



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Πειραματική Διερεύνηση Ενεργειακής Απόδοσης  
Θερμικού - Φωτοβολταϊκού Συλλέκτη**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΟΥ**

**Μπούφη Σοφιανού**

**Αριθμός Μητρώου: 48003**

**Επιβλέπων:**

**Καβαδίας Κοσμάς**

**Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α**

**Αθήνα, Απρίλιος 2023**





UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
SCHOOL OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MECHANICAL  
ENGINEERING

# **Experimental Investigation of the Photovoltaic-Thermal Collector's Energy Performance**

Thesis

of

**Boufis Sofianos**

**Student id.: 48003**

**Professor:**

Kavadias Kosmas

Associate Professor Uni.W.A.

Athens, April 2023





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Πειραματική Διερεύνηση Ενεργειακής Απόδοσης  
Θερμικού - Φωτοβολταϊκού Συλλέκτη**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**Μπούφη Σοφιανού**

**Επιβλέπων:** Καββαδίας Κοσμάς

Αναπληρωτής Καθηγητής Πα.Δ.Α

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κοσμάς Καββαδίας

Κωνσταντίνος – Στέφανος Νίκας

Ζαφειράκης Δημήτριος

Αναπληρωτής Καθηγητής

Καθηγητής

Επίκουρος Καθηγητής

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η υπογράφων Μπούφης Σοφιανός του Ευαγγέλου με αριθμό μητρώου 46148003 φοιτητής του Τμήματος Μηχανολογίας, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ημερομηνία

Ο/Η Δηλών/ούσα

## Περίληψη

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια ελπιδοφόρα βιώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς μπορεί να αντικαταστήσει την καύση των ορυκτών καυσίμων, προσφέροντας θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Το ηλιακό δυναμικό εμφανίζει μια σχετικά προβλέψιμη συμπεριφορά, για τη κάλυψη της καθημερινής ζήτησης σε θέρμανση και ηλεκτρική ενέργεια και η θερμική αποθήκευση για περιόδους απουσίας ή και χαμηλής ακτινοβολίας μπορεί να γίνει εύκολα και οικονομικά.

Μια ανταγωνιστική λύση για την παροχή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, είναι με τη χρήση συστήματος Θερμικού Φωτοβολταϊκού Συλλέκτη (Photovoltaic Thermal System (PVT), καθώς παράγει ταυτόχρονα και τις δύο μορφές ενέργειας. Αυτή η λύση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές σε αστικές περιοχές, όπου η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια συνοδεύεται από μια ζήτηση για χαμηλής ενθαλπίας θερμότητα και ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων συνήθως είναι περιορισμένος. Λόγω της μη διάδοσης και του υψηλότερου κόστους, τα συστήματα PVT αποτελούν ένα σχετικά περιορισμένο τμήμα της αγοράς τη δεδομένη στιγμή, με τη δυνατότητα να αυξηθεί σημαντικά στο άμεσο μέλλον. Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές τεχνολογίες για την ενσωμάτωση PVT, τα οποία μπορούν να συνδυάζονται με διάφορα συστήματα για τη θέρμανση νερού ή και τη θέρμανση χώρων. Στην επιλογή ενός PVT συστήματος, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη, η επιθυμητή αναλογία παραγόμενης θερμικής προς ηλεκτρικής ενέργειας, η εφαρμογή αν πρόκειται για βιομηχανική ή οικιακή, αυτόνομη ή συνδεδεμένη με το δίκτυο και το αν υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης μέρους ή και του συνόλου της παραγόμενης ενέργειας. Αυτές οι παράμετροι σχεδιασμού επηρεάζουν τις απαιτήσεις σχετικά με τη θερμοκρασία του ρευστού, τον λόγο παραγωγής (θερμικής προς ηλεκτρικής ενέργειας), και τη συνολική απόδοση του συστήματος. Επιπλέον ο σχεδιασμός του τόσο όσον αφορά την επιλογή των κατάλληλων υλικών, αλλά και η χρήση συστημάτων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου, καθώς και απομακρυσμένου ελέγχου της λειτουργίας του ψυκτικού συστήματος, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση τέτοιων εγκαταστάσεων σε διαφορετικές εφαρμογές.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει τα οφέλη ενός βιομηχανικού τύπου PVT, σε σύγκριση με τα πιο διαδεδομένα συστήματα μονής ενέργειας (Φ/Β-θερμικού ηλιακού συλλέκτη) και να ενισχύσει την εξέλιξη και την περαιτέρω διάδοση τους στο ευρύ κοινό.

Στο πλαίσιο αυτό η συγκεκριμένη εργασία εξέτασε τα τεχνικά ζητήματα που σχετίζονται με την τεχνολογία PVT, αξιοποιώντας υπάρχουσα εγκατάσταση στην οροφή του εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, ενώ αποτελεί και τεχνική οδηγία με σκοπό τη μελλοντική χρήση του συστήματος από το εκπαιδευτικό και ερευνητικό προσωπικό του Πανεπιστημίου.

Η διαδικασία της πειραματικής διερεύνησης απόδοσης θερμικού Φ/Β συλλέκτη, περιλαμβάνει τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, όπως θερμομέτρα, πυρανόμετρα, καταγραφείς δεδομένων, μετρητές ροής κ.α.. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε λήψη και επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και εξετάστηκε η ορθή λειτουργία του συγκεκριμένου PVT, διαδικασία που επιβεβαίωσε την ορθή λειτουργία της διάταξης καθώς τα πειραματικά αποτελέσματα ταυτίζονται με τα αντίστοιχα στοιχεία που παρέχει ο κατασκευαστής.

**Λέξεις Κλειδιά:** Φωτοβολταϊκός Θερμικός Συλλέκτης, Ηλιακός Θερμικός Συλλέκτης, Φωτοβολταϊκό, Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας, Ηλεκτρικός Βαθμός Απόδοσης, Θερμικός Βαθμός Απόδοσης



## **Abstract**

Solar energy is a promising sustainable energy source, due to its potential to replace the burning of fossil fuels for thermal and electrical energy production. Solar power exhibits relatively predictable behavior, in meeting the daily demand for heating and electricity. Thermal storage for periods of absence or low radiation can be easily and economically achieved.

A competitive solution for providing thermal and electrical energy is the use of Photovoltaic Thermal Systems (PVT), as they simultaneously generate both forms of energy. This solution is particularly suitable for urban areas where the demand for electricity is accompanied by a demand of low-grade heat, and the available space for installing solar systems is usually limited. Due to low market penetration and higher costs compared to single-energy collectors (PV or solar thermal collectors), PVT systems currently represent a relatively small portion of the market, but they have the potential to increase in the near future. There are various alternative technologies for integrating PVT systems, which can be combined with different options for water heating and or space heating. When selecting a PVT system, factors such as the characteristics of the solar collector, the desired ratio of thermal to electrical energy production, the application (industrial or residential), autonomy or grid-connected operation, and the need for energy storage should be taken into account. These design parameters affect the requirements regarding fluid temperature, production (thermal and electrical energy), and overall system efficiency. Furthermore, the design, including the selection of appropriate materials, and the use of tracking systems for sun orientation and remote control of the cooling system, can significantly impact the performance of such systems in different applications.

The aim of this thesis is to demonstrate the benefits of an industrial type PVT system compared to more common single-energy collectors (PV or solar thermal collectors) and to promote the development and further dissemination of such systems to the general public. In this context, the specific work examined the technical issues related to PVT technology, utilizing an existing installation on the roof of the Laboratory of Renewable Energies at the University of West Attica. Additionally, it provides technical guidance for the future use of the system by the laboratory staff. The performance of the thermal PV collector was experimentally investigated using specialized equipment such as thermometers, pyranometers, data loggers, and flow meters, which were permanently installed in the specific installation, except for those used for calibration purposes. Experimental measurements were taken, and the proper functioning of the collector was examined based on a comparison with the manufacturer's specifications. The results confirm its proper operation as they align with the provided manufacturer's data.

**Key words:** photovoltaic thermal collectors, solar thermal collector, photovoltaics, renewable energy, electrical efficiency, thermal efficiency



## **Ευχαριστίες:**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κοσμά Καββαδία, όπως και τον κ. Κωνσταντίνο Χριστόπουλο, για την ευκαιρία που μου έδωσαν να μελετήσω ένα ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα με την καθοδήγησή τους, καθώς και το χρόνο που διέθεσαν, δίνοντάς μου χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες, ούτως ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω την παρούσα Διπλωματική Εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Σπυρόπουλο για της πληροφορίες που μου έδωσε όσον αφορά την εγκατάσταση. Τέλος, ευχαριστώ το Πανεπιστήμιο για την συμβολή που είχε στην διαμόρφωση της προσωπικότητάς μου, κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>7</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>9</b>
<b>Ευχαριστίες:</b> .....	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων</b> .....	<b>13</b>
<b>Κατάλογος Διαγραμμάτων</b> .....	<b>15</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	<b>17</b>
<b>Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή</b> .....	<b>18</b>
1.1 Ενεργειακή κρίση και προοπτική αξιοποίησης Α.Π.Ε. ....	18
1.2 Αγορά ηλιακής ενέργειας.....	19
1.3 Εμπόδια και ευκαιρίες στην ανάπτυξη των PVT. ....	24
1.4 Βιβλιογραφική αναφορά.....	26
1.5 Θεωρητικό υπόβαθρο PVT .....	27
1.6 Είδη ψύξης φωτοβολταϊκών.....	35
1.6.1 Υδροψύξη .....	38
1.6.2 Ψύξη με ψυκτικό αέριο .....	40
1.6.3. Ψύξη με νανορευστό.....	41
1.7 Μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης ενός θερμικού φωτοβολταϊκού. ....	42
1.7.1 Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης με έλεγχο διάχυσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. ....	45
1.7.2 Βελτιστοποίηση απόδοσης με μεθόδους ελέγχου του PVT.....	51
<b>Κεφάλαιο 2. Πειραματική εγκατάσταση συλλέκτη PVT.</b> .....	<b>54</b>
2.1 Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης.....	55
2.2 Τύποι αισθητήρων.....	57
2.3 Αξιολόγηση της υπάρχουσας εγκατάστασης .....	58
2.4 Καταγραφή των δεδομένων.....	60
2.4.1 Συνδεσμολογία STYLITIS .....	61
2.4.2 Επεξεργασία δεδομένων .....	63
<b>Κεφάλαιο 3. Πειραματικό μέρος</b> .....	<b>65</b>

3.1 Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων.....	65
3.2 Μετρήσεις PVT .....	68
<b>Κεφάλαιο. 4 Αποτελέσματα.....</b>	<b>70</b>
4.1 Θερμική απόδοση συλλέκτη .....	70
4.2 Ηλεκτρική απόδοση συλλέκτη .....	73
<b>Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα.....</b>	<b>80</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>83</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Έκταση εγκατεστημένων ηλιακών θερμικών συλλεκτών ανά κάτοικο στην κεντρική Ευρώπη . (Mauthner et al., 2014) .....	22
Εικόνα 2: Απεικόνιση του Φ/Β φαινομένου δείχνει τα ηλεκτρόνια που κινούνται από την αρνητικά(η) φορτισμένη περιοχή στην θετικά φορτισμένη (p). (Asdrubali and Desideri, 2019).....	28
Εικόνα 3: Ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια σε ένα Φ/Β στοιχείο με βάση το πυρίτιο.....	29
Εικόνα 4:PVT σε τομή όπου απεικονίζεται ο μηχανισμός της συναγωγής και ακτινοβολίας όπως επίσης και τα τμήματα του συλλέκτη. (Zhetong, 2019).....	31
Εικόνα 5: α) Παθητική ψύξη με χρήση πτερυγίων στο πίσω μέρος του πάνελ (Elbreki et al., 2021) β) Παθητική ψύξη μέσω του μικροκλίματος που δημιουργεί η εξάτμιση του νερού. (“Solar Aquagrid,(no date)” ) .....	36
Εικόνα 6: α) Βεβιασμένη ψύξη του πάνελ με την χρήση ανεμιστήρα. (Quesada et al., 2012)β) Ψύξη του πάνελ με ροή αέρα στο εσωτερικό γυάλινων κτηρίων. (Pathak et al., 2022).....	36
Εικόνα 7: Ψύξη με υλικό αλλαγής φάσης. (Bellini, 2020)(“Lowering PV panel temperature with phase change materials – pv magazine International,” 2020.).....	37
Εικόνα 8: Ψύξη με ρευστό που ρέει στην επιφάνεια του συλλέκτη. (Raval et al., 2014) .....	37
Εικόνα 9: Συλλέκτες της εταιρείας Virtu όπου το ρευστό ρέει στο εσωτερικό του Φ/Β συλλέκτη. (“Products — Naked Energy,” (no date). ).....	38

<b>Εικόνα 10: PVT με δοχείο αποθήκευσης και αντλία ανακυκλοφορίας. (“Sustainability Experimental Evaluation of the Thermoelectrical Performance of Photovoltaic-Thermal Systems with a Water-Cooled Heat Sink,” 2022.).....</b>	<b>39</b>
<b>Εικόνα 11: Διάταξη PVT με χρήση ψυκτικού αερίου όπου η εγκατάσταση φέρει συμπυκνωτή, βαλβίδες κυκλοφορίας και διαχωρισμού, σύστημα απομάκρυνσης της υγρασίας από το κύκλωμα ψύξης, εναλλάκτη θερμότητας. (Tsai, 2014).....</b>	<b>40</b>
<b>Εικόνα 12: Πειραματική εγκατάσταση PVT με χρήση νανορευστού. Στο σχήμα φαίνεται το Φ/Β, το δοχείο αποθήκευσης του νανορευστού, η αντλία κυκλοφορίας του ρευστού και ο θερμικός συλλέκτης. (Rejeb et al., 2016).....</b>	<b>41</b>
<b>Εικόνα 13: ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος: Συγκεντρωτικοί θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες . .....</b>	<b>43</b>
<b>Εικόνα 14: ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος: Συγκεντρωτικοί θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες τύπου Fresnel. *Το σύστημα δεν είναι σε λειτουργία καθώς λείπει ο αγωγός από όπου διέρχεται το ρευστό προς θέρμανση στην κορυφή της κατασκευής. ....</b>	<b>44</b>
<b>Εικόνα 15: Απώλειες θερμότητας σε ηλιακούς θερμικούς και PVT συλλέκτες διαφόρων σχεδίων. α) Συμβατικός ηλιακός-θερμικός συλλέκτης με επίστρωση που εφαρμόζεται στο θερμικό απορροφητή. β) PVT πάνελ με συμβατικά ηλιακά κύτταρα τοποθετημένα σε απορροφητή (πλάκα χαλκού) γ) PVT πάνελ με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ακτινοβολίας που εφαρμόζεται στις ηλιακές κυψέλες. δ)Μονωμένο πάνελ PVT κενού με επίστρωση χαμηλής εκπομπής. (Dureyrat et al., 2014).....</b>	<b>46</b>
<b>Εικόνα 16: Δομή ενός τυπικού εμπορικού ηλιακού κυττάρου. Περιλαμβάνει μια αντανάκλαστική επίστρωση, μια στρώση p+ και n- στην πίσω επιφάνεια και έναν οπίσθιο ανακλαστήρα. (Riverola et al., 2018).....</b>	<b>47</b>
<b>Εικόνα 17: α) Συλλέκτης PVT εκκενωμένων σωλήνων β) Συλλέκτης Virtu PVT με εμπορικά ηλιακά κύτταρα. γ) Virtu PVT συλλέκτης με ηλιακά κύτταρα επικαλυμμένα με μεμβράνη ITO. (“Products — Naked Energy,(no date)” ).....</b>	<b>50</b>
<b>Εικόνα 18: Φωτοβολταϊκό με σύστημα παρακολούθησής της θέσης του ήλιο με σκοπό την βελτιστοποίηση απορρόφησης της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.(“Solar tracker   Definition &amp; Facts   Britannica,” 2023).....</b>	<b>52</b>
<b>Εικόνα 19: Πλάγια απεικόνιση της εγκατάστασης όπου φαίνεται. Α) Ο Φ/Β συλλέκτης με τον ψύκτη στο πίσω μέρος. Β) Το κουτί στο οποίο είναι τοποθετημένοι οι δύο καταγραφείς δεδομένων(όπως θα αναλυθεί παρακάτω). Γ) Οι σωληνώσεις από όπου διέρχεται και εξέρχεται το νερό από το συλλέκτη.....</b>	<b>54</b>
<b>Εικόνα 20: Σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης όπου φαίνεται η τοποθεσία των διαφόρων αισθητήρων ονομαστικά και για τους αισθητήρες θερμοκρασίας νερού στις θέσεις (Ti1,</b>	

Ti2, TO1,TO12). \*Τα αναλογικά θερμομέτρα βρίσκονται παραπλήσια των ψηφιακών για την επαλήθευση των μετρήσεων και την άμεση λήψη της στιγμιαίας θερμοκρασίας. .. 55

Εικόνα 21: Φωτογραφική απεικόνιση της εγκατάστασης όπου εμφανίζεται η θέση των αισθητήρων στα διάφορα σημεία..... 56

Εικόνα 22:Α)Μέτρηση θερμοκρασίας νερού Β) Μέτρηση θερμοκρασίας περιβάλλοντος Γ) Αναλογικό θερμόμετρο. .... 57

Εικόνα 23: Πυρανόμετρο sp-110 της arogee. .... 58

Εικόνα 24: Ραγίσματα στην επιφάνεια του Φ/Β ..... 59

Εικόνα 25: Αισθητήρας PT-100 μέτρησης θερμοκρασίας επιφανείας. .... 60

Εικόνα 26: Έξοδος νερού ψύξης..... 60

Εικόνα 27: Καταγραφικό STYLITIS-10..... 60

Εικόνα 28: Γραφική απεικόνιση της θέσης των αισθητήρων σε αντιστοιχία με τα δύο καταγραφικά . .... 62

Εικόνα 29: Διαδικασία σύνδεσης νέου καταγραφικού στο λειτουργικό σύστημα..... 63

Εικόνα 30: Διαδικασία εισαγωγής νέου αισθητήρα στο πρόγραμμα. .... 64

Εικόνα 31: Γραφική απεικόνιση των μετρήσεων. .... 64

Εικόνα 32: Πρότυπο πυρανόμετρο Hukseflux SR15-A1 (αριστερά) & διάταξη βαθμονόμησης (δεξιά) ..... 65

Εικόνα 33: Πρότυπο όργανο μέτρησης τάσης και έντασης ρεύματος (FLUKE) ..... 67

## **Κατάλογος Διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 1: Εκτιμώμενη ζήτηση θερμικής ενέργειας στις ΗΠΑ σε θερμοκρασία κάτω από 260 °C ταξινομημένη σύμφωνα με τη θερμοκρασία ανά εφαρμογή. (Fox et al., 2011) ..... 21

Διάγραμμα 2: Ποσοστά εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας από διαφορετικές τεχνολογίες στην Ευρώπη..... 23

Διάγραμμα 3: I–V καμπύλη Φ/Β. Η μπλε καμπύλη είναι η καμπύλη για την θερμοκρασία αναφοράς (25 °C) ενώ οι άλλες δύο καμπύλες αφορούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος μειώνεται με το θερμοκρασία ενώ το ρεύμα βραχυκυκλώματος αυξάνεται ελαφρώς αλλά αυτή η επίδραση είναι μικρή..... 33

**Διάγραμμα 4:** Διάγραμμα εκπομπής μονοκρυσταλικού Φ/Β κυττάρου πυριτίου. Διακεκομμένη γραμμή ιδανικό Φ/Β κελί, Μαύρη γραμμή εμπορικό Φ/Β χωρίς επίστρωση, Κόκκινη γραμμή κελί που φέρει αντανακλαστική επίστρωση. (Riverola et al., 2018) ... 48

**Διάγραμμα 5:** Θερμική απόδοση του συλλέκτη PVT Virtu υπό σταθερές πειραματικές συνθήκες με μεταβολή της θερμοκρασία του νερού εισόδου μεταξύ 35 °C και 80 °C σε ακτινοβολία >900 W/m<sup>2</sup> με κυψέλες επικαλυμμένες με ITO και με συμβατικά Φ/Β κύτταρα χωρίς επίστρωση (Schaeffer et al., 2015) ..... 51

**Διάγραμμα 6:** Θερμικός βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min. (24/5/2023)..... 70

**Διάγραμμα 7:** Θερμικός βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min). (25/5/2023) ..... 71

**Διάγραμμα 8:** Θερμικός βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min (26/5/2023)..... 72

**Διάγραμμα 9:** Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Φ/Β για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min), και θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη. (24/5/2023)..... 73

**Διάγραμμα 10:** Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Φ/Β για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min), και θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη.(25/5/2023)..... 74

**Διάγραμμα 11:** Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Φ/Β για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min), και η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη. (26/5/2023)..... 75

**Διάγραμμα 12:** Διάγραμμα τάσης θερμοκρασίας επιφάνειας Φ/Β χωρίς και για διαφορετικές ροές του ρευστού.(24/05/2023) ..... 76

**Διάγραμμα 13:** Διάγραμμα τάσης θερμοκρασίας επιφάνειας Φ/Β χωρίς και για διαφορετικές ροές του ρευστού.(25/05/2023) ..... 77

**Διάγραμμα 14:** Διάγραμμα τάσης θερμοκρασίας επιφάνειας Φ/Β χωρίς και για διαφορετικές ροές του ρευστού.(26/05/2023) ..... 77

**Διάγραμμα 15:** Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφάνειας ηλεκτρικής παραγωγής συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας.(24/05/2023) ..... 78

**Διάγραμμα 16:** Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφάνειας ηλ. Παραγωγής συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας.(25/05/2023)..... 79

**Διάγραμμα 17:** Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφάνειας ηλ. Παραγωγής συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας.(26/05/2023)..... 80



## **Κατάλογος Πινάκων**

<b>Πίνακας 1: Τιμές (FRτα), FRUL ανά τύπο συλλέκτη.....</b>	<b>32</b>
<b>Πίνακας 2: Τιμές ακτινοβολίας από τα πυρανόμετρα Arpogee και Hukseflux.....</b>	<b>66</b>
<b>Πίνακας 3: Μετρήσεις παροχής από το άνοιγμα του διακόπτη σε κάθε μία από τις επιλεγμένες θέσεις.....</b>	<b>67</b>
<b>Πίνακας 4: Ανεπεξέργαστα δεδομένα από τους Stylitis ανά παροχή, όπου 0.7 l/min (πράσινο), 1.5 l/min (πορτοκαλί), 2.5 l/min (κόκκινο), 3 l/min (μοβ). (26/5/2023).....</b>	<b>69</b>
<b>Πίνακας 5: TOTEE 20701-1/2017. Μέση μηνιαία θερμοκρασία νερού δικτύου ανά κλιματική ζώνη σε °C. ....</b>	<b>69</b>
<b>Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας των ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης που επιτυγχάνει το Φ/Β ανά παροχή για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες.....</b>	<b>75</b>

## **Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή**

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην πειραματική μελέτη της ενεργειακής απόδοσης ενός θερμικού φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συλλέκτη, συμπαραγωγής ηλεκτρικής με θερμική ενέργεια (photovoltaic-thermal power) (PVT), μαζικής παραγωγής. Χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός πως με την χρήση μίας μόνο επιφάνειας ενός Φ/Β συλλέκτη, μπορούν να παραχθούν συγκεντρωτικά δύο μορφές ενέργειας. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν είναι υπό πραγματικές συνθήκες και δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο μοντέλο προσομοίωσης της συμπεριφοράς του ηλιακού πάνελ και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Συνεπώς τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τις συγκεκριμένες συνθήκες επικρατούν την περίοδο λήψης των μετρήσεων (Νοέμβριος-Ιούνιος). Συγκεκριμένα εξετάστηκε πειραματικά η διαφορά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της ψύξης του πάνελ με εργαζόμενο μέσο το νερό, και τα επακόλουθα θερμικά οφέλη από την θέρμανση του νερού, μέσω της επαγωγής θερμότητας από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε υπάρχουσα ανενεργή εγκατάσταση που βρίσκεται στην οροφή του εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πανεπιστημιούπολη αρχαίου Ελαιώνα).

Για την υλοποίηση του πειράματος χρειάστηκε να γίνει κατανοητή η λειτουργία της εγκατάστασης (καθώς δεν υπήρχε σχετικό υλικό π.χ. τεχνική έκθεση), εκτελέστηκε επιδιόρθωση και συντήρηση λειτουργικών και μετρητικών οργάνων. Ακολούθησαν κάποιες μετατροπές για την διευκόλυνση της πειραματικής διαδικασίας. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν με ανοιχτό σύστημα ψύξης, καθώς, ενώ αρχικά η εγκατάσταση σχεδιάστηκε να φέρει δοχείο αποθήκευσης του νερού για περαιτέρω αξιοποίηση του, δεν είναι πλέον λειτουργικό λόγω της μη χρήσης.

### **1.1 Ενεργειακή κρίση και προοπτική αξιοποίησης Α.Π.Ε.**

Η ενεργειακή κρίση που βιώνει ο πλανήτης τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της μείωσης των κοιτασμάτων σε ορυκτά καύσιμα και της προδιαγεγραμμένης ολικής εξάλειψης τους στο προσεχές μέλλον. Σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργεί η εξόρυξη, η καύση και η εκπομπή των αερίων που παράγονται στην ατμόσφαιρα, (φαινόμενο του θερμοκηπίου, όξινη βροχή, αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη) αλλά και κοινωνικά (πόλεμοι, διακρατικοί ανταγωνισμοί) έχουν οδηγήσει σε διεθνή διακρατικά συνέδρια και συνθήκες (π.χ. Διάσκεψη του ΟΗΕ για το περιβάλλον και την ανάπτυξη Ρίο 1992, Πρωτόκολλο του Κιότο-1997). Συνοπτικά οι χώρες που μετείχαν δεσμεύτηκαν να περιορίσουν το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο στον πλανήτη, μέσω της σταδιακής ελάττωσης της χρήσης των υδρογονανθράκων και βελτίωσης των μέσων καύσης, για μειωμένη εκπομπή ρύπων. Έγινε συνεπώς αναγκαία η περαιτέρω ανάπτυξη μεθόδων για την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι τα Φ/Β, η αιολική, η υδροηλεκτρική ενέργεια όπως και η καύση

βιοκαυσίμων. Οι πηγές αυτές είναι αστείρευτες και δεν μολύνουν το περιβάλλον για να αποδώσουν ενέργεια, με εξαίρεση την καύση των βιοκαυσίμων, τα οποία όμως κατά την καύση τους εκπέμπουν λιγότερους ρύπους σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Παράλληλα βοηθούν στην διαχείριση και καταστροφή των απορριμμάτων και λοιπών ζωικών παραγώγων. Ακόμη, κατά την τελευταία διετία παρατηρείται όξυνση της ενεργειακής κρίσης, η οποία οδηγεί σε αύξηση των τιμών της ενέργειας, λόγω ελλείψεων που προέκυψαν στην αγορά από την απότομη “επανεκκίνηση” της οικονομίας μετά το τέλος της καραντίνας του covid-19, χωρίς να υπάρχουν τα απαραίτητα ενεργειακά αποθέματα διαθέσιμα. Η κρίση αυτή επιδεινώθηκε περαιτέρω στην Ευρώπη, με την έναρξη της διαμάχης ανάμεσα σε Ρωσία και Ουκρανία, καθώς επέφερε στην δραματική μείωση εισροής ορυκτών καυσίμων από την Ρωσία προς τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης η οποία αποτελεί βασικό τους προμηθευτή φυσικού αερίου.

Τα προβλήματα που έχουν προκύψει από την αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων καθώς και τα αδιαμφισβήτητα οφέλη τόσο βραχυπρόθεσμα για την κοινωνία, αλλά και μακροπρόθεσμα για τον πλανήτη με οδήγησαν στην επιλογή ενός θέματος που αφορά μια πράσινη μορφή ενέργειας.

## **1.2 Αγορά ηλιακής ενέργειας**

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή η χρήση Φ/Β για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Συγκεκριμένα η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς το 2010 ήταν ίση με 40,34 GW<sub>e</sub>. Την τελευταία δεκαετία η ισχύς αυτή εικοσαπλασιάστηκε φτάνοντας το 2021 τις 843,09 GW<sub>e</sub> το οποίο αντιστοιχεί στο 3% της παγκόσμιας παραγόμενης ενέργειας – ποσοστό χαμηλό σε σχέση με το 22,3% που καλύπτουν συνολικά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η ανάπτυξη προήλθε από πολιτική διαχείριση και οικονομικά κίνητρα που έδωσαν διάφορα κράτη σε εθνικό επίπεδο, παράλληλα με τη γενική κατεύθυνση της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που παρακινεί πολίτες και επιχειρήσεις στην εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων.

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια αστείρευτη πρωτογενή πηγή ενέργειας και μπορεί να μετατραπεί ανάλογα με την χρήση σε θερμότητα ή ηλεκτρική ενέργεια με ανταγωνιστικό και αξιόπιστο τρόπο. Το μέγεθος της ηλιακής διαθεσιμότητας ανά περιοχή είναι γνωστό σε ετήσια και καθημερινή βάση, επομένως με την εγκατάσταση ενός νέου ηλιακού συστήματος, πρόκειται να παραχθεί μια προβλέψιμη ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας όπως π.χ. ο άνεμος. Τα ηλιακά συστήματα αν δεν φέρουν σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου, δεν έχουν κινούμενα μέρη και κατά συνέπεια απαιτούν χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Τα επιμέρους τμήματα που περιλαμβάνουν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (~20 χρόνια) και σπάνια υπολειπονται ή καταστρέφονται. Μακροπρόθεσμα, δεδομένα από εγκατεστημένα συστήματα δείχνουν ότι τα Φ/Β στοιχεία έχουν απώλεια

ισχύος 0,5% ετησίως κατά μέσο όρο, και μόνο το 2% των εγκατεστημένων Φ/Β μονάδων δεν ανταποκρίνεται στο χρόνο ζωής που δίνουν οι κατασκευαστές (10 χρόνια).(Köntges et al., 2014)

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την τεχνολογία των Φ/Β ή μέσω θερμοδυναμικού κύκλου ισχύος σε συστήματα συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργεια (CSP), καθώς και με την κατάλληλη μετατροπή μπορεί να παρέχει θέρμανση ή ψύξη.

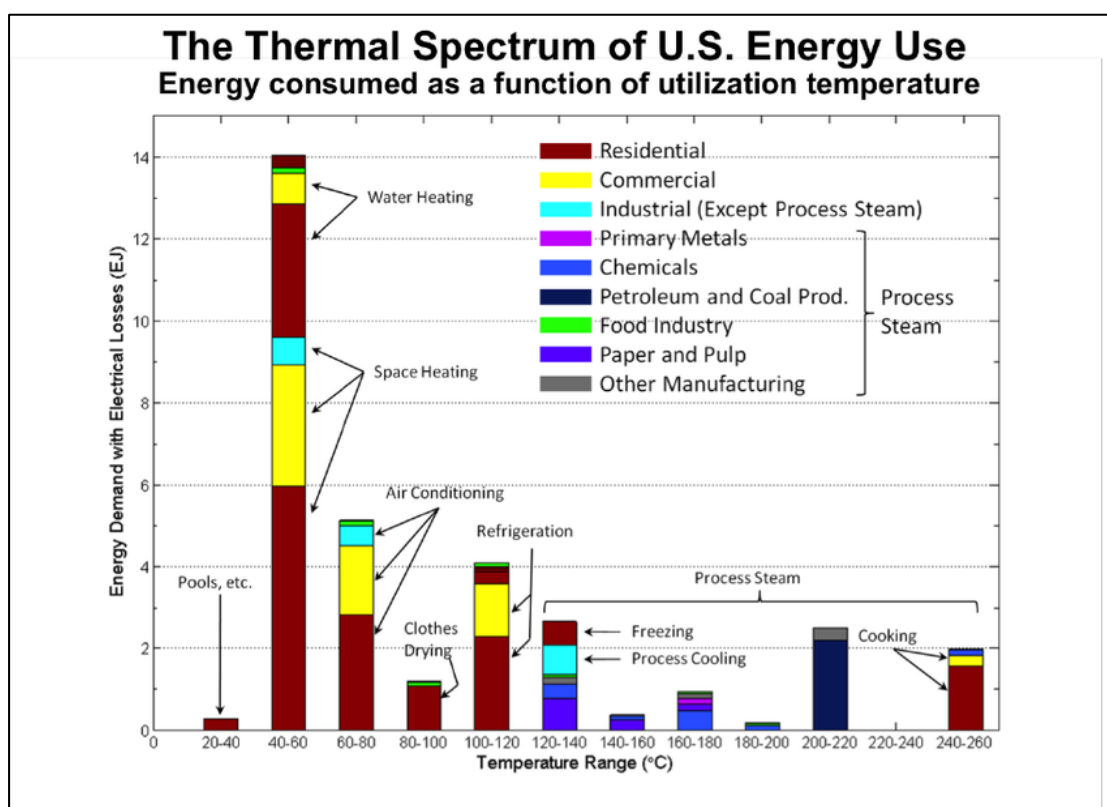
Παγκόσμια κυρίαρχοι στην αγορά ηλιακής ενέργειας είναι κατά σειρά η Κίνα, η Ιαπωνία και οι ΗΠΑ, ενώ αρκετές χώρες στην Ευρώπη έχουν εγκαταστημένο δυναμικό που καλύπτει πάνω από το 6% της συνολικής ζήτησης (Ιταλία 6,9%, Ελλάδα 6,5% και Γερμανία 7,8%) (Solar Power by Country 2023) αποτέλεσμα των ισχυρών κινήτρων για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας που έχουν δοθεί τα τελευταία χρόνια. Το κόστος των Φ/Β μονάδων μειώνεται αισθητά με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ως εκ τούτου γίνεται φανερό ότι τα Φ/Β θα γίνουν σύντομα μια από τις επιλογές με το χαμηλότερο κόστος παραγωγής ενέργειας. Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου με μια πράσινη μορφή ενέργειας αντί για χρήση ορυκτών καυσίμων, τα Φ/Β μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες ηλεκτροδότησης σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές. Αυτή η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή ιδιαίτερα στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, όπου η πρόσβαση στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι είτε περιορισμένη ή αδύνατη.

Εκτός από ηλεκτρική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη θερμική ενέργεια με ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες που θερμαίνουν μια ροή νερού ή αέρα. Οι ηλιακοί συλλέκτες όντας πιο απλή, οικονομική τεχνολογία είναι διαθέσιμοι στο κοινό για περισσότερα χρόνια. Το 2010 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη θερμική ενέργεια τους ήταν 203 GW<sub>th</sub> ενώ αναπτύχθηκε με πιο αργούς ρυθμούς αγγίζοντας τις 501 GW<sub>th</sub> μέχρι το 2021.

Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται συχνά για παραγωγή θερμότητας, λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους. Επιπλέον σε πόλεις που χρησιμοποιούν κεντρικά συστήματα θέρμανσης, η παραγωγή και η κατανάλωση δεν δύναται να απέχει μεγάλη απόσταση, καθώς τέτοιες μεταφορές περιορίζονται στην πράξη με την τρέχουσα τεχνολογία σε μερικές εκατοντάδες μέτρα (υψηλές θερμικές απώλειες και κόστος μεταφοράς). Οι ηλιακές-θερμικές τεχνολογίες είναι προσιτές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε τοπικά ενεργειακά συστήματα για να καλύψουν ένα μεγάλο μέρος της ζήτησης θερμότητας με υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος και χαμηλές σχετικές εκπομπές CO<sub>2</sub> που περιορίζονται στις διεργασίες και τα υλικά που σχετίζονται με την κατασκευή και όχι την χρήση. Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες είναι μια ώριμη αποδεδειγμένη τεχνολογία ιδιαίτερα στην Ελλάδα και χρησιμοποιούνται κυρίως για να θερμάνουν πισίνες σε χαμηλή θερμοκρασία, ζεστό νερό, θέρμανση/ψύξη χώρων και σε

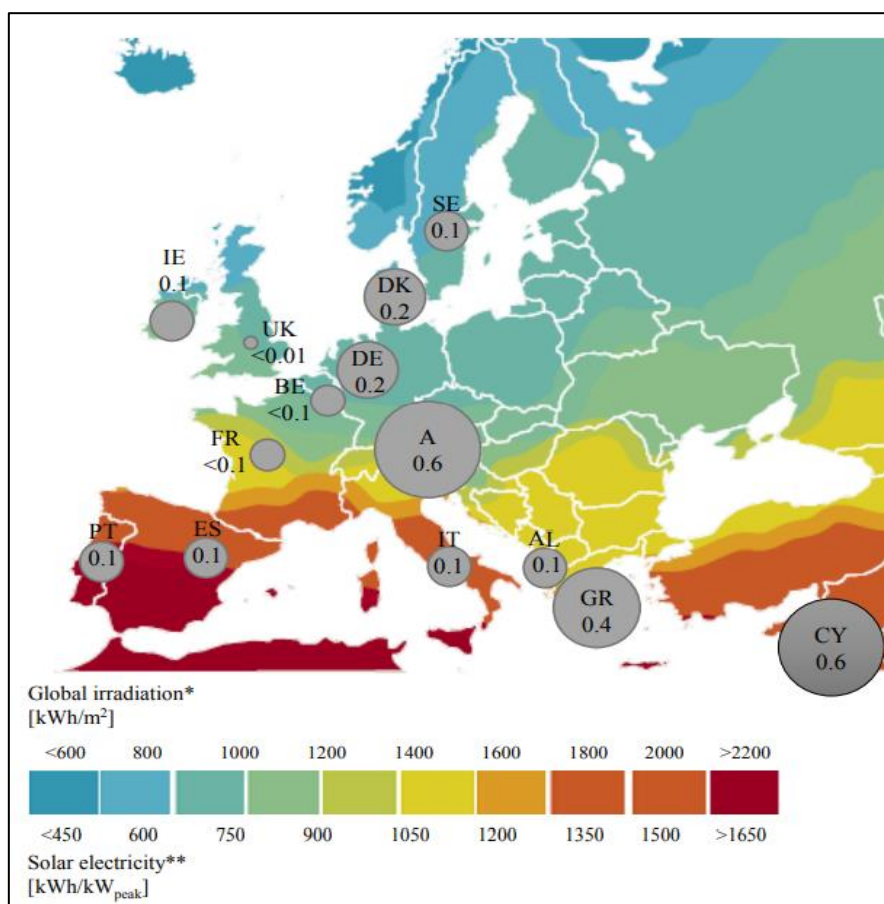
βιομηχανικές διεργασίες, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος στον οικιακό και βιομηχανικό τομέα.

Η ενέργεια για θέρμανση και ψύξη παρέχεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών ανάλογα την εφαρμογή, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών σε θερμική ενέργεια, αφορά μέτριες προς χαμηλές θερμοκρασίες όπως φαίνεται στο (Διάγραμμα 1) όπου αναφέρεται η θερμοκρασία που απαιτείται για κάθε χρήση. Ενδιαφέρον αποτελεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της καταναλισκόμενης θερμικής ενέργειας αφορά θερμοκρασίες από 40 °C έως 60 °C, με κύρια χρήση τη θέρμανση χώρων και ζεστό νερό χρήσης (ZNX). Αποτελεί συνεπώς ένα σημαντικό κριτήριο για την περεταίρω εξέλιξη τους καθώς αυτή η ανάγκη μπορεί να καλυφθεί με υπάρχουσες οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες για ηλιακή θέρμανση και ψύξη (π.χ. οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι η οικονομικότερη και απλούστερη επιλογή). Λειτουργούν με σχετικά υψηλή απόδοση και αγγίζουν θερμοκρασίες έως 150 °C, επαρκής δηλαδή για τις περισσότερες εφαρμογές.



*Διάγραμμα 1: Εκτιμώμενη ζήτηση θερμικής ενέργειας στις ΗΠΑ σε θερμοκρασία κάτω από 260 °C ταξινομημένη σύμφωνα με τη θερμοκρασία ανά εφαρμογή. (Fox et al., 2011)*

Οι ηλιακές θερμικές τεχνολογίες μπορούν να παίξουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην αντιμετώπιση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η ηλιακή θέρμανση προβλέπεται ότι έχει τη δυνατότητα να καλύψει περισσότερο από το 16% του ζεστού νερού για θερμότητα χαμηλής ενθαλπίας, σε ένα σενάριο ενεργειακού μείγματος που διασφαλίζει την αποφυγή της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας άνω των 2 °C (“Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) – Global Energy and Climate Model – Analysis,” (No date)) έως το 2050. Στην Ευρώπη, αυτό μεταφράζεται σε αύξηση της αντίστοιχης ηλιακής θερμικής εγκατεστημένης ισχύος σε 1,3 m<sup>2</sup> ανά ευρωπαϊκό κάτοικο έως το 2050. Σύμφωνα με το (NZE), μέχρι το 2050 η παγκόσμια ηλιακή θερμική παραγωγή θα πρέπει να φτάσει τα 7700 GW<sub>th</sub> (από 435 GW<sub>th</sub> ) στόχος ο οποίος, για την επίτευξη του, απαιτείται μια ετήσια αύξηση 8% ανά έτος. Σήμερα, η αγορά για ηλιακές θερμικές τεχνολογίες εξακολουθεί να είναι κατακερματισμένη όπως φαίνεται στην (Εικόνα 1) με το μεγαλύτερο μέρος των χωρών της ΕΕ να απέχει από τον στόχο των 1,3 m<sup>2</sup>, παρά το μεγάλο ηλιακό δυναμικό που εμφανίζουν πολλές από αυτές.

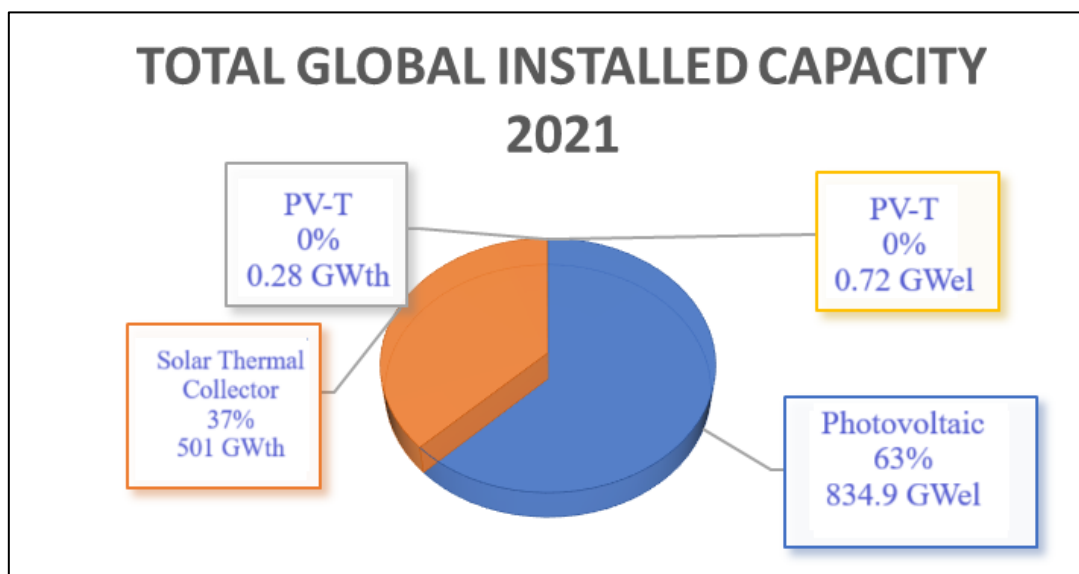


**Εικόνα 1:** Έκταση εγκατεστημένων ηλιακών θερμικών συλλεκτών ανά κάτοικο στην κεντρική Ευρώπη. (Mauthner et al., 2014) \*Η χρωματική κλίμακα δείχνει την διαθέσιμη ετήσια ακτινοβολία και το ετήσιο άθροισμα της ηλιακής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί υπό βέλτιστη κλίση ανά περιοχή.

Οι περιπτώσεις της Κύπρου, Αυστρίας και Ελλάδας είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρες σε αντίθεση με την Γαλλία, Ιταλία, Ισπανία και Πορτογαλία. Είναι προφανές ότι υπάρχει σημαντικό δυναμικό για την εκμετάλλευση της ηλιακής θερμικής ενέργειας, σε χώρες που λαμβάνουν παρόμοια ένταση ηλιακή ακτινοβολία με την Ελλάδα και την Κύπρο και περισσότερο από την Αυστρία, καθώς η εγκατεστημένη δυναμικότητα ανά άτομο είναι πολύ χαμηλότερη από την τιμή στόχο. Η ηλιοφάνεια που χαρακτηρίζει μια περιοχή δεν είναι ο μόνος παράγοντας που καθορίζει το μέγεθος και τη προοπτική της τοπικής αγοράς ηλιακής ενέργειας. Μεταξύ των κριτηρίων που επηρεάζουν την ανάπτυξη της αγοράς ηλιακής ενέργειας, ένα από τα πιο σημαντικά είναι το κόστος των τοπικών εναλλακτικών λύσεων (αέριο, πετρέλαιο, ηλεκτρική ενέργεια, βιομάζα κ.α.), τα χαρακτηριστικά των τοπικών ενεργειακών υποδομών και η οικονομία άλλων βασικών βιομηχανικών τομέων, όπως οι κατασκευές και το μέγεθος των δραστηριοτήτων του τριτογενούς τομέα.

Στην Ευρώπη η αγορά ηλιακών θερμικών συστημάτων είναι περιορισμένη έναντι άλλων ανανεώσιμων πηγών, όπως για παράδειγμα αυτή των Φ/Β συστημάτων. Μέχρι το 2020 στη Γερμανία ήταν εγκατεστημένα 18.6 εκατομμύρια m<sup>2</sup> θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες, σε σύγκριση με περίπου 460 εκατομμύρια m<sup>2</sup> Φ/Β. Σε σχέση με τα συστήματα μονής ενέργειας τα Φ/Β συμπαραγωγής θερμικής με ηλεκτρική ενέργεια είναι τα λιγότερο διαδεδομένα (Διάγραμμα 2) και εμφανίζουν μικρή αύξηση τα τελευταία χρόνια, καθώς για το 2021 η συνολική εγκατεστημένη θερμικής ενέργειας ήταν 720 MWth και 280 MWel ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνεπώς, υπάρχει περιθώριο στην εξέλιξη της τεχνολογίας και τις προώθησης της σε μεγαλύτερο αγοραστικό κοινό με βάση τα πλεονεκτήματα που έχει και την γενικότερη τάση της αγοράς για αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας.



*Διάγραμμα 2: Ποσοστά εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας από διαφορετικές τεχνολογίες στην Ευρώπη.*

### 1.3 Εμπόδια και ευκαιρίες στην ανάπτυξη των PVT.

Η ανταγωνιστικότητα του κόστους της παραγόμενης ηλιακής θερμικής ενέργειας, έναντι των ορυκτών καυσίμων, ποικίλλει ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, τα χαρακτηριστικά του θερμικού φορτίου του κτιρίου, το κόστος του συστήματος και το κόστος των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων. Η ηλιακή θερμότητα είναι ήδη φθηνότερη από το φυσικό αέριο και την ηλεκτρική ενέργεια (τιμή δικτύου) στην κεντρική και νότια Ευρώπη και σε χώρες όπου μεγάλης κλίμακας ηλιακά συστήματα είναι ενσωματωμένα σε τοπικά δίκτυα τηλεθέρμανσης. Ωστόσο, το κόστος κεφαλαίου ενός ολοκληρωμένου ηλιακού θερμικού συστήματος (π.χ. κάλυψη αναγκών θέρμανσης χώρου, ZNX) ελλείψει επιδοτήσεων παραμένει υψηλό.

Η μείωση του κόστους επένδυσης των ηλιακών θερμικών συστημάτων και ταυτόχρονα η αύξηση του ενεργειακού κλάσματος που καλύπτει ο ήλιος είναι η πρώτη πρόκληση, που κινητοποιεί επίσης την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ηλιακής θέρμανσης όπως η ενσωμάτωση της σε δίκτυα τηλεθέρμανσης, η ηλιακή ψύξη ή θέρμανση για χρήση σε βιομηχανικές διεργασίες χαμηλής θερμοκρασίας. Επιπλέον, η ένταξη ηλιακών θερμικών μονάδων σε αποδοτικά συστήματα θέρμανσης, όπως συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί σημαντικό εγχείρημα για τον κλάδο.

Τα τρέχοντα οικονομικά εμπόδια που περιορίζουν την υιοθέτηση ηλιακής θέρμανσης και τεχνολογίες ψύξης μπορούν επίσης να ξεπεραστούν με περαιτέρω προγράμματα υποστήριξης, μέσω της δημόσιας πολιτικής. Όπως οικονομικά κίνητρα που βοηθούν τους ιδιώτες στην πρόσβαση σε κεφάλαιο και την θεσμοθέτηση προτύπων και κανονισμών. Τα πρώτα συντηρούν τη βιομηχανία βραχυπρόθεσμα και είναι δύσκολα να διατηρηθούν, καθώς αυξάνεται ο όγκος της αγοράς. Τα τελευταία είναι πιο αποτελεσματικά και οδηγούν σε μια αυτοσυντηρούμενη αγορά, μακροπρόθεσμα μέσω μιας οικονομίας κλίμακας στις διαδικασίες παραγωγής και στην αλυσίδα εγκατάστασης και υπηρεσιών. Ένας συνδυασμός των μέτρων στήριξης (υποχρεώσεις, οικονομικά κίνητρα), τοπικές συνθήκες (διαθεσιμότητα πόρων ή υψηλές τιμές καυσίμων) και τοπικές ευκαιρίες (δίκτυο τηλεθέρμανσης), καθορίζει την ανάπτυξη της αγοράς και της βιομηχανίας ηλιακής ενέργειας.

Η τεχνολογική καινοτομία διαδραματίζει επίσης βασικό ρόλο στην ενθάρρυνση της υιοθέτησης περισσότερων αποδοτικών και οικονομικών συστημάτων. Νέες λύσεις που συνδυάζουν την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπου απαιτείται θέρμανση, ψύξη και ηλεκτρική ενέργεια. Μεταξύ άλλων, είναι οι μονάδες (PVT), ιδιαίτερα ελπιδοφόρα λύση για εφαρμογή σε αστικό περιβάλλον όπου είναι αναγκαίο να γίνει αξιοποίηση περιορισμένου χώρου με ουσιαστικό και ωφέλιμο τρόπο.



Σύμφωνα με το Ενεργειακό Ερευνητικό Κέντρο της Ολλανδίας (ECN) τα PVT μπορούν να παράγουν έως και 40% περισσότερη ενέργεια για την ίδια επιφάνεια συλλέκτη σε σύγκριση με συστήματα που παράγουν ξεχωριστά την κάθε μορφή ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι οι συλλέκτες PVT λειτουργούν με χαμηλότερη θερμική απόδοση από τα ηλιακά θερμικά συστήματα μονής ενέργειας, με την ψύξη του Φ/Β επιτυγχάνεται καλύτερη ηλεκτρική απόδοση, συνεπώς αντισταθμίζονται οι όποιες απώλειες, λαμβάνοντας περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια η οποία αποτελεί ανώτερη μορφή ενέργεια έναντι της θερμικής.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ενώ τα πρώτα χρησιμοποιούν την έκταση πιο αποτελεσματικά και δίνουν λύση σε περιορισμένους χώρους όπου η ύπαρξη δύο συστημάτων δεν είναι εφικτή, δίνουν λύση για εφαρμογές όπου απαιτείται θέρμανση και ηλεκτρισμός ταυτόχρονα (π.χ. οικίες). Παράγουν ταυτόχρονα περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια η οποία, μετέπειτα, μπορεί να μετατραπεί πιο εύκολα σε άλλες μορφές ενέργειας όπως η θερμική.

Ένα σύστημα PVT προσφέρει τη δυνατότητα δυναμικής αξιοποίησης του 100% της ενέργειας που παράγεται τοπικά, όταν το ηλιακό σύστημα είναι ενσωματωμένο στο δίκτυο με συστήματα αποθήκευσης, θέρμανσης/ψύξης όπως αντλίες θερμότητας, κάνοντας χρήση ταυτόχρονα της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που παρέχεται από το PVT. Αυτή η ενοποίηση απαιτεί τεχνικές λύσεις, όπως ο κεντρικός απομακρυσμένος έλεγχος με ευέλικτη λειτουργία για τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, βελτιώσεις στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ενίσχυση επιχειρησιακών εργαλείων και πρακτικών καθώς και ανάπτυξη τεχνολογιών που υποστηρίζουν την κάλυψη της ζήτησης. Αυτές οι προκλήσεις μετριάζονται για συστήματα μικρής κλίμακας, όπου η τοπική θερμική αποθήκευση είναι προσιτή και η ηλεκτρική αποθήκευση δεν είναι απαραίτητη (διασυνδεδεμένα συστήματα). Επιπλέον, τα μικρής κλίμακας συστήματα διευκολύνουν την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην υπάρχουσα ενεργειακή υποδομή και παρέχουν υποστήριξη στο δίκτυο, χωρίς να δημιουργούν αστάθειες (επίδραση στο φορτίο βάσης) και ανάγκη απόρριψης της περίσσειας ενέργειας.

Η εφαρμογή συστημάτων PVT οδηγεί σε μείωση του αριθμού των εξαρτημάτων της εγκατάστασης, σε σύγκριση με ξεχωριστά Φ/Β και ηλιακά θερμικά συστήματα απαιτώντας λιγότερες πρώτες ύλες.

Συνοπτικά, μια μεγάλης κλίμακας εισαγωγή συστημάτων PVT στην αγορά ενέργειας θα οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση πόρων. Την ίδια στιγμή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι συλλέκτες PVT παράγουν περισσότερη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας συλλέκτη και ως εκ τούτου ο χρήστης επωφελείται από μεγαλύτερη εξοικονόμηση χρημάτων. Τα συστήματα PVT είναι επίσης ανθεκτικά και βελτιώνουν την διάρκεια ζωής των ηλιακών κυψελών σε σύγκριση με τα χωρίς ψύξη Φ/Β. Ενώ παρέχουν στον χρήστη ηλεκτρική ενέργεια την οποία μπορεί να μετατρέψει εύκολα σε

όποια μορφή ενέργειας επιθυμεί. Σύμφωνα με το Solar Trade η ψύξη ενός Φ/Β αυξάνει την μακροζωία του καθώς μειώνει την θερμοκρασία στην επιφάνεια. Μία από τις κύριες αιτίες της μείωσης της απόδοσης και καταστροφής των Φ/Β, είναι οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας που εκτός από τη στιγμιαία μείωση στην ηλεκτρική απόδοση μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμες βλάβες, όπως τον αποχρωματισμό των κυψελών ή τη θραύση του εξωτερικού ηλεκτρικού πλέγματος. Δυνητικοί τρόποι για καινοτομία και εξέλιξη με στόχο τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της απόδοσης, είναι η έρευνα οικονομικότερων υλικών για την κατασκευή Φ/Β συλλεκτών και η υιοθέτηση φθηνών αλλά εξελιγμένων ελεγκτών για την καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα πρότυπα για τον τρόπο δοκιμής και τις προδιαγραφές που πρέπει να πληροί ένα PVT. Συνεπώς, για τη δοκιμή τους χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα πρότυπα EN ISO 9806 για τον έλεγχο σε αντοχή και απόδοση, όσον αφορά το τμήμα του θερμικού συλλέκτη, και το EN 61215 για το Φ/Β. Επομένως, δεν μπορούν να δοθούν στους κατασκευαστές σχετικές πιστοποιήσεις όπως αυτές που παρέχονται στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος για θερμικά ηλιακά συστήματα.

#### **1.4 Βιβλιογραφική αναφορά**

Η βελτίωση της απόδοσης των Φ/Β μέσω ψύξης, για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην απόδοση και μακροζωία της κυψέλης, είναι ένα αντικείμενο που έχει συζητηθεί σε πολλές δημοσιεύσεις στην Ελλάδα και το εξωτερικό. Ας σημειωθεί ότι έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες και μελέτες για το θέμα. Η εργασία που δημοσιεύτηκε από τους (Odeh and Behnia, 2009) αναφέρεται στην ψύξη των Φ/Β με τη χρήση νερού, στην οποία χρησιμοποιήθηκε μια ειδική τεχνική για την ψύξη του Φ/Β. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν νερό που ρέει στην επάνω επιφάνεια πολükρυσταλλικών Φ/Β ισχύος 60 W. Ταυτόχρονα, εξέτασαν την συμπεριφορά των πάνελ σε διαφορετικές γωνίες κλίσης ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία συμπεριλαμβανομένης και της οριζόντιας. Η θερμοκρασία των πάνελ μετρήθηκε υπό σταθερή ακτινοβολία. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε για ψύξη ήταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος πάντα χαμηλότερη από την θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου. Σε αυτή τη μελέτη κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ψύξη της Φ/Β μονάδας με αυτή την τεχνική θα μειώσει τη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης, κατά περίπου 26 °C με έκθεση σε ακτινοβολία 1000 W/m<sup>2</sup> και σε 25 °C θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην εργασία τους οι (Moharram et al., 2013) εξέτασαν ένα σύστημα ψύξης μονοκρυσταλλικού Φ/Β με ψυκτική εγκατάσταση στο πίσω μέρος του πάνελ. Τα πειραματικά αποτελέσματα που έλαβαν έδειξαν ότι η συνολική παραγωγή ενέργειας του θερμικού πλέον Φ/Β, ήταν κατά 14,1% περισσότερη με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ψύξης. Η ηλεκτρική απόδοση έφτασε επίσης το 19,8% όταν δοκιμάστηκε η Φ/Β μονάδα με σύστημα ψύξης, σε σύγκριση με 17,4% που ελήφθη χωρίς ψύξη. Το σύστημα ψύξης είχε ως αποτέλεσμα όχι μόνο να επιτύχει

σημαντική βελτίωση στην απόδοση των Φ/Β με χαμηλό κόστος, αλλά μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως μια οικονομική τεχνική προθέρμανσης για νερό χρήσης. Άλλες μελέτες εξέτασαν τα νανορευστά ως εργαζόμενο μέσο με σκοπό να επιτύχουν βελτιστοποίηση της ψύξης του πάνελ. Το πείραμα των (Komeili Birjandi et al., 2021) διεξήχθη σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες με ενεργό σύστημα ψύξης. Χρησιμοποίησαν πολυφλουικούς νανοσωλήνες άνθρακα (MWCNT) τους οποίους πρόσθεσαν στο νερό, παρασκευάζοντας ένα διάλυμα. Το ποσοστό της απόδοσης των φωτοβολταϊκών βελτιώθηκε κατά ~9,2% με τη χρήση συστήματος ψύξης (νερό). Με την χρήση πολυφλουικών νανοσωλήνων άνθρακα περιεκτικότητας λιγότερο από 1% , το τελικό διάλυμα εμφάνισε τα βέλτιστα αποτελέσματα. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του PVT που χρησιμοποιεί 1% διαλύματος νερού/νανοσωλήνων, αντιστοιχεί σε 17,48% θεωρητικά και 17,66 % πειραματικά για ακτινοβολία 1000 W/m<sup>2</sup>. Η θερμική παραγωγή ενέργειας αντίστοιχα αυξήθηκε 113,14 W. Η θερμική και ηλεκτρική απόδοση υπολογίστηκε υψηλότερη κατά περίπου 0,14 % και 3,67% αντίστοιχα για το σύστημα PVT που λειτουργεί με νανορευστό έναντι συστήματος που χρησιμοποιεί νερό. Η εργασία του (Νίκου Νικολάου., 2018) είχε στόχο την μελέτη, βελτιστοποίηση και αξιολόγηση ενός συστήματος συμπαραγωγής με ενεργειακά και οικονομικά κριτήρια. Το εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από ένα Φ/Β πάνελ με ψύκτη στο πίσω μέρος, συζευγμένο με δοχείο αποθήκευσης, που τροφοδοτεί θερμικά μία αντλία θερμότητας για θέρμανση χώρου και έναν μετατροπέα (inverter) για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η καινοτομία αυτής της μελέτης έγκειται στην πολύπλευρη βελτιστοποίηση του συστήματος (multi-objective optimization), καθώς και στη χρήση νανορευστού (Cu, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) στο PVT. Διερευνήθηκε ο διαφορετικός θερμικός βαθμός απόδοσης του Φ/Β σε σχέση με την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ψύξης. Ενώ χρησιμοποιήθηκε ατμοποιητής εξαιτίας της ύπαρξης διαφορετικού ρευστού για την ψύξη του Φ/Β και θέρμανση του νερού στο θερμοδοχείο. Άλλες μελέτες εξέτασαν τα νανορευστά ως εργαζόμενο μέσο με σκοπό να επιτύχουν βελτιστοποίηση της ψύξης του πάνελ.

Τέλος στην εργασία του ο (Dupeyrat et al., 2014) επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού προγράμματος για την πρόβλεψη της απόδοσης ενός PVT, διενεργώντας μια σειρά από πειράματα με διαφορετικούς συλλέκτες και σε διαφορετικές συνθήκες. Στόχο είχε την ανάπτυξη ενός αξιολογού μοντέλου ελέγχου των λειτουργιών του συλλέκτη όπως αυτά που υπάρχουν για τα Φ/Β και τους θερμικούς συλλέκτες.

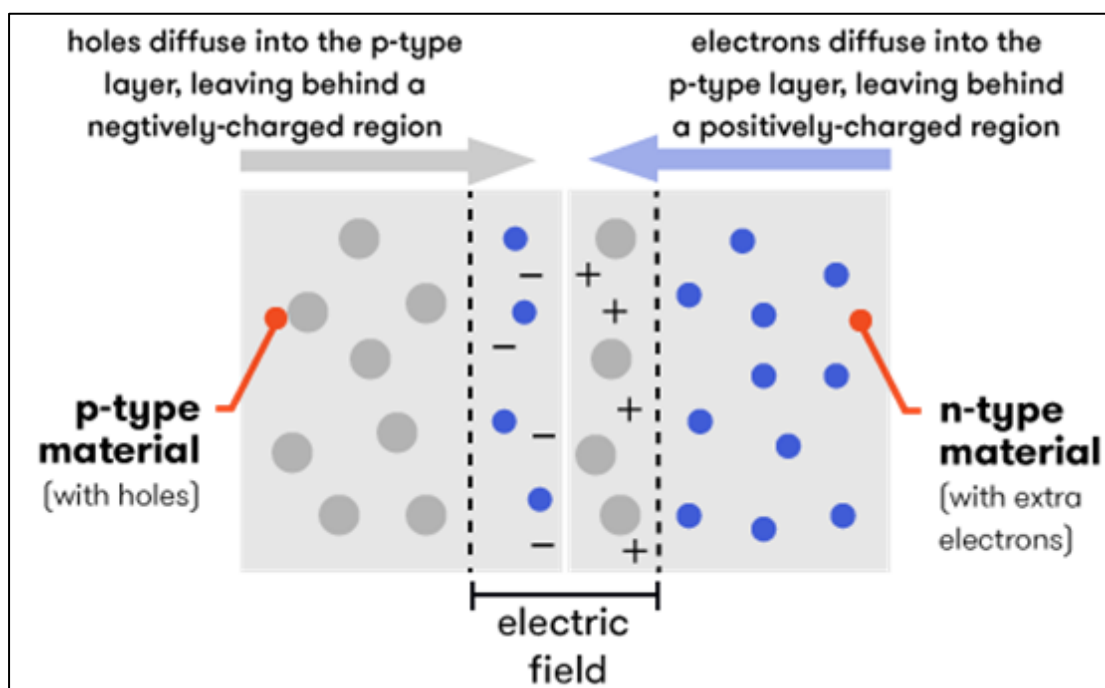
## 1.5 Θεωρητικό υπόβαθρο PVT

Ένα σύστημα PVT αποτελείται από ένα Φ/Β πάνελ, που απαρτίζεται από Φ/Β στοιχεία στο επάνω μέρος, τα οποία έχουν δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού συνήθως από κρυστάλλους πυριτίου (δίοδοι p-n, Si) και είναι τα σημαντικότερα στοιχεία τους (Εικόνα 2). Στο κάτω μέρος των κελιών προστίθεται βόριο (B), το οποίο μαζί με το

πυρίτιο (Si) δημιουργεί δεσμούς που οδηγούν στην ανάπτυξη θετικού φορτίου με ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στην εξωτερική στοιβάδα σε σχέση με το πυρίτιο (p).

Στο πάνω μέρος των κελιών προστίθεται συνήθως φώσφορος (P), δημιουργώντας δεσμούς με το πυρίτιο που οδηγούν στην ανάπτυξη αρνητικού φορτίου με ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα (n). Η περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στους ημιαγωγούς p και n ονομάζεται p-n επαφή. Όταν το κελί απορροφήσει ηλιακή ακτινοβολία έντασης (G) ελευθερώνονται ηλεκτρόνια στα δύο αυτά στρώματα, που ονομάζονται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Εξαιτίας των διαφορετικών φορτίσεων των δύο στρωμάτων τα ηλεκτρόνια θέλουν να μεταφερθούν από το στρώμα n στο στρώμα p, ενώ εμποδίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο στην p-n επαφή. Η ύπαρξη εξωτερικού κλειστού κυκλώματος (αγωγός) ωστόσο, παρέχει την απαραίτητη διαδρομή για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το στρώμα n στο p.

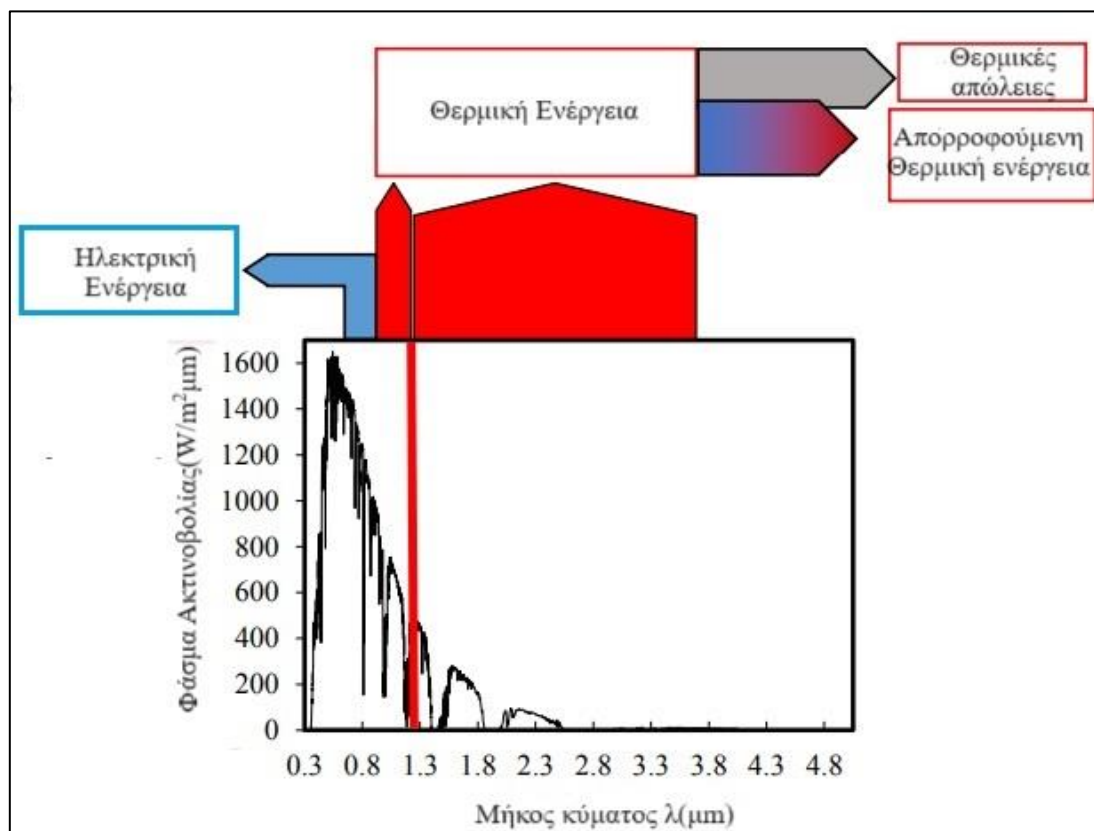
Κατά μήκος του στρώματος n λεπτά καλώδια επιτρέπουν τη διέλευση ηλεκτρονίων και αυτή η κίνηση προκαλεί τη δημιουργία ρεύματος, έντασης βραχυκυκλώσεως ( $I_{sc}$ ). Ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας και το υλικό κατασκευής του, ένα Φ/B στοιχείο δίνει τάση 0.5-1.0 Volt και ρεύμα 20-40 mA ανά  $cm^2$  της επιφάνειάς του.



*Εικόνα 2: Απεικόνιση του Φ/B φαινομένου δείχνει τα ηλεκτρόνια που κινούνται από την αρνητικά(n) φορτισμένη περιοχή στην θετικά φορτισμένη (p). (Asdrubali and Desideri, 2019)*

Οι ημιαγωγοί έχουν σχετικά μικρό ενεργειακό κενό και επομένως απορροφούν μεγάλο μέρος του συνολικού μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμική και η ηλεκτρική ενέργεια σε ένα Φ/B

στοιχείο με βάση το πυρίτιο αναφέρεται στην (Εικόνα 3). Η μικρότερη ενέργεια που απαιτείται για να απορροφηθούν τα φωτόνια και να μετατραπούν σε ηλεκτρισμό σε ένα φωτοβολταϊκό πυριτίου αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 1,1  $\mu\text{m}$ .



*Εικόνα 3: Ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια σε ένα Φ/Β στοιχείο με βάση το πυρίτιο.*

Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια σε φωτοβολταϊκά συστήματα με βάση το πυρίτιο είναι μεταξύ 5% και 20% ανάλογα την τεχνολογία (μονό-πολύ κρυσταλλικά κλπ.), ενώ η ενέργεια που απορρίπτεται ως θερμότητα στις Φ/Β μονάδες αποτελεί το 60% – 70% του συνόλου της ακτινοβολίας. Το κλάσμα της απορροφούμενης ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε θερμότητα στο Φ/Β στοιχείο αυξάνει τη θερμοκρασία του ενώ μειώνει την απόδοση του (κεφ.2.1) και τελικά απορρίπτεται στο περιβάλλον με ακτινοβόληση και μέσω συναγωγής ως θερμικές απώλειες. Σε μια μονάδα PVT αυτή η χαμηλής ποιότητας θερμότητα συλλέγεται στο πίσω μέρος του πάνελ όπου ένας θερμικός συλλέκτης την απορροφά και παράγει χρήσιμη θερμική ενέργεια μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου. Αυτό το ολοκληρωμένο σύστημα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα μεμονωμένο Φ/Β και ηλιακό θερμικό συλλέκτη.

- Συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρότερη έκταση σε αντίθεση με την εγκατάσταση συστημάτων μονής ενέργειας (Φ/Β και θερμικού συστήματος).
- Δυνητικά υψηλότερη απόδοση των Φ/Β λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας των κυψελών που επιτυγχάνεται με την ενεργή της ψύξης.
- Πιθανή μείωση του κόστους της μονάδας ενέργειας λόγω του ότι μόνο ένα σύστημα πρέπει να εγκατασταθεί και να συντηρηθεί.
- Συνεισφέρει στην μακροζωία και καλή λειτουργία του Φ/Β λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται στην επιφάνεια του.

Η ακτινοβολία συλλέγεται από ένα φωτοβολταϊκό τύπου πυριτίου όταν το  $\lambda$  (μήκος κύματος), είναι μικρότερο από την ελάχιστη ενέργεια που απαιτεί το Φ/Β και μετατρέπεται μερικώς σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η ακτινοβολία που απορροφάτε σε μεγαλύτερο  $\lambda$  μετατρέπεται μόνο σε θερμότητα. Μέρος αυτής της θερμότητας χρησιμοποιείται για θέρμανση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας.

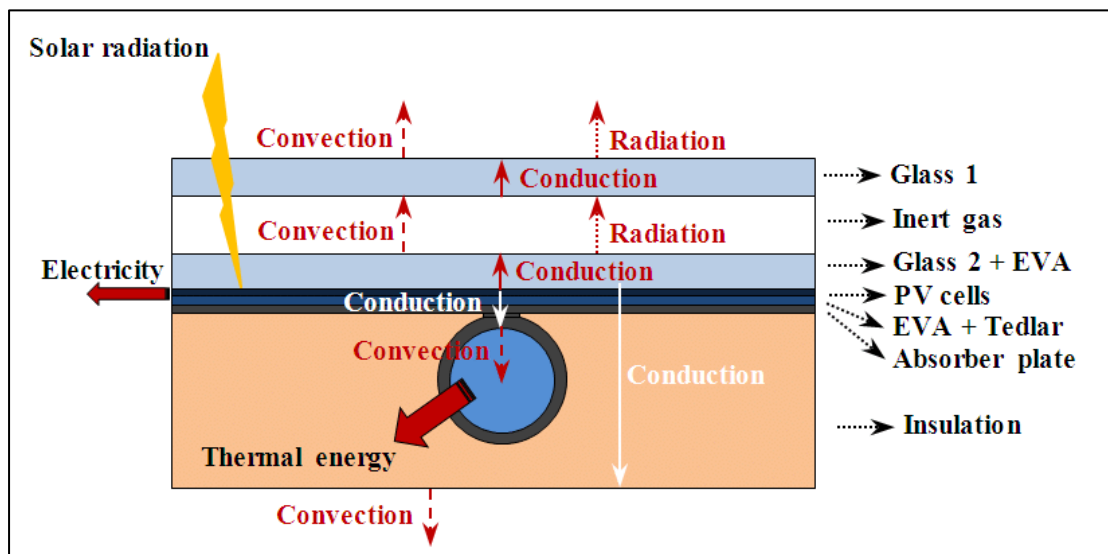
Το σύστημα που εξετάστηκε μπορεί να χωριστεί σε 2 τμήματα ως προς τις λειτουργίες του. Στο τμήμα του Φ/Β συλλέκτη το οποίο περιλαμβάνει τις λειτουργίες του φωτοβολταϊκού καθώς επίσης και την μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και σε αυτό της ψύξης με τη χρήση του νερού, το οποίο περιλαμβάνει τις θερμικές απώλειες από το εργαζόμενο μέσο και το πάνελ προς το περιβάλλον.

Μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη μετατρέπεται σε θερμότητα. Η θερμότητα αυτή απορροφάται από την επιφάνεια του Φ/Β με την χρήση νερού, που κυκλοφορεί σε σωλήνες στο πίσω μέρος της επιφάνειας του συλλέκτη και η απόληξη του αγωγού βρίσκεται στο σημείο χρήσης ή στο σημείο αποθήκευσης. Η κυκλοφορία του νερού στο εσωτερικό των αγωγών γίνεται αξιοποιώντας την φυσική ροή (θερμοσιφωνισμός) οπότε δεν υπάρχουν πρόσθετες απώλειες στο σύστημα, από την εξαναγκασμένη ροή του ψυκτικού υγρού με τη χρήση αντλίας.

Στην (Εικόνα 4) παρουσιάζεται ένας συμβατικός συλλέκτης PVT υγρού σε σωλήνα σε τομή. Ο συλλέκτης αποτελείται από ένα ή περισσότερα στρώματα κρυστάλλου (glass), μια Φ/Β μονάδα (PV cell), έναν θερμικό απορροφητή (αλουμίνιο, χαλκό ή πολυμερή πλάκα) ο οποίος εφάπτεται σε χάλκινους σωλήνες ή ένα πλέγμα από σωλήνες και περιβάλλεται από μονωτικό υλικό (EVA, Tedlar).

Οι μονάδες PVT μπορούν να λειτουργήσουν με διάφορα ψυκτικά υγρά, διαλείμματα και υπάρχουν διάφορα σχέδια θερμοαπορροφητών, μεταξύ αυτών το πιο διαδεδομένο σχέδιο συλλέκτη για οικιακή χρήση είναι αυτό με κάλυμμά μονού τζαμιού και σωλήνες από όπου διέρχεται το ψυκτικό ρευστό.

Η θερμική απόδοση αυτού του τύπου συλλέκτη κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 50% και 60%.



Εικόνα 4: PVT σε τομή όπου απεικονίζεται ο μηχανισμός της συναγωγής και ακτινοβολίας όπως επίσης και τα τμήματα του συλλέκτη. (Zhetong, 2019)

Η ωφέλιμη θερμική ισχύς ( $W$ ) ενός ηλιακού συλλέκτη είναι η διαφορά μεταξύ της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας και των συνολικών θερμικών απωλειών από τον συλλέκτη και υπολογίζεται από την (εξίσωση 1):

$$\dot{Q} = GT * Ac * FR * (\tau * \alpha) - AC * FR * UL * (\bar{\theta} - \theta_{\alpha}) \quad (1)$$

- $AC$ : Η επιφάνεια συλλέκτη ( $m^2$ )
- $GT$  ( $W/m^2$ ): Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια.
- $FR$ : Ο συντελεστής θερμικής απολαβής.
- $\tau$ : Ο συντελεστής διαπερατότητας καλύμματος.
- $\alpha$ : Ο συντελεστής απορροφητικότητας απορροφητήρα.
- $UL$  ( $\frac{W}{m^2K}$ ): Ο συνολικός ισοδύναμος συντελεστής θερμικών απωλειών.
- $\bar{\theta} = (\frac{\theta_{in} + \theta_{out}}{2})$  ( $^{\circ}C$ ): Η μέση θερμοκρασία επιφάνειας συλλέκτη
- $\theta_{\alpha}$  ( $^{\circ}C$ ): Η θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- $\theta_{in} \& \theta_{out}$  ( $^{\circ}C$ ): Η θερμοκρασίες εισόδου & εξόδου του ρευστού.

Οι απώλειες θερμότητας από το κάτω μέρος του συλλέκτη που διέρχονται τη μόνωση μεταφέρονται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας στο περιβάλλον.

Επειδή η θερμοκρασία του αέρα στην κάτω πλευρά του πλαισίου είναι χαμηλή, οι απώλειες που προκύπτουν από ακτινοβολία και συναγωγή είναι μικρότερες σε σύγκριση με τις απώλειες λόγω ροής θερμότητας από τη μόνωση. Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη είναι η αναλογία της ωφέλιμης θερμικής ισχύς προς την ακτινοβολία που πέφτει στον συλλέκτη δίνεται από την (εξίσωση 2):

$$n = \frac{\dot{Q}}{AC*GT} \quad (2)$$

- $\dot{Q}$ : Ωφέλιμη θερμική ισχύς (W)
- AC: Η επιφάνεια συλλέκτη ( $m^2$ )
- GT ( $W/m^2$ ): Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια.

Τα  $F_{R\tau\alpha}$ ,  $F_{RU_L}$  είναι χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία δίνονται από το κατασκευαστή (Πίνακα 1). Το  $F_{R\tau\alpha}$  είναι η ικανότητα εκμετάλλευσης της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας, το  $F_{RU_L}$  είναι το σύνολο των θερμικών απωλειών στο περιβάλλον.

*Πίνακας 1: Τιμές ( $F_{R\tau\alpha}$ ),  $F_{RU_L}$  ανά τύπο συλλέκτη*

Περιγραφή ηλιακού συλλέκτη νερού	$F_{R(\tau\alpha)}$	$F_{RU_L}[W/m^2, ^\circ C]$
Μαύρο χρώμα, 1 υαλοπίνακα	0,82	7,5
Μαύρο χρώμα, 2 υαλοπίνακες ή επιλεκτική επιφάνεια με 1 υαλοπίνακα	0,75	5
Σωλήνες κενού-αέρος	0,57	1,82
Απλός συλλέκτης (πλαστικοί σωλήνες) χωρίς κάλυμμα και μόνωση (ταχύτητα ανέμου 2,2 m/s)	0,86	21,5

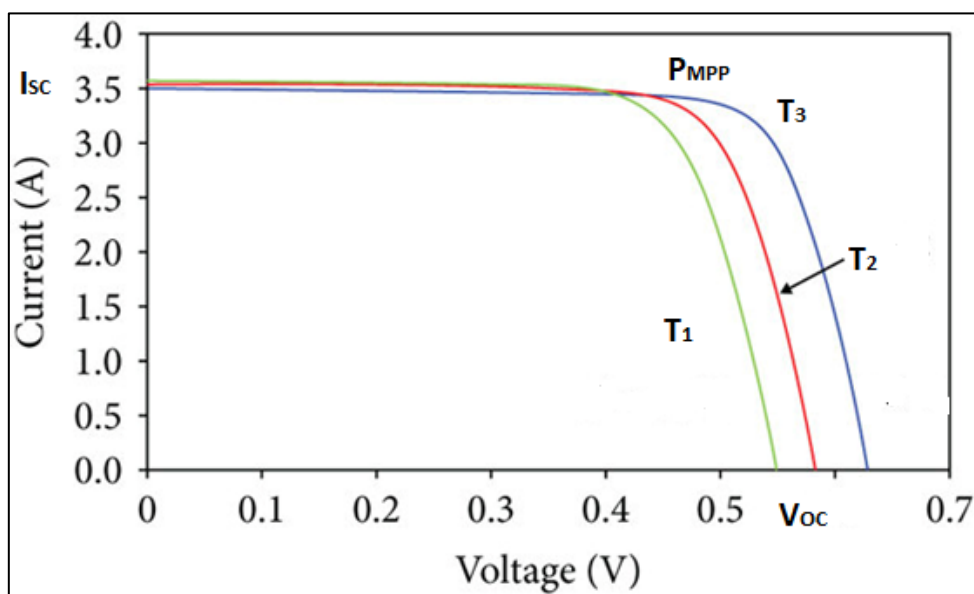
Όπως όλα τα συστήματα που περιλαμβάνουν ημιαγωγούς, οι ηλιακές κυψέλες επηρεάζονται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Όταν ένα φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση του ενεργειακού διάκενου(EG) του υλικού της διόδου προσκρούσει σε αυτή, απορροφάται με χημικό δεσμό στο υλικό και δημιουργεί ζεύγος ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρονίων και οπών) που κατανομούνται στη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας αντίστοιχα, δημιουργώντας διαφορά δυναμικού, κίνηση ηλεκτρονίων και ως εκ τούτου παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, κατά τη θερμική κίνηση των φορέων αυτών, υπάρχει η πιθανότητα επανασύνδεσης τους λόγω των αντίθετων φορτίων που φέρουν, μειώνοντας το συνολικό παρεχόμενο ρεύμα ενώ η διαφορά δυναμικού επηρεάζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία αυξάνει το επίπεδο αταξίας του συστήματος. Οι απώλειες που προκαλούνται λόγω του μηχανισμού αυτού ονομάζονται απώλειες επανασύνδεσης.

Σε μία ηλιακή κυψέλη, η παράμετρος που επηρεάζεται περισσότερο από την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$  η οποία μειώνεται



(Διάγραμμα 3). Το ρεύμα βραχυκυκλώματος,  $I_{sc}$ , αντιθέτως αυξάνεται ελαφρώς με τη θερμοκρασία, καθώς η ενέργεια του διάκενου ζώνης σθένους,  $E_G$ , μειώνεται και περισσότερα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να δημιουργήσουν ζεύγη e-h παρόλα αυτά η αύξηση αυτή είναι δυσανάλογη και δεν επηρεάζει την συνολική μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης.

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς ( $P_{max}$ ) εμφανίζεται στα σημεία  $I_{MPP}$  και  $V_{MPP}$ . Συνεπώς τα Φ/Β πάνελ μονής διόδου p-n δεν μπορούν να επιτύχουν μεγάλο ποσοστό μετατροπής του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η έκθεση του Φ/Β σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνει και το χρόνο ζωής των υλικών που βρίσκονται στο πάνελ, προκαλώντας τους πρόωρη γήρανση και αστοχίες (ράγισμα κυψέλης, αποχρωματισμό του στοιχείου). Οι απώλειες εξαιτίας της δυνατότητας απορρόφησης περιορισμένου φάσματος της ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με τις απώλειες από την αποκοπή των φωτονίων δημιούργησαν το όριο μέγιστης μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική σε ένα ημιαγωγό, Shockley-Queisser με όριο το 32.3% για Φ/Β πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου (25°C). Συγκεκριμένα στην μελέτη που έκαναν οι (Thong et al., 2016) η συνεχής έκθεση ενός πάνελ σε απευθείας ηλιακή ακτινοβολία οδηγεί σε μείωση της ηλεκτρικής παραγωγής έως και 23,69 %.



*Διάγραμμα 3: I-V καμπύλη Φ/Β. Η μπλε καμπύλη είναι η καμπύλη για την θερμοκρασία αναφοράς (25 °C) ενώ οι άλλες δύο καμπύλες αφορούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος μειώνεται με το θερμοκρασία ενώ το ρεύμα βραχυκυκλώματος αυξάνεται ελαφρώς αλλά αυτή η επίδραση είναι μικρή.*

Η ηλεκτρική απόδοση του Φ/Β κελιού προκύπτει, ως η μέγιστη ισχύς εξόδου διαιρούμενη με το προσπίπτουσα ακτινοβολία και υπολογίζεται από τους κατασκευαστές με βάση υπάρχουσα πρότυπα, για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C και προσπίπτουσα ακτινοβολία 1000 W/m<sup>2</sup>, με ηλιακό φάσμα παραπλήσιο με αυτό που έχει ο ήλιος το μεσημέρι (AM 1.5 air mass coefficient).

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος επηρεάζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας καθώς το ενεργειακό χάσμα ( $E_g$  μειώνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως φαίνεται στην **εξίσωση 3**. (Varshni, 1967))

$$E_g = E_g(0) - \frac{aT^2}{T+b} \quad (3)$$

- $a$  και  $b$  είναι ιδιότητες υλικού και ισούνται με  $4,73 \cdot 10^{-4}$  eV/K και  $636$  K<sup>-1</sup> αντίστοιχα για πυρίτιο και η θερμοκρασία δίνεται σε K.
- $E_g(0)$ : Το ενεργειακό χάσμα για  $T=0$  K

Η μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$  που προκύπτει από την αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται στην **εξίσωση 4** και προκαλείται από τον ρυθμό επανασύνδεσης των φορέων και την αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας.

$$V_{OC} = \frac{K_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} - 1 \right) \quad (4)$$

$K_B$  (J/K): Η σταθερά του Μπόλτζμαν η οποία ισούται  $1.38 \times 10^{-23}$ .

- $T$  (K): Η θερμοκρασία σε κέλβιν.
- $q$ : Το στοιχειώδες φορτίο ηλεκτρονίου το οποίο ισούται  $1.6 \times 10^{-19}$  C.
- $I_{sc}$  (A): Η τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώματος σε αμπέρ.
- $I_0$ : Το ρεύμα κορεσμού για ένα ηλιακό κύτταρο.

Για ηλιακές κυψέλες πυριτίου  $\gamma = 3$  και  $V_g = 1,2$  V, επομένως ο λόγος της θερμοκρασίας προς την τάση ανοιχτοκυκλώματος ισούται με  $\sim -2,2$  mV/K.

Η μέγιστη ισχύς  $P_{MPP}$  (δίνεται στο σημείο που η κυψέλη έχει  $V_{MPP}$  και  $I_{MPP}$ ) και εκφράζεται στην **εξίσωση 5**, εμφανίζει επίσης εξάρτηση από τη θερμοκρασία λόγω της ταχύτητας που πραγματοποιούνται οι ανασυνδιασμοί, την τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Ως αποτέλεσμα, η ισχύς μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας παρά την μικρή αύξηση της έντασης του ρεύματος βραχυκυκλώματος κατά  $\sim -0.4$  %/K. (Chen, 2011)

$$P_{MP} = V_{OC} I_{sc} \left( 1 - \frac{1 + \ln(\ln(I_{sc} - I_0))}{\ln(I_{sc} - I_0)} \right) \quad (5)$$

- $V_{OC}$  (V): Η τάση ανοιχτού κυκλώματος
- $I_{sc}$ (A): Η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης
- $I_0$ : Το ρεύμα κορεσμού για ένα ηλιακό κύτταρο.

Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας μπορεί να γραφτεί σαν γραμμική εξίσωση με βάση την **εξίσωση 6**.

$$\eta(T) = \eta_0(1 - \beta_{PV}(T - T_0 + \gamma G \log(G))) \quad (6)$$

- $\eta_0$ : Η απόδοση της ηλιακής κυψέλης που λειτουργεί σε τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, (25°C και 1000 W/m<sup>2</sup> ακτινοβολίας)
- $T_0$ : Η θερμοκρασία αναφοράς του Φ/Β (25°C)
- $\gamma G$  : ο συντελεστής έντασης του ηλιακού φωτός σε μια κυψέλη και θεωρείται από την βιβλιογραφία μηδέν για ακτινοβολία μη δυναμικά μεταβαλλόμενη.
- $\beta_{PV}$ : Ο συντελεστής θερμοκρασίας του ηλιακού κυττάρου (0,4 %/K για κελιά κρυσταλλικής σιλικόνης) ορίζεται από την **εξίσωση 7**

$$\beta_{PV} = \left( \frac{1}{T' - T_0} \right) \quad (7)$$

- Το  $T_0$  είναι η τυπική θερμοκρασία δοκιμής των 25 °C.
- Όπου  $T'$  είναι η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου για την οποία η απόδοση ισούται με μηδέν.

Η παραγόμενη ισχύς ενός Φ/Β **P(Watt)** είναι το γινόμενο του ρεύματος **I(Ampere)** και της τάσης **V(Volt)** που παράγει το φωτοβολταϊκό μέσα από την **εξίσωση 8**.

$$P = V \cdot I \quad (8)$$

Ο βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β (PV) δίνεται από την **εξίσωση 9**.

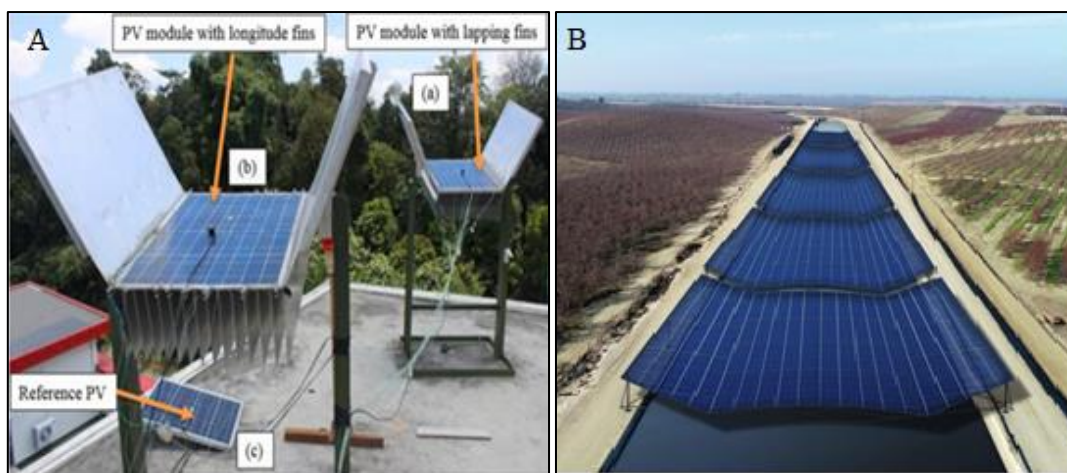
$$\eta (\%) = \frac{P \cdot G}{A} \quad (9)$$

- $P$ (W): Η παραγόμενη ηλεκτρικής ισχύς
- $G$ (W/m<sup>2</sup>): Η ηλιακή ακτινοβολία
- $A$ (m<sup>2</sup>): Η επιφάνεια του Φ/Β συλλέκτη

## 1.6 Είδη ψύξης φωτοβολταϊκών

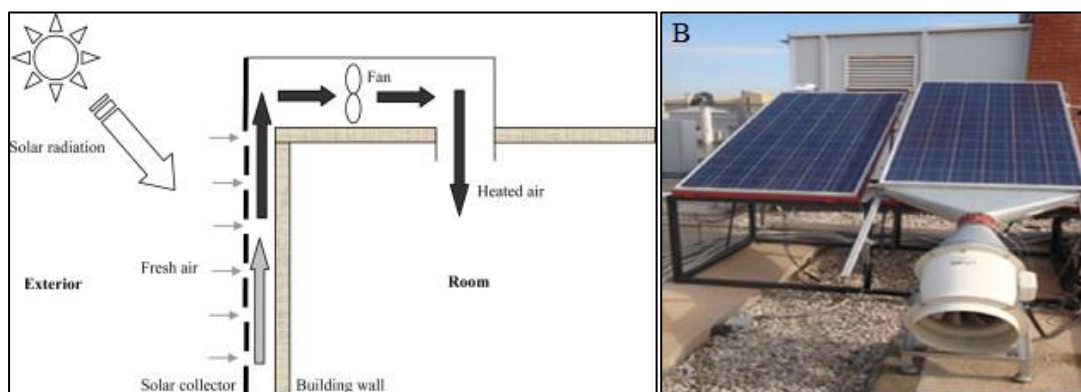
Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την ψύξη των φωτοβολταϊκών πάνελ. Είτε αποθηκεύοντας την παραγόμενη θερμική ενέργεια και αξιοποιώντας την έπειτα, είτε με την απόρριψη της στο περιβάλλον παθητικά (Εικόνα 5α) με εγκατάσταση πτερυγίων στο πίσω μέρος του πάνελ, τα οποία ψύχονται από τον αέρα που διέρχεται από το

εσωτερικό τους, απάγοντας την θερμότητα. Παθητικές μέθοδοι ψύξης επίσης βρίσκουν εφαρμογή όπου είναι δυνατό να αξιοποιηθούν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής για φυσική ψύξη. Για παράδειγμα η τοποθέτηση τους πάνω από αρδευτικά κανάλια (Εικόνα 5β), ωφελεί μέσω του μικροκλίματος που δημιουργείται κοντά στην επιφάνεια του νερού, με σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλοντα χώρο εξαιτίας της εξάτμισης του νερού, ενώ μειώνει τον ρυθμό εξάτμισης ιδιαίτερα σε περιοχές που εμφανίζουν φαινόμενα λειψυδρίας.



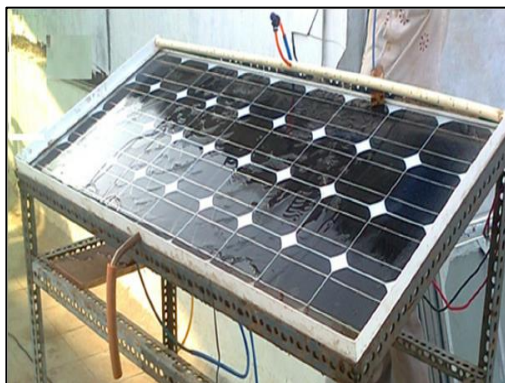
**Εικόνα 5:** α) Παθητική ψύξη με χρήση πτερυγίων στο πίσω μέρος του πάνελ (Elbreki et al., 2021) β) Παθητική ψύξη μέσω του μικροκλίματος που δημιουργεί η εξάτμιση του νερού. (“Solar Aquagrid,(no date)” )

Άλλα συστήματα ψύξης χρησιμοποιούν βεβιασμένη κίνηση του αέρα (Εικόνα 6β ) με την χρήση ανεμιστήρα ο οποίος αυξάνει την φυσική ροή του αέρα στις ψήκτρες επιτυγχάνοντας καλύτερη απαγωγή θερμότητας. Παρόμοιες νέες εγκαταστάσεις σε γυάλινα κτήρια (Εικόνα 6α) χρησιμοποιούν ροή αέρα ανάμεσα στα πάνελ και τους εσωτερικούς τοίχους για να επιτύχουν μείωση της θερμοκρασίας του χώρου και ψύξη των πάνελ ενώ η καταναλισκόμενη ενέργεια παρέχεται από την ηλεκτρική παραγωγή των φωτοβολταϊκών.



**Εικόνα 6:** α) Βεβιασμένη ψύξη του πάνελ με την χρήση ανεμιστήρα. (Quesada et al., 2012)β) Ψύξη του πάνελ με ροή αέρα στο εσωτερικό γυάλινων κτηρίων. (Pathak et al., 2022)

Εναλλακτικές μέθοδοι ψύξης χρησιμοποιούν δοχεία τοποθετημένα στο πίσω μέρος του πάνελ τα οποία περιέχουν στερεά με χαμηλό σημείο τήξης, (παραφίνες, οξειδία γραφενίου) τα οποία καθώς αλλάζουν φάση (στερεή σε υγρή) απάγουν θερμότητα από το πάνελ (Εικόνα 7). Τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα σε ψυχρές περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη διακύμανση της θερμοκρασίας και ελλοχεύει ο κίνδυνος το ρευστό να παγώσει και να προκληθούν βλάβες από την συστολή και διαστολή του δοχείου.



*Εικόνα 7: Ψύξη με υλικό αλλαγής φάσης. (Bellini, 2020) (“Lowering PV panel temperature with phase change materials – pv magazine International,” 2020.)*



*Εικόνα 8: Ψύξη με ρευστό που ρέει στην επιφάνεια του συλλέκτη. (Raval et al., 2014)*

Επιπλέον υπάρχουν μέθοδοι οι οποίοι ενώ χρησιμοποιούν νερό για την επιφανειακή ψύξη, δεν συγκεντρώνουν αυτό το νερό με σκοπό την περαιτέρω αξιοποίηση του καθώς αυτό ρέει στην επιφάνεια του συλλέκτη και αποβάλλεται απευθείας στο περιβάλλον (Εικόνα 8). Αυτή η μέθοδος ενώ έχει το πλεονέκτημα ότι ψύχει απευθείας την επιφάνεια και συνεπώς πιο αποδοτικά, καθαρίζοντας ταυτόχρονα το πάνελ από διάφορες επικαθήσεις από το περιβάλλον. Είναι μη συμφέρουσα καθώς το ρευστό δεν αξιοποιείται, ενώ το νερό διαθλά την ακτίνες του ήλιου και απορροφά ένα μέρος της ακτινοβολίας η οποία θα μπορούσε να απορροφηθεί από το Φ/Β.

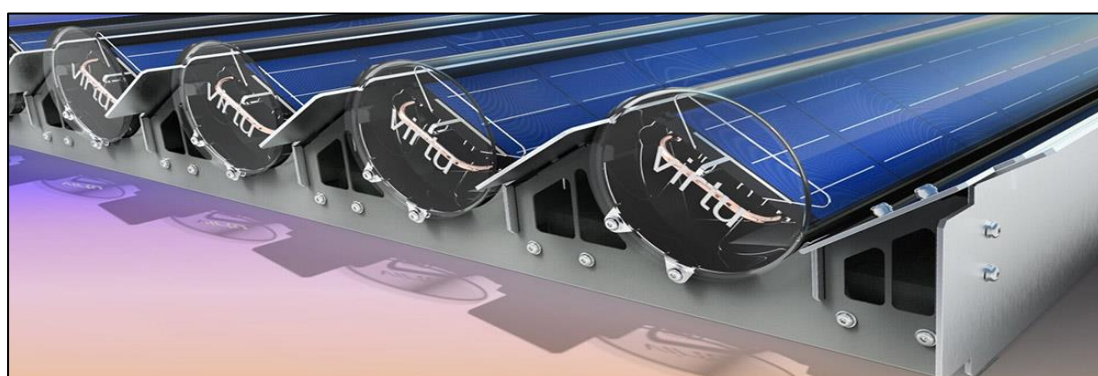
Τα συστήματα που θα εξεταστούν χρησιμοποιούν ρευστά για ψύξη με έμφαση στο είδος του υγρού, αλλά και στο τρόπο με τον οποίο αποθηκεύεται.

Οι συλλέκτες υγρού PVT είναι γενικά η πιο αποδοτική από άλλες τεχνολογίες PVT (π.χ. αέρα) λόγω του υψηλότερου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που επιτυγχάνεται στους αγωγούς ψύξης και της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας του ρευστού έναντι των αερίων. Σε ένα σύστημα PVT το ρευστό μπορεί να κυκλοφορεί είτε με φυσική ροή ή με εξαναγκασμένα κυκλοφορία και η απαιτούμενη ισχύς της

αντλίας είναι γενικά πολύ χαμηλότερη από την ισχύ που απαιτείται για την κυκλοφορία του αέρα στους συλλέκτες με την χρήση ανεμιστήρα.

Έχουν προταθεί πιο καινοτόμες διατάξεις συλλεκτών για την ψύξη ενός PVT. Όπως συλλέκτες ελεύθερης ροής (Εικόνα 9) όπου το ρευστό ρέει στο χώρο μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου καλύμματος με σκοπό να επιτευχθεί πιο ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στα ηλιακά στοιχεία και άμεση απαγωγή θερμότητας.

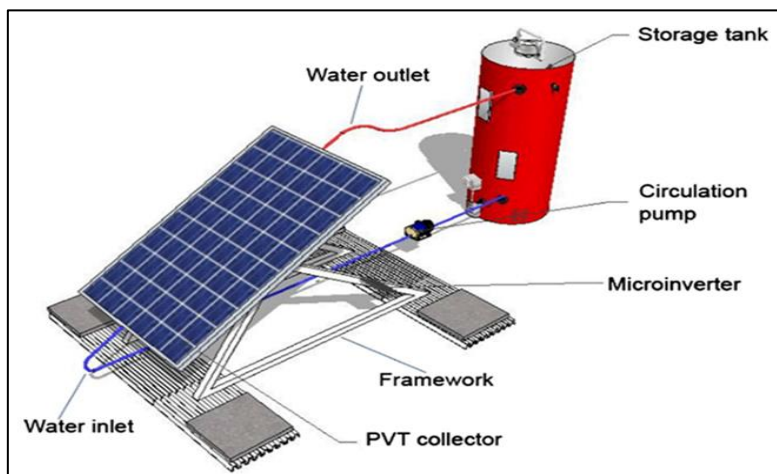
Τα πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι επιτυγχάνεται ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλους τους συλλέκτες, δεν εμφανίζονται απώλειες μεταφοράς, γίνεται εκμετάλλευση μεγαλύτερου μέρους της διαθέσιμης ακτινοβολίας λόγω του σχεδιασμού ενώ είναι πιο εύκολη η παρακολούθηση των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό.



Εικόνα 9: Συλλέκτες της εταιρείας Virtu όπου το ρευστό ρέει στο εσωτερικό του Φ/Β συλλέκτη. (“Products — Naked Energy,” (no date). )

### 1.6.1 Υδρόψυξη

Η χρήση νερού ως ψυκτικό μέσο σε κλειστό κύκλωμα (Εικόνα 10) αποτελεί μια ενεργητική προσέγγιση ψύξης όπου γίνεται μεταφορά της θερμότητας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κυψέλης, στο ψυκτικό μέσο (νερό) μέσω συναγωγής από το πίσω μέρος του πάνελ στο δοχείο όπου και διέρχεται το ρευστό. Το ζεστό νερό έπειτα χρησιμοποιείται για άλλες πρόσθετες χρήσεις ή αποβάλλεται στο περιβάλλον. Στο πείραμα του (Ozgoren et al., 2013) συγκρίνονται πειραματικά δύο πάνελ, το πρώτο χωρίς προσθήκη και το δεύτερο με την προσθήκη ενός σωλήνα στο πίσω μέρος του συλλέκτη από τον οποίο διέρχεται το νερό, τον οποίο και ψύχει. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση μετατροπής της ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια των φωτοβολταϊκών κυψελών αυξήθηκε από 11,5% σε 13,6%, και το ποσοστό της θερμικής απόδοσης ήταν το 51% της συνολικά παραγόμενης ενέργειας.



**Εικόνα 10: PVT με δοχείο αποθήκευσης και αντλία ανακυκλοφορίας. (“Sustainability Experimental Evaluation of the Thermoelectrical Performance of Photovoltaic-Thermal Systems with a Water-Cooled Heat Sink,” 2022.)**

Ένα τυπικό σύστημα PVT αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη ο οποίος φέρει μία ή παραπάνω στρώσεις γυαλιού στο πάνω μέρος, ένα θερμικό απορροφητή (δοχείο κατασκευασμένο από αλουμίνιο, χαλκός ή πολυμερές), με σωλήνες από όπου διέρχεται το ρευστό και ένα στρώμα θερμομόνωσης εξωτερικά. Ανάμεσα στο Φ/Β πάνελ και το σύστημα ψύξης μπορεί να παρεμβάλετε ένα θερμοαγώγιμο υλικό (πάστα) για να βελτιστοποιηθεί η ροή θερμότητας.

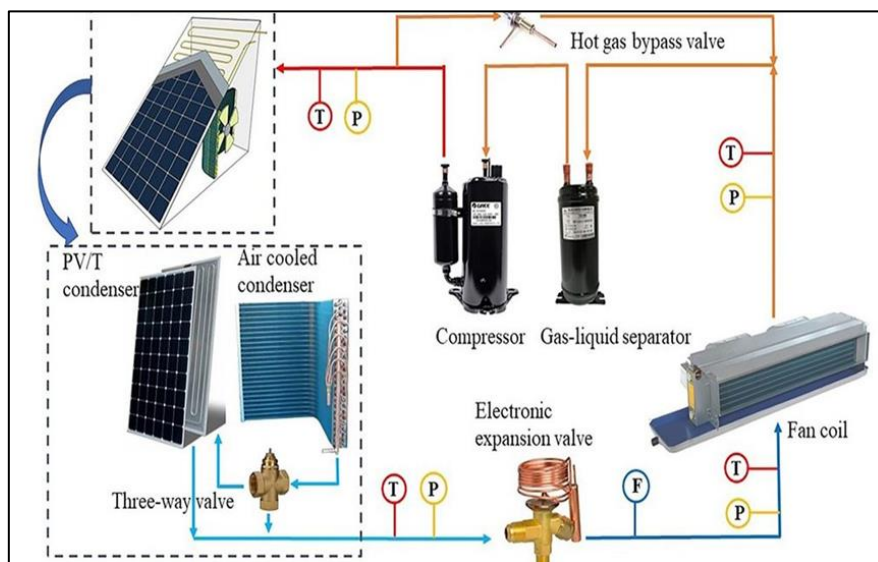
Τέλος περιλαμβάνει δοχείο συλλογής του ρευστού διαστασιολογημένο ανάλογα την χρήση (ZNX, θέρμανση χώρων) και αν πρόκειται να θερμανθεί περεταίρω ή να χρησιμοποιηθεί απευθείας μπορεί να φέρει μια ηλεκτρική αντίσταση.

Οι θερμικές, ηλεκτρικές αποδόσεις και οι θερμοκρασίες λειτουργίας τέτοιων συστημάτων PVT επηρεάζονται κυρίως από τα παρακάτω:

- Τον τύπο του ρευστού μεταφοράς θερμότητας.
- Τον ρυθμό ροής ρευστού.
- Τα γεωγραφικά και κλιματικά στοιχεία της περιοχής που θα τοποθετηθεί.
- Το αν ο συλλέκτης είναι καλυμμένος με ένα ή δυο στρώματα γυαλιού και τις ιδιότητες του καλύμματος (διάθλαση, διαπερατότητα).
- Τον τύπο των ηλιακών κυψελών που χρησιμοποιούνται.
- Τις ιδιότητες του θερμοαπορροφητή υλικό και γεωμετρία, (π.χ. διάμετρος και διάταξη σωλήνα) η οποία καθορίζει την κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια απορρόφησης.
- Ο τρόπος σύνδεσης του θερμοαπορροφητή με το Φ/Β πάνελ έτσι ώστε να απάγεται επαρκώς η θερμότητα.
- Στην κατασκευή ενός PVT όλοι αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να εξασφαλιστεί μια καλή θερμική και ηλεκτρική απόδοση.

### 1.6.2 Ψύξη με ψυκτικό αέριο

Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση ψυκτικού αερίου ως ψυκτικού μέσο, εμφανίζει μεγαλύτερη βελτίωση στην ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών καθώς χρησιμοποιούνται ουσίες με μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα σε σχέση με το νερό. Παρά τη δυνατότητα αυτή, η πρόσφατη έρευνα για τη χρήση ψυκτικών ουσιών ήταν περιορισμένη λόγω των επιπτώσεων στο περιβάλλον (καταστροφή του όζοντος) εξαιτίας των αερίων που χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στο παρελθόν και περιείχαν χλωροφθοράνθρακες (Πτητικές οργανικές ενώσεις, με μικρότερη πυκνότητα από τον αέρα που όταν βρεθούν στην στρατόσφαιρα, διασπώνται από την υπεριώδη ακτινοβολία απελευθερώνοντας χλώριο, το οποίο με την σειρά του αντιδρά με το όζον και το καταστρέφει). Η χρήση φυσικών ψυκτικών ουσιών όπως η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) θα ήταν προτιμότερη, καθώς αποτελούν περιβαλλοντικά βιώσιμες λύσεις.



*Εικόνα 11: Διάταξη PVT με χρήση ψυκτικού αερίου όπου η εγκατάσταση φέρει συμπυκνωτή, βαλβίδες κυκλοφορίας και διαχωρισμού, σύστημα απομάκρυνσης της υγρασίας από το κύκλωμα ψύξης, εναλλάκτη θερμότητας. (Tsai, 2014)*

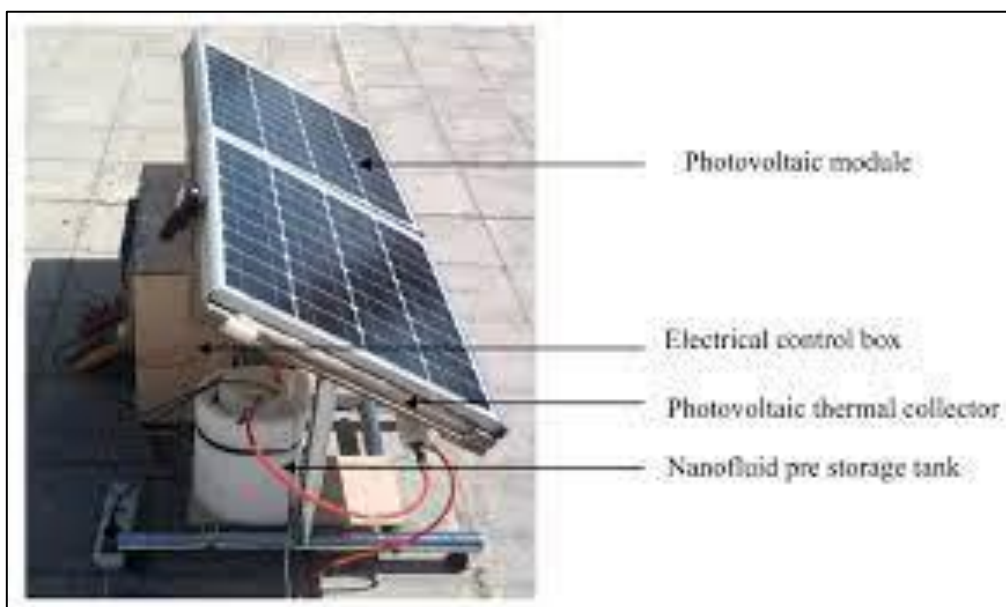
Επίσης, μελετήθηκε (Tsai, 2014) ένα σύστημα PVT (Εικόνα 11) με υποβοήθηση από αντλία θερμότητας, με βάση ψυκτικό υγρό ως εργαζόμενο μέσο, ενώ οι μετρήσεις λήφθηκαν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η εγκατάσταση αποτελούνταν από σαράντα οκτώ Φ/Β στοιχεία, τοποθετημένα σε δύο σειρές με μία μεταλλική κατασκευή στήριξης. Έγινε χρήση Τετραφθοροαιθανίου ( $\text{R134}$ ) σε χάλκινους σωλήνες στο πίσω μέρος του πάνελ, μονωμένους με αφρό πολυστερινίου και μια δεξαμενή νερού 200 λίτρων, από την οποία διερχόταν το ρευστό για να θερμάνει νερό το οποίο ήταν αποθηκευμένο. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν θετικά αποτελέσματα τόσο για την αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής αλλά και την θέρμανση του νερού, χωρίς όμως να δίνονται τα στοιχεία παραγωγής χωρίς ψύξη, για να γίνει σύγκριση και αξιολόγηση των συμπερασμάτων. Τέτοια συστήματα δεν είναι διαδεδομένα καθώς η ανάγκη



ύπαρξης ξεχωριστού δοχείου και κυκλώματος για την αποθήκευση και την κυκλοφορία του αερίου από το ρευστό προς θέρμανση, τα επιπλέον εξαρτήματα όπως συμπυκνωτής, βαλβίδες κυκλοφορίας, διαχωρισμού, σύστημα απομάκρυνσης της υγρασίας από το κύκλωμα ψύξης, καθώς και οι διαφορετικές προδιαγραφές που πρέπει να πληροί το σύστημα με τις επακόλουθες ανάγκες συντήρησης ανεβάζουν κατά πολύ το κόστος, τα οφέλη είναι δυσανάλογα με αποτέλεσμα να είναι μην είναι ανταγωνιστικά στην αγορά.

### 1.6.3. Ψύξη με νανορευστό

Τα νανορευστά είναι ρευστά που περιέχουν ένα διάλυμα σωματιδίων μεγέθους της τάξης νανομέτρων (1–100 νανόμετρα), γνωστά ως νανοσωματίδια. Αυτά τα νανορευστά περιέχουν συνήθως διαλύματα μετάλλων, οξειδία, καρβίδια ή νανοσωλήνες άνθρακα. Παρουσιάζουν ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα και συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με το νερό. Η ενσωμάτωση νανορευστών σε συστήματα PV-T, είναι μια προηγμένη μέθοδος που παρέχει βελτιωμένη διαχείριση της θερμότητας, αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος.



*Εικόνα 12: Πειραματική εγκατάσταση PVT με χρήση νανορευστού. Στο σχήμα φαίνεται το Φ/Β, το δοχείο αποθήκευσης του νανορευστού, η αντλία κυκλοφορίας του ρευστού και ο θερμικός συλλέκτης. (Rejeb et al., 2016)*

Ο (Rejeb et al., 2016) ανέλυσε πειραματικά και αριθμητικά την απόδοση μιας μονάδας PVT μονό-κρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιώντας ένα διάλυμα που περιείχε αιθυλενογλυκόλη με νερό ως ρευστά βάση και νανοσωματίδια, οξειδία του αργίλου ( $Al_2O_3$ ) και χαλκό (Cu) σε διαφορετικές συγκεντρώσεις για κάθε δοκιμή με σκοπό να βρει τη βέλτιστη δοσολογία (0.1, 0.2 και 0.4 wt%). Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων μετά από κάποιο ποσοστό, οδηγεί σε αντίθετα

αποτελέσματα, δηλαδή υποβάθμιση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του νανορευστού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το διάλυμα χαλκού με νερό  $\text{Cu}/\text{H}_2\text{O}$  σε 0,4 wt% έχει καλύτερη θερμική απόδοση, έναντι του νερού και επιτυγχάνει ποσοστά μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ενέργεια ίσο με 76.88% και ηλεκτρική απόδοση 13,5%.

### **1.7 Μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης ενός θερμικού φωτοβολταϊκού.**

Οι θερμικές και ηλεκτρικές αποδόσεις καθώς και οι θερμοκρασίες λειτουργίας τέτοιων συστημάτων επηρεάζονται κυρίως από τον τύπο του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, το ρυθμό ροής του ρευστού, τον αριθμό των στρωμάτων γυαλιού του συλλέκτη, τον τύπο των ηλιακών κυψελών που χρησιμοποιούνται και τις ιδιότητες του θερμοαπορροφητή (υλικό και γεωμετρία) καθορίζοντας την κατανομή της θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στην επιφάνεια απορρόφησης. Σημαντικό είναι να γίνει σύνδεση του θερμοαπορροφητή και της  $\Phi/B$  μονάδας με ένα θερμοαγώγιμο υλικό έτσι ώστε να επιτευχθεί μια καλή θερμική και ηλεκτρική απόδοση.

Το ψυκτικό μέσο μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Επίπεδοι συλλέκτες PVT που λειτουργούν με ρευστό περιέχουν κυρίως νερό ή μείγμα νερού και γλυκόλης για την αποφυγή της πήξης του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ οι συλλέκτες PVT που χρησιμοποιούν, αέρα παρέχουν μια απλούστερη λύση στην ψύξη των ηλιακών κυψελών. Ο αέρας μπορεί να ρέει με φυσική κυκλοφορία, ή εξαναγκασμένα με καλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας αλλά καταναλώνοντας μεγάλα ποσά ενέργειας από τον ανεμιστήρα.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στα συστήματα αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερος από αυτόν του νερού, επομένως ο σχεδιασμός των ψηκτρών έχει μεγάλη επίδραση στον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας σε αερόψυκτους συλλέκτες.

Οι συλλέκτες υγρού PVT είναι γενικά πιο αποδοτικοί από τους αντίστοιχους PVT αέρα λόγω του καλύτερου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που επιτυγχάνεται στους αγωγούς ψύξης. Σε ένα υγρό σύστημα PVT το νερό μπορεί να κυκλοφορεί είτε με φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία και η απαιτούμενη ισχύς άντλησης είναι γενικά πολύ χαμηλότερη από την ισχύ του ανεμιστήρα που απαιτείται για την κυκλοφορία του αέρα στους συλλέκτες.

Η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί με επίπεδη πλάκα μη συγκεντρωτικού PVT συλλέκτη περιορίζεται στην πράξη στους  $\sim 150^\circ\text{C}$ , αλλά μπορεί να επιτευχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας με την χρήση συγκεντρωτικών συλλεκτών CPVT (Εικόνα 13)  $\sim 200^\circ\text{C}$  ή υψηλότερες με την χρήση υλικών με μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα όπως έλαια, μόλυβδο.



*Εικόνα 13: ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος: Συγκεντρωτικοί θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες .*

Η ακτινοβολία που προσπίπτει στις Φ/Β μονάδες συγκεντρώνεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή, με την χρήση φακών ή καθρεφτών, παράγοντας έτσι περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα για την ίδια επιφάνεια. Τα συστήματα συγκέντρωσης χρησιμοποιούν ανακλαστήρες (καθρέφτες) και διαθλαστήρες κυρίως φακούς Fresnel (Εικόνα 14) (οπτικές συσκευές για την εστίαση της ηλιακής ακτινοβολία σε ένα σημείο). Σε θέσεις όπου βρίσκεται διάχυτη η συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί με ανακλαστήρες.

Γενικά απαιτείται ένα σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου ως προς τους συλλέκτες, για τη μεγιστοποίηση της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης των συστημάτων συγκέντρωσης. Στο CPVT η συγκέντρωση του ηλιακού φωτός οδηγεί σε μικρή επιφάνεια κυψέλης και υψηλή συνολική απόδοση συλλέκτη έως και 65% στους 200 °C όταν η οπτική απόδοση είναι περίπου 70% – 80% και για ηλιακές κυψέλες που έχουν υψηλή απόδοση μετατροπής, όπως τα ηλιακά κύτταρα πολλαπλών p-n συνδέσεων με ηλεκτρική απόδοση που μπορεί να φτάσει έως και ~40%. Η απόδοση επηρεάζεται έντονα από τις οπτικές ιδιότητες του ανακλαστήρα, του καλύμματος και του απορροφητή και μπορεί να μειωθεί δραστικά σε περίπτωση ανομοιομορφίας, λόγω γεωμετρίας του κατόπτρου και εσφαλμένου σχήματος. Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται από τα συστήματα συγκέντρωσης και της μειωμένης ηλεκτρικής απόδοσης που προκύπτει από την θέρμανση των κυψελών σε υψηλή ακτινοβολία, η επιλογή της κατάλληλης Φ/Β κυψέλης απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.



*Εικόνα 14: ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος: Συγκεντρωτικοί θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες τύπου Fresnel. \*Το σύστημα δεν είναι σε λειτουργία καθώς λείπει ο αγωγός από όπου διέρχεται το ρευστό προς θέρμανση στην κορυφή της κατασκευής.*

Μια εναλλακτική λύση στους παραδοσιακούς ανακλαστικούς ή συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες είναι οι φωταυγείς ηλιακοί συλλέκτες με επίστρωση κυματοδηγών φωτός (luminescent waveguides), χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή ολοκληρωμένων Φ/Β συστημάτων. Αυτά επιτρέπουν στο ηλιακό φως να διεισδύσει στην επάνω επιφάνεια του πολυμερούς ή ενός γυάλινου κυματοδηγού, το φως απορροφάτε από τα φωτεινά μόρια που είναι ενσωματωμένα στον κυματοδηγό και στη συνέχεια εκπέμπεται εκ νέου σε μεγαλύτερο μήκος κύματος. Μετά την επανεκπομπή, ένα κλάσμα του φωτός παγιδεύεται στον κυματοδηγό λόγω της εσωτερικής ανάκλασης, όπου συγκεντρώνεται κατά μήκος των άκρων της πλάκας.(Moraitis et al., 2018)

Σημαντικός είναι επίσης ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται το Φ/Β με το θερμικό απορροφητή, μπορεί να βελτιωθεί μεταξύ άλλων με τη χρήση επίπεδων θερμοαπορροφητών από πολυμερή που έχουν επίσης μικρότερο βάρος, είναι ευκολότεροι στην εγκατάσταση ενώ κατασκευάζονται εύκολα και με χαμηλό κόστος. Από την άλλη πλευρά, η θερμική αγωγιμότητα του πολυμερούς είναι γενικά χαμηλότερη από εκείνη του μετάλλου, η θερμική διαστολή είναι υψηλότερη και η θερμοκρασία λειτουργίας χαμηλότερη.

Καλύτερη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στα κανάλια, με επακόλουθη βελτίωση της ψύξης των ηλιακών κυψελών, μπορεί να επιτευχθεί με την μείωση της διαμέτρου των σωλήνων και αυξημένο αριθμό καναλιών.

Η θερμική απόδοση των μη συγκεντρωτικών συλλεκτών μπορεί να βελτιωθεί με πρόσθετα γυάλινα καλύμματα για την μείωση των θερμικών απωλειών, σε συνδυασμό με στεγανοποίηση του συλλέκτη με σκοπό την δημιουργία κενού αέρα και την δυνατότητα χρήσης αερίου, (π.χ. αργό) για τη μείωση των απωλειών μεταφοράς. Σε συνδυασμό με επιστρώσεις επιλεκτικού φάσματος υαλοπινάκων που μειώνουν τις απώλειες ακτινοβολίας. Σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας (θέρμανση πισίνας ή προθέρμανση νερού έως ~50 °C), προτιμώνται ακάλυπτοι συλλέκτες επειδή επιτρέπουν υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση (λόγω μειωμένων οπτικών απωλειών) ενώ τα σχέδια με μονό ή διπλό τζάμι και κενό αέρος επιτρέπουν υψηλότερες θερμικές αποδόσεις και υψηλότερες θερμοκρασίες του εργαζόμενου μέσου (λόγω μειωμένων απωλειών συναγωγής) αλλά προκαλούν οπτικές απώλειες και μειωμένη ηλεκτρική απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο κλασικός σχεδιασμός εκκενωμένων συλλεκτών είναι σωληνοειδούς γεωμετρίας, όπου το εκκενωμένο στρώμα βρίσκεται μεταξύ από δύο ομόκεντρους σωλήνες. Συνήθως χρησιμοποιούνται απορροφητικοί σωλήνες με μεγαλύτερη μεικτή επιφάνεια προς την περιοχή απορρόφησης, λόγω του κενού όμως μεταξύ των γυάλινων σωλήνων έχουν χαμηλότερη θερμική απόδοση ανά εγκατεστημένη επιφάνεια σε σύγκριση με επίπεδα σχέδια συλλεκτών.

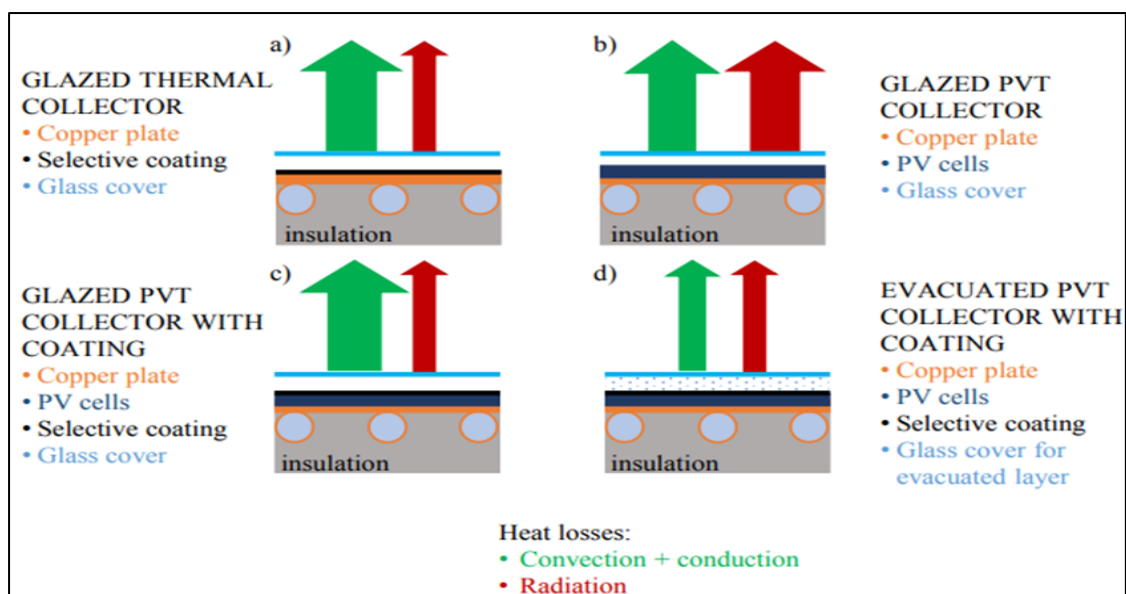
### **1.7.1 Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης με έλεγχο διάχυσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.**

Οι βασικές αιτίες που προκαλούν την απώλεια θερμότητας, σε μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες, μονωμένα ηλιακά πάνελ και PVT φαίνονται στην (Εικόνα 15). Η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον σε ένα συμβατικό ηλιακό θερμικό συλλέκτη με συναγωγή και εκπομπή μέσω του γυαλιού και της μόνωσης, και με ακτινοβολία από την κορυφή του απορροφητή χαλκού (Εικόνα 15α).

Οι απώλειες μεταφοράς μπορούν να μειωθούν με πρόσθετα γυάλινα καλύμματα και/ή να εισαχθεί αέριο στα στρώματα, οι απώλειες ακτινοβολίας ελαχιστοποιούνται με την εφαρμογή μιας επικάλυψης που επιτυγχάνει χαμηλή εκπομπή ακτινοβολίας στον θερμοαπορροφητή και στο κάλυμμα. Σε συμβατικές μονάδες PVT που απεικονίζεται στην (Εικόνα 15b), οι απώλειες ακτινοβολίας είναι γενικά υψηλότερες από ό,τι στους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες που οφείλονται στις οπτικές ιδιότητες των ηλιακών κυψελών που χαρακτηρίζονται από υψηλότερη εκπομπή ακτινοβολίας.

Οι απώλειες μεταφοράς μπορούν να μειωθούν με πρόσθετα γυάλινα καλύμματα και/ή να εισαχθεί αέριο στα στρώματα, οι απώλειες ακτινοβολίας ελαχιστοποιούνται με την εφαρμογή μιας επικάλυψης που επιτυγχάνει χαμηλή εκπομπή ακτινοβολίας στον θερμοαπορροφητή και στο κάλυμμα. Σε συμβατικές μονάδες PVT που απεικονίζεται στην (Εικόνα 15b), οι απώλειες ακτινοβολίας είναι γενικά υψηλότερες από ό,τι στους

ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες που οφείλονται στις οπτικές ιδιότητες των ηλιακών κυψελών που χαρακτηρίζονται από υψηλότερη εκπομπή ακτινοβολίας.



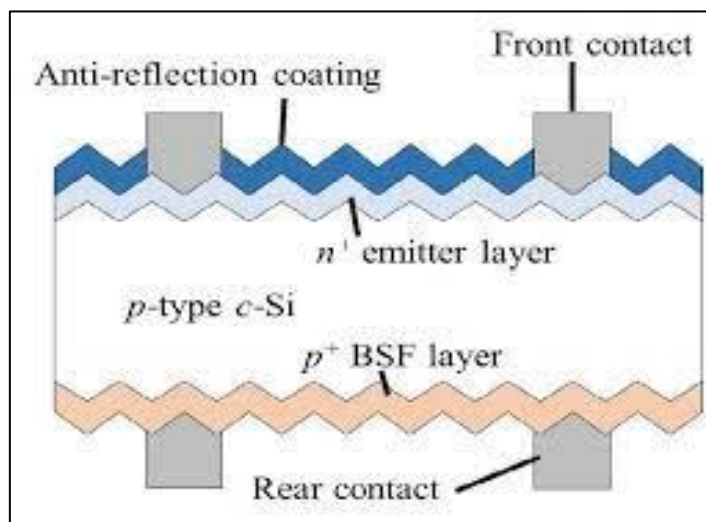
*Εικόνα 15: Απώλειες θερμότητας σε ηλιακούς θερμικούς και PVT συλλέκτες διαφόρων σχεδίων. α) Συμβατικός ηλιακός-θερμικός συλλέκτης με επίστρωση που εφαρμόζεται στο θερμικό απορροφητή. β) PVT πάνελ με συμβατικά ηλιακά κύτταρα τοποθετημένα σε απορροφητή (πλάκα χαλκού) γ) PVT πάνελ με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ακτινοβολίας που εφαρμόζεται στις ηλιακές κυψέλες. δ) Μονωμένο πάνελ PVT κενού με επίστρωση χαμηλής εκπομπής. (Dureyrat et al., 2014)*

Οι απώλειες ακτινοβολίας μπορούν να μειωθούν με την εφαρμογή μιας επικάλυψης χαμηλής εκπομπής στα ηλιακά κύτταρα που είναι διαφανή και εξασφαλίζει καλή απορρόφηση φωτός, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την ηλεκτρική απόδοση όπως στην (Εικόνα 15 c). Ο σχεδιασμός της μονάδας PVT με την υψηλότερη αναμενόμενη θερμική απόδοση είναι αυτή της (Εικόνα 15 d), που αντιπροσωπεύει συλλέκτη με κάλυμμα γυαλιού και επίστρωση χαμηλής εκπομπής όπου το διάκενο μεταξύ του απορροφητή και του καλύμματος είναι αεροστεγές.

Το τμήμα του ηλιακού φωτός που απορροφάτε και μπορεί ενδεχομένως ένα ποσοστό του να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, δίνεται από τον φασματικό συντελεστή απορρόφησης που χαρακτηρίζει το κάθε πάνελ. Τα ηλιακά κύτταρα κατασκευάζονται συνήθως με στόχο τη μεγιστοποίηση του συντελεστή απορρόφησης στο ορατό και υπέρυθρο φάσμα της ακτινοβολίας.

Το πρώτο μεγιστοποιεί την ηλεκτρική μετατροπή και το δεύτερο μεγιστοποιεί τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον και διατηρεί τη θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης όσο το δυνατόν χαμηλότερη (εφόσον δεν μπορεί να η υπέρυθρη ακτινοβολία) με στόχο την αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης. Η απορροφητικότητα ενός υλικού είναι μια ιδιότητα που εξαρτάται από το πάχος και την δομή της επιφάνειας. Σε ένα

ηλιακό κύτταρο, αυτός είναι ένας συνδυασμός πολλών στρωμάτων και η συνολική απορροφητικότητα εξαρτάται από τις επιφανειακές ιδιότητες κάθε στρώσης και από τα υλικά που τις αποτελούν.



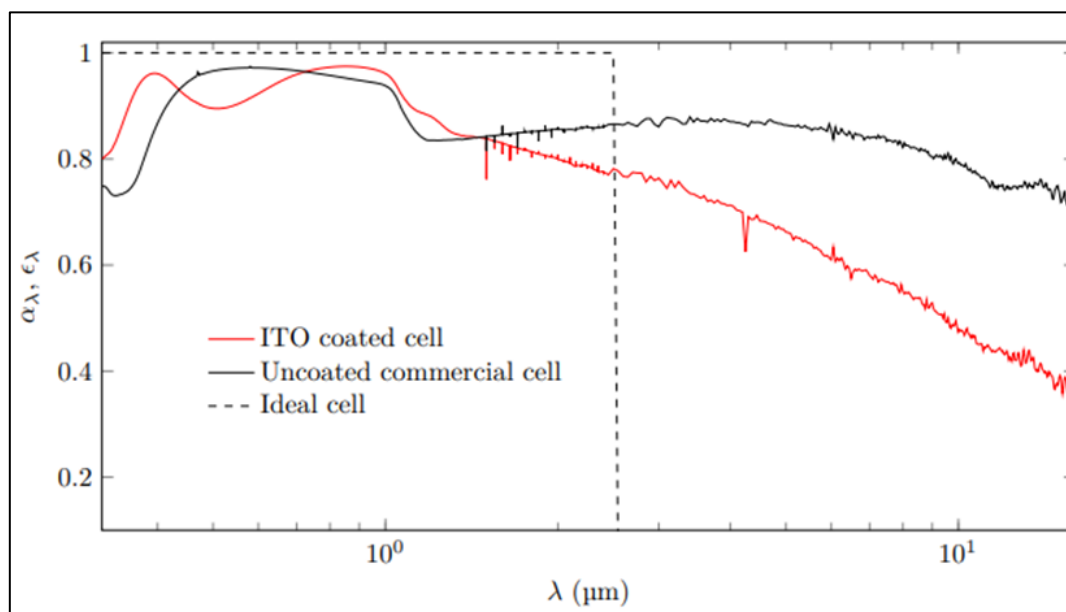
**Εικόνα 16:** Δομή ενός τυπικού εμπορικού ηλιακού κυττάρου. Περιλαμβάνει μια αντανakλαστική επίστρωση, μια στρώση  $p^+$  και  $n^-$  στην πίσω επιφάνεια και έναν οπίσθιο ανακλαστήρα. (Riverola et al., 2018)

Οι (Santbergen and van Zolingen, 2008) μελέτησαν αριθμητικά και πειραματικά τη φασματική απορρόφηση των φωτοβολταϊκών κυττάρων πυριτίου, μέχρι μήκος κύματος 1,7  $\mu\text{m}$ , που είναι ίσο με την αναμενόμενη εκπομπή που προκύπτει από τη σχέση Kirchoff, δείχνοντας ότι η απορρόφηση για AM1.5 (μάζα αέρα) του συνολικού φάσματος είναι 90%. Μετρήθηκε η ικανότητα εκπομπής των ηλιακών κυψελών χωρίς κάλυμμά έως τα 16  $\mu\text{m}$  (εύρος μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας) και προσομοιώθηκε αριθμητικά με στόχο την κατανόηση των σημαντικών παραγόντων που προκαλούν τις απώλειες ακτινοβολίας και επηρεάζουν το σχεδιασμό των Φ/Β κυψελών.

Οι (Riverola et al., 2018) μέτρησαν την ικανότητα εκπομπής ενός εμπορικού μονόκρυσταλλικού ηλιακού κυττάρου πυριτίου (Διάγραμμα 4) στο εύρος του μήκους κύματος μεταξύ 350 nm και 16  $\mu\text{m}$  (τυπικό εύρος θερμικής εκπομπής σε θερμοκρασία χαμηλότερη 100 °C) και προσδιορίστηκε ότι η απορρόφηση και ως επακόλουθο η εκπομπή είναι πάνω από 90% στο ορατό φάσμα μεταξύ 0,3 και 1  $\mu\text{m}$  που οδηγεί σε ισχυρή απορρόφηση για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (μαύρη γραμμή Διάγραμμα 4).

Η απορροφητικότητα πέφτει ελαφρώς για  $\lambda$  1  $\mu\text{m}$  κοντά στο ενεργειακό διάκενο c-Si, αλλά παραμένει πάνω 80% έως 10  $\mu\text{m}$  και πάνω από 70% έως 16  $\mu\text{m}$ . Το εύρος των μηκών κύματος μεταξύ 8  $\mu\text{m}$  και 13  $\mu\text{m}$  συμπίπτει με την μέγιστη θερμική εκπομπή σε εύλογη θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών κυψελών. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ηλιακές κυψέλες πυριτίου χωρίς επίστρωση, παρουσιάζουν μεγάλη

ικανότητα εκπομπής σε σύγκριση με τον ιδανικό θερμοαπορροφητή (περίπου 75% στο μεσαίο υπέρυθρο και στο υπέρυθρο εύρος) και επομένως αυτά τα κύτταρα μπορούν να ψυχθούν ικανοποιητικά με ακτινοβολία. Ωστόσο, για τα συστήματα PVT, η εκπομπή αυτή ευθύνεται για τις υψηλές θερμικές απώλειες ακτινοβολίας και η θερμική απόδοση θα είναι περιορισμένη καθώς αντί να αυξάνει την θερμοκρασία του πάνελ την επιστρέφει στο περιβάλλον.



*Διάγραμμα 4: Διάγραμμα εκπομπής μονοκρυσταλικού Φ/Β κυττάρου πυριτίου. Διακεκομμένη γραμμή ιδανικό Φ/Β κελί, Μαύρη γραμμή εμπορικό Φ/Β χωρίς επίστρωση, Κόκκινη γραμμή κελί που φέρει αντανακλαστική επίστρωση. (Riverola et al., 2018)*

Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός συγκεκριμένων ηλιακών κυψελών για υβριδικά συστήματα θα πρέπει να γίνεται με στόχο την μεγιστοποίηση και της θερμικής απόδοσης.

Η διαχείριση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, σε μονάδες PVT είναι μεγαλύτερη πρόκληση από ό,τι σε καθαρά ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες, όπου συνήθως εφαρμόζονται μαύρες επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής, αφού και ο απορροφητής είναι ενεργό Φ/Β στοιχείο. Επίστρωση από μαύρο χρώμο πάνω από βάση νικελίου χρησιμοποιείται συχνά σε χάλκινες πλάκες, ή εναλλακτικά, χρησιμοποιείται ένα στρώμα τιτανίου-νιτρίδιου-οξειδίου σε ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες. Στα πάνελ PVT, η επίστρωση πρέπει να είναι διαφανής για το προσπίπτον φως και αδιαφανές στην υπέρυθη ακτινοβολία χωρίς να επηρεάζει την ηλεκτρική απόδοση του στοιχείου και να επιτυγχάνει επαρκή συγκέντρωση θερμότητας. Αυτή η ιδιότητα εμφανίζεται σε μεμβράνες διαφανών αγώγιμων οξειδίων (TCO), που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα για το σκοπό αυτό, και σε επιστρώσεις με βάση το μέταλλο. Οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής με βάση το μέταλλο κατασκευάζονται



από μια στοίβα πολλαπλών στρώσεων, που περιλαμβάνει ένα μεταλλικό υλικό μεταξύ διηλεκτρικών στρωμάτων.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στο μέταλλο ανακλούν έντονα το υπέρυθρο φως και έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή εκπομπή ακτινοβολίας, και η διαπερατότητα επιτυγχάνεται με συγκεκριμένα μέταλλα, όπως είναι το ασήμι.

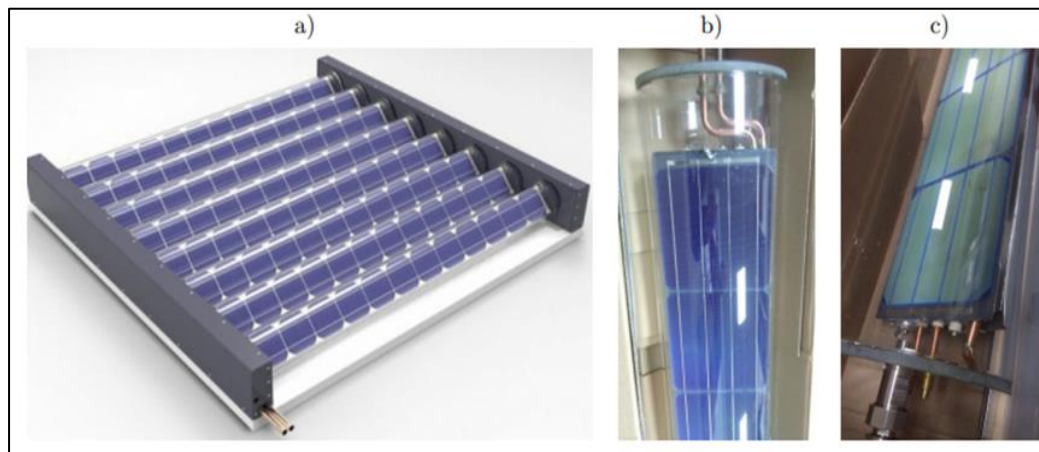
Στις επικαλύψεις TCO, τα ηλεκτρόνια του οξειδίου προκαλούν χαμηλή εκπομπή. Τα TCO έχουν πολύ υψηλότερη διαπερατότητα σε σύγκριση με τις επικαλύψεις με βάση το ασήμι. Ένα τυπικό φιλμ που χρησιμοποιείται στην αποδοτική κρυσταλλοποίηση είναι το  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO),  $\text{TiO}_2:\text{Nb}$ ,  $\text{ZnO}:\text{Al}$ . Παλαιότερες μελέτες πρότειναν τη χρήση επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής για συλλέκτες PVT με υαλοπίνακες. Όπως ο (“C.H. Cox and P. Raghuraman. Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collectors. *Solar Energy*, 35(3):227–241, 1985. ”) πρότεινε ότι μια επίστρωση με χαμηλή εκπομπή (κάτω από  $0,25\mu\text{m}$  στο υπέρυθρο φάσμα), και με ηλιακή απορροφητικότητα μεγαλύτερη από  $0,85\mu\text{m}$  θα πρέπει να υιοθετηθεί για συστήματα PVT.

Άλλες μελέτες εξέτασαν τη χρήση επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής σε συνδυασμό με αντανακλαστικές επιστρώσεις και στις δύο πλευρές του γυάλινου καλύμματος. Η αντανακλαστική επίστρωση που εξετάστηκε ήταν ένα μονό στρώμα  $\text{SiO}_2$  (Διοξείδιο του πυριτίου), ενώ η χαμηλής εκπομπής επίστρωση ήταν από  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (φθοριούχο οξείδιο του κασσιτέρου). Με την εφαρμογή αυτής της επίστρωσης, η εκπομπή στο υπέρυθρο μειώθηκε από 80% σε περίπου 20%. Ο συνδυασμός μιας αντανακλαστικής επίστρωσης με μια επίστρωση χαμηλής εκπομπής οδήγησε σε αυξημένη θερμική απόδοση και ετήσια ηλεκτρική απόδοση (κατά 1%). Αποδείχθηκε επίσης ότι υπάρχει σύνδεση ανάμεσα στην ηλεκτρική, θερμική απόδοση και το πάχος της επίστρωσης.

Η θερμική απόδοση αυξάνεται με το πάχος της επίστρωσης που οδηγεί σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη ηλεκτρική απόδοση λόγω της γραμμικής εξάρτησης της ηλεκτρικής μετατροπής του Φ/Β με τη θερμοκρασία, σε συνδυασμό με μια μικρή απορρόφηση φωτός από την επίστρωση. Από αυτά τα αποτελέσματα, βρέθηκε το βέλτιστο πάχος για αυτή την περίπτωση στα 300nm, για παχύτερες μεμβράνες η θερμική απόδοση σχεδόν δεν αυξάνεται, ενώ η ηλεκτρική απόδοση μειώνεται. Σε άλλη μελέτη, μια μονάδα PVT με μεταλλική επίστρωση και διαφανή αγωγίμα οξειδία αναπτύχθηκε όπου η επικάλυψη χαμηλής εκπομπής εφαρμόστηκε στο γυαλί της Φ/Β μονάδας και λειτούργησε ως υπόστρωμα και βελτιστοποιήθηκε για τη μεγιστοποίηση της ηλιακής μετάδοσης με παράλληλη ελαχιστοποίηση των θερμικών εκπομπών. Το φιλμ αποτελείτο από ένα στρώμα αργίλου 8nm διαπερατότητας 0,8nm και ικανότητα εκπομπής 0,1nm. Η εφαρμογή της επίστρωσης χαμηλής εκπομπής στα Φ/Β μείωσε το ποσοστό απώλειας θερμότητας κατά 82%, ενώ η ηλεκτρική απόδοση μειώθηκε μόνο κατά 3%(Λαμπρινίδης 2017).

Τέλος στο (Διάγραμμα 4) φαίνεται το αποτέλεσμα από την τοποθέτηση ενός φιλμ ITO 100 nm σε εμπορικά Φ/Β, με ενσωματωμένες στο επάνω μέρος νιφάδες πυριτίου και διαπιστώθηκε ότι η ικανότητα εκπομπής μειώνεται κατά ~50% σε σύγκριση με αυτό του ίδιου συμβατικού ηλιακού κυττάρου χωρίς επίστρωση ITO.

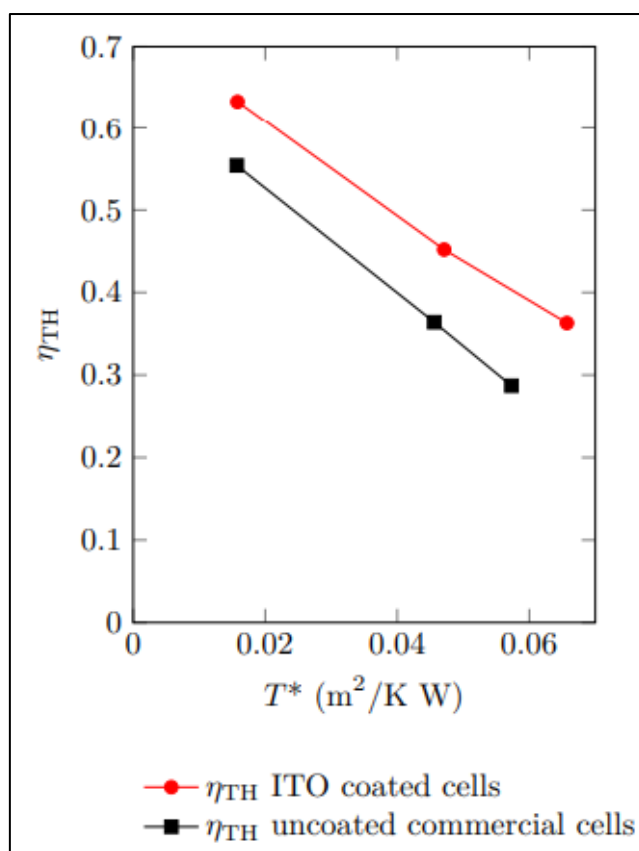
Το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι η επίστρωση ITO μπορεί να καταστείλει αποτελεσματικά τις απώλειες των ηλιακών κυψελών c-Si από τη θερμική ακτινοβολία σε θερμοκρασίες λειτουργίας συλλεκτών PVT.



**Εικόνα 17: α) Συλλέκτης PVT εκκενωμένων σωλήνων β) Συλλέκτης Virtu PVT με εμπορικά ηλιακά κύτταρα. γ) Virtu PVT συλλέκτης με ηλιακά κύτταρα επικαλυμμένα με μεμβράνη ITO. (“Products — Naked Energy,(no date)” )**

Τα επικαλυμμένα με ITO κύτταρα τοποθετήθηκαν σε έναν συλλέκτη PVT με εμπορική ονομασία Virtu (Κεφάλαιο 2.2) με σωλήνα κενού (Εικόνα 17 α). Η (Εικόνα 17 β) αναφέρεται σε έναν σωλήνα που αποτελεί από τον συλλέκτη PVT με τυπικά ηλιακά κύτταρα ενώ στην (Εικόνα 17c), ο ίδιος σωλήνας φέρει επίστρωση ITO στις Φ/Β κυψέλες. Το συγκεκριμένο πάνελ χρησιμοποιεί θερμοσιφωνισμό για την κίνηση του ρευστού με κανάλια όπου είναι εμβαπτισμένα τα φωτοβολταϊκά κύτταρα τα οποία συγκολλούνται στην επιφάνεια της πλάκας και τοποθετούνται μέσα σε ένα σφραγισμένο και εκκενωμένο γυάλινο σωλήνα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι ο βρασμός του νερού που πραγματοποιείται μειώνει την θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων αλλά και επιτυγχάνει ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασία. Ο εκκενωμένος σωληνωτός σχεδιασμός επιτρέπει την μείωση των απωλειών μεταφοράς και επιτρέπει την βέλτιστη κάλυψη των ηλιακών κυψελών αυξάνοντας τον παράγοντα ηλιακού φορτίου του συστήματος όλες τις εποχές. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές του συλλέκτη σε πειραματικές συνθήκες στους δύο σωλήνες (Εικόνα 18), η κόκκινη γραμμή αφορά τα επικαλυμμένα κύτταρα με ITO και η μαύρη τις συμβατικές κυψέλες με τα χαρακτηριστικά εκπομπής (Εικόνα 17). Η επίστρωση με ITO οδήγησε σε απόλυτο κέρδος θερμικής απόδοσης 10%, όπως προκύπτει στην (Διάγραμμα 5) και απώλεια ηλεκτρικής απόδοσης 0,5%. Το θερμικό

κέρδος οφείλεται σε μειωμένη εκπομπή και η ηλεκτρική απώλεια σε αυξημένη ανάκλαση λόγω του ρευστού. (Schaeffer et al., 2015)



Διάγραμμα 5: Θερμική απόδοση του συλλέκτη PVT Virtu υπό σταθερές πειραματικές συνθήκες με μεταβολή της θερμοκρασία του νερού εισόδου μεταξύ 35 °C και 80 °C σε ακτινοβολία >900 W/m<sup>2</sup> με κυψέλες επικαλυμμένες με ITO και με συμβατικά Φ/Β κύτταρα χωρίς επίστρωση (Schaeffer et al., 2015)

### 1.7.2 Βελτιστοποίηση απόδοσης με μεθόδους ελέγχου του PVT

Όταν ένα Φ/Β θερμικό σύστημα σταματάει να λειτουργεί, υπολειτουργεί ή όταν η ένταση της ακτινοβολίας είναι πολύ χαμηλή, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από συμβατικά ορυκτά καύσιμα με υψηλό κόστος ανά kWh. Συνεπώς η παρακολούθηση του ηλιακού συστήματος είναι απαραίτητη για την επίτευξη της αναμενόμενης εξοικονόμησης αλλά και βελτιστοποίηση της απόδοσης. Την ίδια στιγμή, είναι επιθυμητό από τους χρήστες να έχουν την δυνατότητα, να αλληλοεπιδρούν με εύκολο και άμεσο τρόπο απομακρυσμένα μέσω της τεχνολογίας, να είναι σε θέση να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την απόδοση του συστήματος και να προσαρμόζουν την συμπεριφορά του στις διάφορες μεταβολές των τιμών της ενέργειας και των αναγκών σε πραγματικό χρόνο. Σε ένα σενάριο με υψηλή κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μέσω της ηλιακής ενέργειας, ένα σύστημα αυτόματου και προηγμένου ελέγχου (Εικόνα 18) παρακολούθησης της πορείας του ήλιου πρέπει να εφαρμοστεί προκειμένου να διασφαλιστεί η αναμενόμενη μακροπρόθεσμη απόδοση,

μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος συντήρησης και τον χρόνο που το σύστημα μένει εκτός λειτουργίας από βλάβες.



*Εικόνα 18: Φωτοβολταϊκό με σύστημα παρακολούθησής της θέσης του ήλιου με σκοπό την βελτιστοποίηση απορρόφησης της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. (“Solar tracker | Definition & Facts | Britannica,” 2023)*

Βελτιωμένη παρακολούθηση και έλεγχος, μαζί με καιρικές προβλέψεις, δεδομένα συμπεριφοράς χρήστη, μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία του συστήματος και την εξοικονόμηση πόρων. Εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα βελτιστοποιημένη απόδοση, εξισορροπώντας το πρόσθετο κόστος και πολυπλοκότητα που προστίθεται στο σύστημα, μειώνοντας τον συνολικό χρόνο απόσβεσης.

Βελτιστοποιημένες στρατηγικές ελέγχου που διέπουν τον τρόπο λειτουργίας της αντλίας σε ηλιακά θερμικά συστήματα, (ρύθμιση της ροής ανάλογα την θερμοκρασία ή και διακοπή για εξοικονόμηση πόρων) με σκοπό βελτίωση της απόδοσης του συστήματος έχουν προταθεί από αρκετούς συγγραφείς.

Σε μια πρόσφατη πειραματική μελέτη, (Sanda Budea, 2018.) χρησιμοποίησε τέσσερα διαφορετικά σενάρια για τον έλεγχο του ρυθμού ροής. Σε κάθε μία από αυτές τις στρατηγικές ο ρυθμός ροής μάζας προσαρμόστηκε ως συνάρτηση των στιγμιαίων περιβαλλοντικών συνθηκών και τις θερμοκρασίες του συλλέκτη. Σε αυτή τη μελέτη, ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής λειτουργούσε είτε κλείνοντας και ανοίγοντας την ροή με βάση προ εγκατεστημένες ρυθμίσεις είτε σταδιακά, μεγιστοποιώντας την απόδοση του συστήματος για κάθε δεδομένη στιγμή.

Στην τελευταία μέθοδο, ο ρυθμός ροής προσαρμόστηκε γραμμικά με την ακτινοβολία ή μεταβλήθηκε ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συλλέκτη και της πλήρως αναμεμιγμένης δεξαμενής αποθήκευσης. Η πρώτη στρατηγική εξέτασε το σύστημα σε μια βελτιστοποιημένη τιμή του ρυθμού ροής, υποθέτοντας εκ των

προτέρων τις καιρικές συνθήκες και τη ζήτηση με βάση ένα συγκεκριμένο προφίλ χρήστη και υπολογίστηκε η ημερήσια μετατροπή ηλιακής ενέργειας του συλλέκτη. Η βέλτιστη τιμή του ρυθμού ροής προσαρμοζόταν καθημερινά ανάλογα με το επίπεδο ακτινοβολίας και την διάρκεια σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (τα κριτήρια μπορούν να οριστούν για τον καθορισμό διαστημάτων σταθερής ακτινοβολίας, (π.χ. η ακτινοβολία έχει διακύμανση κατά λιγότερο από  $50 \text{ W/m}^2$  ανά λεπτό)

Στην μελέτη του ο (Ntsaluba et al., 2015) πρότεινε έναν βέλτιστο ελεγκτή για ένα ηλιακό θερμικό σύστημα με δύο δεξαμενές αποθήκευσης και δύο αντλίες κυκλοφορίας που επέτρεψαν στο σύστημα να λειτουργεί και κατά τη διάρκεια της νύχτας για την ανακυκλοφορία του νερού. Οι συγγραφείς μεγιστοποίησαν την ενεργειακή απόδοση, ενώ ελαχιστοποίησαν τις θερμικές απώλειες από το σύστημα ψύξης και τις απώλειες από την ενέργεια που απαιτείται για την κυκλοφορία του ρευστού. Ο ελεγκτής επέτρεψε μια αύξηση 8% της θερμικής ενέργειας που συλλέγεται και μια μείωση της τάξης 5% -7% των ενεργειακών απωλειών.

Στις προαναφερθείσες μελέτες, η διακύμανση των παραμέτρων του συλλέκτη (θερμοκρασιακός συντελεστής απώλειας, οπτική απόδοση, αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας και ρυθμός ροής) δεν συμπεριλήφθηκε στις παραμέτρους της αριθμητικής ανάλυσης και η δυναμική λειτουργία του συλλέκτη προσεγγίστηκε από ένα σταθερό μοντέλο. Σε μερικές μόνο μελέτες λήφθηκε υπόψη η μεταβλητή απόδοση του συλλέκτη με τη μεταβολή του ρυθμού ροής σε δυναμικές συνθήκες λειτουργίας. Ένα άλλο δυναμικό μοντέλο του συλλέκτη που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της απόδοσης με τον ρυθμό ροής του πάνελ έλαβε υπόψη την δυναμική συμπεριφορά ενός ηλιακού συλλέκτη για την παραμετροποίηση του τρόπου λειτουργίας του ελεγκτή. Η στρατηγική ελέγχου στοχεύει στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του πάνελ με σκοπό το σχεδιασμό ενός ελεγκτή PID για τις λειτουργίες του πάνελ.

## Κεφάλαιο 2. Πειραματική εγκατάσταση συλλέκτη PVT.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην οροφή του εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πανεπιστημιούπολη 2 ) με την χρήση πειραματικής εγκατάστασης PVT ( Εικόνα 19). Για τη διεξαγωγή του πειράματος πρωτεύων ήταν να γίνει έλεγχος για την ορθή λειτουργία της εγκατάστασης καθώς ήταν σε αχρησία για μεγάλο διάστημα. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε υπό πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του Αιγάλεω Αττικής. Οι τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, νερού, επιφάνειας του πάνελ, ηλιακής ακτινοβολίας, μετρήθηκαν με αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις στην εγκατάσταση και συγκεντρώθηκαν για αξιολόγηση και επεξεργασία μέσω δύο καταγραφικών ψηφιακού σήματος STYLITIS-10. Η παροχή του νερού μετρήθηκε μέσω αναλογικού παροχόμετρου. Τα ανεμολογικά στοιχεία δόθηκαν για τον ίδιο χρόνο από παρακείμενο ανεμόμετρο.

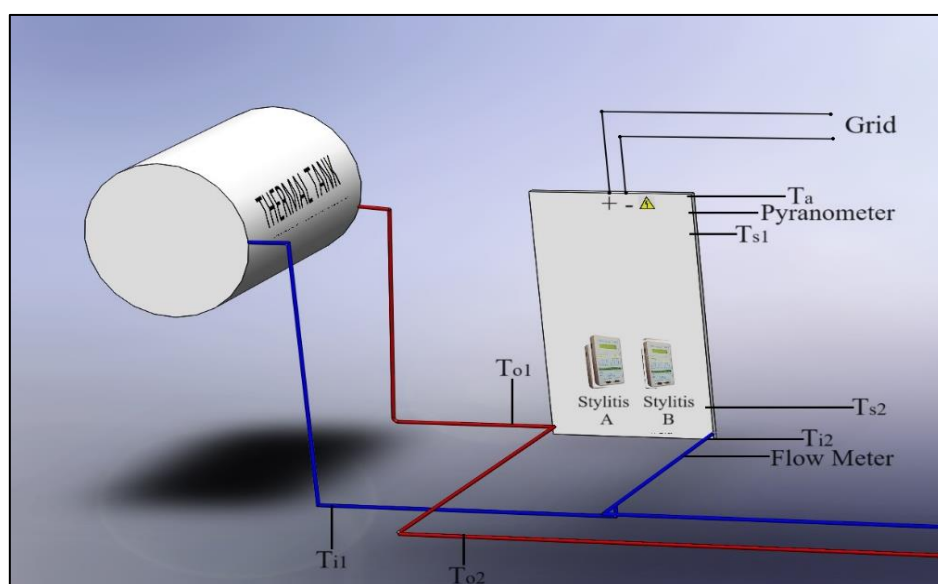


*Εικόνα 19: Πλάγια απεικόνιση της εγκατάστασης όπου φαίνεται. Α) Ο Φ/Β συλλέκτης με τον ψύκτη στο πίσω μέρος. Β) Το κουτί στο οποίο είναι τοποθετημένοι οι δύο καταγραφείς δεδομένων(όπως θα αναλυθεί παρακάτω). Γ) Οι σωληνώσεις από όπου διέρχεται και εξέρχεται το νερό από το συλλέκτη.*

Η λήψη των μετρήσεων έγινε με όσο το δυνατόν σταθερές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας για να μπορέσει να γίνει σύγκριση και αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος ψύξης. Επιπλέον εξετάστηκε η επίδραση που έχει στο σύστημα η ύπαρξη ή όχι θερμοαπαγωγού ρευστού στο σύστημα ψύξης και η επίδραση που έχουν διαφορετικές ροές σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, μερική σκίαση, ύπαρξη και απουσία αέρα). Τέλος μετρήθηκε η ποσότητα του ρευστού που λάβαμε ως προς το χρόνο με σκοπό να υπολογισθούν τα θερμικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την εγκατάσταση.

## 2.1 Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης

Το θερμικό φωτοβολταϊκό που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο Ft250cs της Fototherm το οποίο χρησιμοποιεί 60 πολυκρυσταλλικές κυψέλες σιλικόνης, με πάχος 156mm συνολικών διαστάσεων 1,61 m<sup>2</sup>. Έχει ονομαστική ισχύ 250 Wp και ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 15.5% (“SERIE CS – FotoTherm,(no date)”). Το σύστημα ψύξης, έχει χωρητικότητα ρευστού 0.9l, ονομαστικό θερμικό βαθμό απόδοσης 56%, μπορεί να παράγει 888W/h και η προτεινόμενη παροχή του ρευστού κυμαίνεται σε 1.5 με 2.5 l/min. Είναι τοποθετημένο σε χειροποίητη μεταλλική κατασκευή με βέλτιστη κλίση για το σύνολο του χρόνου στη συγκεκριμένη γεωγραφική θέση ίση με (45°) μοίρες.

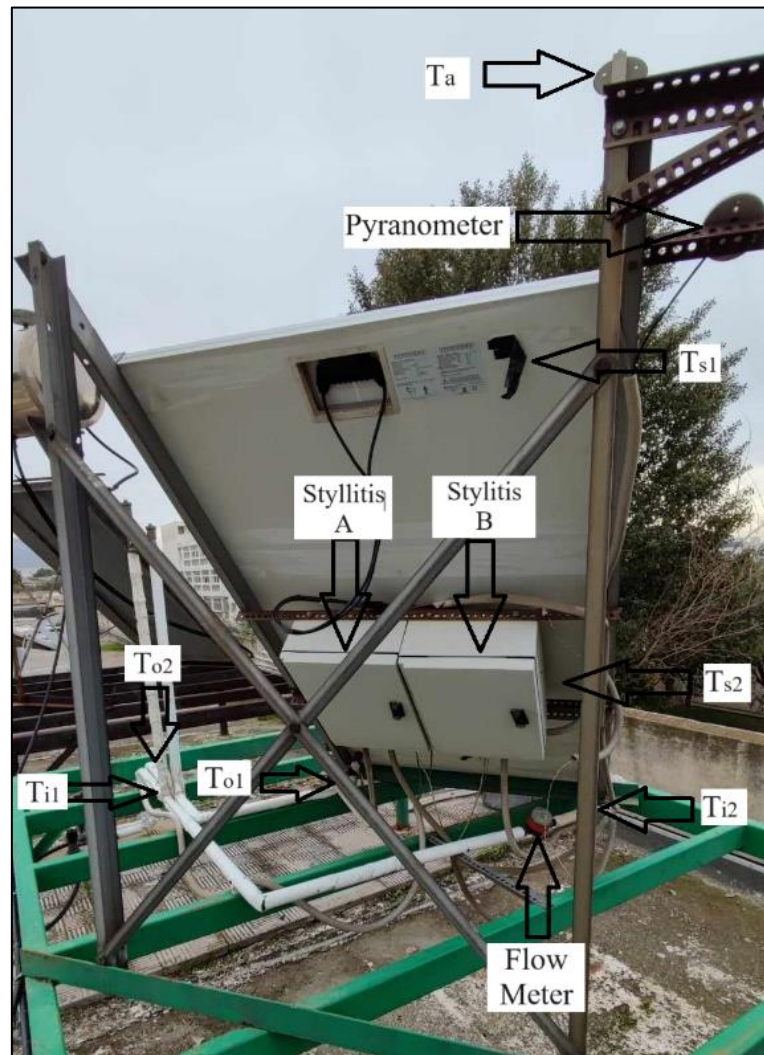


**Εικόνα 20:** Σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης όπου φαίνεται η τοποθεσία των διαφόρων αισθητήρων ονομαστικά και για τους αισθητήρες θερμοκρασίας νερού στις θέσεις ( $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$ ,  $T_{O1}$ ,  $T_{O2}$ ). \*Τα αναλογικά θερμομέτρα βρίσκονται παραπλήσια των ψηφιακών για την επαλήθευση των μετρήσεων και την άμεση λήψη της στιγμιαίας θερμοκρασίας.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω αισθητήρες σε διάφορα σημεία με βάση το παρακάτω διάγραμμα της εγκατάστασης (Εικόνα 20). Συγκεκριμένα για την λήψη των τιμών της ηλεκτρικής παραγωγής του Φ/Β

χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές τάσης και έντασης του ρεύματος που καταγράφει ο φορτιστής που συνδέεται με το πάνελ. Για τις μετρήσεις θερμοκρασίας νερού, παροχής νερού, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και επιφάνειας του συλλέκτη, ηλιακής ακτινοβολίας, τοποθετήθηκαν οι παρακάτω αισθητήρες:

- 4 αισθητήρες pt 100 μέτρησης θερμοκρασίας νερού. (Ti1), (Ti2), (TO1), ( TO2)
- 2 αισθητήρες pt 100 μέτρησης θερμοκρασίας επιφάνειας. (Ts1),( Ts2)
- 1 αισθητήρας pt 100 μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος. (Ta)
- 1 αναλογικό παροχόμετρο. (Flow Meter)
- 1 πυρανόμετρο apogee sp-110 ss. (Pyranometer)
- 3 αναλογικά θερμομέτρα γλυκόζης. (σε θέσεις πλησίον των ψηφιακών)



*Εικόνα 21: Φωτογραφική απεικόνιση της εγκατάστασης όπου εμφανίζεται η θέση των αισθητήρων στα διάφορα σημεία.*



Η ύπαρξη αισθητήρων θερμοκρασίας νερού στη θέση ( $T_{11}$ ) και ( $T_{12}$ ) σε απόσταση 280mm για την μέτρηση της θερμοκρασίας εισόδου και ( $T_{01}$ ), ( $T_{02}$ ) σε απόσταση 170mm για την θερμοκρασία εξόδου, οφείλεται ότι αρχικά η εγκατάσταση προοριζόταν να ανακυκλώνει το νερό του θερμοδοχείου στο οποίο αποθηκευόταν. Συνεπώς υπήρχε ανάγκη μέτρησης της θερμοκρασίας του θερμού νερού που επέστρεφε από το θερμοδοχείο, πριν ανακυκλοφορήσει στο συλλέκτη με σκοπό να αναθερμανθεί περαιτέρω.

## 2.2 Τύποι αισθητήρων

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας PT 100 (Εικόνα 22 Α,Β) αποτελούν το πιο κοινό τύπο θερμομέτρου αντίστασης πλατίνας. Το Pt αναφέρεται στο ότι ο αισθητήρας είναι κατασκευασμένος από πλατίνα (Pt). Το 100 αναφέρεται στο ότι στους  $0^{\circ}\text{C}$  ο αισθητήρας έχει αντίσταση 100 Ohm ( $\Omega$ ).

Το θερμομέτρο αντίστασης είναι ένας τύπος αισθητήρα θερμοκρασίας. Αποτελείται από ένα στοιχείο που χρησιμοποιεί αντίσταση για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και για τους αισθητήρες νερού (Εικόνα 22 Α) βρίσκεται εμβαπτισμένο στο εσωτερικό του αγωγού από όπου διέρχεται το νερό. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Εικόνα 22 Β) ο Pt 100 φέρει πλαστικό κάλυμμα για την προστασία από τα καιρικά φαινόμενα και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ενώ φέρει πτερύγια τα οποία κατευθύνουν τον αέρα στο εσωτερικό του. Τα αισθητήρια PT-100 τα οποία χρησιμοποιήθηκαν φέρουν 3 καλώδια τα δύο χρησιμοποιούνται για την παροχή του ρεύματος και την μεταφορά του σήματος από τον αισθητήρα, ενώ το τρίτο χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει της απώλειες αντίστασης που εμφανίζουν τα καλώδια όταν υπάρχει μεγάλη απόσταση ανάμεσα στον αισθητήρα και τον καταγραφέα του σήματος. Στιγμιαία λήψη της θερμοκρασίας του νερού μπορεί να γίνει με αναλογικά θερμομέτρα γλυκόζης (Εικόνα 22 Γ) τοποθετημένα δίπλα στους ψηφιακούς αισθητήρες .



*Εικόνα 22:Α) Μέτρηση θερμοκρασίας νερού Β) Μέτρηση θερμοκρασίας περιβάλλοντος Γ) Αναλογικό θερμομέτρο.*

Για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε το πυρανόμετρο sp-110 ss της apogee (Εικόνα 23). Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης τυπικά ορίζεται ως η συνολική ακτινοβολία σε ένα εύρος μήκους κύματος από 280 έως 4000 nm (ακτινοβολία βραχέων κυμάτων). Καθορίζεται η ολική ηλιακή ακτινοβολία, η άμεση και η διάχυτη, προσπίπτουσα σε οριζόντια επιφάνεια, ως παγκόσμια ακτινοβολία βραχέων κυμάτων ή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (προσπίπτουσα ροή ακτινοβολίας) και εκφράζεται με  $W/m^2$ . (“Thermopile Pyranometer Support | Apogee Instruments,” (no date).)



*Εικόνα 23: Πυρανόμετρο sp-110 της apogee.*

Τα πυρανόμετρα είναι αισθητήρες που μετρούν την παγκόσμια ακτινοβολία βραχέων κυμάτων. Το πυρανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε περιέχει κυψέλες πυριτίου ευαίσθητες μόνο σε ένα τμήμα του ηλιακού φάσματος, περίπου 350-1100 nm (περίπου το 80 % της συνολικής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων βρίσκεται εντός αυτού του εύρους). Ωστόσο, τα πυρανόμετρα κυψελών πυριτίου είναι βαθμονομημένα για την εκτίμηση της συνολικής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων σε ολόκληρο το ηλιακό φάσμα. Ο SP-110 είναι ένας αυτοτροφοδοτούμενος, αναλογικός αισθητήρας με έξοδο 0 έως 400 mV. Ο αισθητήρας ενσωματώνει μια φωτοδίοδο πυριτίου με στιβαρό, αυτοκαθαριζόμενο περίβλημα αισθητήρα και κασσιτερωμένα καλώδια pigtail για εύκολη σύνδεση με καταγραφείς και ελεγκτές.

### **2.3 Αξιολόγηση της υπάρχουσας εγκατάστασης**

Η τοποθέτηση του πάνελ και όλων των αισθητήρων έγινε το 2015 και από τότε πέρα από την ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε το πάνελ, δεν βρίσκονταν σε λειτουργία τα υπόλοιπα τμήματα όπως το σύστημα ψύξης κατά συνέπεια χρειάστηκε έλεγχος και επιδιόρθωση σε ορισμένα εξαρτήματα. Επισκευή και επανατοποθέτηση έχρηζαν

κυρίως οι αισθητήρες οι οποίοι τοποθετήθηκαν εξωτερικά του PVT για να μετρήσουν τις διάφορες λειτουργίες. Όσον αφορά το πάνελ η μη χρήση του συστήματος ψύξης ,είναι πιθανώς η αιτία που εμφανίστηκαν ραγίσματα (Εικόνα 24) στο ηλεκτρικό κύκλωμα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε στην επιφάνεια του, όπως επίσης και τάσεις που ενδέχεται να δέχτηκε από τη συστολή και τη διαστολή του στάσιμου νερού στο δοχείο ψύξης που είναι προσκολλημένο στο πίσω μέρος του.



*Εικόνα 24: Ραγίσματα στην επιφάνεια του Φ/Β*

Οι συγκεκριμένες φθορές μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση του Φ/Β. Όπως προαναφέρθηκε το πάνελ είναι κατασκευασμένο με προ εγκατεστημένο το σύστημα ψύξης στο πίσω μέρος του Φ/Β και η λειτουργία του προσφέρει μείωση της θερμοκρασίας, προστασία από υπερθέρμανση και ως συνακόλουθο αύξηση της ζωής του συστήματος.

Για τους αισθητήρες χρειάστηκε να γίνει επανεγκατάσταση του ενός από αυτούς που λαμβάνει εξωτερικές θερμοκρασίες από το πίσω άνω μέρος του πάνελ καθώς είχε αποκολληθεί (Εικόνα 25) και επαναπρογραμματισμός του πυρανόμετρου το οποίο εμφάνιζε λανθασμένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Για τη διευκόλυνση της λήψης των μετρήσεων τοποθετήθηκε κοντά στην εγκατάσταση έξοδος νερού (Εικόνα 26) καθώς αρχικά ο αγωγός κατέληγε στο εσωτερικό του εργαστηρίου. Ενώ το καταγραφικό συνδέθηκε με καλώδιο Ethernet για την άμεση λήψη των μετρήσεων από το εργαστήριο και την σύνδεση με το διαδίκτυο.



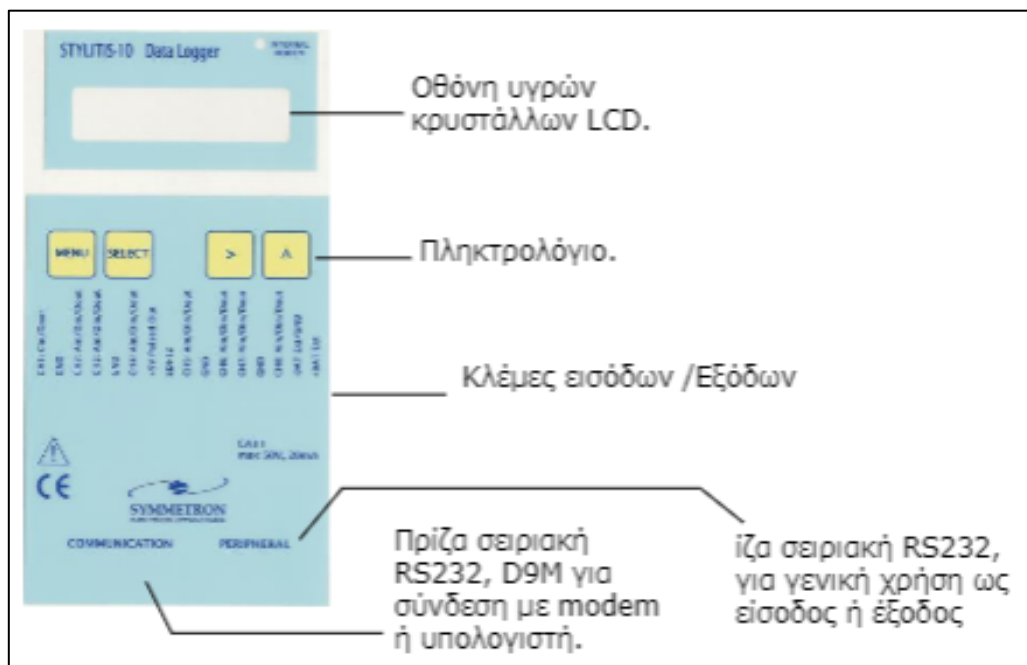
*Εικόνα 25: Αισθητήρας PT-100 μέτρησης θερμοκρασίας επιφανείας.*



*Εικόνα 26: Έξοδος νερού ψύξης.*

## 2.4 Καταγραφή των δεδομένων

Η καταγραφή των δεδομένων έγινε με την χρήση του STYLITIS (Εικόνα 27), το οποίο είναι ένα αυτόνομο καταγραφικό που φέρει μπαταρία. Μπορεί να ανιχνεύσει απευθείας τάση (V), ένταση (I), συχνότητα (Hz). Με την χρήση κατάλληλων αισθητήρων είναι ικανό να μετρήσει θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία, υδατόπτωση, ηλεκτρική ενέργεια.



*Εικόνα 27: Καταγραφικό STYLITIS-10.*

Συνεπώς είναι κατάλληλο για μετεωρολογικούς σταθμούς, συστήματα συλλογής πληροφοριών, παρακολούθηση εγκαταστάσεων Φ/Β, στάθμης δεξαμενών, πίεση

νερού και ροής ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας που προσφέρει η απλότητα της κατασκευής.

Εκτός από τη συλλογή δεδομένων υποστηρίζει έξοδο σήματος που με κατάλληλο προγραμματισμό από τον χρήστη μπορεί να δώσει σήμα σε μικρούς διακόπτες, led με μέγιστη τάση και ένταση (2.5V/20mA).

Η λήψη του σήματος μπορεί να γίνει με καλώδιο ethernet, με απευθείας σύνδεση στον υπολογιστή, ενώ φέρει ειδική θύρα υποδοχής κάρτα SD. Ο εσωτερικός χώρος αποθήκευσης είναι 4 mb που ισούται με χωρητικότητα μετρήσεων 32 μηνών, για λήψη πληροφοριών από 8 κανάλια σε διάστημα 10 λεπτών. Με την σύνδεση του στο δίκτυο μέσω της θύρας ethernet μας δίνεται η δυνατότητα απομακρυσμένης σύνδεσης στο μετρητή. Τέλος μπορεί να αποστέλλει αυτόματα sms με ημερήσια δεδομένα. Για την επεξεργασία των δεδομένων έχει προ εγκατεστημένες τις τιμές των καμπυλών και μετατοπίσεων για κάθε σημείο. Για παράδειγμα για τιμή 1Hz, υπολογίζει την εξίσωση ( $ax^2 + bx + c$ ).

Για την επικοινωνία με το STYLITIS χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Orion 4 της Symmetron. Μέσω του προγράμματος μπορεί να γίνει ο προγραμματισμός των αισθητήρων, να αποθηκευτούν και να επεξεργαστούν τα δεδομένα καθώς επίσης να επικοινωνήσει το καταγραφικό απευθείας με το δίκτυο.

#### 2.4.1 Συνδεσμολογία STYLITIS

Στην εγκατάσταση είναι τοποθετημένα δύο διαφορετικά καταγραφικά. Η παροχή του ρεύματος για την εξασφάλιση συνεχούς λειτουργίας γίνεται από μία πρίζα που διέρχεται από ασφάλεια 10 A. Η παροχή είναι κοινή και γίνεται από ένα φορτιστή μπαταριών οξέος μόλυβδου με τάση 12V. Η σύνδεση στα δύο καταγραφικά γίνεται στις θέσεις -BAT Ext/GND για τον θετικό πόλο που εξέρχεται από το φορτιστή και στην θέση +Bat Ext για τον αρνητικό πόλο αντίστοιχα. Ο τρόπος σύνδεσης μαζί με τους αισθητήρες που αντιστοιχούν σε κάθε STYLITIS περιγράφεται παρακάτω αναλυτικά ενώ απεικονίζεται στο (Εικόνα 28). Πριν από οποιαδήποτε αλλαγή στις ρυθμίσεις του καταγραφικού πρέπει να απενεργοποιηθεί η καταγραφή δεδομένων (ACQ-OFF) είτε με τα πλήκτρα τα οποία βρίσκονται στο μπροστά μέρος της συσκευής είτε μέσω του προγράμματος Orion. Στην συνέχεια μπορούν να πραγματοποιηθούν οι όποιες αλλαγές με την χρήση του προγράμματος και επιστρέφοντας την ρύθμιση στην θέση (ACQ-ON) συνεχίζεται η καταγραφή δεδομένων.

#### **STYLITIS A**

Περιλαμβάνει τα τέσσερα θερμόμετρα μέτρησης νερού PT-100.

- Ο αισθητήρας (T<sub>12</sub>) (θερμοκρασίας νερού) συνδέεται στο CH2
- (W,B καλώδια) και GND ενώ μεσολαβεί αντίσταση 2kΩ / 0.1%, 3ppm
- Ο αισθητήρας (T<sub>01</sub>) (θερμοκρασίας νερού) συνδέεται στο CH3

- (W,B καλώδια) και GND ενώ μεσολαβεί αντίσταση  $2k\Omega / 0.1\%$ ,  $3\text{ppm}$
- Ο αισθητήρας ( $T_{i1}$ ) (θερμοκρασίας νερού) Συνδέεται στο CH4
- (W,B καλώδια) και GND ενώ μεσολαβεί αντίσταση  $2k\Omega / 0.1\%$ ,  $3\text{ppm}$
- Ο αισθητήρας ( $T_{o2}$ ) (θερμοκρασίας νερού) συνδέεται στο CH5
- (W,B καλώδια) και GND ενώ μεσολαβεί αντίσταση  $2k\Omega / 0.1\%$ ,  $3\text{ppm}$

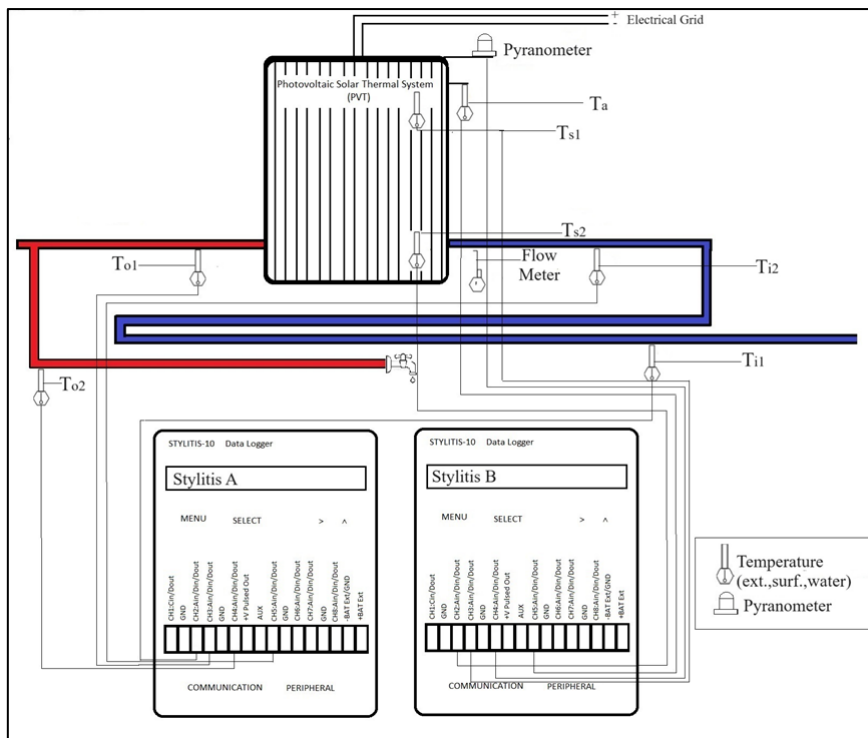
### **STYLITIS B**

Περιλαμβάνει τα δύο θερμομέτρα μέτρησης θερμοκρασίας επιφανείας PT-100, το πυρανόμετρο και τον αισθητήρα θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

- Ο αισθητήρας θερμοκρασίας επιφανείας ( $T_{S1}$ ) συνδέεται στο CH 1
- (W καλώδιο) και (K) GND
- Ο αισθητήρας θερμοκρασίας επιφανείας ( $T_{S2}$ ) συνδέεται στο CH 2
- (W καλώδιο) και (K) GND
- Το πυρανόμετρο (P) συνδέεται στο CH 3 (K καλώδιο) και GND
- (W καλώδιο) ενώ μεσολαβεί αντίσταση  $2k\Omega / 0.1\%$ ,  $3\text{ppm}$
- Ο αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_a$ ) συνδέεται στο CH4
- (W,B καλώδια) και GND ενώ μεσολαβεί αντίσταση  $2k\Omega / 0.1\%$ ,  $3\text{ppm}$

\*Όπου : W=λευκό, B=καφέ, R=κόκκινο, G=πράσινο

\*\*Οι θέσεις των αισθητήρων στην εγκατάσταση όπως επίσης και τα σημεία σύνδεσης στο STYLITIS φαίνονται στο παρακάτω σχήμα

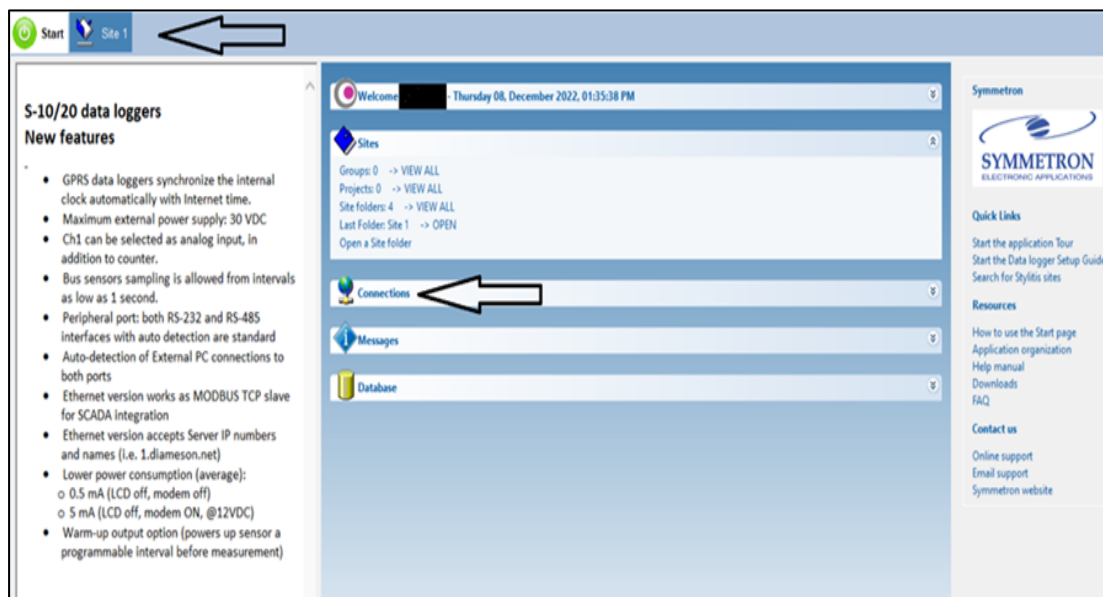


**Εικόνα 28: Γραφική απεικόνιση της θέσης των αισθητήρων σε αντιστοιχία με τα δύο καταγραφικά .**

## 2.4.2 Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των σημάτων που κατέγραψε ο STYLITIS και η μετατροπή τους στις αντίστοιχες τιμές (π.χ. °C, W/m<sup>2</sup>) έγινε με την χρήση του προγράμματος Orpton 4. Είναι μια εφαρμογή Windows που έχει σχεδιαστεί για χρήση με όλα τα καταγραφικά Symmetron STYLITIS.

Προσφέρει στον χρήστη την δυνατότητα εύκολης σύνδεσης και λήψης των δεδομένων ενσύρματα ή και από απόσταση με την χρήση δικτύου. Ενσωματωμένο πρόγραμμα προβολής και επεξεργασίας δεδομένων καθώς και απεικόνιση των τιμών με την μορφή γραφικών παραστάσεων. Η σύνδεση με το πρόγραμμα για κάθε νέο καταγραφικό όπως φαίνεται στην (Εικόνα 29) γίνεται με την επιλογή δημιουργίας νέου (Site) θέσης αποθήκευσης και (Connection) σύνδεσης με την δημιουργία φακέλου και χρήση της αποκλειστικής διεύθυνσης IP που φέρει το κάθε καταγραφικό, είτε ενσύρματα με την χρήση καλωδίου ethernet είτε με απομακρυσμένη σύνδεση εφόσον το καταγραφικό έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο.

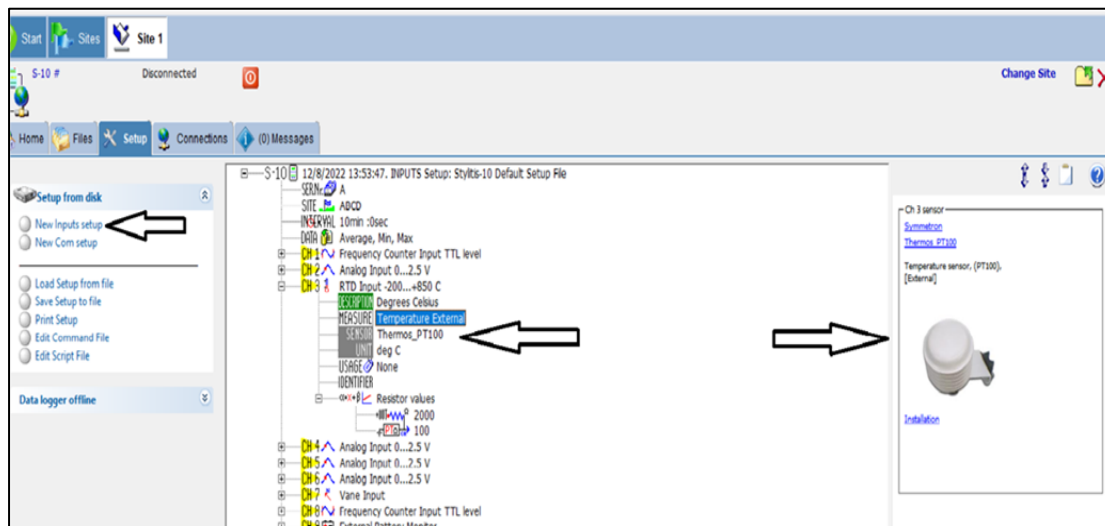


*Εικόνα 29: Διαδικασία σύνδεσης νέου καταγραφικού στο λειτουργικό σύστημα*

Με την επιλογή (New input set up) επιλέγουμε για τον κάθε αισθητήρα το αντίστοιχο (channel) που είναι συνδεδεμένο στο καταγραφικό (Εικόνα 30). Με βάση την μέτρηση που θέλουμε να κάνουμε βρίσκουμε το τύπο του αισθητήρα που απαιτείται και το πρόγραμμα μας εμφανίζει στα δεξιά την εικόνα του αισθητήρα. Ενώ εφαρμόζει αυτόματα τις τιμές του slope και το offset, των τιμών του σήματος που έχει λάβει τα οποία αντιστοιχούν στο μέγεθος το οποίο θέλουμε να καταγράψουμε και υπάρχουν προεγκατεστημένα στην συσκευή.

Για αισθητήρες οι οποίοι δεν είναι αποθηκευμένοι στην βιβλιοθήκη που φέρει το πρόγραμμα υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής, των τιμών εύρους σήματος που φέρει ο

κάθε αισθητήρας χειροκίνητα. Μετά την παραμετροποίηση του καταγραφικού μπορεί να γίνει άμεση ανάγνωση για τις τιμές που δίνει ο κάθε αισθητήρας στιγμιαία μέσω της οθόνης LCD που φέρει στην εμπρός όψη με την χρήση πλήκτρων στο εμπρόσθιο τμήμα του καταγραφικού .



*Εικόνα 30: Διαδικασία εισαγωγής νέου αισθητήρα στο πρόγραμμα.*

Τέλος εμφανίζονται τα αποτελέσματα (πληροφορία) σε μορφή πινάκων τα οποία στην συνέχεια μπορούν να εξαχθούν και να τα επεξεργαστούν περαιτέρω. Δίνονται επίσης και σε μορφή γραφικής παράστασης (Εικόνα 31). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα απεικονίζεται η γραφική παράσταση της θερμοκρασία του νερού ως προς το χρόνο για διάστημα μιας ώρας στις 20/01/2023. Σε κάθε διαφορετικό χρώμα εμφανίζεται η τιμή των τεσσάρων αισθητήρων που επιλέξαμε να εξετάσουμε από το σύνολο των εννιά που είναι εγκατεστημένοι για το πείραμα.



*Εικόνα 31: Γραφική απεικόνιση των μετρήσεων.*



### Κεφάλαιο 3. Πειραματικό μέρος

Για το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας, αρχικά θα παρουσιαστεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων που βρίσκονται τοποθετημένοι μόνιμα στην εγκατάσταση. Έπειτα θα παρουσιαστεί ενδεικτικά ένας αριθμός από το σύνολο των μετρήσεων που λήφθηκαν τα οποία στη συνέχεια θα μας οδηγήσουν σε συμπεράσματα.

Ενώ η διαθέσιμη περίοδος λήψης μετρήσεων ήταν εκτεταμένη Σεπτέμβριος (2022) - Μάιος (2023) η φύση του πειράματος επηρεάζει την ωφέλιμη περίοδο για λήψη αποτελεσμάτων, που μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα, καθώς απαιτεί την ύπαρξη υψηλών περιβαλλοντικών θερμοκρασιών  $>25^{\circ}\text{C}$  (θερμοκρασία δοκιμής των Φ/Β με βάση τα πρότυπα που ακολουθούν οι κατασκευαστές) και υψηλή ηλιοφάνεια. Οι συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες απαιτούνται έτσι ώστε να παρατηρηθεί πτώση της θερμοκρασίας του πάνελ μέσω της ψύξης, με επακόλουθη αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής και επαρκή θέρμανση του ψυκτικού ρευστού, με το οποίο δίνετε έπειτα να κριθεί κατά πόσο είναι χρήσιμη η συγκεκριμένη τεχνολογία και η περαιτέρω εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας.

#### 3.1 Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων

Οι τιμές των αισθητήρων για τη μέτρηση θερμοκρασίας νερού συγκρίθηκαν με τα αναλογικά θερμόμετρα, τα οποία βρίσκονται πλησίον του εκάστοτε αισθητήρα, καθώς και μεταξύ τους εφόσον υπάρχει από ένα ζεύγος για την θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ρευστού από το συλλέκτη όπως και με πρότυπο θερμόμετρο.



*Εικόνα 32: Πρότυπο πυρανόμετρο Hukseflux SR15-A1 (αριστερά) & διάταξη βαθμονόμησης (δεξιά)*

Οι τιμές που δίνει ο αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος επιβεβαιώνεται από πρότυπα όργανα που βρίσκονται παρακείμενα της εγκατάστασης σε ακτίνα μικρότερη των δύο μέτρων.

Για το όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας τα δεδομένα επιβεβαιώθηκαν από πρότυπο πυρανόμετρο (Hukseflux) του εργαστηρίου (Εικόνα 32) και οι τιμές που συγκρίθηκαν δίνονται στον Πίνακα 2. Δεν έγινε κάποια βαθμονόμηση στον αισθητήρα καθώς η διαφορά που εμφανίζει με το πρότυπο κρίθηκε ότι δεν θα επηρεάσει την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

*Πίνακας 2: Τιμές ακτινοβολίας από τα πυρανόμετρα Apogee και Hukseflux*

<i>α/α.</i>	<b>Apogee (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Hukseflux (W/m<sup>2</sup>)</b>	<i>α/α.</i>	<b>Apogee (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Hukseflux (W/m<sup>2</sup>)</b>
<i>1</i>	<b>974.6</b>	<b>973</b>	<i>10</i>	<b>973.6</b>	<b>984</b>
<i>2</i>	<b>978</b>	<b>975</b>	<i>11</i>	<b>969.4</b>	<b>983</b>
<i>3</i>	<b>982.1</b>	<b>975</b>	<i>12</i>	<b>971.5</b>	<b>984</b>
<i>4</i>	<b>987.3</b>	<b>976</b>	<i>13</i>	<b>971.6</b>	<b>984</b>
<i>5</i>	<b>986.3</b>	<b>975</b>	<i>14</i>	<b>973.2</b>	<b>982</b>
<i>6</i>	<b>986.4</b>	<b>976</b>	<i>15</i>	<b>971.6</b>	<b>981</b>
<i>7</i>	<b>982.1</b>	<b>979</b>	<i>16</i>	<b>973.5</b>	<b>981</b>
<i>8</i>	<b>905.6</b>	<b>980</b>	<i>17</i>	<b>976.5</b>	<b>983</b>
<i>9</i>	<b>977.4</b>	<b>984</b>	<i>18</i>	<b>977.2</b>	<b>989</b>

Τα ανεμολογικά στοιχεία δόθηκαν από ανεμόμετρο που βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την εγκατάσταση χωρίς να παρεμβάλλεται εμπόδιο μεταξύ τους. Οι απολήξεις του Φ/Β μετρήθηκαν με την χρήση πολύμετρου (FLUKE) για τις ορθές ενδείξεις τάσης (V) και έντασης (I) (Εικόνα 33).

Για την μέτρηση της ογκομετρικής παροχής για τις διαφορετικές παροχές που επιλέχθηκαν, επειδή ο ρυθμιστής ροής που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι ακριβείας, για κάθε παροχή λήφθηκε μια σειρά από μετρήσεις με σκοπό να βρεθεί η απόκλιση που

προκύπτει σε κάθε μέτρηση από την θέση του ρυθμιστή. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 3 δίνονται μερικές από τις μετρήσεις.



**Εικόνα 33: Πρότυπο όργανο μέτρησης τάσης και έντασης ρεύματος (FLUKE)**

Από το σύνολο των τιμών που συλλέχθηκαν, προκύπτει ότι το συστηματικό σφάλμα για την παροχή 0.7 l/min είναι  $\pm 7.85\%$ , για την παροχή 1.5 l/min είναι  $\pm 8.3\%$ , 2.5 l/min  $\pm 11.5\%$  και για την παροχή 3l/min είναι  $\pm 3.6\%$  αντίστοιχα. Καθώς δεν ήταν δυνατό να βαθμονομηθεί ο συγκεκριμένος διακόπτης, οι αποκλίσεις που προέκυψαν συνυπολογίστηκαν στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 3: Μετρήσεις παροχής από το άνοιγμα του διακόπτη σε κάθε μία από τις επιλεγμένες θέσεις.**

α/α	Θέση διακόπτη – Παροχή			
	0,7 l/min	1,5 l/min	2,5 l/min	3 l/min
1	0.7	1.47	2.5	2.7
2	0.85	0.915	2.375	3.2
3	0.7	0.975	2.175	3.3
4	0.79	1.425	1.875	2.9
5	0.57	1.725	2.175	3.2
6	0.67	1.395	2	2.8
7	0.77	1.2	2.25	2.95
8	0.85	1.05	2.425	3.12
9	0.85	1.8	2.1	3
10	0.8	1.8	2.25	2.85

### 3.2 Μετρήσεις PVT

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας αριθμός από μετρήσεις χωρίς να έχουν υποστεί επεξεργασία οι οποίες στην συνέχεια αξιολογήθηκαν για να ληφθούν τα τελικά συμπεράσματα. Οι μετρήσεις λήφθηκαν χωρίς ροή νερού (μαύρο) αλλά και για τέσσερις διαφορετικές παροχές 0.7 l/min (πράσινο), 1.5 l/min (πορτοκαλί), 2.5 l/min (κόκκινο), 3 l/min (μοβ) παραπλήσιες δηλαδή με τις προτεινόμενες τιμές που δίνει ο κατασκευαστής (1,5-2,5 l/min).

Η σύγκριση των μετρήσεων ανάμεσα στις διαφορετικές ταχύτητες ροής έγινε σε παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, ακτινοβολία, ταχύτητα αέρα) δεδομένου του ότι το πείραμα έγινε σε πραγματικές συνθήκες δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί απόλυτη ταύτιση.

Αρχικά λήφθηκαν μετρήσεις ανά 5 δευτερόλεπτα σε διάστημα 10 λεπτών για την κάθε παροχή. Καθώς όμως ο χρόνος δεν ήταν αρκετός για να προκύψουν επαρκή συμπεράσματα, λόγω της αργής μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας και των υπόλοιπων παραμέτρων, επιλέχθηκε τελικά η συχνότητα του ενός λεπτού σε διάστημα μισής ώρας για κάθε σειρά μετρήσεων. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα πρώτα λεπτά της λειτουργίας του συστήματος ψύξης η θερμοκρασία του νερού εισόδου στο πάνελ είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή του νερού που εξέρχεται, με αποτέλεσμα να θερμαίνεται το πάνελ αντί να ψύχεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο σωλήνας από τον οποίο διέρχεται το νερό του δικτύου είναι εκτεθειμένο στην ηλιακή ακτινοβολία συνεπώς το στάσιμο νερό στο εσωτερικό του αναπτύσσει μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με το νερό που βρίσκεται στο πάνελ και καλύπτεται από το Φ/Β. Συνεπώς απορρίφθηκαν οι πρώτες τιμές θερμοκρασίας μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου. Παρατηρήθηκε επίσης η διαφορά της θερμοκρασίας που έχει το νερό κατά την είσοδο και την έξοδο του από τον συλλέκτη. Στην αρχή της ψύξης του το Φ/Β έχει πιο υψηλή θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος η οποία με την επίδραση της ψύξης μειώνεται ώσπου σταθεροποιείται.

Η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη συμβαδίζει με τις θερμοκρασίες που δίνει ο TOTEE (Πίνακας 5) για την Β' κλιματική ζώνη που βρίσκεται το Αιγάλεω για την περίοδο των τελευταίων ημερών του Μαΐου .

**Πίνακας 4: Ανεπεξέργαστα δεδομένα από τους Stylitis ανά παροχή, όπου 0.7 l/min (πράσινο), 1.5 l/min (πορτοκαλί), 2.5 l/min (κόκκινο), 3 l/min (μωβ). (26/5/2023)**

Ωρα	Stylitis A		Stylitis B				Στοιχεία PVT		
	T <sub>in</sub> (°C)	T <sub>out</sub> (°C)	Θερμ/σία επιφάνειας Ts1 (°C)	Θερμ/σία επιφάνειας Ts2 (°C)	Ηλιακή ακτ/λία G (W/m <sup>2</sup> )	Θερμ/σία Περι/ντος Ta (°C)	Ένταση Ηλ. Ρευμ. I (A)	Τάση Ηλ. Ρευμ. V (V)	Ισχύς P (Watt)
12:30	25.35	30.52	35.15	35.84	670.9	29.08	7.4	29.7	219.78
12:35	25.04	30.25	34.04	34.81	844.4	27.92	7.3	30	219
13:00	23.8	25.96	31.57	32.31	666.7	25.96	7.8	30.1	234.78
13:05	23.77	25.99	31.89	32.68	804.5	26.48	7.5	30.2	226.5
13:30	24.7	27.53	30.97	31.99	496.9	25.42	6.7	30.1	201.67
13:35	25.33	29.63	31.84	32.72	831.9	28.74	7.7	30.2	232.54
13:55	25.53	30.72	29.62	29.37	385	30.70	6.5	30	195
14:00	24.14	31.43	30.28	28.83	279.1	30.09	6.5	30	195

**Πίνακας 5: TOTEE 20701-1/2017. Μέση μηνιαία θερμοκρασία νερού δικτύου ανά κλιματική ζώνη σε °C.**

Κλιματική ή Ζώνη	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
<b>A</b>	13.0	12.8	13.8	16.3	19.9	23.8	26.2	26.6	24.9	21.7	18.1	14.8
<b>B</b>	10.4	10.1	11.7	14.8	18.9	23.1	25.6	25.8	23.5	19.7	15.5	12.2
<b>Γ</b>	6.5	7.3	9.4	13.2	17.6	21.9	24.3	24.6	22.0	17.7	12.7	8.6
<b>Δ</b>	4.2	5.0	7.5	11.5	15.7	19.8	22.2	22.7	20.2	15.9	10.8	6.6

$$T_{in} = (T_{in1} + T_{in2})/2 \quad (3.1)$$

$$T_{out} = (T_{out1} + T_{out2})/2 \quad (3.2)$$

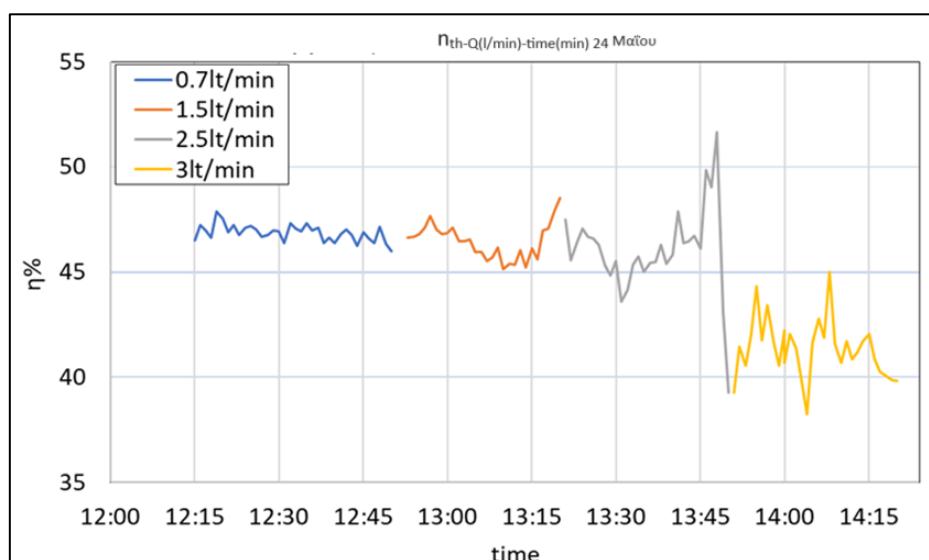
\*Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του νερού στην είσοδο και την έξοδο χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος από τους δύο αισθητήρες αντίστοιχα.

## Κεφάλαιο. 4 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την πειραματική διερεύνηση της ενεργειακής απόδοσης θερμικού-φωτοβολταϊκού συλλέκτη. Μέσω δοκιμών και μετρήσεων, αναλύονται οι αποδόσεις του συστήματος και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις. Εξετάζονται οι παράμετροι που καταγράφηκαν, όπως η παραγόμενη ισχύς, η θερμοκρασία, ο ηλεκτρικός και θερμικός βαθμός απόδοσης. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται γραφικά και σε πίνακες για ευκολότερη κατανόηση και ανάλυση. Επιλέχθηκαν διαφορετικές ημέρες για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με βάση την ηλιοφάνεια και την περιβαλλοντική θερμοκρασία. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού εισόδου και εξόδου από το κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των τιμών από τα δύο ζεύγη αισθητήρων. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα και οι υπολογισμοί για την σύγκριση των διάφορων μεγεθών, τα οποία θα μας οδηγήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα της ψύξης ενός πάνελ με νερό.

### 4.1 Θερμική απόδοση συλλέκτη

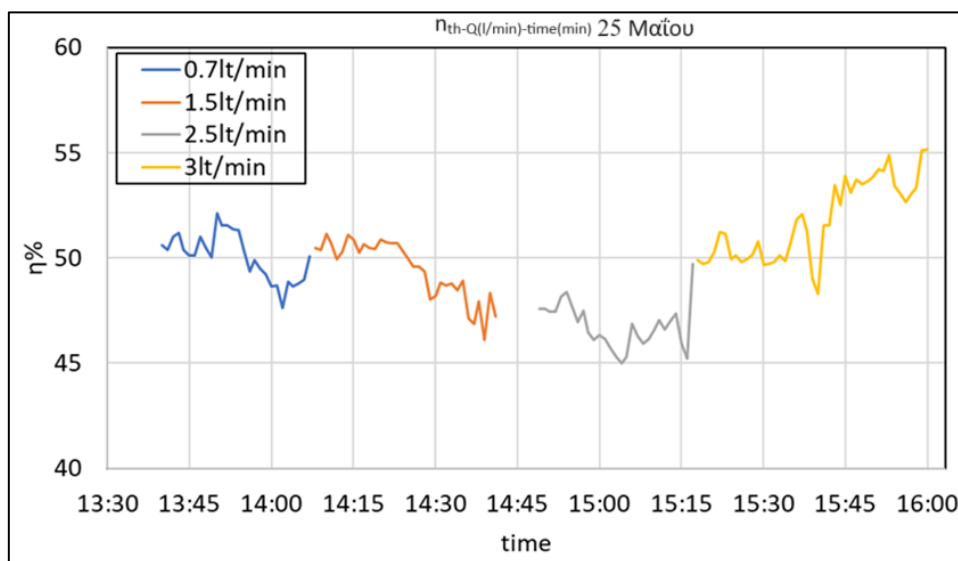
Η ονομαστική θερμική απόδοση του συλλέκτη σύμφωνα με το κατασκευαστή είναι 56%. Το εύρος των διαφορετικών ροών που προτείνει είναι από 1.5-2.5 l/min. Οι διαφορετικές ροές που εξετάσαμε είναι εντός του προτεινόμενου εύρους αλλά και παραπλήσια. Συγκεκριμένα δοκιμές έγιναν για 0.7, 1.5, 2.5, 3 l/min. Για τον πειραματικό υπολογισμό όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.0 συγκρίθηκε η διαφορά της θερμικής ενέργειας που παράγεται στον συλλέκτη στην πραγματικότητα σε σχέση με τη θεωρητική μέγιστη θερμική ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί, λαμβάνοντας υπόψη την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία πάνω στον συλλέκτη.



Διάγραμμα 6: Θερμικός βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min. (24/5/2023).

Στο Διάγραμμα 6 στα χρονικά σημεία 12:50-12:53 , 13:20-13:21 εμφανίζεται μια ασυνέχεια στην γραφική εξίσωση καθώς είναι τα σημεία στα οποία άλλαζε χειροκίνητα η ταχύτητα ροής με αποτέλεσμα να χρειάζεται κάποιος χρόνος για να επιτευχθεί η καινούργια ταχύτητα. Στο σημείο 13:49 εμφανίζεται μια απότομη πτώση του θερμοκινού βαθμού απόδοσης ενώ η παροχή παραμένει σταθερή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι υπήρξε μια απότομη αύξηση στην προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς τα σύννεφα μετατοπίστηκαν, το σύστημα όμως απαιτεί κάποιο χρόνο για να θερμανθεί και ως συνέπεια να μεταβληθεί η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου. Στη συνέχεια μετά το διάστημα 13:48 ενώ η ακτινοβολία σταθεροποιείται και το σύστημα θερμαίνεται η παροχή 3 l/min είναι πολύ υψηλή και το ρευστό δεν παραμένει επαρκή χρόνο στον εναλλάκτη για να αυξηθεί η θερμοκρασία και συνεπώς είναι η λιγότερο αποδοτική από τις τέσσερις διαφορετικές ροές που εξετάσαμε.

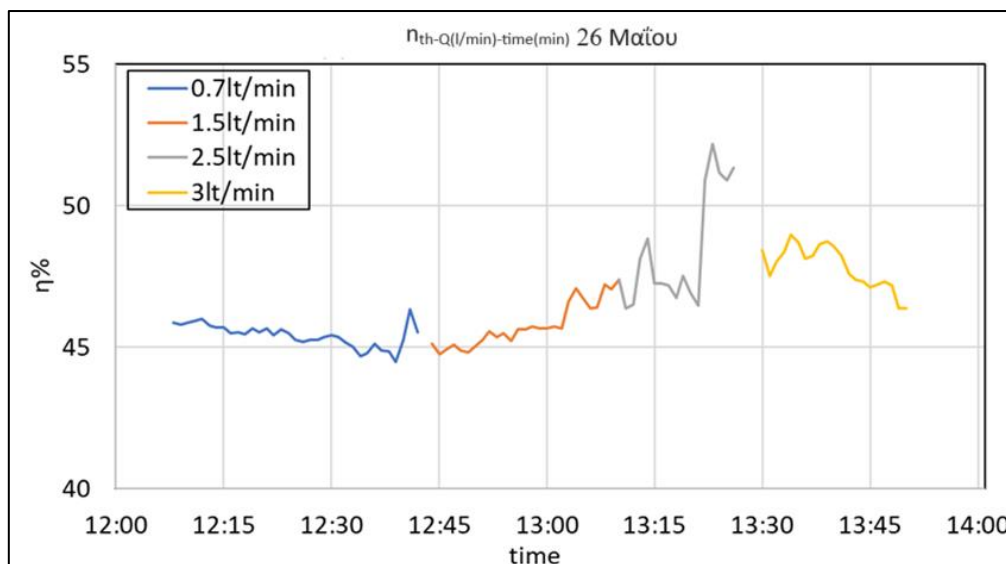
Στο Διάγραμμα 7 όπως και παραπάνω στο σημείο 14:42-14:47 εμφανίζεται μια ασυνέχεια λόγω της αλλαγής στην ταχύτητα ροής, το χρονικό διάστημα που απαιτείται δεν είναι σταθερό και διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Στο σημείο 15:17 όπως και στο 15:40 εμφανίζεται μια απότομη αύξηση του βαθμού απόδοσης που οφείλεται στο ότι το σύστημα αντιδρά με κάποια χρονική καθυστέρηση στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας.



**Διάγραμμα 7: Θερμικός βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min). (25/5/2023)**

Στα σημεία αυτά η θερμοκρασία αυξήθηκε εφόσον το προηγούμενο διάστημα είχε εκτεθεί σε υψηλότερη ακτινοβολία, η οποία έπειτα μειώθηκε και οδήγησε σε αυτή την απότομη μεταβολή. Συγκεκριμένα κατά το διάστημα στο οποίο το σύστημα δεχόταν υψηλή ακτινοβολία η θερμοκρασία του ρευστού ήταν χαμηλή, στην συνέχεια η ακτινοβολία μειώθηκε ενώ το πάνελ είχε θερμανθεί, οδηγώντας σε αυτή την αύξηση του θερμοκινού βαθμού απόδοσης. Αντίστοιχα στο σημείο 15:38 ο συλλέκτης εκτέθηκε σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία έπειτα από σκίαση που είχε υποστεί τα προηγούμενα

λεπτά και οδήγησε στην στιγμιαία πτώση της θερμικής του απόδοσης μέχρι να σταθεροποιηθεί εκ νέου. Οι συγκεκριμένη μέρα από τις τρεις που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι αυτή με την πιο σταθερή ακτινοβολία και τις λιγότερες μεταβολές. Οι συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες οδήγησαν τον συλλέκτη να εμφανίζει σταθερά υψηλό θερμικό βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ημέρες.



Διάγραμμα 8: Θερμικός βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min (26/5/2023)

Στο Διάγραμμα 8 παρατηρείται η ίδια ασυνέχεια στο σημείο 12:42-12:44 και 13:26-13:29 λόγω μεταβολής του ρυθμού ροής. Η συγκεκριμένη ημέρα ήταν αίθρια και παρατηρήθηκε η υψηλότερη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία. Στο σημείο 13:13 εμφανίζεται αύξηση του βαθμού απόδοσης η οποία οφείλεται στην μεταβολή της ταχύτητας από 1,5 l/min σε 2,5 l/min καθώς η προηγούμενη ταχύτητα δεν απέβαλε επαρκώς την υψηλή ακτινοβολία και κατ' επέκταση θερμότητα που δεχόταν το πάνελ. Στο σημείο 13:28 η πτώση του βαθμού απόδοσης προέκυψε από την μεταβολή της παροχής από 2.5l/min σε 3l/min καθώς το ψυκτικό μέσο δεν παραμένει επαρκή χρόνο στο εσωτερικό του ψύκτη έτσι ώστε να αυξήσει την θερμοκρασία του με αποτέλεσμα να εξέρχεται με χαμηλή θερμοκρασία από τον εναλλάκτη.

Στα διαγράμματα 6-8 παρατηρείται η μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης του εναλλάκτη για διαφορετικές ταχύτητες ροής ως προς το χρόνο. Για την περίοδο που εξετάστηκε και με βάση τις δοκιμές που έγιναν, προκύπτει ότι η ιδανική ροή του νερού από το συλλέκτη συμπίπτει με την μέγιστη προτεινόμενη από το κατασκευαστή αυτή δηλαδή των 2.5 l/min.

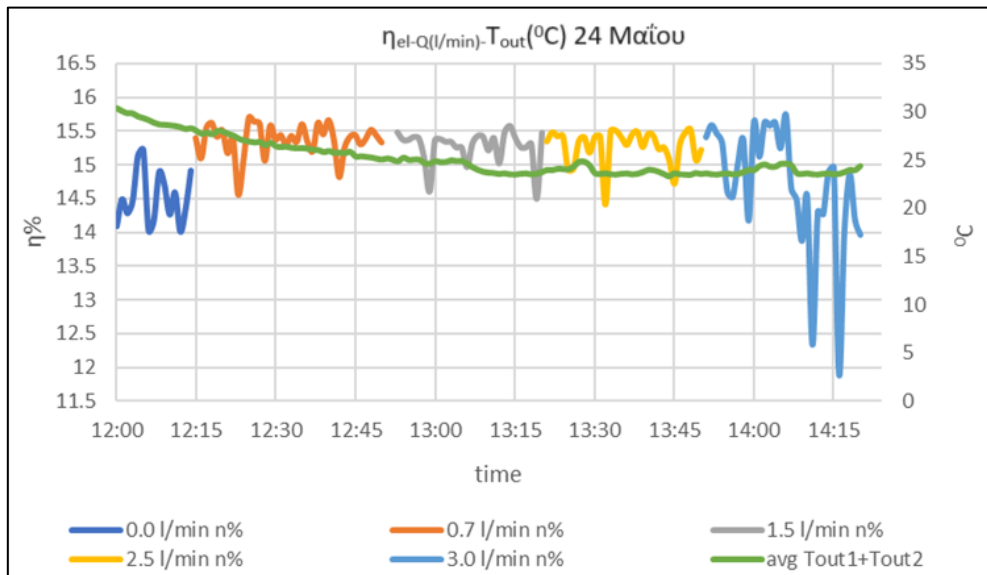
Ο μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης που επιτευχθεί πειραματικά ήταν 55.14% και επιβεβαιώνεται από το 56% που ορίζει ο κατασκευαστής σε εργαστηριακές συνθήκες. Η διαφορά είναι πιθανό να οφείλεται σε γήρανση της εγκατάστασης (επικαθήσεις αλάτων στο εσωτερικό) επιπλέον δεν γνωρίζουμε για ποια παροχή συγκεκριμένα από το προτεινόμενο εύρος 0.9-2.5 l/min έχει επιτευχθεί ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης.



## 4.2 Ηλεκτρική απόδοση συλλέκτη

Η ηλεκτρική απόδοση ενός Φ/Β συστήματος όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.1 υπολογίζεται ως η αναλογία της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύς προς την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συστήματος. Συνεπώς, για να υπολογιστεί η ηλεκτρική απόδοση ανά χρονικό διάστημα, θα πρέπει να γίνει χρήση των τιμών της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της ηλεκτρικής παραγωγής του φωτοβολταϊκού για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Η ηλεκτρική απόδοση συγκρίθηκε σε παραπλήσιες περιβαλλοντικές συνθήκες (ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου) για τις διαφορετικές ταχύτητες ροής καθώς και για την απουσία ψύξης. Στα διαγράμματα 9-11 φαίνεται η ηλεκτρική παραγωγή του Φ/Β για τέσσερις διαφορετικές ροές όπως επίσης και χωρίς. Από τα διαγράμματα προκύπτει η σύνδεση ανάμεσα στην επίδραση της θερμοκρασίας με την απόδοση του συλλέκτη. Καθώς στα διαστήματα που υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού και συνεπώς του συλλέκτη μειώνεται η απόδοση του. Επιπλέον για τις ροές  $\geq 2.5$  l/min η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας και της απόδοσης εμφανίζουν μικρότερη διακύμανση.

Στο διάγραμμα 9 παρατηρούνται σημεία ασυνέχειας κάθε φορά στην οποία αλλάζει η παροχή μέχρι να προσαρμοστεί η καινούργια. Στο διάστημα 12:00-12:15 στο οποίο δεν υπάρχει ροή και η θερμοκρασία του ρευστού και συνεπώς του Φ/Β πάνελ είναι αυξημένη ο ηλεκτρικός βαθμός είναι μειωμένος μέχρι το σημείο όπου ξεκινάει η ψύξη.

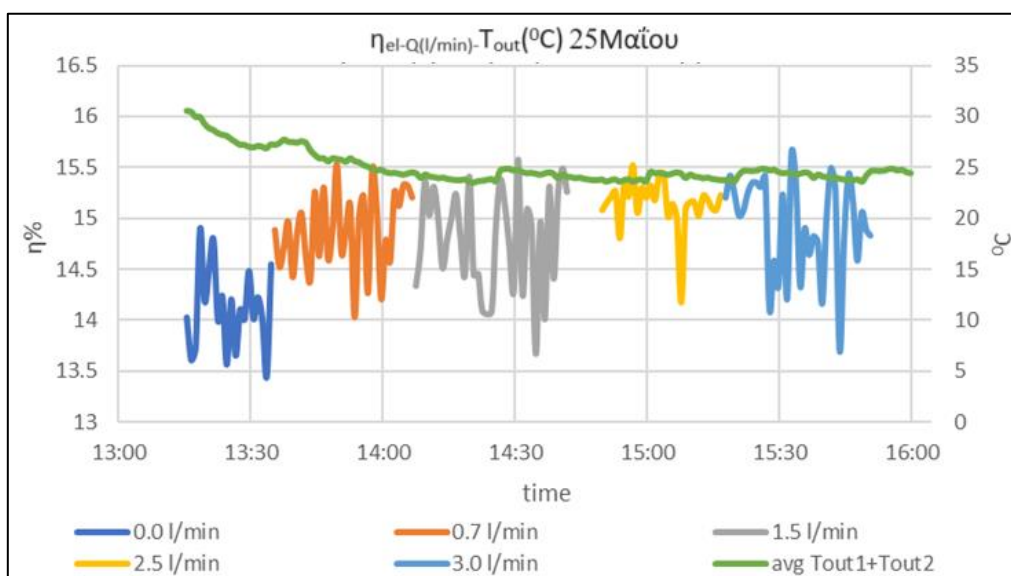


**Διάγραμμα 9: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Φ/Β για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min), και θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη. (24/5/2023).**

Στο διάστημα 12:00-12:28 και 14:00-14:30 υπάρχει μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών καθώς το πάνελ σκιάζεται μερικώς λόγω της θέσης του ήλιου το συγκεκριμένο διάστημα. Στα σημεία 13:28, 13:43 παρατηρείται σύνδεση ανάμεσα στην αύξηση της θερμοκρασίας του νερού στην έξοδο του πάνελ με την ηλεκτρική παραγωγή χωρίς

όμως να είναι άμεση καθώς όπως προαναφέρθηκε το σύστημα απαιτεί κάποιο χρόνο για να απάγει την θερμότητα που έχει δεχτεί το Φ/Β.

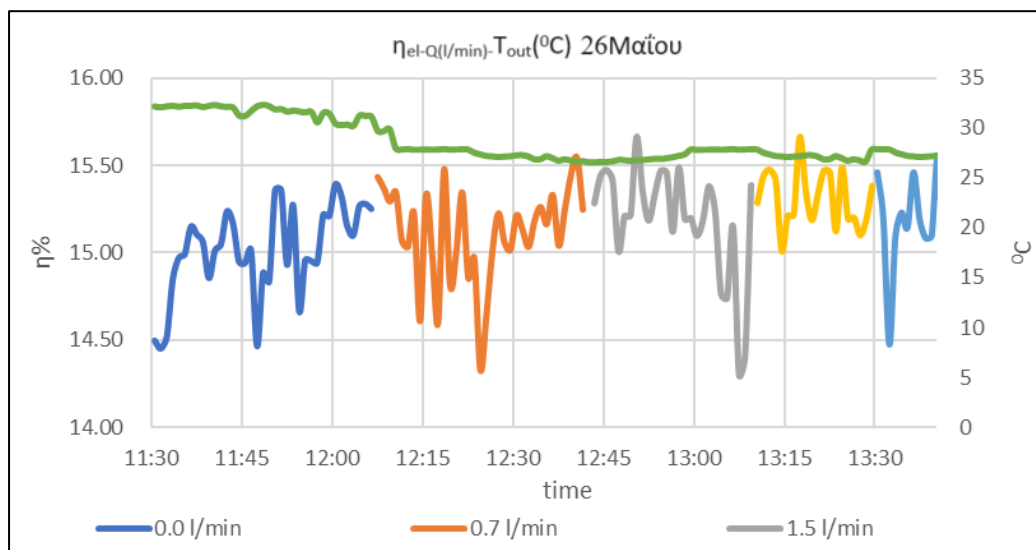
Στο Διάγραμμα 10 παρατηρούνται σημεία ασυνέχειας στα σημεία αλλαγής της παροχής (14:08-14:10,14:44-14:50). Επιπλέον εμφανίζεται πιο έντονη μεταβολή στις τιμές της θερμοκρασίας και του βαθμού απόδοσης η οποία προκαλεί τις απότομες αυξομειώσεις στη γραφική παράσταση καθώς την συγκεκριμένη ημέρα υπήρχε αραιή συννεφιά αλλά έντονος άνεμος, με αποτέλεσμα να υπάρχει σκίαση κατά διαστήματα. Στο διάστημα 13:15-13:35 η θερμοκρασία είναι αυξημένη και παρατηρείται μειωμένη ηλεκτρική απόδοση μέχρι την έναρξη της ψύξης.



**Διάγραμμα 10: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Φ/Β για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min), και θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη. (25/5/2023).**

Στο σημείο 14:11 και έπειτα επικρατούσε συννεφιά στο σημείο κατά διαστήματα, με αποτέλεσμα το Φ/Β να μη δέχεται επαρκή ακτινοβολία και να εμφανίζει χαμηλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Από τις ροές που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε ότι για ροές >1,5l/min η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου και του πάνελ είναι σταθερή και δεν είναι τόσο ευμετάβλητη.

Στο διάγραμμα 11 εμφανίζονται τα σημεία ασυνέχειας στα σημεία αλλαγής της ταχύτητας ροής. Στο σημείο 12:10 διαφαίνεται έντονα η επίδραση της ψύξης στην απόδοση του Φ/Β συλλέκτη η οποία οδήγησε στην αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης, ενώ είναι πιο έντονη η μεταβολή στο συγκεκριμένο διάστημα καθώς υπήρχε έντονη έκθεση της εγκατάστασης σε ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να αυξηθεί η συνολική θερμοκρασία και συνεπώς το σύστημα ψύξης επέδρασε ικανοποιητικά μειώνοντας της θερμοκρασία του συστήματος. Στο σημείο 13:11 το Φ/Β ήταν εκτεθειμένο σε υψηλή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία του πάνελ η ροή δεν ήταν επαρκής και οδήγησε στην μείωση το βαθμού απόδοσης μέχρι την αλλαγή της ταχύτητας όπου και βελτιώθηκε αισθητά. Στο σημείο 13:33 παρατηρείται πτώση στην απόδοση καθώς το πάνελ βρισκόταν μερικώς σκιασμένο σε διαφορετικό σημείο από αυτό που βρίσκεται το πυρανόμετρο.



**Διάγραμμα 11: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης  $\Phi/B$  για διαφορετικές παροχές (0-3 l/min), και η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη. (26/5/2023).**

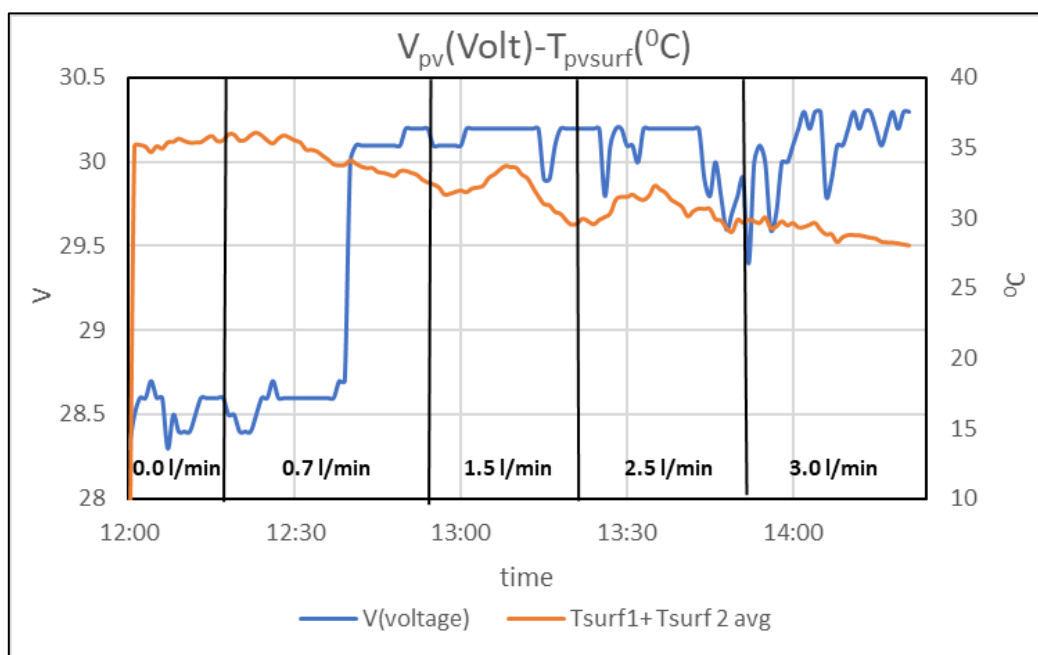
Στον Πίνακα 6 εμφανίζονται οι μέσοι όροι των βαθμών απόδοσης του  $\Phi/B$  για τρεις διαφορετικές ημέρες με ή χωρίς ψύξη, για τέσσερις διαφορετικές παροχές για κάθε ένα αντίστοιχο χρονικό διάστημα η κάθε μία. Παρατηρείται ότι στις 26/5 όπου είναι η ημέρα με την υψηλότερη ακτινοβολία και θερμοκρασία περιβάλλοντος ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι συνολικά υψηλότερος. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης που επιτευχθεί στις πραγματικές συνθήκες που εξετάστηκαν στο πείραμα ήταν 15.46% ποσοστό παραπλήσιο με αυτό που ορίζει ο κατασκευαστής 15.5% +2% (“SERIE CS – FotoTherm,”). Η μείωση αυτή πιθανώς οφείλεται όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.1 σε φθορά που έχει υποστεί το ηλεκτρικό κύκλωμα σε ένα αριθμό από κυψέλες. Η μείωση αυτή ισούται με 2.5% η οποία είναι αποδεκτή καθώς ο κατασκευαστής προβλέπει η μείωση να μη ξεπερνάει το  $\geq 80\%$  σε διάστημα 25 ετών.

**Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας των ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης που επιτυγχάνει το  $\Phi/B$  ανά παροχή για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες.**

Ημερ/νία	24/5/2023		25/5/2023		26/5/2023	
	Χρ. Διάστ.	n%	Χρ. Διάστ.	n%	Χρ. Διάστ.	n%
-	12:00-12:15	<b>14.55</b>	13:16-13:36	<b>14.56</b>	11:31-12:07	<b>15.05</b>
0.7	12:15-12:50	<b>15.04</b>	13:36-14:07	<b>14.94</b>	12:08-12:42	<b>15.15</b>
1.5	12:53-13:20	<b>15.19</b>	14:08-14:41	<b>14.99</b>	12:44-13:10	<b>15.34</b>
2.5	13:21-13:50	<b>15.46</b>	14:49-15:17	<b>15.31</b>	13:10-13:30	<b>15.44</b>
3	13:50-14:20	<b>15.38</b>	15:17-16:00	<b>15.15</b>	13:30-13:50	<b>15.33</b>

Στα διαγράμματα 12-14 εμφανίζεται η μεταβολή της τάσης του  $\Phi/B$  ως συνάρτηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1 όταν στην επιφάνεια του  $\Phi/B$  αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (ανώτερες των 25 °C),

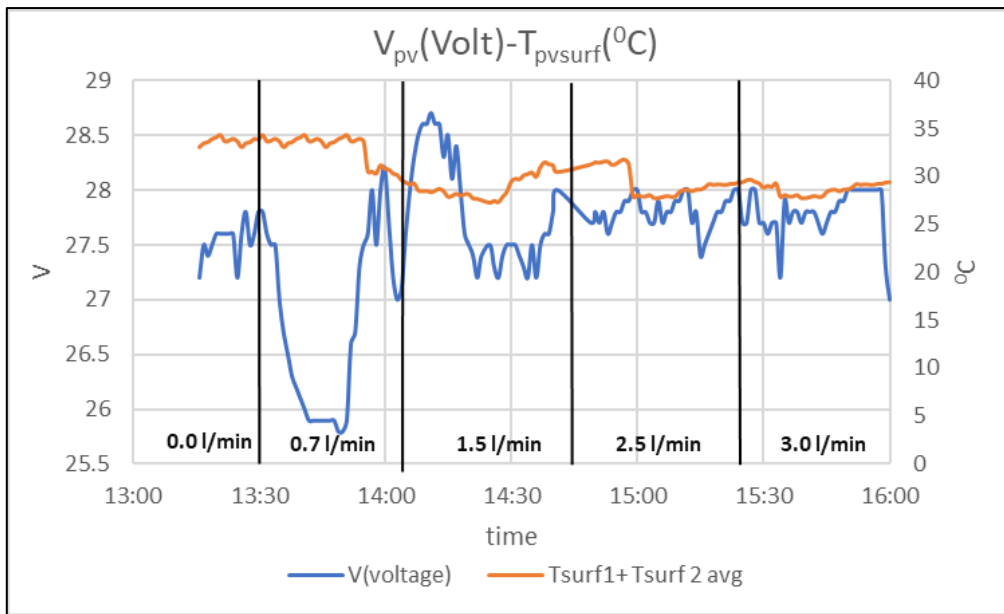
αυξάνεται η κίνηση των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του κρυσταλλικού δεσμού. Η κίνηση αυτή εμποδίζει την μεταφορά των παραγόμενων ηλεκτρονίων στις ελεύθερες θέσεις των ηλιακών κελιών με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο του ανασυνδιασμού. Ως επακόλουθο το Φ/Β οδηγείται σε μείωση του αριθμού των φορτίων που συσσωρεύεται στους πόλους των ηλιακών κυψελών και συνεπώς εμφανίζεται πτώση της τάσης. Στα διαγράμματα εμφανίζεται αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση παρά την μικρή διαφορά θερμοκρασίας που προκύπτει από την ψύξη, παρατηρείται εξάρτηση της τάσης του Φ/Β με την θερμοκρασία που αναπτύσσει στην επιφάνεια του όπως θα αναλυθεί και παρακάτω στα διαγράμματα.



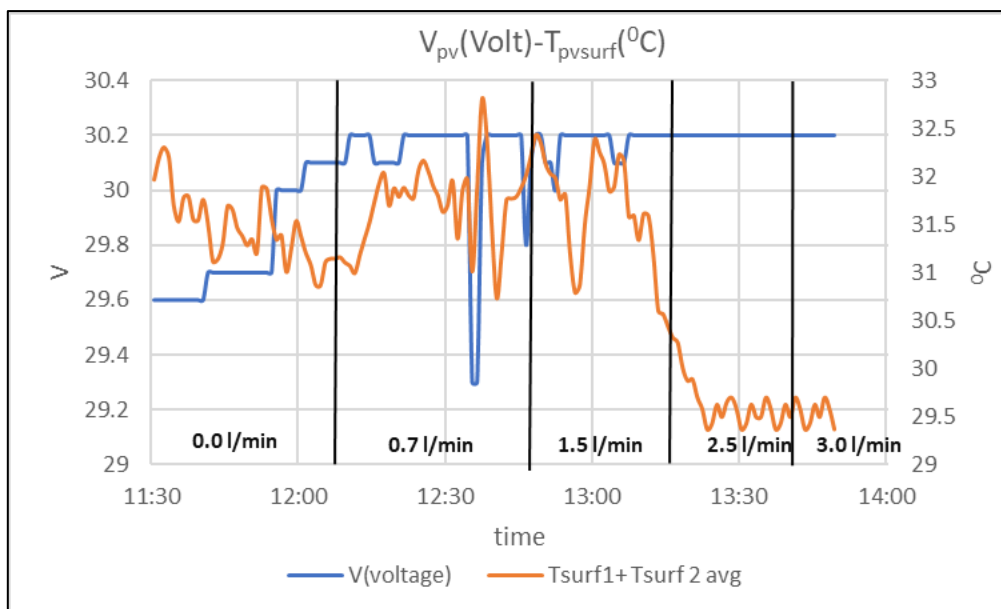
**Διάγραμμα 12: Διάγραμμα τάσης θερμοκρασίας επιφάνειας Φ/Β χωρίς και για διαφορετικές ροές του ρευστού. (24/05/2023)**

Στο Διάγραμμα 12 η ακτινοβολία μέχρι το διάστημα 13:00 παραμένει σταθερή και αρκετά υψηλή. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε άνοδο της θερμοκρασία του Φ/Β και πτώση της τάσης καθώς μέχρι το σημείο 12:20 δεν λειτουργεί το σύστημα ψύξης. Στην συνέχεια παρατηρούμε μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας επιφάνειας, καθώς όπως προαναφερθεί τα πρώτα λεπτά λειτουργίας του ψύκτη θερμό νερό που βρίσκεται στάσιμο στον αγωγό της παροχής διέρχεται από το πάνελ και το θερμαίνει αντί να το ψύχει μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του. Στο σημείο 12:40 η ψύξη αρχίζει να επιδρά στο σύστημα και βαθμιαία μειώνει την θερμοκρασία του Φ/Β εμφανίζοντας μια γραμμικότητα με την βαθμιαία άνοδο της τάσης του πάνελ. Ανάμεσα στις παροχές 2.5 και 3 l/min εμφανίζεται μικρή θερμοκρασιακή πτώση δυσανάλογη όμως των θερμικών απωλειών από το ψύκτη σε σύγκριση με την πιο μικρή παροχή (2.5 l/min).

Στο διάγραμμα 13 στο σημείο 13:40 η πτώση της τάσης του Φ/Β οφείλεται σε μερική σκίαση τμήματος του πάνελ. Στο σημείο 14:15 παρατηρείται η επίδραση της ψύξης στην τάση εξόδου η οποία αυξάνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του Φ/Β. Ενώ αντίστοιχα στο σημείο 14:40 παρατηρείται η πτώση της τάσης με την άνοδο της θερμοκρασίας. Στο διάστημα μετά την αλλαγή παροχής από τα 2.5 l/min και έπειτα παρατηρούνται λιγότερες μεταβολές τόσο όσον αφορά την θερμοκρασία του συλλέκτη αλλά και της τάσης που εμφανίζει.



**Διάγραμμα 13:** Διάγραμμα τάσης θερμοκρασίας επιφάνειας Φ/Β χωρίς και για διαφορετικές ροές του ρευστού. (25/05/2023)

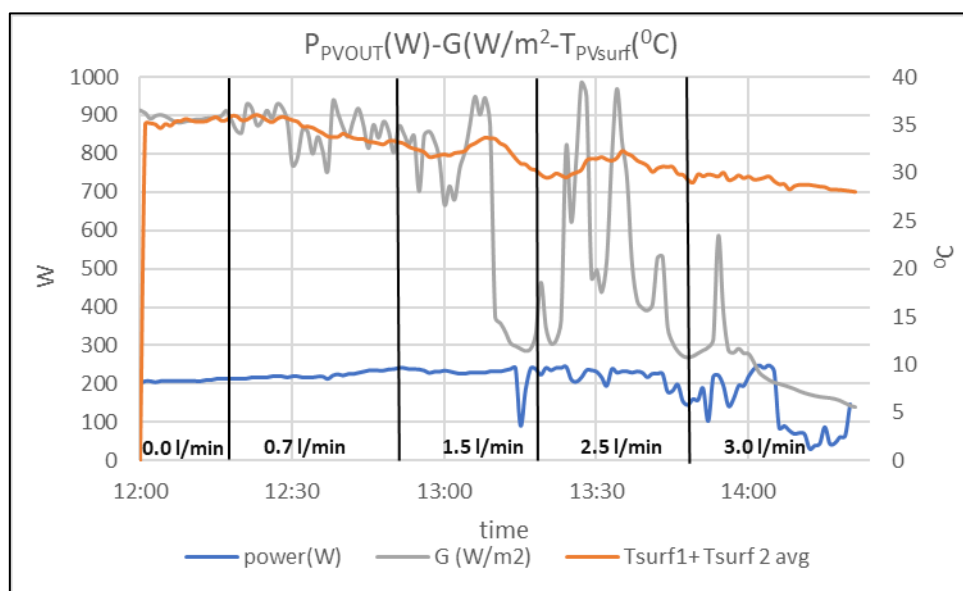


**Διάγραμμα 14:** Διάγραμμα τάσης θερμοκρασίας επιφάνειας Φ/Β χωρίς και για διαφορετικές ροές του ρευστού. (26/05/2023)

Στο διάγραμμα 14 παρατηρείται μεγάλη διακύμανση των τιμών τάσης και θερμοκρασίας επιφάνειας ανάλογες με τις αυξομειώσεις της ακτινοβολίας που δέχτηκε ο συλλέκτης. Στο σημείο 12:10 όπου ξεκίνα να επιδρά η ψύξη στο σύστημα η τάση σταθεροποιείται ενώ επειδή την συγκεκριμένη ημέρα η περιβαλλοντική θερμοκρασία ήταν υψηλότερη ο ψύκτης για ταχύτητα ροής >2,5 l/min μείωσε επαρκώς την θερμοκρασία. Όπως παρατηρείται στην γραφική παράσταση την συγκεκριμένη ημέρα παρά την υψηλή ακτινοβολίας και κατ' επέκταση θερμοκρασία το σύστημα εμφανίζει περιορισμένα θερμικά οφέλη από την ψύξη καθώς η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη των 3 °C.

Στα διαγράμματα 15-17 παρατηρείτε η εξάρτηση της ακτινοβολίας ως προς την θερμοκρασία του συλλέκτη και την ηλεκτρική παραγωγή. Παρατηρούμε ότι η διακυμάνσεις της ακτινοβολίας επηρεάζουν την ηλεκτρική παραγωγή του Φ/Β, ενώ παρά την ψύξη η θερμοκρασία δεν είναι σταθερή, καθώς το σύστημα δεν αντιδρά με την ίδια ταχύτητα με αυτή που μεταβάλλεται η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του πάνελ.

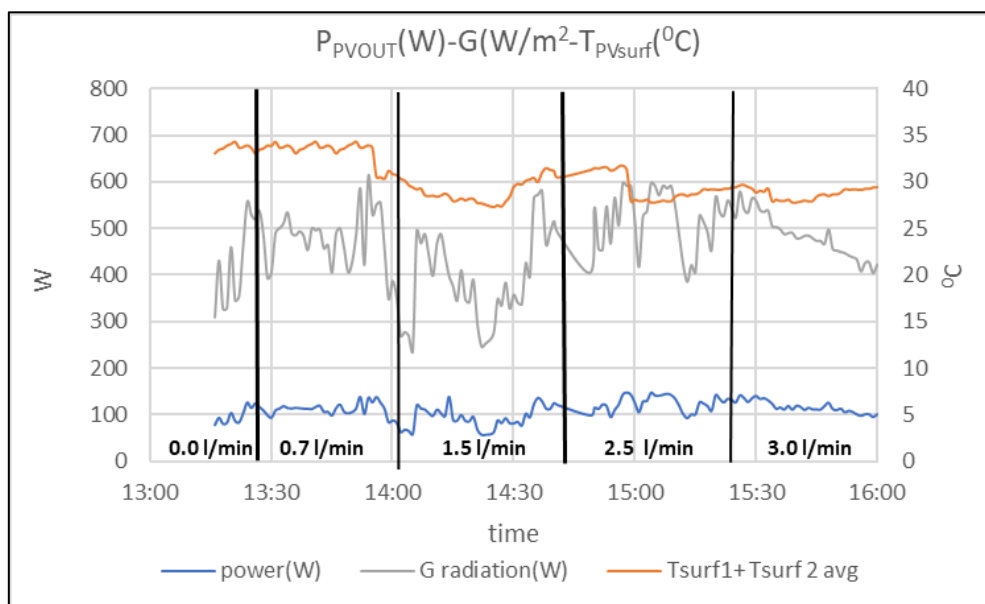
Στο διάγραμμα 15 η ισχύς που παρέχει το Φ/Β μεταβάλλεται ανάλογα με την διακύμανση που έχει η ακτινοβολία όπως στο σημείο 13:15. Στο ίδιο σημείο παρατηρείται η καθυστέρηση με την οποία αντιδρά το σύστημα ψύξης στην μεταβολή της ακτινοβολίας. Επίσης στο σημείο 13:26 και 13:32 παρατηρείται η επίδραση που έχει η αύξηση της ακτινοβολίας στην θερμοκρασία του συλλέκτη και τέλος στην μείωση της ισχύς που αποδίδει. Στο διάστημα 13:58 και έπειτα παρά το γεγονός ότι η ακτινοβολία είναι μειωμένη η θερμοκρασία του πάνελ δεν μεταβάλλεται καθώς συμπίπτει με την θερμοκρασία περιβάλλοντος και δεν διαφέρει κατά πολύ από την θερμοκρασία του νερού που εισάγεται στο ψύκτη από το δίκτυο.



**Διάγραμμα 15: Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφάνειας ηλεκτρικής παραγωγής συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας. (24/05/2023)**

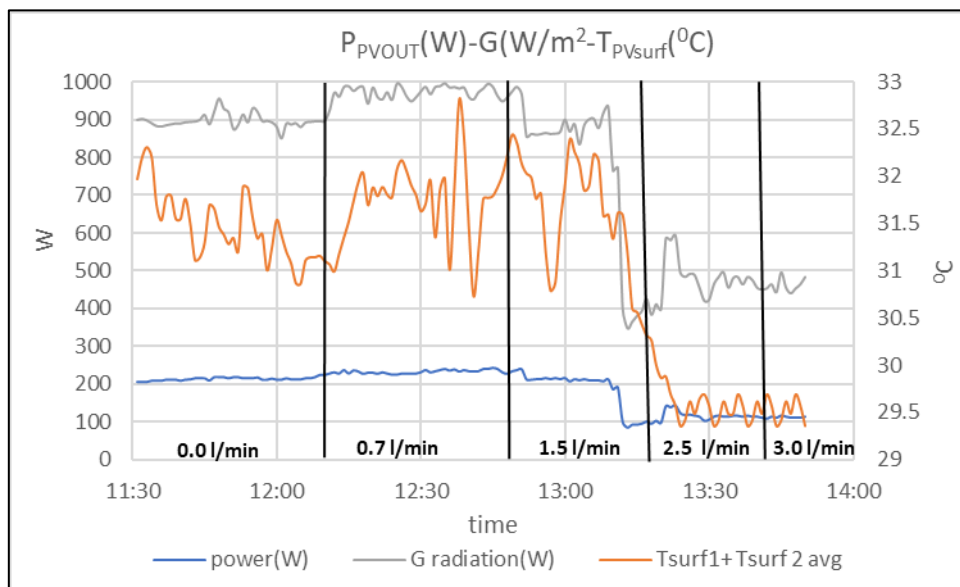
Στο διάγραμμα 16 μέχρι το σημείο 13:45 η θερμοκρασία παραμένει σταθερά υψηλή καθώς η ταχύτητα ροής είναι χαμηλή και απαιτεί περισσότερο χρόνο για να ψύξει το πάνελ. Επίσης παρά την υψηλή ταχύτητα ροής και την χαμηλή ακτινοβολία μετά τις 13:35 η θερμοκρασία του

Φ/Β δεν μειώνεται περαιτέρω εφόσον η θερμοκρασία του νερού του δικτύου για την συγκεκριμένη κλιματική ζώνη και περίοδο του χρόνου είναι ~25 °C.



**Διάγραμμα 16: Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφανείας ηλ. Παραγωγής συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας. (25/05/2023)**

Στο διάγραμμα 17 μέχρι το διάστημα 13:15 η θερμοκρασία είναι υψηλή εφόσον η ταχύτητα ροής δεν ψύχει επαρκώς το πάνελ. Στο σημείο 13:25 εμφανίζεται αύξηση της ισχύς εξόδου του Φ/Β σε συνάρτηση με την πτώση της θερμοκρασίας του πάνελ. Στο σημείο 12:15 η θερμοκρασία αυξάνεται καθώς διέρχεται από το πάνελ ζεστό νερό που βρίσκεται στάσιμο στο εσωτερικό του αγωγού.



**Διάγραμμα 17: Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφανείας ηλ. Παραγωγής συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας. (26/05/2023)**

## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα στα οποία μας οδήγησε η πειραματική διαδικασία.

Επιβεβαιώθηκε πειραματικά η υψηλότερη ταχύτητα ροής που προτείνει ο κατασκευαστής αυτή των 3l/min. Στην συγκεκριμένη εγκατάσταση προκύπτει ότι ιδανική παροχή με τα μεγαλύτερα θερμικά ενεργειακά οφέλη, είναι η 2,5 l/min καθώς ο θερμικός βαθμός απόδοσης για την συγκεκριμένη είναι 55.14% το οποίο επιβεβαιώνει τα στοιχεία του κατασκευαστή που αναφέρει 56%. Κρίνεται ως ικανοποιητικός, καθώς πρόκειται για ένα υβριδικό σύστημα το οποίο δεν έχει μόνο στόχο να μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια, αλλά πρωτίστως σε ηλεκτρική, είναι σαφώς χαμηλότερος από τους θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες μονής ενέργειας οι οποίοι έχουν βαθμό απόδοσης 60%-70%. Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση υπάρχει καθώς η ηλιακή ακτινοβολία δεν προσπίπτει απευθείας στο θερμικό συλλέκτη, αλλά η ενέργεια μεταφέρεται με αγωγιμότητα από το Φ/Β στην επιφάνεια του ψύκτη και με συναγωγή στο ρευστό (νερό) που περιέχει. Συνεπώς οι απώλειες που εμφανίζει είναι υψηλότερες, από ένα συλλέκτη που δέχεται απευθείας την ακτινοβολία και η απορροφητική του επιφάνεια είναι σχεδιασμένη για να συλλέγει την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, σε αντίθεση με το PVT που η ακτινοβολία αρχικά προσπίπτει στο Φ/Β το οποίο δεν έχει ως στόχο να συλλέξει το σύνολο της ακτινοβολίας αλλά μέρος της αντανακλάται στο περιβάλλον. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι το μειονέκτημα αυτό μπορεί να ισοσταθμιστεί εύκολα αν ποσοστό ή και το σύνολο της παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμικής ενέργειας την στιγμή



που απαιτείται αποφεύγοντας την απώλεια θερμότητας από το δοχείο συλλογής προς το περιβάλλον όταν το ψυκτικό μέσο παραμένει στάσιμο στο εσωτερικό του.

Αντίστοιχα μεγαλύτερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης εμφανίζει το σύστημα για την ροήτων 2,5 l/min ίσο με 15,46% το οποίο πλησιάζει την τιμή που έχει δώσει ο κατασκευαστής (15,5 %). Η ροή αυτή συνεπώς κρίνεται ως η βέλτιστη τόσο για να παρέχει επαρκή ψύξη στο Φ/Β αλλά και για να επιτευχθούν επαρκή θερμικά οφέλη. Ενώ η μειωμένη απόδοση συγκριτικά με την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής, συνάδει με τις ελλειψματικές κυψέλες που φέρει το Φ/Β όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1. Σημειώνεται ότι η τεχνολογία κατασκευής του πάνελ είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και ο τυπικός βαθμός απόδοσης είναι μεταξύ 13-15 %.

Παρατηρήθηκε ότι κατά τα πρώτα λεπτά λειτουργίας του συστήματος ψύξης η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο ήταν πιο υψηλή από αυτή της εξόδου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο σωλήνας που μεταφέρει το νερό του δικτύου ύδρευσης, που χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο δεν διαθέτει επαρκή μόνωση, οπότε το νερό θερμαίνεται όταν παραμένει στάσιμο περισσότερο από την θερμοκρασία που αναπτύσσει ο συλλέκτης ο οποίος βρίσκεται καλυμμένος πίσω από το Φ/Β πάνελ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κατά τα πρώτα λεπτά λειτουργίας να έχουμε τα αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Μέσα από δοκιμές παρατηρήθηκε ότι το διάστημα των 30 λεπτών είναι επαρκές για να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στο συλλέκτη. Κατά την διαδικασία της λήψης των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά χρονικά διαστήματα ξεκινώντας από τα δέκα λεπτά και σταδιακά αυξήθηκαν. Τέλος κρίθηκε ιδανικό το διάστημα της μισής ώρας για την εξαγωγή ασφαλών και ποικίλων συμπερασμάτων καθώς το σύστημα χρειάζεται κάποια ώρα για να αντιδράσει στις μεταβολές. Ενώ η συχνότητα μεταβλήθηκε και αυτή από μισό λεπτό αρχικά σε ένα.

Υπάρχει περιθώριο στην ανάπτυξη και χρήση των θερμικών φωτοβολταϊκών τόσο σε μικρής κλίμακας αλλά και σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις οικιακές ή και βιομηχανικές. Καθώς η τεχνολογία του PVT υπερτερεί έναντι συστημάτων μονής ενέργειας λόγω της καλύτερης συνολικής απόδοσης, του μικρού σχετικά κόστους κτήσης και της αφθονίας που υπάρχει σε υπόγεια ρεύματα νερού για την παροχή ψύξης, για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές όπου βρίσκονται συνήθως εγκατεστημένα τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Η θερμική ενέργεια που παράγουν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ποικιλοτρόπως για θέρμανση χώρων, ζεστού νερού χρήσης και βιομηχανικές εφαρμογές με χαμηλές θερμικές απαιτήσεις. Ενώ τέλος εμφανίζουν σαφές πλεονέκτημα σε αστικές περιοχές που υπάρχει περιορισμένος χώρος (π.χ. ταράτσες κτηρίων) και δεν δίνετε να υπάρχει ξεχωριστή μονάδα για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ψύξη έχει μεγαλύτερα οφέλη όταν γίνεται σε συνδυασμό με την χρήση Φ/Β πάνελ μονό κρυσταλλικού πυριτίου. Καθώς ενώ ο συγκεκριμένος τύπος είναι πολύ πιο αποδοτικός στη μετατροπή της ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια (15-22%), σε υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζεται πιο έντονα σε σχέση με το πάνελ άμορφου πυριτίου (13-15%) το οποίο χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο σύστημα. Συνδυαστικά λοιπόν αυτές οι δύο τεχνολογίες μπορούν να δώσουν την βέλτιστη λύση.

Συγκεντρωτικά παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Ως ιδανική ροή κρίνεται η 2,5l/min. Η οποία εμφανίζει τα μέγιστα θερμικά και ηλεκτρικά οφέλη.
- Ο συλλέκτης παράγει ικανοποιητικά ποσά θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ψύξη μειώνει τη θερμοκρασία του συλλέκτη και μειώνει την πιθανότητα να προκληθεί φθορά από την υπερθέρμανση.
- Η χρήση ενός αυτοματοποιημένου ρυθμιστή ροής θα βελτιώσει συνολικά τη λειτουργία του συλλέκτη, με έμφαση στην θερμική ενέργεια καθώς μια σταθερή ροή δεν μπορεί να προσφέρει τα βέλτιστα σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Καθώς ενώ με τα 2,5l/min το Φ/Β ψύχεται επαρκώς τους χειμερινούς μήνες το σύστημα δεν θερμαίνεται αρκετά από την ηλιακή ακτινοβολία οπότε κρίνεται αναγκαία η αξιοποίηση μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας για περαιτέρω θέρμανση του νερού.
- Η ύπαρξη ενός δοχείου συλλογής και ανακυκλοφορίας του ρευστού θα εξασφάλιζε την περαιτέρω θέρμανση του νερού σε υψηλότερη θερμοκρασία και χρήση σε περισσότερες εφαρμογές.

Τέλος, η παρούσα διπλωματική ολοκληρώνεται με κάποιες προτάσεις για περαιτέρω επιστημονικό – πειραματικό έργο:

- Επανάληψη του πειράματος με δοχείο για να μπορεί να αποθηκεύετε και να επανακυκλοφορεί το νερό το οποίο ψύχει το PVT. Με σκοπό την καλύτερη αξιολόγηση του θερμικού οφέλους, καθώς μπορεί να γίνει συγκέντρωση της ημερήσιας παραγωγής σε θερμική ενέργεια. Ενώ θα μπορούσε να γίνει έρευνα και κατάλληλη διαστασιολόγηση του δοχείου έτσι ώστε να επαρκεί πρωτίστως για την ψύξη του Φ/Β, αλλά και την θέρμανση του νερού στην επιθυμητή θερμοκρασία.
- Περαιτέρω αξιοποίηση του παραγόμενου νερού είτε με αναθέρμανση, είτε με απευθείας αξιοποίηση στις εγκαταστάσεις του πανεπιστημίου.
- Επαναξιολόγηση της ροής που επιλέξαμε τους θερινούς μήνες (συνθήκες καύσωνα), καθώς είναι πιθανό η συγκεκριμένη να αδυνατεί να ψύξει επαρκώς το πάνελ με αποτέλεσμα να εμφανίζει μειωμένη απόδοση σε σχέση με αυτό που υπολογίστηκε.
- Διαστασιολόγηση για την κάλυψη των αναγκών νερού μιας μέσης οικογένειας.

- Διερεύνηση της επίδρασης που έχει η υδρόψυξη στην μακροζωία μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Για παράδειγμα στο πάνελ που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση παρατηρήθηκαν ελαττώματα, τα οποία προκλήθηκαν από την υψηλή θερμοκρασία και ενδέχεται να είχαν αποφευχθεί αν το σύστημα της ψύξης ήταν σε λειτουργία.
- Μελέτη αξιοποίησης της αρχής λειτουργίας συμπαραγωγής ενέργειας και για άλλους τύπους Φ/Β όπως είναι οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες, παραβολικοί, κ.α.
- Μελέτη εφαρμογής συγκεντρωτικού συστήματος ψύξης σε μεγάλα Φ/Β πάρκα της τάξης των (MW).
- Εφαρμογή συστήματος ελέγχου ροής της αντλίας για βέλτιστη λειτουργία σε όλες τις συνθήκες.
- Συνδυασμός διαφόρων τεχνολογιών για βελτιστοποίηση της αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου. Όπως Φ/Β μονοκρυσταλλικού πυριτίου, σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου και ρυθμιστής ροής με βάση την θερμοκρασία του πάνελ και των καιρικών προβλέψεων.

## Βιβλιογραφία

1. Asdrubali, F., Desideri, U. (Eds.), 2019. Chapter 7 - High Efficiency Plants and Building Integrated Renewable Energy Systems, in: Handbook of Energy Efficiency in Buildings. Butterworth-Heinemann, pp. 441–595. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00040-1>
2. Budea, S., (no date). Fluid Flow Control in Domestic Hot Water Systems During Days with Different Radiative Stability Levels. Ann. West Univ. Timisoara - Phys.
3. C.H. Cox and P. Raghuraman. Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collectors. Solar Energy, 35(3):227–241, 1985. - Αναζήτηση Google [WWW Document], (no date). URL (accessed 7.3.23).
4. Chen, C.J., 2011. Physics of Solar Energy. John Wiley & Sons.
5. Dupeyrat, P., Ménézo, C., Fortuin, S., 2014. Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. Energy Build. 68, 751–755. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.032>
6. Elbreki, A.M., Muftah, A.F., Sopian, K., Jarimi, H., Fazlizan, A., Ibrahim, A., 2021. Experimental and economic analysis of passive cooling PV module using fins and planar reflector. Case Stud. Therm. Eng. 23, 100801. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100801>

7. Fox, D.B., Sutter, D., Tester, J.W., 2011. The thermal spectrum of low-temperature energy use in the United States. *Energy Environ. Sci.* 4, 3731–3740. <https://doi.org/10.1039/C1EE01722E>
8. Komeili Birjandi, A., Eftekhari Yazdi, M., Dinarvand, S., Salehi, G.R., Tehrani, P., 2021. Effect of Using Hybrid Nanofluid in Thermal Management of Photovoltaic Panel in Hot Climates. *Int. J. Photoenergy* 2021, e3167856. <https://doi.org/10.1155/2021/3167856>
9. Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K.A., Kato, K., 2014. Performance and reliability of photovoltaic systems: subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules: IEA PVPS task 13: external final report IEA-PVPS. International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme, Sankt Ursen.
10. Lowering PV panel temperature with phase change materials – pv magazine International [WWW Document], (no date). URL <https://www.pv-magazine.com/2020/04/24/lowering-pv-panel-temperature-with-phase-change-materials/> (accessed 7.3.23).
11. Mauthner, F., Weiss, W., Spörk-Dür, M., 2014. Markets and Contribution to the Energy Supply 2014.
12. Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A., El-Sherif, H., 2013. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Eng. J.* 4, 869–877. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>
13. Moraitis, P., Schropp, R.E.I., van Sark, W.G.J.H.M., 2018. Nanoparticles for Luminescent Solar Concentrators - A review. *Opt. Mater.* 84, 636–645. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.07.034>
14. Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) – Global Energy and Climate Model – Analysis [WWW Document], (no date). . IEA. URL <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze> (accessed 6.30.23).
15. Ntsaluba, S., Zhu, B., Xia, X., 2015. Optimal flow control of a forced circulation solar water heating system with energy storage units and connecting pipes. *Renew. Energy* 89, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.047>
16. Odeh, S., Behnia, M., 2009. Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling. *Heat Transf. Eng.* 30, 499–505. <https://doi.org/10.1080/01457630802529214>
17. Ozgoren, M., Aksoy, M.H., Bakir, C., Dogan, S., 2013. Experimental Performance Investigation of Photovoltaic/Thermal (PV–T) System. *EPJ Web Conf.* 45, 01106. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20134501106>

18. Pathak, S.K., Sharma, P.O., Goel, V., Bhattacharyya, S., Aybar, H.Ş., Meyer, J.P., 2022. A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 51, 101844. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844>
19. Products — Naked Energy [WWW Document], (no date). URL <https://nakedenergy.com/products> (accessed 7.3.23).
20. Quesada, G., Rouse, D., Dutil, Y., Badache, M., Hallé, S., 2012. A comprehensive review of solar facades. *Opaque solar facades. Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2820–2832. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.078>
21. Rejeb, O., Sardarabadi, M., Ménézo, C., Passandideh-Fard, M., Dhaou, H., Jemni, A., 2016. Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system. *Energy Convers. Manag.* 110, 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.063>
22. Riverola, A., Mellor, A., Alvarez, D., Ferre Llin, L., Guarracino, I., Markides, C., Paul, D., Chemisana, D., Ekins-Daukes, N.J., 2018. Mid-infrared emissivity of crystalline silicon solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 174, 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.002>
23. Santbergen, R., van Zolingen, R.J.C., 2008. The absorption factor of crystalline silicon PV cells: A numerical and experimental study. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92, 432–444. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.10.005>
24. SERIE CS – FotoTherm [WWW Document], (no date). URL <https://www.fototherm.com/prodotti/serie-cs/#tab-id-1> (accessed 7.3.23).
25. Solar Aquagrid [WWW Document], (no date) . Sol. Aquagrid. URL <https://www.solaraquagrid.com> (accessed 7.3.23).
26. Solar tracker | Definition & Facts | Britannica [WWW Document], 2023. URL <https://www.britannica.com/technology/solar-tracker> (accessed 7.3.23).
27. Sustainability | Free Full-Text | Experimental Evaluation of the Thermoelectrical Performance of Photovoltaic-Thermal Systems with a Water-Cooled Heat Sink [WWW Document], (no date). URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/10231> (accessed 7.3.23).
28. Thermopile Pyranometer Support | Apogee Instruments [WWW Document], (no date) (no date). URL <https://www.apogeeinstruments.com/thermopile-pyranometer-support/> (accessed 12.14.23).

29. Thong, L.W., Murugan, S., Ng, P.K., Chee, S., 2016. Analysis of Photovoltaic Panel Temperature Effects on its Efficiency.
30. Tsai, H.-L., 2014. Design and Evaluation of a Photovoltaic/Thermal-Assisted Heat Pump Water Heating System. *Energies* 7, 3319–3338. <https://doi.org/10.3390/en7053319>
31. Varshni, Y.P., 1967. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica* 34, 149–154. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(67\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0031-8914(67)90062-6)
32. Διπλωματική - Νικολάου.pdf, (2018).
33. Διπλωματική - Λαμπρινίδης .pdf, (2017)