

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



- Πτυχιακή Εργασία –

Η Συμβολή της Επιστήμης των Υπολογιστών στις
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Μιχαήλ Κόκκορης Π2015022
Επιβλέπων Καθηγητής : Παναγιώτης Βλάμος

04 Αυγούστου 2022

Επιβλέπων

Παναγιώτης Βλάμος , Καθηγητής
Τμήμα Πληροφορικής – Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Παναγιώτης Βλάμος , Καθηγητής
Τμήμα Πληροφορικής – Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Θεόδωρος Ανδρόνικος , Αναπληρωματικός Καθηγητής
Τμήμα Πληροφορικής – Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Κάτια – Λήδα Κερμανίδου , Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Τμήμα Πληροφορικής – Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Ιόνιο Πανεπιστήμιο, στο τμήμα Πληροφορικής κατά το έτος 2022. Η ολοκλήρωση της πτυχιακής μου θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του καθηγητή μου, τον κύριο Παναγιώτη Βλάμο. Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της πτυχιακής μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω πολύ την οικογένειά μου, η οποία ήταν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, ο καθένας με τον δικό του τρόπο. Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φίλους που με συντρόφεψαν κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων και μου χάρισαν τόσες υπέροχες εμπειρίες και αναμνήσεις.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, εκπονήθηκε για το Τμήμα Πληροφορικής του Ιονίου Πανεπιστημίου. Αποτελεί μία βιβλιογραφική ανασκόπηση που στόχο έχει να αναδείξει τη συμβολή της επιστήμης των υπολογιστών στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πιο αναλυτικά, γίνεται μια αναφορά στην μετάβαση από τα φωτοβολταϊκά συστήματα συμβατικού τύπου, στα σύγχρονα συστήματα, γνωστά και ως ηλεκτρικά / θερμικά συστήματα PV/T. Τα PV/T αποτελούν φωτοβολταϊκά συστήματα στα οποία έχουν τοποθετηθεί θερμικοί συλλέκτες. Πρόκειται για δεξαμενή μέσα στην οποία ρέει ψυκτικό υγρό. Ο θερμικός συλλέκτης αποσκοπεί στην ψύξη της φωτοβολταϊκής μονάδας και, ταυτόχρονα, την αξιοποίηση της παραχθείσας θερμότητας. Η παρούσα εργασία περιγράφει πως με την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων, τα οποία εφαρμόζονται σε προγράμματα προσομοίωσης, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τα κατάλληλα χαρακτηριστικά σχεδιασμού αυτών των συστημάτων ούτως ώστε να αποδίδουν καλύτερα. Επιπλέον, γίνεται λόγος και για τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ANN, τα οποία αποτελούν μέρος της μηχανικής μάθησης. Τα ANN είναι συστήματα με πολλαπλές εισόδους και μόνο μία έξοδο, και χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή προβλέψεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτό να κατασκευαστεί μονάδα PV/T ικανή να αξιοποιήσει στο μέγιστο την θερμότητα που παράγεται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Τέλος, βγαίνει το συμπέρασμα ότι περισσότερο αποδοτικοί μήνες είναι αυτοί που υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια χωρίς όμως υπερβολική αύξησης της θερμότητας. Και τούτο διότι, η υπερβολική ηλιοφάνεια, αυξάνει την ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αλλά ταυτόχρονα θερμαίνεται και η φωτοβολταϊκή μονάδα σε σημείο που επηρεάζεται αρνητικά η απόδοσή της.

Abstract

This graduation thesis was composed for the Department of Informatics of the Ionian University. It is a literature review that aims to highlight the contribution of computer science to renewable energy sources. In more detail, a reference is made to the transition from conventional photovoltaic systems to modern systems, also known as electric / thermal PV/T systems. PV/T are photovoltaic systems in which thermal collectors are installed. These thermal collectors are consisting of a coolant tank. The thermal collector aims to cool the photovoltaic unit and, at the same time, utilize the heat that is produced. This thesis describes how by building mathematical models, which are applied in simulation programs, we are able to know the appropriate design features of these systems so that they perform better. In addition, Artificial Neural Networks (ANNs) are also discussed, which are part of machine learning. ANNs are systems with multiple inputs and only one output and are mainly used to produce predictions. The results show that it is possible to construct a PV/T unit capable of making maximum use of the heat generated by incident solar radiation. Finally, it is concluded that the most efficient months are those when there is enough sunshine but without excessive heat increase. And this is because excessive sunshine increases the amount of incident solar radiation but at the same time heats up the photovoltaic unit to the point where its efficiency is decreased.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	ix
2	Ηλιακή ενέργεια.	xv
3	Συμβατικά ηλιακά συστήματα.....	xv
4	Υβριδικά ηλιακά / θερμικά συστήματα (PV/T).....	xv
4.1	Σχεδιασμός ηλεκτρικού / θερμικού μοντέλου προσομοίωσης.....	xvi
4.1.1	Μαθηματικό μοντέλο.....	xvi
4.1.1.1	Ενεργειακό ισοζύγιο.....	xvii
4.1.1.2	Οριακές συνθήκες.....	xxi
4.1.2	Συμπέρασμα κεφαλαίου.....	xxiii
4.2	Προσομοίωση του (PV/T) μέσω του TRNSYS.....	xxvi
4.2.1	Μαθηματικό μοντέλο.....	xxvi
4.2.1.1	Θερμικό ισοζύγιο.....	xxvi
4.2.1.2	Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συλλέκτη PVT.....	xxviii
4.2.2	Επίλυση του μαθηματικού μοντέλου.....	xxix
4.2.3	Συμπέρασμα κεφαλαίου.....	xxxι
4.3	Ψυκτική Ύλη.....	xxxι
4.3.1	Νάνο-υγρά.....	xxxι
4.3.2	Συμπέρασμα κεφαλαίου.....	xxxv
4.4	Τύποι θερμικών συλλεκτών PV/T.....	xxxviii
4.4.1	Μαθηματικό μοντέλο.....	xxxviii
4.4.1.1	Οπτικό μοντέλο.....	xxxviii
4.4.1.2	Θερμικό μοντέλο.....	xl
4.4.2	Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός PV/T.....	xli
4.4.2.1	Συλλέκτης PVT με σωλήνες.....	xli
4.4.2.2	Συλλέκτης PVT καναλιού.....	xlιιι
4.4.2.3	Συλλέκτης PVT ελεύθερης ροής.....	xliv
4.4.2.4	Συλλέκτης PVT διπλού καναλιού.....	xlν
4.4.3	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	xlvi
5	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ANN.....	xlvii
5.1	Μια εισαγωγή στα Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ANN.....	xlvii
5.2	Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ANN.....	xlvii
5.2.1	Στάδια επιλογής μοντέλου πρόβλεψης.....	xlviii
5.2.2	Προγνωστική εξόρυξη δεδομένων.....	xlviii
5.2.3	Μαθηματικό μοντέλο των ANN.....	xlιx
5.2.3.1	Συναρτήσεις ενεργοποίησης.....	xlιx
5.2.3.2	Αναγνώριση σφαλμάτων του ANN μοντέλου.....	l
5.3	Μοντελοποίηση ισοδύναμων φωτοβολταϊκών μονάδων (EEC) χρησιμοποιώντας ANN.....	l
5.4	Συγκριτική Ανάλυση ψυκτικών υγρών με ANN.....	lv
5.4.1	Μαθηματικό μοντέλο.....	lvι
5.4.2	Ανάλυση αβεβαιότητας.....	lvι
5.4.3	Προσομοίωση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN).....	lvii
5.4.3.1	Σύνολο Δεδομένων.....	lvii
5.4.3.2	Μέθοδοι εκτίμησης της ακρίβειας και της εγκυρότητας.....	lvii
5.5	Συμπέρασμα Κεφαλαίου.....	lviii

6 Συμπεράσματα και συζήτηση.....	lxi
7. Βιβλιογραφία.....	lxii

Περιεχόμενα εικόνων

1 Τα επιμέρους τμήματα ενός PV/T.....	xvii
2 Διακύμανση θερμοκρασίας PV/T και ψυκτικού υγρού σε συνάρτηση με τον χρόνο.....	xxiii
3 Διακύμανση της θερμικής απόδοσης σε συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	xxiv
4 Θερμική και ηλεκτρική αποτελεσματικότητα σε σχέση με τη διάμετρο των σωλήνων.....	xxiv
5 Διακύμανση θερμικής και ηλεκτρικής αποδοτικότητας σε σχέση με το ρυθμό ροής μάζας...	xxv
6 Διακύμανση θερμικής και ηλεκτρικής αποδοτικότητας σε σχέση με τον αριθμό των σωλήνων.....	xxv
7 Η σχέση μεταξύ των αριθμών Nu και Re για μεταβλητά νάνο-υλικά αναλογικά με τη βάση του ψυκτικού υγρού.....	xxxvi
8 Η σχέση μεταξύ των αριθμών Nu και Re για μεταβλητή βάση του ψυκτικού υγρού αναλογικά με τα νάνο-υλικά.....	xxxvii
9 Η διακύμανση της πίεσης αναλογικά με την ορμή του ψυκτικού υγρού σε κάθε πιθανό συνδυασμό βάσης και νάνο-υλικών για το ψυκτικό υγρό.....	xxxvii
10 Η θερμική αγωγιμότητα και πίεση αναλογικά με τον ρυθμό ροής του ψυκτικού υγρού.....	xxxviii
11 Συλλέκτης PV/T με σωλήνες.....	xli
12 Συλλέκτης PV/T καναλιού ανάμεσα σε διπλή στρώση γυαλιού.....	xlili
13 Συλλέκτης PV/T καναλιού με το κανάλι τοποθετημένο εκατέρωθεν του PV/T.....	xliv
14 Συλλέκτης PV/T ελεύθερης ροής.....	xliv
15 Συλλέκτης PVT διπλού καναλιού.....	xliv
16 Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ANN.....	xlvi
17 Βασική διαμόρφωση του PV μοντέλου.....	lii
18 Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων εισόδου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το προτεινόμενο σύστημα.....	lviii
19 Τα αποτελέσματα της θερμικής απόδοσης των μετρούμενων και MLP ANN για τρία μοντέλα PV/T.....	lix
20 Ηλεκτρική απόδοση.....	lx
21 Αποτελέσματα ηλεκτρικού ρεύματος.....	lx
22 Αποτελέσματα ηλεκτρικής τάσης.....	lxi

1. Εισαγωγή.

[1] Οι Engin Karatepe, Mutlu Boztepe και Metin Colak στην εργασία τους με τίτλο “Neural network based solar cell model”, παρουσιάζουν μια προσέγγιση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου ANN με απώτερο σκοπό να βελτιώσουν την ακρίβεια του μοντέλου προσομοίωσης ενός ισοδύναμου κυκλώματος PV. Το μοντέλο που προτάθηκε αποτελούταν από 2 στάδια. Το πρώτο χρησιμοποιείται για να προβλέψει τις πέντε παραμέτρους εισόδου. Στο δεύτερο στάδιο, η έξοδος του ANN τοποθετείται στο «ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα». Υπήρξαν δυο πειραματικές δοκιμές. Μια εξ αυτών έλαβε χώρα στην πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου Ege, όπου εγκαταστάθηκε, μία OST-80 PV μονάδα η οποία αποτελείτο από 36 πολυκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Μαζί με την εν λόγω μονάδα, εγκαταστάθηκε και μια συσκευή μέτρησης. Το προτεινόμενο ANN εκπαιδεύτηκε να για να αναγνωρίζει τις ισοδύναμες παραμέτρους κυκλώματος από 49 διαφορετικές καμπύλες I-V. Τα 8 εξ αυτών χρησιμοποιήθηκαν για να δοκιμαστεί η γενίκευση του μοντέλου. Δηλαδή, κατά πόσο ικανό είναι να χαρτογραφεί σωστά νέα σημεία της καμπύλης, που δεν έχουν συμμετάσχει στην εκπαίδευση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το συμβατικό μοντέλο προκαλεί αρκετά μεγάλο σφάλμα, ειδικώς σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας, επηρεάζοντας την ακρίβεια της προσομοίωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζονται και οι ενδείξεις των καμπύλων I-V. Όσον αφορά, το προτεινόμενο μοντέλο, μειώνει σημαντικά το σφάλμα στις μελέτες προσομοίωσης και προσφέρει επίσης μια συμπαγή λύση για να συμπεριλάβει την εξάρτηση των ισοδύναμων παραμέτρων κυκλώματος από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία των κυψελών.

[2] Οι Atika Qazi, H. Fayaz, A. Wadi, Ram Gopal Raj, N.A. Rahim και Waleed Ahmed Khan στην βιβλιογραφική τους ανασκόπηση με τίτλο “The artificial neural network for solar radiation prediction and designing solar systems: a systematic literature review”, προσπαθούν να μας αποδείξουν γιατί το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι μία από τις πιο αξιόπιστες και ακριβείς μεθόδους για καλύτερο σχεδιασμό των ηλιακών συστημάτων και την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο κύριος στόχος αυτού του έργου είναι να αναπτυχθεί μια κατανόηση της πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Ως αποτέλεσμα αυτής της μελέτης, μπορεί να ειπωθεί ότι τα προσαρμοζόμενα συστήματα νευρωνικά παρεμβολής και τα νευρωνικά δίκτυα αυξάνουν την ακρίβεια πρόβλεψης στις μηνιαίες και ωριαίες προβλέψεις ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα.

[3] Οι Ahmet Koca, Hakan F. Oztop, Yasin Varol & Gonca Ozmen Koca χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ANN) για την εκτίμηση των παραμέτρων ηλιακής ακτινοβολίας για επτά πόλεις από την περιοχή της Μεσογείου της Ανατολίας στην Τουρκία. Για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από την Τουρκική Κρατική και Μετεωρολογική Υπηρεσία. Τα δεδομένα του 2006 χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμές και τα δεδομένα του 2005, του 2007 και του 2008 εκτιμήθηκαν. Οι επιδράσεις του αριθμού των παραμέτρων εισόδου ελέγχθηκαν στην ηλιακή ακτινοβολία που ήταν το στρώμα εξόδου. Για το σκοπό αυτό, ο αριθμός των παραμέτρων του στρώματος εισόδου άλλαξε από 2 σε 6. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από ερευνητές ή επιστήμονες για το σχεδιασμό ηλιακών συσκευών υψηλής απόδοσης. Βρέθηκε επίσης ότι ο αριθμός των παραμέτρων εισόδου ήταν η πιο αποτελεσματική παράμετρος στην εκτίμηση των μελλοντικών δεδομένων σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία.

[4] Στόχος των Muhammad Ammirul Atiqi Mohd Zainuri, Mohd Amran Mohd Radzi, Azura Che Soh, Norman Mariun, Nasrudin Abd Rahim, Jiashen Teh και Ching-Ming Lai, σε αυτό το paper είναι (1) η βελτίωση του αλγορίθμου εξαγωγής των αρμονικών ρεύματος και (2) η βελτίωση του

ρεύματος έγχυσης που παράγεται από ένα μονοφασικό φωτοβολταϊκό φίλτρο ενεργού ισχύος διακλάδωσης (PV SAPF). Ταυτόχρονα, προτείνουν μία απλούστερη τεχνική προσαρμοστικού γραμμικού νευρώνα (ADALINE), η οποία, αναμένεται να τρέξει το ίδιο γρήγορα με τον τρέχων αλγόριθμο. Τέλος, διεξάγεται περαιτέρω ανάλυση για τον αλγόριθμο ελέγχου πυκνωτή σύνδεσης DC. Για τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων, χρησιμοποιήθηκε το MATLAB/Simulink (R2012b). Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας έδειξαν ότι (1) ο απλούστερος αλγόριθμος ADALINE έχει εκτελέσει αποτελεσματικά με χαμηλότερη συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) και εκκρεμή αποζημίωση και (2) ο αλγόριθμος ελέγχου πυκνωτή σύνδεσης DC, λειτουργεί καλά με μονοφασικό PV SAPF και έχει δείξει λιγότερη υπέρβαση, γρήγορο χρόνο απόκρισης και ελάχιστες απώλειες ενέργειας.

[5] Σε αυτήν τη μελέτη, οι Rivai A., Rahim N.A., Elias M.F.M. και Jamaludin J. προτείνουν έναν ανιχνευτή καμπύλης I-V πολλαπλών καναλιών με δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών φωτοβολταϊκών (PV) μονάδων. Ανέπτυξαν επίσης μια μέθοδο προσαρμοζόμενου ρυθμού δειγματοληψίας για τη βελτίωση της απόδοσης του ιχνηθέτη I-V όσον αφορά την ταχύτητα απόκτησης και την ανάλυση δεδομένων, η οποία επιτρέπει στον ιχνηθέτη να μετρά την καμπύλη I-V για ένα ευρύτερο φάσμα ρεύματος και τάσης με υψηλότερα σημεία μέτρησης. Αυτό είναι σημαντικό για την παροχή γρήγορης σύγκρισης και εντοπισμού σφαλμάτων που μπορεί να έχουν συμβεί σε ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ένα πρωτότυπο χαμηλού κόστους κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα μικροελεγκτή Arduino, και οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με 30 φωτοβολταϊκές μονάδες. Η προσομοίωση και τα πειραματικά αποτελέσματα επαλήθευσαν την απόδοση και τη λειτουργικότητα του προτεινόμενου ανιχνευτή καμπύλης I-V.

[6] Οι ηλεκτρικές και θερμικές επιδόσεις των υβριδικών φωτοβολταϊκών-θερμικών ηλιακών συλλεκτών εξαρτώνται από παραμέτρους σχεδιασμού όπως η διάμετρος του σωλήνα, η απόσταση και ο ρυθμός ροής μάζας. Για αυτόν τον λόγο, οι M.S. Khani, M. Baneshi και M. Eslami, σε αυτήν τη μελέτη, ανέπτυξαν έναν υπολογιστικό κώδικα πεπερασμένου όγκου για τον υπολογισμό της μεταβατικής δισδιάστατης κατανομής θερμοκρασίας σε κάθε στρώμα ενός συλλέκτη PV / T. Ως εκ τούτου, η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία απόδοση μπορεί να ληφθεί με ακρίβεια για ένα σύστημα αυθαίρετης διαμόρφωσης. Ο Γενετικός Αλγόριθμος στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να βρει ένα σύνολο παραμέτρων σχεδιασμού που μεγιστοποιούν την ηλεκτρική και θερμική απόδοση με βελτιστοποιήσεις ενός και δύο στόχων. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος στη διάρκεια ενός έτους, η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για μια σειρά από διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος και επιλέγεται ένας κατάλληλος σχεδιασμός με καινοτόμο τρόπο. Σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνουν ότι το σύστημα με μέγιστη ηλεκτρική απόδοση έχει επίσης πολύ καλή θερμική απόδοση σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Οι βελτιστοποιήσεις πραγματοποιούνται επίσης για συλλέκτες διαφορετικών μεγεθών και αναλογίες διαστάσεων. Αποδεικνύεται ότι η παρούσα διαδικασία είναι σε θέση να βελτιώσει περαιτέρω τα προηγούμενως βελτιστοποιημένα σχέδια για την επίτευξη 8,6% και 11,5% επιπλέον ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, αντίστοιχα, σε μια ημέρα. Η ετήσια ηλεκτρική απόδοση του προτεινόμενου συστήματος είναι επίσης 25% καλύτερη από μια συμβατική PV ενότητα χωρίς ψύξη.

[7] Οι φωτοβολταϊκοί (PV) συλλέκτες αντικαθίστανται με υβριδικά φωτοβολταϊκά θερμικά (PV/T) συστήματα για τη δημιουργία ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης. Αυτόν τον σχεδιασμό μελέτησαν και οι Ali H.A. Al-Waeli, Miqdam T. Chaichan, Hussein A. Kazem, K. Sopian και Javad Safaei. Κύρια λειτουργία αυτού του σχεδιασμού είναι να παρέχει ψύξη για το ηλιακό κύτταρο απορροφώντας τη θερμοκρασία του. Αυτή η θερμοκρασία χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμικής ενέργειας αυτού του υβριδικού σχεδιασμού. Υψηλές ηλεκτρικές και θερμικές αποδόσεις συνδέονται με PV / T. Σε αυτήν τη μελέτη, η μαθηματική ανάλυση

χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει την επίδραση του τύπου των νανο-σωματιδίων που προστέθηκαν (SiC, CuO, και Al₂O₃), και το είδος των βασικών υγρών (νερό, γλυκερίνη, και Αιθυλενογλυκόλη) στη μεταφορά θερμότητας συναγωγή του συστήματος PV/T. Ο ηλιακός προσομοιωτής τύπου 'MINI-EESTC' τροποποιήθηκε ώστε να λειτουργεί ως φωτοβολταϊκός ανιχνευτής/T και χρησιμοποιήθηκε στο πρακτικό μέρος της μελέτης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν το ρευστό βάσης και τις θερμοφυσικές ιδιότητες των προστιθέμενων νανοςωματιδίων να επιδρούν στη μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης. Η γλυκερίνη έδειξε τη μέγιστη πτώση πίεσης ενώ το νερό έδειξε την ελάχιστη τιμή. Η προσθήκη νανο-SiC για τα υπό μελέτη ρευστά βάσης παρείχε υψηλότερη συμβατική μεταφορά θερμότητας από ό,τι η νανο-CuO και η νανο-αλουμίνα. Η επικύρωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με την πρακτική έδειξε μια καλή συμφωνία.

[8] Ο φωτοβολταϊκός θερμικός συλλέκτης μπορεί να παρέχει ηλεκτρική και θερμική ισχύ ταυτόχρονα. Σε αυτό το χαρτί, έχει ερευνηθεί αριθμητικά ένας φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης φύλλων και σωλήνων. Η εργασία των Oussama Rejeb, Houcine Dhaou και Abdelmajid Jemni επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός υβριδικού ηλιακού συλλέκτη PV/T για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συλλέκτη σε ημίξηρο κλίμα. Έχει αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς του συλλέκτη, με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο έξι βασικών συστατικών, δηλαδή ένα διαφανές κάλυμμα, ένα φωτοβολταϊκό δομοστοιχείο, μία απορροφητική πλάκα, έναν σωλήνα, ψυκτικό υγρό και μόνωση. Έχει επικυρωθεί με σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης που έχουν ληφθεί με τα πειραματικά αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, όπου έχει σημειωθεί καλή συμφωνία. Χρησιμοποιώντας το αναπτυγμένο μοντέλο μας, η θερμότητα και η ηλεκτρική ισχύς του συλλέκτη φύλλων και σωλήνων έχει αναλυθεί για τέσσερις τυπικές ημέρες του έτους με τις μετεωρολογικές παραμέτρους του Μοναστηριού στην Τυνησία. Επιπλέον, η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία του νερού εισαγωγής, ο αριθμός των καλυμμάτων υαλοπινάκων και ο συντελεστής μεταφοράς αγωγίμης θερμότητας μεταξύ του απορροφητή πιάτων και του δομοστοιχείου PV έχουν εμπλακεί για να προσδιορίσουν την επίδρασή τους στη θερμική και ηλεκτρική απόδοση. Αξιολογούνται επίσης οι μηνιαίες θερμικές και ηλεκτρικές ενέργειες.

[9] Η μελέτη αυτή των Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Gopi Krishna Kafle και Dae Hyun Kim παρουσιάζει ένα μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση των παροδικών διεργασιών φωτοβολταϊκού/θερμικού (PV/T) συστήματος και ηλιακών συλλεκτών συμβατικού τύπου. Τα μοντέλα βασίζονται στην εξοικονόμηση ενέργειας για το γυάλινο κάλυμμα, την PV πλάκα, την πλάκα απορρόφησης, το σωλήνα, το νερό στο σωλήνα και τη δεξαμενή αποθήκευσης για το PV/T και τα ίδια στρώματα, εξαιρουμένης της PV πλάκας στο συμβατικό ηλιακό συλλέκτη. Τα μοντέλα αποτελούνταν από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης που μπορούσαν εύκολα να λυθούν στο πρόγραμμα υπολογιστή Matlab με τη χρήση διαλυτών κώδικα. Για την επικύρωση των προτεινόμενων μεθόδων, έγιναν δοκιμές επιδόσεων και στα δύο συστήματα. Βρέθηκαν ικανοποιητικές συγκλίσεις μεταξύ των δεδομένων που μετρήθηκαν και των υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων. Η στατιστική ανάλυση διενεργήθηκε για την επιστημονική επικύρωση των αποτελεσμάτων. Το τρέχον μοντέλο είναι κατάλληλο για συστήματα PV/T τύπου μονού καλύμματος.

[10] Διάφορες έννοιες συνδυασμένων φωτοθερμικών συλλεκτών είναι δυνατές. Οι έννοιες αυτές διαφέρουν στην προσέγγισή τους για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης και δεν είναι εύκολο να πούμε αν η απόδοση ενός περίπλοκου σχεδίου θα είναι σημαντικά υψηλότερη από την απόδοση ενός απλούστερου. Προκειμένου να επιτευχθεί μια σαφέστερη εικόνα της αναμενόμενης απόδοσης των PV/T, οι H.A. Zondag, D.W. de Vries, W.G.J. van Helden, R.J.C. van Zolingen και A.A. van Steenhoven αξιολόγησαν εννέα διαφορετικά σχέδια. Ο σχεδιασμός

του καναλιού κάτω από το διαφανές PV δίνει την καλύτερη απόδοση, αλλά δεδομένου ότι η ετήσια απόδοση του σχεδιασμού PV-on-sheet-and-tube σε ένα σύστημα ηλιακής θέρμανσης ήταν μόνο 2% χειρότερη, ενώ είναι ευκολότερο να κατασκευαστεί, αυτός ο σχεδιασμός θεωρήθηκε ως μια καλή εναλλακτική λύση.

[11] Η βελτίωση της ηλεκτρικής απόδοσης, με τη μείωση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού συλλέκτη, καθώς και την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που παράγεται, αποτελεί τη βασική ιδέα για την ανάπτυξη των υβριδικών συλλεκτών PV/T. Ένα νέο σχέδιο των υβριδικών συλλεκτών για θέρμανση αέρα παρουσιάζεται από τους Khaled Touafek, Mourad Haddadi και Ali Malek. Η θεωρητική μελέτη πραγματοποιείται μέσω της αριθμητικής μοντελοποίησης και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναπτύσσονται ολοκληρωτικά. μάγισσα ένα πρωτότυπο πραγματοποιείται. Η πειραματική επικύρωση του μαθηματικού μοντέλου καθώς και η μελέτη της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης είναι λεπτομερής. Η εφαρμογή αυτού του νέου σχεδιασμού έχει δώσει μια καλή θερμική και ηλεκτρική απόδοση σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς υβριδικούς συλλέκτες. Η απλότητα της υλοποίησης και η εύκολη ενσωμάτωσή της στα κτίρια τα καθιστούν πιο ανταγωνιστικά.

[12] Αυτή η εργασία των Sadegh Aberoumand, Shahin Ghamari και Bahman Shabani έχει ως στόχο να διερευνήσει την ηλεκτρική και θερμική αποτελεσματικότητα ενός φωτοβολταϊκού / θερμικού (PV / T) συστήματος που ψύχεται από Ag / νανο-υγρό νερό. Το χρησιμοποιούμενο νανο-υγρό παρασκευάστηκε με μια μέθοδο ενός βήματος ηλεκτρικής έκρηξης του σύρματος (EEW) και δοκιμάστηκε για μακροπρόθεσμη σταθερότητα και ομοιομορφία. Η απόδοση του συστήματος PV/T μετρήθηκε λαμβάνοντας υπόψη ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων για τον καθορισμό βασικών δεικτών απόδοσης όπως η ενεργειακή απόδοση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας καθώς και η ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Μελετήθηκαν οι επιδράσεις της ροής μάζας στην αποτελεσματικότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση νάνο-ρευστών για την ψύξη του συστήματος φωτοβολταϊκών/φθοροχλωρανθράκων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση και την αποτελεσματικότητα άσκησης του συστήματος. Διαπιστώθηκε επίσης ότι αυτή η θετική επίδραση είναι εντονότερη με την αύξηση της συγκέντρωσης του νάνο-ρευστού και την αύξηση του ρυθμού ροής (δηλαδή, προς μια τυρβώδη ροή). Με τη χρήση νάνο-ρευστού 4% (με τυρβώδη ροή) η ισχύς εξόδου του πίνακα αυξήθηκε κατά ~35% και ~10% σε σύγκριση με όταν δεν εφαρμόστηκε ψύξη και ψύξη νερού αντίστοιχα. και η αποτελεσματικότητα της εξώθησης προσδιορίστηκε επίσης να είναι 50% και 30% υψηλότερη από ό, τι όταν δεν χρησιμοποιήθηκε ψύξη και ψύξη νερού, αντίστοιχα.

[13] Το τρέχον έργο που δημιουργήθηκε από τους Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Jacopo Vivian, Lorenzo Croci και Giorgio Besagni συμβάλλει στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε οικιακή κλίμακα προτείνοντας και επικυρώνοντας ένα νέο μοντέλο προσομοίωσης με συμπαγείς παραμέτρους για φωτοβολταϊκούς / θερμικούς υβριδικούς ηλιακούς συλλέκτες χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιούνται σε πειραματική εγκατάσταση. Η προσέγγιση μοντελοποίησης, η οποία εξετάζει επίσης την επίδραση των θερμικών χωρητικότητων των στοιχείων που συνθέτουν το φωτοβολταϊκό θερμικό συλλέκτη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες. διερευνήθηκαν επίσης οι επιδράσεις των θερμικών χωρητικότητων του συλλέκτη. Τέλος, το μοντέλο προσομοίωσης υλοποιήθηκε ως λογισμικό TYPE of Transient System Simulation (TRNSYS).

[14] Οι Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Gopi Krishna Kafle και Dae Hyun Kim παρουσίασαν ένα μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση των μεταβατικών διεργασιών του φωτοβολταϊκού/θερμικού (PV/T) συστήματος και των συμβατικών ηλιακών συλλεκτών τύπου. Τα μοντέλα βασίζονται στην εξοικονόμηση ενέργειας για το κάλυμμα γυαλιού, φωτοβολταϊκή πλάκα, απορροφητική πλάκα, σωλήνα, νερό στο σωλήνα και δεξαμενή

αποθήκευσης για το PV / T και τα ίδια στρώματα εκτός από φωτοβολταϊκή πλάκα σε συμβατικό ηλιακό συλλέκτη. Τα μοντέλα αποτελούνταν από πρώτης τάξης συνήθεις διαφορικές εξισώσεις που θα μπορούσαν εύκολα να επιλυθούν στο Matlab. Για τους σκοπούς της επικύρωσης των προτεινόμενων μεθόδων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές επιδόσεων και στα δύο συστήματα. Βρέθηκαν ικανοποιητικές συγκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων δεδομένων και των υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων. Η στατιστική ανάλυση διενεργήθηκε για την επιστημονική επικύρωση των αποτελεσμάτων. Το τρέχον μοντέλο είναι κατάλληλο για τα συστήματα τύπου σωλήνα ενιαίας κάλυψης PV/T.

[15] Το συγκεκριμένο έγγραφο των Jarosław Bigorajski και Dorota Chwieduk αναλύει τη δυνατότητα εφαρμογής PV/T συστημάτων σε μέτριες κλιματικές συνθήκες. Η ενότητα PV/T με υγρό ενιαίο υαλοπίνακα έχει επιλεγεί για εξέταση ως η πλέον κατάλληλη. Παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο της λειτουργίας του PV/T συστήματος. Ως αποτέλεσμα, ο συντελεστής διόρθωσης - σχεδιασμού έχει εισαχθεί στον τύπο. Βοηθά να ληφθεί υπόψη ο σχεδιασμός (αριθμός καλύψεων) της ενότητας PV/T, όταν η ενεργειακή της απόδοση και λειτουργία καθορίζονται μέσω μελετών προσομοίωσης. Μελέτες προσομοίωσης της δυναμικής ενός συστήματος μικροκλίματα PV / T που παρέχει ενέργεια (ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα στο οικιακό σύστημα ζεστού νερού) σε ένα τυποποιημένο σπίτι μίας οικογένειας έχει πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας δικό του αριθμητικό κώδικα. Μελέτες προσομοίωσης της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε εφαρμογές μικροκλίματά σε χώρες μεγάλου γεωγραφικού πλάτους δείχνουν ότι για 2 μήνες ετησίως, τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο, παράγεται περισσότερη ηλεκτρική από τη θερμική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

[16] Οι Ying Yu, Enshen Long, Xi Chen και Hongxing Yang διερεύνησαν την απόδοση ενός χαμηλού κόστους φωτοβολταϊκού θερμικού συλλέκτη (PVT). Το πείραμα μέτρησε όλες τις κύριες ιδιότητες του ανεπτυγμένου δομοστοιχείου PV/T και στη συνέχεια, τα σταθερά αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν την απόδοση του πρωτοτύπου PV/T στο TRNSYS. Συγκρίνοντας την προσομοίωση και τα πειραματικά αποτελέσματα, επιλέχθηκαν δύο ισχυρά μοντέλα που έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα στο χαρακτηρισμό των θερμικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων του συλλέκτη PVT. Μέσω της επικύρωσης των αριθμητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα, η απόκλιση μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρούμενων τιμών μειώθηκε περαιτέρω.

[17] Οι Ali H.A. Al-Waeli, K. Sopian, Jabar H. Yousif, Hussein A. Kazem, John Boland και Miqdam T. Chaichan διερευνούν τα συστήματα PV/T και τα διάφορα ψυκτικά υγρά που ρέουν μέσω των σωλήνων ψύξης. Ωστόσο, το παρόν έγγραφο εστιάζει στον έλεγχο διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό τις ίδιες συνθήκες και το ίδιο περιβάλλον, με τη χρήση ενός συστήματος πολυστρωματικής αντίληψης (MLP) βασισμένου σε τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN). Επίσης, διερευνήθηκαν οι διαφορές στην απόδοση αυτών των συστημάτων σε θερμικά και ηλεκτρικά συστήματα όταν χρησιμοποιείτε μόνο ένα σύστημα προσομοίωσης (MLP). Η προτεινόμενη προσέγγιση ANN απέδειξε ότι η χρήση του νάνο-ρευστού / νανοPCM ενισχύθηκε από την ηλεκτρική απόδοση από 8,07% σε 13,32% και η θερμική απόδοση έφτασε το 72%. Επίσης, η τάση βελτιώθηκε σημαντικά. Πολλές μέθοδοι μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν για την επικύρωση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου ANN, όπως το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE), η συσχέτιση (R) και ο συντελεστής προσδιορισμού (R²).

[18] Οι Gabriel Villarrubia, Juan F. De Paz, Pablo Chamoso και Fernando De la Prieta ενέλησαν τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων ANN για την προσέγγιση της αντικειμενικής λειτουργίας στα προβλήματα βελτιστοποίησης. Η αντικειμενική συνάρτηση προσεγγίζεται από μια μη γραμμική παλινδρόμηση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ενός προβλήματος

βελτιστοποίησης. Η παράγωγος της νέας αντικειμενικής συνάρτησης πρέπει να είναι πολυώνυμο, ούτως ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

[19] Οι Kallol Roy, Kamal Krishna Mandal και Atis Chandra Mandal το 2019 παρουσίασαν μια έξυπνη τεχνική για το EMS που βασίζεται στο Recurrent Neural Network (RNN) με τη βοήθεια του αλγορίθμου Ant-Lion Optimizer (ALO). Ο βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων μέσω της ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής, καθώς και καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως το φωτοβολταϊκό σύστημα, WT, και το σύστημα αποθήκευσης. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιείται για τη βέλτιστη λειτουργία των πικροπηγών για τη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά ωριαία ημέρα και σε πραγματικό χρόνο. Είναι σε θέση να αναλύσει τους τεχνικούς και οικονομικούς χρονικώς εξαρτώμενους περιορισμούς και επιχειρεί να καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση φορτίου με ελάχιστο ενεργειακό κόστος. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η απόκριση ζήτησης (DR) αξιολογείται με τη χρήση του RNN και επιπλέον δεικτών για την αξιολόγηση της ανταπόκρισης του πελάτη. Επιπλέον, ο αλγόριθμος ALO αναπτύχθηκε για να λύσει τα οικονομικά ζητήματα για τον προσδιορισμό της παραγωγής και αποθήκευσης φορτίου. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται στην πλατφόρμα εργασίας MATLAB/Simulink και οι επιδόσεις τους δοκιμάζονται με τις υπάρχουσες μεθόδους όπως GA, ABC και BFA αντίστοιχα.

[20] Ο Seyedali Mirjalili με το άρθρο του “The Ant Lion Optimizer” προτείνει έναν νέο αλγόριθμο που ονομάζεται Ant Lion Optimizer (ALO). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίνεται σε τρεις φάσεις. Πρώτον, χρησιμοποιείται ένα σύνολο 19 μαθηματικών συναρτήσεων για τον έλεγχο διαφορετικών χαρακτηριστικών του ALO. Δεύτερον, τρία κλασικά προβλήματα μηχανικής επιλύονται από την ALO. Τέλος, τα σχήματα δύο ελίκων πλοίων βελτιστοποιούνται από την ALO ως προκλητικά περιορισμένα πραγματικά προβλήματα. Στις δύο πρώτες δοκιμαστικές φάσεις, ο αλγόριθμος ALO συγκρίνεται με μια ποικιλία αλγορίθμων στη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα των συναρτήσεων δοκιμής αποδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι σε θέση να παρέχει πολύ ανταγωνιστικά αποτελέσματα όσον αφορά τη βελτιωμένη εξερεύνηση, την τοπική αποφυγή βέλτιστων, την εκμετάλλευση και τη σύγκλιση. Ο αλγόριθμος ALO βρίσκει επίσης ανώτερους βέλτιστους σχεδιασμούς για την πλειοψηφία των κλασικών προβλημάτων μηχανικής που χρησιμοποιούνται, δείχνοντας ότι αυτός ο αλγόριθμος έχει πλεονεκτήματα στην επίλυση περιορισμένων προβλημάτων με διαφορετικούς χώρους αναζήτησης.

Ύστερα από ενδελεχή μελέτη της ανωτέρω βιβλιογραφίας, η παρούσα πτυχιακή έχει στόχο να αναδείξει την σημασία και την συμβολή της επιστήμης των υπολογιστών στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχοντας, μεταξύ άλλων, καινοτόμες τεχνικές προσομοίωσης και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για εξαγωγή προγνωστικών. Όλα αυτά και άλλα θα λάβουν χώρα στις επόμενες σελίδες αυτής της εργασίας.

2. Ηλιακή ενέργεια

Το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας είναι αφιερωμένο στην ηλιακή ενέργεια. Με τον όρο ηλιακή ενέργεια, τις περισσότερες φορές απευθυνόμαστε στη διαδικασία κατά την οποία η ηλιακή ενέργεια, από τον ήλιο, μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ή αλλιώς ηλιακά συστήματα.

Ωστόσο, το μέγεθος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα ηλιακά συστήματα σε χρονικό διάστημα ενός έτους παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία. Και τούτο διότι, η ενέργεια που παράγεται από τα ηλιακά συστήματα εξαρτάται άμεσα από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Αυτό περιπλέκει τη δουλειά των εταιρειών παραγωγής ενέργειας να προβλέπουν σωστά και να σχεδιάζουν επιχειρηματικές στρατηγικές. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές στράφηκαν στην πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι το οποίο αποδείχθηκε απαραίτητο για την κατασκευή, όσο το δυνατόν αποδοτικότερων ηλιακών συστημάτων.

3. Συμβατικά Ηλιακά Συστήματα

Ας ανατρέξουμε λίγο στο παρελθόν και ας παρατηρήσουμε τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτό που βλέπουμε είναι συμβατικά ηλιακά συστήματα που απορροφούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό. Αυτό που δεν βλέπουμε όμως είναι το μέγεθος των ενεργειακών απωλειών που προκύπτουν.

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ικανά να εκμεταλλευτούν μόνο το 6% με 15% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Από την υπόλοιπη ακτινοβολία που περισσεύει, ένα μέρος αυτής επιστρέφεται στο περιβάλλον μέσω της αντανάκλασης και το άλλο απορροφάται από το φωτοβολταϊκό σύστημα ως θερμότητα. Για τον λόγο αυτό, έπεσαν διάφορες προτάσεις και εναλλακτικές στο τραπέζι, για την αύξηση της απόδοσης αυτών των συστημάτων.

4. Υβριδικά Ηλιακά / Θερμικά Συστήματα (PV/T)

Μία εξ αυτών ήταν και η προσάρτηση ενός θερμικού συλλέκτη στα είδη υπάρχοντα συμβατικά μοντέλα. Έτσι γεννιούνται τα Υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα (PV/T). Ο εν λόγω θερμικός συλλέκτης, είναι σχεδιασμένος ούτως ώστε να συλλέγει και να χρησιμοποιεί την ποσότητα της θερμότητας που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή μονάδα. Ο συλλέκτης, μπορεί να έχει διάφορες μορφές. Παραδείγματος χάριν, ορισμένοι συλλέκτες αποτελούνται από σωλήνες που είναι τοποθετημένοι στο πίσω μέρος των ηλιακών συστημάτων, άλλοι έχουν την μορφή «καναλιών» ή και δεξαμενών, σε κάθε περίπτωση όμως, ανάμεσα τους κυκλοφορεί ψυκτική ύλη. Αυτή η ψυκτική ύλη είναι διπλής σημασίας, Και τούτο διότι, απορροφά την παραχθείσα θερμότητα και ύστερα την μεταφέρει σε άλλες εφαρμογές ή και μορφές ενώ παράλληλα ψύχει και την φωτοβολταϊκή μονάδα. Κατά συνέπεια επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση του ηλιακού συστήματος, αποφεύγοντας την υπερθέρμανση αυτών. Για του λόγου του αληθές, από την πλειοψηφία των ερευνών που έχουν διεξαχθεί επί του θέματος προκύπτει το εξής συμπέρασμα. Αποδοτικότερη λειτουργία των PV/T έχει παρατηρηθεί κατά τους φθινοπωρινούς κι ανοιξιάτικους μήνες, όπου η ποσότητα της ακτινοβολίας είναι αυξημένη ενώ η θερμοκρασία παραμένει σε σχετικά χαμηλά έως μέτρια επίπεδα, σε αντίθεση με τους θερινούς μήνες όπου η θερμοκρασία φτάνει τα υψηλότερα επίπεδα του έτους.

Οι πλειοψηφία των ερευνών που έχουν αναπτυχθεί, για την μελέτη και βελτίωση των PV/T, έχουν προβεί στην κατασκευή μαθηματικών μοντέλων, που περιγράφουν τη συμπεριφορά και την αποδοτικότητα των επιμέρους τμημάτων ενός συστήματος PV/T. Έτσι οδηγούμαστε στην ανάπτυξη ενός κώδικα που είναι ικανός να υπολογίσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους σχεδιασμού που απαιτούνται για την μετάβαση από ένα συμβατικό ηλιακό σύστημα σε έναν υβριδικό ηλιακό / θερμικό συλλέκτη.

4.1 Σχεδιασμός ηλεκτρικού / θερμικού μοντέλου προσομοίωσης.

Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί και η έρευνα που διεξήχθη από τους M.S. Khani, M. Baneshi και M. Eslami με τίτλο “Bi-objective optimization of photovoltaic-thermal (PV/T) solar collectors according to various weather conditions using genetic algorithm: A numerical modeling” [6].

Στόχος των ερευνητών στο ανωτέρω παράδειγμα ήταν ο σχεδιασμός ενός λεπτομερούς δισδιάστατου θερμικού και ηλεκτρικού μοντέλου για αριθμητική ανάλυση ενός PV/T συστήματος με σκοπό την πολλαπλή βελτιστοποίηση των διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Η ψυκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το παράδειγμα είχε ως βάση το νερό.

4.1.1. Μαθηματικό Μοντέλο

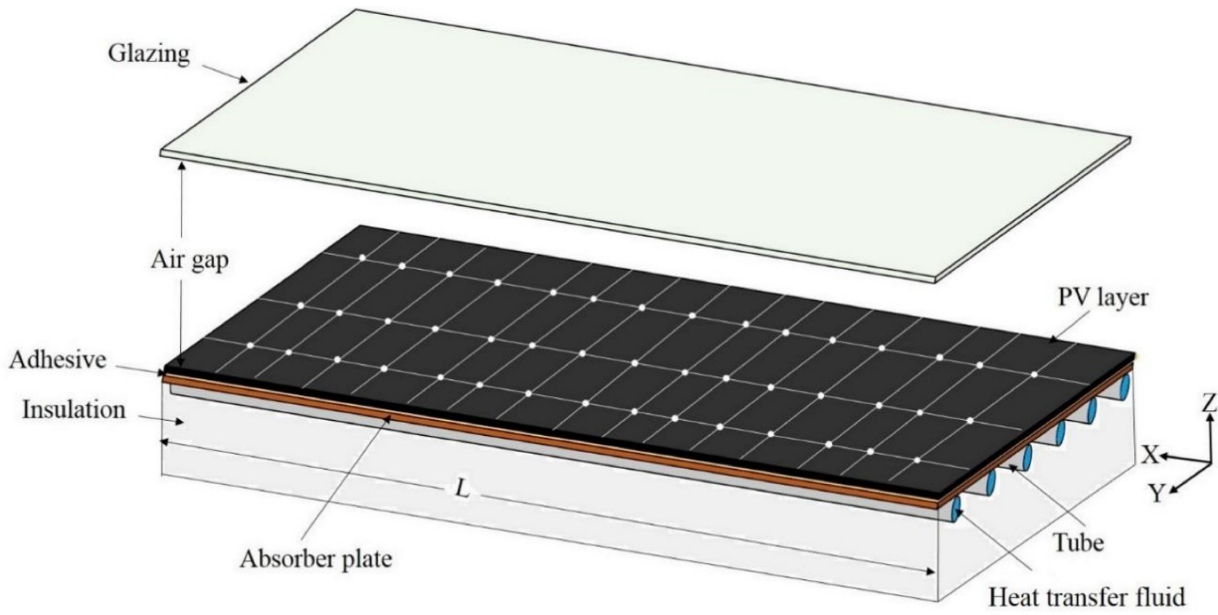
Ένας υδρόψυκτος συλλέκτης PV/T, αποτελείται, όπως βλέπουμε και στην εικόνα 1, από τα ακόλουθα μέρη:

Έναν υαλοπίνακα, ένα στρώμα PV και μια πλάκα απορρόφησης (όπου και συνδέονται οι σωλήνες). Στους εν λόγο σωλήνες, κυκλοφορεί η ψυκτική ύλη, σε αυτή τη περίπτωση έχει ως βάση το νερό, η οποία μεταφέρει χρήσιμη θερμότητα από την πλάκα απορρόφησης.

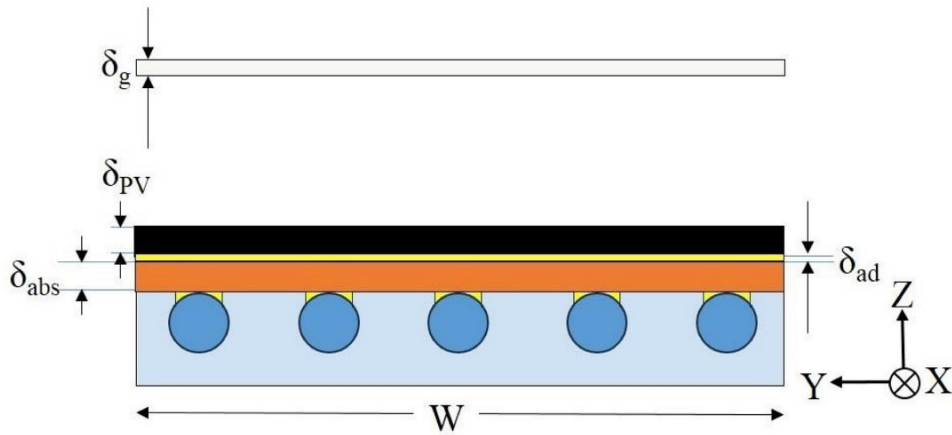
Το μαθηματικό μοντέλο που θα αναπτυχθεί σε αυτό το κεφάλαιο θα είναι σε θέση να υπολογίσει τις παραμέτρους σχεδιασμού αναφορικά με τον θερμικό συλλέκτη που θα εφαρμοστεί. Αυτοί είναι οι εξής :

- 1 Ο αριθμός των σωλήνων (N_{tu})
- 2 Η απόσταση μεταξύ των σωλήνων (W_{tu})
- 3 Η διάμετρο των σωλήνων (D_{tu})
- 4 Ο ρυθμός ροής μάζας μέσα σε κάθε σωλήνα ($m_{_}$)

Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί το ενεργειακό ισοζύγιο για τα επιμέρους τμήματα του συστήματος.



(a)



(b)

Εικόνα 1: Τα επιμέρους τμήματα ενός PV/T. Η εικόνα αντλήθηκε από:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219319188>

4.1.1.1. Ενεργειακό ισοζύγιο

Η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου του PV/T αποτελείται από ένα σύνολο συναρτήσεων οι οποίες εκφράζουν το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε ένα από τα μέρη του PV/T ξεχωριστά. Αυτά εκφράζονται ως εξής:

Υαλοπίνακας:

$$\rho_g \delta_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = a_g \times G + h_{r,g-env} (T_{sky} - T_g) + h_{wi} (T_{amb} - T_g) + (h_{r,pv-g} + h_{conv,pv}) (T_{pv} - T_g) + K_g \delta_g \left(\frac{\partial^2 T_g}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial Y^2} \right) \quad (1)$$

Όπου, σύμφωνα με τον Swinbank:

$$T_{sky} = 0.0522 \times T_{amb}^{1.5} \quad (2)$$

$$h_{wi} = 2.3 + 3V_{wi} \quad 0 < V_{wi} < 7 \text{ m/s} \quad (3)$$

$$h_{conv.pv-g} = \frac{Nu_{air} K_{air}}{\delta_{air}} \quad (4)$$

Από την 4:

$$Nu_{air} = 1 + 1.44 \times \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right]^+ \times \left[1 - \frac{1708 \times (\sin \theta)^{1.66}}{Ra \cos \theta} \right] + \left[\frac{(Ra \delta_{air} \cos \theta)^{1.66}}{5830} - 1 \right]^+ \quad (5)$$

Και

$$Ra = \frac{g \beta_{air} (T_{pv} - T_g) \delta_{air}^3}{\alpha_{air} \nu_{air}} \quad (6)$$

Στην εξίσωση 5, ο εκθέτης "+" σημαίνει ότι η έκφραση μέσα στην αγκύλη περιλαμβάνεται στην εξίσωση εάν και εφόσον είναι θετική, διαφορετικά αγνοείται.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ακτινοβολίας μεταξύ του υαλοπίνακα και του στρώματος PV ($h_{r,pv-g}$) και μεταξύ του υαλοπίνακα και του ουρανού ($h_{r,g-env}$) εκφράζονται από τις εξισώσεις 7 και 8 αντίστοιχα.

$$h_{r,pv-g} = \frac{\varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_{PV}^2) (T_g + T_{pv})}{\frac{1 - \varepsilon_{PV}}{\varepsilon_{PV} A_{pv}} + \frac{1}{A_{pv} F_{pv-g}} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g A_g}} \quad (7)$$

$$h_{r,g-env} = \varepsilon_g \sigma (T_g^3 + T_g^2 T_{sky} + T_g T_{sky}^2 + T_{sky}^3) \quad (8)$$

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2, ο συντελεστής σχήματος ακτινοβολίας μεταξύ των στοιχείων του γυάλινου καλύμματος και του στρώματος PV (F_{pv-g}), μπορεί να ληφθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_{pv-g} = F_{1-2} = \frac{1}{((x_2 - x_1)(y_2 - y_1))} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j+k+l} F(x_i, y_i, \eta_i, \xi_i) \quad (9)$$

Όπου

$$F(x, y, \eta, \xi) = \frac{1}{2\pi} \left(\begin{aligned} & (y - \eta)[(x - \xi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{[(x - \xi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \\ & + (x - \xi)[(y - \eta)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{[(y - \eta)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \\ & - \frac{z^2}{2} \ln[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2] \end{aligned} \right) \quad (10)$$

Φωτοβολταϊκό στρώμα PV:

$$\begin{aligned} \rho_{PV} \delta_{PV} C_{PV} \frac{\partial T_{PV}}{\partial t} &= a_{PV} \tau_g \times G - E_{elec} + h_{cond, PV-abs}(T_{abs} - T_{PV}) \\ &+ (h_{r, PV-g} + h_{conv, PV-g}) \times (T_g - T_{PV}) + K_{PV} \delta_{PV} \left(\frac{\partial^2 T_{PV}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_{PV}}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

όπου είναι η θερμοκρασία του απορροφητή και είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αγωγιμότητας μεταξύ του Φ/Β στρώματος και της πλάκας απορρόφησης [15]:

$$h_{cond, PV-abs} = K_{ad} / \delta_{ad} \quad (12)$$

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση (13):

$$E_{elec} = G \times \tau_g \times \eta_{PV} \times p_{ac} \times [1 - \beta(T_{PV} - T_{ref})] \quad (13)$$

όπου και είναι η απόδοση ηλεκτρικής μετατροπής στη θερμοκρασία αναφοράς ($T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) και ο συντελεστής θερμοκρασίας ηλιακής κυψέλης, αντίστοιχα.

Πλάκα απορρόφησης:

Το ενεργειακό ισοζύγιο για το συνδεδεμένο με σωλήνα τμήμα της πλάκας απορρόφησης μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} \rho_{abs} \delta_{abs} C_{abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial t} &= h_{cond, PV-abs}(T_{PV} - T_{abs}) + \frac{A_{abs, tu}}{A_{abs}} h_{cond, abs-tu} \\ &\times (T_{tu} - T_{abs}) + K_{abs} \delta_{abs} \left(\frac{\partial^2 T_{abs}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_{abs}}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Ενώ για το άλλο τμήμα που είναι σε επαφή με τη μόνωση η εξίσωση 14 μειώνεται σε:

$$\begin{aligned} \rho_{abs} \delta_{abs} C_{abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial t} &= h_{cond, PV-abs}(T_{PV} - T_{abs}) + \\ &h_{cond, in abs}(T_{amb} - T_{abs}) + K_{abs} \delta_{abs} \left(\frac{\partial^2 T_{abs}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_{abs}}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Όπου:

$$h_{cond,in\ abs} = \left(\left(\frac{t_{ins}}{K_{ins}} \right) + \left(\frac{t_{abs}}{K_{abs}} \right) \right) - 1 \quad (16)$$

Και

$$h_{cond,abs-tu} = K_{ad} / \delta_{ad} \quad (17)$$

Οι ανωτέρω εξισώσεις, υπολογίζουν τη μεταφορά θερμότητας αγωγιμότητας μεταξύ της πλάκας απορρόφησης και του σωλήνα ή της μόνωσης, αντίστοιχα.

Σωλήνας:

$$\begin{aligned} \rho_{tu} \delta_{tu} c_{tu} Pe \frac{\partial T_{tu}}{\partial t} = \frac{Pe}{4} h_{cond,abs-tu} (T_{abs} - T_{tu}) + Pe h_{conv,tu-f} (T_f - T_{tu}) \\ + \frac{3Pe}{4} h_{cond,tu-i} (T_{amb} - T_{tu}) + K_{tu} Pe \delta_{tu} \left(\frac{\partial^2 T_{tu}}{\partial X^2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

Όπου

$$Pe = 2\pi R \quad (19)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του σωλήνα και του ρευστού μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εκφράσεις :

$$\begin{aligned} Nu &= 4.34 & Re < 2300 \\ Nu &= 0.023 Re^{0.8} pr^{0.4} & Re < 2300 \quad (20) \\ h_{conv,tu-f} &= K_f \frac{Nu}{D_{tu}} \end{aligned}$$

Ψυκτικό υγρό:

$$\rho_f c_f \pi R^2 \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + U \frac{\partial T_f}{\partial X} \right) = Pe \times h_{conv,tu-f} \times (T_{tu} - T_f) \quad (21)$$

Η απαιτούμενη ενέργεια άντλησης για την εργασία ρευστού δίνεται από:

$$W_p = \frac{N m g h_i}{\eta_{pump}} \quad (22)$$

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απώλειες κεφαλής στο σύστημα συμπεριλαμβανομένων των απωλειών τριβής μέσα σε σωλήνες, κεφαλές και συνδέσμους, το h_i υπολογίζεται από:

$$h_l = \frac{8m^2}{\rho^2 g \pi^2 D_{tu}^4} \left(f_{tu} \frac{1}{D_{tu}} + K_1 + K_2 \right) + \frac{8(Nm)^2}{\rho^2 g \pi^2 D_{header}^4} f_{header} \frac{1}{D_{header}} \quad (23)$$

Όπου :

$$\begin{cases} f = \frac{64}{Re} & Re < 2300 \text{ Laminar Flow} \\ f = \frac{1}{(0.79 \log(Re) - 1.64)^2} & Re > 2300 \text{ Turbulent Flow} \end{cases} \quad (24)$$

και $K_1=1$ και $K_2=1,5$ είναι οι συντελεστές απώλειας στην είσοδο και έξοδο του σωλήνα, αντίστοιχα. Οι ηλεκτρικές και θερμικές αποδόσεις ορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\eta_{elec} = \frac{E_{elec} \times A_c - W_p}{(G \times A_c)} \quad (25)$$

$$\eta_{th} = \frac{m \times A_c \times (T_{f,o} - T_{f,i})}{(G \times A_c)} \quad (26)$$

4.1.1.2 Οριακές συνθήκες

- Για την επίλυση των εξισώσεων (1, 11, 14 και 15) εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες οριακές συνθήκες:

$$\frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad 0 \leq Y \leq W \text{ για } X = 0 \text{ και } X = L \quad (27)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Y} = 0 \quad 0 \leq X \leq L \text{ για } Y = 0 \text{ και } Y = W \quad (28)$$

Για την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου του σωλήνα (Εξ. 18), οι οριακές συνθήκες μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$T_{tu} = T_{f,in} \text{ για } X = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial T_{tu}}{\partial X} = 0 \text{ για } X = L \quad (30)$$

Από τα ανωτέρω, προκύπτει ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων από το οποίο θα προκύψει η δισδιάστατη μεταβατική κατανομή θερμοκρασίας $T(X, Y, t)$ για κάθε στρώμα του PV. Εδώ έρχονται να συμβάλουν και τα υπολογιστικά συστήματα καθώς για την επίλυση του

προαναφερθέντος συστήματος, γίνεται χρήση του συστήματος έμμεσης διακριτοποίησης FTCS¹ (Forward Time Central Difference) και του MATLAB² με την επαναληπτική μέθοδο Gauss-Seidel³.

Μία αντίστοιχη έρευνα διεξαχθεί και από τους Oussama Rejeb, Houcine Dhaou και Abdelmajid Jemni στην εργασία τους με τίτλο «Ανάλυση των παραμέτρων επίδρασης ενός φωτοβολταϊκού θερμικού συλλέκτη: Μελέτη περίπτωση για τις κλιματικές συνθήκες του Μοναστηριού στην Τυνησία ».[21]

Η εργασία τους είχε στόχο να διερευνήσει την επίδραση των διαφορετικών παραμέτρων, όπως οι μετεωρολογικές, οι σχεδιαστικές και οι οπτικές παράμετροι

Και σε αυτή τη περίπτωση σχεδιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο αποτελούμενο από τις εξισώσεις ισοζυγίου ούτως ώστε να επιτευχθεί η προσημείωση του PV/T.

1 FTCS: Μία μέθοδος επίλυσης θερμικών εξισώσεων.

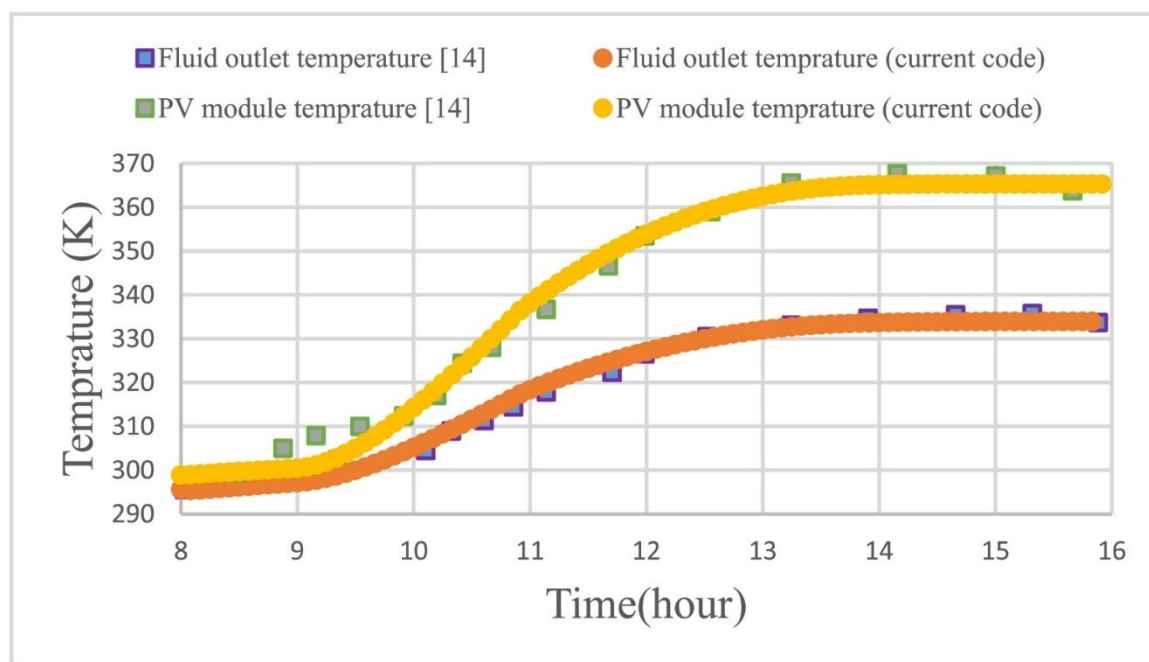
2 MATLAB: Μία πλατφόρμα προγραμματισμού και αριθμητικής υπολογιστικής που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεδομένων, ανάπτυξη αλγορίθμων και τη δημιουργία μοντέλων.

3Μέθοδος Gauss-Seidel : Μια επαναληπτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων.

4.1.2. Συμπέρασμα Κεφαλαίου

Από τις δύο ανωτέρω έρευνες προκύπτουν τα εξής συγκριτικά αποτελέσματα:

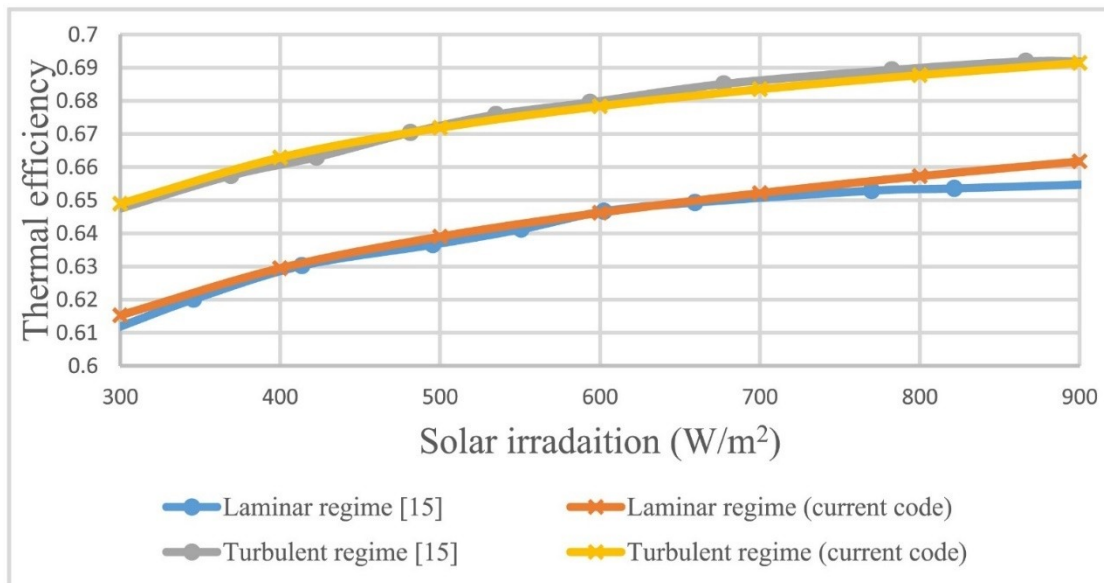
Στην εικόνα 2 βλέπουμε τι διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας του PV/T και των ψυκτικών υγρών συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 2: Διακύμανση θερμοκρασίας PV/T και ψυκτικού υγρού σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η εικόνα αντλήθηκε από: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219319188>

Αυτό που παρατηρούμαι είναι ότι η θερμοκρασία ανεβαίνει όσο προχωράμε προς τις μεσημεριανές ώρες.

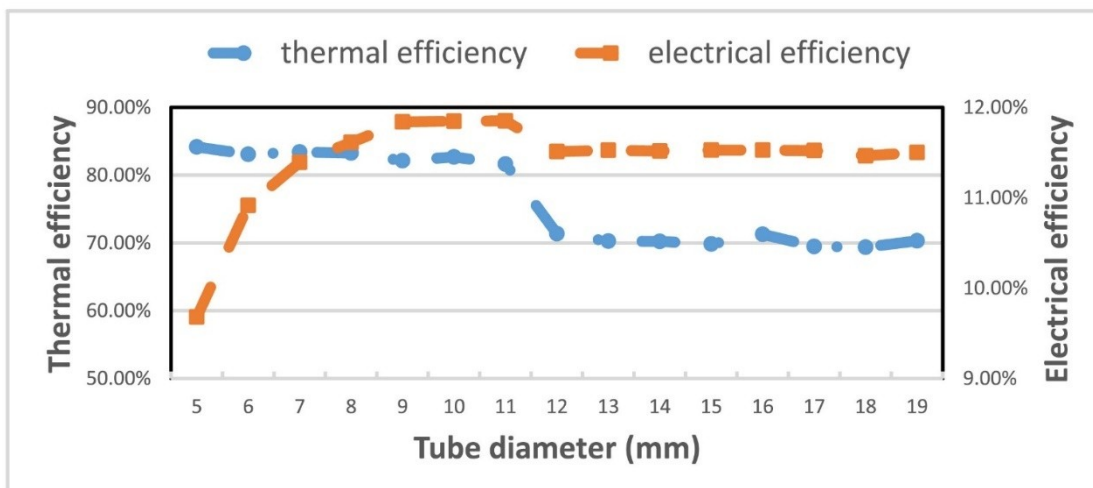
Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η θερμική απόδοση του συστήματος PV/T έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας υπό ελασματοειδή και τυρβώδη ροή .



Εικόνα 3 Διακύμανση της θερμικής απόδοσης σε συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η εικόνα αντλήθηκε από <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219319188>

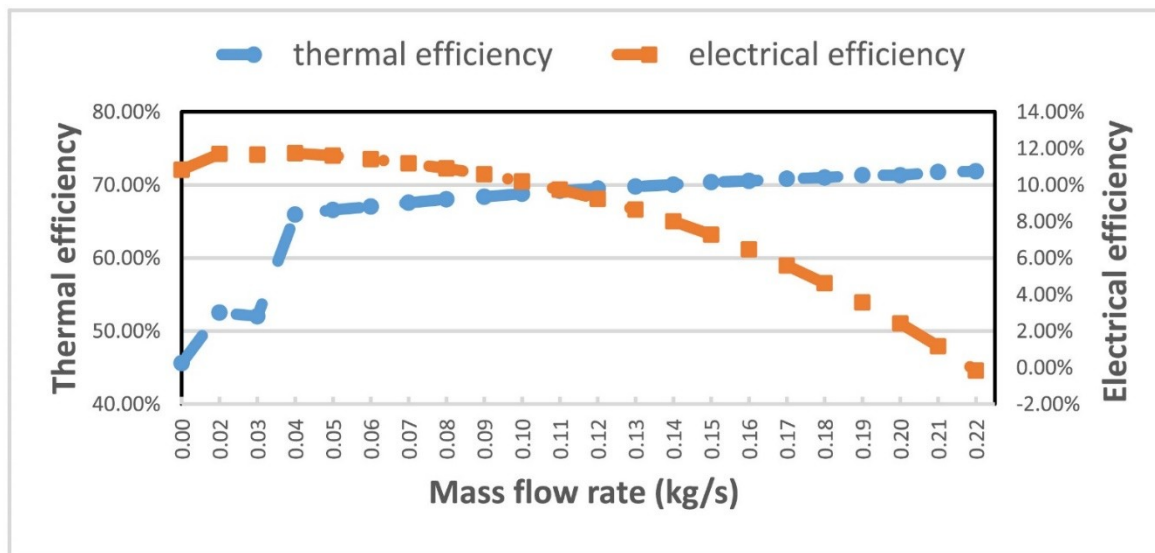
Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι, και στις δύο περιπτώσεις, όσο περισσότερο είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερη είναι και η θερμική απόδοση του PV/T.

Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει από την έρευνα των M.S. Khani, M. Baneshi και M. Eslami [6] είναι το γεγονός ότι εξίσου σημαντικό ρόλο παίζει και ο αριθμός των σωλήνων που εφαρμόζονται στον PV/T, η διάμετρος αυτών, καθώς και ο ρυθμός ροής μάζας εντός των σωλήνων. Αυτό ακριβώς περιγράφεται στις εικόνες 4, 5 και 6



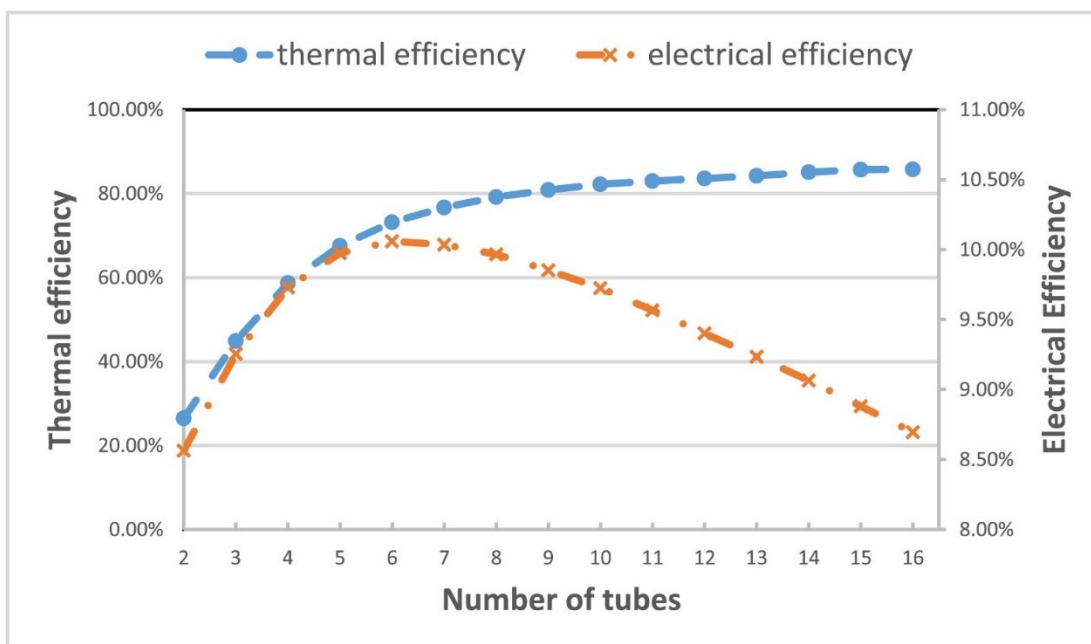
Εικόνα 4 Θερμική και ηλεκτρική αποτελεσματικότητα σε σχέση με τη διάμετρο των σωλήνων. Η εικόνα αντλήθηκε από : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219319188>

Σύμφωνα με την εικόνα 4 καλύτερη αναλογία σε θερμική και ηλεκτρική απόδοση έχουμε με τη χρήση σωλήνων διαμέτρου 9 – 11 mm με 80.00% θερμική αποδοτικότητα και 11.50% ηλεκτρική αποδοτικότητα.



Εικόνα 5 Διακύμανση θερμικής και ηλεκτρικής αποδοτικότητας σε σχέση με το ρυθμό ροής μάζας. Η εικόνα αντλήθηκε από : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219319188>

Σύμφωνα με την εικόνα 5 καλύτερη αναλογία θερμικής και ηλεκτρικής αποδοτικότητας έχουμε όταν ο ρυθμός ροής μάζας κυμαίνεται μεταξύ 0,07 και 0.09 kg/s με 70.00% θερμική αποδοτικότητα και 11.00% ηλεκτρική αποδοτικότητα.



Εικόνα 6 Διακύμανση θερμικής και ηλεκτρικής αποδοτικότητας σε σχέση με τον αριθμό των σωλήνων. Η εικόνα αντλήθηκε από : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219319188>

Σύμφωνα με την εικόνα 6 καλύτερη αναλογία θερμικής και ηλεκτρικής αποδοτικότητας έχουμε όταν ο αριθμός των σωλήνων είναι 7 όπου έχουμε 10.00% ηλεκτρική αποδοτικότητα και περίπου 75.00% θερμική αποδοτικότητα

4.2. Προσομοίωση του PV/T μέσω του TRNSYS.

Μια ακόμη έρευνα η οποία αξίζει να σημειωθεί σε αυτή την πτυχιακή είναι αυτή των Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Jacopo Vivian, Lorenzo Croci και Giorgio Besagni [13]. Οι προαναφερθέντες, ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης ενός PV/T το οποίο και υλοποιήθηκε ως λογισμικό TYPE of Transient System Simulation (TRNSYS).

Ούτως ώστε να εξεταστεί η αποδοτικότητα του μοντέλου και η θερμική χωρητικότητα είναι αναγκαίο να διακριθεί ο υβριδικός συλλέκτης σε επιμέρους στοιχεία και να αναπτυχθούν εξισώσεις θερμικής ισορροπίας για κάθε ένα από αυτά. Ως αποτέλεσμα αυτού, προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων ικανό να υπολογίσει τις άγνωστες θερμοκρασίες που χρειάζονται, με σκοπό να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις τόσο της θερμικής χωρητικότητας του συστήματος όσο και της ροής του ανέμου στην επιφάνεια του συλλέκτη PVT.

4.2.1. Μαθηματικό μοντέλο.

Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ο PV/T, για τη συγκεκριμένη έρευνα [13], είναι τέσσερα σε αριθμό και είναι τα εξής: (1) ένα γυάλινο κάλυμμα, (2) ένα φωτοβολταϊκό στρώμα από κυψέλες πολυπυριτίου, (3) μια πλάκα απορρόφησης, από αλουμίνιο, εγκατεστημένη στην πίσω πλευρά του συλλέκτη, και (4) ένα θερμομονωτικό πάνελ.

4.2.1.1. Θερμικό ισοζύγιο

Προκειμένου να κατασκευαστεί το μαθηματικό μοντέλο θα πρέπει να υπολογιστεί το θερμικό ισοζύγιο για κάθε ένα από τα επιμέρους στοιχεία του PV/T.

Το θερμικό ισοζύγιο για το γυάλινο κάλυμμα:

Με την εξίσωση 7 περιγράφεται η ισορροπία των ροών θερμότητας στο γυάλινο κάλυμμα του ισοδύναμου ηλεκτρικού δικτύου.

$$\bar{G}A_{abs-g} + A \cdot \frac{T_{PV}-T_g}{R_{g-PV}} - A \cdot (T_g - T_a) \cdot H_{g-a} = C \cdot \frac{\Delta T_g}{\Delta t_{timestep}} \quad (31)$$

Όπου $\bar{G}A_{|g}$ είναι η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάτε από το γυαλί (εξ.8), R_{g-PV} είναι η θερμική αντίσταση (εξ.9), H_{g-a} είναι ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης επί της γυάλινης επιφάνειας (εξ.10), C_g είναι η θερμική χωρητικότητα του στρώματος γυαλιού (εξ.11) και $\bar{\alpha}_{PV}$ είναι ο συνολικός λόγος ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάτε από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα. (εξ.12).

$$\bar{G}A_{abs-g} = G \cdot A \cdot a_g + G \cdot A(1 - a_g - \rho_g - \bar{\tau}\alpha_{PV}) \cdot a_g \quad (32)$$

$$R_{g-PV} = \frac{s_g}{2 \cdot \lambda_g} + \frac{s_{EVA}}{\lambda_{EVA}} + \frac{s_{PV}}{2 \cdot \lambda_{PV}} \quad (33)$$

$$H_{g-a} = \epsilon_g \cdot \sigma \cdot \frac{T_g^4 - T_{sky}^4}{T_g - T_{sky}} + 1.247 \cdot [|T_g - T_a| \cdot \cos \beta]^{\frac{1}{3}} + 2.658 \cdot V_w \quad (34)$$

$$C_g = s_g \cdot A \cdot \rho_g \cdot c_g \quad (35)$$

$$\bar{\tau}\alpha_{PV} = \frac{\tau_g \cdot a_{PV}}{1 - \rho_d \cdot (1 - a_{PV})} \quad (36)$$

Το θερμικό ισοζύγιο για το φωτοβολταϊκό στρώμα:

Αποτελεί συνάρτηση των ενεργειακών ροών λόγω της απορροφημένης ηλιακής ακτινοβολίας και των θερμικών ροών θερμότητας και μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$G \cdot A \cdot \bar{\tau}\alpha_{PV} - A \cdot \frac{(T_{PV} - T_g)}{R_{g-PV}} - A \cdot \frac{(T_{PV} - T_{RBHEX})}{R_{PV-RBHEX}} = C_{PV} \cdot \frac{\Delta T_{PV}}{\Delta t_{timestep}} \quad (37)$$

Όπου $R_{PV-RBHEX}$ είναι η τιμή της θερμικής αντίστασης μεταξύ του φωτοβολταϊκού στρώματος και της απορροφητικής πλάκας (εξ.14), λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του συστήματος και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών. C_{PV} είναι η θερμική χωρητικότητα του φωτοβολταϊκού στρώματος (εξ.15).

$$R_{PV-RBHEX} = \frac{s_{PV}}{2 \cdot \lambda_{PV}} + \frac{2 \cdot s_{EVA}}{\lambda_{EVA}} + \frac{s_{Tedlar}}{\lambda_{Tedlar}} + \frac{s_{RBHEX}}{2 \cdot \lambda_{RBHEX}} \quad (38)$$

$$C_{PV} = s_{PV} \cdot A \cdot \rho_{PV} \cdot c_{PV} + 2 \cdot s_{PV} \cdot A \cdot \rho_{EVA} \cdot c_{EVA} \quad (39)$$

Το θερμικό ισοζύγιο για τη πλάκα απορρόφησης:

Το ενεργειακό ισοζύγιο της πλάκας απορρόφησης μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση 40:

$$A \cdot \frac{T_{PV} - T_{RBHEX}}{R_{PV-RBHEX}} - A \cdot \frac{T_{RBHEX} - T_{ISO}}{R_{RBHEX-ISO}} - P_{th} = C_{RBHEX} \cdot \frac{\Delta T_{RBHEX}}{\Delta t_{timestep}} \quad (40)$$

όπου $R_{RBHEX-ISO}$ είναι οι ροές θερμότητας / αγωγιμότητας στο φωτοβολταϊκό στρώμα και στο μονωτικό πάνελ (εξ.17), P_{th} είναι η θερμική ισχύ που ανταλλάσσεται με το ρευστό φορέα

θερμότητας του υβριδικού ηλιακού συλλέκτη PVT (εξ.19) και C_{RBHEx} είναι η θερμική χωρητικότητα της απορροφητικής πλάκας κυλινδρικού δεσμού (εξ.18).

$$R_{RBHEx-ISO} = \frac{s_{RBHEx}}{2 \cdot \lambda_{RBHEx}} + \frac{s_{ISO}}{\lambda_{ISO}} \quad (41)$$

$$C_{RBHEx} = s_{RBHEx} \cdot A \cdot \rho_{RBHEx} \cdot c_{RBHEx} + V_{wg \cdot RBHEx} \cdot \rho_{wg} \cdot c_{wg} \quad (42)$$

$$P_{th} = G \cdot A_{th} \cdot \eta_{th} \quad (43)$$

όπου η_{TH} είναι η θερμική απόδοση του συλλέκτη PVT (εξ.20)

$$\eta_{TH} = \eta_0 - \alpha_1 \cdot (T_{mean-wg} - T_a) / G - \alpha_2 \cdot (T_{mean-wg} - T_a)^2 / G \quad (44)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο για το θερμομονωτικό πάνελ:

Το ενεργειακό ισοζύγιο του πίνακα μόνωσης εκφράζεται από την εξίσωση 21:

$$A \cdot \frac{T_{RBHEx} - T_{ISO}}{R_{RBHEx-ISO}} - A \cdot (T_{ISO} - T_a) \cdot H_{ISO-a} = C_{ISO} \cdot \frac{\Delta T_{ISO}}{\Delta t_{timestep}} \quad (45)$$

Όπου H_{ISO-a} είναι ο συνολικός συντελεστής ανταλλαγής θερμότητας (εξ.22) και C_{ISO} είναι η θερμική χωρητικότητα του στοιχείου (εξ.23) ως συνάρτηση του πάχους και του εμβαδού του φύλλου με τη χρήση της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του πίνακα μόνωσης.

$$H_{ISO-a} = \epsilon_{ISO} \cdot \sigma \cdot \frac{T_{ISO}^4 - T_a^4}{T_{ISO} - T_a} + 1.247 \cdot [|T_{ISO} - T_a| \cdot \cos \beta]^{\frac{1}{3}} + 2.658 \cdot V_w \quad (46)$$

$$C_{ISO} = s_{ISO} \cdot A \cdot \rho_{ISO} \cdot c_{ISO} \quad (47)$$

4.2.1.2. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συλλέκτη PVT.

Η αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι συνάρτηση της μέσης θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στρώματος. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{el} = G \cdot A \cdot \eta_{ref-PV} \cdot [1 - b_{PV}(T_{PV} - T_{ref-PV})] \quad (48)$$

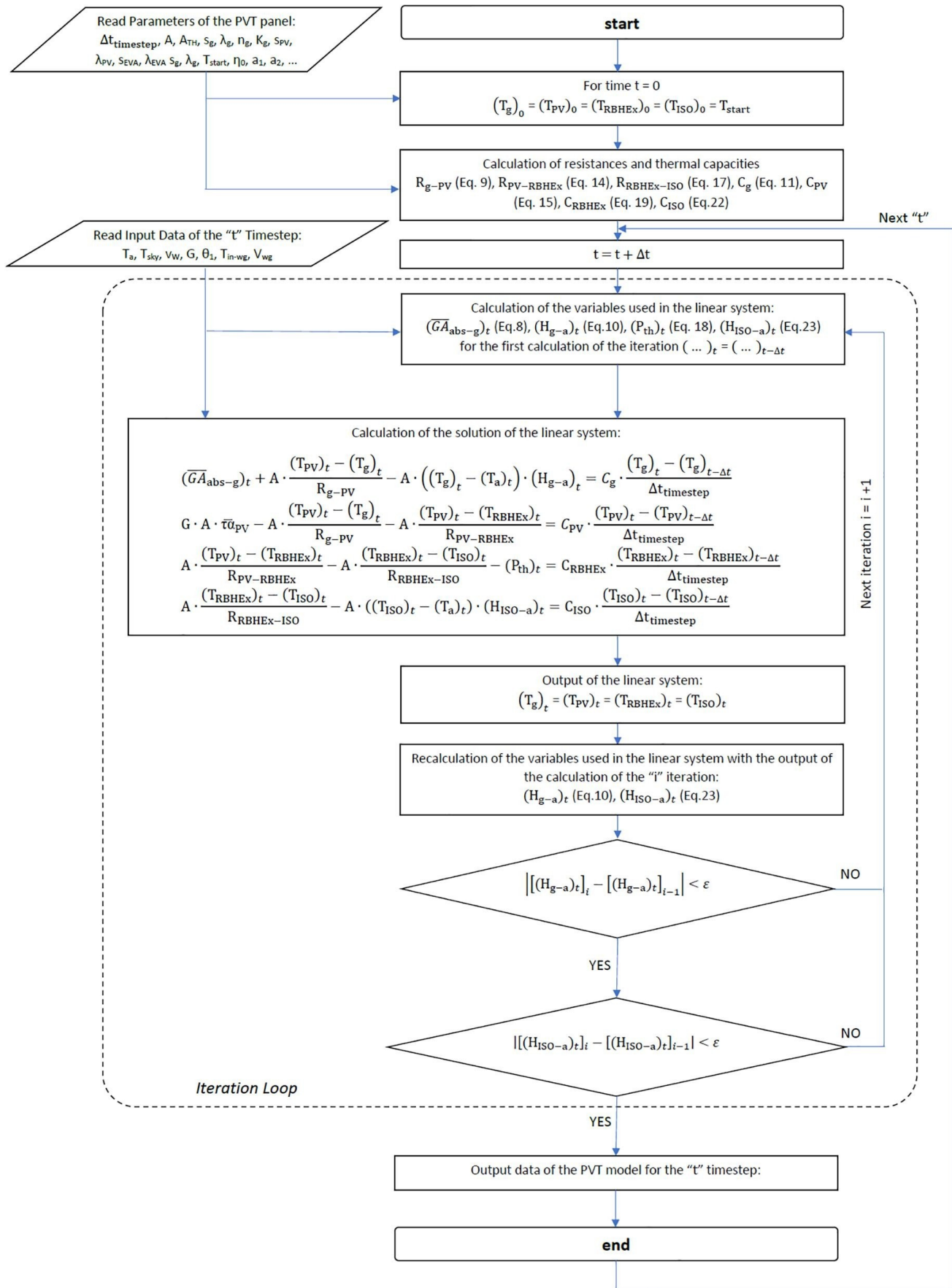
Όπου οι τιμές των συντελεστών η_{ref-PV} και T_{ref-PV} αντιπροσωπεύουν την αποτελεσματικότητα αναφοράς του PV ενότητα στη θερμοκρασία αναφοράς.

4.2.2 Επίλυση του μαθηματικού μοντέλου.

Από όλα τα ανωτέρω προκύπτει ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις άγνωστες θερμοκρασίες που χρειαζόμαστε. Οι τέσσερις άγνωστες θερμοκρασίες πρέπει να αρχικοποιηθούν κατά το πρώτο στάδιο, δεδομένου ότι το μοντέλο δημιουργήθηκε για να χρησιμοποιηθεί σε δυναμικές προσομοιώσεις και να εξετάσει τις θερμικές χωρητικότητες του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης πρέπει να ορίσει τις αρχικές τιμές T_g , T_{PV} , T_{RBHEX} και T_{ISO} οι οποίες δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η θερμοκρασία υπολογίζεται ως η μέση τιμή της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού θερμικού φορέα και της θερμοκρασίας.

Οι εξισώσεις (31), (37), (40) και (45) είναι αυτές που απαρτίζουν το γραμμικό μας σύστημα.

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού και δείχνει σαφέστερα τη ροή των πληροφοριών στο μοντέλο (βλέπε διάγραμμα 1). Το διάγραμμα ροής παρουσιάζει τόσο τις παραμέτρους του μοντέλου όσο και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου της διαδικασίας υπολογισμού. Οι συντελεστές εναλλαγής θερμότητας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία των θερμικών κόμβων, συνεπώς ένας βρόχος επανάληψης υλοποιείται μέχρι η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων να είναι μικρότερη από μια ανοχή ε που ορίστηκε στο 10^{-6} .



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ροής. Το διάγραμμα αντλήθηκε από :
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419303218>

4.2.3. Συμπέρασμα Κεφαλαίου.

Ύστερα από τη κατασκευή του μοντέλου, οι ερευνητές προέβησαν σε μια συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων που παράγει το μοντέλο προσομοίωσης με τις πραγματικές τιμές που παράγει ένας PV/T.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία εισόδου και ο ρυθμός ροής μάζας του ρευστού φορέα θερμότητας, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην οριζόντια επιφάνεια και στο κεκλιμένο επίπεδο του πεδίου των συλλεκτών PV/T και η ταχύτητα του ανέμου. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες έχουν συγκεντρωθεί επί το πλείστον από το τεχνικό φύλλο δεδομένων.

Τα δείγματα λαμβάνονταν κάθε 6 δευτερόλεπτα και ο μέσος όρος των μετρήσεων και των προσομοιώσεων, υπολογιζόταν σε χρονικό διάστημα 1 λεπτού. Επιπλέον, εφαρμόστηκε συντελεστής μετατροπής ίσος με 0,97 στην προσομοιωμένη τιμή, δεδομένου ότι ο μετατροπέας δεν ελήφθη υπόψη στο μοντέλο.

Τα δεδομένα εξόδου των προσομοιώσεων αξιολογούν τόσο τη θερμική όσο και την ηλεκτρική συμπεριφορά του πίνακα PV/T που χρησιμοποιείται στην πειραματική εγκατάσταση.

Προκειμένου να εκπληρωθεί ο κύριος στόχος της εργασίας, ο οποίος ήταν να αξιολογηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι θερμικές χωρητικότητες του συστήματος επηρεάζουν τα αποτελέσματα προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με και χωρίς θερμικές χωρητικότητες και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις δοκιμές μέτρησης.

Το γενικότερο συμπέρασμά που πηγάζει από όλα τα ανωτέρω είναι ότι το μοντέλο ταιριάζει με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε ένα εύρος $\pm 10\%$. Παράλληλα, οι προσομοιωμένες τιμές θερμικής ενέργειας ήταν υψηλότερες κατά περίπου 20-30% όσον αφορά τις πραγματικές μετρήσεις. Εν κατακλείδι, αν και οι διαφορές ήταν αμελητέες, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τόσο για την ενέργεια όσο και για τις θερμοκρασίες των φωτοβολταϊκών κυττάρων ταίριαζαν περισσότερο με τις μετρούμενες τιμές όταν ελήφθησαν υπόψη οι θερμικές χωρητικότητες.

4.3. Ψυκτική Ύλη.

Με τον όρο ψυκτική ύλη αναφερόμαστε στο υλικό εκείνο που κυκλοφορεί στο PV/T μέσω του θερμικού συλλέκτη. Το έργο αυτού του υλικού είναι να μεταφέρει το ποσό της θερμότητας που απορροφάτε από τον PV/T άλλα συστήματα και εφαρμογές. Ωστόσο δεν παρέχουν όλα τα υλικά το ίδιο αποδοτικά αποτελέσματα. Έτσι λοιπόν, η επιστήμονες καλούνται να ανακαλύψουν το καταλληλότερο ψυκτικό υλικό.

Έχει γίνει χρήση πολλών και διαφόρων μεθόδων για την ψύξη των PV/T. Ορισμένες εξ αυτών είναι ο αέρας και το νερό. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια συναντάτε όλο και περισσότερο η χρήση μιας άλλης ψυκτικής ύλης γνωστή και ως νάνο-υγρό.

4.3.1. Νάνο-υγρά

Τα συμβατικά ψυκτικά υγρά χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Για το λόγο αυτό οι ερευνητές προχώρησαν στην προσθήκη νάνο-υλικών, με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, στα ήδη υπάρχοντα υγρά.

Κάτι αντίστοιχο μας παρουσιάζουν και οι Ali H.A. Al-Waeli, Miqdam T. Chaichan, Hussein A. Kazem, K. Sopian και Javad Safaei στην έρευνά τους με τίτλο “Numerical study on the effect of operating nanofluids of photovoltaic thermal system (PV/T) on the convective heat transfer”. Όπως μπορούμε να καταλάβουμε και από τον τίτλο, πρόκειται για μία αριθμητική μελέτη που στόχο έχει τη βελτίωση των ψυκτικών υγρών που ρέουν στους θερμικούς συλλέκτες των υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων (PV/T). [7]

Η ανωτέρω έρευνα εξετάζει τρεις διαφορετικούς τύπους νανοσωματιδίων (Al_2O_3 , SiC, και CuO) και τρεις διαφορετικούς τύπους συμβατικών υγρών (νερό, γλυκερίνη και αιθυλενογλυκόλη) μέσω της κατασκευής ενός αριθμητικού μοντέλου.

Το αριθμητικό μοντέλο αποτελείται από μια αριθμητική εξίσωση που καλείται να υπολογίσει τις ιδανικές αναλογίες ούτως ώστε να παραχθεί το «ιδανικό» νάνο-υγρό. Η εξίσωση έχει ως εξής:

$$\varphi\% = \frac{(m_p/\rho_p)}{(m_p/\rho_p) + (m_f/\rho_f)} \quad (49)$$

Ταυτόχρονα εφαρμόζεται και το μοντέλο των B.E. LAUNDER και D.B. SPALDING. Στην έρευνά τους εξετάζουν το πρόβλημα της πραγματοποίησης αριθμητικών προβλέψεων της τυρβώδους ροής [22] και μας παρέχουν μια σειρά εξισώσεων για τον υπολογισμό των ακόλουθων :

- 1 Η εξίσωση της συνέχειας
- 2 Η κινητική ενέργεια
- 3 Η διασπορά κινητικής ενέργειας
- 4 Το διάχυτο ιξώδες (μ_i)
- 5 Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (hc)
- 6 Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας
- 7 Μέσος αριθμός Nusselt
- 8 Η πτώση της πίεσης ροής του ρευστού στους σωλήνες
- 9 Η θερμική χωρητικότητα και η πραγματικής πυκνότητας του ψυκτικού υγρού στη θερμοκρασία αναφοράς
- 10 Η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα

Η εξίσωση της συνέχειας:

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i) = 0 \quad (50)$$

Η ενεργειακή εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial X_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial X_i}\left[\left(k + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial X_i} + u_i(\tau_{ij})_{eff}\right] \quad (51)$$

Η εξίσωση μετατροπής ορμής:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (52)$$

Η τυρβώδης εξίσωση της κινητικής ενέργειας (k):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (53)$$

Η τυρβώδης εξίσωση της διασποράς κινητικής ενέργειας (ε):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \left(\frac{\epsilon}{k} \right) G_k + C_{\epsilon 2} \rho \left(\frac{\epsilon^2}{k} \right) \quad (54)$$

Το διάχυτο ιξώδες (μ_t):

$$\mu_t = (\rho C_\mu k^2) / \epsilon \quad (55)$$

Για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές σταθερές όπως (σ_k, σ_c, C_{ε1}, C_{ε2} και C_μ). Η τυρβώδης κινητική ενέργεια (k_{in}) και ο ρυθμός διάχυσης συγκλίνουν στο τμήμα εισόδου. Μπορούν στη συνέχεια να εκφραστούν στις εξισώσεις:

$$k_{in} = \frac{2}{3} (u_{in} I)^2, \quad \epsilon_{in} = C_\mu^{\frac{2}{3}} \frac{k^{\frac{2}{3}}}{L} \quad (56)$$

Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h_c):

Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας που προκύπτει από την εξίσωση:

$$Q_{ave} = h_c A_c (\Delta T) \quad (57)$$

Ο μέσος αριθμός Nusselt:

Υπολογίζεται χάρη στον μέσο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην εξίσωση:

$$N_u = \frac{h_{av} D_h}{k_f} \quad (58)$$

Όπου:

$$D_h = \frac{2WH}{W + H} \quad (59)$$

και

$$h_{av} = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (T_{base} - T_{mf})} \quad (60)$$

και

$$T_{base} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{5} \quad (61)$$

Η πτώση της πίεσης ροής του ρευστού στους σωλήνες:

$$\Delta p = f \frac{(x_e - x_s) \sigma u_{in}^2}{2 D_h} \quad (62)$$

Η θερμική χωρητικότητα και η πραγματικής πυκνότητας του ψυκτικού υγρού στη θερμοκρασία αναφοράς:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (63)$$

Η αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα:

$$k_{eff} = k_{static} + k_{Brownian} \quad (64)$$

Όπου:

$$k_{static} = k_f \left[\frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (65)$$

και

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f C_{pf} \sqrt{\frac{kT}{2\rho_p d_p}} f(T, \phi) \quad (66)$$

Και

$$f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.391123 \times 10^{-3}) \quad (67)$$

Όλα τα ανωτέρω εισήχθησαν στο MATLAB προκειμένου να παραχθεί μια μαθηματική ανάλυση.

4.3.2. Συμπέρασμα Κεφαλαίου.

Η παρούσα έρευνα μελέτησε τη συμπεριφορά των νάνο-υγρών σε σχέση με διάφορους παράγοντες. Σε σχέση με το νάνο-υλικό που χρησιμοποιήθηκε, τη βάση του νάνο-υγρού και την μεταξύ τους αναλογία. Επίσης λαμβάνεται υπόψιν και η ορμή της ροής του ψυκτικού υγρού. Για την πρόβλεψη της ορμής του ψυκτικού υγρού γίνεται εφαρμογή του αριθμού Reynolds⁴ (Re). Όσο

4 Ο αριθμός Reynolds είναι ένας αδιάστατος αριθμός που χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση των συστημάτων υγρών στα οποία η επίδραση του ιξώδους είναι σημαντική για τον έλεγχο των ταχυτήτων ή του μοτίβου ροής ενός ρευστού.

μεγαλύτερος είναι ο αριθμός Re τόσο ποιο τυρβώδης είναι και η ροή του ψυκτικού υγρού. Όσων αφορά τη θερμική αγωγιμότητα του ψυκτικού υγρού, αυτή εκφράζεται με την εφαρμογή του αριθμού Nusselt⁵ (Nu).

Τα νάνο-υλικά που εξετάστηκαν σε αυτή τη μελέτη είναι τα εξής :

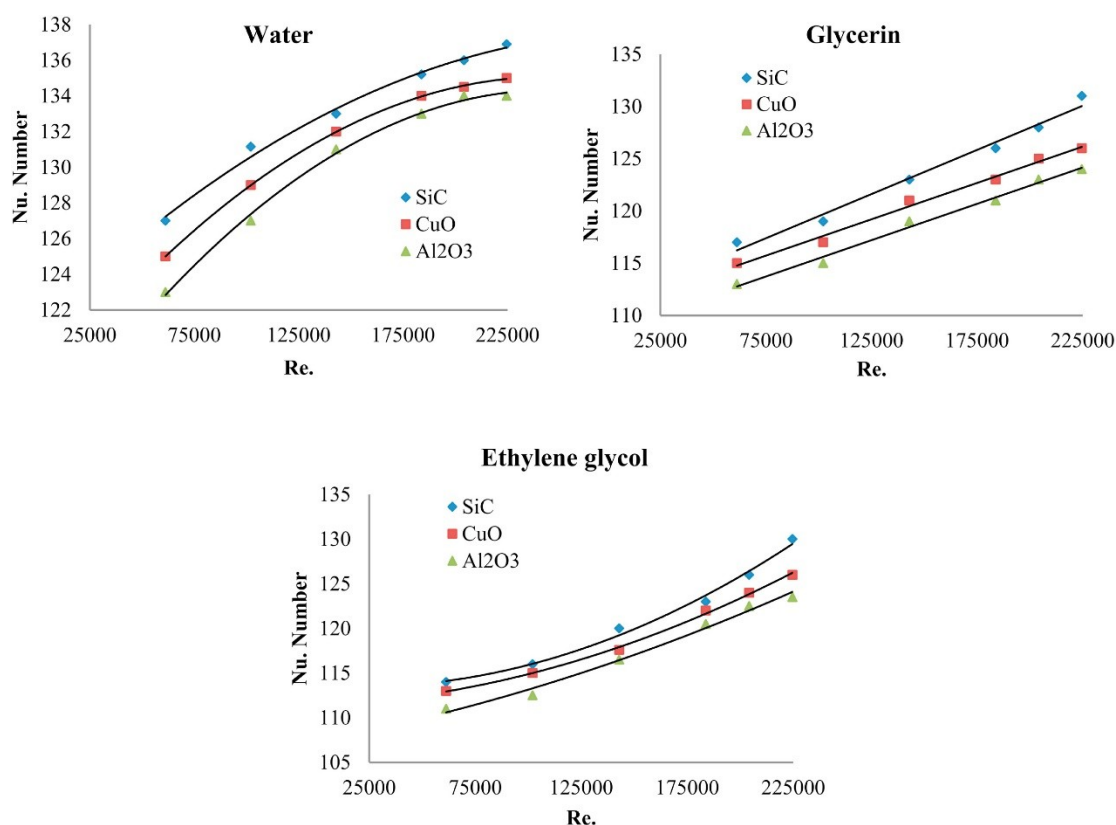
- SiC
- CuO
- Al₂O₃

Οι βάσεις ψυκτικού υγρού που δοκιμάστηκαν ήταν :

- Νερό
- Γλυκερίνη
- Αιθυλενογλυκόλη

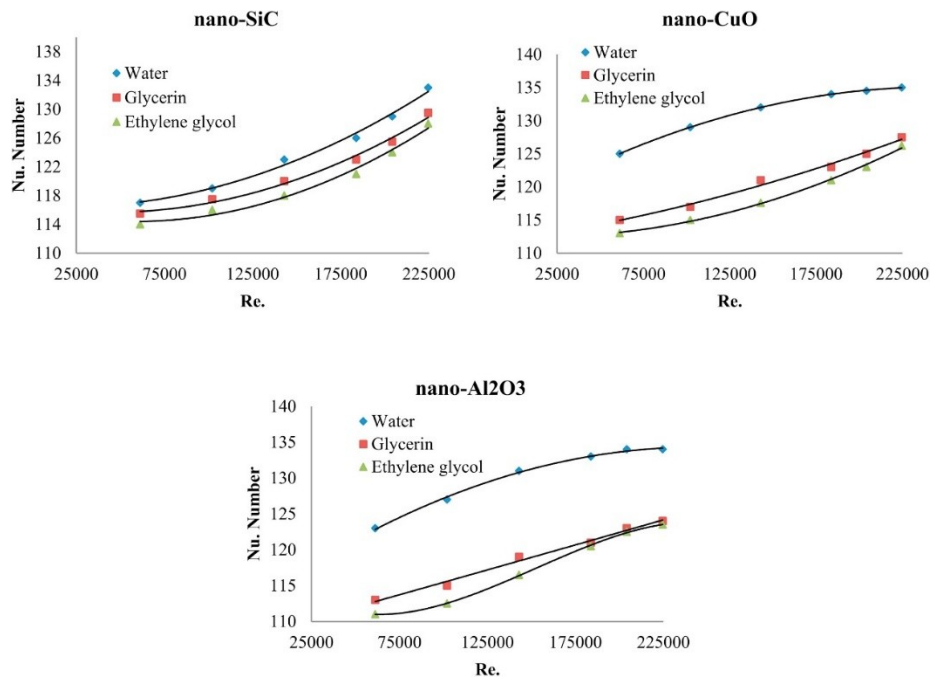
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα:

Σύμφωνα με τις εικόνες 7 και 8 παρατηρούμε καλύτερη αναλογία θερμικής αγωγιμότητας Nu και ορμής Re του ψυκτικού υγρού όταν το SiC χρησιμοποιείται ως νάνο-υλικό και νάνο-υγρό έχει ως βάση το νερό.



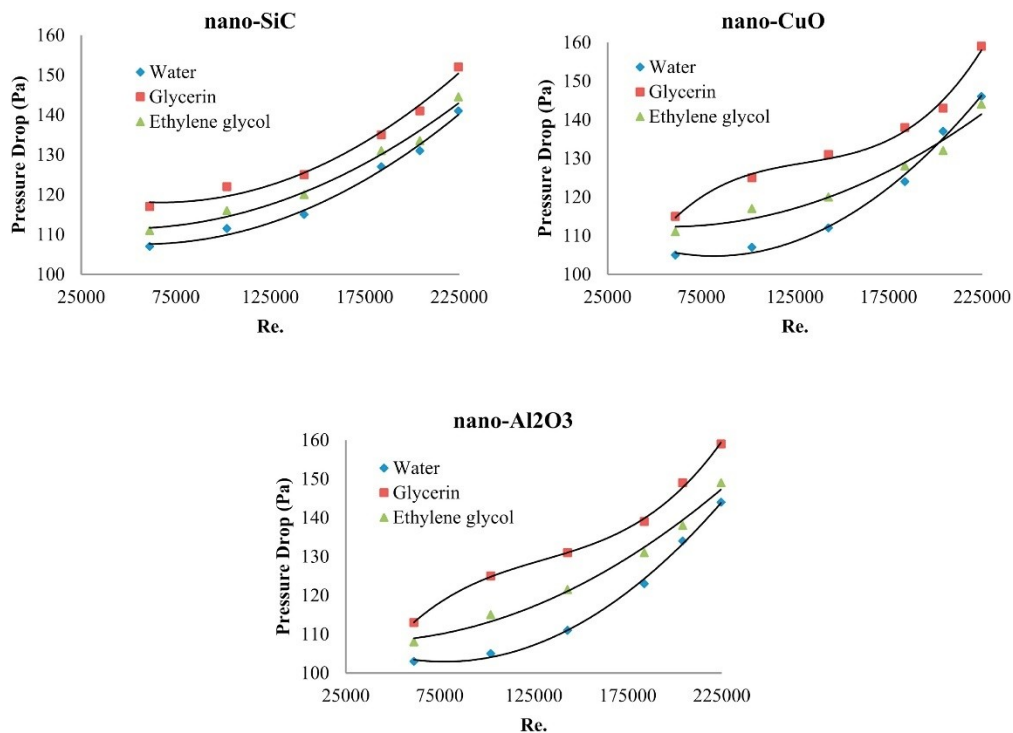
Εικόνα 7: Η σχέση μεταξύ των αριθμών Nu και Re για μεταβλητά νάνο-υλικά αναλογικά με τη βάση του ψυκτικού υγρού. Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X18301266#bib30>

5 Ο αριθμός Nusselt είναι μια σημαντική παράμετρος που μπορεί να συμβάλει σε έναν καλύτερο ρυθμό ανταλλαγής θερμότητας.



Εικόνα 8: Η σχέση μεταξύ των αριθμών Nu και Re για μεταβλητή βάση του ψυκτικού υγρού αναλογικά με τα νάνο-υλικά. Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X18301266#bib30>

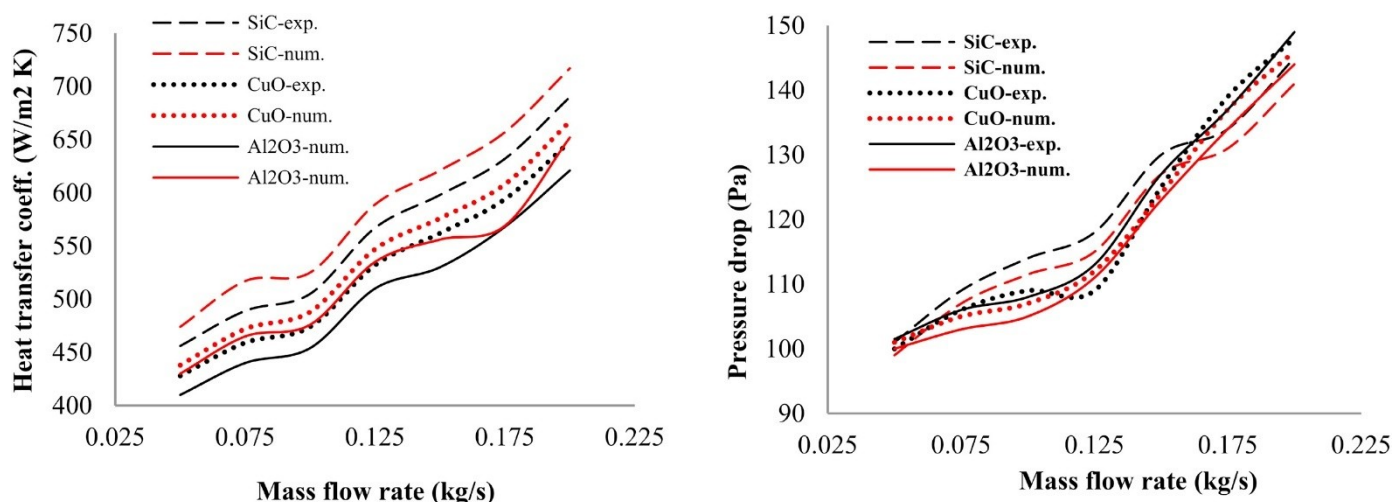
Από την εικόνα 9 παρατηρούμε ότι χαμηλότερη πίεση παρατηρείται όταν το ψυκτικό υγρό έχει ως βάση το νερό και υψηλότερη πίεση όταν έχουν ως βάση τη γλυκερίνη. Ένα κόμη συμπέρασμα είναι ότι καλύτερη συμπεριφορά στη πίεση του ψυκτικού υγρού παρατηρούμε όταν το SiC χρησιμοποιείται ως νάνο-υλικό.



Εικόνα 9: Η διακύμανση της πίεσης αναλογικά με την ορμή του ψυκτικού υγρού σε κάθε πιθανό συνδυασμό βάσης και νάνο-υλικών για το ψυκτικό υγρό. Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X18301266#bib30>

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με αυτής των Ali H.A. Al-Waeli, Miqdam T. Chaichan, Hussein A. Kazem και K. Sopian που διεξήγαγαν το 2017 με τίτλο «Comparative study to use nano-(Al₂O₃, CuO, and SiC) with water to enhance photovoltaic thermal PV/T collectors» [48]

Η εν λόγω σύγκριση φαίνεται στην εικόνα 10 όπου και παρατηρούμε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μελετών.



Εικόνα 10 : Η θερμική αγωγιμότητα και πίεση αναλογικά με τον ρυθμό ροής του ψυκτικού υγρού. Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X18301266#bib30>

Από την ανωτέρω εικόνα παρατηρούμε και πάλι ότι καλύτερη αναλογία θερμικής αγωγιμότητας, πίεσης και ροής του ψυκτικού υγρού έχουμε όταν το νάνο-υλικό που χρησιμοποιούμε είναι το SiC.

4.4. Τύποι θερμικών συλλεκτών PV/T

Αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται στους διάφορους τύπους θερμικών συλλεκτών, και σκοπό έχει να αναδείξει το αποδοτικότερο μοντέλο. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι βασισμένο επί το πλείστον την έρευνα των Zondag, Vries, Helden, Zolingen και Steenhoven με τίτλο “The yield of different combined PV-thermal collector designs” [10], οι οποίοι πραγματοποίησαν μία βιβλιογραφική ανασκόπηση ερευνητικών μελετών με θέμα την βελτιστοποίηση PV/T συστημάτων.

4.4.1. Μαθηματικό μοντέλο :

Για την ανάλυση των διάφορων τύπων PV/T κρίθηκε απαραίτητο από τους ερευνητές η κατασκευή δύο μαθηματικών μοντέλων, ένα οπτικό και ένα θερμικό.

4.4.1.1. Οπτικό μοντέλο:

Ρόλος του είναι να υπολογίζει τις ροές θερμότητας μέσα στον PV/T και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς-απορρόφησης του θερμικού συλλέκτη και έχει σκοπό να λύσει την ισορροπία ροής ενέργειας σε κάθε διασύνδεση στη διαμόρφωση PVT. Έτσι παράγονται ένα σύνολο από εξισώσεις για κάθε μία από τις επιμέρους διασυνδέσεις

Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται για κάθε διάστημα μήκους κύματος ξεχωριστά και στη συνέχεια ενσωματώνονται σε όλο το ηλιακό φάσμα

Οι εξισώσεις για μια από τις διασυνδέσεις του PV/T είναι οι παρακάτω:

$$\begin{aligned} q_{i,1} &= G \\ q_{0,1} &= R_{1,2} q_{i,1} + (1 - R_{1,2}) q_{1,2} \\ q_{0,2} &= (1 - R_{1,2}) q_{i,1} + R_{1,2} q_{1,2} \\ q_{i,2} &= q_{0,3} \exp \left[-K \delta_{topglass} / \cos \theta \right] \end{aligned} \quad (68)$$

Οι τιμές για τους συντελεστές ανάκλασης $R_{1,2}$ προσδιορίζονται από τις εξισώσεις Fresnel:

$$R = \frac{1}{2} (R^{\uparrow} + R^{\downarrow}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2[\theta_i - \theta_r]}{\sin^2[\theta_i + \theta_r]} + \frac{\tan^2[\theta_i - \theta_r]}{\tan^2[\theta_i + \theta_r]} \right) \quad (69)$$

κατά την οποία οι γωνίες καθορίζονται βάσει του νόμου της Snell:

$$\sin \theta_r / \sin \theta_i = n_i / n_r \quad (70)$$

Όσων αφορά τον υπολογισμό του τ_α (συντελεστής μετάδοσης απορρόφησης) θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας τις ακόλουθες παραδοχές:

- 1 Η ηλιακή ακτινοβολία διακρίνεται σε 50% παράλληλη και 50% εγκάρσια πόλωση. Έτσι το τ_α για την ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει ως το άθροισμά των τ_α για κάθε μια από τις δύο πολώσεις.
- 2 Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από εκάστοτε μέρη, για τα οποία το τ_α θα πρέπει να εφαρμοστεί ξεχωριστά για το κάθε ένα από αυτά. Έτσι, το συνολικό τ_α του PV προκύπτει ως ο μέσος όρος των τ_α , των εκάστοτε μερών του PV.
- 3 Ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι η διαφορές μεταξύ των αρχιτεκτονικών σχεδιασμών. Με αυτό εννοούμε το γεγονός ότι, από κάθε σχεδιασμό προκύπτει διαφορετική τιμή του τ_α . Η ιδιαιτερότητα κρύβεται στους σχεδιασμούς εκείνους όπου οι σωλήνες του νερού είναι τοποθετημένοι στο πάνω μέρος του PV. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά το τ_α για την μετάδοση της απορρόφησης του PV και για την μετάδοση της απορρόφησης του νερού.

Όσον αφορά για το τ_{PV} (συντελεστής μετάδοσης των στρωμάτων πάνω από τον PV), προκύπτει από τον συνδυασμό της ποσότητας ακτινοβολίας που δέχονται στα στρώματα του PV και οι σωλήνες νερού.

Έπειτα, η τιμές που παράγονται από το εν λόγω μοντέλο εισάγονται ως σταθερά στο θερμικό μοντέλο.

4.4.1.2. Θερμικό μοντέλο:

Ο συντελεστής τ_α που υπολογίστηκε από το οπτικό μοντέλο, πλέον εισάγεται στο θερμικό μοντέλο. Έπειτα, η ηλεκτρική απόδοση, συναρτήσει της θερμοκρασίας αφαιρείται από τον τ_α . Αυτό μας δίνει το ποσό της θερμικής ενέργειας που απορρόφησε το σύστημα. Έτσι, προκύπτει η επίδραση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

$$\tau_{a,off} = \{\tau_\alpha - \tau_{pv}\eta_{el}\} \quad (71)$$

Με τον συνδυασμό των ανώτερο προκύπτουν η απόδοση και η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη όπου ως απόδοση του συλλέκτη ορίζεται ως η ποσότητα χρήσιμης ενέργειας που παράγεται από αυτόν, ενώ, η αποτελεσματικότητα ορίζεται ως, ο λόγος της απόδοσης προς την ποσότητα ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται από τον συλλέκτη.

Ηλεκτρική απόδοση:

$$\eta_{th} = m \frac{c(T_{out}-T_{in})}{G} \quad (72)$$

Θερμική απόδοση:

$$\eta_{el} = \frac{V_{MPP}I_{MPP}}{GA} \quad (73)$$

Όπου, V_{MPP} και I_{MPP} αντιπροσωπεύουν την τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος, A είναι η περιοχή του πίνακα, c είναι η θερμοχωρητικότητα του μέσου συλλέκτη (νερό), ή η ροή μάζας ανά τετραγωνικό μέτρο σε kg/s/m², G η ακτινοβολία σε W/m² και T_{in} και T_{out} είναι η θερμοκρασία εισροής και η θερμοκρασία εκροής σε °C, αντίστοιχα. Η θερμική απόδοση, η_{el} , παρουσιάζεται συμβατικά ως συνάρτηση της μειωμένης θερμοκρασίας, η οποία ορίζεται ως:

$$T_{red} = \frac{T_{in}-T_a}{G} \quad (74)$$

Όπου, T_a αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

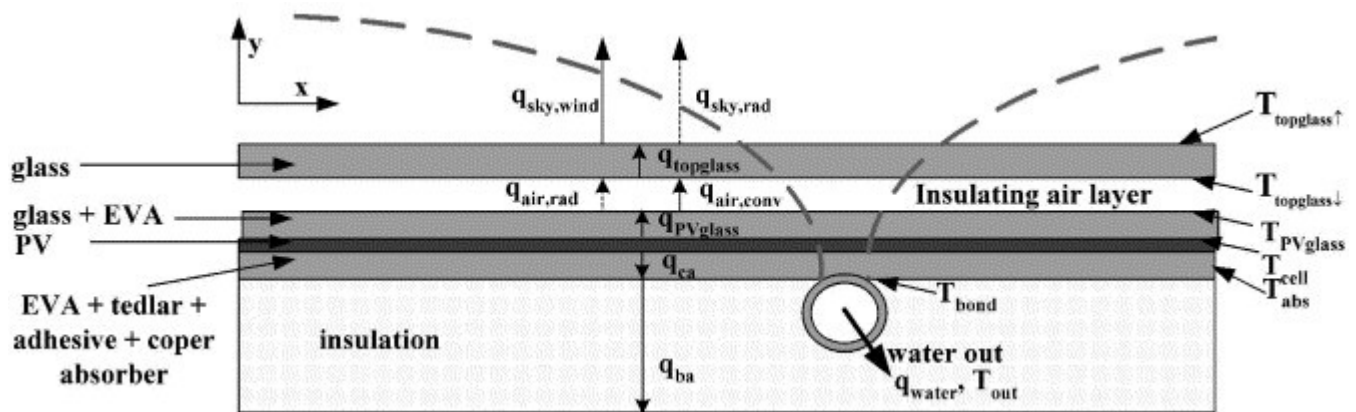
4.4.2. Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός PV/T:

Τώρα που έχει κατασκευαστεί το μαθηματικό μοντέλο μπορούμε να το εφαρμόσουμε στους διάφορους τύπους αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Οι διάφοροι τύποι αρχιτεκτονικού σχεδιασμού που θα εξεταστούν είναι οι εξής :

- Συλλέκτης PV/T με σωλήνες.
- Συλλέκτης PV/T καναλιού.
- Συλλέκτης PV/T ελεύθερης ροής.
- Συλλέκτης PV/T διπλού καναλιού.

4.4.2.1. Συλλέκτης PVT με σωλήνες.



Εικόνα 11: Συλλέκτης PV/T με σωλήνες. Η εικόνα αντλήθηκε από:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300121X>

Το ενεργειακό ισοζύγιο ενέργειας για τον συλλέκτη PVT με σωλήνες με, μία στρώση υαλοπινάκων, εκφράζεται ως εξής:

$$q_{water} = q_{ca} - q_{ba} \quad (75)$$

$$q_{ca} = (\tau_a - \tau_{PV}\eta_{el})G - q_{PVglass} \quad (76)$$

$$q_{PVglass} = q_{air,conv} + q_{air,rad} \quad (77)$$

$$q_{air,conv} + q_{air,rad} = q_{topglass} \quad (78)$$

$$q_{topglass} = q_{sky,conv} + q_{sky,rad} \quad (79)$$

Σε περίπτωση όπου δεν υπάρχει υαλοπίνακας οι εξισώσεις 77 και 78 παραλείπονται και η 79 μετασχηματίζεται με το $q_{topglass}$ να αλλάζει σε $q_{PVglass}$.

Σε περίπτωση δύο στρώσεων υαλοπίνακα, οι εξισώσεις 77 και 78 επαναλαμβάνονται.

$$q_{ca} = h_{ca}(T_{cell} - \bar{T}_{abs}) \quad (80)$$

$$q_{ba} = h_{ba}(\bar{T}_{abs} - T_{cell}) \quad (81)$$

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, σε αντίθεση με μοντέλο διαφορετικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, συνδέεται μια ξεχωριστή πλάκα θερμικής απορρόφησης με τη βοήθεια αγωγίμης κόλας. Για την μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των φωτοβολταϊκών κυττάρων και του απορροφητικής πλακάς, η εξίσωση 8 αντικαθίσταται από τις 80 και 81:

Η θερμική αγωγιμότητά του ανωτέρου μοντέλου προκύπτει από την εξίσωση 82.

$$h_{ca} = (R_{EVA} + R_{tedlar} + R_{glue})^{-1} = \left(\frac{5 \times 10^{-4}}{0.35} + \frac{1 \times 10^{-4}}{0.2} + \frac{5 \times 10^{-5}}{0.85} \right)^{-1} = 500 \frac{W}{Km^2} \quad (82)$$

Αυτό που παρατηρείται από τις παραπάνω εξισώσεις ροής θερμότητας είναι ότι έχουμε 6 αγνώστους($T_{out}, T_{\downarrow}, T_{PVglass}, T_{\downarrow}, T_{topglass \downarrow}, T_{topglass \uparrow}, T_{\downarrow}$) σε σύστημα 5 εξισώσεων. Αυτόν είναι βέβαιο ότι θα καταλήξει σε άτοπο. Για το λόγο αυτό απαιτείται και η ύπαρξη μιας 6ης εξίσωσης που θα συμπληρώσει το σύστημα. Έτσι οριστική μία εξίσωση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας απορρόφησης $T_{\downarrow}$ η οποία έχει ως εξής:

$$T_{abs}(x) = T_a + \frac{(\tau_a - \tau_{PV\eta_{el}})}{U_{loss}} + \cosh(mx) \frac{T_{bond} - T_a - (\tau_a - \tau_{PV\eta_{el}})G/U_{loss}}{\cosh[m(W-D)/2]} \quad (83A)$$

ME

$$m \equiv \sqrt{U_{loss}/k\delta_{abs}} \quad (83B)$$

στην οποία ο συντελεστής θερμικής απώλειας και η θερμοκρασία του δεσμού δίδονται από :

$$U_{loss} = \frac{q_{sky,rad} + q_{sky,conv} + q_{ba}}{T_{PVglass} - T_a} \quad (84)$$

$$T_{bond} = T_{water} + q_{water}/h_{tube} = T_{water} + qD/Nu_{tube}k_{water} \quad (85)$$

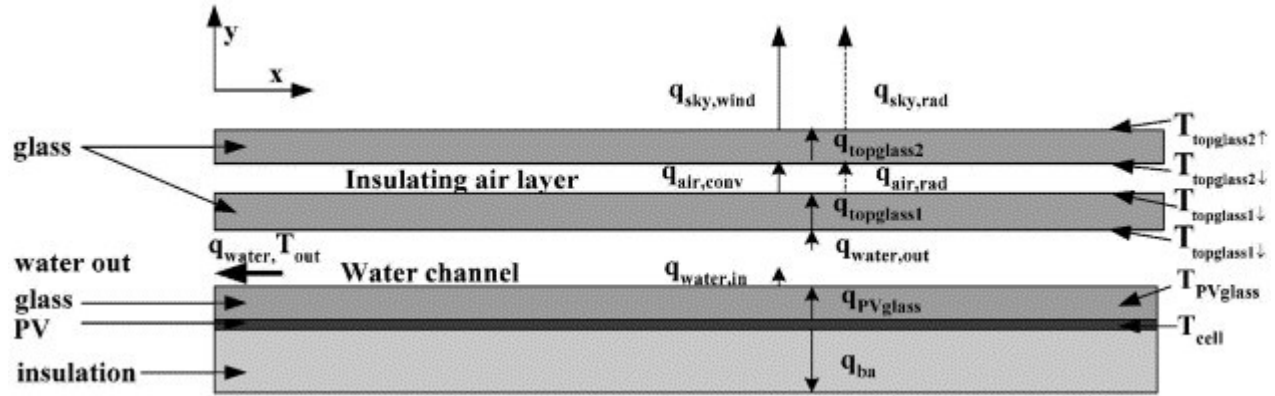
$$Re < 2300 \Rightarrow Nu_{tube} = 4.364$$

$$Re > 2300 \Rightarrow Nu_{tube} = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (86)$$

4.4.2.2. Συλλέκτης PVT καναλιού.

Σε αυτό το μοντέλο θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις.

1^η περίπτωση :



Εικόνα 12: Συλλέκτης PV/T καναλιού ανάμεσα σε διπλή στρώση γυαλιού. Η εικόνα αντλήθηκε από: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300121X>

Στην πρώτη, το κανάλι του νερού είναι τοποθετημένο ανάμεσα από τις υάλινες επιστρώσεις και πάνω από τον PV. Η ιδιαιτερότητα αυτής την αρχιτεκτονικής είναι ότι μέρος της θερμότητας που απορροφάτε από τον PV χάνεται μέσω του νερού. Ένα μέρος αυτής θα απορροφηθεί από το νερό $q_{water,in}$ και θα αντληθεί $q_{water,out}$, ενώ ένα άλλο μέρος θα επιστρέψει στα εξωτερικά στρώματα του συλλέκτη $q_{topglass1}$. Επιπλέον, το νερό, έχει την ικανότητα να απορροφά άμεσα και την ηλιακή ενέργεια, σύμφωνα με τον συντελεστή τ_a για το νερό.

$$(\tau_a - \tau_{pv})G = q_{PVglass} + q_{ba} \quad (87)$$

$$q_{PVglass} = q_{water,in} \quad (88)$$

$$q_{water} + q_{water,out} = q_{water,in} + \tau_{a,water}G \quad (89)$$

$$q_{water,out} = q_{topglass1} \quad (90)$$

$$q_{topglass1} = q_{air,conv} + q_{air,rad} \quad (91)$$

$$q_{topglass2} = q_{air,conv} + q_{air,rad} \quad (92)$$

$$q_{topglass2} = q_{sky,rad} + q_{sky,conv} \quad (93)$$

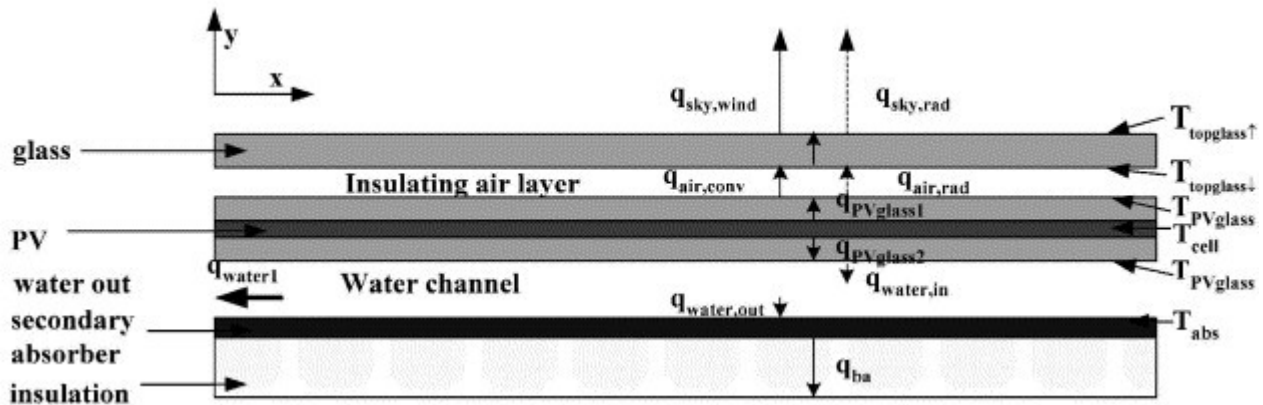
Έτσι έχουμε ένα σύστημα με επτά εξισώσεις για επτά αγνώστους

$$(T_{out}, T_{cell}, T_{PVglass}, T_{topglass1 \downarrow}, T_{topglass1 \uparrow}, T_{topglass2 \downarrow}, T_{topglass2 \uparrow}).$$

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του PVglass και του νερού καθορίζεται από :

$$Nu = 5.385 \Rightarrow h_{channel} = Nu \frac{k_{water}}{d_{water}} = 650 \quad (94)$$

2^η περίπτωση :



Εικόνα 13: Συλλέκτης PV/T καναλιού με το κανάλι τοποθετημένο εκατέρωθεν του PV/T. Η εικόνα αντλήθηκε από: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300121X>

Στην περίπτωση που το κανάλι νερού τοποθετηθεί εκατέρωθεν του PV το σύστημα των εξισώσεων θα πάρει την εξής μορφή:

$$(\tau_a - \tau_{PV}\eta_{el})G = q_{PVglass1} + q_{PVglass2} \quad (95)$$

$$q_{PVglass2} = q_{water,in} \quad (96)$$

$$q_{water} + q_{water,out} = q_{water,in} + \tau_{a,water}G \quad (97)$$

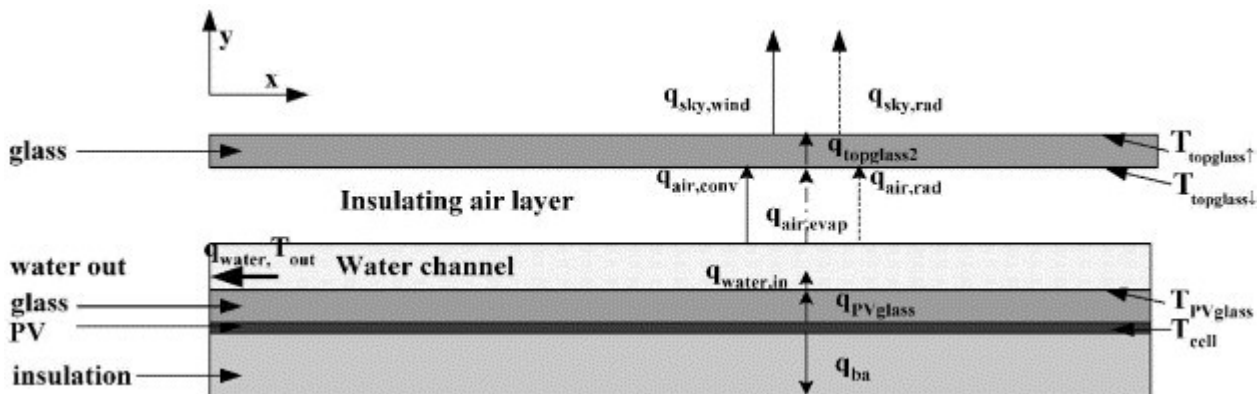
$$q_{water} + \tau_{a,abs2}G = q_{ba} \quad (98)$$

$$q_{PVglass} = q_{air,conv} + q_{air,rad} \quad (99)$$

$$q_{topglass} = q_{air,conv} + q_{air,rad} \quad (100)$$

$$q_{topglass2} = q_{sky,rad} + q_{sky,conv} \quad (101)$$

4.4.2.3. Συλλέκτης PVT ελεύθερης ροής.



Εικόνα 14: Συλλέκτης PV/T ελεύθερης ροής. Η εικόνα αντλήθηκε από: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300121X>

Εδώ πρόκειται για ένα μοντέλο παρόμοιο με αυτό του προηγούμενου κεφαλαίου, όπου το κανάλι είναι τοποθετημένο άνωθεν του PV. Η ειδοποιός διαφορά του συγκεκριμένου μοντέλου είναι το γεγονός ότι έχουν μια λιγότερη στρώση γυαλιού. Με την απώλεια του $topglass1$, το σύστημα των εξισώσεων δε θα περιλαμβάνει τις εξισώσεις 90 και 91 και θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$(\tau_a - \tau_{PV\eta_{el}})G = q_{PVglass} + q_{back} \quad (102)$$

$$q_{PVglass} = q_{water,in} \quad (103)$$

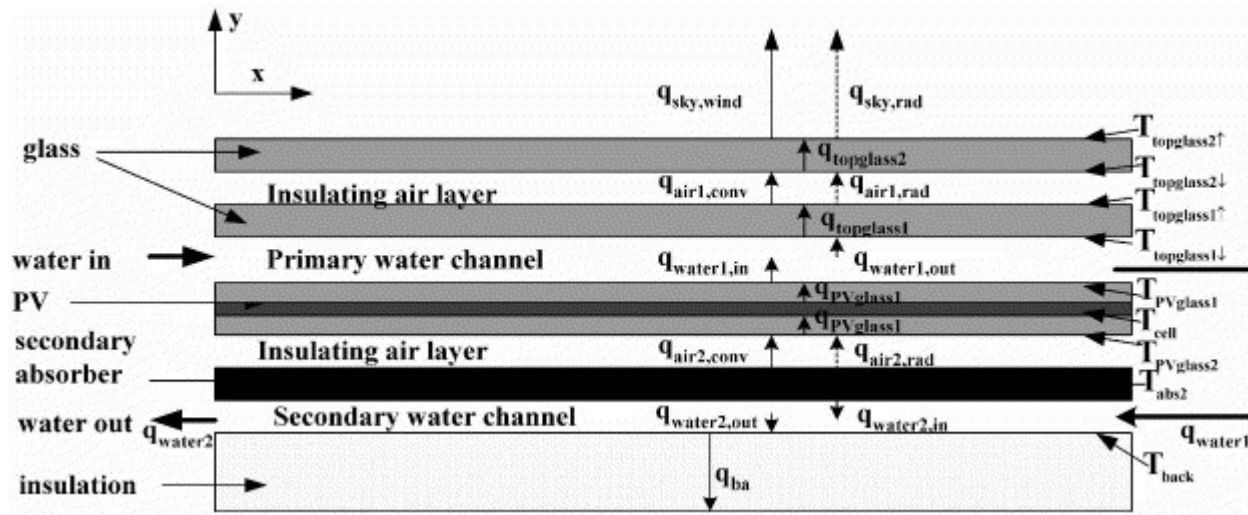
$$q_{water} + q_{air,rad} + q_{air,conv} + q_{air,evap} = q_{water,in} + \tau_{a,water}G \quad (104)$$

$$q_{air,rad} + q_{air,conv} + q_{air,evap} = q_{topglass} \quad (105)$$

$$q_{topglass} = q_{sky,rad} + q_{sky,conv} \quad (106)$$

4.4.2.4. Συλλέκτης PVT διπλού καναλιού.

Εδώ παρουσιάζεται ένα μοντέλο με 2 κανάλια νερού. Το πρωτεύων είναι τοποθετημένο άνωθεν του PV και το δευτερεύων εκατέρωθεν του PV και της απορροφητικής πλάκας. Επιπρόσθετα, στο μοντέλο αυτό εμφανίζονται 4 στρώσεις γυαλιού, γεγονός που παρέχει περισσότερη μόνωση. Επομένως, το σύστημα των εξισώσεων ενεργειακού ισοζυγίου θα έχει τη μορφή:



Εικόνα 15 : Συλλέκτης PVT διπλού καναλιού. Η εικόνα αντλήθηκε από:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300121X>

$$q_{ba} = q_{water2,out} \quad (107)$$

$$q_{water2,in} = q_{water2} + q_{water2,out} \quad (108)$$

$$\tau_{\alpha 2} G = q_{air2,conv} + q_{air2,rad} + q_{water2,in} \quad (109)$$

$$q_{air2,rad} + q_{air2,con} = q_{PVglass} \quad (110)$$

$$(\tau_a - \tau_{PV\eta_{el}})G + q_{PVglass2} = q_{PVglass1} \quad (111)$$

$$q_{water1,in} = q_{PVglass1} \quad (112)$$

$$q_{water1} + q_{water1,out} = q_{water1,in} + \tau_{\alpha,water} G \quad (113)$$

$$q_{water1,out} = q_{topglass1} \quad (114)$$

$$q_{topglass1} = q_{air1,conv} + q_{air1,rad} \quad (115)$$

$$q_{topglass2} = q_{air1,conv} + q_{air1,rad} \quad (116)$$

$$q_{topglass2} = q_{sky,rad} + q_{sky,conv} \quad (117)$$

Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου συστήματος εξισώσεων είναι το γεγονός ότι τα δύο κανάλια νερού δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ως δύο ανεξάρτητα, καθώς το ένα επηρεάζει το άλλο. Για το λόγο αυτό, η επίλυση του συστήματος απαιτεί περισσότερες επαναλήψεις.

Στην περίπτωση μη μονωμένου συστήματος οι εξισώσεις 108, 109 και 110 αντικαθίσταται από τις ακόλουθες :

$$q_{water2,in} + \tau_{\alpha,water2} G = q_{water2} + q_{water2,out} \quad (118)$$

$$\tau_{\alpha 2} G + q_{water2,out} = q_{back} \quad (119)$$

$$q_{PVglass2} = -q_{water2,in} \quad (120)$$

4.4.3. Συμπέρασμα Κεφαλαίου

Αποδοτικότερο μοντέλο από τα ανωτέρων αναδείχθηκε ο συλλέκτης PV/T μονού καναλιού με μία στρώση μόνωσης.

Ο συλλέκτης PV/T με διπλή μόνωση, αν και πετυχαίνει μειωμένη απώλεια ενέργειας, εξαιτίας της αυξημένης μόνωσης μειώνεται και η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο σύστημα. Κατ' επέκταση έχουμε μείωση και στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Το μοντέλο ελεύθερης ροής, όπου δεν υπάρχει καθόλου μόνωση, αποδείχθηκε το χειρότερο από τα μοντέλα που εξετάστηκαν.

5. Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα ANN.

5.1. Μια εισαγωγή στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ANN.

Η έμπνευση για τα νευρωνικά δίκτυα προήλθε από τον τομέα της βιολογίας. Κάθε ζωντανός οργανισμός του οικοσυστήματός μας έχει ένα νευρωνικό σύστημα το οποίο ευθύνεται για μια σειρά από διεργασίες, όπως για παράδειγμα η αντίδραση σε ορισμένα ερεθίσματα, η μνήμη κ.λ.π. Αυτό το νευρωνικό σύστημα, αποτελείται από πολλά νευρωνικά δίκτυα τα οποία αντιστοιχούν σε ορισμένες διεργασίες, και κάθε ένα από αυτά, αποτελείται από νευρώνες. Οι νευρώνες καλούνται να επεξεργάζονται κάθε λογής πληροφορίες και να επικοινωνούν με τους υπόλοιπους νευρώνες με ηλεκτρικά σήματα. Έτσι λοιπόν, βοηθούν τον εγκέφαλο κάθε οργανισμού, να εκτελεί με μεγαλύτερη ευκολία διεργασίες απαραίτητες για την επιβίωση του. Με άλλα λόγια θα λέγαμε ότι έχουν την ικανότητα να αυτοματοποιούν ένα μεγάλο μέρος των διεργασιών του εγκέφαλου.

Αυτή την ικανότητα των νευρωνικών δικτύων ζήτησε και η επιστήμη των υπολογιστών και αναρωτήθηκε: «Είναι άραγε κάτι τέτοιο εφικτό και για τα υπολογιστικά συστήματα ; ». Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι όχι καθώς η δομή των υπολογιστικών συστημάτων διαφέρει κατά πολύ με αυτή του εγκέφαλου. Αυτό όμως που είναι εφικτό, είναι η δημιουργία ορισμένων μοντέλων με τέτοια δομή που να μοιάζει με αυτή των νευρωνικών δικτύων. Έτσι οδηγούμαστε στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ANN τα οποία αποτελούν κομμάτι της μηχανικής μάθησης και έχουν την ικανότητα να αποκτούν γνώση μέσω εκπαίδευσης πάνω σε ένα σύνολο από δεδομένα, όπως ακριβώς κάνουν και τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα.

Κάθε νευρώνας ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, λαμβάνει ως είσοδο ένα σύνολο από σήματα και έχει μόνο μία έξοδο η οποία αποτελεί συνάρτηση των σημάτων αυτών. Κάθε είσοδος έχει μια δική της τιμή βάρους η οποία εκφράζει το πόσο στενά συνδεδεμένοι είναι ο νευρώνας «προέλευσης» με τον νευρώνα «παραλήπτη» και παίρνει τιμές από -1 μέχρι 1.

5.2. Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ANN:

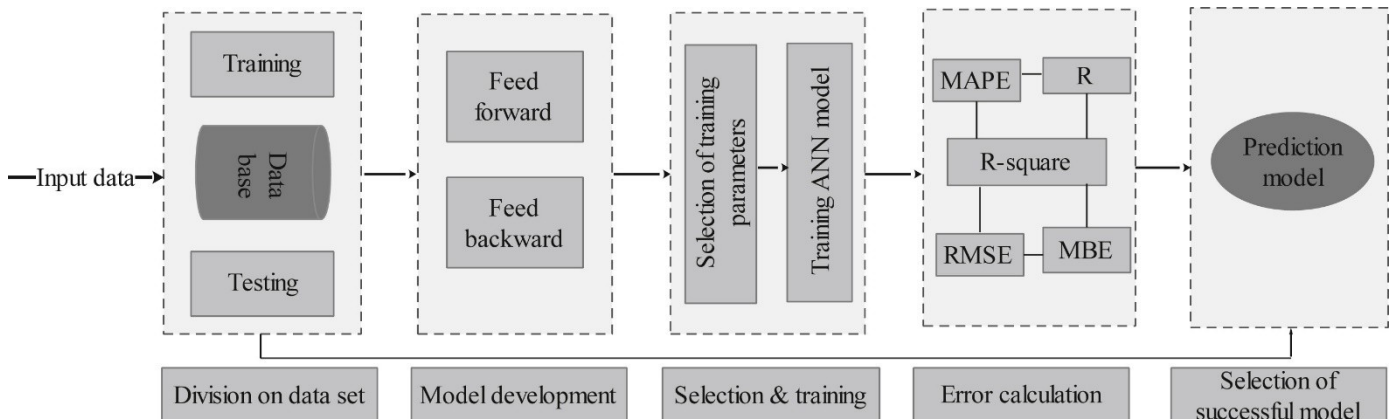
Το κεφάλαιο αυτό είναι βασισμένο επί το πλείστον στην έρευνα των Atika Qazi Fayaz Hussain, A. Wadi, Ram Gopal Raj, N.A. Rahim και Waleed Ahmed Khan την οποία και διεξήγαγαν το 2015 [2]. Η έρευνά τους είχε ως αντικείμενο τη συμβολή της επιστήμης των υπολογιστών στην απόδοση των ηλιακών συστημάτων παραγωγής ενέργειας με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Η ενέργεια που παράγεται από τα ηλιακά συστήματα, εξαρτάται άμεσα από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Γεγονός που δυσκολεύει το έργο των ενεργειακών επιχειρήσεων για κατάλληλες προβλέψεις και σχεδιασμό επιχειρηματικών στρατηγικών. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές, στράφηκαν στην πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία, όπως αποδείχθηκε είναι απαραίτητη για την κατασκευή όσο το δυνατόν πιο αποδοτικών ηλιακών συστημάτων. Για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται πολλές μέθοδοι πρόβλεψης εξόρυξης δεδομένων με πρωτοπόρα τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN).

Έτσι λοιπόν, σε αυτό το κεφάλαιο θα διεισδύσουμε περισσότερο στην αρχιτεκτονική των ANN και θα δούμε πως μπορούν να συνδράμουν στην απόδοση των ηλιακών συστημάτων.

5.2.1. Στάδια επιλογής μοντέλου πρόβλεψης:

Στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας, τα δεδομένα λαμβάνονται ως είσοδος και ύστερα αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων. Το σύνολο των δεδομένων, στη συνέχεια, χωρίζεται σε ομάδες εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος χρησιμοποιείται για εκπαίδευση και τα υπόλοιπα δεδομένα για δοκιμές. Το feed-forward και το feed-back είναι οι δύο τύποι μοντέλων ANN που χρησιμοποιούνται για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Μετά, σειρά έχει η αναγνώριση και ο υπολογισμός των σφαλμάτων προκειμένου να επιτευχθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Στο τελικό στάδιο γίνεται η επιλογή του επιτυχημένου μοντέλου.



Εικόνα 16 : Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ANN. Πάρθηκε από : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615004096>

Το πρώτο στάδιο αφορά την προ-επεξεργασία των δεδομένων προς ανάλυση. Το στάδιο αυτό είναι μεγίστης σημασίας λόγω της επιρροής των δεδομένων στην αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια των αλγορίθμων εξόρυξης. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τις εξής ενέργειες: καθαρισμό, μετασχηματισμό και μείωση των δεδομένων.

Στη συνέχεια, ακολουθεί το δεύτερο στάδιο που αφορά τη δημιουργία του μοντέλου πρόβλεψης και την επικύρωση. Για το στάδιο αυτό, διάφορα μοντέλα πρόβλεψης εφαρμόζονται στο σύνολο δεδομένων και ύστερα συγκρίνονται μεταξύ τους, ούτως ώστε να προκύψει το καλύτερο όλων. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη διότι ένα μοντέλο είδη γνωστό ως «καλό» ή «κακό» δε σημαίνει ότι αποδίδει το ίδιο σε όλα τα σύνολα δεδομένων.

Το τελευταίο στάδιο είναι αυτό της ανάπτυξης (δηλαδή, εφαρμογή του μοντέλου σε νέα δεδομένα για τη δημιουργία προβλέψεων), κατά το οποίο, επιλέγεται το μοντέλο πρόβλεψης και εφαρμόζεται σε νέα δεδομένα. Τα αποτελέσματα της πρόβλεψης συλλέγονται και αναλύονται.

5.2.2. Προγνωστική εξόρυξη δεδομένων:

Πέραν από τη πρόβλεψη, μία εκ των παροχών της εξόρυξης δεδομένων είναι και η προγνωστική εξόρυξη δεδομένων. Στόχος αυτής είναι η εξαγωγή προγνωστικών για τα δεδομένα που εισήχθησαν. Αυτές είναι οι γνωστότερες τεχνικές για την προγνωστική διαδικασία:

- **Bagging (Bootstrap Aggregation):** Μειώνει τη διακύμανση της πρόβλεψης δημιουργώντας πρόσθετα δεδομένα για εκπαίδευση από το αρχικό σύνολο δεδομένων χρησιμοποιώντας συνδυασμούς με επαναλήψεις.

- **Boosting:** Υπολογίζει την έξοδο του μοντέλου πρόβλεψης χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα και στη συνέχεια εξάγει μια μέση προσέγγιση υπολογίζοντας τον μέσο όρο του αποτελέσματος.
- **Μετά-μάθηση ή Stacking (Stacked Generalization):** Συνδυάζει τις προβλέψεις από πολλαπλά μοντέλα. Ιδιαίτερα χρήσιμο όταν οι τύποι μοντέλων που περιλαμβάνονται στο έργο είναι πολύ διαφορετικοί.

Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των ανώτερο τεχνικών μπορεί κανείς να βρει μια καλή προγνωστική δύναμη για ένα ευρύτερο φάσμα δεδομένων εισόδου, χρησιμοποιώντας διαφορετικά στενά συντονισμένα μοντέλα.

5.2.3. Μαθηματικό μοντέλο των ANN.

Τα ANN χρησιμοποιούν νευρώνες και απλές μονάδες επεξεργασίας, συνδυάζουν δεδομένα και αποθηκεύουν σχέσεις μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών. Διακρίνονται σε δύο είδη. Single layer Preceptor (SLP) και multi-layer Preceptor (MLP).

Το MLP αποτελείται από πολλά διασυνδεδεμένα στρώματα νευρώνων τα οποία χωρίζονται σε 3 μέρη. Το πρώτο μέρος είναι αυτό που περιλαμβάνει και το επίπεδο εισόδου ενώ στο τρίτο μέρος το επίπεδο εξόδου. Το ενδιάμεσο / δεύτερο μέρος αποτελείται από ένα ή περισσότερα επίπεδα που ονομάζονται κρυφά στρώματα. Μέσα σε κάθε στρώμα υπάρχουν αρκετοί νευρώνες (κόμβοι). Κάθε νευρώνας σε ένα στρώμα συνδέεται με τους νευρώνες στο παρακείμενο στρώμα με διαφορετικό βάρος. Αυτά τα βάρη μετά την προπόνηση των δεδομένων θα περιέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη δομή του νευρωνικού δικτύου, καθώς εκφράζουν την συνδεσιμότητα μεταξύ των νευρώνων. Τα σήματα λοιπόν περνούν μέσα από τα επίπεδα όπου κάθε νευρώνας λαμβάνει σήματα από ένα γειτονικό στρώμα στο προηγούμενο στρώμα (X_i). Ωστόσο, το σήμα έρχεται με το βάρος του (W_{ij}), συνοψισμένο με τη συνεισφορά μεροληψίας (b_j). Αυτό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως:

$$net_j = \sum_{i=1}^n (X_i W_{ij} + b_j) \quad (121)$$

5.2.3.1 Συναρτήσεις Ενεργοποίησης:

Η έξοδος των νευρώνων στη συνέχεια υπολογίζεται εφαρμόζοντας μια από τις συναρτήσεις ενεργοποίησης στη συνολική είσοδο (1).

$$\begin{array}{ll} f(a) = X & -\infty < X < \infty \\ f(a) = \frac{1}{1-e^{-X}} & 0 \leq X \leq 1 \\ f(a) = \frac{e^X - e^{-X}}{e^X + e^{-X}} & -1 \leq X \leq 1 \\ f(a) = e^{-X} & 0 \leq X < \infty \end{array}$$

5.2.3.2. Αναγνώριση σφαλμάτων του ANN μοντέλου:

Σε περίπτωση που, με το πέρας της πρώτης επανάληψης, η έξοδος δε ταιριάζει με τις τιμές-στόχους, τότε θεωρούμε ότι το ANN αντιμετωπίζει ένα σφάλμα το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπιστεί. Πρώτα όμως θα πρέπει να το εντοπίσουμε. Τα λάθη κατά τη διάρκεια της μαθησιακής διαδικασίας (εκπαίδευση δεδομένων), υπολογίζονται με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j |t_j - o_j|^2}{\sum_j |o_j|^2} \right) \quad (122)$$

$$RMS = \left(\frac{1}{p} \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (123)$$

$$MAPE = \left(\frac{o-t}{o} \times 100 \right) \quad (124)$$

Όπου το p εκφράζει το μοτίβο, το O είναι η τιμή εξόδου και το t αντιπροσωπεύει τη τιμή στόχο. .

Για τις επόμενες επαναλήψεις υπολογίζεται να είναι το σφάλμα μικρότερο. Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς για κάθε σύνολο εισόδου έως ότου δεν υπάρχει σφάλμα.

Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι τα ANN μοντέλα μπορούν να δεχτούν πολλές παραμέτρους ως είσοδο σε σύγκριση με τα συμβατικά εμπειρικά μοντέλα. Κατ' επέκταση, έχουν την ικανότητα να προβλέπουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την ηλιακή ακτινοβολία ακόμα και σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες.

5.3. Μοντελοποίηση ισοδύναμων φωτοβολταϊκών μονάδων (EEC) χρησιμοποιώντας ANN.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα διεισδύσουμε στην έρευνα των Engin Karatepe, Mutlu Boztepe και Metin Colak, την οποία διεξήγαγαν το 2006 [1]. Η έρευνά τους αποδεικνύει την αποδοτικότητα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων σε ότι αφορά τα ηλιακά συστήματα. Σχετίζεται με τη μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών μονάδων χρησιμοποιώντας ANN. Σκοπός των ερευνητών ήταν η παραγωγή ακριβέστερης πρόγνωσης της απόδοσης ενός ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος μιας φωτοβολταϊκής μονάδας. Τα ισοδύναμα μοντέλα κυκλώματος δίνουν στους τεχνολόγους καλύτερο feedback και έτσι επιτρέπουν στους σχεδιαστές κυκλωμάτων να κάνουν πολύ ταχύτερες προσομοιώσεις. Το εκπαιδευμένο δίκτυο συγκρίθηκε με άλλα εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιώντας πολλαπλούς συνδυασμούς παραμέτρων. Με την έννοια παράμετροι εννοούνται διάφοροι παράγοντες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα ή και τη ποσότητα του δείγματος. Παραδείγματος χάριν, τέτοιου είδους παράγοντες μπορούν να χαρακτηριστούν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η τοποθεσία της φωτοβολταϊκής μονάδας κ.λ.π. . Η σχέση μεταξύ τους είναι μη γραμμική και δεν μπορεί εύκολα να εκφραστεί από μια αναλυτική εξίσωση σε αντίθεση με το νευρωνικό δίκτυο εάν εκπαιδευτεί σωστά. Αυτό το καθιστά μια καλή επιλογή για ένα τέτοιο έργο.

Πειραματικά δεδομένα δίνονται ως είσοδος για την εκπαίδευση του νευρικού δικτύου με τον αλγόριθμο backpropagation. Οι τεχνικές ANN μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία, επιλέγεται ένα μεγάλο δίκτυο και οι περιττοί «νευρώνες» εξαλείφονται. Η δεύτερη κατηγορία, σε αντίθεση με τη πρώτη, αρχίζει με ένα μικρό δίκτυο και σταδιακά προσθέτει «νευρώνες». Σε αυτή τη μελέτη, για να χαρτογραφηθεί η σχέση μεταξύ των πέντε παραμέτρων, της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας των κυψελών, χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη κατηγορία..

Οι πέντε παράμετροι που σχετίζονται με το EEC είναι οι εξής:

- I_{ph} : Φωτο-ρεύμα
- R_s : Αντίσταση σειράς
- R_p : Παράλληλη αντίσταση
- I_s Ρεύμα κορεσμού διόδων
- n : Συντελεστής ιδανικότητας

Τέλος, ελήφθησαν επαρκή αποτελέσματα για ένα νευρωνικό δίκτυο τροφοδοσίας τριών στρωμάτων (στρώματα εισόδου, μονής κρυφής και εξόδου).

Ο αριθμός των «νευρώνων» / κόμβων στα στρώματα εισόδου και εξόδου βασίζεται στις διαστάσεις εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα. Οι 20 κρυμμένοι κόμβοι αποδείχθηκαν ως η καλύτερη δυνατή αναλογία για μια ακριβή εκτίμηση και επομένως μόνο τα αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν για την εν λόγω έρευνα. Συνεπώς, το στρώμα εισόδου έχει 2 κόμβους, το κρυφό στρώμα έχει 20 κόμβους και το στρώμα εξόδου έχει 5 κόμβους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το στρώμα εισόδου αποτελείται από ένα δισδιάστατο διάνυσμα, ακτινοβολία και θερμοκρασία, και το στρώμα εξόδου είναι ένα διάνυσμα πέντε διαστάσεων που περιλαμβάνει τις πέντε παραμέτρους του EEC (n , I_s , R_s , R_p και I_{ph}). Για να μειώσουμε την υπολογιστική προσπάθεια, λαμβάνουμε υπόψη ένα δίκτυο μικρού μεγέθους όταν βρούμε ένα κατάλληλο μέγεθος δικτύου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό κατά τη διάρκεια της φάσης δοκιμών του δικτύου όπου συνήθως απαιτούνται γρήγορες απαντήσεις.

Το διάνυσμα εισόδου $x = [\text{ακτινοβολία}, \text{θερμοκρασία}]$ εφαρμόζεται στο στρώμα εισόδου του δικτύου. Η καθαρή είσοδος της ισοστής κρυφής μονάδας υπολογίζεται από τη εξίσωση 125, μέσω της εξίσωσης 121, ως εξής:

$$n_j^1 = \sum_{i=1}^2 (X_i W_{ij} + b_j^1) \quad (125)$$

όπου το w_{ji} είναι το βάρος στη σύνδεση από τη ισοστή μονάδα εισόδου, για $j = 1, 2, \dots, 20$. Η έξοδος των νευρώνων στο κρυφό στρώμα είναι:

$$\alpha_j^1 = f_1(\sum_{i=1}^2 w_{ji} x_i + b_j^1) \quad (126)$$

$$f_1(n) = \text{tansig}(n) = \frac{2}{1 - e^{-2n}} - 1 \quad (127)$$

και η είσοδος στους νευρώνες στο στρώμα εξόδου υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

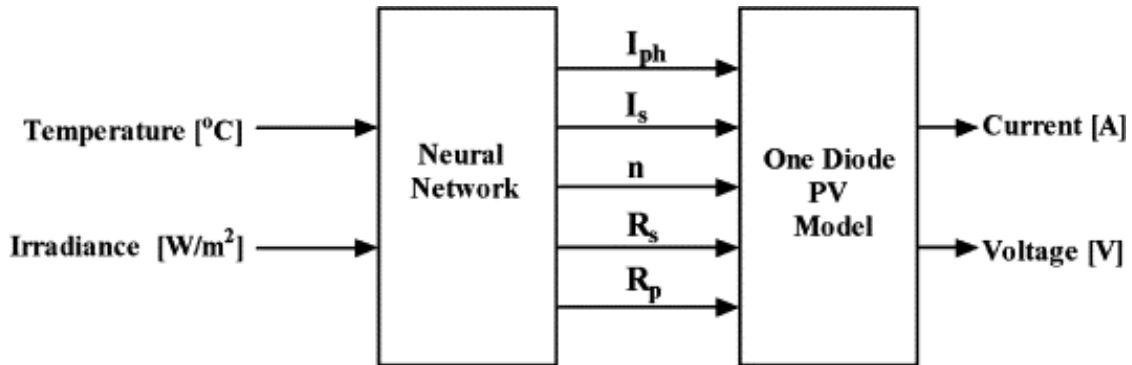
$$n_k^2 = \sum_{j=1}^{20} (a_j^1 W_{kj} + b_k^2) \quad (128)$$

όπου w_{kj} είναι το βάρος στη σύνδεση από τη j οστή μονάδα εισόδου για $k = 1, 2, \dots, 5$ και αντιπροσωπεύουν την προκατάληψη για τους νευρώνες του δεύτερου στρώματος. Η έξοδος του δεύτερου στρώματος α_k^2 είναι οι έξοδοι δικτύου ενδιαφέροντος και επισημαίνονται y_k .

$$\alpha_k^2 = y_k = f_2\left(\sum_{j=1}^{20} w_{kj} a_j^1 + b_k^2\right) \quad (129)$$

$$f_2(n) = \text{purelin}(n) = n \quad (130)$$

Για το στάδιο εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος backpropagation και η Levenberg-Marquardt ως μέθοδος βελτιστοποίησης. Στο τέλος, το PV μοντέλο διαμορφώνεται ως εξής. Το πρώτο στάδιο ξεκινάει με το νευρωνικό δίκτυο το οποίο προσδιορίζει τις πέντε παραμέτρους του ECC. Στο δεύτερο και τελικό στάδιο, οι ECC παράμετροι διατίθενται στο μοντέλο ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος μιας διόδου.



Εικόνα 17 : Βασική διαμόρφωση του PV μοντέλου. Η εικόνα αντλήθηκε από :
:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040500186X

Δύο δοκιμές επιλέχθηκαν για να εξακριβωθεί η αποδοτικότητα του PV μοντέλου. Η πρώτη περιλαμβάνει δεδομένα που αποκτήθηκαν από το μοντέλο ηλεκτρικής απόδοσης της φωτοβολταϊκής μονάδας Sandia National Laboratory (SNL) για τη μονάδα SM-55 PV. Η εν λόγω μονάδα αποτελείται από 36 σειρές συνδεδεμένων ηλιακών κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Για τη δεύτερη δοκιμή, τα δεδομένα που αποκτήθηκαν αφορούσαν εξωτερικές μετρήσεις μιας πειραματικής εγκατάστασης για τη φωτοβολταϊκή μονάδα OST-80, αποτελούμενη από πολυκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου και κατασκευασμένα από την Orjin Solar Technology Ltd. στην Τουρκία. Οι δοκιμές αφορούσαν τον έλεγχο της αποδοτικότητας των μονάδων σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Ο Πίνακας 1 δείχνει τις προδιαγραφές των φωτοβολταϊκών μονάδων SM-55 και OST-80 ανά κατάσταση.

	SM-55 PV	OST-80 PV
Μέγιστη Ισχύς / Maximum power (P_{mp}) (W)	55	80
Τάση ανοικτού κυκλώματος / Open circuit voltage (V_{oc}) (V)	21,7	22
Ρεύμα βραχυκύκλωσης / Short circuit current (I_{sc}) (A)	3,45	4,9
Τάση σε λειτουργία με μέγιστη ισχύ / Operating voltage at maximum power (V_{mp}) (V)	17,4	18
Ρεύμα σε λειτουργία με μέγιστη ισχύ / Operating current at maximum power (I_{mp}) (A)	3,15	4,5

Πίνακας 1 : Προδιαγραφές των φωτοβολταϊκών μονάδων SM-55 και OST-80,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040500186X>

Operating		SNL model values			Conventional model			The proposed model		
G [W/m ²]	T [°C]	V_{mp} [V]	I_{mp} [A]	P_{mp} [W]	V_{mp} [V]	I_{mp} [A]	P_{mp} [W]	V_{mp} [V]	I_{mp} [A]	P_{mp} [W]
150	25	16.381	0.480	7.871	15.336	0.470	7.220	16.375	0.478	7.841
250		16.822	0.799	13.446	16.050	0.787	12.634	16.799	0.799	13.430
350		17.046	1.116	19.038	16.491	1.105	18.236	17.029	1.117	19.032
450		17.178	1.433	24.618	16.843	1.423	23.968	17.187	1.432	24.618
550		17.262	1.748	30.176	17.107	1.741	29.798	17.251	1.749	30.176
650		17.318	2.061	35.706	17.320	2.061	35.706	17.337	2.059	35.706
750		17.355	2.374	41.206	17.514	2.379	41.680	17.351	2.374	41.206
850		17.379	2.685	46.672	17.695	2.696	47.707	17.402	2.682	46.672
950		17.394	2.995	52.106	17.838	3.014	53.782	17.388	2.996	52.106
150	45	14.472	0.479	6.943	13.673	0.467	6.388	14.484	0.476	6.900
250		14.971	0.798	11.947	14.402	0.783	11.284	14.971	0.795	11.916
350		15.224	1.115	16.975	14.886	1.100	16.382	15.218	1.114	16.958
450		15.372	1.430	21.995	15.260	1.416	21.618	15.390	1.429	21.995
550		15.467	1.745	26.995	15.525	1.736	26.960	15.470	1.744	26.995
650		15.529	2.058	31.967	15.762	2.054	32.387	15.520	2.059	31.967
750		15.570	2.370	36.910	15.957	2.374	37.882	15.548	2.373	36.909
850		15.597	2.681	41.820	16.137	2.691	43.437	15.606	2.679	41.820
950		15.614	2.990	46.698	16.282	3.012	49.042	15.604	2.992	46.698

Πίνακας 2 : Οι τιμές ρεύματος, τάσης και ισχύος στο μέγιστο σημείο ισχύος της φωτοβολταϊκής μονάδας SM-55 για τη δοκιμή δεδομένων, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040500186X>

Ο πίνακας 2 περιέχει τιμές του ρεύματος $G[W/m^2]$ που παράγεται συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας της μονάδα SM-55 και τη θερμοκρασία στους 25 °C και 45 °C αντίστοιχα.

Οι ερευνητές κατέληξαν στο εξής συμπέρασμα. Εξαιτίας του γεγονότος ότι, στο συμβατικό μοντέλο δεν περιλαμβάνεται η επιρροή των 5 παραμέτρων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν παράγονται ακριβείς εκτιμήσεις για την απόδοση της φωτοβολταϊκής μονάδας σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Το προτεινόμενο μοντέλο, μέσω των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, δίνει τιμές σε αυτές τις 5 παραμέτρους με αποτέλεσμα να παράγει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ακόμα μία μελέτη που επιβεβαιώνει την αξία και την αποδοτικότητα των ANN, σε ότι αφορά την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι και αυτή των Ahmet Koca, Hakan F. Oztop, Yasin Varol και Gonca Ozmen Koca [3]. Η μελέτη τους είχε ως αντικείμενο την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της χρήσης ANN με διαφορετικές παραμέτρους εισόδου για την περιοχή της Ανατολίας στη Μεσογειακή Τουρκία. Οι παράμετροι εισόδου αφορούν το γεωγραφικό πλάτος, μήκος, υψόμετρο, μέση συννεφιά και διάρκεια ηλιοφάνειας ενώ έξοδος είναι η ηλιακή ακτινοβολία.

Για την εκπαίδευση του ANN μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα των πόλεων Αττάλεια και Μπουρντούρ (ή αλλιώς Πολυδώριο) ενώ από τις πόλεις Ισπάρτα, Μάρας, Μερσίνη, Άδανα και Αντιόχεια αντλήθηκαν δεδομένα για τη δοκιμή του μοντέλου.

Οι μεταβλητές εισόδου είναι το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος, το υψόμετρο, ο μήνας του έτους και η μέση θολότητα. Μεταβλητή εξόδου είναι η ηλιακή ακτινοβολία.

Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται τρία επίπεδα. Αυτά είναι το επίπεδο εισόδου, το κρυφό επίπεδο και το επίπεδο εξόδου. 5, 8 και 1 νευρώνες χρησιμοποιούνται στα επίπεδα αντίστοιχα. Ο αριθμός των νευρώνων εντοπίζεται χρησιμοποιώντας διαδικασία δοκιμής και λάθους. Οι λειτουργίες εφαπτομένης σιγμοειδούς και γραμμικής ενεργοποίησης χρησιμοποιούνται στο κρυφό επίπεδο και στο επίπεδο εξόδου αντίστοιχα.

Το προτεινόμενο μοντέλο ANN υλοποιείται στο MATLAB. Διάφοροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης είναι διαθέσιμοι για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Σε αυτήν τη μελέτη, ο αλγόριθμος αντίστροφης διάδοσης χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του μοντέλου ANN. Η μέση τετραγωνική ρίζα (RMSE), ο συντελεστής πολλαπλών προσδιορισμών (R^2) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (COV) υπολογίζονται για να απεικονίσουν την απόδοση του μοντέλου.

Οι στατιστικοί δείκτες RMSE, COV και R^2 δίδονται από τις εξισώσεις 131, 132 και 133 αντίστοιχα:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y(i) - T(i))^2}{n}} \quad (131)$$

$$COV = \frac{RMSE \cdot 100}{T_{mean}} \quad (132)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y(i) - T(i))^2}{\sum_{i=1}^n (T(i))^2} \quad (133)$$

όπου n είναι το πλήθος των δειγμάτων, Y είναι η έξοδος του ANN, T είναι η μετρούμενη έξοδος και T_{mean} είναι η μέση τιμή όλων των μετρούμενων αποτελεσμάτων.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την συγκεκριμένη μελέτη είναι ότι το μοντέλο που βασίζεται στο ANN ήταν ακριβές για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας στη περιοχή της Ανατολίας και ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας για οποιαδήποτε άλλη περιοχή.

Οι πόλεις που επιλέχθηκαν για την εκπαίδευση ήταν οι Αττάλεια και Μπουρντούρ και οι πόλεις που επιλέχθηκαν για τις δοκιμές είναι οι Ισπάρτα, Μάρας, Μερσίνη, Άδανα και η Αντιόχεια. Το μέγιστο RMSE βρέθηκε να είναι 6,9% για την αναφορά της Μερσίνης. Ωστόσο, η καλύτερη τιμή λήφθηκε στο 3,58% για την Ισπάρτα.

Το πιο πρωτότυπο σημείο αυτής της μελέτης είναι ο έλεγχος του αριθμού των παραμέτρων εισόδου. Σε αυτήν την περίπτωση, δοκιμάστηκαν 4 με 6 παράμετροι για να βρεθεί η απόδοση του ANN. Για παράδειγμα, η παράμετρος της μέσης θολότητας δοκιμάστηκε για πρώτη φορά σε αυτή τη μελέτη για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα κύρια συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να εξαχθούν από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, παρατίθενται ως εξής:

- Σύμφωνα με το μοντέλο που βασίζεται στο ANN ήταν ακριβές για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ερευνητές ισχυρίζονται επίσης πως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας για οποιαδήποτε περιοχή με ίδιες ή παρόμοιες περιεκτικές τιμές με αυτές τις Τουρκίας.
- Καλύτερες υπήρξαν οι προβλέψεις για τις πόλεις Αντιόχεια και Μπουρντούρ, με μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους.
- Η κύρια πρωτοτυπία της μελέτης ήταν ο έλεγχος των παραμέτρων εισόδου στα αποτελέσματα. Φάνηκε ότι ο αριθμός των παραμέτρων εισόδου ήταν αποτελεσματικός στις τιμές R^2 .

5.4. Συγκριτική Ανάλυση ψυκτικών υγρών με ANN.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην πειραματική μελέτη των Ying Yu, Enshen Long, Xi Chen και Hongxing Yang [19] των οποίων η μελέτη εστιάζει στον έλεγχο διαφορετικών συστημάτων ψύξης PV/T. Οι προαναφερθέντες είχαν σκοπό να σχεδιάσουν και να εφαρμόσουν ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου για να συγκρίνουν την παραγωγικότητα τριών PV/T συστημάτων, και την απόδοση αυτών σε διαφορετικά συστήματα ψύξης. Πιο συγκεκριμένα η ερευνά τους ασχολήθηκε με 4 τύπους PV/T. Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά, τους υβριδικούς ηλιακούς / θερμικούς συλλέκτες που έχουν ως βάση το νερό, ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες στους οποίους η ψύξη επιτυγχάνεται με νάνο-υγρά και ηλιακούς / θερμικούς συλλέκτες όπου το νάνο-υγρό που εφαρμόζεται είναι της μορφής nano-PCM. Για τους σκοπούς αυτού του έργου έγινε χρήση ενός συστήματος πολυστρωματικής αντίληψης (MLP) βασισμένου σε τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN).

5.4.1 Μαθηματικό μοντέλο.

Για την ανάλυση της αποδοτικότητας των PV/T κατασκευάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο αποτελείται από τις ακόλουθες εξισώσεις :

Η χρήσιμη συλλεγόμενη θερμότητα (Q_u)

$$Q_u = mC_p(T_o - T_i) \quad (134)$$

όπου m είναι ο ρυθμός ροής μάζας, C_p η ειδική θερμότητα ($J/kg \cdot K$), T_o και T_i η θερμοκρασία εξόδου και εισόδου, αντίστοιχα.

Η θερμική αποδοτικότητα του συστήματος είναι:

$$\frac{Q_u}{I_s \times A_c} \quad (135)$$

όπου I_s είναι η ηλιακή ένταση, και A_c η περιοχή του συλλέκτη.

Η ηλεκτρική ισχύς (P) είναι:

$$P = I \times V \quad (136)$$

όπου

(I) είναι το ρεύμα και (V) είναι η τάση.

Η ηλεκτρική απόδοση (η_e) είναι:

$$\eta_e = \frac{P}{I_s \times A_c} \quad (137)$$

Η συνολική απόδοση (η_t) ισούται με τη θερμική απόδοση και την ηλεκτρική απόδοση :

$$\eta_t = \eta_{thermal} + \eta_{electrical} = \frac{Q_u + P}{I_s \times A_c} \quad (138)$$

5.4.2. Ανάλυση αβεβαιότητας

Ο υπολογισμός των αβεβαιοτήτων είναι ένα σημαντικό μέρος για τον έλεγχο πιθανού σφάλματος των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, πρέπει να αποφεύγονται τυχαία σφάλματα όπως σφάλματα στη βαθμονόμηση καθώς και ανθρώπινα σφάλματα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι αυτή των «Kline and McClintock» σύμφωνα με την οποία η αβεβαιότητα W_R υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0.5} \quad (139)$$

Όπου R είναι μια δεδομένη συνάρτηση της ανεξάρτητης μεταβλητής ($x_1, x_2, \dots, x_n$), και ($w_1, w_2, \dots, w_n$) είναι οι αβεβαιότητες των ανεξάρτητων μεταβλητών.

5.4.3. Προσομοίωση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN)

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση του νευρωνικού δικτύου MLP ήταν το NeuroSolution. Βέβαια, στις 20 Αυγούστου του 2021 η nDimensional, η εταιρεία που παρείχε το συγκεκριμένο λογισμικό, ανακοίνωσε την κατάργησή του.

5.4.3.1. Σύνολο δεδομένων

Το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε χωρίστηκε σε 3 ομάδες. Η πρώτη ομάδα αποτελούσε το 50% του συνόλου και αποσκοπούσε στην εκπαίδευση του μοντέλου. Ύστερα έρχεται η δεύτερη ομάδα με ποσοστό 30% η οποία είχε σκοπό την επικύρωση του και τέλος η τρίτη ομάδα με ποσοστό 20% η οποία χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή του μοντέλου.

Οι παράμετροι για το συγκεκριμένο μοντέλο χωρίζονται και αυτοί σε 2 ομάδες και είναι οι εξής:

Παράμετροι εισόδου: η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Παράμετροι εξόδου: το ρεύμα PV/T (A), η τάση PV/T (V), η ηλεκτρική απόδοση PV/T (%) και η θερμική απόδοση PV/T (%).

5.4.3.2. Μέθοδοι εκτίμησης της ακρίβειας και της εγκυρότητας.

Η R_2 (εξ.133) είναι μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επικύρωση των προβλεπτικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του πραγματικού μοντέλου. Άλλες μέθοδοι, όπως το «Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (MAPE)» (εξ.140), «Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα Ρίζας (RMSE)» (εξ.131), «Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE)» (εξ.141) και «Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE)» (εξ.142), εφαρμόζονται για την επαλήθευση της εγκυρότητας των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων.

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - f_i}{y_i} \right| \quad (140)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - y_i| \quad (141)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - y_i)^2 \quad (142)$$

Επιπλέον, για να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, η έξοδος δικτύου (x) και η επιθυμητή έξοδος (d), χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης (r). Κανονικά, η τιμή του r είναι στην περιοχή [-1, 1]. Αν $r = 1$, αυτό δείχνει μια ισχυρή θετική σχέση (συσχέτιση). Όταν $r = 0$, αυτό δείχνει ότι δεν υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ αυτών των μεταβλητών. Ωστόσο, σε περίπτωση που $r = -1$, τότε καταγράφεται μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ αυτών των μεταβλητών.

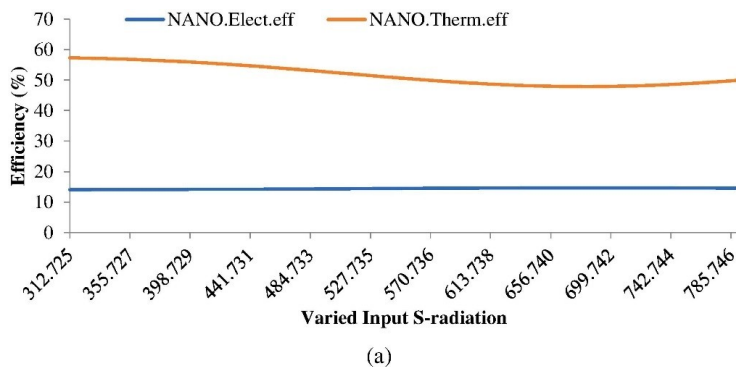
$$r = \frac{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(d_i - \bar{d})}{N}}{\sqrt{\frac{\sum_i (d_i - \bar{d})^2}{N}} \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N}}} \quad (143)$$

5.5 Συμπέρασμα Κεφαλαίου.

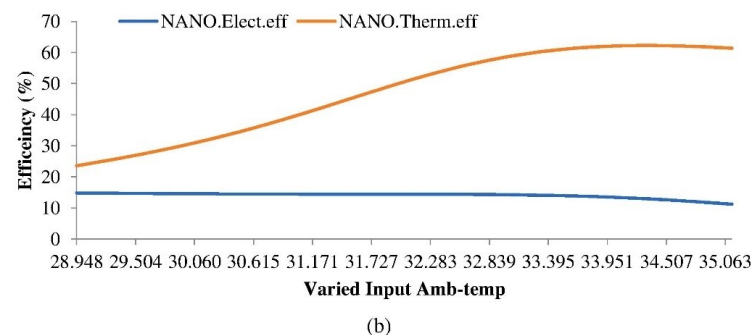
Το MLP αποτελείται από δύο εισόδους και ένα κρυφό επίπεδο. Επίσης, οι μέθοδοι μάθησης ορμής υλοποιούνται με τιμή βήματος ίση με 1 και ποσοστό μάθησης 0,7%. Η μέγιστη επανάληψη είναι 1000. Ωστόσο, η συμπεριφορά του συστήματος υπό συνθήκες δοκιμής στην επαιτεία του σταδίου εκπαίδευσης γίνεται χωρίς καμία προηγούμενη γνώση του πίνακα μεταβλητότητας της εισόδου. Ως εκ τούτου, η ANN ξεκίνησε τη διαδικασία κατάρτισης με τυχαίες τιμές στα βάρη, η οποία δείχνει κάποιες διακυμάνσεις στην έξοδο του δικτύου κατά τις πρώτες επαναλήψεις. Θα εκπαιδευτεί μετά από μια σειρά επαναλήψεων και θα ενημερώσει τις τιμές βάρους ανάλογα.

Το αποτέλεσμα του μοντέλου MLP συγκρίνεται με το επιθυμητό αποτέλεσμα από τα πραγματικά μοντέλα.

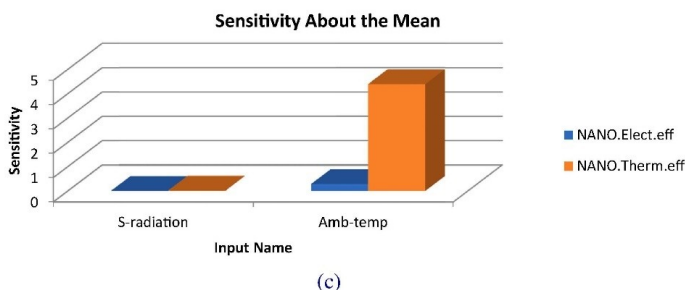
Τα βέλτιστα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν για το MSE ήταν 4,87% και 35,92%, για το MAE 1,72% και 4,85% και για το r ίσο με 0,59% και 0,58%, για την ηλεκτρική και θερμική απόδοση αντίστοιχα. Τα MSE και MAE για την ηλεκτρική απόδοση είναι μικρά. Ωστόσο, το MAE είναι υψηλότερο λόγω της διακύμανσης της καμπύλης. Τόσο η ηλεκτρική όσο και η θερμική απόδοση δείχνουν μια καλή τιμή συσχέτισης r .



Η ανάλυση ευαισθησίας προσδιορίζεται από την επίδραση ορισμένων παραμέτρων εισόδου στην έξοδο του δικτύου. Έτσι, βοηθά να λάβει τη σωστή απόφαση για τη χρήση των πιο αποτελεσματικών παραμέτρων εισόδου που θα μπορούσαν να βελτιώσουν την έξοδο.



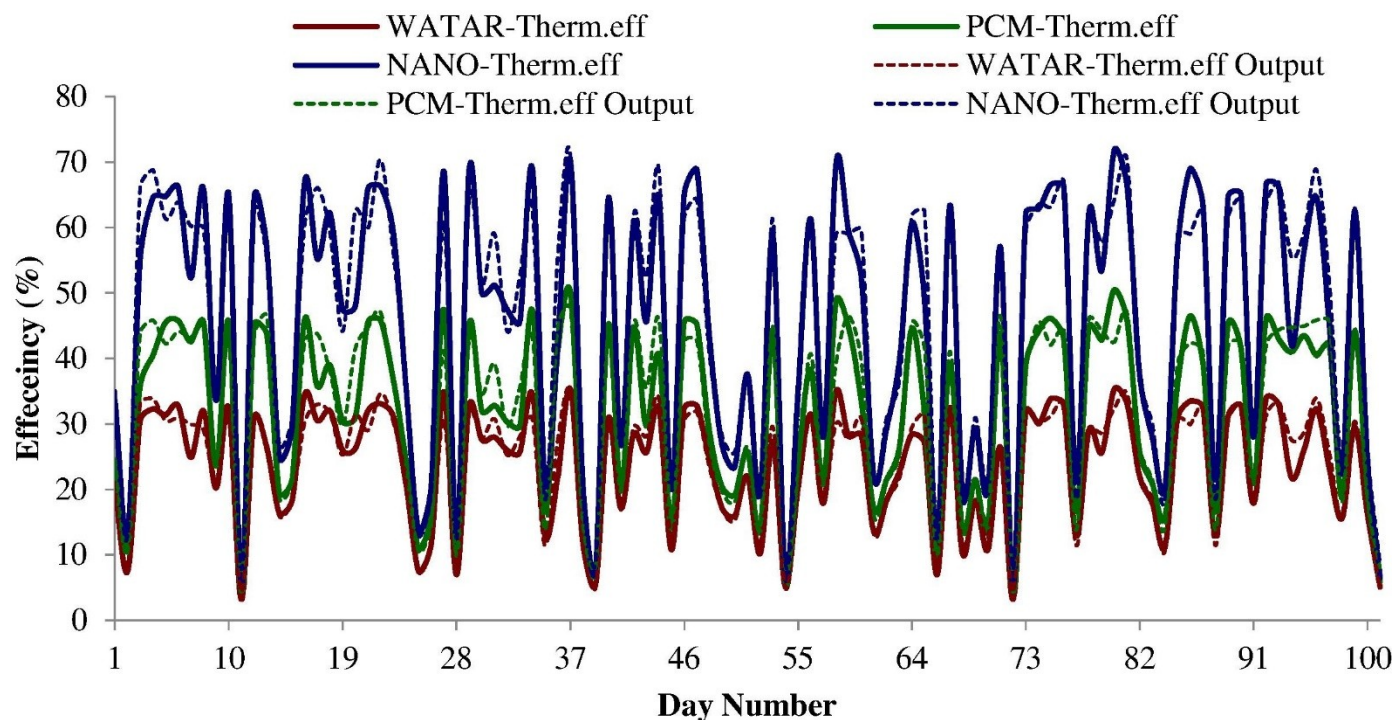
Η εικόνα 18 δείχνει την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων εισόδου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το προτεινόμενο σύστημα.



Εικόνα 18 : Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων εισόδου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το προτεινόμενο σύστημα. Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302572#f0005>

Η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει ότι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος έχει σχεδόν μια σταθερή επίδραση στην ηλεκτρική απόδοση. Ωστόσο, η θερμοκρασία Ambient είχε σημαντική επίδραση στη θερμική απόδοση.

Η εικόνα 19 απεικονίζει τα αποτελέσματα της θερμικής απόδοσης των μετρούμενων και MLP ANN για τρία μοντέλα PV/T.

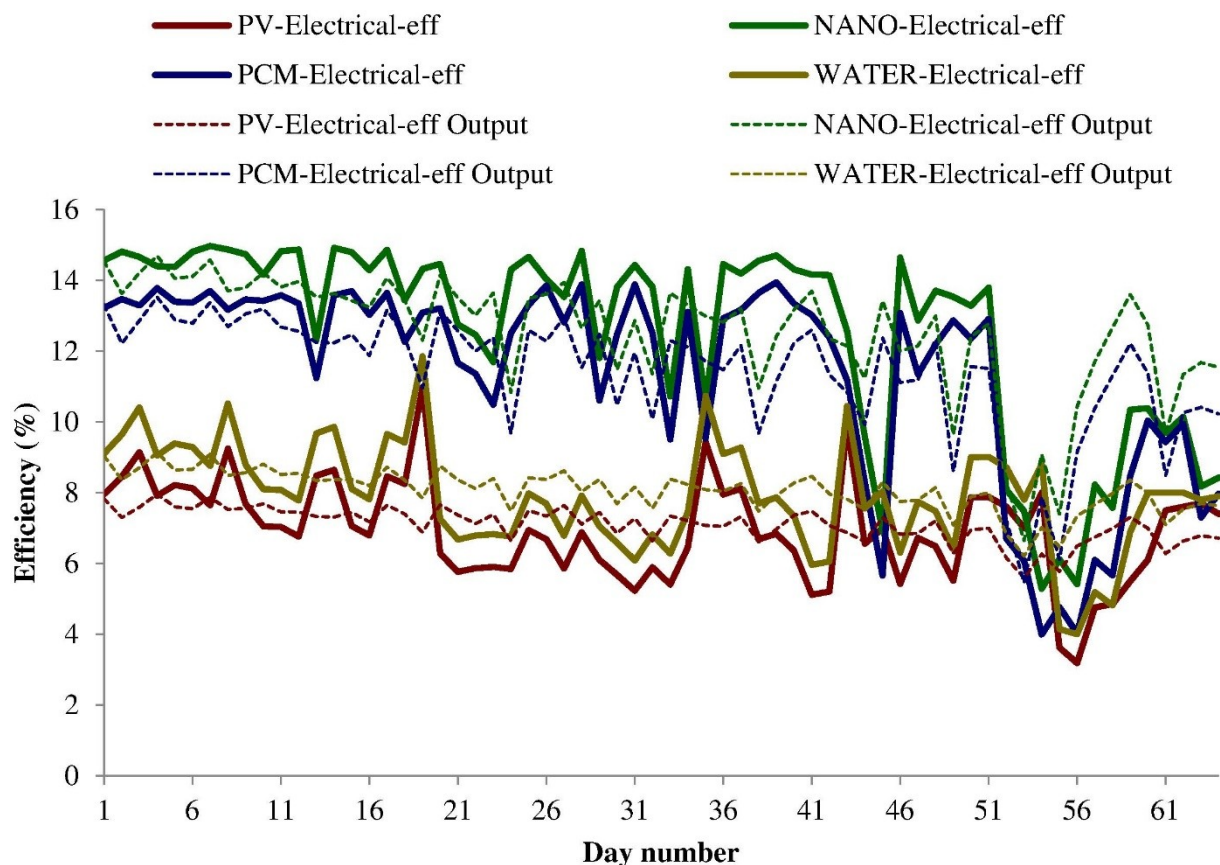


Εικόνα 19 : Τα αποτελέσματα της θερμικής απόδοσης των μετρούμενων και MLP ANN για τρία μοντέλα PV/T. Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302572#0005>

Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με το μοντέλο ANN αποδεικνύει ότι το σύστημα NANO είχε την υψηλότερη απόδοση. Ωστόσο, τα MSE και MAE είναι λίγο υψηλά για το σύστημα NANO σε σύγκριση με άλλα συστήματα.

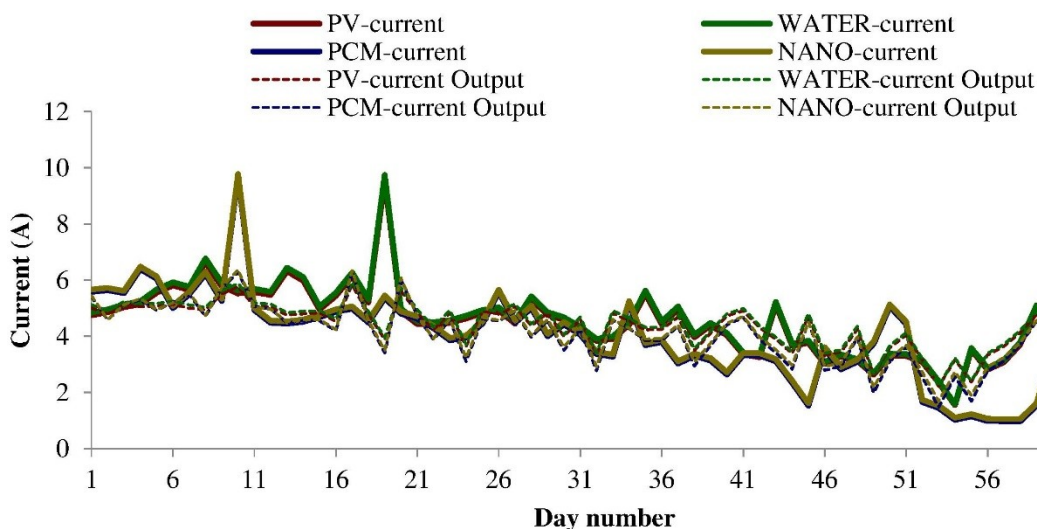
Η σύγκριση των τεσσάρων μοντέλων συστημάτων δείχνει ότι η υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση του μοντέλου nano-PCM. Μπορεί η μεταβολή στο ρεύμα λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας να είναι ασήμαντη αλλά η μεταβολή της τάσης σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι σημαντική. Ως εκ τούτου, προκύπτει ότι το σύστημα nano-PCM έχει σημαντική βελτίωση στην τάση σε σύγκριση με άλλα συστήματα.

Έτσι, οι ερευνητές, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο ηλιακός / θερμικός συλλέκτης με nano-PCM είχε τη βέλτιστη επίδραση ψύξης μεταξύ των τριών συστημάτων που δοκιμάστηκαν, καθώς η ηλεκτρική απόδοσή του ήταν 13,32% ενώ για τον συμβατικό PV ήταν 8,07%.

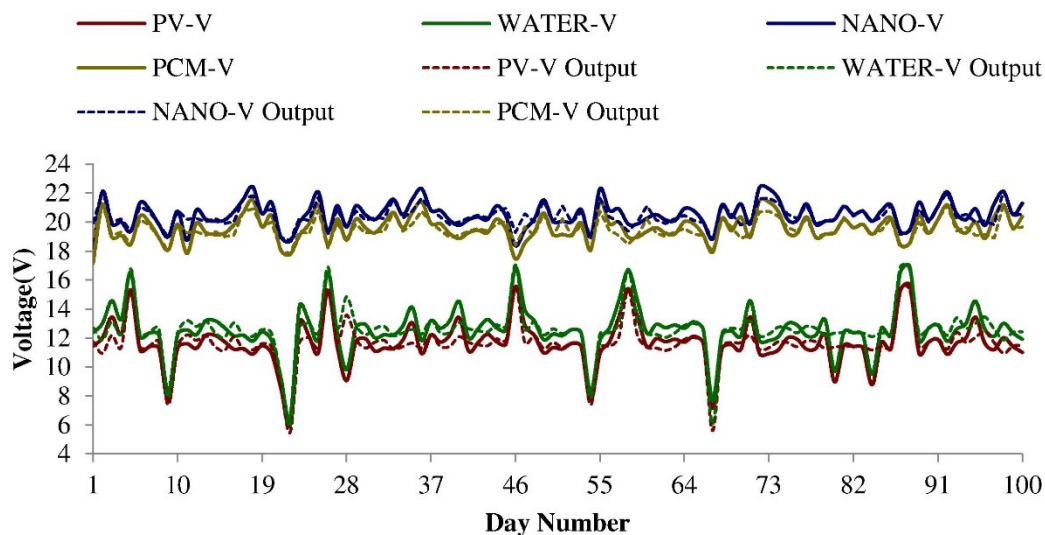


Εικόνα 20 : Ηλεκτρική απόδοση. Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302572#f0005>

Επιπλέον, από τις εικόνες 20, 21 και 22 προκύπτει και το συμπέρασμα ότι το σύστημα NANO παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με την ηλεκτρική απόδοση. Επίσης βλέπουμε ότι το σύστημα NANO επιτυγχάνει την ψηλότερη ηλεκτρική τάση από τα υπόλοιπα συστήματα (βλέπε εικόνα 22).



Εικόνα 21 : Αποτελέσματα ηλεκτρικού ρεύματος Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302572#f0005>



Εικόνα 22 : Αποτελέσματα ηλεκτρικής τάσης Η εικόνα αντλήθηκε από : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302572#f0005>

6. Συμπεράσματα και συζήτηση.

Από την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση πηγάζουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Το πρώτο πράγμα που καταλαβαίνουμε είναι ότι με την χρήση της επιστήμης των υπολογιστών είμαστε σε θέση να παίρνουμε καλύτερες αποφάσεις σε ότι αφορά τον σχεδιασμό περισσότερων αποδοτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επίσης, έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργούμε πιο εξελιγμένα συστήματα. Μεγάλο παράδειγμα αποτελούν τα Ηλιακά / Θερμικά συστήματα (PV/T) τα οποία συμβάλουν στην αξιοποίηση της θερμότητας που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή μονάδα.

Με τη χρήση λογισμικών προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα του Matlab, και με τη χρήση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων ANN, αποδείχθηκε ότι τα PV/T είναι περισσότερο αποδοτικά κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες, σε αντίθεση με το μεσημέρι που η ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται ραγδαία, σε σημείο να προκαλεί και αύξηση της θερμοκρασίας της μονάδας, σε τέτοιο βαθμό ικανό να επηρεάσει αρνητικά την αποδοτικότητα της. Για τους ίδιους λόγους, έχει αποδειχθεί ότι περισσότερο αποδοτικοί είναι οι μήνες της άνοιξης και του φθινοπώρου όπου η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυξημένη ενώ η θερμότητα παραμένει μέσα στα επιτρεπτά όρια. Ένας συνδυασμός των κατάλληλων συνθηκών μπορεί να αποφέρει ικανοποιητική παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και θερμότητας.

Άλλα προτερήματα που μας παρέχει η επιστήμη των υπολογιστών, σε ότι αφορά τα PV/T συστήματα είναι το γεγονός ότι μπορούμε να πάρουμε καλύτερες αποφάσεις σε ότι έχει να κάνει με την αρχιτεκτονική σχεδιασμού της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να προβλέψουμε την απόδοση της μονάδας για κάθε έναν από τους τύπους σχεδιασμού και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα ούτως ώστε να αποφανθούμε πιο από αυτά αποδίδει καλύτερα. Επίσης μπορούμε να γνωρίζουμε ποιος είναι ο κατάλληλος αριθμός μόνωσης που μπορεί να εφαρμοστεί ούτως ώστε να προστατεύεται η μονάδα χωρίς να επηρεάζεται η ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται. Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να προβλέψουμε και ποιος τύπος ψυκτικού υγρού έχει καλύτερη θερμική αγωγιμότητα και κατά συνέπεια ταιριάζει περισσότερο για αυτό το έργο.

7. Βιβλιογραφία.

- [1] Engin Karatepe, Mutlu Boztepe, Metin Colak, “Neural network based solar cell model”, Energy Conversion and Management, Volume 47, Issues 9–10, 2006, Pages 1159-1178, ISSN 0196-8904, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040500186X>
- [2] Atika Qazi, H. Fayaz, A. Wadi, Ram Gopal Raj, N.A. Rahim, Waleed Ahmed Khan, “The artificial neural network for solar radiation prediction and designing solar systems: a systematic literature review”, Journal of Cleaner Production, Volume 104, 2015, Pages 1-12, ISSN 0959-6526, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615004096>
- [3] Ahmet Koca, Hakan F. Oztop, Yasin Varol & Gonca Ozmen Koca (2011, January 24), “Estimation of solar radiation using artificial neural networks with different input parameters for Mediterranean region of Anatolia in Turkey, Ανακτήθηκε στις 16 Νοεμβρίου 2020 από: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417411001059>
- [4] Muhammad Ammirul Atiqi Mohd Zainuri, Mohd Amran Mohd Radzi, Azura Che Soh, Norman Mariun, Nasrudin Abd Rahim, Jiashen Teh and [Ching-Ming Lai](#). (2018, May 04). “Photovoltaic Integrated Shunt Active Power Filter with Simpler ADALINE Algorithm for Current Harmonic Extraction”. Retrieved November 26, 2020, from <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1152/htm>
- [5] Rivai A., Rahim N.A., Elias M.F.M., Jamaludin J., “Multi-channel photovoltaic current-voltage (I-V) curve tracer employing adaptive-sampling-rate method”, (2020), IET Science, Measurement and Technology, 14 (8), pp. 969-976. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85092645630&origin=inward&txGid=81fc471412ad94b4bede801a5852c7d3>
- [6] M.S. Khani, M. Baneshi, M. Eslami, “Bi-objective optimization of photovoltaic-thermal (PV/T) solar collectors according to various weather conditions using genetic algorithm: A numerical modeling”, volume 189, 2019. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219319188>
- [7] Ali H.A. Al-Waeli, Miqdam T. Chaichan, Hussein A. Kazem, K. Sopian, Javad Safaei, “Numerical study on the effect of operating nanofluids of photovoltaic thermal system (PV/T) on the convective heat transfer”, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 12, 2018, Pages 405-413, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X18301266>
- [8] Oussama Rejeb, Houcine Dhaou, Abdelmajid Jemni, “A numerical investigation of a photovoltaic thermal (PV/T) collector”, Renewable Energy, Volume 77, 2015, Pages 43-50, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114008386>
<https://en.wikipedia.org/wiki/Fortran>
- [9] Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Gopi Krishna Kafle, Dae Hyun Kim, “Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 103, 2012, Pages 184-193. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812001730>

- [10] H.A. Zondag, D.W. de Vries, W.G.J. van Helden, R.J.C. van Zolingen, A.A. van Steenhoven, "The yield of different combined PV-thermal collector designs", *Solar Energy*, Volume 74, Issue 3, 2003, Pages 253-269.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300121X>
- [11] Khaled Touafek, Mourad Haddadi, Ali Malek, "Design and modeling of a photovoltaic thermal collector for domestic air heating and electricity production", *Energy and Buildings*, Volume 59, 2013, Pages 21-28.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005531>
- [12] Sadegh Aberoumand, Shahin Ghamari, Bahman Shabani, "Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PV/T) system using nanofluids: An experimental study", *Solar Energy*, Volume 165, 2018, Pages 167-177.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18302391>
http://hacchp.gr/wp-content/uploads/2017/03/Exergy_Analysis-1.pdf
- [13] Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Jacopo Vivian, Lorenzo Croci, Giorgio Besagni, "The validation of a novel lumped parameter model for photovoltaic thermal hybrid solar collectors: a new TRNSYS type", *Energy Conversion and Management*, Volume 188, 2019, Pages 414-428.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419303218>
- [14] Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Gopi Krishna Kafle, Dae Hyun Kim, "Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 103, 2012, Pages 184-193.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812001730>
- [15] Jarosław Bigorajski, Dorota Chwieduk, "Analysis of a micro photovoltaic/thermal – PV/T system operation in moderate climate", *Renewable Energy*, Volume 137, 2019, Pages 127-136
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118301265>
- [16] Ying Yu, Enshen Long, Xi Chen, Hongxing Yang, "Testing and modelling an unglazed photovoltaic thermal collector for application in Sichuan Basin", *Applied Energy*, Volume 242, 2019, Pages 931-941
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919305227>
- [17] Ali H.A. Al-Waeli, K. Sopian, Jabar H. Yousif, Hussein A. Kazem, John Boland, Miqdam T. Chaichan, "Artificial neural network modeling and analysis of photovoltaic/thermal system based on the experimental study", *Energy Conversion and Management*, Volume 186, 2019, Pages 368-379. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302572>
- [18] Gabriel Villarrubia, Juan F. De Paz, Pablo Chamoso, Fernando De la Prieta, "Artificial neural networks used in optimization problems", *Neurocomputing*, Volume 272, 2018, Pages 10-16. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231217311116>

- [19] Kallol Roy, Kamal Krishna Mandal, Atis Chandra Mandal, "Ant-Lion Optimizer algorithm and recurrent neural network for energy management of micro grid connected system", Energy, Volume 167, 2019, Pages 402-416.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218321509>
- [20] Seyedali Mirjalili, "The Ant Lion Optimizer", Advances in Engineering Software, Volume 83, 2015, Pages 80-98.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997815000113>
- [21] O. Rejeb, H. Dhaou, A. Jemni "**Parameters effect analysis of a photovoltaic thermal collector: case study for climatic conditions of Monastir, Tunisia**". Energy Convers Manag, 89 (2015 Jan 1), pp. 409-419 <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0196890414008991?token=192C597CD3C86759B34C434B0059B4E17CE4560572480B24E7E90F727B60EB3AB6CEBF210086DDA0F545BF5D42281752&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220516172758>
- [22] B.E. LAUNDER, D.B. SPALDING, " PAPER 8 - THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS", Editor(s): Suhas V. Patankar, Andrew Pollard, Ashok K. Singhal, S. Pratap Vanka, Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion, Pergamon, 1983, Pages 96-116, ISBN 9780080309378, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-030937-8.50016-7>