



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## **Διερεύνηση Μεθόδων Ψύξης Φωτοβολταϊκών Κελιών με τη Χρήση Θερμοηλεκτρικών Στοιχείων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαργαρίτα Γ. Οικονομάκου

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Διερεύνηση Μεθόδων Ψύξης Φωτοβολταϊκών Κελιών με τη Χρήση  
Θερμοηλεκτρικών Στοιχείων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαργαρίτα Γ. Οικονομάκου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22<sup>α</sup> Μαρτίου 2023.

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χρήστος Χριστοδούλου  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Μαργαρίτα Γ. Οικονομάκου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαργαρίτα Οικονομάκου, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

Η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων αποτελεί ένα μείζον πρόβλημα το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει η κοινωνία τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Προς αυτό το σκοπό, συντελείται τα τελευταία χρόνια μια προσπάθεια στροφής της ενεργειακής παραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Στο πλαίσιο της υλοποίησης αυτού του πλάνου, διενεργείται ενδελχής επιστημονική έρευνα που αποσκοπεί στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων που εκμεταλλεύονται τις ΑΠΕ και μέσω της οποίας έχουν αναδειχθεί διάφοροι κρίσιμοι παράγοντες που συνεισφέρουν στην συντήρηση και βελτιστοποίησή τους. Έχει αποδειχθεί ότι ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες, είναι η απαγωγή θερμότητας από τα θερμαινόμενα μέρη των συστημάτων αυτών.

Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη σημασία του παράγοντα της ψύξης για την αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Συγκεκριμένα κατόπιν αξιολόγησης των διαθέσιμων εφαρμογών, γίνεται μια πειραματική μελέτη της λύσης στο ζήτημα της ψύξης φωτοβολταϊκών με τη χρήση θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Η κατασκευή της πειραματικής διάταξης και η αποτίμηση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας έγιναν στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

**Λέξεις κλειδιά:** Φωτοβολταϊκά, ψύξη φωτοβολταϊκού, απόδοση, πολυκρυσταλλικά, θερμοηλεκτρικά, Peltier, Seebeck,



# Abstract

One of the most concerning problems that society has to face in the 21<sup>st</sup> century is the depletion of fossil fuels. To this end, in recent years, there has been made a remarkable effort in order to shift energy production from fossil fuels to Renewable Energy Sources (RES). In the context of the implementation of this plan, a thorough scientific research, that aims to improve the performance of the systems that exploit RES is being carried out. Through this research, various critical factors that contribute to the maintenance and optimization of these systems have been highlighted. It has been proven that one of the most important factors is the heat dissipation from the heated parts of the aforementioned systems.

In this light, this thesis is concerned to the importance of the cooling factor for the efficient operation of photovoltaic systems. Specifically after evaluating the available solutions to the matter of photovoltaic cooling, an experimental study of the solution of using thermoelectric elements as cooling devices is carried out. The construction of the experimental setup and the evaluation of the results of the process were completed in the Electronic Sensors Laboratory of the School of Electrical and Computer Engineering of the National Technical University of Athens.

**Key Words:** photovoltaic cells, polycrystalline, cooling, thermoelectric device, Peltier, Seebeck





# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον καθηγητή κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου που με εμπιστεύτηκε με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα για να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία, αλλά και για τη γενικότερη καθοδήγηση και συμβολή του στην πορεία μου ως μηχανικός. Επιπλέον, ευχαριστώ τους καθηγητές κύριο Ιωάννη Γκόνο και κύριο Χρήστο Χριστοδούλου για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τις συμβουλές τους. Οφείλω, επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ προς όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων και ιδιαίτερα τον συνάδελφο και ερευνητή Δημήτρη Κοσσυβάκη, τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Σπύρο Αγγελόπουλο αλλά και την υποψήφια διδάκτορα και φίλη μου Γεωργία Στάμου για την πολύτιμη βοήθειά τους, τις συμβουλές και την υποστήριξή τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω ακόμα την ευγνωμοσύνη μου προς τους φίλους μου, που με συντρόφευσαν στο ταξίδι των φοιτητικών μου χρόνων. Τέλος, θέλω από καρδιάς να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τη μητέρα μου Ελένη και την αδερφή μου -και συνάδελφο- Χρύσα για την αγάπη και την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.



# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ενεργειακή κρίση – ΑΠΕ.....	2
1.1.1	Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	3
2	Φωτοβολταϊκά Στοιχεία.....	7
2.1	Ιστορική Αναδρομή.....	7
2.2	Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	9
2.3	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	10
2.3.1	Φως και ηλιακή ακτινοβολία.....	10
2.3.2	Ηλιακή Γεωμετρία.....	11
2.3.3	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	14
2.4	Η φωτοβολταϊκή διάταξη.....	15
2.4.1	Ημιαγωγοί.....	15
2.4.2	Η ζεύξη P-N.....	16
2.4.3	Πόλωση ημιαγωγού P-N.....	17
2.4.4	Δίοδος Schottky.....	19
2.4.5	Φωτοβολταϊκή Διάταξη.....	19
2.4.6	Σύγκριση φωτοβολταϊκών διατάξεων p – n και Schottkey.....	20
2.5	Το φωτοβολταϊκό κελί (cell).....	20
2.5.1	Φωτοβολταϊκά Κελιά Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου.....	21
2.5.2	Φωτοβολταϊκά Κελιά Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου.....	22
2.5.3	Φωτοβολταϊκά Κελιά Άμορφου Πυριτίου.....	23
2.5.4	Πολυμερή Φωτοβολταϊκά Κελιά.....	24
2.5.5	Φωτοβολταϊκά Κελιά Πολλαπλών Επαφών (multi-junction).....	25
2.5.6	Φωτοβολταϊκά Κελιά Κβαντικής Κηλίδας (quantum-dot).....	26
2.5.7	Φωτοβολταϊκά Κελιά Δισεληνοϊνδούχου Χαλκού (CuInSe <sub>2</sub> ή CIS και με προσθήκη γαλλίου CIGS).....	27
2.5.8	Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Τελουριούχου Καδμίου (CdTe).....	28
2.5.9	Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs).....	29
2.5.10	Φωτοβολταϊκά κελιά HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer).....	30
2.6	Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module).....	30
2.7	Ηλεκτρικά μεγέθη που ενδιαφέρουν στα φωτοβολταϊκά.....	32

2.7.1	Η χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού κελιού.....	32
2.7.2	Το ρεύμα βραχυκύκλωσης.....	35
2.7.3	Τάση ανοιχτού κύκλωσης.....	36
2.7.4	Μέγιστη παροχή ισχύος .....	36
2.7.5	Βαθμός απόδοσης φβ πλαισίου . .....	37
2.8	Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση των πλαισίων στις ΦΒ εγκαταστάσεις.....	38
2.8.1	Αρχική βαθμονόμηση STC.....	38
2.8.2	Ο θερμοκρασιακός παράγοντας .....	39
2.8.3	Ρύπανση σωματιδιακής προέλευσης .....	39
2.8.4	Ηλεκτρικές απώλειες.....	40
2.8.5	Σταθερή γωνία τοποθέτησης των ΦΒ πλαισίων .....	41
2.8.6	Νότιος προσανατολισμός φωτοβολταϊκού πλαισίου .....	42
2.8.7	Οι απώλειες της μετατροπής από DC σε AC.....	43
3	Θερμοηλεκτρικά Στοιχεία .....	45
3.1	Εισαγωγή.....	45
3.2	Ιστορική αναδρομή .....	45
3.3	Φαινόμενο Seebeck .....	45
3.4	Φαινόμενο Peltier .....	46
3.5	Φαινόμενο Thomson.....	48
3.6	Θερμοηλεκτρικά στοιχεία.....	49
3.6.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των θερμοστοιχείων .....	51
3.6.2	Αντλία θερμότητας TEC.....	52
3.6.3	Θερμοηλεκτρική γεννήτρια TEG .....	54
4	Μέθοδοι ψύξης φωτοβολταϊκών – βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	55
4.1	Σημασία του παράγοντα της ψύξης για την απόδοση του φωτοβολταϊκού.....	55
4.2	Ενεργητική και παθητική ψύξη.....	56
4.3	Ψύξη Φωτοβολταϊκού με νερό.....	56
4.4	Ψύξη φωτοβολταϊκού με αέρα.....	57
4.5	Ψύξη φωτοβολταϊκού με Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) – Phase Change Materials (PCM) 58	
4.6	Ψύξη Φωτοβολταϊκού με τη χρήση θερμοηλεκτρικών – υβριδικά φωτοβολταϊκά.....	58
4.6.1	Ηλιακές Θερμογεννήτριες (PV-TEG) .....	59
4.6.2	Ηλιακές Αντλίες Θερμότητας (PV-TEC) .....	59

4.6.3	Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των PV/TE (Critical Factors) .....	60
5	Πειραματικό μέρος .....	61
5.1	Προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος σε Matlab.....	61
5.1.1	Μαθηματικό υπόβαθρο .....	61
5.1.2	Υποσύστημα φωτοβολταϊκού .....	62
5.1.3	Ισχύς εξόδου του συστήματος .....	65
5.1.4	Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση .....	65
5.1.5	Αποτελέσματα από το μοντέλο.....	66
5.2	Πειραματική διάταξη και μετρήσεις .....	66
5.2.1	Υλικά και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης	66
5.2.2	Διαδικασία κατασκευής πειραματικής διάταξης.....	72
5.2.3	Όργανα μέτρησης και υλοποίησης του πειράματος .....	82
5.2.4	Υλοποίηση του πειράματος .....	83
5.2.5	Μετρήσεις που λήφθηκαν .....	84
5.2.6	Πορίσματα που εξάγονται από τις μετρήσεις .....	89
5.2.7	Σύγκριση μετρούμενων μεγεθών – σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	92
6	Συμπεράσματα.....	96
7	Ιδέες για μελλοντική εργασία .....	98
8	Βιβλιογραφία .....	100



# Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Τα αποτελέσματα της οικολογικής καταστροφής για τον πλανήτη.....	2
Σχήμα 2-1: Διαφήμιση της ηλιακής μπαταρίας Bell - από το περιοδικό Look Magazine 1956 [2].....	8
Σχήμα 2-2: Διάγραμμα της ελάττωσης της τιμής των φωτοβολταϊκών μέσα στα χρόνια [2]	9
Σχήμα 2-3: Η εκλειπτική τροχιά περιστροφής της Γης γύρω από τον Ήλιο ολοκληρώνεται σε 365 μέρες εισάγοντας τις εποχές [3]. .....	11
Σχήμα 2-4: Αναπαράσταση του συστήματος Ηλίου-Γης όπου θεωρείται ότι η Γη έχει σταθερή θέση στο κέντρο, ενώ ο Ήλιος και όλο το εκλειπτικό επίπεδο περιστρέφεται γύρω της [3]. .....	12
Σχήμα 2-5: Απεικόνιση του γεωγραφικού πλάτους (γωνία $\phi$ ) και του γεωγραφικού μήκους (γωνία $\alpha$ ) [3]. .....	13
Σχήμα 2-6: Οι γωνίες του ηλιακού συλλέκτη για την κλίση ( $\alpha$ ) και τον αζιμουθιακό προσανατολισμό ( $\theta$ ) στο έδαφος και η γωνία για την προσπίπτουσα άμεση ηλιακή δέσμη [3].....	14
Σχήμα 2-7: Το διάγραμμα της ενέργειας ηλεκτρονίων - απόστασης, για μια φωτιζόμενη δίοδο p-n, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας [3]. .....	15
Σχήμα 2-8: Η διάταξη των ενεργειακών ζωνών για μέταλλα, αμέταλλα και ημιαγωγούς [3]. .....	16
Σχήμα 2-9: Ορθή πόλωση διόδου [4].....	17
Σχήμα 2-10: Ανάστροφη πόλωση διόδου [4].....	18
Σχήμα 2-11: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας ιδανικής διόδου [4]. .....	19
Σχήμα 2-12: Κυκλωματική αναπαράσταση φωτοβολταϊκού κελιού [3]. .....	20
Σχήμα 2-13: Τομή κυττάρου φωτοβολταϊκού κελιού μονοκρυσταλλικού πυριτίου [5]. .....	22
Σχήμα 2-14: Φωτοβολταϊκό κελί πολυκρυσταλλικού πυριτίου [6]. .....	23

Σχήμα 2-15: Σύγκριση τεχνολογιών μονορυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου [7]. .....	23
Σχήμα 2-16: Φωτοβολταϊκό κελί αμόρφου πυριτίου [8].....	24
Σχήμα 2-17: Εφαρμογή τεχνολογίας πολυμερών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε πρόσοψη κτηρίου στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ [9]......	25
Σχήμα 2-18: Διαστρωμάτωση σε φωτοβολταϊκό κελί πολλαπλών επαφών από χαλκοπυρίτιο [10].....	26
Σχήμα 2-19: Φωτοβολταϊκό κελί τεχνολογίας κβαντικής κηλίδας [11]......	27
Σχήμα 2-20: Σχέδιο φωτοβολταϊκού κελιού $CuInSe_2$ [13]......	28
Σχήμα 2-21: Εφαρμογή φωτοβολταϊκών πλαισίων CdTe σε BIPV [14]. .....	29
Σχήμα 2-22: Διαστημική εφαρμογή φωτοβολταϊκών GaAs εγκατεστημένων σε ηλιακό δορυφόρο [15]. .....	30
Σχήμα 2-23: Από το φωτοβολταϊκό κελί (cell) στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [3].....	31
Σχήμα 2-24: Τμήματα ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου [16].....	32
Σχήμα 2-25: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ιδανικού φωτοβολταϊκού κελιού [3]. .....	33
Σχήμα 2-26: Χαρακτηριστική ρεύματος - τάσης μια διόδου p-n που υπόκειται συγχρόνως σε ηλεκτρική και οπτική διέγερση. Σημειώνονται οι περιοχές λειτουργίας που αξιοποιούν τη διάταξη ως ανιχνευτή ακτινοβολίας (III) και ως φωτοβολταϊκό στοιχείο (κελί) (IV) [3].....	33
Σχήμα 2-27: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτιζόμενου, ιδανικού φωτοβολταϊκού κελιού [3].....	34
Σχήμα 2-28: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης φωτοβολταϊκού κελιού [3]. .....	35
Σχήμα 2-29: Το ηλεκτρικό κύκλωμα που απαιτείται για την καταγραφή της χαρακτηριστικής I-V ενός φωτοβολταϊκού κελιού και τον προσδιορισμό της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος [3]......	36
Σχήμα 2-30: Για δεδομένες συνθήκες φωτισμού, η χαρακτηριστική καμπύλης ρεύματος - τάσης ενός φωτοβολταϊκού παρέχει σημείο λειτουργίας $I_{max}$ , $V_{max}$ για το οποίο η παρεχόμενη ισχύς μεγιστοποιείται [3]. .....	37



Σχήμα 2-31: Το φαινόμενο του soiling σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [12].	40
Σχήμα 2-32: Βέλτιστη θέση ηλιακού συλλέκτη ως προς τον Ήλιο [3].	42
Σχήμα 2-33: Σχέση απόδοσης φωτοβολταϊκού με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία [17].	43
Σχήμα 3-1: Φαινόμενο Seebeck [13].	46
Σχήμα 3-2: Φαινόμενο Peltier [13].	47
Σχήμα 3-3: Αντίθετη κίνηση ηλεκτρικού - θερμικού φορτίου για $P < 0$ [13].	47
Σχήμα 3-4: Ίδιας φοράς κίνηση ηλεκτρικού - θερμικού φορτίου για $P > 0$ [13].	48
Σχήμα 3-5: Φαινόμενο Thomson [13].	49
Σχήμα 3-6: α) Θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών συναρτήσει της συγκέντρωσης των φορέων τους η β) Γραφική παράσταση συντελεστή απόδοσης θερμοηλεκτρικού (figure of merit) [13].	50
Σχήμα 3-7: Τομή θερμοηλεκτρικού στοιχείου Peltier [13].	51
Σχήμα 3-8: Συστοιχία TEC για ψύξη [13].	53
Σχήμα 3-9: Συστοιχία TEG για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [13].	54
Σχήμα 4-1: Φωτοβολταϊκό πάνελ με εγκατεστημένο σύστημα ψεκασμού νερού για την ψύξη του. Στην εικόνα φαίνονται τα μπεκ στην κορυφή του πάνελ από όπου γίνεται ο ψεκασμός, καθώς και η περιοχή αποστράγγισής του και οι σωληνώσεις [13].	57
Σχήμα 4-2: Ηλιακή θερμογεννήτρια [17]	59
Σχήμα 4-3: Ηλιακή αντλία θερμότητας [17].	60
Σχήμα 5-1: Σχεδιαστικές απεικονίσεις του κελιού όπου αναγράφονται οι διαστάσεις [21].	68
Σχήμα 5-2: Σχεδιαστική απεικόνιση και διαστάσεις του θερμοηλεκτρικού [22].	69
Σχήμα 5-3: Η θερμοαγώγιμη κόλλα (πάστα) που χρησιμοποιήθηκε	70
Σχήμα 5-4: Η ψύκτρα που χρησιμοποιήθηκε	70
Σχήμα 5-5: Το προφίλ αλουμινίου πάνω στο οποίο στήθηκε η πειραματική διάταξη	71

Σχήμα 5-6: Το ανεμιστηράκι που χρησιμοποιήθηκε βοηθητικά .....	72
Σχήμα 5-7: Το φωτοβολταϊκό κελί της διάταξης. Στη φωτογραφία φαίνονται τα bushbars της άνω όψης της που, βραχυκυκλωμένα δίνουν τον αρνητικό ακροδέκτη.....	73
Σχήμα 5-8: Η πίσω όψη του κελιού όπου έχουν κολληθεί στα bushbars τα καλώδια που αποτελούν το θετικό ακροδέκτη. Φαίνονται οι θερμοσυστελλόμενοι σωλήνες καθώς και το λεπτό στρώμα σιλκόνης που εξυπηρετούν σκοπούς μόνωσης.....	74
Σχήμα 5-9: Ράγισμα και αποκοπή τμήματος του κελιού στο σημείο κόλλησης του ακροδέκτη .....	75
Σχήμα 5-10: Εφαρμογή κόλλας στην πίσω όψη του κελιού .....	76
Σχήμα 5-11: Η θερμοηλεκτρική συσκευή του πειράματος. Φαίνεται η ψυχρή περιοχή της .....	77
Σχήμα 5-12: Εφαρμογή κόλλας στο θερμοηλεκτρικό .....	78
Σχήμα 5-13: Η ψυχρή πλευρά του θερμοηλεκτρικού (σημειωμένη με C) πρόκειται να κολληθεί στην κάτω όψη του φωτοβολταϊκού.....	78
Σχήμα 5-14: Το κύκλωμα δοκιμής.....	79
Σχήμα 5-15: Η διάταξη κάτω από τη δοκιμαστική διάταξη τεχνητού ήλιου .....	80
Σχήμα 5-16: Σύνδεση των ακροδεκτών στη δοκιμαστική πλακέτα για τη δημιουργία κλειστού κυκλώματος .....	81
Σχήμα 5-17: Άποψη του θερμοηλεκτρικού και της ψύκτρας στην κάτω όψη του αλουμινίου .....	81
Σχήμα 5-18: Η γεννήτρια μέγιστης τάσης εξόδου 260V που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα .....	82
Σχήμα 5-19: Διακύμανση ισχύος εξόδου με τη θερμοκρασία για ψύξη με χρήση TEC .....	89
Σχήμα 5-20: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας για τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν .....	90
Σχήμα 5-21: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας για τις συνδεσμολογίες TEG .....	90
Σχήμα 5-22: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας για τις συνδεσμολογίες TEC .....	91

Σχήμα 5-23: Σύγκριση θερμοκρασιών στις συνδεσμολογίες TEC με ανεμιστηράκι.....	91
Σχήμα 5-24: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας μεταξύ περίπτωσης TEG και TEC σε συνδυασμό με ανεμιστηράκι.....	92



## Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 5-1: Συνιστώσες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο για τους τρεις τύπους κελιών [17].....	65
Πίνακας 5-2: Τιμές θερμοκρασίας και ισχύος που προκύπτουν .....	66
Πίνακας 5-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού κελιού.....	67
Πίνακας 5-4: Εμπρόσθια όψη κελιού (-) .....	67
Πίνακας 5-5: Οπίσθια όψη κελιού (+).....	67
Πίνακας 5-6: Ηλεκτρικά μεγέθη κελιού .....	67
Πίνακας 5-7: Θερμικά χαρακτηριστικά κελιού .....	67
Πίνακας 5-8: Εξάρτηση τάσης από την ένταση ηλεκτρικής ακτινοβολίας .....	68
Πίνακας 5-9: Ηλεκτρικά μεγέθη θερμοηλεκτρικής συσκευής [22]. .....	69
Πίνακας 5-10: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού χωρίς ψύξη.....	85
Πίνακας 5-11: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη TEG... ..	86
Πίνακας 5-12: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη συνδυασμού TEG και ανεμιστήρα .....	86
Πίνακας 5-13: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη TEC. ...	87
Πίνακας 5-14: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη συνδυασμού TEC και ανεμιστήρα.....	88



# 1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια διερεύνηση της αναγκαιότητας ψύξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων με γνώμονα τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους. Σε αυτό το πλαίσιο γίνεται μια επισκόπηση στις μεθόδους που εφαρμόζονται ή μελετώνται σήμερα για την επίτευξη αυτού του σκοπού, ενώ μεγαλύτερη εμβάθυνση γίνεται στη μέθοδο ψύξης με την αξιοποίηση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων και συσκευών. Η εφαρμογή των θερμοστοιχείων για την ψύξη των φωτοβολταϊκών μελετήθηκε τόσο θεωρητικά, όσο και πειραματικά με την κατασκευή διάταξης αποτελούμενης από φωτοβολταϊκό κελί πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Δομικά η εργασία διαρθρώνεται σε δυο βασικά μέρη, το θεωρητικό και το πρακτικό. Αναφορικά με το θεωρητικό μέρος, αυτό αναπτύσσεται σε τρία κεφάλαια. Στο πρώτο καλύπτεται η θεωρία πάνω στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ξεκινώντας από τα υλικά που δομούν τα φωτοβολταϊκά κελιά και καταλήγοντας στους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στο δεύτερο κεφάλαιο θεωρίας, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο του θερμοηλεκτρικού φαινομένου που αξιοποιούν τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία, καθώς επίσης περιγράφεται η λειτουργία τους. Στο τρίτο θεωρητικό κεφάλαιο, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων ψύξης φωτοβολταϊκών, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στη μέθοδο με θερμοστοιχεία. Κατόπιν ακολουθεί το πρακτικό μέρος της εργασίας, το οποίο οργανώνεται σε τέσσερα μέρη. Αρχικά, γίνεται μια προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκού με χρήση Matlab. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα περιγράφεται βήμα – βήμα η κατασκευή της πειραματικής διάταξης, η εκτέλεση του πειράματος, καθώς και παρατίθενται οι μετρήσεις που ελήφθησαν. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται σχολιασμός των μετρήσεων και καταγραφή των συμπερασμάτων, ενώ στο τελευταίο σκιαγραφείται ένα πλάνο μελλοντικής εργασίας πάνω στο παρόν θέμα για περαιτέρω επέκτασή του.

## 1.1 Ενεργειακή κρίση – ΑΠΕ



Σχήμα 1-1: Τα αποτελέσματα της οικολογικής καταστροφής για τον πλανήτη

Είναι γεγονός ότι οι πρώτες ύλες και τα ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη πρέπει να αντλούνται με μέτρο, και σύνεση, προκειμένου να μη λείψουν από τις επερχόμενες γενεές. Σήμερα, η ανάγκη για κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς σε όλα τα τεχνολογικά αναπτυσσόμενα κέντρα. Πολλές από τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής ενέργειας (συμβατικές μέθοδοι / πυρηνική τεχνολογία) συνδέονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η επίδραση των οποίων είναι αισθητή τόσο σε τοπική, όσο και σε καθολική κλίμακα. Δεδομένων της ανησυχίας, αλλά και του γενικού ενδιαφέροντος των πολιτών για τη διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να αποτελέσουν την ενδεχόμενη διέξοδο στα προβλήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με πρόσφατα δεδομένα ερευνών, η παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρική ενέργεια, ανήλθε σε ποσοστό 40% της συνολικής κατά το 2020. Στόχους για το 2030 αποτελούν η αύξηση της απόδοσης της «πράσινης», όπως αποκαλείται, ενέργειας και η περαιτέρω ενσωμάτωσή της με πρόβλεψη την εξοικονόμηση 15% στο κόστος ηλεκτροπαραγωγής [1].



## 1.1.1 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

### 1.1.1.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο άφθονη ενεργειακή πηγή στη γη - 173.000 TW της ηλιακής ενέργειας προσπίπτουν στη Γη ανά πάσα στιγμή. Το ηλιακό φως μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη θέρμανση και το φωτισμό οικιών και άλλων κτιρίων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για θέρμανση ζεστού νερού, ηλιακή ψύξη και διάφορες εμπορικές και βιομηχανικές χρήσεις.

Η ηλιακή ενέργεια είναι η μετατροπή της ενέργειας από το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια, είτε με απευθείας χρήση φωτοβολταϊκών, είτε έμμεσα με χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας, είτε με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων. Ένα ηλιακό κύτταρο ή φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι μια συσκευή που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιώντας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν φακούς ή καθρέφτες και συστήματα παρακολούθησης για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας. Στη συνέχεια η θερμότητα διοχετεύεται μέσω συμβατικής γεννήτριας.

### 1.1.1.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η χρήση της κινητικής ενέργειας του ανέμου μέσω των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια, είναι άφθονη, ανανεώσιμη, ευρέως διαδεδομένη, δεν παράγει εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία, δεν καταναλώνει νερό και χρησιμοποιεί μικρές εκτάσεις. Οι καθαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι πολύ λιγότερο προβληματικές από αυτές των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από πολλές μεμονωμένες ανεμογεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στο εκάστοτε δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν πτερύγια για τη συλλογή της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Ο άνεμος ρέει πάνω από τα πτερύγια που δημιουργούν ανύψωση (παρόμοια με την επίδραση στα πτερύγια του αεροπλάνου), γεγονός που προκαλεί την περιστροφή των

πτερυγίων. Τα πτερύγια συνδέονται με έναν κινητήριο άξονα που κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

### **1.1.1.3 Βιομάζα**

Η βιομάζα είναι οποιοδήποτε οργανικό υλικό που έχει αποθηκεύσει ηλιακό φως με τη μορφή χημικής ενέργειας. Το ξύλο είναι ένα πολύ γνωστό παράδειγμα βιομάζας: μπορεί να καεί για τη θερμότητα ή να διαμορφωθεί σε δομικά υλικά. Υπάρχουν πολλοί πρόσθετοι τύποι βιομάζας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή καυσίμων, χημικών και ενέργειας - όπως τα φυτά, τα γεωργικά και δασικά υπολείμματα, τα οργανικά συστατικά των απορριμμάτων (αστικά στερεά απόβλητα) και τα φύκια.

Η καύση της βιομάζας απελευθερώνει εκπομπές άνθρακα, αλλά κατατάσσεται ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και στα νομικά πλαίσια του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), επειδή τα φυτικά αποθέματα μπορούν να αντικατασταθούν από νέα ανάπτυξη. Ως πηγή ενέργειας, η βιομάζα μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί απευθείας μέσω καύσης για την παραγωγή θερμότητας, είτε έμμεσα μετά τη μετατροπή της σε διάφορες μορφές βιοκαυσίμου.

### **1.1.1.4 Γεωθερμική ενέργεια**

Η γεωθερμική ενέργεια είναι θερμική ενέργεια που παράγεται και αποθηκεύεται στη Γη. Η εσωτερική θερμότητα της γης είναι η θερμική ενέργεια που παράγεται από τη ραδιενεργή αποσύνθεση και τη συνεχή απώλεια θερμότητας από το σχηματισμό της Γης. Η γεωθερμική ενέργεια είναι οικονομικά αποδοτική, αξιόπιστη, βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον, αλλά η αξιοποίησή της περιορίζεται σε περιοχές κοντά στα σύνορα των τεκτονικών πλακών.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι συστημάτων γεωθερμικής ενέργειας:

- Άμεση χρήση και συστήματα τηλεθέρμανσης
- Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Τα συστήματα άμεσης χρήσης και τηλεθέρμανσης χρησιμοποιούν ζεστό νερό από πηγές ή δεξαμενές που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της γης.

Οι γεωθερμικοί ηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν τους υδροθερμικούς πόρους υψηλής θερμοκρασίας που προέρχονται είτε από πηγάδια ξηρού ατμού είτε από πηγάδια ζεστού νερού κοντά στην επιφάνεια για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το ζεστό νερό ή ο ατμός τροφοδοτούν έναν στρόβιλο που παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν τις σταθερές θερμοκρασίες κοντά στην επιφάνεια της γης για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας μεταφέρουν τη θερμότητα από το έδαφος (ή το νερό) σε κτίρια κατά τη διάρκεια του χειμώνα και αντιστρέφουν τη διαδικασία το καλοκαίρι.

#### **1.1.1.5 Υδροηλεκτρική ενέργεια**

Η υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από την ενέργεια της πτώσης του νερού. Από την αρχαιότητα, η δυναμική ενέργεια του νερού έχει χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία διαφόρων μηχανημάτων, όπως ο νερόμυλος. Στα τέλη του 19ου αιώνα, η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτέλεσε πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η περισσότερη υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από τη δυναμική ενέργεια του φραγμένου νερού που οδηγεί ένα υδραυλικό στρόβιλο και μια γεννήτρια. Η ισχύς που εξάγεται από το νερό εξαρτάται από την ένταση και τη διαφορά ύψους μεταξύ της πηγής και της εκροής του νερού. Αυτή η διαφορά ύψους ονομάζεται κεφαλή. Ένας μεγάλος σωλήνας (το «στέλεχος») παραδίδει νερό από τη δεξαμενή στον στρόβιλο.

#### **1.1.1.6 Ωκεανός**

Οι ωκεανοί καλύπτουν περισσότερο από το 70% της επιφάνειας της Γης. Ως οι μεγαλύτεροι ηλιακοί συλλέκτες στον κόσμο, οι ωκεανοί περιέχουν θερμική ενέργεια από τον ήλιο και παράγουν μηχανική ενέργεια από τις παλίρροιες και τα κύματα.

Οι θαλάσσιες και υδροκινητικές τεχνολογίες δεσμεύουν ενέργεια από τους ωκεανούς και τα ποτάμια - συμπεριλαμβανομένων των κυμάτων, των παλιρροιών, των ωκεάνιων ρευμάτων, των ελεύθερων ρεόντων ποταμών, των ρευμάτων και των θερμικών κλίσεων των ωκεανών - για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται σε πολύ πρώιμο στάδιο ανάπτυξης.



## 2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

### 2.1 Ιστορική Αναδρομή

Μια από τις πλέον διαδεδομένες και αποδοτικές εναλλακτικές μορφές ενέργειας είναι η ενέργεια που προέρχεται από φωτοβολταϊκά. Η τεχνική της δημιουργίας ηλεκτρικής ενέργειας από την απορρόφηση του φωτός σε υλικά με ηλεκτροστατικά φράγματα δυναμικού (φωτοβολταϊκό φαινόμενο) εφαρμόστηκε σε βιομηχανική κλίμακα στις αρχές της δεκαετίας του 1960, προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες τροφοδοσίας των διαστημικών εφαρμογών των ΗΠΑ (πρόγραμμα Apollo). Ακολούθησε η αυτόνομη τροφοδοσία σε σταθμούς/αποστολές των απομονωμένων περιοχών του πλανήτη (Αρκτική - Ανταρκτική) και, κατόπιν, η εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας επεκτάθηκε σταδιακά καλύπτοντας μέρος των οικιακών ενεργειακών αναγκών των τεχνολογικά ανεπτυγμένων χωρών.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο ανακάλυψε ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel το 1839, κατά τη διάρκεια πειραμάτων του με μία ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Η ανακάλυψη στην οποία προέβη, είχε να κάνει με το γεγονός ότι ορισμένα υλικά παρουσίαζαν την ικανότητα παραγωγής μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος, όταν βρίσκονταν εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία.

Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams και ο φοιτητής του Day, παρατήρησαν ότι μία ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski, εισήγαγε τη μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si), η οποία χρησιμοποιείται, βελτιστοποιημένη, ως και σήμερα. Μία σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949, όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν τη θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ, η κβαντική θεωρία είχε διατυπωθεί επαρκώς και συνεπώς οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές έγιναν υλοποιήσιμες. Τις δεκαετίες του '40 και του '50, πραγματοποιήθηκαν τα πρώτα βήματα προς την κατεύθυνση της εμπορικής αξιοποίησης των φωτοβολταϊκών με την ανάπτυξη της μεθόδου Czochralski για την παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής

καθαρότητας. Το πρώτο ηλιακό κύτταρο δημιουργήθηκε στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Charin, Fuller και Pearson. Κατασκεύασαν ηλιακό κελί κρυσταλλικού πυριτίου με ικανότητα μετατροπής 6%. Τα ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία, δεν άργησαν να βρουν εφαρμογή.



**Σχήμα 2-1: Διαφήμιση της ηλιακής μπαταρίας Bell - από το περιοδικό Look Magazine 1956 [2].**

Το 1958, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιήθηκε σε διαστημικές εφαρμογές, όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I. Το 1962, η μεγαλύτερη, για τα δεδομένα της εποχής, φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε ένα φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp. Παρόλο που είχε αναπτυχθεί η έρευνα σχετικά με τις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών, αυτές πραγματοποιούνταν μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων, λόγω του ιδιαίτερα ηψηλού κόστους παραγωγής και εγκατάστασής τους. Κυριότερος χρήστης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν, ήταν η NASA. Η διείδυση των φωτοβολταϊκών έγινε με πολύ αργό ρυθμό στην αγορά, σε σύγκριση με την γρήγορη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, μία τεχνολογία που επίσης στηρίζεται στα ημιαγωγικά υλικά. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στις τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές στην παραγωγική διαδικασία κατά την προσπάθειά τους να δημιουργήσουν καθαρά ημιαγωγικά υλικά.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η ποσότητα του απαιτούμενου υλικού είναι πολύ μεγάλη και η παραγωγή του είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα.. Ως εκ τούτου, έχουν αρχίσει τα τελευταία χρόνια να αναπτύσσονται οι τεχνολογίες λεπτών υμενίων (thin film). Στις τεχνολογίες αυτές, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας του υλικού και συνεπώς μείωση στις τιμές των φωτοβολταϊκών. Η περαιτέρω μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών, καθώς και η αύξηση της απόδοσής, με σκοπό την ευρύτερη διάδοσή τους, αποτελεί διαρκή στόχο για τη βιομηχανία και την έρευνα. Οι προβλέψεις για το άμεσο μέλλον όσον αφορά την αγορά των φωτοβολταϊκών είναι ιδιαίτερα ευοίωνες, τόσο για την καθολική εξάπλωση της τεχνολογίας αυτής παγκοσμίως, όσο και για την καθοδική πορεία στις τιμές τους και την αύξηση της απόδοσής τους.



Σχήμα 2-2: Διάγραμμα της ελάττωσης της τιμής των φωτοβολταϊκών μέσα στα χρόνια [2]

## 2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Μέσω των φωτοβολταϊκών κυψελών ή κελιών γίνεται απευθείας μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα παράγεται DC ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για την απευθείας τροφοδοσία DC ηλεκτρικών φορτίων, ή με η χρήση αντιστροφέα (inverter) να μετατραπεί σε AC. Στην περίπτωση αυτή, η παραγόμενη ενέργεια μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για την απευθείας τροφοδότηση AC

ηλεκτρικών φορτίων (αυτόνομα συστήματα) ή να διατεθεί στο δίκτυο διανομής (διασυνδεδεμένα συστήματα). Κάθε μεμονωμένο κελί έχει μικρή απόδοση, της τάξης του 10-20% ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής, και έτσι περισσότερα κελιά συνδέονται σε σειρά και σχηματίζουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελεί και τη δομική μονάδα όλων των τύπων εγκαταστάσεων. Κατά την κατασκευή φωτοβολταϊκών συστημάτων, πολλά πλαίσια συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα για να επιτευχθεί η κατά περίπτωση ζητούμενη παραγόμενη ισχύς.

## 2.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

### 2.3.1 Φως και ηλιακή ακτινοβολία

Στο παρελθόν, το φως θεωρείτο ότι ήταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό εξηγούσε με εύστοχο τρόπο πολλά από τα παρατηρούμενα φαινόμενα, με πλήθος άλλων, όμως, να μένουν ανεξήγητα. Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα ο Einstein κατάφερε να εξηγήσει την επίδραση της συχνότητας και της ενέργειας του φωτός στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εισάγοντας τα κβάντα φωτός. Η προσέγγιση αυτή οδήγησε στην ανακάλυψη του στοιχειώδους σωματιδίου του φωτός, του φωτονίου. Αυτό χαρακτηρίζει τη δυαδική φύση του φωτός που συνιστά ένα κύμα ύλης. Η ενέργεια ενός σωματιδίου φωτός υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = h \cdot f = \hbar \cdot \omega \quad (2.3.1)$$

Στην οποία είναι:

- $h$ : η σταθερά του Planck ( $6.63 \cdot 10^{-34} J \cdot s = 4.14 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$ )
- $f$ : η συχνότητα
- $\omega$ : η γωνιακή κυκλική συχνότητα περιστροφής
- $\hbar = h/2\pi$

Το μήκος κύματος του φωτός  $\lambda$ , έχει σχέση αντιστρόφως ανάλογη με τη συχνότητα, σύμφωνα με τη σχέση



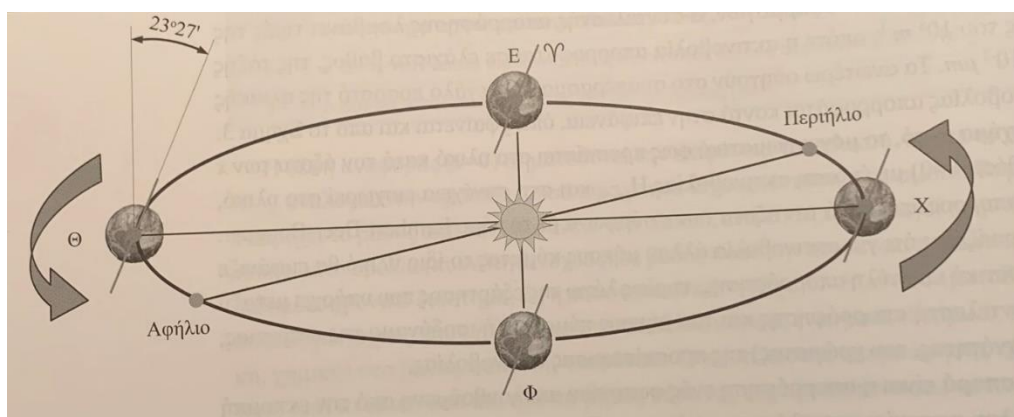
$$c = \lambda \cdot f \quad (2.3.2)$$

Όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός ( $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

Κατά τη μελέτη της ηλιακής ενέργειας ενδιαφερόμαστε κυρίως για τον ανά μονάδα επιφανείας ρυθμό ροής ηλιακής ενέργειας του φωτός που προσπίπτει κάθετα σε έναν ηλιακό συλλέκτη. Το μέγεθος αυτό είναι η πυκνότητα ισχύος, ή ένταση φωτισμού, ή πιο διαδεδομένα ηλιακή ακτινοβολία και μετράται σε  $[W/m^2]$ .

### 2.3.2 Ηλιακή Γεωμετρία

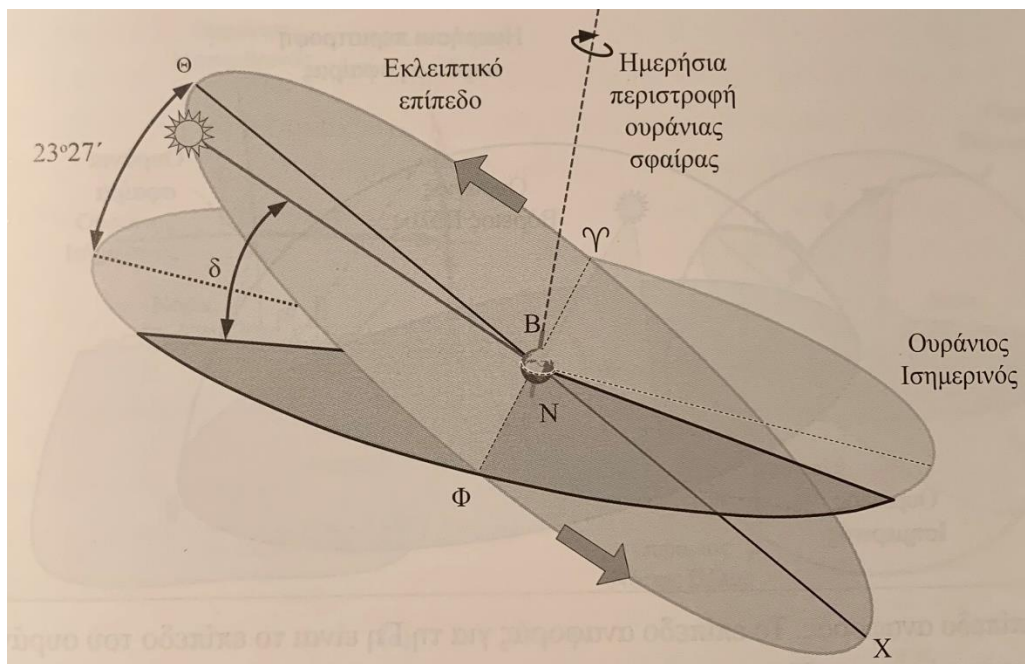
Τα μαθηματικά που καθορίζουν την κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα, αν λάβουμε υπόψη μας ότι ο Ήλιος αποτελεί ένα σταθερό σημείο ως προς την περιφερόμενη Γη. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα, η γη κινείται σε μια ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο. Το επίπεδο που περιέχει αυτή την τροχιά ονομάζεται ελλειπτικό επίπεδο (ecliptic plane).



**Σχήμα 2-3: Η ελλειπτική τροχιά περιστροφής της Γης γύρω από τον Ήλιο ολοκληρώνεται σε 365 μέρες εισάγοντας τις εποχές [3].**

Η Γη χρειάζεται ένα έτος (365 μέρες) για να ολοκληρώσει μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον Ήλιο. Ακόμα, η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της, τον πολικό άξονα και ολοκληρώνει μια πλήρη ιδιοπεριστροφή σε 24 ώρες (1 ημέρα). Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο ελλειπτικό επίπεδο και τον πολικό άξονα της Γης διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και ισούται με  $23^\circ 27' = 23.45$ . Η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ του κέντρου του Ήλιου και του κέντρου της Γης μεταβάλλεται κατά την περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο, στη διάρκεια του έτους. Η κοντινότερη απόσταση της τροχιάς

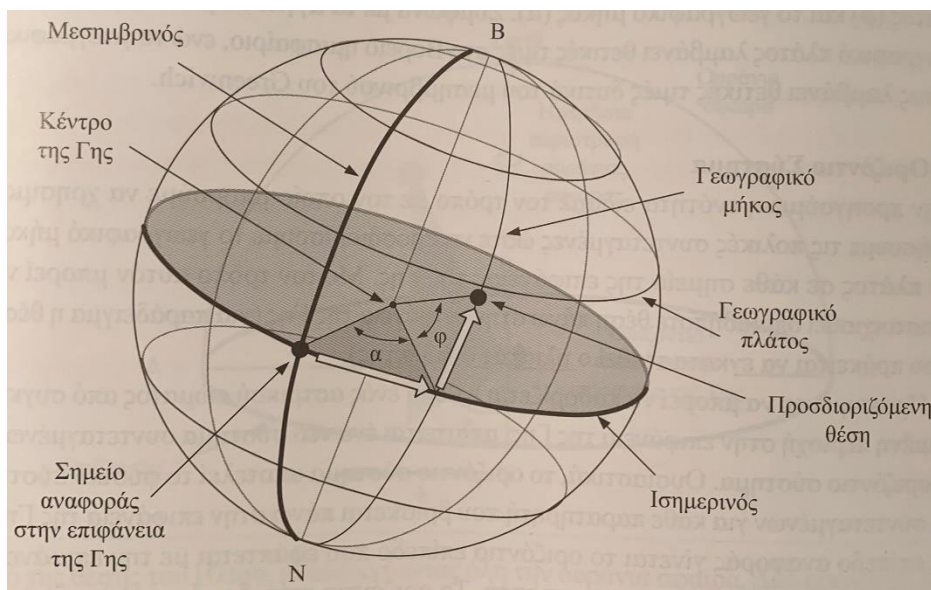
της Γης γύρω από τον ήλιο σηματοδοτεί το περιήλιο, ενώ η πιο μακρινή το αφήλιο της τροχιάς. Κατά την περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο διατηρείται σταθερός ο προσανατολισμός του πολικού άξονα ως προς το εκλειπτικό επίπεδο και με τον τρόπο αυτό εισάγονται οι διάφορες εποχές στα δυο ημισφαίρια. Αστρονομικά ενδιαφέρει πάντα το Βόρειο ημισφαίριο και για το λόγο αυτό στην Σχήμα 2-3 σηματοδοτείται το αστρονομικό σύμβολο της άνοιξης ( $\Upsilon$ ) ως προς το βόρειο ημισφαίριο της Γης.



**Σχήμα 2-4: Αναπαράσταση του συστήματος Ηλίου-Γης όπου θεωρείται ότι η Γη έχει σταθερή θέση στο κέντρο, ενώ ο Ήλιος και όλο το εκλειπτικό επίπεδο περιστρέφεται γύρω της [3].**

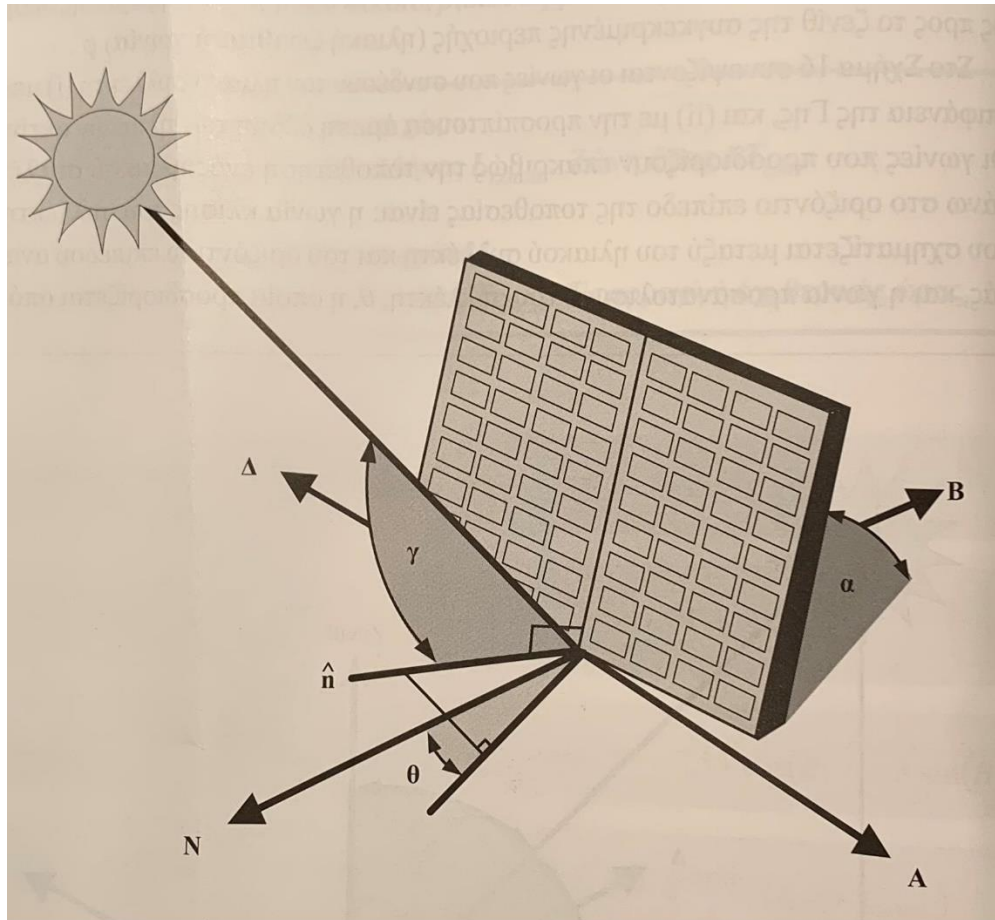
Στους υπολογισμούς που συνδέονται με την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένας ηλιακός συλλέκτης, γίνεται η υπόθεση ότι η Γη είναι σταθερή και ο Ήλιος κινείται γύρω της διαγράφοντας τροχιά πάνω στο εκλειπτικό επίπεδο.

Αναφορικά με τον προσδιορισμό της θέσης του Ηλίου σε σχέση με κάποια τοποθεσία πάνω στη Γη, αυτός γίνεται με χρήση μαθηματικών μοντέλων που παρατίθενται ακολούθως. Κάθε τοποθεσία πάνω στην επιφάνεια της Γης προσδιορίζεται μονοσήμαντα από ένα ζεύγος σφαιρικών συντεταγμένων, το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος. Το επίπεδο αναφοράς είναι αυτό του Ισημερινού, το οποίο τέμνει κάθετα τον πολικό άξονα στο κέντρο της Γης και συναντά την επιφάνειά της κατά μήκος του Ισημερινού.



**Σχήμα 2-5: Απεικόνιση του γεωγραφικού πλάτους (γωνία  $\phi$ ) και του γεωγραφικού μήκους (γωνία  $\alpha$ ) [3].**

Ωστόσο, στη μελέτη της πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν συλλέκτη, είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων. Στην ουσία, το σύστημα αυτό αποτελεί το φυσικό σύστημα συντεταγμένων για κάθε παρατηρητή που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια της Γης. Εν προκειμένω, το επίπεδο αναφοράς είναι το οριζόντιο επίπεδο που εφάπτεται στην επιφάνεια της Γης στην τοποθεσία του παρατηρητή, ενώ αυτό τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ορίζοντα. Η τομή μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο αναφοράς στη θέση του παρατηρητή και της ουράνιας σφαίρας, αποτελεί το ζενίθ της δεδομένης θέσης. Στο εν λόγω σύστημα συντεταγμένων η θέση του Ηλίου ως προς τη θέση του παρατηρητή ορίζεται από το ύψος υπεράνω του ορίζοντα ( $\beta$ ) και το αζιμούθιο ( $Z$ ) ως προς το Νότο. Το ύψος υπεράνω του ορίζοντα ( $\beta$ ) είναι η γωνία υπό την οποία φαίνεται ο Ήλιος ως προς το οριζόντιο επίπεδο στη θέση στην επιφάνεια της Γης όπου βρίσκεται ο παρατηρητής, με τιμές που κυμαίνονται από  $-90^\circ$  ως  $90^\circ$ . Το αζιμούθιο ( $Z$ ) είναι η γωνία που δημιουργείται μεταξύ μιας ορισμένης κατεύθυνσης και του την προβολή του Ηλίου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς. Εν προκειμένω επιλέγεται ως διεύθυνση αναφοράς ο Νότος.

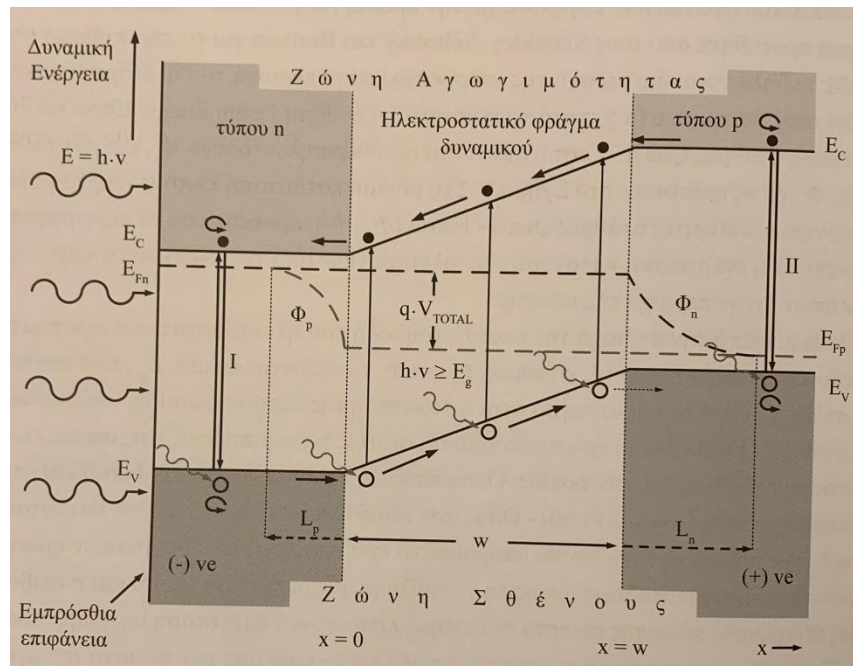


Σχήμα 2-6: Οι γωνίες του ηλιακού συλλέκτη για την κλίση ( $\alpha$ ) και τον αζιμουθιακό προσανατολισμό ( $\theta$ ) στο έδαφος και η γωνία για την προσπίπτουσα άμεση ηλιακή δέσμη [3].

### 2.3.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζεται η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος εντός ενός σώματος, όταν αυτό εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία. Το φαινόμενο στηρίζεται στην οπτική διέγερση της διόδου που αποτελεί το φωτοβολταϊκό κελί. Συγκεκριμένα, εφόσον η ενέργεια  $E = h \cdot f$  ενός προσπίπτοντος φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού, τότε αυτό (και κάθε φωτόνιο αντίστοιχης ενέργειας) απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους του ημιαγωγού που βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Η ενέργεια του κάθε απορροφούμενου φωτονίου διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη θέση του στο πλέγμα μια οπή. Με τον τρόπο αυτό, η οπτική διέγερση εισάγει ζεύγη οπών (στη ζώνη σθένους) και ηλεκτρονίων (στη ζώνη αγωγιμότητας), σε όλο το μήκος της επαφής p-n συμπεριλαμβανομένου και του ηλεκτροστατικού φράγματος. Το φαινόμενο ομοιάζει το

φωτοηλεκτρικό, όμως αντί για εκπομπή ηλεκτρονίων από το σώμα προς το περιβάλλον του, υπάρχει ελεύθερη μετακίνηση ηλεκτρονίων εντός του σώματος.



Σχήμα 2-7: Το διάγραμμα της ενέργειας ηλεκτρονίων - απόστασης, για μια φωτιζόμενη διόδο p-n, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας [3].

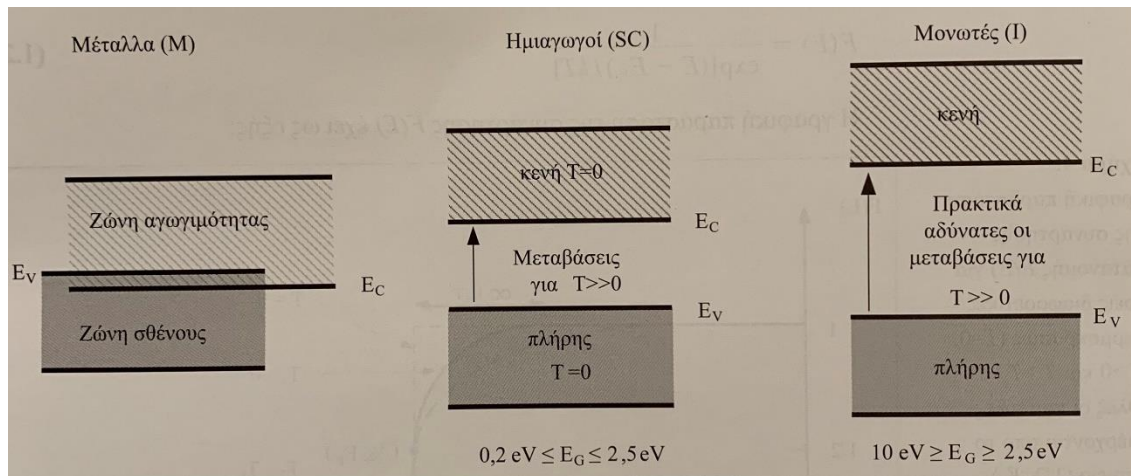
## 2.4 Η φωτοβολταϊκή διάταξη

### 2.4.1 Ημιαγωγοί

Όπως προηγουμένως αναφέρθηκε, τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα στοιχεία που έχουν τις ιδιότητες για να αναπτυχθεί το φαινόμενο αυτό είναι οι ημιαγωγοί. Η μοριακή δομή των ημιαγωγών είναι κρυσταλλική. Τα ηλεκτρόνια εντός αυτής μπορούν να υπάρξουν μόνο σε σαφώς καθορισμένες ενεργειακές ζώνες, γεγονός που αποτελεί έναν θεμελιώδη κανόνα των ηλεκτρονιακών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τα ημιαγωγά υλικά. Η αναλυτική φυσική των ενεργειακών ζωνών είναι πολύπλοκη και στηρίζεται στην επίλυση των εξισώσεων Schrödinger. Ποιοτικά, ωστόσο, μπορεί να δοθεί μια εικόνα των ενεργειακών ζωνών ενός ημιαγωγού, οι οποίες κατά βάση είναι η ζώνη αγωγιμότητας και η ζώνη σθένους που διαχωρίζονται από το ενεργειακό διάκενο. Τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους συμβάλλουν στη δημιουργία των χημικών δεσμών του κρυστάλλου, ενώ τα ηλεκτρόνια της



ζώνης αγωγιμότητας είναι ελεύθερα να κινούνται στον κρύσταλλο συμβάλλοντας στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού [4].



Σχήμα 2-8: Η διάταξη των ενεργειακών ζωνών για μέταλλα, αμέταλλα και ημιαγωγούς [3].

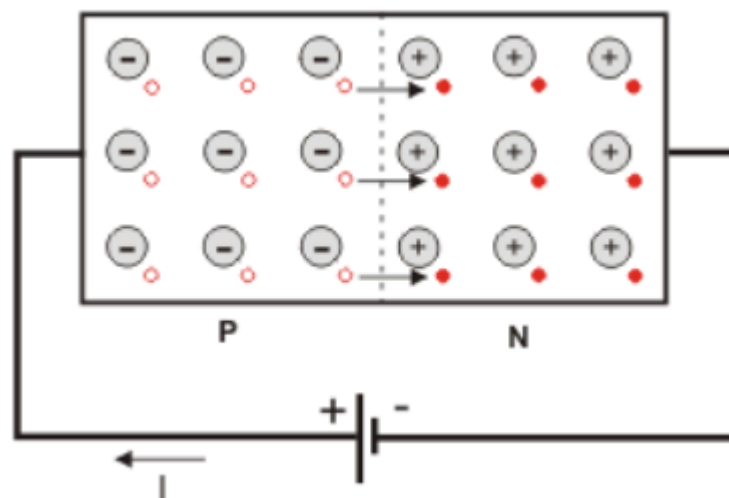
#### 2.4.2 Η ζεύξη P-N

Προκειμένου τα ημιαγωγικά υλικά να αποκτήσουν τις απαραίτητες φωτοβολταϊκές ιδιότητες και να επιτευχθούν τα ζητούμενα αποτελέσματα γίνονται προσμίξεις (doping). Παρακάτω θα δοθεί ένα παράδειγμα περιγράφοντας την κρυσταλλική δομή του πυριτίου (Si). Το πυρίτιο είναι ο πλέον διαδεδομένος ημιαγωγός με 4 ηλεκτρόνια σθένους. Σε ένα κρύσταλλο πυριτίου τα γειτονικά άτομα μοιράζονται τα ηλεκτρόνιά τους, με αποτέλεσμα κάθε άτομο να συμπληρώνει την εξωτερική του στοιβάδα σχηματίζοντας ομοιοπολικούς δεσμούς (8 ηλεκτρόνια) και να βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση (συμπεριφορά ιδανικού αερίου). Προσθέτοντας ένα άτομο σαν το φώσφορο (P) με σύνολο ηλεκτρονίων σθένους 5 η κρυσταλλική δομή του πυριτίου θα έχει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο ελεύθερο να κινηθεί μεταξύ των ατόμων υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Αυτή η κρυσταλλική δομή έχει αρνητικό φορτίο, διότι υπάρχει περίσσεια αρνητικών φορέων, και χαρακτηρίζεται ως ημιαγωγός τύπου n. Αντίθετα πρόσμιξη ατόμου γαλλίου (Ga) ή βορίου (B) θα οδηγούσε σε κρύσταλλο πυριτίου με ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο και με θετικό φορτίο, καθώς υπάρχει έλλειμα αρνητικών φορέων. Αυτό ονομάζουμε ημιαγωγό τύπου p. Έτσι, τοποθετώντας εν επαφή τους δυο ημιαγωγούς, ελεύθερα ηλεκτρόνια του στοιχείου τύπου n τείνουν να καταλάβουν θέσεις του τύπου p, όπου υπάρχει περίσσεια θετικών φορέων με τους οποίους μπορούν να επανασυνδεθούν. Το παραπάνω φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ζώνης

ουδέτερα φορτισμένης που αποτελεί φραγμό στην διείσδυση περαιτέρω ηλεκτρονίων, λόγω του ενεργειακού χάσματος που δημιουργείται. Αυτή η ζώνη ονομάζεται ζώνη απογύμνωσης και τον ημιαγωγό p-n. Η ηλιακή ακτινοβολία επιδρά ώστε τα ηλεκτρόνια να αποκτήσουν την απαραίτητη ενέργεια για να ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα και να κινηθούν ως προς την δίοδο και ημιαγωγό τύπου P.

### 2.4.3 Πόλωση ημιαγωγού P-N

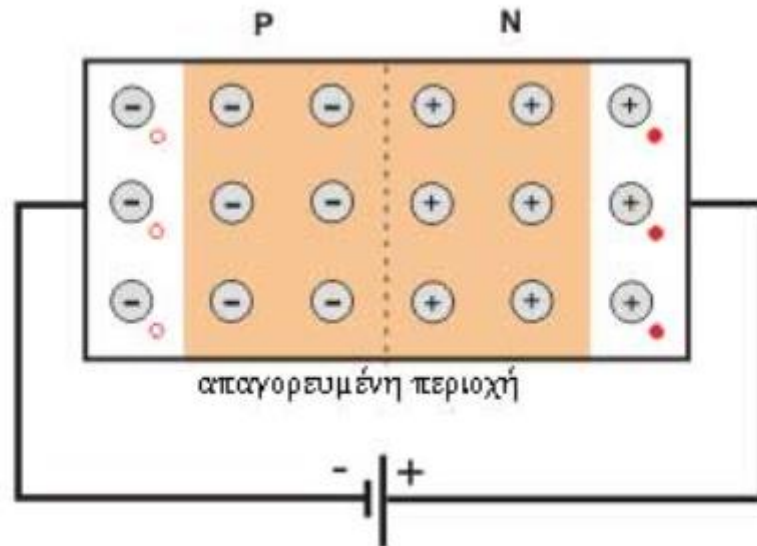
Το ενεργειακό χάσμα της δίοδου μπορεί να υπερνικηθεί με την τοποθέτηση της απαραίτητης τάσης στα άκρα της δίοδου. Σε μία δίοδο p-n υπάρχει ορθή και ανάστροφη πόλωση. Η φύση της δίοδου του ημιαγωγού p-n είναι έτσι, ώστε η διέλευση του ρεύματος να αντιμετωπίζει διαφορετική αντίσταση ανάλογα με την πολικότητα στα άκρα της. Κατά την σύνδεση μίας πηγής ενέργειας με την δίοδο με ορθή πόλωση ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται με τον ημιαγωγό p και η συμπεριφορά της δίοδου είναι όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 2-9: Ορθή πόλωση δίοδου [4].

Στην Σχήμα 2-9 φαίνεται πως η τάση  $V$  που εφαρμόζεται στα άκρα της δίοδου ωθεί τους φορείς των φορτίων, ηλεκτρόνια για ημιαγωγό n και οπές για ημιαγωγό p, προς την ζώνη απογύμνωσης μειώνοντας το πλάτος της. Όταν το πλάτος της ζώνης είναι αρκετά μικρό ώστε να υπερπηδηθεί το ενεργειακό χάσμα μεταξύ των αγωγών η αντίσταση της δίοδου πέφτει επιτρέποντας την διέλευση ρεύματος.

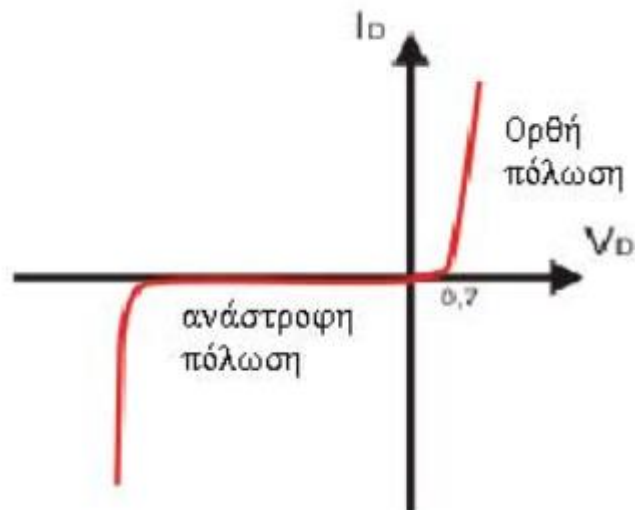
Αντίθετα, σε ανάστροφη πόλωση της διόδου η πηγή έλκει τους φορείς της διόδου. Οι οπές του ημιαγωγού p έλκονται από τον αρνητικό πόλο της πηγής και τα ηλεκτρόνια του n από τον θετικό πόλο. Κατά συνέπεια το πλάτος της ουδέτερης ζώνης αυξάνεται, αυξάνοντας αντίστοιχα το ενεργειακό χάσμα της ζώνης απογύμνωσης και συνεπώς την ηλεκτρική αντίσταση της διόδου. Επομένως η διόδος δεν άγει.



Σχήμα 2-10: Ανάστροφη πόλωση διόδου [4].

Όταν η ανάστροφη τάση στα άκρα της διόδου ξεπεράσει ένα κρίσιμο όριο, η ζώνη απογύμνωσης καταρρέει επιτρέποντας την διέλευση ρεύματος όπως φαίνεται στην παρακάτω χαρακτηριστική διόδου. Αξίζει να αναφέρουμε πως το φαινόμενο αυτό είναι αντιστρέψιμο παρά μόνο της θερμικής καταστροφής του ημιαγωγού.





Σχήμα 2-11: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας ιδανικής διόδου [4].

#### 2.4.4 Δίοδος Schottky

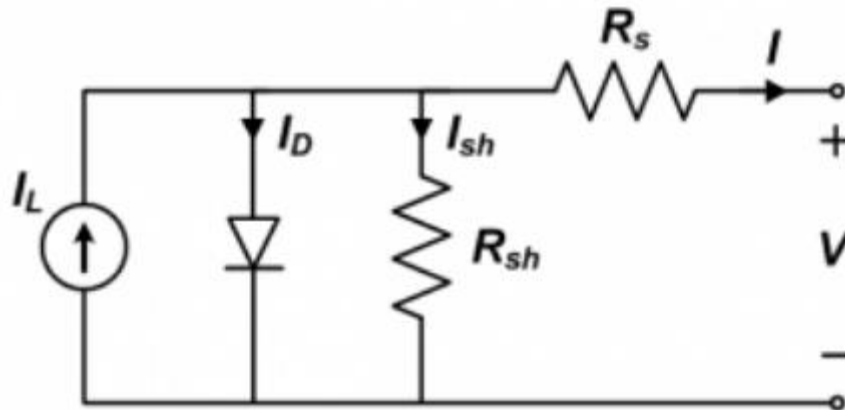
Η διάδος αυτή κατασκευάζεται από την επαφή μεταξύ ενός μετάλλου και ενός ημιαγωγού. Το κριτήριο επιλογής του κατάλληλου συνδυασμού υλικών (μετάλλου - ημιαγωγού), ώστε να σχηματιστεί μια ανορθωτική επαφή είναι οι τιμές της ηλεκτροσυγγένειας του ημιαγωγού και του έργου εξόδου του μετάλλου.

#### 2.4.5 Φωτοβολταϊκή Διάταξη

Το φωτοβολταϊκό κελί μπορεί να παρασταθεί κυκλωματικά από το μοντέλο της διόδου τύπου p - n. Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτή, τα άτομα της διόδου απορροφούν φωτόνια που φέρουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

Με την απορρόφηση ενός φωτονίου από τον ημιαγωγό, απελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους με ενέργεια ίση με αυτή του φωτονίου και μεταπηδά στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, δημιουργείται μια περίσσεια ηλεκτρικών φορέων – ηλεκτρονίων και οπών – στη διάοδο. Συγκεκριμένα τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς την περιοχή τύπου n, ενώ οι οπές προς την περιοχή τύπου p, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών της διόδου. Η διαφορά δυναμικού αυτή, συνιστά ορθή πόλωση για τη διάοδο και συνεπάγεται την αγωγή της.

Αν και η συνήθης πρακτική, είναι η χρήση διόδων τύπου p-n στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, υπάρχουν και εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται δίοδοι Schottkey για την κατασκευή τους.



Σχήμα 2-12: Κυκλωματική αναπαράσταση φωτοβολταϊκού κελιού [3].

#### 2.4.6 Σύγκριση φωτοβολταϊκών διατάξεων p – n και Schottkey

Στις διατάξεις οπτοηλεκτρικής μετατροπής που βασίζουν τη λειτουργία τους σε δίοδους Schottkey, το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού εκτείνεται σχεδόν έως τη φωτιζόμενη επιφάνεια του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα μεγάλο πλήθος φωτονίων να απορροφάται από την ενεργό περιοχή ( $w$ ). Αυτό δεν ισχύει για τις κλασικές δίοδους p – n, στις οποίες το φράγμα δυναμικού εγκαθίσταται στο εσωτερικό της δομής, με αποτέλεσμα πολλά φωτόνια να απορροφώνται πριν φτάσουν το φράγμα δυναμικού, γεγονός που εισάγει σημαντικές απώλειες.

### 2.5 Το φωτοβολταϊκό κελί (cell)

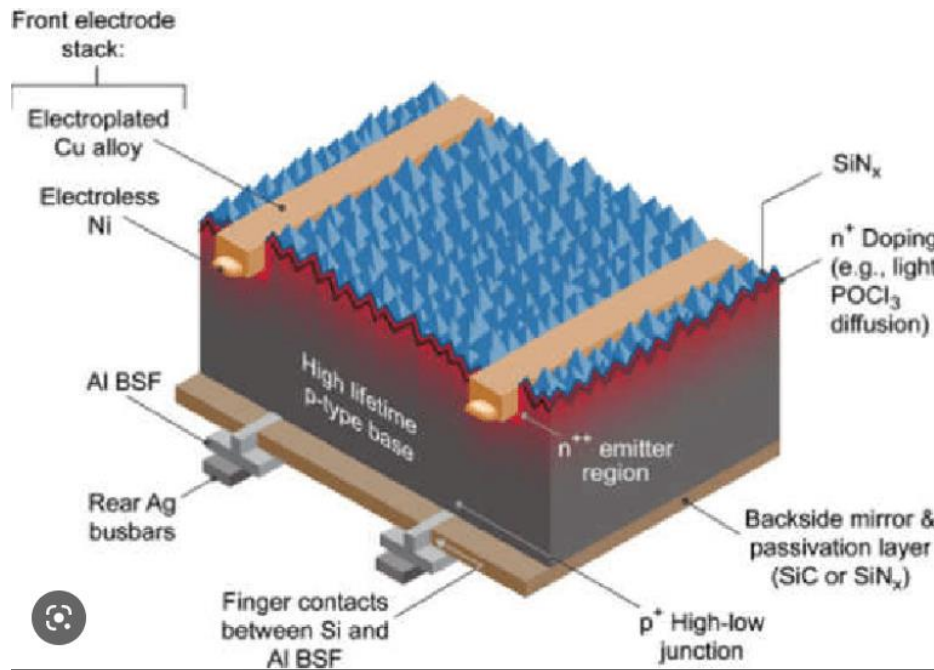
Το φωτοβολταϊκό κελί αποτελεί την ελάχιστη δομική μονάδα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτεινή ακτινοβολία. Συνήθως στο εμπόριο βρίσκονται κελιά που αποτελούνται από δίοδους επαφής p – n και έχουν εμβαδόν φωτιζόμενης επιφάνειας από μερικά  $\text{cm}^2$  μέχρι  $180 \text{ cm}^2$ .

Τα ηλιακά στοιχεία, διαθέτουν υψηλή αξιοπιστία λειτουργίας και μεγάλη διάρκεια ζωής και ως κύριοι στόχοι βελτίωσης παραμένουν συνήθως η απόδοση και το κόστος τους. Σκοπός,

λοιπόν, της εξέλιξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η δημιουργία στοιχείων με υψηλότερο, κατά το δυνατό, βαθμό απόδοσης και χαμηλό κόστος. Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στη βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών που συναντώνται σήμερα ποικίλουν ως προς το βασικό υλικό κατασκευής, την ικανότητα μετατροπής και το κόστος τους. Μία συνοπτική αναφορά των κυριότερων χαρακτηριστικών τους ακολουθεί στη συνέχεια.

### 2.5.1 Φωτοβολταϊκά Κελιά Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ένα υλικό με εύρος ζώνης 1.12eV. Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, είναι τα πλέον διαδεδομένα στην αγορά. Έχουν πάχος περίπου 0.3 mm και η απόδοση τους στη βιομηχανία κυμαίνεται μεταξύ 15-20%. Σε τελευταίας τεχνολογίας προϊόντα έχει επιτευχθεί απόδοση ως και 24%. Το μονοκρυσταλλικό κελί κατασκευάζεται με τον καθαρισμό της πρώτης ύλης σε φάσεις, σε κυκλική ή οκταγωνική μορφή. Κύριες μεθόδους κατασκευής των κυψελών αποτελούν η μέθοδος Czochralski (CZ) και η μέθοδος Float Zone (FZ) που βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από μεγάλη καθαρότητα, για αυτό και το κόστος του είναι το μεγαλύτερο από τις άλλες συμβατικές κατηγορίες. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης-επιφάνειας ή «ενεργειακής πυκνότητας».



Σχήμα 2-13: Τομή κυττάρου φωτοβολταϊκού κελιού μονοκρυσταλλικού πυριτίου [5].

## 2.5.2 Φωτοβολταϊκά Κελιά Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

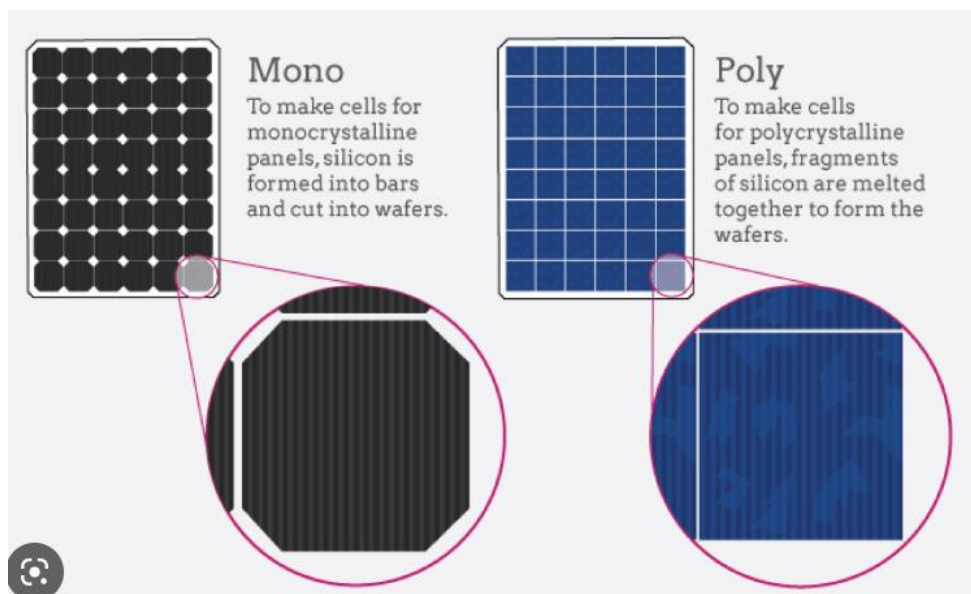
Πρόκειται για μια πιο οικονομική εκδοχή των μονοκρυσταλλικών στοιχείων και έχουν πάχος επίσης περίπου 0,3 mm. Το χαμηλότερο κόστος τους οφείλεται στο χαμηλότερο κόστος παραγωγής τους. Η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 16-18% αν και, σε κλιματικές συνθήκες όπως αυτές της Ελλάδας, παρουσιάζουν εφάμιλλα ποσά απόδοσης με τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, καθώς τείνουν να συμπεριφέρονται καλύτερα σε πιο υψηλές θερμοκρασίες.

Το τελικό προϊόν προκύπτει από τη στερεοποίηση τηγμένου πυριτίου και διαθέτει κοκκώδη μορφή. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης, Directional Solidification (DS), η χύτευση τηγμένου πυριτίου και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση – Electromagnetic Casting (EMC). Το μέγεθος των μονοκρυσταλλικών περιοχών (κρυσταλλικών κόκκων) εξαρτάται από τις συνθήκες πήξης του πυριτίου. Όσο μεγαλύτερες είναι οι μονοκρυσταλλικές περιοχές ενός κελιού, τόσο μεγαλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται σε αυτό.

Οπτικά ο διαχωρισμός τους μπορεί να γίνει λόγω της χαρακτηριστικής σκούρας μπλε απόχρωσής τους αλλά και των κρυσταλλικών κόκκων που διακρίνονται.



Σχήμα 2-14: Φωτοβολταϊκό κελί πολυκρυσταλλικού πυριτίου [6].



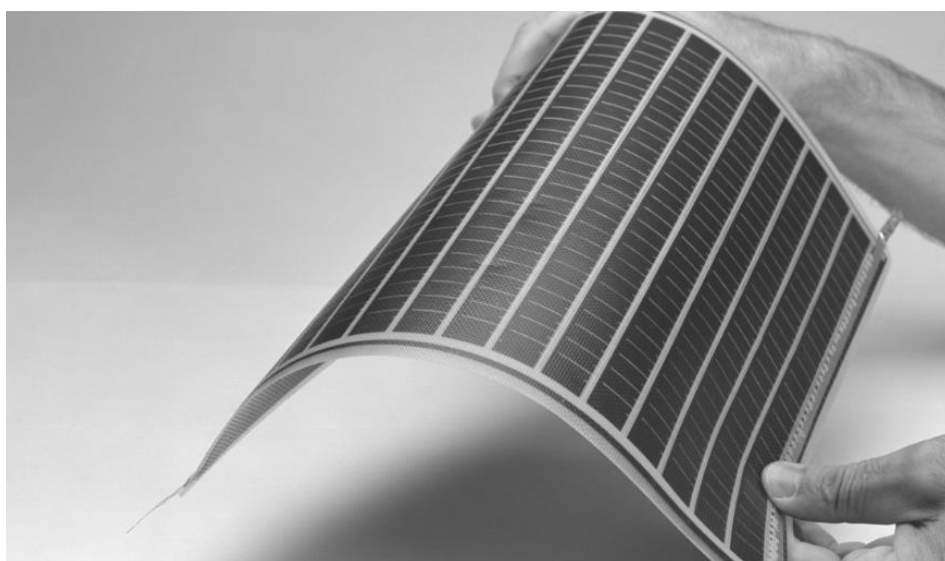
Σχήμα 2-15: Σύγκριση τεχνολογιών μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου [7].

### 2.5.3 Φωτοβολταϊκά Κελιά Άμορφου Πυριτίου

Το άμορφο πυρίτιο, έχει εύρος ζώνης που κυμαίνεται μεταξύ 1.7-1.8 eV. Τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου, αποτελούν κελιά με βάση πυρίτιο που δεν έχει κρυσταλλική δομή. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση πυριτίου πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Ένα

τέτοιου είδους κελί περιέχει πολύ λιγότερο ενεργό υλικό από ό, τι τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία και κατά συνέπεια η απόδοσή των κελιών αμόρφου πυριτίου είναι πολύ χαμηλότερη σε σύγκριση με τις προαναφερθείσες κατηγορίες. Συγκεκριμένα κυμαίνεται μεταξύ 9-12%.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών κελιών αυτής της τεχνολογίας είναι το ότι δεν επηρεάζονται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης υπερέχουν στην αξιοποίηση της απόδοσής τους σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά) και όχι ευθεία. Για αυτό το λόγω χρησιμοποιούνται ευρέως στη χώρα μας και σε πληθώρα εφαρμογών.



**Σχήμα 2-16: Φωτοβολταϊκό κελί αμόρφου πυριτίου [8].**

Εκτός από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες, που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες στην αγορά, αξίζει να γίνει μια αναφορά και σε κάποιες νεότερες που εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρό βαθμό ωριμότητας.

#### **2.5.4 Πολυμερή Φωτοβολταϊκά Κελιά**

Πρόκειται για εξαιρετικά λεπτά και εύκαμπτα φωτοβολταϊκά κελιά που κατασκευάζονται από οργανικά υλικά. Οι μέθοδοι παραγωγής τους είναι πολύ χαμηλότερου κόστους εν συγκρίσει με αυτές των κρυσταλλικών κελιών και των κελιών αμόρφου πυριτίου, ενώ η απόδοσή τους είναι της τάξης του 8% (με πρόβλεψη να ξεπεράσει το 10% τα επόμενα χρόνια). Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι είναι ευάλωτα στην πρόωρη γήρανση. Σταδιακά, και με τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους, αναμένεται η ευρεία

ενσωμάτωση των πολυμερών φωτοβολταϊκών κελιών σε πλήθος εφαρμογών με κυριότερες τις κτιριακές (στο πλαίσιο των κουφωμάτων), αφού τα ημιδιαφανή υλικά κατασκευής τους, τους δίνουν αυτή τη δυνατότητα.



**Σχήμα 2-17: Εφαρμογή τεχνολογίας πολυμερών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε πρόσοψη κτηρίου στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ [9].**

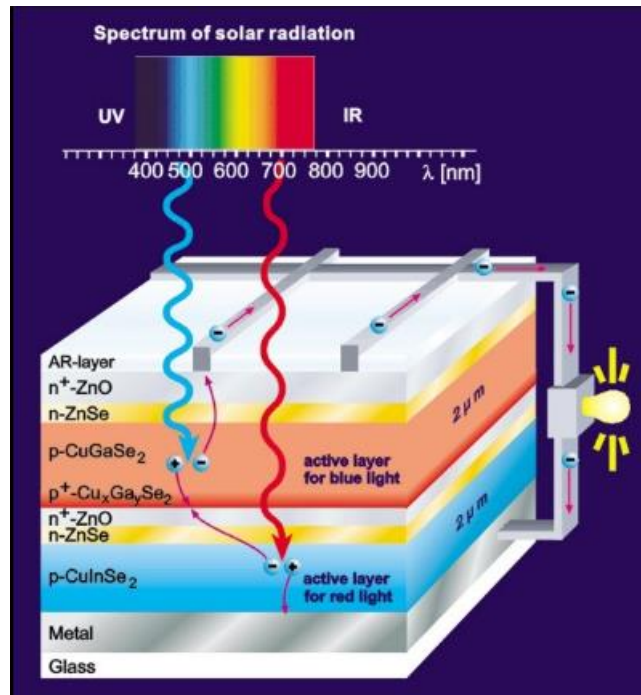
### 2.5.5 Φωτοβολταϊκά Κελιά Πολλαπλών Επαφών (multi-junction)

Αυτού του είδους τα φωτοβολταϊκά κελιά αναπτύχθηκαν τελευταία με γνώμονα τη βελτίωση της απόδοσης των υφιστάμενων τεχνολογιών. Προς αυτό το σκοπό, προτάθηκε η τεχνοτροπία κατασκευής τους κατά την οποία γίνεται υπέρθεση διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών με διαφορετικά ενεργειακά διάκενα. Τα υλικά με το υψηλότερο διάκενο τοποθετούνται σε ανώτερα τμήματα του κελιού.

Η εν λόγω τεχνική, με την ενσωμάτωση διαφόρων ημιαγωγικών υλικών, αποσκοπεί στην καλύτερη αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται υψηλότερη απόδοση και μικρότερη άυξηση της θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία, αφού μεγαλύτερο ποσό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Τα ποσοστά απόδοσης που επιτυγχάνονται με αυτή την τεχνολογία είναι ιδιαίτερα υψηλά. Σε θεωρητικό επίπεδο αγγίζουν το 65-80%, ενώ σε εργαστηριακούς ελέγχους έχει

παρατηρηθεί ποσοστό της τάξης του 40%. Προς στιγμήν το προϊόν αυτό είναι σε πειραματικό στάδιο και δεν κυκλοφορεί στην αγορά. Ακόμα, όμως και όταν τεθεί σε κυκλοφορία, το κόστος παραγωγής του θα είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών τεχνολογιών.

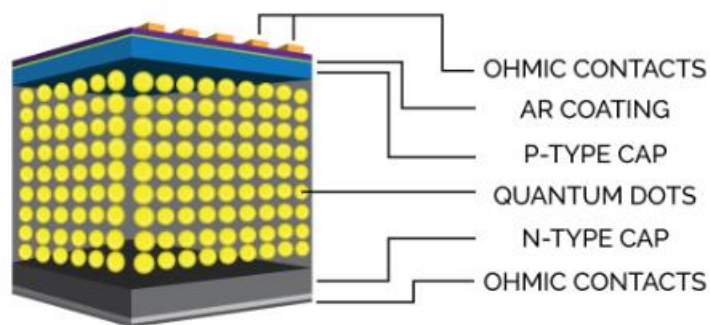


Σχήμα 2-18: Διαστρωμάτωση σε φωτοβολταϊκό κελί πολλαπλών επαφών από χαλκοπυρίτιο [10].

### 2.5.6 Φωτοβολταϊκά Κελιά Κβαντικής Κηλίδας (quantum-dot)

Τα φωτοβολταϊκά κελιά κβαντικής κηλίδας έχουν την ιδιαιτερότητα ότι αξιοποιούν quantum dots (και όχι όλη την επιφάνεια του κελιού) για την απορρόφηση και μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το ποσοστό απόδοσής τους είναι χαμηλό, περίπου της τάξης του 7-9%. Ωστόσο προσεχώς αναμένεται να ανέλθει στο 14% και παράλληλα με το χαμηλό κόστος παραγωγής τους, αυτού του είδους τα κελιά μπορούν δυνητικά να αποτελέσουν μια ανταγωνιστική λύση.



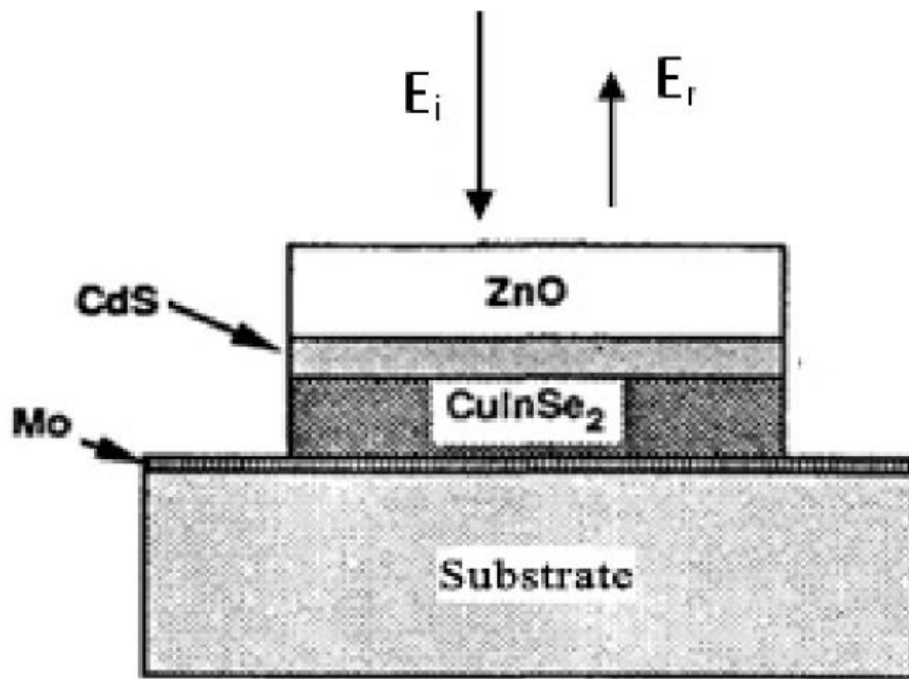


Σχήμα 2-19: Φωτοβολταϊκό κελί τεχνολογίας κβαντικής κηλίδας [11].

Παρακάτω ακολουθούν κάποια παραδείγματα συνήθων υλικών κατασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων.

### 2.5.7 Φωτοβολταϊκά Κελιά Δισεληνοϊνδούχου Χαλκού (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS και με προσθήκη γαλλίου CIGS)

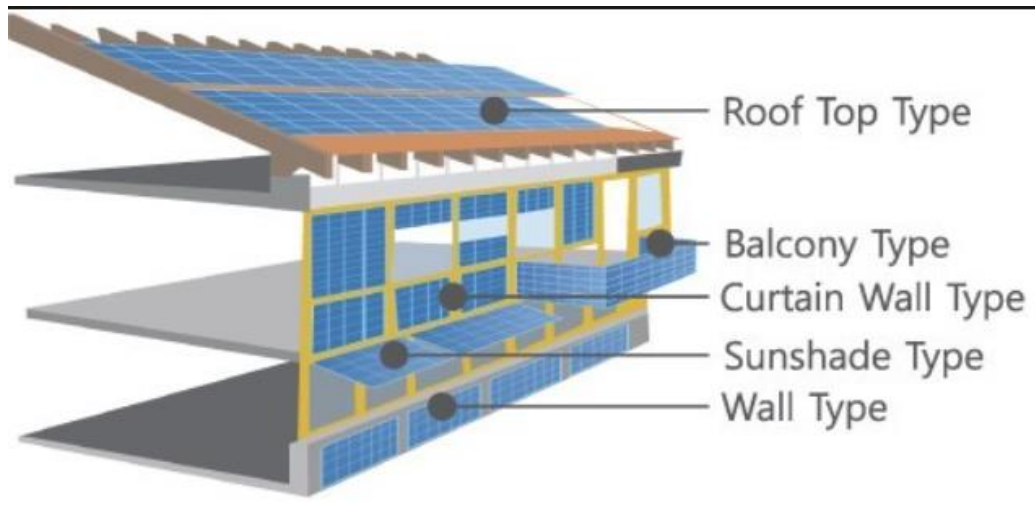
Ο δισεληνοϊνδούχος χαλκός έχει κατά προσέγγιση ενεργειακό διάκενο 1eV. Τα φωτοβολταϊκά κελιά που παράγονται από αυτό το υλικό ανήκουν στην κατηγορία λεπτών υμενίων και χαρακτηρίζονται από εξαιρετική απορροφητικότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο η απόδοση του πλαισίων δισεληνοϊνδούχου χαλκού με τις σύγχρονες τεχνικές κατασκευής κυμαίνεται στο 11%. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18.8%, η οποία είναι η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επίστρωσης. Με την πρόσμιξη γαλλίου (CIGS), η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει, είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στη φύση, γεγονός που καθιστά αυτή την τεχνολογία κοστοβόρα. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο [12].



Σχήμα 2-20: Σχέδιο φωτοβολταϊκού κελιού CuInSe<sub>2</sub> [13].

### 2.5.8 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Τελουριούχου Καδμίου (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο, έχει ενεργειακό διάκενο 1.44 eV, και έχει τη δυνατότητα απορρόφησης ως και 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως, προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου τελουριούχου καδμίου στο εύρος 6-8%. Εργαστηριακά, η απόδοση αυτού του τύπου κελιού έχει φτάσει το 16%. Ωστόσο, η χρήση του δεν είναι τόσο ευρέως διαδεδομένη, διότι Κάδμιο είναι επιβαρυντικό για την ανθρώπινη υγεία, ενώ συγχρόνως, το Τελλούριο υπάρχει σε περιορισμένη ποσότητα. Σημαντικότερη εφαρμογή του είναι σε κτήρια στο πλαίσιο των Building Intergrated Photovoltaic (BIPV).



Σχήμα 2-21: Εφαρμογή φωτοβολταϊκών πλαισίων CdTe σε BIPV [14].

### 2.5.9 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs)

Το αρσενιούχο γάλλιο, είναι ένα κράμα μετάλλων που περιέχει εκτός από γάλλιο, μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος και είναι ιδιαίτερος σπάνιο. Το ενεργειακό του διάκενο είναι 1.42 eV. Η απόδοση φωτοβολταϊκού κελιού Αρσενιούχου Γαλλίου κατασκευασμένου με τη μέθοδο πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά κελιά GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Ανθεκτικά είναι ακόμα και στις υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και ως εκ τούτου, ενδείκνυνται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το αρκετά υψηλό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.



Σχήμα 2-22: Διαστημική εφαρμογή φωτοβολταϊκών GaAs εγκατεστημένων σε ηλιακό δορυφόρο [15].

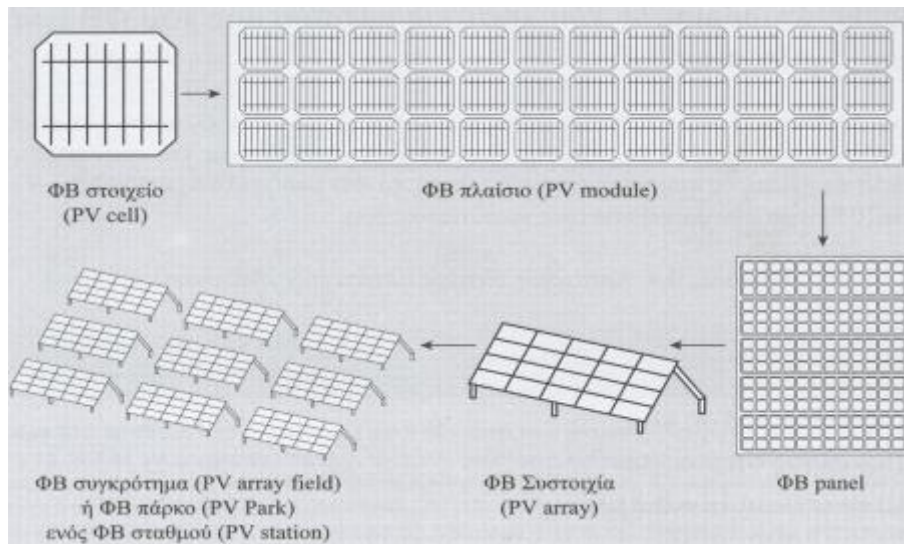
#### 2.5.10 Φωτοβολταϊκά κελιά HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)

Τα πιο γνωστά εμπορικά φωτοβολταϊκά κελιά ετεροεπαφής, αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω), ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17.2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Άλλα πλεονεκτήματα για τα φωτοβολταϊκά κελιά ετεροεπαφής είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στη διάχυτη ακτινοβολία. Στον αντίποδα, αυτού του τύπου τα φωτοβολταϊκά κελιά είναι αισθητά ακριβότερα από τα συμβατικά.

### 2.6 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (*module*)

Τα φωτοβολταϊκά κελιά συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για τη δημιουργία πλαισίων (*modules*). Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι η βασική κατασκευαστική μονάδα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία οποιασδήποτε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, ανεξαρτήτως του μεγέθους εγκατεστημένης ισχύος.

Κατασκευαστικά, το πλαίσιο συνιστά ενιαία στοιχειοσειρά, με τα στοιχεία τοποθετημένα πάνω σε κοινό φέρον υπόστρωμα. Συνεπώς, περιλαμβάνει πολλά πανομοιότυπα φωτοβολταϊκά κελιά, συνδεδεμένα σε σειρά. Η συνδεσμολογία αυτή επιφέρει τη ζητούμενη αύξηση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Για το σχηματισμό ενός πλαισίου, τα ΦΒ κελιά συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά, δηλαδή η άνω όψη του ενός (υλικό τύπου  $n^+$ ) συνδέεται ηλεκτρικά με την πίσω όψη (υλικό τύπου  $p$ ) του επόμενου κελιού.



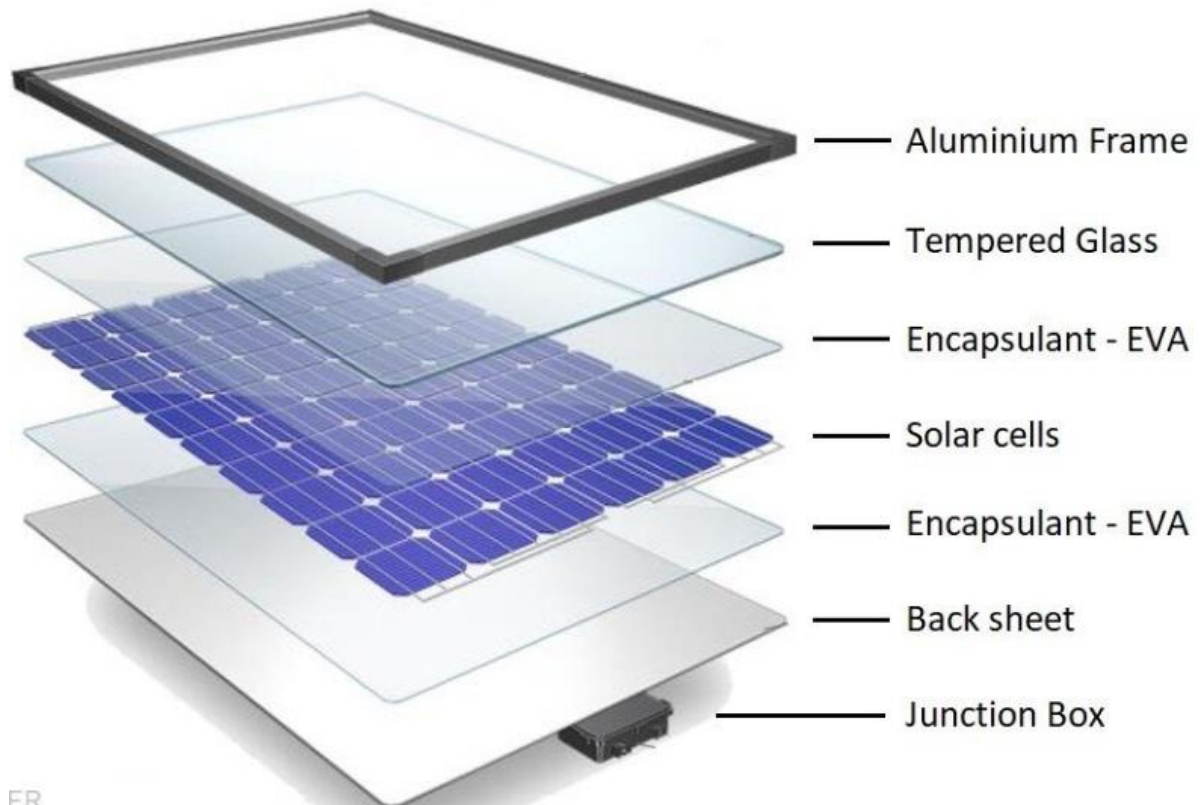
**Σχήμα 2-23: Από το φωτοβολταϊκό κελί (cell) στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [3].**

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι συγκολλήσεις είναι το πλέον ευάλωτο σημείο της κατασκευής ενός ΦΒ πλαισίου και κατά συνέπεια, θα πρέπει να προφυλάσσονται από τυχόν διεργασίες ηλεκτροχημικής προσβολής και διάβρωσης, καθώς και από περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μελλοντικά θα επέλθουν. Προς αυτό το σκοπό, όλη η στοιχειοσειρά εγκιβωτίζεται σε διάφανη ρητίνη, προκειμένου να εμποδιστεί η διείσδυση τα υγρασίας στο εσωτερικό και να διασφαλιστεί η μηχανική σταθερότητα της δομής. Οι ακροδέκτες (θετικός και αρνητικός) της στοιχειοσειράς καταλήγουν στους εξωτερικούς ακροδέκτες που βρίσκονται εντός των κιβωτίων που περιέχουν όλες τις ηλεκτρικές συνδέσεις της εγκατάστασης.

Η διάφανη ρητίνη εγκιβωτισμού των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών κελιών περιβάλλεται με ενισχυμένο γυαλί, το οποίο εμπεριέχει υμένιο προστασίας που προσφέρει υψηλή αντοχή σε εγκάρσιες μηχανικές καταπονήσεις. Παράλληλα, διαφοροποιεί το δείκτη διάθλασης στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ του γυαλιού και της ρητίνης με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό της ηλιακής ακτίνας μεταξύ των δυο γυαλιών. Με τον τρόπο

αυτό ενισχύεται η ανάκλαση των παγιδευμένων φωτονίων και εν τέλει η απορρόφησή τους από τη φωτοβολταϊκή δίοδο.

Περιμετρικά το πλαίσιο επενδύεται με μεταλλικό σκελετό από ανοδιωμένο αλουμίνιο, υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση. Το πλαίσιο πάντα γειώνεται εξωτερικά με μονόκλωνο χάλκινο αγωγό κατάλληλης διατομής.



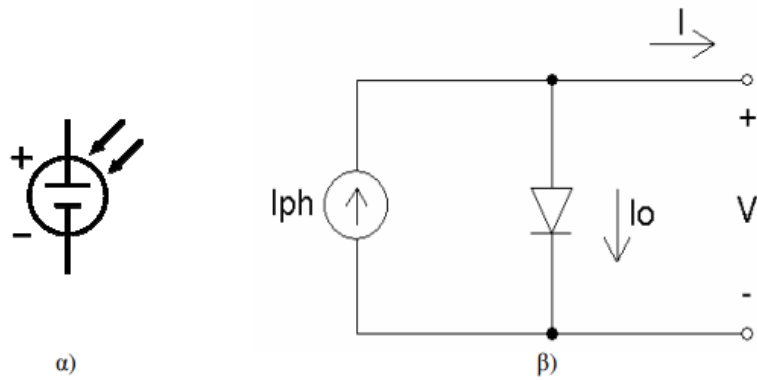
FR

Σχήμα 2-24: Τμήματα ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου [16].

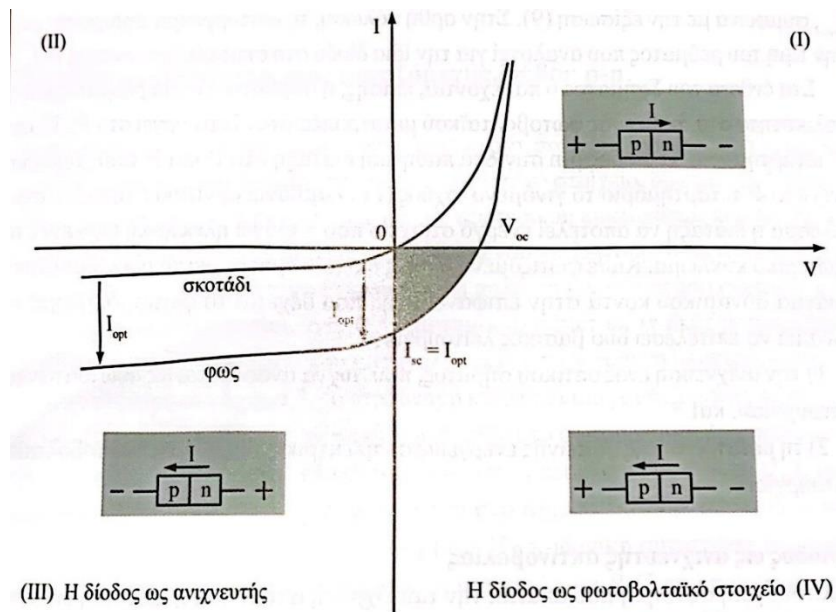
## 2.7 Ηλεκτρικά μεγέθη που ενδιαφέρουν στα φωτοβολταϊκά

### 2.7.1 Η χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού κελιού

Ένα ιδανικό φωτοβολταϊκό κελί μπορεί να παρασταθεί στο ισοδύναμο ηλεκτρικό του κύκλωμα από μια πηγή σταθερού ρεύματος συνδεδεμένη παράλληλα με μια ιδανική δίοδο [3].



Σχήμα 2-25: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ιδανικού φωτοβολταϊκού κελιού [3].



Σχήμα 2-26: Χαρακτηριστική ρεύματος - τάσης μια διόδου p-n που υπόκειται συγχρόνως σε ηλεκτρική και οπτική διέγερση. Σημειώνονται οι περιοχές λειτουργίας που αξιοποιούν τη διάταξη ως ανιχνευτή ακτινοβολίας (III) και ως φωτοβολταϊκό στοιχείο (κελί) (IV) [3].

Το ρεύμα  $I$  που διαρρέει το φορτίο που συνδέεται στους ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού κελιού περιγράφεται από την εξίσωση Shockley ως εξής:

$$I = I_{ph} - I_o \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.8.1)$$

Όπου:

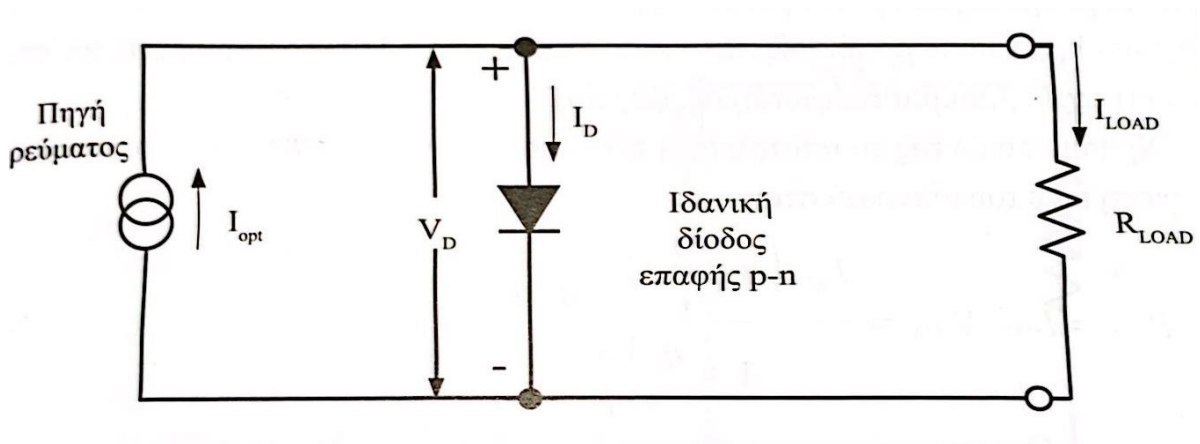
- $I_{ph}$  το φωτόρευμα
- $I_o$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου
- $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου ( $1,6 \times 10^{-19} C$ )



- $k_B$  η σταθερά Boltzman  $1,38 \times 10^{-23} J/K$
- $T$  η απόλυτη θερμοκρασία του φβ σε βαθμούς K

Στην ιδανική περίπτωση η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι:

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( I + \frac{I_{ph}}{I_o} \right) \quad (2.8.2)$$



Σχήμα 2-27: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτιζόμενου, ιδανικού φωτοβολταϊκού κελιού [3].

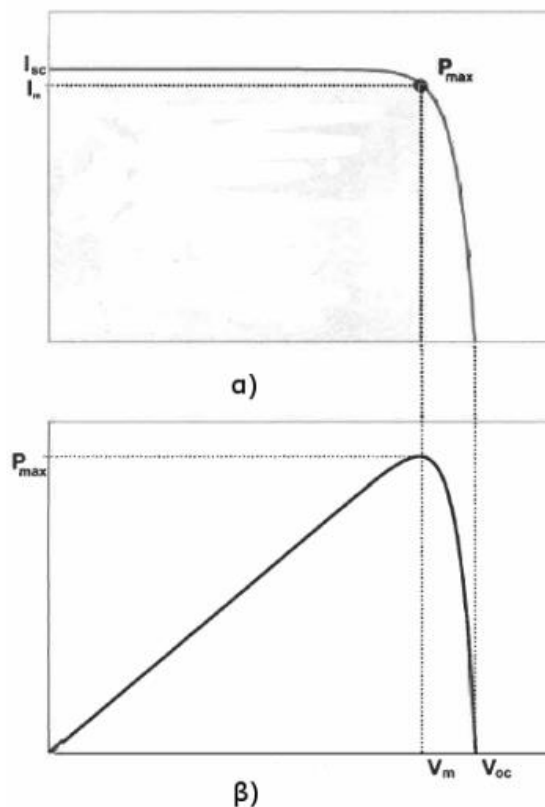
Η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς η οποία παράγεται από το ιδανικό φωτοβολταϊκό κελί υπολογίζεται:

$$P_{LOAD} = I_{LOAD} V_{LOAD} \quad (2.8.3)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος προκύπτει ότι  $V_{LOAD} = V_D$  και αντικαθιστώντας την τιμή του  $I_{LOAD}$  από την 2.8.1 λαμβάνουμε:

$$P_{LOAD} = \left( I_{ph} - I_o \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \right) V_D \quad (2.8.4)$$





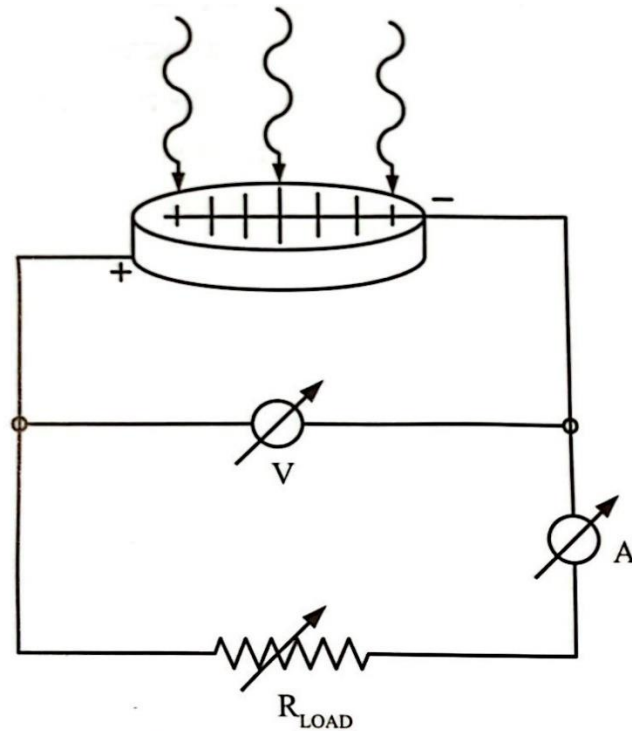
Σχήμα 2-28: Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης φωτοβολταϊκού κελιού [3].

Η χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης ενός φωτοβολταϊκού κελιού προκύπτει από τα σημεία λειτουργίας του 4<sup>ου</sup> τεταρτημορίου της γενικευμένης καμπύλης I-V που αναπαρίσταται στην Σχήμα 2-26. Στο τεταρτημόριο αυτό παράγεται ηλεκτρική ισχύς [3]. Η παρεχόμενη ισχύς και η καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού κελιού παρουσιάζονται συνήθως με τη μορφή που φαίνεται στην Σχήμα 2-26. Ο άξονας των ρευμάτων έχει αναστραφεί ως προς τον οριζόντιο άξονα των τάσεων και παρέχονται μόνο τα δεδομένα της φωτιζόμενης καμπύλης του 4<sup>ου</sup> τεταρτημορίου (ανεστραμμένα). Το κύκλωμα που απαιτείται προκειμένου να χαραχθεί η γραφική παράσταση ρεύματος – τάσης ενός μεμονωμένου φωτοβολταϊκού κελιού, δίνεται στην Σχήμα 2-29.

### 2.7.2 Το ρεύμα βραχυκύκλωσης

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού, για μηδενική τάση αναλογεί η μέγιστη δυνατή τιμή ρεύματος, αλλιώς ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{SC}$ ). Το ρεύμα αυτό αναλογεί στην τιμή του ρεύματος που προβλέπεται από το ηλεκτρικό κύκλωμα της Σχήμα

2-29 στην περίπτωση κατά την οποία βραχυκυκλωθούν μεταξύ τους οι ακροδέκτες του φορτίου του φωτοβολταϊκού κελιού, αν δηλαδή τεθεί  $R_{LOAD} = 0$ .



Σχήμα 2-29: Το ηλεκτρικό κύκλωμα που απαιτείται για την καταγραφή της χαρακτηριστικής I-V ενός φωτοβολταϊκού κελιού και τον προσδιορισμό της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος [3].

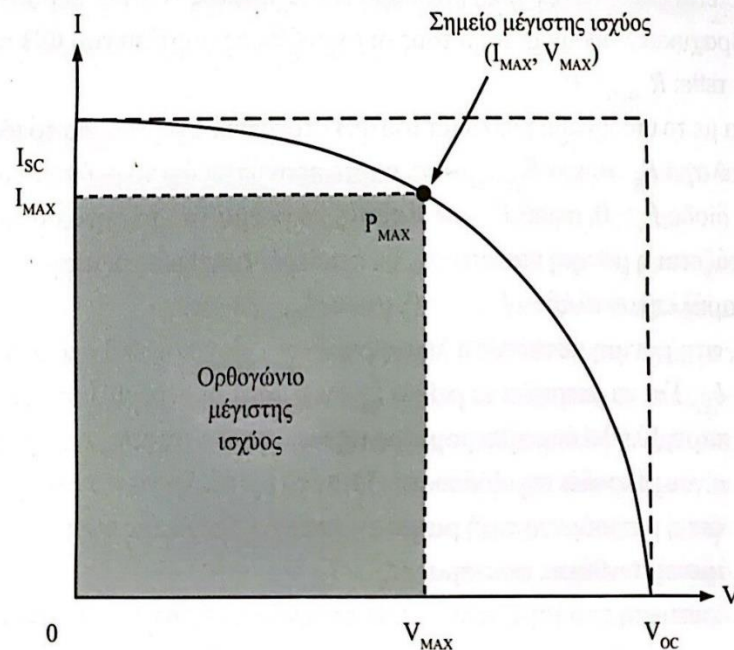
### 2.7.3 Τάση ανοιχτοκύκλωσης

Όταν οι ακροδέκτες εξόδου του φωτοβολταϊκού κελιού ανοιχτοκυκλωθούν, (ισοδύναμα  $R_{LOAD} = \infty$ .) τότε η τάση εξόδου του μεγιστοποιείται. Πρακτικά, η τάση  $V_{OC}$  ενός φωτιζόμενου φωτοβολταϊκού κελιού μπορεί να μετρηθεί, για τις δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας, εάν συνδεθεί ένα βολτόμετρο με άπειρη εσωτερική αντίσταση απευθείας στους ακροδέκτες εξόδου του χωρίς να συνυπάρχει ο κλάδος με την αντίσταση φορτίου της Σχήμα 2-29. Όταν το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό κελί θεωρείται ιδανικό, τότε η μετρούμενη τιμή τάσεως παρέχει απευθείας την τιμή για το μέγεθος  $V_D$  (Σχήμα 2-27).

### 2.7.4 Μέγιστη παροχή ισχύος .

Στη μη ιδανική περίπτωση, όπου η αντίσταση φορτίου λαμβάνει τιμές από 0 ως  $\infty$ , οι τιμές λειτουργίας για την τιμή του ρεύματος κυμαίνονται από  $I_{SC}$  ως 0 και αντιστοίχως της τάσης από 0 ως  $V_{OC}$ . Από όλα τα ζεύγη τιμών λειτουργίας, υπάρχει ένα  $(V_{MAX}, I_{MAX})$  το οποίο

αποδίδει μέγιστη ισχύ  $P_{MAX}$ . Η τιμή της παραγόμενης μέγιστης ισχύος υπολογίζεται από το εμβαδόν της του σκιασμένου ορθογωνίου του Σχήμα 2-30.



Σχήμα 2-30: Για δεδομένες συνθήκες φωτισμού, η χαρακτηριστική καμπύλης ρεύματος - τάσης ενός φωτοβολταϊκού παρέχει σημείο λειτουργίας  $I_{max}$ ,  $V_{max}$  για το οποίο η παρεχόμενη ισχύς μεγιστοποιείται [3].

### 2.7.5 Βαθμός απόδοσης φβ πλαισίου .

Σε σταθερές συνθήκες φωτισμού του φωτοβολταϊκού κελιού, η αναλογία μεταξύ εμβαδού ορθογωνίου μέγιστης ισχύος προς το εμβαδόν του μεγίστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης και υπολογίζεται:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.8.5)$$

Για το ιδανικό φωτοβολταϊκό, η τιμή του αγγίζει τη μονάδα.

Οι ηλεκτρικές παράμετροι που δόθηκαν παραπάνω καθορίζουν τον συντελεστή απόδοσης του κελιού, που υπολογίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης από το φωτοβολταϊκό ηλεκτρικής ισχύος προς την ισχύ που προσδίδεται με τη μορφή ακτινοβολίας.

$$\eta = \frac{P_{\text{ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ}}}{P_{\text{ΟΠΤΙΚΗ}}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{HA} = \frac{I_{\text{MAX}}V_{\text{MAX}}}{HA} = \frac{FFI_{\text{SC}}V_{\text{OC}}}{HA} \quad (2.8.6)$$

Όπου

- $H$  η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας
- $A$  το εμβαδόν του φωτοβολταϊκού κελιού

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, εμβαδού  $A$ , ορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας.

## 2.8 Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση των πλαισίων στις ΦΒ εγκαταστάσεις

Παρόλη την εντυπωσιακή πρόοδο που έχει σημειωθεί όσον αφορά στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, η περιορισμένη απόδοσή τους, που προέρχεται από την αδυναμία εκμετάλλευσης ολόκληρου του ηλιακού φάσματος, εγείρει ερωτήματα σχετικά με την ανταγωνιστικότητά τους απέναντι στην παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Ειδικότερα, μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα που απελευθερώνεται στο περιβάλλον, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης του συστήματος. Ακόμα και σε φωτοβολταϊκά συστήματα 3<sup>ης</sup> γενιάς, όπως οι περοβσκίτες (PSCs) όπου έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στο πεδίο της σχεδίασης, της διεπαφής και της αρχιτεκτονικής συστήματος, είναι απαραίτητη η διατήρηση του φωτοβολταϊκού κάτω από ένα ορισμένο θερμοκρασιακό κατώφλι προκειμένου να εξασφαλισθεί μακροχρόνια λειτουργία και αποφυγή πρόωρης γήρανσης του υλικού [12].

### 2.8.1 Αρχική βαθμονόμηση STC

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια βαθμονομούνται ως προς την παραγωγή ισχύος κορυφής ( $W_p$ ) με βάση τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Επί παραδείγματι, ένα πλαίσιο το οποίο δοκιμάστηκε σε συνθήκες Standard Test Conditions (STC) και πιστοποιήθηκε ότι

παράγει ισχύ 100 W, θα χαρακτηριστεί ως ηλιακό ΦΒ πλαίσιο παροχής ισχύος 100 W<sub>p</sub> DC σε συνθήκες έκθεσης ακτινοβολίας STC. Κάθε μεταβολή των συνθηκών έκθεσης θα επηρεάσει το ποσό της παραγόμενης ισχύος του πλαισίου. Παρακάτω ακολουθούν οι κυριότεροι παράγοντες που μειώνουν την παραγόμενη ισχύ κορυφής των ΦΒ πλαισίων.

### 2.8.2 Ο θερμοκρασιακός παράγοντας

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κελιών αυξάνεται από την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Ως εκ τούτου, μειώνεται και η παραγωγή ισχύος κορυφής από τα πλαίσια. Για τις συνθήκες ηλιοφάνειας που επικρατούν στην Ελλάδα, τα περισσότερα φωτοβολταϊκά κελιά του εμπορίου μειώνουν την παραγωγή ισχύος εξόδου τους κατά 12%. Με βάση το προηγούμενο παράδειγμα, για το πλαίσιο που έχει βαθμονομηθεί με 100 W<sub>p</sub> DC STC, η μείωση αυτή μεταφράζεται σε παραγωγή ισχύος εξόδου 88 W DC.

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση της παρεχόμενης ισχύος μπορεί να περιορισθεί όταν τα φωτοβολταϊκά κελιά ψύχονται.

### 2.8.3 Ρύπανση σωματιδιακής προέλευσης

Όπως είναι επόμενο, στην εκτεθειμένη στο περιβάλλον άνω όψη των φωτοβολταϊκών πλαισίων επικάθονται σωματιδιακοί ρυπαντές ή σκόνη, γεγονός που οδηγεί στο να μειώνεται η τελική ακτινοβολία που εισχωρεί στα φωτοβολταϊκά κελιά του πλαισίου, σε ποσοστά μεταξύ 5% με 15%. Ο μηχανισμός αυτός ενισχύεται από τη νυχτερινή υγρασία που έχει ως αποτέλεσμα την προσκόλληση των ρυπαντών στην επιφάνεια και κατά συνέπεια τη συμβολή τους στην ανάκλαση ή την απορρόφηση της πρισιπίπτουσας ακτινοβολίας. Στη διεθνή βιβλιογραφία το φαινόμενο αυτό περιγράφεται ως «soiling» [12]. Η οριζόντια τοποθέτηση των πλαισίων επιφέρει μεγαλύτερα ποσοστά απωλειών οφειλόμενων στις επικαθίσεις (13-15%). Αντιθέτως, η κατακόρυφη ή με μεγάλη κλίση (π.χ. 40°) τοποθέτησή τους παρέχει καλύτερη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού τους (π.χ. από τη βροχή). Συγχρόνως, οι αγροτικές ασχολίες σε παρακείμενες εκτάσεις συνιστούν επιβαρυντικό παράγοντα για την απόδοση λόγω της γύρης ή επικαθίσεων από το όργωμα, με αποτέλεσμα η μείωσή της να ανέρχεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 15%. Από την άλλη πλευρά, η μέση τυπική ρύπανση των επιφανειών των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε αστικό περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί ότι συντελεί σε μείωση της αποδιδόμενης ισχύος της τάξης του 7%.



Σχήμα 2-31: Το φαινόμενο του soiling σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [12].

#### 2.8.4 Ηλεκτρικές απώλειες

Οι ηλεκτρικές απώλειες της εγκατάστασης μπορούν να αποδοθούν σε δυο βασικούς παράγοντες:

- Στις ωμικές απώλειες των καλωδιώσεων και των συνδέσμων της εγκατάστασης. Προκειμένου να περιορισθούν στο ελάχιστο οι απώλειες Joule, χρησιμοποιούνται αυξημένης διατομής DC καλώδια για τις συνδέσεις. Μάλιστα, στους υπολογισμούς για τη διαστασιολόγηση, προσμετράται ο συντελεστής προσαύξησης του ονομαστικού ρεύματος 25% και ο συντελεστής προσαύξησης ονομαστικής τάσης 15%. Επίσης, συνεκτιμάται ο συνολικός αριθμός παράλληλων συστοιχιών, ενώ θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι οι μεταλλικές επιφάνειες των συνδέσμων DC τύπου Tyco ή Multi Contact (MC) δεν έχουν υποστεί ηλεκτροδιάβρωση, ως αποτέλεσμα εσφαλμένης μεθοδολογίας εγκατάστασης (με αποτέλεσμα τη στιγμιαία εκδήλωση τόξου DC).
- Σε διαφοροποιήσεις ηλεκτρικών μεγεθών μεταξύ των παράλληλων φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Καθώς δεν είναι όλα τα πλαίσια όμοια μεταξύ τους, υπάρχει το ενδεχόμενο η παραγόμενη ισχύς κάθε συστοιχίας να διαφέρει. Ως εκ τούτου, η συστοιχία με τη μικρότερη παραγωγή καθορίζει τη μείωση της παρεχόμενης ισχύος και των υπόλοιπων συστοιχιών που συνδέονται παράλληλα. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου αξιοποιούνται τα δεδομένα των flash reports καθώς και η

ταξινόμηση των πλαισίων γίνεται ανά παράλληλη ομάδα συστοιχιών σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή. Η μείωση της ισχύος εξόδου λόγω ηλεκτρικών απωλειών ανέρχεται σε ποσοστά της τάξης του 3-7%.

#### 2.8.5 Σταθερή γωνία τοποθέτησης των ΦΒ πλαισίων

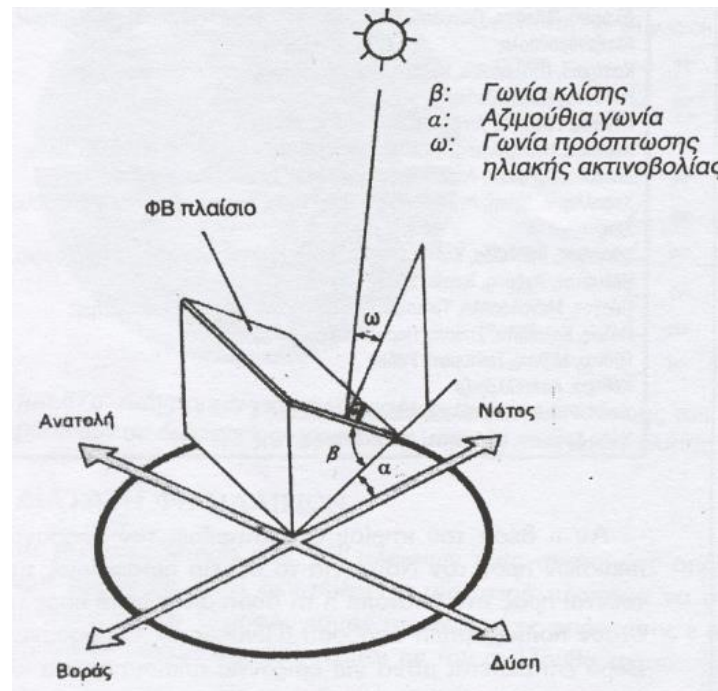
Η γωνία τοποθέτησης – κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ως προς το οριζόντιο έδαφος-επιηρεάζει την παραγόμενη ισχύ τους. Η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος επιτυγχάνεται όταν η ακτίνα πρόσπτωσης του φωτός είναι σχεδόν κάθετη με την επιφάνεια του πλαισίου.

Η ηλιακή γωνία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, διότι ο ήλιος βρίσκεται υψηλότερα στον ουρανό το καλοκαίρι και χαμηλότερα το χειμώνα. Κατά συνέπεια, μεταβάλλεται και η φωτεινή ισχύς που δέχεται ένα πλαίσιο εγκατεστημένο υπό σταθερή κλίση. Εν άλλους λόγους ένα πλαίσιο υπό σταθερή γωνία κλίσης, θα παράγει διαφορετικές τιμές ισχύος ανάλογα με την εποχή του έτους, ακόμα και όταν η φωτεινή ισχύς της άμεσης δέσμης (όπως αυτή μετράται επί της καθέτου επιφάνειας στη διεύθυνση της δέσμης) παραμένει σταθερή.

Στην περίπτωση πλαισίων εγκατεστημένων σε κινητά συστήματα με δυνατότητα ιχνηλάτησης της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας (trackers), παρατηρείται ότι η προσπίπτουσα φωτεινή ισχύς είναι κατά 10% μεγαλύτερη το χειμώνα και έως και 40% μεγαλύτερη κατά τους θερινούς μήνες. Μια άλλη μέθοδος εγκατάστασης είναι αυτή στην οποία επιλέγονται δυο διαφορετικές, σταθερές γωνίες κλίσης, μια για το χειμώνα και μια για το καλοκαίρι.

Για σταθερή γωνία εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πλαισίων καθ' όλο το έτος, μια ενδεικτική γωνία κλίσης είναι οι  $30^\circ$  για περιοχές με γεωγραφικό πλάτος  $30 - 40^\circ$ . Δεδομένου ότι η συνήθης κλίση μια κεραμοσκεπούς στέγης είναι  $15^\circ$ , προκύπτει ότι τα πλαίσια που εγκαθίστανται σε επικλινείς στέγες νότιου προσανατολισμού θα αποκλίνουν κατά  $15^\circ$  περίπου από την επιθυμητή βέλτιστη τιμή μιας σταθερής γωνίας κλίσης. Η παραπάνω απόκλιση των  $15^\circ$  εισάγει περαιτέρω μείωση στην παραγόμενη ισχύ της τάξης του 3%.

Για συγκριτικούς σκοπούς αναφέρεται ότι αν το ίδιο πλαίσιο είχε τοποθετηθεί σε οριζόντιο προσανατολισμό στέγης, το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης θα ήταν 11%, ενώ αν είχε τοποθετηθεί κατακόρυφα σε πρόσοψη νοτίου προσανατολισμού θα ανερχόταν στο 44%. Συμπερασματικά, η κάθετη τοποθέτηση πλαισίου οδηγεί σε αυξημένες απώλειες ισχύος και συνεπώς δεν προτείνεται.



Σχήμα 2-32: Βέλτιστη θέση ηλιακού συλλέκτη ως προς τον Ήλιο [3].

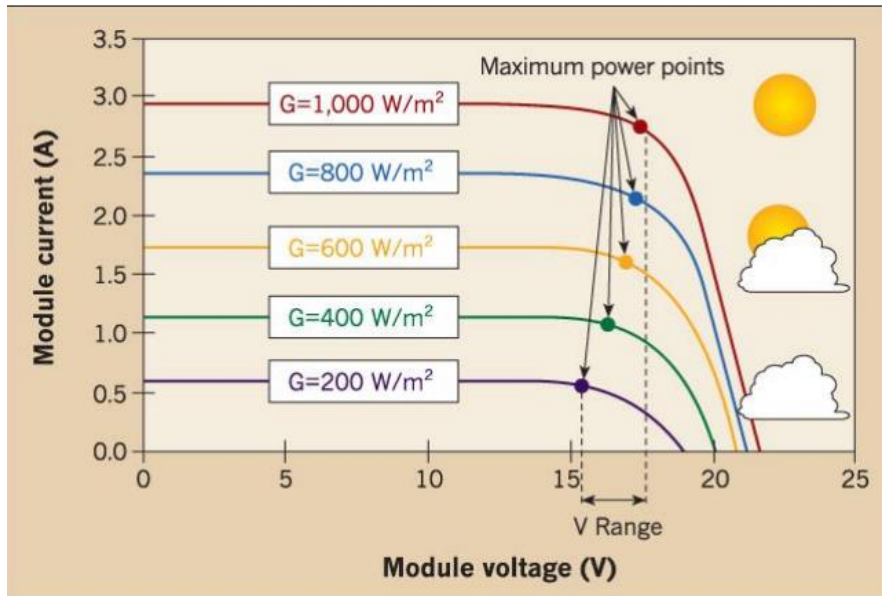
### 2.8.6 Νότιος προσανατολισμός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η φωτεινή ισχύς που δέχεται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και κατ' επέκταση και η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει, εξαρτάται και από τον προσανατολισμό του στον ορίζοντα. Μάλιστα, για το Βόρειο ημισφαίριο, ο βέλτιστος προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη είναι ο νότιος και αντιστρόφως για το Νότιο ημισφαίριο. Όταν το πλαίσιο είναι προσανατολισμένο δυτικά ή ανατολικά, εκτείθεται σε λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία καθώς ο ήλιος μετατοπίζεται στη διάρκεια της ημέρας.

Όταν, λοιπόν, ένα ΦΒ πλαίσιο είναι εγκατεστημένο προς το Νότο, δεν υπάρχουν απώλειες ως προς την παραγόμενη ισχύ. Ωστόσο, όταν ο προσανατολισμός του είναι Νότιος – Νοτιοδυτικός (NND) ή Νότιος- Νοτιοανατολικός (NNA) με σταθερή γωνία κλίσης 30 °, η



ισχύς εξόδου του μειώνεται μόλις κατά 1%. Στην περίπτωση Ανατολικός – Νοτιοανατολικός (ANA) ή Δυτικός – Νοτιοδυτικός (ΔΝΔ) το αντίστοιχο ποσοστό ανέρχεται στο 9%.



Σχήμα 2-33: Σχέση απόδοσης φωτοβολταϊκού με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία [17].

### 2.8.7 Οι απώλειες της μετατροπής από DC σε AC

Οι απώλειες αυτής της φύσης, συνήθως εκδηλώνονται υπό μορφή θερμότητας στον αντιστροφέα και ανέρχονται σε ποσοστό 6 – 10%.

Διευκρινίζεται ότι η ενδεχόμενη αποθήκευση της DC ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές επιφέρει περαιτέρω μείωση της ισχύος εξόδου κατά 10%



## 3 Θερμοηλεκτρικά Στοιχεία

### 3.1 Εισαγωγή

Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η απευθείας μετατροπή της διαφοράς θερμοκρασίας σε ηλεκτρική τάση και αντίστροφα. Ενώ πρόκειται για παλιά τεχνολογία, έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια να κερδίζει έδαφος στη βιομηχανία, έπειτα και από τη βελτίωση των υλικών.

### 3.2 Ιστορική αναδρομή

Η ανακάλυψη του θερμοηλεκτρικού φαινομένου έγινε από τον Thomas Johann Seebeck το 1822. Συγκεκριμένα παρατήρησε ότι όταν στο σημείο ένωσης δυο διαφορετικών μετάλλων ενός ηλεκτρικού κυκλώματος που υπήρχε διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους, γινόταν εκτροπή μιας μαγνητικής βελόνας πυξίδας. Αυτό το γεγονός οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι αγωγοί διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα όταν στα άκρα τους υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας.

Πρακτικά τα ηλεκτρόνια από τη θερμή περιοχή του μετάλλου έχουν περισσότερη ενέργεια, άρα και μεγαλύτερες ταχύτητες, συγκριτικά με αυτά στην ψυχρή. Συνεπώς θα παρατηρηθεί διάχυση ηλεκτρονίων από τη θερμή περιοχή στην ψυχρή και άρα θα γίνει συσσώρευση ηλεκτρονίων στην ψυχρή περιοχή και οπών στην θερμή. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δυναμικού το οποίο τελικά θα πάρει τιμή ικανή να εμποδίσει οποιαδήποτε περεταίρω μετατόπιση ηλεκτρονίων

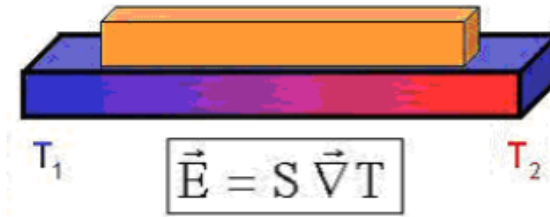
### 3.3 Φαινόμενο Seebeck

Στο φαινόμενο Seebeck, αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού η οποία εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δυο επαφών. Επιπλέον εντοπίζεται εξάρτηση και από τα υλικά των επαφών. Η τάση που αναπτύσσεται υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.8.7)$$

Όπου:

- $S_A$  και  $S_B$  οι συντελεστές Seebeck των μετάλλων A και B με μονάδα μέτρησης  $V/K$ ,
- $T_1$  και  $T_2$  οι θερμοκρασίες των δυο επαφών A και B αντίστοιχα σε K



Σχήμα 3-1: Φαινόμενο Seebeck [13].

Οι συντελεστές είναι μη γραμμικοί και εξαρτώνται από την απόλυτη θερμοκρασία, τη μοριακή δομή και το υλικό των αγωγών.

### 3.4 Φαινόμενο Peltier

Το φαινόμενο Peltier είναι το δεικνύς αντίστροφο του φαινομένου Seebeck, δηλαδή η δημιουργία διαφοράς θερμοκρασίας έπειτα από την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης. Το φαινόμενο Peltier παρατηρείται όταν δυο διαφορετικοί αγωγοί ενώνονται σε μια επαφή. Επειδή οι στάθμες Fermi των δυο υλικών είναι συνήθως διαφορετικές, μερικά ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από την επαφή μέχρι να παραχθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο σαφώς μεγάλο ώστε να εμποδίζει την περαιτέρω ροή ηλεκτρονίων κατά μήκος της επαφής. Το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται κατά μήκος της επαφής Peltier εξαρτάται τόσο από το είδος των μετάλλων, όσο και από τη θερμοκρασία της επαφής. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (φορτίο ή θερμικό ρεύμα) δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) I \quad (2.8.8)$$

Όπου  $\Pi_{AB}$  η σταθερά Peltier του κυκλώματος και  $\Pi_A, \Pi_B$  οι σταθερές Peltier του κάθε υλικού. Η παραπάνω σχέση εκφράζει το ισοζύγιο θερμότητας από και προς τη διεπιφάνεια A-B των αγωγών.



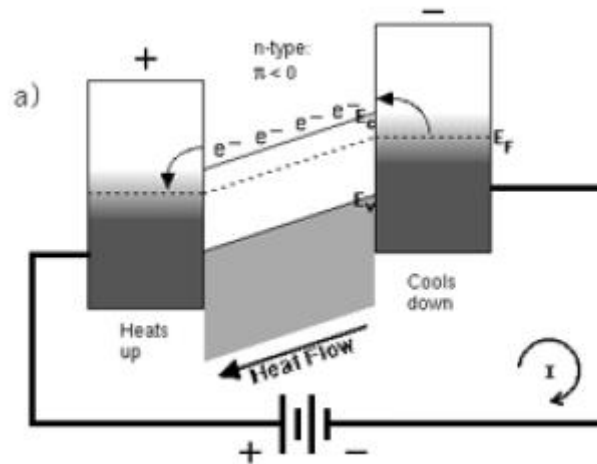
---


$$\Pi_{12} I \equiv \text{ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΗ ΕΤΕΡΟΕΠΑΦΗΣ}$$


---

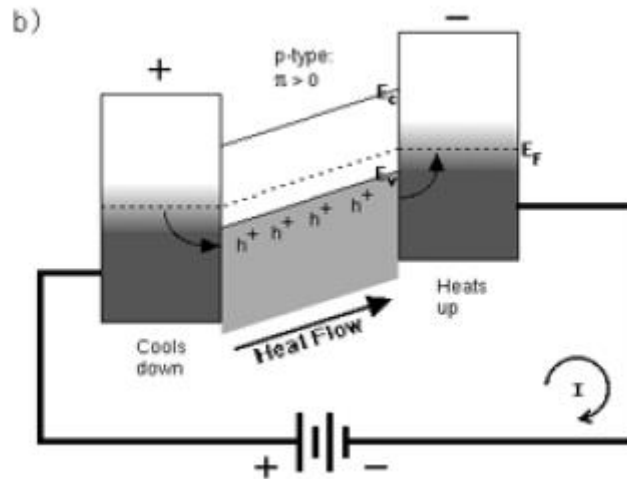
Σχήμα 3-2: Φαινόμενο Peltier [13].

- a. Στην περίπτωση που η σταθερά  $\Pi < 0$ , η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του θερμικού φορτίου και υπάρχει μετάπτωση ηλεκτρονίων από την υψηλή ενεργειακή στάθμη προς στην χαμηλή για ημιαγωγούς τύπου n



Σχήμα 3-3: Αντίθετη κίνηση ηλεκτρικού - θερμικού φορτίου για  $\Pi < 0$  [13].

- b. Στην περίπτωση που η σταθερά  $\Pi > 0$ , η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι προς την ίδια κατεύθυνση με αυτήν του θερμικού φορτίου και υπάρχει μετακίνηση οπών από την χαμηλή ενεργειακή στάθμη προς την υψηλή για ημιαγωγούς τύπου p.



Σχήμα 3-4: Ίδια φοράς κίνηση ηλεκτρικού - θερμικού φορτίου για  $\Pi > 0$  [13].

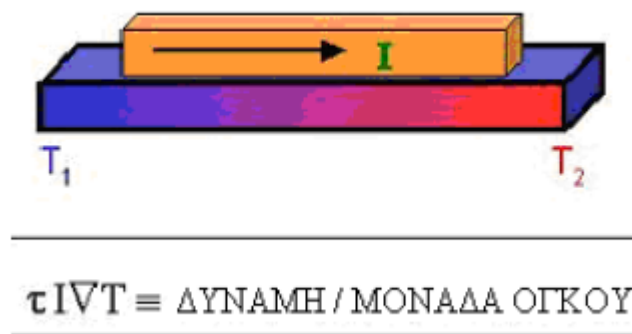
### 3.5 Φαινόμενο Thomson

Το φαινόμενο Thomson σχετίζεται με την έκλυση ή την απορρόφηση θερμικής ενέργειας από ένα υλικό όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα. Ο Thomson προσπάθησε να επιλύσει τις διαφορές ανάμεσα στις τάσεις Seebeck ενός θερμοηλεκτρικού κυκλώματος τις οποίες μέτρησε και τις τάσεις τις οποίες ανέμενε να ανιχνεύσει σε ένα αντιστρέψιμο σύστημα που υπάκουε στους νόμους της θερμοδυναμικής. Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο Thomson είναι:

$$\frac{dQ}{dt} = \tau \cdot \Delta T \quad (2.8.9)$$

Όπου  $\tau$  ο συντελεστής Thomson .

Στο σημείο αυτό, χρειάζεται να αποσαφηνιστεί το ότι η έκλυση θερμότητας από ένα υλικό όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα που μελέτησε ο Thomson, δεν έχει σχέση με τη θερμότητα που αναπτύσσεται σε έναν αγωγό αντίστασης  $R$  όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα για κάποιο χρονικό διάστημα και η οποία αποβάλλεται από αυτόν σύμφωνα με το φαινόμενο Joule ( $Q = I^2 R t$ ).



Σχήμα 3-5: Φαινόμενο Thomson [13].

### 3.6 Θερμοηλεκτρικά στοιχεία

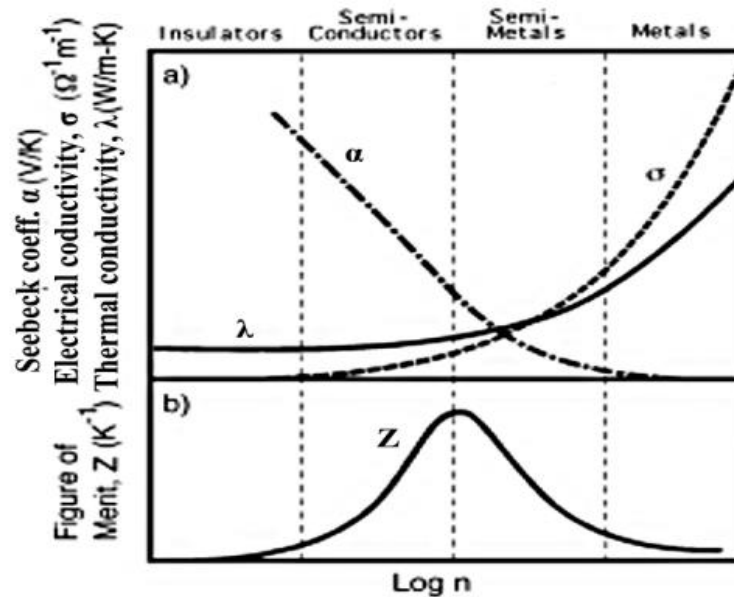
Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία, ή αλλιώς θερμοστοιχεία, είναι τα στοιχεία που δομούν τις θερμοηλεκτρικές συσκευές. Κατασκευαστικά αποτελούνται από μια διμεταλλική επαφή ή επαφή μετάλλου – ημιαγωγού και επένδυση κεραμικού υλικού (συνήθως Alumina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Για την κατασκευή αποδοτικών τέτοιων συσκευών είναι απαραίτητο τα χρησιμοποιούμενα υλικά με μεγάλες τιμές συντελεστή Seebeck. Τα μέταλλα έχουν τιμές της τάξης μερικών  $\mu\text{V}/\text{K}$ , που είναι πολύ χαμηλές για πρακτικές εφαρμογές. Αντιθέτως, οι ημιαγωγοί τείνουν να έχουν συντελεστές Seebeck της τάξης των εκατοντάδων  $\mu\text{V}/\text{K}$ , γεγονός που τους καθιστά περισσότερο κατάλληλους. Επιπλέον παράγοντες που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα μια εφαρμογής θερμοστοιχείων είναι η ηλεκτρική και η θερμική αγωγιμότητα. Συγκεκριμένα μεγάλη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας περιορίζει το φαινόμενο Joule, ενώ η χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας συμβάλλει στη διατήρηση της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στις δυο επιφάνειες.

Οι προαναφερθέντες παράγοντες συνοψίζονται στον τύπο του συντελεστή απόδοσης ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου.

$$ZT = \frac{(\Delta T)_{max}}{T} = \frac{\sigma S^2}{k} T \quad (2.8.10)$$

Όπου:

- $(\Delta T)_{\max}$  είναι η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που μπορεί να επιτευχθεί στις δυο επαφές ενός θερμοστοιχείου,
- $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,
- $\sigma$  η ειδική αγωγιμότητα,
- $S$  ο συντελεστής Seebeck και
- $k$  ο συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας κάθε υλικού.



Σχήμα 3-6: α) Θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών συναρτήσει της συγκέντρωσης των φορέων τους  $n$  β) Γραφική παράσταση συντελεστή απόδοσης θερμοηλεκτρικού (figure of merit) [13].

Το βέλτιστο συντελεστή απόδοσης  $ZT$  εμφανίζουν οι υψηλού βαθμού πρόσμιξης ημιαγωγοί. Ως εκ τούτου και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία Βισμούθιου – Τελλουρίου ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ).

Η βελτιστοποίηση του  $ZT$  αποτελεί αντικείμενο επιστημονικής μελέτης διότι η θερμική ισχύς, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμική αγωγιμότητα εξαρτώνται από την ηλεκτρονική δομή του κάθε υλικού. Συνεπώς, είναι αδύνατο να μεταβληθεί μια παράμετρος χωρίς να επηρεαστούν οι άλλες.





Σχήμα 3-7: Τομή θερμοηλεκτρικού στοιχείου Peltier [13].

### 3.6.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των θερμοστοιχείων

Τα θερμοστοιχεία πλεονεκτούν στα εξής σημεία:

- Είναι στοιχεία στερεάς κατάστασης (solid-state)
- Δε διαθέτουν κινούμενα μέρη
- Έχουν μεγάλο χρόνο ζωής (100.000-200.000 ώρες λειτουργίας)
- Το κόστος συντήρησής τους είναι μικρό
- Βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών
- Έχουν μηδενική ρύπανση
- Η λειτουργία τους είναι αθόρυβη

Το βασικό μειονέκτημα των θερμοηλεκτρικών στοιχείων είναι η μικρή τους απόδοση. Βέβαια, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών και την εφαρμογή νέων κραμάτων και μεθόδων στις θερμοηλεκτρικές διατάξεις γίνεται προσπάθεια να βελτιωθεί.

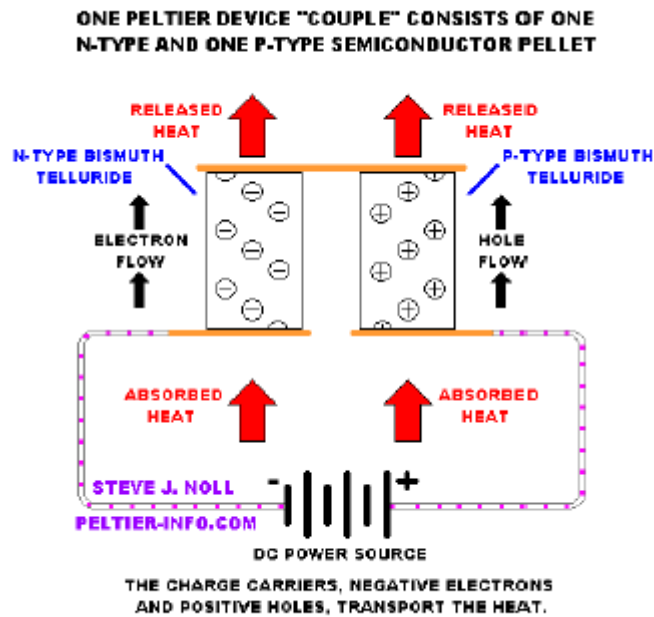
Η αρχή λειτουργίας των θερμοστοιχείων βασίζεται στα τρία θερμοηλεκτρικά φαινόμενα που συναντήσαμε παραπάνω. Το φαινόμενο Peltier, βάσει του οποίου το θερμοστοιχείο λειτουργεί σαν μία αντλία που μεταφέρει θερμότητα από τη μία πλάκα στην άλλη όταν διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα από αυτό, βρίσκει εφαρμογή σε εφαρμογές ψύξης – θέρμανσης.

Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται θερμοηλεκτρικές ψυκτικές διατάξεις ή αλλιώς αντλίες θερμότητας, Thermoelectric Coolers (TECs).

Βάσει του φαινομένου Seebeck το θερμοστοιχείο λειτουργεί αντίστροφα. Οπότε φέρνοντας σε επαφή τη μία πλάκα του με μία θερμή δεξαμενή ενώ την άλλη με μία ψυχρή, επιτυγχάνει κατά την αγωγή θερμότητας από τη μία πλευρά του στην άλλη, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τάσης και συνεπώς ρεύματος σε ένα κύκλωμα. Οι διατάξεις που εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Seebeck για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι γνωστές ως Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες ή Thermoelectric Generators (TEGs). Τέλος, σύμφωνα με το φαινόμενο Thomson όταν ένας αγωγός που παρουσιάζει θερμική ανισοτροπία διαρρέεται από ρεύμα τότε ανάλογα με τη φορά του ρεύματος ο αγωγός αυτός είτε θα απορροφήσει είτε θα προσδώσει θερμότητα στο περιβάλλον. Παρόλο, όμως, που το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται και στους δύο τρόπους λειτουργίας του θερμοστοιχείου, είναι αμελητέο σε σχέση με τα άλλα δύο. Με τη χρήση των θερμοστοιχείων, σχεδόν κάθε πηγή θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η έλλειψη μάλιστα κινούμενων μερών, σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος και βάρος των θερμοστοιχείων τα κάνει ιδανικά για εξειδικευμένες εφαρμογές.

### 3.6.2 Αντλία θερμότητας TEC

Η αντλία θερμότητας (TEC) είναι μια διάταξη στερεάς κατάστασης που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο Peltier και δουλεύει για την απομάκρυνση της θερμότητας από ένα σύστημα. Όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει ένα TEC, η θερμότητα αντλείται από την μια επαφή του στην άλλη. Η θερμοκρασία της ψυχρής επαφής θα πέσει ραγδαία κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος συντηρώντας τη θερμότητα που μετακινείται από τη θερμή πλευρά. Η βαθμίδα θερμοκρασίας θα μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου ρεύματος.



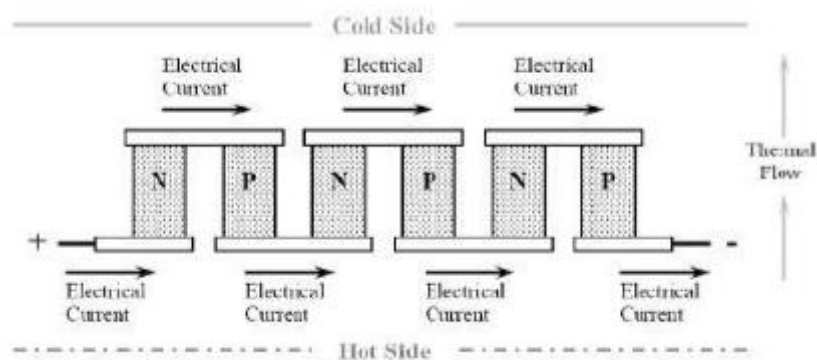
Σχήμα 3-8: Συστοιχία TEC για ψύξη [13].

Στο Σχήμα 3-8 τα θετικά φορτία (οπές) του p-τύπου υλικού κινούνται από την επαφή A προς την επαφή B. Αντίστοιχα, τα αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια) του n-τύπου υλικού κινούνται και αυτά από την επαφή A προς την επαφή B. Λόγω της χρήσης δυο διαφορετικών τύπων υλικών, η θερμότητα έχει την ίδια κατεύθυνση μέσα από αυτά (συντελεστής Peltier  $P > 0$ ). Ένα μείζονος σημασίας χαρακτηριστικό που έχει η διάταξη αυτή είναι ότι τα συζυγή ζεύγη θα πρέπει να έχουν παραπλήσιες ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα ζεύγη πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ημιαγωγό με διαφορετικές προσμείξεις. Στις διατάξεις Peltier που κυκλοφορούν στην αγορά, το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  το οποίο παρασκευάζεται και ως p και ως n τύπου ανάλογα με το ποσοστό Te πριν την ανάπτυξη του κρυστάλλου (π.χ. με τη διαδικασία της παρένθεσης). Γενικά τα υλικά που ανήκουν στην οικογένεια  $\text{M}_2\text{X}_3$ , όπου M: Bi ή Sb και X: Te ή Se είναι κατάλληλα υλικά για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές. Σε πραγματικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται συστοιχίες n και p υλικών, στηριζόμενα στην προηγούμενη διάταξη, αυξάνοντας έτσι με τον τρόπο αυτό την απόδοση του στοιχείου Peltier. Τέτοιου είδους συσκευές έχουν την ικανότητα μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων θερμότητας όταν έχουν συνδεθεί με κοινές πηγές συνεχούς ρεύματος. Οι περισσότερες από αυτές αποτελούνται από 254 στοιχεία n και p τύπου που εναλλάσσονται διαδοχικά και μπορούν να λειτουργήσουν από 12 ως 16V.

Οι συσκευές Peltier μπορούν να παράξουν θερμοκρασιακές διαφορές μέχρι και 65°C. Χρησιμοποιούνται επίσης για τοπική ψύξη, όπου μόνο ένα μικρό τμήμα του συστήματος πρέπει να ψυχθεί. Οι θερμοηλεκτρικές αυτές διατάξεις είναι τέλος χρήσιμες ως ενεργές συσκευές ελέγχου θερμοκρασίας. Μια απλή διαδικασία ανατροφοδότησης χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει το TEC σε ένα σύστημα όπου απαιτείται μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, καθώς η θερμοκρασία στη μια πλευρά της συσκευής είναι ευθέως ανάλογη προς το φορτίο εισόδου. Η ψυχρή πλευρά της συσκευής μπορεί είτε να ψυχθεί είτε να ζεσταθεί στην κατάλληλη θερμοκρασία, εξαρτώμενη πάντα από την πολικότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Όσο η θερμοκρασία παραμένει μέσα στα όρια των προδιαγραφών της συσκευής και γίνεται χρήση ενός κατάλληλου απαγωγού θερμότητας ή πηγής θερμότητας στη μια πλευρά, η θερμοκρασία ελέγχεται με αρκετή ακρίβεια.

### 3.6.3 Θερμοηλεκτρική γεννήτρια TEG

Η απλούστερη θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) προϋποθέτει ένα ζεύγος, το οποίο περιλαμβάνει ένα p-τύπου και ένα n-τύπου θερμοστοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα. Μέρος της θερμότητας αντλείται στη μια πλευρά του ζεύγους και αποβάλλεται από την άλλη. Έτσι παράγεται ένα ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μπορεί να μετρηθεί, ανάλογο της βαθμίδας θερμοκρασίας (ή αλλιώς ανάλογο της θερμικής ροής) μεταξύ των θερμών και ψυχρών επαφών.



Σχήμα 3-9: Συστοιχία TEG για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [13].

## 4 Μέθοδοι ψύξης φωτοβολταϊκών – βιβλιογραφική ανασκόπηση

Όπως είναι προφανές, για να βελτιωθεί και να διασφαλιστεί για το χρόνο ζωής του συστήματος η απόδοσή του, κρίνεται απαραίτητη η ψύξη αυτού. Προς αυτό το σκοπό αναπτύχθηκαν τα Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Hybrid Photovoltaic/Thermal PV/T). Πρόκειται για συσκευές που συνδυάζουν φωτοβολταϊκά κελιά με κατάλληλες συσκευές απαγωγής θερμότητας για ψύξη και θεωρούνται σήμερα η πιο κατάλληλη λύση. Τα συστήματα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του επιπέδου παραγωγής ενέργειας καθώς υπάρχει και η δυνατότητα παράλληλης αξιοποίησης της απαγόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει καθώς η ψύξη αυξάνει τις δυνατότητες μετατροπής ενέργειας των κελιών, ενώ συγχρόνως, η απαγόμενη θερμότητα μπορεί να αξιοποιηθεί ζεσταίνοντας νερό ή αέρα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι επικρατέστερες μέθοδοι ψύξης φωτοβολταϊκών σήμερα.

### *4.1 Σημασία του παράγοντα της ψύξης για την απόδοση του φωτοβολταϊκού*

Η θερμοκρασία ενός φωτοβολταϊκού κελιού αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία του. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αύξηση της θερμοκρασίας του οδηγεί σε μείωση της απόδοσής του. Όσο η θερμοκρασία αποκλίνει από την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του, η παραγωγή ενέργειας μειώνεται, αφού μεγάλα ποσά ενέργειας μετατρέπονται σε θερμότητα και εκλύονται στο περιβάλλον. Για τη διατήρηση της θερμοκρασίας των πλαισίων σε επιθυμητά επίπεδα είναι απαραίτητη η ψύξη των φωτοβολταϊκών.

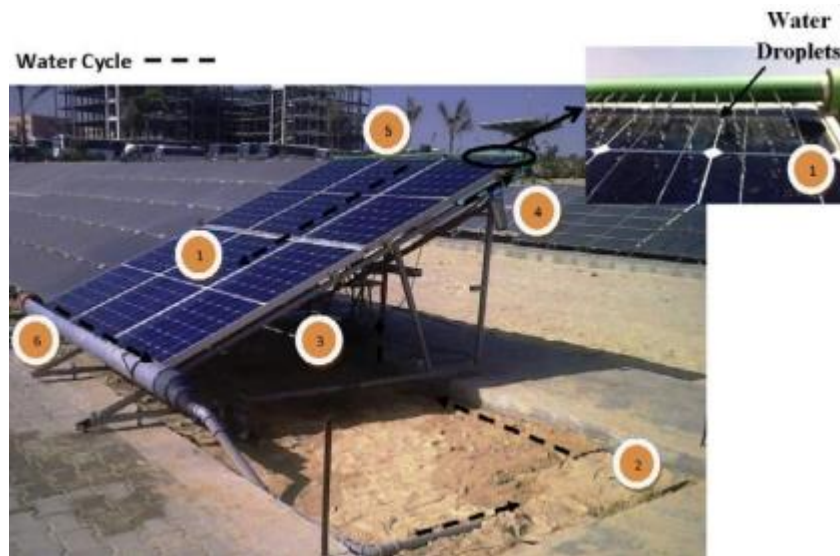
## 4.2 Ενεργητική και παθητική ψύξη

Εν γένει η ψύξη ενός σώματος μπορεί να γίνει με παθητικό ή με ενεργητικό τρόπο. Κατά την παθητική ψύξη δε δαπανάται ενέργεια για να ψυχθεί το ζητούμενο σώμα, αλλά αξιοποιούνται οι ιδιότητες των υλικών. Ένα κλασικό παράδειγμα παθητικής ψύξης είναι η χρήση ψυκτρών. Αντιθέτως, στην ενεργητική ψύξη γίνεται δαπάνη ενέργειας. Επί παραδείγματι, η ψύξη με τη χρήση οποιασδήποτε συσκευής που καταναλώνει ενέργεια θεωρείται ενεργητική

## 4.3 Ψύξη Φωτοβολταϊκού με νερό

Η ψύξη φωτοβολταϊκού με χρήση νερού έχει διερευνηθεί αρκετά και εφαρμόζεται σε πλήθος συστημάτων. Μάλιστα έχουν, κατά καιρούς, υλοποιηθεί διάφορες παραλλαγές αυτής της μεθόδου. Οι πιο σημαντικές είναι:

- Ψεκάσμος νερού μέσω μπεκ που είναι τοποθετημένα στην πάνω επιφάνεια του πλαισίου. Η εν λόγω τεχνική επιφέρει μείωση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού με ρυθμό 2°C/min. Η τεχνική αυτή μειονεκτεί σε δυο σημεία. Πρώτον, το νερό που ψεκάζεται πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού μπορεί να παρασυρθεί από τον αέρα και δεύτερον, το στρώμα νερού επί της επιφάνειας ενισχύει την ανάκλαση των ακτινών της φωτεινής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να μειώνεται η απορρόφησή της. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ταυτόχρονος καθαρισμός του πλαισίου από επικαθίσεις.



**Σχήμα 4-1:** Φωτοβολταϊκό πάνελ με εγκατεστημένο σύστημα ψεκασμού νερού για την ψύξη του. Στην εικόνα φαίνονται τα μπεκ στην κορυφή του πάνελ από όπου γίνεται ο ψεκασμός, καθώς και η περιοχή αποστράγγισής του και οι σωληνώσεις [13].

- Χρήση εναλλάκτη θερμότητας μέσα στον οποίο κυκλοφορεί νερό και είναι εγκατεστημένος στο πίσω μέρος του πάνελ. Το νερό κυκλοφορεί εντός σπιράλ σωληνώσεων που προσαρμόζονται στο πίσω μέρος του πλαισίου. Τέτοιου είδους συστήματα επιτυγχάνουν αύξηση της απόδοσης κατά 9%.
- Βύθιση φωτοβολταϊκού σε νερό. Σε αυτή την περίπτωση, επιτυγχάνεται διατήρηση σταθερής τιμής θερμοκρασίας λειτουργίας στους 30 βαθμούς, αλλά η απόδοση ελαττώνεται, σε μεγαλύτερο βαθμό όσο το βάθος βύθισης αυξάνεται.

#### **4.4 Ψύξη φωτοβολταϊκού με αέρα**

Η ψύξη φωτοβολταϊκού με αέρα υπάγεται στην κατηγορία ψύξης μέσω ενσωματωμένης θερμικής μονάδας μέσα στην οποία ένα κυκλοφορούν ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας από του φωτοβολταϊκού θερμαίνεται, ψύχοντάς την. Εν προκειμένω, το ρευστό αυτό είναι ο αέρας. Η απαγωγή θερμότητας με κυκλοφορία αέρα είναι η απλούστερη και φθηνότερη λύση, ταυτόχρονα, όμως, και η λιγότερο αποδοτική.

## **4.5 Ψύξη φωτοβολταϊκού με Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) – Phase Change Materials (PCM)**

Τα τελευταία χρόνια, τα Υλικά Αλλαγής Φάσης χρησιμοποιούνται εκτενώς για τη ρύθμιση θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών [18]. Τα χαρακτηριστικά τους που ευνοούν στη διάδοσή τους είναι η υψηλή χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας και η δυνατότητα λειτουργίας κάτω από σταθερή θερμοκρασία. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ στα φωτοβολταϊκά έχει ερευνηθεί θεωρητικά και πειραματικά από πλήθος επιστημόνων. Η παραφίνη θεωρείται το πλέον κατάλληλο ΥΑΦ διότι είναι διαθέσιμη για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και επιπλέον έχει πολύ καλή συμπεριφορά στις αλλαγές θερμοκρασίας, χωρίς να παγώνει όταν ψύχεται. Μάλιστα έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η χρήση παραφίνης οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού σε σχέση με τη λειτουργία του χωρίς ψυκτικό μέσο κατά 4.3–8.7 % [19].

## **4.6 Ψύξη Φωτοβολταϊκού με τη χρήση θερμοηλεκτρικών – υβριδικά φωτοβολταϊκά**

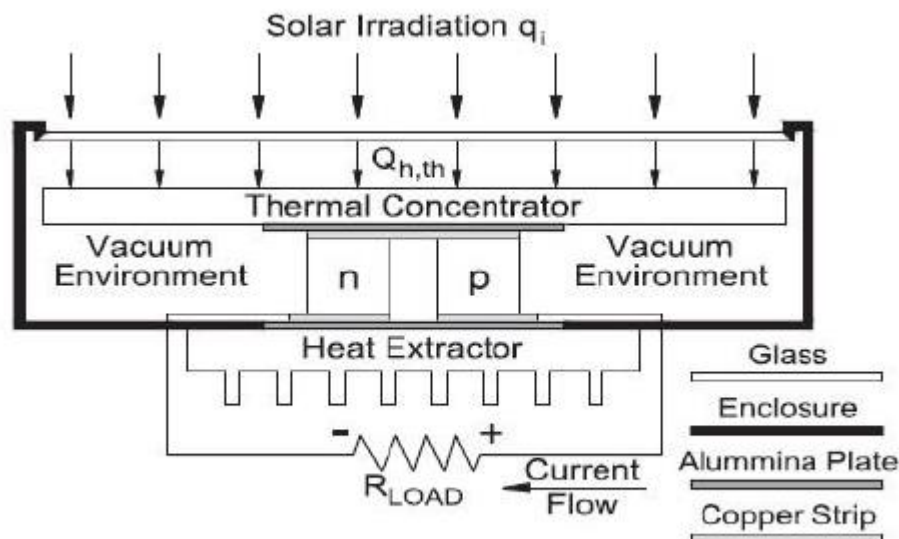
Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα (PV/T) θεωρούνται σήμερα η πλέον ελκυστική λύση στο πρόβλημα της μειωμένης απόδοσης των φωτοβολταϊκών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας τους. Σε αυτά τα συστήματα γίνεται συνδυασμός θερμοηλεκτρικών συσκευών με κατάλληλες ψύκτρες. Η αύξηση της απόδοσης που επιτυγχάνεται οφείλεται και στη δυνατότητα επιπλέον παραγωγής ισχύος, ανάλογα με το είδος της συσκευής που χρησιμοποιείται. Εν γένει, υπάρχουν δυο προσεγγίσεις της εν λόγω λύσης που σχετίζονται με τον τρόπο λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής συσκευής. Η συσκευή μπορεί να τεθεί σε λειτουργία γεννήτριας (TEG) ή σε λειτουργία αντλίας θερμότητας (TEC). Στη δεύτερη περίπτωση, η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στο φαινόμενο Peltier, δηλαδή τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια την οποία μετατρέπει σε διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο επιφανειών της. Έτσι αποβάλλει μέρος της θερμικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού μέσω της θερμής πλευράς της στο περιβάλλον. Η βελτίωση στην ικανότητα φωτοβολταϊκής μετατροπής του κελιού προκύπτει ως



αποτέλεσμα της μείωσης της θερμοκρασίας του, ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η κατανάλωση της συσκευής για τον υπολογισμό της συνολικής ισχύος εξόδου του υβριδικού συστήματος. Οι δυο τύποι υβριδικών φωτοβολταϊκών/ θερμικών συστημάτων αναφέρονται στις επόμενες ενότητες.

#### 4.6.1 Ηλιακές Θερμογεννήτριες (PV-TEG)

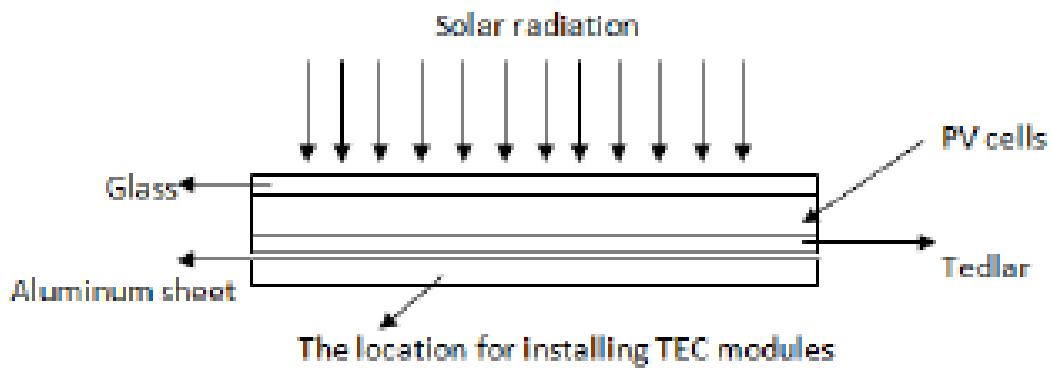
Πρόκειται για διάταξη στην οποία μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) βρίσκεται ανάμεσα σε μια επιφάνεια απορρόφησης ηλιακής ενέργειας, δηλαδή το φωτοβολταϊκό, και σε μια ψύκτρα. Η θερμοκρασιακή διαφορά που εντοπίζεται ανάμεσα στις δυο επιφάνειες του TEG έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 4-2: Ηλιακή θερμογεννήτρια [17]

#### 4.6.2 Ηλιακές Αντλίες Θερμότητας (PV-TEC)

Σε αυτού του τύπου το υβριδικό φωτοβολταϊκό, εγκαθίσταται μια συσκευή Peltier TEC (Thermo Electric Cooler) στην πίσω πλευρά του. Ένα μέρος της παραγόμενης ισχύος χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του TEC. Η αποδοτική λειτουργία του συστήματος αποτελεί πεδίο έρευνας και στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πολύ υλικό για την θερμομηχανική προσομοίωσή του [20].



Σχήμα 4-3: Ηλιακή αντλία θερμότητας [17].

#### 4.6.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των PV/TE (Critical Factors)

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των διατάξεων υβριδικών φωτοβολταϊκών είναι επιγραμματικά οι ακόλουθοι [17].

- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας
- Θερμοκρασία
- Σημεία ηλεκτρικών συνδέσεων Electric connections
- MPPT
- Thermal interface materials
- Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- Γεωμετρική δομή φωτοβολταϊκού κελιού
- Κατασκευαστικός παράγοντας θερμοηλεκτρικής συσκευής (μήκος ακροδεκτών, εύκαμπτη ή συμπαγής δομή)
- Παράγοντας πλήρωσης
- Επίδραση των εσωτερικών επιπέδων
- Επίδραση του σχήματος του συστήματος

## 5 Πειραματικό μέρος

Το πειραματικό μέρος της εργασίας χωρίζεται σε δυο σκέλη. Το πρώτο αφορά την προσομοίωση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς ψύξη με χρήση Matlab. Σε αυτό το πλαίσιο γίνονται δοκιμές για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες κυψελών. Το δεύτερο μέρος αφορά στην κατασκευή πειραματικής διάταξης και δοκιμή αυτής σε συνθήκες τεχνητού ήλιου. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε κελί πολυκρυσταλλικού πυριτίου και θερμοηλεκτρική συσκευή για την ψύξη του. Στα κεφάλαια που ακολουθούν πρόκειται να αναλυθούν τα δυο αυτά σκέλη.

### *5.1 Προσομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος σε Matlab*

Σε αυτό το μέρος της εργασίας, περιγράφεται η προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στη διαμόρφωσή της. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, βασίστηκε σε ήδη υπάρχοντα μοντέλα που έχουν περιγραφεί ενδελεχώς στη διεθνή βιβλιογραφία και στηρίζεται σε εξισώσεις θερμοδυναμικής ισορροπίας [17]. Εν προκειμένω, σκοπός είναι η δοκιμή του μοντέλου αυτού για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες κελιών, και συγκεκριμένα μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς και κελιού ετεροεπαφών. Το υπό μελέτη σύστημα είναι ένα μη συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα.

Το μοντέλο κατασκευάστηκε ώστε να μην υπεισέρχεται παράγοντας ψύξης στους υπολογισμούς και έτσι να δίνει τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται και την ισχύ που παράγεται από τη συμβατική λειτουργία του πλαισίου.

#### 5.1.1 Μαθηματικό υπόβαθρο

Για την εκτίμηση της ισχύος που παράγεται από το εν λόγω φωτοβολταϊκό κατασκευάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο σε Matlab. Το μαθηματικό αυτό μοντέλο βασίζεται στην εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος όταν λαμβάνονται υπόψη η τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού, η απαγωγή θερμότητας μεταξύ των εσωτερικών επιπέδων καθώς και οι διάφοροι μηχανισμοί ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ των μερών του συστήματος και του περιβάλλοντος.

Παρακάτω ακολουθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορά ενέργειας για κάθε τμήμα ξεχωριστά και που η συν-επίλυσή τους παράγει το ζητούμενο αποτέλεσμα. Μάλιστα γίνεται δοκιμή και προσομοίωση για τρεις διαφορετικούς τύπους κελιών. Οι παράμετροι για κάθε ξεχωριστό τύπο βρίσκονται στον Πίνακας 5-1.

Στο σημείο αυτό, να σημειωθεί ότι για όλους τους υπολογισμούς που ακολουθούν έχουν θεωρηθεί σταθερές τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας,  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ , αρχικής θερμοκρασίας  $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$  και ταχύτητας του αέρα  $v = 2 \text{ m/s}$ .

### 5.1.2 Υποσύστημα φωτοβολταϊκού

Για την εμπρόσθια όψη του φωτοβολταϊκού, το ισοζύγιο ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση [1]:

$$\begin{aligned} \tau_g [a_c \beta_{PV} + a_b (1 - \beta_{PV})] G A_{PV} \\ = U_f (T_{cell} - T_a) A_{PV} + \varepsilon \sigma A_{PV} (T_{cell}^4 - T_{sky}^4) \\ + U_b (T_{cell} - T_c) A_{PV} + \tau_g \beta_{PV} \eta_{el} G A_{PV} \end{aligned} \quad (3.1.1)$$

Στο αριστερό μέρος περιγράφεται η προσπίπτουσα ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Συγκεκριμένα:

- $\tau_g$  η ανακλαστικότητα του γυάλινου περιβλήματος
- $a_c$  ο συντελεστής απορροφητικότητας του κελιού
- $a_b$  ο συντελεστής απορροφητικότητας της οπίσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού
- $\beta_{PV}$  το ποσοστό της επιφάνειας του πλαισίου που καταλαμβάνεται από φωτοβολταϊκά κελιά (photovoltaic module packing factor)
- $G$  η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- $A_{PV}$  το εμβαδόν που καταλαμβάνει το κελί

Οι 4 όροι του δεξιού μέλους της εξίσωσης αντιστοιχούν στη μεταφορά θερμότητας εξαιτίας της μεταγωγής και της ακτινοβολίας στην εμπρόσθια όψη του συστήματος, στη διάδοση της θερμότητας από την εμπρόσθια, στην οπίσθια όψη του συστήματος διαμέσου όλων των

εσωτερικών στρωμάτων και στο κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατράπηκε πράγματι σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στη μαθηματική έκφραση των παραπάνω ποσοτήτων συναντώνται τα μεγέθη που ακολουθούν:

- $T_{cell}$  η θερμοκρασία κελιού
- $T_a$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- $T_c$  η θερμοκρασία οπίσθιας όψης του συστήματος
- $\epsilon$  παράγοντας εκπομπής του συστήματος
- $\sigma$  σταθερά Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23} J/K$ )
- $\eta_{el}$  συντελεστής μετατροπής (conversion efficiency) του κελιού στην πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας του
- $U_f$  η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του κελιού και του περιβάλλοντος, συνυπολογίζοντας φαινόμενα μεταγωγής και απαγωγής
- $U_b$  η θερμική αγωγιμότητα των εσωτερικών στρωμάτων του κελιού (αναφορικά με το υλικό του κελιού αλλά και το υλικό της οπίσθιας όψης του συστήματος) και
- $T_{sky}$  η ισχύουσα θερμοκρασία του ουρανού

Οι παραπάνω παράγοντες ορίζονται από τις εξής εξισώσεις:

$$U_f = \left[ \frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_{cf}} \right]^{-1} \quad (3.1.2)$$

$$U_b = \left[ \frac{L_c}{K_c} + \frac{L_b}{K_b} \right]^{-1} \quad (3.1.3)$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (3.1.4)$$

Αναφορικά με τις (3.1.2) – (3.1.4) ισχύουν:

- $L_g$  το πάχος του γυαλιού που καλύπτει την άνω επιφάνεια του συστήματος
- $L_c$  το πάχος του φωτοβολταϊκού κελιού

- $L_b$  το πάχος υλικού της οπίσθιας όψης του συστήματος
- $K_g$  η θερμική αγωγιμότητα του γυαλιού
- $K_c$  η θερμική αγωγιμότητα του κελιού
- $K_b$  η θερμική αγωγιμότητα του υλικού της οπίσθιας όψης
- $h_{cf}$  ο συντελεστής μεταγωγής θερμότητας της εμπρόσθιας όψης του συστήματος

Ο συντελεστής μετατροπής (conversion efficiency) κάθε διαφορετικού τύπου κελί, σε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας αναφοράς  $T_{ref}$  υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο, όπου  $\eta_{el,T_{ref}}$  είναι ο συντελεστής μετατροπής για τη θερμοκρασία αναφοράς (25°C):

$$\eta_{el} = \eta_{el,T_{ref}} [1 - \beta(T_{cell} - T_{ref})] \quad (3.1.5)$$

Όπου  $\beta$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασιακής απόδοσης

Για την οπίσθια όψη του φωτοβολταϊκού συστήματος, το ισοζύγιο ενέργειας περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$U_b(T_{cell} - T_c)A_{PV} = h_{cb}(T_c - T_a)(A_{PV}) \quad (3.1.6)$$

Σε αυτήν είναι:

- $h_{cb}$ : ο συντελεστής μεταγωγής θερμότητας για την οπίσθια όψη του συστήματος

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο φωτοβολταϊκό κελί, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι μηχανισμοί που επιδρούν και στις δυο πλευρές του συστήματος, οπότε πρακτικά γίνεται αντικατάσταση του τρίτου όρου του δεξιού μέλους της εξίσωσης (3.1.1) από το δεξιό μέλος της εξίσωσης (3.1.6). Συνεπώς η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο φωτοβολταϊκό κελί δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \tau_g [a_c \beta_{PV} + a_b (1 - \beta_{PV})] G A_{PV} & \quad (3.1.7) \\ & = U_f (T_{cell} - T_a) A_{PV} + \varepsilon \sigma A_{PV} (T_{cell}^4 - T_{sky}^4) \\ & + h_{cb} (T_c - T_a) (A_{PV}) + \tau_g \beta_{PV} \eta_{el} G A_{PV} \end{aligned}$$

### 5.1.3 Ισχύς εξόδου του συστήματος

Η ισχύς εξόδου του συστήματος ( $P_{PV}$ ), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_H = \tau_g \beta_{PV} \eta_{el} G A_{PV} \quad (3.1.8)$$

### 5.1.4 Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές που λαμβάνουν οι διάφορες παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στις παραπάνω εξισώσεις για τους διαφορετικούς τύπους κελιών που εξετάζονται.

Πίνακας 5-1: Συνιστώσες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο για τους τρεις τύπους κελιών [17].

Parameter	Symbol	Unit	Mono-Si	Poly-Si	Si-HJT
Module packing factor	$\beta_{PV}$	-	0.89	0.92	0.89
Glass transmissivity	$\tau_g$	-	0.95	0.95	0.95
Glass emissivity	$\epsilon$	-	0.85	0.85	0.85
Glass thickness	$L_g$	m	0.003	0.003	0.003
Glass th. Conductivity	$K_g$	W/mK	1.00	1.00	1.00
Cell absorptivity	$\alpha_c$	-	0.90	0.90	0.90
Cell STC el. Efficiency	$\eta_{el,Tref}$	%	17.00	15.00	22.50
Cell eff. temp. coefficient	$\beta$	-	0.004	0.004	0.0021
Cell thickness	$L_c$	m	0.0003	0.0003	0.0003
Cell th. Conductivity	$K_c$	W/mK	0.036	0.036	0.036
Backsheet absorptivity	$\alpha_b$	-	0.50	0.50	0.50
Backsheet thickness	$L_b$	m	0.0005	0.0005	0.0005

<b>Backsheet th. Conductivity</b>	$K_b$	W/mK	0.033	0.033	0.033
-----------------------------------	-------	------	-------	-------	-------

### 5.1.5 Αποτελέσματα από το μοντέλο

Σε αυτή την περίπτωση, δόθηκε στο μοντέλο σαν αρχική τιμή θερμοκρασίας  $T_{cell,0} = 62^\circ\text{C}$ . Έπειτα από την εκτέλεση της επαναληπτικής μεθόδου, τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο που περιγράφεται από τις παραπάνω σχέσεις, χωρίς την ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικής ψύξης παρουσιάζονται ακολούθως.

Πίνακας 5-2: Τιμές θερμοκρασίας και ισχύος που προκύπτουν

<b>Mono-Si</b>	<b>Poly-Si</b>	<b>Si-HJT</b>
$T_{cell} (^{\circ}\text{C})$		
63.064	65.332	60.894
$P_{PV} (\text{W})$		
2.450	2.280	3.120

## 5.2 Πειραματική διάταξη και μετρήσεις

Για το δεύτερο σκέλος του πειραματικού μέρους της εργασίας, μελετήθηκε η απόδοση μιας φωτοβολταϊκής διάταξης αποτελούμενης από φωτοβολταϊκό κελί πολυκρυσταλλικού πυριτίου σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Οι συνθήκες αυτές αφορούν στην ύπαρξη ή μη θερμοηλεκτρικής συσκευής ψύξης του κελιού καθώς και στον τρόπο συνδεσμολογίας τους. Το πείραμα αναλύεται εκτενέστερα στα κεφάλαια που ακολουθούν.

### 5.2.1 Υλικά και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης

Για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι υλικά:

- Κελί πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού της εταιρείας Solar Cells Hellas Group, μοντέλο SCH6P-90, με τα εξής χαρακτηριστικά [21]:



Πίνακας 5-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού κελιού

Χαρακτηριστικά προϊόντος			
Τεχνολογία κελιού	Διαστάσεις (mm)	Διαγώνιος (mm)	Πάχος κελιού (mm)
Polycrystalline	156×156	220	180/200 ± μm

Πίνακας 5-4: Εμπρόσθια όψη κελιού (-)

Εμπρόσθια όψη κελιού (-)			
Αριθμός bushbars	Πλάτος bushbar (mm)	Υλικό bushbar	Αντί ανακλαστική επένδυση
2	2 ± 0.2	Ασήμι (Ag)	Silicon Nitride

Πίνακας 5-5: Οπίσθια όψη κελιού (+)

Οπίσθια όψη κελιού (+)			
Αριθμός bushbars	Πλάτος bushbars (mm)	Υλικό bushbars	Back Surface Field (BSF)
2	4 ± 0.2	Ασήμι (Ag)	Αλουμίνιο (Al)

Πίνακας 5-6: Ηλεκτρικά μεγέθη κελιού

Ηλεκτρικά μεγέθη σε STC συνθήκες			
Μέγιστη ισχύς εξόδου ( $P_{max}$ )(W)	Τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{OC}$ )(V)	Ρεύμα βραχυκυκλώματος ( $I_{SC}$ )(A)	Απόδοση κελιού
3.9	0.616	8.17	16 %

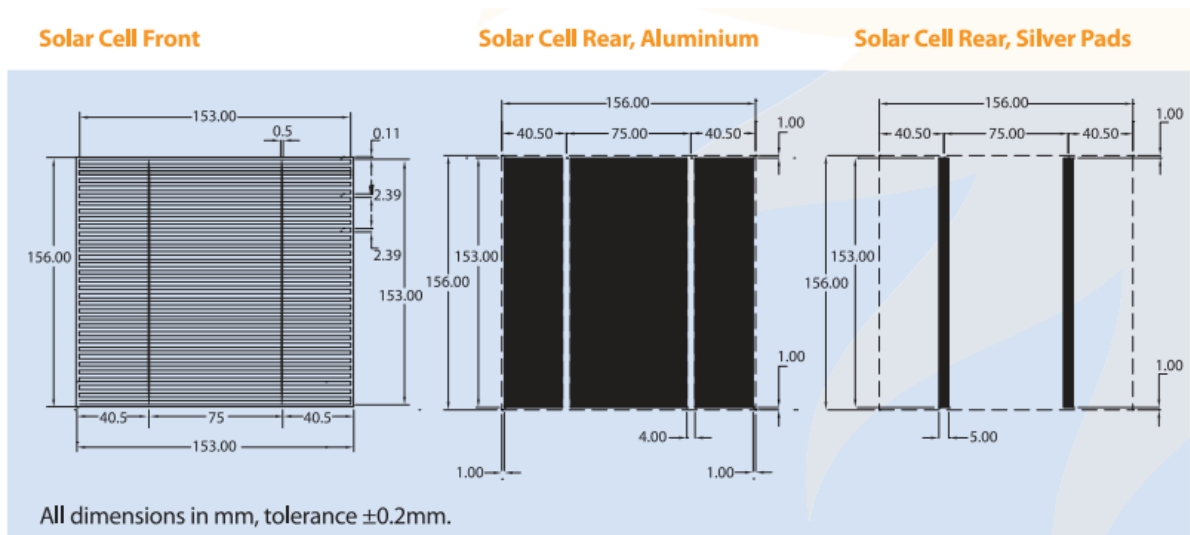
Πίνακας 5-7: Θερμικά χαρακτηριστικά κελιού

Θερμικά χαρακτηριστικά
------------------------

Θερμοκρασιακή συνιστώσα της $P_{max}$	Θερμοκρασιακή συνιστώσα της $V_{OC}$	Θερμοκρασιακή συνιστώσα του $I_{SC}$
-0.44 %/°C	-0.36 %/°C	-0.04 %/°C

Πίνακας 5-8: Εξάρτηση τάσης από την ένταση ηλεκτρικής ακτινοβολίας

Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G) ( $W/m^2$ )	$V_{mpp}$ (V)
1000	1.000
800	0.990
600	0.985
400	0.980
200	0.940
100	0.890

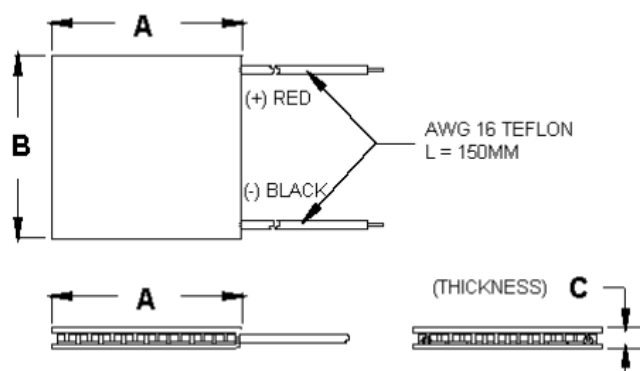


Σχήμα 5-1: Σχεδιαστικές απεικονίσεις του κελιού όπου αναγράφονται οι διαστάσεις [21].

- Θερμοηλεκτρική συσκευή Peltier-Seebeck του τύπου TEC1-12706, τα χαρακτηριστικά της οποίας παρατίθενται ακολούθως.

Πίνακας 5-9: Ηλεκτρικά μεγέθη θερμοηλεκτρικής συσκευής [22].

Θερμοκρασία θερμής επιφάνειας	25 °C	50 °C
$Q_{max}(W)$	50.00	57.00
$\Delta T_{max}(^{\circ}C)$	66.00	75.00
$I_{max}(A)$	6.40	6.40
$V_{max}(V)$	14.40	16.40
$R_{TEC}(Ohms)$	1.98	2.30



Ceramic Material: Alumina ( $Al_2O_3$ )  
Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

Size table:

A	B	C			
40	40	3.8			

Σχήμα 5-2: Σχεδιαστική απεικόνιση και διαστάσεις του θερμοηλεκτρικού [22].

- Θερμοαγώγιμη κόλλα που εξασφαλίζει αφενός τη συνοχή, αλλά και αφετέρου την αγωγή θερμότητας μεταξύ των επιπέδων της διάταξης. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη λόγω της σύστασής της που εξασφαλίζει μακροπρόθεσμη σταθερότητα και βελτιωμένη θερμοαγώγιμη συμπεριφορά σε σύγκριση με άλλα τέτοια προϊόντα που κυκλοφορούν στην αγορά.



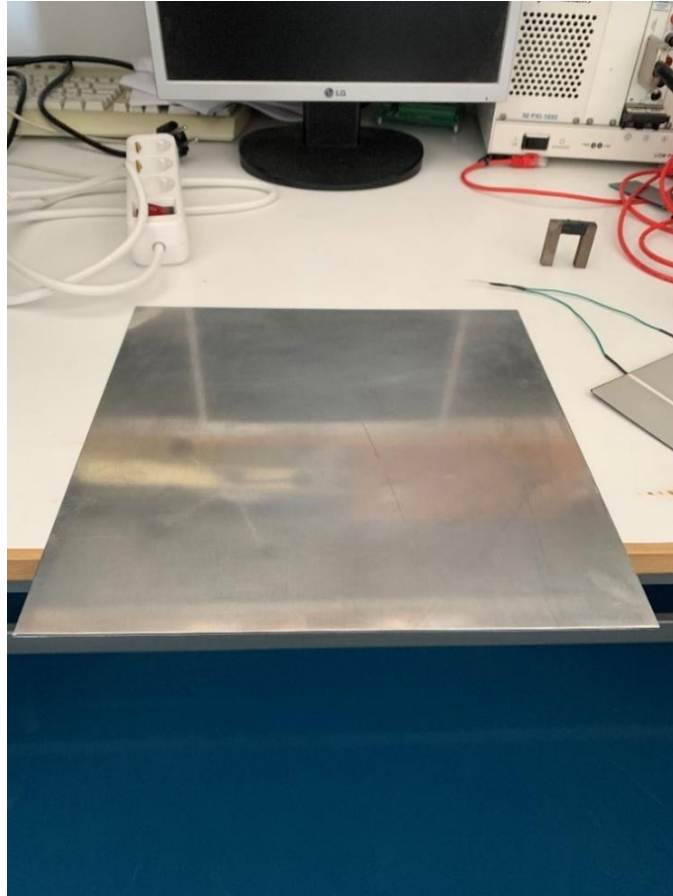
Σχήμα 5-3: Η θερμοαγώγιμη κόλλα (πάστα) που χρησιμοποιήθηκε

- Μεταλλική ψύκτρα αέρος, η χρήση της οποίας συντελεί στην απαγωγή θερμότητας από τη θερμή επιφάνεια του θερμοηλεκτρικού προς το περιβάλλον



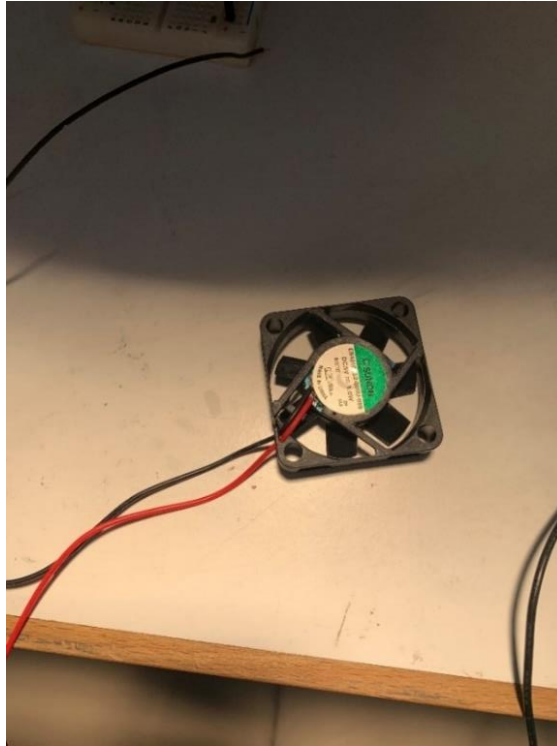
Σχήμα 5-4: Η ψύκτρα που χρησιμοποιήθηκε

- Προφίλ αλουμινίου διαστάσεων (300mm\*300mm) και πάχους 2mm, πάνω στο οποίο στήθηκε η διάταξη. Συγκεκριμένα η χρησιμότητα του αλουμινίου έγκειται τόσο στη δημιουργία μιας περισσότερο ανθεκτικής επιφάνειας, όσο και στην καλύτερη διάδοση της θερμότητας από την πίσω όψη του κελιού.



Σχήμα 5-5: Το προφίλ αλουμινίου πάνω στο οποίο στήθηκε η πειραματική διάταξη

- Ανεμιστηράκι της εταιρείας SUNON με τάση λειτουργίας 5V και μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύ 1W για την ενίσχυση του φαινομένου ψύξης.



Σχήμα 5-6: Το ανεμιστηράκι που χρησιμοποιήθηκε βοηθητικά

- Καλώδια για τις συνδέσεις της διάταξης.
- Θερμοσυστελλόμενα για ηλεκτρική μόνωση των σημείων όπου έχουν γίνει κολλήσεις
- Σιλικόνη
- Καλάι

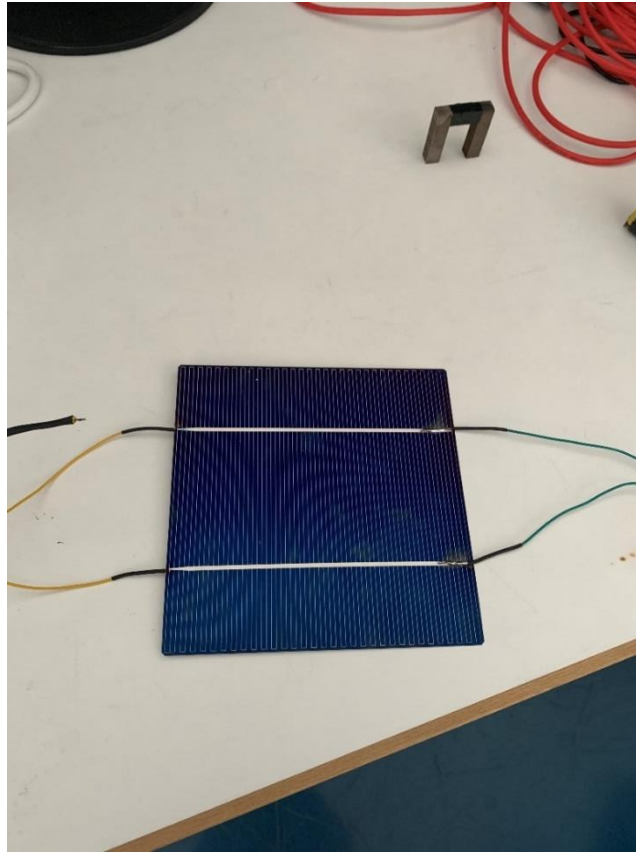
Αναφορικά με τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή της διάταξης, αυτά παρατίθενται παρακάτω:

- Απογυμνωτής και κόφτης καλωδίων
- Ηλεκτρικό κολλητήρι
- Πιστόλι σιλικόνης
- Πιστόλι θερμού αέρα για την εφαρμογή των θερμοσυστελλόμενων σωλήνων
- Οινόπνευμα και πανί για την απομάκρυνση της κόλλας από τις επιφάνειες σε περίπτωση λάθους

### 5.2.2 Διαδικασία κατασκευής πειραματικής διάταξης

Η κατασκευή της διάταξης ολοκληρώθηκε στα παρακάτω βήματα.

### 5.2.2.1 Προετοιμασία φωτοβολταϊκού κελιού



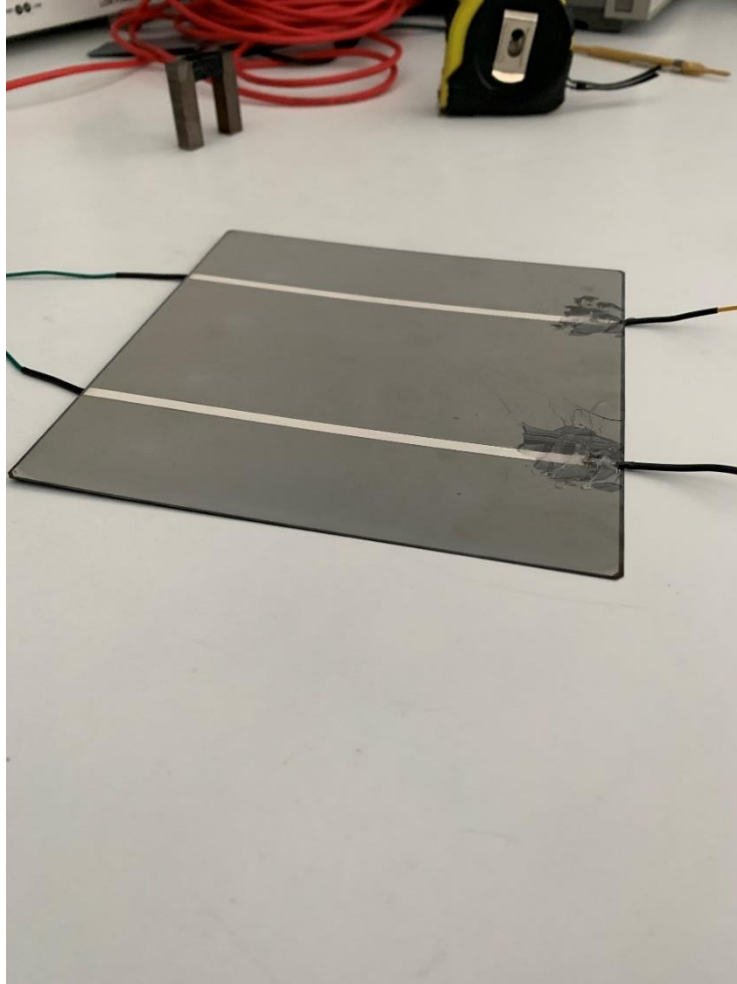
**Σχήμα 5-7: Το φωτοβολταϊκό κελί της διάταξης. Στη φωτογραφία φαίνονται τα bushbars της άνω όψης της που, βραχυκυκλωμένα δίνουν τον αρνητικό ακροδέκτη**

Το φωτοβολταϊκό κελί που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει δυο γραμμές που χρησιμοποιούνται για συλλογή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε όψη της (bushbars), καθεμία από τις οποίες συνδέεται ηλεκτρικά με τη μισή επιφάνειά του. Συγκεκριμένα, στην κάτω όψη βρίσκεται το συν (+) από όπου θα προκύψει ο θετικός ακροδέκτης, ενώ στην πάνω όψη το πλην (-) όπου και θα κολληθεί ο αγωγός του αρνητικού ακροδέκτη.

Πάνω στις εν λόγω γραμμές υπάρχει μονωτικό υλικό, το οποίο απομακρύνεται πριν γίνει οποιαδήποτε κόλληση. Για να απομακρυνθεί αυτή η στρώση χρησιμοποιήθηκε η αιχμηρή άκρη ενός μικρού κατσαβιδιού και χαράχθηκε τοπικά για ένα μήκος περίπου 1cm.

Κατόπιν, κολλήθηκαν καλώδια, δυο σε κάθε πλευρά του κελιού που αντιστοιχούν στις γραμμές τροφοδοσίας και περάστηκαν θερμοσυστελλόμενοι σωλήνες, κατάλληλης διατομής που εξυπηρετούν την ηλεκτρική απομόνωση των απογυμνωμένων αγωγών. Η εφαρμογή τους έγινε με πιστόλι θερμού αέρος. Στο σημείο αυτό, αξίζει να επισημανθεί το

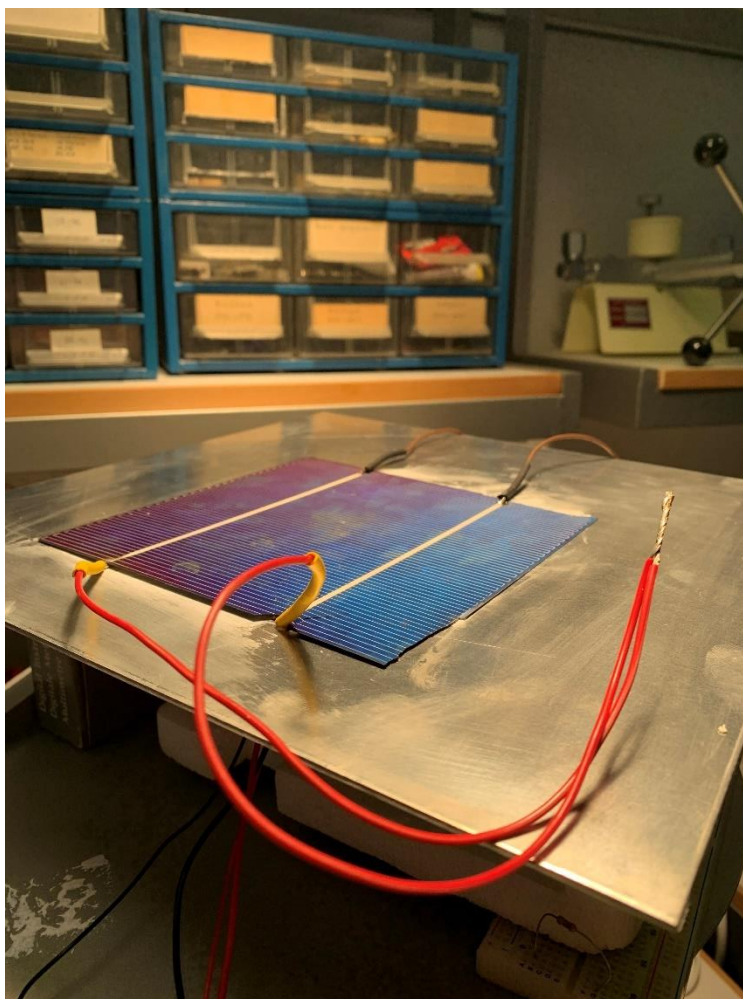
ότι, για τους αρνητικούς ακροδέκτες οι οποίοι στην τελική διάταξη βρίσκονται εν επαφή με το αλουμίνιο, χρειάστηκε να προστεθεί ένα επίπεδο ηλεκτρικής μόνωσης. Προς αυτό το σκοπό, πάνω από τις κολλήσεις των αγωγών τοποθετήθηκε ένα λεπτό στρώμα σιλικόνης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-8.



**Σχήμα 5-8: Η πίσω όψη του κελιού όπου έχουν κολληθεί στα bushbars τα καλώδια που αποτελούν το θετικό ακροδέκτη. Φαίνονται οι θερμοσυστελλόμενοι σωλήνες καθώς και το λεπτό στρώμα σιλικόνης που εξυπηρετούν σκοπούς μόνωσης**

Στην συνέχεια, τα δυο καλώδια που εξέρχονται από κάθε όψη του κελιού συνενώθηκαν μεταξύ τους σχηματίζοντας έναν ακροδέκτη. Σε κάθε ακροδέκτη εφαρμόστηκε ένας θερμοσυστελλόμενος σωλήνας μεγαλύτερης διαμέτρου από αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε επιμέρους καλώδιο.





Σχήμα 5-9: Ράγισμα και αποκοπή τμήματος του κελιού στο σημείο κόλλησης του ακροδέκτη

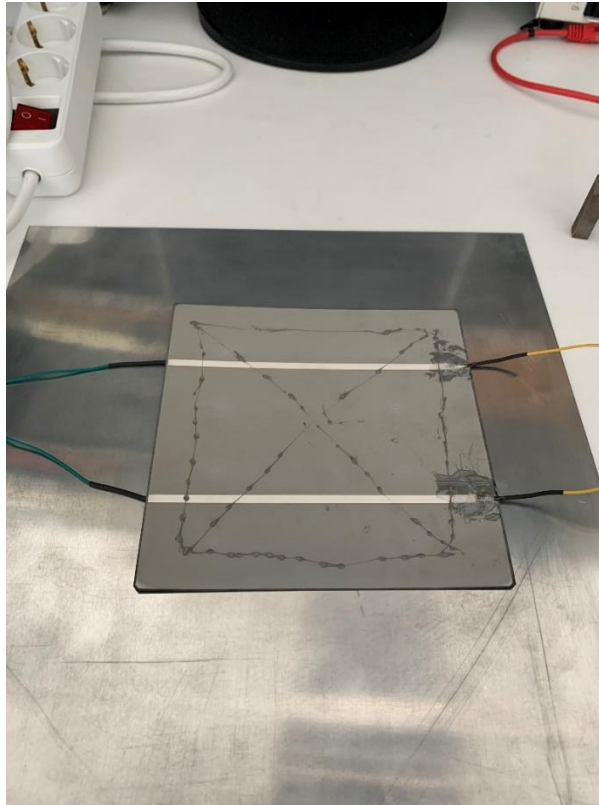
Σημειώνεται ότι λόγω της μεγάλης ευθρυπτότητας του κελιού, η παραπάνω διαδικασία χρειάστηκε να επαναληφθεί ορισμένες φορές προκειμένου να είναι ακέραιο το κελί στο τελικό κύκλωμα, καθώς ρωγμές και σπασίματα ελαττώνουν την ικανότητα μετατροπής ενέργειας που διαθέτει.

#### **5.2.2.2 Εφαρμογή του κελιού στο αλουμίνιο με χρήση της κόλλας**

Για την εφαρμογή του κελιού πάνω στο αλουμίνιο, απλώθηκε μια ποσότητα θερμοαγώγιμης κόλλας στην πίσω όψη του, όπως απεικονίζεται παρακάτω. Η κόλλα απλώθηκε σύμφωνα με τον προτεινόμενο από τον κατασκευαστή της τρόπο, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη κατανομή της θερμότητας αλλά και να περιορισθεί ο κίνδυνος αποκόλλησης των δυο υλικών. Έπειτα κολλήθηκε πάνω στην επιφάνεια του αλουμινίου με πολύ προσεχτικές κινήσεις για να μην προκληθεί κάποιο σπάσιμο ή ρωγμή και με γνώμονα το να εφάπτεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του κελιού πάνω στο

αλουμίνιο για να επιτυγχάνεται καλύτερη διάδοση της θερμότητας στην πίσω όψη του αλουμινίου.

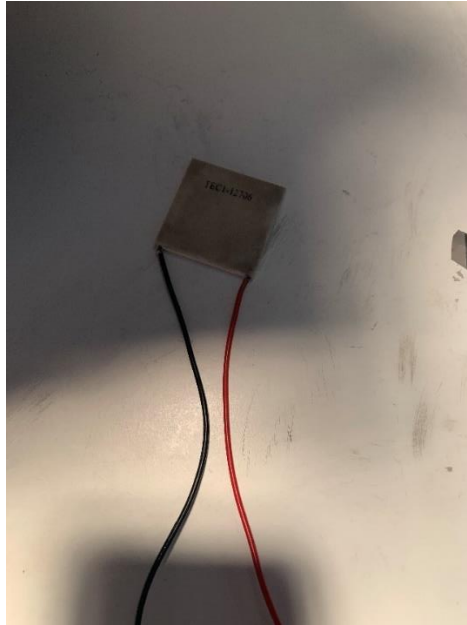
Επισημαίνεται ότι τα καλώδια του θετικού ακροδέκτη, είχαν κατά το δυνατόν πιεσθεί ώστε να μη δημιουργούν μεγάλο κενό ανάμεσα στις δυο επιφάνειες.



Σχήμα 5-10: Εφαρμογή κόλλας στην πίσω όψη του κελιού

### 5.2.2.3 Προετοιμασία θερμοηλεκτρικής συσκευής

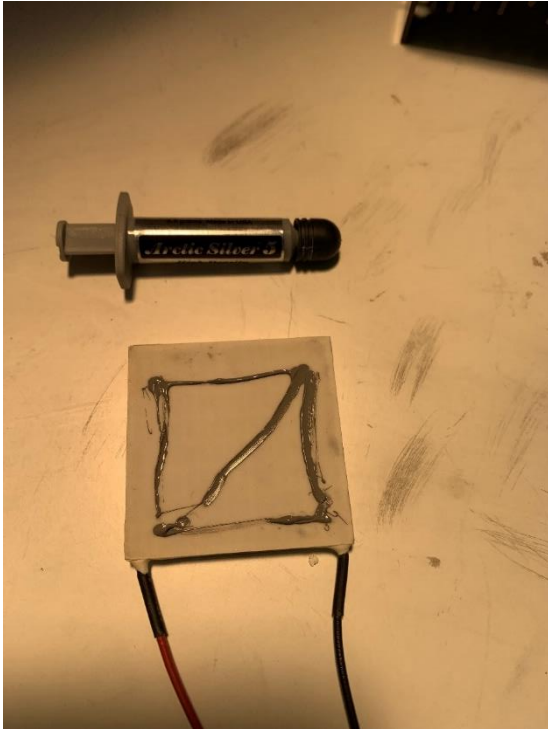
Η θερμοηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι η εικονιζόμενη στο Σχήμα 5-11.



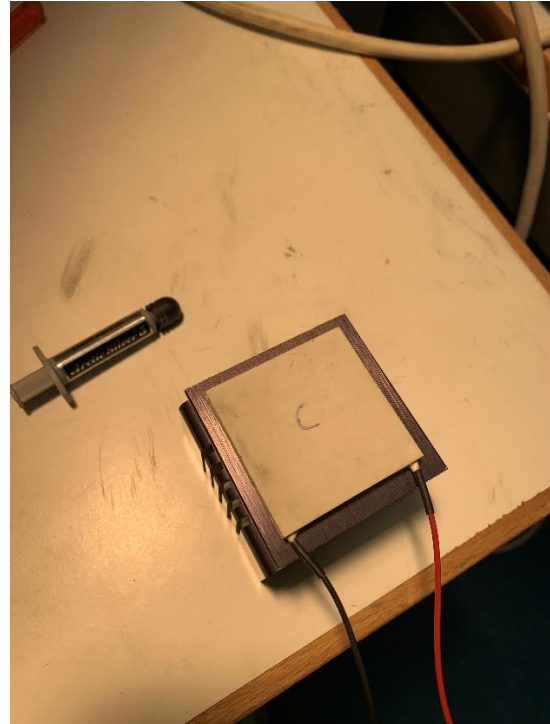
**Σχήμα 5-11: Η θερμοηλεκτρική συσκευή του πειράματος. Φαίνεται η ψυχρή περιοχή της**

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή αλλά έπειτα και από πειραματική επαλήθευση στο εργαστήριο, η ψυχρή επιφάνεια είναι η εικονιζόμενη. Αυτή η επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με την πίσω όψη του αλουμινίου στην τελική διάταξη.

Στη θερμή πλευρά της συσκευής κολλήθηκε με τη χρήση της ίδιας θερμοαγώγιμης κόλλας η ψύκτρα αέρος.



Σχήμα 5-12: Εφαρμογή κόλλας στο  
θερμοηλεκτρικό

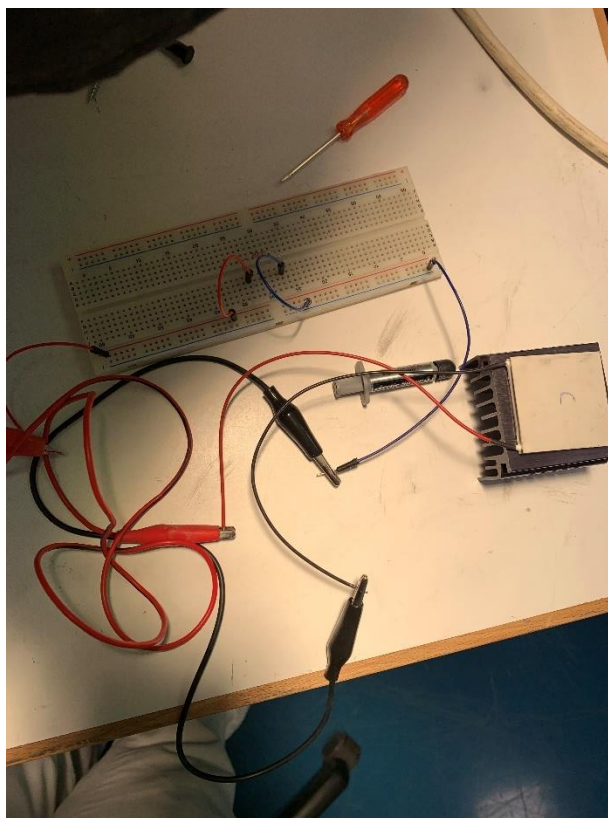


Σχήμα 5-13: Η ψυχρή πλευρά του  
θερμοηλεκτρικού (σημειωμένη με C) πρόκειται να  
κολληθεί στην κάτω όψη του φωτοβολταϊκού

Κατά τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε και ένα ανεμιστηράκι, το οποίο προσαρμόστηκε κάτω από την ψύκτρα με τη χρήση βιδών μέσα στις αυλακώσεις της.

#### 5.2.2.4 Κατασκευή κυκλώματος δοκιμής

Για τη λήψη των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε μια πλακέτα δοκιμών (breadboard) στην οποία συνδέθηκαν ωμικές αντιστάσεις για να κλείνει το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού αλλά και του θερμοηλεκτρικού κατά τη λειτουργία του ως Seebeck.



Σχήμα 5-14: Το κύκλωμα δοκιμής

#### 5.2.2.5 Τελική διάταξη

Στην ολοκληρωμένη πειραματική διάταξη, η θερμοηλεκτρική συσκευή με την ψύκτρα κολλήθηκαν με τη χρήση της κόλλας στην πίσω όψη του αλουμινίου.

Επιπλέον, η σύνδεση του κυκλώματος του φωτοβολταϊκού επιτεύχθηκε με τη χρήση καλωδίων σύνδεσης (κροκοδειλάκια) από τους ακροδέκτες του προς την πλακέτα δοκιμής.

Στους ακροδέκτες της θερμοηλεκτρικής συσκευής προσαρμόστηκαν επίσης καλώδια σύνδεσης. Τα καλώδια αυτά, ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούσε η συσκευή, προσαρμόζονταν είτε στο τροφοδοτικό για λειτουργία Peltier, είτε σε μια αντίσταση ίσου μεγέθους με την εσωτερική της συσκευής, πάνω στην πλακέτα δοκιμής για λειτουργία Peltier.

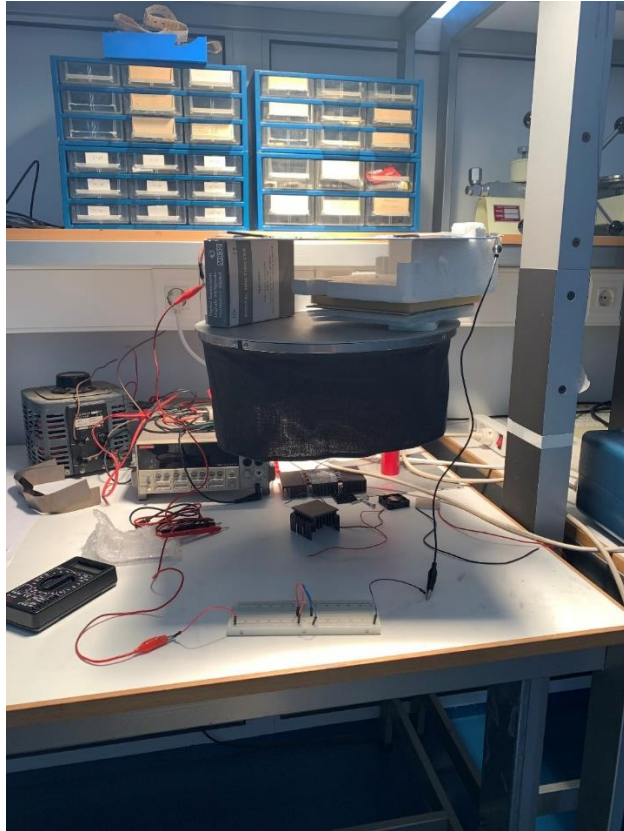
Η πειραματική διάταξη, δηλαδή το αλουμίνιο με το κελί, το θερμοηλεκτρικό και την ψύκτρα, τοποθετήθηκε κάτω από τη διάταξη τεχνητού ήλιου του εργαστηρίου. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερη τιμή προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό, χρησιμοποιήθηκαν κάποια κουτιά για να μειωθεί η απόσταση ανάμεσα στο κελί και τη φωτεινή πηγή. Έτσι επιτεύχθηκε απόλυτη απόσταση ίση με 30cm. Επιπλέον,

λόγω του βάρους της ψύκτρας, παρατηρήθηκε ότι συχνά αποκολλούταν από το θερμοηλεκτρικό. Σαν λύση χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτό ξύλο που τοποθετήθηκε για στήριγμα.



**Σχήμα 5-15: Η διάταξη κάτω από τη δοκιμαστική διάταξη τεχνητού ήλιου**





**Σχήμα 5-16: Σύνδεση των ακροδεκτών στη δοκιμαστική πλακέτα για τη δημιουργία κλειστού κυκλώματος**



**Σχήμα 5-17: Άποψη του θερμοηλεκτρικού και της ψύκτρας στην κάτω όψη του αλουμινίου**

### 5.2.3 Όργανα μέτρησης και υλοποίησης του πειράματος

Προκειμένου να λειτουργήσει η διάταξη τοποθετήθηκε σε μονάδα τεχνητού ήλιου. Η μονάδα αυτή αποτελείται από μια φωτεινή πηγή (λάμπα) που προσομοιώνει τη λειτουργία του Ήλιου, καθώς παράγει θερμική και φωτεινή ενέργεια. Η φωτεινή πηγή αυτή τροφοδοτείται από μια γεννήτρια που στη μέγιστη λειτουργία της δίνει 260V. Με εφαρμογή μέγιστης τιμής τάσης, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κελί που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια δοκιμής είναι 597,86W/m<sup>2</sup>. Το φωτοβολταϊκό τοποθετήθηκε σε απόσταση 30 cm από τη λάμπα και σε κάθετη κλίση.



**Σχήμα 5-18: Η γεννήτρια μέγιστης τάσης εξόδου 260V που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα**

Οι μετρήσεις του πειράματος ελήφθησαν με τη χρήση ηλεκτρονικού πολυμέτρου. Συγκεκριμένα, αναφορικά με τις μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, αυτές έγιναν με χρήση των ακροδεκτών του πολυμέτρου. Όσον αφορά στη μέτρηση θερμοκρασίας του κελιού, αυτή έγινε με τη χρήση θερμοζεύγους το οποίο προσαρμόστηκε στο πολύμετρο για να δείξει τις μετρήσεις. Επιπλέον η τροφοδοσία του θερμοηλεκτρικού κατά τη λειτουργία Peltier, καθώς και του ανεμιστήρα, έγινε με τη χρήση τροφοδοτικού μέγιστης τάσης εξόδου 15V.



#### 5.2.4 Υλοποίηση του πειράματος

Η διαδικασία του πειράματος επαναλήφθηκε με ορισμένες τροποποιήσεις για να γίνει δοκιμή λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού ως συσκευή Seebeck (TEG) και ως συσκευή Peltier (TEC).

Συγκεκριμένα, δεδομένου του ότι η λειτουργία Seebeck παρουσιάζει σαφή βελτίωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού, αφού με μηδαμινή κατανάλωση ισχύος, άρα εξ ορισμού θετικό ισοζύγιο ισχύος, ελαττώνει τη θερμοκρασία λειτουργίας του και συνεπώς ενισχύει τη φωτοηλεκτρική μετατροπή, η πειραματική διαδικασία είναι περισσότερο εστιασμένη στην επαλήθευση αυτού του φαινομένου. Η λειτουργία Peltier, είναι υπό προϋποθέσεις περισσότερο αποδοτική από την Seebeck και αυτό γιατί εφαρμόζεται τάση στο θερμοηλεκτρικό. Ωστόσο, για να καταστεί καλύτερη από τη λειτουργία Seebeck, χρειάζεται το ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος να είναι μεγαλύτερο. Προς αυτό το σκοπό, και δεδομένου του ότι το φωτοβολταϊκό κελί του πειράματος παράγει το μέγιστο 3.4 W ισχύος, είναι απαραίτητο η καταναλισκόμενη ισχύς του θερμοηλεκτρικού να είναι μικρότερη από την παραγόμενη του κελιού αλλά και με την αύξηση της απόδοσης που εισάγει να συνεπάγεται την ύπαρξη θετικού προσήμου στον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης ισχύος του συστήματος. Βέβαια η λειτουργία Peltier δίνει πολύ πιο γρήγορα αποτελέσματα, άρα παρατηρείται δραματική μείωση της θερμοκρασίας του κελιού σε μικρό χρονικό διάστημα. Σε κάθε περίπτωση και οι δυο μέθοδοι καθυστερούν τη γήρανση του κελιού, γεγονός που εμμέσως και μακροπρόθεσμα ευνοεί την αύξηση της απόδοσής του.

Έτσι, στο πείραμα δόθηκε περισσότερη βαρύτητα στην εφαρμογή με TEG καθώς ήταν εμφανής η βελτίωση της απόδοσης λόγω του ότι δεν υπήρχε κατανάλωση ισχύος κατά την ψύξη.

Ανεξάρτητα όμως, από τη συνδεσμολογία του θερμοηλεκτρικού, σε κάθε περίπτωση προηγήθηκε το στάδιο της έκθεσης του κελιού σε ακτινοβολία χωρίς κάποιο ψυκτικό μέσο για να μετρηθεί η παραγόμενη ισχύς του υπό αυτές τις συνθήκες. Ειδικότερα, η διάταξη, τοποθετήθηκε αρχικά πάνω στην ειδική πλατφόρμα με τη φωτεινή πηγή σε απόλυτη απόσταση 50cm και σε γωνία 30 μοιρών. Παρατηρήθηκε ωστόσο ότι η ακτινοβολία που προσέπιπτε στο κελί δεν ήταν ικανοποιητική και ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκαν αντικείμενα για να υπερυψωθεί η διάταξη. Τελικά η διάταξη τοποθετήθηκε σε απόλυτη

απόσταση από τη λάμπα 30 cm οπότε και η προσπίπτουσα ακτινοβολία που δεχόταν ήταν τιμής  $G = 597,86 \text{ W/m}^2$  υπό γωνία 0 μοιρών.

Κατόπιν, έγινε ρύθμιση της γεννήτριας για να παράγει τη μέγιστη τάση εξόδου και η διάταξη αφέθηκε χωρίς κάποιο ψυκτικό μέσο για να ληφθούν μετρήσεις. Καταγράφηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας, παραγόμενης τάσης και ρεύματος του φωτοβολταϊκού κελιού.

Στη συνέχεια έγινε σύνδεση και του ψυκτικού μέσου, ήτοι του θερμοηλεκτρικού με την αερόψυκτρα, στο πίσω μέρος του αλουμινίου.

Στην αρχή, για να επιτευχθεί λειτουργία Seebeck του θερμοηλεκτρικού (δηλαδή ως θερμοηλεκτρική γεννήτρια - TEG), συνδέθηκαν οι ακροδέκτες του σε δοκιμαστική πλακέτα με αντίσταση ίσης τιμής με την τιμή της εσωτερικής του αντίστασης, 2,7 Ohm. Μέσω αυτής κλείνει το κύκλωμα και είναι εφικτή η μέτρηση της τιμής του παραγόμενου ρεύματος.

Το πείραμα επαναλήφθηκε στις ίδιες συνθήκες με επιπλέον τη σύνδεση του ανεμιστήρα, η τροφοδοσία του οποίου γίνεται με τροφοδοτικό και σταθερά καταναλώνει ισχύ 0.5 W. Κατόπιν έγιναν οι σχετικές μετρήσεις.

Ακολουθως έγινε επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας με λειτουργία του θερμοηλεκτρικού ως συσκευή Peltier ή αλλιώς αντλία θερμότητας (TEC). Προς αυτό το σκοπό, μετά το πέρας ικανού χρονικού διαστήματος κατά το οποίο η διάταξη ήταν υπό την ακτινοβολία χωρίς την επίδραση κάποιου ψυκτικού φαινομένου, προσαρμόστηκε στο πίσω μέρος του αλουμινίου το TEC με την ψύκτρα, οι ακροδέκτες του οποίου συνδέθηκαν με τροφοδοτικό. Το τροφοδοτικό ρυθμίστηκε σε δυο επίπεδα τροφοδοσίας, 2.5V και 5V, στα οποία υπολογίζεται η καταναλισκόμενη ισχύς του στα 1.30W και 2.85W αντίστοιχα, με σκοπό να καταγραφούν τα αποτελέσματα του πειράματος σε δυο περιπτώσεις λειτουργίας.

### 5.2.5 Μετρήσεις που λήφθηκαν

Αρχικά επισημαίνεται ότι το πείραμα διεξήχθη σε εσωτερικό χώρο με τη χρήση διάταξης τεχνητού ήλιου. Η διάταξη αυτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-15 αποτελείται από μια φωτεινή πηγή που παράγει μεγάλης φωτεινότητας ακτινοβολία και θερμική ενέργεια, προσομοιάζοντας έτσι, τις συνθήκες λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού σε εξωτερικό περιβάλλον. Η φωτεινότητα που εκλύει η πηγή, μετρήθηκε με κατάλληλο όργανο (λουξόμετρο) και προέκυψε, στη μέγιστη σκάλα λειτουργίας της να είναι  $G = 75.700 \text{ Lux}$

που μετατρέπεται σε  $G = 597,86\text{W/m}^2$ , στη θέση όπου βρίσκεται η διάταξη. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε και πιστολάκι για να προσομοιάζονται οι συνθήκες ανέμου του περιβάλλοντος. Ακολουθούν οι μετρήσεις και κάποια γραφικά αποτελέσματά τους από τις επιμέρους περιπτώσεις μελέτης. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σημειωθεί το ότι ενώ η μέγιστη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης που παράγει δυνητικά το συγκεκριμένο κελί είναι 8,7 A, η μέγιστη τιμή ρεύματος φορτίου που μετρήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία με  $R_{load} = 2,7 \text{ Ohm}$  ήταν  $I_{load} = 3,15\text{A}$  (αντί για  $\sim 4,3\text{A}$  όπου θα ήταν η μέγιστη ένταση ρεύματος φορτίου). Για την απόκλιση αυτή της τάξης περίπου του 1A στην τιμή του ρεύματος φορτίου οφείλονται πλήθος παραγόντων, όπως οι διατομές καλωδίων που έχουν χρησιμοποιηθεί και το ότι οι δοκιμές που οδήγησαν στη σύνταξη του datasheet έχουν γίνει σε εξωτερικό περιβάλλον και όχι σε προσομοίωση αυτού.

### 5.2.5.1 Χωρίς ψυκτικό μέσο:

Μετά την τοποθέτηση του κελιού κάτω από τη διάταξη τεχνητού ήλιου, μετρήθηκαν η θερμοκρασία του, καθώς και οι τιμές ρεύματος και τάσης εξόδου με αντίσταση φορτίου 2,7 Ohm ανά κάποια χρονικά διαστήματα. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 5-10: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού χωρίς ψύξη

	Θερμοκρασία (°C)	Τάση (mV)	Ρεύμα(A)	Ισχύς εξόδου(W)
Έναρξη	25	571	3.05	1.74
+20 min	45	558	2.94	1.64
+20 min	49	510	2.75	1.40
+20 min	52	520	2.68	1.39
+20 min	57	526	2.50	1.25
+20 min'	60	508	2.30	1.17
+20 min'	61	495	2.31	1.13

### 5.2.5.2 Ψύξη με χρήση TEG

Πίνακας 5-11: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη TEG

	Θερμοκρασία (°C)	Τάση (mV)	Ρεύμα(A)	Ισχύς εξόδου(W)
Έναρξη	62	495	2.40	1.18
+20 min	54	515	2.48	1.28
+20 min	49	521	2.61	1.36
+20 min	42	522	2.74	1.43
+20 min	39	538	2.79	1.50
+20 min	37	559	2.88	1.61
+20 min	36	599	3.03	1.82

### 5.2.5.3 Ψύξη με χρήση TEG και ανεμιστηράκι

Το ανεμιστηράκι που χρησιμοποιήθηκε λειτούργησε με κατανάλωση ισχύος 0,5W, επομένως στους υπολογισμούς της ισχύος εξόδου του συστήματος έχει αφαιρεθεί αυτή η ποσότητα.

Πίνακας 5-12: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη συνδυασμού TEG και ανεμιστήρα

	Θερμοκρασία (°C)	Τάση (mV)	Ρεύμα(A)	Ισχύς φωτοβολταϊκού (W) (P <sub>cell</sub> )	Ισχύς εξόδου (W) (P <sub>cell</sub> -P <sub>fan</sub> )
Έναρξη	62	490	2.46	1.20	0.70
+20 min	52	531	2.61	1.39	0.89
+20 min	47	553	2.84	1.57	1.07
+20 min	40	574	2.97	1.70	1.20
+20 min	38	588	3.04	1.78	1.28
+20 min	33	591	3.09	1.83	1.33
+20 min	33	596	3.14	1.87	1.37

#### 5.2.5.4 Ψύξη με χρήση TEC

Το TEC λειτούργησε με δυο τάσεις τροφοδοσίας, 2,5V και 5V. Στην πρώτη περίπτωση, η κατανάλωσή του υπολογίστηκε 1,30W ενώ στη δεύτερη 2,85W. Και στις δυο περιπτώσεις, οι ποσότητες αυτές αφαιρέθηκαν από τη συνολική ισχύ εξόδου του συστήματος.

Πίνακας 5-13: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη TEC.

	Θερμοκρασία (°C)	Τάση (mV)	Ρεύμα(A)	Ισχύς φωτοβολταϊκού (W)	Ισχύς εξόδου (W) (Pcell-Ptec)
<b>Τροφοδοσία TEC στα 2.5V</b>					
Έναρξη	63	487	2.25	1.10	-0.20
+20 min	49	536	2.53	1.38	0.08
+20 min	37	561	2.71	1.52	0.22
+20 min	33	579	2.86	1.66	0.36
+20 min	30	588	2.93	1.72	0.42
+20 min	29	596	3.05	1.82	0.52
+20 min	29	602	3.09	1.86	0.56
<b>Τροφοδοσία TEC στα 5V</b>					
Έναρξη	63	489	2.18	1.07	-1.78
+20 min	46	543	2.47	1.34	-1.51
+20 min	33	579	2.74	1.59	-1.26
+20 min	29	592	2.88	1.70	-1.15
+20 min	29	598	2.94	1.76	-1.09
+20 min	27	601	3.11	1.87	-0.98
+20 min	27	605	3.11	1.88	-0.97

### 5.2.5.5 Ψύξη με χρήση TEC και ανεμιστηράκι

Πίνακας 5-14: Μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικών μεγεθών κελιού με ψύξη συνδυασμού TEC και ανεμιστήρα

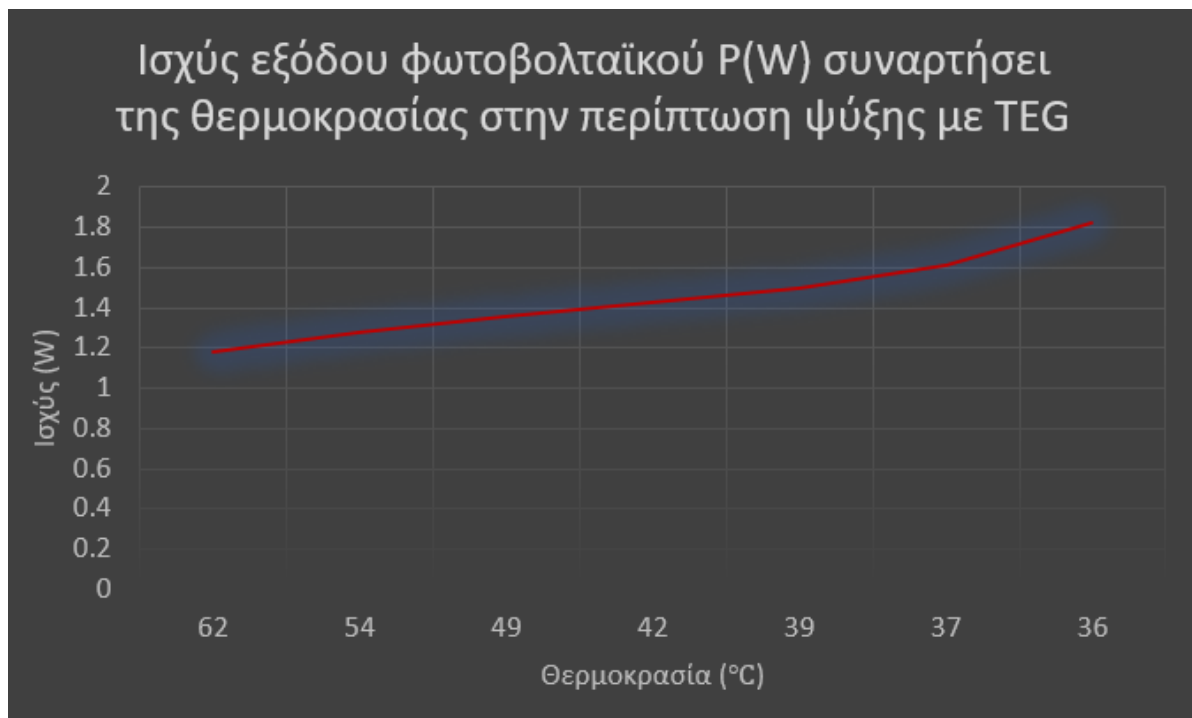
Σε αυτή την συνδεσμολογία, εκτός από το θερμοηλεκτρικό, η ψύξη ενισχύθηκε και με ένα ανεμιστηράκι. Όπως είναι αντιληπτό, η ισχύς εξόδου του συνολικού συστήματος προέκυψε σε κάθε περίπτωση αρνητική, συνεπώς παρακάτω παρατίθενται μετρήσεις θερμοκρασίας και ισχύος του φωτοβολταϊκού μόνο.

	Θερμοκρασία (°C)	Τάση (mV)	Ρεύμα(A)	Ισχύς φωτοβολταϊκού(W) (Pcell)
<b>Τροφοδοσία TEC στα 2.5V και ανεμιστηράκι</b>				
Έναρξη	62	485	2.30	1.12
+20 min	41	551	2.71	1.49
+20 min	30	580	2.89	1.68
+20 min	28	594	2.98	1.77
+20 min	27	602	3.07	1.85
+20 min	26	608	3.12	1.90
+20 min	26	609	3.12	1.90
<b>Τροφοδοσία TEC στα 5V και ανεμιστηράκι</b>				
Έναρξη	61	500	2.34	1.17
+20 min	35	574	2.88	1.65
+20 min	29	595	3.01	1.79
+20 min	28	599	3.04	1.82
+20 min	26	601	3.06	1.84
+20 min	25	602	3.06	1.84
+20 min	25	608	3.09	1.88

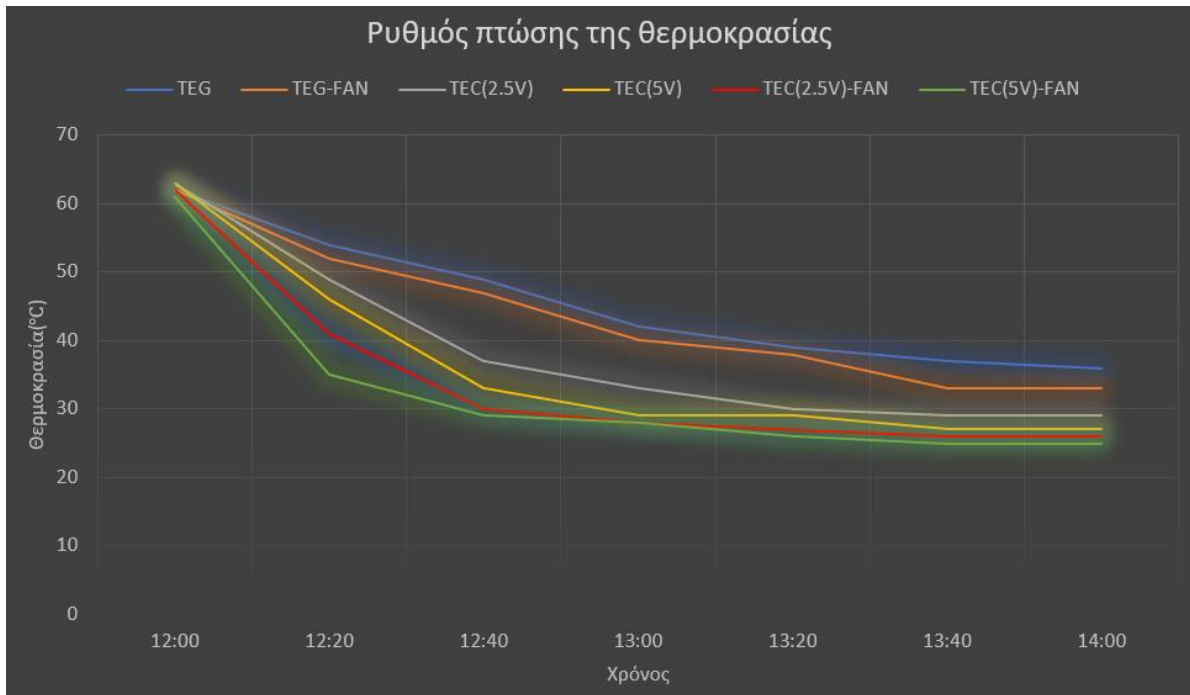
### 5.2.6 Πορίσματα που εξάγονται από τις μετρήσεις

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται γραφικά η διακύμανση των διάφορων μεγεθών συναρτήσει του χρόνου και της θερμοκρασίας κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.

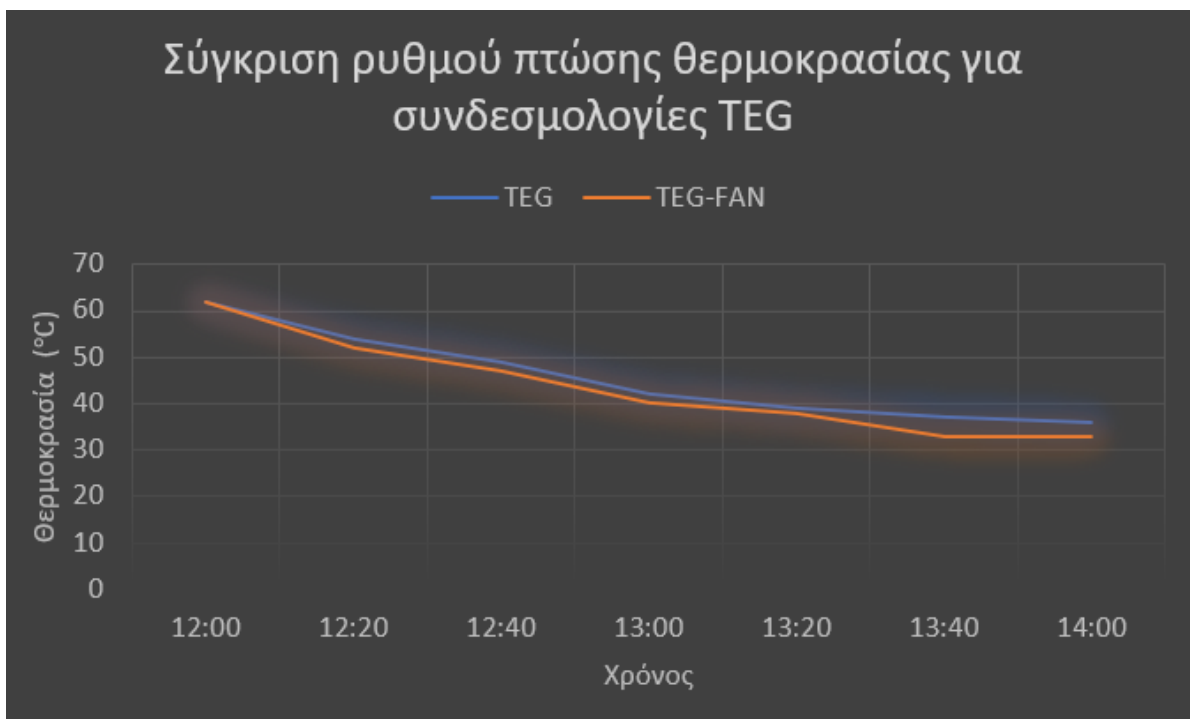
Σημειώνεται ότι ο οριζόντιος άξονας του χρόνου επιλέχθηκε να είναι ενιαίος για απεικονιστικούς σκοπούς. Τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία ελήφθησαν οι μετρήσεις είναι τα ίδια, αλλά προφανώς δεν έγιναν όλα τα πειράματα την ίδια ώρα.



Σχήμα 5-19: Διακύμανση ισχύος εξόδου με τη θερμοκρασία για ψύξη με χρήση TEC

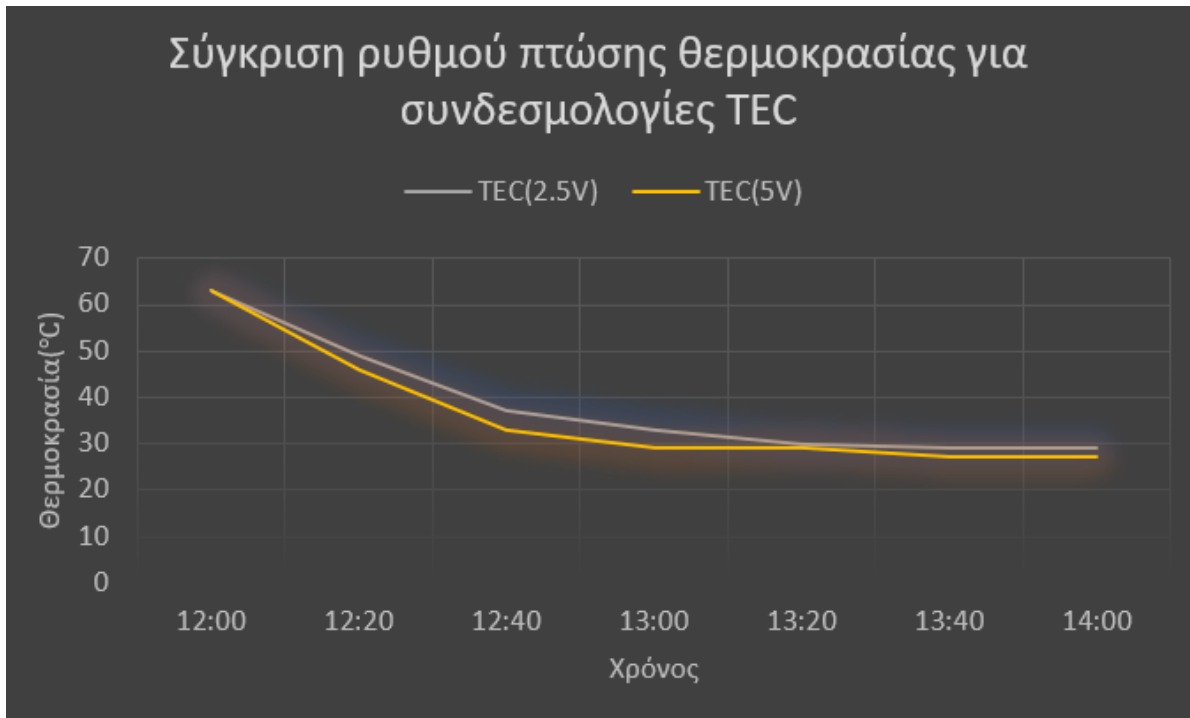


Σχήμα 5-20: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας για τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν

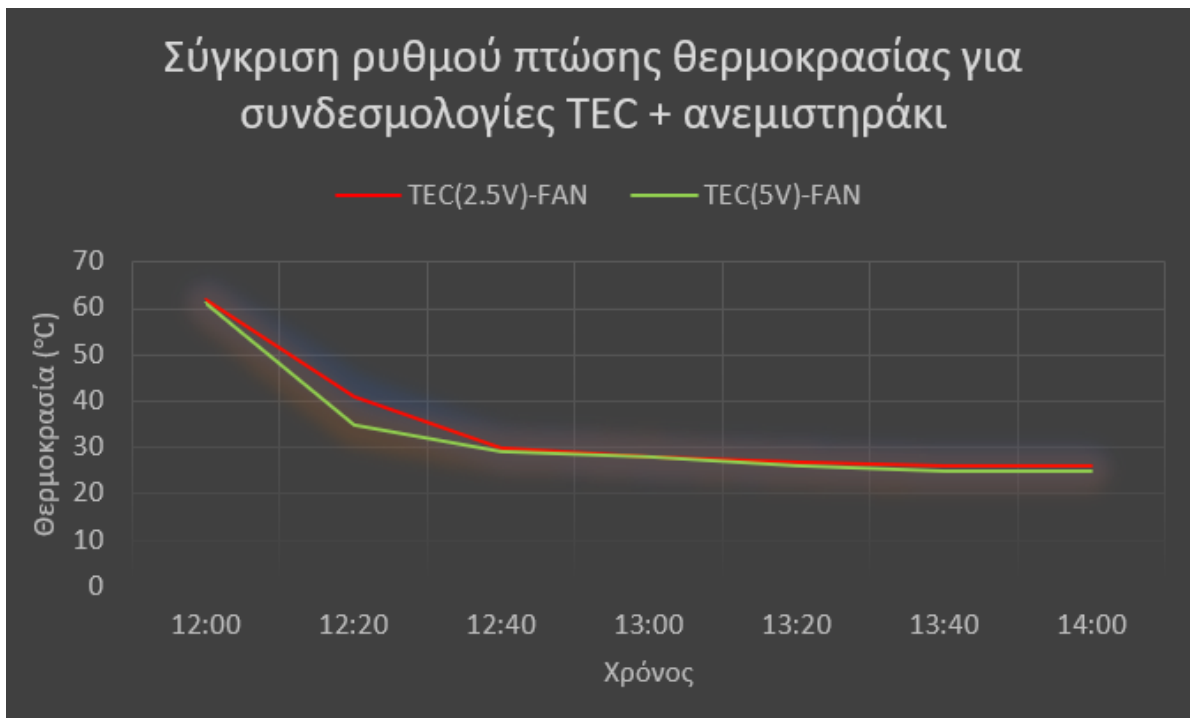


Σχήμα 5-21: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας για τις συνδεσμολογίες TEG

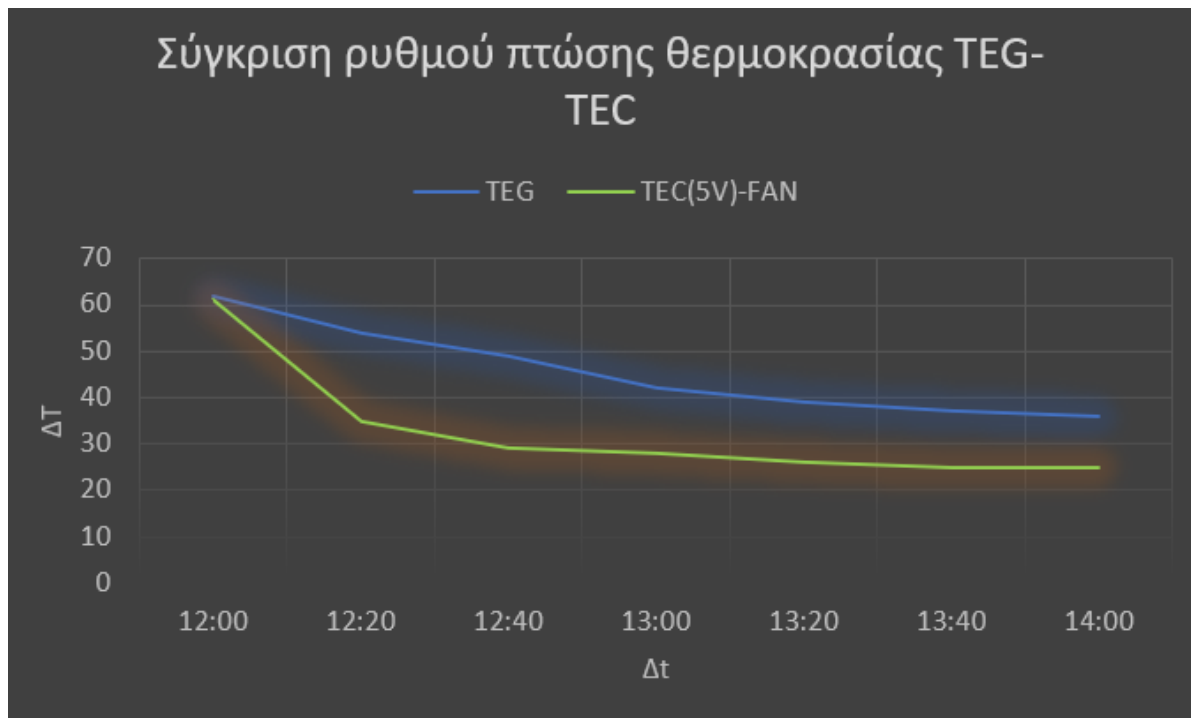




Σχήμα 5-22: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας για τις συνδεσμολογίες TEC



Σχήμα 5-23: Σύγκριση θερμοκρασιών στις συνδεσμολογίες TEC με ανεμιστηράκι



Σχήμα 5-24: Σύγκριση ρυθμού πτώσης θερμοκρασίας μεταξύ περίπτωσης TEG και TEC σε συνδυασμό με ανεμιστηράκι

### 5.2.7 Σύγκριση μετρούμενων μεγεθών – σχολιασμός αποτελεσμάτων

- Ψύξη με TEG: Στην περίπτωση όπου επέδρασε μόνο το θερμοηλεκτρικό, παρατηρήθηκε σαφής βελτίωση της αποδιδόμενης ισχύος του υβριδικού συστήματος κατά ποσοστό 4.6% με παράλληλη ελάττωση της θερμοκρασίας του κελιού κατά 26 βαθμούς. Η αύξηση της ισχύος που παρατηρήθηκε, αποτυπώνεται και στο Σχήμα 5-19 όπου φαίνεται ότι η ισχύς αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την ελάττωση της θερμοκρασίας του κελιού. Σημειώνεται ότι η αύξηση της ισχύος γίνεται με έναν σταθερό ρυθμό. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκε και ανεμιστηράκι, λόγω της εισαγωγής καταναλισκόμενης ισχύος από αυτό, παρατηρείται μείωση στην παραγόμενη ισχύ του υβριδικού συστήματος. Η αποδιδόμενη ισχύς του κελιού αυτού καθαυτού παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 7.47%. ενώ επιτυγχάνεται πτώση της θερμοκρασίας του κελιού κατά 29 βαθμούς με ρυθμό πιο γρήγορο σε σύγκριση με αυτόν που παρατηρείται στην περίπτωση μόνο με το TEG, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-21. Βέβαια, ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας και στις δυο περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζει μια ομαλότητα. Οπότε συμπερασματικά, στην περίπτωση όπου γίνεται εξέταση του πειράματος υπό το πρίσμα της βελτίωσης της παραγωγής ισχύος του συστήματος, τότε αυτή

πράγματι παρατηρείται κατά τη μεμονωμένη λειτουργία TEG. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση όπου κρίνεται σκόπιμη η ταχεία ελάττωση της θερμοκρασίας του κελιού, ανεξάρτητα από τις μεταβολές στην αποδιδόμενη ισχύ του συστήματος, εφαρμογή βρίσκει ο συνδυασμός TEG και ανεμιστήρα.

- Ψύξη με TEC: Σε αυτή τη διάταξη μετρήθηκε ελάττωση της θερμοκρασίας κατά 34 και 36 βαθμούς για τάση λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού 2.5V και 5V αντίστοιχα. Αναφορικά με τη μεμονωμένη ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού, αυτή παρουσίασε αύξηση σε ποσοστά 8% και 9.1% αντίστοιχα. Η ισχύς του υβριδικού συστήματος, ωστόσο παρουσίασε ελάττωση λόγω της καταναλισκόμενης ισχύος του θερμοηλεκτρικού, για αυτό και εν προκειμένω δεν εξετάζεται η διακύμανσή της. Παρατηρήθηκε επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η θερμοκρασία του κελιού στην περίπτωση τροφοδοσίας του θερμοηλεκτρικού με 5V παρουσίασε μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης σε σύγκριση με την περίπτωση τροφοδοσίας με 2.5V, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-22. Κατά το συνδυασμό λειτουργίας TEC και ανεμιστήρα μετρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας κατά 36 βαθμούς και για τις δυο περιπτώσεις τροφοδοσίας του θερμοηλεκτρικού. Η ισχύς του φωτοβολταϊκού παρουσίασε αύξηση κατά 9.1% και 6.89% για τις δυο τιμές τροφοδοσίας αντίστοιχα, ενώ η ισχύς του συνολικού συστήματος υπέστη μείωση. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-23, η θερμοκρασία παρουσιάζει πιο απότομη ελάττωση στην αρχή των καμπυλών, με αυτή που αντιστοιχεί στα 5V τροφοδοσία να έχει πιο ραγδαία μεταβολή. Από ένα σημείο και μετά, στο οποίο φτάνουν και την ελάχιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνουν, οι καμπύλες σταθεροποιούνται μέχρι το τέλος του πειράματος.
- Σύγκριση των μεθόδων που υλοποιήθηκαν: Οι μέθοδοι που υλοποιήθηκαν μπορούν να συγκριθούν ως προς την αποτελεσματικότητα της ψύξης τους. Η λειτουργία Peltier του θερμοηλεκτρικού έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη πιο χαμηλών θερμοκρασιών και σε πιο μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης, σε κάθε περίπτωση η υποβοήθηση από τη λειτουργία του ανεμιστήρα οδηγεί σε πολύ καλύτερα θερμοκρασιακά αποτελέσματα. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ψύξη με τη χρήση TEG είναι σταθερή και συντελεί στη συνολική αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος και συνεπώς του ρυθμού απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος, ωστόσο μη ελεγχόμενη. Με αυτό εννοείται ότι η ψύξη, λόγω της

παθητικής φύσης της διαδικασίας, διενεργείται με έναν σταθερό ρυθμό που δεν μπορεί να επιταχυνθεί. Από την άλλη μεριά, η ψύξη με χρήση TEC μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα. Μάλιστα, το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με την αύξηση της τάσης τροφοδοσίας του θερμοηλεκτρικού ή και το συνδυασμό λειτουργίας θερμοηλεκτρικού και ανεμιστήρα με αποτέλεσμα να επιτευχθεί ως και ακαριαία ψύξη του φωτοβολταϊκού. Στο Σχήμα 5-24 αντιπαραβάλλονται οι δυο ακραίες περιπτώσεις του πειράματος, η ψύξη μόνο με TEG και η ψύξη με συνδυασμό TEC σε τροφοδοσία 5V και ανεμιστήρα. Παρατηρείται ότι σε διάστημα 20 λεπτών, στην περίπτωση του TEC, η θερμοκρασία έχει ελαττωθεί κατά 26 βαθμούς, τιμή που αντιστοιχεί στο 72% της συνολικής μείωσης που επιδέχεται σε αυτές τις συνθήκες. Στο ίδιο χρονικό διάστημα, η μείωση που έχει επιτευχθεί με τη χρήση TEG είναι 7 βαθμοί, ποσοστό που αντιστοιχεί στο 28% της συνολικής μείωσης. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η ψύξη που επιτυγχάνεται με σύστημα Peltier είναι πολύ πιο αποτελεσματική αναφορικά με την πτώση της θερμοκρασίας του κελιού, τόσο χρονικά, όσο και ποιοτικά. Αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό που αναφέρθηκε καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη τη μέθοδο ψύξης με TEC για εφαρμογές φωτοβολταϊκών όπως τα περοβσκιτικά κελιά, οι ιδιότητες των οποίων καταστρέφονται αν η θερμοκρασία τους ξεπεράσει ένα -σχετικά χαμηλό-κατώφλι θερμοκρασίας περί τους 50 βαθμούς. Σε μια τέτοια περίπτωση, η άμεση αντιμετώπιση της αύξησης θερμοκρασίας είναι απαραίτητη προκειμένου να μην καταστραφεί το σύστημα.



## 6 Συμπεράσματα

Έπειτα από τη μελέτη του θέματος της ψύξης φωτοβολταϊκών στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πειραματικό επίπεδο, εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία και καταγράφονται στο παρόν κεφάλαιο.

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι μια πολλά υποσχόμενη και συνεχώς εξελισσόμενη λύση στο μείζον πρόβλημα της εξάντλησης των ορυκτών πόρων και καυσίμων. Το αδύναμο σημείο αυτής της τεχνολογίας είναι η ελάττωση της αποδιδόμενης ισχύος από την αναπόφευκτη αύξηση της θερμοκρασίας των κελιών. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη μεθόδων ψύξης φωτοβολταϊκών είναι ένα πολύ κρίσιμο αντικείμενο μελέτης.

Στην παρούσα εργασία έγινε εστίαση στην ψύξη φωτοβολταϊκών με χρήση θερμοηλεκτρικών συσκευών και συγκεκριμένα στην κατασκευή πειραματικής διάταξης που υλοποιεί αυτή τη διαδικασία. Έπειτα από την ανάπτυξη και δοκιμή για κατάλληλο χρονικό διάστημα του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος κελιού πολυκρυσταλλικού πυριτίου που αναλύθηκε στα παραπάνω κεφάλαια προέκυψε ότι λειτούργησε, ως ένα βαθμό, σύμφωνα με τον αναμενόμενο τρόπο. Ειδικότερα κατά τη λειτουργία του θερμοηλεκτρικού ως TEG σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck, παρατηρήθηκε αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος του συστήματος κατά ποσοστό 4.6% με παράλληλη μείωση της θερμοκρασίας του κελιού κατά 26 βαθμούς. Στην προσπάθεια ενίσχυσης του φαινομένου αυτού με ενσωμάτωση ενός μικρού ανεμιστήρα προέκυψε ότι η αποδιδόμενη ισχύς του κελιού βελτιώθηκε, ενώ συνολικά του υβριδικού συστήματος μειώθηκε λόγω της κατανάλωσης του ανεμιστήρα. Κατά τη λειτουργία του θερμοηλεκτρικού ως TEG, συσκευή Peltier, αποδείχθηκε ότι η ψύξη που επιτυγχάνεται με αυτή τη συνδεσμολογία είναι πιο άμεση και αποτελεσματική (μείωση θερμοκρασίας κατά 34-36 βαθμούς). Ωστόσο, παρόλο που δεν κατέστη δυνατό να υπολογιστεί αριθμητικά κάποιο άμεσο κέρδος ισχύος του υβριδικού συστήματος -εξαιτίας της καταναλισκόμενης ισχύος που δαπανάται για την ψύξη- τα οφέλη στην απόδοση φαίνονται σε βάθος χρόνου, όπου η ψύξη με μέθοδο Peltier διατηρεί την απόδοση σε ποσοστά 99%-101% για όλο το χρόνο ζωής του πραγματικού συστήματος (20-25 χρόνια). Στην προσπάθεια περαιτέρω ενίσχυσης του φαινομένου ψύξης ενσωματώθηκε και σε αυτή τη διάταξη ανεμιστηράκι, η λειτουργία του οποίου οδήγησε σε αρνητικό

ισοζύγιο ισχύος για το υβριδικό σύστημα. Βέβαια σε αυτή την περίπτωση, η πτώση της θερμοκρασίας του ήταν ακόμα πιο ραγδαία.

Συμπερασματικά, έπειτα από την εργαστηριακή μελέτη της ψύξης φωτοβολταϊκού με θερμοηλεκτρικές συσκευές επαληθεύτηκε η αρχική εκτίμηση για τη σύγκριση των δυο μεθόδων, υπό το πρίσμα της υλοποίησής τους στο πλαίσιο του πειράματος που πραγματοποιήθηκε. Η μέθοδος που βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck αποδεικνύεται πιο αποδοτική καθώς επιτυγχάνει τη μείωση της θερμοκρασίας με παράλληλη αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος του υβριδικού συστήματος. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος Peltier δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα ψύξης, τόσο χρονικά όσο και ποιοτικά. Η μέθοδος αυτή, όπως υλοποιήθηκε και εξετάστηκε ως προς την ψυκτική της ικανότητα, θα ήταν χρήσιμη σε κάποια εφαρμογή όπου απαιτείται σχεδόν ακαριαία μείωση θερμοκρασίας λειτουργίας φωτοβολταϊκού, όπως σε εφαρμογές περοβσικιτικών κελιών. Παράλληλα, τονίζεται ότι η ικανότητα διατήρησης της απόδοσης του συστήματος σε βάθος χρόνου, αποτελεί σημαντικό παράγοντα που οδηγεί σε πολλές περιπτώσεις στην απόφαση χρήσης υβριδικού συστήματος Peltier έναντι του Seebeck.

## 7 Ιδέες για μελλοντική εργασία

Η διάταξη που αναπτύχθηκε λειτούργησε ικανοποιητικά για τα δεδομένα υπό τα οποία δοκιμάστηκε, ωστόσο σαφώς υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης του συστήματος.

Αρχικά, είναι σκόπιμο να αναπτυχθεί σύστημα στο οποίο η παραγόμενη ισχύς του υβριδικού συστήματος να είναι μεγαλύτερη από την καταναλισκόμενη ισχύ για την ψύξη του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη μελέτη του συστήματος ψύξης και του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προς αυτό το σκοπό χρειάζεται να εγκατασταθούν συνδεδεμένα σε σειρά περισσότερα φωτοβολταϊκά κελιά προκειμένου η παραγόμενη ισχύς να αυξηθεί. Συγχρόνως, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η ενσωμάτωση ψύκτρας μεγαλύτερων διαστάσεων καθώς και η λειτουργία των θερμοηλεκτρικών σε χαμηλότερες τιμές τροφοδοσίας (για το TEC) και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ώστε να βρεθούν πειραματικά οι συνθήκες στις οποίες θα μπορούσε το υβριδικό σύστημα να λειτουργήσει με θετικό ισοζύγιο ισχύος σε κάθε περίπτωση.

Επιπλέον, στο ίδιο πλαίσιο μπορούν να γίνουν δοκιμές με ανατροφοδότηση και του ανεμιστήρα για ενίσχυση της ψύξης και δοκιμές ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο ισοζύγιο και η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας.

Αφού ρυθμιστούν τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να γίνουν δοκιμές με το είδος και τα χαρακτηριστικά του θερμοηλεκτρικού και του φωτοβολταϊκού κελιού με γνώμονα τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Αναλυτικότερα, μπορούν να γίνουν δοκιμές σχετικά με το χρησιμοποιούμενο κελί αλλά και τη θερμοηλεκτρική συσκευή. Αναφορικά με το κελί, εκτός από τη δοκιμή διαφόρων τεχνολογιών στο πλαίσιο του υβριδικού συστήματος, μπορεί να δοκιμαστεί και περοβσικτικό κελί προκειμένου να επαληθευθεί πειραματικά η αποτελεσματικότητα της ψύξης με χρήση Peltier σε αυτή την περίπτωση.

Συγχρόνως, για την επέκταση της παρούσας εργασίας, είναι σκόπιμο να γίνουν δοκιμές σε κάθε περίπτωσης μελέτης και σε πραγματικές συνθήκες ηλιοφάνειας, δηλαδή σε εξωτερικό περιβάλλον.

Τέλος, μια επέκταση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να αποτελέσει η ανάπτυξη συστήματος αυτόματης αναγνώρισης της ανόδου της θερμοκρασίας ενός κελιού και ρύθμισης αυτής.





## 8 Βιβλιογραφία

- [1] G. K. Singh, "Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review," *Energy*, vol. 53, pp. 1–13, May 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.02.057.
- [2] "Monocrystalline Cells vs. Polycrystalline Cells: What's the Difference? | Greentech Renewables," Dec. 12, 2017. <https://www.greentechrenewables.com/article/monocrystalline-cells-vs-polycrystalline-cells-whats-difference> (accessed Mar. 22, 2023).
- [3] ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Θ. ΔΕΡΒΟΣ | metabook.gr. Accessed: Mar. 22, 2023. [Online]. Available: <https://metabook.gr/books/fotovoltaika-systhmata-konstantinos-th-derbos-198792>
- [4] S. O. Kasap, *Principles of electronic materials and devices*, 3rd ed. Boston London: McGraw-Hill, 2006.
- [5] C. Soumya, B. Deepanraj, and J. Ranjitha, "A review on solar photovoltaic systems and its application in electricity generation," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2396, no. 1, p. 020011, Sep. 2021, doi: 10.1063/5.0066291.
- [6] "UCLA Develops Electricity-Generating, Transparent Solar Cell Windows," *Inhabitat - Green Design, Innovation, Architecture, Green Building | Green design & innovation for a better world*, Jul. 23, 2012. <https://inhabitat.com/ucla-develop-electricity-generating-transparent-solar-cell-windows/> (accessed Mar. 22, 2023).
- [7] A. E. Dixon, "16 - PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION: THEORY, PRESENT AND FUTURE SOLAR CELLS," in *Solar Energy Conversion II*, A. F. Janzen and R. K. Swartman, Eds. Pergamon, 1981, pp. 243–259. doi: 10.1016/B978-0-08-025388-6.50037-4.
- [8] H.-Z. B. für M. und Energie, "Multi junction CIGS cells," HZB Website. [https://www.helmholtz-berlin.de/projects/pvcomb/forschen/cigs/cigsmulti\\_en.html](https://www.helmholtz-berlin.de/projects/pvcomb/forschen/cigs/cigsmulti_en.html) (accessed Mar. 22, 2023).
- [9] K. Vijayakumar, "A case for Building Integrated Photovoltaics (BIPV)," *Solarify*, Feb. 23, 2018. <https://solarify.in/blog/buildings-integrated-photovoltaics/> (accessed Mar. 22, 2023).
- [10] A. I. Fedoseyev, M. Turowski, A. Raman, Q. Shao, and A. A. Balandin, "Multiscale Models of Quantum Dot Based Nanomaterials and Nanodevices for Solar Cells," in *Computational Science – ICCS 2008*, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 242–250. doi: 10.1007/978-3-540-69387-1\_27.
- [11] H. Kamak, "How are solar panels made? A simple explanation.," *Solarify*, Oct. 22, 2019. <https://solarify.in/blog/how-are-solar-panels-made/> (accessed Mar. 22, 2023).
- [12] H. Haloui, K. Touafek, M. Zaabat, H. B. cheikh el hocine, and A. Khelifa, "The Copper Indium Selenium (CuInSe<sub>2</sub>) thin Films Solar Cells for Hybrid Photovoltaic Thermal Collectors (PVT)," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 1213–1219, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.765.
- [13] Laboratoire des Matériaux et Structure des Systèmes Electromécaniques et leur Fiabilité (LMSSEF) Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi, Algérie E-mail:

- abdelmah@yahoo.com and A. Mahdjoub, "Reflection loss minimization for a ZnO/CdS/CuInSe<sub>2</sub> photovoltaic cell," *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.*, vol. 16, no. 4, pp. 379–381, Dec. 2013, doi: 10.15407/spqeo16.04.379.
- [14] "Solar panels on spacecraft," Wikipedia. Feb. 18, 2023. Accessed: Mar. 22, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar\\_panels\\_on\\_spacecraft&oldid=1140019048](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_panels_on_spacecraft&oldid=1140019048)
- [15] "Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες και Εφαρμογές στα Φωτοβολταϊκά και την Αυτοκινητοβιομηχανία - PDF ΔΩΡΕΑΝ Λήψη." <https://docplayer.gr/11144903-Thermoilektrikes-gennitries-kai-efarmoges-sta-fotovoltaika-kai-tin-aytokinitoviomihania.html> (accessed Mar. 22, 2023).
- [16] S. Siah Chehreh Ghadikolaei, "Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: An overall review," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 18, pp. 10939–10972, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.164.
- [17] D. N. Kossyvakis, E. V. Hristoforou, P. Falaras, and A. Kaltzoglou, "Optimum coupling of photovoltaic devices and Peltier coolers for improved performance and stability," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 41, no. 11, pp. 1667–1693, Dec. 2022, doi: 10.1080/14786451.2022.2092481.
- [18] P. Azimi, A. Shahsavar, and N. Azimi, "Using high-frequency ultrasonic and thermoelectric generators to enhance the performance of a photovoltaic module," *J. Clean. Prod.*, vol. 350, p. 131393, May 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131393.
- [19] S. Kiwan, H. Ahmad, A. Alkhalidi, W. O. Wahib, and W. Al-Kouz, "Photovoltaic Cooling Utilizing Phase Change Materials," *E3S Web Conf.*, vol. 160, p. 02004, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202016002004.
- [20] H. Najafi and K. A. Woodbury, "Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells," *Sol. Energy*, vol. 91, pp. 152–160, May 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.01.026.
- [21] E. N. F. Ltd, "ENF Ltd." <https://www.ensolar.com/pv/cell-datasheet/349> (accessed Mar. 23, 2023).
- [22] "Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies: iScience." [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(21\)00133-4?\\_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004221001334%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(21)00133-4?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004221001334%3Fshowall%3Dtrue) (accessed Mar. 22, 2023).