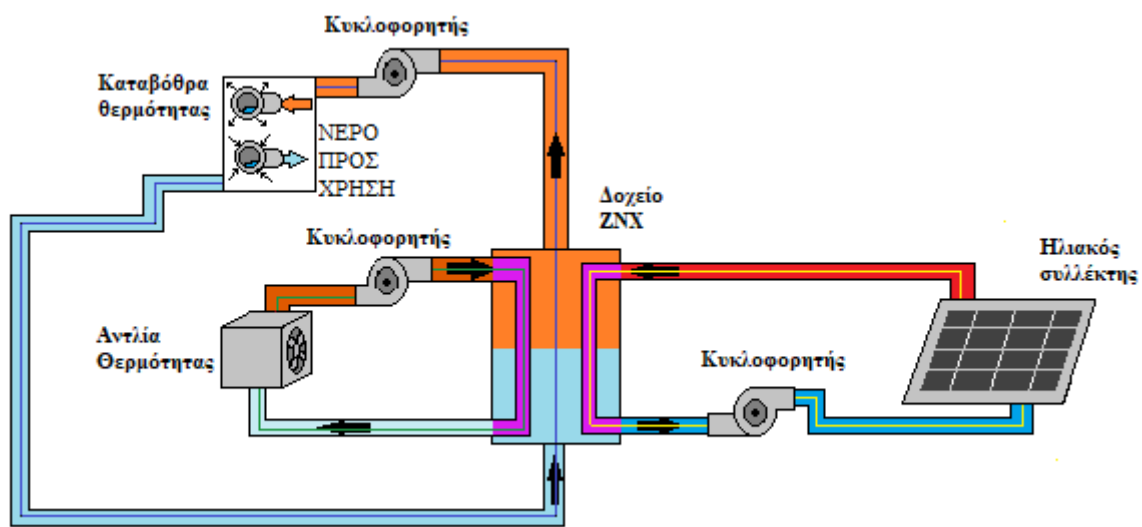
Σκοπός του δεύτερου σεναρίου είναι η εξέταση του πως οι θερμοκρασιακές συνθήκες της Αττικής επηρεάζουν μια αντλία θερμότητας στην διαδικασία κάλυψης ενεργειακών απαιτήσεων

κατοικιών για ζεστό νερό χρήσης στη διάρκεια ενός έτους. Ρυθμιστικός παράγοντας στη συγκεκριμένη διερεύνηση θα αποτελέσει η ισχύς της αντλίας θερμότητας. Επίσης σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της αποδοτικότερης Α/Θ είναι οι ώρες που κάνει να φτάσει το επιθυμητό set point για το ΖΝΧ που έχει ορισθεί, αλλά και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα προηγούμενα σενάρια παρέχουν πληροφορίες για τον μεμονωμένο τρόπο λειτουργίας του κάθε συστήματος που επιλέξαμε, επομένως στο τρίτο σενάριο θα προσομοιωθεί η συνδυαστική λειτουργία των αποδοτικότερων συστημάτων από τα προηγούμενα σενάρια και πως αυτή ξεχωρίζει από τις μεμονωμένες λειτουργίες αυτών.

Τελικός σκοπός είναι η ανάδειξη του συνδυασμού που ενεργειακά είναι ο πιο παραγωγικός για τις κατοικίες στην περιοχή της Αττικής, επίσης θερμοκρασιακά αλλά και από άποψη κατανάλωσης.

Η συνδυαστική διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1 Διάταξη συνδυασμένου συστήματος.

5.2 Σενάριο θέρμανσης ΖΝΧ με την χρήση ηλιακών συλλεκτών

Στο πρώτο σενάριο προσομοιώνεται η χρήση διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών για την θέρμανση ζεστού νερού χρήσης. Σκοπός της προσομοίωσης είναι η εύρεση των θερμικών κερδών και η παραγόμενη θερμότητα κάθε συλλέκτη, σε τι θερμοκρασία φτάνει το νερό της δεξαμενής καθώς και ο τρόπος που αποδίδουν ο καθένας ξεχωριστά σε ένα σύστημα ηλιακού συλλέκτη-δεξαμενής αποθήκευσης.

Για την εξαγωγή των ημερησίων θερμικών και θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε σαν πρότυπο η αναλογία 75l δεξαμενής /m² συλλέκτη στην εκάστοτε διάταξη. Συνεπώς οι διατάξεις απαρτίζονται από συλλέκτες 2 m² και δεξαμενή αποθήκευσης όγκου 150l και επιφάνειας 6.48m².

Για την περίπτωση της προσομοίωσης με διαφορετικές αναλογίες θα επιλεγεί ο αποδοτικότερος συλλέκτης από την παραπάνω διερεύνηση. Οι αναλογίες που επιλέχθηκαν για την

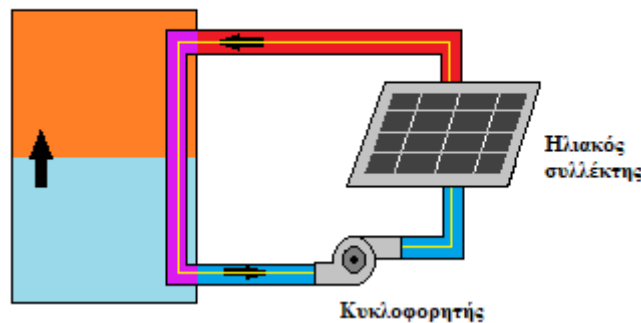
σύγκριση των αποτελεσμάτων με το βασικό πρότυπο είναι 25 l/m², 125 l/m² και 200 l/m². Επίσης τα τετραγωνικά των συλλεκτών παραμένουν σταθερά όταν αλλάζει η αναλογία l/m².

Τέλος θα γίνει σύγκριση του απομαστευμένου φορτίου με τις ανάγκες απαιτούμενου φορτίου από τον Κ.Εν.Α.Κ. (ΤΕΕ, 2017α)

5.2.1 Διάταξη

Το υπό μελέτη σενάριο περιλαμβάνει τα εξής συστήματα:

- Απλός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα.
- Ηλιακός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα.
- Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης.
- Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρος
- Δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης.



Εικόνα 5.2 Διάταξη Ηλιακού Συλλέκτη και δεξαμενής αποθήκευσης.

Χαρακτηριστικά ηλιακών συλλεκτών:

A_c : Επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη [m²].

Για την ημερήσια κατανομή των φορτίων επιλέχθηκε οι συλλέκτες να καταλαμβάνουν επιφάνεια 2 m².

η_0 : Συντελεστής μηδενικών απωλειών [-].

U_0 : Συντελεστής θερμικής απώλειας ηλιακού συλλέκτη [W/m²·K].

Οι συντελεστές η_0 και U_0 για κάθε είδος συλλέκτη υπολογίστηκαν με βάση τις προτεινόμενες τιμές του ΤΕΕ. (ΤΕΕ, 2011)

T_c : Θερμοκρασία νερού συλλέκτη [°C].

Η θερμοκρασία T_c είναι κάθε ώρα της ημέρας ίδια με την θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής.

Χαρακτηριστικά δεξαμενής:

A_s : Επιφάνεια δεξαμενής αποθήκευσης [m²].

U_i : Συντελεστής θερμικής απώλειας δεξαμενής [W/m²·K].

M : Μάζα δεξαμενής αποθήκευσης [kg].

Η τιμή της επιφάνειας, ο συντελεστής απώλειας και η μάζα της δεξαμενής επιλέχθηκαν με βάση τα αντίστοιχα τυπικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών της αγοράς για οικιακή χρήση.

T_{st} : Θερμοκρασία νερού δεξαμενής [°C].

Για τους υπολογισμούς των φορτίων των ηλιακών συλλεκτών επιλέχθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά(Πίνακας 5.1):

Πίνακας 5.1 Αντιπροσωπευτικές τιμές για τις παραμέτρους απόδοσης διάφορων τύπων ηλιακών συλλεκτών.(TEE, 2011), (Duffie and Beckman, 2012)

	n_o	U_o
Απλός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα	0.86	21.5
Ηλιακός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα	0.82	7.5
Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης	0.75	5
Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρα	0.57	1.82
Συντελεστής τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης	$b_o = 0.15$	
Γεωγραφικό πλάτος (Αττικής)	$\lambda_z = 30^\circ$	
Γεωγραφικό μήκος (Αττικής)	$\lambda_{top} = 23.72^\circ$	

Για την δεξαμενή αποθήκευσης ZNX του βασικού σεναρίου επιλέχθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά (Πίνακας 5.2):

Πίνακας 5.2 Αντιπροσωπευτικές τιμές για τις παραμέτρους της δεξαμενής αποθήκευσης.

Δεξαμενή αποθήκευσης	
Επιφάνεια δεξαμενής αποθήκευσης	6.48 m ²
Όγκος δεξαμενής αποθήκευσης	150 l
Συντελεστής απωλειών δεξαμενής αποθήκευσης	0.4 W/ m ² *K

Για την διερεύνηση με διαφορετικές αναλογίες επιλέχθηκαν τα εξής εύρη τιμών αποθηκευτικού όγκου δεξαμενής/επιφάνεια συλλέκτη. (Πίνακας 5.3) Συγκεκριμένα για την μελέτη του πως αντιδράει ο συλλέκτης στην κάλυψη μικρότερων αναγκών έγινε δοκιμή με δεξαμενή αποθήκευσης 50 l. Αντίστοιχα για την μελέτη του τρόπου κάλυψης μεγαλύτερων αναγκών έγινε διερεύνηση για δεξαμενές 250 l και 400 l, δεξαμενές που έχουν όγκο 1.5-2.5 φορές μεγαλύτερο από την δεξαμενή αναφοράς των 150 l:

Πίνακας 5.3 Εύρος τιμών για τις παραμέτρους της δεξαμενής αποθήκευσης.

Δεξαμενή αποθήκευσης	
Εύρος επιφάνεια δεξαμενής αποθήκευσης	[2.16-17.28] m ²
Εύρος όγκου δεξαμενής αποθήκευσης	[50-400] l

5.2.2 Μεθοδολογία υπολογισμών

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία έγιναν οι υπολογισμοί των θερμικών κερδών από τους συλλέκτες λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και το πώς αυτή εκμεταλλεύεται για την θέρμανση του νερού της δεξαμενής (flowchart 5.1). Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά των συστημάτων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα (5.2.1).

1. Υπολογισμός διορθωμένης ακτινοβολίας G_D για κεκλιμένο επίπεδο ίση με την κλίση του συλλέκτη για όλο το έτος.
2. Υπολογισμός απωλειών δεξαμενής Q_i από τις ώρες 01:00 μέχρι 06:00.
Αυτές τις ώρες δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως η διάταξη αλληλοεπιδρά μόνο με το περιβάλλον έτσι υπολογίζονται απώλειες εξαρτώμενες από την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής.
3. Υπολογισμός θερμοκρασίας T_{st} της δεξαμενής από τις ώρες 07:00 έως 19:00.
Τις συγκεκριμένες ώρες μέσα στο έτος εκπέμπεται ακτινοβολία στην περιοχή της Αττικής. Υπολογίζονται τα θερμικά κέρδη από τον συλλέκτη και παράλληλα οι απώλειες της δεξαμενής με σκοπό μια πιο ρεαλιστική εικόνα κατά το ισοζύγιο ενέργειας.
4. Στις 20:00 γίνεται απομάστευση όγκου νερού ίσο με έναν όγκο δεξαμενής και τοποθετείται πάλι νερό δικτύου.
5. Υπολογίζονται οι απώλειες Q_i της δεξαμενής τις ώρες 21:00-24:00
6. Ακολουθούνται σε επανάληψη τα βήματα 2 έως 5 για όλη τη διάρκεια του έτους.

5.2.3 Μαθηματικό μοντέλο

Διόρθωση ακτινοβολίας για συλλέκτη με κλίση:

Έχοντας λάβει υπόψιν τις ηλιακές γεωμετρίες που αναφέρθηκαν στο 2ο κεφάλαιο και τα χαρακτηριστικά της διάταξης για τους συλλέκτες (Πίνακας 5.1) υπολογίζεται η γωνία πρόσπτωσης θ για κάθε ώρα και μέρα του έτους από τη σχέση 3.2.

Στη συνέχεια με την χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων για την ακτινοβολία στην Αττική γίνεται διόρθωση της ηλιακής ακτινοβολία που προσπίπτει στον υπό κλίση συλλέκτη με τη χρήση της σχέσης 3.1 και υπολογίζεται η ζητούμενη G_D .

Τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία βρίσκονται στο excel...

Υπολογισμός απωλειών δεξαμενής:

$$Q_l = U_t \cdot A_t \cdot (T_{st} - T_a) \quad (\text{Σχέση 5.1})$$

Όπου T_a η θερμοκρασία εξωτερικού αέρα με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα της Αττικής.

Υπολογισμός θερμικών φορτίων ηλιακού συλλέκτη:

Για τον συλλέκτη το φορτίο Q_{sol} δίνεται από τη σχέση 3.12. Ο πλήρης προσδιορισμός του φορτίου απαιτεί τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης N_{sol} αλλά και του συντελεστή $K_{τα}$ οι οποίοι δίνονται από τις σχέσεις 3.10 και 3.11 αντίστοιχα.

Η ενέργεια της δεξαμενής υπολογίζεται από την σχέση:

$$E = Q \cdot t = m \cdot C_p \cdot (T_{st2} - T_{st1}) \quad (\text{Σχέση 5.2})$$

$$E = Q_{sol} - Q_l \quad (\text{Σχέση 5.3})$$

C_p : θερμοχωρητικότητα νερού, 4186 (J/kg·°C)

T_{st2} : ζητούμενη θερμοκρασία δεξαμενής [°C].

T_{st1} : θερμοκρασία δεξαμενής την προηγούμενη ώρα [°C].

Υπολογισμός θερμοκρασίας δεξαμενής:

Γνωρίζοντας ότι η ενέργεια της δεξαμενής E και το φορτίο Q του συστήματος είναι ίσα για κάθε ώρα λειτουργίας από τη στιγμή που η διερεύνηση γίνεται σε ωριαία βάση, μέσω ισοζυγίου ενέργειας των σχέσεων 5.2 και 5.3 προκύπτει η θερμοκρασία T_{st} της δεξαμενής για κάθε ώρα της ημέρας (Σχέση 5.4)

$$T_{st} = T_{st2} = T_{st1} + \frac{E}{(m \cdot C_p)} \quad (\text{Σχέση 5.4})$$

Υπολογισμός απαιτούμενου θερμικού φορτίου ZNX:

$$Q_d = V_d \cdot C_p \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (\text{Σχέση 5.5})$$

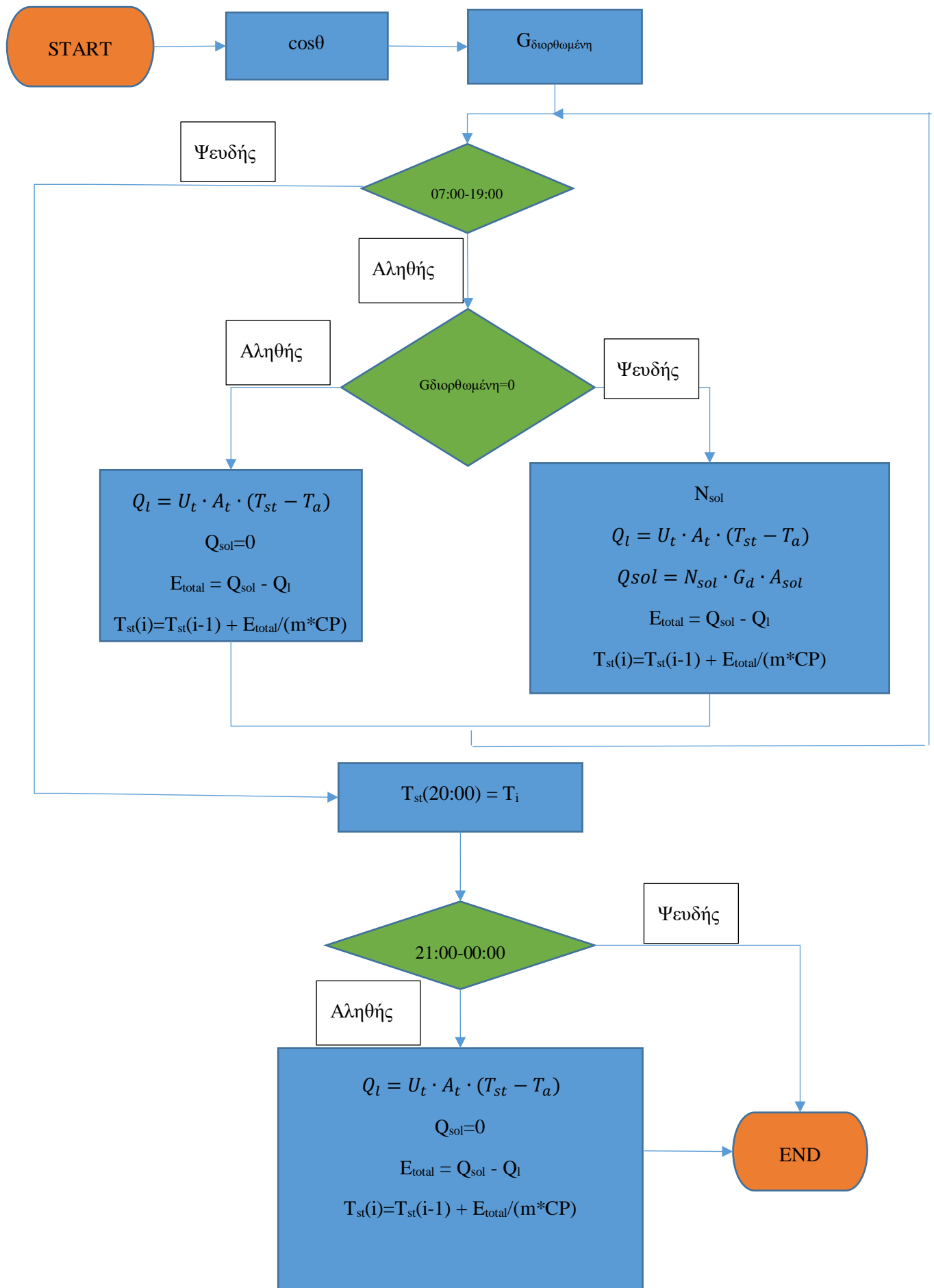
V_d : ημερήσιο φορτίο ZNX [l/ημέρα]

Για την κατοικία που επιλέχθηκε, στην οποία διαμένουν 3 άτομα το ημερήσιο φορτίο είναι 150 l/ημέρα (ΤΕΕ, 2017α).

ρ : Πυκνότητα νερού

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του απαιτούμενου ZNX και του μέσου ετήσιου νερού δικτύου για την περιοχή που βρίσκεται η κατοικία (ΤΕΕ, 2017α)

Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο του πρώτου σεναρίου.



Σχήμα 5.1: Flowchart αλγορίθμου πρώτου σεναρίου.

5.3 Σενάριο θέρμανσης ZNX με την χρήση A/Θ

Στο δεύτερο σενάριο διερευνάται ο τρόπος λειτουργίας των αντλιών θερμότητας μέσα στη διάρκεια της ημέρας. Εκτός από τα θερμικά κέρδη που συμβάλλει η αντλία θερμότητας στην δεξαμενή αποθήκευσης, δίνεται βάση και στις ώρες που απαιτεί το σύστημα μας ώστε να ικανοποιήσει την θερμοκρασιακή συνθήκη που έχει οριστεί ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις για ZNX.

Στο σενάριο αυτό επιλέχθηκε set point 45°C το οποίο οδηγεί στην παύση της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Η επιλογή αυτή έγινε με βάση τις προτεινόμενες τιμές ZNX σύμφωνα με τους Duffie και Beckman (2013).

Για την προσομοίωση επιλέχθηκε οι αντλίες θερμότητας να έχουν σταθερή ισχύ. Μέσα από ένα εύρος τιμών για την ισχύ της αντλίας γίνεται προσπάθεια της εύρεσης της αποδοτικότερης ισχύς για κάθε αντλία και πως αυτή αποδίδεται θερμοκρασιακά για το νερό της δεξαμενής, σε ώρες λειτουργίας της αντλίας αλλά και σε ηλεκτρική κατανάλωση.

5.3.1 Διάταξη

Το υπό μελέτη σενάριο περιλαμβάνει τα εξής συστήματα:

- Αντλία θερμότητας αέρα-νερού
- Γεωθερμική αντλία θερμότητας
- Δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης

Χαρακτηριστικά αντλιών θερμότητας:

F_{hp} : Παροχή αντλίας θερμότητας [kg/h].

Q_{hp} : Φορτίο αντλίας θερμότητας [W].

COP: Βαθμός απόδοσης αντλίας θερμότητας (Coefficient of Performance) [-].

Χαρακτηριστικά δεξαμενής αποθήκευσης:

Αναφέρονται αναλυτικά στην υποενότητα 5.2.1 και συγκεκριμένα οι τιμές που επιλέχθηκαν για αυτό το σενάριο στον Πίνακα 5.2.

Για τους υπολογισμούς κατά την διερεύνηση των αντλιών θερμότητας επιλέχθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά(Πίνακας 5.4):

Πίνακας 5.4 Αντιπροσωπευτικές τιμές για τις παραμέτρους της αντλίας θερμότητας.

Αντλία θερμότητας	
Παροχή αντλίας θερμότητας	256.9 kg/h
Εύρος ισχύος αντλίας θερμότητας	[2000-3000] W
Set point αντλίας θερμότητας	45 °C

5.3.2 Μεθοδολογία υπολογισμών 2^{ου} σεναρίου

Παρακάτω αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για να εξαχθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δεύτερου σεναρίου.

1. Εισαγωγή νερού δικτύου στην δεξαμενή στις 06:00 κάθε μέρας πριν την έναρξη των υπολογισμών.
2. Επιλέχθηκε η ώρα εκκίνησης της αντλίας να είναι στις 07:00 έτσι ώστε να συμπίπτει με την ώρα λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών προς διευκόλυνση της σύγκρισης των αποτελεσμάτων
3. Από τις 07:00 κάθε μέρα υπολογίζονται τα εξής μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη set point που έχει ορισθεί:
 - Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου νερού από την αντλία θερμότητας $T_{water,outlet}$.
 - Υπολογισμός διαφοράς θερμοκρασίας (ΔT) $T_{water-outlet} - T_{outdoor\ air}$ για αντλία θερμότητας αέρα-νερού ή $T_{water-outlet} - T_{ground\ source}$ για γεωθερμική αντλία θερμότητας.
 - Το COP της αντλίας θερμότητας
 - Υπολογισμός ηλεκτρική ενέργεια P_{el} που καταναλώνεται.
 - Υπολογισμός απωλειών δεξαμενής Q_i .
 - Υπολογισμός συνολικής ενέργειας E_{total} .
 - Υπολογισμός θερμοκρασίας νερού δεξαμενής T_{st} .
4. Την ώρα που ικανοποιείται το set point γίνεται απομάστευση όγκου νερού ίσο με έναν όγκο δεξαμενής.
5. Ακολουθούνται σε επανάληψη τα βήματα 1 έως 4 για όλη τη διάρκεια του έτους
6. Υπολογίζονται οι ετήσιες ώρες λειτουργίας για κάθε είδος αντλίας θερμότητας.

Τα παραπάνω, απεικονίζονται στο flowchart 5.2

5.3.3 Μαθηματικό μοντέλο

Υπολογισμός φορτίου αντλίας θερμότητας Q_{hp} :

Για το σενάριο αυτό επιλέχθηκε σταθερή ισχύς για την αντλία θερμότητας άρα το φορτίο Q_{hp} παραμένει σταθερό (Πίνακας 5.4)

Η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από την αντλία θερμότητας $T_{water-outlet}$ δίνεται από την σχέση:

$$T_{water-outlet} = T_{st} + \left(\frac{Q_{hp}}{F_{hp} \cdot Cp} \right) \quad (\text{Σχέση 5.6})$$

Το COP της αντλίας δίνεται από την σχέση (Mouzeviris and Papakostas, 2020):

$$y = 0.001 \cdot x^2 - 0.1534 \cdot x + 7.3775 \quad (\text{Σχέση 5.7})$$

Στην οποία ως y ορίζεται το COP και ως x το ΔT .

Με τον όρο ΔT προσδιορίζεται η διαφορά θερμοκρασίας $T_{\text{water-outlet}} - T_{\text{outdoor air}}$ για την αντλία θερμότητας αέρα-νερού ενώ για την γεωθερμική $T_{\text{water-outlet}} - T_{\text{ground source}}$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι έχει γίνει η υπόθεση πως η θερμοκρασία του εδάφους $T_{\text{ground source}}$ ταυτίζεται με την θερμοκρασία του νερού δικτύου T_i για κάθε μήνα (ΤΕΕ, 2010β) για την απλούστευση των υπολογισμών. Η πραγματική απόκλιση είναι μικρή για να επηρεάσει τα ποσά του συγκεκριμένου σεναρίου τα οποία τίθενται σε σύγκριση για ετήσια βάση.

Υπολογισμός ηλεκτρική ενέργεια P_{el} που καταναλώνεται:

$$P_{el} = \frac{Q_{hp}}{COP} \quad (\text{Σχέση 5.8})$$

Υπολογισμός απωλειών δεξαμενής Q_i :

Προσδιορίζεται από την σχέση 5.1

Η ενέργεια της δεξαμενής E υπολογίζεται ως εξής:

Προσδιορίζεται από την σχέση 5.2 ή από τη σχέση 5.9

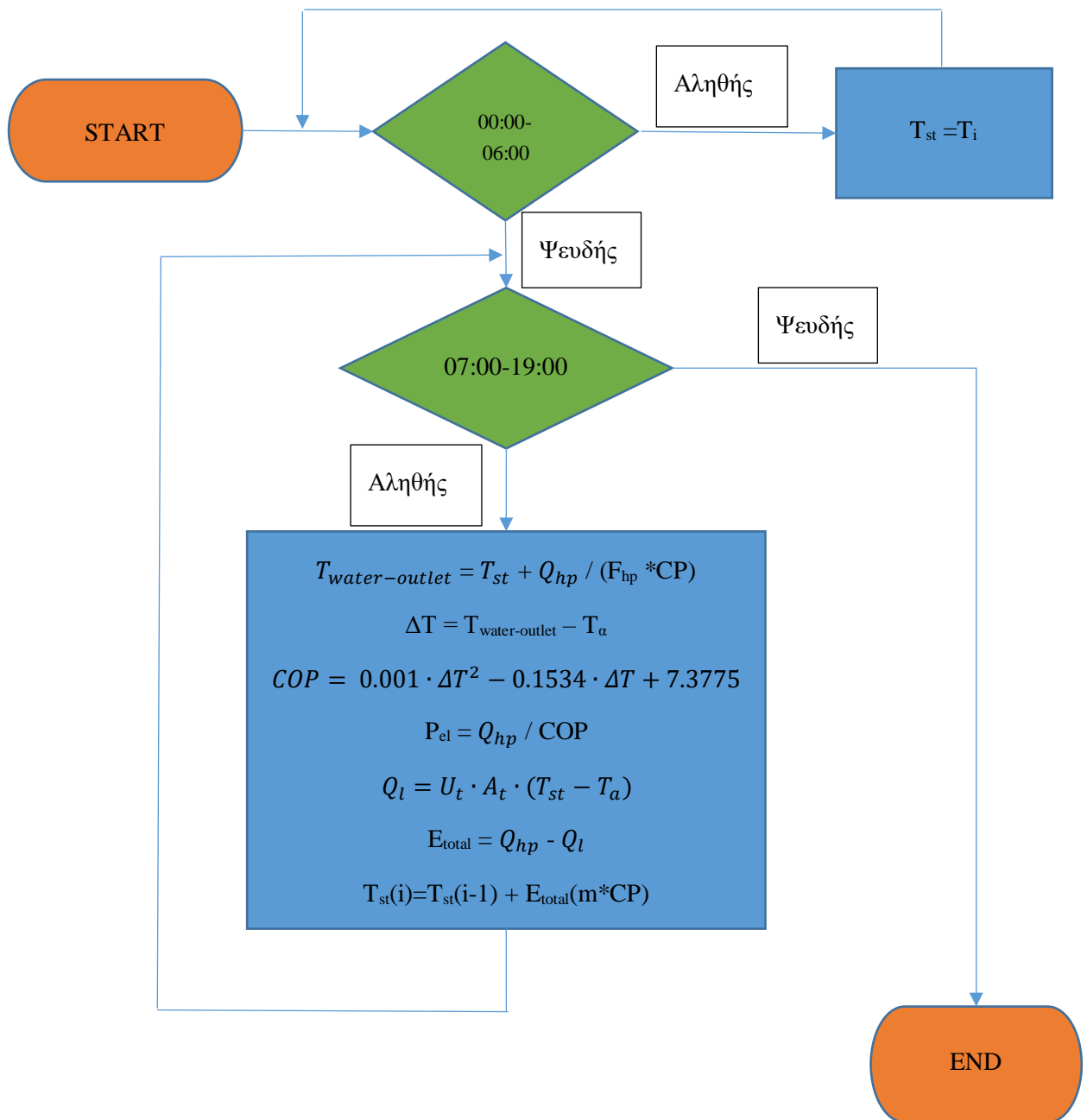
$$E = Q_{hp} - Q_i \quad (\text{Σχέση 5.9})$$

Υπολογισμός θερμοκρασίας δεξαμενής:

Γνωρίζοντας ότι η ενέργεια της δεξαμενής E και το φορτίο Q του συστήματος είναι ίσα για κάθε ώρα λειτουργίας από τη στιγμή που η διερεύνηση γίνεται σε ωριαία βάση, μέσω ισοζυγίου ενέργειας των σχέσεων 5.2 και 5.9 προκύπτει η θερμοκρασία T_{st} της δεξαμενής για κάθε ώρα της ημέρας

$$T_{st} = T_{st2} = T_{st1} + \frac{E}{(m \cdot Cp)} \quad (\text{Σχέση 5.10})$$

Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο του δεύτερου σεναρίου.



Σχήμα 5.2: Flowchart αλγορίθμου δεύτερου σεναρίου.

5.4 Σενάριο διερεύνησης ηλιακού συστήματος θέρμανσης ZNX υποβοηθούμενο από Α/Θ

Στο σενάριο αυτό θα αναλυθεί η συνδυαστική λειτουργία συστήματος θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης με ηλιακό συλλέκτη, υποβοηθούμενου από αντλία θερμότητας. Κατά τη διάρκεια του έτους υπάρχουν μέρες τις οποίες η ακτινοβολία δεν αρκεί για την κάλυψη των αναγκών ζεστού νερού χρήσης μόνο με την χρήση ηλιακών συλλεκτών. Σε τέτοιες περιπτώσεις το ενεργειακό έλλειμα μπορεί να αναπληρωθεί με την βοήθεια των αντλιών θερμότητας. Γίνεται λοιπόν σε αυτό το σενάριο διερεύνηση για το πώς το συνδυαστικό σύστημα επηρεάζει τα θερμικά φορτία και τη συνολική ενέργεια του συστήματος, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, την θερμική πρόσδοση στο σύστημα και τις ώρες λειτουργίας της αντλίας.

5.4.1 Διάταξη

Το υπό μελέτη σενάριο περιλαμβάνει τα εξής συστήματα:

- Αποδοτικότερος ηλιακός συλλέκτης (Σενάριο θέρμανσης ZNX με την χρήση ηλιακών συλλεκτών)
- Αποδοτικότερη αντλία θερμότητας (Σενάριο θέρμανσης ZNX με την χρήση Α/Θ)
- Δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης

Μετά τη διερεύνηση των στα σενάρια 5.2 και 5.3 επιλέχθηκαν τα αποδοτικότερα συστήματα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.5 Αντιπροσωπευτικές τιμές για τις παραμέτρους της συνδυαστικής διάταξης .

Ηλιακός συλλέκτης	
Επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη	2 m ²
Αντλία θερμότητας	
Ισχύς αντλίας θερμότητας	3000 w
Set point αντλίας θερμότητας	45°C
Δεξαμενή αποθήκευσης	
Χαρακτηριστικά δεξαμενής	Πίνακας 5.2

5.4.2 Μεθοδολογία υπολογισμών

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία οι αντλίες θερμότητας σε διάταξη με τους ηλιακούς συλλέκτες καλύπτουν το φορτίο που χρειάζεται έτσι ώστε το νερό της δεξαμενής να φτάσει το set point που έχει ορισθεί.

1. Υπολογισμός διορθωμένης ακτινοβολίας G_D για κεκλιμένο επίπεδο ίση με την κλίση του συλλέκτη για όλο το έτος.
2. Υπολογισμός απωλειών δεξαμενής Q_l από τις ώρες 01:00 μέχρι 06:00.

Αυτές τις ώρες δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως η διάταξη αλληλοεπιδρά μόνο με το περιβάλλον έτσι υπολογίζονται απώλειες εξαρτώμενες από την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής.

3. Υπολογισμός θερμοκρασίας T_{st} της δεξαμενής.

Έναρξη υπολογισμών στις 07:00, τη στιγμή που η θερμοκρασία της δεξαμενής ξεπεράσει το set point οι υπολογισμοί σταματάνε.

Στην Αττική η αργότερη ώρα που εκπέμπεται ακτινοβολία σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι στις 19:00, επομένως ακολουθούνται δύο διαδικασίες.

I) Αν μέχρι τις 19:00 η θερμοκρασία της δεξαμενής φτάσει το επιθυμητό set point, η αντλία θερμότητας δε συνεισφέρει καθόλου μέσα στην ημέρα. Επομένως υπολογίζεται το T_{st} της δεξαμενής με βάση τα ηλιακά κέρδη Q_{sol} και τις απώλειες της δεξαμενής Q_l .

Όταν το T_{st} ξεπεράσει το set point η μεθοδολογία συνεχίζεται ως εξής

4. Την ώρα που ικανοποιείται το set point πραγματοποιείται απομάστευση όγκου νερού ίσο με έναν όγκο δεξαμενής και τοποθετείται πάλι νερό δικτύου.
5. Υπολογίζονται οι απώλειες Q_l της δεξαμενής τις ώρες $t(T_{st} > \text{set point}) - 24:00$.

Συνεχίζονται οι υπολογισμοί για την επόμενη μέρα από το 2^ο βήμα και με την υπάρχουσα T_{st} .

II) Στην περίπτωση που μέχρι τις 19:00 δεν έχει φτάσει η διάταξη το επιθυμητό set point υπολογίζεται η T_{st} της δεξαμενής μέχρι εκείνη την ώρα με βάση τα ηλιακά κέρδη Q_{sol} και τις απώλειες της δεξαμενής Q_l .

4. Στις 19:00 ξεκινάει η λειτουργία της αντλίας θερμότητας, υπολογίζεται το P_{el} , το COP, το $T_{water, outlet}$ και το αντίστοιχο ΔT για την αντλία έτσι ώστε να φτάσει το T_{st} της δεξαμενής στο ζητούμενο set point.
5. Προσδιορίζεται η ώρα όπου το T_{st} γίνεται μεγαλύτερο από το set point. Την επόμενη ακριβώς ώρα πραγματοποιείται απομάστευση όγκου νερού ίσο με έναν όγκο δεξαμενής και τοποθετείται πάλι νερό δικτύου.
6. Από την ώρα της απομάστευσης και μέχρι τις 24:00 υπολογίζονται οι απώλειες Q_l τις δεξαμενής.

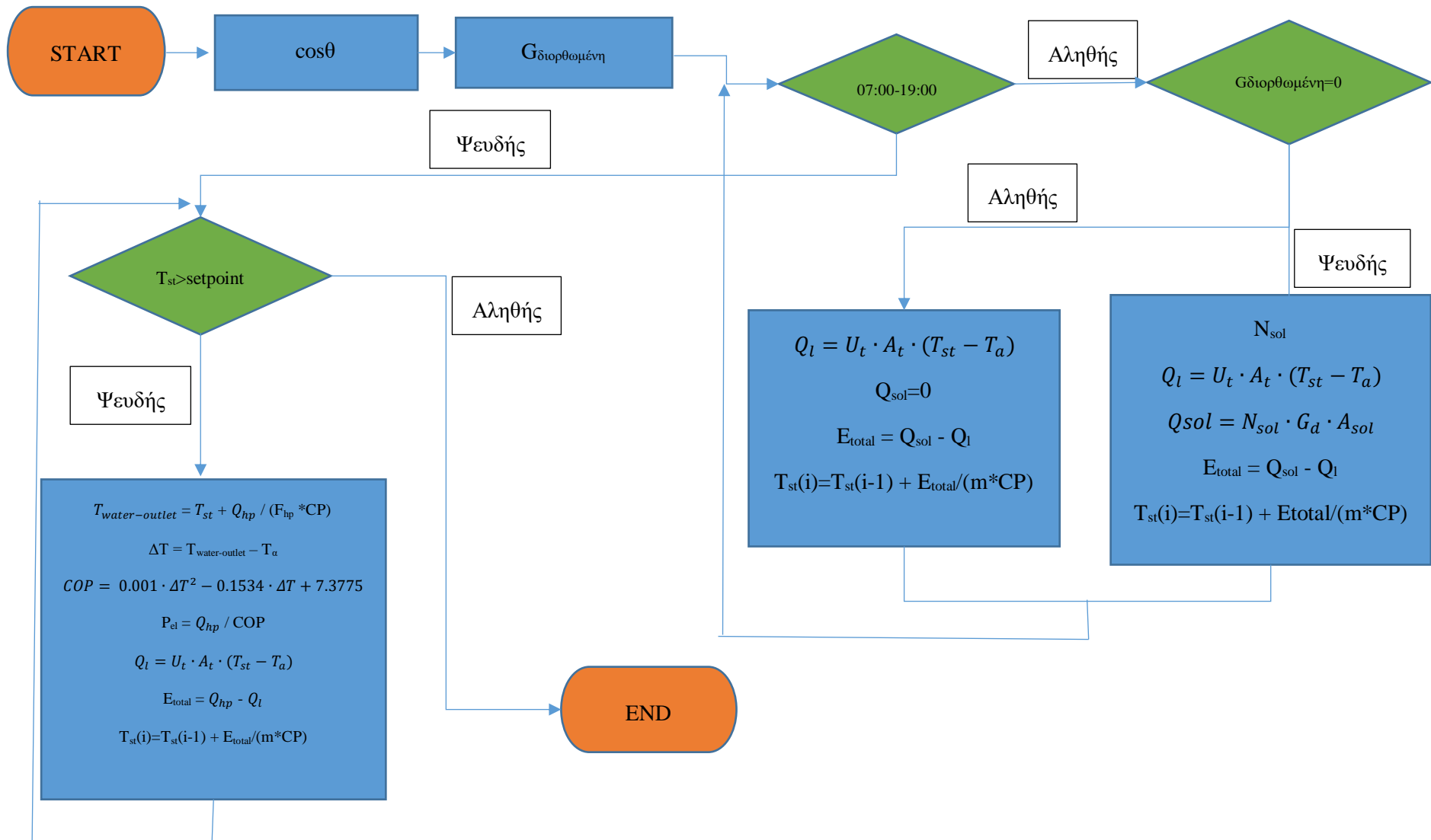
Συνεχίζονται οι υπολογισμοί για την επόμενη μέρα από το 2ο βήμα και με την υπάρχουσα T_{st} .

Τα παραπάνω απεικονίζονται στο flowchart 5.3

5.4.3 Μαθηματικό μοντέλο

Το συνδυαστικό σενάριο αποτελεί συνδυασμό των σεναρίων 5.2 και 5.3 επομένως οι υπολογισμοί ακολουθούν τα ίδια μαθηματικά μοντέλα με αυτά που αναλύθηκαν στα κεφάλαια 5.2.3 και 5.3.3 ανάλογα με την ώρα που ικανοποιείται η συνθήκη για το ZNX.

Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο του τρίτου σεναρίου.

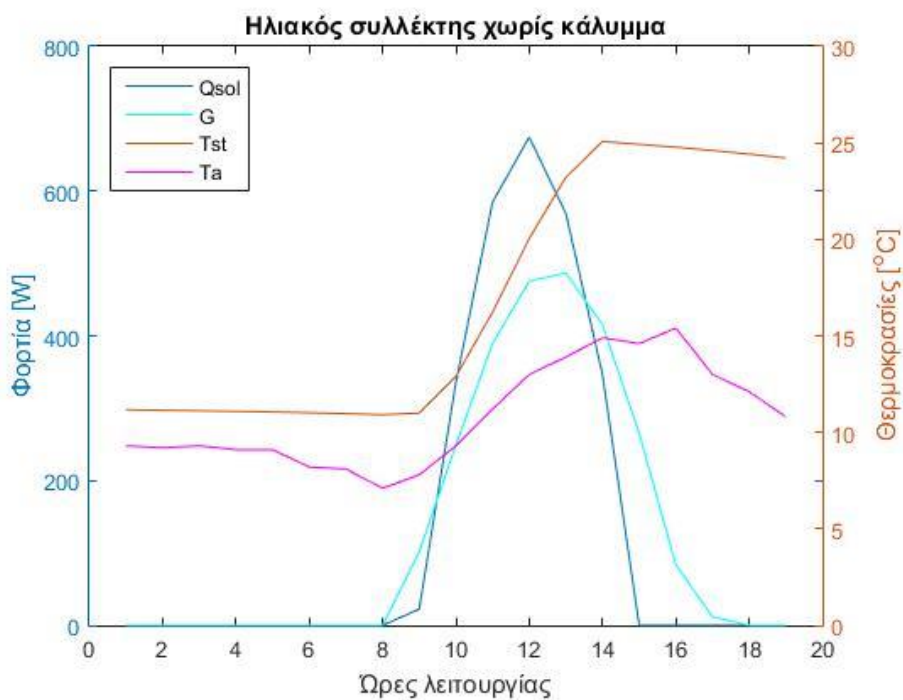


Σχήμα 5.3: Flowchart αλγορίθμου τρίτου σεναρίου.

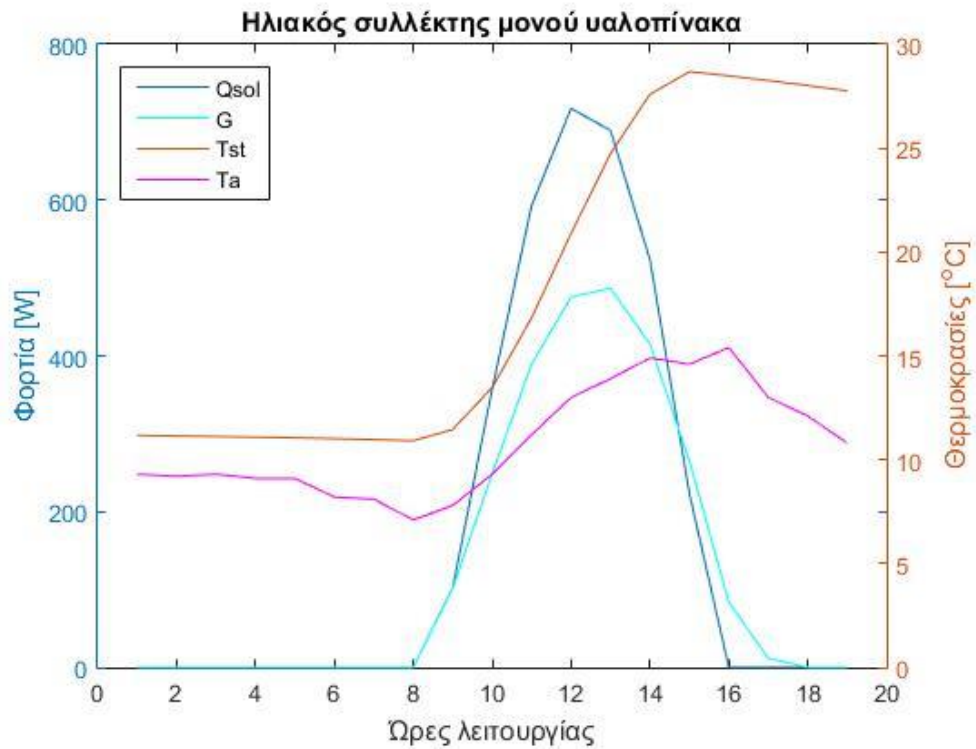
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων

6.1 Αποτελέσματα σεναρίου θέρμανσης ZNX με ηλιακούς συλλέκτες

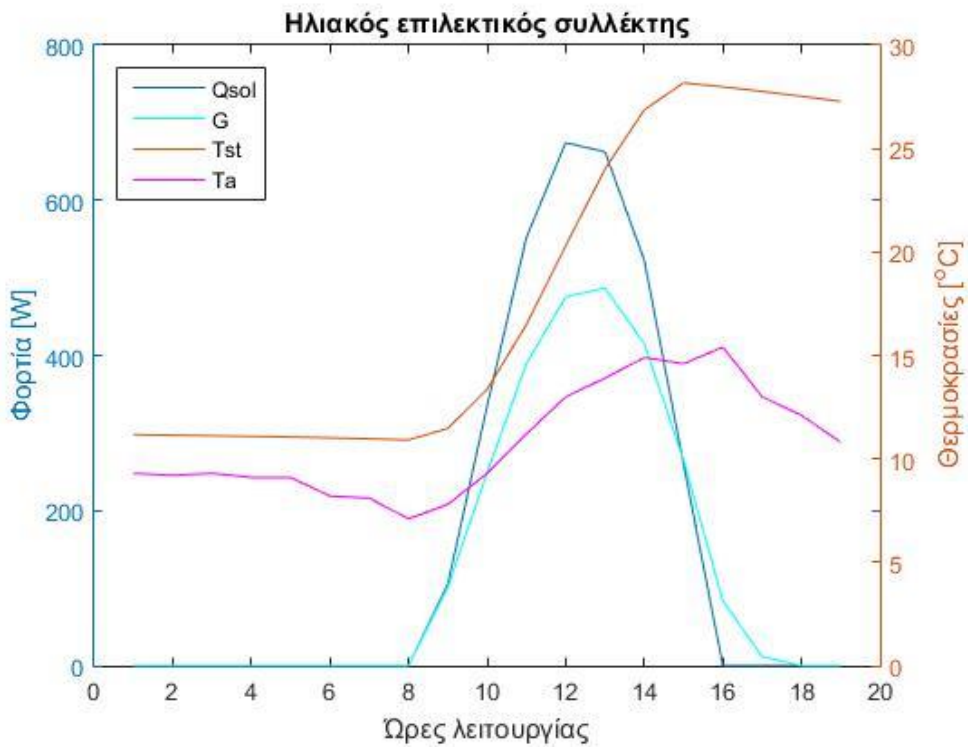
Παρακάτω παρατίθενται τα θερμικά κέρδη των ηλιακών συλλεκτών Q_{sol} , η θερμοκρασία της δεξαμενής T_{st} μία μέρα με χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας στην περιοχή της Αττικής καθώς και τα δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα για αυτήν. Σημειώνεται πως τα διαγράμματα απεικονίζουν το ωράριο λειτουργίας της διάταξης (εκκίνηση: 00:00, απομάστευση: 19:00).



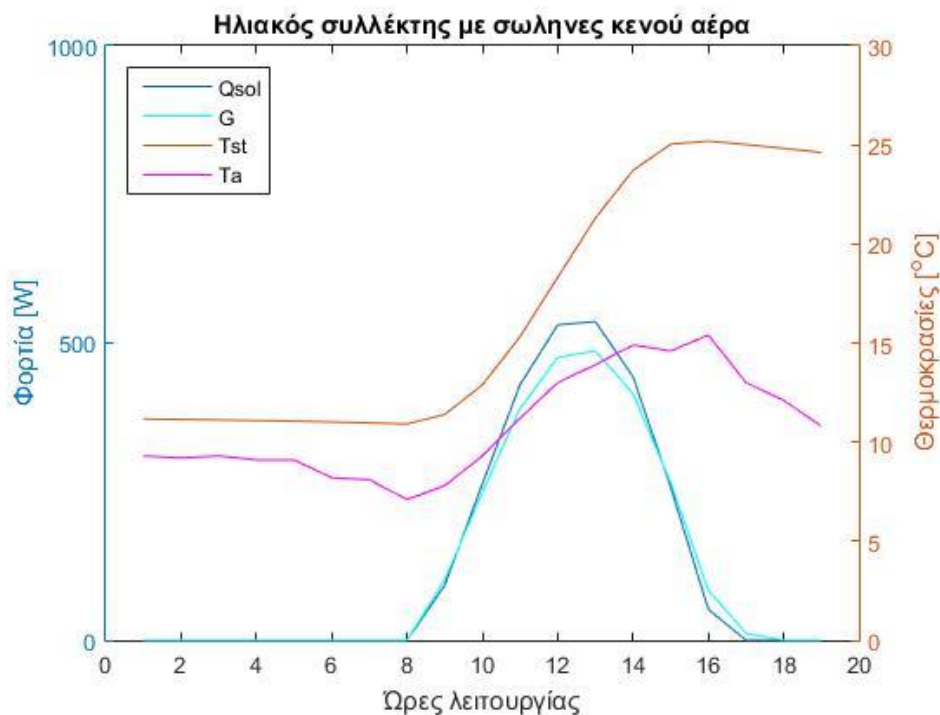
Σχήμα 6.1: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού συλλέκτη χωρίς κάλυμμα-χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.2: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού συλλέκτη μονού υαλοπίνακα-χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.3: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού επιλεκτικού συλλέκτη-χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.4: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού συλλέκτη με σωλήνες κενού αέρος-χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εικονιζόμενων διαγραμμάτων αντιστοιχούν στις ακόλουθες μέγιστες θερμοκρασίες δεξαμενής, συνολικά ημερήσια θερμικά φορτία ηλιακού και αποδόσεις συλλέκτη :

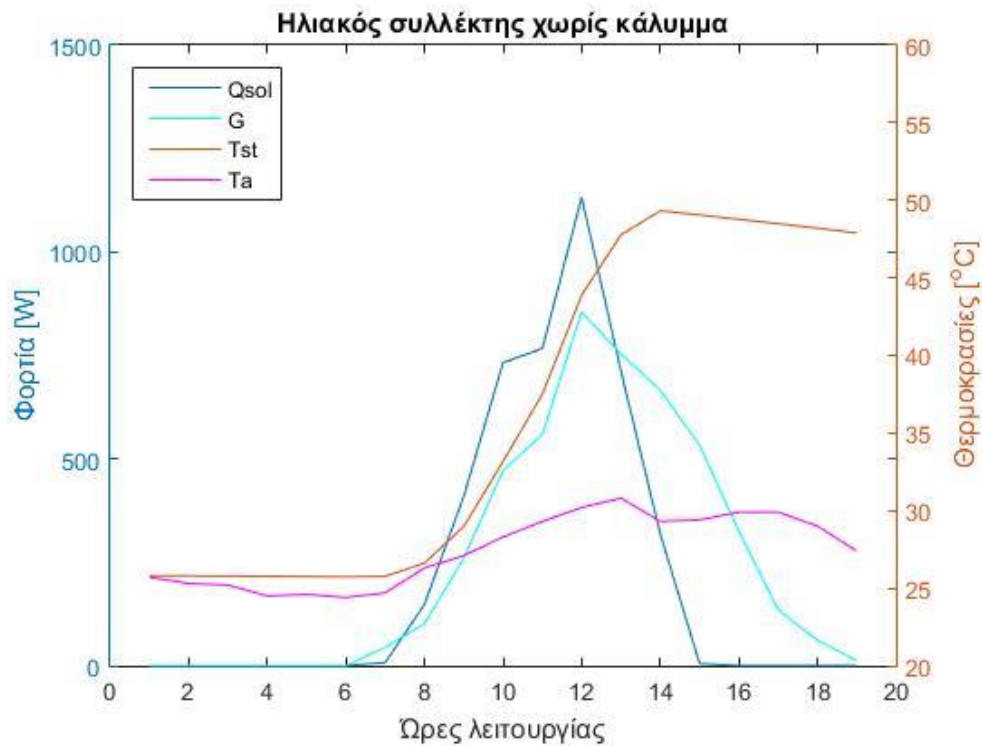
Πίνακας 6.1 Τιμές $Q_{sol,total}$, $T_{st,max}$, N_{sol} για κάθε είδος συλλέκτη-ημέρα χαμηλής ακτινοβολίας

	Q_{sol} (W)	T_{st} (°C)	N_{sol}
Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα	$2.53 \cdot 10^3$	25.1	0.51
Απλός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα	$3.2 \cdot 10^3$	28.7	0.64
Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης	$3.11 \cdot 10^3$	28.2	0.63
Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρα	$2.6 \cdot 10^3$	25.2	0.52
Διαθέσιμη συνολική ακτινοβολία	$G = 2.48 \cdot 10^3$ (W/m ²)		

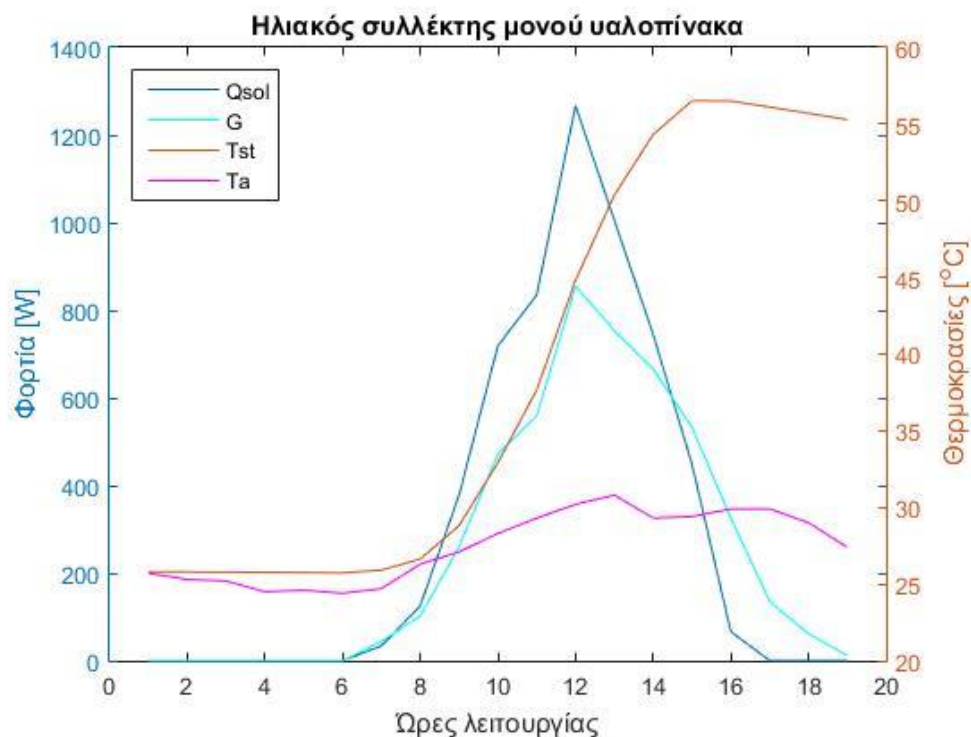
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι στις μέρες με χαμηλή ακτινοβολία όλα τα είδη συλλεκτών έχουν χαμηλή απόδοση καθώς δεν προσεγγίζουν την επιθυμητή θερμοκρασία ZNX (45°C). Ακόμα και ο ηλιακός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα που προσλαμβάνει τα μέγιστα ηλιακά κέρδη για τις συγκεκριμένες συνθήκες φτάνει το νερό της δεξαμενής σε θερμοκρασία μόλις 28.7°C. Επομένως είναι

επιτακτική η χρήση βοηθητικής πηγής για μέρες χαμηλής ακτινοβολίας καθώς η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί.

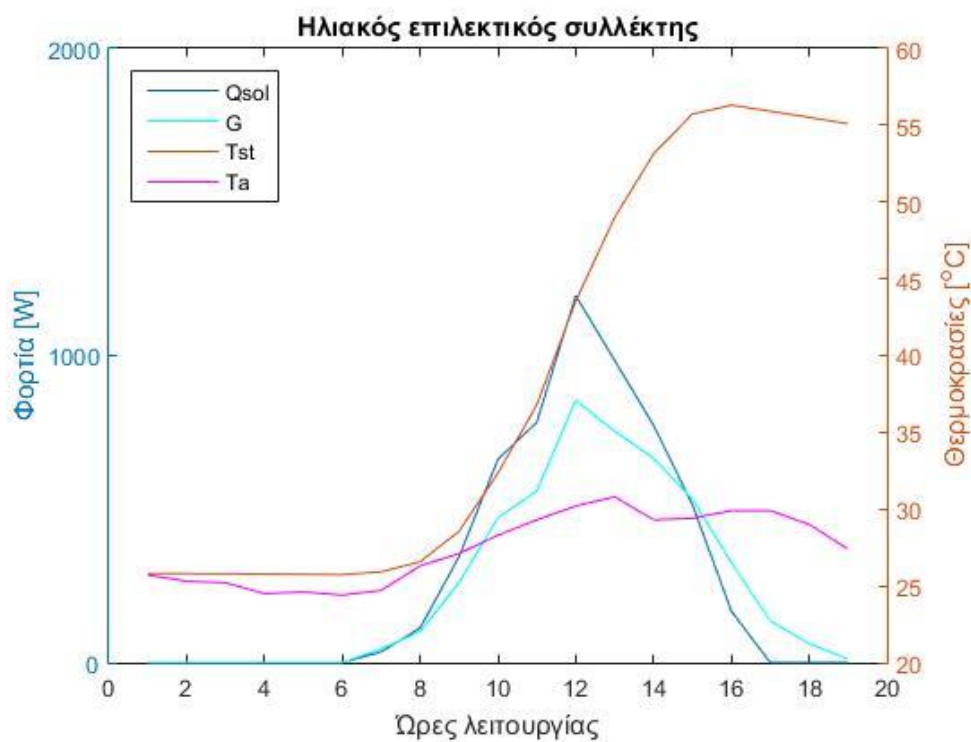
Παρακάτω παρατίθενται τα θερμικά κέρδη των ηλιακών συλλεκτών Q_{sol} και η θερμοκρασία της δεξαμενής T_{st} μία μέρα με υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας στην περιοχή της Αττικής καθώς και τα δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα για αυτήν. Σημειώνεται πως τα διαγράμματα απεικονίζουν το ωράριο λειτουργίας της διάταξης (εκκίνηση: 00:00, απομάστευση: 19:00 και συνεπώς) .



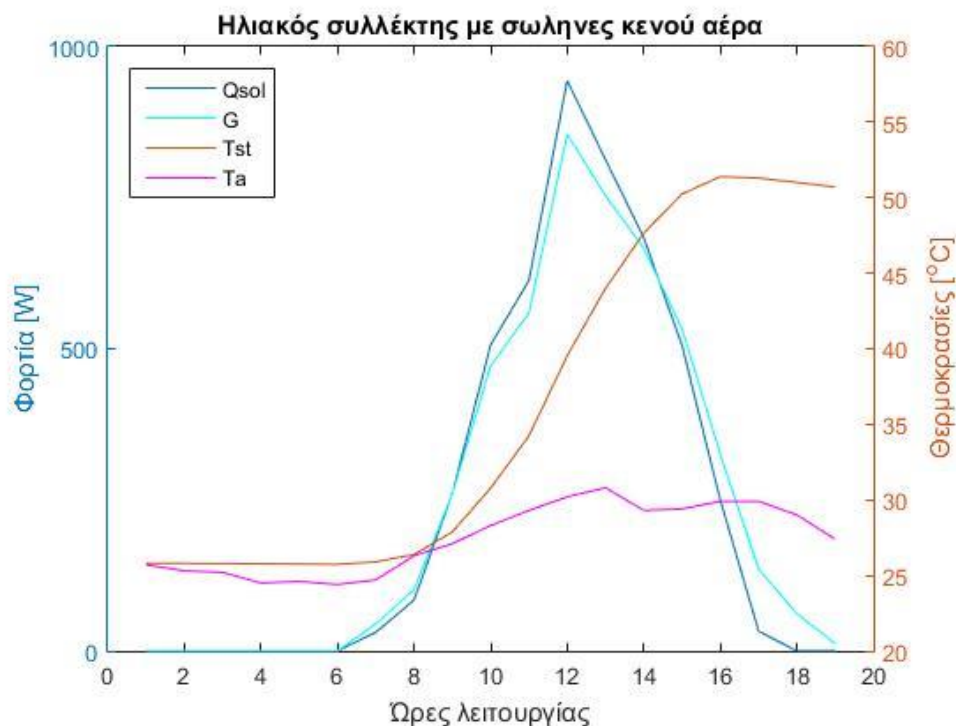
Σχήμα 6.5: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού συλλέκτη χωρίς κάλυμμα - υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.6: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού συλλέκτη μονού υαλοπίνακα - χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.7: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού επιλεκτικού συλλέκτη-υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.8: Ανάλυση ημερήσιας λειτουργίας: Περίπτωση ηλιακού συλλέκτη με σωλήνες κενού αέρος-υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.

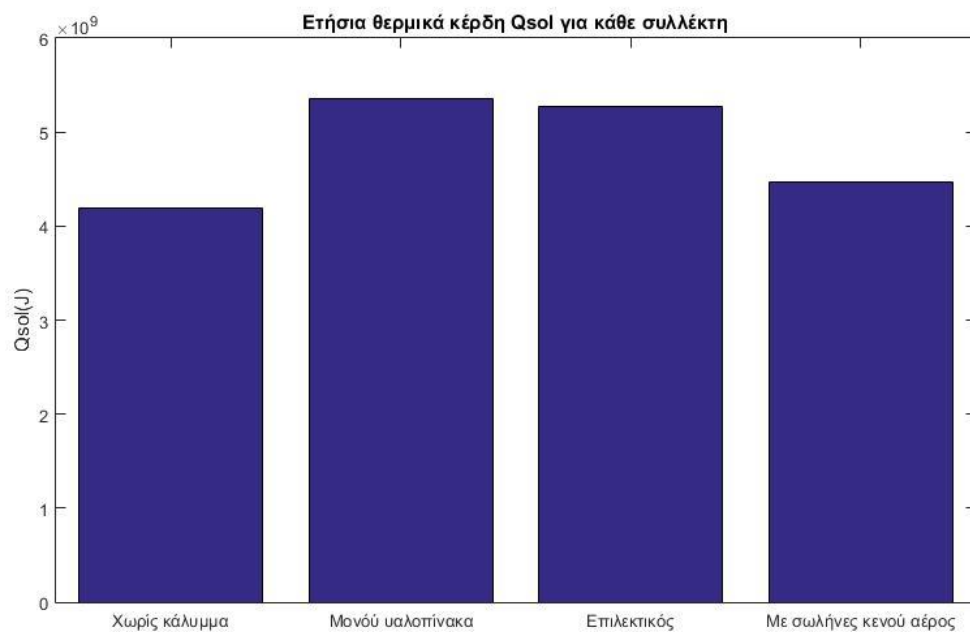
Τα αποτελέσματα των παραπάνω εικονιζόμενων διαγραμμάτων αντιστοιχούν στις ακόλουθες μέγιστες θερμοκρασίες δεξαμενής, συνολικά ημερήσια θερμικά φορτία ηλιακού και αποδόσεις συλλέκτη:

Πίνακας 6.2 Τιμές $Q_{sol,total}$, $T_{st,max}$, N_{sol} για κάθε είδος συλλέκτη-ημέρα υψηλής ακτινοβολίας

	Q_{sol} (W)	T_{st} (°C)	N_{sol}
Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα	$4.23 \cdot 10^3$	49.3	0.44
Απλός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα	$5.62 \cdot 10^3$	56.5	0.59
Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης	$5.57 \cdot 10^3$	56.3	0.58
Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρα	$4.72 \cdot 10^3$	51.4	0.49
Διαθέσιμη συνολική ακτινοβολία	$G = 4.78 \cdot 10^3$ (W/m ²)		

Από τα παραπάνω δεδομένα συμπεραίνεται ότι για μέρες υψηλής ακτινοβολίας όπως η συγκεκριμένη οι ηλιακοί συλλέκτες υπερκαλύπτουν την επιθυμητή θερμοκρασία για το ZNX(45°C). Αξιοσημείωτο είναι ότι οι θερμοκρασίες για μερικούς συλλέκτες ξεπερνούν ακόμα και τους 55°C. Επομένως, η χρήση βοηθητικής πηγής σε μέρες με υψηλής ακτινοβολίας δεν είναι αναγκαία. Επίσης επιβεβαιώνεται ότι σε μέρες με υψηλή ακτινοβολία οι συλλέκτες παρουσιάζουν μειωμένο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις μέρες χαμηλής ακτινοβολίας σύμφωνα με την εξίσωση 3.10.

Στο επόμενο διάγραμμα παρατίθενται τα συνολικά ετήσια θερμικά ηλιακά κέρδη για κάθε είδος συλλέκτη στις βασικές συνθήκες που επιλέχθηκαν.



Σχήμα 6.9: Ετήσια θερμικά κέρδη Q_{sol} - αποτελέσματα ανά τύπο ηλιακού συλλέκτη.

Τα αποτελέσματα του παραπάνω εικονιζόμενου διαγράμματος (Σχήμα 6.9) αντιστοιχούν στις ακόλουθες μέσες ετήσιες θερμοκρασίες δεξαμενής και αποδόσεις συλλέκτη :

Πίνακας 6.3 Ετήσιες τιμές $Q_{sol,total}$, $T_{st,average}$, N_{sol} για κάθε είδος συλλέκτη.

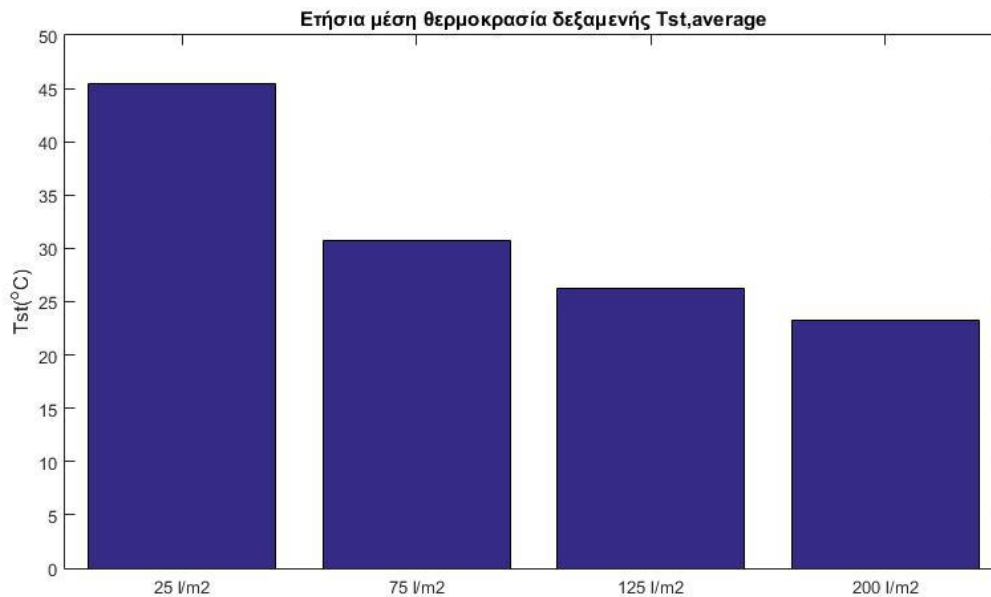
	Q_{sol} (J)	T_{st} (°C)	N_{sol}
Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα	$4.19 \cdot 10^9$	28.9	0.47
Απλός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα	$5.35 \cdot 10^9$	31.2	0.60
Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης	$5.27 \cdot 10^9$	30.7	0.59
Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρα	$4.46 \cdot 10^9$	28.3	0.5
Ετήσια διαθέσιμη συνολική ακτινοβολία	$G = 4.43 \cdot 10^9$ (J)		

Από τα δεδομένα της ετήσιας προσομοίωσης παρατηρείται πως ο συλλέκτης με την καλύτερη θερμική και θερμοκρασιακή απόδοση είναι ο συλλέκτης μονού υαλοπίνακα. Επίσης παρατηρείται ότι έχει τον μεγαλύτερο ετήσιο βαθμό απόδοσης, επομένως για την περιοχή της Αττικής είναι αυτός που εκμεταλλεύεται αποδοτικότερα το ηλιακό της δυναμικό. Κρίνοντας από την μέση ετήσια θερμοκρασία του, που προκύπτει από αυτό το σενάριο, εικάζεται ότι θα χρειάζεται και την λιγότερη ενεργειακή υποβοήθηση από κάποιου είδους βοηθητική πηγή, κάτι που θα μελετηθεί αναλυτικότερα στο συνδυαστικό σενάριο.

Η χρήση όμως επιλεκτικών συλλεκτών είναι συνηθέστερη και αφού τα ετήσια θερμικά φορτία του επιλεκτικού είναι παρεμφερή με αυτά του μονού υαλοπίνακα επιλέχθηκε αυτός για τις υπόλοιπες διερευνήσεις των περιπτώσεων του σεναρίου. Το γεγονός ότι ο ηλιακός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα είναι αποδοτικότερος στη συγκεκριμένη προσομοίωση πιθανότατα οφείλεται στους συντελεστές απωλειών U_0 που προτείνει το TEE και στο χαμηλό φορτίο που δουλεύουν οι συλλέκτες.

Σε αυτό το σημείο αναλύεται το πώς η διαφορετική αναλογία λίτρων ανά τετραγωνικό μέτρο συλλέκτη επηρεάζει την ετήσια απόδοση του επιλεκτικού συλλέκτη. Επισημαίνεται ότι το σενάριο αναφοράς έχει δεξαμενή αποθήκευσης χωρητικότητας 150 l.

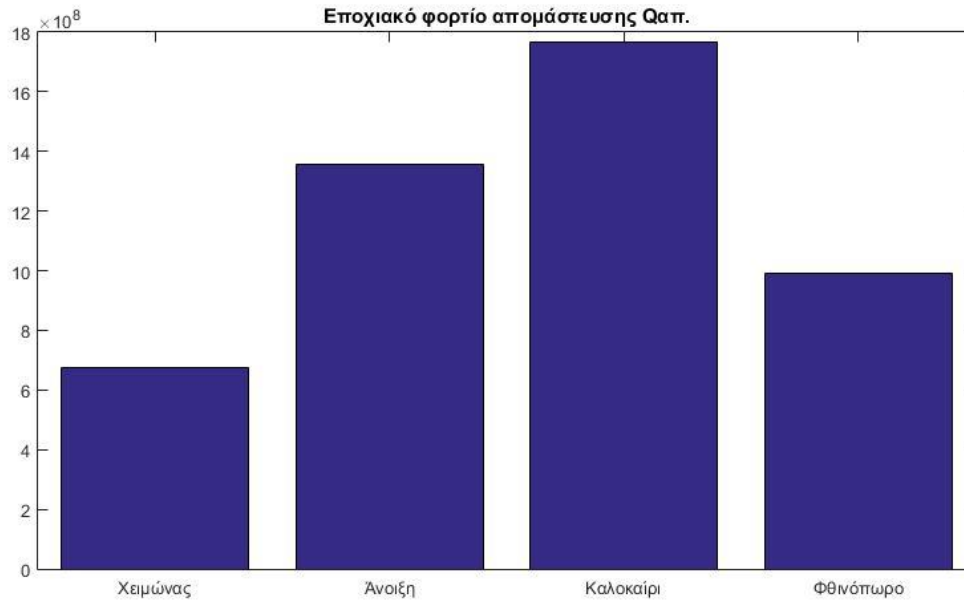
Επιλεκτικός ηλιακός συλλέκτης :



Σχήμα 6.10: Ετήσια μέση θερμοκρασία T_{st} ηλιακού επιλεκτικού συλλέκτη-αποτελέσματα για διαφορετικές αναλογίες l/m^2 .

Παρατηρείται ότι για αναλογία $25 l/m^2$, ο επιλεκτικός συλλέκτης διατηρεί μέση ετήσια θερμοκρασία $45.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτό συνεπάγεται ότι για χαμηλές απαιτήσεις ZNX, δηλαδή μικρή δεξαμενή αποθήκευσης η χρήση βοηθητικής πηγής ίσως και να μην είναι απαραίτητη, αφού η επιθυμητή θερμοκρασία ZNX των $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ καλύπτεται κατά μέσο όρο μέσα στο έτος από τα θερμικά κέρδη. Αυτό συμβαίνει γιατί με σταθερό ηλιακό φορτίο τα 50 l δεξαμενής θερμαίνονται με μεγαλύτερη άνεση σε σχέση με μεγαλύτερους όγκους. Αντιθέτως όσο αυξάνεται ο όγκος της δεξαμενής, επομένως και η αναλογία των l/m^2 συλλέκτη, η μέση θερμοκρασία παρουσιάζει κι αυτή μείωση και η χρήση βοηθητικής πηγής για την κάλυψη των αναγκών είναι ακόμα μεγαλύτερη, κάτι το αναμενόμενο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο διάγραμμα (Σχήμα 6.11) το εποχιακό συνολικό φορτίο απομάστευσης $Q_{\text{απ}}$ για τον επιλεκτικό ηλιακό συλλέκτη. Ως ενέργεια απομάστευσης ορίζεται το γινόμενο που προκύπτει από την σχέση 5.2, με T_{st2} την θερμοκρασία της δεξαμενής πριν την απομάστευση και T_{st1} τη θερμοκρασία του νερού δικτιού που την τροφοδοτεί αμέσως μετά.



Σχήμα 6.11: Εποχιακό φορτίο απομάστευσης Q_{ap} (J) ηλιακού επιλεκτικού συλλέκτη-αποτελέσματα για τις εποχές του έτους.

Από τη σχέση 5.5 προκύπτει απαιτούμενο φορτίο ZNX για κάθε εποχή $Q_d = 1.55 \cdot 10^9$ J.

Ακολουθεί η παρουσίαση των ποσοστών κάλυψης εποχιακών φορτίων για τον επιλεκτικό συλλέκτη με βάση το φορτίο απομάστευσης (Πίνακας 6.4).

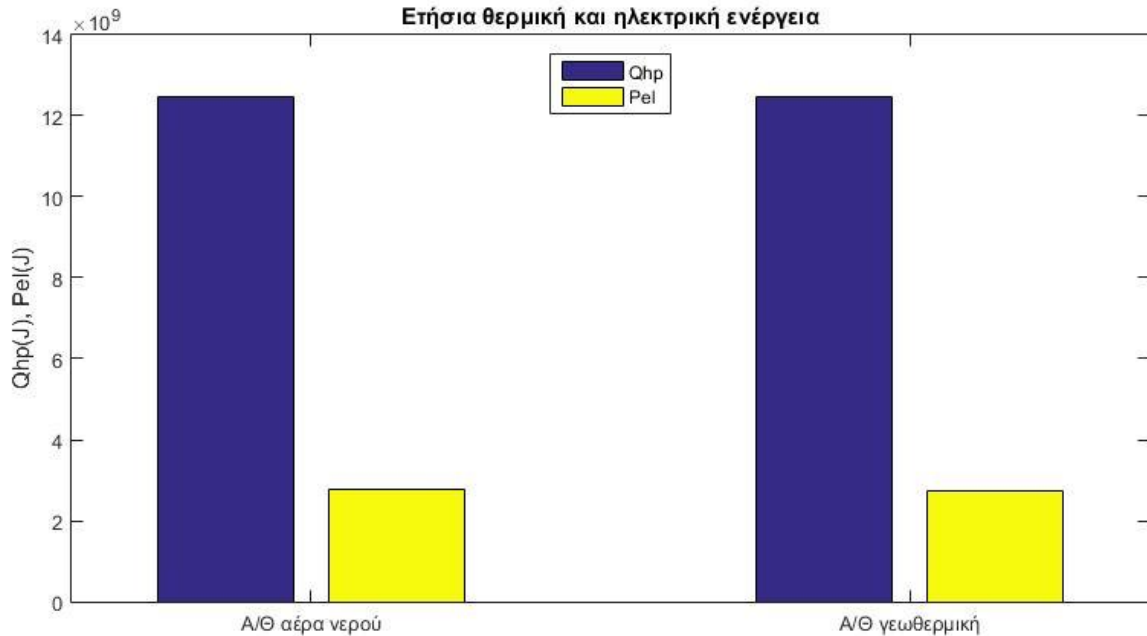
Πίνακας 6.4 Τιμές % κάλυψης φορτίου ZNX για ηλιακό επιλεκτικό συλλέκτη-εποχιακά αποτελέσματα.

	Ποσοστό κάλυψης φορτίου ZNX ανά εποχή
Χειμώνας	43.61%
Άνοιξη	87.54%
Καλοκαίρι	114.06%
Φθινόπωρο	63.87%
Απαιτούμενο φορτίο ZNX για κάθε εποχή $Q_d = 1.55 \cdot 10^9$ J	

Παρατηρείται ότι την άνοιξη και το καλοκαίρι ο συλλέκτης επαρκεί για να καλύψει τα απαιτούμενα φορτία ZNX. Αντίθετα το χειμώνα και το φθινόπωρο που οι κλιματικές συνθήκες για την Αττική δυσχαιραίνουν κρίνεται σκόπιμη η χρήση βοηθητικής πηγής.

6.2 Αποτελέσματα σεναρίου θέρμανσης ZNX με την χρήση A/Θ

Παρακάτω παρουσιάζεται το ετήσιο θερμικό φορτίο των αντλιών και η ηλεκτρική κατανάλωση για ισχύ A/Θ 2000W.



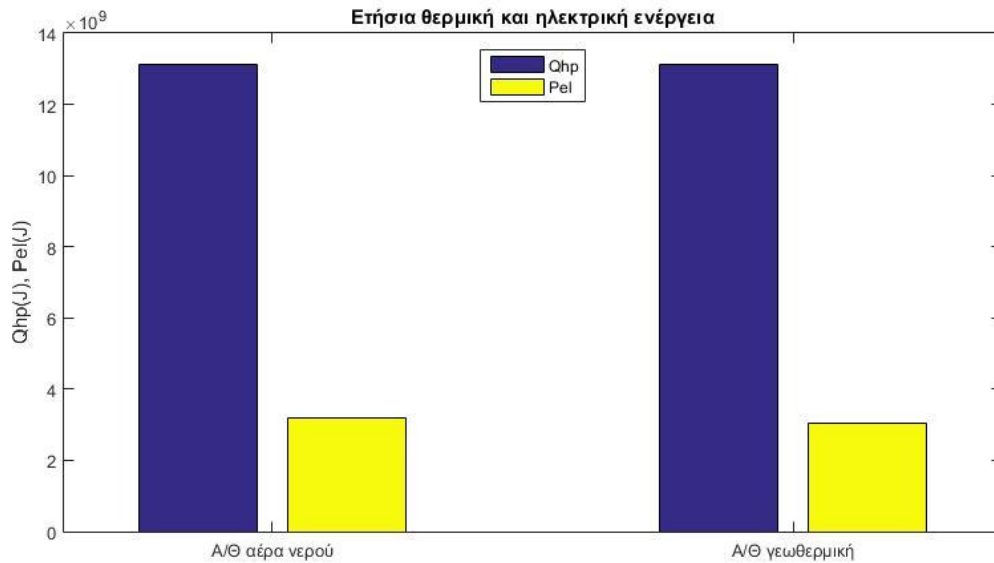
Σχήμα 6.12: Ετήσια θερμική ενέργεια Q_{hp} , ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} - αποτελέσματα για ισχύς A/Θ 2000W.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση της γεωθερμικής A/Θ με την A/Θ αέρα-νερού όσον αφορά την ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} , τον συντελεστή COP και την μέση ημερήσια διάρκεια της λειτουργίας τους στο έτος (Πίνακας 6.5).

Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας για σύστημα A/Θ (2000W).

	A/Θ αέρα-νερού	A/Θ γεωθερμική
Ετήσιο φορτίο Q_{hp} (J)	$1.24 \cdot 10^{10}$	
Ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} (J)	$2.77 \cdot 10^9$	$2.72 \cdot 10^9$
Μέσος ετήσιος συντελεστής COP	4.48	4.57
Μέσος όρος ημερήσιων ωρών κάλυψης set point	4.73	

Παρακάτω παρουσιάζεται το ετήσιο θερμικό φορτίο των αντλιών και η ηλεκτρική κατανάλωση για ισχύ A/Θ 3000W.



Σχήμα 6.13: Ετήσια θερμικά ενέργεια Q_{hp} , ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} - αποτελέσματα για ισχύς A/Θ 3000W.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση της γεωθερμικής A/Θ με την A/Θ αέρα-νερού όσον αφορά την ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} , τον συντελεστή COP και την μέση ημερήσια διάρκεια της λειτουργίας τους στο έτος (Πίνακας 6.6).

Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας για σύστημα A/Θ (3000W).

	A/Θ αέρα-νερού	A/Θ γεωθερμική
Ετήσιο φορτίο Q_{hp} (J)	$1.31 \cdot 10^{10}$	
Ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} (J)	$3.19 \cdot 10^9$	$3.05 \cdot 10^9$
Μέσος ετήσιος συντελεστής COP	4.10	4.29
Μέσος όρος ημερήσιων ωρών κάλυψης set point	3.32	

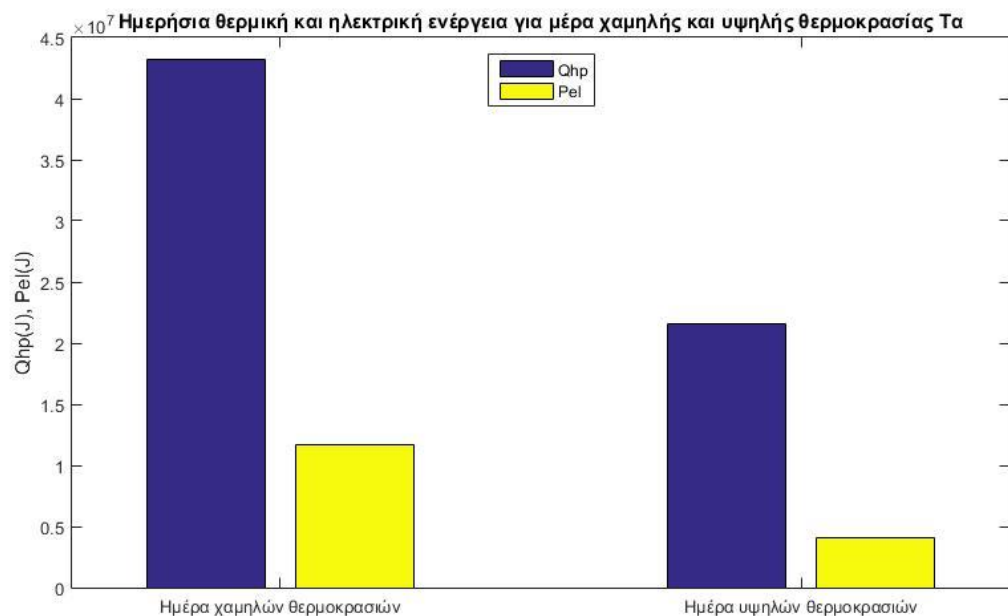
Μετά τη διερεύνηση του σεναρίου συμπεραίνεται πως αποδοτικότερη A/Θ για τις κλιματολογικές συνθήκες της Αττικής είναι η γεωθερμική A/Θ. Η ετήσια κατανάλωση της ηλεκτρικής της ενέργειας είναι μικρότερη από αυτή της αντλίας αέρα-νερού. Επίσης αποδίδει καλύτερα το φορτίο

της αφού παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή COP. Οι παρατηρήσεις ισχύουν και για τις δύο διαφορετικές ισχύς αντλίας που προσομοιώθηκαν.

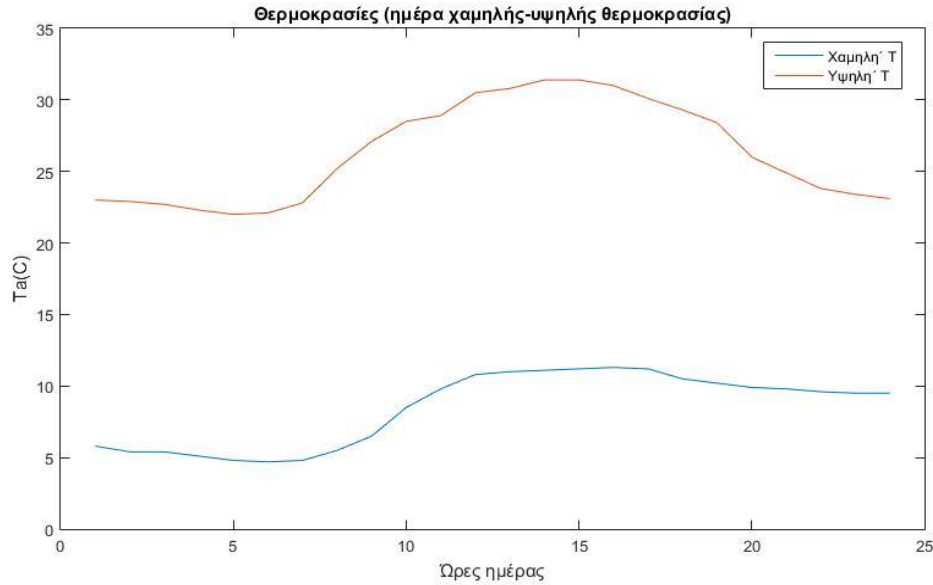
Αυτό συμβαίνει γιατί ο συντελεστής COP και επομένως η ηλεκτρική κατανάλωση εξαρτώνται από την διαφορά θερμοκρασίας ΔT (σχέση 5.7). Η μέση ετήσια θερμοκρασία T_a για την περιοχή της Αττικής υπολογίστηκε $17.6\text{ }^\circ\text{C}$ ενώ η μέση θερμοκρασία νερού δικτύου είναι 18.6 (TEE, 2017α). Επομένως αφού υπάρχει ζήτηση για ZNX όλο το έτος καταλήγει η γεωθερμική A/Θ να είναι αποδοτικότερη. Τελικά λόγω των μικρών ενεργειακών διαφορών και του μεγάλου κόστους εγκατάστασης της γεωθερμικής A/Θ, ρεαλιστικότερη επιλογή για την περιοχή της Αττικής είναι η A/Θ αέρα-νερού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρότι οι ετήσιες ώρες κάλυψης του set point για 3kW ισχύ είναι 29.76% μικρότερες από αυτές της διερεύνησης με ισχύ αντλίας 2kW η ηλεκτρική ενέργεια P_{el} αυξήθηκε κατά 10.97% . Αυτό συμβαίνει γιατί η μεγαλύτερη ισχύς αυξάνει το T_{wout} της αντλίας έτσι η τιμή του COP μειώνεται και σαν αποτέλεσμα έχουμε αυξημένη κατανάλωση.

Παρακάτω θα δειχθούν τα ημερήσια ποσά ενέργειας της A/Θ αέρα-νερού για μία χαρακτηριστική μέρα χαμηλής (20/1) και υψηλής θερμοκρασίας (1/8) περιβάλλοντος αντίστοιχα (Σχήμα 6.13)



Σχήμα 6.14: Ημερήσια ενεργειακή συμπεριφορά συστήματος A/Θ. Περίπτωση A/Θ αέρα-νερού. Χαμηλή (20/1) και υψηλή (1/8) θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 6.15 Θερμοκρασίες T_a ημερών χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση της τιμών ημέρας χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος όσον αφορά το φορτίο Q_{hp} την ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} , τον συντελεστή COP και την μέση ημερήσια διάρκεια της λειτουργίας τους (Πίνακας 6.7).

Πίνακας 6.7 Ημερήσια αποτελέσματα για A/Θ αέρα-νερού.

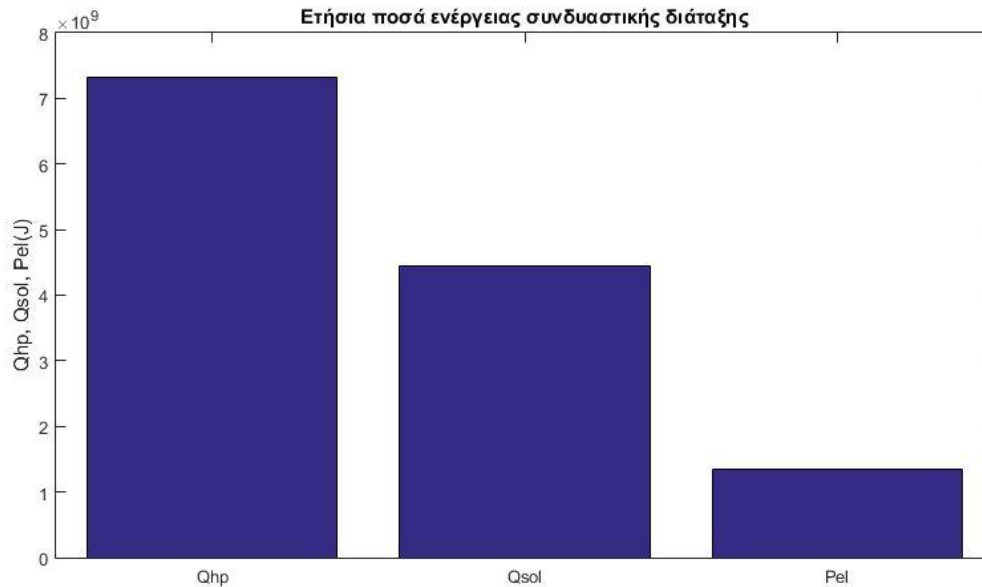
	Χαμηλή T_a	Υψηλή T_a
Φορτίο Q_{hp} (J)	$4.32 \cdot 10^7$	$2.16 \cdot 10^7$
Ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} (J)	$1.21 \cdot 10^7$	$4.26 \cdot 10^6$
Μέσος συντελεστής COP	3.55	5.06
Ώρες κάλυψης set point	4	2

Η κατανάλωση είναι μεγαλύτερη σε μέρες χαμηλών θερμοκρασιών εξαιτίας των μεγαλύτερων απωλειών της δεξαμενής αποθήκευσης και της χαμηλότερης θερμοκρασίας νερού δικτύου το οποίο πληρώνει το δοχείο στην αρχή κάθε ημέρας. Επίσης παρατηρείται μείωση του συντελεστή COP εξαιτίας των μεγάλων διαφορών θερμοκρασίας ρευστού κατά τη λειτουργία της A/Θ.

6.3 Αποτελέσματα σεναρίου διερεύνησης ηλιακού συστήματος θέρμανσης ΖΝΧ υποβοηθούμενο από Α/Θ

Σε συνέχεια της διερεύνησης της ανεξάρτητης λειτουργίας των δύο βασικών υποσυστημάτων (ηλιακός συλλέκτης, Α/Θ), επιλέχθηκε να προσομοιωθεί συνδυαστικό σύστημα επιλεκτικού ηλιακού συλλέκτη υποβοηθούμενο από Α/Θ αέρα-νερού ισχύος 3kW.

Τα ετήσια αποτελέσματα για τις ενέργειες του συνδυαστικού συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8.



Σχήμα 6.16: Ετήσια ποσά ενέργειας- αποτελέσματα για συνδυασμένο σύστημα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές της συνδυαστικής διάταξης όσον αφορά το φορτίο των ηλιακών συλλεκτών Q_{sol}, το φορτίο της Α/Θ Q_{hp}, την ηλεκτρική κατανάλωση P_{el}, τον συντελεστή COP και την μέση ημερήσια διάρκεια της λειτουργίας τους στο έτος (Πίνακας 6.8).

Πίνακας 6.8 Ετήσιες τιμές Q_{hp}, Q_{sol}, P_{el}, COP για συνδυασμένο σύστημα.

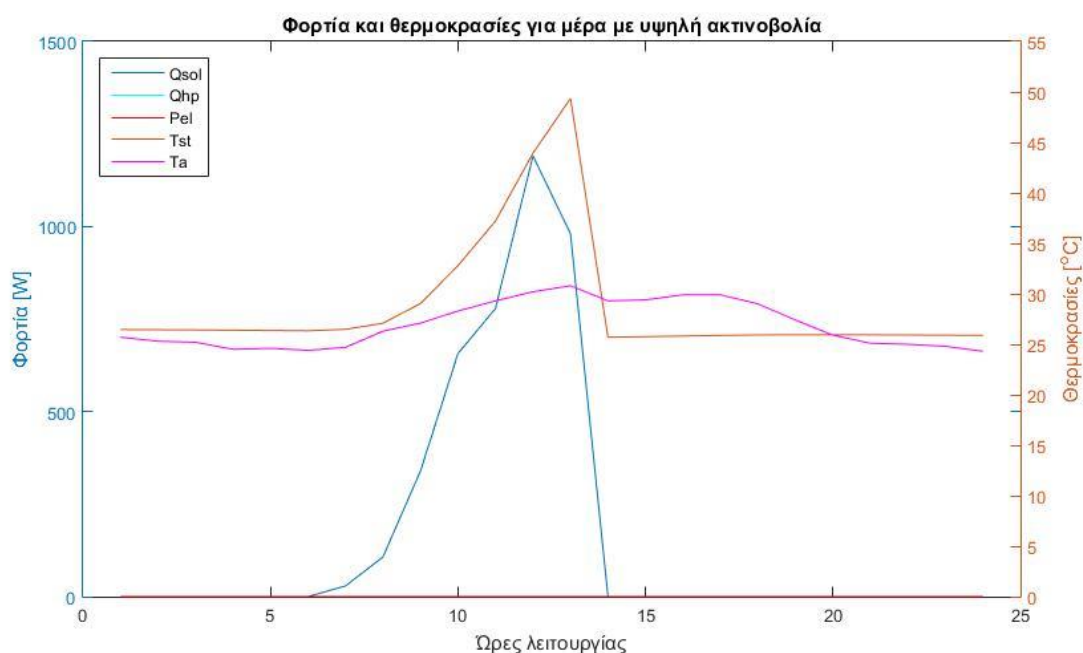
	Συνδυαστική διάταξη
Ετήσιο φορτίο ηλιακών συλλεκτών Q _{sol} (J)	4.44·10 ⁹
Ετήσιο φορτίο Q _{hp} (J)	7.32 ·10 ⁹
Ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση P _{el} (J)	1.35·10 ⁹
Μέσος ετήσιος συντελεστής COP	5.42
Μέσες ετήσιες ώρες κάλυψης set point	1.85

Από τον πίνακα 6.6 και τον πίνακα 6.8 παρατηρείται ότι ο συνδυασμός των συστημάτων μειώνει το απαιτούμενο φορτίο A/Θ Q_{hp} σχεδόν στο μισό (μείωση φορτίου κατά 44.12%), επίσης η ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος μειώνεται κατά 57.68% καθώς τα φορτία της αντλίας για την επίτευξη του set point αναπληρώνονται από την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας έτσι εξοικονομείτε ηλεκτρική ενέργεια. Η συμβολή του ηλιακού συλλέκτη στο σύστημα αντικατοπτρίζεται και στις απαιτούμενες ώρες λειτουργίας της A/Θ αφού η σύμπραξη των δύο συστημάτων μειώνει κατά 44.27% τις ώρες χρήσης της A/Θ .

Επίσης η χρήση A/Θ σε διάταξη ηλιακού συλλέκτη δεξαμενή αποθήκευσης καλύπτει τις οποίες θερμοκρασιακές ελλείψεις που προκύπτουν σε ημερήσια βάση για το μεμονωμένο σύστημα ηλιακού συλλέκτη δεξαμενής που σαν αποτέλεσμα οδηγούν την μέση ετήσια θερμοκρασία σε τιμή χαμηλότερη από την απαιτούμενη όπως αναλύθηκε και στον σενάριο θέρμανσης ZNX μόνο με ηλιακό.

Παρακάτω παρατίθενται τα θερμικά κέρδη των ηλιακών συλλεκτών Q_{sol} , η θερμοκρασία της δεξαμενής T_{st} , Η θερμική ισχύς της A/Θ Q_{hp} , η ηλεκτρική ενέργεια P_{el} μία μέρα με υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας στην περιοχή της Αττικής καθώς και τα δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα για αυτήν.

Υψηλή ακτινοβολία:



Σχήμα 6.17 Ημερήσια θερμικά κέρδη των ηλιακών συλλεκτών, θερμικό φορτίο A/Θ , ηλεκτρική ενέργεια, θερμοκρασία δεξαμενής ZNX. Περίπτωση συνδυαστικού συστήματος -υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.

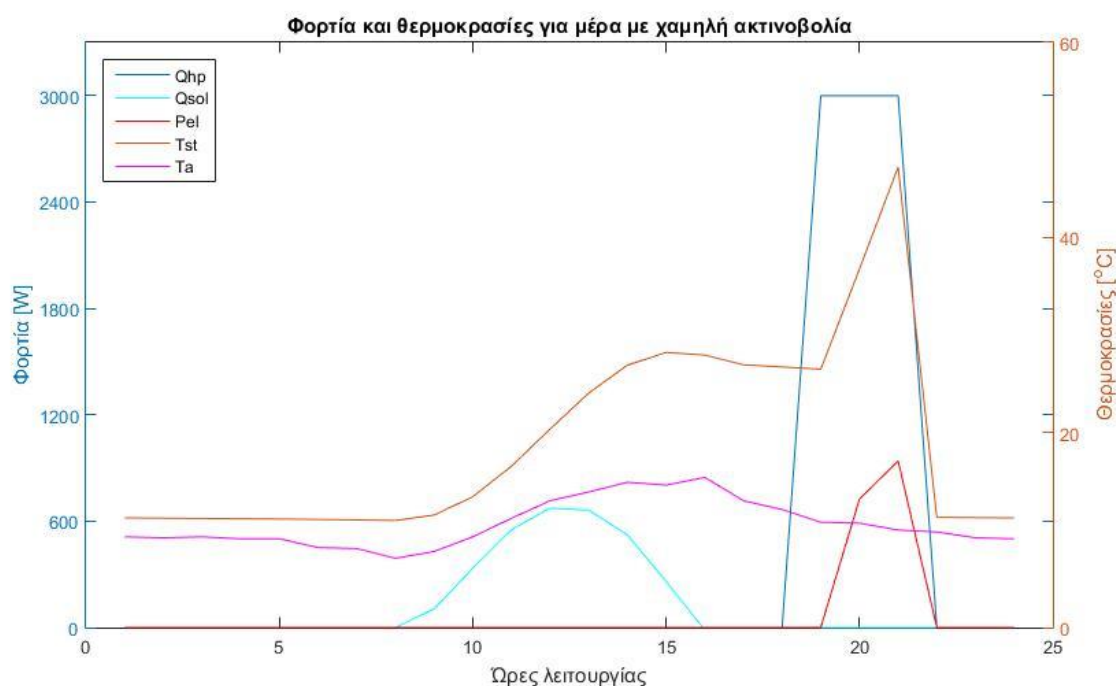
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές της συνδυαστικής διάταξης όσον αφορά το φορτίο των ηλιακών συλλεκτών Q_{sol} , το φορτίο της A/Θ Q_{hp} , την ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} , τον συντελεστή COP και την ημερήσια διάρκεια της λειτουργίας τους σε μέρα υψηλής ακτινοβολίας (Πίνακας 6.9).

Πίνακας 6.9 Τιμές Q_{hp} , Q_{sol} , P_{el} , COP για συνδυασμένο σύστημα-ημέρα υψηλής ακτινοβολίας

	Συνδυαστική διάταξη
Φορτίο Q_{sol} (J)	$1.07 \cdot 10^7$
Φορτίο Q_{hp} (J)	-
Ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} (J)	-
Μέσος συντελεστής COP	-
Ώρες κάλυψης set point (χρήση A/Θ)	-

Παρακάτω παρατίθενται τα θερμικά κέρδη των ηλιακών συλλεκτών Q_{sol} , η θερμοκρασία της δεξαμενής T_{st} , Η θερμική ισχύς της A/Θ Q_{hp} , η ηλεκτρική ενέργεια P_{el} μία μέρα με χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας στην περιοχή της Αττικής καθώς και τα δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα για αυτήν.

Χαμηλή ακτινοβολία:



Σχήμα 6.18 Ημερήσια θερμικά κέρδη των ηλιακών συλλεκτών, θερμικό φορτίο A/Θ, ηλεκτρική ενέργεια, θερμοκρασία δεξαμενής ZNX. Περίπτωση συνδυαστικού συστήματος -χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές της συνδυαστικής διάταξης όσον αφορά το φορτίο των ηλιακών συλλεκτών Q_{sol} , το φορτίο της A/Θ Q_{hp} , την ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} , τον συντελεστή COP και την ημερήσια διάρκεια της λειτουργίας τους σε μέρα χαμηλής ακτινοβολίας (Πίνακας 6.10).

Πίνακας 6.10 Πίνακας 6.8 Τιμές Q_{hp} , Q_{sol} , P_{el} , COP για συνδυασμένο σύστημα-ημέρα χαμηλής ακτινοβολίας

	Συνδυαστική διάταξη
Φορτίο Q_{sol} (J)	$1.47 \cdot 10^7$
Φορτίο Q_{hp} (J)	$3.24 \cdot 10^7$
Ηλεκτρική κατανάλωση P_{el} (J)	$5.99 \cdot 10^6$
Μέσος συντελεστής COP	5.41
Ώρες κάλυψης set point	3

Σε μέρες με υψηλή ακτινοβολία όπως αυτή στο σχήμα 6.17 η χρήση βοηθητικής πηγής δεν είναι αναγκαία καθώς και από τον Πίνακα 6.9 Φαίνεται ότι ο ηλιακός συλλέκτης κάλυψε την απαιτούμενη θερμοκρασία ZNX μόνο με την χρήση του ηλιακού δυναμικού μέσα στην ημέρα.

Από την μέρα χαμηλής ακτινοβολίας φαίνεται ότι η A/Θ είναι αναγκαία καθώς όπως είδαμε και στο σενάριο θέρμανσης μόνο με ηλιακά το νερό της δεξαμενής παραμένει σε χαμηλές θερμοκρασίες τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως η κάλυψη των αναγκών σε τέτοιες περιπτώσεις πραγματοποιούνται μόνο με την χρήση βοηθητικής πηγής. Κάτι που επιβεβαιώνεται αφού με τις πρώτες ώρες λειτουργίας της αντλίας το ZNX φτάνει τους 45 °C. Αξιοσημείωτη είναι και η μείωση στην ηλεκτρική ενέργεια λειτουργίας της A/Θ, παρατηρείται μείωση 50.49% σε σχέση με την μεμονωμένη διερεύνηση της.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διερεύνηση της απόδοσης ηλιακού θερμικού συστήματος ZNX, υποβοηθούμενου από Α/Θ για την κάλυψη θερμικών φορτίων στη διάρκεια του έτους για την περιοχή της Αττικής. Η διερεύνηση έγινε στη βάση μοντέλου προσομοίωσης που αναπτύχθηκε, και το οποίο αναλύει τη συμπεριφορά του κάθε υποσυστήματος της υπό μελέτη διάταξης. Η ανάλυση εφαρμόστηκε σε ημερήσιο και ετήσιο επίπεδο.

Από τη διερεύνηση θέρμανσης ZNX του συστήματος αποτελούμενου από ηλιακούς συλλέκτες (απουσία βοηθητικής πηγής) προέκυψαν οι εξής παρατηρήσεις:

- Αποδοτικότερος συλλέκτης για το σενάριο που προσομοιώθηκε είναι ο ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης.
- Τα θερμικά κέρδη του επιλεκτικού συλλέκτη σε συνδυασμό με δεξαμενή αποθήκευσης όγκου 50 l μπορεί κατά μέσο όρο μέσα στο έτος να καλύψει τις ανάγκες για θερμοκρασία ZNX 45 °C.
- Το φορτίο απομάστευσης του επιλεκτικού ηλιακού συλλέκτη δεν επαρκεί για να καλύψει τα εποχιακά απαιτούμενα φορτία του χειμώνα της άνοιξης και του φθινοπώρου.

Από τη διερεύνηση θέρμανσης ZNX με Α/Θ προέκυψαν οι εξής παρατηρήσεις:

- Αποδοτικότερη Α/Θ για τις θερμοκρασιακές συνθήκες της Αττικής είναι η γεωθερμική αντλία θερμότητας
- Η αύξηση της ισχύς των Α/Θ μείωσε τις ετήσιες ώρες κάλυψης του set point κατά 29.76% και παράλληλα αυξήθηκε η απαιτούμενη ετήσια ηλεκτρική ενέργεια κατά 10.97%.
- Σε μέρες με χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος παρατηρείται μείωση του συντελεστή COP εξαιτίας των μεγάλων διαφορών θερμοκρασίας ρευστού κατά τη λειτουργία της Α/Θ.

Από τη διερεύνηση θέρμανσης ZNX μη ηλιακό συλλέκτη υποβοηθούμενο από Α/Θ προέκυψαν οι εξής παρατηρήσεις:

- Ο συνδυασμός των συστημάτων μειώνει το απαιτούμενο φορτίο Α/Θ Q_{hp} σε ετήσια βάση κατά 44.12% σε σχέση με τη μεμονωμένη χρήση της αντλίας.
- Το συνδυαστικό σύστημα μειώνει την ηλεκτρική κατανάλωση της Α/Θ κατά 57.68% σε σχέση με τη μεμονωμένη χρήση της αντλίας.
- Η σύμπραξη των δύο συστημάτων μειώνει κατά 44.27% τις ώρες χρήσης της Α/Θ σε σχέση με τη μεμονωμένη χρήση της αντλίας.
- Σε καθημερινή βάση η θερμοκρασία του ZNX φτάνει την επιθυμητή τιμή των 45 °C, που με τη θέρμανση μόνο με ηλιακούς συλλέκτες δεν είναι εφικτό.

Σύμφωνα με την εμπειρία που αποκτήθηκε με την παρούσα διερεύνηση παρουσιάζονται οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική μελέτη, οι οποίες αναφέρονται παρακάτω:

- Βελτιστοποίηση διαφορετικών κριτηρίων των συστημάτων της συνδυαστικής διάταξης.
- Επέκταση της μεθοδολογίας και του τρόπου απομάστευσης του φορτίου σε καθημερινή βάση.
- Διερεύνηση περισσότερων συστημάτων για την πιθανή εύρεση αποδοτικότερου ηλιακού συλλέκτη ή αντλίας θερμότητας.
- Κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων κατανάλωσης με την χρήση ΑΠΕ
- Αξιοποίηση δεδομένων από αντίστοιχες πραγματικές διατάξεις.

Βιβλιογραφία

- Argiriou A., Lykoudis S. Kontoyiannidis S. Balaras C.A., Asimakopoulos D., Petrakis M., Kassomenos P.**, 1999. «Comparison of methodologies for TRY generation using 20 years data for Athens, Greece». *Sol. Energy* 1999, 66, 33–45,
- ASHRAE**, 2020. «Heating, Ventilating, and Air-Conditioning SYSTEM AND EQUIPMENT». Handbook, SI Edition
- Alternative-energy**. URL:<http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hotwater/evacuated-tube->
- Bertrand A, Mastrucci A, Schler N, Aggoune R, Marchal F.**, 2016. «Characterisation of domestic hot water end-uses for integrated urban thermal energy assessment and optimization». *Applied Energy*. In press.
- Bolaji, B. M.**, 2011. «Comparative Analysis of Performance of Three Ozone-Friends HFC Refrigerants in a Vapour Compression Refrigerator». *Journal of Sustainable Energy and Environment*.
- BP company**, Retrieved 19 August 2021. «Statistical Review of World Energy (2021)».
- Ciucci, M.**, 2020, Νοέμβριος. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο.
- Combe N., Harrison D., Craig S., Young M.**, 2012. «An investigation into usability and exclusivity issues of digital programmable thermostats». *Journal of Engineering Design*.
- Crall C. P.**, 2015, Ιούλιος 1. «Understanding Thermal Systems: Industrial Refrigeration Systems». *Insulation Outlook*.
- Gaglia A. G. et al.**, 2019. «Energy performance of European residential buildings: Energy use, technical and environmental characteristics of the Greek Energy Build».
- Duffie John A., Beckman William A.**, 2013. «Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition».
- Dannemand M., B. Perers, S. Furbo**, 2019. Performance of a demonstration solar PVT assisted heat pump system with cold buffer storage and domestic hot water storage tanks. *Energy Build*, ch. 188, pp.46-57
- Di Perna C. G. Magri, G. Giuliani, G. Serenelli**, 2015. «Experimental assessment and dynamic analysis of a hybrid generator composed of an air source heat pump coupled with a condensing gas boiler in a residential building». *Appl. Therm. Eng.*, ch. 76, pp. 86-97
- Emhofer J.**, 2021. «Experimental demonstration of an air-source heat pump application using an integrated phase change material storage as a desuperheater for domestic hot water generation». *Applied Energy*.
- Esen M., Ayhan T.**, 1996. «Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for different phase change materials». *Energy Convers. Manage.*, ch. 37, pp.1775-1785
- Esen M., Durmuş A., Durmuş A.**, 1998. «Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials». *Solar Energy*, ch. 37, pp. 19-28

- Esen M.**, 2000. «Thermal performance of a solar-aided latent heat store used for space heating by heat pump». *Solar Energy*, ch. 69, pp. 15-25
- Eurostat Energy Statistics – An Overview**, URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production (accessed on 22 September 2021)
- Evatt, D.**, 2015, Απρίλιος 22. «THE POWER OF CHOICE». Elephant Ears Service Company.
- Gareiou Z., Drimili E., Zervas E.**, 2021. Public acceptance of renewable energy sources. *Low Carbon Energy Technologies in Sustainable Energy Systems*, Chapter 12, pp 309-327.
- G. Panaras, E. M.**, 2013. «Investigation of the performance of a combined solar thermal heat pump hot water system.». *Solar Energy*, pp. 169-182.
- Herez A., H. El Hage, T. Lemenand, M. Ramadan, M. Khaled**, 2020. «Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems». *Solar Energy*, ch. 207, pp. 1321-1347
- Jonas D., M. Lämmle, D. Theis, S. Schneider, G. Frey**, 2019. «Performance modeling of PVT collectors: Implementation, validation and parameter identification approach using TRNSYS». *Solar Energy*, ch. 193, pp. 51-64
- McQuiston, Faye C., Parker, Jerald D.**, 2003. «ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ». Τόμ.
- Mouzeviris G., Papakostas K.**, 1 Jun 2020. «Comparative Analysis of Air-to-Water and Ground Source Heat Pumps Performances». *International Journal of Sustainable Energy*.
- NASA, 2008**. «Solar System Exploration: Planets: Sun: Facts & Figures». NASA. 2 Ιανουαρίου 2008.
- Pallis, P.**, 2019. «Cost effectiveness assessment and beyond: A study on energy». *Energy Build*.
- Pérez-Lombard**, 2013. «A review of buildings energy consumption information». *Energy Build*, ch 40, pp. 394-398
- Pelleton Co.**, 2021. URL: <https://www.pelleton.gr/>
- Pezzutto S., Toleikyte A., De Felice M.**, 2015 «Assessment of the Space Heating and Cooling Market in the EU28: A Comparison between EU15 and EU13 Member States.». *International Journal of Contemporary Energy*.
- Poppi S., C. Bales, A. Heinz, F. Hengel, D. Chèze, I. Mojic, C. Cialani**, 2016. «Analysis of system improvements in solar thermal and air source heat pump combisystems». *Appl. Energy*, ch. 173, pp. 606-623
- Radwan A.Almasri, Nidal H.Abu-Hamdeh, Khaled Khodary Esmaeil, S.Suyambazhahan**, 2022. «Thermal solar sorption cooling systems - A review of principle, technology, and applications». *Alexandria Engineering Journal*. vol. 61, pp. 367-402

Reda F. S. Paiho, R. Pasonen, M. Helm, F. Menhart, R. Schex, A. Laitinen, 2020. «Comparison of solar assisted heat pump solutions for office building applications in Northern climate». *Renewable Energy*, ch. 147 , pp.1392-1417

Selasenergy Co., 2021. URL: <https://selasenergy.gr>

Seyed Houman Razavi, R. A., 2018. «Modeling, simulation and dynamic control of solar assisted ground source heat pump to provide heating load and DHW.». *Applied Thermal Engineering*, pp. 127-144.

Sunbelt-solar. URL: <https://Sunbelt-solar.com>

TaxtWalnum, H., 2021. «Measurement data on domestic hot water consumption and related energy use in hotels, nursing homes and apartment buildings in Norway». *Data in brief*.

The Renewable Energy Hub, 2020. URL: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/heat-pumps-information/>

Wang X. P. Cui, W. Zhang, X. Zhou, L. Li, 2017. «Optimal Design methods and experimental validation for hybrid ground source heat pump system with gas boiler». *Procedia Eng.*, ch., 205, pp. 4149-4156

World Energy Council, 2013. «World Energy Resources», ch. 8 Solar

Ε. Σουλιώτης, Γ. Πανάρας, 2019. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΠΕ. Μάθημα 4: «Υπολογισμός ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο».

ΕΝ.Ε.ΕΠΙ.Θ.Ε., 2020. «Αντλίες Θερμότητας: Μέγιστη Εξοικονόμηση Ενέργειας και Ιδανικό Περιβάλλον Χειμώνα-Καλοκαίρι». Ένωση Ελληνικών Επιχειρήσεων Θέρμανσης και Ενέργειας.

Μανωλάκος, Δ., 2020. «Σημειώσεις μαθήματος 'Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική». Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ&ΓΜ.

Μαρτινόπουλος Γ. Τσιλιγκιρίδης Γ., 2006. «Ηλιακά Θερμικά συστήματα στην Ελλάδα-Περιβαλλοντικά Οφέλη». Πρακτικά 8ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, σελ. 99-106, Θεσσαλονίκη

ΤΕΕ, 2017α. «Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1.» *Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων και την έκδοση ΠΕΑ*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, , 2017

ΤΕΕ, 2017β. "Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3." *"Κλιματικά δεδομένα Ελληνικών περιοχών"*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017.

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ(ΤΕΕ), 2011. Αθήνα. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. Στο Τ. Ε. ΕΛΛΑΔΑΣ, ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΤΩΝ Α. ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ.

Χριστοδουλάκη Ρ., 2008. «Εφαρμογές Θερμικών Ηλιακών στον Κτιριακό Τομέα». Ημερίδα για Νέες Τεχνολογίες στα Κτίρια Ελλάδας.

ΤΕΕ, 2010α. Τεχνική Οδηγία ΤΟΤΕΕ 20701-3. «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών»

Παράρτημα

Π.1 Σενάριο θέρμανσης ΖΝΧ με ηλιακούς συλλέκτες.

```
% Author : Chris Vlachos
% Date : 15 September 2021

NO = 0.86;
NO2= 0.82;
NO3= 0.75;
NO4= 0.57;
AC = 2; % (m^2)
AT = 6.48; % (m^2)
UT = 0.4; % (Συντελεστής απωλειών δεξαμενής) W/m^2*C
UO = 21.5;
UO2= 7.5;
UO3= 5;
UO4=1.82;
M = 150; % (kg)
BO = 0.15;
CP = 4186; % (J/kg*C)
Ti = [11.3 10.9 11.8 14.3 17.7 21.6 24.7 25.7 24.2 21.1 16.9 13.5]; % (Νερό
δικτύου για Αθήνα)
Ta = xlsread('T_full.xlsx'); % (Θερμοκρασία αέρα για Αθήνα)
t_tw = (7:19)';
G = xlsread('SR.xlsx'); % (Ακτινοβολία για Αθήνα)
Ltop = 23.72;
Lz = 30;

%Υπολογισμός γωνίας θ για κάθε ώρα/ημέρα/μήνα

b = 45; % κλίση συλλέκτη
c = 0; % Γωνία αζιμούθιου
f = 37.96; % γεωγραφικό πλάτος Αθήνας

B = zeros(1,365);
Et = zeros(1,365);
d = zeros(1,365);
t_thw = zeros(13,365);
w = zeros(13,365);
sin_a = zeros(13,365);
a = zeros(13,365);
sin_cs = zeros(13,365);
cs = zeros(13,365);
cos_U = zeros(13,365);
U = zeros(13,365);
Kta = zeros(13,365);
Gdio = zeros(13,365);

%Διόρθωση ακτινοβολίας για συλλέκτη με κλίση

for n=1:365
```

```

    B(n) = (n - 81) * 360 / 364; %
    Κλίση άξονα γης
    Et(n) = 9.87 * sind(2*B(n)) - 7.53 * cosd(B(n)) - 1.5 * sind(B(n)); %
    Ελλειπτική τροχιά γης
    d(n) = 23.45 * sind(360*(284+n)/365); %
    Γωνία ηλιακής απόκλισης

    for j=1:13

        t_thw(j,n) = t_tw(j) + (Ltop-Lz)/15 + Et(n)/60;
    % Τοπική ηλιακή ώρα
        w(j,n) = (t_thw(j,n) - 12)*360/24;
    % Ωριαία γωνία
        sin_a(j,n) = cosd(d(n))*cosd(f)*cosd(w(j,n))+sind(d(n))*sind(f);
        a(j,n) = asind(sin_a(j,n));
    % Ηλιακό ύψος
        sin_cs(j,n) = cosd(d(n))*sind(w(j,n))./cosd(a(j,n));
        cs(j,n) = asind(sin_cs(j,n));
    %Γωνία ηλιακού αζιμούθιου
        cos_U(j,n) = cosd(a(j,n))*sind(b).*cosd(cs(j,n) -
c)+sind(a(j,n))*cosd(b);
        U(j,n) = acosd(cos_U(j,n));
    %Γωνία θ πρόσπτωσης

        %Υπολογισμός συντελεστή Kta
        Kta(j,n) = 1 - BO*(( 1 / cosd(U(j,n))) - 1);

        %Διόρθωση ακτινοβολίας για συλλέκτη με κλίση
        Gdio(j,n) = G(n,j) * cosd(U(j,n))*10^6; % (J)

    end
end

%Ετήσιος πίνακας Ti
Ti_y=zeros(24,365);
for n=1:12
    if n<=7
        if n==1
            Ti_y(1:24,1:31)=Ti(n);
        elseif n==2
            Ti_y(1:24,32:59)=Ti(n);
        elseif mod(n,2)==1
            fd=59+(n-3)*30+fix(n/2);
            ld=fd+30;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        else
            fd=59+(n-3)*30+(n/2);
            ld=fd+29;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        end
    end
    else
        if mod(n,2)==1
            fd=212+(n-8)*30+(fix(n/2)-2);
            ld=fd+29;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        else
            fd=212+(n-8)*30+((n/2)-3);
            ld=fd+30;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        end
    end
end

```



```

end
end

Gd=zeros(24,365);
Gd(7:19,1:365)=Gdio;
Kta2=zeros(24,365);
Kta2(7:19,1:365)=Kta;

Tst=zeros(24,365);
Tst2=zeros(24,365);
Tst3=zeros(24,365);
Tst4=zeros(24,365);
Tst(1,1)=Ti(1);
Tst2(1,1)=Ti(1);
Tst3(1,1)=Ti(1);
Tst4(1,1)=Ti(1);
Etotal=zeros(24,365);
Etotal2=zeros(24,365);
Etotal3=zeros(24,365);
Etotal4=zeros(24,365);
Etotal(1,365)=0;
Etotal2(1,365)=0;
Etotal3(1,365)=0;
Etotal4(1,365)=0;
Ql=zeros(24,365);
Ql2=zeros(24,365);
Ql3=zeros(24,365);
Ql4=zeros(24,365);
Qsol=zeros(24,365);
Qsol2=zeros(24,365);
Qsol3=zeros(24,365);
Qsol4=zeros(24,365);
Nsol=zeros(19,365);
Nsol2=zeros(19,365);
Nsol3=zeros(19,365);
Nsol4=zeros(19,365);

%Υπολογισμοί Tst για όλο το έτος, Qsolar ηλιακού Qloss δοχείου

%Χωρίς κάλυμα

for i=2:6
    Ql(i,1)=(UT * AT * (Tst(i-1,1) - Ta(1,i)))*3600;
    Qsol(i,1)=0;
    Etotal(i,1)=Qsol(i,1)-Ql(i,1);
    Tst(i,1) = Tst(i-1,1) + Etotal(i,1) / (M * CP);
end

for n=1:365
    for i=7:19
        if Gd(i,n)==0
            Ql(i,n)=(UT * AT * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
            Qsol(i,n)=0;
            Etotal(i,n)=Qsol(i,n)-Ql(i,n);
            Tst(i,n) = Tst(i-1,n) + Etotal(i,n) / (M * CP);
        else
            Nsol(i,n) = Kta2(i,n) * NO - UO * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i)) /
(Gd(i,n)*1000);
            Qsol(i,n) = Nsol(i,n) * Gd(i,n) * AC;
            Ql(i,n)= UT * AT * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i))*3600;

```

```

        Etotal(i,n) = Qsol(i,n)-Ql(i,n);
        Tst(i,n) = Tst(i-1,n) + Etotal(i,n) / (M * CP);
    end
end
Qap(1,n)=M*CP*(Tst(19,n)-Ti_y(19,n));
Tst(20,n)=Ti_y(20,n);
for i=21:24
    Ql(i,n)= (UT * AT * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
    Qsol(i,n)=0;
    Etotal(i,n)=Qsol(i,n)-Ql(i,n);
    Tst(i,n) = Tst(i-1,n) + Etotal(i,n) / (M * CP);
end
if n<365
    Ql(1,n+1)= (UT * AT * (Tst(24,n) - Ta(n+1,1)))*3600;
    Qsol(1,n+1)=0;
    Etotal(1,n+1)=Qsol(1,n+1)-Ql(1,n+1);
    Tst(1,n+1) = Tst(24,n) + Etotal(1,n+1) / (M * CP);
    for i=2:6
        Ql(i,n+1)= (UT * AT * (Tst(i-1,n+1) - Ta(n+1,i)))*3600;
        Qsol(i,n+1)=0;
        Etotal(i,n+1)=Qsol(i,n+1)-Ql(i,n+1);
        Tst(i,n+1) = Tst(i-1,n+1) + Etotal(i,n+1) / (M * CP);
    end
end
end
end

%Μονού υαλοπίνακα

for i=2:6
    Ql2(i,1)= (UT * AT * (Tst2(i-1,1) - Ta(1,i)))*3600;
    Qsol2(i,1)=0;
    Etotal2(i,1)=Qsol2(i,1)-Ql2(i,1);
    Tst2(i,1) = Tst2(i-1,1) + Etotal2(i,1) / (M * CP);
end

for n=1:365
    for i=7:19
        if Gd(i,n)==0
            Ql2(i,n)= (UT * AT * (Tst2(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
            Qsol2(i,n)=0;
            Etotal2(i,n)=Qsol2(i,n)-Ql2(i,n);
            Tst2(i,n) = Tst2(i-1,n) + Etotal2(i,n) / (M * CP);
        else
            Nsol2(i,n) = Kta2(i,n) * NO2 - UO2 * (Tst2(i-1,n) -
Ta(n,i)) / (Gd(i,n)*1000);
            Qsol2(i,n) = Nsol2(i,n) * Gd(i,n) * AC;
            Ql2(i,n)= UT * AT * (Tst2(i-1,n) - Ta(n,i))*3600;
            Etotal2(i,n) = Qsol2(i,n)-Ql2(i,n);
            Tst2(i,n) = Tst2(i-1,n) + Etotal2(i,n) / (M * CP);
        end
    end
end
Qap2(1,n)=M*CP*(Tst2(19,n)-Ti_y(19,n));
Tst2(20,n)=Ti_y(20,n);
for i=21:24
    Ql2(i,n)= (UT * AT * (Tst2(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
    Qsol2(i,n)=0;
    Etotal2(i,n)=Qsol2(i,n)-Ql2(i,n);
    Tst2(i,n) = Tst2(i-1,n) + Etotal2(i,n) / (M * CP);
end
if n<365

```

```

Ql2(1,n+1)= (UT * AT * (Tst2(24,n) - Ta(n+1,1)))*3600;
Qsol2(1,n+1)=0;
Etotal2(1,n+1)=Qsol2(1,n+1)-Ql2(1,n+1);
Tst2(1,n+1) = Tst2(24,n) + Etotal2(1,n+1) / (M * CP);
for i=2:6
    Ql2(i,n+1)= (UT * AT * (Tst2(i-1,n+1) - Ta(n+1,i)))*3600;
    Qsol2(i,n+1)=0;
    Etotal2(i,n+1)=Qsol2(i,n+1)-Ql2(i,n+1);
    Tst2(i,n+1) = Tst2(i-1,n+1) + Etotal2(i,n+1) / (M * CP);
end
end
end

%Επιλεκτικός

for i=2:6
    Ql3(i,1)= (UT * AT * (Tst3(i-1,1) - Ta(1,i)))*3600;
    Qsol3(i,1)=0;
    Etotal3(i,1)=Qsol3(i,1)-Ql(i,1);
    Tst3(i,1) = Tst3(i-1,1) + Etotal3(i,1) / (M * CP);
end

for n=1:365
    for i=7:19
        if Gd(i,n)==0
            Ql3(i,n)= (UT * AT * (Tst3(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
            Qsol3(i,n)=0;
            Etotal3(i,n)=Qsol3(i,n)-Ql3(i,n);
            Tst3(i,n) = Tst3(i-1,n) + Etotal3(i,n) / (M * CP);
        else
            Nsol3(i,n) = Kta2(i,n) * NO3 - UO3 * (Tst3(i-1,n) -
Ta(n,i)) / (Gd(i,n)*1000);
            Qsol3(i,n) = Nsol3(i,n) * Gd(i,n) * AC;
            Ql3(i,n)= UT * AT * (Tst3(i-1,n) - Ta(n,i))*3600;
            Etotal3(i,n) = Qsol3(i,n)-Ql3(i,n);
            Tst3(i,n) = Tst3(i-1,n) + Etotal3(i,n) / (M * CP);
        end
    end
    Qap3(1,n)=M*CP*(Tst3(19,n)-Ti_y(19,n));
    Tst3(20,n)=Ti_y(20,n);
    for i=21:24
        Ql3(i,n)= (UT * AT * (Tst3(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
        Qsol3(i,n)=0;
        Etotal3(i,n)=Qsol3(i,n)-Ql(i,n);
        Tst3(i,n) = Tst3(i-1,n) + Etotal3(i,n) / (M * CP);
    end
    if n<365
        Ql3(1,n+1)= (UT * AT * (Tst3(24,n) - Ta(n+1,1)))*3600;
        Qsol3(1,n+1)=0;
        Etotal3(1,n+1)=Qsol3(1,n+1)-Ql3(1,n+1);
        Tst3(1,n+1) = Tst3(24,n) + Etotal3(1,n+1) / (M * CP);
        for i=2:6
            Ql3(i,n+1)= (UT * AT * (Tst3(i-1,n+1) - Ta(n+1,i)))*3600;
            Qsol3(i,n+1)=0;
            Etotal3(i,n+1)=Qsol3(i,n+1)-Ql3(i,n+1);
            Tst3(i,n+1) = Tst3(i-1,n+1) + Etotal3(i,n+1) / (M * CP);
        end
    end
end
end

%Κενού άερα

```

```

for i=2:6
    Ql4(i,1)=(UT * AT * (Tst4(i-1,1) - Ta(1,i)))*3600;
    Qsol4(i,1)=0;
    Ettotal4(i,1)=Qsol4(i,1)-Ql4(i,1);
    Tst4(i,1) = Tst4(i-1,1) + Ettotal4(i,1) / (M * CP);
end

for n=1:365
    for i=7:19
        if Gd(i,n)==0
            Ql4(i,n)=(UT * AT * (Tst4(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
            Qsol4(i,n)=0;
            Ettotal4(i,n)=Qsol4(i,n)-Ql4(i,n);
            Tst4(i,n) = Tst4(i-1,n) + Ettotal4(i,n) / (M * CP);
        else
            Nsol4(i,n) = Kta2(i,n) * NO4 - UO4 * (Tst4(i-1,n) -
Ta(n,i)) / (Gd(i,n)*1000);
            Qsol4(i,n) = Nsol4(i,n) * Gd(i,n) * AC;
            Ql4(i,n)= UT * AT * (Tst4(i-1,n) - Ta(n,i))*3600;
            Ettotal4(i,n) = Qsol4(i,n)-Ql(i,n);
            Tst4(i,n) = Tst4(i-1,n) + Ettotal4(i,n) / (M * CP);
        end
    end
    Qap4(1,n)=M*CP*(Tst4(19,n)-Ti_y(19,n));
    Tst4(20,n)=Ti_y(20,n);
    for i=21:24
        Ql4(i,n)=(UT * AT * (Tst4(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
        Qsol4(i,n)=0;
        Ettotal4(i,n)=Qsol4(i,n)-Ql4(i,n);
        Tst4(i,n) = Tst4(i-1,n) + Ettotal4(i,n) / (M * CP);
    end
    if n<365
        Ql4(1,n+1)=(UT * AT * (Tst4(24,n) - Ta(n+1,1)))*3600;
        Qsol4(1,n+1)=0;
        Ettotal4(1,n+1)=Qsol4(1,n+1)-Ql4(1,n+1);
        Tst4(1,n+1) = Tst4(24,n) + Ettotal4(1,n+1) / (M * CP);
        for i=2:6
            Ql4(i,n+1)=(UT * AT * (Tst4(i-1,n+1) - Ta(n+1,i)))*3600;
            Qsol4(i,n+1)=0;
            Ettotal4(i,n+1)=Qsol4(i,n+1)-Ql4(i,n+1);
            Tst4(i,n+1) = Tst4(i-1,n+1) + Ettotal4(i,n+1) / (M * CP);
        end
    end
end
end

Tst(19,165)
Tst2(19,165)
Tst3(19,165)
Tst4(19,165)

Tt=sum(Tst(7:19,1:365))/13;
Tts=sum(Tt(1,1:365))/365;
Tt2=sum(Tst2(7:19,1:365))/13;
Tts2=sum(Tt2(1,1:365))/365;
Tt3=sum(Tst3(7:19,1:365))/13;
Tts3=sum(Tt3(1,1:365))/365;
Tt4=sum(Tst4(7:19,1:365))/13;
Tts4=sum(Tt4(1,1:365))/365;

x2=1:4;

```

```

X2=x2.';

xeim=sum(Qap(1,1:62))+sum(Qap(1,335:365));
apx1=[xeim sum(Qap(1,63:154)) sum(Qap(1,154:246)) sum(Qap(1,246:334))];

Qtot=sum(Qsol(1:19,1:365));
Qsoltot=sum(Qtot(1,1:365));
Qtot2=sum(Qsol2(1:19,1:365));
Qsoltot2=sum(Qtot2(1,1:365));
Qtot3=sum(Qsol3(1:19,1:365));
Qsoltot3=sum(Qtot3(1,1:365));
Qtot4=sum(Qsol4(1:19,1:365));
Qsoltot4=sum(Qtot4(1,1:365));

NSOL=sum(Nsol(7:19,227))/13;
NSOL2=sum(Nsol2(7:19,227))/13;
NSOL3=sum(Nsol3(7:19,227))/13;
NSOL4=sum(Nsol4(7:19,227))/13;

Gdio_tot=sum(Gdio(1:13,1:365));
ggg=sum(Gdio_tot(1,1:365));

G19=sum(Gdio(1:13,19));
G227=sum(Gdio(1:13,227));

Q119=sum(Q1(7:19,19));
Q19=sum(Qsol(1:19,19));
Q227=sum(Qsol(1:19,227));
Q219=sum(Qsol2(1:19,19));
Q2227=sum(Qsol2(1:19,227));
Q319=sum(Qsol3(1:19,19));
Q3227=sum(Qsol3(1:19,227));
Q419=sum(Qsol4(1:19,19));
Q4227=sum(Qsol4(1:19,227));

Gdio_f(7:19,1:365)=Gdio(1:13,1:365);
Ta_f=Ta.';

x1=1:19;
x=x1.';

figure(1);
[Max_Rad]=plotyy(x,Qsol(x1,227),x,Tst(x1,227));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,227),'c');
plot(Max_Rad(2),x,Ta_f(1:19,227),'m');
legend('Qsol','G','Tst','Ta')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1),'Ενέργειες [J]')
ylabel(Max_Rad(2),'Θερμοκρασίες [°C]')

figure(2);
[Max_Rad]=plotyy(1:19,Qsol2(1:19,227),1:19,Tst2(1:19,227));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,227),'c');

```

```

plot(Max_Rad(2),x,Ta_f(1:19,227),'m');
legend('Qsol','G','Tst','Ta')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(Max_Rad(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')

figure(3);
[Max_Rad]=plotyy(1:19,Qsol3(1:19,227),1:19,Tst3(1:19,227));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,227),'c');
plot(Max_Rad(2),x,Ta_f(1:19,227),'m');
legend('Qsol','G','Tst','Ta')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(Max_Rad(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')

figure(4);
[Max_Rad]=plotyy(1:19,Qsol4(1:19,227),1:19,Tst4(1:19,227));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,227),'c');
plot(Max_Rad(2),x,Ta_f(1:19,227),'m');
legend('Qsol','G','Tst','Ta')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός συλλέκτης με σωληνες κενού αέρα')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(Max_Rad(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')

figure(5);
[Max_Rad]=plotyy(1:19,Qsol(1:19,19),1:19,Ta_f(1:19,19));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,19),'c');
plot(Max_Rad(2),x,Tst(1:19,19),'m');
legend('Qsol','G','Ta','Tst')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(Max_Rad(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')
%grid on

figure(6);
[Max_Rad]=plotyy(1:19,Qsol2(1:19,19),1:19,Ta_f(1:19,19));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,19),'c');
plot(Max_Rad(2),x,Tst2(1:19,19),'m');
legend('Qsol','G','Ta','Tst')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός συλλέκτης μονού υαλοπίνακα')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1), 'Ενέργειες [J]')

```

```

ylabel(Max_Rad(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')

figure(7);
[Max_Rad]=plotyy(1:19,Qsol3(1:19,19),1:19,Ta_f(1:19,19));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,19),'c');
plot(Max_Rad(2),x,Tst3(1:19,19),'m');
legend('Qsol','G','Ta','Tst')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός επιλεκτικός συλλέκτης')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(Max_Rad(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')

```

```

figure(8);
[Max_Rad]=plotyy(1:19,Qsol4(1:19,19),1:19,Ta_f(1:19,19));
hold(Max_Rad(1));
hold(Max_Rad(2));
plot(Max_Rad(1),x,Gdio_f(1:19,19),'c');
plot(Max_Rad(2),x,Tst4(1:19,19),'m');
legend('Qsol','G','Ta','Tst')
legend('Location','northwest')
title('Ηλιακός συλλέκτης με σωληνες κενού αέρα')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(Max_Rad(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(Max_Rad(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')
set(Max_Rad(2), 'YLim', [0 16])
set(Max_Rad(2), 'YTick', [0:2:16])

```

```

figure (10)
bar(apx1)
title ('Εποχιακό φορτίο απομάστευσης Qap.')
xlabel ('Χειμώνας', 'Ανοιξη', 'Καλοκαίρι', 'Φθινόπωρο')
ylabel ('Qap(J)');

```

```

figure (11)
plot(x3,Qap(1,1:365));
hold on
plot(x3,Qap2(1,1:365));
hold on
plot(x3,Qap3(1,1:365));
hold on
plot(x3,Qap4(1,1:365));
hold off

```

```

figure (12)
plot(1:24,Ta_f(1:24,19))
hold on
plot(1:24,Ta_f(1:24,227))
hold off

```

```

QQ = [Qsoltot Qsoltot2 Qsoltot3 Qsoltot4];
figure(9)
bar(QQ);
title ('Ετήσια θερμικά κέρδη Qsol για κάθε συλλέκτη')
xlabel('Συλλέκτης χωρίς κάλυμμα', 'Συλλέκτης μονού υαλοπίνακα', 'Επιλεκτικός συλλέκτης', 'Συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρα')

```

```
ylabel ('Qsol(J)');  
  
TT_xwris = [34.7 64 28.2 24.4];  
figure (13)  
bar(TT_kenou)  
title ('Ετήσια μέση θερμοκρασία δεξαμενής Tst,average')  
ylabel ('Tst(C)');
```


Π.2 Σενάριο θέρμανσης ZNX με A/Θ.

```
% Author : Chris Vlachos
% Date : 15 September 2021

AT = 6.48; %(m^2)
UT = 0.4; %(Συντελεστής απωλειών δεξαμενής) W/m^2*C
M = 150; %(kg)
CP = 4186; %(J/kg*C)
Ti = [11.3 10.9 11.8 14.3 17.7 21.6 24.7 25.7 24.2 21.1 16.9 13.5]; %(Νερό
δικτύου για Αθήνα)
Ta = xlsread('T_full.xlsx'); %(Θερμοκρασία αέρα για Αθήνα)
Fhp = 256.9; %(Παροχή A/Θ σε kg την ώρα)
setpoint=45;

Pw=[2000; 3000];
Qhp_o=zeros(24,365);
Qhp_o(7:19,1:365)=3000*3600;
Qhp_gs_o=zeros(19,365);
Qhp_gs_o(7:19,1:365)=3000*3600;
Pel=zeros(19,365);
Pel_gs=zeros(19,365);
COP_o=zeros(19,365);
COP_gs_o=zeros(19,365);

%Ετήσιος πίνακας Ti
Ti_y=zeros(24,365);
for n=1:12
    if n<=7
        if n==1
            Ti_y(1:24,1:31)=Ti(n);
        elseif n==2
            Ti_y(1:24,32:59)=Ti(n);
        elseif mod(n,2)==1
            fd=59+(n-3)*30+fix(n/2);
            ld=fd+30;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        else
            fd=59+(n-3)*30+(n/2);
            ld=fd+29;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        end
    end
    else
        if mod(n,2)==1
            fd=212+(n-8)*30+(fix(n/2)-2);
            ld=fd+29;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        else
            fd=212+(n-8)*30+((n/2)-3);
            ld=fd+30;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        end
    end
end

%Θέρμανση ZNX μόνο με αντλίες θερμότητας

%Αέρα-νερού
```

```

Tst_hp=zeros(24,365);

for n=1:365
    Tst_hp(6,n)=Ti_y(1,n);
end

for n=1:365
    for i=7:19
        %Qhp_o(i,n) = (2384.6 + (18 * Ta(n,i)) - (22 * Tst_hp(i-
1,n))) * 3600;
        Twout_o(i,n) = Tst_hp(i-1,n) + ( Qhp_o(i,n) / (Fhp * CP));
        DT_o(i,n) = Twout_o(i,n) - Ta(n,i);
        COP_o(i,n) = 0.001 * DT_o(i,n) .^2 - 0.1534 * DT_o(i,n) +
7.3775;
        Pel(i,n) = Qhp_o(i,n)/COP_o(i,n);
        Ql_o(i,n)= (UT * AT * (Tst_hp(i-1,n) - Ta(n,i))) * 3600;
        Etotal_hp(i,n)=Qhp_o(i,n)-Ql_o(i,n);
        Tst_hp(i,n) = Twout_o(i,n) - (Ql_o(i,n)/(M * CP));
        if Tst_hp(i,n)>setpoint
            Qhp_o(i+1:19,n)=0;
            break
        end
    end
end

end

%Γεωθερμική
Tst_gs=zeros(24,365);

for n=1:365
    Tst_gs(6,n)=Ti_y(1,n);
end

for n=1:365
    for i=7:19
        %Qhp_gs_o(i,n) = (2384.6 + (18 * Ti_y(i,n)) - (22 * Tst_gs(i-
1,n))) * 3600;
        Twout_gs_o(i,n) = Tst_gs(i-1,n) + ( Qhp_gs_o(i,n) / (Fhp *
CP));
        DT_gs_o(i,n) = Twout_gs_o(i,n) - Ti_y(i,n);
        COP_gs_o(i,n) = 0.001 * DT_gs_o(i,n) .^2 - 0.1534 *
DT_gs_o(i,n) + 7.3775;
        Pel_gs(i,n) = Qhp_gs_o(i,n)/COP_gs_o(i,n);
        Ql_gs_o(i,n)= (UT * AT * (Tst_gs(i-1,n) - Ta(n,i))) * 3600;
        Etotal_gs(i,n)=Qhp_gs_o(i,n)-Ql_gs_o(i,n);
        Tst_gs(i,n) = Twout_gs_o(i,n) - (Ql_gs_o(i,n)/(M * CP));
        if Tst_gs(i,n)>setpoint
            Qhp_gs_o(i+1:19,n)=0;
            break
        end
    end
end

end

for n=1:365
    for i=7:19
        if Qhp_o(i,n) ~= 0
            HoO(i,n)=1;
        end
    end
end

```

```

end

for n=1:365
    for i=7:19
        if Qhp_gs_o(i,n) ~= 0
            HoO_gs(i,n)=1;
        end
    end
end

HoO_t=sum(HoO(1:10,1:365));
HoO_tt=sum(HoO_t(1,1:365))/365;

HoO_gs_t=sum(HoO_gs(1:10,1:365));
HoO_gs_tt=sum(HoO_gs_t(1,1:365))/365;

h2=4.0712; %12 15
hgs2=6.8603;

h3=3.4082; %11 12
hgs3=4.8274;

Qhp_t=sum(Qhp_o(1:19,1:365));
Qhp_tt=sum(Qhp_t(1,1:365));
Qhp_gs_t=sum(Qhp_gs_o(1:19,1:365));
Qhp_gs_tt=sum(Qhp_gs_t(1,1:365));
Pel_t=sum(Pel(1:19,1:365));
Pel_tt=sum(Pel_t(1,1:365));
Pel_gs_t=sum(Pel_gs(1:19,1:365));
Pel_gs_tt=sum(Pel_gs_t(1,1:365));
COP_av = sum(COP_o(7:19,1:365))/13;
COP_avg = sum(COP_av(1,1:365))/365;
COP_avgs = sum(COP_gs_o(7:19,1:365))/13;
COP_avg_gs = sum(COP_avggs(1,1:365))/365;

QHP = [Qhp_tt Pel_tt; Qhp_gs_tt Pel_gs_tt ];
figure (1)
bar(QHP)
title ('Ετήσια θερμική και ηλεκτρική ενέργεια')
ylabel ('Qhp(J), Pel(J)');
legend ('Qhp', 'Pel')
legend('Location', 'north')

Xam=sum(Qhp_o(1:19,19));
Yps=sum(Qhp_o(1:19,227));
PXam=sum(Pel(1:19,19));
PYps=sum(Pel(1:19,227));

QQ= [Xam PXam; Yps PYps];
figure (2)
bar(QQ)
title ('Ετήσια θερμική και ηλεκτρική ενέργεια για μέρα χαμηλής και υψηλής ακτινοβολίας')
ylabel ('Qhp(J), Pel(J)');
legend ('Qhp', 'Pel')
legend('Location', 'north')

```

Π.3 Σενάριο διερεύνησης ηλιακού συστήματος θέρμανσης ΖΝΧ υποβοηθούμενο από Α/Θ

```
% Author : Chris Vlachos
% Date : 15 September 2021

NO = 0.86;
NO2= 0.75;
NO3= 0.57;
NO4= 0.86;
AC = 2; %(m^2)
AT = 6.48; %(m^2)
UT = 0.4; %(Συντελεστής απωλειών δεξαμενής) W/m^2*C
UO = 21.5;
UO2= 5;
UO3= 1.82;
UO4= 21.5;
M = 150; %(kg)
BO = 0.15;
CP = 4186; %(J/kg*C)
Ti = [11.3 10.9 11.8 14.3 17.7 21.6 24.7 25.7 24.2 21.1 16.9 13.5]; %(Νερό
δικτύου για Αθήνα)
Ta = xlsread('T_full.xlsx'); %(Θερμοκρασία αέρα για Αθήνα)
t_tw = (7:19)';
G = xlsread('SR.xlsx'); %(Ακτινοβολία για Αθήνα)
Ltop = 23.72;
Lz = 30;
Fhp = 256.9; %(Παροχή Α/Θ σε kg την ώρα)

%Υπολογισμός γωνίας θ για κάθε ώρα/ημέρα/μήνα

b = 45; % κλίση συλλέκτη
c = 0; % Γωνία αζιμούθιου
f = 37.96; % γεωγραφικό πλάτος Αθήνας

B = zeros(1,365);
Et = zeros(1,365);
d = zeros(1,365);
t_thw = zeros(13,365);
w = zeros(13,365);
sin_a = zeros(13,365);
a = zeros(13,365);
sin_cs = zeros(13,365);
cs = zeros(13,365);
cos_U = zeros(13,365);
U = zeros(13,365);
Kta = zeros(13,365);
Gdio = zeros(13,365);

%Διόρθωση ακτινοβολίας για συλλέκτη με κλίση

for n=1:365
```

```

B(n) = (n -81) * 360 / 364; %
Κλίση άξονα γης
Et(n) = 9.87 * sind(2*B(n)) - 7.53 * cosd(B(n)) - 1.5 * sind(B(n)); %
Ελλειπτική τροχιά γης
d(n) = 23.45 * sind(360*(284+n)/365); %
Γωνία ηλιακής απόκλισης

for j=1:13

    t_thw(j,n) = t_tw(j) + (Ltop-Lz)/15 + Et(n)/60;
% Τοπική ηλιακή ώρα
    w(j,n) = (t_thw(j,n) - 12)*360/24;
% Ωριαία γωνία
    sin_a(j,n) = cosd(d(n))*cosd(f)*cosd(w(j,n))+sind(d(n))*sind(f);
    a(j,n) = asind(sin_a(j,n));
% Ηλιακό ύψος
    sin_cs(j,n) = cosd(d(n))*sind(w(j,n))./cosd(a(j,n));
    cs(j,n) = asind(sin_cs(j,n));
%Γωνία ηλιακού αζιμούθιου
    cos_U(j,n) = cosd(a(j,n))*sind(b).*cosd(cs(j,n)-
c)+sind(a(j,n))*cosd(b);
    U(j,n) = acosd(cos_U(j,n));
%Γωνία θ πρόπτωσης

    %Υπολογισμός συντελεστή Kta
    Kta(j,n) = 1 - BO*(( 1 / cosd(U(j,n))) - 1);

    %Διόρθωση ακτινοβολίας για συλλέκτη με κλίση
    Gdio(j,n) = G(n,j) * cosd(U(j,n))*10^6; % (W)

end
end

%Ετήσιος πίνακας Ti
Ti_y=zeros(24,365);
for n=1:12
    if n<=7
        if n==1
            Ti_y(1:24,1:31)=Ti(n);
        elseif n==2
            Ti_y(1:24,32:59)=Ti(n);
        elseif mod(n,2)==1
            fd=59+(n-3)*30+fix(n/2);
            ld=fd+30;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        else
            fd=59+(n-3)*30+(n/2);
            ld=fd+29;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        end
    end
    else
        if mod(n,2)==1
            fd=212+(n-8)*30+(fix(n/2)-2);
            ld=fd+29;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        else
            fd=212+(n-8)*30+(n/2)-3;
            ld=fd+30;
            Ti_y(1:24,fd:ld)=Ti(n);
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

Gd=zeros(24,365);
Gd(7:19,1:365)=Gdio;
Kta2=zeros(24,365);
Kta2(7:19,1:365)=Kta;

Tst=zeros(24,365);
Tst2=zeros(24,365);
Tst3=zeros(24,365);
Tst4=zeros(24,365);
Tst_g=zeros(24,365);
Tst_g2=zeros(24,365);
Tst_g3=zeros(24,365);
Tst_g4=zeros(24,365);
Tst(1,1)=Ti(1);
Tst2(1,1)=Ti(1);
Tst3(1,1)=Ti(1);
Tst4(1,1)=Ti(1);
Tst_g(1,1)=Ti(1);
Tst_g2(1,1)=Ti(1);
Tst_g3(1,1)=Ti(1);
Tst_g4(1,1)=Ti(1);
Etotal=zeros(24,365);
Etotal(1,365)=0;
Ql=zeros(24,365);
Qsol=zeros(24,365);
Pel=zeros(24,365);

Qhp=zeros(24,365);
Qhp(19:24,1:365)=3000*3600;

%Υπολογισμοί Tst για όλο το έτος, Qsolar ηλιακού Qloss δοχείου και Qhp %

% ΑΠΛΟΣ ΚΑΙ ΗΡ

for i=2:6
    Ql(i,1)=(UT * AT * (Tst(i-1,1) - Ta(1,i)))*3600;
    Qsol(i,1)=0;
    Etotal(i,1)=Qsol(i,1)-Ql(i,1);
    Tst(i,1) = Tst(i-1,1) + Etotal(i,1) / (M * CP);
end

for n=1:365
    for i=7:19
        if Gd(i,n)==0
            Ql(i,n)=(UT * AT * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
            Qsol(i,n)=0;
            Etotal(i,n)=Qsol(i,n)-Ql(i,n);
            Tst(i,n) = Tst(i-1,n) + Etotal(i,n) / (M * CP);
        else
            Nsol(i,n) = Kta2(i,n) * NO - UO * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i)) /
Gd(i,n);
            Qsol(i,n) = Nsol(i,n) * Gd(i,n) * AC;
            Ql(i,n)= UT * AT * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i))*3600;
            Etotal(i,n) = Qsol(i,n)-Ql(i,n);
            Tst(i,n) = Tst(i-1,n) + Etotal(i,n) / (M * CP);
        end
    end
end

```

```

        k(1,n)=i+1;
        if Tst(i,n)>=45
            Qhp(i+1:24,n)=0;
            break
        end
    end
end
if k(1,n)==20 && Tst(19,n)<50
    for i=20:24
        %Qhp(i,n) = (3384.6 + (18 * Ta(n,i)) - (22 * Tst(i-1,n)))*3600;
        Twout(i,n) = Tst(i-1,n) + ( Qhp(i,n) / (Fhp * CP)); %sos des
thn paroxi kai tis monades sou με Πανάρα
        DT(i,n) = Twout(i,n) - Ta(n,i);
        COP(i,n) = 0.001 * DT(i,n) .^2 - 0.1534 * DT(i,n) + 7.3775;
        Pel(i,n) = Qhp(i,n)/COP(i,n);
        Ql(i,n)= (UT * AT * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
        Etotal(i,n)=Qhp(i,n)-Ql(i,n);
        Tst(i,n) = Twout(i,n) + (Ql(i,n)/(M * CP));
        k(1,n)=i+1;
        if Tst(i,n)>=45
            Qhp(i+1:24,n)=0;
            break
        end
    end
end
end
for i=k(1,n)
    Tst(i,n)=Ti_y(i,n);
end
k(1,n)=k(1,n)+1;
for i=k(1,n):24
    Ql(i,n)= (UT * AT * (Tst(i-1,n) - Ta(n,i)))*3600;
    Qsol(i,n)=0;
    Etotal(i,n)=Qsol(i,n)-Ql(i,n);
    Tst(i,n) = Tst(i-1,n) + Etotal(i,n) / (M * CP);
end
if n<365
    Ql(1,n+1)= (UT * AT * (Tst(24,n) - Ta(n+1,1)))*3600;
    Qsol(1,n+1)=0;
    Etotal(1,n+1)=Qsol(1,n+1)-Ql(1,n+1);
    Tst(1,n+1) = Tst(24,n) + Etotal(1,n+1) / (M * CP);
    for i=2:6
        Ql(i,n+1)= (UT * AT * (Tst(i-1,n+1) - Ta(n+1,i)))*3600;
        Qsol(i,n+1)=0;
        Etotal(i,n+1)=Qsol(i,n+1)-Ql(i,n+1);
        Tst(i,n+1) = Tst(i-1,n+1) + Etotal(i,n+1) / (M * CP);
    end
end
end
end
for n=1:365
    for i=19:24
        if Qhp(i,n) ~= 0
            HoO(i,n)=1;
        end
    end
end
end

HoO_t=sum(HoO(1:23,1:365));
HoO_tt=sum(HoO_t(1,1:365))/365;

Qhptot=sum(Qhp(1:24,1:365));
Qhp_tot=sum(Qhptot(1,1:365));

```

```

Qtot=sum(Qsol(1:19,1:365));
Qsoltot=sum(Qtot(1,1:365));
Pelt=sum(Pel(1:24,1:365));
Peltt=sum(Pelt(1,1:365));
Tt=sum(Tst(7:24,1:365))/18;
Tts=sum(Tt(1,1:365))/365;
Ta2= Ta.';

Qsol19=sum(Qsol(1:19,19));
Qsol227=sum(Qsol(1:19,227));
Qhp19=sum(Qhp(19:24,19));
Qhp227=sum(Qhp(19:24,227));
Pel19=sum(Pel(19:24,19));
Pel227=sum(Pel(19:24,227));
HoO19=sum(HoO(1:23,19));
HoO227=sum(HoO(1:23,227));

x1=1:24;
x=x1.';

y1=Qsol(1:24,19);
y2=zeros(24,1);
y2(1:24,1)=Qhp(1:24,19);
y3=zeros(24,1);
y3(1:24,1)=Pel(1:24,19);
y4=Tst(1:24,19);
y5=Ta2(1:24,19);

Q = [Qhp_tot; Qsoltot; Peltt];
figure (1)
bar(Q)
title ('Ετήσια ποσά ενέργειας συνδυαστικής διάταξης')
ylabel ('Qhp, Qsol, Pel(J)');

figure (2)

[AX H1 H2] = plotyy(x, y2, x, y4, 'plot');
hold(AX(1));
hold(AX(2));
plot(AX(1),x,y1,'c');
plot(AX(1),x,y3,'r');
plot(AX(2),x,y5,'m');

legend ('Qhp', 'Qsol', 'Pel', 'Tst', 'Ta')
legend('Location','northwest')
title('Ενέργειες και θερμοκρασίες για μέρα με χαμηλή ακτινοβολία')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(AX(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(AX(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')

y1=Qsol(1:24,227);
y2=zeros(24,1);
y2(1:24,1)=Qhp(1:24,227);
y3=zeros(24,1);
y3(1:24,1)=Pel(1:24,227);
y4=Tst(1:24,227);
y5=Ta2(1:24,227);

figure (3)

```



```

[AX H1 H2] = plotyy(x, y1, x, y4, 'plot');
hold(AX(1));
hold(AX(2));
plot(AX(1),x,y2,'c');
plot(AX(1),x,y3,'r');
plot(AX(2),x,y5,'m');

legend ('Qsol','Qhp','Pel','Tst','Ta')
legend('Location','northwest')
title('Ενέργειες και θερμοκρασίες για μέρα με υψηλή ακτινοβολία')
xlabel('Ώρες λειτουργίας')
ylabel(AX(1), 'Ενέργειες [J]')
ylabel(AX(2), 'Θερμοκρασίες [°C]')
set(AX(2), 'YLim', [0 55])
set(AX(2), 'YTick', [0:5:55])

```