



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διερεύνηση χρήσης Υβριδικών Φ/Β PV-Thermal
για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανση θερμοκηπίων**



Λεκατσάς-Λούκας Δημήτριος

5652

**Επιβλέπων
Πανίδης Θρασύβουλος, Καθηγητής**

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του

Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, Σεπτέμβριος 2021

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών
Λεκατσάς-Λούκας Δημήτριος
© 2021 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

Λεκατσά-Λούκα Δημήτριο

5652

την 18^η Οκτώβρη 2021

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερεύνηση χρήσης Υβριδικών Φ/B PV-Thermal για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανση θερμοκηπίων

Λεκατσάς-Λούκας Δημήτριος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της χρήσης υβριδικών φωτοβολταϊκών PV-T συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών θερμοκηπίων. Στα πρώτα κεφάλαια θα γίνει αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του θερμοκηπίου καθώς και τις συνθήκες που διευκολύνουν την καλλιέργεια. Στη συνέχεια, θα παρατεθούν τα πιο συνήθη συμβατικά αλλά και εναλλακτικά κεντρικά συστήματα θέρμανσης, που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας για την θέρμανση θερμοκηπίων. Στο τέταρτο κεφάλαιο, θα γίνει αναφορά στη μελέτη και κατασκευή ενός συστήματος PV-T για την θέρμανση θερμοκηπίου και την διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Το πέμπτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη σημαντικότητα της αυτοματοποίησης ενός θερμοκηπίου που χρησιμοποιεί κάποιο αντίστοιχο σύστημα, τόσο για λειτουργικούς λόγους, αλλά και για λόγους ακρίβειας των συλλεγόμενων μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, για την αυτοματοποίηση χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής Arduino-Nano, σε συνδυασμό με αισθητήρες θερμοκρασίας LM-335z και ρελέ ισχύος, σαν ενεργοποιητές της εκάστοτε ηλεκτρικής συσκευής. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται πλήρης περιγραφή του τρόπου καταμέτρησης των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού LabView, καθώς και η διαχείριση αυτών για την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων. Η εργασία ολοκληρώθηκε με τα τελευταία κεφάλαια, όπου γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, καθώς και με μια μελέτη για την βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος σε μια θερμοκηπιακή μονάδα, κάνοντας χρήση των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από την πειραματική διάταξη.

Λέξεις κλειδιά

Θερμοκήπιο, Θέρμανση, PV-T, Υβριδικό, Αυτοματισμός

ABSTRACT

Investigation of the use of PV-Thermal hybrids for electricity production and greenhouse heating.

Dimitris Lekatsas-Loukas

The aim of this thesis is to evaluate the use of hybrid photovoltaic PV-T systems for electricity production and greenhouse heating. The first chapters will refer to factors that affect greenhouse operations as well as the conditions that facilitate the cultivation. Next, we will list the most common conventional and alternative central heating systems, that are used nowadays for greenhouse heating. In the fourth chapter, there will be a reference on set up and construction of a PV-T system, qualified for greenhouse heating and the process followed to install and setup the experiment. The fifth chapter focuses on the importance for automation on a greenhouse that uses a relative system, both for functional reasons and for accuracy in the results, for this arrangement. More specifically, an Arduino-Nano microcontroller was used in combination with LM-335z temperature sensors and power relay actuators, to control each electrical appliance. The next chapter provides a complete description of how to gather and save the data using LabView software, as well as managing them to extract useful results. Thesis was complete with the latest chapters, where the results are presented, as well as with a study on the viability of such a system in a greenhouse unit, making use of the collected data from the experimental arrangement.

keywords

Greenhouse, Heating, Hybrid, PVT, Automation

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

[Παράδειγμα: Σχήμα 1. Μεταβολή του συντελεστή ενίσχυσης $A(r,\zeta)$	43]
Εικόνα 2.1. Αξονικά αερόθερμα ζεστού νερού	11
Εικόνα 2.2. Λέβητες πετρελαίου (άνω αριστερά) (https://alfa-therm.gr/), αερίου (άνω δεξιά) (https://www.geotherm.gr/), πυρήνα (κάτω) (https://www.geotherm.gr/).....	12
Εικόνα 2.3. Καυστήρας λέβητα κεντρικής θέρμανσης θερμοκηπίου με χρήση πετρελαίου ή και φυσικού αερίου (http://haaringdebrabander.nl/)	14
Εικόνα 2.4. Λειτουργία αντλίας θερμότητας (http://www.veoliawater2energy.com/).....	15
Εικόνα 2.5. Τύποι αντλιών θερμότητας [5]	18
Εικόνα 2.6. Γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης/ψύξης κτηρίου (https://www.protothema.gr/).	19
Εικόνα 2.7. Σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης θερμοκηπίου (https://gr.depositphotos.com/)	21

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

GH1	Θερμοκήπιο 1 (με χρήση PV-T)
GH2	Θερμοκήπιο 2 –αναφοράς (χωρίς χρήση PV-T)
Q (Wh, J)	Θερμότητα
W (Wh, J)	Έργο
COP	Συντελεστής αποδοτικότητας αντλίας θερμότητας
T (K)	Θερμοκρασία
V (Volt)	Τάση
P (W)	Ισχύς
K (W/(m ² K))	Ολικός συντελεστής θερμοπερατότητας καλύμματος θερμοκηπίου
A (m ²)	Επιφάνεια
ΔT (°C)	Διαφορά θερμοκρασίας (T _{εσ} - T _{εξ})
T _{εσ} (°C)	Θερμοκρασία εσωτερικού θερμοκηπίου
T _{εξ} (°C)	Θερμοκρασία εξωτερικού θερμοκηπίου
n	Αριθμός εναλλαγών του αέρα ανά ώρα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	V
ABSTRACT.....	VI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	VII
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....	VIII
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	X
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ - ΔΟΜΗ.....	2
1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	3
2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ.....	7
2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ.....	8
2.1.1 ΤΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	9
2.1.1.1 ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ.....	9
2.1.1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ.....	10
2.1.1.3 ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΤΜΟΥ.....	10
2.1.1.4 ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ, ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	11
2.1.2 ΚΕΝΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	12
2.1.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	14
2.1.3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	14
<i>Τύποι αντλιών θερμότητας.....</i>	<i>17</i>
2.1.3.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	18
2.1.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ.....	19
2.2 ΦΩΣ.....	21
2.3 ΥΓΡΑΣΙΑ.....	22
2.4 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	23
2.5 ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΣ.....	23
3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	26
3.1 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	27
3.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.....	28
3.3 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ PV-T.....	29
3.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	29
3.3.2 ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	31
3.3.3 ΘΕΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	33
3.3.4 ΤΥΠΟΙ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PV-T.....	35
4. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PV-T ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	37
4.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	37
4.1.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	37
4.1.1.1 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.....	37

4.1.1.2	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	39
4.1.2	ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	39
4.1.3	ΕΠΙΚΟΝΙΑΣΗ	40
4.1.4	ΑΣΘΕΝΕΙΕΣ ΚΑΙ ΕΧΘΡΟΙ ΤΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ	40
4.2	ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ	40
4.2.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ	42
4.2.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡV-T	43
4.2.3	ΛΗΨΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	45
5.	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	49
5.1	Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ARDUINO.....	50
5.2	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ LM335Z	51
5.2.1	ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ LM335Z	52
5.3	ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΗΤΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ.....	53
5.4	ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	55
5.5	ΑΠΟΦΥΓΗ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	56
5.6	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	60
5.7	ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	61
6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	65
6.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	65
6.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡV-T	66
6.3	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	68
6.3.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	68
6.3.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	70
6.3.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΡV-T ΣΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	71
6.4	ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΩΤΑΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΤΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	72
6.4.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	73
6.5	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	74
6.5.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	76
6.5.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	77
6.5.2.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡV-T	77
6.5.2.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΕΒΗΤΑ ΥΓΡΑΕΡΙΟΥ	78
6.5.2.3	ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΡV-T.....	79
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	81
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
7.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	82
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση χρήσης Υβριδικών Φ/Β PV-Thermal συστημάτων, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών θερμοκηπίων.

Είναι γνωστό ότι τα θερμοκήπια χρησιμεύουν στη διατήρηση ενός περιβάλλοντος φιλικού προς τα φυτά με σκοπό την καλλιέργειά τους, όταν αυτά βρίσκονται εκτός εποχής και κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες του χρόνου. Η κύρια πηγή θερμικής ενέργειας του θερμοκηπίου είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τις νυχτερινές ώρες λοιπόν, καθώς και τις κρύες ημέρες του χρόνου με μειωμένη ηλιοφάνεια, χρειάζεται να εξισορροπηθούν οι ενεργειακές απώλειες θερμαίνοντάς το με εξωτερικά συστήματα τα οποία καταναλώνουν διάφορους πόρους. Αντίστοιχα, κατά τους πιο θερμούς μήνες με υψηλή ηλιοφάνεια, για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση απαιτείται ψύξη η οποία επιτυγχάνεται συνήθως μέσω φυσικού ή τεχνητού εξαερισμού.

Στην παρούσα διπλωματική λοιπόν, θα εξεταστεί η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της χρήσης υβριδικού συστήματος PV-T, για την κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών ενός θερμοκηπίου κυρίως κατά τους ψυχρούς μήνες. Θα εξεταστεί επίσης και η βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος μέσω οικονομικής μελέτης.

1.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Θα χρησιμοποιηθούν δύο πανομοιότυπα θερμοκήπια, με συνθήκες που θα ευνοούν την καλλιέργεια της τομάτας. Το ένα εκ των δύο θα λειτουργεί κατ' εξοχήν με συμβατικούς τρόπους θέρμανσης, δηλαδή με τη χρήση ενός ηλεκτρικού αερόθερμου. Στο δεύτερο θερμοκήπιο, θα χρησιμοποιηθεί υβριδικό σύστημα PV-T παράλληλα με ηλεκτρικό αερόθερμο, με σκοπό τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Θα γίνει πλήρης καταγραφή των θερμοκρασιών και της

κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και για τα δύο θερμοκήπια καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών. Οι μετρήσεις θα χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η ενέργεια που απέδωσε στο θερμοκήπιο το υβριδικό PV-T. Στα τελευταία κεφάλαια θα εξεταστεί και η βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος για χρήση σε θερμοκήπια.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ - ΔΟΜΗ

Μετά το εισαγωγικό κεφάλαιο και μία σύντομη ιστορική αναδρομή στα ηλιακά θερμικά συστήματα και τη χρησιμότητά τους, θα προχωρήσουμε στο 2^ο κεφάλαιο, στο οποίο θα αναφερθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα θερμοκήπια και πώς αυτοί μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας. Σχετικά με την θερμοκρασία των θερμοκηπίων, θα γίνει αναλυτική αναφορά των συνηθέστερων συστημάτων θέρμανσης.

Στο 3^ο κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική περιγραφή των συστημάτων θέρμανσης θερμοκηπίων που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει και εκτενής αναφορά στον τρόπο λειτουργίας και στη χρησιμότητα των υβριδικών φωτοβολταϊκών PV-T συστημάτων, ενώ παράλληλα θα εξεταστούν τα θετικά και αρνητικά της χρήσης ενός τέτοιου συστήματος σε μια θερμοκηπιακή μονάδα.

Στο 4^ο κεφάλαιο θα αναφερθούν όλα τα στοιχεία που θα πρέπει να είναι σε αρμονία μεταξύ τους, ώστε να ευνοείται η καλλιέργεια της τομάτας και στην συνέχεια θα γίνει ο σχεδιασμός για το πώς μπορεί αυτό να επιτευχθεί. Στο τέλος του κεφαλαίου θα αναφερθούν όλα τα υλικά και οι κατασκευές που απαιτήθηκαν για να δημιουργηθούν τα δύο θερμοκήπια και το σύστημα PV-T. Θα γίνει επίσης και αναφορά σε όλα τα όργανα και αισθητήρες που απαιτήθηκαν, ώστε να γίνει πλήρης καταμέτρηση των θερμοκρασιών και καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας των δύο θερμοκηπίων.

Το 5^ο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην αυτοματοποίηση των θερμοκηπίων, το οποίο κρίθηκε απαραίτητο αφ' ενός για τη λειτουργία του κυκλοφορητή του PV-T, αλλά και της θέρμανσης και εξαερισμού των θερμοκηπίων. Γίνεται εκτενής αναφορά στην πλακέτα Arduino και πώς αυτή

μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χειρισμό της κεντρικής θέρμανσης, του εξαερισμού αλλά και του κυκλοφορητή του συστήματος PV-T.

Στο τελευταίο κεφάλαιο θα γίνει θεωρητικός υπολογισμός της ενέργειας που μπορεί να αποδώσει ένα σύστημα PV-T κατά τους μήνες λειτουργίας του. Παράλληλα θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις του καταγράφηκαν και θα υπολογιστεί η ακριβής ενέργεια που απέδωσε το σύστημα PV-T στο θερμοκήπιο. Θα γίνει σύγκριση των θεωρητικών και των πραγματικών μετρήσεων, ενώ θα εξεταστεί και μέσω οικονομικής ανάλυσης ο χρόνος απόσβεσης και η βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος για τη χρήση σε θερμοκήπιο. Τέλος θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα και προτάσεις για βελτιστοποίηση τέτοιων εγκαταστάσεων.

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας ξεκινάει από την αρχαιότητα. Πιο συγκεκριμένα, ο Αριστοφάνης στο έργο του «Νεφέλες» κάνει αναφορά σε μεγεθυντικούς φακούς, οι οποίοι πωλούνταν σε φαρμακεία και χρησίμευαν για να ανάβουν κεριά. Την ίδια εποχή οι αρχαίοι Έλληνες και Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν κάτοπτρα για να ανάψουν δαυλούς σε διάφορες τελετές και εκδηλώσεις, όπως ακριβώς συμβαίνει και σήμερα κατά το άναμμα της ολυμπιακής φλόγας.

Από τότε που άνθρωπος εγκαταστάθηκε σε μόνιμη κατοικία άρχισε να μαζεύει και να καλλιεργεί φυτά για να εξασφαλίζει ευκολότερα τη διατροφή του. Στην αρχή καλλιεργούσε διάφορα είδη φυτών την εποχή που ευδοκιμούσαν. Οι πρώτες προσπάθειες καλλιέργειας φυτών εκτός εποχής που δεν ευδοκιμούσαν εκ του φυσικού τους έγιναν από τους Κινέζους πολλές χιλιετίες προ Χριστού.

Στην Αίγυπτο και στην Περσία πολλούς αιώνες προ Χριστού καλλιεργούσαν όλο τον χρόνο λουλούδια, τα οποία οι Βασιλιάδες χρησιμοποιούσαν για να στολίσουν τις αίθουσες στις γιορτές. Στην ελληνική μυθολογία αναφέρεται ότι μία ορισμένη μέρα του χειμώνα οι γυναίκες θρηνούσαν το χαμό του Άδωνη και στόλιζαν στα σπίτια τους ένα κενοτάφιο με σπάνια άνθη τα οποία καλλιεργούσαν το χειμώνα [1]. Ο Θεόφραστος αναφέρεται ως ο πρώτος που μελέτησε την επίδραση που ασκούν η θερμότητα, ο άνεμος και το έδαφος στις καλλιέργειες. Πιο

συστηματικές προσπάθειες πρωίμισης λαχανικών και λουλουδιών έγιναν στη ρωμαϊκή εποχή. Ο Λένον αναφέρει ότι οι Ρωμαίοι κάλυπταν τα φυτά τους με φύλλα μύκας για να τα προστατεύσουν από το κρύο [2].

Η πρωίμιση κηπευτικών, που άρχισε με τους Ρωμαίους, ξεχάστηκε για πολλούς αιώνες. Σύμφωνα με τον London, διάσημο συγγραφέα κηπευτικών, το πρώτο συστηματικό θερμοκήπιο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το 1611 από τον Solomon de Gauss of Heildelberg [2] και προοριζόταν για να προστατεύει από το κρύο δέντρα πορτοκαλιάς. Το 1611 κατασκευάστηκαν γυάλινα θερμοκήπια στο Alkmaar της Ολλανδίας και το 1625 άλλα παρόμοια στο Altort της Γερμανίας [3]. Το πρώτο θερμοκήπιο στην Αγγλία, φαίνεται ότι κατασκευάστηκε το 1864 στο Apothary Garden. Μεγάλη διάδοση των εμπορικών γυάλινων θερμοκηπίων στις χώρες της Ευρώπης άρχισε τον 19^ο αιώνα.

Το πρώτο διαφανές πλαστικό φύλλο που χρησιμοποιήθηκε αντί του γυαλιού, ήταν το flex-o-glass και κατασκευάστηκε το 1925 από τον Αμερικανό Warf. Από τότε άρχισαν συστηματικά πειράματα για την αντικατάσταση του γυαλιού από φύλλο πλαστικού.

Η εξέλιξη των μέσων κλιματισμού των θερμοκηπίων ακολούθησε την πορεία των κατασκευών. Τα πρώτα θερμοκήπια δεν είχαν συστήματα θέρμανσης. Το 1714 ο Volkamer περιγράφει ένα σύστημα θέρμανσης θερμοκηπίων το οποίο αποτελείται από μία εστία που ήταν έξω από το θερμοκήπιο, της οποίας οι σωλήνες των καπναερίων περνούσαν μέσα από το θερμοκήπιο θερμαίνοντας το. Αργότερα, η θέρμανση θερμοκηπίων γινόταν με την κυκλοφορία ζεστού νερού και αργότερα με ατμό.

Τον 20^ο αιώνα εφαρμόστηκαν πολλές τεχνικές βελτιώσεις στις κατασκευές και σε κλιματισμούς των θερμοκηπίων. Μερικές από τις πιο χαρακτηριστικές είναι:

1. Τα αερόθερμα
2. Τα συστήματα μείωσης της θερμοκρασίας με εξάτμιση νερού
3. Τα αεροστήριχτα θερμοκήπια
4. Τα φυτοτρόνια
5. Οι θάλαμοι ανάπτυξης φυτών
6. Ο εμπλουτισμός του αέρα του θερμοκηπίου με CO₂

7. Η χρησιμοποίηση τεχνητού φωτισμού
8. Τα σπορεία που θερμαίνονται με ηλεκτρισμό
9. Οι θάλαμοι υδρονέφωσης

Όλες αυτές οι βελτιώσεις συντέλεσαν στην αύξηση της ποιότητας και της ποσότητας της παραγωγής των θερμοκηπίων.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό στη διάδοση των θερμοκηπίων σε όλο τον κόσμο είναι ότι τα διάφορα είδη πλαστικών σαν υλικό κάλυψης έχουν εκτοπίσει τελείως το γυαλί. Για αυτό χρειάστηκαν έρευνες πολλών ετών για να επιβεβαιώσουν ότι συμφέρει οικονομικά η χρησιμοποίηση θερμοκηπίων με πλαστικό ακόμα και σε χώρες με καλά εξοπλισμένα γυάλινα θερμοκήπια.

2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Η ανάπτυξη και η απόδοση των φυτών εξαρτάται από τη γενετική του σύνθεση και από το περιβάλλον. Γενότυπος και περιβάλλον παίζουν εξίσου σπουδαίο ρόλο στην ανάπτυξη και στην απόδοση των καλλιεργειών του θερμοκηπίου και ανάλογα με το ποιος από τους δύο είναι πιο περιοριστικός είναι και ο σπουδαιότερος παράγων.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία αέρα
- Φως
- Εξαερισμός
- Διοξείδιο του άνθρακα

Η αλλαγή του γενοτύπου είναι πολύ δύσκολη και απαιτεί πολύ χρόνο. Η ρύθμιση των παραγόντων του περιβάλλοντος στο θερμοκήπιο είναι δυνατή αλλά ταυτόχρονα πολύ δύσκολη, όχι μόνο επειδή υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες συγχρόνως, αλλά και επειδή ο κάθε παράγοντας μεταβάλλεται ευρέως, και ακόμα υπάρχει μία διαρκής αλληλεπίδραση μεταξύ όλων των παραγόντων.

Οι λόγοι για τους οποίους ρυθμίζονται στα θερμοκήπια οι παράγοντες ανάπτυξης είναι οι εξής:

1. Να βελτιωθούν οι συνθήκες ανάπτυξης των καλλιεργειών, ώστε το οικονομικό αποτέλεσμα να είναι το μέγιστο δυνατό.
2. Να επεκταθεί η εποχή παραγωγής όταν οι καιρικές συνθήκες είναι δυσμενείς.
3. Να εξασφαλιστεί η κανονική παραγωγή και η υψηλή ποιότητα των προϊόντων.
4. Να αντιμετωπιστούν οι ασθένειες των καλλιεργειών με τη δημιουργία ιδανικών συνθηκών περιβάλλοντος για τις καλλιέργειες.

Η μέγιστη απόδοση στις καλλιέργειες επιτυγχάνεται μόνο όταν όλοι οι παράγοντες του περιβάλλοντος βρεθούν σε ένα άριστο επίπεδο. Παρακάτω θα περιγραφούν αυτοί οι παράγοντες που επηρεάζουν τις καλλιέργειες.

2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ

Κύριος σκοπός των θερμοκηπίων είναι η παραγωγή αγροτικών προϊόντων εκτός εποχής. Για την επιβίωση μίας καλλιέργειας στο θερμοκήπιο υπάρχει ανάγκη για θέρμανση, ειδικότερα κατά τους πιο κρύους μήνες του χρόνου, όταν ο ήλιος δεν επαρκεί, και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει φυσικά και ο τόπος στον οποίο είναι τοποθετημένο το θερμοκήπιο, καθώς και οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν.

Η θερμοκρασία είναι ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης των καλλιεργειών. Από πολυάριθμες μετρήσεις έχει αποδειχθεί ότι η ανάπτυξη των φυτών περιορίζεται μεταξύ των θερμοκρασιών 0°C, που είναι το σημείο στο οποίο παγώνει το νερό, και 49°C, που είναι το σημείο απονιτροποίησης των πρωτεϊνών. Για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόδοσης των καλλιεργειών στα θερμοκήπια, απαιτείται μία ορισμένη θερμοκρασία για την κάθε καλλιέργεια. Έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε θερμοκήπια, έδειξαν ότι μικρές αποκλίσεις από την άριστη θερμοκρασία μπορούν να επηρεάσουν πολύ σοβαρά τις αποδόσεις και την ποιότητα των προϊόντων.

Η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος παίζει σημαντικό ρόλο στη θερμοκρασία ενός θερμοκηπίου. Από έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι στην περίπτωση που ένα θερμοκήπιο βρίσκεται σε μία περιοχή, η οποία είναι κατά τρεις βαθμούς ψυχρότερη από μία άλλη, ξοδεύει περίπου τη διπλάσια ποσότητα καυσίμων για θέρμανση.

Μιας και η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο παίζει τόσο σπουδαίο ρόλο στην ανάπτυξη των καλλιεργειών, φροντίζεται ώστε η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου να είναι πάντα βέλτιστη. Εάν αυτό δεν καθίσταται δυνατό λόγω των εξωτερικών συνθηκών του περιβάλλοντος, χρειάζεται είτε αύξηση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου για να θερμανθεί, είτε μείωση της θερμοκρασίας του για να ψυχθεί.

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων. Ένα κατάλληλο σύστημα θέρμανσης θερμοκηπίου πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Να εξασφαλίζει την επιθυμητή θερμοκρασία
2. Να διανέμει τη θερμοκρασία ομοιόμορφα μέσα στο θερμοκήπιο
3. Να χρησιμοποιεί οικονομικά καύσιμα
4. Να είναι εγγυημένης κατασκευής
5. Να μη μολύνει τον αέρα του θερμοκηπίου με καυσαέρια

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει ανάλυση της δομής και της λειτουργίας των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης των θερμοκηπίων, τα οποία διακρίνονται σε δύο τύπους: τα τοπικά και τα κεντρικά συστήματα.

2.1.1 ΤΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Ως τοπικά συστήματα θέρμανσης εννοούνται τα συστήματα που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε μικρά θερμοκήπια, και όλες οι επιμέρους μονάδες τους είναι τοποθετημένες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου [1].

Τα πιο συνήθη τοπικά συστήματα θέρμανσης είναι τα εξής:

- Οι διάφοροι τύποι αερόθερμων
- Οι θερμάστρες που λειτουργούν μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας
- Οι θερμάστρες συναγωγής

2.1.1.1 ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ

Τα αερόθερμα αποτελούν το πιο σύνηθες τοπικό σύστημα θέρμανσης θερμοκηπίων που χρησιμοποιείται, εξαιτίας του χαμηλού κόστους εγκατάστασής του συγκριτικά με άλλα συστήματα, όπως είναι τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει υψηλή αποδοτικότητα και δεν εμφανίζει αδράνεια κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου. Επίσης, η αυτοματοποίησή του είναι πολύ εύκολη. Η θερμοκρασία του

θερμοκηπίου ανεβαίνει πολύ γρήγορα από τη στιγμή που δοθεί εντολή εκκίνησης της λειτουργίας του από τον θερμοστάτη [1].

Κάποια από τα μειονεκτήματά των αερόθερμων είναι ότι η θερμότητα που παράγουν χάνεται πολύ γρήγορα από το χώρο, μιας και θερμαίνεται μόνο ο αέρας και όχι το έδαφος ή κάποια επιφάνεια με αρκετά μεγάλη θερμοχωρητικότητα, όπως συμβαίνει με άλλα συστήματα

Ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούν τα αερόθερμα, διακρίνονται στα ηλεκτρικά αερόθερμα, στα αερόθερμα ατμού ή ζεστού νερού και στα αερόθερμα αερίου, πετρελαίου ή στερεών καυσίμων [1].

2.1.1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ

Η λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων θέρμανσης είναι γνωστή σε όλους, μιας και χρησιμοποιούνται ευρέως και σε κατοικίες. Αποτελούνται από αντιστάσεις και έναν ανεμιστήρα, ο οποίος ανακυκλώνει τον αέρα μέσα από αυτές ώστε να απορροφήσει θερμότητα.

Η πιο συνήθης χρήση τους είναι σε πειραματικά και ερασιτεχνικά θερμοκήπια, μιας και δεν αφήνουν ρυπογόνα κατάλοιπα (καυσαέρια κλπ.) και είναι εύκολη η αυτοματοποίησή τους και ρύθμιση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου. Φυσικά το υψηλό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας τα κατατάσσει σε έναν από τους πιο ακριβούς τρόπους θέρμανσης θερμοκηπίων [1].

2.1.1.3 ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΤΜΟΥ

Στα αερόθερμα ζεστού νερού και ατμού, παράγεται σε λέβητα ατμός ή ζεστό νερό, που έπειτα κυκλοφορούν σε σωλήνες μεγάλης επιφάνειας. Η αποδοτικότητά τους εξαρτάται από την ταχύτητα ροής του ρευστού στους σωλήνες, από το μέγεθος της επιφάνειας των σωλήνων και σίγουρα από την παροχή του ανεμιστήρα [1]. Τα αερόθερμα συνήθως τοποθετούνται ψηλά για την βέλτιστη θέρμανση των ανώτερων φύλλων.

Ο συγκεκριμένος τρόπος θέρμανσης χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σαν συμπληρωματική θέρμανση σε συστήματα κεντρικής θέρμανσης, και ιδίως σε αυτά τα συστήματα με σωλήνες ζεστού νερού.



Εικόνα 2.1. Αξονικά αερόθερμα ζεστού νερού

2.1.1.4 ΑΕΡΟΘΕΡΜΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ, ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Τα συγκεκριμένα αερόθερμα πετρελαίου, αερίου και στερεών καυσίμων διαθέτουν λέβητα με ενσωματωμένο καυστήρα κλειστού ή ανοιχτού τύπου [1].

Ο καυστήρας με ανοιχτό θάλαμο καύσης χρησιμοποιεί τον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου για την καύση και ανακυκλώνει τα καυσαέρια μέσα στο θερμοκήπιο. Το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται είναι πολύ χρήσιμο κατά την φωτοσύνθεση των φυτών την ημέρα. Από την άλλη μεριά όμως, κατά τη διάρκεια της νύχτας η έλλειψη οξυγόνου δημιουργεί προβλήματα τόσο στην καύση στον καυστήρα, όσο και στην καθαρότητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Τα αερόθερμα, τα οποία λειτουργούν με κλειστό θάλαμο καύσης, λαμβάνουν τον αναγκαίο αέρα μέσω ενός αεραγωγού και απελευθερώνουν τα καυσαέρια έξω από τον χώρο του θερμοκηπίου μέσω μίας καπνοδόχου. Η καπνοδόχος αυτή θα πρέπει να εξέρχεται οριζόντια απ' το θερμοκήπιο και να έχει το κατάλληλο μέγεθος, ώστε να μην επιστρέφουν τα καυσαέρια. Οι συγκεκριμένες συσκευές θερμαίνουν αέρα που εισχωρεί από τον εξωτερικό χώρο, και στη συνέχεια τον διοχετεύουν στο θερμοκήπιο, αποφεύγοντας έτσι την εισροή καυσαερίου στο θερμοκήπιο, και βοηθώντας παράλληλα στον εξαερισμό του θερμοκηπίου [1].

Τα σημαντικότερα μέρη των συγκεκριμένων συστημάτων είναι τα εξής:

- Ο καυστήρας

- Ο ανεμιστήρας ανακυκλοφορίας του αέρα
- Ο εναλλάκτης θερμότητας

Η λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων ρυθμίζεται χειροκίνητα ή με τη χρήση θερμοστάτη. Το κόστος λειτουργίας τους είναι σχετικά υψηλό, οπότε χρησιμοποιούνται συνήθως ως βοηθητικά και μόνο για την προθέρμανση του χώρου.



Εικόνα 2.2. Λέβητες πετρελαίου (άνω αριστερά) (<https://alfa-therm.gr/>), αερίου (άνω δεξιά) (<https://www.geotherm.gr/>), πυρήνα (κάτω) (<https://www.geotherm.gr/>)

2.1.2 ΚΕΝΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Σε πολύ μεγάλου μεγέθους θερμοκήπια, εγκαθίστανται κεντρικά συστήματα θέρμανσης, στα οποία ο χώρος όπου παράγεται η θερμική ενέργεια είναι διαφορετικός από αυτόν του θερμοκηπίου [1].

Τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης αποτελούνται συνήθως από:

- Τον λέβητα παραγωγής ζεστού νερού ή ατμού

- Το δίκτυο σωληνώσεων

Το λεβητοστάσιο κατασκευάζεται σε κάποιο άκρο του θερμοκηπίου, στο οποίο τοποθετούνται [4]:

- Ο λέβητας με τον καυστήρα (υγρών και αερίων καυσίμων)
- Το δοχείο προθερμάνσεων (σε περίπτωση καύσης μαζούτ)
- Και οι συλλέκτες διανομής

Από τους συλλέκτες διανομής ξεκινάει ο κλάδος τροφοδοσίας προς τις σωληνώσεις διανομής ζεστού νερού ή ατμού, και ένας προς τα αερόθερμα. Οι σωλήνες διανομής ουσιαστικά λειτουργούν σαν εναλλάκτες θερμότητας προς το θερμοκήπιο. Είναι μεταλλικές κατασκευές με μεγάλο μήκος, ώστε να δημιουργείται μια μεγάλη επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Ο κάθε κλάδος διατηρεί τους δικούς του κυκλοφορητές και ηλεκτροβάννες [4].

Ένα τέτοιο σύστημα με σωστό σχεδιασμό, παρέχει ικανοποιητική θέρμανση του θερμοκηπίου. Στα θετικά του στοιχεία συγκαταλέγεται το ότι εκτός απ' τον αέρα θερμαίνεται και το έδαφος του θερμοκηπίου. Η «θερμική αδράνεια» τους, όμως, είναι μεγαλύτερη από των αερόθερμων, αφού απαιτείται αρκετός χρόνος από την εκκίνηση τους μέχρι να θερμανθεί το θερμοκήπιο σε ικανοποιητικό βαθμό. Σε σχέση με τους κοινούς λέβητες έχουν πολύ μεγαλύτερη αποδοτικότητα λόγω μειωμένων απωλειών. Επίσης, με τη χρήση του ατμού απολυμαίνεται και το χώμα του θερμοκηπίου. Το υψηλό κόστος αγοράς και η εξειδικευμένη συντήρησή τους τα κάνει δυσπρόσιτα για μικρούς παραγωγούς [4].

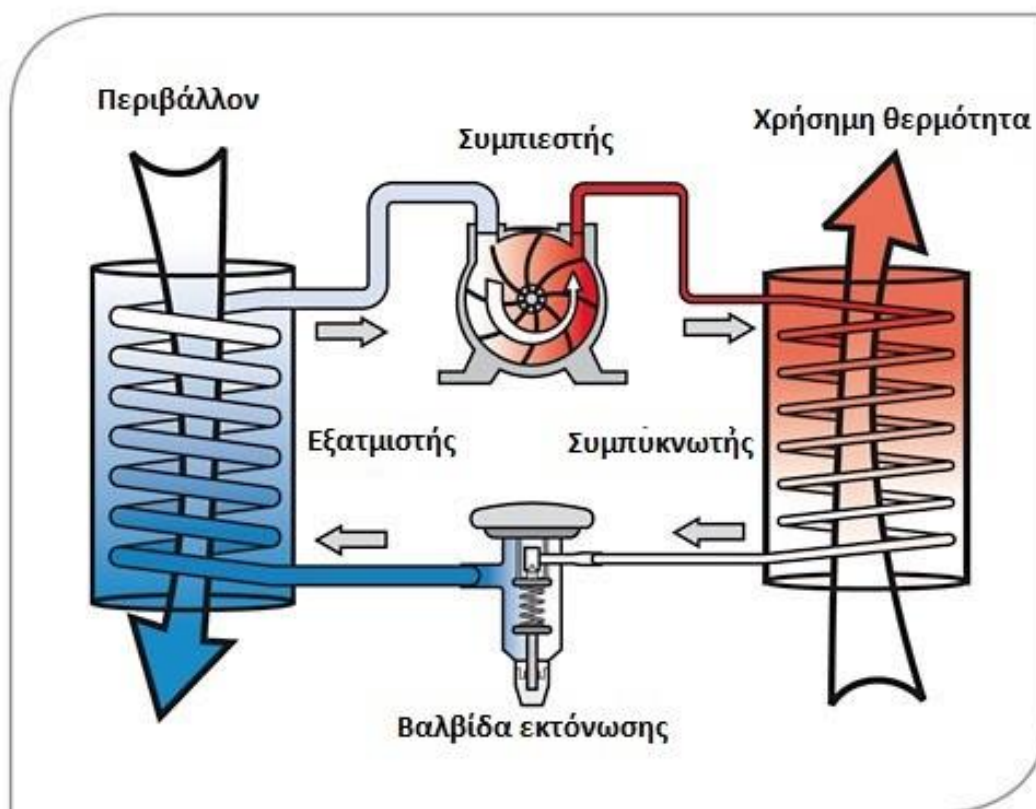


Εικόνα 2.3. Καυστήρας λέβητα κεντρικής θέρμανσης θερμοκηπίου με χρήση πετρελαίου ή και φυσικού αερίου (<http://haaringdebrabander.nl/>)

2.1.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

2.1.3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι αντλίες θερμότητας έχουν πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος, αφού ουσιαστικά αντλούν θερμότητα από το περιβάλλον με σχετικά μικρή χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Βασίζονται στον ψυκτικό κύκλο, αλλά στην ουσία λειτουργούν με αντίστροφο τρόπο. Απορροφούν θερμότητα από το περιβάλλον (εκπέμποντας στο περιβάλλον ψυχρότερο αέρα) και το μόνο κόστος τους είναι συνήθως το ηλεκτρικό ρεύμα για τη λειτουργία του συμπιεστή, και ίσως για κάποιον ανεμιστήρα ανακυκλοφορίας του αέρα. Αν αντιστραφεί το σύστημα, δημιουργείται μια ψυκτική συσκευή ακριβώς όπως είναι το ψυγείο στο σπίτι μας. Το κλιματιστικό, για παράδειγμα, έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει και με τους δύο κύκλους.



Εικόνα 2.4. Λειτουργία αντλίας θερμότητας (<http://www.veoliawater2energy.com/>)

Η μηχανική αντλία θερμότητας αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- τον **συμπιεστή**, ο οποίος αποτελεί και την καρδιά του κύκλου. Σε αυτόν εισέρχεται ψυκτικός ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, και εξέρχεται σαν ψυκτικός ατμός υψηλότερης πίεσης και, συνεπώς, θερμοκρασίας. Το στοιχείο αυτό είναι και το μοναδικό που απαιτεί κατανάλωση μηχανικής ενέργειας για τη λειτουργία του.
- τον **συμπυκνωτή**, από τον οποίο περνάει ο θερμός ψυκτικός ατμός, που εξέρχεται από τον συμπιεστή, και εκεί συμπυκνώνεται ξανά σε ρευστό, απορρίπτοντας θερμότητα στο χώρο, στην προκειμένη περίπτωση στο θερμοκήπιο. Ουσιαστικά είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας.

- την **εκτονωτική βαλβίδα (στραγγαλισμού)**, η δουλειά της οποίας είναι να μειώσει την υψηλή πίεση του ψυκτικού υγρού, με απώτερο σκοπό την περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του.
- τέλος, τον **εξατμιστή**, ο οποίος είναι επίσης ένας εναλλάκτης θερμότητας. Το κρύο πια ψυκτικό υγρό απορροφά θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον και μετατρέπεται πάλι σε ατμό.

Φυσικά οι αντλίες θερμότητας αποτελούνται και από άλλα εξαρτήματα, όπως σωληνώσεις για την κυκλοφορία του ψυκτικού, φίλτρα, θερμοστάτες και όργανα αυτοματισμού κ.α.

Οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται από ένα βασικό χαρακτηριστικό τους, που είναι ο συντελεστής λειτουργίας τους (COP). Αυτός ουσιαστικά δείχνει το πολλαπλάσιο της θερμότητας που αποδίδεται στο χώρο, σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας. Αν υποθεθεί ότι η ενέργεια που καταναλώνει ο συμπυκνωτής είναι W , τότε η θερμότητα που μεταφέρεται στο χώρο είναι $Q+W$, όπου Q η θερμότητα που απορροφάται από το περιβάλλον.

Έτσι λοιπόν ο συντελεστής λειτουργίας της αντλίας θερμότητας δίνεται από τον εξής τύπο:

$$COP = \frac{Q + W}{W} \quad (1)$$

Για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των αντλιών θερμότητας έχει καθιερωθεί η μέτρηση COP που αναφέραμε παραπάνω σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές συνθήκες. Για τη θέρμανση, οι συνθήκες αυτές είναι οι εξής:

- Εσωτερική θερμοκρασία = 20°C
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος = 7°C

Στις συγκεκριμένες θερμοκρασιακές συνθήκες, ένας συνήθης βαθμός αποδοτικότητας μιας αντλίας θερμότητας βρίσκεται στο 3.25. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε 1000W ενέργειας που καταναλώνονται, αποδίδονται στον χώρο 3250W θερμότητας. Αν η εξωτερική θερμοκρασία πέσει όμως στους -6°C, τότε ο βαθμός αποδοτικότητας θα μειωθεί αισθητά, και μπορεί να πέσει

πιο χαμηλά από το 1.5. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι οι κλιματικές συνθήκες της κάθε περιοχής επηρεάζουν αρκετά το κόστος λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος.

Οι αντλίες θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς λόγους σε ένα θερμοκήπιο [1], όπως:

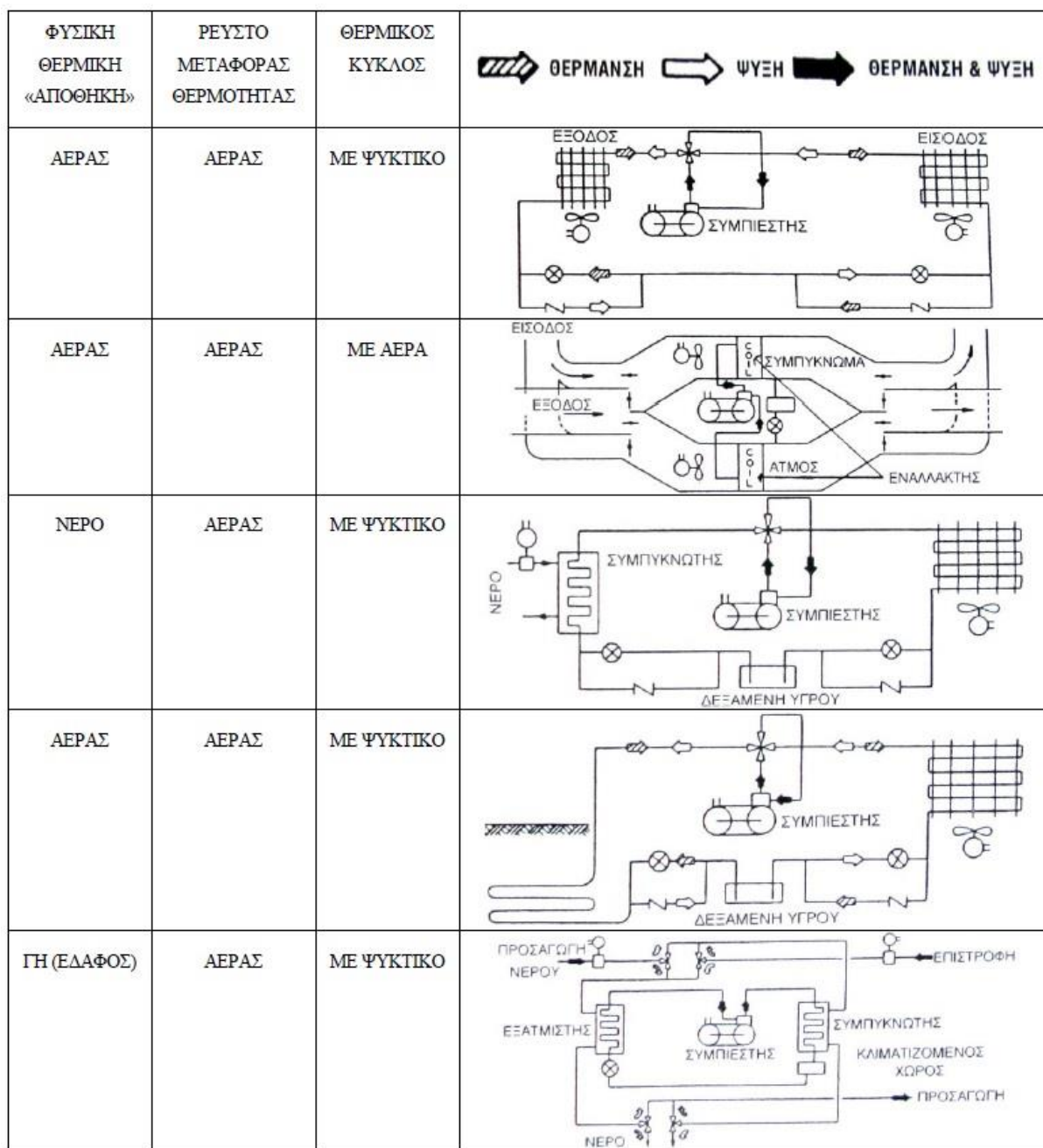
- για ψύξη ή θέρμανση
- για αφύγρανση

Φυσικά η ψύξη του θερμοκηπίου μέσω ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ ασύμφορη, μιας και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες απαιτείται η απορρόφηση τεράστιων ποσών θερμότητας από ένα θερμοκήπιο.

Τύποι αντλιών θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιούν, καθώς και με το μέσο διανομής της θερμότητας στο χώρο που είναι προς θέρμανση. Συγκεκριμένα, διακρίνονται σε:

- Αέρα - Νερού
- Αέρα - Αέρα
- Νερού - Νερού
- Νερού - Αέρα



Εικόνα 2.5. Τύποι αντλιών θερμότητας [5]

2.1.3.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που παράγεται από ζωικούς οργανισμούς, όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, τα υπολείμματα καλλιεργειών, τα κτηνοτροφικά απόβλητα, τα

απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ., και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Οι βασικότερες μέθοδοι αξιοποίησής της είναι η καύση και η αεριοποίησή της. Όσον αφορά τα θερμοκήπια, η αξιοποίηση της ενέργειάς τους γίνεται μέσω της καύσης. Το αρνητικό είναι ότι χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες ποσότητες σε σχέση με αυτές των συμβατικών καυσίμων, λόγω της μικρής τους θερμογόνου δύναμης.

2.1.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Η Γη, η οποία ουσιαστικά είναι μια μεγάλη δεξαμενή θερμότητας, μπορεί να προσφέρει σαν πηγή θερμότητας σε πάρα πολλές εφαρμογές μέσω συστημάτων γεωεναλλακτών σε συνδυασμό με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Η φυσική ροή της θερμότητας γίνεται από τις υψηλότερες θερμοκρασίες προς τις χαμηλότερες. Με τη χρήση μιας αντλίας θερμότητας, μπορεί να επιτευχθεί και αντίστροφη ροή της θερμότητας, δηλαδή από το ψυχρότερο προς το θερμότερο μέσο.



Εικόνα 2.6. Γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης/ψύξης κτηρίου (<https://www.protothema.gr/>)

Ένα γεωθερμικό σύστημα, το οποίο αποτελείται κυρίως από την κεντρική μονάδα εντός του κτηρίου και έναν γεωεναλλάκτη μέσα στο υπέδαφος, μπορεί να δεσμεύει την ενέργεια της γης.

Κατά τους πιο ψυχρούς μήνες, η εγκατάσταση μπορεί να αντλεί θερμότητα από το υπέδαφος και να την αποβάλλει στον χώρο θερμαίνοντάς τον, ενώ κατά τους θερμότερους μήνες μπορεί να αποβάλει θερμότητα από τον χώρο προς το υπέδαφος. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό της αποδοτικότητας του συστήματος, όπως προαναφέρθηκε. Το κόστος λειτουργίας αφορά ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία των κυκλοφορητών, καθώς και του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας.

Το σύστημα αποτελείται από τρία κύρια μέρη:

- τους **γεωεναλλάκτες**, οι οποίοι ουσιαστικά δρουν σαν εναλλάκτες θερμότητας με το υπέδαφος, με σκοπό να αξιοποιηθεί η ενέργειά του. Πρόκειται για υπόγειους αγωγούς τοποθετημένους σε τουλάχιστον τρία μέτρα βάθος. Όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια και το τους, τόσο καλύτερη και η αποδοτικότητά τους. Χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
 - **Γεωεναλλάκτες κλειστού βρόχου**, που χρησιμοποιούν τη θερμότητα που βρίσκεται στο υπέδαφος.
 - **Γεωεναλλάκτες ανοιχτού βρόχου**, που χρησιμοποιούν τον υδροφόρο ορίζοντα ή υπόγεια ρεύματα νερού.
- τη **γεωθερμική αντλία θερμότητας**, η χρήση της οποίας είναι αναγκαία για τη μεταφορά θερμότητας από ένα ψυχρό μέσο σε ένα θερμότερο.
- το **σύστημα διανομής θερμικών και ψυκτικών φορτίων**, με το οποίο εννοούμε όλα τα απαραίτητα δίκτυα, εξαρτήματα και αυτοματισμοί που είναι απαραίτητα για τη διανομή της θέρμανσης ή της ψύξης στο θερμοκήπιο.



Εικόνα 2.7. Σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης θερμοκηπίου (<https://gr.depositphotos.com/>)

2.2 ΦΩΣ

Ένας από τους πιο σπουδαίους παράγοντες του περιβάλλοντος που επηρεάζουν τις καλλιέργειες μέσα στα θερμοκήπια είναι το φως.

Οι απαιτήσεις των φυτών σε φως εξαρτώνται από το είδος και το στάδιο του σποριοφύτου. Όταν υπάρχουν συνθήκες μεγάλης έντασης φωτός έχει βρεθεί ότι τα φύλλα των φυτών γίνονται κοντύτερα αλλά πιο πλατιά. Τα φυτά που αναπτύσσονται σε ανεπαρκή φωτισμό γίνονται αδύνατα, ασθενικά, παράγουν λίγα φύλλα και δε σχηματίζουν άνθη και καρπούς.

Η διάρκεια της ημέρας έχει μεγάλη σημασία για τις καλλιέργειες, γιατί από έρευνες βρέθηκε ότι επηρεάζει την είσοδο των φυτών στο αναπαραγωγικό στάδιο, το λήθαργο και τη βλάστηση των σπόρων, την επιμήκυνση του φυτού, τον σχηματισμό βολβών κ.α. Μεγάλο ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών παίζει και το μήκος κύματος του φωτός.

Έχοντας υπ' όψη πόσο σημαντικός παράγοντας είναι το φως στην ανάπτυξη των φυτών, οι ερευνητές και οι παραγωγοί φρόντισαν να αυξήσουν την ένταση του φωτός με τεχνητά μέσα, όμως δεν αρκεί η τοποθέτηση μερικών λαμπτήρων πάνω από τα φυτά για αύξηση της παραγωγής. Η αντίδραση των φυτών είναι πολύπλοκη στον τεχνητό φωτισμό, και μόνο αν ο παραγωγός γνωρίζει καλά το θέμα μπορεί να επωφεληθεί.

2.3 ΥΓΡΑΣΙΑ

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζει την ανάπτυξη των καλλιεργειών στα θερμοκήπια είναι και η υγρασία του αέρα. Οι Cotter και Walker [21] αναφέρουν ότι σε υψηλή σχετική υγρασία του αέρα τα φυτά γίνονται ψηλότερα και αναπτύσσονται καλύτερα, μιας και αποφεύγονται οι συνέπειες της έλλειψης υγρασίας του εδάφους. Αντιθέτως, σε χαμηλή σχετική υγρασία αέρα δημιουργούνται σκασίματα στους καρπούς και μειώνονται οι αποδόσεις των καλλιεργειών.

Η ιδανική σχετική υγρασία του αέρα ενός θερμοκηπίου κυμαίνεται ανάλογα με την εποχή, αλλά γενικά για τα περισσότερα θερμοκήπια είναι γύρω στο 60%.

Κάθε εποχή του χρόνου, η σχετική υγρασία ρυθμίζεται στα επιθυμητά όρια. Ο πιο απλός τρόπος για την μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα, είναι η αξιοποίηση του φαινομένου της απόθεσης της υγρασίας με μορφή σταγόνων πάνω στα υλικά κάλυψης. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν ο αέρας ψυχτεί κάτω από το σημείο δρόσου, μέρος της υγρασίας του αποτίθεται υπό μορφή σταγόνων.

Στην περίπτωση που η σχετική υγρασία του θερμοκηπίου και η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος είναι υψηλές, όπως, η σχετική υγρασία του αέρα του μειώνεται με εξαερισμό, με την προϋπόθεση ότι η σχετική υγρασία του εξωτερικού αέρα είναι χαμηλότερη.

Για την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα, ιδίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, εφαρμόζονται οι εξής τεχνικές:

1. Βρέξιμο του εδάφους και του υλικού κάλυψης με νερό
2. Σκίαση του θερμοκηπίου

3. Περιορισμός της ταχύτητας κίνησης του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο
4. Ψεκασμός των καλλιεργειών του θερμοκηπίου με νερό ανά τακτά χρονικά διαστήματα
5. Μείωση τη θερμοκρασίας στα θερμοκήπια με εξάτμιση νερού
6. Ύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου με ειδικούς υγραντήρες

2.4 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ αποτελεί ένα από τα απαραίτητα υλικά της φωτοσύνθεσης, γιατί μαζί με το νερό και τα θρεπτικά συστατικά παρουσία του φωτός και της χλωροφύλλης, συμμετέχει στη σύνθεση υδατανθράκων.

Το διοξείδιο του άνθρακα στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα απαντάται σε αναλογία 0,03%. Μέσα στα θερμοκήπια η αναλογία αυτή τη νύχτα αυξάνεται μέχρι 0,06%, ενώ την ημέρα λόγω της φωτοσύνθεσης πέφτει κάτω από 0,02%.

Μέσα σε ένα θερμοκήπιο παράγεται CO₂ από την αποσύνθεση των αποβλήτων και των οργανικών λιπασμάτων. Άλλα μέσα παραγωγής του είναι το καθαρό πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το προπάνιο, το βουτάνιο, η αλκοόλη και το καθαρό CO₂.

Για την αποφυγή ζημιών, τόσο στις καλλιέργειες όσο και στους ανθρώπους που εργάζονται στα θερμοκήπια, από τοξικότητες από υποπροϊόντα του CO₂, συνιστάται η χρήση καυστήρων αναγνωρισμένων τύπων, οι οποίοι πρέπει να συντηρούνται καλά. Επίσης, μόλις διαπιστωθούν τοξικά φαινόμενα συνίσταται η χρησιμοποίηση πρώτων υλών, που δεν περιέχουν σε μεγάλη αναλογία και άλλες βλαβερές προσμίξεις, και η δυνατότητα γρήγορης διακοπής της χορήγησης CO₂ στις καλλιέργειες.

2.5 ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΣ

Ο εξαερισμός διακρίνεται στον φυσικό και στον τεχνητό εξαερισμό. Ο φυσικός εξαερισμός προκαλείται από τον άνεμο ή από την κίνηση του αέρα που οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του αέρα θερμοκηπίου και του αέρα περιβάλλοντος. Ο τεχνητός εξαερισμός

βασίζεται στην κίνηση του αέρα με τεχνητά μέσα. Επίσης, υπάρχει και ο εξαερισμός λόγω ατελειών της κατασκευής (χαλαμάδες, κακή συναρμολόγηση του πλαστικού στο σκελετό κ.λπ.).

Ένα σύστημα εξαερισμού για να είναι κατάλληλο να εφαρμοστεί σε θερμοκήπια πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Να εξασφαλίζει ικανοποιητικές συνθήκες θερμοκρασίας σε αντίξοες κλιματολογικές συνθήκες
2. Να μετακινεί τον αέρα ομοιόμορφα
3. Να λειτουργεί αυτόματα
4. Να είναι απλό και αξιόπιστο
5. Να είναι φτηνό στην κατασκευή και να καταναλώνει λίγα καύσιμα

Σε κάθε εποχή του χρόνου αντιμετωπίζονται διαφορετικά προβλήματα εξαερισμού. Τον χειμώνα ο αέρας που εισέρχεται στα θερμοκήπια είναι ψυχρότερος από τον αέρα του θερμοκηπίου, και για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να αναμειγνύεται με τον θερμότερο αέρα του θερμοκηπίου πάνω από τις καλλιέργειες πριν διανεμηθεί στο χώρο. Το καλοκαίρι, για την πρόληψη της υπερβολικής ανύψωσης της θερμοκρασίας του αέρα, θα πρέπει να εισάγονται στα θερμοκήπια μεγάλες ποσότητες αέρα χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά η ταχύτητα κίνησής του.

Οι ανάγκες των θερμοκηπίων σε εξαερισμό εξαρτώνται από το μέγεθος του θερμοκηπίου, από τη μέγιστη ανεκτή θερμοκρασία αέρα στο θερμοκήπιο και από τις κλιματολογικές συνθήκες του περιβάλλοντος. Από έρευνες έχει βρεθεί ότι 60 εναλλαγές του αέρα του θερμοκηπίου την ώρα προκαλούν ικανοποιητική μείωση στη θερμοκρασία του αέρα, ενώ με περισσότερες από 75 εναλλαγές την ώρα το κόστος εξαερισμού επιβαρύνεται πάρα πολύ χωρίς να επέρχεται μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας.

Τα αναπτυχθέντα μέχρι σήμερα συστήματα εξαερισμού των θερμοκηπίων, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Συστήματα φυσικού εξαερισμού
2. Συστήματα τεχνητού εξαερισμού

Ο φυσικός εξαερισμός εφαρμόζεται στα θερμοκήπια όταν δε χρειάζεται ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας, και πραγματοποιείται από τα ανοίγματα που βρίσκονται στη στέγη και στις πλευρές των θερμοκηπίων. Χρειάζεται συνεχή παρακολούθηση και εργατικά χέρια για το ανοιγοκλείσιμο των ανοιγμάτων εξαερισμού. Όταν δεν φυσάει άνεμος ο φυσικός εξαερισμός είναι ανεπαρκής, ενώ όταν φυσάει δυνατός άνεμος, τα θερμοκήπια υπεραερίζονται και πολλές φορές τα φυτά παθαίνουν ζημιές. Ο φυσικός εξαερισμός δεν απαιτεί καύσιμα για τη λειτουργία του.

Ο τεχνητός εξαερισμός είναι αποτελεσματικότερος από τον φυσικό εξαερισμό. Σήμερα υπάρχουν δύο συστήματα τεχνητού εξαερισμού:

1. Το *σύστημα υποπίεσης*, στο οποίο ο εξαεριστήρας εξάγει αέρα από το θερμοκήπιο δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο υποπίεση μέσα στο θερμοκήπιο, επιτρέποντας την είσοδο αέρα από τα ανοίγματα που υπάρχουν στην αντικρινή πλευρά.
2. Το *σύστημα υπερπίεσης*, σύμφωνα με το οποίο ο αέρας του περιβάλλοντος εισάγεται με πίεση στο θερμοκήπιο αναγκάζοντας τον θερμό και υγρό αέρα να βγει από ειδικά ανοίγματα.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία εδώ και χιλιάδες χρόνια. Ωστόσο, η χρήση και ο ρυθμός εκμετάλλευσής της έχει αυξηθεί πολύ τα τελευταία χρόνια με την χρήση της τεχνολογίας.

Η παγκόσμια ενεργειακή κρίση η οποία επικρατεί και μεγαλώνει ολοένα τα τελευταία χρόνια, ωθεί την ανθρωπότητα όλο και περισσότερο στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έναντι αυτής που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, διότι αφενός τα ορυκτά καύσιμα είναι θέμα χρόνου να εκλείψουν, και αφετέρου το φαινόμενο του θερμοκηπίου πλήττει ολοένα και περισσότερο τον πλανήτη με απτά και ορατά αποτελέσματα τώρα πια στην αλλαγή του κλίματος. Η «καθαρή» ενέργεια, λοιπόν, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πια αναγκαία.

Η συνολική ηλιακή ενέργεια που διαπερνά την ατμόσφαιρα και φτάνει στο επίπεδο της γης, είναι αρκετή για να υπερκαλύψει τις ανθρώπινες ανάγκες. Η ηλιακή ακτινοβολία έξω από τα όρια της ατμόσφαιρας φτάνει στα επίπεδα των 1370W/m^2 , ενώ στο επίπεδο του εδάφους φτάνει μέχρι και τα 1100W/m^2 , ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα. Η ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι πολύ εύκολα προσβάσιμη και με πολύ καλούς συντελεστές αποδοτικότητας σε διάφορα γεωγραφικά σημεία του κόσμου, μπορεί να υποστηρίξει το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που χρειάζεται η ανθρωπότητα, καθιστώντας την ένα από τα πιο μελετημένα και ερευνημένα κομμάτια της τεχνικής.

Τα ηλιακά ενεργειακά συστήματα συγκριτικά με άλλα συστήματα έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- δεν παράγουν καθόλου ηχορύπανση
- δεν παράγουν χημικά απόβλητα ή οποιαδήποτε ρυπογόνο ουσία για το περιβάλλον
- έχουν μεγάλη αποδοτικότητα
- παρέχουν αξιοπιστία, μιας και είναι οικονομικά και έχουν χρόνο ζωής 20 με 30 χρόνια
- έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Από την άλλη πλευρά όμως:

- προσφέρουν μεγάλους χρόνους αποπληρωμής

- έχουν μεγάλο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης
- χρειάζονται μεγάλο χώρο για να εγκατασταθούν, ο οποίος χώρος δεν είναι πάντα διαθέσιμος

3.1 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η θέρμανση ενός θερμοκηπίου με αποκλειστική χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν είναι βιώσιμη. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται παράλληλα με άλλα συστήματα θέρμανσης, διότι η ηλιακή ενέργεια δεν είναι σταθερή όλες τις ημέρες του χρόνου και δεν είναι αξιόπιστη. Επίσης, η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά τετραγωνικό μέτρο είναι σχετικά μικρή, οπότε απαιτείται μία τεράστια έκταση φωτοβολταϊκών για την κάλυψη όλων των θερμικών αναγκών ενός θερμοκηπίου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι παραγωγοί χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά συστήματα για τη μείωση του λειτουργικού κόστους του εξοπλισμού των κεντρικών συστημάτων θέρμανσης και εξαερισμού, που χρησιμοποιούν ρεύμα για τη λειτουργία τους. Αυτά περιλαμβάνουν τους κυκλοφορητές, ανεμιστήρες, συμπιεστές (αντλίες θερμότητας) κ.ά.. Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει στον εξοπλισμό του τα εξής:

- Φωτοβολταϊκά
- Inverter
- Μπαταρία
- Ρυθμιστή φόρτισης

Πρόσφατα στη Γαλλία, δημιουργήθηκε το πρώτο θερμοκήπιο με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων στις στέγες των θερμοκηπίων του. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν 13.440 πάνελ σε μία έκταση 40.000 τετραγωνικών μέτρων, τα οποία ενσωματώθηκαν στις στέγες. Τα πάνελ αφήνουν μεταξύ τους κενά ώστε να φτάνει το φως στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Η παραγωγή ενέργειας της συγκεκριμένης εγκατάστασης είναι της τάξεως των 2.5MW ή 3GWh ετησίως, και έχει τη δυνατότητα να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες 200 ανθρώπων,

μειώνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 254 τόνους ετησίως. (<https://4green.gr/>).

3.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Η χρήση ηλιακών συλλεκτών για τη θέρμανση ενός θερμοκηπίου είναι πολύ πιο αποδοτική και με αρκετά μικρότερο κόστος από αυτό που απαιτείται με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων, αφενός διότι η ενεργειακή αποδοτικότητα του ηλιακού συλλέκτη είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή του φωτοβολταϊκού, αφετέρου διότι η αποθήκευση της ενέργειας από τον ηλιακό συλλέκτη μπορεί να γίνει με πολύ μικρότερο κόστος, με χρήση δεξαμενών, στις οποίες μπορεί να αποθηκευτεί η παραγόμενη θερμότητα.

Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε χρήσιμη θερμότητα είτε με ενδιάμεσο μέσο κάποιο υγρό με μεγάλη θερμοχωρητικότητα, είτε με νερό. Συνήθως στα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται συλλέκτες χαμηλού κόστους από σωλήνες πολυαιθυλενίου ή συλλέκτες από μαύρα φύλλα πολυαιθυλενίου που έχουν μεγάλη αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος. Το ζεστό νερό αποθηκεύεται σε δεξαμενές και διανέμεται όταν είναι απαραίτητο μέσω σωλήνων.

Επειδή οι συλλέκτες καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο, γίνονται προσπάθειες για την εύρεση τρόπων ώστε να τοποθετούνται στο πλάι των θερμοκηπίων ή ακόμα και στο εσωτερικό τους. Έχουν κατασκευαστεί συλλέκτες οι οποίοι τοποθετούνται στα άκρα της στέγης των θερμοκηπίων, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να στρέφονται μέσω ηλεκτροκινητήρων. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να απορροφούν τη μέγιστη ενέργεια όταν η ηλιακή ενέργεια είναι υψηλή και παράλληλα να σκιάζουν τα φυτά, ενώ όταν η ηλιακή ενέργεια είναι χαμηλή λόγω νέφωσης στρέφονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εμποδίζουν τις ακτίνες του ηλίου να έρθουν σε απευθείας επαφή με τα φυτά.

3.3 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ PV-T

Υπάρχουν δύο βασικά συστήματα που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια. Το ένα είναι το φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο παράγει ηλεκτρικό ρεύμα μέσω της ενέργειας των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας, και το δεύτερο είναι ο ηλιακός θερμικός συλλέκτης, ο οποίος μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα [6] [7].

Παρ' ότι η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει ανέβει σε πολύ καλά επίπεδα τον τελευταίο καιρό, υπάρχουν κάποιες παράμετροι που επηρεάζουν τις συνθήκες λειτουργίας τους όσον αφορά τον χρόνο αποπληρωμής και απόσβεσης της αρχικής επένδυσης. Αυτές οι παράμετροι βιωσιμότητας, όπως είναι η επιφανειακή θερμοκρασία, η σκόνη, το μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και οι κλιματικές συνθήκες, είναι σημαντικές για την οικονομία αυτής της καθαρής και αέναης ενέργειας.

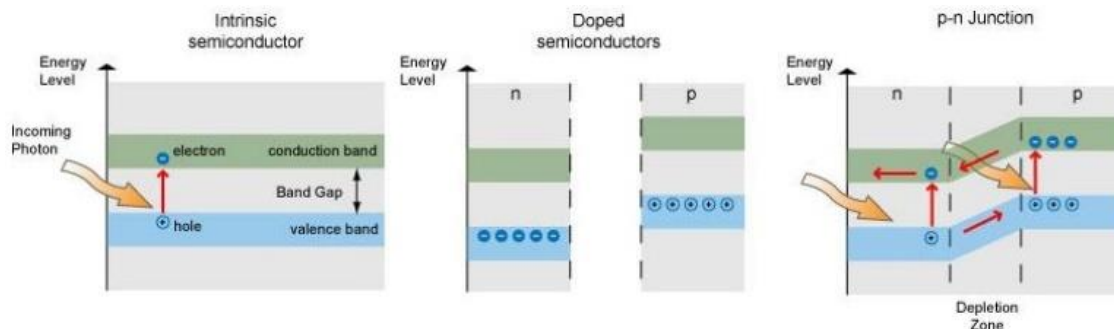
Από όλες αυτές τις παραμέτρους, η πιο σημαντική και ενδιαφέρουσα είναι αδιαμφισβήτητη η θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει διότι η παρατεταμένη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και ο τρόπος που λειτουργούν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες μετατρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια, τείνουν να ανεβάζουν κατά πολύ τη θερμοκρασία τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό, έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας που παράγουν τα κελιά, καθώς και την ταχύτερη γήρανση του συστήματος λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας κατά την ημέρα και την ξαφνική ψύξη κατά τη νύχτα, όταν δεν υπάρχει πια ηλιακή ακτινοβολία.

3.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

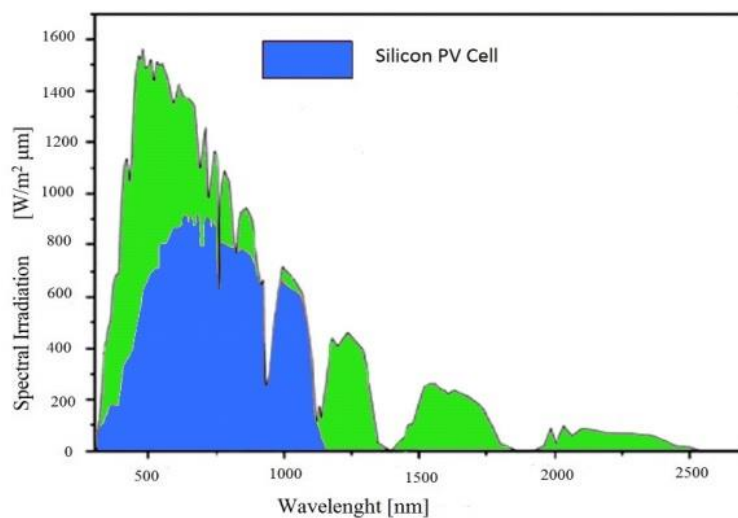
Όπως είναι γνωστό, το φως του ηλίου μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια ροή από φωτόνια, όπου το καθένα «κουβαλάει» ένα μικρό (κβαντικό) ποσό ενέργειας. Είναι επίσης γνωστό ότι το φάσμα του φωτός έχει διαφορετικές ενέργειες στα φωτόνια του ανάλογα με το μήκος κύματος.

Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία συμβαίνει σύμφωνα με τις αρχές που πρωτοειπώθηκαν από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel το 1839 [8]. Περιληπτικά, πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια

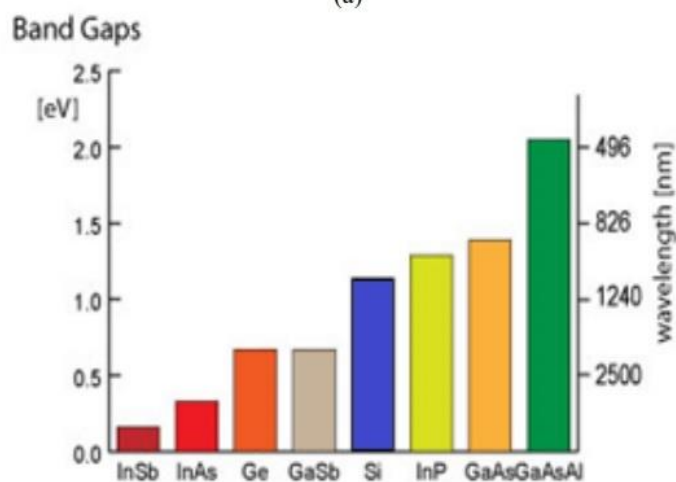
των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρεύματος. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο [9].



Εικόνα 3.1. Δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της αποβολής του ηλεκτρονίου [10].



(a)



(b)

Εικόνα 3.2. (α) Χρήσιμη ενέργεια του ηλιακού φάσματος από Si κυψέλες, και
(b) Ενεργειακό χάσμα υλικών φωτοβολταϊκών κελίων [11]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2 (b) τα ενεργειακά χάσματα των υλικών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά έχουν διαφορετικές τιμές και δεν είναι δυνατό να συνεργαστούν απόλυτα με τις ενέργειες των φωτονίων του ηλιακού φάσματος (Εικόνα 3.2 (a)). Μερίδα των φωτονίων χάνεται και μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτή η διαδικασία έχει ως επακόλουθο την αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών με αρνητικά αποτελέσματα στην αποδοτικότητά τους και μείωση της ενεργούς ζωής τους λόγω θερμικής κόπωσης [8].

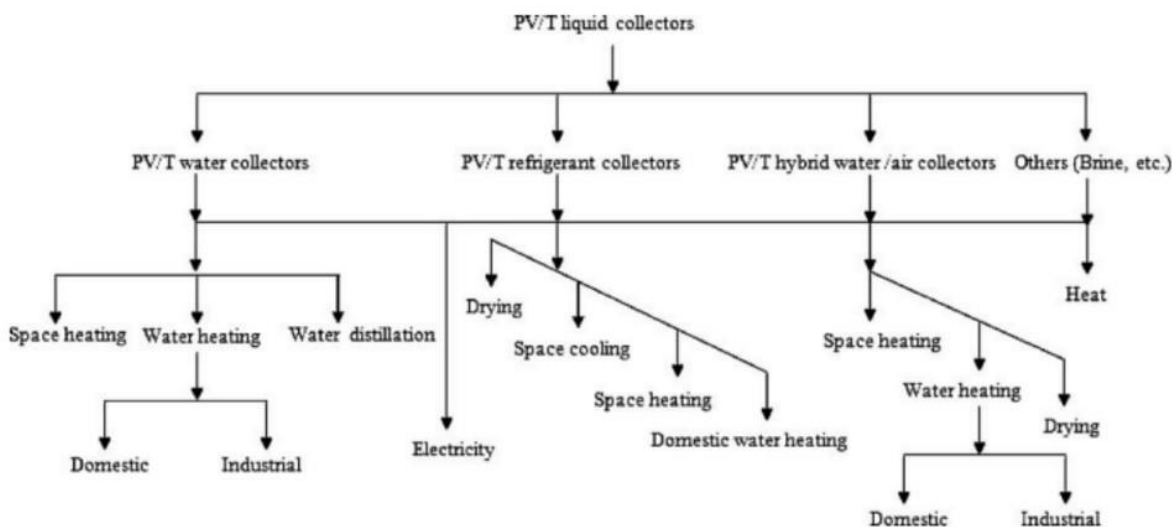
3.3.2 ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Αν και τα φωτοβολταϊκά και οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, αλλά για αρκετά διαφορετικούς σκοπούς (παραγωγής ρεύματος ή παραγωγή θερμότητας), δεν έχουν πολύ μεγάλη διαφορά στον τρόπο τοποθέτησής τους, καθώς και στους χώρους στους οποίους τοποθετούνται. Έτσι λοιπόν, η ιδέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (PV-T) στο ίδιο σύστημα, μπορεί να θεωρηθεί χρήσιμη σε πάρα πολλές εγκαταστάσεις [12]. Αυτό δεν είναι κάτι καινούριο, αλλά δεν έχει φανεί πολύ μεγάλο ενδιαφέρον για τέτοια συστήματα.

Ερευνητές που ασχολούνται συγκεκριμένα με τα φωτοβολταϊκά σαν συνέπεια της αυξημένης ζήτησης σε νέες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η οποία έχει δείξει ραγδαία αύξηση στην αγορά των ηλιακών συστημάτων της τάξεως του 30% κάθε χρόνο [13], έχουν δείξει ότι η θερμική κόπωση και η αυξημένη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών αυξάνουν τη γήρανσή τους και μειώνουν την αποδοτικότητά τους. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι με τον κατάλληλο συνδυασμό φωτοβολταϊκών με ηλιακούς συλλέκτες προκύπτουν πολλά θετικά στοιχεία. Η αποδοτικότητα του συλλέκτη μπορεί να αυξηθεί και το φωτοβολταϊκό μπορεί να προστατευτεί από τις υψηλές θερμοκρασίες με ταυτόχρονη αύξηση της αποδοτικότητάς του κατά τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Τα θετικά των υβριδικών ηλιακών συστημάτων λοιπόν, έχουν ανεβάσει το ενδιαφέρον του αγοραστικού κοινού τα τελευταία χρόνια.

Το γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά μπορούν να μεταλλάξουν ένα μικρό μόνο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνειά τους, ενώ όλη η υπόλοιπη ενέργεια χάνεται σε θερμότητα, μειώνει την αποδοτικότητα του συστήματος αλλά ενισχύει την ιδέα και τα θετικά των PV-T συστημάτων, τα οποία μπορούν να μετατρέψουν αυτή τη θερμική ενέργεια σε χρήσιμη ενέργεια για τον άνθρωπο. Παράλληλα, λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού επιτυγχάνονται καλύτεροι συντελεστές μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Έρευνες πάνω στα υβριδικά ηλιακά συστήματα έχουν ξεκινήσει από τα μέσα της δεκαετίας του '70 αποσκοπώντας στην αύξηση της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών [14]. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την αντίσταση στο ηλεκτρικό κύκλωμα και μειώνει την αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού [15]. Τα συστήματα PV-T χρησιμοποιούν αυτή την χαμένη υπό άλλες συνθήκες ενέργεια για να παρέχουν ζεστό νερό ή αέρα σε εφαρμογές της καθημερινότητας, ενώ παράλληλα το φωτοβολταϊκό πάνελ διατηρείται ψυχρότερο, αυξάνοντας την αποδοτικότητά του σε παραγωγή ρεύματος. Η ταυτόχρονη ψύξη του φωτοβολταϊκού διατηρεί την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε υψηλά επίπεδα και γι' αυτό τα υβριδικά συστήματα έχουν μεγάλο πλεονέκτημα σε αποδοτικότητα.



Εικόνα 3.3. Χρήσεις υβριδικών ηλ. συστημάτων PV-T ανά τύπο

Τα υβριδικά συστήματα αέρος, νερού ή αέρος-νερού χρησιμοποιούνται για να ψύχουν το σύστημα, ή με άλλα λόγια, για να απορροφούν θερμότητα από το φωτοβολταϊκό πάνελ του συστήματος.

Παρ' ότι τα PV/T-αέρος συστήματα ήταν πιο εξελιγμένα, μια ραγδαία ανάπτυξη εμφανίζεται τον τελευταίο καιρό και στα PV/T-νερού συστήματα. Η θερμοχωρητικότητα του νερού είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτήν του αέρα, συνεπώς το σύστημά μπορεί να γίνει πολύ αποδοτικότερο με τη χρήση νερού έναντι του αέρος.

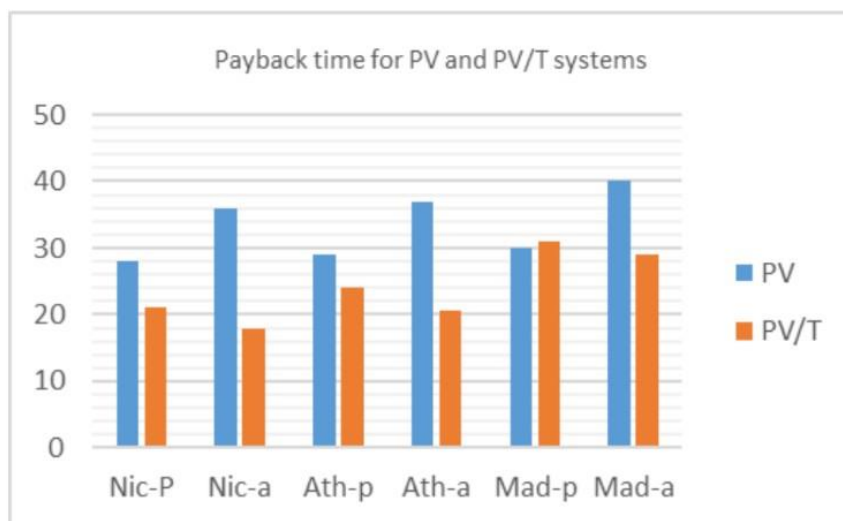
Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι υβριδικών συστημάτων PV-T. Όσον αφορά το φωτοβολταϊκό τμήμα, αυτό μπορεί να λειτουργεί με μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, άμορφο πυρίτιο (c-Si, pc-Si, a-Si) ή λεπτό φιλμ. Η κυκλοφορία του αέρα ή του νερού μπορεί να γίνεται με φυσική ή εξαναγκασμένη ροή με χρήση κυκλοφορητή. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα γύρω από αυτά τα συστήματα, καθώς επίσης και η ζήτησή τους, έχουν σημειώσει άνοδο, μειώνοντας αρκετά το κόστος κατασκευής και διάθεσής τους στην αγορά.

3.3.3 ΘΕΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μερικά από τα θετικά χαρακτηριστικά των υβριδικών συστημάτων που τα καθιστούν πολύ ελκυστικά για το αγοραστικό κοινό είναι τα εξής [16]:

- Είναι πολυλειτουργικά: μπορεί να παραχθεί ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από το ίδιο σύστημα
- Είναι ευέλικτα και αποδοτικά: η συνολική αποδοτικότητα είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με την χρήση των δύο συστημάτων (φωτοβολταϊκού & θερμικού συλλέκτη) ξεχωριστά.
- Από το παραπάνω χαρακτηριστικό προκύπτει ακόμη ένα θετικό. Σε πολλές περιπτώσεις, ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος. Με το υβριδικό σύστημα ο χώρος που χρειάζεται για την τοποθέτησή του είναι ούτε λίγο ούτε πολύ ο μισός από αυτόν που θα χρειαζόταν για τα δύο συστήματα ξεχωριστά.

- Έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η θερμότητα που απορροφάται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ή και ψύξη, ανάλογα με την εποχή, και είναι κατάλληλη για σπίτια ή και καταστήματα.
- Είναι βολικά και κατά περιπτώσεις σχετικά οικονομικά. Οποιοδήποτε κτήριο μπορεί να δεχτεί το σύστημα χωρίς να γίνουν απαραίτητα κάποιες αλλαγές σε αυτό. Μάλιστα σε περιπτώσεις που πρέπει να αλλάξει η μόνωση της ταράτσας, με τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος αντί της μόνωσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος αποπληρωμής τους



Εικόνα 3.4. Ο χρόνος αποπληρωμής υβριδικών συστημάτων άμορφου (a) και πολυκρυσταλλικού (P) πυριτίου σε απλά φωτοβολταϊκά και PV-T συστήματα [17].

Το ανωτέρω διάγραμμα έχει δημιουργηθεί βάσει των κλιματικών συνθηκών και ηλιοφάνειας της Νίκαιας (Nic), Αθήνας (Ath) και Μαδρίτης (Mad). Όπως παρατηρείται στην παραπάνω εικόνα, ο χρόνος αποπληρωμής των PV-T συστημάτων είναι αρκετά γρηγορότερος από αυτόν των απλών φωτοβολταϊκών, παρά το υψηλότερο κόστος. Αυτό συμβαίνει λόγω της αυξημένης αποδοτικότητας τους, ειδικά αν χρησιμοποιηθεί με ορθό τρόπο (θέρμανση νερού ή χώρων) το κομμάτι του ηλιακού συλλέκτη, το οποίο μπορεί να έχει αποδοτικότητα έως 60-70% (έως και 600 W/m^2) σε σχέση με την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε αυτό.

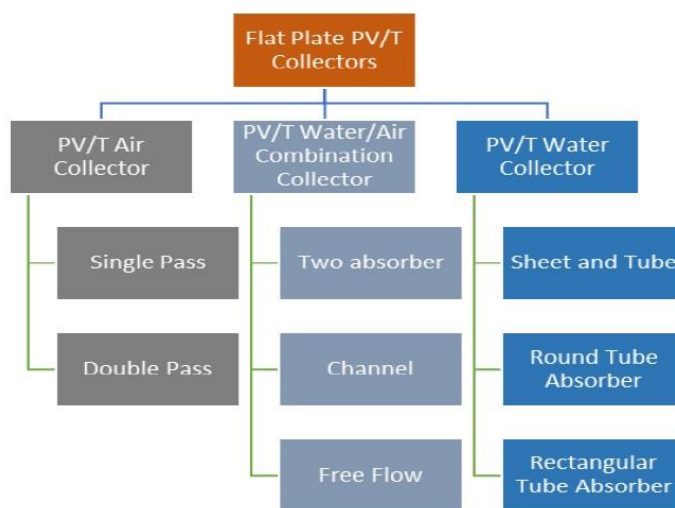
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα τους λοιπόν κρύβεται πίσω από την μεγάλη αποδοτικότητα τους. Δεδομένου ότι το φωτοβολταϊκό μπορεί να έχει απόδοση 15-20% (ανάλογα το υλικό του), η οποία δεν μειώνεται λόγω της ψύξης του πάνελ, ενώ παράλληλα το κομμάτι του ηλιακού

συλλέκτη μπορεί να έχει απόδοση μέχρι και 60-70%, είναι κατανοητό ότι μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μένει αχρησιμοποίητο. Αυτό τα εκτοξεύει σε ένα από τα πιο αποδοτικά ηλιακά συστήματα που υπάρχουν σήμερα.

3.3.4 ΤΥΠΟΙ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PV-T

Τα υβριδικά ηλιακά συστήματα μπορούν να διαφοροποιηθούν με διάφορους τρόπους ώστε να ταιριάζουν κάθε φορά στο εκάστοτε έργο. Τα τελευταία χρόνια οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν γίνει σχεδόν απαραίτητοι στα νοικοκυριά, μιας και ένα μεγάλο ποσοστό χρησιμοποιεί πια ηλιακούς θερμοσίφωνες. Η χρήση ενός ηλιακού συλλέκτη σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκό δεν θα μπορούσε να είναι κάτι άλλο παρά πιο αποδοτική για ένα νοικοκυριό.

Εκτός από τη θέρμανση ζεστού νερού χρήσης, η επιλογή της θέρμανσης νερού ή και αέρος απευθείας για τη θέρμανση ενός χώρου μπορεί να αποδειχτεί πολύ αποδοτική και να βοηθήσει στην οικονομία ενός σπιτιού, καθώς και οποιουδήποτε κτηρίου διαφορετικής χρήσης. Επίσης, η ανακύκλωση του αέρα βοηθάει και στον εξαερισμό των κτηρίων, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τις συνθήκες διαβίωσης.

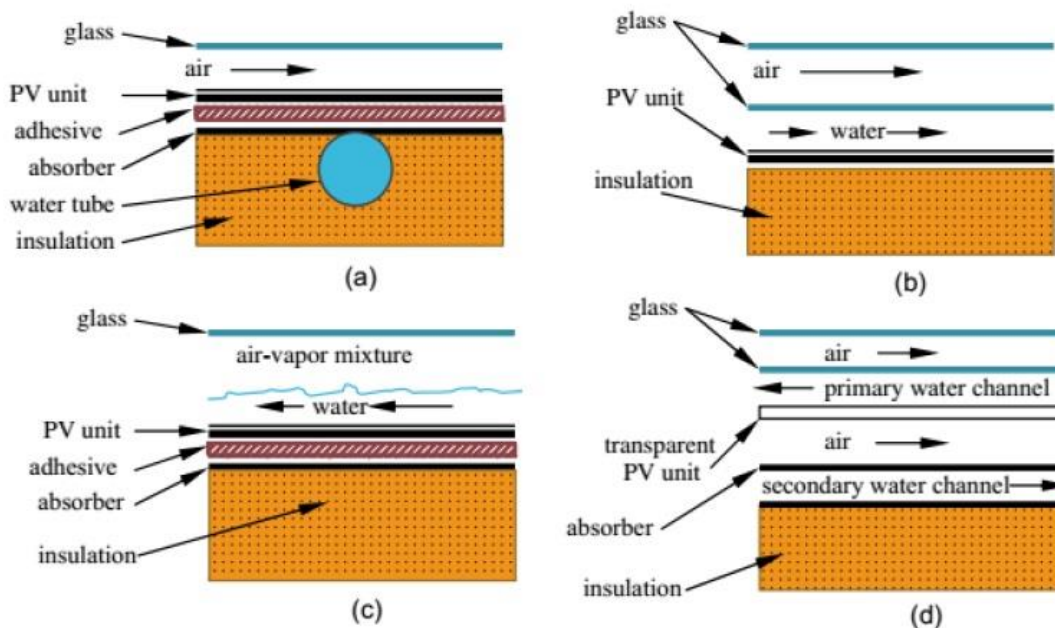


Εικόνα 3.5. Διαχωρισμός συστημάτων PV-T [17]

Τα υβριδικά ηλιακά συστήματα είναι διαθέσιμα σε αρκετές παραλλαγές, ανάλογα με τον τύπο και τον σχεδιασμό της μονάδας του φωτοβολταϊκού, το είδος του υγρού που

χρησιμοποιείται για να απορροφηθεί θερμότητα από αυτό και την περιοχή που πρόκειται να τοποθετηθεί (καιρικές συνθήκες κλπ.). Γενικότερα χωρίζονται σε PV-T με:

- κυκλοφορία υγρού
- κυκλοφορία αέρα
- συνδυασμό και των δύο



Εικόνα 3.6. Λειτουργία διαφορετικών τύπων PV-T (a) φύλλου-σωλήνα, (b) Νερού-αέρα (c) ελεύθερης ροής (d) Διπλής απορρόφησης νερού-αέρα [18].

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούνται αρκετές διαφοροποιήσεις μεταξύ των υβριδικών ηλιακών συστημάτων PV-T, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε έργου. Η διαφορά προφανώς έγκειται στο κόστος-αποδοτικότητα του κάθε συνδυασμού και είναι στην ευχέρεια του μηχανικού να κρίνει ποιο είναι το πιο κατάλληλο ανάλογα με τις ανάγκες του έργου και φυσικά τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

4. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PV-T ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

4.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Πριν γίνει αναφορά στην κατασκευή του θερμοκηπιακού συστήματος, θα πρέπει να δοθούν λίγες πληροφορίες για την καλλιέργεια της τομάτας, η οποία επιλέχθηκε να καλλιεργηθεί, τις κλιματικές συνθήκες και τα λοιπά στοιχεία που ευνοούν την καλλιέργειά της. Οι πληροφορίες αυτές είναι απαραίτητες για την κατασκευή της εγκατάστασης.

4.1.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ο φωτισμός, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία αποτελούν σημαντικές συνθήκες για την παραγωγή και την ανάπτυξη της τομάτας σε ένα θερμοκήπιο. Για βέλτιστα αποτελέσματα από την καλλιέργεια του επιλεγμένου φυτού, θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στις συγκεκριμένες αυτές συνθήκες, οι οποίες θα πρέπει να βρίσκονται σε άριστα επίπεδα.

4.1.1.1 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η εσωτερική θερμοκρασία σε ένα θερμοκήπιο επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό φωτοσύνθεσης, και συνεπώς και την ανάπτυξη του φυτού. Έχει παρατηρηθεί ότι θερμοκρασίες μικρότερες των 14°C μπορεί να καθυστερήσουν την ανάπτυξη του φυτού, καθώς και την καρπόδεση. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και όταν οι θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της ημέρας είναι σε υψηλά επίπεδα. Από την άλλη μεριά, θερμοκρασίες υψηλότερες των 28°C μπορεί να μειώσουν την ζωντάνια του φυτού και να επηρεάσουν αρνητικά την παραγωγή.

Οι βέλτιστες θερμοκρασίες της συγκεκριμένης καλλιέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ηλιοφάνεια και αλλάζουν ανάλογα την εποχή του χρόνου. Έτσι λοιπόν κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου η ένταση του φωτισμού είναι σε χαμηλά επίπεδα, τις ηλιόλουστες ημέρες συνίσταται θερμοκρασία 24°C κατά την διάρκεια της ημέρας και θερμοκρασία 17°C κατά τη νύχτα. Ημέρες με εκτεταμένη συννεφιά, μπορεί να αλλάξουν αυτές τις θερμοκρασίες σε 20 °C

κατά τη διάρκεια της ημέρας και 15°C κατά τη νύχτα. Η θερμοκρασία ενός θερμοκηπίου τον χειμώνα είναι αρκετά χαμηλή, ενώ το καλοκαίρι μπορεί να είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα. Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες, έτσι ώστε η θερμοκρασία εσωτερικού των θερμοκηπίων να βρίσκεται σε σωστά επίπεδα για την εποχή **Invalid source specified..**

Παρακάτω φαίνονται οι βέλτιστες και χειρίστες θερμοκρασίες για την καλλιέργεια της τομάτας **Invalid source specified.:**

- **Θανατηφόρος θερμοκρασία:** μέγιστη 49 έως 51°C, ελάχιστη 0 έως 3°C. Όταν η θερμοκρασία παραμένει υψηλότερη από την μέγιστη ή μικρότερη από την ελάχιστη για μεγάλο διάστημα, τότε το συγκεκριμένο φυτό καταστρέφεται.
- **Βιολογική θερμοκρασία:** μέγιστη 31 έως 36°C, ελάχιστη 8 έως 10°C. Όταν η θερμοκρασία παραμένει υψηλότερη από την μέγιστη ή μικρότερη από την ελάχιστη για μεγάλο διάστημα, δημιουργούνται διαταραχές στο φυτό χωρίς να καταστρέφεται όμως η καλλιέργεια.
- **Θερμοκρασία Φυτρώματος:** μέγιστη 35 έως 41°C, ελάχιστη 9 έως 10°C, με την άριστη να βρίσκεται μεταξύ 20 και 30°C. Όσο βρίσκεται η θερμοκρασία εκτός των άριστων ορίων, αυξάνεται το ποσοστό των σπόρων που δε φυτρώνουν ενώ παράλληλα παρατηρείται και καθυστέρηση στο φύτευμα.
- **Θερμοκρασία εδάφους:** Άριστη 19 έως 22°C, ελάχιστη 13 έως 15°C. Όταν η θερμοκρασία παραμένει υψηλότερη από την μέγιστη ή μικρότερη από την ελάχιστη, δυσκολεύεται η ανάπτυξη των φυτών καθώς και δημιουργία νέου ριζικού συστήματος. Ανάλογα την ηλικία του φυτού, οι απαιτήσεις γίνονται ακόμα υψηλότερες. Σε σχέση με τις θερμοκρασίες που απαιτούνται κατά την άνθηση, οι θερμοκρασίες πρέπει να είναι πολύ υψηλότερες σε ένα ανεπτυγμένο φυτό.

Ο φωτισμός, όπως και σε όλες σχεδόν τις καλλιέργειες είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη της τομάτας. Ακόμα και αν όλες οι άλλες συνθήκες είναι βέλτιστες, η έλλειψη φωτός θα δυσκολέψει πολύ την ανάπτυξη και μπορεί να προβεί και καταστροφικό για την καλλιέργεια.

4.1.1.2 ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η σχετική υγρασία, η οποία επιδρά στο φυτό και στην παραγωγή περίπου όπως και το νερό, και έχει πολύ σημαντική επίδραση στο κλείσιμο των στοματίων των φύλλων, τα οποία σε φυσιολογικά επίπεδα σχετικής υγρασίας μεταξύ 55% και 70% παραμένουν ανοικτά. Το άνοιγμά τους δραστηριοποιεί τους μηχανισμούς εφοδιασμού του φυτού με νερό, θρεπτικά στοιχεία, διοξείδιο του άνθρακα κ.ά. Επίσης, η πολύ υψηλή σχετική υγρασία ευνοεί την ανάπτυξη και την εξάπλωση ασθενειών, ενώ η γύρη από τους ανθήρες δεν μπορεί να εξαπλωθεί.

4.1.2 ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η τομάτα προσαρμόζεται εύκολα σε διάφορους τύπους εδάφους, όμως η ανάπτυξη και η παραγωγή της είναι καλύτερη σε έδαφος μέσης σύστασης, βαθύ, γόνιμο, πλούσιο σε οργανική ουσία, στραγγερό, καλά αεριζόμενο, με υψηλό βαθμό υδατοϊκανότητας, χωρίς προβλήματα από έλλειψη ή περίσσεια θρεπτικών στοιχείων. Όσον αφορά την εδαφική ενεργό οξύτητα για την καλλιέργεια της τομάτας, οι καταλληλότερες τιμές της κυμαίνονται μεταξύ $pH=6-6.5$, αν και τα αποτελέσματα είναι καλά και για pH μέχρι 7.5. Τα καταλληλότερα εδάφη είναι τα αμμοπηλώδη και τα πηλοαμμώδη, ενώ για πρώιμη παραγωγή μπορεί να χρησιμοποιηθούν και ελαφρά αμμώδη εδάφη, τα οποία όμως είναι πτωχά και με χαμηλό βαθμό υδατοϊκανότητας. Τα αμμώδη εδάφη πλεονεκτούν στον χρόνο παραγωγής (πιο πρώιμη), όχι όμως και στο ύψος της. Επίσης, τα βαριά πηλώδη εδάφη δεν αποτελούν τόσο κατάλληλη επιλογή, μιας και στραγγίζουν δύσκολα, και είναι προβληματικά όταν υπάρχει υψηλή συγκέντρωση αλάτων, γιατί η έκλυσή τους γίνεται δύσκολα. Το ριζικό σύστημα της τομάτας αναπτύσσεται μέχρι και το βάθος των 75cm, και όταν η φυσική στράγγιση του εδάφους δεν είναι ικανοποιητική θα πρέπει να προβλέπεται εγκατάσταση συστήματος στράγγισης στο θερμοκήπιο. Για τη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους είναι απαραίτητη η εφαρμογή άφθονης οργανικής ουσίας, η οποία προστίθεται στο έδαφος με κομπόστ, χλωρή λίπανση, αμειψισπορά ή κοπριά [20].

4.1.3 ΕΠΙΚΟΝΙΑΣΗ

Η υψηλή αποδοτικότητα στην καλλιέργεια της τομάτας σε θερμοκήπιο εξασφαλίζεται μόνο εάν τα άνθη καρποδέσουν ικανοποιητικά. Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρρηξη των ανθών και την εκτίναξη της γύρης. Έχει βρεθεί ότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη των 21°C, ενώ όταν είναι χαμηλότερη των 18°C η εκτίναξη της γύρης καθυστερεί και όταν είναι μεγαλύτερη των 32°C η καρπόδεση μειώνεται. Στη δεύτερη περίπτωση της υψηλής θερμοκρασίας, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με σκίαση του θερμοκηπίου ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία, είτε με περιοδικό ψεκασμό των φυτών με σύστημα υδρονέφωσης ή άρδευσης με καταιονισμό. Η αναμενόμενη εξάτμιση έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο συγκριτικά με τη θερμοκρασία του εξωτερικού ατμοσφαιρικού αέρα, όμως με τη διαβροχή των φυτών εγκυμονούν κίνδυνοι προσβολής από ασθένειες, και για αυτόν τον λόγο η διαβροχή θα πρέπει να διακόπτεται νωρίς το απόγευμα, ώστε τα φυτά να στεγνώνουν πριν νυχτώσει [21].

4.1.4 ΑΣΘΕΝΕΙΕΣ ΚΑΙ ΕΧΘΡΟΙ ΤΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ

Η τομάτα είναι ένα φυτό, το οποίο είναι ευαίσθητο και επιρρεπές σε ασθένειες μυκητολογικής, βακτηριακής και ιολογικής φύσεως. Ο βοτρυτής, ο περονόσπορος, το ωϊδίο και η σκληροτίνια θεωρούνται ως οι πιο συχνές και άκρως επικίνδυνες ασθένειες, οι οποίες όμως δύναται να καταπολεμηθούν με συγκεκριμένες κινήσεις από τον παραγωγό.

4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί ένα σύστημα θερμοκηπίων για καλλιέργεια τομάτας, το ένα εκ των οποίων θα λειτουργεί σε συνδυασμό με ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό PV-T, το οποίο θα συμβάλει στις θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες του θερμοκηπίου. Θα γίνει πλήρης καταγραφή των μετρήσεων της θερμοκρασίας, καθώς και της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανσή τους. Στο τέλος θα γίνει σύγκριση μεταξύ

των μετρήσεων που προέκυψαν από τα δύο θερμοκήπια, ώστε να βρεθεί η συμβολή του συστήματος PV-T.

Όπως είναι γνωστό, στα θερμοκήπια πρέπει να διατηρούνται συγκεκριμένες και ευνοϊκές για την ανάπτυξη των επιλεχθέντων φυτών θερμοκρασίες. Κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, είναι αναγκαία η χρήση κάποιου είδους θέρμανσης για τη συντήρηση της θερμοκρασίας εντός του θερμοκηπίου στα επιθυμητά επίπεδα. Τα είδη θέρμανσης που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε θερμοκήπια αναφέρονται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση επιλέχθηκε η χρήση αερόθερμων, ενώ στο ένα από τα δύο θερμοκήπια το αερόθερμο λειτουργεί συνδυαστικά με το τοποθετημένο σύστημα PV-T. Η θερμότητα που παράγεται από το σκέλος του ηλιακού συλλέκτη του PV-T, θα αποθηκεύεται σε δεξαμενή που βρίσκεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, με σκοπό να αποδίδει τη χρήσιμη ενέργειά του κατά τις νυχτερινές ώρες όπου η θέρμανση είναι αναγκαία. Το δεύτερο θερμοκήπιο, το οποίο λειτουργεί χωρίς το ηλιακό σύστημα, παίζει τον ρόλο του σημείου αναφοράς.

Από τη σύγκριση των μετρήσεων της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στα δύο θερμοκήπια, θα βρεθεί το ποσό της ενέργειας που απορροφάται από το θερμοκήπιο μέσω της λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη του συστήματος PV-T. Επίσης, η παραγωγή ρεύματος από το φωτοβολταϊκό του PV-T θα πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια όλων των μηνών του έτους, και το παραγόμενο ρεύμα θα αποθηκεύεται σε μπαταρίες για περαιτέρω χρήση. Στην παρούσα διπλωματική επιλέγεται το «net-metering». Σε μια κανονική θερμοκηπιακή μονάδα, το παραγόμενο ρεύμα μπορεί να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες του θερμοκηπίου, όπως είναι ο εξαερισμός, οι αντλίες υδροδότησης κ.α.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, που εγκαθίστανται στα πλαίσια του net metering, συνδέονται με το δημόσιο δίκτυο. Το παραγόμενο ρεύμα απορροφάται από το δίκτυο του παρόχου ενέργειας, και στη συνέχεια συμψηφίζεται με το ρεύμα που καταναλώνει ο ιδιοκτήτης του ακινήτου ή της επιχείρησης. Ο συμψηφισμός είναι ενεργειακός. Στο τέλος κάθε μετρητικής περιόδου το ποσό της οφειλής προς την ΔΕΗ, θα ισούται με την αξία των κιλοβατώραν (kWh),

που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας που παράγεται και της ενέργειας που καταναλώνεται.

4.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Η κατασκευή του συστήματος θερμοκηπίων ξεκινά με την κατασκευή δύο πανομοιότυπων θερμοκηπίων διαστάσεων και εμβαδού 5m^2 . Για τα θερμοκήπια χρησιμοποιήθηκε πολυανθρακικό πάνελ τα οποία συνδέθηκαν μεταξύ τους με βέργες και γωνίες αλουμινίου. Τα θερμοκήπια διαθέτουν από μια συρόμενη πόρτα καθώς και δύο παράθυρα στην οροφή για λόγους εξαερισμού.



Εικόνα 4.1: Εγκατάσταση των δύο θερμοκηπίων

4.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PV-T

Για την θέρμανση, χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο θερμοκήπια, ηλεκτρικά αερόθερμα (IZZU TG200-IP1 1800-2000W).

Για την κατασκευή του συστήματος θέρμανσης PV-T για το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη εγκατάσταση, επιλέχτηκε πάνελ PV-T της Fototherm και πιο συγκεκριμένα το CS250 series. Στην Εικόνα 4.3 φαίνονται οι τεχνικές προδιαγραφές του συγκεκριμένου πάνελ. Η στήριξή του PV-T έγινε με μεταλλικές ράβδους δημιουργώντας ένα πλαίσιο πάνω από το θερμοκήπιο. Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου τοποθετήθηκε μεταλλική δεξαμενή νερού, που θα έχει τον ρόλο ταμιευτήρα ενέργειας, συγκρατώντας το ζεστό νερό του συλλέκτη. Για την σύνδεση του κυκλώματος νερού, μαζί με άλλα χρησιμοποιήθηκε ένας κυκλοφορητής 12V, βαλβίδα εξαερισμού, δεξαμενή διαστολής 1.5bar καθώς και ένα φίλτρο και βαλβίδα διαφορικής πίεσης για την αναπλήρωση του χαμένου υγρού από το κύκλωμα.



Εικόνα 4.2: Δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού (αριστερά) και το αερόθερμο



Serie FT255Cs

ELECTRICAL DATA

		FT255Cs
Typical power	(P _n)	255 Wp
Open circuit voltage	(V _{oc})	37,4 V
Maximum power voltage	(V _{pm})	30,2 V
Short circuit current	(I _{sc})	9,00 A
Maximum power current	(I _{pm})	8,43 A
Module efficiency	(η _m)	15,8 %
Maximum system voltage	(V)	1000V DC
Reverse current load (I _r)	(A)	15
Temperature coefficient (P _n)	(γ)	-0,41 %/°C
Temperature coefficient (V _{pm})	(β)	-0,31 %/°C
Temperature coefficient (I _{pm})	(α)	0,053 %/°C

STC condition: irradiance = 1000W/m², cell temperature = 25°C

SPECIFICATION

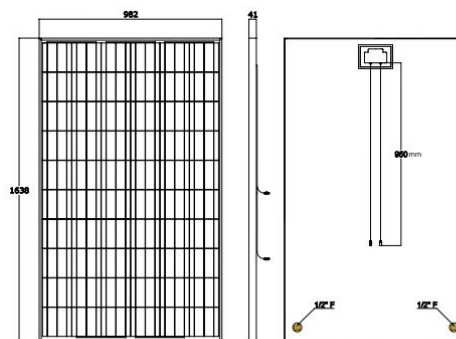
Cells	60 Polycrystalline silicon 156 mm
Electrical connectors	MC4
Hydraulic connector	female
Dimensions	1638x982x41 mm
Weight	27 Kg

THERMAL DATA

Aperture area	1,59 m ²
Thermal efficiency η _t *	56%
Nominal thermal power **	888 W
Volume flow rate	1,5 - 2,5 l/min
Flow losses	400 - 900 mmH ₂ O
Fluid volume	0,9 l
Coefficient α1 *	9,12
Coefficient α2 *	0,00
Effective thermal capacity	20 kJ Kg ⁻¹ K ⁻¹
IAM K0 at 50° C	96,0 %

* Based on aperture area

** PV OFF conditions referred to (T_m-T_a)=0



Εικόνα 4.3: Τεχνικές προδιαγραφές Υβριδικού φωτοβολταϊκού FOTOTHERM FT255Cs Series

4.2.3 ΛΗΨΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για την λήψη των μετρήσεων του συστήματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο συσκευές της National Instruments.

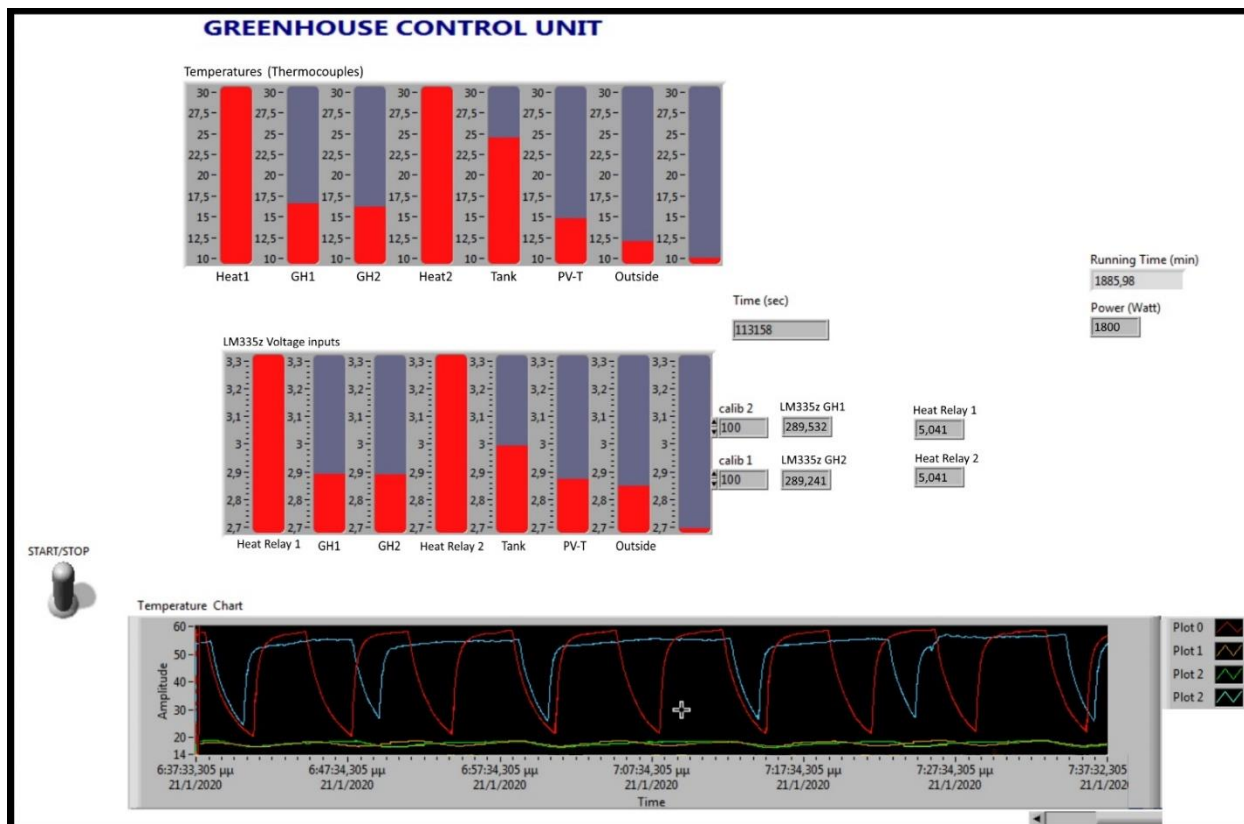
- **National Instruments FP-1600 Network Interface** - Η συγκεκριμένη συσκευή χρησιμεύει στην επικοινωνία μεταξύ του κεντρικού υπολογιστή και του κόμβου, στον οποίο συγκεντρώνονται όλα τα σήματα από τους αισθητήρες της εγκατάστασης.

- **National Instruments FP-TC-120 (8-Ch Thermocouple Input)**
- **National Instruments FP-AI-110 (8-Ch, 16-Bit Analog Input)** - Η συγκεκριμένη καταγραφική συσκευή διαβάζει αναλογικά σήματα



Εικόνα 4.4. Σύστημα λήψης δεδομένων της National Instruments, όπως έχει τοποθετηθεί στην εγκατάσταση.

Για την καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα LabView, στην οποία αποστέλλονται οι μετρήσεις από τα όργανα της National Instruments.



Εικόνα 4.5: Στιγμιότυπο από το λογισμικό LabView

Στο επάνω μέρος της Εικόνα 4.5 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που προκύπτουν από τις μετρήσεις των θερμοζευγών. Στο κάτω μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι θερμοκρασίες των δύο θερμοκηπίων, ενώ στο ίδιο γράφημα διακρίνονται και οι τιμές των αισθητήρων που έχουν τοποθετηθεί πάνω στα δύο θερμαντικά σώματα.

Τα θερμοζεύγη λαμβάνουν μετρήσεις από:

- το εσωτερικό των δύο θερμοκηπίων
- τις θερμοκρασίες των δύο αερόθερμων
- τον συλλέκτη του PV-T
- τη δεξαμενή – εναλλάκτη θερμότητας
- τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Στο επόμενο κεφάλαιο εξηγείται η αναγκαιότητα της τοποθέτησης επιπρόσθετων αισθητήρων LM335z για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Στην Εικόνα 4.5, παρατηρούνται και οι μετρήσεις των τάσεων (LM335z GH1 & GH2) από τους συγκεκριμένους αισθητήρες.

5. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Κατά τη λειτουργία του συστήματος, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρήθηκαν αρκετές διακυμάνσεις στις μετρήσεις που ελήφθησαν και προβλήματα με τη λειτουργικότητα της διαδικασίας, μερικά εκ των οποίων είναι τα εξής:

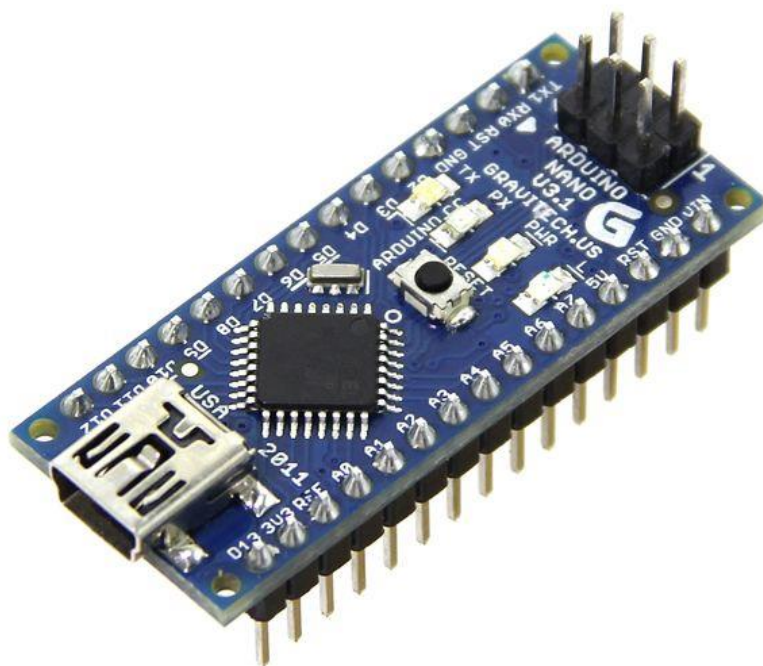
- Τα θερμοζεύγη δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια, κάτι που είναι αναγκαίο για την εγκυρότητα και ακρίβεια των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.
- Οι θερμοστάτες των αερόθερμων στα δύο θερμοκήπια δεν μπορούσαν να συγχρονιστούν απόλυτα, ώστε να ανοιγοκλείνουν με πλήρη συνέπεια και σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, κάτι το οποίο θα οδηγούσε προφανώς σε διαφορετικές καταναλώσεις ενέργειας μεταξύ των δύο θερμοκηπίων.
- Ο κυκλοφορητής του συστήματος PV-T πρέπει να λειτουργεί μόνο όταν η θερμοκρασία του νερού στον συλλέκτη είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής που βρίσκεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.
- Προβλήματα εξαερισμού, καθώς τις μέρες με ηλιοφάνεια, ακόμα και κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η θερμοκρασία του θερμοκηπίου ανέβαινε έως και τους 40°C.

Τα παραπάνω κατέστησαν την αυτοματοποίηση των θερμοκηπίων αναγκαία, διότι σε πειραματικό τουλάχιστον επίπεδο, μπορούν να προκύψουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα ακόμα και από μικρές αποκλίσεις στις ληφθείσες μετρήσεις. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μάλιστα, όπου με την συμβολή του PV-T υπολογίζεται να υπάρξει μια μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως του 15-20% κατά προσέγγιση, η παραμικρή απόκλιση θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στα αποτελέσματα.

5.1 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ARDUINO

Το Arduino είναι μια υπολογιστική πλατφόρμα που έχει τις βάσεις της στην Ιταλία. Η συσκευή αποτελείται από μια μητρική πλακέτα με αρκετές ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους, οι τιμές των οποίων διαβάζονται από έναν μικροελεγκτή. Έτσι λοιπόν δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης αισθητήρων θερμοκρασίας, πίεσης, φωτός κ.α. στις εισόδους, ενώ στις εξόδους δίνεται η δυνατότητα χειρισμού ηλεκτροκινητήρων, ρελέ κλπ. Το σημαντικότερο είναι ότι μπορεί να κωδικοποιηθεί με γλώσσα προγραμματισμού Wiring, μια παραλλαγή της C++ για μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής AVR, όπως είναι ο ATmega που χρησιμοποιεί το Arduino. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα ελέγχου των τιμών που διαβάζονται από τις εισόδους της πλακέτας, και ανάλογα με αυτές γίνεται ο χειρισμός της επιθυμητής εξόδου.

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Arduino NANO, που παρά το μικρό της μέγεθος, έχει επαρκή αριθμό εισόδων και εξόδων για την πλήρη αυτοματοποίησή των θερμοκηπίων.



Εικόνα 5.1. Arduino Nano [<http://gravitech.us/>]

5.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ LM335Z

Αρχικά, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη, όταν όμως λήφθηκαν οι πρώτες μετρήσεις, παρατηρήθηκε ότι δεν ήταν ακριβείς και είχαν μεγάλη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές. Αποφασίστηκε λοιπόν να αντικατασταθούν με αισθητήρες LM335Z στη διεξαγωγή των μετρήσεων της θερμοκρασίας των θερμοκηπίων, η χρήση των οποίων γίνεται σε συνδυασμό με την υπολογιστική πλατφόρμα Arduino. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν μεγάλη ακρίβεια, μπορούν να βαθμονομηθούν εύκολα, και δίνουν μια διαφορά τάσης πολλαπλάσια της απόλυτης θερμοκρασίας κατά 10mV/K. Ο γενικός τύπος είναι:

$$T = V \times 100 \quad (2)$$

που σημαίνει ότι εάν ο αισθητήρας διαβάσει για την τάση την τιμή 2.730V, αυτό μεταφράζεται σε 273K.

Παρακάτω υποδεικνύεται ο κώδικας μετατροπής της τιμής της τάσης (V), που διαβάσει το Arduino από τους αισθητήρες LM335Z, σε θερμοκρασία (K):

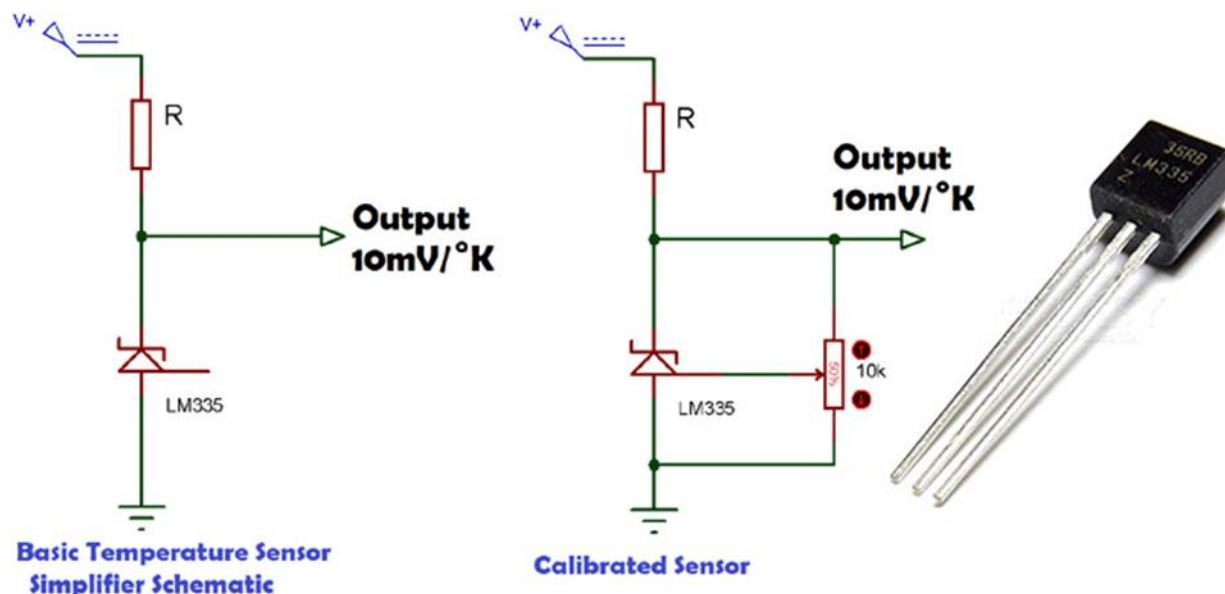
```
const int PANELSENSOR = A2;
pinMode(PANELSENSOR, INPUT);

float solarPanelTemperature = ((analogRead(PANELSENSOR) / 1024.0) * 5000)/10;
```

Εικόνα 5.2. Κώδικας μετατροπής της τιμής της τάσης (V) σε θερμοκρασία (K)

- Στην πρώτη σειρά ορίζεται ως «const int» η μεταβλητή «PANELSENSOR», η οποία συνδέεται με το αναλογικό pin «A2» της πλακέτας Arduino.
- Στη συνέχεια, στο «pinMode → INPUT» ορίζεται το pin «A2» της μεταβλητής να λειτουργεί σαν αναλογική είσοδος και να δίνει τις τιμές σε Volt.
- Από το Arduino δίνονται 5V στον αντίστοιχο ακροδέκτη του αισθητήρα LM335Z. Αρχικά, η τιμή που διαβάσει το Arduino διαιρείται με το 1024, ώστε να μετατραπεί η τιμή από ψηφιακή (bit) σε αναλογική. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με 5000mV, και διαιρείται με το 10, αφού η διαβάθμιση των LM335Z είναι γραμμική και δίνει 10mV/K. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει πια η θερμοκρασία του αισθητήρα σε K.

Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες από -40°C έως 100°C . Το ένα από τα τρία πόδια του αισθητήρα (ADI) χρησιμεύει στην βαθμονόμηση. Αν οι αισθητήρες βαθμονομηθούν σωστά στους 25°C , τότε η ακρίβειά τους μπορεί να αυξηθεί στον 1K ανά 100K .



Εικόνα 5.3. Αισθητήρας και ηλεκτρικό κύκλωμα LM335Z [<https://components101.com/>]

5.2.1 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ LM335Z

Για να έχουν μεγαλύτερη συνέπεια οι μετρήσεις της θερμοκρασίας, χρειάστηκε να γίνει μία περαιτέρω βαθμονόμηση στους αισθητήρες θερμοκρασίας (LM335Z). Οι προδιαγραφές τους δίνουν μέγιστη απόκλιση 1K ανά 100K, η οποία παραμένει σταθερή και δεν αλλάζει με τη χρήση ή με την πάροδο του χρόνου. Με τη βοήθεια ενός θερμομέτρου παρατηρήθηκε ότι στους 300K, που είναι κατά προσέγγιση η θερμοκρασία στην οποία διεξάγονται οι μετρήσεις, προκύπταν μέγιστες αποκλίσεις έως και 3 °C.

Η περαιτέρω βαθμονόμηση γίνεται μέσω του κώδικα του Arduino, στον οποίο δίνεται η δυνατότητα προσθαφαίρεσης του σφάλματος που παρατηρείται ανά αισθητήρα, δίνοντας στη συνέχεια τη δυνατότητα στα ρελέ της εγκατάστασης (για αερόθερμα, κυκλοφορητή ηλιακού

συλλέκτη και ανεμιστήρων εξαερισμού), τα οποία χειρίζεται το Arduino, να λειτουργούν πανομοιότυπα στα δύο θερμοκήπια για την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας στα αποτελέσματα.

Ανάλογη βαθμονόμηση γίνεται επίσης μέσω των υπολογιστικών φύλλων excel, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων που καταγράφονται από τα συστήματα της National Instruments στον κεντρικό υπολογιστή. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Αρχικά, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι οι αισθητήρες λειτουργούν ιδανικά, γράφεται ο κώδικας με τέτοιο τρόπο ώστε το αερόθερμο να ανάβει στους 18°C (2.91V) και να σβήνει στους 20°C (2.93V).
2. Στη συνέχεια με θερμόμετρο στήλης υδραργύρου μετρούνται οι πραγματικές εσωτερικές θερμοκρασίες των θερμοκηπίων, μέσα στα οποία ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται τα θερμαντικά σώματα.
3. Μέσω του κώδικα, αφαιρείται ή προστίθεται η διαφορά θερμοκρασίας που μετριέται με το θερμόμετρο. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλους τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις φαίνονται επίσης χρήσιμες στην προετοιμασία των excel για να μετατραπούν οι μετρήσεις που καταγράφονται από το National Instruments FP-AI-110 (8-Ch, 16-Bit Analog Input) από Volt σε °C.

5.3 ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΗΤΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Αρχικά, ξεκινά η καταγραφή των δεδομένων συνδέοντας απευθείας τον κυκλοφορητή στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Με αυτό τον τρόπο η αντλία τροφοδοτείται με ρεύμα μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν ο ηλιακός συλλέκτης είναι ψυχρός και το φωτοβολταϊκό δεν παράγει ρεύμα, παραμένει σε αδράνεια.

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι τις ημέρες με κρύο αέρα ή με χαμηλή ηλιοφάνεια ο συλλέκτης μπορεί να μη θερμαίνονταν ικανοποιητικά και τα αποτελέσματα να ήταν αντίθετα από τα επιθυμητά, απορροφώντας αντί να προσδίδει θερμότητα στη δεξαμενή.

Έτσι λοιπόν αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το Arduino ως ενεργοποιητής του αντίστοιχου ρελέ με τη βοήθεια δύο αισθητήρων θερμοκρασίας LM335Z, αποσκοπώντας στη λειτουργία της

αντλίας μόνο στην περίπτωση που η θερμοκρασία του νερού στο συλλέκτη είναι μεγαλύτερη από αυτήν της δεξαμενής που βρίσκεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

```
const int PANELSENSOR = A2;
const int TANKSENSOR = A0;

const int diffON = 4;
const int diffOFF = 2;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(PANELSENSOR, INPUT);
  pinMode(TANKSENSOR, INPUT);
  pinMode(RELAYP, OUTPUT);

  void loop() {
    if ((solarPanelTemperature) > (hotWaterTankTemperature + diffON))
      digitalWrite(RELAYP, HIGH);
    else if ((solarPanelTemperature) < (hotWaterTankTemperature + diffOFF))
      digitalWrite(RELAYP, LOW);

    delay(1000);
  }
}
```

Εικόνα 5.4. Κώδικας ενεργοποίησης κυκλοφορητή του συλλέκτη του συστήματος PV-T

Στην Εικόνα 5.4 παρατηρείται ότι έχουν προστεθεί δύο μεταβλητές «diffON» και «diffOFF», οι οποίες βοηθούν ώστε να μην ανοιγοκλείνει ο κυκλοφορητής επανειλημμένα όταν η θερμοκρασία βρίσκεται σε ένα κρίσιμο σημείο. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει η διαφορά θερμοκρασίας από τέσσερις (4) βαθμούς να γίνει δύο (2) μέχρι να διακοπεί ξανά η λειτουργία του κυκλοφορητή.

Όσον αφορά τον αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας του συλλέκτη, έπρεπε να εισχωρήσει στον συλλέκτη και όχι να βρίσκεται στην έξοδο του, όπως συνηθίζεται, μιας και στην περίπτωση που η αντλία δε θα βρισκόταν σε λειτουργία, η έξοδος του συλλέκτη δεν θα μετρούσε απόλυτα τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του. Χρειάστηκε λοιπόν ο αισθητήρας να αδιαβροχοποιηθεί και να εισχωρήσει στις σωληνώσεις του ηλιακού συλλέκτη.

5.4 ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Σε αυτό το σημείο ξεκινά να λειτουργεί το αυτοματοποιημένο σύστημα και να λαμβάνονται οι πρώτες μετρήσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρήθηκε ότι οι θερμοστάτες από τα αερόθερμα δεν είχαν απόλυτη συνέπεια στην λειτουργία τους, δυσκολεύοντας την προσπάθεια διατήρησης των δύο θερμοκηπίων σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, και ειδικότερα την προσπάθεια να δουλεύουν και τα δύο θερμοκήπια σε απόλυτα πανομοιότυπες συνθήκες, κάτι το οποίο είναι αναγκαίο, ώστε οι καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος από τα αερόθερμα των δύο θερμοκηπίων να είναι παρόμοιες.

```
const int GHSSENSOR1 = A4;
const int GHSSENSOR2 = A6;
const int RELAYH1 = 6;
const int RELAYH2 = 8;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(GHSSENSOR1, INPUT);
  pinMode(GHSSENSOR2, INPUT);
  pinMode(RELAYH1, OUTPUT);
  pinMode(RELAYH2, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAYH1, HIGH);
  digitalWrite(RELAYH2, HIGH);
}

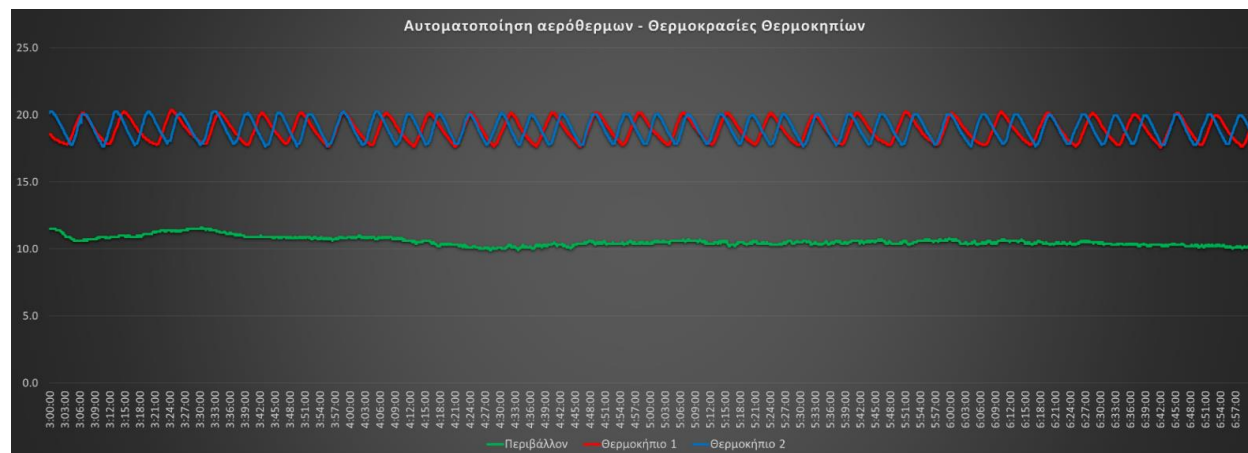
void loop() {
  float GreenHouseTemperature1 = ((analogRead(GHSSENSOR1) / 1024.0) * 5000)/10;
  float GreenHouseTemperature2 = ((analogRead(GHSSENSOR2) / 1024.0) * 5000)/10;
  if((GreenHouseTemperature1) < 291)
    digitalWrite(RELAYH1, LOW);
  else if((GreenHouseTemperature1) > 293)
    digitalWrite(RELAYH1, HIGH);
  if(GreenHouseTemperature2 < 291)
    digitalWrite(RELAYH2, LOW);
  else if(GreenHouseTemperature2 > 293)
    digitalWrite(RELAYH2, HIGH);

  delay(1000);
}
```

Εικόνα 5.5. Κώδικας λειτουργίας αερόθερμων (Θερμοκρασία ενεργοποίησης 18°C, απενεργοποίησης 20°C)

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού αποφασίστηκε και πάλι η χρήση του Arduino ως ενεργοποιητή για τα θερμαντικά σώματα. Έτσι, στις εισόδους του Arduino προστέθηκαν ακόμα

δύο αισθητήρες LM335Z, οι οποίοι μετρούν τις εσωτερικές θερμοκρασίες των θερμοκηπίων. Το Arduino προγραμματίστηκε έτσι ώστε να ελέγχει τις θερμοκρασίες από τους αισθητήρες και να ενεργοποιεί τα ρελέ των θερμαντικών στοιχείων όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από 18°C, και να τα απενεργοποιεί όταν αυτή περάσει τους 20°C.



Εικόνα 5.6. Θερμοκρασίες θερμοκηπίων κατά τη νυχτερινή λειτουργία των αερόθερμων. Παρατηρείται η διατήρηση των θερμοκρασιών των θερμοκηπίων από 18°C έως 20°C

5.5 ΑΠΟΦΥΓΗ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Παρατηρήθηκε ότι τις ζεστές ημέρες με δυνατή ηλιοφάνεια οι θερμοκρασίες για ένα θερμοκήπιο που προορίζεται για καλλιέργεια ντομάτας ήταν απαγορευτικές, μεγαλύτερες των 35°C. Για την αποφυγή της υπερθέρμανσης στα θερμοκήπια χρησιμοποιήθηκαν για εξαερισμό δύο ανεμιστήρες 220V – 20W, ο χειρισμός των οποίων ήταν πολύ εύκολος μέσω του Arduino, μιας και οι αισθητήρες μέτρησης των εσωτερικών θερμοκρασιών ήταν ήδη συνδεδεμένοι για τη ρύθμιση της λειτουργίας των θερμαντικών στοιχείων. Προστέθηκαν λοιπόν στο Arduino δύο ρελέ ενεργοποίησης και έγιναν οι απαραίτητες αλλαγές στον κώδικα, ώστε να ενεργοποιούνται οι ανεμιστήρες εξαερισμού στην περίπτωση κατά την οποία η θερμοκρασία του θερμοκηπίου ξεπερνά τους 26°C.

```
const int RELAYF1 = 2;
const int RELAYF2 = 4;
const int GHSENSOR1 = A4;
const int GHSENSOR2 = A6;
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(GHSENSOR1, INPUT);
  pinMode(GHSENSOR2, INPUT);
  pinMode(RELAYF1, OUTPUT);
  pinMode(RELAYF2, OUTPUT);
}
void loop() {
  float GreenHouseTemperature1 = ((analogRead(GHSENSOR1) / 1024.0) * 5000)/10;
  float GreenHouseTemperature2 = ((analogRead(GHSENSOR2) / 1024.0) * 5000)/10;

  if(GreenHouseTemperature1 < 299)
    digitalWrite(RELAYF1, HIGH);
  else
    digitalWrite(RELAYF1, LOW);
  if(GreenHouseTemperature2 < 299)
    digitalWrite(RELAYF2, HIGH);
  else
    digitalWrite(RELAYF2, LOW);

  delay(3000);
}
```

Εικόνα 5.7. Κώδικας λειτουργίας ανεμιστήρων εξαερισμού (Ενεργοποίηση στους 26°C)

Στις παρακάτω εικόνες δίνονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας από το εσωτερικό των θερμοκηπίων, στην περίπτωση που στο ένα από τα δύο θερμοκήπια λειτουργεί ο εξαερισμός, ενώ στο δεύτερο όχι. Στην Εικόνα 5.9 επιλέχθηκε μία ημέρα με μέτρια ηλιοφάνεια, και παρατηρείται ότι ο ανεμιστήρας που χρησιμοποιήθηκε ως μέσο εξαερισμού δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα διατηρώντας τη θερμοκρασία χαμηλότερη από 30°C.

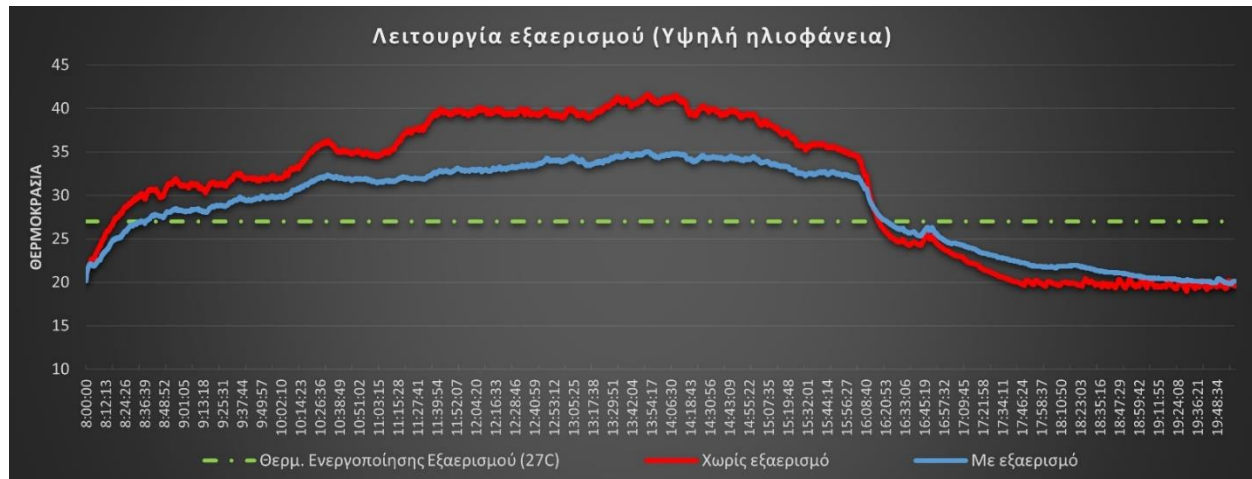
Στην Εικόνα 5.10 επιλέχθηκε ημέρα με εξαιρετικά υψηλή ηλιοφάνεια κατά την οποία η θερμοκρασία στο εσωτερικό των θερμοκηπίων αγγίζει τους 42°C. Παρατηρείται ότι ο ανεμιστήρας δεν είναι ικανός να διατηρήσει τη θερμοκρασία του θερμοκηπίου σε μη απαγορευτικά για την καλλιέργεια τομάτας επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται ότι παρά τον εξαερισμό η θερμοκρασία του θερμοκηπίου παρέμεινε στους 35°C.



Εικόνα 5.8. Ανεμιστήρας εξαερισμού



Εικόνα 5.9. Λειτουργία εξαερισμού σε ημέρα με μέτρια ηλιοφάνεια



Εικόνα 5.10. Λειτουργία εξαερισμού σε ημέρα με υψηλή ηλιοφάνεια

5.6 ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

```
const int PANELSENSOR = A2;
const int TANKSENSOR = A0;
const int GHSENSOR1 = A4;
const int GHSENSOR2 = A6;
const int RELAYP = 12;
const int RELAYF1 = 2;
const int RELAYF2 = 4;
const int RELAYH1 = 6;
const int RELAYH2 = 8;

const int diffON = 2;
const int diffOFF = 0;

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    pinMode(PANELSENSOR, INPUT);
    pinMode(TANKSENSOR, INPUT);
    pinMode(GHSENSOR1, INPUT);
    pinMode(GHSENSOR2, INPUT);

    pinMode(RELAYP, OUTPUT);
    pinMode(RELAYF1, OUTPUT);
    pinMode(RELAYF2, OUTPUT);
    pinMode(RELAYH1, OUTPUT);
    pinMode(RELAYH2, OUTPUT);
    digitalWrite(RELAYP, LOW);
    digitalWrite(RELAYF1, LOW);
    digitalWrite(RELAYF2, LOW);
    digitalWrite(RELAYH1, LOW);
    digitalWrite(RELAYH2, LOW);
}

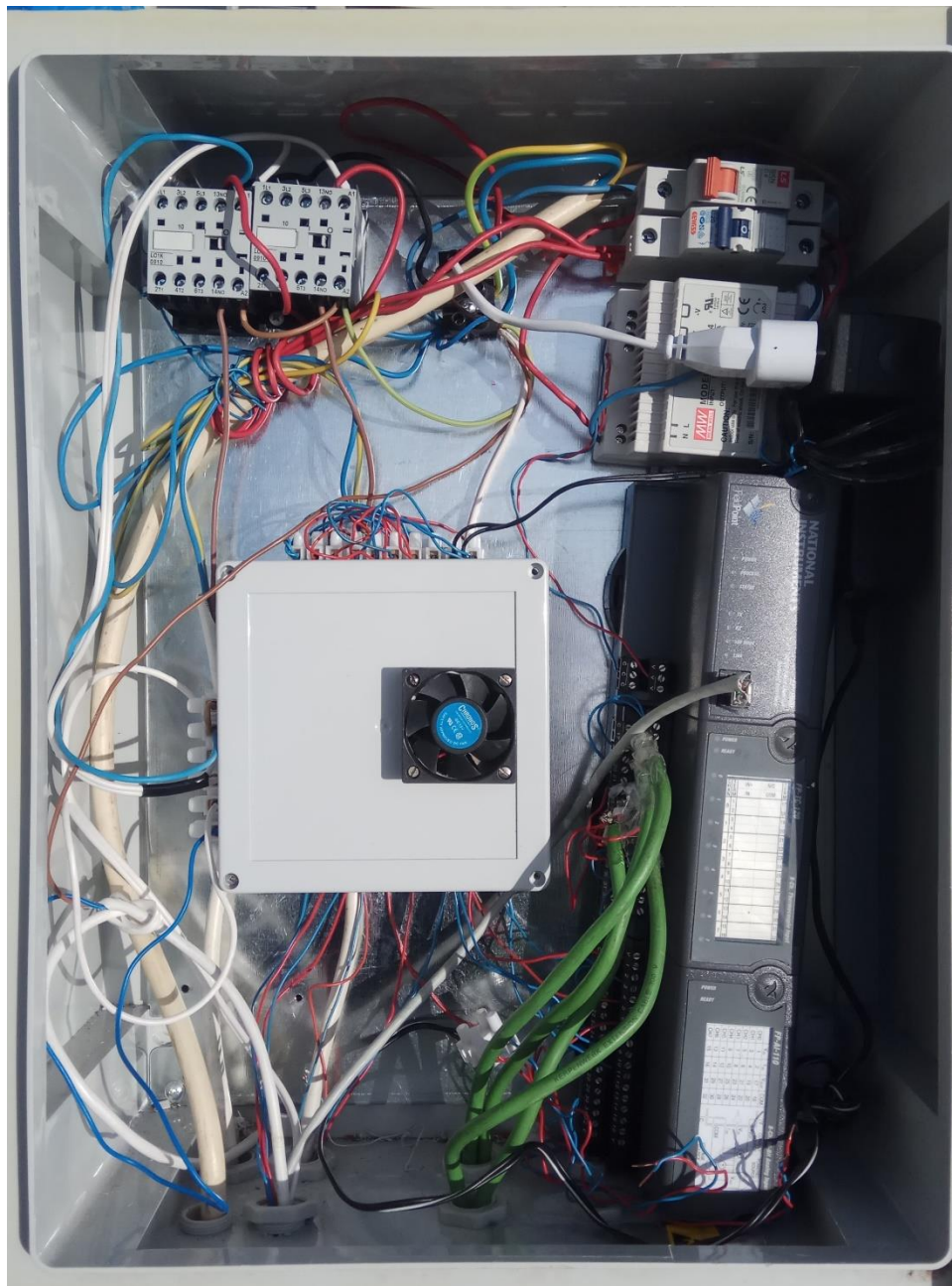
void loop() {
    float solarPanelTemperature = ((analogRead(PANELSENSOR) / 1024.0) * 5000)/10;
    float hotWaterTankTemperature = ((analogRead(TANKSENSOR) / 1024.0) * 5000)/10;
    float GreenHouseTemperature1 = ((analogRead(GHSENSOR1) / 1024.0) * 5000)/10;
    float GreenHouseTemperature2 = ((analogRead(GHSENSOR2) / 1024.0) * 5000)/10;
    if((solarPanelTemperature - 2.5) > (hotWaterTankTemperature + diffON))
        digitalWrite(RELAYP, HIGH);
    else if ((solarPanelTemperature - 2.5) < (hotWaterTankTemperature + diffOFF))
        digitalWrite(RELAYP, LOW);
    if((GreenHouseTemperature1 - 1.5) < 299)
        digitalWrite(RELAYF1, HIGH);
    else
        digitalWrite(RELAYF1, LOW);
    if((GreenHouseTemperature1 - 1.5) < 291)
        digitalWrite(RELAYH1, LOW);
    else if((GreenHouseTemperature1 - 1.5) > 293)
        digitalWrite(RELAYH1, HIGH);
    if(GreenHouseTemperature2 < 299)
        digitalWrite(RELAYF2, HIGH);
    else
        digitalWrite(RELAYF2, LOW);
    if(GreenHouseTemperature2 < 291)
        digitalWrite(RELAYH2, LOW);
    else if(GreenHouseTemperature2 > 293)
        digitalWrite(RELAYH2, HIGH);

    delay(3000);
}
```

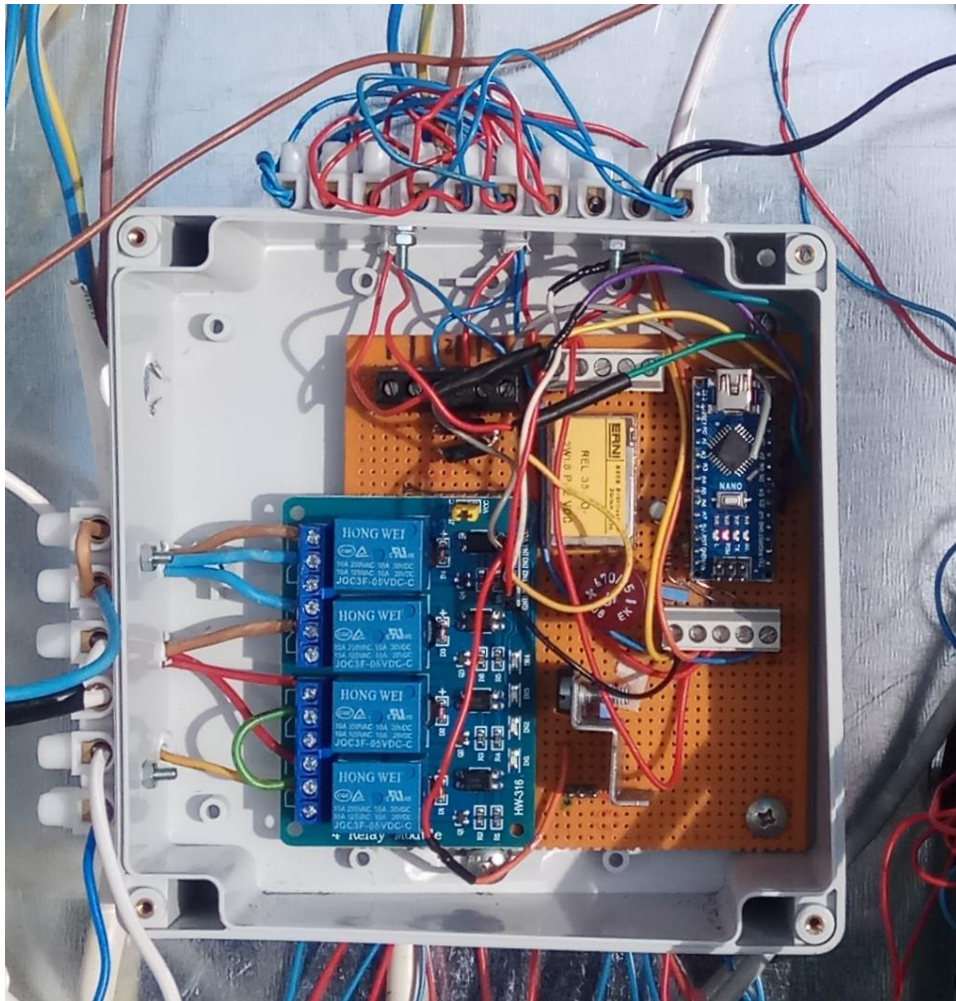
Εικόνα 5.11. Συνολικός κώδικας του συστήματος

5.7 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην Εικόνα 3.12 παρατηρείται η κεντρική μονάδα αυτοματισμού και καταγραφής δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, δεξιά βρίσκονται οι συσκευές της National Instruments που λαμβάνουν τα σήματα από τα θερμοζεύγη και τις αποστέλλουν στον κεντρικό υπολογιστή, όπου μέσω του LabView αποθηκεύονται. Στη μέση της κεντρικής μονάδας, βρίσκεται ο «εγκέφαλος» του συστήματος αυτοματισμού όπου στο εσωτερικό του εμπεριέχεται ηλεκτρολογική πλακέτα με το Arduino καθώς και τις απαραίτητες συνδέσεις και ρελέ ενεργοποίησης. Στην Εικόνα 3.13 φαίνεται το εσωτερικό του κουτιού. Εξωτερικά παρατηρούνται δύο σειρές από κλέμες, όπου στην πάνω μεριά του κουτιού χρησιμεύουν για την σύνδεση των αισθητήρων LM335Z, ενώ στην αριστερή μεριά, συνδέονται με τα ρελέ ενεργοποίησης.

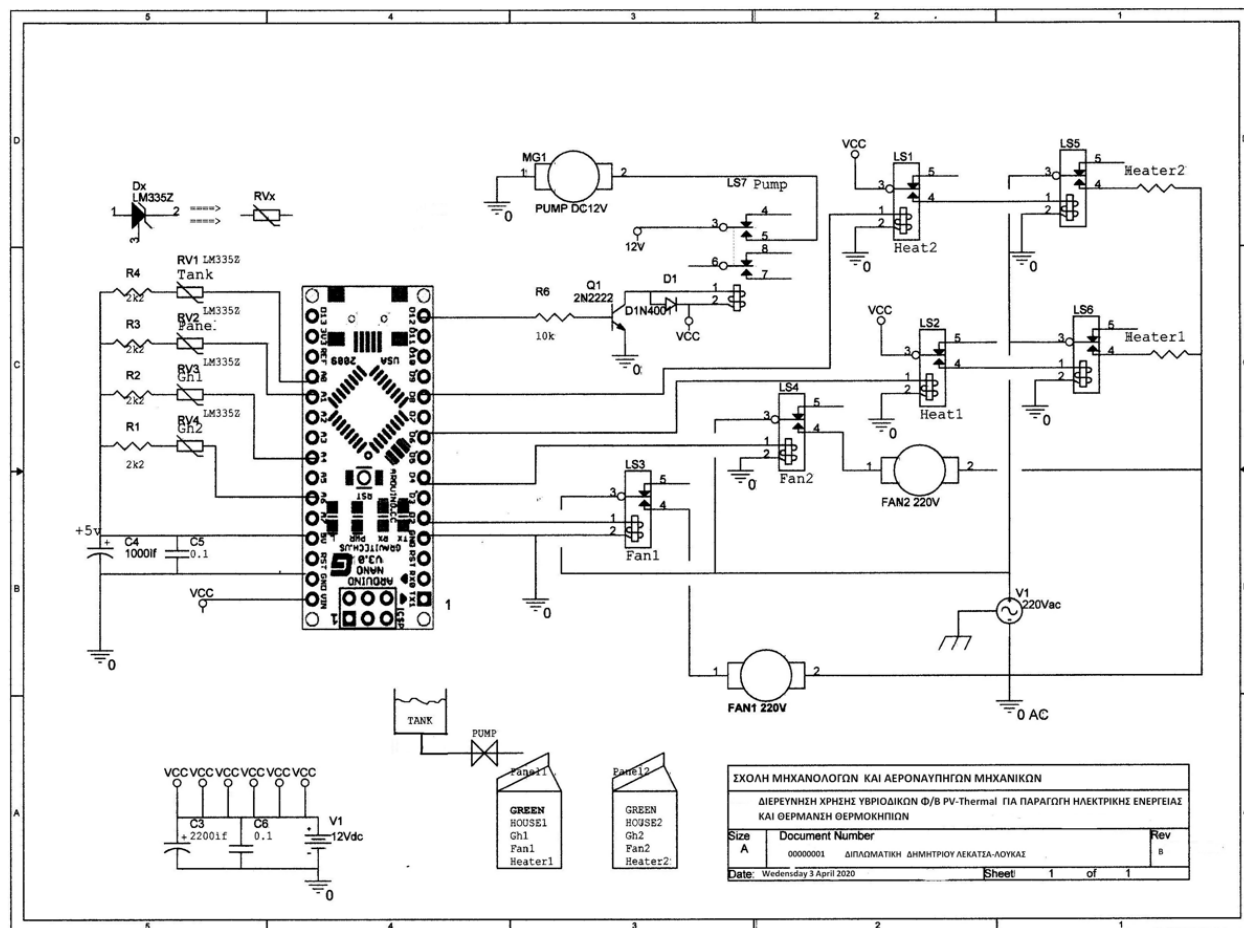


Εικόνα 5.12 Κεντρική μονάδα αυτοματισμού και καταγραφής δεδομένων



Εικόνα 5.13 Πλακέτα αυτοματισμού

Στην Εικόνα 5.14 φαίνεται το ηλεκτρολογικό σχέδιο της πλακέτας αυτοματισμού.

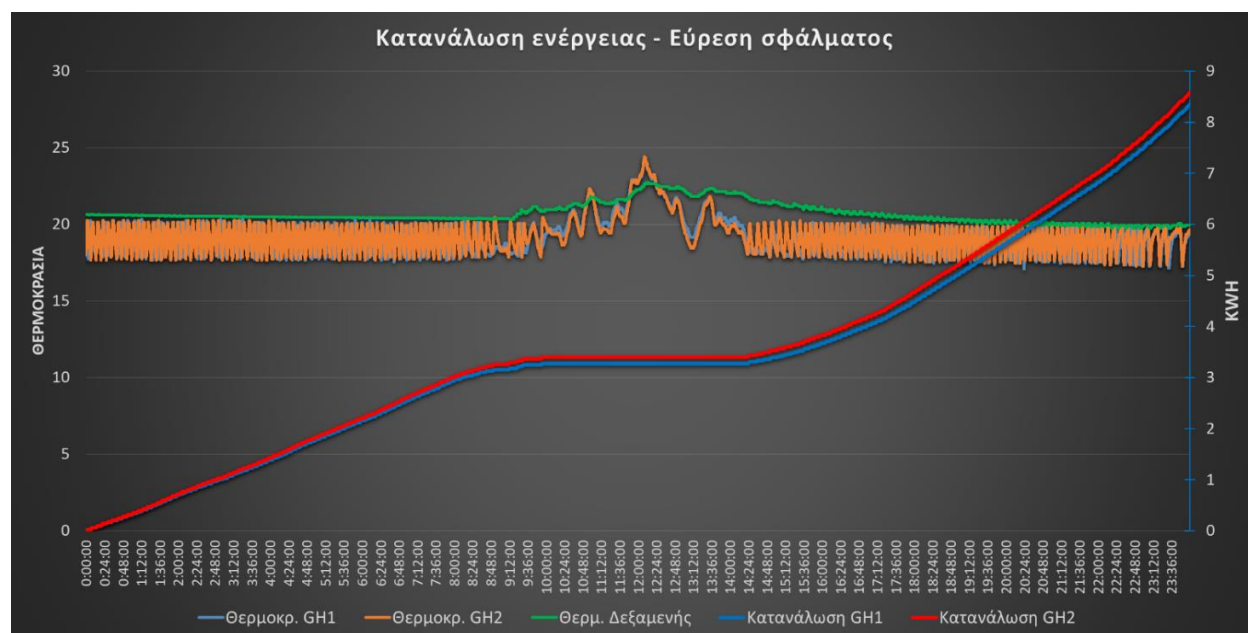


Εικόνα 5.14 Ηλεκτρολογικό σχέδιο πλακέτας αυτοματισμού

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Για τον υπολογισμό του σφάλματος επιλέχθηκαν οι μετρήσεις που λήφθηκαν μια νεφελώδη ημέρα, κατά την οποία τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας παρέμειναν σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Ο κυκλοφορητής του συστήματος PV-T τέθηκε εκτός λειτουργίας, ώστε να μην υπάρξει καμία απολύτως προσθήκη ενέργειας από αυτό στο σύστημα των θερμοκηπίων. Εάν οι μετρήσεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για τη θέρμανση των δύο θερμοκηπίων την συγκεκριμένη μέρα ήταν απόλυτα πανομοιότυπες, αυτό θα σήμαινε ότι το σφάλμα είναι μηδενικό, οποιαδήποτε όμως διαφορά εντοπίζεται μεταξύ των δύο ημερήσιων καταναλώσεων, σημαίνει την ύπαρξη σφάλματος μεταξύ των μετρήσεων, το οποίο παραμένει καθ' ολη τη διάρκεια διεξαγωγής μετρήσεων.



Εικόνα 6.1. Καταναλώσεις ενέργειας των δύο θερμοκηπίων για την εύρεση του σφάλματος. Παρατηρείται μια διαφορά της τάξεως του 0.24kWh.

Στην Εικόνα 6.1 απεικονίζονται οι μετρήσεις της συγκεκριμένης μέρας. Παρατηρείται μια διαφορά κατανάλωσης της τάξεως του 2.8%, που είναι και το τελικό σφάλμα το οποίο πρέπει

να ληφθεί υπόψιν στην ενότητα των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το θερμοκήπιο δύο κατανάλωσε 8.58kWh ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το πρώτο θερμοκήπιο κατανάλωσε 8.34kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η διαφορά των 0.24kWh μεταξύ τους, δείχνει την ύπαρξη ενός σφάλματος 2.8%. Το σφάλμα αυτό μπορεί να έχει προκύψει από:

- Ατέλειες στη μόνωση των θερμοκηπίων
- Ατέλειες στις συνδέσεις των πλαστικών πάνελ του θερμοκηπίου
- Ζημιές που έχουν δημιουργηθεί στα τοιχώματα του θερμοκηπίου από χαλάζι
- Το Θερμοκήπιο 1 το οποίο λειτουργεί με το σύστημα PV-T, διατηρεί στο εσωτερικό του μία δεξαμενή νερού 100λ η οποία αποταμιεύει ενέργεια από τον ηλιακό συλλέκτη. Η συγκεκριμένη δεξαμενή θερμαίνεται από το περιβάλλον του θερμοκηπίου χωρίς τη λειτουργία του συλλέκτη, με αποτέλεσμα να αποβάλει κατά τη διάρκεια της νύχτας σταδιακά αυτή την ενέργεια. Το συγκεκριμένο ποσό ενέργειας θα μπορούσε να έχει επηρεάσει το σφάλμα που υπολογίστηκε.

6.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PV-T

Για τον υπολογισμό του ενεργειακού κέρδους του υβριδικού συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν πίνακες από την ιστοσελίδα του ΛΑ-Κ.ΕΝ.Α.Κ. με τη μέση μηνιαία ακτινοβολία στην περιοχή της Πάτρας, οι οποίοι πίνακες αφορούν ακριβώς τον ίδιο προσανατολισμό ($\gamma=0^\circ$) και την ίδια κλίση ($\beta=45^\circ$) με το σύστημα PV-T, που έχει τοποθετηθεί στη στέγη του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, οι μηνιαίες μετρήσεις όλου του έτους χρησιμοποιούνται για την εύρεση του παραγόμενου από το φωτοβολταϊκό ηλεκτρικού ρεύματος, και για τον κατά προσέγγιση υπολογισμό της μέγιστης ενέργειας που μπορεί να αποδώσει ο ηλιακός συλλέκτης τους μήνες διεξαγωγής των μετρήσεων, δηλαδή από τον Ιανουάριο έως και τον Απρίλιο. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται αργότερα με τις πραγματικές μετρήσεις.

Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία

Επιλέξτε περιοχή και τρόπο τοποθέτησης

Πάτρα ▼ Κεκλιμένος 45ο ▼ N 180ο ▼

Επιλέξτε περιοχή, κλίση συλλέκτη και προσανατολισμό και πατήστε πάνω σε κάθε γραμμή για το διάγραμμα

Πάτρα

Κλίση/Προσανατολισμός	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
$\beta=45^\circ \gamma=180^\circ$	88	97	144	143	176	179	186	185	168	141	105	93

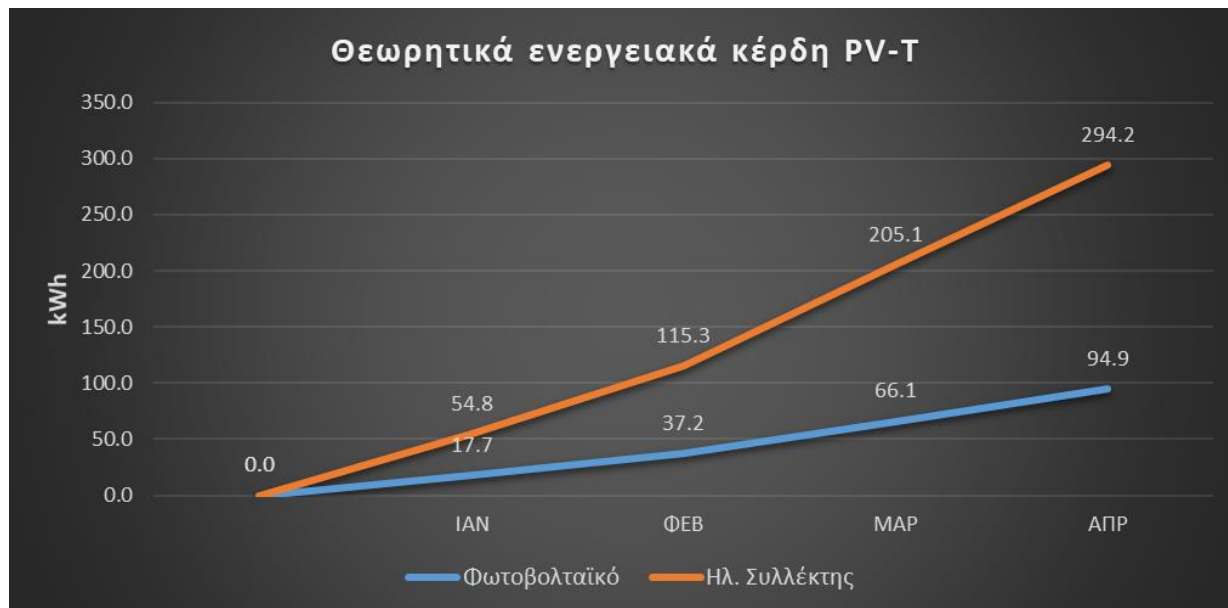
β : Κλίση επιφάνειας ($^\circ$), γ : Προσανατολισμός επιφάνειας ($^\circ$), Όλες οι τιμές είναι σε kWh/m²

Εικόνα 6.2. Μέσες μηνιαίες ηλ. ακτινοβολίες για την Πάτρα (<https://www.chem-lab.gr/lakenak>)

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι με τη λήψη των ακριβών τιμών του παραπάνω πίνακα βρίσκονται οι ιδανικές ενεργειακές απολαβές του συστήματος, κάτι που δεν είναι εφικτό σε κανένα σύστημα και ειδικά στον ηλιακό συλλέκτη, ο οποίος χρειάζεται αρκετή ηλιοφάνεια με μεγάλη διάρκεια ώστε να αποδώσει. Η χαμηλή ηλιοφάνεια τις πρωινές και απογευματινές ώρες, η πυκνή συννεφιά, καθώς και η παροδική ηλιοφάνεια λίγων λεπτών δεν αρκούν για να θερμανθεί το σύστημα και να αποδώσει ενεργειακά. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής της τάξεως του 70% επί των τιμών του πίνακα. Ο ίδιος συντελεστής τίθεται για το φωτοβολταϊκό στο 80% για διάφορους λόγους, όπως είναι η ύπαρξη σκόνης και λάσπης στο πάνελ, ή λόγους που οφείλονται σε μικροδιαφορές στην κλίση του σε σχέση με το απόλυτο ($\beta=45^\circ$ και $\gamma=0^\circ$).

Για την εύρεση των τιμών χρησιμοποιούνται τα παρακάτω μεγέθη από τις προδιαγραφές του Fototherm CS Series FT255Cs συστήματος PV-T, που χρησιμοποιείται στη διεξαγωγή μετρήσεων:

- Επιφάνεια: 1.59m²
- Συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκού: 15.8%
- Συντελεστής απόδοσης συλλέκτη: 56%

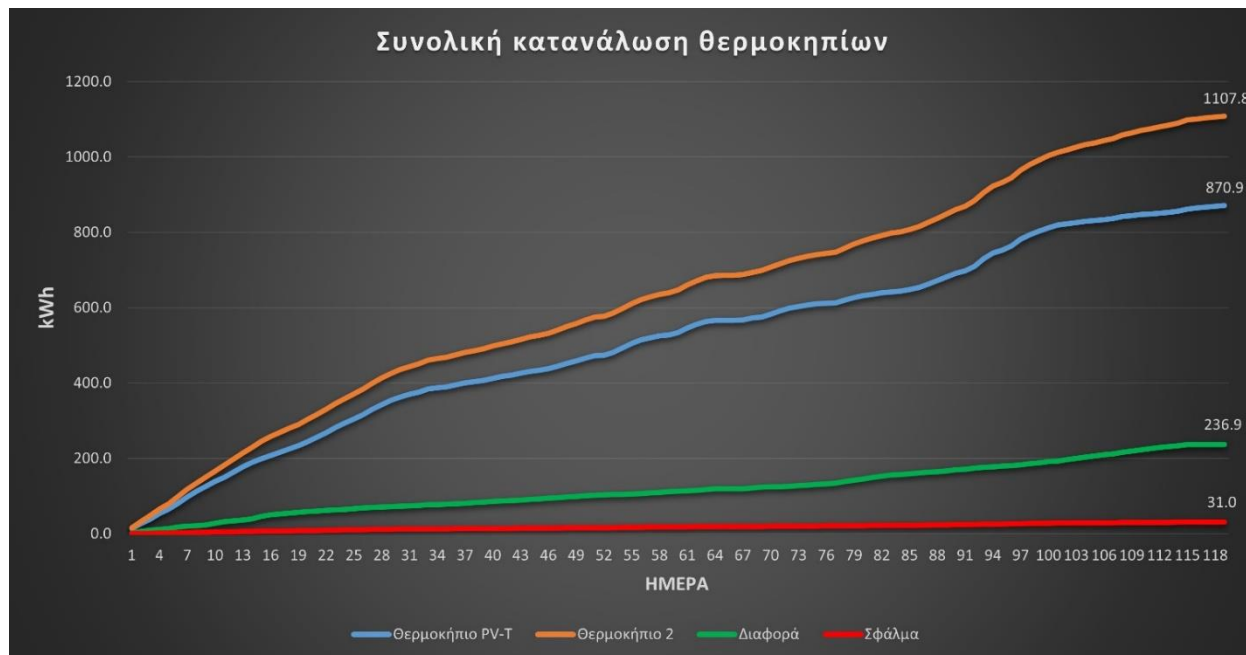


Εικόνα 6.3: Θεωρητικά ενεργειακά κέρδη του συστήματος PV-T (Ιανουάριο έως Απρίλιο), με τη χρήση τιμών μέσης μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας για την Πάτρα.

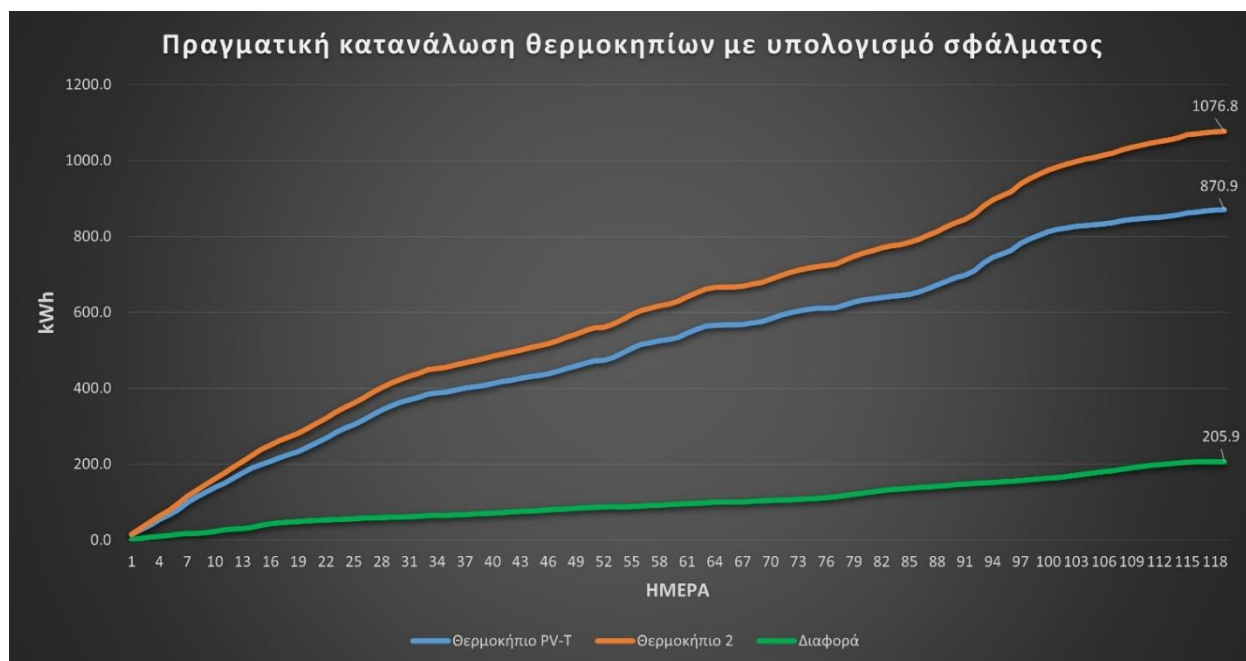
6.3 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας των δύο θερμοκηπίων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το θερμοκήπιο 2 χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς, μιας και η θέρμανσή του προέρχεται εξ ολοκλήρου από το αερόθερμο. Το θερμοκήπιο 1 (Θερμοκήπιο PV-T), υποβοηθείται στη θέρμανσή του από το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Από τη διαφορά των δύο ανωτέρω καταναλώσεων προκύπτει η συμβολή της ενέργειας του ηλιακού συλλέκτη στη θέρμανση. Σημειώνεται πως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το PV-T δεν μετρείται και προκύπτει από τις θεωρητικές τιμές, όπως υπολογίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η συμβολή του φωτοβολταϊκού υπολογίζεται για όλο το έτος, μιας και η λειτουργία του net-metering που επιλέχτηκε συμψηφίζει στο τέλος του έτους την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που επιστρέφεται στο δίκτυο του παρόχου και αυτήν που καταναλώνεται.



Εικόνα 6.4. Τιμές κατανάλωσης όπως καταγράφηκαν στον υπολογιστή



Εικόνα 6.5. Πραγματικές τιμές ύστερα από τον υπολογισμό του σφάλματος

Παρατηρείται στην Εικόνα 6.5 ότι η ωφέλιμη ενέργεια που προστίθεται από τον ηλιακό συλλέκτη του συστήματος PV-T είναι μόνο 205.9kWh, έναντι των 294.2kWh που υπολογίστηκαν

θεωρητικά. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της αποβολής ενέργειας από τη δεξαμενή, η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τις ημέρες που ο ηλιακός συλλέκτης του συστήματος PV-T παράγει ικανοποιητικό ποσό θερμότητας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά ισχυρή ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου πάνω από τους 16°C. Η δεξαμενή στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μη όντας μονωμένη, αποβάλλει θερμότητα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας παρόλο που το θερμοκήπιο δε χρίζει θέρμανσης σε αυτή τη θερμοκρασία. Συγκρίνοντας τη διαφορά της πραγματικής τιμής από την θεωρητική παρατηρείται μία απώλεια της τάξεως του 30%.

6.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

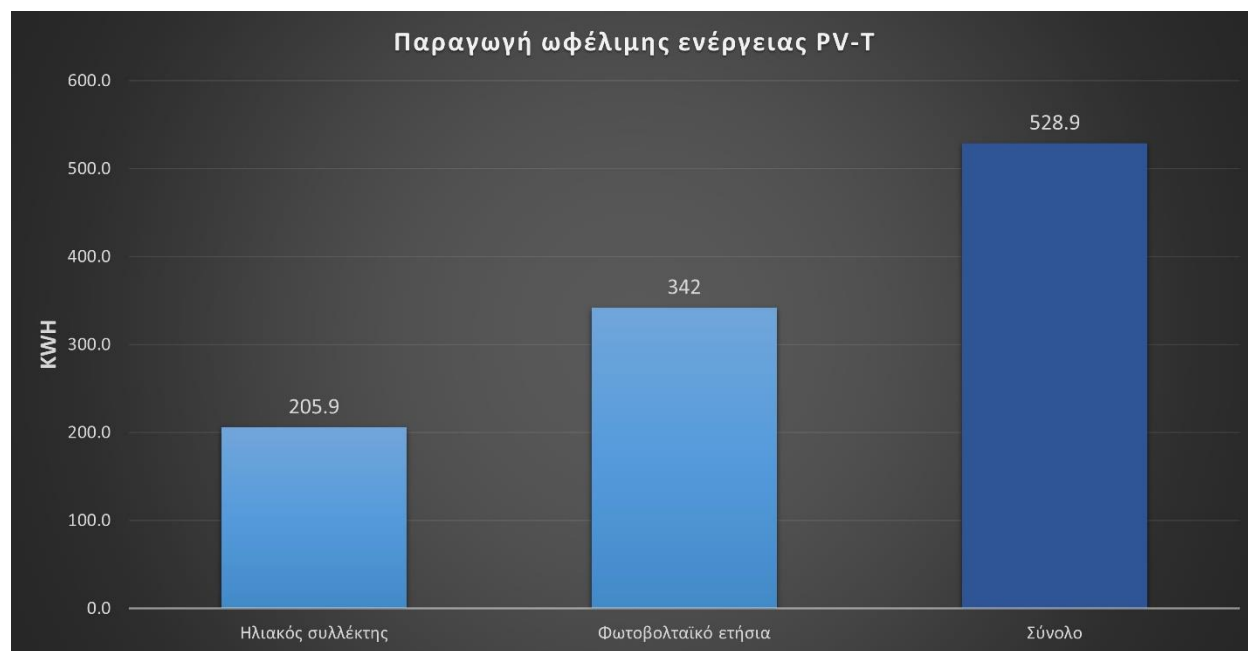
Η συμβολή του φωτοβολταϊκού στοιχείου στη θέρμανση του θερμοκηπίου προκύπτει από τις θεωρητικές τιμές όπως υπολογίστηκαν νωρίτερα, αλλά κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Να σημειωθεί ότι λόγω του net-metering (συμψηφισμού) που επιλέχθηκε, η παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού κατά τους θερμότερους μήνες επιστρέφεται στο δίκτυο του παρόχου και συμψηφίζεται με την κατανάλωση στα τιμολόγια του παρόχου του ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι η συμβολή του φωτοβολταϊκού στοιχείου στη θέρμανση του θερμοκηπίου αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.



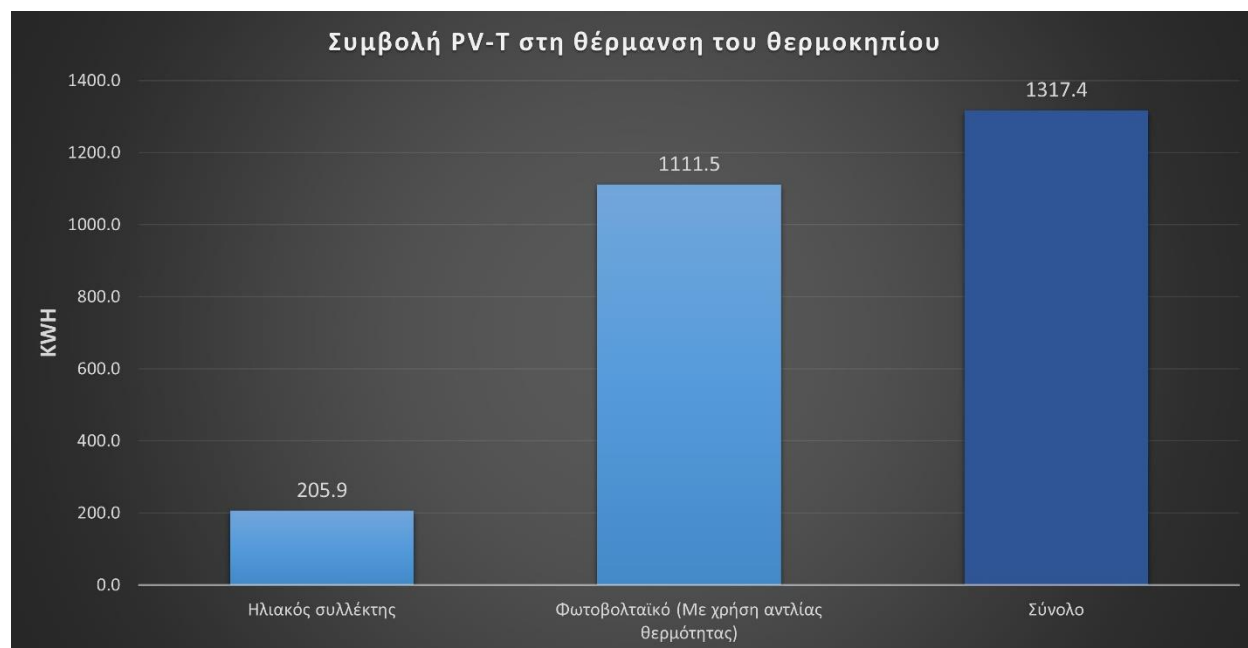
Εικόνα 6.6. Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος του φωτοβολταϊκού

6.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΟΥ PV-T ΣΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Εάν επιλεγεί μια αντλία θερμότητας ως μέσο θέρμανσης του θερμοκηπίου, το όφελος της συμβολής του φωτοβολταϊκού στη θέρμανση της εγκατάστασης μπορεί να υπερτριπλασιαστεί.



Εικόνα 6.7. Παραγόμενη ωφέλιμη ενέργεια από το σύστημα PV-T



Εικόνα 6.8. Συμβολή του συστήματος PV-T για τη θέρμανση του θερμοκηπίου

Το παραπάνω διάγραμμα συμβολής του συστήματος PV-T στην θέρμανση του θερμοκηπίου προκύπτει για χρήση αντλίας θερμότητας με δείκτη $COP=3.25$, που είναι ένας τυπικός συντελεστής για διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου και περιβάλλοντος $10^{\circ}C-12^{\circ}C$.

Με τη λειτουργία του net-metering από τον πάροχο ηλεκτρικού ρεύματος, δίνεται η δυνατότητα χρήσης της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τους κρύους μήνες, καθώς με τη χρήση και της αντλίας θερμότητας ως κεντρική θέρμανση το συνολικό κέρδος του συστήματος PV-T υπερδιπλασιάζεται. Με αυτό τον τρόπο οι ανάγκες της θερμοκηπιακής εγκατάστασης για θερμοκρασία εσωτερικού χώρου $19^{\circ}C$ υπερκαλύπτονται.

6.4 ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΩΤΑΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΤΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέγεται το θερμοκήπιο να λειτουργεί σε θερμοκρασίες $18-20^{\circ}C$, μιας και η βέλτιστη θερμοκρασία θερμοκηπίου για καλλιέργεια και γρήγορη παραγωγή τομάτας είναι κατά μέσο όρο οι $19^{\circ}C$.

Πολλοί παραγωγοί επιλέγουν για λόγους οικονομίας τα θερμοκήπια να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Φυσικά με τα χρόνια καλλιέργειας ο καλλιεργητής μπορεί να βρει την χρυσή τομή ανάμεσα στην παραγωγή και το ενεργειακό κόστος, σχετικά με την επιλογή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται θεωρητικά η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για θερμοκρασίες θέρμανσης χαμηλότερες αυτών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Οι θερμοκρασίες που επιλέγονται για το εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι κατά μέσο όρο $17^{\circ}C$, στην οποία η παραγωγή είναι σχεδόν ανάλογη με αυτή των $19^{\circ}C$, και $15^{\circ}C$ που είναι το κατώτατο όριο που προτείνεται για την καλλιέργεια του συγκεκριμένου φυτού.

6.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Για τον υπολογισμό των αναγκών σε θέρμανση προτείνεται ενιαίος τρόπος [21] σε συνδυασμό με τους μετεωρολογικούς πίνακες που υπάρχουν για την Ελλάδα.

Για τον παραπάνω σκοπό χρησιμοποιείται ο εξής τύπος [21]:

$$Q = (K \times A \times \Delta T + 0.36 \times V \times n \times \Delta T) \times 1.20 \quad (3)$$

$$Q = (T_{\varepsilon\sigma} - T_{\varepsilon\xi}) \times (K \times A + 0.36 \times V \times n) \times 1.20 \quad (4)$$

όπου:

- K = Ολικός συντελεστής θερμοπερατότητας καλύμματος ($W/m^2\text{ }^\circ C$)
- A = Επιφάνεια καλύμματος (m^2)
- $\Delta T = (T_{\varepsilon\sigma} - T_{\varepsilon\xi})$ = Διαφορά θερμοκρασίας έξω - μέσα ($^\circ C$)
 - Ως εσωτερική θερμοκρασία λαμβάνεται η επιθυμητή νυχτερινή θερμοκρασία για την καλλιέργεια.
 - Ως εξωτερική θερμοκρασία λαμβάνεται η μέση ελάχιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται στην περιοχή σε διάστημα τριετίας.
- V = Όγκος θερμοκηπίου
- n = Αριθμός εναλλαγών του αέρα από διαφυγές με κλειστά παράθυρα ανά ώρα

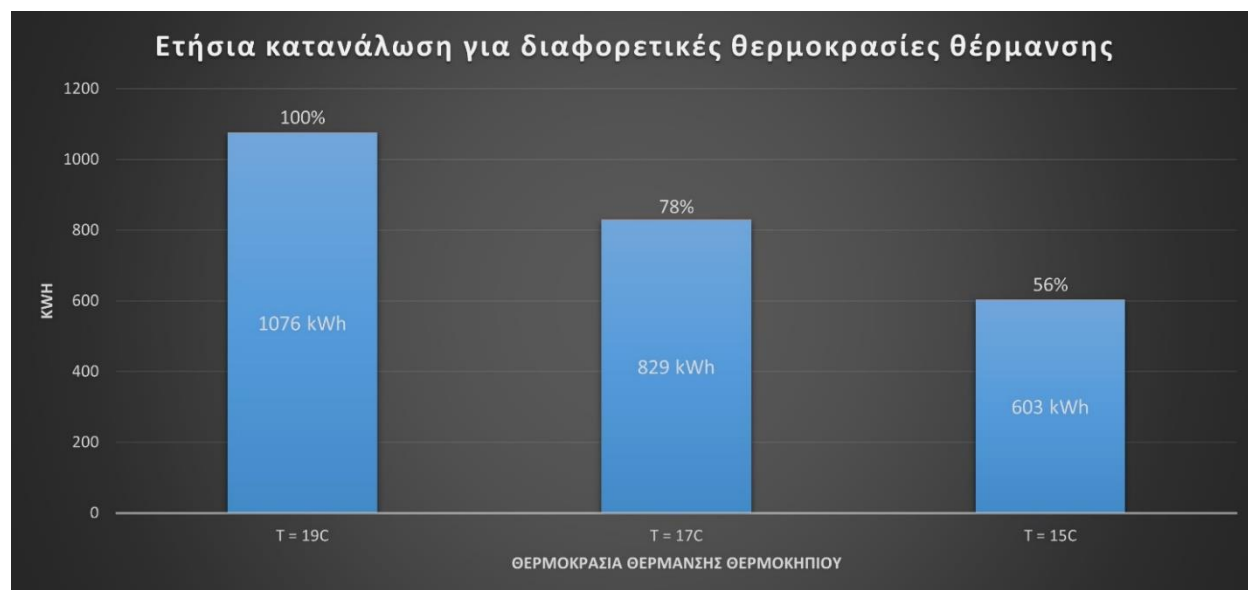
Από τους ανωτέρω συντελεστές της εξίσωσης, τα K , A , V και n δε χρειάζεται να υπολογιστούν και θα θεωρηθούν ως σταθερές. Συνεπώς:

$$\frac{Q_{\text{πειραμ}}}{Q_{\text{θεωρ}}} = \frac{T_{\varepsilon\sigma} - T_{\varepsilon\xi}}{T'_{\varepsilon\sigma} - T_{\varepsilon\xi}} \quad (5)$$

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις που έχουν συλλεχθεί αφορούν $T_{\varepsilon\sigma}=19^\circ C$ με $Q=1076kWh$, θα υπολογιστούν τα νέα $Q_{\text{θεωρ}}$ για τις παρακάτω τιμές της θερμοκρασίας:

- $T^1_{\varepsilon\sigma}=17^\circ C$
- $T^2_{\varepsilon\sigma}=15^\circ C$

Ως εξωτερικές θερμοκρασίες στον ανωτέρω τύπο, χρησιμοποιούνται οι μέσες νυχτερινές θερμοκρασίες ανά μήνα διεξαγωγής μετρήσεων στην περιοχή της Πάτρας. Σε συνδυασμό με τις μηνιαίες καταναλώσεις που καταγράφηκαν ανά μήνα, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 6.9. Ετήσια κατανάλωση για διαφορετικές θερμοκρασίες θέρμανσης του εσωτερικού των θερμοκηπίων

Παρατηρείται λοιπόν ότι για κάθε 2°C μείωσης της θερμοκρασίας θέρμανσης στο εσωτερικό των θερμοκηπίων, η ενέργεια που απαιτείται για την θέρμανση μειώνεται κατά 22%. Ειδικότερα, στην περίπτωση διατήρησης του εσωτερικού των θερμοκηπίων στους 15°C, το σύστημα PV-T που χρησιμοποιείται θα κάλυπτε πλήρως τις ανάγκες θέρμανσης και των δύο θερμοκηπίων της εγκατάστασης.

6.5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Για να αποφασιστεί κατά πόσο μια επένδυση είναι οικονομικά βιώσιμη, πρέπει να γίνουν αρχικά αρκετοί υπολογισμοί, καθώς και κάποιες παραδοχές, οι οποίες θα αφορούν το μέγεθος της θερμοκηπιακής μονάδας, τις θερμοκρασίες θέρμανσης που θα επιλεγούν από τον καλλιεργητή κ.α.

Παραδοχές – Στοιχεία οικονομικής μελέτης:

1. Η θερμοκηπιακή μονάδα σίγουρα θα χρειαστεί ένα δεύτερο σύστημα θέρμανσης να λειτουργεί παράλληλα με το σύστημα PV-T. Το συγκεκριμένο σύστημα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να καλύψει πλήρως τις ανάγκες θέρμανσης της εγκατάστασης, καθώς τις ημέρες με χαμηλή ηλιοφάνεια το σύστημα PV-T δεν αποδίδει. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του συστήματος PV-T παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και την διοχετεύουν στον πάροχο, με σκοπό τον συμψηφισμό της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο τέλος του έτους (net-metering). Έτσι λοιπόν, για να χρησιμοποιηθεί και αυτό το ποσό ενέργειας στη θέρμανση των θερμοκηπίων, επιλέγεται η χρήση αντλίας θερμότητας. Οι αντλίες θερμότητας λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους μπορούν να υπερτριπλασιάσουν το ενεργειακό κέρδος από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών. Στην παρούσα οικονομική ανάλυση χρησιμοποιείται αντλία θερμότητας με δείκτη COP=3.25 που είναι τυπικός για διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου και περιβάλλοντος ίση με 10-12°C, όπως προκύπτει από τις μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες της Πάτρας.

2. Επιλέγεται θερμοκηπιακή μονάδα 1000m² ώστε να μειωθεί αρκετά το κόστος αγοράς των PV-T αγοράζοντάς το σε τιμές χονδρικής. Το κόστος ενός πάνελ Fototherm CS255 serie PV-T, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, ανέρχεται στα 550€. Η συγκεκριμένη εταιρία μειώνει τις τιμές έως και 45% για εταιρίες τοποθέτησης ή για αγορά μεγάλου αριθμού τεμαχίων για χρήση σε εγκαταστάσεις. Συνεπώς το κόστος του κάθε πάνελ για την συγκεκριμένη εγκατάσταση υπολογίζεται να είναι στα 302.5€.

3. Για τον υπολογισμό του χρόνου απόσβεσης της συγκεκριμένης επένδυσης, το ενεργειακό κόστος ανά έτος της εγκατάστασης συγκρίνεται με μια αντίστοιχη θερμοκηπιακή μονάδα που χρησιμοποιεί αποκλειστικά λέβητα αερίου ως κεντρικό σύστημα θέρμανσης. Η μελέτη γίνεται για διάφορες τιμές επιδοτήσεων, όπως αυτές που δίνουν οι κρατικοί μηχανισμοί ανά περιόδους για την αγροτική ανάπτυξη της χώρας.

4. Τέλος, ο υπολογισμός του συνολικού ποσού θερμότητας που χρειάζεται ένα τέτοιο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια ενός έτους, χρειάζεται αρκετές παραδοχές ως προς τις ώρες που απαιτούνται ημερησίως για τη θέρμανσή του.

6.5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Στο παρόν υποκεφάλαιο υπολογίζονται οι ετήσιες απαιτήσεις ενός αμφίρρικτου πολλαπλού θερμοκηπίου 1000m² και ύψους 2.5m σε θερμότητα. Για το συγκεκριμένο θερμοκήπιο επιλέγεται ως υλικό κάλυψης το διπλό φύλλο πολυαιθυλενίου, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη μόνωση, και εν συνεχεία στη μείωση του κόστους μίας «πράσινης» και αυτόνομης εγκατάστασης για θέρμανση.

Για τον υπολογισμό των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου χρησιμοποιείται ο εξής τύπος, όπως προτείνεται από το υπουργείο αγροτικής ανάπτυξης [21]:

$$P = (K \times A \times \Delta T + 0.36 \times V \times n \times \Delta T) \times 1.20 \quad (5)$$

όπου:

- $K = 2.9$ (διπλό φύλλο πολυαιθυλενίου)
- $A = 1412\text{m}^2$
- $\Delta T = H$ διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, που υπολογίζεται βάση των μέσων χαμηλότερων θερμοκρασιών για την περιοχή της Πάτρας ανά μήνα λειτουργίας (Δεκέμβριος – Απρίλιος)
- $V=2955\text{m}^3$
- $n=0.8$ (νέα κατασκευή με διπλό φύλλο πολυαιθυλενίου)

Με τη βοήθεια των φύλλων Excel βρίσκεται το θερμικό φορτίο που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου για κάθε έναν από τους μήνες λειτουργίας ξεχωριστά.

Εδώ χρειάζεται να γίνει μια παραδοχή για τον απαιτούμενο χρόνο θέρμανσης ανά ημέρα και μήνα. Υπενθυμίζεται ότι ο ανωτέρω τύπος χρησιμοποιείται για την εύρεση του μέγιστου θερμικού φορτίου που μπορεί να απαιτηθεί ανά μήνα, βάση των μέσων ελάχιστων θερμοκρασιών του εκάστοτε μήνα. Έτσι λοιπόν, ο τελικός υπολογισμός γίνεται βάσει των παρακάτω παραμέτρων:

Ώρες λειτουργίας θέρμανσης ανά μήνα.

- Δεκέμβριος: 8 ώρες ανά ημέρα
- Ιανουάριος: 10 ώρες ανά ημέρα

- Φεβρουάριος: 12 ώρες ανά ημέρα
- Μάρτιος: 10 ώρες ανά ημέρα
- Απρίλιος: 6 ώρες ανά ημέρα (για 15 ημέρες συνολικά)

Με τις παραπάνω προϋποθέσεις προκύπτει ότι η συνολική θερμότητα που απαιτείται για την θέρμανση του θερμοκηπίου ανά έτος είναι $Q=72.110\text{kWh}$.

6.5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Στο παρόν υποκεφάλαιο υπολογίζεται το κόστος της εγκατάστασης θέρμανσης για κάθε ένα από τα δύο θερμοκήπια, στο ένα εκ των οποίων χρησιμοποιείται υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα PV-T, ενώ στο δεύτερο χρησιμοποιείται λέβητας υγραερίου, που είναι ο πλέον διαδεδομένος για χρήση σε αντίστοιχα θερμοκήπια.

6.5.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PV-T

Σε προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίστηκε, σύμφωνα με τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από την εγκατάσταση, ότι η ωφέλιμη θερμότητα από τον ηλιακό συλλέκτη και το φωτοβολταϊκό με τη συμβολή της αντλίας θερμότητας με δείκτη $COP=3.25$, ανέρχεται στις $1.317,4\text{kWh/έτος}$ για κάθε πάνελ PV-T.

Συνεπώς, απαιτούνται 55 πάνελ για την πλήρη κάλυψη των αναγκών για την απαιτούμενη θερμότητα των 72.110kWh ετησίως. Το συνολικό κόστος για την αγορά των PV-T ανέρχεται στα 17600€ , με το κάθε πάνελ να κοστίζει 302.5€ . Στο ποσό αυτό προστίθεται ένα κόστος της τάξεως των 1500€ για σωληνώσεις και τη δημιουργία μιας αυτόνομης και μονωμένης δεξαμενής 10m^3 στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όπου θα αποθηκεύεται το ζεστό νερό των ηλιακών συλλεκτών, ώστε να είναι δυνατή η χρήση του κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όποτε κριθεί απαραίτητο. Επίσης, είναι απαραίτητη και η χρήση ενός inverter για την διοχέτευση του παραγόμενου ρεύματος στο δίκτυο του παρόχου (λειτουργία net-metering). Το κόστος ενός inverter 15kW κυμαίνεται στα 4000€ .

Για να συμπληρωθεί το σύστημα θέρμανσης απαιτείται μια αντλία θερμότητας. Στο παρόν θερμοκήπιο προτιμάται αντλία θερμότητας τύπου αέρα-νερού, ώστε η δεξαμενή, που αποθηκεύει θερμότητα από τους ηλιακούς συλλέκτες των PV-T, να μοιράζεται το ίδιο δίκτυο σωληνώσεων για αποβολή θερμότητας προς το θερμοκήπιο. Από τον τύπο υπολογισμού των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου, που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για μέση ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος 7°C τον Φεβρουάριο προκύπτει ισχύς $Q=53\text{kW}$. Συνεπώς, πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντλία θερμότητας με δυναμικότητα 60-70kW. Το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης μπορεί να αγγίξει τα 25000€.

Σημειώνεται ότι το πλήθος των πάνελ PV-T υπολογίζεται έτσι ώστε οι ανάγκες θέρμανσης να καλύπτονται πλήρως σε συνδυασμό με την αντλία θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά. Συνεπώς, η ετήσια δαπάνη σε ηλεκτρική ενέργεια θεωρείται μηδενική.

6.5.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΕΒΗΤΑ ΥΓΡΑΕΡΙΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μέγιστες θερμικές ανάγκες του θερμοκηπίου είναι της τάξεως του $Q=53\text{kW}$. Συνεπώς ένας λέβητας δυναμικότητας 60kW είναι επαρκής για τη θέρμανση του θερμοκηπίου. Η εγκατάσταση ενός αντίστοιχου λεβητοστασίου σε θερμοκήπιο κοστίζει 18000-20000€.

Ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης ενός συστήματος PV-T προκύπτει συγκριτικά με τα συνολικά κόστη των δύο εγκαταστάσεων, αλλά και με τα ετήσια έξοδα ενέργειας του καθενός. Συνεπώς, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το ετήσιο κόστος του φυσικού αερίου για θέρμανση του θερμοκηπίου με χρήση λέβητα. Ο λέβητας αερίου συμπύκνωσης που χρησιμοποιείται έχει βαθμό αποδοτικότητας $n=0.95$.

Η τιμή του φυσικού αερίου μπορεί να διαφέρει από μήνα σε μήνα, μιας και επηρεάζεται από τη ζήτηση και η τιμή του ανεβαίνει κατά τους χειμερινούς μήνες. Έτσι λοιπόν, μπορεί τους καλοκαιρινούς μήνες με ρυθμιζόμενες χρεώσεις, φόρους και τέλη να ανέρχεται στα 0.033€/kWh, αλλά τους χειμερινούς μήνες αγγίζει τα 0.039-0.047€/kWh. Για λόγους ευκολίας θα χρησιμοποιηθεί μια μέση τιμή 0.044€/kWh. Για την απαιτούμενη θερμότητα των 72.110kWh

ετησίως το ετήσιο ενεργειακό κόστος με χρήση λέβητα αερίου και βαθμό αποδοτικότητας 95%, ανέρχεται στα 3340€.

6.5.2.3 ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ PV-T

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την εύρεση του χρόνου απόσβεσης της επένδυσης συγκρίνεται το συνολικό κόστος κατασκευής αλλά και οι ετήσιες δαπάνες των δύο θερμοκηπίων, το ένα εκ των οποίων χρησιμοποιεί PV-T σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας, ενώ το άλλο βασίζεται εξ ολοκλήρου σε κεντρικό σύστημα θέρμανσης λέβητα αερίου.

Παρακάτω δίνονται τα συγκεντρωτικά κόστη για τα δύο θερμοκήπια:

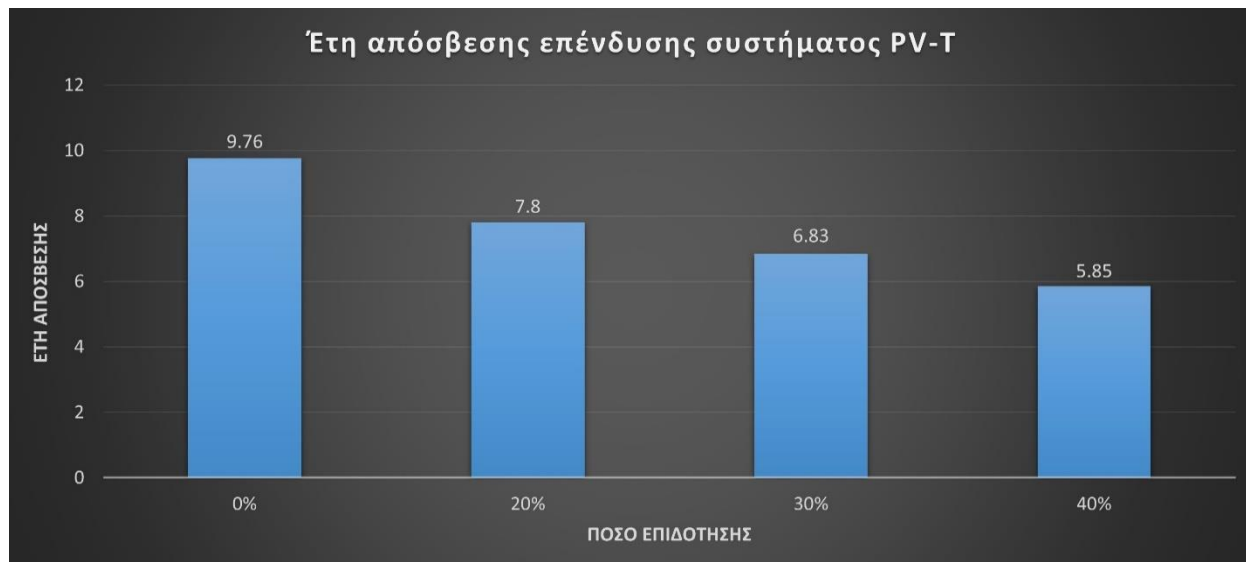
Θερμοκήπιο με σύστημα PV-T

• Σύστημα αντλίας θερμότητας :	25000€
• PV-T πάνελ (55 τεμάχια) :	17600€
• Μονωμένη δεξαμενή 10m ² :	1500€
• Inverter 38V to 220V 15kW :	4600€
Σύνολο :	50600€
Ετήσιο ενεργειακό κόστος :	μηδενικό

Θερμοκήπιο με σύστημα λέβητα φυσικού αερίου

• Λεβητοστάσιο :	18000€
Σύνολο :	18000€
Ετήσιο ενεργειακό κόστος :	3340€ για αγορά φυσικού αερίου

Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνονται τα έτη απόσβεσης της εγκατάστασης συστήματος θέρμανσης με χρήση PV-T, σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα κεντρικής θέρμανσης λέβητα υγραερίου, για διαφορετικά μεγέθη επιδότησης. Σημειώνεται ότι η επιδότηση υπολογίζεται και για τους δύο τύπους θερμοκηπίων και αφορά το αρχικό κόστος εγκατάστασης της εκάστοτε επένδυσης.



Εικόνα 6.10. Έτη απόσβεσης της επένδυσης συστήματος PV-T, για διαφορετικές τιμές επιδότησης

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η χρήση υβριδικών φωτοβολταϊκών PV-T συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανση θερμοκηπίων. Αναφέρθηκαν γενικά τα συνηθέστερα συμβατικά και εναλλακτικά συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται σήμερα για την θέρμανση θερμοκηπίων. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε, διερευνήθηκε και κατασκευάστηκε ένα σύστημα δύο θερμοκηπίων, το ένα εκ των οποίων λειτουργεί σε συνδυασμό με υβριδικό φωτοβολταϊκό PV-T. Στη συνέχεια έγινε αναφορά στη σημαντικότητα της αυτοματοποίησης ενός θερμοκηπίου που χρησιμοποιεί κάποιο αντίστοιχο σύστημα, τόσο για λειτουργικούς λόγους αλλά και λόγους ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Για την αυτοματοποίηση της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής Arduino-Nano σε συνδυασμό με αισθητήρες θερμοκρασίας LM-335z και ρελέ ισχύος σαν ενεργοποιητές της εκάστοτε ηλεκτρικής συσκευής. Στα επόμενα κεφάλαια έγινε περιγραφή του τρόπου καταμέτρησης των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού LabView, καθώς και της διαχείρισης αυτών για την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων. Η εργασία ολοκληρώθηκε με τα τελευταία κεφάλαια στα οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και μια μελέτη για την βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος σε μια θερμοκηπιακή μονάδα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των μετρήσεων αναφορικά με τη βιωσιμότητα μιας εγκατάστασης PV-T σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας για τη θέρμανση θερμοκηπίων ήταν ενθαρρυντικά. Υπολογίστηκε ότι μπορεί να γίνει απόσβεση ενός τέτοιου συστήματος σε χρονικό διάστημα μόλις έξι ετών, ανάλογα το ποσοστό επιδότησης που μπορεί να εισπράξει ο εκάστοτε αγρότης. Το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλό συγκριτικά με μία αντίστοιχη εγκατάσταση που βασίζεται αποκλειστικά σε λέβητα αερίου, διότι απαιτείται και η παράλληλη χρήση μιας αντλίας θερμότητας, ώστε να αξιοποιηθεί η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των PV-T με όσο το δυνατόν

υψηλότερο συντελεστή αποδοτικότητας. Το μηδενικό ενεργειακό κόστος όμως που επιτυγχάνεται λόγω της αυτόνομης και πράσινης λειτουργίας του, το καθιστά τελικά βιώσιμο.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις που αφορούν στη βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος.

Πρώτον, η δεξαμενή αποθήκευσης του ζεστού νερού του συλλέκτη μη έχοντας μόνωση μέσα στο θερμοκήπιο εκπέμπει θερμότητα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, αποβάλλοντας ακόμα και την ημέρα θερμότητα, η οποία θα ήταν πολύ χρήσιμη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Δεν ήταν συχνή η καταγραφή θερμοκρασιών μεγαλύτερων των 40°C στην δεξαμενή, και όσες φορές συνέβη, η θερμοκρασία του θερμοκηπίου βρισκόταν σε υψηλότερα επίπεδα από 30°C. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η δεξαμενή θα έπρεπε να είναι πολύ καλά μονωμένη και να αποβάλλει τη θερμότητα μέσω ενός εναλλάκτη κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Ακόμη, η θερμοκρασία στο εσωτερικό των θερμοκηπίων μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τις ηλιόλουστες ημέρες η θερμοκρασία του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της νύχτας μπορεί να πέφτει σε πολύ πιο χαμηλά επίπεδα, σε σχέση με μία κρύα ημέρα. Με κατάλληλο προγραμματισμό του Arduino ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και με την προσθήκη ενός αισθητήρα φωτός, θα μπορούσε να μειωθεί αρκετά η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στο θερμοκήπιο.

Όσον αφορά τον εξαερισμό του θερμοκηπίου για την αποφυγή απαγορευτικών θερμοκρασιών σε ημέρες με υψηλή ηλιοφάνεια, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτεροι ανεμιστήρες εξαερισμού, ή και αυτοματισμός για το άνοιγμα των παραθύρων της οροφής.

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα προσθήκη θα ήταν η μελέτη της ψύξης του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια των πιο θερμών εποχών του χρόνου, χρησιμοποιώντας μία δεξαμενή εξάτμισης εκτός του θερμοκηπίου και ανακύκλωσης του δροσερού νερού στην δεξαμενή εντός του θερμοκηπίου.

Τέλος, αναφορικά με τα αποτελέσματα και τη μελέτη της εγκατάστασης σε θερμοκηπιακή μονάδα, η χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας έναντι της συμβατικής ηλεκτρικής, η οποία χρησιμοποιήθηκε, θα μπορούσε να εκτοξεύσει τη συμβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά των PV-T στη θέρμανση του θερμοκηπίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ. Ν. Μαυρογιαννόπουλος, Θερμοκήπια, Αθήνα: Εκδόσεις Α. Σταμούλης, 2005.
- [2] K. Lemon, «The covered garden,» *Londom Museum Press*, 1962.
- [3] Ι. Γραφιαδέλης Μαυριανός, Σύγχρονα Θερμοκήπια, Θεσσαλονίκη, 1987.
- [4] Χ. Μεϊντάνης, «Κάλυψη ενεργειακών αναγκών σε θερμοκήπια,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- [5] Β. Σελλούντος, Θέρμανση-Κλιματισμός, Αθήνα: Εκδόσεις ΤεκΔΟΤΙΚΗ ΣΕΛΚΑ-4Μ, 2005.
- [6] Z.HA., «Flat-Plate PV-Thermal collectors and systems,» 2008.
- [7] P.J., «Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity & hot air/water. Energy Conversion Management,» 1994.
- [8] M. I. V. ONER, «Thermal (PVT) Solar Panels».
- [9] «<https://el.wikipedia.org>,» [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 2020 3 12].
- [10] A. M. Langella, «Metallic Bonding, Alloys & Semiconductors,» APSI Chemistry, 2014.
- [11] U. guerrero, «Seminario de ingenieria en enegia fotovoltaica,» Mexico City, 2013.
- [12] K. Hein, Future energy supply in Europe - residential application. Solar energy, 2005.
- [13] H.W., «PV solar electricity industry: market growth and perspective,» *Solar energy Materials and Solar Cells*, 2006.
- [14] A. Fudholi, Energy and Exergy analyses on water based PVT collector with spiral, Antalya: A.I.M.Y.O.M.H., 2013.
- [15] C. S. R., Detailed analysis of the energy yield of systems with recovered sheet-and-tube PVT collectors, Sollar Energy.
- [16] S. A. H. M., «Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis,» *Renewable and sustainable energy Reviews*, 2012.
- [17] M. N. A. N. Ö. Muhammet Kaan YEŞİLYURT, «Techniques for Enhancing and Maintaining Electrical Efficiency of Photovoltaic Systems,» *International Journal of New Technology and Research*, 2018.

- [18] O. M. Y. R. M. H. M. S. S. K. I. A., «Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors,» *Renewable and sustainable energy reviews*, 2011.
- [19] D. W. d. Vries, «Design of a PV/Thermal combi panel. PhD. Thesis,» Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1998.
- [20] Ε. Γ, «Βιολογική καλλιέργεια ντομάτας υπό κάλυψη,» Πανεπιστήμιο Ηρακλείου.
- [21] Χ. Όλυμπος, Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια, του Χρήστου Ολύμπου, Καθηγητή Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, 2001.
- [22] «Gaiapedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.gaiapedia.gr/>.
- [23] Υ. α. ανάπτυξης, *Εφημερίδα της κυβέρνησης*, 2020.
- [24] D. a. W. J. N. Cotter, *Climate - Humidity Interrelationships in a plastic greenhouse*, 1996.