



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**Μελέτη ενεργειακής απόδοσης ασύμμετρων υβριδικών  
θερμικών/φωτοβολταϊκών συλλεκτών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Στυλιανός Φ. Ορφανός

**Επιβλέπων: Κορωνάκη Ειρήνη**  
Επίκουρος Καθηγήτρια  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Θερμότητας

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**Μελέτη ενεργειακής απόδοσης ασύμμετρων υβριδικών  
θερμικών/φωτοβολταϊκών συλλεκτών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Στυλιανός Φ. Ορφανός

**Επιβλέπων: Κορωνάκη Ειρήνη**  
Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την εξεταστική επιτροπή την ..... 2017

.....  
Κορωνάκη Ειρήνη  
Επίκουρος  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....  
Αντωνόπουλος Κίμων  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ρογδάκης Εμμανουήλ  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

.....  
Στυλιανός Φ. Ορφανός

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.  
Copyright © Στυλιανός Φ. Ορφανός, 2017  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες είναι διατάξεις, οι οποίες απορροφούν ηλιακή ενέργεια και παράγουν θερμική ενέργεια για ανάγκες ζεστού νερού χρήσης (ZNX). Ωστόσο, η θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας με χαμηλή δυνατότητα εκμετάλλευσής της (χαμηλή εξέργεια). Τα Υβριδικά Φωτοβολταϊκά/Θερμικά στοιχεία (στο εξής PVT - Photovoltaic Thermal hybrid solar collector) αναπτύχθηκαν για να βελτιώσουν εξεργειακά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.

Τα PVT αποτελούνται από ένα θερμικό συλλέκτη σε συνδυασμό με ένα Φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η παραγωγή της θερμότητας από το συλλέκτη, μειώνει τη θερμοκρασία λειτουργίας του Φωτοβολταϊκού στοιχείου και ως εκ τούτου αυξάνει την ηλεκτρική απόδοσή του. Η αποθήκευση της παραγόμενης θερμότητας γίνεται σε ένα δοχείο με ρευστό υψηλής θερμοχωρητικότητας.

Στόχος αυτής της εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση μίας συστοιχίας πέντε (5) PVT συλλεκτών και η αξιολόγηση τους ως προς την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και της αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Τα PVT της πειραματικής διάταξης είναι ασύμμετροι συγκεντρωτικοί συλλέκτες οροφής, οι οποίοι είναι γνωστοί ως CPCs (Compound Parabolic Concentrators). Οι συλλέκτες αυτοί είναι βασισμένοι στο σχεδιασμό MaReCo (Maximum Reflector Collector), ο οποίος έχει ως στόχο να μειώσει την απαιτούμενη ποσότητα συλλέκτη με σχεδιασμό χαμηλής συγκέντρωσης.

Η εργασία θα αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Δημιουργία αλγόριθμου για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον χώρο των πειραμάτων (Αθήνα).
- Υπολογισμός της παραγόμενης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μελέτη του ρυθμού αποθήκευσης της παραγόμενης θερμικής ενέργειας για άμεση και έμμεση αποθήκευση.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχη προσομοίωση σε χώρο υψηλότερου γεωγραφικού πλάτους (Moat – Ηνωμένο Βασίλειο) για την άμεση μορφή αποθήκευσης.
- Σύγκριση της απόδοσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα CPC-PVT με την απόδοση της παραγωγής από τυπικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ο υπολογισμός της απόδοσης των τυπικών φωτοβολταϊκών θα γίνει με τη χρήση του προγράμματος PVsyst.

Ο αλγόριθμος για τα παραπάνω μέρη θα δημιουργηθεί με το πρόγραμμα MATLAB και η ρύθμιση των παραμέτρων του αλγόριθμου θα γίνει τόσο με βάση τα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας, αλλά και βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων.

**Λέξεις κλειδιά:** Υβριδικά Φωτοβολταϊκά/Θερμικά στοιχεία, συγκεντρωτικοί συλλέκτες, Matlab, Collares – Pereira, άμεση αποθήκευση, έμμεση αποθήκευση, MaReCo, PVsyst

## ABSTRACT

Solar thermal collectors absorb solar energy and produce heat for the needs for hot water. However, heat is a type of energy with low quality (low exergy to energy ratio). Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collectors were developed in order to improve upon the total conversion efficiency of the solar energy.

PVTs comprise of a thermal absorber in conjunction with a Photovoltaic module. The heat transfer from the collector, reduces the operational temperature of the Photovoltaic module, therefore increasing the electric efficiency of the system as a whole. Afterwards, the produced heat is stored in a tank of a fluid with high heat capacity.

The goal of this thesis is to develop a model for the setup of five (5) PVT collectors and the assessment of the efficiency in the production of heat and electric energy and the storage of the aforementioned heat. The PVTs utilized in this project parabolic collectors for rooftop applications also known as CPCs (Compound Parabolic Concentrators). These collectors are based on the MaReCo (Maximum Reflector Collector) design, which achieves the reduction of the necessary collector material by being a low concentration design.

This thesis will be comprised of the following sections:

- The development of algorithm for the calculation of incident irradiation on the site of the experiment (Athens).
- Calculation of the produced thermal and electrical energy
- Study upon the rate of storage of the heat, both for direct and indirect storage setups
- Comparison of the results with the corresponding simulation for a site with higher latitude (Moat – United Kingdom) for the direct storage setup
- Comparison of the electrical performance ratio from CPC-PVTs with the performance from a typical flat PV module. The calculation of the latter will be done with PVsyst.

The algorithm for the aforementioned sections will be programmed in MATLAB and the adjustment of the parameters and starting conditions will be based upon international bibliography and experimental data.

**Key Words:** Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collectors, Compound Parabolic Concentrators, PVT, CPC, Matlab, Collares – Pereira, direct storage, indirect storage, MaReCo, PVsyst



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτρια **κα. Ειρήνη Κορωνάκη** για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ και να φέρω εις πέρας ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα **κ. Μιχάλη Νίτσα** για την υπομονή και την οξύνοιά του καθώς και για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε στη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία **ΕΛΕΚΤΡΟΜΕΚ Α.Ε.** για τη χρησιμοποίηση του προγράμματος PVsyst για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

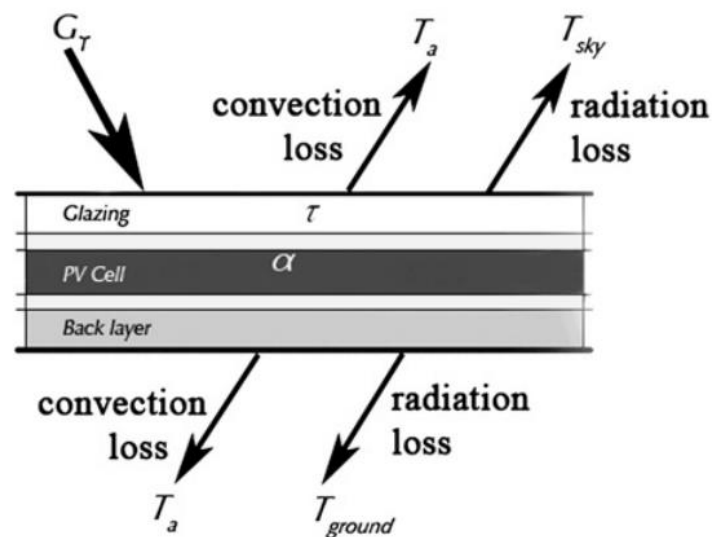
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	11
1.1 Αρχή λειτουργίας Φωτοβολταϊκών - Θερμικών συλλεκτών .....	11
1.2 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών - Θερμικών συλλεκτών .....	13
1.3 Ιστορική Αναδρομή στους συλλέκτες PV/T [4].....	20
Κεφάλαιο 2: Ηλιακή ακτινοβολία και Συλλέκτες .....	25
2.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης .....	25
2.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	27
2.2.1 Βασικές έννοιες [2, 3] .....	27
2.2.2 Υπολογισμός προσπίπτουσας ακτινοβολίας.....	31
2.2.3 Υπολογισμός απορροφούμενης ακτινοβολίας.....	35
2.3 Μετατροπή της Ηλιακής σε Θερμική και Ηλεκτρική ενέργεια.....	37
Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση ενέργειας .....	41
3.1 Άμεση αποθήκευση .....	41
3.2 Έμμεση αποθήκευση .....	44
Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση με MATLAB της Ηλιακής Ακτινοβολίας και των Συλλεκτών.46	
4.1 Παράμετροι του μοντέλου .....	46
4.2 Υπολογισμός προσπίπτουσας και απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας στους συλλέκτες..	48
4.2.1 Ιεραρχία συναρτήσεων .....	48
4.2.2 Επεξήγηση συναρτήσεων .....	50
4.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου εργαζόμενου μέσου από τους συλλέκτες.....	60
4.3.1 Ιεραρχία συναρτήσεων .....	60
4.3.2 Επεξήγηση συναρτήσεων .....	60

<b>Κεφάλαιο 5: Μοντελοποίηση με MATLAB της αποθήκευσης ενέργειας.....</b>	<b>65</b>
5.1 Παράμετροι του μοντέλου .....	65
5.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου για το άμεσο μοντέλο αποθήκευσης.....	65
5.2.1 Ιεραρχία συναρτήσεων .....	65
5.2.2 Επεξήγηση συναρτήσεων .....	67
5.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου για το έμμεσο μοντέλο αποθήκευσης.....	72
5.3.1 Ιεραρχία συναρτήσεων .....	72
<b>Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα .....</b>	<b>73</b>
6.1 Ηλιακή Ενέργεια .....	73
6.2 Άμεση αποθήκευση .....	76
6.3 Έμμεση αποθήκευση .....	98
<b>Κεφάλαιο 7: Επίλογος.....</b>	<b>101</b>
7.1 Συμπεράσματα.....	101
7.2 Συμβολή και πρωτοτυπία της εργασίας.....	102
7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	102
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Λίστα εικόνων και πινάκων.....</b>	<b>103</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Κώδικας .....</b>	<b>106</b>

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Αρχή λειτουργίας Φωτοβολταϊκών - Θερμικών συλλεκτών

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε αυτό σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο βομβαρδισμός του ημιαγώγιμου υλικού από φωτόνια έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το ποσοστό της ενέργειας που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική, εκλύεται στο περιβάλλον σαν θερμότητα. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας λειτουργίας του, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας του είναι ευθέως ανάλογη με την παραγωγή ενέργειάς του. Οπότε, η αύξηση της παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου συνοδεύεται από την πτώση της απόδοσής του.



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση απωλειών θερμότητας [1]

Αποτελεί, λοιπόν, εύλογο πόρισμα ότι η ψύξη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και η συγκέντρωση της απαγόμενης θερμότητας για ωφέλιμους σκοπούς (πχ Ζεστό Νερό Χρήσης), αυξάνει τόσο την ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού, όσο και τη συνολική απόδοση του συστήματος, δεδομένου ότι μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακής ενέργειας μετατρέπεται σε αξιοποιήσιμη ενέργεια (θερμική και ηλεκτρική). Σε αυτή την αρχή στηρίζονται τα Φωτοβολταϊκά – Θερμικά στοιχεία (PV/T systems).

Ένα τυπικό Φωτοβολταϊκό – Θερμικό στοιχείο αποτελείται από:

1. **Το Απορροφητή (absorber):** στοιχείο που απορροφά και αποθηκεύει την παραγόμενη θερμότητα
2. **Το Συγκεντρωτή (concentrator):** κάτοπτρο ή φακός διάθλασης, ο οποίος συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε όσο το δυνατόν μικρότερη επιφάνεια. Η ύπαρξή του είναι προαιρετική.
3. **Το Φωτοβολταϊκό στοιχείο:** μετατροπέας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Παραπροϊόν αυτής της διαδικασίας είναι η θερμότητα.

Τα πλεονεκτήματα των PV/T συστημάτων σε σχέση με ένα σύστημα με διακριτό PV,θερμικό συλλέκτη είναι τα εξής [2]:

1. Το θερμικό και το ηλεκτρικό στοιχείο απορροφούν διαφορετικά μέρη του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συνδυασμός και των δύο οδηγούν εκ των πραγμάτων σε μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης από δύο ξεχωριστά συστήματα.
2. Μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος το οποίο σημαίνει και μικρότερο χώρο εγκατάστασης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου τα PV/T απευθύνονται σε μικρές εγκαταστάσεις και οικιακές εφαρμογές.
3. Μικρότερο κόστος εγκατάστασης.

Η εφαρμογή των PV/T απευθύνεται κυρίως σε χρήστες μικρής ισχύος δεδομένης της δυσκολία αποθήκευσης και μεταφοράς της θερμικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Πιθανές εφαρμογές της θερμικής ενέργειας είναι η θέρμανση νερού χρήσης, η θέρμανση και ψύξη χώρων καθώς και η ξήρανση.

## 1.2 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών - Θερμικών συλλεκτών

Οι Συλλέκτες PV/T χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με:

1. το υλικό απαγωγής θερμότητας
2. τον τρόπο ενσωμάτωσης του απορροφητή στο φωτοβολταϊκό στοιχείο
3. τον τρόπο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας
4. το υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας
5. την τοπολογία τους
6. τον τύπο του φωτοβολταϊκού στοιχείου

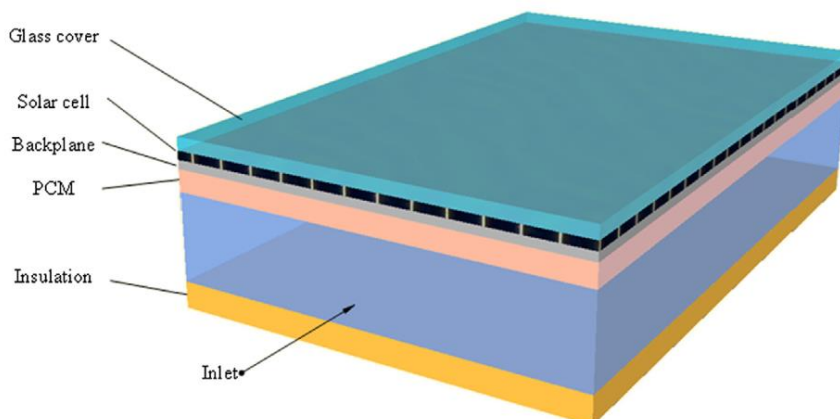
### 1.2.1 Υλικό απαγωγής θερμότητας [2]

**Ατμοσφαιρικός Αέρας:** Η απόδοση των PV/T με ψυκτικό μέσον τον ατμοσφαιρικό αέρα κινούνται μεταξύ του 50% και 65% με την ηλεκτρική απόδοση ενός τυπικού πολυκρυσταλλικού Φωτοβολταϊκού στοιχείου να είναι ανάμεσα στο 10 έως 15% και η θερμική απόδοση να κυμαίνεται ανάμεσα στο 40-50%. Θετικά μίας τέτοια κατασκευής είναι η απλότητα και το μικρό κόστος της, ωστόσο ο αέρας έχοντας μικρή ειδική θερμοχωρητικότητα προκαλεί την ανάγκη για αυξημένη παροχή μάζας ψυκτικού μέσου, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει την ιδιοκατανάλωση του συστήματος σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, η μικρή πυκνότητα του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση για μεγάλο όγκο σωληνώσεων και επιφάνειας συναλλαγής με το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

**Νερό:** Το νερό θεωρείται ένα από τα ιδανικότερα ρευστά για την ψύξη των PV/T συστημάτων καθώς αποτελεί ένα μέσο με χαμηλό κόστος, υψηλή διαθεσιμότητα και εξαιρετικά θερμικά χαρακτηριστικά. Σε αντίθεση με τα συστήματα που αξιοποιούν τον αέρα για την ψύξη τους, τα PV/T νερού εμφανίζουν απόδοση 60-80%. Το πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό εμφανίζει σχεδόν τετραπλάσια θερμοχωρητικότητα σε σχέση με τον αέρα και σε συνδυασμό με ένα σύστημα αποθήκευσης χαμηλών απωλειών, μπορεί να αποτελέσει μία αξιοπρεπή λύση για την ικανοποίηση θερμικών φορτίων μετά το πέρας της ηλιοφάνειας. Ένα μη προφανές πρόβλημα αυτής της υλοποίησης αποτελεί το γεγονός ότι σε ψυχρά κλίματα το νερό ενδέχεται να στερεοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας και να προκαλέσει προβλήματα στις σωληνώσεις. Για αυτό το λόγο σε ψυχρά κλίματα συνήθως χρησιμοποιείται νερό με αντιπηκτικά προσθετικά.

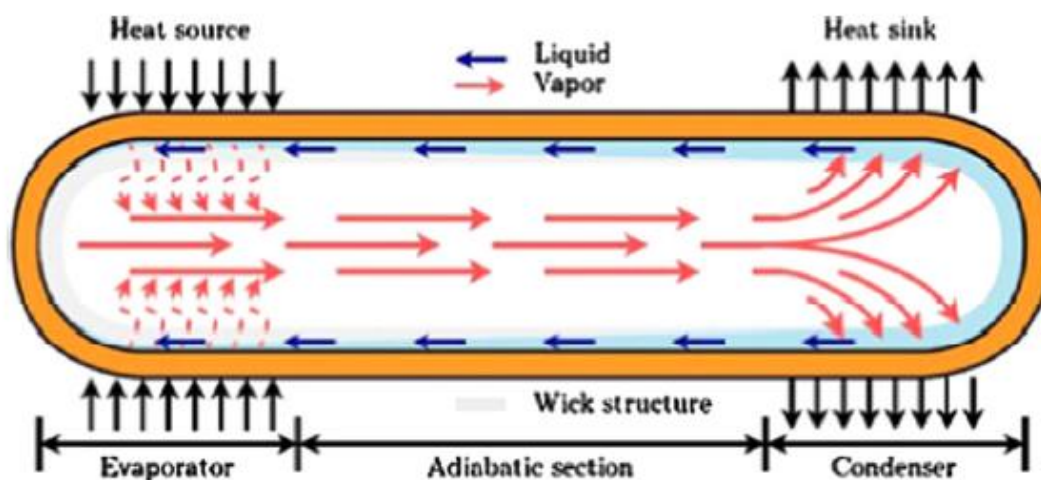
**Συνδυασμός Νερού και Αέρα:** Συστήματα με δύο κανάλια ψύξης τα οποία είναι ιδανικά για θερμά κλίματα. Ο αέρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση χώρων ενώ το νερό για ζεστό νερό χρήσης.

**Υλικό αλλαγής φάσης (Phase Change Material – PCM):** Πολλοί μελετητές έχουν προτείνει την προσθήκη υλικών αλλαγής φάσης στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ώστε να τηρείται η θερμοκρασία τους κοντά στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η λειτουργία των PCM στηρίζεται στο γεγονός ότι αποτελούν υλικά με μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα, το οποίο σημαίνει ότι όταν επιτύχουν τη θερμοκρασία τήξης τους μπορούν να απορροφήσουν μεγάλα ποσά θερμότητας, κρατώντας τη θερμοκρασία αυτή σταθερή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διατηρούν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας σταθερό, το οποίο είναι και το προσόν αυτής της υλοποίησης. Αρνητικό αποτελεί το ο χαμηλός βαθμός θερμικής αγωγιμότητας και το υψηλότερο τους κόστος σε σχέση με τα άλλα υλικά.



Εικόνα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα συλλέκτη PV/T με PCM [3]

**Heat Pipe** [4]: Θεωρείται ένας αποδοτικός μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας που συνδυάζει τις αρχές της θερμικής αγωγιμότητας και της αλλαγής φάσεως. Αποτελείται από το μέρος του ατμοπαραγωγού, το αδιαβατικό κομμάτι και το τμήμα του συμπυκνωτή.



Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού Heat Pipe

Η βέλτιστη εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος απαγωγής θερμότητας είναι στους επίπεδους συλλέκτες, στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερη θερμική επαφή μεταξύ των Φωτοβολταϊκών στοιχείων και των στοιχείων απαγωγής θερμότητας. Η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος αυτού είναι μεταξύ 40-50°C, ενώ ο βαθμός απόδοσης πλησιάζει το 40%.

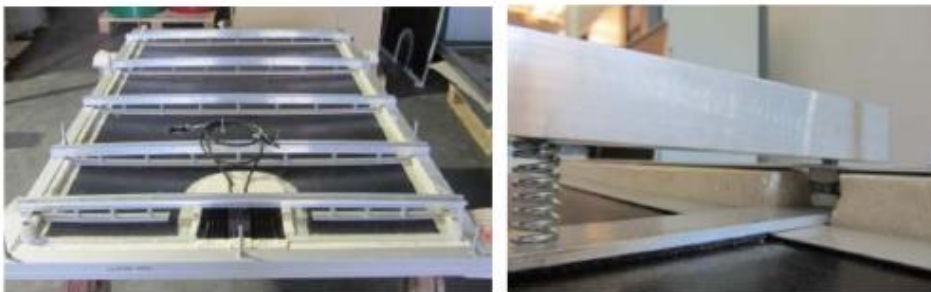
## 1.2.2 Τρόπος ενσωμάτωσης του απορροφητή στο φωτοβολταϊκό στοιχείο [5]

**Άμεσης επαφής:** Αφορά επαγμογές με αέρα ή νερό σαν εργαζόμενο μέσον, και όπως φανερώνει το όνομά τους η επαφή του εργαζόμενου μέσου με το Φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι άμεση. Στα θετικά αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα κατασκευής και η μικρότερη θερμική αντίσταση δεδομένου δεν υπάρχει κάποιο υλικό ανάμεσα στο Φωτοβολταϊκό στοιχείο και στο υλικό απαγωγής θερμότητας. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί στην μέγιστη πίεση του εργαζόμενου μέσου, κακή απόδοση στην απαγωγή θερμότητας και στην περίπτωση του νερού κίνδυνος ανάπτυξης πάγου.

**Θερμική πάστα:** Πρόκειται για λεπτή στρώση ρευστού μεγάλου ιξώδους με υψηλή θερμική διαπερατότητα ( $0,8 \div 11,4 \text{ W/m/K}$ ) η οποία προφανώς εξαρτάται από το εκάστοτε υλικό και τη γεωμετρία. Πέρα από την υψηλή θερμική αγωγιμότητα η θερμική πάστα χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Η ενσωμάτωση με θερμική πάστα είναι απλή και σχετικά οικονομική, ωστόσο υπάρχει αβεβαιότητα για την μακροχρόνια απόδοση του υλικού. Επίσης, η διακύμανση στο πάχος μπορεί να προκαλέσει τοπικά προβλήματα.

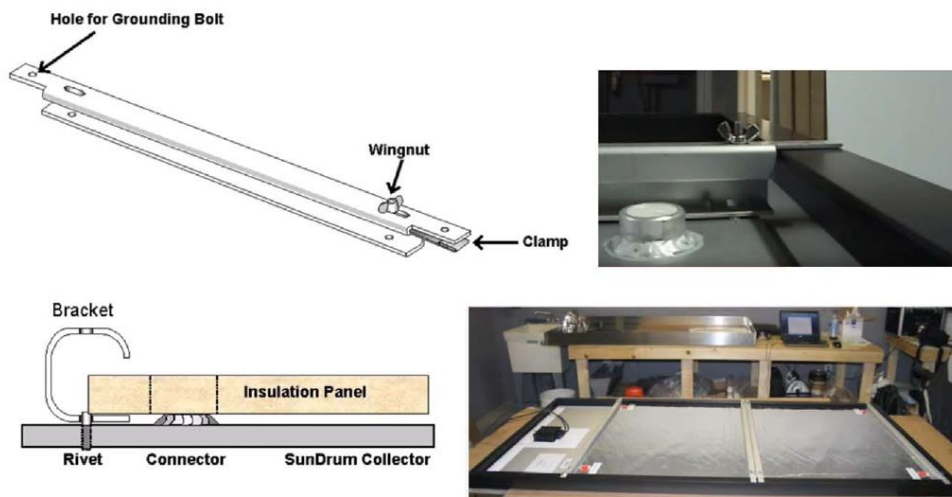
**Επικάλυψη με Ethylene vinyl acetate (EVA):** Η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια με την Θερμική Πάστα, ωστόσο το γεγονός ότι οι μεμβράνες EVA είναι σε στερεή μορφή εξαλείφουν τον κίνδυνο ανισομερούς κατανομής και την εμφάνιση φυσαλίδων αέρα ανάμεσα στο θερμοαγώγιμο υλικό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμική διαπερατότητά τους είναι ελαφρώς χειρότερη.

**Μηχανική στερέωση:** Η μηχανική στερέωση των Φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος ενσωμάτωσης. Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζεται η στερέωση απορροφητών πολυπροπυλενίου με ελατήρια.



**Εικόνα 1.4: Παράδειγμα μηχανικής στερέωσης με ελατήρια**

Παρόμοια εφαρμογή βρίσκεται στην Εικόνα 1.5 όπου ο θερμικός απορροφητής είναι στερεωμένος στο φωτοβολταϊκό στοιχείο μέσω πολλών μηχανικών υποστηριγμάτων. Η μηχανική στερέωση εξασφαλίζει την στερέωση του φωτοβολταϊκού στοιχείου με τον απορροφητή, ωστόσο προσθέτει επιπλέον εξαρτήματα όπως βίδες, ελατήρια και ελάσματα τα οποία με τη σειρά τους αυξάνουν το βάρος, το κόστος και την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα από όλα, ωστόσο, είναι ότι η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εξαλείψει την ύπαρξη φυσαλίδων αέρα μεταξύ του απορροφητή και του Φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο μειώνει τη μετάδοση θερμότητας.



Εικόνα 1.5: Παράδειγμα μηχανικής στερέωσης με μηχανικά υποστηρίγματα

### 1.2.3 Τρόπος αποθήκευσης θερμότητας

**Άμεσος:** Στην άμεσο αποθήκευση θερμότητας το ψυκτικό μέσον ταυτίζεται με το μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Θετικό αυτού του τρόπου αποθήκευσης είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει η ανάγκη για εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του αποθηκευτικού και του ψυκτικού μέσου.

**Έμμεσος:** Στην έμμεσο αποθήκευση το ψυκτικό μέσο μεταφέρει τη θερμότητά του στο αποθηκευτικό μέσο μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Αυτή η απόπλεξη μεταξύ των δύο υλικών επιτρέπει στη βελτιστοποίηση του συστήματος δεδομένου ότι διαφορετικά είναι τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του υλικού για την απαγωγή θερμότητας από τα Φωτοβολταϊκά στοιχεία και διαφορετικά τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για την αποθήκευση ενέργειας. Το μόνο αρνητικό αυτού του τρόπου αποθήκευσης είναι οι απώλειες στον εναλλάκτη.

### 1.2.4 Υλικό αποθήκευσης θερμότητας [6], [3]

**Αποθήκευση με Νερό:** Το πλέον διαδεδομένο υλικό αποθήκευσης θερμότητας. Έχει χαμηλό κόστος, υψηλή διαθεσιμότητα ενώ η πυκνότητά του σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοχωρητικότητά του το καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές περιορισμένου χώρου. Το μειονέκτημα του νερού σαν αποθηκευτικό μέσο αφορά τη χαμηλή σχετικά δυνατότητα αποθήκευσής του (λόγω υψηλής θερμικής αγωγιμότητας), το οποίο αποτελεί πρόβλημα δεδομένου ότι η αιχμή στην παραγωγή θερμότητας στα PV/T συστήματα δεν ταυτοχρονίζεται απαραίτητα με την αιχμή στη ζήτηση, η οποία συμβαίνει κυρίως το βράδυ.

**Αποθήκευση με Υλικό αλλαγής φάσης (Phase Change Material – PCM):** Υλικά τα οποία υφίστανται αλλαγή φάσης σε κατάλληλη θερμοκρασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αποθηκευτικά υλικά θερμότητας εάν πληρούνται συγκεκριμένα κριτήρια. Η αλλαγή φάσης πρέπει να συνοδεύεται από μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα και η διαδικασία πρέπει να είναι αναστρέψιμη για μεγάλο αριθμό κύκλων χωρίς σημαντικές απώλειες στην ποιότητα του υλικού. Η αλλαγή φάσης



πρέπει να σημαίνει μέσα από περιορισμένη θέρμανση και ψύξη. Τέλος το κόστος του υλικού και του δοχείου του πρέπει να είναι λογικό.

Το άλας του Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) ήταν ένα από τα πρώτα PCM που μελετήθηκαν πειραματικά για εφαρμογές οικιακής θέρμανσης. Σε θερμοκρασία περίπου  $34^\circ\text{C}$  δίνει ένα διάλυμα:

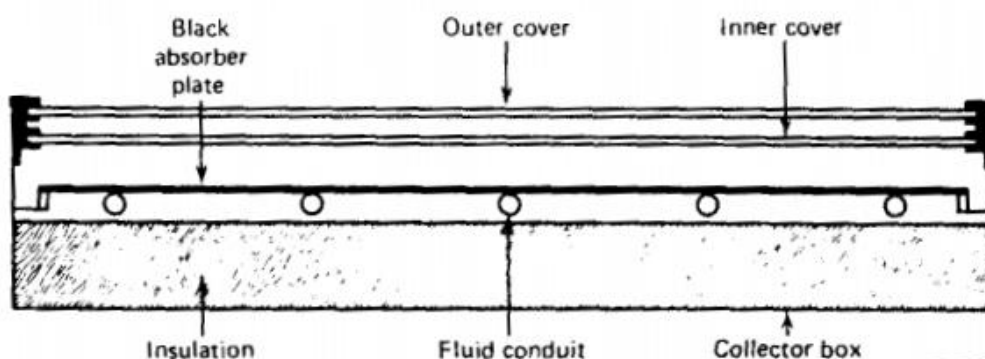


Η αποθήκευση ενέργειας είναι η αντίδραση από αριστερά προς τα δεξιά, ενώ η αντίστροφη αντίδραση είναι η αντίδραση απόδοσης της αποθηκευμένης θερμότητας. Οι πρακτικές εφαρμογές αυτού του υλικού έχουν καταδείξει ότι υπάρχει σημαντική επίπτωση στην απόδοσή του με την αύξηση των κύκλων. Άλλα καταλληλότερα υλικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ως PCM είναι οι παραφίνες (με διάφορες θερμοκρασίες τήξης) και εύτηκτα μείγματα (μείγμα ουσιών με σημείο τήξης χαμηλότερο από τις ουσίες από τις οποίες αποτελείται).

Πλεονέκτημα των υλικών PCM ως αποθηκευτικά στοιχεία είναι το γεγονός ότι μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας και να τα αποδίδουν σε ένα σχετικά περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας. Αυτό το γεγονός σημαίνει ότι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι σταθερός. Ένα μειονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι η αύξηση της θερμικής αντίστασης του υλικού όσο αυτό πλησιάζει τη στερεή φάση. Όσο διαφεύγει θερμότητα από το υλικό, παρατηρείται κρυσταλλοποίηση στα τοιχώματα του εναλλάκτη. Οπότε, με το πέρασμα του χρόνου η θερμότητα πρέπει να διαπεράσει όχι μόνο το φράγμα του εναλλάκτη αλλά και ένα στρώμα στερεού υλικού PCM το οποίο σταδιακά αυξάνεται.

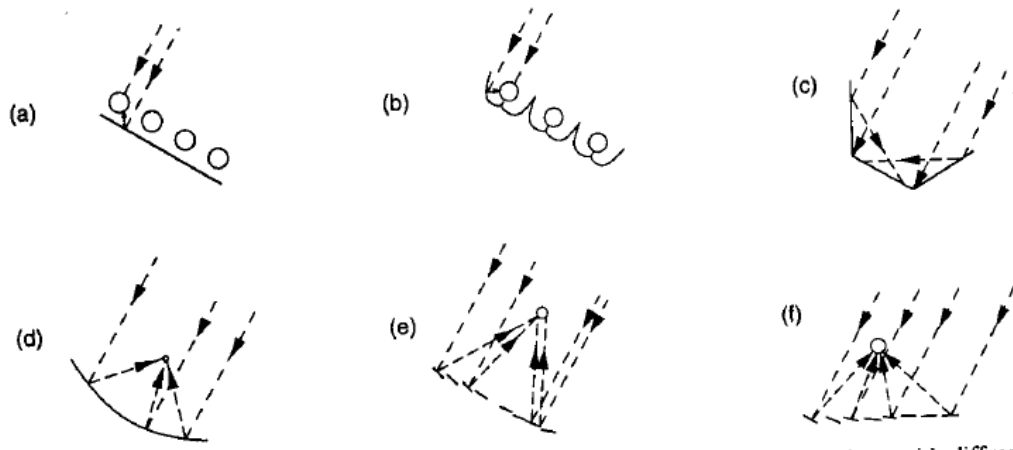
### 1.2.5 Τοπολογία Συγκεντρωτή

**Χωρίς συγκεντρωτή - Επίπεδοι συλλέκτες:** Αυτοί είναι οι συλλέκτες με την πιο απλή γεωμετρία. Αποτελούνται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, του οποίου η οπίσθια επιφάνειά έρχεται σε επαφή με σωλήνες που περιέχουν το ρευστό απαγωγής θερμότητας. Στα απλά θερμικά συστήματα το Φωτοβολταϊκό στοιχείο αντικαθίσταται από μία πλάκα υψηλής απορροφητικότητας. Πλεονέκτημά του είναι το χαμηλό του κόστος και η απλότητα σχεδιασμού και συντήρησης



Εικόνα 1.6: Σχήμα θερμικού επίπεδου συλλέκτη [6]

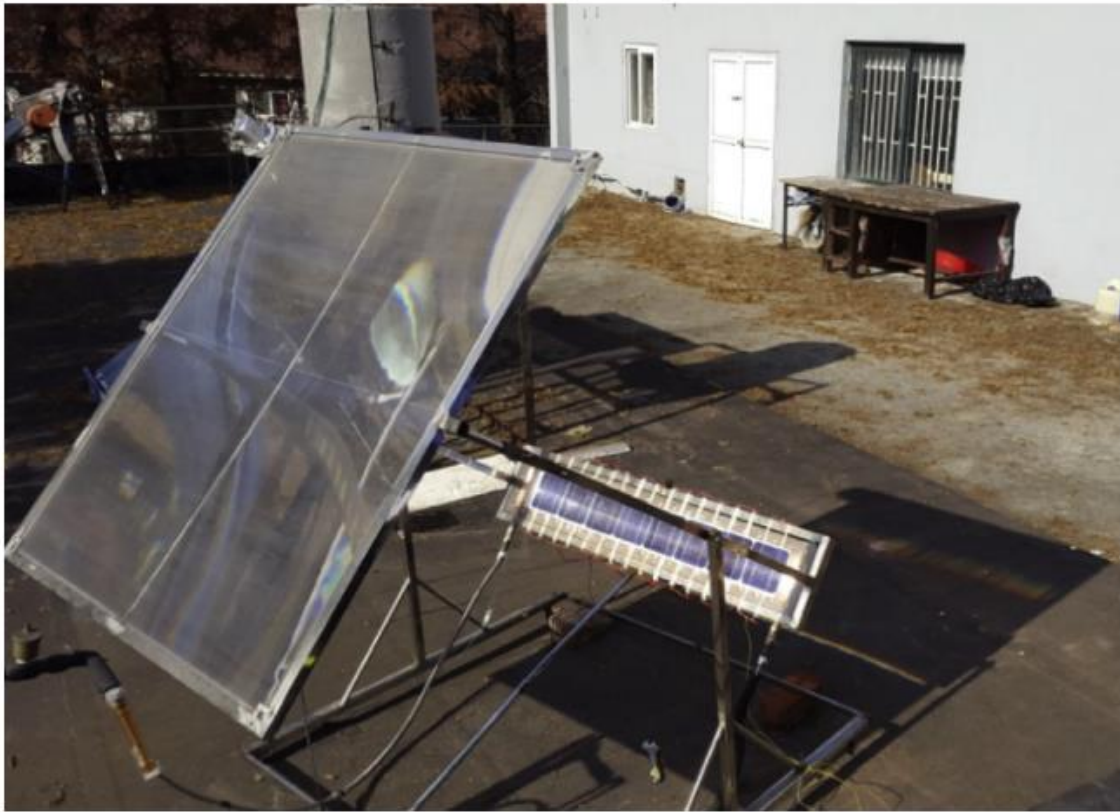
**Συλλέκτες κατόπτρων:** συγκεντρωτές οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της επιφάνειας από την οποία λαμβάνουν χώρα οι απώλειες θερμότητας, συγκεντρώνοντας με κάτοπτρα την ηλιακή ενέργεια σε μικρότερη επιφάνεια. Η μικρότερη επιφάνεια του απορροφητή συνεπάγεται μικρότερη επιφάνεια απωλειών. Ο βαθμός με τον οποίον συμβαίνει αυτή η συγκέντρωση εκφράζεται μέσω του λόγου συγκέντρωσης (C) και μπορεί να κυμαίνεται από τιμές μικρότερης της μονάδας μέχρι και  $10^5$ . Ο λόγος συγκέντρωσης είναι ευθέως ανάλογος με τη θερμοκρασία πρόσδοσης της ενέργειας.



**Εικόνα 1.7: Τύποι συλλεκτών κατόπτρου [6]**

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συλλεκτών, οι οποίοι φαίνονται στην Εικόνα 1.7. (a): Σωληνωτοί απορροφητές με οπίσθιο γραμμικό κάτοπτρο, (b): Σωληνωτοί απορροφητές με οπίσθιο καμπύλο κάτοπτρο, (c): επίπεδος απορροφητής με επίπεδους συλλέκτες εκατέρωθέν του, (d): παραβολικά κάτοπτρα, (e): κάτοπτρα Fresnel, (f): Κάτοπτρα που ακολουθούν την πορεία του ήλιου και κατευθύνουν την ακτινοβολία σε έναν κεντρικό απορροφητή. Η κάθε μία διαφορετική γεωμετρία κατόπτρων χαρακτηρίζεται από έναν αντίστοιχο λόγο συγκέντρωσης, ο οποίος υπαγορεύεται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

**Γραμμικοί Φακοί Fresnel [7]:** Οι φακοί Fresnel είναι οπτικές συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώνουν τις ακτίνες του ήλιου. Η συγκέντρωση των ακτίνων του ήλιου σε μία πεπερασμένη φωτοβολταϊκή επιφάνεια, επιτυγχάνει την καλύτερη φόρτιση αυτής της επιφάνειας σε ηλιοφάνεια μικρότερη των συνθηκών STC (standard test conditions). Με αυτόν τον τρόπο, αντικαθίσταται η κοστοβόρα φωτοβολταϊκή επιφάνεια με χαμηλής (σχετικής) αξίας φακούς. Παράλληλα, η υπερφόρτιση των φωτοβολταϊκών προκαλεί μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας, η οποία είναι και ένας από τους σκοπούς των PV/T συστημάτων. Σε σύγκριση με τους συλλέκτες κατόπτρων, οι συλλέκτες φακών Fresnel υπερέχουν λόγω του μικρότερού τους κόστους και βάρους [4].



Εικόνα 1.8: Διάταξη PV/T με φακούς Fresnel [7]

### 1.2.6 Τύπος Φωτοβολταϊκού στοιχείου

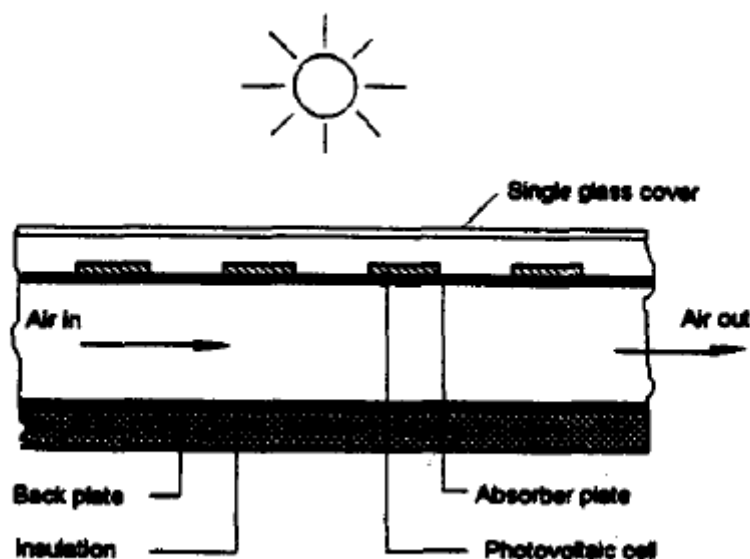
**Μονοκρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία:** Αυτή η μορφή είναι η παλιότερη από όλες τις τεχνολογίες. Όπως υποδεικνύει το όνομά τους αποτελούνται από μία συνεχόμενη κρυσταλλική δομή. Δημιουργούνται με τη μέθοδο Czochralski, κατά την οποία ένας πυρήνας κρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται σε μία δεξαμενή λιωμένου πυριτίου. Στη συνέχεια γύρω από τον αρχικό πυρήνα συντάσσονται κρυσταλλικές δομές οι οποίες είναι γνωστές ως ingots (κυλινδρικοί ράβδοι). Στη συνέχεια οι τέσσερις άκρες αυτών των ράβδων κόβονται ώστε να δημιουργήσουν το Φωτοβολταϊκό στοιχείο. Πλεονέκτημά τους είναι η υψηλή απόδοση, οι χαμηλές απώλειες λόγω θερμοκρασίας και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους. Μειονέκτημά τους είναι το υψηλό τους κόστος.

**Πολυκρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία:** Έχουν παρόμοια διαδικασία παρασκευής με τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, με τη διαφορά ότι ο αρχικός πυρήνας κρυσταλλικού πυριτίου απλά αφήνεται να στερεοποιηθεί μαζί με το λιωμένο πυρίτιο. Παρότι εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερες αποδόσεις και μεγαλύτερο συντελεστή μείωσης της απόδοσης ανά βαθμό Κέλβιν, έχουν επικρατήσει στην αγορά για το σημαντικά μικρότερο κόστος παρασκευής τους. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι το μειονέκτημα της χαμηλότερης απόδοσης είναι λιγότερο αισθητό στις εφαρμογές PV/T για το λόγο ότι η θερμότητα που απορρίπτει το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι αξιοποιήσιμη.

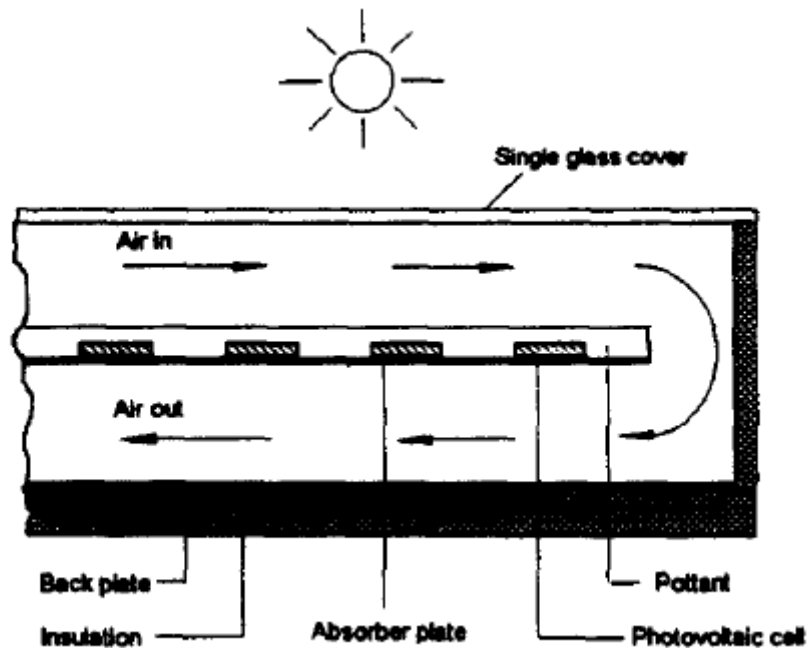
### 1.3 Ιστορική Αναδρομή στους συλλέκτες PV/T [4]

Ο **Hendrie** ανέπτυξε το πρώτο θεωρητικό μοντέλο ενός επίπεδου PV/T συλλέκτη. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι συλλέκτες που είναι βασισμένοι σε αέρα και ρευστά μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις θερμικές 40,4% και 32,9% αντίστοιχα και μία τυπική ηλεκτρική απόδοση. Οι **Cox και Raghuran** βρήκαν ότι οι συλλέκτες αέρα είναι κατά κανόνα λιγότερο αποδοτικοί από τους συλλέκτες ρευστού λόγω της μικρής πυκνότητας ισχύος, της μικρής απορροφητικότητας ηλιακής ενέργειας, των υψηλών απωλειών λόγω υπέρυθρης ακτινοβολίας και της χαμηλής μεταφοράς θερμότητας του αέρα.

Ο **Huang** μελέτησε ένα ενσωματωμένο PVT σύστημα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συλλέκτες PVT κατασκευασμένοι από πτυχωτά πολυανθρακικά στοιχεία μπορούν να επιτύχουν καλύτερη εξοικονόμηση της πρωτογενούς ενέργειας μέχρι και 61,3%, όταν η διαφορά μεταξύ του δοχείου αποθήκευσης και του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι 4°C. Οι **Bergene και Lovvik** ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο PVT, το οποίο βασίζεται στην ανάλυση ενεργειακής μεταφοράς συμπεριλαμβανομένης της επαγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας το οποίο είχε αρχίσει από τους Duffie και Beckman και το αποτέλεσμα του μοντέλου πρότεινε ότι η συνολική απόδοση του PVT με συγκεντρωτή είναι μεταξύ 60-80%. Οι **Grag και Agarwal** ανέπτυξαν μία προσομοίωση για να εξετάσουν το αποτέλεσμα του σχεδιασμού και τις μεταβλητές λειτουργίας ενός υβριδικού PVT σε συνδυασμό με σύστημα θέρμανσης με αέρα. Βρήκανε ότι τα PVT θέρμανσης αέρα εξαρτώνται κατά μεγάλο ποσοστό από τις θερμοκρασίες σχεδιασμού, αφού το επιπλέον γυάλινο κάλυμμα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες απώλειες εκπομπής και πάνω από κάποιο κρίσιμο σημείο το κάλυμμα μονού γυαλιού μπορεί να συγκεντρώσει μεγαλύτερη θερμότητα σε σχέση με το διπλό γυαλί. Ο **Sorjan** ανέπτυξε το μοντέλο σταθερής-κατάστασης για να αναλύσει την απόδοση των μονών και διπλών περασμάτων PVT σε κανονικές συνθήκες ροής μάζας.

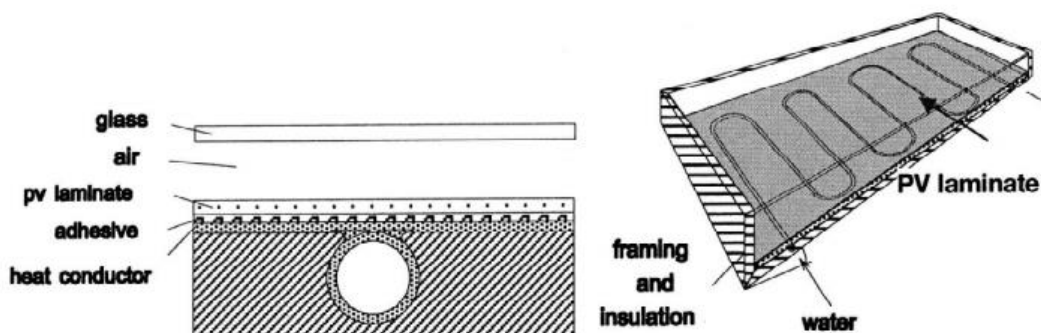


Εικόνα 1.9: PVT Απλής διέλευσης [6]



Εικόνα 1.10: PVT διπλής διέλευσης [6]

Οι **De Vries και Zondag** πειραματίστηκαν με έναν PVT-ηλιακό θερμοσίφωνα με αποθήκευση νερού και βρήκαν ότι το καλυμμένο σύστημα «φύλλο-και-σωλήνας» είναι το πιο πολλά υποσχόμενο σύστημα PVT για τη θέρμανση ΖΝΧ. Αυτό το σύστημα PVT μπορεί να επιτύχει ετήσιες ηλιακές επιδόσεις μεταξύ 34% και 39% για τα καλυμμένα συστήματα και 24% για τα ακάλυπτα.

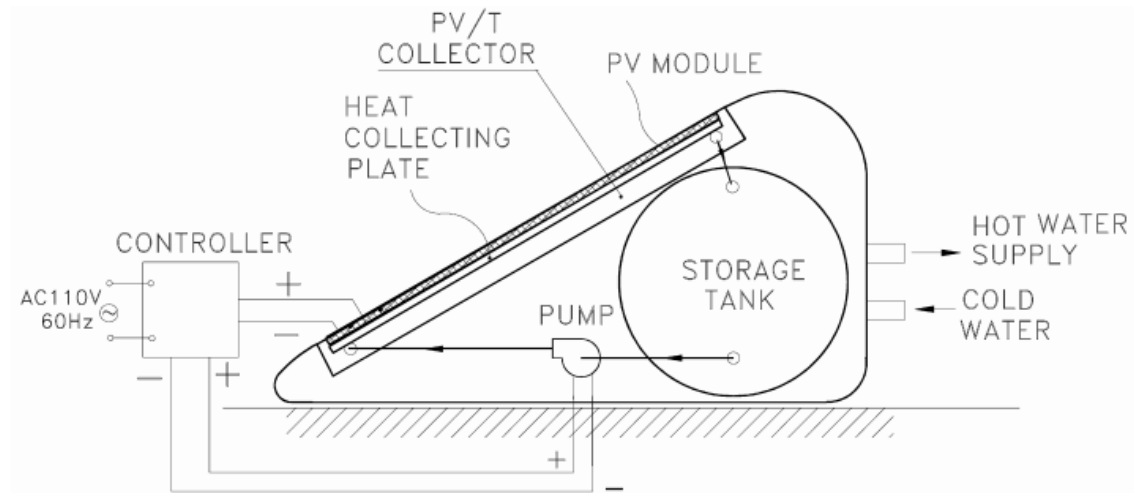


Εικόνα 1.11: Σύστημα των De Vries και Zondag [8]

Ο **Καλογήρου** δημιούργησε τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση της απόδοσης ενός υβριδικού PVT με νερό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υβριδικό σύστημα αυξάνει τη μέση ετήσια απόδοση του PV συστήματος από 2,8% σε 7,7% και επιπλέον καλύπτει το 49% των αναγκών σε ΖΝΧ για μία οικία, αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο τη μέση ετήσια απόδοση κατά 31,7%. Οι **Jones και Underwood** μελέτησαν τη θερμοκρασία ενός Φωτοβολταϊκού στοιχείου σε ασταθή κατάσταση σε σχέση με το χρόνο. Εκτέλεσαν πειράματα για αίθριο και νεφελώδη ουρανό και παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία των στοιχείων κινείται μεταξύ 27 και 52°C για θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 24,5°C. Ο **Huang** μελέτησε πειραματικά τα ακάλυπτα ενσωματωμένα PVT υπό φυσικές συνθήκες λειτουργίας ως προς την παραγωγή ΖΝΧ. Παρατήρησαν ότι η εξοικονόμηση σε πρωτογενή ενέργεια

ξεπερνά το 60%, το οποίο είναι ψηλότερο από τους συμβατικούς ηλιακούς θερμαστές και τα αμιγώς φωτοβολταϊκά συστήματα.

B. J. Huang *et al.*



Εικόνα 1.12: Σχηματικό διάγραμμα ενσωματωμένου PVT [9]

Ο **Καλογήρου** μελέτησε τη μηνιαία απόδοση των ακόλυπτων υβριδικών συλλεκτών PVT κάτω από εξαναγκασμένη λειτουργία για τις κλιματικές ανάγκες της Κύπρου και παρατήρησε αύξηση της ετήσιας απόδοσης των PV από 2,8% σε 7,7% με θερμική απόδοση στο 49%. Οι **Sandnes και Rekstad** παρατήρησαν τη συμπεριφορά του συνδυασμένου PVT και συλλέκτη ο οποίος κατασκευάστηκε επισυνάπτοντας ένα μονοκρυσταλλικό Φωτοβολταϊκό στοιχείο πάνω σε ένα μαύρο πλαστικό απορροφητή ηλιακής θερμότητας. Προτείνουν ότι αυτή η υλοποίηση ταιριάζει σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας για την αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

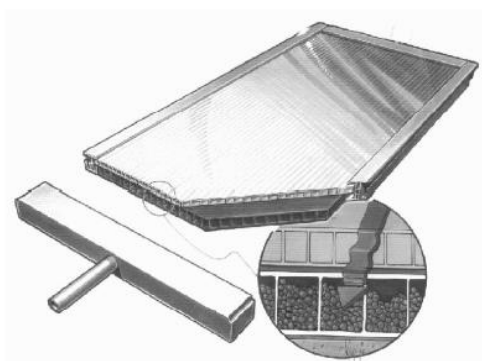
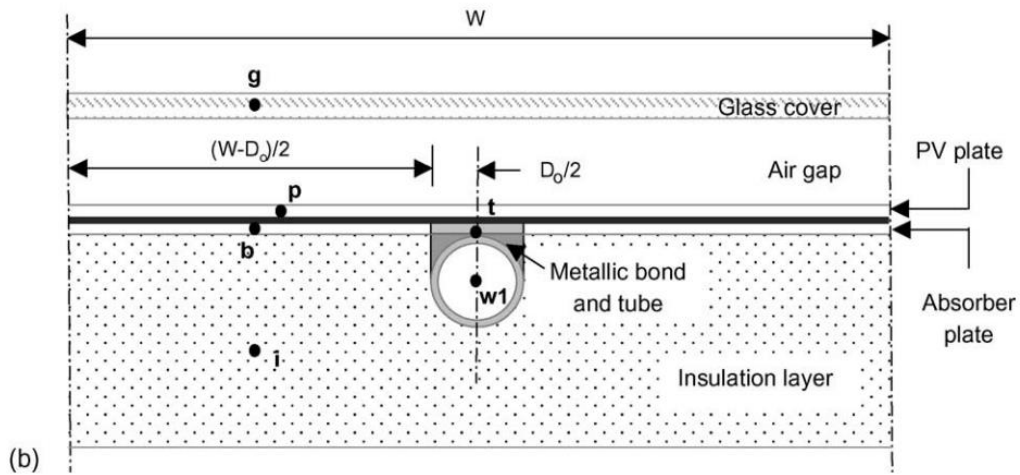


Fig. 2. The SolarNor collector. The absorber of PPO plastic contains internal, wall-to-wall channels filled with ceramic granulates (source: SolarNor, 1996).

Εικόνα 1.13: Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με μαύρη πλαστική επιφάνεια στην οπίσθια όψη για την απαγωγή θερμότητας [10]



Ο **Chow** ανέλυσε ένα συγκεντρωτικό PVT νερού με απλή κάλυψη για μεταβατικές καταστάσεις. Παρατήρησε ότι η απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής σε μειωμένες θερμοκρασίες μεγαλώνει κατά 2% με παροχή μάζας 0,01kg/s για θερμική αγωγιμότητα μεταξύ πλάκας και φωτοβολταϊκού στοιχείου 10.000 W/m<sup>2</sup>/K. Επιπλέον το σύστημα εμφανίζει θερμική απόδοση ίση με 60%.



**Εικόνα 1.14: Το σύστημα μελέτης του Chow [11]**

Οι **Tiwari και Sodha** ανέπτυξαν ένα θερμικό μοντέλο για ενσωματωμένους PVT συγκεντρωτές και το συνέκριναν με έναν απλό PVT για ZNX. Οι προσομοιώσεις προέβλεψαν 58% εξοικονόμηση σε πρωτογενή ενέργεια.

Έχοντας τα παραπάνω πορίσματα αλλά και την κατηγοριοποίηση των PV/T συστημάτων υπόψιν, στα πλαίσια αυτής της εργασίας καταλήξαμε σε σύστημα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Υδατικό διάλυμα γλυκόλης για το ρευστό απαγωγής θερμότητας. Η γλυκόλη δρα ως αντιπηκτικό. Εναλλακτικά θα μελετηθεί το νερό ως ρευστό στους συλλέκτες.
2. Μηχανικός τρόπος ενσωμάτωσης στο πίσω μέρος της φωτοβολταϊκής επιφάνειας
3. Έμμεση και άμεση αποθήκευση
4. Αποθήκευση σε μονωμένη δεξαμενή νερού
5. Παραβολικά κάτοπτρα
6. Πολυκρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Στην πορεία της διπλωματικής θα μοντελοποιηθεί τόσο η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική και ηλεκτρική, από την παραγωγή της μέχρι και την αποθήκευση. Για την άμεση αποθήκευση θα συγκριθεί η απόδοση του μοντέλου για την Ελλάδα (Ελληνικό) και το Ηνωμένο Βασίλειο (Moat), ενώ για την έμμεση αποθήκευση θα επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα.

## 1.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] E. Skoplaki και J. Palyvos, «Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations,» *Renewable Energy*, τόμ. 34, pp. 23-29, 2008.
- [2] A. H. Al-Waelia, K. Sopian, H. A. Kazemb και M. T. Chaichanc, «Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 77, pp. 109-130, 2017.
- [3] D. Su, Y. Jia, G. Alva, L. Liu και G. Fang, «Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic–thermal solar collectors integrated with phase change materials,» *Energy Conversion and Management*, τόμ. 131, pp. 79-89, 2017.
- [4] A. Kumar, P. Baredar και U. Qureshi, «Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, αρ. 42, pp. 1428-1436, 2015.
- [5] J. Wua, X. Zhangb, J. Shenb, Y. Wud, K. Connellyd και T. Yangb, «A review of thermal absorbers and their integration methods for the combined solar photovoltaic/thermal (PV/T) modules,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, αρ. 75, pp. 839-854, 2017.
- [6] J. A. Duffie και W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Willey & Sons, Inc., 1980.
- [7] F. Karimi, H. Xu, Z. Wang, J. Chen και M. Yang, «Experimental study of a concentrated PV/T system using linear Fresnel lens,» *Energy*, αρ. 123, pp. 402-412, 2017.
- [8] S. KS, Y. HT, L. HT, K. S και V. TN, «Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters,» *Energy Conversion and Management*, 1996.
- [9] H. Zondag, D. d. Vries, W. v. Helden, R. v. Zolingen και A. v. Steenhoven, «The yield of different combined PV-thermal collector designs,» *Solar Energy*, 2003.
- [10] B. J. HUANG, T. H. LIN, W. C. HUNG και F. S. SUN, «Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems,» *Solar Energy*, 2001.
- [11] B. SANDNES και J. REKSTAD, «A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model,» *Solar Energy*, 2002.
- [12] T.T.Chow, «Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model,» *Solar Energy*, 2003.



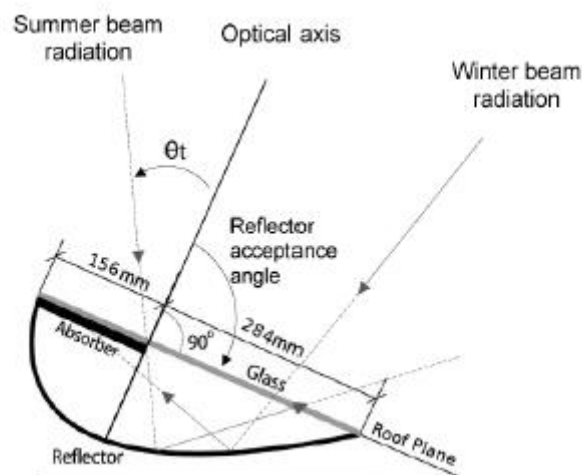
## Κεφάλαιο 2: Ηλιακή ακτινοβολία και Συλλέκτες

### 2.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη, την οποία στοχεύει να μοντελοποιήσει η παρούσα εργασία, αποτελείται από πέντε διπλούς συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου της εταιρίας Solarus v11 PVT collector. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ο συλλέκτης και στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η τομή του, η οποία καταδεικνύει τη γεωμετρία του.



Εικόνα 2.1: Άποψη του Συλλέκτη της πειραματικής διάταξης [1]



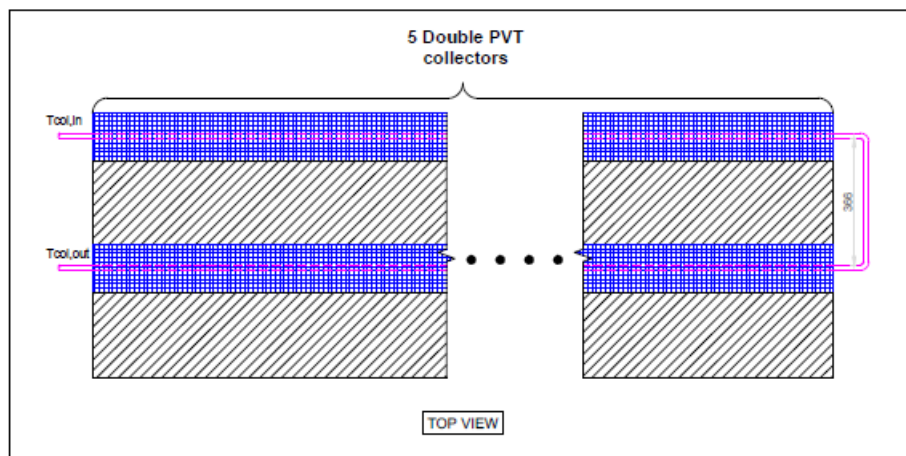
Εικόνα 2.2: Τομή του Συλλέκτη της πειραματικής διάταξης [1]

Ο συλλέκτης αυτός αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκές πλάκες πλάτους 156mm, οι οποίες είναι τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε η πρώτη να εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο επίπεδο του Συλλέκτη, και η δεύτερη την ανακλώμενη. Η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται στο παραβολικό κάτοπτρο που βρίσκεται στο κάτω μέρος του συλλέκτη. Όπως γίνεται σαφές και από την Εικόνα 2.2 η ανάκλαση είναι χρήσιμη, μόνο κατά τις ώρες εκείνες στις οποίες το ηλιακό ύψος είναι χαμηλό, καθώς σε διαφορετική περίπτωση το κάτοπτρο απορρίπτει πίσω

στο περιβάλλον την ανακλώμενη ακτινοβολία. Σε αυτό το θέμα θα αναφερθούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο μέρος 2.2 Ηλιακή ακτινοβολία.

Ενδιάμεσα στις δύο φωτοβολταϊκές πλάκες υπάρχει ένας μεταλλικός αγωγός, ο οποίος απορροφά μέρος της θερμότητας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη η σωλήνα περιέχει αιθυλική γλυκόλη ( $\text{CH}_2\text{OH}_2$ ), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για το χαμηλό σημείο πήξης της ( $-12.9^\circ\text{C}$ ) σε σχέση με το νερό. Η απαγωγή της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει θετική επίπτωση στην απόδοσή τους, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας τους συνοδεύεται και από αντίστοιχη μείωση της απόδοσης. Παράλληλα αυτή η θερμότητα αξιοποιείται για τη θέρμανση Νερού Χρήσης.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.3) βρίσκεται μία σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης. Η αρχική κατασκευή του υδραυλικού κυκλώματος ήταν με δύο παράλληλους αγωγούς, έναν για τους βόρειους συλλέκτες και έναν για τους νότιους. Ενώνοντας τις εξόδους του πέμπτου συλλέκτη, επιτυγχάνουμε μεγαλύτερες θερμοκρασίες στην γλυκόλη αυξάνοντας έτσι το εξεργειακό περιεχόμενό της. Για το υπόλοιπο της εργασίας ο κάθε συλλέκτης θα μελετάται σαν ξεχωριστή οντότητα με τον πρώτο να είναι η θέση εισόδου της γλυκόλης (με θερμοκρασία  $T_{\text{col,in}}$ ) και τον δέκατο η θέση εξόδου (με θερμοκρασία  $T_{\text{col,out}}$ )



Εικόνα 2.3: Κάτοψη της πειραματικής διάταξης

## 2.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Πριν συνεχίσουμε με την πλήρη ανάλυση του συλλέκτη, πρέπει πρώτα να αναλύσουμε την ηλιακή γεωμετρία και να εκτιμήσουμε την ποσότητα ενέργειας η οποία αποδίδεται στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλακών. Στόχος είναι ο υπολογισμός της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου,  $I_T$ .

### 2.2.1 Βασικές έννοιες [2, 3]

**Ηλιακή σταθερά  $G_{sc}$  [ $W/m^2$ ]:** η μέση ακτινοβολία που δέχεται μία νοητή επιφάνεια κάθετη στην κατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων, η οποία βρίσκεται εκτός της γήινης ατμόσφαιρας. Ο όρος «σταθερά» είναι καταχρηστικός, καθώς η τιμή του μεγέθους αυτού μεταβάλλεται κατά 7% μεταξύ 1<sup>ης</sup> Ιανουαρίου (η γη βρίσκεται στην πιο μικρή απόσταση σε σχέση με τον ήλιο) και 3<sup>ης</sup> Ιουλίου (η γη βρίσκεται στην πιο μεγάλη απόσταση σε σχέση με τον ήλιο). Οπότε, η τιμή αυτή θα θεωρηθεί ίση με τον ετήσιο μέσο όρο, ο οποίος είναι ίσος με  $G_{sc}=1361 W/m^2$ .



Εικόνα 2.4: Ηλιακή σταθερά [4]

**Ηλιακή Ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας  $G_{on}$  [ $W/m^2$ ]:** Για να ληφθεί υπόψιν η μετακίνηση της γης σε σχέση με τον ήλιο στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.33 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365}\right) \quad (2.1)$$

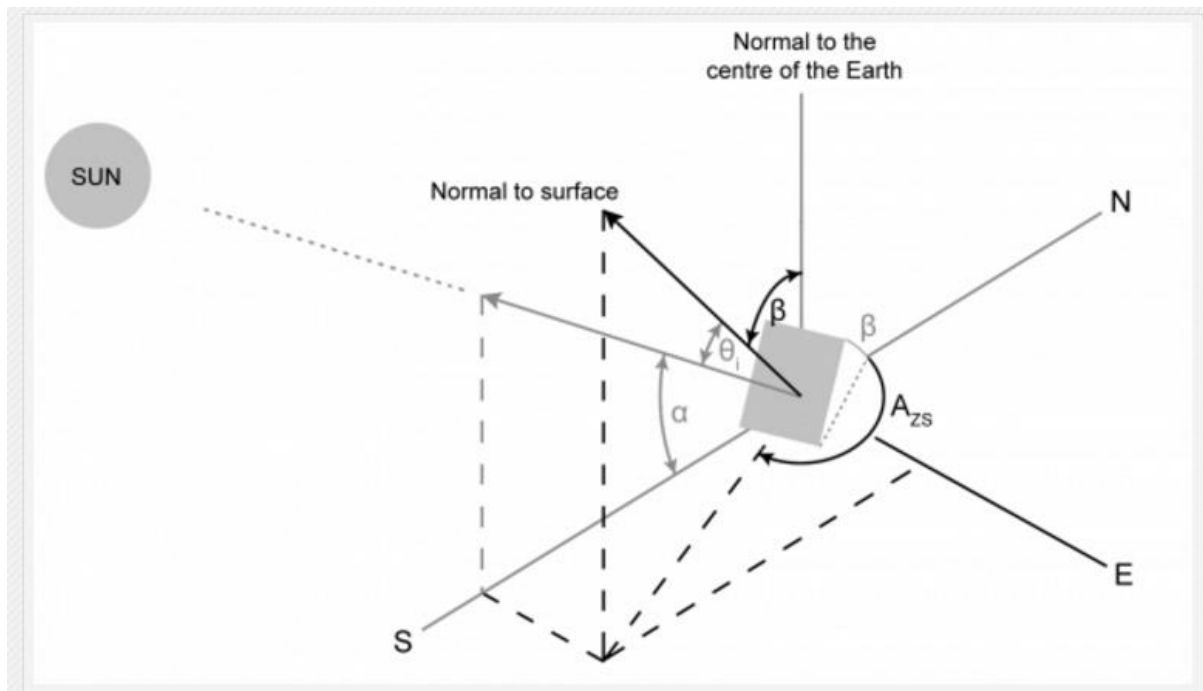
, όπου  $n =$  η ημέρα του έτους [ $1 \div 365$ ].

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε χαρακτηριστικές γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας.

**Ηλιακό ύψος  $\alpha$  [ $^\circ$ ]:** είναι η γωνία που σχηματίζεται από γωνία θέασης του ήλιο και από την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.

**Γωνία ζενίθ  $\theta_z$  [ $^\circ$ ]:** είναι η γωνία που σχηματίζεται από γωνία θέασης του ήλιο και από την κατακόρυφο. Οι γωνίες  $\alpha$  και  $\theta_z$  είναι συμπληρωματικές.

**Αζιμούθιο επιφάνειας  $\gamma$  [ $^\circ$ ]:** είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και την νότια ημιευθεία.  $\Gamma=0^\circ$  στο νότο,  $\gamma=90^\circ$  στη δύση,  $\gamma=180^\circ$  στο βορρά,  $\gamma=270^\circ$  στην ανατολή. Στο πλαίσιο της εργασίας  $\gamma=0$ .



Εικόνα 2.5: Χαρακτηριστικές γωνίες ηλιακής γεωμετρίας [4]

**Αζιμούθιο ήλιου  $\gamma_s$  [°]:** είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της ευθείας όρασης του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

**Κλίση επιπέδου  $\beta$  [°]:** είναι η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδος επιφάνειά με το οριζόντιο επίπεδο. Η πειραματική διάταξη έχει κλίση επιπέδου ίση με  $\beta=30^\circ$ .

**Γεωγραφικό πλάτος παρατηρητή  $\phi$  [°]:** για τη διπλωματική θα θεωρηθεί ίσο με  $\phi=37,97^\circ$

**Ηλιακός χρόνος [min]:** είναι ο χρόνος που μετρείται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό. Το ηλιακό μεσημέρι είναι η στιγμή που ο ήλιος τέμνει το μεσημβρινό του παρατηρητή. Υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους:

$$Solar\_time = t_{local} \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.2)$$

,όπου  $t_{local}$  = τοπική ώρα

$L_{st}$  = το γεωγραφικό μήκος στο οποίο βασίζεται η τοπική ώρα ( $30^\circ$  για την Ελλάδα)

$L_{loc}$  = το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή  $= 23.72^\circ$

Ο τύπος (2.2) έχει θετικό πρόσημο μπροστά από τον παράγοντα  $4(L_{st}-L_{loc})$  για δυτικά μήκη και αρνητικό πρόσημο για ανατολικά. Στην περίπτωσή μας θα είναι αρνητικό.

$E$  [min] είναι η εξίσωση χρόνου και υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

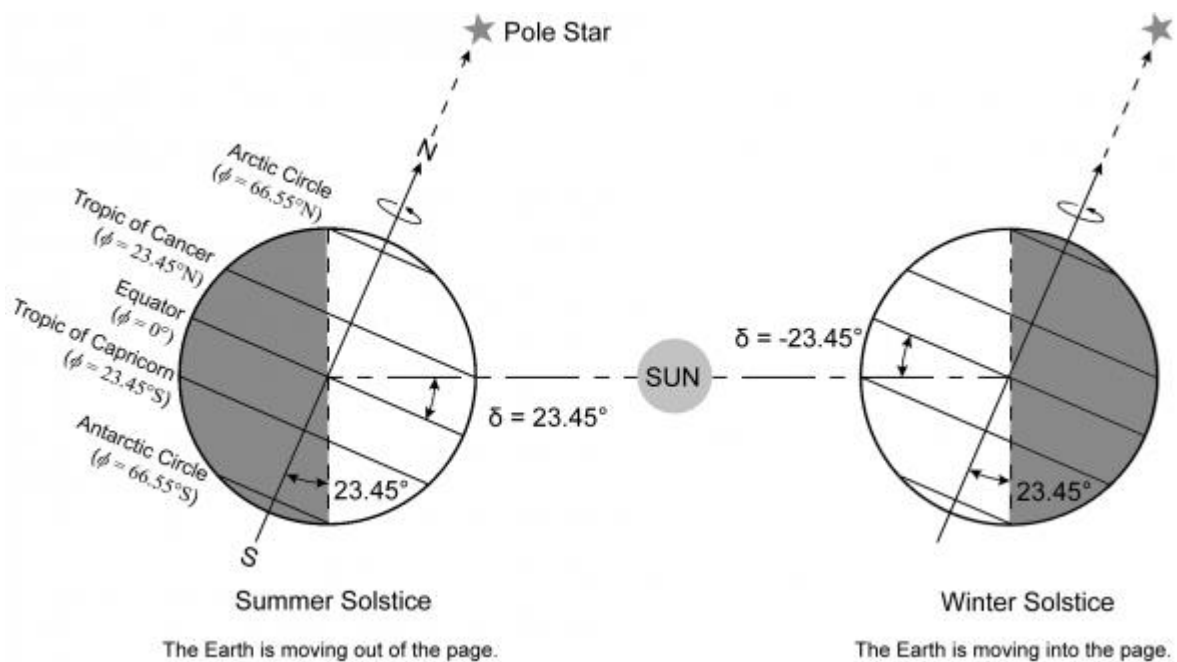
$$\begin{aligned} E &= 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \\ B &= 360 \frac{n-81}{364} \\ n &= day\_of\_year = 1 \div 365 \end{aligned} \quad (2.3)$$

**Ωριαία γωνία  $\omega$  [°]:** η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί του άξονά της με ρυθμό 15°/h.

$$\omega = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin a - \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} \right] \quad (2.4)$$

Υποθέτουμε ότι  $\omega > 0$  για το απόγευμα και  $\omega < 0$  για το πρωί.

**Ηλιακή απόκλιση  $\delta$  [°]:** η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Οι τιμές της γωνίας  $\delta$  κινούνται μεταξύ -23.45 (στο χειμερινό ηλιοστάσιο) και 23.45 (στο θερινό ηλιοστάσιο).



Εικόνα 2.6: Ηλιακή απόκλιση στο θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο [4]

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (2.5)$$

**Μέση ημέρα του μήνα:** Η μέρα κατά την οποία η ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας είναι περίπου ίση με τη μέση ημερήσια του μηνός. Η ημέρα αυτή θα θεωρηθεί η αντιπροσωπευτική του κάθε μήνα για τον υπολογισμό της ημερήσιας ενέργειας που δέχεται οριζόντια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρα (Ho, βλ. Κεφάλαιο 2.2.2). Η μέση ημέρα για κάθε μήνα βρίσκεται βάσει του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1: Μέση ημέρα του μήνα

Μήνας	Μέση ημέρα του μήνα		
	Ημέρα του μήνα	Ημέρα του Χρόνου[n]	Ηλιακή απόκλιση[°]
Ιανουάριος	17	17	-20.9
Φεβρουάριος	16	47	-13.0
Μάρτιος	16	75	-2.4
Απρίλιος	15	105	9.4

Μάιος	15	135	18.8
Ιούνιος	11	162	23.1
Ιούλιος	17	198	21.2
Αύγουστος	16	228	13.5
Σεπτέμβριος	15	258	2.2
Οκτώβριος	15	288	-9.6
Νοέμβριος	14	318	-18.9
Δεκέμβριος	10	344	-23

Η ακτινοβολία κατά κανόνα συμβολίζεται με τρία γράμματα, ένα Κεφαλαίο λατινικό χαρακτήρα και δύο δείκτες. Είναι δηλαδή της μορφής:

$A_{XY}$ , όπου

**A=**

- **G** για τη στιγμιαία ακτινοβολία σε  $W/m^2$ ,
- **I** για την ωριαία ακτινοβολία σε  $J/m^2$  ή  $Wh/m^2$  και
- **H** για την ημερήσια ακτινοβολία σε  $J/m^2$  ή  $Wh/m^2$

**X=**

- **b (beam)** για την άμεσο ακτινοβολία, την ακτινοβολία χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα
- **d (diffuse)** για την διάχυτο ακτινοβολία, την ακτινοβολία από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης μέσα στην ατμόσφαιρα
- **a (albedo)** για την ανακλώμενη ακτινοβολία από παρακείμενες επιφάνειες
- **o** για την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας
- **[κενό]** για την ολική ακτινοβολία, η οποία είναι άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης

**Y=**

- **T** για το κεκλιμένο επίπεδο
- **n** για ακτινοβολία κάθετου επιπέδου
- **[κενό]** για το οριζόντιο επίπεδο.

**Γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  [°]:** της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτίνων και της καθέτου της επιφάνειας. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (2.6)$$

**Η Ωριαία γωνία δύσης του ήλιου  $\omega_s$  [°]** υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad (2.7)$$

**Η διάρκεια της ημέρας  $N$  [h]** είναι ίση με:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (2.8)$$

## 2.2.2 Υπολογισμός προσπίπτουσας ακτινοβολίας

- **Ημερήσια ολική (H) και διάχυτος ακτινοβολία (H<sub>d</sub>) οριζόντιου επιπέδου**

Έχοντας ορίσει όλες τις απαραίτητες έννοιες της ηλιακής γεωμετρίας, είναι δυνατόν να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της ημερήσιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια εκτός της ατμόσφαιρας (H<sub>o</sub>) σε J/m<sup>2</sup>:

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \frac{360 \cdot n}{365}\right) \cdot \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta\right] \quad (2.9)$$

Η σε Wh/m<sup>2</sup>:

$$H_o = \frac{24}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \frac{360 \cdot n}{365}\right) \cdot \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta\right] \quad (2.10)$$

Συχνά, επιθυμούμε τον υπολογισμό της μηνιαίας μέση τιμή ημερήσιας ακτινοβολίας ( $\bar{H}_o$ ). Για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους αρκεί η αντικατάσταση του n, της δ και του ω<sub>s</sub> με τις αντίστοιχες τιμές της μέσης ημέρας του μήνα.

Ο δείκτης αιθριότητας (**K<sub>T</sub>**) αντιπροσωπεύει τη συχνότητα εμφάνισης διαυγών ημερών. Μεγάλος δείκτης αιθριότητας αντιστοιχεί σε μεγάλη πιθανότητα διαυγούς ουράνιου θόλου. Αριθμητικά αποτελεί το πηλίκο μεταξύ της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ίδια ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας, το οποίο είναι και διαισθητικά συνεπές. Δηλαδή, εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας το οποίο καταφέρνει να διέλθει μέσα από αυτήν. Ανάλογα με τους παράγοντες του κλάσματος ο δείκτης αιθριότητας μπορεί να είναι Ωριαίος, Ημερήσιος ή Μηνιαίος. Το TOTEE παρέχει τιμές για τον Μηνιαίο δείκτη αιθριότητας σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος (Εικόνα 2.7). Πέρα από το TOTEE υπάρχουν και άλλες βάσεις δεδομένων με στοιχεία για το δείκτη αιθριότητας, όπως το Meteororm, το οποίο και θα χρησιμοποιήσουμε σε σύγκριση με τα στοιχεία του TOTEE.

**Πίνακας 4.3.** Μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας  $k_t$ .

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα, Ελληνικό	0,44	0,47	0,48	0,53	0,57	0,62	0,63	0,64	0,60	0,54	0,49	0,44
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	0,45	0,46	0,49	0,52	0,56	0,60	0,61	0,63	0,61	0,55	0,47	0,43
Αγρίνιο	0,46	0,47	0,49	0,51	0,55	0,62	0,64	0,63	0,59	0,55	0,49	0,44
Αγχίαλος	0,45	0,46	0,47	0,51	0,55	0,61	0,62	0,62	0,58	0,51	0,46	0,43

**Εικόνα 2.7:** Μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας για Αθήνα, Ελληνικό

Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, αυτό το δεδομένο και έχοντας ήδη υπολογίσει τη μηνιαίως μέση τιμή ημερήσιας ακτινοβολίας, μπορούμε να εξάγουμε την τιμή της μηνιαίως μέση ολική ακτινοβολία ημέρας οριζόντιου επιπέδου ( $\bar{H}$ ):

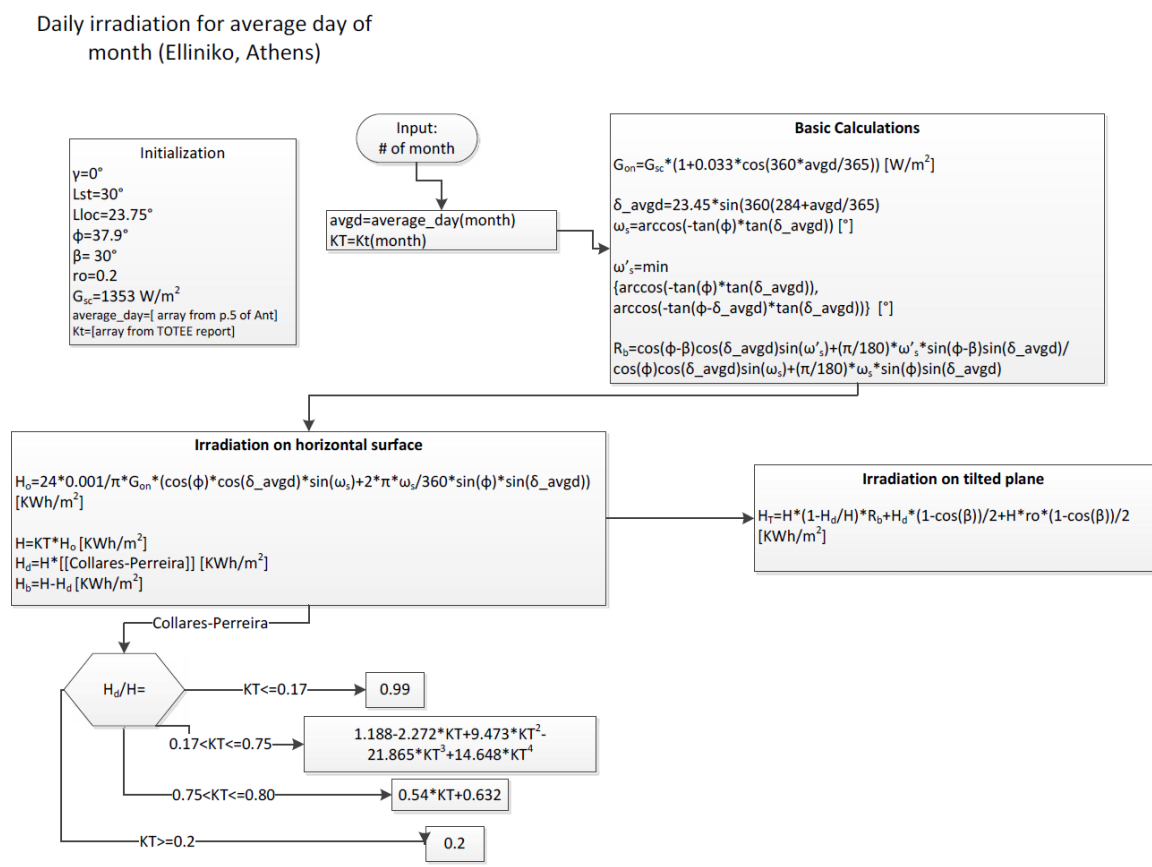
$$\bar{H} = \bar{K}_T \cdot \bar{H}_o \quad (2.11)$$



Στη συνέχεια, από το μοντέλο των Collares-Pereira και Rabl (1979) υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί η μηνιαίως μέση διάχυτος ακτινοβολία ημέρας οριζόντιου επιπέδου ( $\bar{H}_d$ ) μέσω του παρακάτω τύπου:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = \begin{cases} 0.99 \rightarrow K_T \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272 \cdot K_T + 9.473 \cdot K_T^2 - 21.865 \cdot K_T^3 + 14.648 \cdot K_T^4 \rightarrow 0.17 < K_T \leq 0.75 \\ 0.54 \cdot K_T + 0.632 \rightarrow 0.75 < K_T \leq 0.80 \\ 0.20 \rightarrow K_T \geq 0.80 \end{cases} \quad (2.12)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Εικόνα 2.8) παρουσιάζεται εποπτικά η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 2.8: Μπλοκ διάγραμμα ημερήσιας ακτινοβολίας για την τυπική μέρα του μήνα

- **Ανάλυση ημερήσιας ακτινοβολίας σε ωριαίες τιμές**

Εφόσον έχει βρεθεί η τιμή της ημερήσιας ακτινοβολίας για κάθε ημέρα του μήνα (συνολικά ίση για όλες τις ημέρες), επόμενος στόχος είναι η κατανομή αυτής της ενέργειας στη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η διαδικασία γίνεται με τον υπολογισμό των συντελεστών  $r_i$  και  $r_d$ .

Ο συντελεστής  $r_i$  είναι το πηλίκο της ολικής ωριαίας ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου (I) με την αντίστοιχη ημερήσια ακτινοβολία (H). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας αντί για την



ημερήσια ακτινοβολία της εκάστοτε ημέρας θα χρησιμοποιήσουμε την ημερήσια ακτινοβολία της μέσης ημέρας του μήνα ( $\bar{H}$ ). Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους του μοντέλου των Collares-Pereira και Rabl (1979):

$$r_t = \frac{I}{\bar{H}} = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cdot \cos \omega) \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi\omega_s/360) \cdot \cos \omega_s}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \cdot \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \cdot \sin(\omega_s - 60)$$
(2.13)

Σε αντιστοιχία με το συντελεστή  $r_t$ , ο συντελεστής  $r_d$  αποτελεί το πηλίκο της διάχυτης ωριαίας ακτινοβολίας οριζώντιου επιπέδου ( $I_d$ ) με την αντίστοιχη ημερήσια ακτινοβολία ( $H_d$ ). Όπως και για την περίπτωση της ολικής ακτινοβολίας και εδώ θα χρησιμοποιήσουμε τη ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία της μέσης ημέρας του μήνα ( $\bar{H}_d$ ). Ο συντελεστής  $r_d$  υπολογίζεται από το μοντέλο των Liu and Jordan (1960) με τον τύπο:

$$r_d = \frac{I_d}{\bar{H}_d} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi\omega_s/360) \cdot \cos \omega_s}$$
(2.14)

Η συμβολή της ανακλώμενης ακτινοβολία από παρακαείμενες επιφάνειες (albedo) θα θεωρηθεί αμελητέα στην ολική ακτινοβολία οριζώντιου επιπέδου, οπότε η εύρεση της άμεσης ωριαίας ακτινοβολίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_b = I - I_d$$
(2.15)

Από το μοντέλο των Liu and Jordan (1963) μπορεί να υπολογιστεί η ολική ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ( $I_T$ ).

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + (I_b + I_d) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}$$
(2.16)

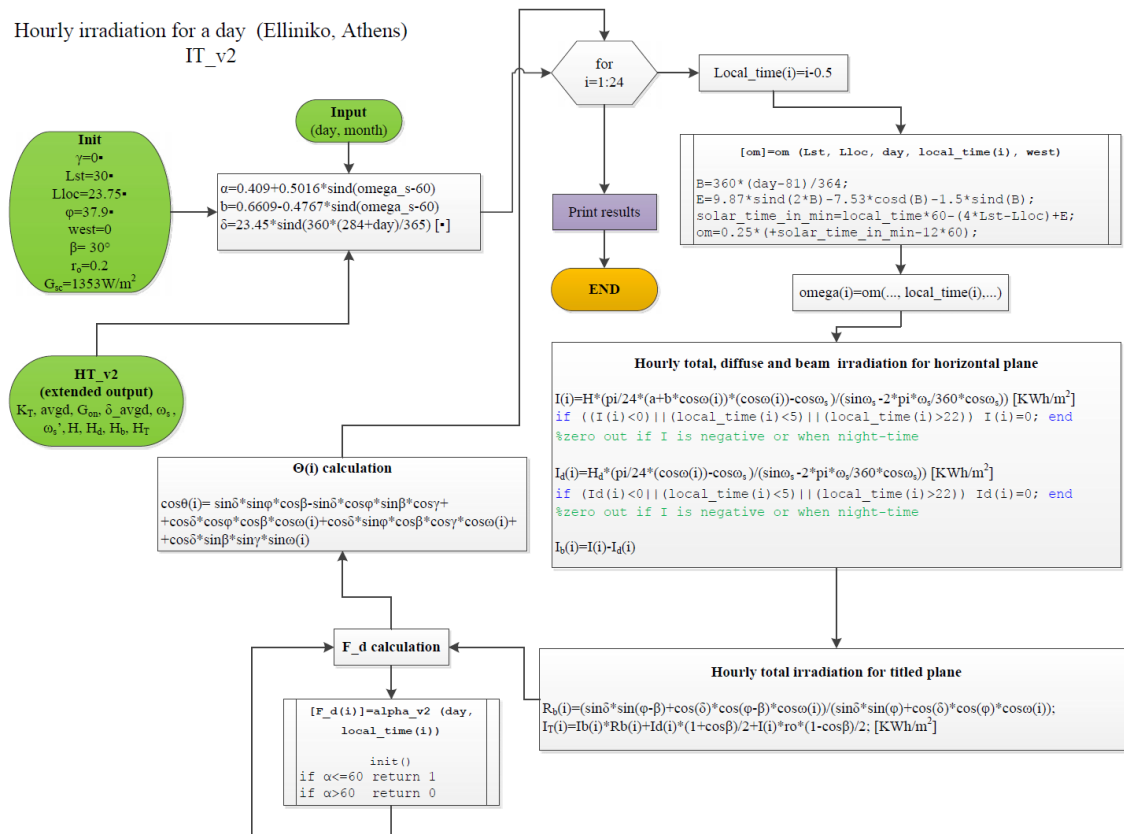
Όπου ο συντελεστής  $R_b$  είναι ο λόγος της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο ακτινοβολία οριζώντιου επιπέδου και για αζιμούθιο επιφάνειας ίσο με  $\gamma=0^\circ$  (κατεύθυνση νότια) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega}$$
(2.17)

Και  $\rho$  αποτελεί την ανακλαστικότητα του εδάφους. Μία τυπική τιμή για την ανακλαστικότητα του εδάφους είναι το 0.2 (για χιονισμένο έδαφος η τιμή είναι 0.7).

Στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής, το οποίο συνοψίζει τις διαδικασίες που απαιτούνται για τη μετάβαση σε ωριαίες τιμές ακτινοβολίας.

Hourly irradiation for a day (Elliniko, Athens)  
IT\_v2



Εικόνα 2.9: Μπλοκ ωριαίας ακτινοβολίας για επιλεγμένη ημέρα

Σε αυτό το σημείο έχει παρατεθεί όλο το αναγκαίο θεωρητικό υπόβαθρο για να υπολογιστεί η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο. Παρατηρούμε, ωστόσο, ότι εντός του παραπάνω διαγράμματος ροής υπάρχουν δύο διαδικασίες (υπολογισμός των ωρών κατά τις οποίες το ηλιακό ύψος υπερβαίνει τις 60° και υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης) οι οποίες δεν είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αυτές οι διαδικασίες θα είναι χρήσιμες στο επόμενο μέρος, στο οποίο θα υπολογιστεί η απορροφούμενη ακτινοβολία από τα δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία του PVT.

### 2.2.3 Υπολογισμός απορροφούμενης ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη δεν είναι εκμεταλλεύσιμη στο σύνολό της, καθώς υπεισέρχεται ο παράγοντας της διαπερατότητας και της απορροφητικότητας του γυαλιού προστασίας στην περίπτωση της εμπρόσθιας φωτοβολταϊκής επιφάνειας και της ανακλαστικότητας και της γεωμετρίας του κατόπτρου στην περίπτωση της οπίσθιας επιφάνειας. Αυτά τα μεγέθη μπορούν να ορισθούν και να υπολογιστούν. Στις επόμενες παραγράφους θα καταλήξουμε σε τύπους που θα μπορούν να υπολογίσουν την συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στις φωτοβολταϊκές πλάκες.

- **Εμπρόσθια επιφάνεια:** Για την εμπρόσθια επιφάνεια ο υπολογισμός είναι απλός, καθώς το μόνο το οποίο υπεισέρχεται μεταξύ της ατμόσφαιρας και της φωτοβολταϊκής επιφάνειας είναι το προστατευτικό γυαλί του συλλέκτη. Αυτή η επίδραση μοντελοποιείται με το γινόμενο της διαπερατότητας  $[\tau]$  με την απορροφητικότητα  $[\alpha]$ , η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω ομάδα τύπων

$$(\tau\alpha) = GT(\theta) = \frac{\frac{1-R_s(\theta)}{1+R_s(\theta)} + \frac{1-R_p(\theta)}{1+R_p(\theta)}}{2} \quad (2.18)$$

$$R_s = \left[ \frac{n_{glass} \cdot \cos(\theta) - n_{air} \cdot \cos(t)}{n_{glass} \cdot \cos(\theta) + n_{air} \cdot \cos(t)} \right]^2 \quad (2.19)$$

$$R_p = \left[ \frac{n_{air} \cdot \cos(\theta) - n_{glass} \cdot \cos(t)}{n_{air} \cdot \cos(\theta) + n_{glass} \cdot \cos(t)} \right]^2 \quad (2.20)$$

$$t = \arcsin\left(\frac{n_{air} \cdot \sin(\theta)}{n_{glass}}\right) \quad (2.21)$$

Όπου  $\theta$  είναι η γωνία πρόσπτωσης, όπως αυτή υπολογίζεται από τον τύπο (2.6). Οπότε η συνολική απορροφούμενη ενέργεια στην εμπρόσθια επιφάνεια είναι ίση με:

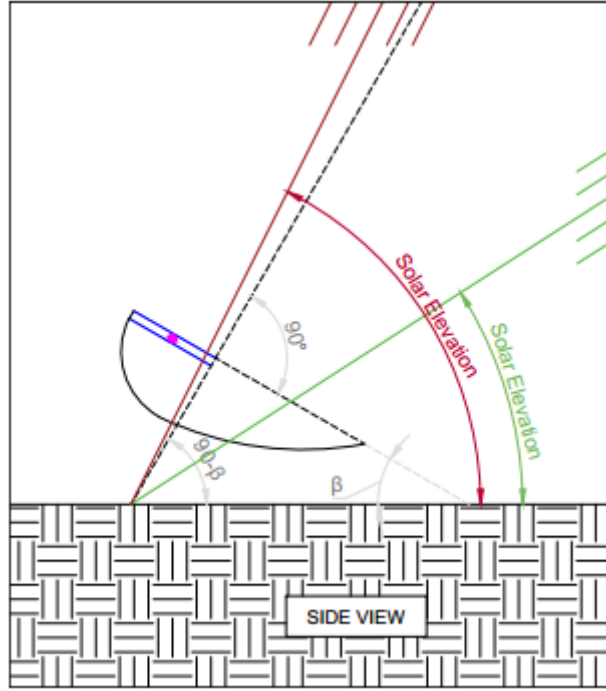
$$S_{front} = I_T \cdot (\tau\alpha) \quad (2.22)$$

Η μονάδα μέτρησης της  $S_{front}$  είναι ανηγμένη ανά μονάδα επιφάνειας ( $W/m^2$ ).

- **Οπίσθια επιφάνεια:** Για την εμπρόσθια επιφάνεια ο υπολογισμός είναι περισσότερο πολύπλοκος, καθώς πέραν του συντελεστή  $(\tau\alpha)$  υπεισέρχονται η ανακλαστικότητα του κατόπτρου καθώς και η γεωμετρία του. Επιπλέον, η συμβολή της αμέσου με τη διάχυτο ακτινοβολία μελετάται ξεχωριστά. Συγκεκριμένα:

$$I_{b\_CPC} = F \cdot I_b \quad (2.23)$$

Όπου  $F$  είναι η συνάρτηση η οποία είναι ίση με 1 όταν το ηλιακό ύψος είναι μικρότερο της γωνίας που σχηματίζεται από την καθέτο στην επιφάνεια του συλλέκτη με το οριζόντιο επίπεδο (Εικόνα 2.10)



**Εικόνα 2.10: Γωνία απόρριψης για την οπίσθια επιφάνεια**

Για την συμβολή της διάχυτου ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$I_{d\_CPC} = \begin{cases} \frac{I_d}{C} \rightarrow \beta + \theta_c \leq 90^\circ \\ I_d \left[ \frac{1/C + \cos \beta}{2} \right] + I_a \left[ \frac{1/C - \cos \beta}{2} \right] \rightarrow \beta + \theta_c > 90^\circ \end{cases} \quad (2.24)$$

Όπου  $\theta_c$  είναι η μισή γωνία αποδοχής. Στην συγκεκριμένη εργασία η γωνία αποδοχής είναι  $60^\circ$  και η κλίση του συλλέκτη είναι ίση με  $30^\circ$ , οπότε το άθροισμα  $[\theta_c + \beta]$  είναι μικρότερο από  $90^\circ$ . Ο όρος  $C$  είναι ο λόγος συγκέντρωσης του κατόπτρου. Η τιμή αυτή είναι δεδομένη από τον κατασκευαστή.

Η άθροιση των δύο μεγεθών γίνεται με τον παρακάτω τύπο:

$$S_{back} = (I_{b,CPC} \cdot \tau_{cb} \cdot a_b + I_{d,CPC} \cdot \tau_{cd} \cdot a_d) \cdot \tau_{CPC} \quad (2.25)$$

Όπου ο όρος  $\tau_{CPC}$  είναι η διαπερατότητας του συγκεντρωτή, ο οποίος λαμβάνει υπόψιν τις απώλειες ανάκλασης. Οπότε με  $\rho$  το συντελεστή ανάκλασης του κατόπτρου και  $N$  τον μέσο ρυθμό ανακλάσεων:

$$\tau_{CPC} = \rho^N \quad (2.26)$$

Με τον τύπο (2.26) και με την υπόθεση ότι το γινόμενο  $(\tau\alpha)$  είναι ίσο για τη διάχυτο και την άμεσο ακτινοβολία, ο τύπος (2.25) απλοποιείται ως εξής:

$$S_{back} = (I_{b,CPC} + I_{d,CPC}) \cdot (\tau\alpha) \cdot \rho^N \quad (2.27)$$

Η μονάδα μέτρησης της  $S_{back}$  είναι ανηγμένη ανά μονάδα επιφάνειας ( $W/m^2$ ). Άξιο προσοχής είναι το γεγονός ότι η επιφάνεια με την οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί η  $S_{back}$  είναι η επιφάνεια του ανοίγματος και όχι της οπίσθιας φωτοβολταϊκής επιφάνειας.

## 2.3 Μετατροπή της Ηλιακής σε Θερμική και Ηλεκτρική ενέργεια

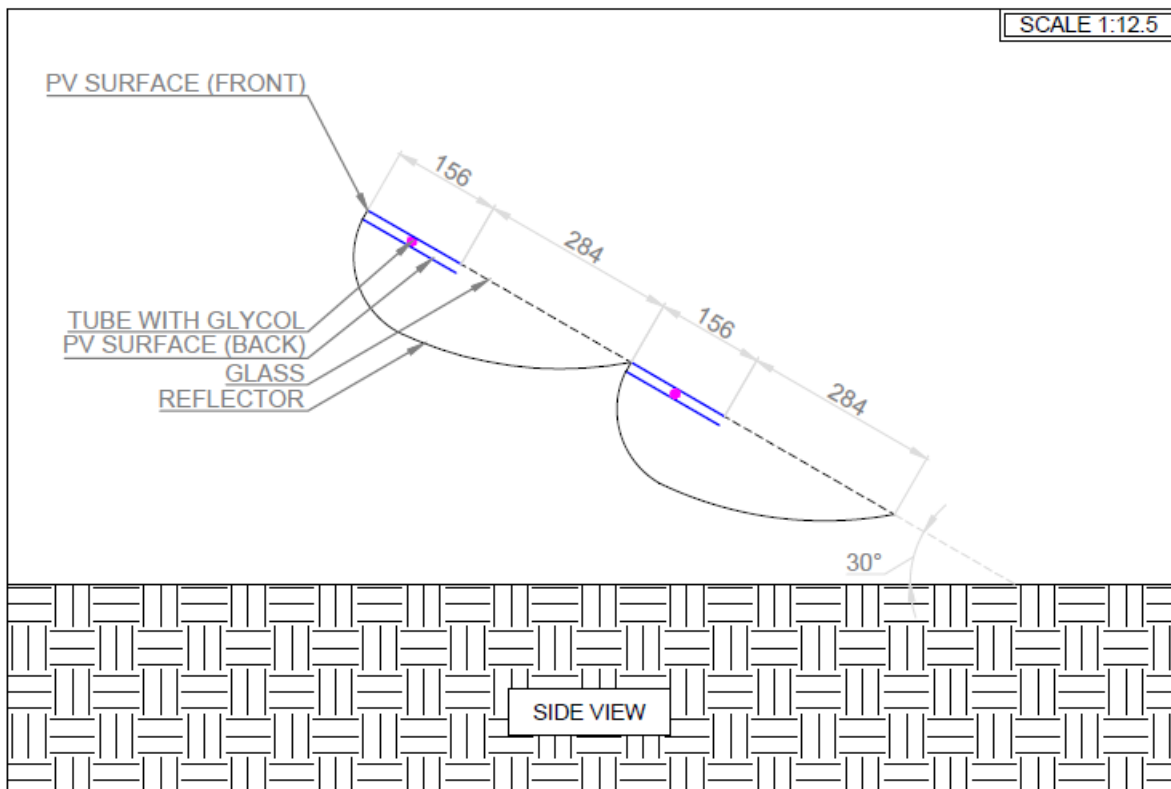
Σε αυτό το σημείο έχει υπολογιστεί η ηλιακή ισχύς, η οποία προσπίπτει στις δύο φωτοβολταϊκές επιφάνειες. Οπότε, η ηλεκτρική ισχύς ( $P_{el}$ ) που παράγεται από ένα PVT στοιχείο είναι με την προσπίπτουσα ηλιακή ισχύ ( $S_{total}$ ) επί την ηλεκτρική απόδοση του στοιχείου ( $n_{el}$ ).

$$P_{el} = S_{total} \cdot n_{el} \quad (2.28)$$

Η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ισχύς είναι το γινόμενο της εκάστοτε προσπίπτουσας ισχύος ανηγμένη σε επιφάνεια ( $S_{front}$  και  $S_{back}$ ) με την αντίστοιχη επιφάνεια ( $A_{PV}$  και  $A_{open}$ ).

$$S_{total} = S_{front} \cdot A_{PV} + S_{back} \cdot A_{open} \quad (2.29)$$

Από τις εικόνες Εικόνα 2.11 και Εικόνα 2.12 και συνυπολογίζοντας τη νεκρή ζώνη, εύκολα υπολογίζονται οι επιφάνειες του τύπου (2.29), ωστόσο η αναφορά συγκεκριμένων μεγεθών θα γίνει στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης του προβλήματος.



**Εικόνα 2.11: Πλάγια όψη ενός διπλού στοιχείου PVT**

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου υπολογίζεται από τον τύπο [1]:

$$n_{el} = n_{el\_ref} \cdot [1 - \beta(T_{eff} - T_{ref})] \quad (2.30)$$

Όπου  $\eta_{el\_ref}$  είναι ο συντελεστής απόδοσης του στοιχείου σε θερμοκρασία  $T_{ref}$ ,  $\beta$  είναι η πτώση στο συντελεστή απόδοσης για κάθε βαθμό Kelvin, και η  $T_{eff}$  υπολογίζεται από τον τύπο [1]:

$$T_{eff} = T_{PV} + T_{PVT} - T_{amb} \quad (2.31)$$

Όπου

$$T_{PV} = 30.0006 + 0.0175 \cdot (G_T - 300) + 1.14 \cdot (T_{amb} - 25) \quad (2.32)$$

$$T_{PVT} = \frac{T_{col,out} - T_{col,in}}{2} \quad (2.33)$$

Η θερμική ισχύς είναι η λογιστική διαφορά της ηλιακής ισχύος με την ηλεκτρική, εξαιρουμένων των θερμικών απωλειών ( $F'$ ):

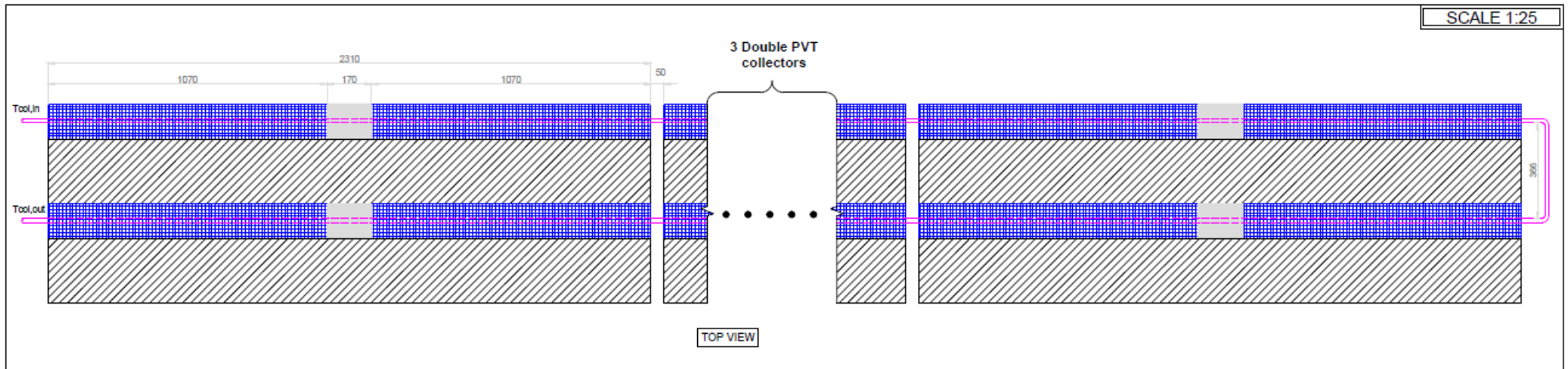
$$\begin{aligned} \dot{Q} &= S_{total} - P_{el} - P_{loss} \Leftrightarrow \\ \dot{Q} &= S_{total} - P_{el} - \frac{F_R \cdot U_L \cdot (T_{col,in} - T_{amb})}{C} \\ F_R &= \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot C}{U_L} \left(1 - e^{-\frac{U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p \cdot C}}\right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Επίσης είναι γνωστό ότι:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{col,out\_NEW} - T_{col,in}) \Leftrightarrow T_{col,out\_NEW} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{col,in} \quad (2.35)$$

Οπότε, υποθέτοντας μία αρχική τιμή της θερμοκρασίας εξόδου και θέτοντας την στον τύπο (2.33), μπορούμε να δημιουργήσουμε μία επαναληπτική μέθοδο, στην οποία θα εξετάζεται η απόλυτη διαφορά της προηγούμενης από τη νέα τιμή. Εφόσον επιτευχθεί ένα επιθυμητό όριο σύγκλισης, η νέα τιμή θεωρείται η πραγματική τιμή εξόδου του στοιχείου. Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται, ολοκληρωμένη, η πειραματική διάταξη. Η διαδικασία που περιγράφεται στο μέρος 2.3 επαναλαμβάνεται για κάθε ξεχωριστό στοιχείο (δέκα συνολικά) και η έξοδος του ενός αποτελεί είσοδο για το επόμενο.

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου για το σύστημα Ηλίου-Συλλέκτη. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί το μαθηματικό μοντέλο της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.



Εικόνα 2.1: Κάτοψη της πειραματικής διάταξης

## 2.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] D. Evans, «Simplified method for predicting photovoltaic array output,» σε *Solar Energy*, 1981, p. 555–560.
- [2] Α. Α. Κίμωνας, *Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα Μέρος Πρώτο*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2011.
- [3] D. John και B. William, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wisconsin: Wiley-Interscience Publication, 1980.
- [4] L. A. Diwan, «Study of Optimizations in a Novel Asymmetric Photovoltaic/Thermal Hybrid Solar Collector,» Instituto Superior Tecnico, Lisboa, 2013.
- [5] «ITACA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.itacanet.org/eng-home/>.
- [6] Y. Tripanagnostopoulos, S. Tselepis, M. Souliotis και K. Tonui, «Design aspects of hybrid PVT/water solar systems,» σε *19th European Solar Energy Conference and Exhibition 7-11 June*, Paris, 2004.
- [7] S. Kalogirou και Y. Tripanagnostopoulos, «Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production,» σε *Energy Conversion and Management*, 2006, p. 3368–3382.

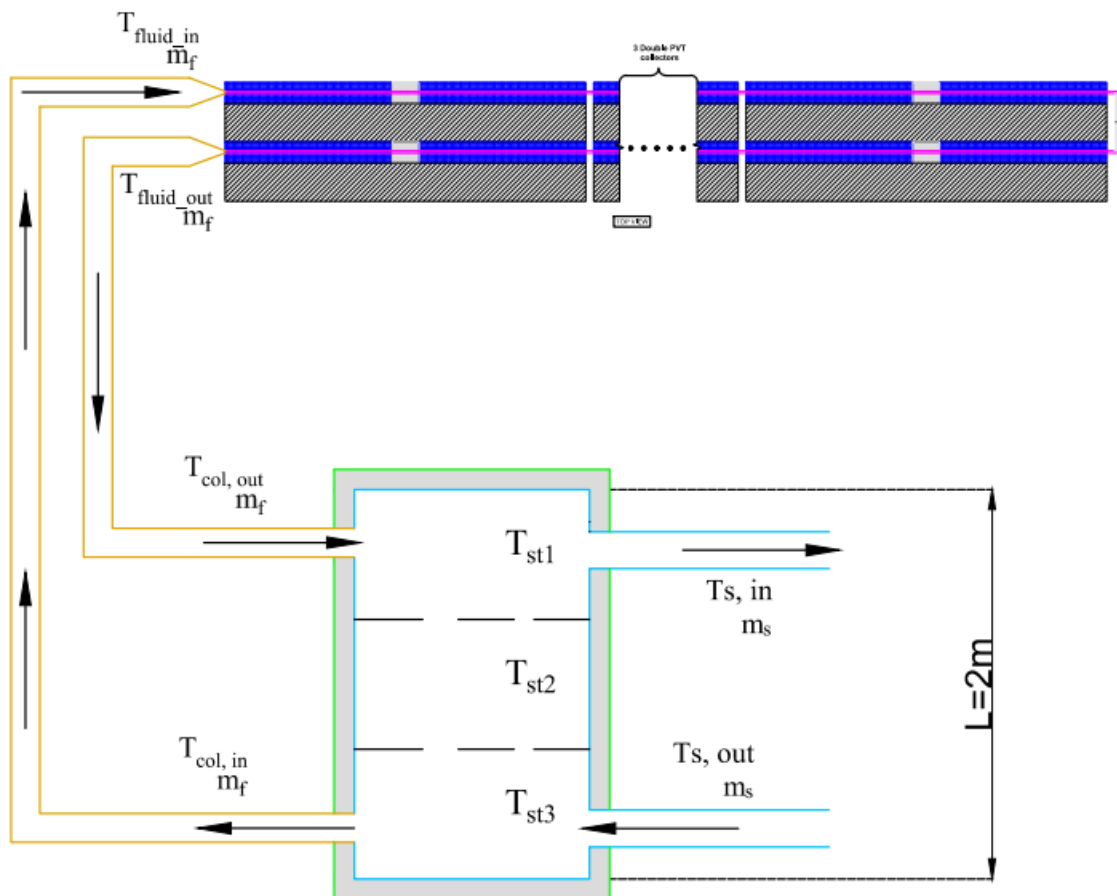


## Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση ενέργειας

Αφού μελετήθηκε η ηλιακή ακτινοβολία και το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας το οποίο μετατρέπεται από τους συλλέκτες σε θερμική, το επόμενο βήμα είναι να αναλυθεί η μέθοδος αποθήκευσης αυτής της ενέργειας. Για την αποθήκευση χρησιμοποιείται μία δεξαμενή νερού μονωμένη με πολυουρεθάνη.

### 3.1 Άμεση αποθήκευση

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ολόκληρο το σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, με άμεση αποθήκευση. Σε αυτό τον τρόπο αποθήκευσης το ρευστό το οποίο κυκλοφορεί στους συλλέκτες είναι το ίδιο με αυτό που κυκλοφορεί στο φορτίο και στη δεξαμενή. Οπότε, για αυτόν τον τρόπο αποθήκευσης το ρευστό στους συλλέκτες θα θεωρηθεί το νερό αντί για τη γλυκόλη.



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση αποθηκευτικού δοχείου για την άμεση αποθήκευση ενέργειας

Η έξοδος του ρευστού από τους συλλέκτες έχει θερμοκρασία  $T_{\text{fluid\_out}}$  και παροχή μάζας ίση με  $m_f$ . Στην πραγματικότητα οι απώλειες των σωληνώσεων καθιστούν τη θερμοκρασία εισόδου στη δεξαμενή ( $T_{\text{col\_out}}$ ) ελαφρώς χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εξόδου από τους συλλέκτες ( $T_{\text{fluid\_out}}$ ), ωστόσο στα πλαίσια της εργασίας οι απώλειες έχουν θεωρηθεί αμελητέες και οι θερμοκρασίες ίσες.

Στη δεξαμενή υποθέτουμε ότι σχηματίζονται τρία στρώματα ρευστού, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τη δική τους θερμοκρασία. Το πρώτο στρώμα επικοινωνεί με τους συλλέκτες λαμβάνοντας θερμότητα από αυτούς με ροή  $m_f$ , με το φορτίο παρέχοντας θερμότητα σε αυτό με ροή  $m_s$ , με το δεύτερο στρώμα με ροή ανταλλαγής  $m_s$  καθώς και με το περιβάλλον. Το δεύτερο στρώμα επικοινωνεί με το πρώτο με ροή  $m_f$ , με το τρίτο με ροή  $m_s$  και εκλύει και αυτό θερμότητα προς το περιβάλλον. Τέλος, το τρίτο στρώμα επικοινωνεί με το δεύτερο με ροή  $m_f$ , με το φορτίο με ροή  $m_s$  ενώ και αυτό εκλύει θερμότητα στο περιβάλλον.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η θερμοκρασία  $T_{st1}=T_{s,in}$  και  $T_{st3}=T_{col,in}$ . Για αυτό το λόγο δεν υπάρχουν όροι ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του εισερχόμενου ρεύματος προς το φορτίο και του πρώτου στρώματος της δεξαμενής, και του εισερχόμενου ρεύματος στους συλλέκτες και του τρίτου στρώματος της δεξαμενής.

Με τις παραπάνω παρατηρήσεις κατασκευάζεται το παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$M \cdot C_p \cdot \frac{dT_{st1}}{dt} = m_f \cdot C_p \cdot (T_{col,out} - T_{st1}) + m_s \cdot C_p \cdot (T_{st2} - T_{st1}) - U_L \cdot A_{st1} \cdot (T_{st1} - T_{amb}) \quad (3.1)$$

$$M \cdot C_p \cdot \frac{dT_{st2}}{dt} = m_f \cdot C_p \cdot (T_{st1} - T_{st2}) + m_s \cdot C_p \cdot (T_{st3} - T_{st2}) - U_L \cdot A_{st2} \cdot (T_{st2} - T_{amb}) \quad (3.2)$$

$$M \cdot C_p \cdot \frac{dT_{st3}}{dt} = m_f \cdot C_p \cdot (T_{st2} - T_{st3}) + m_s \cdot C_p \cdot (T_{s,out} - T_{st3}) - U_L \cdot A_{st3} \cdot (T_{st3} - T_{amb}) \quad (3.3)$$

Όπου,

$M$  = Η μάζα του εκάστοτε στρώματος, δεδομένου του κυλινδρικού σχήματος της δεξαμενής αυτή είναι ίση με  $\frac{\rho_{fluid} \cdot V}{3} = \frac{\rho_{fluid} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L}{3}$

$C_p$  = Η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού

$A_{sti}$  = Η επιφάνεια της δεξαμενής που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον για το στρώμα  $i$ .

Πιο συγκεκριμένα  $A_{st1} = A_{st3} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \frac{\pi \cdot D \cdot L}{3}$  και  $A_{st2} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{3}$

$U_L$  = Η θερμική αντίσταση της μόνωσης (10cm πολυουρεθάνης)

Η λογική με την οποία θα προσεγγιστεί η μοντελοποίηση του παραπάνω σχήματος είναι η εξής:

- Στην αρχή της ημέρας θα θεωρηθεί ότι  $T_{fluid,in}=T_{amb}$ .
- Με δεδομένα τα στοιχεία της ηλιοφάνειας και του  $T_{fluid,in}$  θα υπολογιστεί το  $T_{fluid,out}$ .

- Ως  $T_{s,out}$  θα χρησιμοποιηθεί η θερμοκρασία του νερού παροχής σύμφωνα με το TOTEE.
- Με αυτά τα δεδομένα θα λυθεί το σύστημα διαφορικών μέσω της ode45 του Matlab, με βήμα δευτερολέπτου και για τη διάρκεια μίας ώρας.
- Με το πέρας της διαδικασίας και τον καθορισμό των τελικών τιμών  $T_{st1}$ ,  $T_{st2}$  και  $T_{st3}$ , η  $T_{s3}$  θα γίνει η  $T_{fluid,in}$  της επόμενης ώρας.

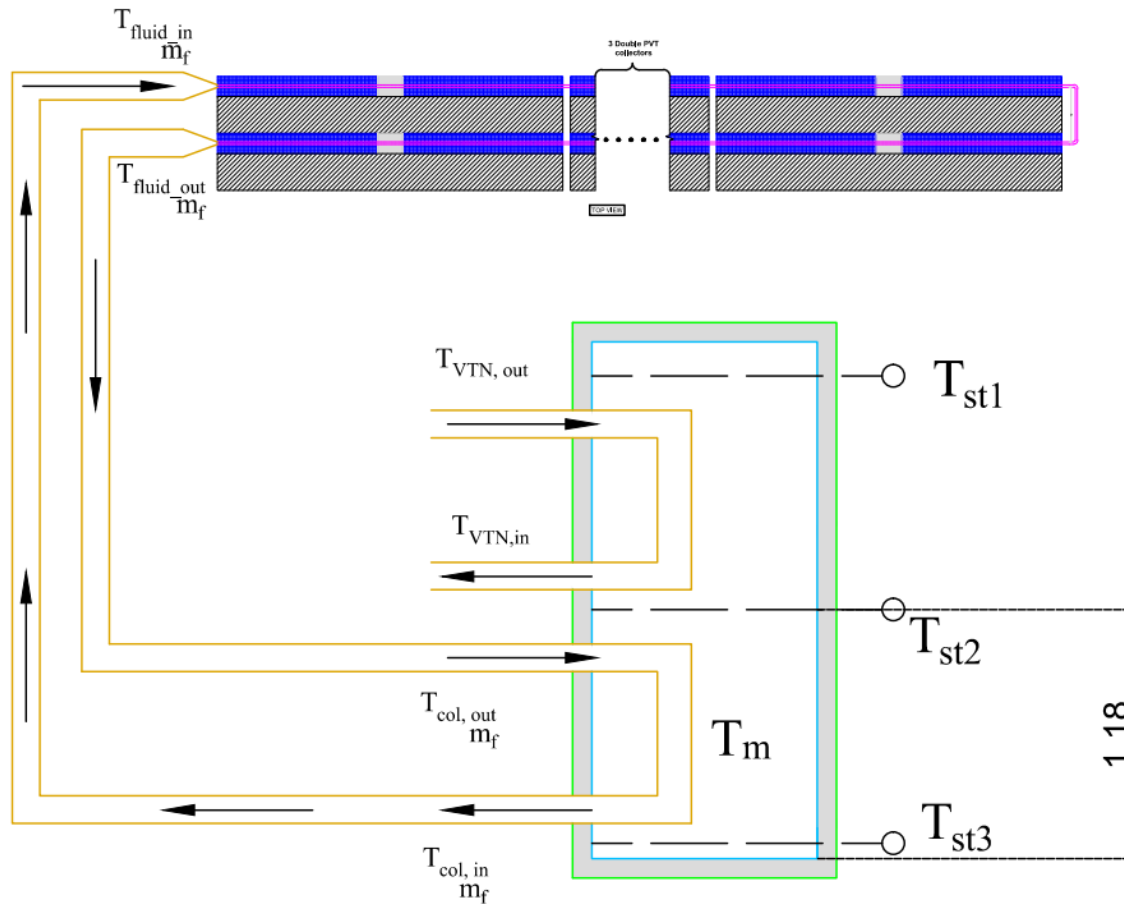
Τέλος, θα μελετηθούν τα εξής σενάρια ως προς την κατανάλωση ( $m_s$ ) και της παροχής των συλλεκτών ( $m_f$ ):

1.  $m_s$  σταθερή,  $m_f$  σταθερή και μηδενίζεται όταν  $\frac{dT_{st1}}{dt} < 0$
2.  $m_s = 0$ ,  $m_f$  σταθερή και μηδενίζεται όταν  $\frac{dT_{st1}}{dt} < 0$
3.  $m_s$  μεταβαλλόμενη ώστε να προσομοιάζει πραγματικές καμπύλες ζήτησης,  $m_f$  σταθερή
4.  $m_s$  μεταβαλλόμενη ώστε να προσομοιάζει πραγματικές καμπύλες ζήτησης,  $m_f$  σταθερή και μηδενίζεται όταν  $\frac{dT_{st1}}{dt} < 0$

Κατά τη μελέτη αυτών των σεναρίων, θεωρείται ότι ο καταναλωτής απαιτεί ZNX θερμοκρασίας 50°C. Εάν το σύστημα των συλλεκτών δεν μπορεί να το τροφοδοτήσει, τότε οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται από ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης. Για τα σενάρια 1 έως 3 θα παρουσιασθούν συνοπτικά με ενδεικτικές γραφικές παραστάσεις των θερμοκρασιών και της ενέργειας, ενώ η πιο λεπτομερής μελέτη θα αφορά το σενάριο 4.

### 3.2 Έμμεση αποθήκευση

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ολόκληρο το σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, με έμμεση αποθήκευση. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει φορτίο και ότι το πρώτο στρώμα της δεξαμενής θερμαίνεται από αντλίες κενού. Αυτή η ιδιομορφία οφείλεται στο γεγονός ότι αυτή είναι η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου, οπότε για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα του μοντέλου με την πραγματικότητα, πρέπει να απευθύνονται σε αντίστοιχες διατάξεις.



**Εικόνα 3.2: Απεικόνιση αποθηκευτικού δοχείου για την έμμεση αποθήκευση ενέργειας**

Στην έμμεση αποθήκευση θερμότητας, το ρευστό των συλλεκτών αποσυμπλέκεται από το ρευστό της αποθήκευσης. Στη δεδομένη πειραματική διάταξη, το ρευστό των συλλεκτών είναι γλυκόλη ενώ το ρευστό αποθήκευσης είναι νερό. Η εναλλαγή θερμότητας μέσω του εναλλάκτη εκφράζεται με το λογαριθμικό μέσο διαφοράς θερμοκρασίας (LMTD). Δεδομένου ότι δεν υφίσταται στρωματοποίηση εντός του πεδίου εναλλαγής, και ότι υπάρχει ελάχιστη ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του συστήματος των συλλεκτών και των αντλιών κενού, οι θερμοκρασίες  $T_{st2}$  και  $T_{st3}$  αντικαθίστανται από τη μέση θερμοκρασία  $T_m$ . Συνυπολογίζοντας πάντα και τις απώλειες της επιφάνειας με το περιβάλλον, η διαφορική εξίσωση που χαρακτηρίζει το σύστημα είναι η εξής:

$$M \cdot C_p \frac{dT_m(t)}{dt} = U \cdot A_{HEX} \frac{T_{col\_out} - T_{col\_in}}{\ln \left[ \frac{T_{col\_out} - T_m(t)}{T_{col\_in} - T_m(t)} \right]} - U_L \cdot A_m \cdot (T_m(t) - T_{amb}) \quad (3.4)$$

Όπου,

M = Η μάζα του στρώματος, δεδομένου του κυλινδρικού σχήματος της δεξαμενής αυτή

είναι ίση με 
$$\frac{\rho_{fluid} \cdot V}{3} = \frac{\rho_{fluid} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L}{3}$$

C<sub>p</sub> = Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού

A<sub>HEX</sub> = Η επιφάνεια του εναλλάκτη

A<sub>m</sub> = Η εξωτερική επιφάνεια του δοχείου (μόνο τα τοιχώματα που αφορούν τους συλλέκτες)

U<sub>L</sub> = Η θερμική αντίσταση της μόνωσης (10cm πολυουρεθάνης)

U = Η θερμική αντίσταση του εναλλάκτη (10cm πολυουρεθάνης)

## Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση με MATLAB της Ηλιακής Ακτινοβολίας και των Συλλεκτών

### 4.1 Παράμετροι του μοντέλου

**Παράμετροι τοποθεσίας και γεωμετρίας της διάταξης:** Ως τοποθεσία του πειράματος έχει καθοριστεί το Ελληνικό (Αθήνα). Παρότι η πραγματική τοποθεσία είναι στην Πολυτεχνειούπολη στη Ζωγράφου, για τις ανάγκες του μοντέλου προτιμήθηκε το Ελληνικό διότι για αυτή την τοποθεσία υπάρχουν περισσότερα ιστορικά μετεωρολογικά στοιχεία στη βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο. Η διάταξη έχει κλίση  $30^\circ$  ενώ το αζιμούθιο της διάταξης είναι 0, δηλαδή είναι προσανατολισμένη προς το νοτιά.

**Πίνακας 4.1: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για την τοποθεσία και τις γεωμετρικές παραμέτρους της διάταξης**

Συμβολισμός βιβλιογραφίας	Συμβολισμός στον κώδικα	Περιγραφή	Τιμή
$L_{st}$	Lst	Γεωγραφικό μήκος για την τοπική ώρα	33,00 [°]
$L_{loc}$	Lloc	γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή	23,75 [°]
$\varphi$	phi	Γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή	37,90[°]
-	west	Μεταβλητή η οποία είναι ίση με 1 για δυτικά γεωγραφικά μήκη και 0 για ανατολικά.	0
$\beta$	beta	Κλίση του επιπέδου της φωτοβολταϊκής διάταξης	30,00 [°]
$\gamma$	gamma	Αζιμούθιο του επιπέδου της φωτοβολταϊκής διάταξης	0,00 [°]
$G_{sc}$	Gsc	Ηλιακή σταθερά	1361 [W/m <sup>2</sup> ]

Οι αρχικοποιήσεις του Πίνακα 4.1 υλοποιούνται στο αρχείο **location.m**. Το αρχείο αυτό το καλούν όλες οι άλλες συναρτήσεις οι οποίες χρειάζονται γεωγραφικά και γεωμετρικά δεδομένα για να κάνουν υπολογισμούς. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο μπορεί με ευκολία να τροποποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε άλλη τοποθεσία και διάταξη με απλή αλλαγή αυτών των παραμέτρων.

Η δεύτερη τοποθεσία που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να γίνει η σύγκριση της απόδοσης είναι το Μοατ στο Ηνωμένο Βασίλειο, για το οποίο διαφέρει ως προς τα στοιχεία των παρακάτω δύο πινάκων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι δεδομένα για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και το συντελεστή αιθριότητας για το Μοατ έχουν χρησιμοποιηθεί από την βάση δεδομένων Meteororm 8.1. Η ίδια βάση δεδομένων έχει αξιοποιηθεί και για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στο Ελληνικό.

**Πίνακας 4.2: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για την τοποθεσία και τις γεωμετρικές παραμέτρους της υποθετικής διάταξης στο Moat**

Συμβολισμός βιβλιογραφίας	Συμβολισμός στον κώδικα	Περιγραφή	Τιμή
$L_{st}$	Lst	Γεωγραφικό μήκος για την τοπική ώρα	0 [°]
$L_{loc}$	Lloc	γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή	1 [°]
$\varphi$	phi	Γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή	53,35[°]
-	west	Μεταβλητή η οποία είναι ίση με 1 για δυτικά γεωγραφικά μήκη και 0 για ανατολικά.	1

**Πίνακας 4.3: Συντελεστής αιθριότητας για το Moat από τη βάση δεδομένων Meteonorm**

Μήνας	Συντελεστής Kt
<b>Ιανουάριος</b>	0.318
<b>Φεβρουάριος</b>	0.297
<b>Μάρτιος</b>	0.397
<b>Απρίλιος</b>	0.469
<b>Μάιος</b>	0.435
<b>Ιούνιος</b>	0.424
<b>Ιούλιος</b>	0.419
<b>Αύγουστος</b>	0.374
<b>Σεπτέμβριος</b>	0.441
<b>Οκτώβριος</b>	0.361
<b>Νοέμβριος</b>	0.362
<b>Δεκέμβριος</b>	0.365

**Παράμετροι Συλλέκτη:** Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, οι κατοπτρικοί συγκεντρωτές χαρακτηρίζονται από τον λόγο συγκέντρωσης C, τον μέσο αριθμό ανακλάσεων N καθώς και τις οπτικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται. Τα χαρακτηριστικά για τον συλλέκτη της Solarus που χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη της διπλωματικής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 4.4: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για το Συγκεντρωτή**

Συμβολισμός βιβλιογραφίας	Συμβολισμός στον κώδικα	Περιγραφή	Τιμή
C	C	Λόγος Συγκέντρωσης	1,5
N	N	Μέσος αριθμός ανακλάσεων	0,25
$\rho_{Al}$	r_al	Ανακλαστικότητα Αλουμινίου	0,91
$n_{air}$	$n_1$	Συντελεστής διάθλασης αέρα στους 0°C και σε ατμοσφαιρική πίεση	1,000277
$n_{glass}$	$n_2$	Συντελεστής διάθλασης γυαλιού	1,5
F'	F_tone	Θερμική απόδοση συλλέκτη	0,96
$\beta_p$	beta_ro	Θερμικός συντελεστής PV	-0,39 [%/°C]
V	V	Παροχή μάζας γλυκόλης/ρευστού	285 [lt/h]
$n_{ref}$	nel_ref	Ηλεκτρική απόδοση PV	0,186
$C_p$	Cp	Ειδική θερμοχωρητικότητα γλυκόλης	3195 [J/Kg/K]
$C_{pw}$	Cpw	Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού	4187,81 [J/Kg/K]
d	d	πυκνότητα γλυκόλης	1026 [kg/m <sup>3</sup> ]
$A_{PV}$	A_PV	Φωτοβολταϊκή επιφάνεια	0,31672 [m <sup>2</sup> ]

$A_{open}$	$A_{open}$	Επιφάνεια ανοίγματος για τον ανακλαστήρα	0,6686 [m <sup>2</sup> ]
------------	------------	--	--------------------------

Οι αρχικοποιήσεις του υλοποιούνται στο αρχείο **Solarus\_PVT.m**.

## 4.2 Υπολογισμός προσπίπτουσας και απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας στους συλλέκτες

Ο υπολογισμός της προσπίπτουσας και απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας στους συλλέκτες είναι το πρώτο βήμα, για τον υπολογισμό της θερμικής ενέργειας η οποία συλλέγεται. Στις επόμενες σελίδες θα αναλυθεί ο κώδικας ο οποίος υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους.

### 4.2.1 Ιεραρχία συναρτήσεων

Ο τρόπος προγραμματισμού που έχει χρησιμοποιηθεί χαρακτηρίζεται αρθρωτός (modular). Το πλεονέκτημα μίας τέτοιας υλοποίησης είναι ότι επιτρέπει την γρήγορο εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων, την ευκολία στη διόρθωσή τους και το αποτέλεσμα είναι ένας κώδικας ευανάγνωστος και ευνόητος. Ωστόσο, η ιεράρχηση των εκάστοτε συναρτήσεων, η σειρά εκτέλεσής τους και η λειτουργία τους, δεν είναι πάντα προφανή σε έναν τρίτο παρατηρητή (που πιθανότητα θα κληθεί να επεκτείνει η να τροποποιήσει τον ήδη υπάρχοντα κώδικα). Για αυτό απαιτούνται σαφή διαγράμματα ροής της πληροφορίας που παρέχουν εποπτεία των επιμέρους συναρτήσεων.

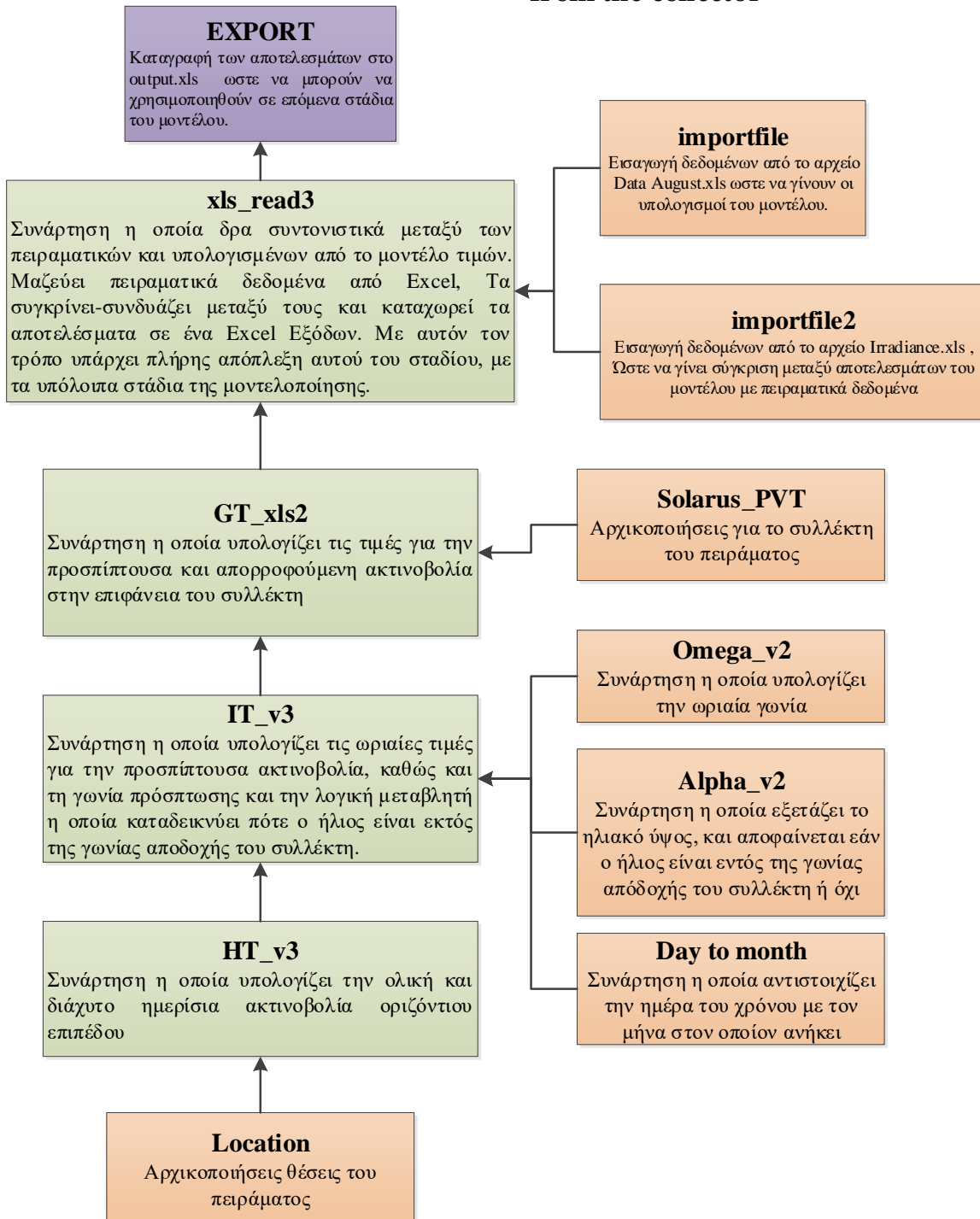
Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η ομάδα συναρτήσεων, η οποία είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό της απορροφούμενης ακτινοβολίας από τους συλλέκτες της διάταξης. Η χρονική βάση στην οποία γίνονται οι υπολογισμοί είναι η μία ώρα. Οπότε, τα πειραματικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στο κεφάλαιο των Αποτελεσμάτων πρέπει να αναχθούν στην ίδια χρονική βάση.

Αρχικά υπολογίζεται η ημερήσια ακτινοβολία με τη χρήση του μοντέλου των Collares-Pereira (HT\_v3), στη συνέχεια αυτή η ακτινοβολία διανέμεται στο διάστημα των ωρών μίας ημέρας και για το επίπεδο κλήσης της διάταξης (IT\_v3). Το σύνολο της ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια των συλλεκτών είναι συνάρτηση τόσο της επιφάνειας του συλλέκτη αλλά και των οπτικών ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία αποτελείται. Η παραπάνω διεργασία υλοποιείται με τη συνάρτηση GT\_xls2. Τέλος, στην κορυφή της αλυσίδας βρίσκεται η συνάρτηση xls\_read3, η οποία διαβάζει πειραματικά δεδομένα, καλεί τις κατάλληλες συναρτήσεις και εξάγει τα αποτελέσματα του μοντέλου. Εάν απαιτείται μπορεί να δεχθεί και πειραματικά δεδομένα και να τα συγκρίνει. Στην περίπτωση που δεν απαιτείται σύγκριση με πειραματικά δεδομένα, η συνάρτηση η οποία απλά γράφει τα υπολογιζόμενα μεγέθη του μοντέλου σε ένα φύλλο excel είναι η xls\_read\_write\_only\_irradiance\_data και θα χρησιμοποιείται στη θέση της xls\_read3.

Τέλος, υπάρχουν και μικρότερες επικουρικές διαδικασίες οι οποίες επιτελούν απλές αλλά επαναλαμβανόμενες εργασίες.



## Calculation of absorbed Irradiance from the collector



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα συναρτήσεων για τον υπολογισμό της απορροφούμενης ακτινοβολίας

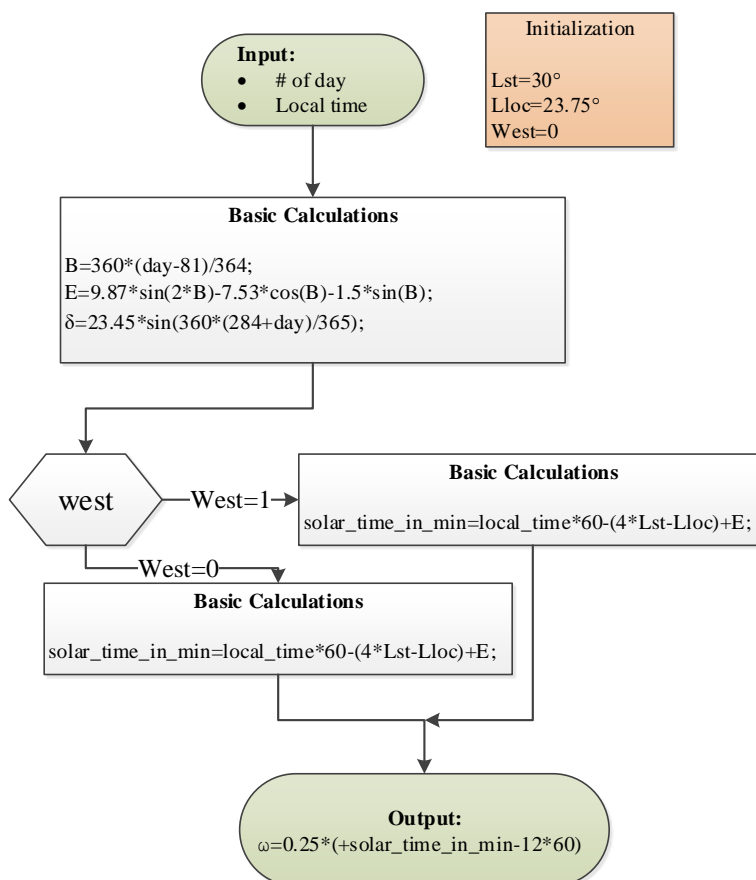
## 4.2.2 Επεξήγηση συναρτήσεων

**Συνάρτηση ωριαίας γωνίας:** Συνάρτηση η οποία δέχεται ως είσοδο τον αύξων αριθμό της εκάστοτε ημέρας (1η Ιανουαρίου = 1) και την τοπική ώρα σε δεκαδική μορφή (11:45 = 11,75) και επιστρέφει την ωριαία γωνία σε μοίρες.

**Πίνακας 4.5: Ταυτότητα συνάρτησης omega\_v2**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
omega_v2
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
location
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από την IT_v3
<b>Είσοδος</b>
Αύξων αριθμός ημέρας
Τοπική ώρα σε δεκαδική μορφή
<b>Έξοδος</b>
Ωριαία γωνία ( $\omega$ )

### Hour angle (omega\_v2)



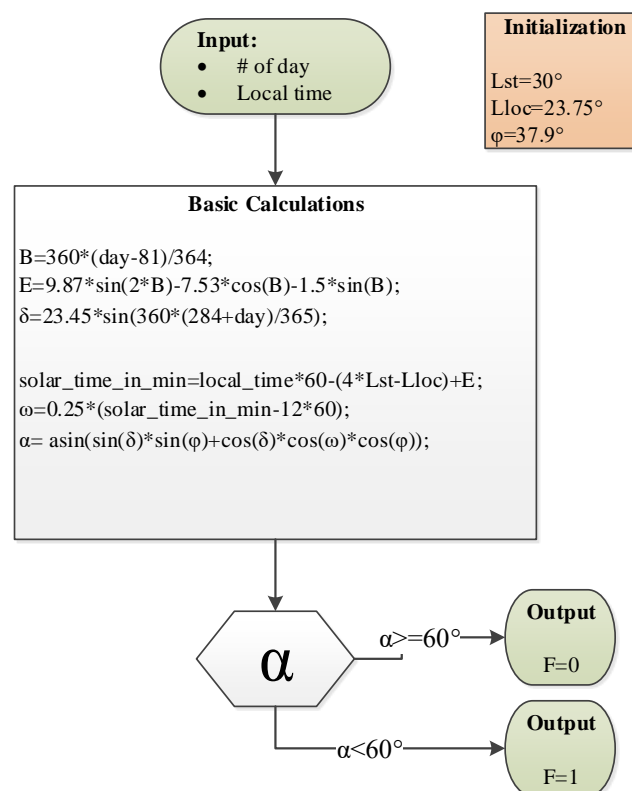
**Εικόνα 4.2: Διάγραμμα συνάρτησης omega\_v2**

**Συνάρτηση γωνίας αποδοχής συλλέκτη:** Η συνάρτηση αυτή δέχεται τα ίδια ορίσματα με την προηγούμενη και υπολογίζει το ηλιακό ύψος για τη δεδομένη ώρα. Εάν το ηλιακό ύψος είναι εντός της γωνίας αποδοχής του συλλέκτη δίνει ως έξοδο 1, ενώ στην αντίθετη περίπτωση 0. Αυτή η μεταβλητή χρησιμοποιείται από συναρτήσεις ανώτερη ιεραρχίας για να μηδενίσουν την ακτινοβολία στην οπίσθια επιφάνεια του συλλέκτη όταν χρειάζεται.

**Πίνακας 4.6 Ταυτότητα συνάρτησης alpha\_v2**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
alpha_v2
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
location
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από την IT_v3
<b>Είσοδος</b>
Αύξων αριθμός ημέρας
Τοπική ώρα σε δεκαδική μορφή
<b>Έξοδος</b>
Boolean μεταβλητή η οποία καταδεικνύει πότε ο ήλιος είναι εντός της γωνίας αποδοχής του συλλέκτη (F)

**Collector rejection angle (alpha\_v2)**



**Εικόνα 4.3: Διάγραμμα συνάρτησης alpha\_v2**

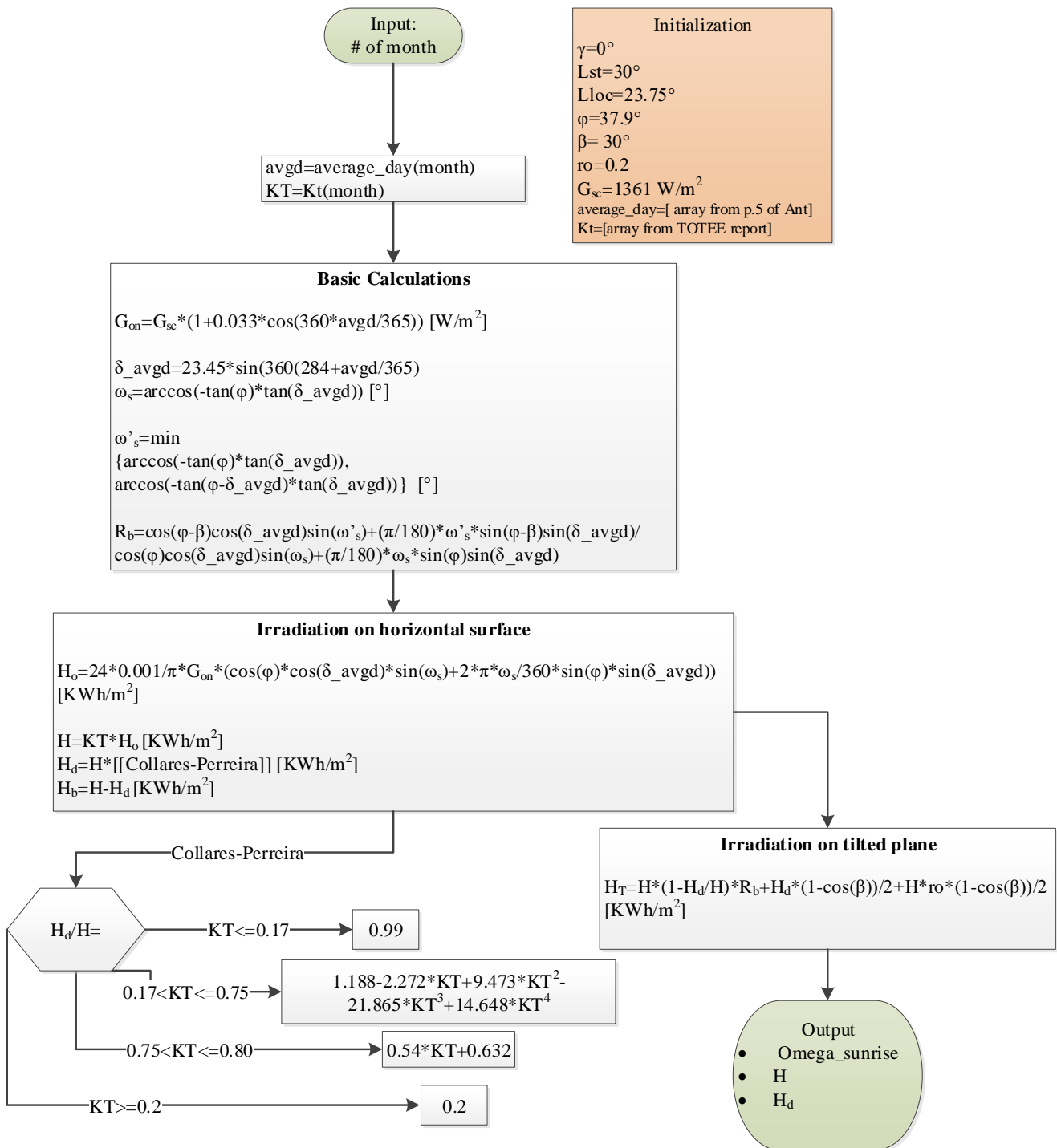
**Συνάρτηση υπολογισμού ημερήσιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας (HT\_v3):** Σκοπός αυτής της συνάρτησης είναι να υπολογίσει την προσπίπτουσα ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου για τη μέση ημέρα του μήνα. Στις επόμενες συναρτήσεις χρειάζεται μόνο η ολική και η διάχυτος ακτινοβολία. Για λόγους πληρότητας υπολογίζονται και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη της ημέρας όπως η άμεσος ακτινοβολία και η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, ωστόσο δεν είναι κρίσιμες για το υπόλοιπο μοντέλο. Συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές που απαιτούνται για την εξίσωση καθώς και οι εξαρτήσεις από άλλες συναρτήσεις. Με λευκό υπόβαθρο, οι μεταβλητές που δεν είναι κρίσιμες για την ορθή εκτέλεση του προγράμματος

**Πίνακας 4.7: Ταυτότητα συνάρτησης HT\_v3**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
HT_v3
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
location
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από την IT_v3
<b>Είσοδος</b>
Αύξων αριθμός μήνα
<b>Έξοδος</b>
Ολική ακτινοβολία ημέρας για οριζόντιο επίπεδο (H)
Διάχυτος ακτινοβολία ημέρας (Hd)
Ωριαία γωνία δύσης ( $\omega_s$ )
Άμεσος ακτινοβολία ημέρας (Hb)
Ολική ακτινοβολία ημέρας σε κεκλιμένο επίπεδο (HT)

Η ολική ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου προκύπτει από τους τύπους του κεφαλαίου 2 για τη χαρακτηριστική ημέρα του εκάστοτε μήνα. Στη συνέχεια με τις τιμές του  $K_t$  και με το μοντέλο των Collares-Pereira υπολογίζεται η διάχυτος ακτινοβολία για την εν λόγω μέρα. Η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου υπολογίζεται και αυτή και η χρησιμότητά της θα γίνει προφανής στην επόμενη συνάρτηση. Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται το διάγραμμα ροής.

## Daily irradiation for average day of month (HT\_v3)



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα συνάρτησης HT\_v3

**Συνάρτηση υπολογισμού ωριαίας προσπίπτουσας ακτινοβολίας (IT\_v3):** Η συνάρτηση IT\_v3 χρησιμοποιεί τα δεδομένα της ημερήσιας ακτινοβολίας και τα κατανέμει στη διάρκεια της ημέρας σύμφωνα με το μοντέλο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.

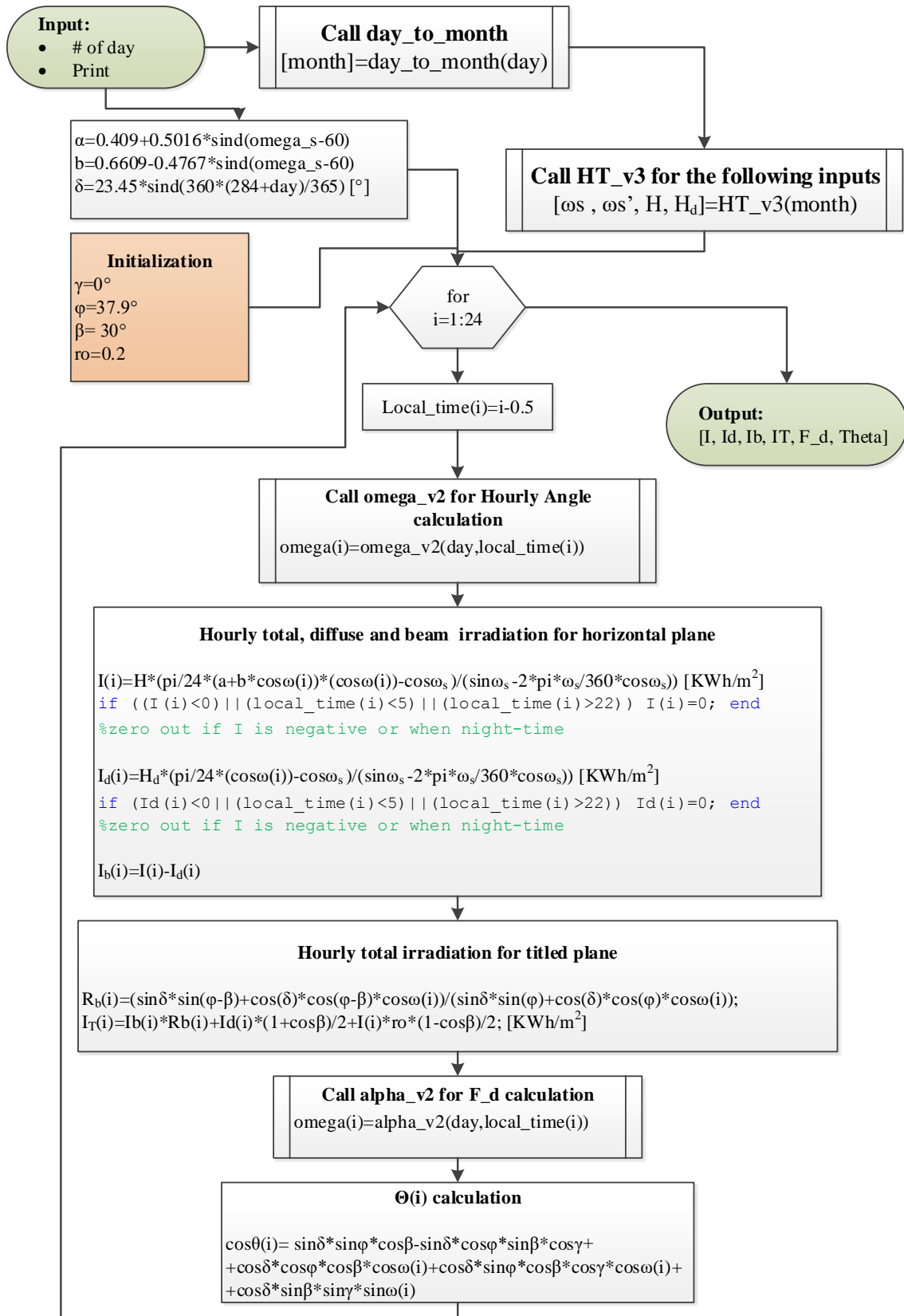
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μεγέθη υπολογίζονται στο μέσο της εκάστοτε ώρας, και γίνεται η υπόθεση ότι η υπολογιζόμενη ακτινοβολία υφίσταται κατά τη διάρκεια της ώρας που έχει ως χρονικό μέσο τη στιγμή για την οποία γίνεται ο υπολογισμός. Για παράδειγμα, όταν τοποθετούμε στις εξισώσεις την τιμή 11.5 τα εξαγόμενα μεγέθη ακτινοβολίας θεωρείται ότι αφορούν την διάρκεια 11:00 έως 12:00. Επίσης, η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου είναι απαραίτητη για να απαγορεύσει στη συνάρτηση να δίνει τιμές ακτινοβολίας για ώρες στις οποίες ο ήλιος δεν βρίσκεται στον ουράνιο θόλο.

**Πίνακας 4.8: Ταυτότητα συνάρτησης IT\_v3**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
IT_v3
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
HT_v3
omega_v2
alpha_v2
day_to_month
importfile3*
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από την GT_xls2
<b>Είσοδος</b>
Αύξων αριθμός ημέρας
Επιλογή εκτύπωσης ή όχι αποτελεσμάτων
<b>Έξοδος</b>
Ολική ωριαία ακτινοβολία για οριζόντιο επίπεδο (I)
Διάχυτος ωριαία ακτινοβολία για οριζόντιο επίπεδο (Id)
Άμεσος ωριαία ακτινοβολία για οριζόντιο επίπεδο (Ib)
Ολική ωριαία ακτινοβολία για κεκλιμένο επίπεδο (I)
Ηλιος πίσω από τον ορίζοντα θέασης τους κατόπτρου (F_d)
Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας (theta)

Στον παραπάνω πίνακα στη συνάρτηση importfile3 έχει τοποθετηθεί αστερίσκος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτή η συνάρτηση χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση στην οποία θέλουμε να «εξαναγκάσουμε» το μοντέλο να διαχειριστεί πραγματικά δεδομένα ηλιοφάνειας. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η αρθρωτή μορφή του κώδικα μας δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε πραγματικά δεδομένα σε διάφορα μέρη του μοντέλου, ώστε να εξετάζουμε και να αξιολογούμε ξεχωριστά την κάθε βαθμίδα του μοντέλου. Σε κανονικές συνθήκες το αντίστοιχο εδάφιο είναι ανενεργό.

## Hourly irradiation for a day (IT\_v3)



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα συνάρτησης IT\_v3

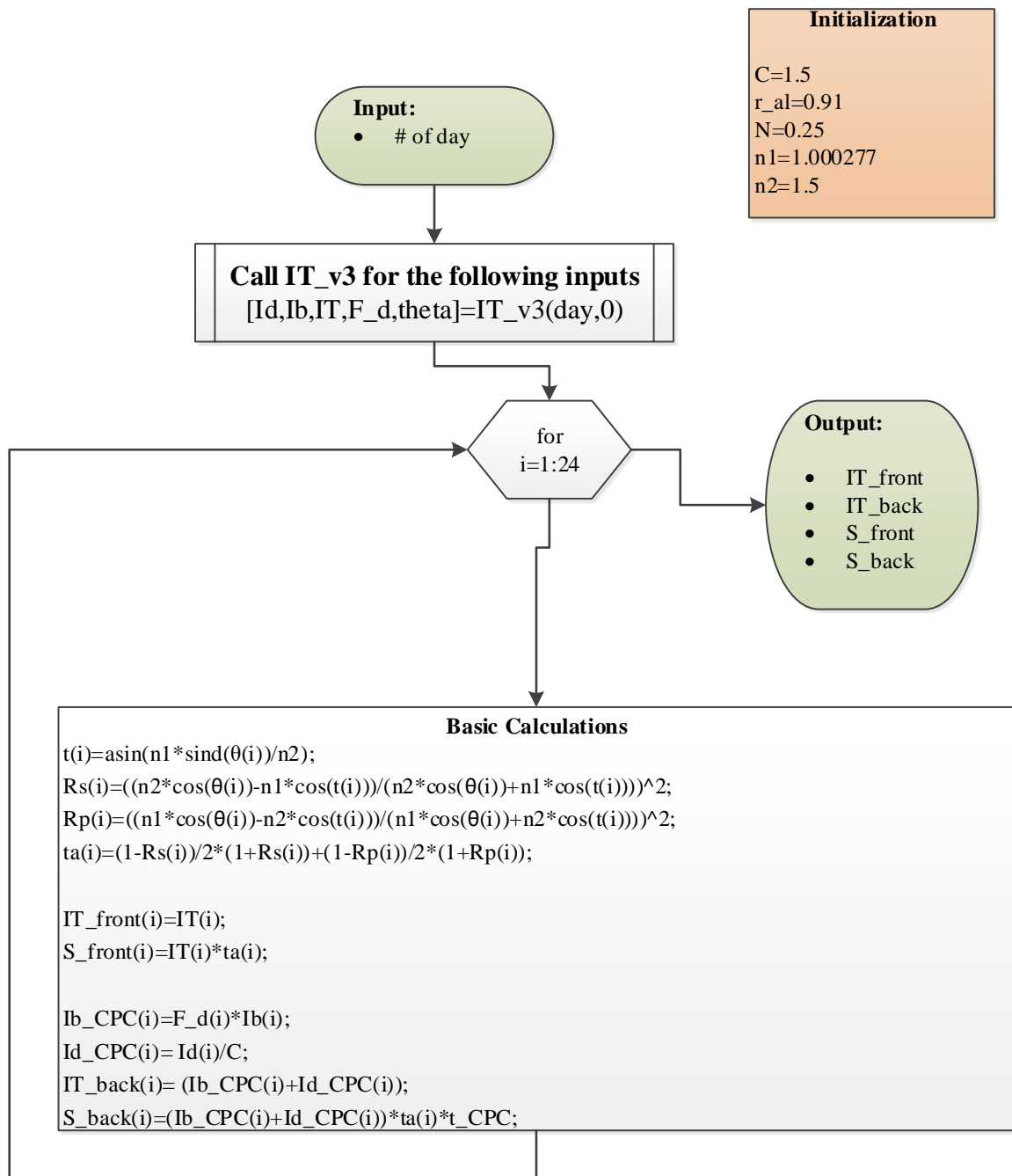
**Συνάρτηση υπολογισμού προσπίπτουσας και απορροφούμενης ακτινοβολίας (GT\_xls2):** Η συνάρτηση GT\_xls2 υπολογίζει την απορροφούμενη και προσπίπτουσα ακτινοβολία στο συλλέκτη για τη δεδομένη ώρα. Λειτουργικά είναι παρόμοια συνάρτηση με την IT\_v3 (ο δείκτης i και στις δύο περιπτώσεις αφορά την ίδια χρονική στιγμή). Ο διαχωρισμός σε δύο εξισώσεις έχει γίνει μόνο για λόγους χρηστικότητας.

**Πίνακας 4.9: Ταυτότητα συνάρτησης GT\_xls2**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
GT_xls2
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
solarus_PVT
location
day_to_month
IT_v3
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από την xls_read3
<b>Είσοδος</b>
Αύξων αριθμός ημέρας
<b>Έξοδος</b>
Προσπίπτουσα ωριαία ακτινοβολία μπροστά (IT_front)
Προσπίπτουσα ωριαία ακτινοβολία πίσω (IT_back)
Απορροφούμενη ωριαία ακτινοβολία μπροστά (S_front)
Απορροφούμενη ωριαία ακτινοβολία πίσω (S_back)



## Calculation of incident and absorbed irradiance (GT\_xls2)



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα συνάρτησης GT\_xls2

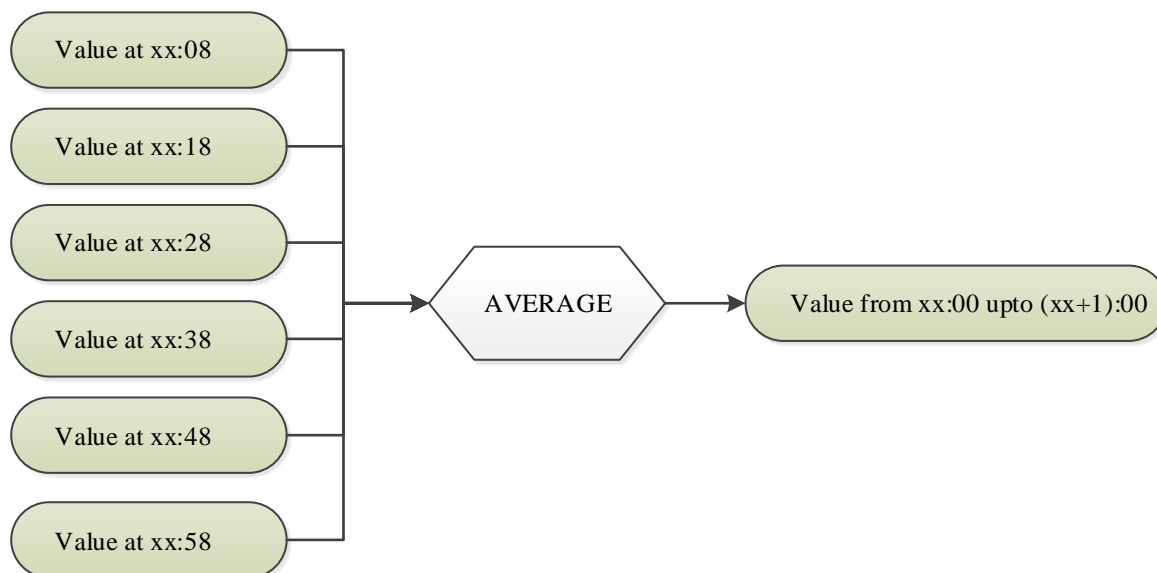
**Συνάρτηση συλλογής και καταγραφής δεδομένων (xls\_read3):** Η συνάρτηση αυτή είναι ανώτερη στην ιεραρχία του μέρους αυτού. Καλεί τις συναρτήσεις που υπολογίζουν την προσπίπτουσα και

απορροφούμενη ακτινοβολία στους συλλέκτες και καταγράφει τα αποτελέσματα στο excel εξόδου (output.xls), ώστε τα ίδια δεδομένα να είναι διαθέσιμα σε επόμενες συναρτήσεις.

**Πίνακας 4.10: Ταυτότητα συνάρτησης xls\_read3**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
xls_read3
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
importfile
importfile2
GT_xls2
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από το χρήστη
<b>Είσοδος</b>
Τα δεδομένα εισάγονται από excel
<b>Έξοδος</b>
Τα δεδομένα εξάγονται σε excel

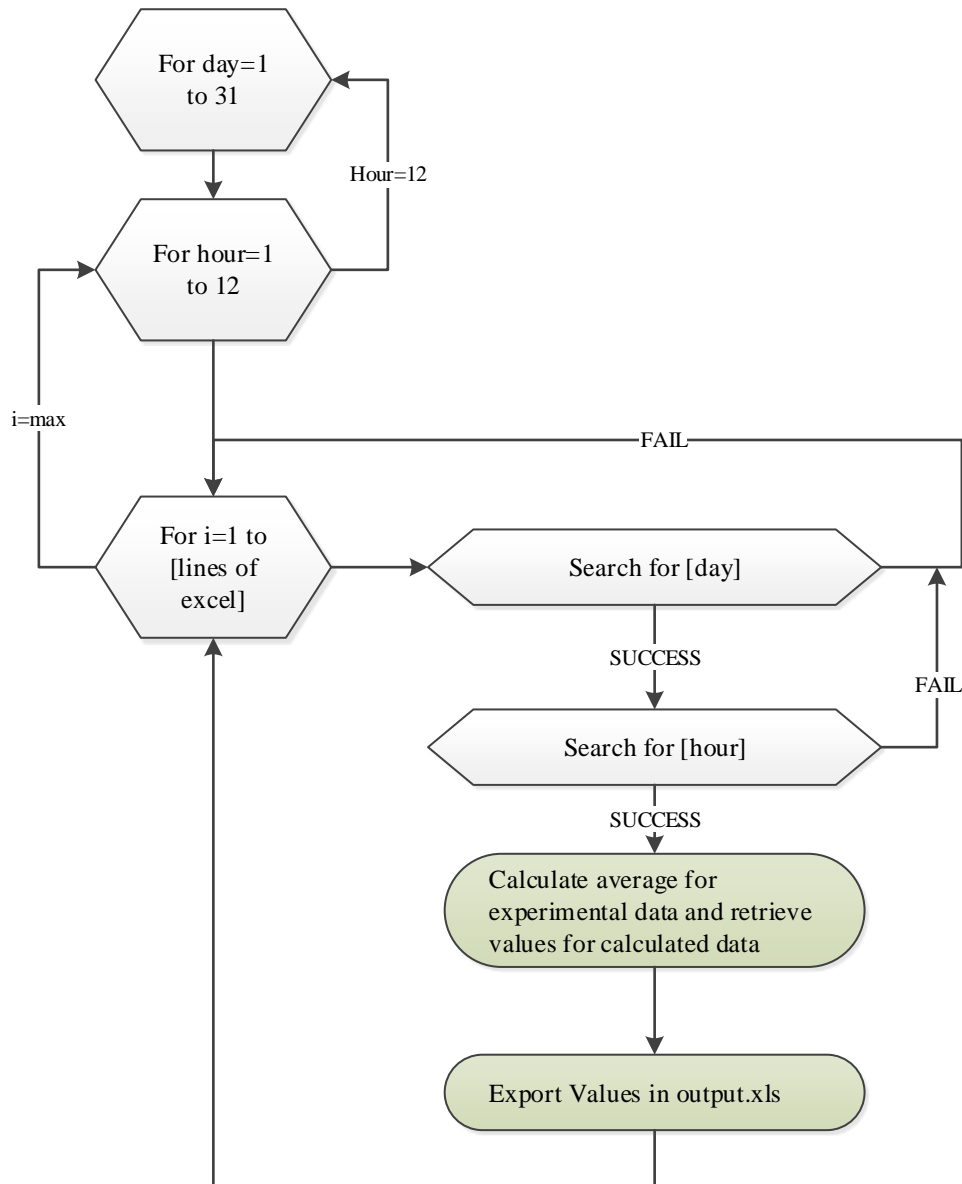
Η βασική λειτουργία της συνάρτησης είναι να συγχρονίσει τα δεδομένα που υπολογίζονται μέσω των μοντέλων που περιγράψαμε στα προηγούμενα μέρη με τα πειραματικά δεδομένα. Στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τα μεγέθη αυτά. Τα μετρητικά της πειραματικής διάταξης λαμβάνουν τιμές ανά 10 λεπτά. Ωστόσο, το μοντέλο που έχουμε επιλέξει παράγει τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία σε διάστημα μίας ώρας. Οπότε, υπολογίζοντας τη μέση τιμή των έξι μετρήσεων οι οποίες περιέχονται στην αντίστοιχη χρονική διάρκεια μπορεί να γίνει πλήρης αντιστοίχιση των πραγματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα των υπολογισμών.



**Εικόνα 4.7: Αντιστοίχιση πειραματικών δεδομένων με τιμές του μοντέλου**

Σημαντική εντολή της εν λόγω συνάρτησης είναι η **strfind(string, pattern)**, ή οποία δέχεται ως ορίσματα δύο συμβολοσειρές (string) και επιστημαίνει τη θέση εμφάνισης ενός μοτίβου (pattern) στο προς εξέταση string. Εάν δε βρει ομοιότητα επιστρέφει 0. Για να εντοπίσουμε λοιπόν την ημερομηνία και ώρα που μας ενδιαφέρει για να συλλέξουμε δεδομένα, το πρόγραμμα σαρώνει όλες τις γραμμές

ημερομηνίας των διαθέσιμων δεδομένων, και μόλις βρει τη σωστή ημέρα και ώρα εισέρχεται στο κυρίως μέρος του προγράμματος, εκτελεί τους απαιτούμενους υπολογισμούς και καταχωρεί όλα τα δεδομένα σε έναν πίνακα. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας (όταν δηλαδή έχει εξεταστεί και η τελευταία ημέρα της περιόδου που έχει επιλεγεί) οι τιμές μεταφέρονται από τον πίνακα στο excel εξόδου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να περιορίζεται ο αριθμός πρόσβασης στο excel καθώς κάθε πρόσβαση συνοδεύεται από μεγάλη καθυστέρηση στην εξέλιξη του προγράμματος.



**Εικόνα 4.8: Διάγραμμα σάρωσης πειραματικών δεδομένων και αντιστοίχιση με τα υπολογιζόμενα δεδομένα από το μοντέλο**

Στη συνέχεια οι επόμενες συναρτήσεις αξιοποιούν αυτά τα δεδομένα απευθείας από το αρχείο output.xls. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση που δεν απαιτείται σύγκριση με πειραματικά δεδομένα, η συνάρτηση η οποία απλά γράφει τα υπολογιζόμενα μεγέθη του μοντέλου σε ένα φύλλο excel είναι η xls\_read\_write\_only\_irradiance\_data και θα χρησιμοποιείται στη θέση της xls\_read3.

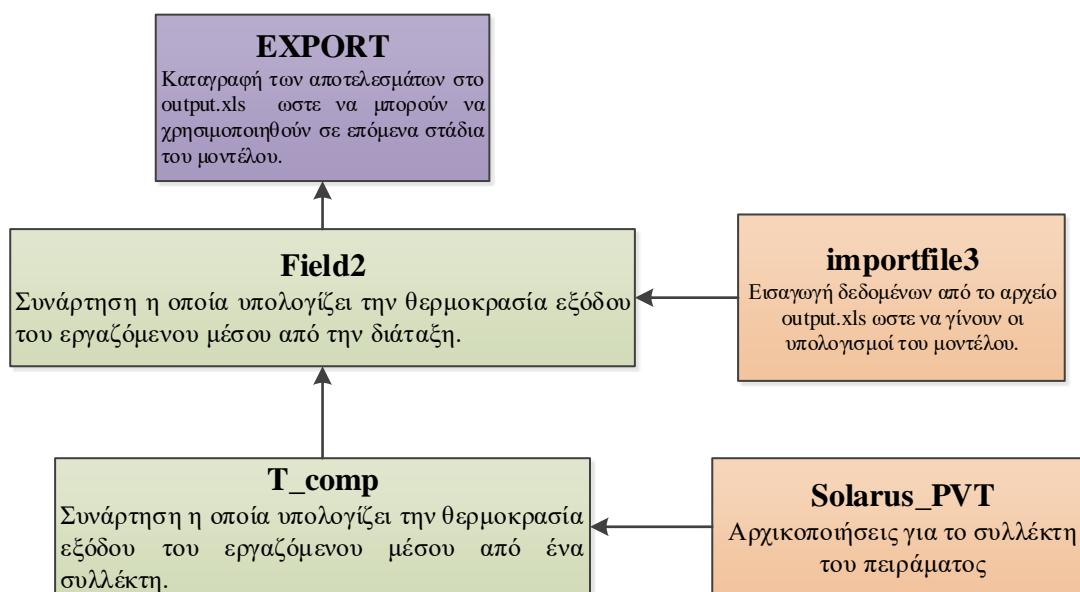
## 4.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου εργαζόμενου μέσου από τους συλλέκτες

Σε αυτό το κομμάτι θα αναλυθεί ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τους συλλέκτες. Η μόνη γνωστή παράμετρος για κάθε στιγμή θα είναι η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στη διάταξη, και με τον υπολογισμό της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας θα παράγεται ως έξοδος η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού μετά και από το δέκατο συλλέκτη. Πόρισμα αυτής της διαδικασίας είναι και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία ωστόσο δε θα μελετηθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

### 4.3.1 Ιεραρχία συναρτήσεων

Στον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου η ιεράρχηση των συναρτήσεων είναι αρκετά απλούστερη. Η Field2 συγκεντρώνει τα δεδομένα από το output.xls το οποίο κατασκευάστηκε με τις συναρτήσεις του προηγούμενου μέρους. Καλεί την T\_comp η οποία έχει ως στόχο να παράγει τη θερμοκρασία εξόδου για τον κάθε συλλέκτη ξεχωριστά.

### Calculation of output Temperature of working liquid from the collector



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα συναρτήσεων για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου της διάταξης

### 4.3.2 Επεξήγηση συναρτήσεων

**Συνάρτηση υπολογισμού της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από έναν εναλλάκτη:**  
Η συνάρτηση αυτή καλείται από την Field2 και αποστολή της είναι να υπολογίσει τη θερμοκρασία

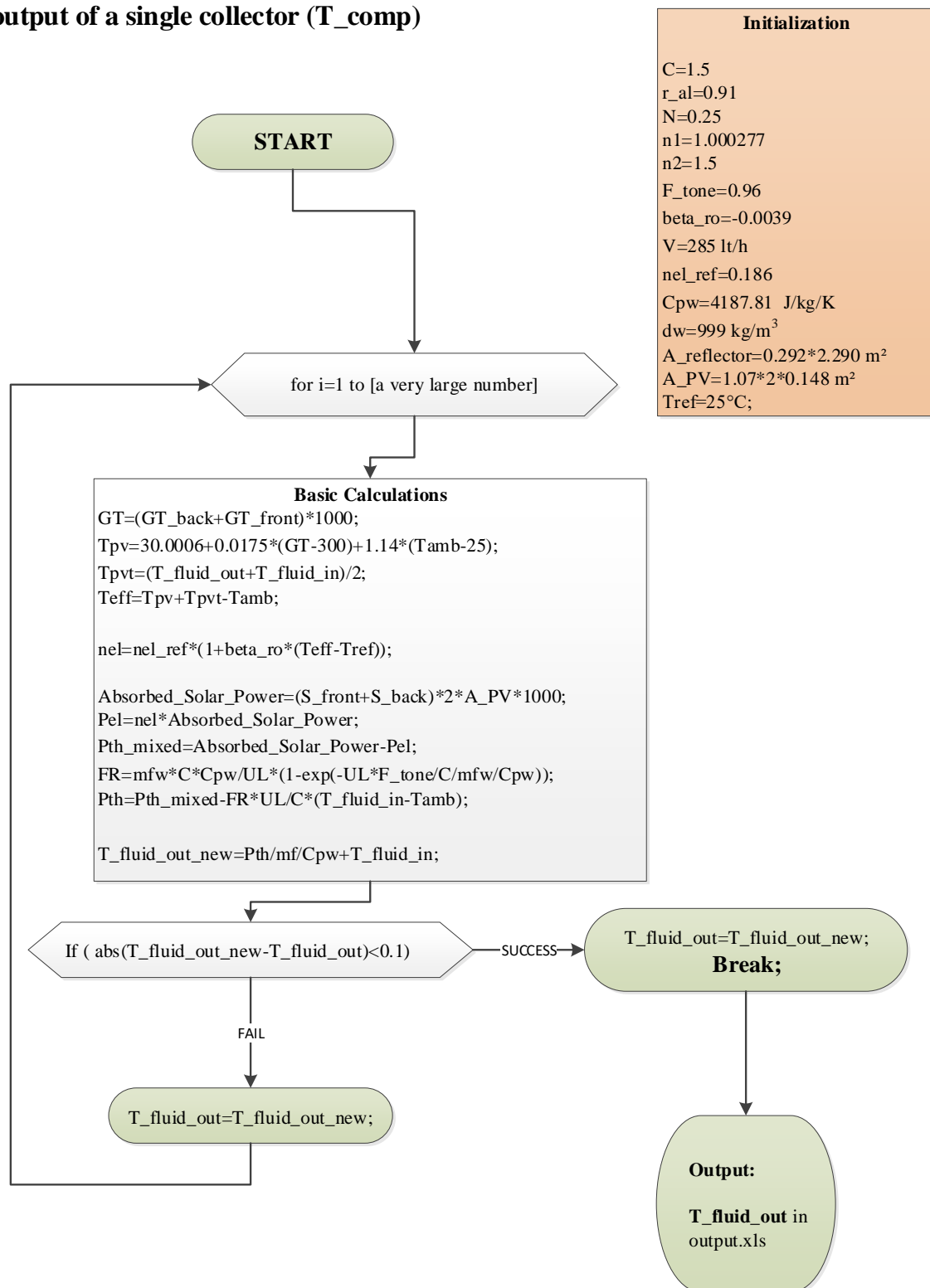
εξόδου του εργαζόμενου μέσου από έναν συλλέκτη. Αρχικά γίνεται μια υπόθεση για την τιμή της θερμοκρασίας αυτής. Βάση αυτής της τιμής υπολογίζεται η θερμοκρασία του Φωτοβολταϊκού στοιχείου και εν συνεχεία η ηλεκτρική του απόδοση. Με γνωστή την ηλεκτρική απόδοση και την προσπίπτουσα ακτινοβολία υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς. Το υπόλοιπο (αφαιρώντας καταλλήλως τις απώλειες) θεωρείται ότι μεταβιβάζεται στο εργαζόμενο μέσον ως θερμότητα. Οπότε, με το γνωστό τύπο για τη θερμότητα ( $dQ=m \cdot C_p \cdot dT$ ) μπορεί να υπολογιστεί εκ νέου η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας γίνεται ένας έλεγχος σύγκλισης και εφόσον ικανοποιηθεί η τιμή αυτή θεωρείται η θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη και επιστρέφεται στην συνάρτηση Field2.

Οι μικρές διαφορές μεταξύ των διαστάσεων του συλλέκτη στο πρόγραμμα και στις εικόνες του Κεφαλαίου 2 οφείλονται στο γεγονός ότι οι εικόνες του Κεφαλαίου 2 αναπαριστούν τις εξωτερικές διαστάσεις και όχι τις πραγματικές διαστάσεις των φωτοβολταϊκών επιφανειών και της επιφάνειας ανάκλασης. Σε κάθε περίπτωση οι διαφορές αυτές είναι αναλογικά μικρές.

**Πίνακας 4.11: Ταυτότητα συνάρτησης T\_comp**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
T_comp
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
T_comp
importfile3*
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από το χρήστη
<b>Είσοδος</b>
Θερμοκρασία εισόδου σε έναν συλλέκτη (T_fluid_in)
Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Tamb)
Απορροφούμενη ωριαία ακτινοβολία μπροστά (S_front)
Απορροφούμενη ωριαία ακτινοβολία πίσω (S_back)
Προσπίπτουσα ωριαία ακτινοβολία μπροστά (IT_front)
Προσπίπτουσα ωριαία ακτινοβολία πίσω (IT_back)
<b>Έξοδος</b>
Θερμική ενέργεια (Pth)
Ηλεκτρική ενέργεια (Pel)
Θερμοκρασία εξόδου από έναν συλλέκτη (T_fluid_out)

## Calculation of fluid temperature in the output of a single collector ( $T_{comp}$ )

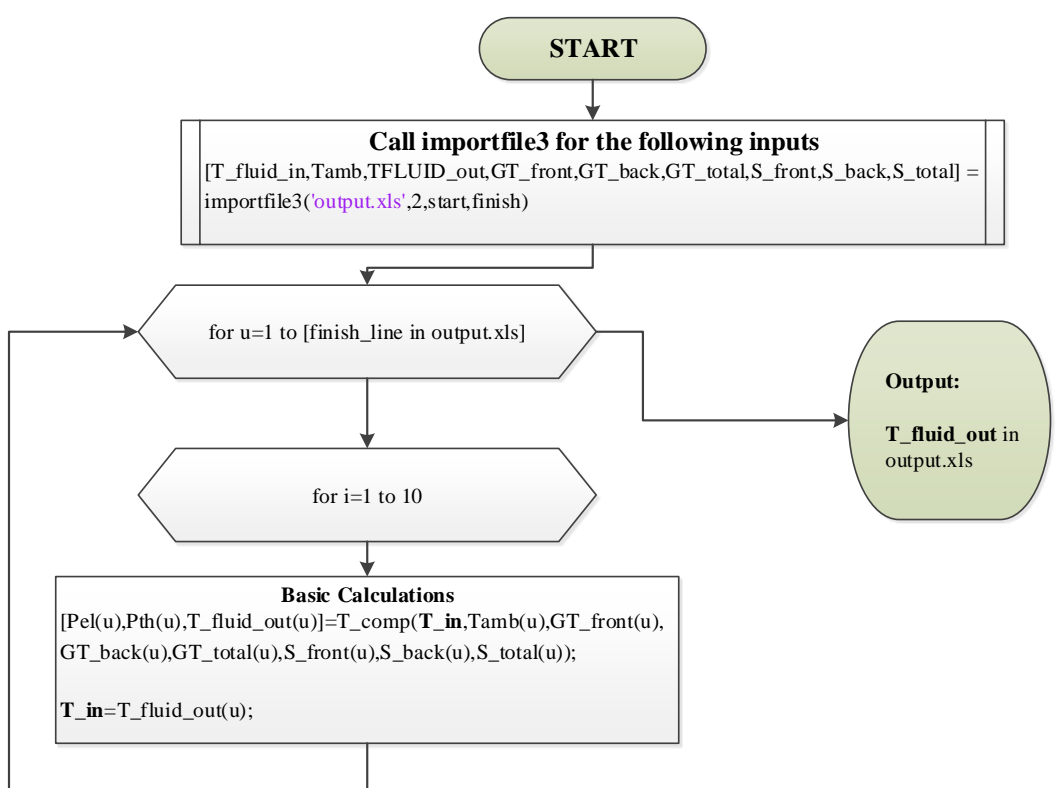


Εικόνα 4.10: Διάγραμμα συνάρτησης  $T_{comp}$

**Συνάρτηση υπολογισμού της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τη συνολική διάταξη:** Η συνάρτηση αυτή εισάγει τα δεδομένα ακτινοβολίας από το output.xls και καλεί την T\_comp δέκα φορές (όσα δηλαδή και τα αυτοτελή στοιχεία της διάταξης) ενημερώνοντας κάθε φορά τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Η έξοδος του πρώτου συλλέκτη είναι η είσοδος του δεύτερου κ.ο.κ. Η έξοδος από τον δέκατο συλλέκτη αποθηκεύεται στο output.xls και θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη αποθήκευσης.

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
Field2
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
T_comp
importfile3*
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Καλείται από το χρήστη
<b>Είσοδος</b>
-----
<b>Έξοδος</b>
Θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τη διάταξη (T_fluid_out)

**Calculation of fluid temperature in the output of the collectors (Field2)**



**Εικόνα 4. 11: Διάγραμμα συνάρτησης Field2**

Στο σημείο αυτό έχει υλοποιηθεί το μοντέλο που αφορά την παραγωγή θερμότητας. Στο κεφάλαιο 6, των αποτελεσμάτων θα παρατεθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου για ετήσια διάρκεια. Επίσης, στο επόμενο κεφάλαιο, η Field2 θα μεταβληθεί ώστε να συμπεριλαμβάνει και το μέρος της αποθήκευσης για τον υπολογισμό της επόμενης τιμής του  $T_{\text{fluid\_in}}$ .



## Κεφάλαιο 5: Μοντελοποίηση με MATLAB της αποθήκευσης ενέργειας

### 5.1 Παράμετροι του μοντέλου

**Παράμετροι Μονάδας αποθήκευσης:** Η αποθηκευτική μονάδα αποτελεί ένα κυλινδρικό δοχείο το οποίο στην εξωτερική του επιφάνεια έχει 10 cm πολυουρεθάνης ως μόνωση. Ο όγκος του είναι ανεξάρτητος από το μέγεθός του καθώς εντός του δοχείου βρίσκονται άλλα μηχανήματα, τα οποία καταλαμβάνουν όγκο (πχ αναδευτήρες) τα οποία όμως δεν αποτελούν αντικείμενο της εργασίας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία:

Πίνακας 5.1: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για του δοχείου αποθήκευσης

Συμβολισμός βιβλιογραφίας	Συμβολισμός στον κώδικα	Περιγραφή	Τιμή
V	V	Όγκος αποθήκευσης	0,8654 [m <sup>3</sup> ]
D	D	Διάμετρος εξωτερικής επιφάνειας	1[m]
L	L	Ύψος εξωτερικής επιφάνειας	2[m]
d <sub>pu</sub>	thickness	Πάχος πολυουρεθάνης	0,1[m]
k <sub>pu</sub>	k_pu	Θερμική αγωγιμότητα πολυουρεθάνης	0,03[W/m/K]
-	Ts_out	Θερμοκρασία τροφοδοσίας	25,7 [°C]

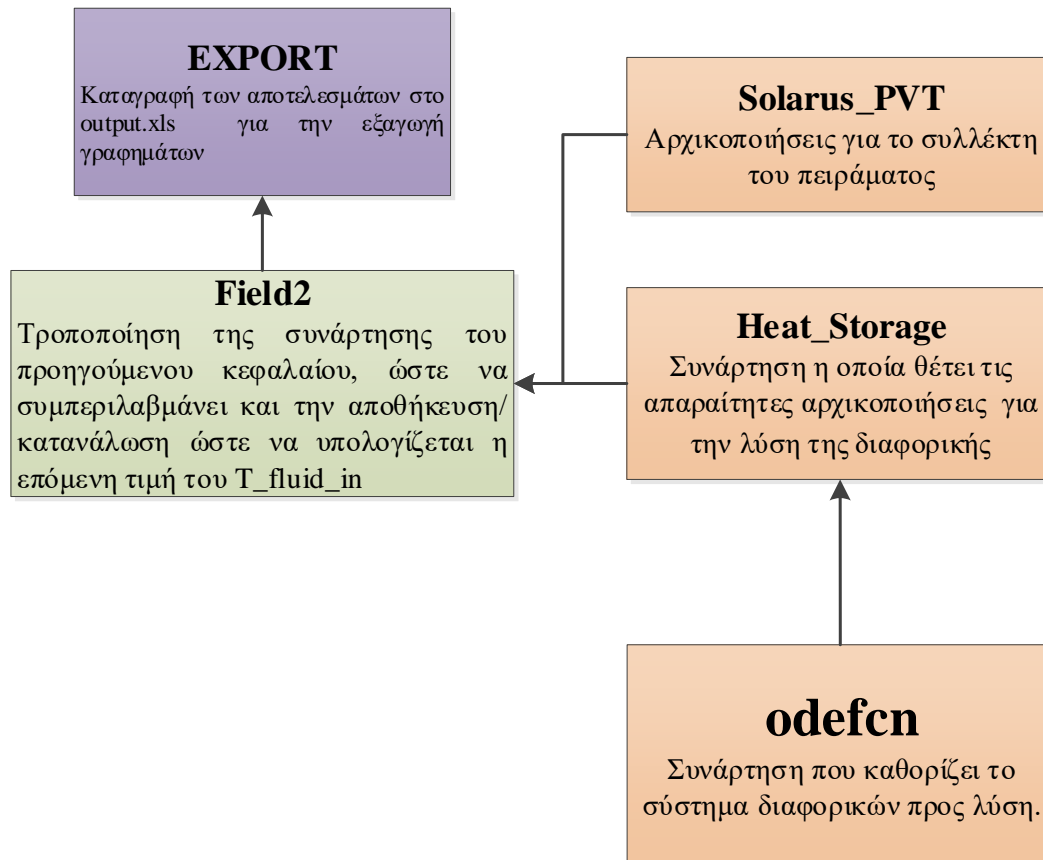
### 5.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου για το άμεσο μοντέλο αποθήκευσης

#### 5.2.1 Ιεραρχία συναρτήσεων

Για τη μοντελοποίηση της άμεσης αποθήκευσης χρειάζεται μόνο μία τροποποίηση της προαναφερθείσας field2. Στο προηγούμενο κεφάλαιο η θερμοκρασία εισόδου στους συλλέκτες θεωρείται δεδομένη. Το οποίο είναι σωστό, αφού είτε ελέγχουμε πειραματικά δεδομένα είτε «τρέχουμε» το μοντέλο εξ ολοκλήρου, το πεδίο των PVT χρειάζεται μόνο αυτή την τιμή για να προχωρήσει στους υπόλοιπους υπολογισμούς.

Στην περίπτωση της άμεσης αποθήκευσης η τιμή T<sub>fluid\_in</sub> κάθε επόμενης ώρας υπολογίζεται μέσα από τις συνθήκες ηλιοφάνειας, τις συνθήκες αποθήκευσης και την τιμή της T<sub>fluid\_in</sub> της προηγούμενης ώρας. Όποτε, έχοντας μόνο μία αρχική συνθήκη για κάθε μέρα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η χρονοσειρά θερμοκρασιών (και ως εκ τούτου και ενεργειών) για τις υπόλοιπες ώρες.

## Calculation of daily energy production with given Irradiance data, Indirect Storage



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα συναρτήσεων για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εισόδου

## 5.2.2 Επεξήγηση συναρτήσεων

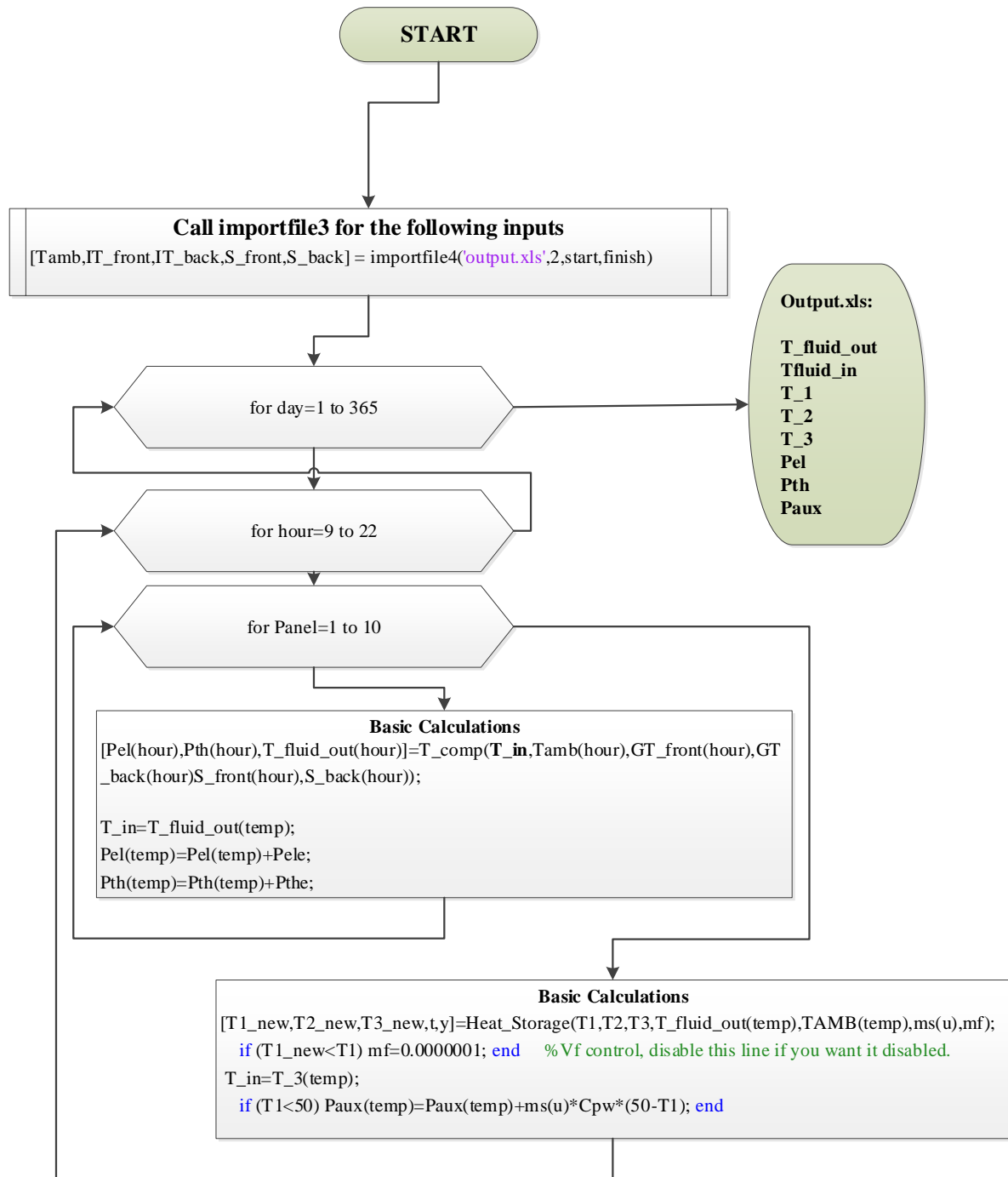
**Συνάρτηση υπολογισμού θερμοκρασίας εισόδου:** Ίδια συνάρτηση με αυτή του κεφαλαίου 5, αλλά με τροποποιήσεις ώστε ολόκληρος ο υπολογισμός να γίνεται μέσω του μοντέλου. Πέραν των σημείων υπολογισμού των ισχύων για κάθε ώρα, περιέχει γραμμή κώδικα η οποία μηδενίζει τη ροή των συλλεκτών ( $m_f$ ), εάν η θερμοκρασία  $T_{st1}$  μειωθεί.

Η παραδοχή που πρέπει να σημειωθεί εδώ είναι ότι η μελέτη για την παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας γίνεται στο διάστημα από την 9<sup>η</sup> ώρα της ημέρας (08:00-09:00) μέχρι τη 22<sup>η</sup> ώρα της ημέρας (21:00 με 22:00). Ο λόγος για αυτή την παραδοχή είναι η εστίαση στη μελέτη του ενεργού διαστήματος της ημέρας και η διευκόλυνση της ευθυγράμμισης των στοιχείων με τα πειραματικά δεδομένα. Η επίπτωση στα αποτελέσματα κρίνεται μικρή καθώς η ηλιακή ενέργεια στο διάστημα 22:00-08:00 είναι ελάχιστη έως μηδενική.

**Πίνακας 5.2: Ταυτότητα συνάρτησης field2**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
Field2
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
Location, importfile3
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
-----
<b>Είσοδος</b>
-----
<b>Έξοδος</b>
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού (T_fluid_out)
Θερμοκρασία εισόδου ρευστού (T_fluid_out)
Θερμοκρασίες στρωμάτων αποθήκευσης (T1,T2,T3)
Θερμική (Pth), ηλεκτρική(Pel) και προσδιδόμενη ισχύς (Paux)

## Calculation of fluid temperature in the output of the collectors (Field2)



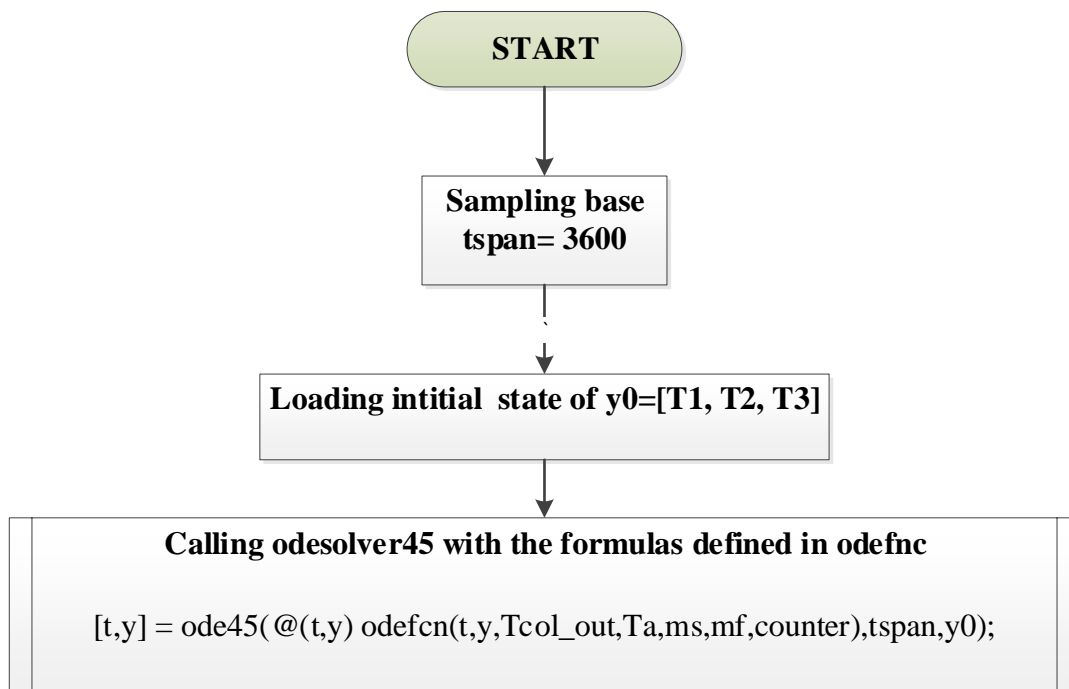
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα συνάρτησης field2

**Συνάρτηση υπολογισμού θερμοκρασίας αποθήκευσης:** Απλή συνάρτηση, η οποία θέτει το χρονικό βήμα της λύσης, τις αρχικές συνθήκες και καλεί την ode45 για να λύσει το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων

**Πίνακας 5.3: Ταυτότητα συνάρτησης Heat\_Storage**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
Heat_Storage
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
odefcn
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Field2
<b>Είσοδος</b>
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού (T_fluid_out)
Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Tamb)
Θερμοκρασίες στρωμάτων αποθήκευσης (T1,T2,T3)
Παροχή φορτίου (ms) και συλλεκτών (mf)
<b>Έξοδος</b>
Θερμοκρασίες στρωμάτων αποθήκευσης για την επόμενη ώρα (T1_new,T2_new,T3_new)

**Calculation of Energy equilibrium  
inside the storage tank  
(Heat\_Storage)**



**Εικόνα 5.3: Διάγραμμα συνάρτησης Heat storage**

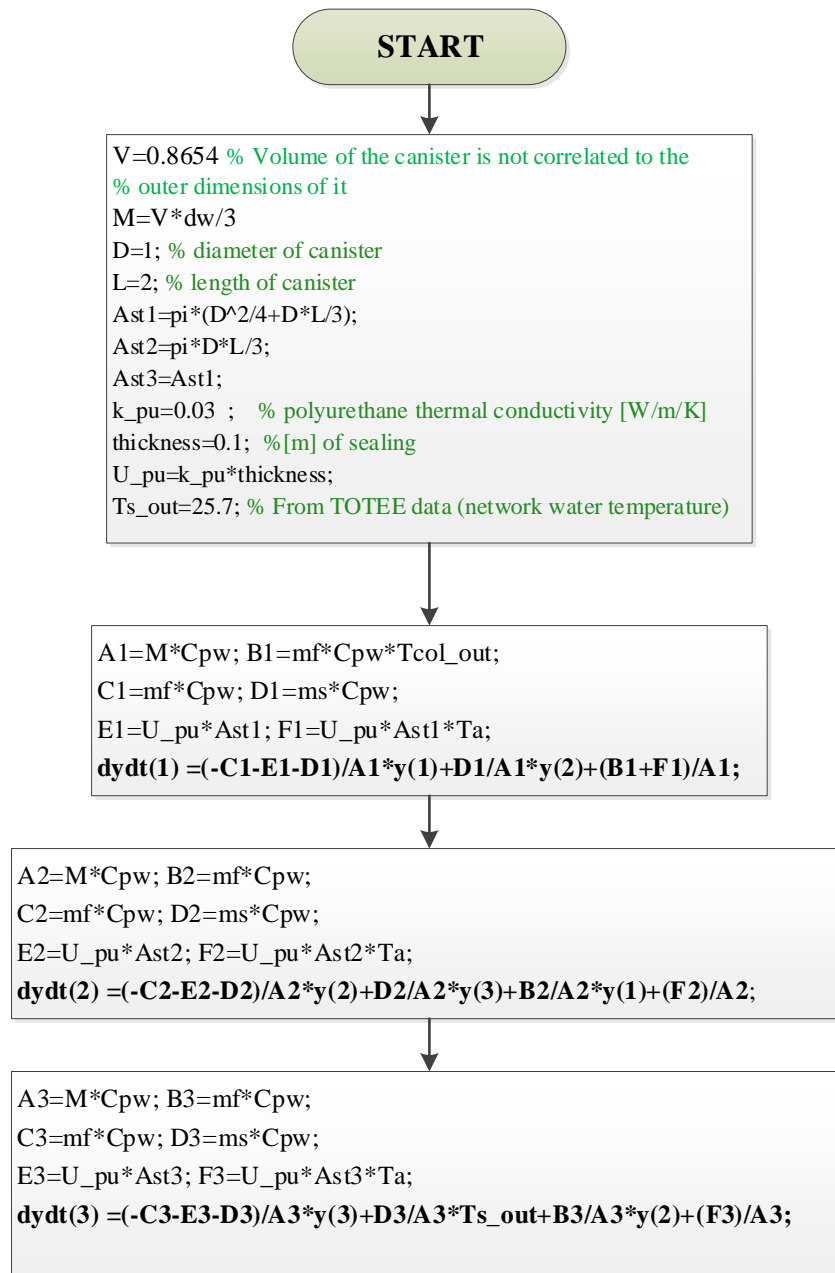
**Συνάρτηση καθορισμού συστήματος διαφορικών συναρτήσεων:** Η συνάρτηση αυτή είναι ο πυρήνας της μοντελοποίησης, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούν τα τρία στρώματα θερμοκρασιών του δοχείου αποθήκευσης μεταξύ τους. Οι Τύποι του κεφαλαίου 3 έχουν παραμετροποιηθεί και λυθεί ως προς τις παραγώγους  $\frac{dT_{st1}}{dt}$ ,  $\frac{dT_{st2}}{dt}$  και  $\frac{dT_{st3}}{dt}$

**Πίνακας 5.4: Ταυτότητα συνάρτησης field2**

<b>Κωδική ονομασία συνάρτησης</b>
odefcn
<b>Συναρτήσεις που καλεί</b>
-----
<b>Συναρτήσεις από τις οποίες καλείται</b>
Heat_Storage
<b>Είσοδος</b>
-----
<b>Έξοδος</b>
-----

Τροποποιώντας αυτή τη συνάρτηση μπορούμε να τροποποιήσουμε την υλοποίηση της αποθήκευσης.

## Defining System of differential equations (odefcn)



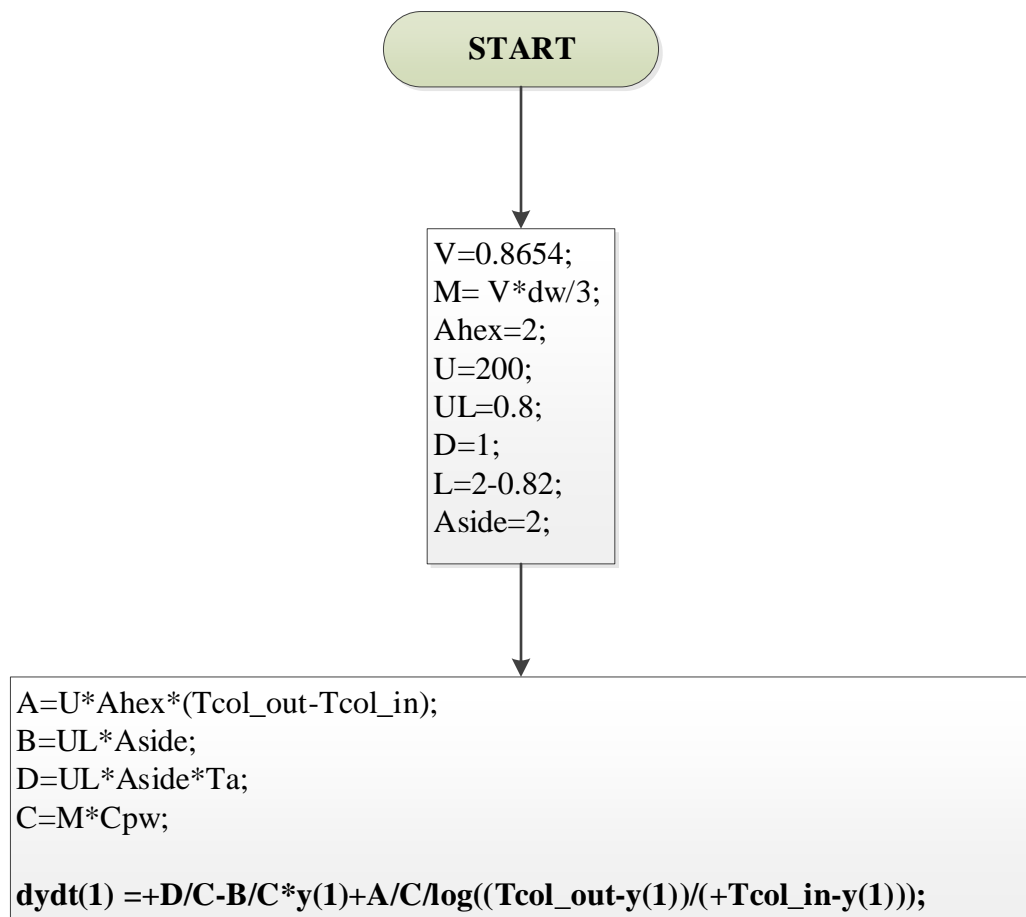
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα συνάρτησης odefcn

## 5.3 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου για το έμμεσο μοντέλο αποθήκευσης

### 5.3.1 Ιεραρχία συναρτήσεων

Η Μοντελοποίηση της έμμεσης αποθήκευσης χρειάζεται μόνο μία τροποποίηση στην odefcn ώστε να αντιπροσωπεύει την διαφορική εξίσωση του κεφαλαίου 3 για την έμμεση αποθήκευση. Σε αντίθεση όμως με την άμεση αποθήκευση, ο καθορισμός της  $T_m(t)$  απαιτεί τη γνώση τόσο της θερμοκρασίας εισόδου όσο και της θερμοκρασίας εξόδου. Αυτό το γεγονός, περιορίζει το μοντέλο καθώς δεν επιτρέπει την πλήρη ανεξαρτησία από τα πειραματικά δεδομένα.

#### Defining System of differential equations (IND\_odefcn)



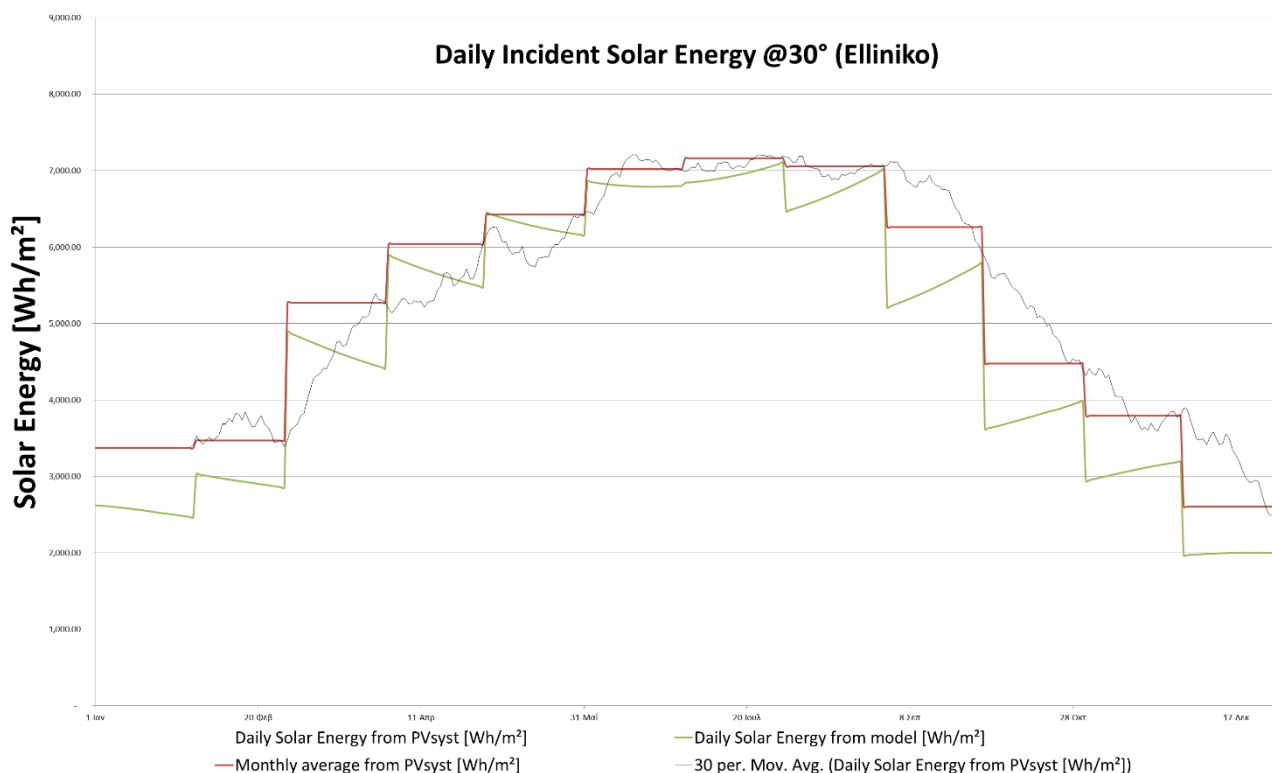
Εικόνα 5.5: Διάγραμμα συνάρτησης IND\_odefcn



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα

### 6.1 Ηλιακή Ενέργεια

Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται σύγκριση μεταξύ της προσπίπτουσας ενέργειας σε μοναδιαία επιφάνεια ( $\text{Wh/m}^2$ ) με κλίση  $30^\circ$ , όπως αυτή υπολογίστηκε μέσω του μοντέλου, με τη βάση δεδομένων Meteonorm 7.1.



**Εικόνα 6.2: Ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια για το Ελληνικό στη διάρκεια ενός έτους**

Η πράσινη γραμμή αναπαριστά τις τιμές του μοντέλου. Η συνάρτηση εμφανίζει ασυνέχεια στις ημερομηνίες στις οποίες αλλάζει ο μήνας. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς ο υπολογισμός έχει γίνει με βάση τη χαρακτηριστική ημέρα του μήνα, και η ενέργεια αυτή έχει προσαρμοστεί στις υπόλοιπες ημέρες του μήνα μέσω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ήλιου για κάθε δεδομένη ημέρα.

Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά το μέσο όρο των τιμών της βάσης δεδομένων για κάθε μήνα, ενώ η μαύρη τον κινούμενο μέσο όρο της ίδιας βάσης, με περίοδο τριάντα ημερών. Ο λόγος για τον οποίο αξιοποιήθηκαν οι μέσοι όροι και όχι οι πραγματικές τιμές, είναι οι μεγάλες μεταβολές που παρατηρούνται στην πραγματικότητα λόγω των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών. Συγκεκριμένα, η μεταβολή του συντελεστή  $K_t$  γίνεται σε επίπεδο ώρας και όχι σε επίπεδο μήνα. Αυτό το γεγονός αποτελεί αδυναμία του μοντέλου καθώς, η συνάρτηση  $H_d(K_t, H)$  δεν είναι γραμμική και μάλιστα αποτελείται και από διαφορετικούς κλάδους ανάλογα με την τιμή του  $K_t$ . Οπότε, ο μέσος όρος των τιμών του  $K_t$  για ένα μήνα, δεν παρέχει ισοδύναμα αποτελέσματα με ωριαίες τιμές του  $K_t$ . Επιπλέον, το μοντέλο υποθέτει μία μέση τιμή ακτινοβολίας για κάθε μήνα, το οποίο προφανώς δεν είναι αντίστοιχο της πραγματικότητας.

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται σύγκριση της ηλιακής ενέργειας σε μηνιαία βάση. Παρατηρούμε ότι η συνολική απόκλιση μοντέλου με Meteonorm είναι 9,06%. Ενώ, οι μηνιαίες αποκλίσεις κυμαίνονται από 2,82% έως και 23%. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της ποσοστιαίας απόκλισης είναι η παρακάτω:

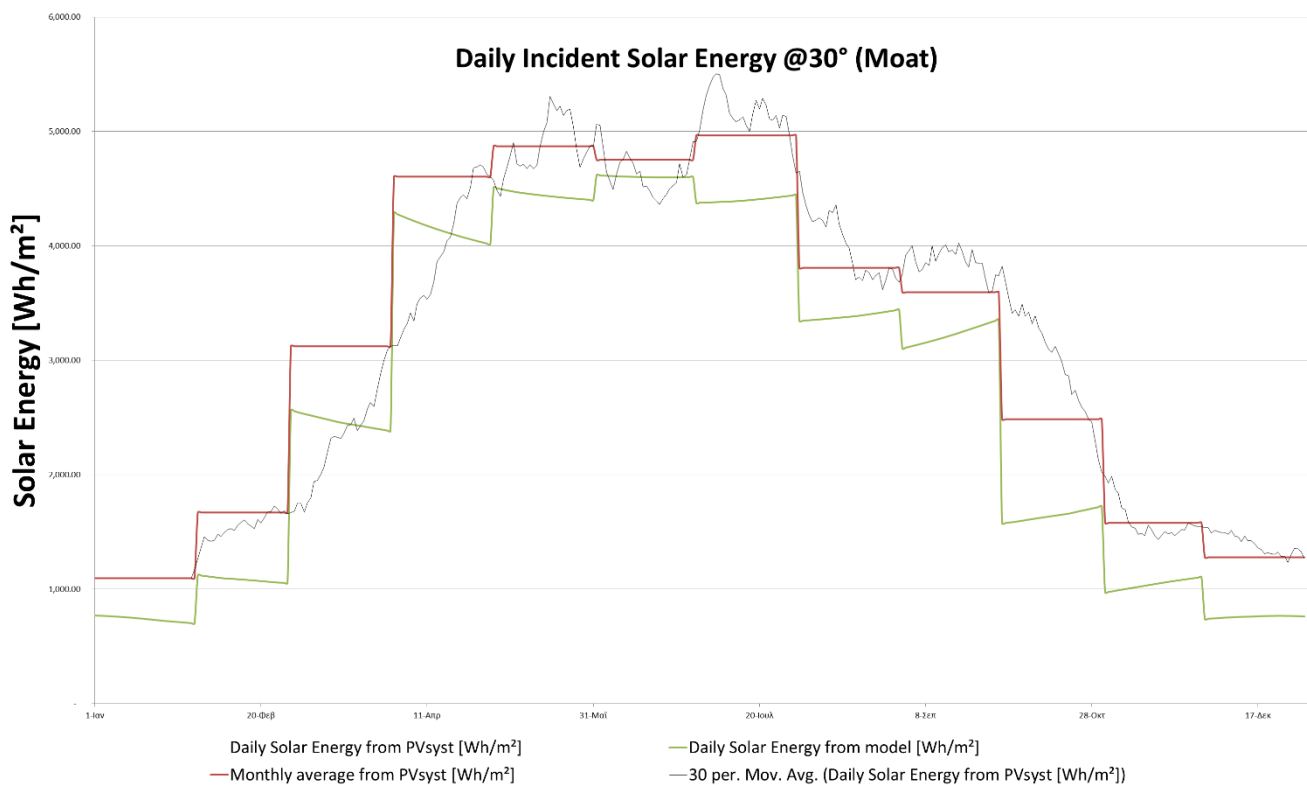
$$d(\%) = \frac{X_{meteonorm} - X_{model}}{X_{meteonorm}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

**Πίνακας 6.1: Ηλιακή ενέργεια ανά μήνα για το Ελληνικό**

Μήνας	Μηνιαία Ηλιακή ενέργεια από το μοντέλο [Wh/m <sup>2</sup> ]	Μηνιαία Ηλιακή ενέργεια από το Meteonorm [Wh/m <sup>2</sup> ]	Σχετική διαφορά [%]
Ιανουάριος	79.054,81	102.638,60	22,98%
Φεβρουάριος	82.294,73	99.402,60	17,21%
Μάρτιος	143.730,88	161.385,10	10,94%
Απρίλιος	170.005,95	181.186,90	6,17%
Μάιος	194.736,08	200.385,50	2,82%
Ιούνιος	204.231,77	210.346,50	2,91%
Ιούλιος	215.344,13	222.711,70	3,31%
Αύγουστος	208.244,47	219.229,00	5,01%
Σεπτέμβριος	164.390,93	177.942,00	7,62%
Οκτώβριος	117.594,30	137.334,60	14,37%
Νοέμβριος	92.276,09	113.837,80	18,94%
Δεκέμβριος	61.760,63	80.081,60	22,88%
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>1.733.664,77</b>	<b>1.906.481,90</b>	<b>9,06%</b>

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει με ακρίβεια μήνες στους οποίους είναι εντονότερη η πιθανότητα νέφωσης, το οποίο σημαίνει ότι σε αυτούς τους μήνες το μοντέλο έχει την μεγαλύτερη αδυναμία να υπολογίσει σωστά την ακτινοβολία.

Στο επόμενο διάγραμμα και πίνακα παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία για την δεύτερη περιοχή μελέτης, το Μοαί του Ηνωμένου Βασιλείου. Σε αυτή την περιοχή η απόκλιση είναι μεγαλύτερη και αγγίζει το 14,64%. Αυτό εν πολλοίς είναι αναμενόμενο, καθώς η συμβολή της νέφωσης για την περιοχή της Αγγλίας στο συνολικό μοντέλο είναι μεγαλύτερη. Οπότε, είναι φυσικό η αδυναμία του μοντέλου να είναι εντονότερη.



**Εικόνα 6.3: Ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια για το Moat στη διάρκεια ενός έτους**

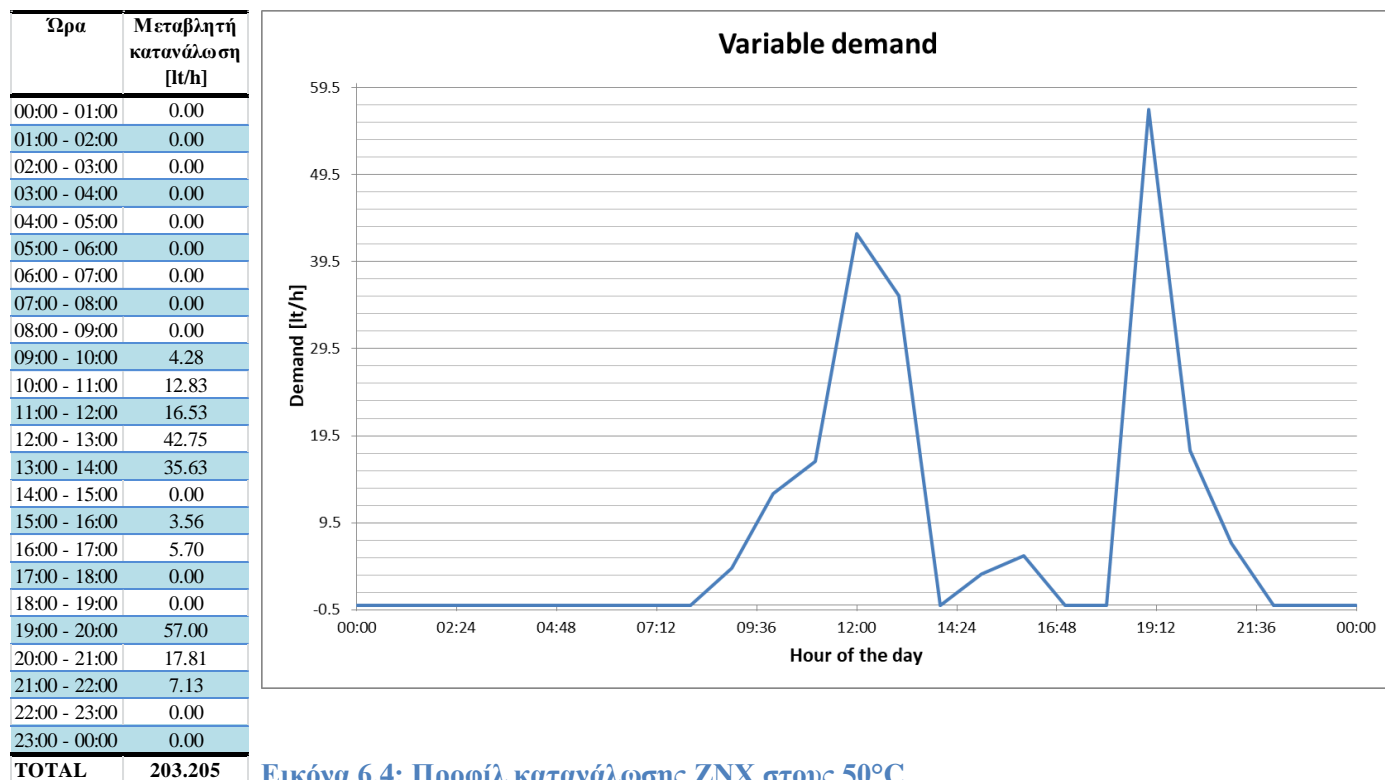
Σε κάθε περίπτωση, παρά τις αποκλίσεις, τα αποτελέσματα του μοντέλου θα μπορέσουν να προσφέρουν μία αξιόπιστη εικόνα για την σχετική απόδοση του PVT στις τοποθεσίες προς μελέτη.

**Πίνακας 6.2: Ηλιακή ενέργεια ανά μήνα για το Moat**

Μήνας	Μηνιαία Ηλιακή ενέργεια από το μοντέλο [Wh/m <sup>2</sup> ]	Μηνιαία Ηλιακή ενέργεια από το Meteonorm [Wh/m <sup>2</sup> ]	Σχετική διαφορά [%]
Ιανουάριος	22.906,85	35.536,00	35,54%
Φεβρουάριος	30.375,64	45.396,40	33,09%
Μάρτιος	76.386,05	95.768,90	20,24%
Απρίλιος	124.159,29	138.145,30	10,12%
Μάιος	137.795,75	148.485,70	7,20%
Ιούνιος	138.122,39	147.281,90	6,22%
Ιούλιος	136.485,46	147.445,30	7,43%
Αύγουστος	104.958,52	117.285,60	10,51%
Σεπτέμβριος	96.661,50	112.176,30	13,83%
Οκτώβριος	50.912,38	66.517,50	23,46%
Νοέμβριος	31.241,07	46.468,60	32,77%
Δεκέμβριος	23.526,94	40.025,00	41,22%
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>973.531,86</b>	<b>1.140.532,50</b>	<b>14,64%</b>

## 6.2 Άμεση αποθήκευση

**Μεταβαλλόμενο Προφίλ κατανάλωσης:** Η υπόθεση που έχει ακολουθηθεί στη συμπεριφορά της μελέτης του υβριδικού συστήματος PVT για τη ζήτηση σε ZNX ακολουθεί την παρακάτω κατανομή (Εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.4: Προφίλ κατανάλωσης ZNX στους 50°C

Η συνολική ποσότητα ZNX μέσα στην ημέρα είναι 203,2 lt στους 50°C. Η ποσότητα αυτή επιλέχθηκε από τον Πίνακα 5.11 της οδηγίας 20107-1/2010 του TOTEE. Για το σενάριο 1 η παροχή της ζήτησης εξισώνεται με μία σταθερή τιμή ώστε στο πέρας της ημέρας η συνολική ποσότητα να είναι ίση με τη μεταβαλλόμενη παροχή. Οι παροχές συμβαδίζουν με το διάστημα μελέτης των συλλεκτών το οποίο είναι από 08:00 έως 22:00. Σε μία πραγματική εφαρμογή η θερμοκρασία του δοχείου στην αρχή της ημέρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία στο τέλος της προηγούμενης, το οποίο όμως δεν μελετάται στα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

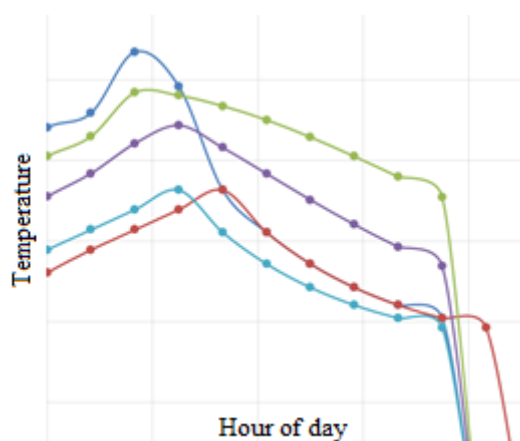
Παρακάτω θα συγκριθούν ποιοτικά τα τέσσερα σενάρια για το μήνα Ιούλιο και το μήνα Δεκέμβριο. Αυτοί οι δύο μήνες αποτελούν την καλύτερη και τη χειρότερη περίπτωση αντίστοιχα από τη σκοπιά της παραγωγής. Τα διαγράμματα που θα εξεταστούν είναι η θερμική, ηλεκτρική και προσδιδόμενη ενέργεια καθώς και οι θερμοκρασίες  $T_{fluid\_in}$ ,  $T_{fluid\_out}$ ,  $T_{st1}$ ,  $T_{st2}$ ,  $T_{st3}$ , για την περιοχή του Ελληνικού.

**Σενάριο 1 – Συνεχής ζήτηση με έλεγχο τροφοδοσίας από τους συλλέκτες:** Στην υλοποίηση αυτή η παροχή του φορτίου ( $m_s$ ) είναι ίση με 14.5 lt/h, ώστε η συνολική παροχή ZNX να είναι ίδια με τις απαιτήσεις μίας οικίας όπως αυτή καθορίζεται από το TOTEE.

Στις 10:00 παρατηρείται η πτώση της θερμοκρασίας στην είσοδο των συλλεκτών ( $T_{fluid\_in}$ ) κατά περίπου 5°C. Αυτό οφείλεται στην αρχικοποίηση της θερμοκρασίας αυτής σε σχέση με την αρχικοποίηση των θερμοκρασιών του δοχείου αποθήκευσης. Η θερμοκρασία εισόδου στους συλλέκτες ( $T_{fluid\_in}$ ) αρχικοποιείται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος την ώρα που αρχίζει η μελέτη του συστήματος (08:00). Αντίστοιχα, οι θερμοκρασίες του δοχείου αρχικοποιούνται σε θερμοκρασία 5°C μικρότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η υπόθεση αυτή έχει γίνει γιατί η μελέτη του συστήματος περιορίζεται στη διάρκεια μίας ημέρας (και πιο συγκεκριμένα στην περίοδο από 08:00 έως 21:00) και το σύστημα των συλλεκτών θεωρείται απομονωμένο από το σύστημα της αποθήκευσης. Επίσης, είναι εύλογη υπόθεση ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός υπόγειου δωματίου θα είναι 5 βαθμούς χαμηλότερη από τη θερμοκρασία στην τοποθεσία των συλλεκτών.

Λόγω του ελέγχου στην παροχή των συλλεκτών, οι θερμοκρασίες  $T_{st1}$  και  $T_{st2}$  παραμένουν σχετικά σταθερές μετά την επίτευξη της μέγιστης θερμοκρασίας στην έξοδο των συλλεκτών. Υπενθυμίζεται ότι ο έλεγχος γίνεται στην πρώτη παράγωγο της  $T_{st1}$ , οπότε η παροχή των συλλεκτών μηδενίζεται στις 17:00.

Στη μέση ημέρα του χειρότερου μήνα (Δεκέμβριος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st1\_max}=20,37^\circ\text{C}$  στις 15:00 ενώ σταθεροποιείται στις επόμενες ώρες στους  $19,93^\circ\text{C}$ . Δεδομένου ότι η θερμοκρασία του νερό τροφοδοσίας ( $T_{s\_out}$ ) από το σύστημα ύδρευσης έχει υποτεθεί ίση με  $25,7^\circ\text{C}$ , το ρεύμα εισόδου το χειμώνα θερμαίνει το δοχείο αποθήκευσης και εκεί οφείλεται η θετική κλίση της  $T_{st3}$  το χειμώνα. Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι 2974W στις 12:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι 674W. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι όροι ενέργεια και ισχύς είναι εναλλάξιμοι σε αυτή την περίπτωση αφού το ελάχιστο διάστημα μελέτης είναι η μία ώρα. Η απαιτούμενη προσδιδόμενη ισχύς είναι 746W στο μέγιστο και απαντάται στις 08:00, και συνεχίζει σταθερά μέχρι τις 21:00 κοντά στα 500W. Για τη μέση ημέρα του Δεκέμβρη η συνολική θερμική ενέργεια είναι 16,749Wh/day, η ηλεκτρική είναι 3,994 Wh/day και η προσδιδόμενη ενέργεια που απαιτείται είναι 7604Wh/day.



**Εικόνα 6.5: Θερμοκρασίες τον Ιούλιο για δεκαπλάσια παροχή φορτίου**

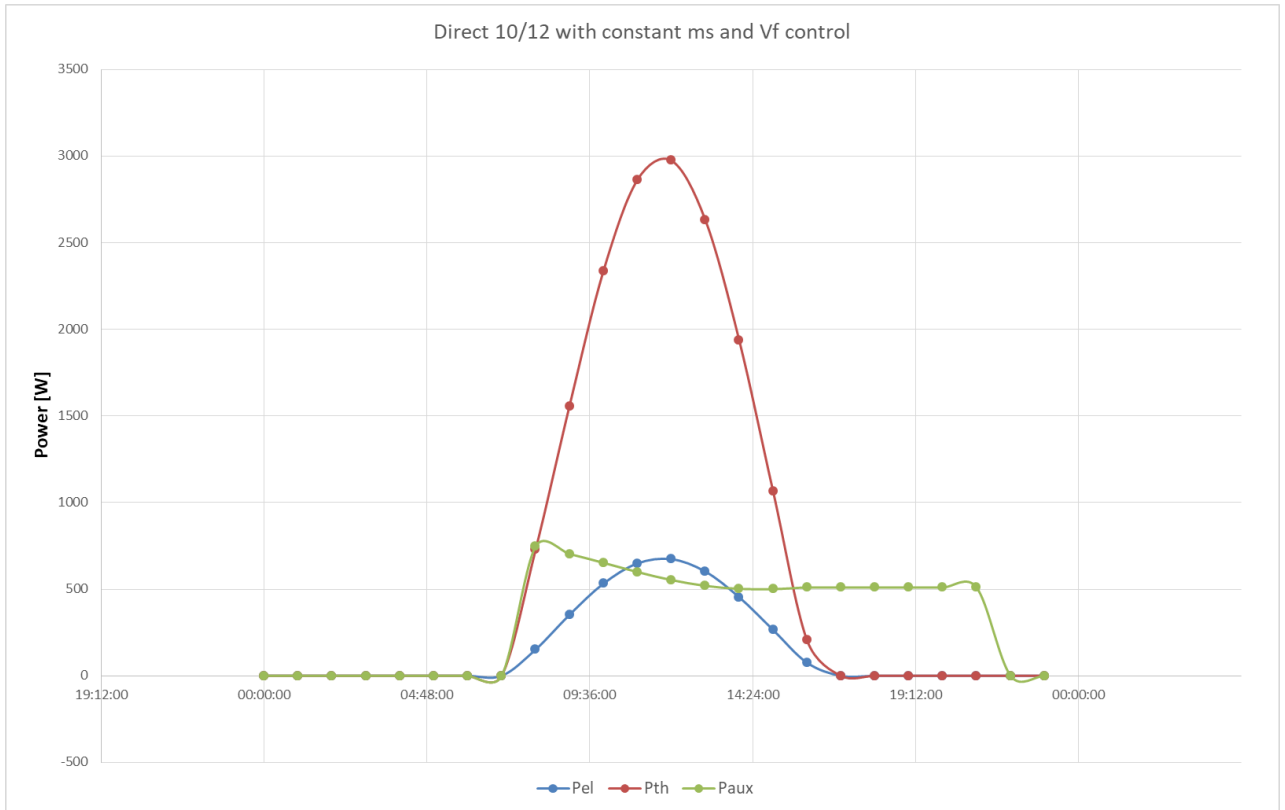
Στη μέση ημέρα του καλύτερου μήνα (Ιούλιος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st1\_max}=63,44^\circ\text{C}$  στις 15:00, ενώ σταθεροποιείται στις επόμενες ώρες στους  $62,4^\circ\text{C}$ . Το ρεύμα εισόδου από το δίκτυο, το καλοκαίρι ψύχει το δοχείο αποθήκευσης και εκεί οφείλεται η αρνητική κλίση της  $T_{st3}$ . Οι κλίσεις των  $T_{st1}$  και  $T_{st2}$  είναι αισθητά χαμηλότερες αφού η ροή  $m_s$  είναι σχετικά μικρή και η διαφορά ( $T_{st2}-T_{st3}$ ) είναι αρκετά μικρότερη από τον όρο ( $T_{st\_out}-T_{st3}$ ). Στην Εικόνα 6.4 φαίνεται το ίδιο κομμάτι της γραφικής παράστασης για δεκαπλάσια όμως παροχή στο φορτίο και παρατηρείται ότι οι κλίσεις μεταξύ  $T_{st1}$ ,

$T_{st2}$  και  $T_{st3}$  τείνουν να εξισωθούν. Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι 7551W στις 10:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι 1457W. Στις 14:00

παρατηρείται ένα δεύτερο τοπικό μέγιστο στην ισχύ. Η μείωση της ισχύος μεταξύ 10:00 και 14:00 οφείλεται στο μεγάλο ηλιακό ύψος, το οποίο εμποδίζει την άμεσο ηλιακή ακτινοβολία να προσπέσει στην οπίσθια φωτοβολταϊκή επιφάνεια. Η απαιτούμενη προσδιδόμενη ισχύς είναι 373W στο μέγιστο

και απαντάται στις 08:00. Για τη μέση ημέρα του Ιουλίου η συνολική θερμική ενέργεια είναι 46,801Wh/day, η ηλεκτρική είναι 9,616 Wh/day και η προσδιδόμενη ενέργεια που απαιτείται είναι 810Wh/day.

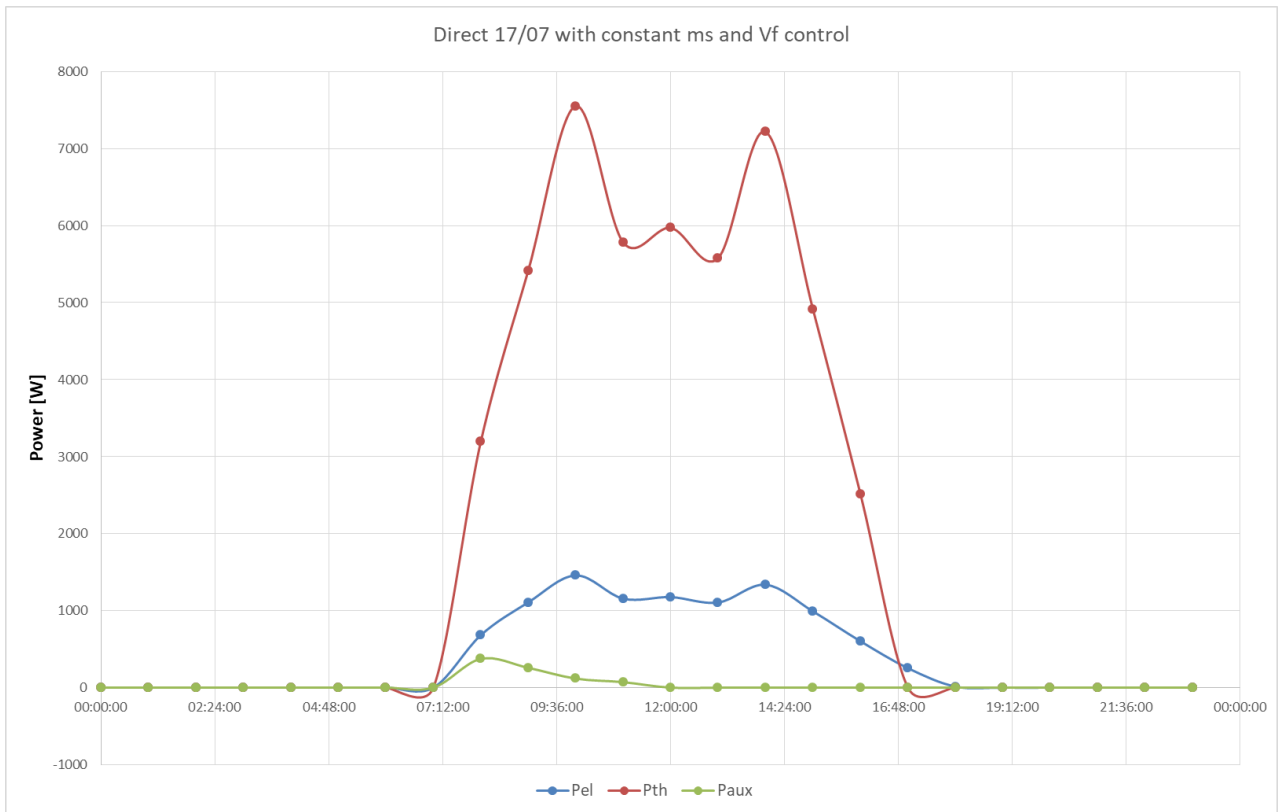
Στη διάρκεια ενός χρόνου η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι  $W_{el}=2.765.696Wh$ , η παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι  $Q_{th}=12.577.711,86Wh$  και η ανάγκη σε προσδιδόμενη ενέργεια είναι  $Q_{aux}=1.352.499Wh$ .



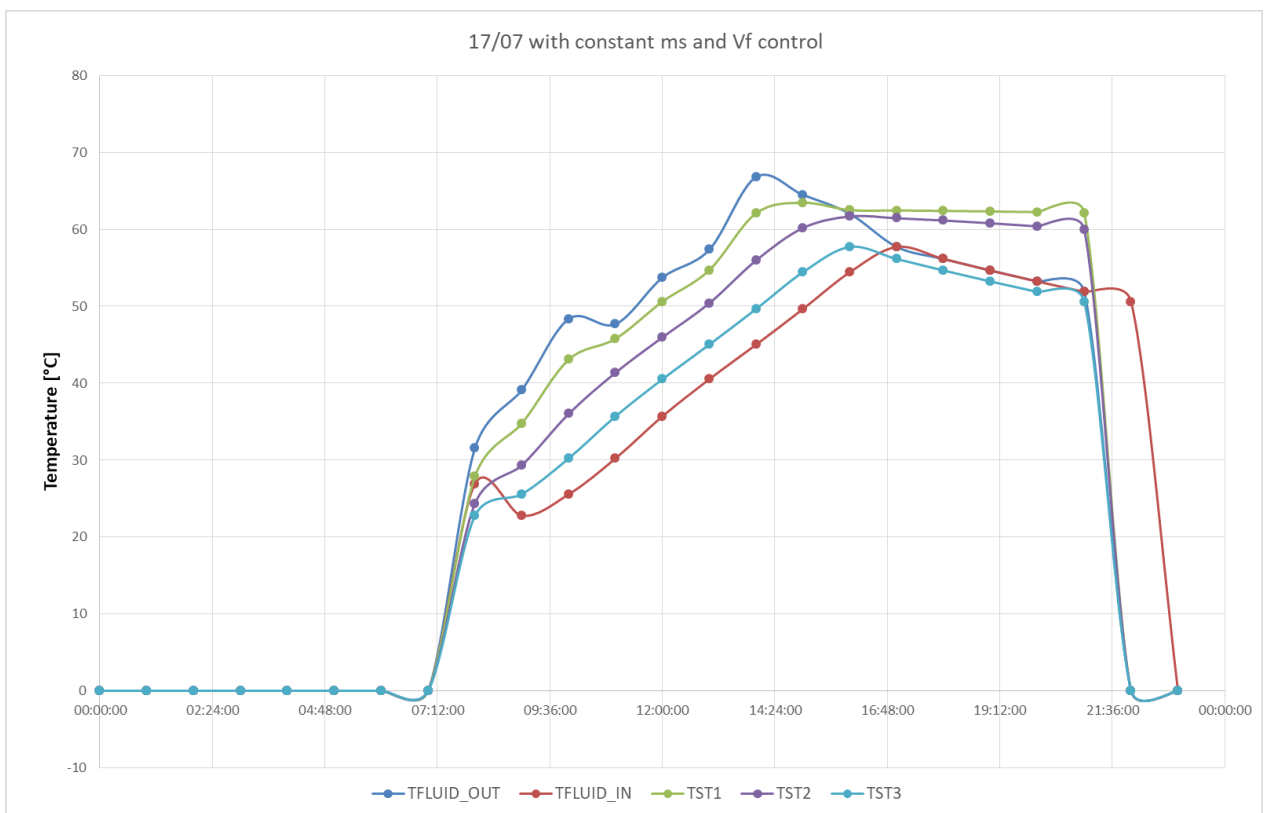
Εικόνα 6.5: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 1)



Εικόνα 6.6: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 1)



Εικόνα 6.7: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 1)



Εικόνα 6.8: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 1)



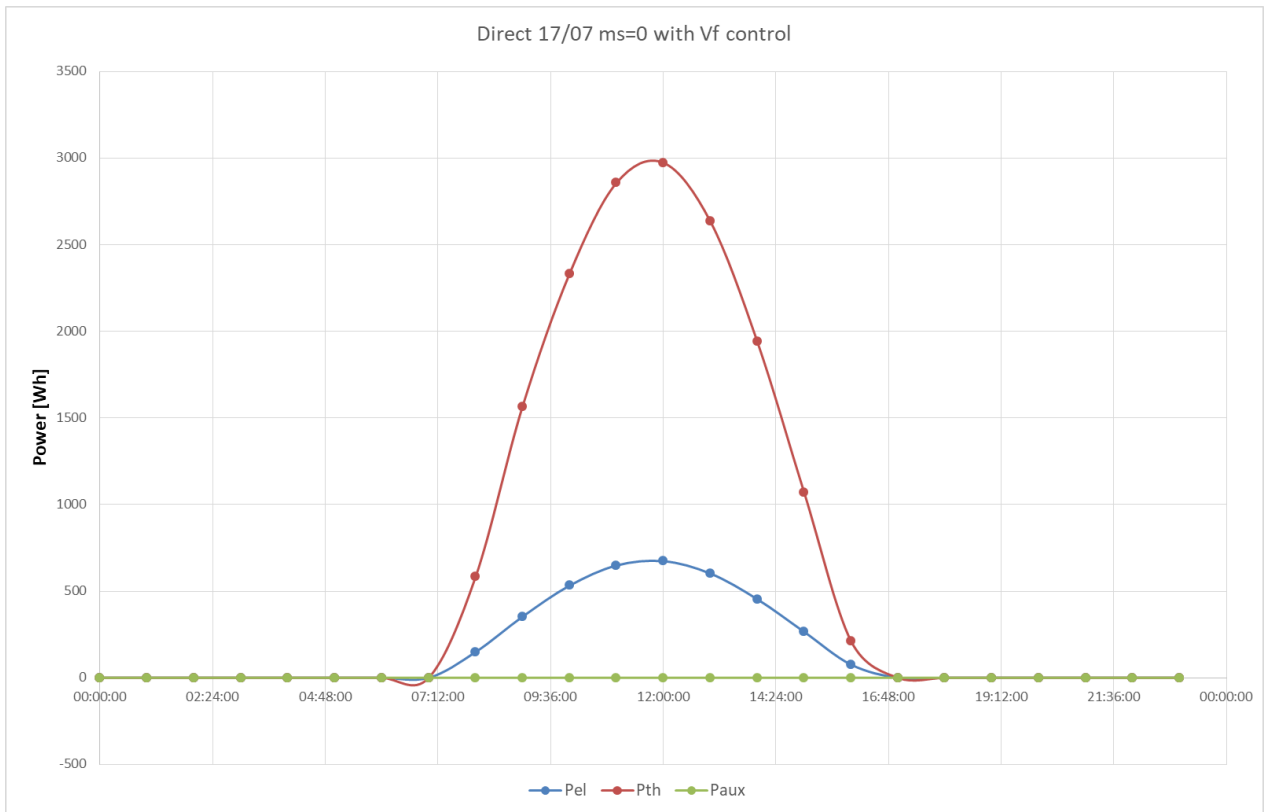
**Σενάριο 2 – Μηδενική ζήτηση με έλεγχο τροφοδοσίας από τους συλλέκτες:** Η υλοποίηση αυτή αποτελεί ένα σημείο αναφοράς, το οποίο περιγράφει τη δυνατότητα του συστήματος σε παραγωγή ενέργειας, χωρίς την επιρροή της θερμοκρασίας του δικτύου.

Στη μέση ημέρα του χειρότερου μήνα (Δεκέμβριος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st\_max}=20,33^{\circ}\text{C}$  στις 15:00 ενώ σταθεροποιείται στις επόμενες ώρες στους  $19,87^{\circ}\text{C}$ . Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι  $2973\text{W}$  στις 12:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι  $673\text{W}$ . Για τη μέση ημέρα του Δεκέμβρη η συνολική θερμική ενέργεια είναι  $16,536\text{Wh/day}$  και η ηλεκτρική είναι  $3,989\text{Wh/day}$ .

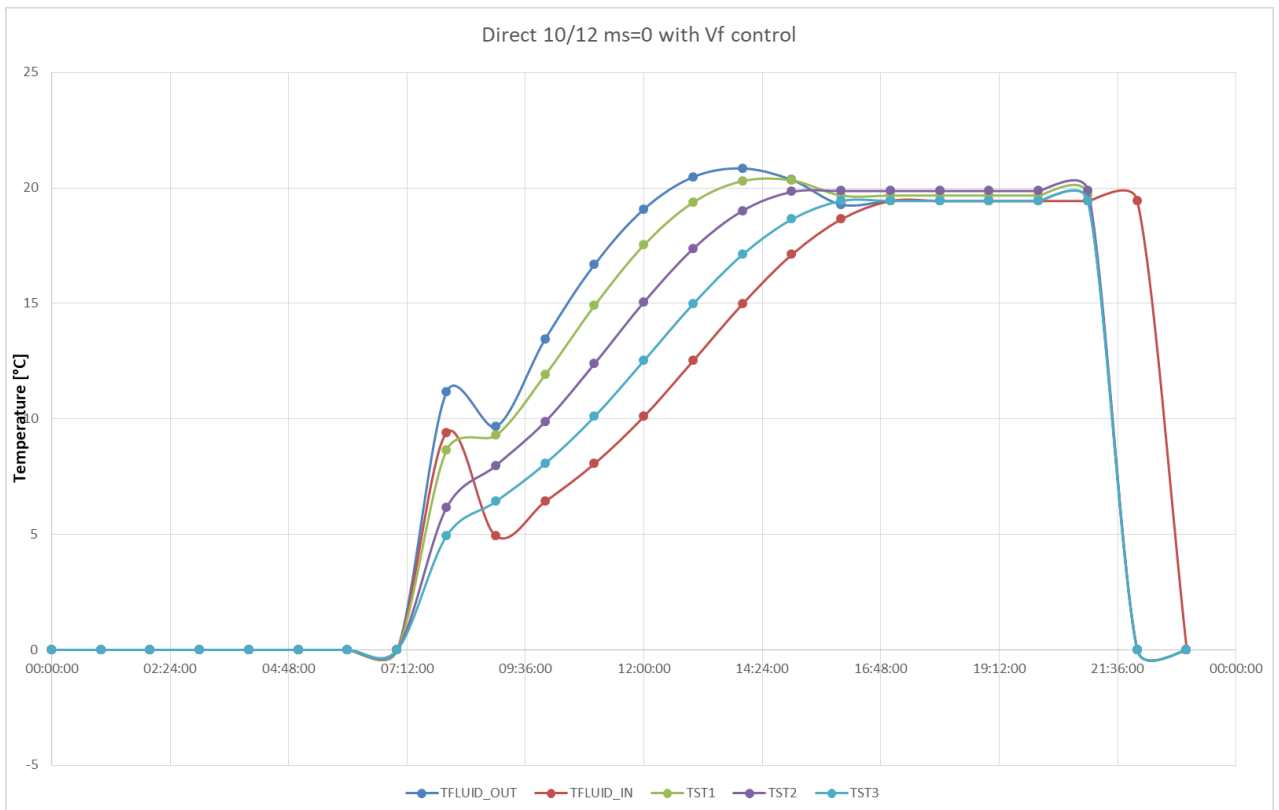
Στη μέση ημέρα του καλύτερου μήνα (Ιούλιος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st\_max}=66,44^{\circ}\text{C}$  στις 15:00, ενώ σταθεροποιείται στις επόμενες ώρες στους  $65,9^{\circ}\text{C}$ . Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι  $7525\text{W}$  στις 10:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι  $1449\text{W}$ . Στις 14:00 παρατηρείται ένα δεύτερο τοπικό μέγιστο στην ισχύ. Η μείωση της ισχύος μεταξύ 10:00 και 14:00 οφείλεται στο μεγάλο ηλιακό ύψος, το οποίο εμποδίζει την άμεσο ηλιακή ακτινοβολία να προσπέσει στην οπίσθια φωτοβολταϊκή επιφάνεια. Για τη μέση ημέρα του Ιουλίου η συνολική θερμική ενέργεια είναι  $46,238\text{Wh/day}$  και η ηλεκτρική είναι  $9,516\text{Wh/day}$ .

Σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο, οι θερμοκρασίες του δοχείου μετά τη διακοπή της παροχής των συλλεκτών μένουν σχετικά σταθερές, αφού πλέον ο μόνος λόγος για τη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι οι απώλειες του δοχείου στο περιβάλλον, οι οποίες είναι αμελητέες λόγω της ισχυρής μόνωσης (ωστόσο παρατηρήσιμες). Οι θερμοκρασίες το καλοκαίρι είναι ελαφρώς μεγαλύτερες καθώς δεν υφίσταται το ρεύμα φορτίου το οποίο ψύχει το δοχείο, ενώ το χειμώνα υπάρχει η αντίστροφη συμπεριφορά αφού το ρεύμα εισόδου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από την έξοδο των συλλεκτών.

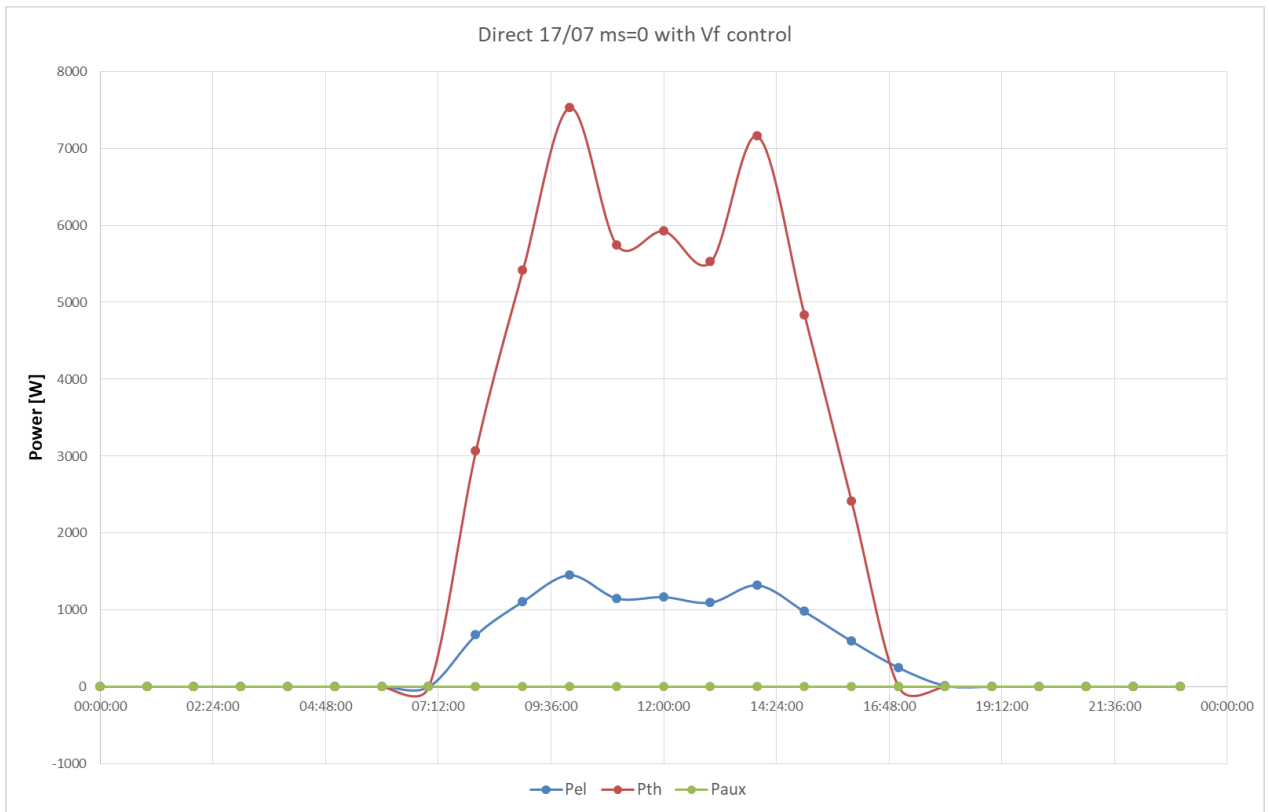
Στη διάρκεια ενός χρόνου η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι  $W_{el}=2.748.894\text{Wh}$ , η παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι  $Q_{th}=12.451.908\text{Wh}$  και η ανάγκη σε προσδιδόμενη ενέργεια είναι  $Q_{aux}=0\text{Wh}$ .



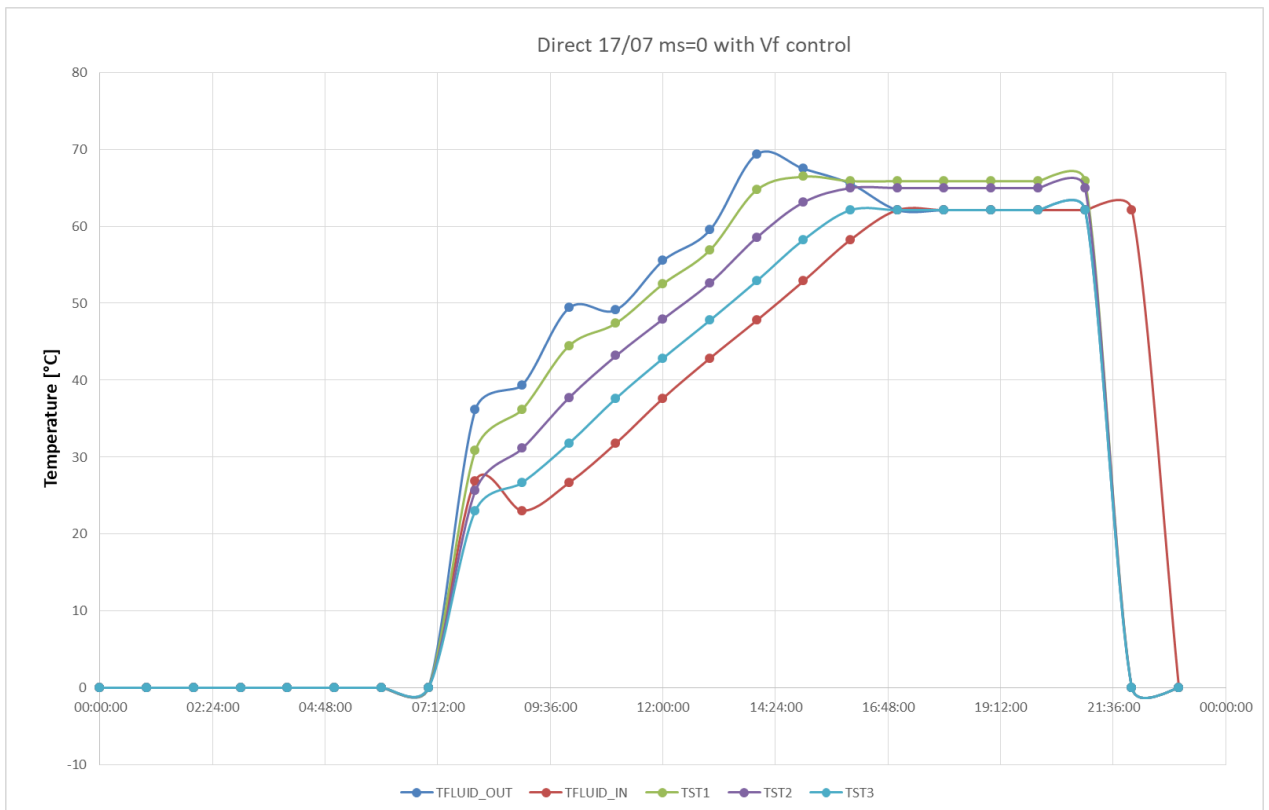
Εικόνα 6.9: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 2)



Εικόνα 6.10: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 2)



Εικόνα 6.11: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 2)



Εικόνα 6.12: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 2)

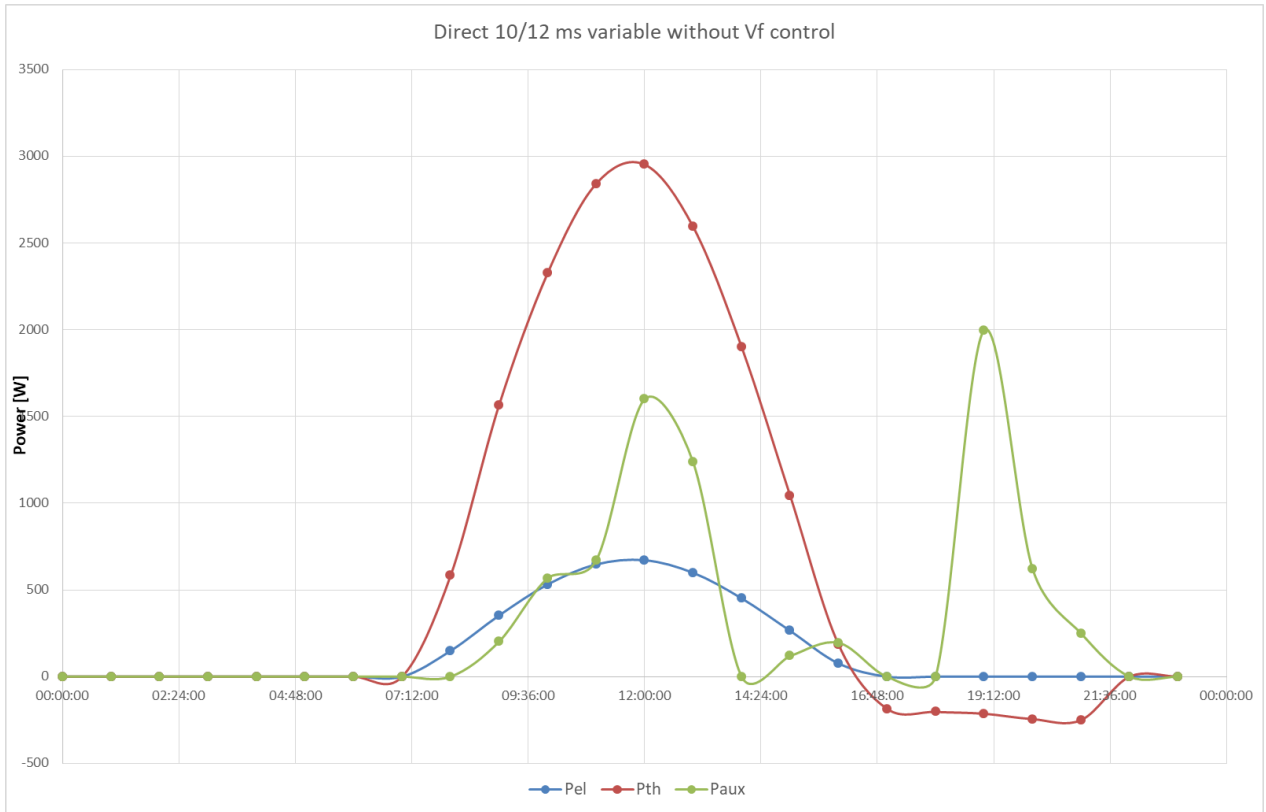
**Σενάριο 3 – Μεταβλητή ζήτηση χωρίς έλεγχο τροφοδοσίας από τους συλλέκτες:** Η μεταβλητή ζήτηση επιβάλλει επιπλέον δυσκολίες στην αποθήκευση επειδή περιλαμβάνει μία μεγάλη αιχμή ζήτησης όταν ο ήλιος έχει μειωθεί. Δεδομένου ότι το φορτίο μπορεί να ζητηθεί εκτός του διαστήματος μελέτης (08:00 με 21:00) αυτή η αιχμή προσομοιάζει τέτοιες περιπτώσεις.

Στη μέση ημέρα του χειρότερου μήνα (Δεκέμβριος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st1\_max}=21,44^{\circ}\text{C}$  στις 15:00. Λόγω της απουσίας διακοπής της παροχής στους συλλέκτες όταν  $\frac{dT_{st1}}{dt} < 0$  η θερμοκρασία στο τέλος της ημέρας φτάνει στους  $20^{\circ}\text{C}$ . Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι  $2952\text{W}$  στις 12:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι  $671\text{W}$ . Για τη μέση ημέρα του Δεκέμβρη η συνολική θερμική ενέργεια είναι  $15,087\text{Wh/day}$ , η ηλεκτρική είναι  $3,979\text{Wh/day}$  και η προσδιδόμενη ενέργεια που απαιτείται είναι  $7,248\text{Wh/day}$ .

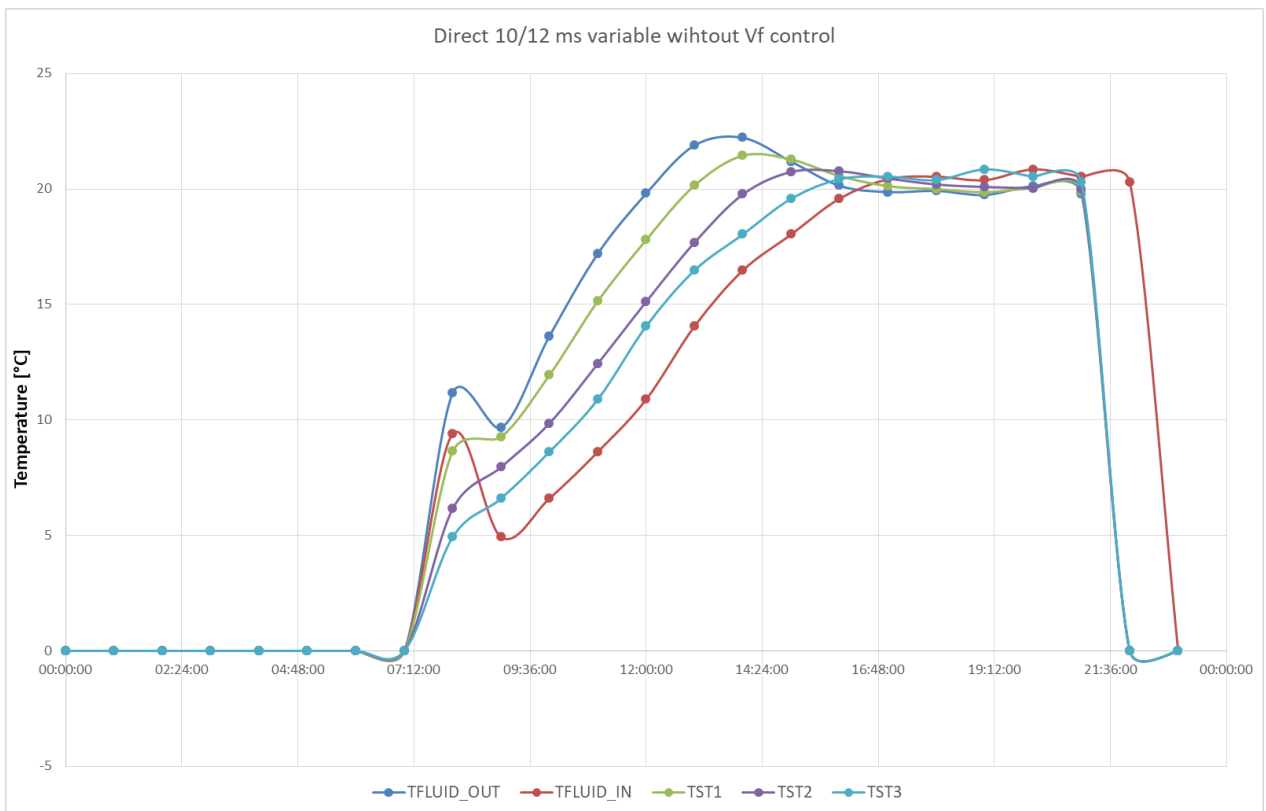
Στη μέση ημέρα του καλύτερου μήνα (Ιούλιος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st1\_max}=64^{\circ}\text{C}$  στις 15:00, λόγω της απουσίας του ελέγχου τροφοδοσίας από τους συλλέκτες η θερμοκρασία στο τέλος της ημέρας φτάνει τους  $55^{\circ}\text{C}$ . Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι  $7526\text{W}$  στις 10:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι  $1449\text{W}$ . Στις 14:00 παρατηρείται ένα δεύτερο τοπικό μέγιστο στην ισχύ. Η μείωση της ισχύος μεταξύ 10:00 και 14:00 οφείλεται στο μεγάλο ηλιακό ύψος, το οποίο εμποδίζει την άμεσο ηλιακή ακτινοβολία να προσπέσει στην οπίσθια φωτοβολταϊκή επιφάνεια. Για τη μέση ημέρα του Ιουλίου η συνολική θερμική ενέργεια είναι  $43,648\text{Wh/day}$ , η ηλεκτρική είναι  $9,573\text{Wh/day}$  και η προσδιδόμενη ενέργεια που απαιτείται είναι  $232\text{Wh/day}$ .

Η σημαντικότερη διαφορά σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια, είναι ότι από ένα οριακό σημείο και μετά (την αλλαγή κλίσης του  $T_{st1}$ ) το ρευστό το οποίο κυκλοφορεί στους συλλέκτες αποβάλλει αντί να προσλαμβάνει θερμότητα μειώνοντας αισθητά την απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, η  $T_{st1}$  μειώνεται για πρώτη φορά στις 16:00 και η πρώτη αρνητική τιμή ισχύος εμφανίζεται στις 18:00. Στα προηγούμενα σενάρια η παροχή στους συλλέκτες είχε μηδενιστεί στις 17:00.

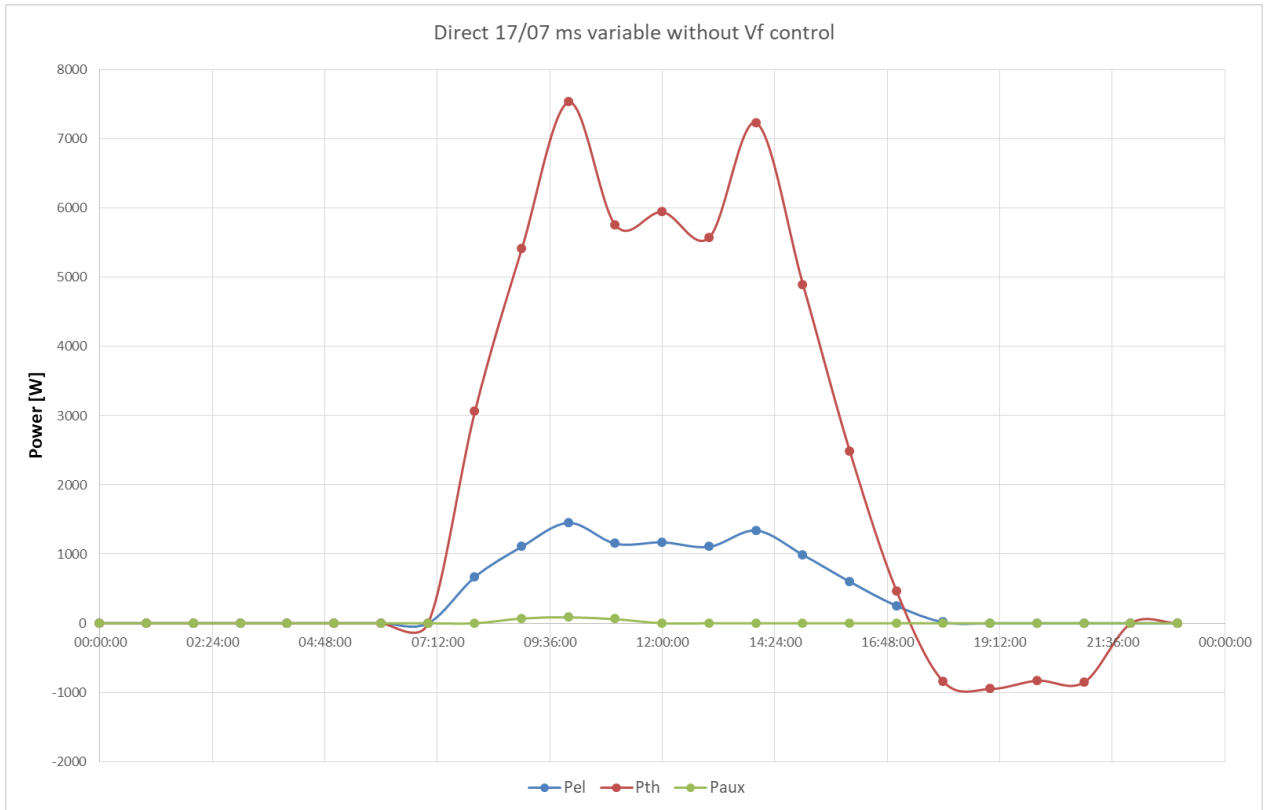
Στη διάρκεια ενός χρόνου η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι  $W_{el}=2.754.594\text{Wh}$ , η παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι  $Q_{th}=11.576.281\text{Wh}$  και η ανάγκη σε προσδιδόμενη ενέργεια είναι  $Q_{aux}=1.205.675\text{Wh}$ .



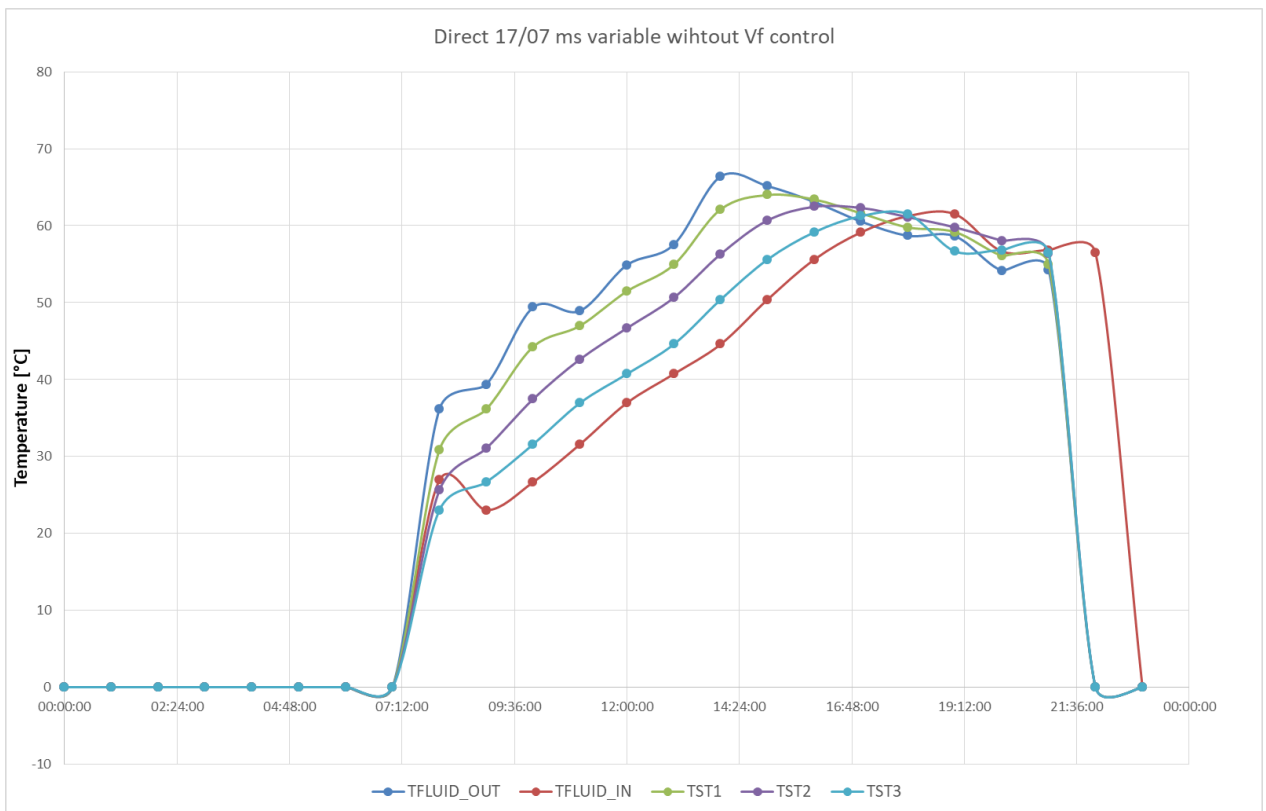
Εικόνα 6.13: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 3)



Εικόνα 6.14: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 3)



Εικόνα 6.15: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 3)



Εικόνα 6.16: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 3)

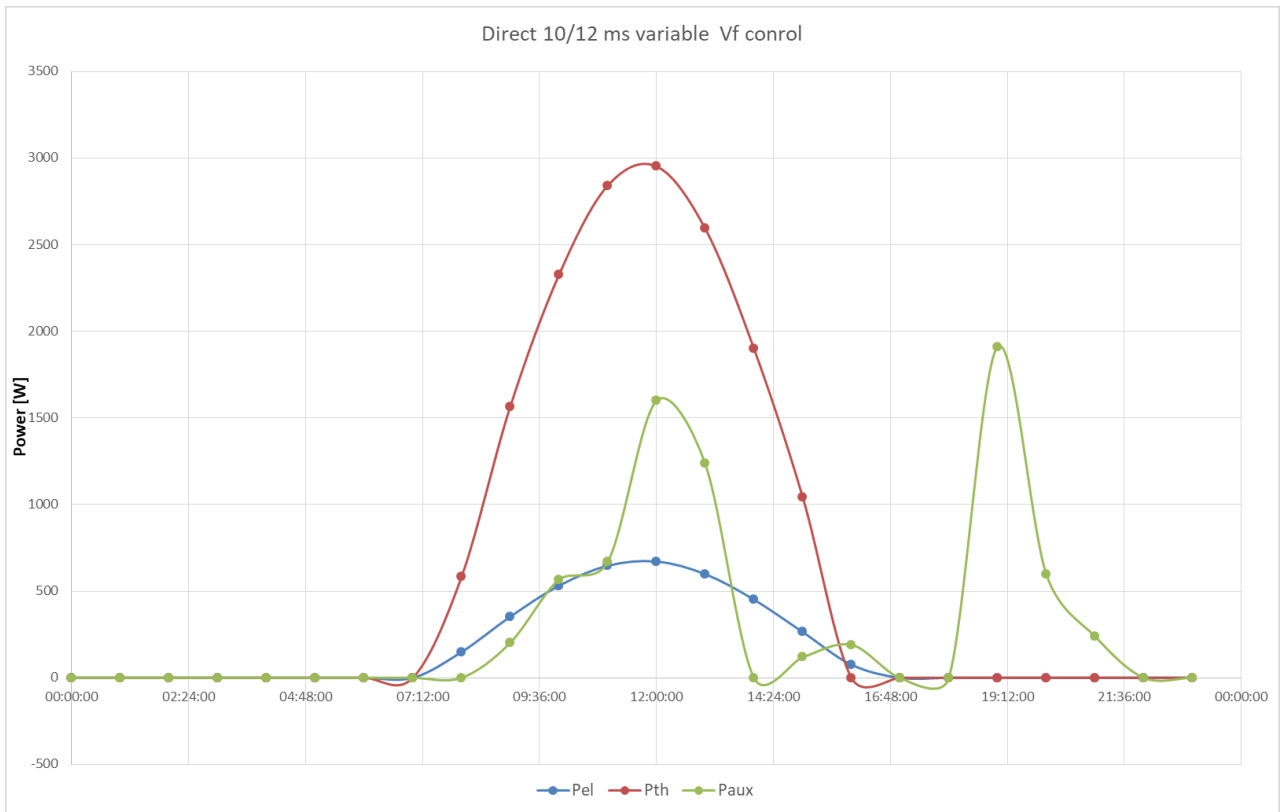
**Σενάριο 4 - Μεταβλητή ζήτηση με έλεγχο τροφοδοσίας από τους συλλέκτες:** Το σενάριο αυτό αποτελεί την πιο πιθανή περίπτωση για μία πραγματική εφαρμογή, καθώς συνδυάζει τη μεταβλητή φύση του φορτίου σε συνδυασμό με τον έλεγχο τροφοδοσίας στους συλλέκτες.

Στη μέση ημέρα του χειρότερου μήνα (Δεκέμβριος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st1\_max}=21,4^{\circ}\text{C}$  στις 15:00 ενώ σταθεροποιείται στις επόμενες ώρες στους  $20,7^{\circ}\text{C}$ . Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι 2952W στις 12:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι 671W. Για τη μέση ημέρα του Δεκέμβρη η συνολική θερμική ενέργεια είναι 16,536Wh/day, η ηλεκτρική είναι 3,989 Wh/day και η προσδιδόμενη ενέργεια που απαιτείται είναι 7098Wh/day.

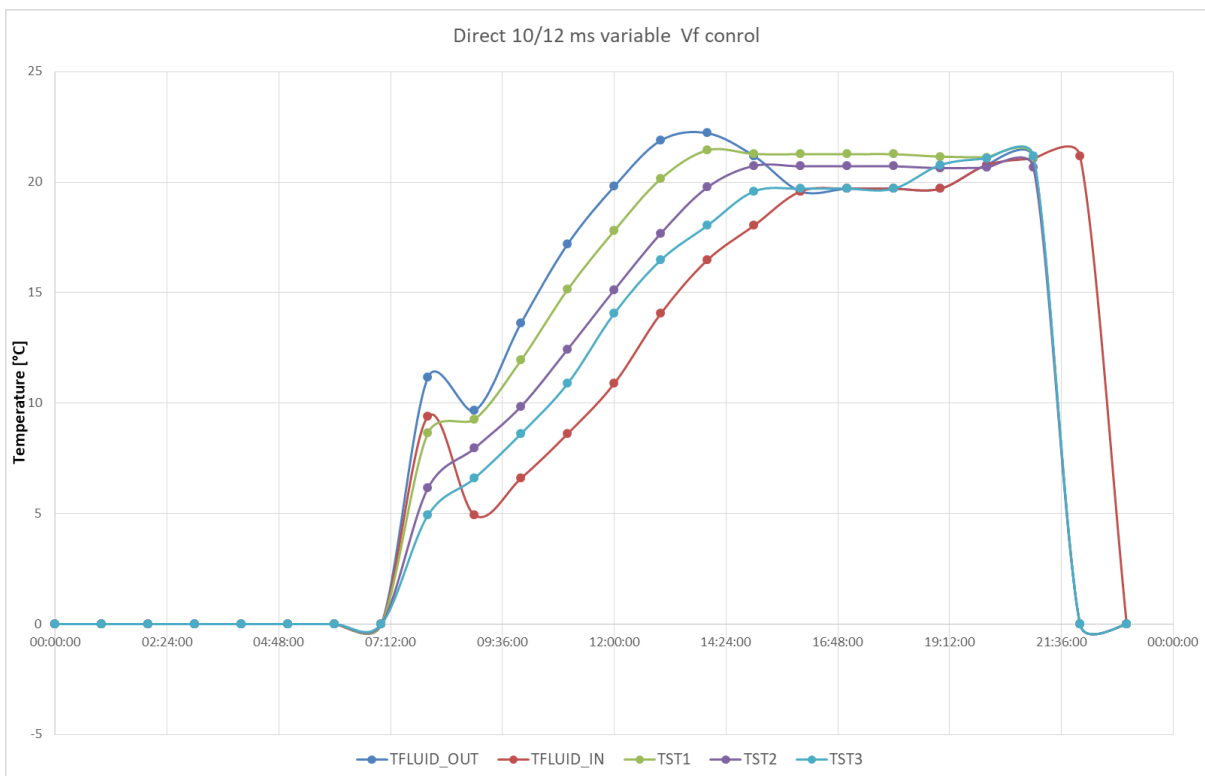
Στη μέση ημέρα του καλύτερου μήνα (Ιούλιος) η μέγιστη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος είναι  $T_{st1\_max}=66,44^{\circ}\text{C}$  στις 15:00, ενώ σταθεροποιείται στις επόμενες ώρες στους  $65,9^{\circ}\text{C}$ . Η μέγιστη παραγόμενη θερμική ισχύς είναι 7525W στις 10:00 και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι 1449W. Στις 14:00 παρατηρείται ένα δεύτερο τοπικό μέγιστο στην ισχύ. Η μείωση της ισχύος μεταξύ 10:00 και 14:00 οφείλεται στο μεγάλο ηλιακό ύψος, το οποίο εμποδίζει την άμεσο ηλιακή ακτινοβολία να προσπέσει στην οπίσθια φωτοβολταϊκή επιφάνεια. Για τη μέση ημέρα του Ιουλίου η συνολική θερμική ενέργεια είναι 46,523Wh/day, η ηλεκτρική είναι 9,574 Wh/day και η προσδιδόμενη ενέργεια που απαιτείται είναι 232Wh/day.

Στη διάρκεια ενός χρόνου η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι  $W_{el}=2.754.690\text{Wh}$ , η παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι  $Q_{th}=12.466.226\text{Wh}$  και η ανάγκη σε προσδιδόμενη ενέργεια είναι  $Q_{aux}=1.147.592\text{Wh}$ .

Σε σύγκριση με το σενάριο 3, το οποίο δεν περιλαμβάνει έλεγχο της παροχής προς τους συλλέκτες, η ηλεκτρική παραγωγή παραμένει στα ίδια επίπεδα, αλλά η παραγόμενη θερμότητα αυξάνεται κατά 7% στο εύρος του χρόνου και οι ανάγκες σε προσδιδόμενη ενέργεια μειώνεται κατά 5%. Για αυτό το λόγο, η σύγκριση μεταξύ της απόδοσης του συστήματος στην Ελλάδα και στο Ηνωμένο Βασίλειο θα πραγματοποιηθεί με γνώμονα το σενάριο 4.

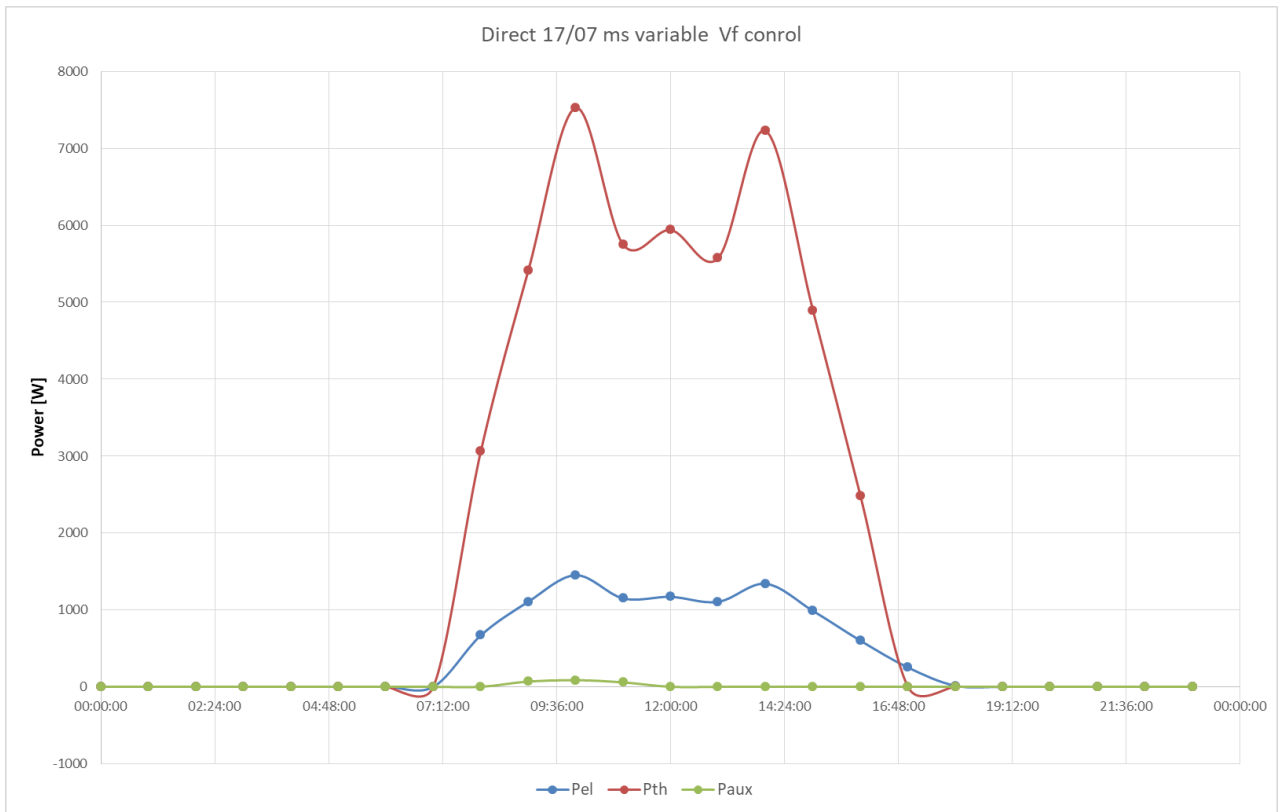


Εικόνα 6.17: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 4)

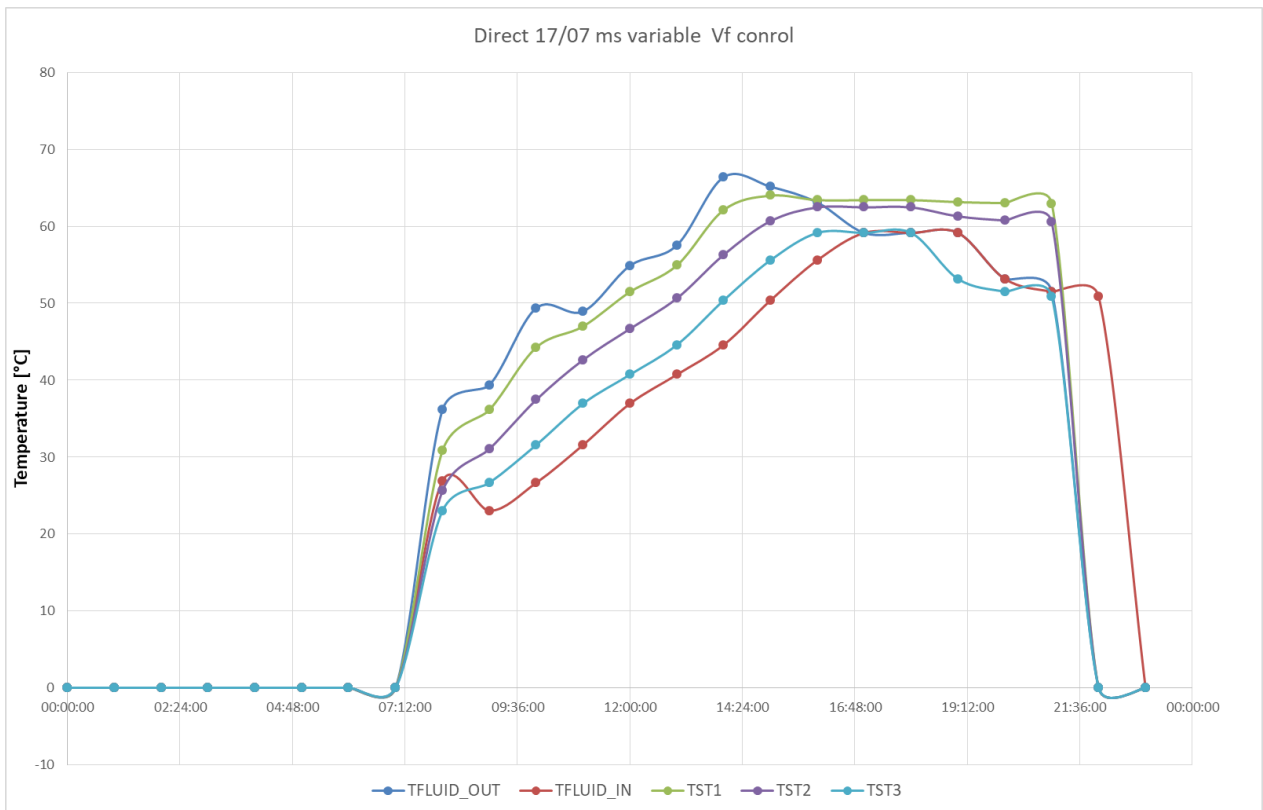


Εικόνα 6.18: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 4)





Εικόνα 6.19: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 4)



Εικόνα 6.20: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 4)

### Σύγκριση απόδοσης της διάταξης PVT για το σενάριο 4, στο Ελληνικό και στο Moat

Το σενάριο 4 είναι το πιο ρεαλιστικό σενάριο όσον αφορά το φορτίο και την παραγωγή. Ο μηδενισμός της παροχής στην περίπτωση πτώσης της θερμοκρασίας του πρώτου στρώματος είναι λογική καθώς φάνηκε από τα διαγράμματα του σεναρίου 3, ότι χάνεται θερμική ενέργεια με την κυκλοφορία του ψυκτικού ρευστού κατά το απόγευμα. Ενώ η κατανομή του φορτίου που παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου είναι η πλέον αληθοφανής.

Βάσει αυτών των παραμέτρων εξετάστηκε η παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός χρόνου. Επίσης, υπολογίστηκε ο συνολικός βαθμός απόδοσης της διάταξης βάσει της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην συνολική επιφάνεια του συλλέκτη. Για το λόγο ότι η διάρκεια της ημέρας είναι διαφορετική για την Αγγλία, η μελέτη διευρύνθηκε από τις 06:00 μέχρι τις 22:00. Επίσης, ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία για την αρχική συνθήκη του ρευστού αποθήκευσης θεωρήθηκαν οι 5°C. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 6.3: Σύγκριση παραγωγής και συντελεστών απόδοσης για τη διάταξη CPC-PVT σε Moat και Ελληνικό με ηλιακά δεδομένα από το μοντέλο**

	Moat	Ελληνικό	Απόλυτη διαφορά	Σχετική διαφορά
<b><math>E_{\text{electrical}}</math> (Wh/a)</b>	1.824.661,02	2.801.396,83	976.735,82	34,87%
<b><math>Q_{\text{thermal}}</math> (Wh/a)</b>	7.579.086,85	12.616.894,91	5.037.808,06	39,93%
<b><math>Q_{\text{auxiliary}}</math> (Wh/a)</b>	2.257.322,04	1.027.291,90	-1.230.030,14	-119,74%
<b>Συνολική παγκόσμια ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (Wh/a)</b>	9.593.182,93	17.083.532,64	7.490.349,72	43,85%
<b><math>PR_{\text{electrical}}</math> (%)</b>	19,02%	16,40%		
<b><math>PR_{\text{thermal}}</math> (%)</b>	79,00%	73,85%		
<b>Απώλειες (%)</b>	1,97%	9,75%		

Είναι αναμενόμενο το γεγονός ότι το Ελληνικό υπερέχει σε απόλυτους αριθμούς απέναντι στο Moat, δεδομένου ότι η διαθέσιμη ενέργεια είναι σχεδόν διπλάσια (43,85% διαφορά στην ηλιακή ενέργεια υπέρ του Ελληνικού). Στον αντίποδα, οι συντελεστές απόδοσης (Performance Ratio – PR) είναι οριακά καλύτεροι για τη θέση στο Ηνωμένο Βασίλειο. Κύριος λόγος για αυτή την υπεροχή είναι η ηλιακή γεωμετρία, η οποία επιτρέπει την εκμετάλλευση της οπίσθιας φωτοβολταϊκής επιφάνειας για όλες τις ώρες του χρόνου. Ένας επιπλέον λόγος είναι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα βοηθητικές για την ηλεκτροπαραγωγή.

Η σημαντικότερη διαφορά βρίσκεται στην απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην οποία το Moat υπερέχει κατά δύο ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με το Ελληνικό. Αυτή η διαφορά έχει ακόμα μεγαλύτερο βάρος, εάν συλλογιστούμε ότι το 18% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Κάτι το οποίο συνάδει με συγκρίσεις αποτελεσμάτων από Φωτοβολταϊκά πάρκα στην Ελλάδα και στο Ηνωμένο βασίλειο. Όσο πιο κοντά στον ισημερινό κινούμαστε, τότε μεγαλύτερες είναι οι θερμικές απώλειες, οπότε για χώρες νοτιότερα από την Ελλάδα, τα Φωτοβολταϊκά ίσως είναι η λιγότερο ενδεδειγμένη λύση για ηλεκτροπαραγωγή σε σχέση με άλλες διεξόδους (πχ. ηλιοθερμική παραγωγή).

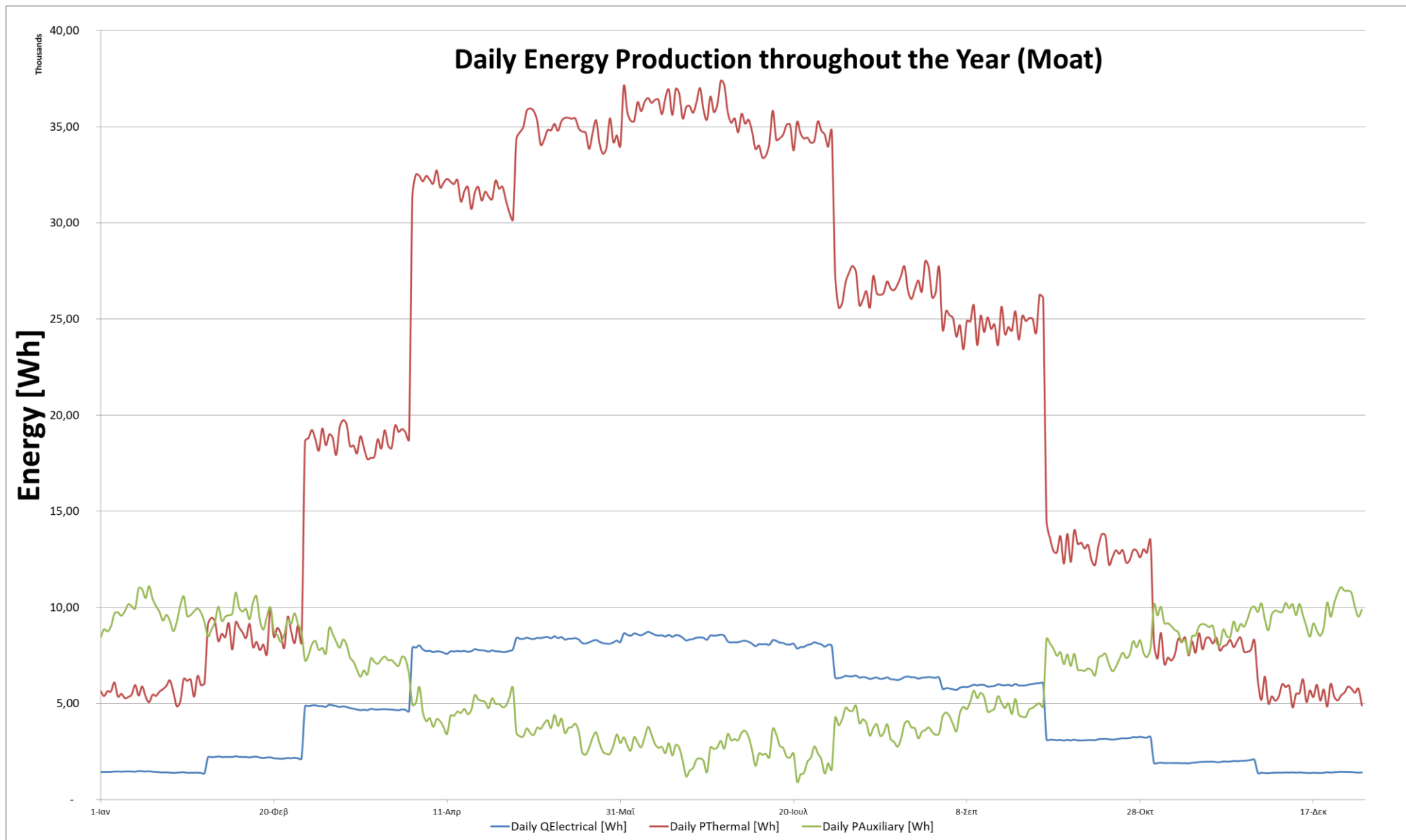
Τέλος, έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι στο εύρος ενός χρόνου το σύστημα C-PVT μπορεί να υποστηρίξει την κατανάλωση λόγω  $Q_{aux}$  στην Ελλάδα, αλλά όχι στην Αγγλία. Σε τέτοια περίπτωση προτείνεται η αύξηση του μεγέθους της εγκατάστασης στην Αγγλία.

Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται διαγράμματα της ηλεκτρικής, θερμικής και προσδιδόμενης ημερήσιας ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Στην περίπτωση του Ελληνικού έχει προστεθεί και το διάγραμμα το οποίο περιλαμβάνει τις ώρες της ημέρας για τις οποίες το ηλιακό ύψος είναι μικρότερο των  $60^\circ$ . Αυτό είναι σημαντικό για να δικαιολογηθούν οι απότομες μειώσεις της ενέργειας στη διάρκεια του ίδιου μήνα.

### Daily Energy Production throughout the Year (Elliniko)



Εικόνα 6.6: Ηλεκτρική, θερμική και προσδιδόμενη ενέργεια για τη διάρκεια ενός χρόνου στο Ελληνικό



Εικόνα 6.7: Ηλεκτρική, θερμική και προσδιδόμενη ενέργεια για τη διάρκεια ενός χρόνου στο Ελληνικό

## Σύγκριση συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής με ηλεκτροπαραγωγή με παραβολικό κάτοπτρο

Το PVsyst είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης φωτοβολταϊκών πάρκων, το οποίο αντλεί μετεωρολογικά δεδομένα από τη βάση Meteoprom και για δεδομένο σχεδιασμό, παρέχει τα αποτελέσματα για την ηλεκτροπαραγωγή. Ένα χρήσιμο εργαλείο αυτού του προγράμματος είναι το διάγραμμα απωλειών, στο οποίο εμφανίζονται λεπτομερώς όλες οι απώλειες του πάρκου, από την προσπίπτουσα ακτινοβολία μέχρι την κατανάλωση. Στις εικόνες 6.23 και 6.24 παρατίθενται τα διαγράμματα απωλειών για τα πάρκα που προσομοιώθηκαν, τα οποία έχουν την ίδια γεωμετρία και τοποθεσία με αυτά της εργασίας. Με κατάλληλη προσαρμογή για την διαφορετική ποιότητα φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορούν να αξιολογηθούν οι διαφορές στους συντελεστές απόδοσης. Ο Πίνακας 6.4 συνοψίζει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε ώστε να υπολογιστεί ο ηλεκτρικός συντελεστής απόδοσης των συμβατικών πάρκων, όπως αυτά προσομοιώθηκαν στο PVsyst, ώστε να είναι ισοδύναμος με αυτόν του Πίνακα 6.3.

Δεδομένα είναι τα μεγέθη της απορροφούμενης ακτινοβολίας ( $S$ ), της φωτοβολταϊκής επιφάνειας ( $A_{PV}$ ), όλων των απωλειών ( $L$ ), της ενέργειας μετά τις προαναφερθείσες απώλειες ( $E_{L\_ALL}$ ), η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων της προσομοίωσης ( $n_{ref\_risen}=15.9\%$ ) και των φωτοβολταϊκών στοιχείων της Solarus για τα οποία έχουν γίνει οι υπολογισμοί του μοντέλου ( $n_{ref\_sol}=18.6\%$ ).

Η απόδοση που υπολογίστηκε στις προηγούμενες σελίδες εκφράζεται ως η ηλεκτρική ενέργεια μετά τις απώλειες προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $L_{IAM}$ ) και θερμοκρασίας ( $L_{TEMP}$ ) ως προς τη συνολική προσπίπτουσα ενέργεια στην επιφάνεια του συλλέκτη ( $E_{EFF}$ ). Στη συνέχεια αυτός ο συντελεστής απόδοσης ( $PR_{L\_TEMP}$ ) πρέπει να προσαρμοστεί για τα φωτοβολταϊκά καλύτερης απόδοσης που χρησιμοποιούνται στην πειραματική διάταξη της εργασίας ( $PR_{L\_TEMP\_SOL}$ ). Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από την παρακάτω αλληλουχία τύπων:

$$I_{INC} = \frac{S}{1 - L_{IAM}} \quad (6.2)$$

$$E_{INC} = I_{INC} \cdot A_{PV} \quad (6.3)$$

$$S_{SOL} = S \frac{n_{ref\_sol}}{n_{ref\_risen}} \quad (6.4)$$

$$PR_{ALL} = \frac{E_{L\_ALL}}{E_{EFF}} \quad (6.5)$$

$$E_{L\_TEMP} = E_{L\_ALL} \frac{1 + L_{TEMP}}{1 + L_{ALL}} \quad (6.6)$$

$$PR_{L\_TEMP} = \frac{E_{L\_TEMP}}{E_{EFF}} \quad (6.7)$$

$$E_{L\_TEMP\_SOL} = E_{L\_TEMP} \frac{n_{ref\_sol}}{n_{ref\_risen}} \quad (6.8)$$

$$PR_{L\_TEMP\_SOL} = \frac{E_{L\_TEMP\_SOL}}{E_{EFF\_SOL}} \quad (6.9)$$

Με αυτή τη διαδικασία διασφαλίζεται ότι ο δείκτης απόδοσης  $PR_{L\_TEMP\_SOL}$  είναι αντίστοιχος του συντελεστή απόδοσης  $PR_{electrical}$  του Πίνακα 6.3.

**Πίνακας 6.4: Συγκεντρωτικός πίνακας απόδοσης συμβατικού φωτοβολταϊκού**

Μέγεθος	Συντομογραφία	Moat	Ελληνικό
Προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια του PV [kWh/m <sup>2</sup> ]	I <sub>INC</sub>	1.137,26	1.904,68
Προσπίπτουσα ενέργεια στην επιφάνεια του PV [kWh]	E <sub>INC</sub>	510.631,54	855.200,87
Απώλειες προσπίπτουσας ακτινοβολίας [%]	L <sub>IAM</sub>	-3,20%	-2,90%
Απορροφούμενη ακτινοβολία [kWh/m <sup>2</sup> ]	S	1.102,00	1.851,00
Απορροφούμενη ακτινοβολία για τα Solarus PV [kWh/m <sup>2</sup> ]	S <sub>SOL</sub>	1.289,13	2.165,32
Επιφάνεια PV [m <sup>2</sup> ]	A <sub>PV</sub>	449,00	449,00
Απορροφούμενη ενέργεια [kWh]	E <sub>EFF</sub>	494.798,00	831.099,00
Απορροφούμενη ενέργεια για τα Solarus PV [kWh]	S <sub>SOL</sub>	578.820,30	972.229,02
Απώλειες λόγω θερμοκρασίας [%]	L <sub>TEMP</sub>	-1,00%	-5,80%
Απώλειες λόγω επιπέδου ακτινοβολίας [%]	L <sub>IRR</sub>	-0,90%	-0,10%
Απώλειες λόγω ποιότητας PV [%]	L <sub>QUAL</sub>	0,70%	0,80%
Απώλειες LID [%]	L <sub>LID</sub>	-2,00%	-2,00%
Απώλειες μη συνταιριασμένων PV [%]	L <sub>MM</sub>	-1,00%	-1,00%
Ωμικές απώλειες [%]	L <sub>OHM</sub>	-0,50%	-0,70%
Ενέργεια μετά τις παραπάνω απώλειες [kWh]	E <sub>L\_ALL</sub>	75.500,00	121.400,00
Απόδοση με όλες τις απώλειες [%]	PR <sub>L\_ALL</sub>	14,79%	14,20%
Ενέργεια μετά από τις απώλειες θερμοκρασίας [kWh]	E <sub>L\_TEMP</sub>	78.431,27	125.393,42
Απόδοση μετά από τις απώλειες θερμοκρασίας [%]	PR <sub>L\_TEMP</sub>	15,85%	15,09%
Ενέργεια μετά από τις απώλειες θερμοκρασίας για τα Solarus PV [kWh]	E <sub>L\_TEMP\_SOL</sub>	91.749,79	146.686,64
Απόδοση μετά από τις απώλειες θερμοκρασίας για τα Solarus PV [%]	PR <sub>L\_TEMP\_SOL</sub>	<b>17,97%</b>	<b>17,15%</b>

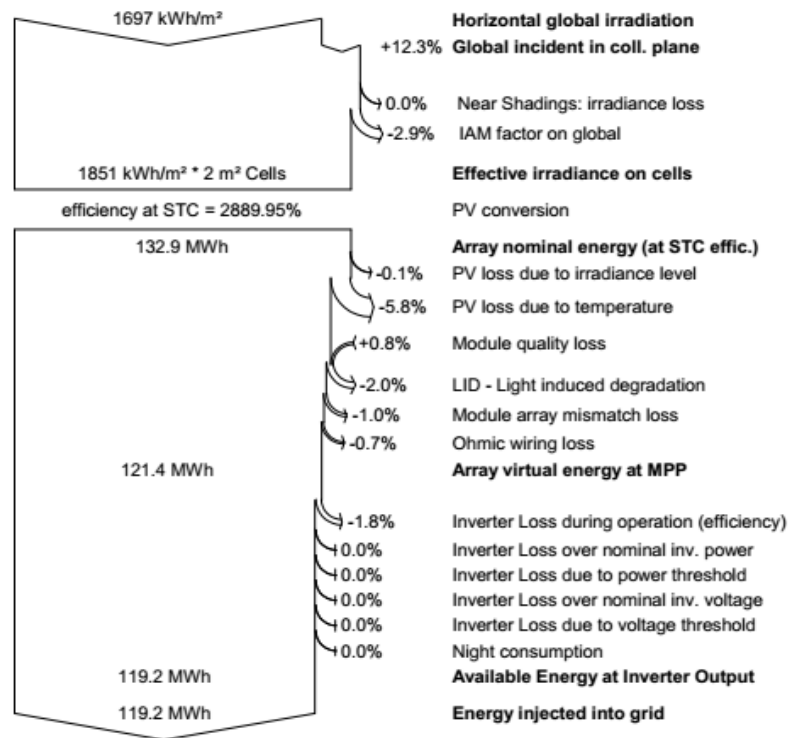
Συνοπτικά, λοιπόν, για το Moat ο συντελεστής απόδοσης ενός τυπικού φωτοβολταϊκού είναι 17,97% και με το παραβολικό κάτοπτρο βελτιώνεται και φτάνει στο 19,02%. Για το Ελληνικό, όμως, υπάρχει μείωση από 17,15% σε 16,4%. Αυτό σημαίνει, ότι τα οφέλη της καλύτερης απαγωγής θερμότητας δεν μπορούν να αντισταθμίσουν την απώλεια αμέσου ακτινοβολίας λόγω του μεγάλου ηλιακού ύψους. Στον αντίποδα για το Ηνωμένο Βασίλειο, στο οποίο το ηλιακό ύψος δεν ξεπερνά ποτέ τη γωνία απόρριψης, το παραβολικό κάτοπτρο του συλλέκτη σε συνδυασμό και με τη βελτιωμένη απαγωγή θερμότητας φαίνεται να ευνοεί τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού.

### Grid-Connected System: Loss diagram

**Project :** Elliniko  
**Simulation variant :** New simulation variant

<b>Main system parameters</b>	System type	<b>Grid-Connected</b>	
<b>Near Shadings</b>	Linear shadings		
PV Field Orientation	tilt	30°	azimuth 0°
PV modules	Model	RSM60-6-260P	Pnom 260 Wp
PV Array	Nb. of modules	276	Pnom total <b>71.8 kWp</b>
Inverter	Model	SG60KTL	Pnom 60.0 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)		

#### Loss diagram over the whole year



PVysyst Licensed to ELECTROMECH S.A. (Greece)

Εικόνα 6.23: Διάγραμμα απωλειών από PVsyst για συμβατική ηλεκτροπαραγωγή στο Ελληνικό



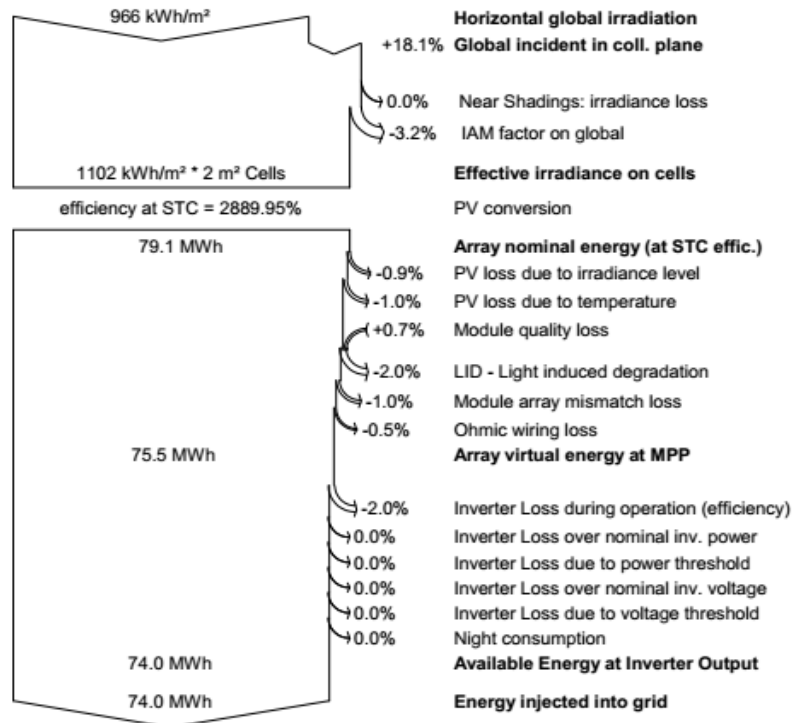
### Grid-Connected System: Loss diagram

**Project :**

**Simulation variant : MOAT**

Main system parameters	System type	Grid-Connected	
<b>Near Shadings</b>	Linear shadings		
PV Field Orientation	tilt	30°	azimuth 0°
PV modules	Model	RSM60-6-260P	Pnom 260 Wp
PV Array	Nb. of modules	276	Pnom total <b>71.8 kWp</b>
Inverter	Model	SG60KTL	Pnom 60.0 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)		

#### Loss diagram over the whole year



PVsynt Licensed to ELECTROMECC S.A. (Greece)

Εικόνα 6.24: Διάγραμμα απωλειών από PVsynt για συμβατική ηλεκτροπαραγωγή στο Moat.

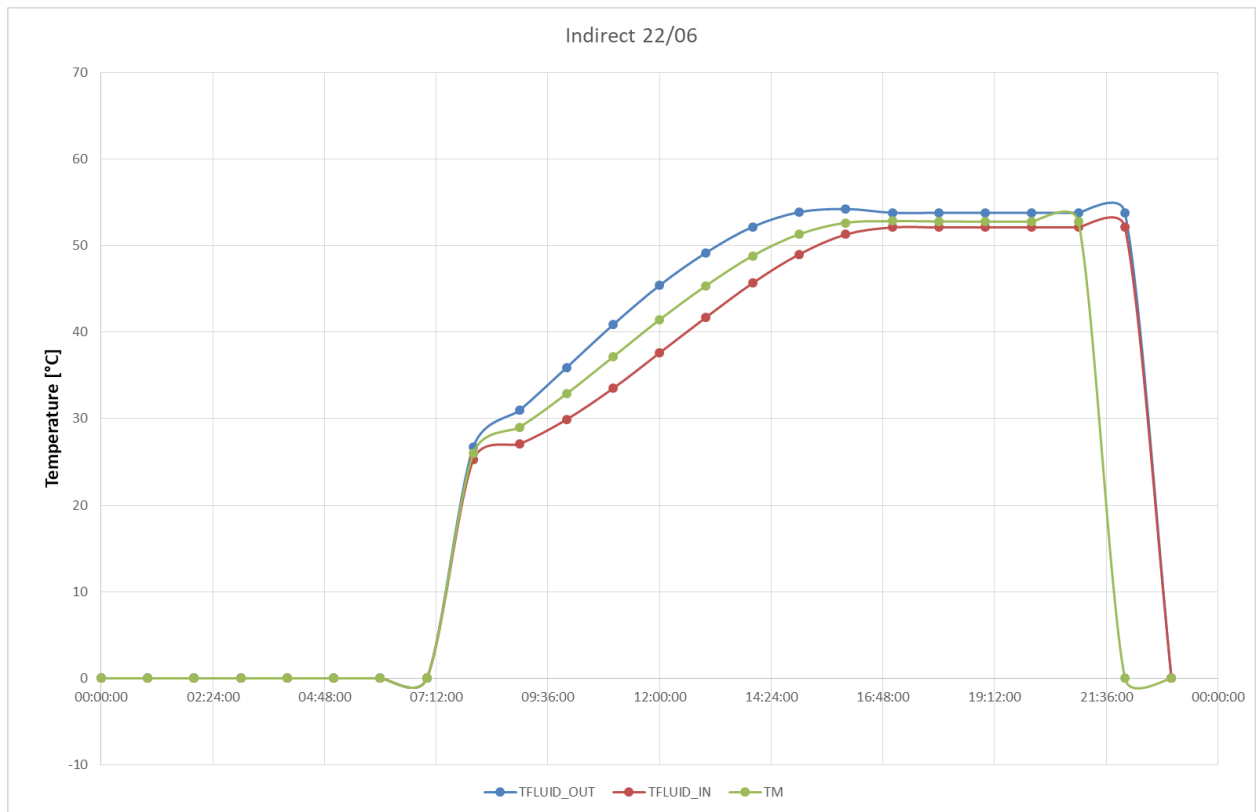
### 6.3 Έμμεση αποθήκευση

Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, η έμμεση αποθήκευση επιτρέπει μόνο την επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά τη μέση θερμοκρασία του μέσου του στρώματος στο δοχείο αποθήκευσης ( $T_m$ ).

Ως εκ τούτου, παρακάτω παρατίθενται δειγματοληπτικά δύο γραφικές παραστάσεις, στις οποίες έχει υπολογιστεί το  $T_m$  για δεδομένες τιμές εισόδου και εξόδου. Οι τιμές αυτές βρίσκονται εντός 10% με τις πειραματικές τιμές, οπότε η μοντελοποίηση θεωρείται επιτυχής.

**Πίνακας 6.5: Πίνακας με θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα για την έμμεση αποθήκευση στις 22/06/2016**

<b>Date</b> <b>[dd/mm/yyyy</b> <b>hh:mm]</b>	<b>T<sub>COL_OUT</sub></b>	<b>T<sub>COL_IN</sub></b>	<b>T<sub>M</sub></b>	<b>T<sub>M_EXP</sub></b>	<b>(T<sub>M_EXP</sub>- T<sub>M_EXP</sub>)/T<sub>M_EXP</sub></b>
22/6/2016 0:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 1:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 2:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 3:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 4:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 5:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 6:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 7:00	0,00	0,00	0,00		
22/6/2016 8:00	26,73	25,28	26,01		
22/6/2016 9:00	31,00	27,08	29,03		
22/6/2016 10:00	35,90	29,90	32,88		
22/6/2016 11:00	40,85	33,50	37,13	37,26	0,33%
22/6/2016 12:00	45,40	37,60	41,44	41,42	-0,05%
22/6/2016 13:00	49,18	41,72	45,37	45,88	1,12%
22/6/2016 14:00	52,17	45,67	48,82	50,46	3,25%
22/6/2016 15:00	53,87	48,98	51,31	54,24	5,39%
22/6/2016 16:00	54,23	51,28	52,64		
22/6/2016 17:00	53,80	52,10	52,83		
22/6/2016 18:00	53,80	52,10	52,80		
22/6/2016 19:00	53,80	52,10	52,77		
22/6/2016 20:00	53,80	52,10	52,77		
22/6/2016 21:00	53,80	52,10	52,77		
22/6/2016 22:00	53,80	52,10	52,77		

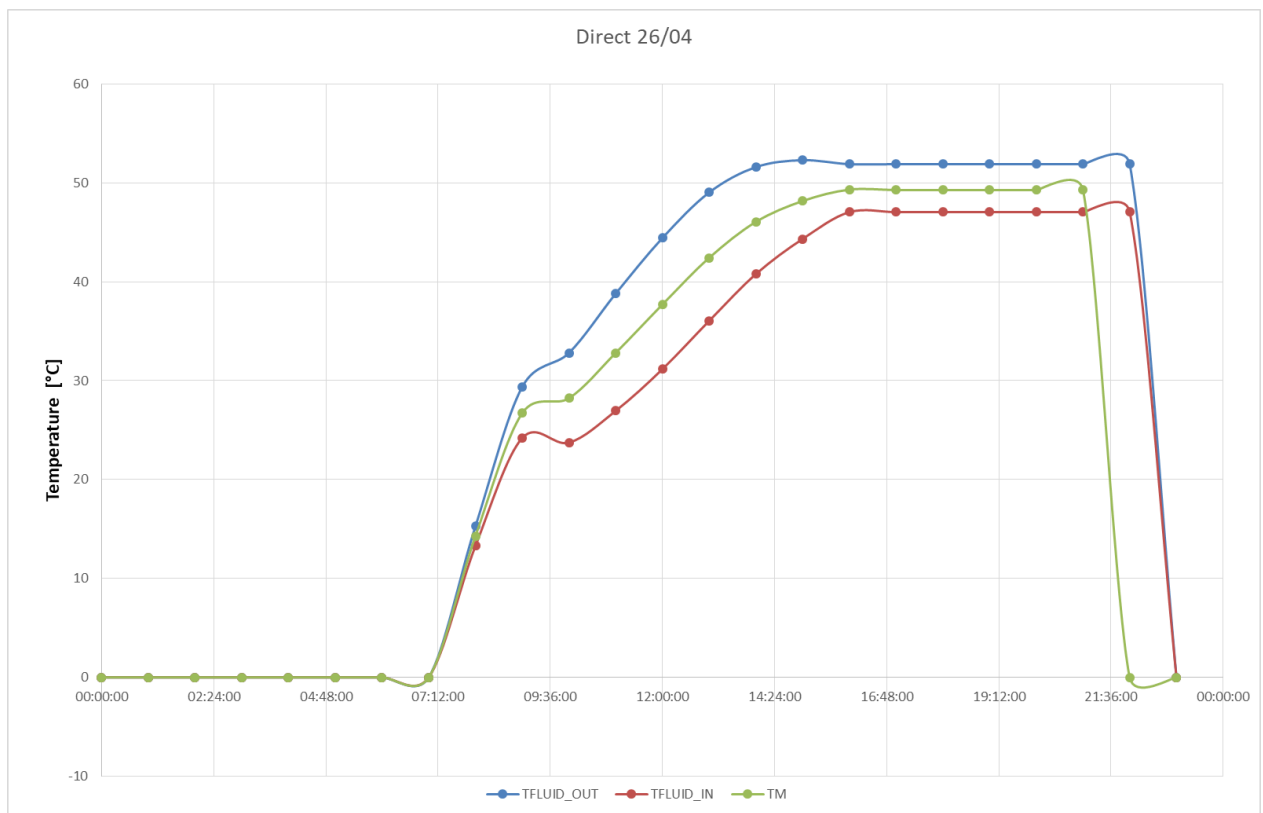


Εικόνα 6.25: Μοντελοποίηση της έμμεσης αποθήκευσης για τις 22/06

Πίνακας 6.6: Πίνακας με θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα για την έμμεση αποθήκευση στις 26/04/2016

Date [dd/mm/yyyy hh:mm]	$T_{COL\_OUT}$	$T_{COL\_IN}$	$T_M$	$T_{M\_EXP}$	$\frac{(T_{M\_EXP} - T_{M\_EXP})}{T_{M\_EXP}}$
26/4/2016 0:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 1:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 2:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 3:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 4:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 5:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 6:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 7:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 8:00	0,00	0,00	0,00		
26/4/2016 9:00	15,29	13,30	14,30		
26/4/2016 10:00	29,38	24,20	26,72	23,13	-15,55%
26/4/2016 11:00	32,80	23,73	28,22	27,15	-3,95%
26/4/2016 12:00	38,80	26,95	32,81	32,28	-1,65%
26/4/2016 13:00	44,43	31,17	37,71	37,88	0,46%

26/4/2016 14:00	49,03	36,05	42,43	43,05	1,45%
26/4/2016 15:00	51,60	40,78	46,06	47,55	3,14%
26/4/2016 16:00	52,30	44,33	48,17	50,98	5,51%
26/4/2016 17:00	51,90	47,05	49,33		
26/4/2016 18:00	51,90	47,05	49,28		
26/4/2016 19:00	51,90	47,05	49,28		
26/4/2016 20:00	51,90	47,05	49,28		
26/4/2016 21:00	51,90	47,05	49,28		
26/4/2016 22:00	51,90	47,05	49,28		



Εικόνα 6.26: Μοντελοποίηση της έμμεσης αποθήκευσης για τις 26/04

## Κεφάλαιο 7: Επίλογος

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γίνονται ελκυστικότερες λύσεις με την πάροδο του χρόνου για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας λόγω του αυξημένου ρυθμού εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων, της αστάθειας στην τιμή τους και την επίπτωσή τους στο περιβάλλον. Τα συστήματα που αξιοποιούν Υβριδικά Φωτοβολταϊκά/Θερμικά στοιχεία προσφέρουν μία πλήρη λύση για τις ενεργειακές ανάγκες μίας οικίας, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για περιπτώσεις με δύσκολη πρόσβαση στο δίκτυο (εφαρμογές νησίδας). Στην παρούσα εργασία μελέτηθηκε η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος για δύο διαφορετικές τοποθεσίες, στο Ηνωμένο Βασίλειο και στην Ελλάδα.

### 7.1 Συμπεράσματα

Τα πορίσματα που εξάχθηκαν από την παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Το μοντέλο των Collares, Pereira και Rabl για τον υπολογισμό της ωριαίας ακτινοβολίας αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά η αδυναμία του να ακολουθήσει τη στοχαστική φύση του δείκτη αιθριότητας ( $K_t$ ) περιορίζει αισθητά την ακρίβειά του. Αυτό το γεγονός γίνεται εντονότερο σε μήνες με υψηλή νέφωση (χειμερινούς μήνες για το βόρειο ημισφαίριο) και σε περιοχές με ιστορικά χαμηλούς δείκτες αιθριότητας.
- Ο έλεγχος της τροφοδοσίας των συλλεκτών (δηλαδή ο μηδενισμός της παροχής εργαζόμενου μέσου στους συλλέκτες όταν η πρώτη παράγωγος της θερμοκρασίας του ανώτερου στρώματος του δοχείου αποθήκευσης λάβει αρνητικές τιμές) μπορεί να έχει μεγάλο αντίκτυπο στη βελτίωση της θερμικής απόδοσης των συλλεκτών.
- Το υψηλότερο γεωγραφικό πλάτος του Moat βοηθάει του συλλέκτες στο να αξιοποιήσουν αποδοτικότερα την ηλιακή ενέργεια τόσο σε θερμικό όσο και σε ηλεκτρικό επίπεδο. Ωστόσο, το χαμηλό επίπεδο ηλιοφάνειας έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για περισσότερη προσδιδόμενη ενέργεια για το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στο Ελληνικό η προσδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μικρότερη από την παραγόμενη, οπότε επιτυγχάνεται λογιστικός συμψηφισμός της ενέργειας.
- Σε σύγκριση με τη συμβατική ηλεκτροπαραγωγή, το Moat κερδίζει σε απόδοση. Ο λόγος είναι η καλύτερη απαγωγή θερμότητας, καθώς και οι βελτιωμένες οπτικές ιδιότητες του συγκεντρωτή. Στον αντίποδα, το Ελληνικό χάνει σημαντικό ποσοστό της απόδοσης, καθώς η καλύτερη απαγωγή θερμότητας και οι βελτιωμένες οπτικές ιδιότητες δεν επαρκούν για να αντισταθμίσουν το γεγονός ότι για αρκετές ώρες το χρόνο η άμεσος ακτινοβολία του ήλιου δεν προσπίπτει στην οπίσθια φωτοβολταϊκή επιφάνεια. Πρέπει, επίσης, να τονιστεί ότι το μέγιστο ηλιακό ύψος της εκάστοτε ημέρας συμπίπτει με τη μέγιστη προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια. Οπότε, η επιρροή αυτών των χαμένων ωρών ηλιοφάνειας έχουν αναλογικά μεγάλη αρνητική επίπτωση.

## 7.2 Συμβολή και πρωτοτυπία της εργασίας

Επιπλέον των συμπερασμάτων που αναφέρθηκαν, η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται και στον τρόπο που έχει δομηθεί ο κώδικας MATLAB. Κάθε ένα από τα στάδια του υπολογισμού της ηλιοφάνειας, της παραγωγής ενέργειας και του τρόπου αποθήκευσης είναι πλήρως αποπλεγμένα μεταξύ τους, το οποίο επιτρέπει τη δοκιμή πληθώρας μεθόδων, εξοπλισμού και γεωγραφικών τοποθεσιών, ώστε να δοκιμαστούν και να μελετηθούν πολλές διαφορετικές υλοποιήσεις. Με την εκτενή και παραστατική επεξήγησης όλων των σημείων του κώδικα, φιλοδοξία αυτής της εργασίας είναι να αποτελέσει εργαλείο για τις επόμενες εργασίες πάνω στα Υβριδικά Φωτοβολταϊκά/Θερμικά στοιχεία.

## 7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην εργασία αποδεικνύεται ότι ο συλλέκτης έχει θετικό αντίκτυπο στην απόδοση, όταν το ηλιακό ύψος δεν υπερβαίνει τη γωνία αποδοχής. Ωστόσο, η απόδοση του συλλέκτη για γεωγραφικά πλάτη παρόμοια της Ελλάδας εξαρτάται από δύο ανταγωνιστικούς παράγοντες. Τα οφέλη της απαγωγής θερμότητας και των βελτιωμένων οπτικών ιδιοτήτων σε σχέση με τη χαμένη ενέργεια όταν το ηλιακό ύψος υπερβαίνει τη γωνία αποδοχής. Λόγω αυτής της ιδιομορφίας δημιουργείται πληθώρα ερωτημάτων βελτιστοποίησης, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης. Μερικά από αυτά είναι:

- Εύρεση του ελάχιστου γεωγραφικού πλάτους, στο οποίο ο συλλέκτης έχει ευεργετική επίπτωση στην απόδοση ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό στοιχείο. Πέρα από την αυστηρά γεωμετρική προσέγγιση, το κλίμα της εκάστοτε τοποθεσίας θα επηρεάζει την καταλληλότητα του συλλέκτη.
- Μελέτη του οφέλους από τη θερμική απαγωγή αγνοώντας την επιρροή της ηλιακής γεωμετρίας
- Σχεδιασμός του βέλτιστου συστήματος (αριθμός και κλίση συλλέκτη) για την κάλυψη δεδομένων θερμικών αναγκών σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος της εγκατάστασης.

Πέρα από την μελέτη του συγκεκριμένου συλλέκτη, τρόπου αποθήκευσης και μοντέλου ηλιοφάνειας, η αποπλεγμένη και αρθρωτή δομή του κώδικα της εργασίας επιτρέπει τη μελέτη πολλαπλών συνδυασμών των παραπάνω.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Λίστα εικόνων και πινάκων

Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση απωλειών θερμότητας [1] .....	11
Εικόνα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα συλλέκτη PV/T με PCM [3] .....	14
Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού Heat Pipe .....	14
Εικόνα 1.4: Παράδειγμα μηχανικής στερέωσης με ελατήρια .....	15
Εικόνα 1.5: Παράδειγμα μηχανικής στερέωσης με μηχανικά υποστηρίγματα .....	16
Εικόνα 1.6: Σχήμα θερμικού επίπεδου συλλέκτη [6] .....	17
Εικόνα 1.7: Τύποι συλλεκτών κατόπτρου [6] .....	18
Εικόνα 1.8: Διάταξη PV/T με φακούς Fresnel [7] .....	19
Εικόνα 1.9: PVT Απλής διέλευσης [6] .....	20
Εικόνα 1.10: PVT διπλής διέλευσης [6] .....	21
Εικόνα 1.11: Σύστημα των De Vries και Zondag [8] .....	21
Εικόνα 1.12: Σχηματικό διάγραμμα ενσωματωμένου PVT [9] .....	22
Εικόνα 1.13: Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με μαύρη πλαστική επιφάνεια στην οπίσθια όψη για την απαγωγή θερμότητας [10] .....	22
Εικόνα 1.14: Το σύστημα μελέτης του Chow [11] .....	23
Εικόνα 2.1: Αποψη του Συλλέκτη της πειραματικής διάταξης [1] .....	25
Εικόνα 2.2: Τομή του Συλλέκτη της πειραματικής διάταξης [1] .....	25
Εικόνα 2.3: Κάτοψη της πειραματικής διάταξης .....	26
Εικόνα 2.4: Ηλιακή σταθερά [4] .....	27
Εικόνα 2.5: Χαρακτηριστικές γωνίες ηλιακής γεωμετρίας [4] .....	28
Εικόνα 2.6: Ηλιακή απόκλιση στο θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο [4] .....	29
Εικόνα 2.7: Μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας για Αθήνα, Ελληνικό .....	31
Εικόνα 2.8: Μπλοκ διάγραμμα ημερήσιας ακτινοβολίας για την τυπική μέρα του μήνα .....	32
Εικόνα 2.9: Μπλοκ ωριαίας ακτινοβολίας για επιλεγμένη ημέρα .....	34
Εικόνα 2.10: Γωνία απόρριψης για την οπίσθια επιφάνεια .....	36
Εικόνα 2.11: Πλάγια όψη ενός διπλού στοιχείου PVT .....	37
Εικόνα 2.12: Κάτοψη της πειραματικής διάταξης .....	39
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση αποθηκευτικού δοχείου για την άμεση αποθήκευση ενέργειας .....	41
Εικόνα 3.2: Απεικόνιση αποθηκευτικού δοχείου για την έμμεση αποθήκευση ενέργειας .....	44
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα συναρτήσεων για τον υπολογισμό της απορροφούμενης ακτινοβολίας .....	49
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα συνάρτησης $\omega_{v2}$ .....	50
Εικόνα 4.3: Διάγραμμα συνάρτησης $\alpha_{v2}$ .....	51
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα συνάρτησης $HT_{v3}$ .....	53
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα συνάρτησης $IT_{v3}$ .....	55
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα συνάρτησης $GT_{xls2}$ .....	57
Εικόνα 4.7: Αντιστοίχιση πειραματικών δεδομένων με τιμές του μοντέλου .....	58
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα σάρωσης πειραματικών δεδομένων και αντιστοίχιση με τα υπολογιζόμενα δεδομένα από το μοντέλο .....	59
Εικόνα 4.9: Διάγραμμα συναρτήσεων για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου της διάταξης ..	60
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα συνάρτησης $T_{comp}$ .....	62
Εικόνα 4. 11: Διάγραμμα συνάρτησης $Field2$ .....	63
Εικόνα 5.1: Διάγραμμα συναρτήσεων για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εισόδου .....	66
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα συνάρτησης $field2$ .....	68

Εικόνα 5.3: Διάγραμμα συνάρτησης Heat storage .....	69
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα συνάρτησης odefcn.....	71
Εικόνα 5.5: Διάγραμμα συνάρτησης IND_odefcn.....	72
Εικόνα 6.1: Ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια για το Ελληνικό στη διάρκεια ενός έτους.....	73
Εικόνα 6.2: Ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια για το Moat στη διάρκεια ενός έτους .....	75
Εικόνα 6.3: Προφίλ κατανάλωσης ZNX στους 50°C .....	76
Εικόνα 6.4: Θερμοκρασίες τον Ιούλιο για δεκαπλάσια παροχή φορτίου .....	77
Εικόνα 6.5: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 1).....	79
Εικόνα 6.6: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 1).....	79
Εικόνα 6.7: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 1) .....	80
Εικόνα 6.8: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 1) .....	80
Εικόνα 6.9: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 2).....	82
Εικόνα 6.10: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 2).....	82
Εικόνα 6.11: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 2) .....	83
Εικόνα 6.12: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 2) .....	83
Εικόνα 6.13: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 3).....	85
Εικόνα 6.14: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 3).....	85
Εικόνα 6.15: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 3) .....	86
Εικόνα 6.16: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 3) .....	86
Εικόνα 6.17: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 4).....	88
Εικόνα 6.18: Θερμοκρασίες για το χειρότερο μήνα (Σενάριο 4).....	88
Εικόνα 6.19: Ενεργειακό Ισοζύγιο για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 4) .....	89
Εικόνα 6.20: Θερμοκρασίες για το καλύτερο μήνα (Σενάριο 4) .....	89
Εικόνα 6.21: Ηλεκτρική, θερμική και προσδιδόμενη ενέργεια για τη διάρκεια ενός χρόνου στο Ελληνικό .....	92
Εικόνα 6.22: Ηλεκτρική, θερμική και προσδιδόμενη ενέργεια για τη διάρκεια ενός χρόνου στο Ελληνικό .....	93
Εικόνα 6.23: Διάγραμμα απωλειών από PVsyst για συμβατική ηλεκτροπαραγωγή στο Ελληνικό .....	96
Εικόνα 6.24: Διάγραμμα απωλειών από PVsyst για συμβατική ηλεκτροπαραγωγή στο Moat .....	97
Εικόνα 6.25: Μοντελοποίηση της έμμεσης αποθήκευσης για τις 22/06.....	99
Εικόνα 6.26: Μοντελοποίηση της έμμεσης αποθήκευσης για τις 26/04.....	100



Πίνακας 2.1: Μέση ημέρα του μήνα.....	29
Πίνακας 4.1: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για την τοποθεσία και τις γεωμετρικές παραμέτρους της διάταξης.....	46
Πίνακας 4.2: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για την τοποθεσία και τις γεωμετρικές παραμέτρους της υποθετικής διάταξης στο Moat.....	47
Πίνακας 4.3: Συντελεστής αιθριότητας για το Moat από τη βάση δεδομένων Meteonorm .....	47
Πίνακας 4.4: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για το Συγκεντρωτή .....	47
Πίνακας 4.5: Ταυτότητα συνάρτησης omega_v2 .....	50
Πίνακας 4.6 Ταυτότητα συνάρτησης alpha_v2 .....	51
Πίνακας 4.7: Ταυτότητα συνάρτησης HT_v3.....	52
Πίνακας 4.8: Ταυτότητα συνάρτησης IT_v3 .....	54
Πίνακας 4.9: Ταυτότητα συνάρτησης GT_xls2.....	56
Πίνακας 4.10: Ταυτότητα συνάρτησης xls_read3 .....	58
Πίνακας 4.11: Ταυτότητα συνάρτησης T_comp.....	61
Πίνακας 5.1: Αρχικές συνθήκες του μοντέλου για του δοχείου αποθήκευσης.....	65
Πίνακας 5.2: Ταυτότητα συνάρτησης field2.....	67
Πίνακας 5.3: Ταυτότητα συνάρτησης Heat_Storage .....	69
Πίνακας 5.4: Ταυτότητα συνάρτησης field2.....	70
Πίνακας 6.1: Ηλιακή ενέργεια ανά μήνα για το Ελληνικό .....	74
Πίνακας 6.2: Ηλιακή ενέργεια ανά μήνα για το Moat .....	75
Πίνακας 6.3: Σύγκριση παραγωγής και συντελεστών απόδοσης για τη διάταξη CPC-PVT σε Moat και Ελληνικό με ηλιακά δεδομένα από το μοντέλο .....	90
Πίνακας 6.4: Συγκεντρωτικός πίνακας απόδοσης συμβατικού φωτοβολταϊκού .....	95
Πίνακας 6.5: Πίνακας με θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα για την έμμεση αποθήκευση στις 22/06/2016 .....	98
Πίνακας 6.6: Πίνακας με θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα για την έμμεση αποθήκευση στις 26/04/2016 .....	99

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Κώδικας

```
function [Lst, Lloc, phi, west, beta, ro,Gsc,gamma,Kt]= location()

Lst = 30;           % [deg] longitude of local time zone (Lst_Athens=30)
Lloc = 23.75;      % [deg] longitude of observer (Lloc_Athens_elliniko=23 deg 45'
=23.75 deg)
phi = 37.9;       % [deg] latitude of observer (phi_Athens_elliniko=37 deg 54'
=37.90 deg)
west=0;           % western or eastern hemisphere
beta=30;          % PV module tilt
ro=0.2;           % reflectance of the surroundings - Albedo factor
Gsc=1361;         % [W/m²]solar constant
gamma=0;          % azimuth (if facing south it equals zero)
%Kt=[0.44 0.47 0.48 0.53 0.57 0.62 0.63 0.64 0.6 0.54 0.49 0.44];
% Average monthly Clearness Index from TOTEE and for Elliniko
Kt=[0.459 0.44 0.534 0.57 0.598 0.642 0.659 0.653 0.586 0.504 0.498 0.410];
% Average monthly Clearness Index from Meteonorm and for Elliniko
end
```

```
function [ C,r_al,N,n1,n2,UL,F_tone,beta_ro,...
Vf,nel_ref,Cpw,Cp,dw,d,mfw,A_reflector,A_PV ] = solarus_PVT()
C=1.5;             %concentration factor for Solarus MaReCo
r_al=0.91;         %aluminium reflectance
N=0.25;           %average number of reflects for C=1.5 and theta_c=45 fig. G.3.5.
n1=1.000277;      %air index of refraction at 0°C and 100kPa
https://en.wikipedia.org/wiki/List\_of\_refractive\_indices
n2=1.5;           %glass index of refraction flint glass impure
https://en.wikipedia.org/wiki/List\_of\_refractive\_indices
UL=4.8;           % Coefficient of thermal losses W/m²/K
F_tone=0.96;      % Thermal efficiency of collector 0.96
beta_ro=-0.0039; % Temperature coefficient of PV [-0.39%/K]
Vf=0.285/3600;    % Volume flow rate 285 lt/h=285*0.001/3600 [m³/s]
nel_ref=0.186;    % Electrical efficiency of PV
Cpw=4187.81;      % Heat Capacity of water J/Kg/K @40°C
Cp=3915;          % Heat Capacity of pararafin J/Kg/K
dw=999;           % Density of water kg/m³
d=1026;           % Density kg/m³
mfw=Vf*dw;        % Mass flow rate= [m³/s][kg/m³]=[kg/s]
A_reflector=0.292*2.290; % Opening area through which the Irradiance gets
reflected to the back
%side of the PV. [m²]
A_PV=1.07*2*0.148; % Area of PV front or back [m²]
end
```

```

function [month] = day_to_month(day)
    month=9;
if (day>=1)&&(day<=31) month=1; %disp('Jan')
elseif (day>=32)&&(day<=59) month=2;%disp('Feb')
    elseif (day>=60)&&(day<=90) month=3;%disp('Mar')
        elseif (day>=91)&&(day<=120) month=4;%disp('Apr')
            elseif (day>=121)&&(day<=151) month=5;%disp('MAy')
                elseif (day>=152)&&(day<=181) month=6;%disp('Jun')
                    elseif (day>=182)&&(day<=212) month=7;%disp('Jul')
                        elseif (day>=213)&&(day<=243) month=8;%disp('aug')
                            elseif (day>=244)&&(day<=273) month=9;%disp('Sep')
                                elseif (day>=274)&&(day<=304) month=10;%disp('Oct')
                                    elseif (day>=305)&&(day<=334)
month=11;%disp('Nov')
                                        elseif (day>=335)&&(day<=365)
month=12;%disp('Dec')
end
end
end

```

```

function [ KT, avgd, Gon, delta_avgd, omega_s, omega_sunrise, H, Hd, Hb, HT ] =
HT_v3(month)

[Lst, Lloc, phi, west, beta, ro, Gsc, gamma,Kt]=location();
average_day=[17 47 75 105 135 162 198 228 258 288 318 344]; % Average day
of the month according to Table A.1.1. of "Thermal Solar Systems" Antonopoulos
KT=Kt(month);
avgd=average_day (month);

Gon=Gsc*(1+0.033*cosd(360*avgd/365)); % Gon:
Horizontal extra-terrestrial Irradiance [W/m2] (A.1.1)

delta_avgd=23.45*sind(360*(284+avgd)/365); % Delta_avgd:
Solar Declination for the average day [°] (A.1.5)

omega_s=acosd(-tand(phi)*tand(delta_avgd)); % omega_s:
Hourly angle of sunset according to (A.2.5) ALWAYS >0
if (omega_s>acosd(-tand(phi-beta)*tand(delta_avgd))) % check the
minimum between [acosd(-tand(phi)*tand(delta_avgd))] and [acosd(-tand(phi-
beta)*tand(delta_avgd))]
    omega_s= acosd(-tand(phi-beta)*tand(delta_avgd)); % for tilted
plane
end
omega_sunrise=-omega_s; % the minimum
value becomes omega_sunrise BUT it must be negative

Ho=24*0.001/pi*Gon*(cosd(phi)*cosd(delta_avgd)*sind(omega_s)+2*pi*omega_s/360*sind(
phi)*sind(delta_avgd));

```

```

%
Extraterrestrial Radiation on horizontal surface during a day A.5.4 [KWh/m^2].
Proof on notebook

H=KT*Ho; % Dayli Total
Radiation on horizontal surface (in the atmosphere) A.9.2

if KT<=0.17 % Collares-
Perreira model for calculating Dayli diffuse Radiation on horizontal surface
    Hd=H*0.99;
elseif (KT>0.17) && (KT<=0.75)
    Hd=H*(1.188-2.272*KT+9.473*KT.^2-21.865*KT.^3+14.648*KT.^4);
elseif (KT>0.75) && (KT<0.8)
    Hd=H*(0.54+0.632);
elseif (KT>=0.8)
    Hd=H*0.2;
end
% The export is H and Hd in [KWh/m^2]
% Calculations from here on are not nessecary
Hb=H-Hd;

Rb=(cosd(phi-
beta)*cosd(delta_avgd)*sind(omega_sunrise)+(pi/180)*omega_sunrise*sind(phi-
beta)*sind(delta_avgd))/(cosd(phi)*cosd(delta_avgd)*sind(omega_s)+(pi/180)*omega_s*
sind(phi)*sind(delta_avgd));

HT=H*(1-Hd/H)*Rb+Hd*(1+cosd(beta))/2+H*ro*(1+cosd(beta))/2;

end

```

```

function [omega_v2]= omega_v2 (day, local_time)
%returns the hour angle omega_v2ega for a given local time
[Lst, Lloc, phi, west, beta, ro,Gsc,gamma]= location();

B=360*(day-81)/364;
E=9.87*sind(2*B)-7.53*cosd(B)-1.5*sind(B); %[min] Equation of time

if (west==1)% Eastern hemisphere=>West=1
    solar_time_in_min=local_time*60+4*(Lst-Lloc)+E;
elseif (west==0)
    solar_time_in_min=local_time*60-4*(Lst-Lloc)+E;
end

omega_v2=0.25*(+solar_time_in_min-12*60); %[deg] hour angle, it is positive for
p.m. [-180,180]
end

```

```

function [ F ] = alpha_v2(delta, omega)
% determines if the sun for a given day and local time is in front or in the
% back of the panel. Returns "1" if it's in front
[Lst, Lloc, phi, west, beta, ro, Gsc, gamma]=location();

F=0;

alpha= asind(sind(delta)*sind(phi)+cosd(delta)*cosd(omega)*cosd(phi));
% from a=(90-θz) and formula A.2.34
if (alpha<=60)
    F=1;
elseif (alpha>60)
    F=0;
end

end

```

```

function [ I, Id, Ib, IT, F_d, theta ] = IT_v3(day, print)
[Lst, Lloc, phi, west, beta, ro, Gsc, gamma]=location();
[month] = day_to_month(day)
[~,~,~,~,~,~, H, Hd, ~, ~]=HT_v3(month);
%[~,~,~,IPoAWm,~,~,~,~,~,~,~,~] = importfile3('output',1,(day-218)*24+2,(day-
218)*24+25);
omega= zeros(24,1);
local_time=zeros(24,1);
I=zeros(24,1);
Id=zeros(24,1);
Ib=zeros(24,1);
IT=zeros(24,1);
Rb=zeros(24,1);
F_d=zeros(24,1);
theta=zeros(24,1);
nI=zeros(24,1);
nId=zeros(24,1);
nIb=zeros(24,1);
nIT=zeros(24,1);

analogy=0;
% Calculating delta, omega_sunrise and omega_s for this day
delta=23.45*sind(360*(284+day)/365); % Delta_avgd:
for this day [°] (A.1.5)

omega_s=acosd(-tand(phi)*tand(delta)); % omega_s:
Hourly angle of sunset according to (A.2.5) ALWAYS >0
if (omega_s>acosd(-tand(phi-beta)*tand(delta))) % check the
minimum between [acosd(-tand(phi)*tand(delta))] and [acosd(-tand(phi-
beta)*tand(delta))]

```

```

        omega_s= acosd(-tand(phi-beta)*tand(delta));           % for tilted
plane
    end
    omega_sunrise=-omega_s;                                   % the minimum
value becomes omega_sunrise BUT it must be negative

a=0.409+0.5016*sind(omega_s-60);                             % (A.11.2)
b=0.6609-0.4767*sind(omega_s-60);                             % (A.11.3)

for i=1:24                                                    % Calculation
of the hourly values for each hour
    local_time(i)=i-0.5;                                       % omega should
come from the middle of the hour (note of equation A.11.1)
    omega(i)=omega_v2(day,local_time(i));

    I(i)=H*(pi/24*(a+b*cosd(omega(i)))*(cosd(omega(i))-
cosd(omega_s))/(sind(omega_s)-2*pi*omega_s/360*cosd(omega_s))); % Total hourly
irradiance of horizontal plane (A.11.1)
    %if ((I(i)<0)||(local_time(i)<5)||(local_time(i)>22)) I(i)=0; end
    if ((omega(i)<omega_sunrise)||(omega(i)>omega_s)) I(i)=0; end
% Check to make sure that there is no irradiance during night
    Id(i)=Hd*(pi/24*(cosd(omega(i))-cosd(omega_s))/(sind(omega_s)-
2*pi*omega_s/360*cosd(omega_s)));                             % Diffuse hourly irradiance of
horizontal plane (A.11.4)
    %if (Id(i)<0||(local_time(i)<5)||(local_time(i)>22)) Id(i)=0; end
    if ((omega(i)<omega_sunrise)||(omega(i)>omega_s)) Id(i)=0; end
    Ib(i)=I(i)-Id(i);
% Beam hourly irradiance of horizontal plane, I ignore Albedo

Rb(i)=(sind(delta)*sind(phi-beta)+cosd(delta)*cosd(phi-
beta)*cosd(omega(i)))/(sind(delta)*sind(phi)+cosd(delta)*cosd(phi)*cosd(omega(i)));
%Rb formula from A.4.4
IT(i)=Ib(i)*Rb(i)+Id(i)*(1+cosd(beta))/2+I(i)*ro*(1-cosd(beta))/2;
% Hourly total in plane irradiance (A.13.5)

if (IT(i)<=0) IT(i)=0; end                                     % Filter out
weird cases

[ F_d(i) ] = alpha_v2(delta, omega(i));
theta(i)= acosd(sind(delta)*sind(phi)*cosd(beta)-
sind(delta)*cosd(phi)*sind(beta)*cosd(gamma)+cosd(delta)*cosd(phi)*cosd(beta)*cosd(
omega(i))...
+cosd(delta)*sind(phi)*sind(beta)*cosd(gamma)*cosd(omega(i))+cosd(delta)*sind(beta)
*sind(gamma)*sind(omega(i)));

%analogy=IPoAWm(i)/1000/IT(i);
%IT(i)=analogy*IT(i); %Enable if you want to force feed Irradiance data.
%Ib(i)=analogy*Ib(i);
%Id(i)=analogy*Id(i);
% I(i)=analogy*I(i);
end

if (print==1)

```

```

fprintf('Local time Omega   I       Id       Rb       It       F       theta\n');
fprintf('   [h]       [deg][kWh/m²][kWh/m²] [] [kWh/m2] [bool] [deg]\n');
fprintf('%05.2f\t%07.2f\t%5.2f\t%.2f\t%05.2f\t%.2f\t%i\t%06.2f\n', [ local_time,
omega,I,Id,Rb,IT,F_d,theta]');
fprintf('sunrise: %0f       sunset: %f           \n', [omega_sunrise, omega_s]'); end
end

```

```

function [I,Id,Ib,IT,F_d,theta, IT_front, IT_back,S_front,S_back ] = GT_xls2( day )

[ C,r_al,N,n1,n2,UL,F_tone,beta_ro,...
  Vf,nel_ref,Cpw,Cp,dw,d,mf,A_reflector,A_PV ] = solarus_PVT()
[Lst, Lloc, phi, west, beta, ro, Gsc, gamma]=location();
[ I,Id,Ib,IT,F_d,theta ] = IT_v3(day,0);
t_CPC=r_al.^N;

IT_front=zeros(24,1);S_front=zeros(24,1);

Ib_CPC=zeros(24,1);Id_CPC=zeros(24,1);IT_back=zeros(24,1);t=zeros(24,1);
Rs=zeros(24,1);Rp=zeros(24,1);
ta=zeros(24,1); Ib_CPC_tot=0;Id_CPC_tot=0;

for i=1:24
    t(i)=asind(n1*sind(theta(i))/n2);
    Rs(i)=((n2*cosd(theta(i))-n1*cosd(t(i)))/(n2*cosd(theta(i))+n1*cosd(t(i))))^2;
    Rp(i)=((n1*cosd(theta(i))-n2*cosd(t(i)))/(n1*cosd(theta(i))+n2*cosd(t(i))))^2;
    ta(i)=(1-Rs(i))/2*(1+Rs(i))+ (1-Rp(i))/2*(1+Rp(i));

IT_front(i)=IT(i);
S_front(i)=IT(i)*ta(i);

Ib_CPC(i)=F_d(i)*Ib(i)*cosd(theta(i));
Id_CPC(i)= Id(i)/C;
IT_back(i)= (Ib_CPC(i)+Id_CPC(i));
S_back(i)=(Ib_CPC(i)+Id_CPC(i))*ta(i)*t_CPC;
end
end

```

```

function [ ] = xls_read3( )
max=3827;          % max row of your imported data
[datetime,T_fluid_in,Tamb,day1]=importfile('Data_August',1,2,max);
[date1,irradiance,Tfout] = importfile2('irradiance',1,2,max);
start_row=1;      % first row is headers
first_day=6;      % first day of the range you want to examine
end_day=31;       % last day of the range you want to examine
counter=start_row;
day_count=0;
day_correction=213-1; %1st of August is equal to 213th day of the
year

DATE=cell(fix(max/6),1);TFIN=zeros(fix(max/6),1);TAMB=zeros(fix(max/6),1);IPOA=zero
s(fix(max/6),1);TFOUT=zeros(fix(max/6),1);
ITOT=zeros(fix(max/6),1);STOT=zeros(fix(max/6),1);IBAC=zeros(fix(max/6),1);SBAC=zer
os(fix(max/6),1);IFRO=zeros(fix(max/6),1);SFRO=zeros(fix(max/6),1);
IPOA_diff=zeros(fix(max/6),1);

for day=first_day:end_day          % Outer loop (scanning days of the month)

    counter=counter+24
    GT_counter=1;                  %GT_counter is the index for GT_xls
    if (day==first_day) counter=start_row; %
    end
    [ IT_front, IT_back,S_front,S_back ] = GT_xls2( day+day_correction ); %calls
function that calculates Irradiance for this day
    day_count=day_count+1
    correct=0;
    correct2=0;

    for hour=1:12                  % inner loop (scanning hours of the day) 1:12
because of date format
t=0;t2=0;t3=0;IR=0;time=0;flag=0; % initialize temporary variables

    if ((hour>=1)&&(hour<=11)) GT_counter=GT_counter+1; counter=counter+1
    end

    if (hour==12) correct=1;counter=counter-11;GT_counter=1;
    end

    for i=1:(max-1)                % inner-inner loop scans every line of the excel
for datamatching----

c1=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016',day)); %searches datetime(i) for the
string 'day'/8/2016 if it fails c1=[] or if success c1='number of start'
c2={[]};
if (isequal(c2{1},c1{1})) %fail -> do nothing

else
    c3=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016%d:',day,hour)); % checks if it's the
correct hour
    if (isequal(c3{1},c2{1})) flag=0; %fail -> do nothing
    else flag=1;
        c5=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016%d:0',day,hour)); %1/6
measurement

```



```

        c6=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016%d:1',day,hour));           %2/6
measurement
        c7=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016%d:2',day,hour));           %3/6
measurement
        c8=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016%d:3',day,hour));           %4/6
measurement
        c9=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016%d:4',day,hour));           %5/6
measurement
        c10=strfind(datetime(i),sprintf('%d/8/2016%d:5',day,hour));          %6/6
measurement
        if (isequal(c5{1},c2{1})==0)    t=t+T_fluid_in(i);t2=t2+Tamb(i);
t3=t3+Tfout(i); IR=IR+irradiance(i); end %1/6 measurement
        if (isequal(c6{1},c2{1})==0)    t=t+T_fluid_in(i);t2=t2+Tamb(i);
t3=t3+Tfout(i); IR=IR+irradiance(i); end %2/6 measurement
        if (isequal(c7{1},c2{1})==0)    t=t+T_fluid_in(i);t2=t2+Tamb(i);
t3=t3+Tfout(i); IR=IR+irradiance(i); end %3/6 measurement
        if (isequal(c8{1},c2{1})==0)    t=t+T_fluid_in(i);t2=t2+Tamb(i);
t3=t3+Tfout(i); IR=IR+irradiance(i); end %4/6 measurement
        if (isequal(c9{1},c2{1})==0)    t=t+T_fluid_in(i);t2=t2+Tamb(i);
t3=t3+Tfout(i); IR=IR+irradiance(i); end %5/6 measurement
        if (isequal(c10{1},c2{1})==0)   %6/6 measurement wrap up the calculations
and write the average in matrix

        if (time==1&&correct==1) correct2=1;end
        t=t+T_fluid_in(i);t2=t2+Tamb(i); t3=t3+Tfout(i); IR=IR+irradiance(i);
average=t/6; average2=t2/6; average3=t3/6; average4=IR/6; %counter=counter+time;
TFIN(counter+12*time)=average;
TAMB(counter+12*time)=average2;
TFOUT(counter+12*time)=average3;
IPOA(counter+12*time)=average4;
DATE(counter+12*time)=[sprintf('d=%d,h=%d:30',day,hour+12*time)];
IFRO(counter+12*time)=IT_front(GT_counter+12*time);
IBAC(counter+12*time)=IT_back(GT_counter+12*time);

ITOT(counter+12*time)=IT_back(GT_counter+12*time)+IT_front(GT_counter+12*time);
;

SFRO(counter+12*time)=S_front(GT_counter+12*time);
SBAC(counter+12*time)=S_back(GT_counter+12*time);

STOT(counter+12*time)=S_back(GT_counter+12*time)+S_front(GT_counter+12*time);
IPOA_diff(counter+12*time)=IT_front(GT_counter+12*time)*1000;
average=0;average2=0;average3=0;average4=0;t=0;t2=0;t3=0;IR=0;time=1;

end

end
end
end
end
%write all data in output excel
xlswrite('output.xls',DATE,2,sprintf('A2:A%d',max));
xlswrite('output.xls',TFIN,2,sprintf('B2:B%d',max));
xlswrite('output.xls',TAMB,2,sprintf('C2:C%d',max));
xlswrite('output.xls',IPOA,2,sprintf('D2:D%d',max));
xlswrite('output.xls',TFOUT,2,sprintf('E2:E%d',max));
xlswrite('output.xls',IFRO,2,sprintf('F2:F%d',max));

```

```

xlswrite('output.xls', IBAC, 2, sprintf('G2:G%d', max));
xlswrite('output.xls', ITOT, 2, sprintf('H2:H%d', max));
xlswrite('output.xls', SFRO, 2, sprintf('I2:I%d', max));
xlswrite('output.xls', SBAC, 2, sprintf('J2:J%d', max));
xlswrite('output.xls', STOT, 2, sprintf('K2:K%d', max));
xlswrite('output.xls', IPOA_diff, 2, sprintf('L2:L%d', max));
end

```

```

function [ ] = xls_read_write_only_irradiance_data( )

max=8760;
start_row=4; % first row is headers
first_day=1; % first day of the range you want to examine
end_day=365; % last day of the range you want to examine
counter=start_row;
day_count=0;

DATE=cell(max,1);TAMB=zeros(max,1);IT=zeros(max,1);I=zeros(max,1);F_d=zeros(max,1);
theta=zeros(max,1);
Id=zeros(max,1);IT_front=zeros(max,1);S_front=zeros(max,1);IT_back=zeros(max,1);S_b
ack=zeros(max,1);

for day=first_day:end_day % Outer loop (scanning days of the month)

    counter=counter+24
    GT_counter=1; %GT_counter is the index for GT_xls
    if (day==first_day) counter=start_row; end

    [I_24,Id_24,Ib_24,IT_24,F_d_24,theta_24, IT_front_24,
IT_back_24,S_front_24,S_back_24 ]=GT_xls2( day )%calls function that calculates
Irradiance for this day
    day_count=day_count+1

for hour=1:24
    row_in_excel=(day-1)*24+hour;
I(row_in_excel)=I_24(hour);
Id(row_in_excel)=Id_24(hour);
Ib(row_in_excel)=Ib_24(hour);
F_d(row_in_excel)=F_d_24(hour);
theta(row_in_excel)=theta_24(hour);
IT_front(row_in_excel)=IT_front_24(hour);
IT_back(row_in_excel)=IT_back_24(hour);
S_front(row_in_excel)=S_front_24(hour);
S_back(row_in_excel)=S_back_24(hour);
IT(row_in_excel)=IT_24(hour);

end
end

%write all data in output excel

```

```

xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',IT,2,sprintf('C4:C%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',I,2,sprintf('D4:D%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',Id,2,sprintf('E4:E%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',IT_front,2,sprintf('F4:F%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',S_front,2,sprintf('G4:G%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',IT_back,2,sprintf('H4:H%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',S_back,2,sprintf('I4:I%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',theta,2,sprintf('J4:J%d',max+3));
xlswrite('Athens Elliniko Irradiance.xlsm',F_d,2,sprintf('K4:K%d',max+3));

end

```

```

function [] = Field2()

first_day=1;
last_day=365;
startRow=(first_day-1)*24+4           % Line from which the import data will
begin, 1st line
endRow=(last_day)*24+3
start_temp=25;
excel_name='Athens Elliniko Irradiance - ms=const.xlsm';
[ C,r_al,N,n1,n2,UL,F_tone,beta_ro,...
  Vf,nel_ref,Cpw,Cp,dw,d,mfc,A_reflector,A_PV ] = solarus_PVT();
ms_f=mfc; %constant Load mass flow equal to mf
ms_constant=14.514/3600;

%ms=[ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant
ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant...
%   ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant
ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ms_constant ]
%constant Load mass flow equal to mf
%ms=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
ms=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 ms_f*0.015 ms_f*0.045 ms_f*0.058 ms_f*0.15
ms_f*0.125 0 ms_f*0.0125 ms_f*0.02 0 0 ms_f*0.2 ms_f*0.0625 ms_f*0.025 0 0]; %2031t
per day @50°C
% source p.142: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-2nd.pdf

[Date,TAMB,IT,I,Id,IT_front,S_front,IT_back,S_back,Theta,F_d] =
importfile4(excel_name,'Model',startRow,endRow);
Pel=zeros(endRow-startRow+1,1);
Pth=zeros(endRow-startRow+1,1);
Paux=zeros(endRow-startRow+1,1);
T_fluid_out=zeros(endRow-startRow+1,1);
T_1=zeros(endRow-startRow+1,1);
T_2=zeros(endRow-startRow+1,1);
T_3=zeros(endRow-startRow+1,1);
t=zeros(endRow-startRow+1,1);
y=zeros(endRow-startRow+1,1);
T_fluid_in=zeros(endRow-startRow+1,1);
%T_f_out_d=zeros(finish-start,1);

```

```

for z=1:(last_day-first_day+1)
    mf=mfc; %Initialisation of mf in case it has been set to zero
    for u=9:22
        temp=(z-1)*24+u
        if (u==9) T_fluid_in(temp)=TAMB(temp);T_in=TAMB(temp)-5;T1=TAMB(temp)-
5;T2=TAMB(temp)-5;T3=TAMB(temp)-5; end % at 08:30 t_fluid_in = tamb

        for i=1:10

[Pele,Pthe,T_fluid_out(temp)]=T_comp(T_in,TAMB(temp),IT_front(temp),IT_back(temp),S
_front(temp),S_back(temp),mf);
            T_in=T_fluid_out(temp);
            Pel(temp)=Pel(temp)+Pele;
            Pth(temp)=Pth(temp)+Pthe;
            % When I insert losses this is where Vf control goes
            end
%Direct calculation

[T1_new,T2_new,T3_new,t,y]=Heat_Storage(T1,T2,T3,T_fluid_out(temp),TAMB(temp),ms(u)
,mf);
        if (T1_new<T1) mf=0.0000001; end %Vf vcontrol, disable this line if you
want it disabled.
        T_1(temp)=T1_new;T_2(temp)=T2_new;T_3(temp)=T3_new;
        T_fluid_in(temp+1)=T_3(temp);
        T1=T1_new;T2=T2_new;T3=T3_new;
        T_in=T_3(temp);
        if (T1<50) Paux(temp)=Paux(temp)+ms(u)*Cpw*(50-T1); end
        end

end
xlswrite(excel_name,T_fluid_out,'Model',sprintf('Q%d:Q%d',startRow,endRow));
xlswrite(excel_name,T_fluid_in,'Model',sprintf('R%d:R%d',startRow,endRow));
xlswrite(excel_name,T_1,'Model',sprintf('S%d:S%d',startRow,endRow));
xlswrite(excel_name,T_2,'Model',sprintf('T%d:T%d',startRow,endRow));
xlswrite(excel_name,T_3,'Model',sprintf('U%d:U%d',startRow,endRow));
xlswrite(excel_name,Pel,'Model',sprintf('L%d:L%d',startRow,endRow));
xlswrite(excel_name,Pth,'Model',sprintf('M%d:M%d',startRow,endRow));
xlswrite(excel_name,Paux,'Model',sprintf('N%d:N%d',startRow,endRow));
end

```

```

function
[ Pel, Pth, T_fluid_out ] = T_comp ( T_fluid_in, Tamb, GT_front, GT_back, S_front, S_back, mf )
[ C, r_al, N, n1, n2, UL, F_tone, beta_ro, ...
  Vf, nel_ref, Cpw, Cp, dw, d, mfw, A_reflector, A_PV ] = solarus_PVT();

counter=0;
Tref=25; % Reference temperature (temperature where nel=nel_ref
T_fluid_out=T_fluid_in+10; % starting hypothesis about the T_fluid_out

for i=1:1000
  counter=counter+1;

  GT=(GT_back+GT_front)*1000; %GT is W/m²
  Tpv=30.0006+0.0175*(GT-300)+1.14*(Tamb-25);
  Tpv=(T_fluid_out+T_fluid_in)/2;
  Teff=Tpv+Tpv-Tamb;
  % beta_ro is negative
  nel=nel_ref*(1+beta_ro*(Teff-Tref));
  Absorbed_Solar_Power=(S_front+S_back)*2*A_PV*1000; % front and back
  [kWh/m²*m²]*1000[W/kW]/1h=Wsun
  Pel=nel*Absorbed_Solar_Power;
  Pth_mixed=Absorbed_Solar_Power-Pel;
  FR=mfw*C*Cpw/UL*(1-exp(-UL*F_tone/C/mfw/Cpw));
  Pth=Pth_mixed-FR*UL/C*(T_fluid_in-Tamb);
  if (mf==0.0000001) Pth=0;end
  T_fluid_out_new=Pth/mf/Cpw+T_fluid_in;

  if ( abs(T_fluid_out_new-T_fluid_out)<0.1)
    T_fluid_out=T_fluid_out_new;
    break;
  else T_fluid_out=T_fluid_out_new;
  end
end
end
end

```

```

function [ T1_end, T2_end, T3_end, t, y ] =
Heat_Storage(T1,T2,T3,Tcol_out,Ta,ms,mf)
%HEAT_STORAGE Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
format shortEng
format compact
sampling=3600;
y0= [ T1, T2, T3]; %Starting values for each layer of the tank

tspan=zeros(sampling,1);
for i=1:sampling tspan(i)=i; end

counter=0;
[t,y] = ode45(@ (t,y) odefcn(t,y,Tcol_out,Ta,ms,mf,counter), tspan,y0);

T1_end=y(sampling,1);
T2_end=y(sampling,2);

```

```

T3_end=y(sampling,3);
end
function dydt = odefcn(t,y,Tcol_out,Ta,ms,mf,counter)
dydt = zeros(3,1);
[ C,r_al,N,n1,n2,UL,F_tone,beta_ro,...
  Vf,nel_ref,Cpw,Cp,dw,d,mfw,A_reflector,A_PV ] = solarus_PVT();
V=0.8654; % volume of water [m^3]
M= V*dw/3; % mass of water [kg]
D=1; % diameter of canister
L=2; % length of canister
Ast1=pi*(D^2/4+D*L/3);
Ast2=pi*D*L/3;
Ast3=Ast1;
k_pu=0.03 ; % polyurethane thermal conductivity [W/m/K]
thickness=0.1; % [m] of sealing
U_pu=k_pu*thickness;

Ts_out=25.7; % From TOTEE data (network water temperature)

A1=M*Cpw;
B1=mf*Cpw*Tcol_out;
C1=mf*Cpw;
D1=ms*Cpw;
E1=U_pu*Ast1;
F1=U_pu*Ast1*Ta;
dydt(1) = (-C1-E1-D1)/A1*y(1) + D1/A1*y(2) + (B1+F1)/A1;
A2=M*Cpw;
B2=mf*Cpw;
C2=mf*Cpw;
D2=ms*Cpw;
E2=U_pu*Ast2;
F2=U_pu*Ast2*Ta;
dydt(2) = (-C2-E2-D2)/A2*y(2) + D2/A2*y(3) + B2/A2*y(1) + (F2)/A2;
A3=M*Cpw;
B3=mf*Cpw;
C3=mf*Cpw;
D3=ms*Cpw;
E3=U_pu*Ast3;
F3=U_pu*Ast3*Ta;
dydt(3) = (-C3-E3-D3)/A3*y(3) + D3/A3*Ts_out + B3/A3*y(2) + (F3)/A3;
counter=counter+1;
end

```

```

function dydt = IND_odefcn(t,y,Tcol_out,Ta,Vf,Tcol_in)
dydt(1) = zeros(1,1);

[ C,r_al,N,n1,n2,UL,F_tone,beta_ro,...
  Vf,nel_ref,Cpw,Cp,dw,d,mfw,A_reflector,A_PV ] = solarus_PVT();

V=0.8654; % volume of water [m^3]
M= V*dw/3; % mass of water [kg]
Ahex=2; %m^2
U=200; %W/m^2/K
UL=0.8; %W/m^2/K

D=1; % diameter of canister
L=2-0.82; % length of canister
Aside=2; %hypothesis of insulated top

A=U*Ahex*(Tcol_out-Tcol_in);
B=UL*Aside;
D=UL*Aside*Ta;
C=M*Cpw;

dydt(1) =+D/C-B/C*y(1)+A/C/log((Tcol_out-y(1))/(+Tcol_in-y(1)));

end

```