



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Diploma Thesis

Study of PV System Installation in a permanent residence

by

KOLOKOTRONIS STYLIANOS

Supervisor: Prof. Panagiotis Tsiakaras

Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Science "Analysis and Management in Energy Systems" at the University of Thessaly

Volos, 2025



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Εγκατάστασης Φ/Β Συστήματος σε μόνιμη κατοικία

υπό

ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗ ΣΤΥΛΙΑΝΟΥ

Επιβλέπων: Καθηγητής Παναγιώτης Τσιακάρας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του τίτλου σπουδών στο
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Ανάλυση και Διαχείριση Ενεργειακών Συστημάτων» στο
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος, 2025

© 2024 STYLIANOS KOLOKOTRONIS

All rights reserved. The approval of the present Diploma Thesis by the Master in Science ADES, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Thessaly, does not imply acceptance of the views of the author (Law 5343/32 art. 202).

Approved by the Committee on Final Examination

Advisor Dr. Panagiotis Tsiakaras
Professor
Department of Mechanical Engineering
University of Thessaly

Member Dr. Angeliki Brouzgou
Assistant Professor
Department of Energy Systems
Faculty of Technology
University of Thessaly

Member Dr. Georgios Charalampous
Associate Professor
Department of Mechanical Engineering
University of Thessaly

ABSTRACT

This thesis examines the design, cost estimation, and implementation of a 10 kW autonomous photovoltaic (PV) system for residential use. Positioned within the broader context of electrochemistry and renewable energy, the study aims to assess how such systems can meet household energy demands while promoting energy independence and environmental sustainability. The work addresses technical, economic, and environmental aspects and is intended as a practical reference for engineers and homeowners alike.

The first section introduces the basic concepts and classifications of PV technologies, including monocrystalline and polycrystalline systems. It outlines how PV systems operate, focusing on the photovoltaic effect, in which sunlight is converted into electricity via semiconductor materials—primarily silicon. The role of dopants like boron and phosphorus in creating the p-n junction is explained. The section also reviews site-related factors such as solar orientation, tilt angle, and shading, which influence energy yield.

The second chapter explores the electrochemical components that support PV systems, particularly in autonomous configurations. Devices such as fuel cells, lithium-ion batteries, supercapacitors, and catalysts are analyzed for their ability to store and manage energy. These technologies enable energy availability during low solar periods and improve overall system efficiency and resilience.

The third section discusses the physical principles and material technologies that underlie PV cell function. In addition to silicon-based systems, newer materials and trends—such as bifacial panels and perovskite solar cells—are briefly introduced as part of the evolving PV landscape.

The practical part of the thesis focuses on designing a 10 kW stand-alone PV system for a typical residence. The study identifies key components: solar panels, mounting structures, batteries, inverters, and wiring. System sizing is based on average household loads, and the necessary surface area, battery capacity, and inverter specifications are calculated accordingly. A detailed cost breakdown is provided, covering equipment, installation, and operational considerations.

Results from performance simulations indicate that the system can achieve high levels of energy independence—over 70% annually—while reducing reliance on the power grid.

In conclusion, the thesis demonstrates that autonomous PV systems are technically feasible and economically reasonable for residential applications. They contribute to the decentralization of energy production, lower environmental impact, and align with national and global sustainability goals. This work provides a structured framework for future installations and supports wider implementation of clean energy technologies in the residential sector.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού (ΦΒ) συστήματος ισχύος 10 kW για χρήση σε μόνιμη κατοικία, συνδυάζοντας γνώσεις ηλεκτροχημείας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σκοπός είναι η παρουσίαση των τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων που απαιτούνται για την επιλογή, εγκατάσταση και λειτουργία ενός αποδοτικού και βιώσιμου ενεργειακού συστήματος.

Αρχικά, αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων και τα είδη φωτοβολταϊκών κυψελών, όπως τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά πλαίσια, καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους ανάλογα με τις ανάγκες της κατοικίας. Παρέχονται οδηγίες για την επιλογή υλικών και εξοπλισμού, καλύπτοντας τόσο τον μηχανικό όσο και τον καταναλωτή.

Στη συνέχεια, εξετάζονται ηλεκτροχημικές συσκευές μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας, όπως κυψέλες καυσίμου, ηλεκτροχημικοί υπερπυκνωτές και μπαταρίες, που ενισχύουν την απόδοση και αυτονομία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Το τρίτο μέρος αναφέρεται στις φυσικοχημικές αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυψελών, εστιάζοντας στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, στη λειτουργία των ημιαγωγών και στην κατασκευή του p-n ημιαγωγού. Ειδική προσοχή δίνεται στο ρόλο του πυριτίου και των προσμίξεων, όπως το βόριο και ο φώσφορος, που είναι κρίσιμα για την αποτελεσματική μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την τεχνική ανάλυση και προμελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος, με λεπτομερή περιγραφή των βασικών μερών του: φωτοβολταϊκά πλαίσια, βάσεις στήριξης, αντιστροφέας, μπαταρίες, καλώδια και συνδέσεις. Υπολογίζονται η απαιτούμενη επιφάνεια εγκατάστασης, ο αριθμός των μπαταριών και η ισχύς του αντιστροφέα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Επιπλέον, παρουσιάζεται αναλυτικός πίνακας κόστους εξοπλισμού και εγκατάστασης.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης, τα οποία επιβεβαιώνουν τη βιωσιμότητα και αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού. Η προσομοίωση δείχνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση κόστους λειτουργίας και αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας, καθιστώντας το σύστημα τεχνικά εφικτό και οικονομικά συμφέρον. Παράλληλα, αναδεικνύονται τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών ρύπων και την πράσινη μετάβαση. Συνολικά, η εργασία αποδεικνύει ότι ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 10 kW αποτελεί μια ρεαλιστική και βιώσιμη λύση για την κάλυψη των σύγχρονων ενεργειακών απαιτήσεων σε οικιακό επίπεδο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

-ABSTRACT	σελ.5
-ΠΕΡΙΛΗΨΗ	σελ.6
-ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	σελ.7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	σελ.14
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	σελ.14
1.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	σελ.15
1.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	σελ.15
1.5 ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	σελ.16
1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	σελ.17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.18
2.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	σελ.18
2.2.1 Αιολική ενέργεια	σελ.18
2.2.2 Υδροηλεκτρική Ενέργεια	σελ.18
2.2.3 Βιομάζα	σελ.18
2.2.4 Υδρογόνο	σελ.19
2.3 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	σελ.19
2.3.1 Μετατροπή ενέργειας	σελ. 20
2.3.1.1 Κυψέλες Καυσίμου	σελ.20
2.3.1.1.α Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)	σελ.20
2.3.1.1.β Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)	σελ.20
2.3.1.1.γ Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)	σελ.21
2.3.1.1.δ Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου	
2.3.1.2 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες	σελ.22
2.3.1.2.α Αμπερομετρικοί ή Βολτομετρικοί Μέθοδος Ανίχνευσης	σελ.23
2.3.1.2.β Ποτενσιομετρικοί Μέθοδος Ανίχνευσης	σελ.24
2.3.1.3 Ηλεκτρολύτες	σελ.24
2.3.2 Αποθήκευση Ενέργειας	σελ.26
2.3.2.1 Υπερπυκνωτές	σελ.26

2.3.2.1.α Ηλεκτροχημικοί Πυκνωτές Διπλού Στρώματος (EDLCs)	σελ.27
2.3.2.1.β Ψευδοπυκνωτές	σελ.28
2.3.2.1.γ Υβριδικοί υπερπυκνωτές (HCs)	σελ.28
2.3.2.2 Μπαταρίες	σελ.29
2.3.2.2.α Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion)	σελ.29
2.3.2.2.β Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος (Pb-A)	σελ.30
2.3.2.2.γ Μπαταρίες Νικελίου Καδμίου (Ni-Cd)	σελ.30
2.3.2.2.δ Μπαταρίες Μετάλλου-Αέρα (MAB)	σελ.31
2.3.2.3 Υδρογόνο: Παραγωγή και Χρήση	σελ.33
2.3.2.3.α Ηλεκτρόλυση νερού	σελ.33
2.3.2.3.α.1 Ηλεκτρόλυση νερού χαμηλής θερμοκρασίας	σελ.33
2.3.2.3.α.2 Ηλεκτρόλυση νερού υψηλής θερμοκρασίας	σελ.34
2.3.2.3.α.3 Διαχωρισμός Νερού	σελ.35
2.3.4 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	σελ.36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ	
3.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ	σελ.39
3.1.1 Εισαγωγή	σελ.39
3.1.1.α Ημιαγωγοί	σελ.39
3.1.1.β Ημιαγωγοί ντοπαρίσματος	σελ.40
3.1.1.γ Η ένωση p-n	σελ.40
3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ	σελ.41
3.2.1 Παραγωγή πολυπυριτίου	σελ.41
3.2.2 Παραγωγή μονοκρυσταλλικού πυριτίου	σελ.42
3.2.3 Παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου	σελ.42
3.2.3.α Παραγωγή ηλιακών κυψελών	σελ.43
3.2.4 Τύποι ηλιακών συλλεκτών	σελ.44
3.2.4.1 Συστήματα Αέρα (Air PVT)	σελ.44
3.2.4.2 Συστήματα Νερού (Water-Based Systems)	σελ.45
3.2.4.3 Συστήματα Bi-fluid (Bi-fluid Systems)	σελ.45
3.2.4.4 Φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα βασισμένα σε σωλήνες θερμότητας (Heat Pipe based PVT Systems)	σελ.46
3.2.4.5 Φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα με βάση τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM PVT Systems)	σελ.47

3.2.5 Ηλιακές κυψέλες	σελ.48
3.2.6 Ηλιακές κυψέλες λεπτής μεμβράνης	σελ.49
3.2.6.1 Κελιά άμορφου πυριτίου (a-Si)	σελ.49
3.2.6.2 Κελιά τελλουριούχου-κάδμιου (CdTe)	σελ.49
3.2.6.3 Ηλιακή κυψέλη σεληνιούχου-γαλλίου/ ινδίου-χαλκού (CIGS)	σελ.49
3.3 Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ	σελ.50
3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	σελ.50
3.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΕΛΙΑ: ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	σελ.51
3.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ-ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	σελ.52
3.6.1 Θέρμανση Πισίνας	σελ.52
3.6.2 Ηλιακή ψύξη με συλλέκτες φωτοβολταϊκών-θερμικών συστημάτων	σελ.53
3.6.3 Αφαλάτωση Νερού	σελ.54
3.6.4 Θερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας	σελ.55
3.6.5 Ηλιακός στεγνωτήρας	σελ.55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΝΕΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.57
4.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	σελ.57
4.2.1 Βαφής – Ευαισθητοποιημένες Ηλιακές Κυψέλες (DSSCs)	σελ.57
4.2.2 Ηλιακές Κυψέλες με Κβαντικές Κουκκίδες (QDSCs)	σελ.58
4.2.3 Ηλιακές Κυψέλες Πολλαπλών Διακλαδώσεων	σελ.59
4.2.4 Ηλιακές Κυψέλες Περοβσκήτη	σελ.60
4.2.5 Οργανικές Ηλιακές Κυψέλες	σελ.61
4.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΤΕΤΑΡΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	σελ.61
4.3.1 Εφαρμογές Γραφενίου στα Φωτοβολταϊκά	σελ.61
4.3.2 Διπλής Όψης Φωτοβολταϊκά Πάνελ (Bifacial PV)	σελ.62
4.3.3 Ενσωματωμένα σε Κτίρια Φωτοβολταϊκά (BIPV)	σελ.63
4.3.4 Έξυπνα ενεργειακά δίκτυα (Smart Grids)	σελ.63
4.3.5 Πλωτά Φωτοβολταϊκά (Floating PV Panels)	σελ.64
4.3.6 Ηλιακά Δέντρα (Solar Trees)	σελ.66
4.4 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	σελ.67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
5.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	σελ.69
5.1.1 Επίγεια ηλιακή μονάδα (Σταθερή)	σελ.70
5.1.2 Σύστημα Ηλιακής Παρακολούθησης	σελ.70

5.1.3 Συστήματα Ηλιακής Μονάδας στην Οροφή	σελ.72
5.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ (INVERTERS)	σελ.72
5.2.1 Μετατροπέας Εκτός Δικτύου (off-grid connection)	σελ.75
5.2.2 Μετατροπέας Δικτυού (grid connection)	σελ.76
5.2.3 Απαραίτητοι Παράμετροι Λειτουργίας	σελ.77
5.2.3.1 Βαθμός Απόδοσης	σελ.77
5.2.3.2 Το φαινόμενο της νησιδοποίησης (islanding)	σελ.77
5.2.3.3 Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος	σελ.78
5.2.3.4 Σημείο Βέλτιστης Λειτουργίας (MPPT)	σελ.78
5.2.3.5 Περιορισμένη Λειτουργία Ισχύος	σελ.78
5.3 ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ	σελ.79
5.3.1 Καλώδιο AC	σελ.79
5.3.2 Καλώδιο AC Ισχύος	σελ.79
5.3.3 Καλώδιο DC	σελ.80
5.3.4 Καλωδίωση Σηματοδοσίας	σελ.80
5.4 ΓΕΙΩΣΗ	σελ.81
5.5 ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	σελ.81
5.6 ΚΑΘΑΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ (NET METERING)	σελ.82
5.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΒΛΕΨΗΣ	σελ.83
5.8 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΕΡΩΝ	σελ.83
5.8.1 Επεξήγηση του Χώρου Εγκατάστασης	σελ.83
5.8.2 Βάση Στήριξης Φ/Β Πλαισίων	σελ.84
5.8.3 Επιλογή Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	σελ.84
5.8.4 Επιλογή Μετατροπέα Τάσης	σελ.85
5.8.5 Επιλογή Αντικεραυνικής Προστασίας	σελ.86
5.9 ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	σελ.87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
6.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	σελ.88
-ΑΝΑΦΟΡΕΣ	σελ.94

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Παγκόσμια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ανά περιοχή από το έτος 2014 έως 2024 [8].	σελ.15
Εικόνα 2 Ετήσια ηλιακή παραγωγή ανά ήπειρο [9].	σελ.16
Εικόνα 3 Ακαθάριστα ηλιακά πάνελ [10].	σελ.17

Εικόνα 4 Σκίαση από ένα ηλιακό θερμοσίφωνα [10].	σελ.17
Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση SOFC [14].	σελ.20
Εικόνα 6 Σχηματική Απεικόνιση της PEM [13].	σελ.21
Εικόνα 7 Απεικόνιση της κατασκευής και λειτουργίας μιας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου [13].	σελ.21
Εικόνα 8 Απεικόνιση λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου [14].	σελ.22
Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση αμπερομετρικής ή βολτομετρικής τεχνικής ανίχνευσης [45].	σελ.23
Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση ποτενσιομετρικής μέθοδος ανίχνευσης [47].	σελ.24
Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση της αποθήκευσης ενέργειας των υπερπυκνωτών διπλού στρώματος (EDLC) [20].	σελ.27
Εικόνα 12 Η δομή ενός ψευδοπυκνωτή [20].	σελ.28
Εικόνα 13 Η δομή ενός υδριβικού υπερπυκνωτή [20].	σελ.28
Εικόνα 14 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας ιόντων-λιθίου [1].	σελ.29
Εικόνα 15 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας μόλυβδου-οξέος [31].	σελ.30
Εικόνα 16 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας νικελίου-καδμίου [35].	σελ.31
Εικόνα 17 Δομή και λειτουργία μπαταρίας ψευδαργύρου-αέρα [37].	σελ.32
Εικόνα 18 Απεικόνιση της δομής μιας μπαταρίας Li-Air κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και των αντιδράσεων που συμβαίνουν της ανόδου και της καθόδου κατά την εκφόρτιση και τη φόρτιση, αντίστοιχα [40].	σελ.33
Εικόνα 19 Αρχές λειτουργίας της ηλεκτρόλυσης νερού χαμηλής θερμοκρασίας [48].	σελ.34
Εικόνα 20 Σχήμα ηλεκτρόλυσης υψηλής θερμοκρασίας [52].	σελ.35
Εικόνα 21 Σχήμα συστήματος δύο ηλεκτροδίων για συνολική διάσπαση νερού [53].	σελ.35
Εικόνα 22 Διάγραμμα ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος με εφεδρική μπαταρία, μετατροπέα, ελεγκτή και ενσωμάτωση μετρητή [58].	σελ.37
Εικόνα 23 Κρυσταλλική δομή του πυριτίου: Ατομικοί πυρήνες και ηλεκτρόνια σθένους (αριστερά). Κρυσταλλικό πλέγμα του GaAs (δεξιά) [62].	σελ.39
Εικόνα 24 Η ένωση P-N [64].	σελ.41
Εικόνα 25 Διαδικασία παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου [66].	σελ.42
Εικόνα 26 Μονοκρυσταλλικό - Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο [68].	σελ.43
Εικόνα 27 Στάδια κατασκευής τυποποιημένων [69].	σελ.43
Εικόνα 28 Τύποι συστημάτων PVT που κατηγοριοποιούνται με βάση τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας [63].	σελ.44
Εικόνα 29 Διαμορφώσεις συστημάτων PVT με βάση τον αέρα [71].	σελ.45

Εικόνα 30 Σχηματική απεικόνιση σχεδίων συλλεκτών με βάση το νερό [72].	σελ.45
Εικόνα 31 Διάγραμμα διατομής ενός αερόψυκτου και υδρόψυκτου φωτοβολταϊκού-θερμικού συλλέκτη μονής διέλευσης [73].	σελ.46
Εικόνα 32 Η δομή και οι μηχανισμοί των σωληνώσεων θερμότητας [70].	σελ.47
Εικόνα 33 Τοπικό διάγραμμα του συστήματος PCM [74].	σελ.48
Εικόνα 34 Κελί άμορφου πυριτίου [77].	σελ.49
Εικόνα 35 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών κελιών [78].	σελ.50
Εικόνα 36 Διάγραμμα Χαρακτηριστικής Καμπύλης I-V [61].	σελ.51
Εικόνα 37 Σύνδεση σε σειρά [82].	σελ.52
Εικόνα 38 Παράλληλη σύνδεση [82].	σελ.52
Εικόνα 39 Σχηματική απεικόνιση των φωτοβολταϊκών συστημάτων για εφαρμογή σε πισίνα [83].	σελ.53
Εικόνα 40 Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της ηλιακής ψύξης [84].	σελ.54
Εικόνα 41 Σχηματική απεικόνιση της αφαλάτωσης [86].	σελ.54
Εικόνα 42 Αντλία θερμότητας από το έδαφος για θέρμανση και ψύξη [88].	σελ.55
Εικόνα 43 Σχηματική απεικόνιση για την λειτουργία του ξηραντήρα θερμοκηπίου [72].	σελ.56
Εικόνα 44 Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας της ηλιακής κυψέλης ευαισθητοποιημένης με χρωστική ουσία [88].	σελ.58
Εικόνα 45 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού λειτουργίας των QDSCs [91].	σελ.59
Εικόνα 46 Σχηματική απεικόνιση μιας κυψέλης τριπλής ένωσης και προσεγγίσεις για τη βελτίωση της απόδοσης της κυψέλης [132].	σελ.60
Εικόνα 47 Μεσοσκοπική και επίπεδη αρχιτεκτονική συσκευής για ηλιακή κυψέλη περοβσκίτη [133].	σελ.61
Εικόνα 48 Σχηματική απεικόνιση της ηλιακής κυψέλης γραφενίου [93].	σελ.63
Εικόνα 49 (Α) Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας BPV, (Β) Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογία MPV [94].	σελ.64
Εικόνα 50 Τύποι συστημάτων BIPV [96].	σελ.64
Εικόνα 51 Γενική διαδικασία για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας για έξυπνα κτίρια [89].	σελ.65
Εικόνα 52 Κύρια στοιχεία του πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος [134].	σελ.66
Εικόνα 53 Διάταξη ηλιακού δέντρου [135].	σελ.67
Εικόνα 54 Υπολογισμός ύψους σκιάς [99].	σελ.69
Εικόνα 55 Πάνελ εγκαταστημένα σε δώμα (Σταθερή εγκατάσταση) [1].	σελ.70
Εικόνα 56 Σύστημα ανίχνευσης ήλιου [1].	σελ.71
Εικόνα 57 Σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων στη οροφή [1].	σελ.72

Εικόνα 58 Φωτοβολταϊκό σύστημα με αντιστροφείς κλάδων [105].	σελ.73
Εικόνα 59 Κεντρικός μετατροπέας [107].	σελ.74
Εικόνα 60 Αντιστροφέας πολλαπλών κλάδων [109].	σελ.75
Εικόνα 61 Λειτουργία Εκτός Δικτύου [112].	σελ.75
Εικόνα 62 Κατοικία συνδεδεμένη με μετατροπέα δικτύου [113].	σελ.77
Εικόνα 63 Καλώδιο H07RN-F [117].	σελ.79
Εικόνα 64 Καλώδιο XLPE PVC/SWA/PVC [118].	σελ.80
Εικόνα 65 Κόκκινο καλώδιο DC Solar 1x6 mm ² [119].	σελ.80
Εικόνα 66 Μαύρο καλώδιο DC Solar 1x6 mm ² [120].	σελ.80
Εικόνα 67 Καλώδιο FTP Cat5e [121].	σελ.81
Εικόνα 68 Διάγραμμα των ροών ενέργειας/πληροφοριών ενός νοικοκυριού που λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς για τη μελέτη περίπτωσης [128].	σελ.82
Εικόνα 69 Σύστημα τηλεπίβλεψης Sunny Webbox [130].	σελ.83
Εικόνα 70 Αεροφωτογραφία στέγης	σελ.83
Εικόνα 71 Βάση στήριξης ECOSOL II [136].	σελ.84
Εικόνα 72 Προφίλ και διαστάσεις JAM60-S20-370-MR [103].	σελ.84
Εικόνα 73 Έξυπνος μετατροπέας Sunny Tripower 8.0 [115].	σελ.85
Εικόνα 74 Σύστημα Προστασία Rayvoss A [124].	σελ.85
Εικόνα 75 Γενικοί παράμετροι εγκατάστασης	σελ.88
Εικόνα 76 Αποτελέσματα λειτουργίας	σελ.90
Εικόνα 77 Διάγραμμα Απωλειών	σελ.92
Εικόνα 78 Χρήσιμη ενέργεια του συστήματος (ημερήσιες εισροές/εκροές)	σελ.93
Εικόνα 79 Χρήσιμη ενέργεια του συστήματος (Σύστημα διανομή ισχύος εξόδου)	σελ.93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά από το μοντέλο JAM60-S20-370-MR [103].	σελ.82
Πίνακας 2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Sunny Tripower 8.0 [115].	σελ.87
Πίνακας 3 Ανάλυση Κόστους Εξοπλισμού Φ/Β Εγκατάστασης	σελ.88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια άφθονη και δωρεάν πηγή που μπορεί εύκολα να καλύψει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες. Με την βοήθεια διάφορων συστημάτων, μπορεί να παραχθεί τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια, για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να μετατρέψουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των ηλιακών κυψελών. Ξεχωρίζουν τρεις κατηγορίες που χρησιμοποιούν την ενέργεια του ήλιου ως βάση τους και αυτές είναι: η ηλιακή θέρμανση και ψύξη (SHC), η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP) και τα φωτοβολταϊκά συστήματα [1].

Η ηλιακή θέρμανση και ψύξη (SHC), είναι μια τεχνολογία η οποία βασίζεται στην συγκέντρωση του ηλιακού φωτός για την θέρμανση του νερού με την βοήθεια του νερού. Παρουσιάζεται συνήθως σε χώρες με αρκετή ηλιοφάνεια, για παράδειγμα Ελλάδα και χρησιμοποιείται ευρέως για οικιακές απαιτήσεις. Η συγκεκριμένη κατηγορία διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες, όπως ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού (SWHS), θέρμανση, εξαερισμός και ψύξη (HVAC) και διαδικασία ηλιακής βιομηχανικής θέρμανσης [2].

Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP), παράγει ηλεκτρική ενέργεια με την βοήθεια διάφορων μέσων, όπως τα κάτοπτρα ή φακούς για την συγκέντρωση ηλιακού φωτός. Υπάρχουν τέσσερις τεχνολογίες συγκέντρωσης του ηλιακού φωτός και χαρακτηρίζονται ως παραβολικός συλλέκτης, συλλέκτης παραβολικού πιάτου, γραμμικός συλλέκτης Fresnel και πύργος ηλιακής ενέργειας [3].

Την μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια σε μορφή συνεχούς ρεύματος (DC), την συναντάμε μόνο στα φωτοβολταϊκά συστήματα, με την χρήση ημιαγωγικά υλικά όπως το πυρίτιο (Si). Συνήθως διακρίνονται σε μονοκρυσταλλικά-πολυκρυσταλλικά, λεπτούς υμενίου και περοβσκίτη [4].

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Πριν ο Γάλλος επιστήμονας A. Mouchot αρχίσει να χρησιμοποιεί τον πρώτο παραβολικό ηλιακό συλλέκτη το 1866 για να συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε βραστό νερό και να παράγει ατμό, ο οποίος παρέχει την κινητική ενέργεια σε μια ατμομηχανή, έγιναν πολλές προσπάθειες να χρησιμοποιηθεί ο Ήλιος ως πηγή θερμότητας. Αυτές οι προσπάθειες ξεκίνησαν με την εστίαση των ηλιακών ακτίνων χρησιμοποιώντας έναν μεγεθυντικό φακό για να ξεκινήσει μια φωτιά.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 από ένα Γάλλο επιστήμονα, με το όνομα A. E. Becquerel. Διεξήγαγε το πρώτο φωτοβολταϊκό πείραμα, το οποίο αφορούσε την ηλεκτρολυτική επαφή δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων.

Το 1876, ο Άγγλος φυσικός W. G. Adams, μαζί με τον μαθητή του R. E. Day, ανακάλυψαν ότι το σελήνιο παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν πέφτει πάνω του το φως του ηλίου.

Ο Πολωνός χημικός, J. Czocharlski, το έτος 1918, ήταν αυτός που εφηύρε τη μέθοδο Czocharlski, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μονοκρυστάλλων και για την παραγωγή πλακιδίων ημιαγωγών.

Το 1949, δημιουργήθηκε μια τεχνική από τους Mott και Schottky, η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση των αλλαγών που συμβαίνουν σε μια ηλεκτροχημική διεπιφάνεια καθώς μεταβάλλεται η συνεχής τάση της. Σε ένα ηλεκτροχημικό κύτταρο εφαρμόζεται διέγερση δυναμικού εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας και μικρού σήματος.

Το βήμα που άλλαξε το παιχνίδι της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών, έλαβε χώρα στα εργαστήρια Bell στις Ηνωμένες Πολιτείες, το έτος 1954, όπου οι ερευνητές D. M. Chapin, C. S. Fuller και G. L. Pearson, επινόησαν το πρώτο ηλιακό κελί, με την απόδοση του να φτάνει στα 6%.

Το 1958, οι ΗΠΑ εκτόξευσαν το Vanguard I, τον πρώτο ηλιακό δορυφόρο με αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, για να δοκιμάσει τις δυνατότητες εκτόξευσης ενός οχήματος, καθώς και τις επιπτώσεις του διαστημικού περιβάλλοντος σε έναν δορυφόρο και τα συστήματά του σε γήινη τροχιά [1,5].

1.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

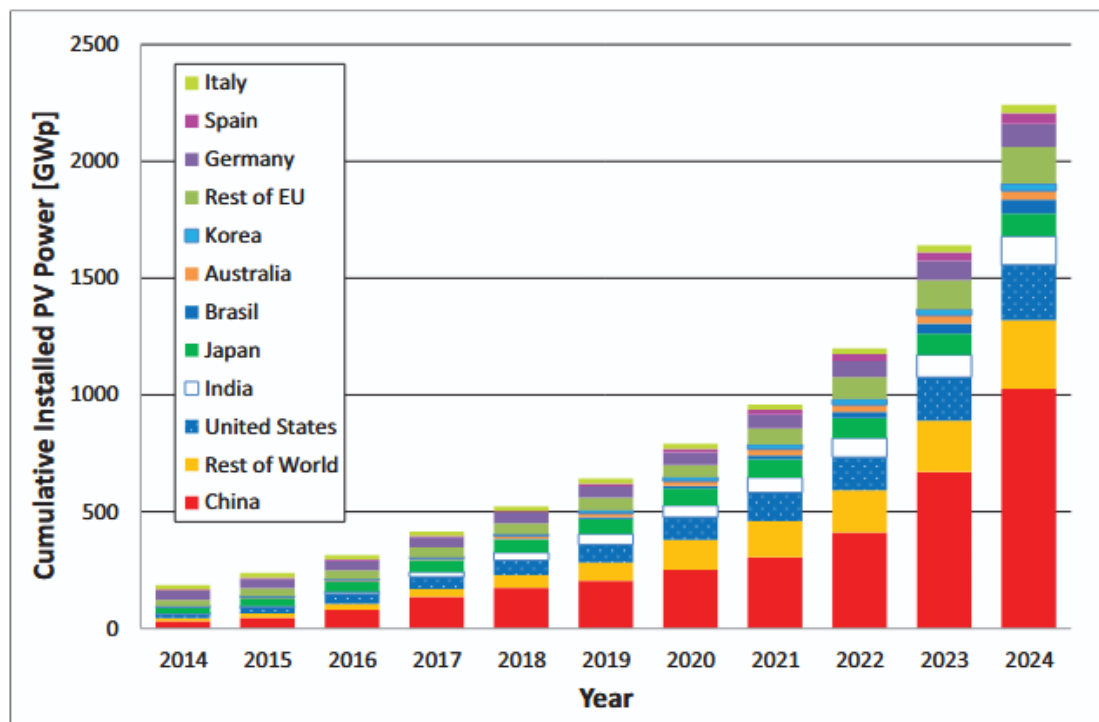
Πλεονεκτήματα: Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν μια οικονομική τεχνολογία με μεγάλη διάρκεια ζωής, για παράδειγμα οι κατασκευαστές δίνουν έως 25 χρόνια εγγύηση. Είναι μια βιώσιμη και καθαρή πηγή ενέργειας, λόγω της χρήσης του πυριτίου ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, είναι μια τεχνολογία που απαιτεί ελάχιστη συντήρηση κατά τη διάρκεια του χρόνου, ώστε να λειτουργεί στην μέγιστη απόδοση.

Μειονεκτήματα: Τα φωτοβολταϊκά απαιτούν πολύ χώρο για την εγκατάστασή τους. Επιπλέον, δεν λειτουργούν κατά την διάρκεια της νύχτας και απαιτεί υψηλό κόστος για την αρχική τους εγκατάσταση. Επίσης, η διαδικασία κατασκευής των φωτοβολταϊκών πάνελ δεν είναι φιλική προς το περιβάλλον [6].

1.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού και της ενεργειακής ζήτησης έχει ενισχύσει τον ρόλο της ενεργειακής ασφάλειας στον σχεδιασμό ενεργειακών πολιτικών. Η υιοθέτηση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα των φωτοβολταϊκών (ΦΒ), αποτελεί βασικό εργαλείο για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την επίτευξη ενεργειακής αυτάρκειας. Η κυβερνητική στήριξη έχει αποδειχθεί κρίσιμη για τη διάδοση των φωτοβολταϊκών, τα οποία προτιμώνται λόγω της απλής εγκατάστασης και χαμηλής συντήρησης. Από το 2014 έως το 2024, παρατηρείται ραγδαία αύξηση της παγκόσμιας φωτοβολταϊκής δυναμικότητας και παραγωγής, με την Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ινδία και την Ευρώπη όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1**, κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο στις εγκαταστάσεις και προσθήκες νέας δυναμικότητας. Η μείωση του κόστους (LCOE) των φωτοβολταϊκών συστημάτων, λόγω τεχνολογικής προόδου, έχει επιταχύνει την υιοθέτηση της τεχνολογίας. Παρά τις τεχνικές και θεσμικές προκλήσεις, η πορεία

των φωτοβολταϊκών είναι ανοδική, με στόχο την περαιτέρω ενσωμάτωσή τους σε ένα βιώσιμο και έξυπνο ενεργειακό σύστημα.



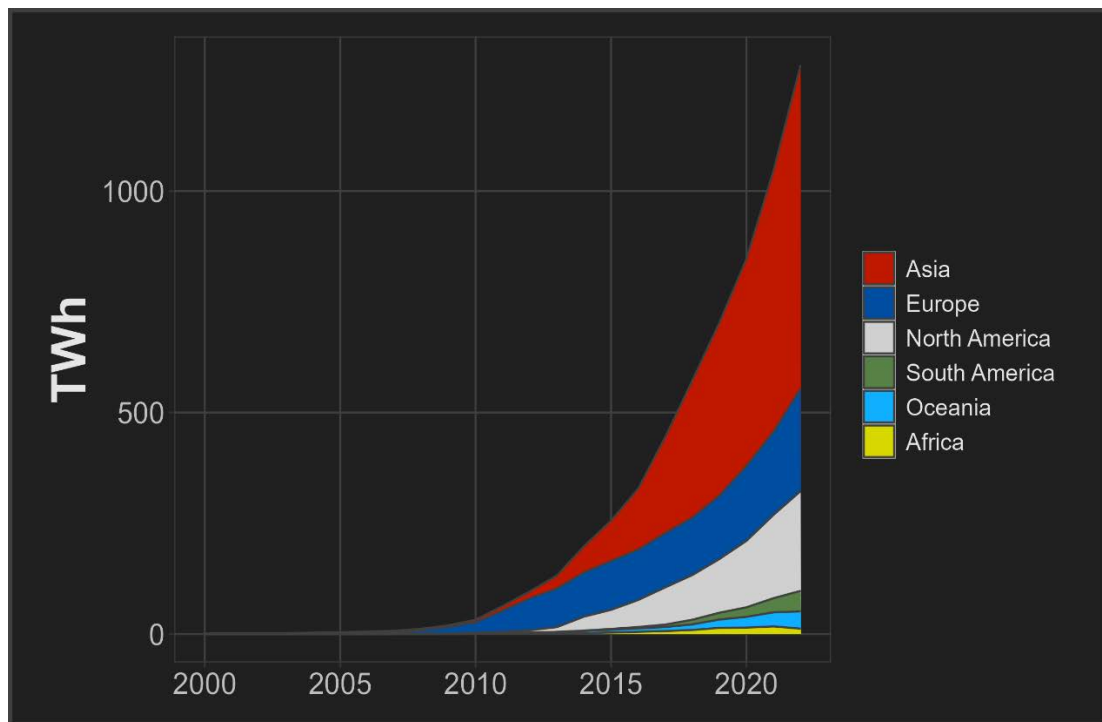
Εικόνα 1 Παγκόσμια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ανά περιοχή από το έτος 2014 έως 2024 [8].

1.5 ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Η τεχνολογία φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων παρουσιάζει διαχρονικά πτωτική τάση κόστους, με το κόστος των πολυκρυσταλλικών πυριτικών φωτοβολταϊκών μονάδων να μειώνεται παγκοσμίως κατά 68 % την περίοδο 2014–2019. Ειδικότερα, η τιμή μειώθηκε από 0,58 €/W το 2014 σε 0,18 €/W το 2019, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, γεγονός που συνοδεύτηκε από αύξηση της παραγωγής πολυκρυσταλλικών κυψελών σε σχέση με τις μονοκρυσταλλικές. Η σημαντική αυτή μείωση κόστους, σε συνδυασμό με τη χαμηλή συντήρηση μετά την αρχική εγκατάσταση και τα κρατικά κίνητρα (επιδοτήσεις, net metering, προγράμματα χρέωσης βάσει χρόνου χρήσης), καθιστά τα φωτοβολταϊκά οικονομικά ανταγωνιστικά έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας [1].

Το ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE) αποτελεί βασικό εργαλείο για τη σύγκριση του οικονομικού δυναμικού διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το LCOE των φωτοβολταϊκών μειώθηκε από 0,398 €/kWh το 2010 σε 0,037 €/kWh το 2023, πλησιάζοντας ή και ξεπερνώντας την ανταγωνιστικότητα των συμβατικών και άλλων ανανεώσιμων πηγών, όπως η αιολική ενέργεια. Σύμφωνα με την IRENA, το 2018 τα ΦΒ ήταν ήδη ανταγωνιστικά ως προς το κόστος σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Οι προβλέψεις δείχνουν περαιτέρω μείωση του LCOE των ΦΒ έως το 2030 θα κυμανθεί στα 0,017–0,069

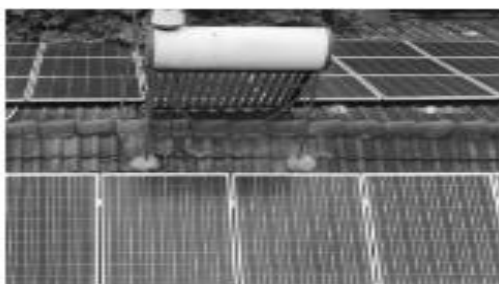
€/kWh, ξεπερνώντας πιθανώς την αιολική ενέργεια ως προς την οικονομική αποδοτικότητα μέχρι το 2050 [8].



Εικόνα 2 Ετήσια ηλεκτρική παραγωγή ανά ήπειρο [9].

1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά κελιά μπορεί να αποδώσουν στο μέγιστο εφόσον τηρηθούν οι προδιαγραφές. Ωστόσο, υπάρχουν πρακτικά ζητήματα, που επηρεάζουν αρνητικά την αποδοτικότητα, όπως η σκόνη, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 και η σκίαση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Επίσης, ένας σημαντικός παράγοντας είναι η γήρανση των κελιών. Φυσικοί παράγοντες όπως οι μεταβολές θερμοκρασίες και η υγρασία, μπορεί να επηρεάσουν τα πάνελ αρνητικά. Η απόδοση μπορεί να μειωθεί κατά 1-4% λόγω των απωλειών του μετατροπέα. Βέβαια, έναν παράγοντα που συναντάμε συχνά, είναι το ελάττωμα του κατασκευαστή, όπως το ραγισμένο γυαλί που υπάρχει σαν προστατευτικό για τα ηλιακά πάνελ [9,10].



Εικόνα 3 Σκίαση από ένα ηλιακό θερμοσίφωνα [10].



Εικόνα 4 Ακαθάριστα ηλιακά πάνελ [10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη κοινωνία, η ζήτηση για ενεργειακές λύσεις που είναι βιώσιμες, καθαρές και αποδοτικές είναι μεγαλύτερη από ποτέ. Οι ηλεκτροχημικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών ιόντων λιθίου, των κυψελών καυσίμου, των ηλεκτρολυτών και των υπερπυκνωτών, θα έχουν μια κρίσιμη σημασία για τη διαχείριση και τη χρήση της ενέργειας.

Πρόκειται για ζωτικά στοιχεία της ενεργειακής μετάβασης, από την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρολυτών έως την παραγωγή καθαρής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου.

2.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.2.1 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια σχετίζεται με την κίνηση του αέρα και αποτελεί μια βιώσιμη και καθαρή τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δεν προκαλεί υπερθέρμανση του πλανήτη ή τοξική ρύπανση. Βέβαια, υπάρχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, που θα πρέπει να μετριαστεί, όπως τα ζητήματα χρήσης της γης και οι προκλήσεις για την άγρια ζωή και τους βιότοπους [11].

2.2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από την κίνηση του νερού με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση της δυναμικής ενέργειας του νερού. Είναι μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας, με υψηλή πυκνότητα ισχύος, μεγάλη διάρκεια ζωής και έχει την ικανότητα να παρέχει ενέργεια για περιόδους που κυμαίνονται για μερικές ώρες έως και πολλές ημέρες. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες: α) αντηλισταμείωση υδροηλεκτρικής ενέργειας (pumped hydro storage), Μικρός υδρουλεκτρικός σταθμός (small hydropower plant) και υδροηλεκτρικός σταθμός με κλιμακωτή δεξαμενή (cascaded reservoir hydropower plant). Βέβαια, ένα από τα μειονεκτήματά της το υψηλό κόστος για την κατασκευή υποδομών, όπως τα φράγματα [12].

2.2.3 Βιομάζα

Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με την βοήθεια της βιομάζας περιλαμβάνουν την καύση μιας πρώτης ύλης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως το ξύλο, υπολείμματα φυτών. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση. Αν και έχει το πλεονέκτημα να μειώνει τα απόβλητα και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα όταν χρησιμοποιείται σωστά, υπάρχουν προκλήσεις όπως ο ανταγωνισμός για τη γη με τις καλλιέργειες τροφίμων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η σχετικά χαμηλή ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Για να ξεπεραστούν αυτά τα ζητήματα, είναι απαραίτητο να βελτιωθούν οι

τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας και να εφαρμοστούν βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης, ενώ η συνδυαστική χρήση με άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα συνολικά [12].

2.2.4 Υδρογόνο

Το υδρογόνο λειτουργεί ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους φορείς ενέργειας για την επίτευξη βιώσιμου και κλιματικά ουδέτερου ενεργειακού συστήματος. Η μοναδικότητά του έγκειται στο γεγονός ότι δεν αποτελεί πρωτογενή πηγή ενέργειας, αλλά ενεργειακό φορέα, καθώς απαιτείται η παραγωγή του μέσω ενεργοβόρων διεργασιών όπως η ηλεκτρόλυση του νερού ή η αναμόρφωση φυσικού αερίου. Παρά τις μεγάλες δυνατότητές του, η υιοθέτησή του σε ευρεία κλίμακα παραμένει περιορισμένη, κυρίως λόγω τεχνικών και οικονομικών περιορισμών. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς, όπως στη βιομηχανία και στις μεταφορές, με ιδιαίτερη έμφαση σε περιπτώσεις όπου η άμεση ηλεκτροδότηση δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά εφικτή.

Η αποθήκευση του υδρογόνου, ωστόσο, παραμένει τεχνικά απαιτητική λόγω της χαμηλής του πυκνότητας υπό κανονικές συνθήκες. Αυτό καθιστά αναγκαία είτε τη συμπίεση σε υψηλές πιέσεις, είτε την υγροποίησή του σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, είτε τη χημική του ενσωμάτωση σε φορείς όπως τα μεταλλικά υδρίδια ή η αμμωνία. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους συνεπάγεται συγκεκριμένο ενεργειακό και οικονομικό κόστος, αν και βρίσκονται υπό διαρκή τεχνολογική εξέλιξη. Εξίσου σημαντικό είναι το ζήτημα της ασφάλειας, δεδομένου ότι το υδρογόνο είναι εύφλεκτο και σχηματίζει εκρηκτικά μείγματα με τον αέρα. Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη και εφαρμογή διεθνών κανονισμών ασφαλείας (όπως ISO, ANSI και NFPA) παρέχει ένα αξιόπιστο θεσμικό πλαίσιο για τη βιομηχανική και μεταφορική του χρήση.

Παρά τις υψηλές προσδοκίες που έχουν αναπτυχθεί γύρω από την τεχνολογία του υδρογόνου, παραμένουν σημαντικά εμπόδια προς την ευρεία εφαρμογή του. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος παραγωγής και μεταφοράς, η χαμηλή συνολική ενεργειακή απόδοση στην αλυσίδα εφοδιασμού, καθώς και η άνιση γεωγραφική κατανομή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως σε περιοχές της Ευρώπης. Για να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό του υδρογόνου απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις σε τεχνολογικές καινοτομίες, υποδομές και ρυθμιστικά πλαίσια [34,35].

2.3 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι συσκευές μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας είναι διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν μια μορφή ενέργειας σε χημική, την αποθηκεύουν και την απελευθερώνουν όταν χρειάζεται μετατρέποντας εκ νέου στην αρχική της μορφή. Οι πιο γνωστές συσκευές θεωρούνται τα φωτοβολταϊκά κελιά, οι μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές, οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες και οι κυψέλες καυσίμου.

2.3.1 Μετατροπή Ενέργειας

2.3.1.1 Κυψέλες καυσίμου

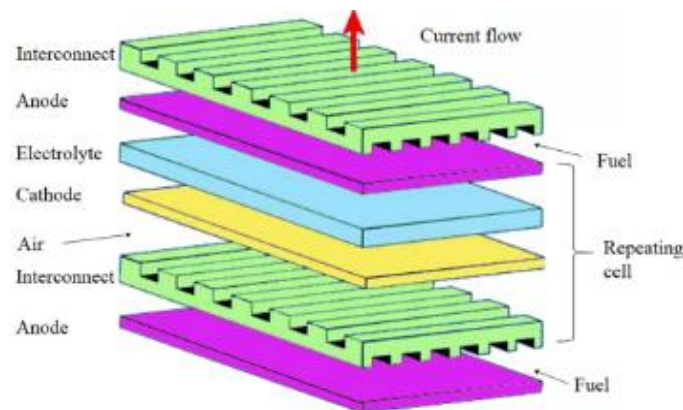
Οι κυψέλες καυσίμου είναι τα κέντρα ενός συστήματος, οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με την μετατροπή του υδρογόνου που λειτουργεί ως καύσιμο. Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρισμού, οι κυψέλες καυσίμου παράγουν και θερμότητα με την βοήθεια του μηχανισμού μετατροπής του υδρογόνου και οξυγόνου σε νερό.

Οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται σε τρεις ομάδες με βάση τους ηλεκτρολύτες. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

1. Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)
2. Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
3. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)
4. Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου [13].

2.3.1.1.α Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου αποτελούν ένα τύπο κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιούν το στερεό οξείδιο ως ηλεκτρολύτη. Λειτουργούν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (800-1000°C), με σκοπό τη διατήρηση της θερμικής σταθερότητας, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, την καταλυτική δραστηριότητα και την χημική συμβατότητα με την βοήθεια των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη.



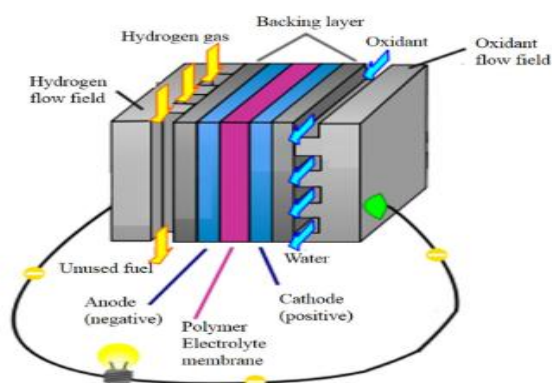
Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση SOFC [14].

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, είναι μια συσκευή η οποία αποτελείται από άνοδο, ηλεκτρολύτη και κάθοδο και μετατρέπει την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Τα συνήθη υλικά καθόδου περιλαμβάνουν LSM, LSCF, BSCF και PBSCF, με το Ni-YSZ να είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό ανόδου. Ο ηλεκτρολύτης είναι σταθεροποιημένος με Yttria Zirconia, ενώ οι κάθοδοι αποτελούνται από οξείδια μετάλλων προς ο χαλκός (Cu), το κοβάλτιο (Co) [13].

2.3.1.1.β Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)

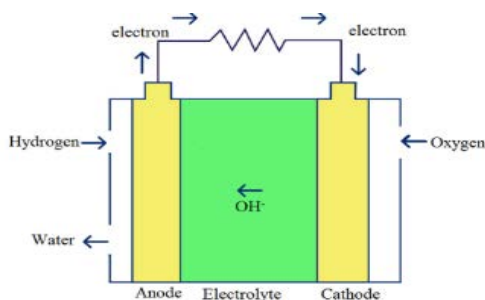
Η συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου είναι αρκετά ευαίσθητη σε μη καθαρά καύσιμα. Λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, από 60-80° για προς LT-PEM και από 100-200° για HT-PEM, και παράγουν αρκετή ισχύ για προς ανάγκες προς καθημερινότητας, η οποία κυμαίνεται από 50-250 kW. Όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6**, το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο, όπου διαχωρίζεται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια περνούν μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο, ενώ τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια, σχηματίζοντας νερό. Τα πλεονεκτήματα αυτών των κυψελών είναι η μειωμένη ωμική αντίσταση, τον μετριασμό των προβλημάτων εξάτμισης, αποδοτική παραγωγή ενέργειας και δενδρικής ανάπτυξης [13,15].



Εικόνα 6 Σχηματική Απεικόνιση της PEM [13].

2.3.1.1.γ Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)

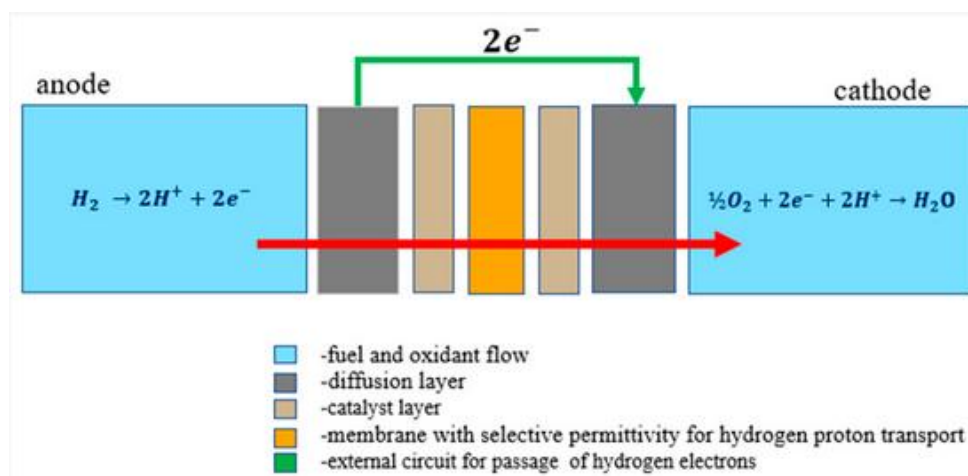
Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν το υδροξείδιο του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7**, όπου το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο και αντιδρά, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και σχηματίζοντας υδροξείδια όπου μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο, όπου αντιδρούν με το οξυγόνο και σχηματίζουν νερό. Παρέχουν βιώσιμη ενέργεια με χαμηλό κόστος και υψηλή ισχύ πυκνότητα ενέργειας. Λειτουργούν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες 50-90°C και παρατηρείται ότι διακατέχει βελτιωμένη κινητική πολύπλοκων αντιδράσεων σε αλκαλικό μέσο [13].



Εικόνα 7 Απεικόνιση της λειτουργίας μιας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου [13].

2.3.1.1.δ Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου

Ο βασικότερος τύπος κυψέλης καυσίμου είναι η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Το καύσιμο υδρογόνο αυτού του είδους κυψέλης μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή από παραδοσιακά καύσιμα. Όταν χρησιμοποιείται σε μια κυψέλη καυσίμου, το καύσιμο υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές έχει εξαιρετικές ιδιότητες και σχεδόν καμία αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου χρησιμοποιεί μια ηλεκτροχημική αντίδραση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο εισέρχεται στην κυψέλη μέσω της ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση, και το οξυγόνο εισέρχεται στην κυψέλη μέσω της καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα αναγωγή. Στην **Εικόνα 8**, περιγράφεται σχηματικά η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 8 Απεικόνιση λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου [14].

Καθώς τα αντιδρώντα κινούνται, ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια σχηματίζονται στην άνοδο και μια ροή ηλεκτρονίων μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος παράγει ηλεκτρισμό. Η κυψέλη αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία ως υποκατάστατο ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία [14].

2.3.1.2 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες αποτελούν μία από τις αρχαιότερες και ευρύτερα μελετημένες κατηγορίες αισθητήρων, με πολυάριθμες εφαρμογές που έχουν πλέον εδραιωθεί εμπορικά. Παρότι άλλοι τύποι χημικών αισθητήρων βρίσκονται ακόμη σε πειραματικά στάδια ή περιορισμένες χρήσεις, ορισμένες ηλεκτροχημικές τεχνολογίες έχουν ήδη ενσωματωθεί επιτυχώς σε πολλές βιομηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές.

Η γενική κατηγορία των ηλεκτροχημικών αισθητήρων περιλαμβάνει ποικίλες υποκατηγορίες, όπως είναι οι κυψέλες καυσίμου, οι αισθητήρες επιφανειακής αγωγιμότητας, τα ενζυμικά βιοαισθητήρια και τα εξειδικευμένα ηλεκτρόδια. Κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η βασική αρχή λειτουργίας που σχετίζεται

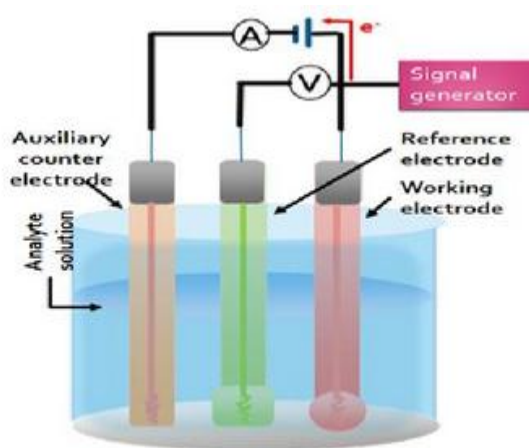
με την αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρικού ρεύματος και χημικής αντίδρασης – δηλαδή τον πυρήνα της ηλεκτροχημείας.

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες είναι ικανοί να μετατρέπουν άμεσα χημικές πληροφορίες σε ηλεκτρικά σήματα, γεγονός που ενισχύει τη συσχέτισή τους με τις ηλεκτροχημικές μεθόδους ανάλυσης. Η λειτουργία τους βασίζεται κατά κανόνα στον εντοπισμό οξειδοαναγωγικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου εργασίας. Ανάλογα με την τεχνική μέτρησης που χρησιμοποιείται, οι αισθητήρες αυτοί ταξινομούνται σε ποτενσιομετρικούς, αμπερομετρικούς ή αγωγιμομετρικούς [44].

2.3.1.2.α Αμπερομετρικοί ή Βολταμετρικοί μέθοδος ανίχνευσης

Κατά την αμπερομετρική ανίχνευση, μια ηλεκτροχημική αντίδραση οξείδωσης ή αναγωγής λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου εργασίας, όταν εφαρμόζεται σταθερό δυναμικό. Η αντίδραση αυτή παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο είναι αναλογικό προς τη συγκέντρωση του αναλυτή-στόχου στο δείγμα, καθώς καταγράφεται σε σύγκριση με ένα αντίθετο ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 9**.

Η αποδοτικότητα της τεχνικής μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση ηλεκτροδίου περιστρεφόμενου δίσκου (Rotating Disk Electrode - RDE), το οποίο αυξάνει τον ρυθμό μεταφοράς μάζας του αναλυτή προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Χάρη στο χαμηλό όριο ανίχνευσης και την αυξημένη εκλεκτικότητα που προσφέρει, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται εκτενώς σε βιοκαταλυτικούς βιοαισθητήρες και σε αισθητήρες συγγένειας.



Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση αμπερομετρικής τεχνικής ανίχνευσης [45].

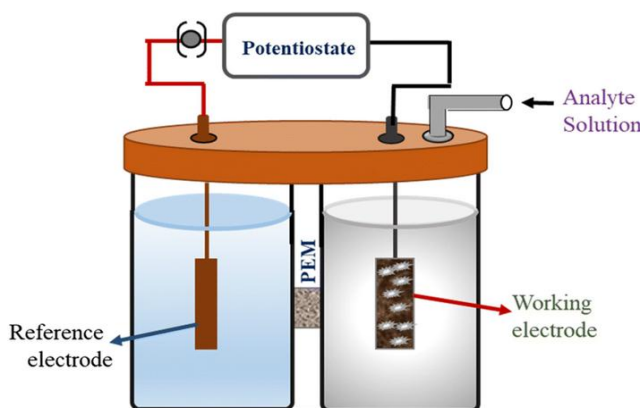
Σε αντίθεση με την αμπερομετρική τεχνική, η βολταμετρική ανίχνευση βασίζεται στη μέτρηση του ρεύματος που παράγεται από την ηλεκτροχημική αντίδραση καθώς το δυναμικό του ηλεκτροδίου εργασίας μεταβάλλεται εντός προκαθορισμένου εύρους. Τεχνικές όπως η διαφορική παλμική βολταμμετρία (DPV), η κυκλική βολταμμετρία (CV), η βολταμμετρία τετραγωνικού κύματος (SWV) και η γραμμική σάρωση χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συγκέντρωσης του αναλυτή μέσω της καταγραφής της ρεύματος-δυναμικού απόκρισης.

Στο πεδίο των σύγχρονων βιοαισθητήρων, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους αισθητήρες που βασίζονται σε απταμερή – συνθετικές ολιγονουκλεοτιδικές αλυσίδες με υψηλή συγγένεια προς συγκεκριμένους στόχους. Οι απταμερικοί βιοαισθητήρες επωφελούνται ιδιαίτερα από τη βολταμετρική προσέγγιση, η οποία επιτρέπει την ευαίσθητη και επιλεκτική ανίχνευση ακόμα και σε μικρούς όγκους δείγματος, καθιστώντας τους ιδανικούς για προηγμένες διαγνωστικές εφαρμογές [46].

2.3.1.2.β Ποτενσιομετρική μέθοδος ανίχνευσης

Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια αναφοράς που είναι προσκολλημένα σε ένα στρώμα των οποίων η μεταβολή του δυναμικού μετράται όταν αντιδρά επιλεκτικά με το φορτισμένο ιόν του αναλυτή-στόχου, σύμφωνα με την ποτενσιομετρική μέθοδο. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ της μεμβράνης πριν και μετά την παραγωγή του φορτισμένου ιόντος οφείλεται στο φορτισμένο ιόν που δημιουργείται από ένα ένζυμο το οποίο καταλύει μια συγκεκριμένη αντίδραση, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 14**. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι βιοαισθητήρες που βασίζονται σε τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, οι οποίοι αποτελούνται από ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου και ένα διαμέρισμα βιολογικής αναγνώρισης. Οι βιοϋποδοχείς εναποτίθενται σε ένα μονωτικό (χημικά και ηλεκτρικά) στρώμα, συνήθως ένα πολυμερές, που υπάρχει μεταξύ του διαλύματος του αναλυτή και του ημιαγωγού.

Ένα ηλεκτροστατικό φαινόμενο πύλης στον ημιαγωγό και μια διαφορά ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων πηγής και αποστράγγισης καταγράφονται όταν η διαδικασία δέσμευσης είναι επιτυχής και η επιφάνεια του ηλεκτροστατικού δυναμικού του στρώματος ηλεκτρολύτη-μονωτή μεταβάλλεται [46].



Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση ποτενσιομετρικής μέθοδος ανίχνευσης [47].

2.3.1.3 Ηλεκτρολύτες

Όταν συνδυάζεται με ιονισμένους διαλύτες, μια χημική ένωση που είναι φορτισμένη είτε με θετικά είτε με αρνητικά ιόντα ονομάζεται ηλεκτρολύτης. Ο ηλεκτρολύτης είναι ηλεκτρικά αγωγίμος λόγω των διαλυτών που προκαλούνται από τα ελεύθερα κινούμενα ιόντα. Η πλειονότητα των ηλεκτρολυτών είναι είτε λιωμένα άλατα είτε υγρά. Παρ' όλα αυτά, οι στερεοί ηλεκτρολύτες μπορούν να βρεθούν σε διάφορες

μορφές, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρολυτών τύπου gel, των ηλεκτρολυτών σε τήξη και των ηλεκτρολυτών που χρησιμοποιούνται σε πυκνωτές και μπαταρίες.

Οι στερεοί ηλεκτρολύτες είναι ο πρώτος τύπος ηλεκτρολύτη. Αυτοί πρέπει να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις. Πρέπει, πρώτα απ' όλα, να είναι αδιάβροχοι, πυκνοί και καλοί αγωγοί ιόντων με αυξημένη σταθερότητα σε περιβάλλοντα οξειδοαναγωγής. Στη συνέχεια, προκειμένου να έχουν υψηλή αντοχή, να είναι ανθεκτικοί στο θερμικό σοκ και να έχουν χαμηλότερη ιοντική αντίσταση, πρέπει να είναι λεπτοί. Οι στερεοί ηλεκτρολύτες διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τους οργανικούς και τους ανόργανους ηλεκτρολύτες. Μια κατηγορία ανόργανου ηλεκτρολύτη είναι τα διάφορα οξείδια. Είναι ένας τύπος ηλεκτρολύτη πολύ σημαντικός καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη θερμική σταθερότητα, σταθερότητα στην φωτολυτική υποβάθμιση, υψηλή αντοχή και υψηλό πρότυπο δυναμικό οξειδοαναγωγής. Επίσης, ορισμένοι ηλεκτρολύτες που περιέχουν λίθιο έχουν υψηλή ιοντική αγωγιμότητα τάξης μεγέθους $10^{-3} \Omega\text{m}$ στους 25 °C, είναι αρκετά πορώδεις και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μπαταριών ιόντων λιθίου. Γενικά, οι ηλεκτρολύτες οξειδίων κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες. Αυτές περιλαμβάνουν ηλεκτρολύτες που περιέχουν φθόριο, περοβσκίτες, ηλεκτρολύτες που σχετίζονται με περοβσκίτες και διάφορους τύπους απατίτη και σελίτη. Το υψηλό κόστος παραγωγής τους αποτελεί όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα. Οι θειούχοι στερεοί ηλεκτρολύτες είναι μια άλλη υποκατηγορία στερεών ανόργανων ηλεκτρολυτών. Είναι πιο αποτελεσματικοί από τους ηλεκτρολύτες οξειδίων λόγω της υψηλότερης ιοντικής αγωγιμότητάς τους. Επειδή οι θειούχοι ηλεκτρολύτες είναι περισσότερο πολώσιμοι, μπορούν ευκολότερα να αποκτήσουν μεγαλύτερη ηλεκτρική διπολική ροπή όταν εκτίθενται σε ηλεκτρικό πεδίο.

Οι κατηγορίες στερεών ηλεκτρολυτών που προέρχονται από σύνθετα υδρίδια είναι άλλοι τύποι που συναντήθηκαν. Για τα μέταλλα λιθίου, διακρίνονται για την υψηλή μηχανική αντοχή, την ευελιξία και τη σταθερότητά τους. Λόγω της χαμηλής αντίστασής τους στα όρια των κόκκων, θεωρούνται επίσης αξιόπιστα. Οι οργανικοί ηλεκτρολύτες είναι η άλλη μεγάλη κατηγορία στην οποία εμπίπτουν οι στερεοί ηλεκτρολύτες. Οι πολυμερείς ηλεκτρολύτες και οι πολυηλεκτρολύτες είναι δύο κατηγορίες οργανικών στερεών ηλεκτρολυτών. Ένα ιοντοαγώγιμο μέσο ονομάζεται πολυμερής ηλεκτρολύτης. Είναι χρήσιμοι για τη διευκόλυνση της μεταφοράς φορτίου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου μιας κυψέλης. Τόσο οι μπαταρίες όσο και οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν πολυμερείς ηλεκτρολύτες. Οι πολυμερείς στερεοί ηλεκτρολύτες είναι ευκολότεροι στην κατασκευή, πιο ευέλικτοι, πιο χημικά σταθεροί και πιο συμβατοί με τα ηλεκτρόδια από τους ανόργανους στερεούς ηλεκτρολύτες. Τα άλατα λιθίου βρίσκονται σε μακρομόρια που ονομάζονται πολυμερείς ηλεκτρολύτες. Χαρακτηρίζονται από χαμηλή μοριακή μάζα και ακαμψία.

Οι πολυηλεκτρολύτες είναι πολυμερή με μεγάλο αριθμό ιοντικών ομάδων που μπορούν είτε να δίνουν είτε να δέχονται κατιόντα κατανέμοντας κανονικά την ομάδα που παρέχει πρωτόνια κατά μήκος της αλυσίδας. Είναι δυνατή η αναπαραγωγή αυτών των ιοντικών ομάδων. Όταν οι ομάδες αυτές

αποσυντίθενται σε υδατικά διαλύματα, τα πολυμερή φορτίζονται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι πολυηλεκτρολύτες μοιράζονται χαρακτηριστικά τόσο με τα πολυμερή όσο και με τους ηλεκτρολύτες αλάτων. Αυτό υποδηλώνει ότι τα διαλύματά τους έχουν υψηλό ιξώδες και είναι ηλεκτρικά αγώγιμα, παρόμοια με εκείνα των αλάτων. Όλα τα προαναφερθέντα υποδηλώνουν ότι δεν είναι ηλεκτρικά ουδέτεροι όπως ορισμένα άλλα είδη ηλεκτρολυτών. Έχουν αρκετές ευεργετικές ιδιότητες λόγω του συνδυασμού της αποτελεσματικής ηλεκτρολυτικής τους συμπεριφοράς και της συμπεριφοράς των πολυμερών. Τα πλεονεκτήματά τους και οι μοναδικές ιδιότητές τους αξιοποιούνται από διάφορους τεχνολογικούς και βιομηχανικούς τομείς.

Οι υγροί ηλεκτρολύτες αποτελούν τη δεύτερη βασική κατηγορία ταξινόμησης. Πρόκειται για μια ιοντική ένωση που μοιάζει με υγρό. Με άλλα λόγια, σε αντίθεση με άλλα υγρά, το υγρό αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια γνωστά ως ιόντα και όχι από ουδέτερα μόρια. Υπάρχουν πολυάριθμες χρήσεις για τα ιοντικά υγρά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρολύτες και είναι ισχυροί διαλύτες. Η κύρια εφαρμογή τους είναι στην παραγωγή ηλεκτρικών μπαταριών.

Τέλος, τα αλκάλια ή το φωσφορικό οξύ χρησιμοποιούνται για την παρασκευή άλλων ειδών υγρών ηλεκτρολυτών [16][17].

2.3.2 Αποθήκευση Ενέργειας

2.3.2.1 Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές αποτελούν μια σύγχρονη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, γνωστή για την ικανότητά της να φορτίζει και να εκφορτίζει πολύ γρήγορα. Η βασική τους δομή περιλαμβάνει δύο αγώγιμες πλάκες (ηλεκτρόδια), οι οποίες χωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό). Κατά τη λειτουργία τους, το ένα ηλεκτρόδιο αποκτά θετικό φορτίο και το άλλο αρνητικό.

Σε σύγκριση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές έχουν **μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα**, δηλαδή δεν μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Ωστόσο, πλεονεκτούν σημαντικά σε άλλα σημεία: έχουν **μεγαλύτερη διάρκεια ζωής**, υψηλότερη **πυκνότητα ισχύος** και μπορούν να υποστούν **πολλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης χωρίς σημαντική φθορά**. Σε πολλές περιπτώσεις, η διάρκεια ζωής τους μπορεί να φτάσει και τα **10 χρόνια**.

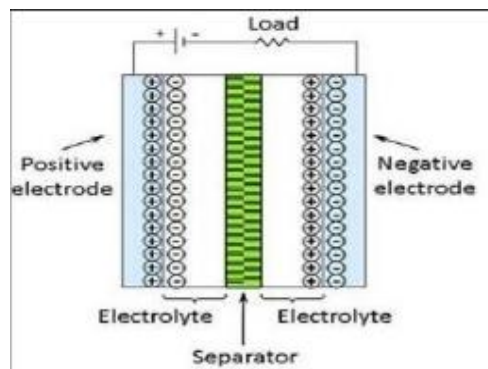
Οι ηλεκτροχημικοί υπερπυκνωτές διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους, ανάλογα με τον τρόπο αποθήκευσης του ηλεκτρικού φορτίου:

- **Διπλής ηλεκτρικής στιβάδας (EDLCs)**, που βασίζονται στη φυσική προσρόφηση ιόντων στα ηλεκτρόδια.
- **Ψευδοπυκνωτές (PCs)**, όπου το φορτίο αποθηκεύεται μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων.
- **Υβριδικοί υπερπυκνωτές (HCs)**, οι οποίοι συνδυάζουν χαρακτηριστικά και των δύο παραπάνω τύπων [16].

2.3.2.1.α Ηλεκτροχημικοί Πυκνωτές Διπλού Στρώματος (EDLCs)

Ένας ηλεκτρολύτης, δύο υλικά με βάση τον άνθρακα που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδιο και ένας διαχωριστής αποτελούν όλα τα συστατικά των EDLC.

Όταν εφαρμόζεται τάση, τα EDLC μπορούν είτε να αποθηκεύουν τα φορτία ηλεκτροστατικά είτε να χρησιμοποιούν μια μη φαρανταϊκή διαδικασία που εξαλείφει την ανάγκη μεταφοράς φορτίου μεταξύ του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου λόγω της έλξης αντίθετου φορτίου που προκαλείται από τη διαφορά δυναμικού, η οποία προκαλεί τη διάχυση των ιόντων του ηλεκτρολύτη πάνω στο διαχωριστή και στους αντίθετα φορτισμένους πόρους του ηλεκτροδίου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 11**. Για να σταματήσει η επανασύνδεση ιόντων στα ηλεκτρόδια, αναπτύχθηκε ένα διπλό στρώμα φορτίου. Το διπλό στρώμα επιτρέπει στα EDLC να επιτυγχάνουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, εκτός από την αύξηση της ειδικής επιφάνειας και τη μείωση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων [17,18].



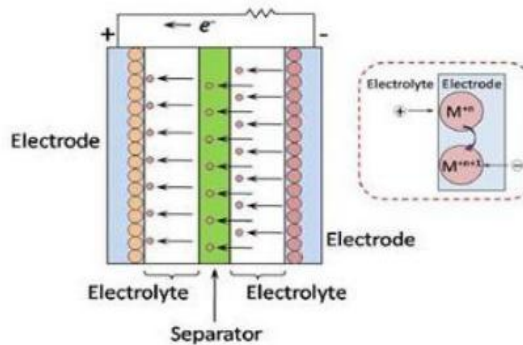
Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση της αποθήκευσης ενέργειας των υπερπυκνωτών διπλού στρώματος (EDLC) [20].

Επιπλέον, ο μηχανισμός αποθήκευσης των ηλεκτροχημικών πυκνωτών διπλού στρώματος επιτρέπει εξαιρετική απόδοση ισχύος, γρήγορη πρόσληψη ενέργειας και διανομή. Μπορεί να υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ των μπαταριών και των EDLCs λόγω της μη φαρανταϊκής φάσης, η οποία δεν είναι μια χημική αντίδραση- οι μπαταρίες μπορούν να αντέξουν μόνο μερικές χιλιάδες κύκλους, ενώ οι EDLCs μπορούν να αντέξουν εκατομμύρια.

2.3.2.1.β Ψευδοπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές με ηλεκτρόδια από αγώγιμα πολυμερή ή οξείδια μετάλλων και υλικά υψηλής ηλεκτροχημικής ψευδοχωρητικότητας είναι ένας τύπος. Παρόμοια με τις αντιδράσεις οξείδωσης-αναγωγής, ο μηχανισμός Faradaic περιλαμβάνει τη μεταφορά φορτίου μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 12**. Το ρεύμα Faradic ρέει μέσω μιας κυψέλης υπερπυκνωτών όταν εφαρμόζε-

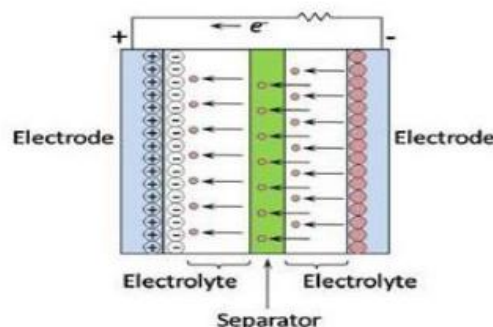
ται δυναμικό στον ψευδοπυκνωτή, επειδή η αναγωγή και η οξείδωση συμβαίνουν στο υλικό του ηλεκτροδίου που περιλαμβάνει τη διέλευση του φορτίου διαμέσου ενός διπλού στρώματος. Επιπλέον, σε σύγκριση με τους EDLC, οι ψευδοπυκνωτές μπορούν να επιτύχουν υψηλότερες ειδικές χωρητικότητες και ενεργειακές πυκνότητες χάρη στον φαραδικό μηχανισμό που χρησιμοποιούν [17,21].



Εικόνα 12 Η δομή ενός ψευδοπυκνωτή [20].

2.3.2.1.γ Υβριδικοί υπερπυκνωτές (HCs)

Ένας υβριδικός υπερπυκνωτής συνδυάζει έναν ψευδοπυκνωτή και έναν ηλεκτροχημικό πυκνωτή διπλής στρώσης. Ο λόγος για την ονομασία του είναι ότι διαθέτει τις ιδιότητες και τα οφέλη και των δύο ειδών πυκνωτών. Έχει ανακαλυφθεί ότι έχει μεγάλη χωρητικότητα, παρόμοια με τους ψευδοπυκνωτές, και αρκετά καλή κυκλική σταθερότητα, παρόμοια με τους πυκνωτές EDLC. Από την άλλη πλευρά, είναι λιγότερο αποτελεσματικοί στη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης από τους υπερπυκνωτές διπλής στρώσης. Η αρχή λειτουργίας τους συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των προηγούμενων πυκνωτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, ένας κατάλληλος συνδυασμός ηλεκτροδίων, η απόσταση ηλεκτροδίων και η επιλογή υλικού διορθώνουν και ενισχύουν την αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας και της απόδοσης ισχύος. Με βάση τη δομή των ηλεκτροδίων τους, οι υβριδικοί υπερπυκνωτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: ασύμμετροι, σύνθετοι και μπαταρίες [22].



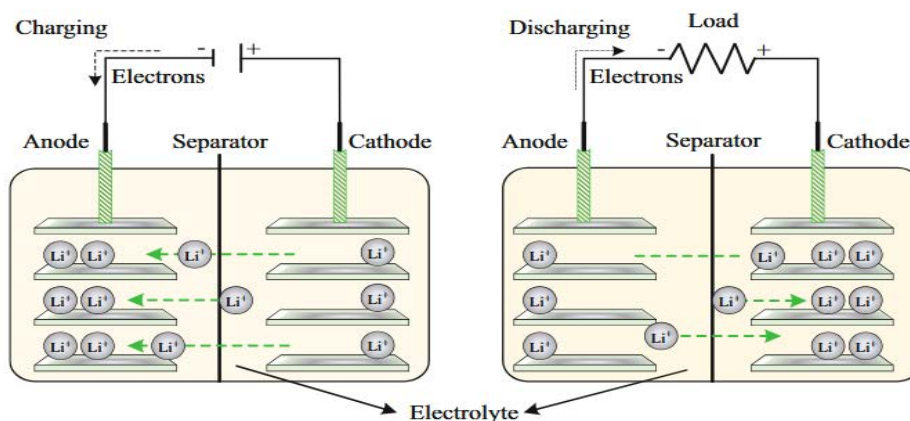
Εικόνα 13 Η δομή ενός υβριδικού υπερπυκνωτή [20].

2.3.2.2 Μπαταρίες

Οι μπαταρίες είναι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες μετατρέπουν την χημική σε ηλεκτρική ενέργεια και την απελευθερώνουν όταν είναι απαραίτητο. Είναι μια καθαρή μορφή αποθήκευσης ενέργειας, με βελτιωμένη ενεργειακή πυκνότητα, με σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος, την αξιοπιστία και τις ανάγκες συντήρησης. Οι πιο γνωστές είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, μόλυβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου και μετάλλου-αέρα.

2.3.2.2.α Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε εμπορικές εφαρμογές. Στην **Εικόνα 14**, παρουσιάζεται το χημικό δυναμικό των ιόντων λιθίου και των ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης σε ένα σύστημα μπαταρίας ιόντων λιθίου.



Εικόνα 14 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας ιόντων-λιθίου [1].

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές λόγω της χαμηλής συντήρησης, της εξαιρετικής κυκλωσιμότητας, της υψηλής τάσης (3,6V), της χαμηλής αυτοεκφόρτισης και της υψηλής ειδικής ενέργειας. Έχουν αντικαταστήσει τα συστήματα μπαταριών με βάση το νικέλιο (Ni-Cd και NiMH) που κυριαρχούσαν προηγουμένως στην αγορά. Οι μπαταρίες αυτές χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στα EV και HEV, καθώς και στις στρατιωτικές και αεροδιαστημικές βιομηχανίες.

Ενώ ο γραφίτης παραμένει το κύριο υλικό ανόδου για μπαταρίες ιόντων λιθίου λόγω της στρωματοειδούς δομής του, έχει αυξηθεί πρόσφατα η έρευνα σε μη γραφιτικούς άνθρακες, οξείδια μετάλλων και σύνθετα υλικά τους. Τα λιθιωμένα οξείδια μετάλλων, όπως είναι το οξείδιο του λιθίου κοβαλτίου, το οξείδιο αλουμινίου νικελίου κοβαλτίου λιθίου και το οξείδιο κοβαλτίου νικελίου μαγγανίου λιθίου, χρησιμεύουν ως υλικά καθόδου για μπαταρίες ιόντων λιθίου. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου

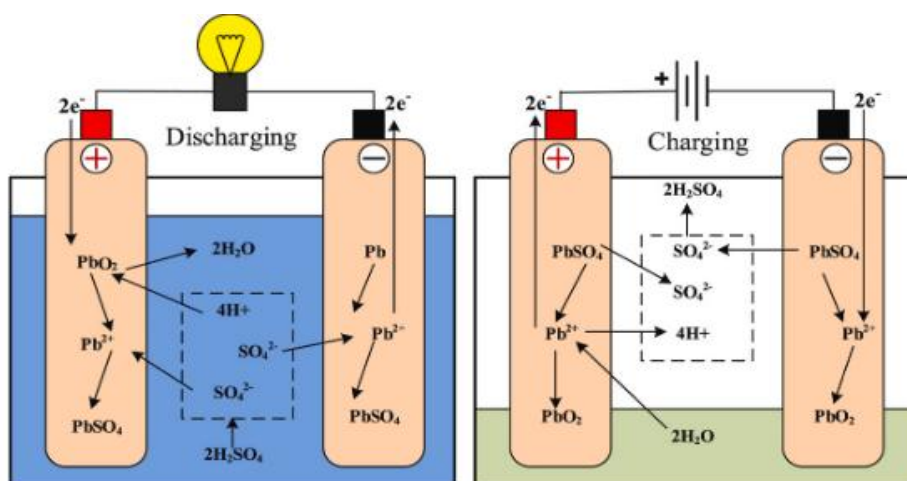
χρησιμοποιούν συνήθως υγιούς ηλεκτρολύτες από άλατα λιθίου, για παράδειγμα LiPF_6 , LiClO_4 και LiAsF_6 , διαλυμένους σε οργανικούς διαλύτες, όπως $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_3$, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ και $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3$.

Δεδομένου ότι είναι απαραίτητοι για την αύξηση της κινητικότητας των ιόντων λιθίου, η οποία τελικά ενισχύει την απόδοση των κυψελών των μπαταριών και είναι επίσης κρίσιμη για την ασφάλεια των συσκευών, η επιλογή των σωστών οργανικών διαλυτών είναι απαραίτητη. Οι νέες μπαταρίες στερεάς κατάστασης, που μερικές φορές ονομάζονται μπαταρίες πολυμερών Li-ion , αρχίζουν να διατίθενται στο εμπόριο, καθώς τα άλατα Li που περιέχουν πολύ αγωγίμα πολυμερή ηλεκτρώματα αντικαθιστούν τα παραδοσιακά υγρά άλατα Li ως ηλεκτρολύτη. Κυρίως για φορητές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, εξαιρετικά λεπτούς φορητούς υπολογιστές και φορητά ηλεκτρονικά είδη, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι δημοφιλείς λόγω της συμπαγούς και ελαφριάς δομής των κυψελών τους χωρίς διαρροές [19,23,26].

2.3.2.2.β Μπαταρίες Μόλυβδου-Οξέος (Pb-A)

Οι μπαταρίες μόλυβδου-οξέος αποτελεί μια από τις παλαιότερες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε χημικές αντιδράσεις μεταξύ ηλεκτροδίων μόλυβδου και θεικού οξέος. Συγκεκριμένα, η άνοδος αποτελείται από ηλεκτρόδιο μόλυβδου και ο ηλεκτρολύτης είναι θεικό οξύ, ενώ η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από οξείδιο του μόλυβδου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 15**. Αποτελούνται από έξι κυψέλες, κάτι που προσδίδει συνολική τάση 12 V.

Ως πλεονεκτήματα παρουσιάζονται η δυνατότητα ανακύκλωσης και το χαμηλό κόστος κατασκευής, αντίθετα τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν το μεγάλο βάρος και όγκο, τον περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, από 300-500 κύκλους, και ότι περιέχουν τοξικά υλικά, όπως ο μόλυβδος [28,29,30].



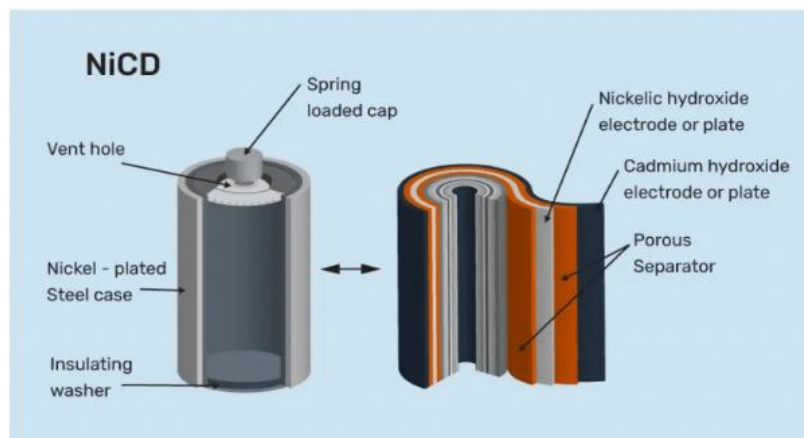
Εικόνα 15 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας μόλυβδου-οξέος [31].

2.3.2.2.γ Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου αποτελούν μία από τις πρώιμες τεχνολογίες επαναφορτιζόμενων μπαταριών, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα ως εναλλακτική λύση. Χαρακτηρίζονται

από ονομαστική τάση περίπου 1,2 V, ενώ η ενεργειακή τους πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 40 - 60 Wh/kg, τιμές που τις καθιστούν κατάλληλες για ποικίλες εφαρμογές. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτών είναι η εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία μπορεί να αγγίξει έως και τα 20 έτη. Παράλληλα, εμφανίζουν αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες, με εύρος λειτουργίας από -40°C έως και +75°C. Η ενεργειακή τους απόδοση κυμαίνεται από 60% έως 83%, ενώ μπορούν να αντέξουν έως και 25.000 κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης, ανάλογα με τις συνθήκες χρήσης και συντήρησης. Στην **Εικόνα 16** απεικονίζεται σχηματικά η δομή της μπαταρίας νικελίου-καδμίου.

Σε ό,τι αφορά τη χημική τους δομή, η άνοδος της μπαταρίας αποτελείται από μεταλλικό κάδμιο (Cd), το οποίο οξειδώνεται κατά τη λειτουργία σε υδροξείδιο του καδμίου ($\text{Cd}(\text{OH})_2$). Η κάθοδος περιέχει οξείδιο του νικελίου ($\text{NiO}(\text{OH})$), που κατά την εκφόρτιση αναγάγεται σε υδροξείδιο του νικελίου ($\text{Ni}(\text{OH})_2$). Ο ηλεκτρολύτης είναι αλκαλικής φύσης, με κύριο συστατικό συνήθως το υδροξείδιο του καλίου (KOH), το οποίο διευκολύνει την αγωγή ιόντων και συμβάλλει στην αποτελεσματική λειτουργία της κυψέλης [32,33,34].



Εικόνα 16 Απεικόνιση δομής μπαταρίας νικελίου-καδμίου [35].

2.3.2.2.δ Μπαταρίες Μετάλλου-Αέρα (MAB)

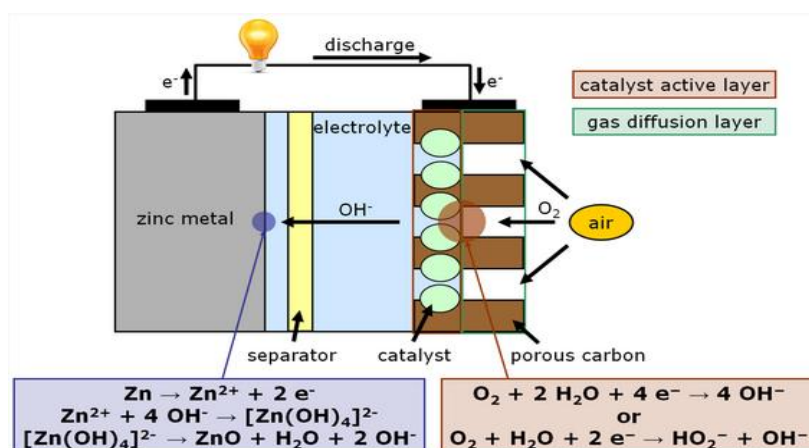
Παρά τη δεσπόμενη θέση των μπαταριών ιόντων λιθίου στον τομέα των επαναφορτιζόμενων ενεργειακών συστημάτων, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικές προκλήσεις. Η μέτρια ενεργειακή πυκνότητα (75–200 Wh/kg) σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος του λιθίου (10–70 USD/kg), περιορίζουν τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας σε ευρύτερη κλίμακα. Επιπλέον, ζητήματα που σχετίζονται με τη θερμική αστάθεια και την ασφάλεια εντείνουν την ανάγκη για καινοτόμες λύσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα αναδεικνύονται ως υποσχόμενες εναλλακτικές, με τις πιο διαδεδομένες παραλλαγές να περιλαμβάνουν συστήματα Zn-Air, Al-Air, Li-Air, Fe-Air και Na-Air [36].

- **Μπαταρίες Ψευδαργύρου-Αέρα (Zn-Air)**

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου-αέρα (Zn-air) αναδεικνύονται ως μια βιώσιμη εναλλακτική στις συμβατικές μπαταρίες ιόντων λιθίου, λόγω της υψηλής θεωρητικής ενεργειακής πυκνότητάς τους, η

οποία φθάνει τα 1.086 Wh/kg, υπερβαίνοντας σημαντικά εκείνη των LIBs . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7, η κάθοδος αυτού του τύπου μπαταρίας είναι ο αέρας ο οποίος βρίσκεται άφθονος στο περιβάλλον και εισέρχεται στην μπαταρία. Η κάθοδος αέρα περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την συνολική απόδοση της μπαταρίας. Ο μηχανισμός της ηλεκτροκατάλυσης λαμβάνει χώρα στην κάθοδο. Χρησιμοποιούνται διάφοροι ηλεκτροκαταλύτες προκειμένου να αυξήσουν την ταχύτητα των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων. Ο πιο συνηθισμένος είναι η πλατίνα ή λευκόχρυσος. Ο ψευδάργυρος, ως άφθονο και οικονομικό μέταλλο, συμβάλλει στη μείωση του κόστους παραγωγής και όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 17**, χρησιμοποιείται ως υλικό ανόδου δηλαδή στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, καθιστώντας τις μπαταρίες αυτές ελκυστικές για ευρεία χρήση.

Η λειτουργία των Zn-air μπαταριών βασίζεται σε αλκαλικούς ηλεκτρολύτες, όπως το KOH, όπου τα ιόντα ψευδαργύρου αντιδρούν με ιόντα υδροξειδίου (OH^-) για τον σχηματισμό $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$, το οποίο, όταν κορεστεί, παράγει οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO). Η χρήση ηλεκτροκαταλυτών, όπως ευγενή μέταλλα (π.χ., Pt, Pd) ή νανοσωλήνες άνθρακα, ενισχύει τις αντιδράσεις μείωσης και εξέλιξης του οξυγόνου (ORR/OER), βελτιώνοντας την απόδοση της μπαταρίας.



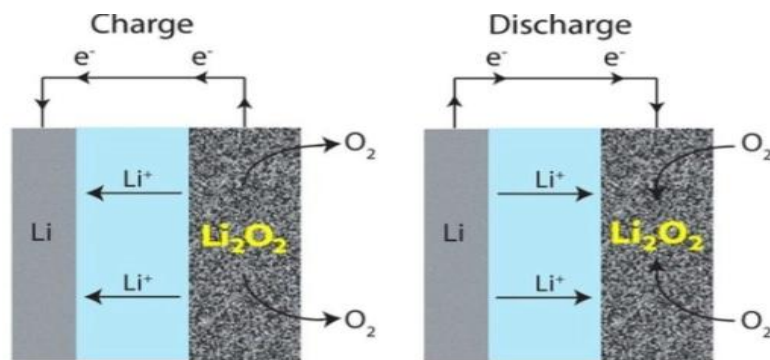
Εικόνα 17 Δομή και λειτουργία μπαταρίας ψευδαργύρου-αέρα [37].

Πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των Zn-air μπαταριών έχουν επιτρέψει την επίτευξη κύκλου ζωής που υπερβαίνει τους 1.000 κύκλους, με ενεργειακή απόδοση που ξεπερνά το 70% . Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τις μπαταρίες ψευδαργύρου-αέρα κατάλληλες για εφαρμογές όπως τα ακουστικά βαρηκοΐας και άλλες φορητές συσκευές [38,39].

• Μπαταρίες Λιθίου-Αέρα (Li-Air)

Οι μπαταρίες λιθίου-αέρα (Li-air) ξεχωρίζουν για την εξαιρετικά υψηλή θεωρητική ειδική ενέργειά τους, η οποία φθάνει τα 13.000 Wh/kg, προσεγγίζοντας την ενεργειακή πυκνότητα της βενζίνης. Ωστόσο, η πρακτική ειδική ενέργεια είναι σημαντικά χαμηλότερη, κυμαινόμενη μεταξύ 500 και 900 Wh/kg, λόγω απωλειών και υποβάθμισης των επιδόσεων της μπαταρίας.

Η άνοδος αποτελείται από μέταλλο λιθίου, το οποίο οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και ιόντα λιθίου στον ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 18**. Η κάθοδος, συνήθως κατασκευασμένη από πορώδη υλικά όπως νανοσωλήνες άνθρακα ή γραφένιο, διευκολύνει την αντίδραση του οξυγόνου με τα ιόντα λιθίου για τον σχηματισμό υπεροξειδίου του λιθίου (Li_2O_2), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8. Για τον έλεγχο της υγρασίας και την προστασία της καθόδου, χρησιμοποιείται συχνά φιλμ πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE).



Εικόνα 18 Απεικόνιση της δομής μιας μπαταρίας Li-Air κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και των αντιδράσεων που συμβαίνουν της ανόδου και της καθόδου κατά την εκφόρτιση και τη φόρτιση, αντίστοιχα [40].

Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν υδατικά διαλύματα με άλατα λιθίου, όπως το εξαφθοροφωσφορικό λίθιο (LiPF_6), και οργανικούς διαλύτες όπως το διμεθυλοσουλφοξείδιο (DMSO), ωστόσο, αυτά τα συστήματα αντιμετωπίζουν προκλήσεις, όπως η πτητικότητα και η διάβρωση του λιθίου.

Οι στερεοί ηλεκτρολύτες, όπως τα κεραμικά υλικά τύπου NASICON (π.χ., LAGP) σε συνδυασμό με πολυμερή όπως το PEO, προσφέρουν βελτιωμένη σταθερότητα και μειωμένο κίνδυνο σχηματισμού δενδριτών. Παρά τις τεχνικές προκλήσεις, οι μπαταρίες Li-air παρουσιάζουν υψηλές αποδόσεις, κυμαινόμενες μεταξύ 75% και 95%, και το κόστος τους εκτιμάται μεταξύ 100 και 250 USD/kWh, καθιστώντας τις υποσχόμενες για εφαρμογές υψηλής ενεργειακής πυκνότητας [41].

2.3.2.3 Υδρογόνο: Παραγωγή και Χρήση

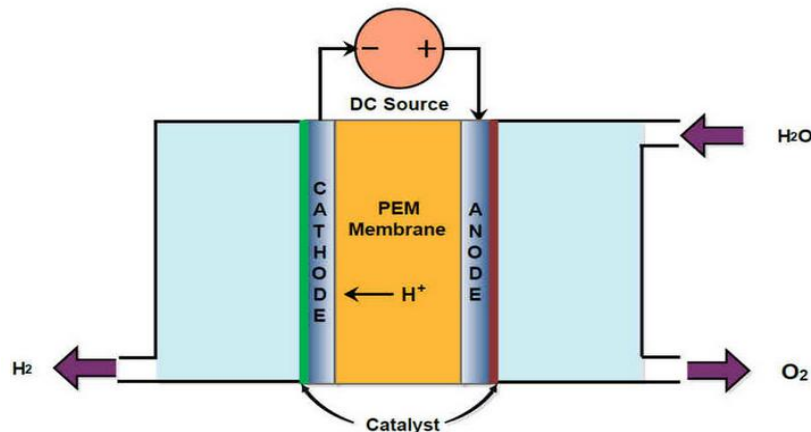
2.3.2.3.α Ηλεκτρόλυση νερού

2.3.2.3.α.1 Ηλεκτρόλυση νερού χαμηλής θερμοκρασίας

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με ηλεκτρόλυση ατμού σε υψηλές θερμοκρασίες (> 700-800 °C) ή νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες (< 100 °C).

Τα συστήματα ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη είτε μια πολυμερή μεμβράνη, αγωγός πρωτονίων, είτε ένα αλκαλικό διάλυμα, αγωγός ιόντων υδροξυλίου, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 19**. Σε σύγκριση με το υδρογόνο που παράγεται με αεριοποίηση άνθρακα ή αναμόρφωση φυσικού αερίου, τα συστήματα ηλεκτρόλυσης προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως υδρογόνο υψηλής καθαρότητας,

αρθρωτή δομή μονάδας και γρήγορη εκκίνηση και διακοπή λειτουργίας. Επιπλέον τα συστήματα αυτά έχουν καλή ικανότητα παρακολούθησης του φορτίου και είναι κατάλληλα για ενσωμάτωση με διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακές φωτοβολταϊκές και αιολικές γεννήτριες.



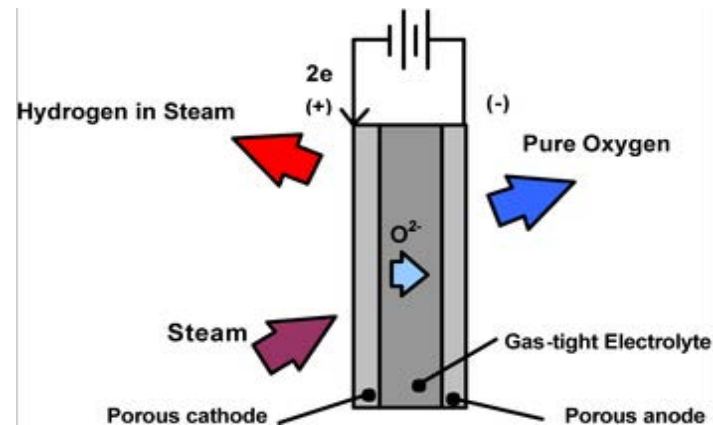
Εικόνα 19 Αρχές λειτουργίας της ηλεκτρόλυσης νερού χαμηλής θερμοκρασίας [48].

Τα πρόσθετα πλεονεκτήματα έναντι των αλκαλικών συστημάτων από τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας, τα συστήματα με βάση τη μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEM) περιλαμβάνουν υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος, συστήματα πλήρως στερεάς κατάστασης που δεν απαιτούν συμπλήρωση ηλεκτρολύτη ή αλκαλικά διαλύματα και υδρογόνο υψηλότερης καθαρότητας και παραγωγή υδρογόνου σε πολύ υψηλότερες πιέσεις. Η διαδικασία ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου είναι ενεργοβόρα και η πλειονότητα των εμπορικών ηλεκτρολυτών χρειάζεται ηλεκτρική ισχύ εισόδου 6,7-7,3 kWh/Nm³, περίπου 05-55% απόδοση με βάση την υψηλή θερμογόνο δύναμη υδρογόνου. Αυτό αυξάνει το κόστος παραγωγής υδρογόνου και αναιρεί τα οφέλη του υδρογόνου ως καθαρού καυσίμου εάν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από πόρους ορυκτών καυσίμων.

Οι ηλεκτρολύτες χαμηλής θερμοκρασίας νερού είναι ιδανικοί για την ενσωμάτωση με διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επειδή μπορούν να λειτουργούν με ευκολία υπό μεγάλες διακυμάνσεις φορτίου [49,50].

2.3.2.3.α.2 Ηλεκτρόλυση νερού υψηλής θερμοκρασίας

Η θερμοδυναμική κάνει την ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες πιο αποδοτική, καθώς, σε αντίθεση με την αύξηση της θερμικής ζήτησης, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται σημαντικά. Στις υψηλές θερμοκρασίες, παρατηρείται αύξηση της ιοντικής αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη και βελτίωση των ρυθμών των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 20**. Επιπλέον, η απορριπτόμενη θερμότητα από διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας, όπως πυρηνικές, ηλιακές, γεωθερμικές και ορυκτές, μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί προς όφελος της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης [51].



Εικόνα 20 Σχήμα ηλεκτρόλυσης υψηλής θερμοκρασίας [52].

2.3.2.3.α.3 Διαχωρισμός νερού

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω της διαδικασίας διάσπασης του νερού, η οποία επιτρέπει στο νερό να διασπαστεί απευθείας στα συστατικά του στοιχεία. Το πόσο της ενέργειας που απαιτείται για τη διάσπαση ενός μεμονωμένου δεσμού H-O-H περιλαμβάνει θερμική (θερμότητα), ηλεκτρική (ρεύμα) και φωτεινή (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία), όπως φαίνεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21 Σχήμα συστήματος δύο ηλεκτροδίων για συνολική διάσπαση νερού [53].

Διαφορετικές διαδικασίες διάσπασης του νερού συμβαίνουν γενικά κάθε φορά που χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό είδος πηγής ενέργειας, όπως η ηλεκτρόλυση, η θερμólυση ή η φωτόλυση, για την πραγματοποίηση της αντίδρασης.

Για να οδηγηθεί η ηλεκτρολυτική διάσπαση του νερού, πρέπει να περάσει ηλεκτρικό ρεύμα από το νερό. Στη διεπιφάνεια ηλεκτροδίου-διαλύματος, σε έναν ηλεκτρολύτη λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου, μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική ενέργεια. Ενώ μια αντίδραση εξέλιξης υδρογόνου λαμβάνει χώρα στην κάθοδο, το νερό υφίσταται μια αντίδραση στην άνοδο για την παραγωγή πρωτονίων και οξυγόνου. Παρόλο που η ηλεκτρολυτική διάσπαση του νερού διατίθεται στο εμπόριο ως λιγότερο επιβλαβής διαδικασία από τη συμβατική SMR με μηδενικές εκπομπές CO₂, οι ηλεκτρολύτες τροφοδοτούνται συνήθως με ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται κυρίως από την καύση

άνθρακα ή φυσικού αερίου, η οποία απελευθερώνει CO₂ ως παραπροϊόν. Ως αποτέλεσμα, η έρευνα σήμερα επικεντρώνεται περισσότερο στη χρήση τεχνολογιών συλλογής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για την τροφοδοσία της ηλεκτροχημικής/καταλυτικής αντίδρασης διάσπασης νερού.

Μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου που επικεντρώνεται στη μείωση των εκπομπών CO₂ και στη χρήση ανανεώσιμων πόρων, όπως το ηλιακό φως και το νερό, είναι η φωτοχημική/φωτοκαταλυτική διάσπαση νερού. Η ευθυγράμμιση του ηλεκτρονικού χάσματος ζώνης του φωτοευαίσθητου υλικού με το δυναμικό οξειδοαναγωγής του νερού είναι η πιο κρίσιμη απαίτηση για τις αντιδράσεις διάσπασης του νερού με την ηλιακή ενέργεια. Τα αποτελεσματικά φωτοκαταλυτικά υλικά, των οποίων τα κενά τροχιακά d σχηματίζουν τον πυθμένα των αντίστοιχων ζωνών αγωγιμότητας, θεωρείται γενικά ότι επωφελούνται από την παρουσία κατιόντων μετάλλων μετάπτωση με ηλεκτρονική διαμόρφωση d0 (Ta⁵⁺, Ti⁴⁺, Zr⁴⁺, Nb⁵⁺, Ta⁵⁺, W⁶⁺ και Mo⁶⁺) ή κατιόντων μετάλλων με ηλεκτρονική διαμόρφωση d10 (In³⁺, Sn⁴⁺, Ga³⁺ και Ge⁴⁺). Σημαντική πρόοδος στον τομέα αυτό έχει σημειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες από ένα αυξανόμενο αριθμό ερευνητικών ομάδων που έχουν πραγματοποιήσει εμπειριστικές επισκοπήσεις του θέματος. Μια άλλη εναλλακτική μέθοδος για τη δημιουργία υδρογόνου από νερό με πιθανώς ελάχιστες ή καθόλου εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι η θερμική ή θερμοχημική διάσπαση νερού. Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν μελετήσει αυτή την τεχνολογία με μεγάλη λεπτομέρεια και η βιβλιογραφία περιγράφει περισσότερους από 300 κύκλους διάσπασης νερού με ποικίλες παραμέτρους λειτουργίας, τεχνικές προκλήσεις και δυνατότητες παραγωγής υδρογόνου.

Οι υψηλές θερμοκρασίες (500-2000°C) είναι απαραίτητες για τις θερμοχημικές διεργασίες διάσπασης νερού, προκειμένου να προωθηθεί μια ακολουθία χημικών αντιδράσεων που οδηγούν στην ανάπτυξη υδρογόνου. Ένας κλειστός κύκλος που χρησιμοποιεί μόνο νερό και παράγει υδρογόνο και οξυγόνο δημιουργείται με την επαναχρησιμοποίηση των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται σε κάθε κύκλο. Η τεχνολογία αυτή είναι ένας ελκυστικός τρόπος για την παραγωγή υδρογόνου με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας ή απορριπτόμενης θερμότητας από υφιστάμενους πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η εφαρμογή σε μεγαλύτερη κλίμακα λύσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για αντιδράσεις διάσπασης του νερού εξακολουθεί ωστόσο να είναι δύσκολη και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνολική οικονομία της διαδικασίας καθώς και από τις μελλοντικές εξελίξεις σε φιλικές προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες [54,55,56].

2.3.4 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα αποτελούν μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ταξινόμησή τους βασίζεται τόσο στη θέση εγκατάστασης όσο και στον τρόπο λειτουργίας τους. Ανάλογα με τη χωροθέτηση, διακρίνονται σε επίγεια και σε συστήματα στέγης. Στα επίγεια, η εγκατάσταση πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου στο έδαφος, ενώ

στα συστήματα στέγης τα ΦΒ πλαίσια τοποθετούνται πάνω σε κτιριακές κατασκευές (οικιακές, βιομηχανικές ή εμπορικές).

Η απόδοση ενός ΦΒ συστήματος εξαρτάται κυρίως από τρεις παράγοντες: τη σκίαση, τον προσανατολισμό και την κλίση. Η σκίαση μειώνει αισθητά την παραγωγή, συνεπώς απαιτείται μελέτη για την αποφυγή παρεμβολών από σταθερά ή μεταβλητά εμπόδια (π.χ. δέντρα, κτίρια). Ο βέλτιστος προσανατολισμός για συστήματα στο βόρειο ημισφαίριο είναι προς τον νότο, με κλίση περίπου 20°, ενώ εποχιακές ρυθμίσεις της κλίσης (αυξημένη τον χειμώνα, μειωμένη το καλοκαίρι) μπορούν να ενισχύσουν την ενεργειακή απόδοση.

Ως προς τον τρόπο λειτουργίας, τα ΦΒ συστήματα κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. **Αυτόνομα (off-grid):** Δεν συνδέονται με το δίκτυο και χρησιμοποιούν μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας, εξασφαλίζοντας τροφοδοσία κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανεπαρκής.
2. **Διασυνδεδεμένα (grid-connected):** Συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο λειτουργεί ως εφεδρική πηγή και αποθήκη ενέργειας.
3. **Υβριδικά:** Συνδυάζουν αποθήκευση σε μπαταρίες και διασύνδεση με το δίκτυο. Η ενέργεια αποθηκεύεται αρχικά και το πλεόνασμα τροφοδοτείται στο δίκτυο.

Στα αυτόνομα και υβριδικά συστήματα, η ύπαρξη συστοιχίας μπαταριών επιτρέπει υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ οι ελεγκτές φόρτισης προστατεύουν από υπερφόρτιση. Ωστόσο, το υψηλό κόστος των μπαταριών περιορίζει συχνά τη χρήση τους [57].



Εικόνα 22 Διάγραμμα ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος με εφεδρική μπαταρία, μετατροπέα, ελεγκτή και ενσωμάτωση μετρητή [58].

Κεντρικό ρόλο στο ΦΒ σύστημα διαδραματίζει ο αντιστροφέας (inverter), ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) που παράγεται από τα ΦΒ πάνελ σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), όπως παρουσιάζεται

στην **Εικόνα 22**. Παράλληλα, σταθεροποιεί την τάση και διασφαλίζει ημιτονοειδή κυματομορφή. Η απόδοσή του κυμαίνεται από 90% έως 96%, με βέλτιστη λειτουργία μεταξύ 70%–90% της ονομαστικής ισχύος της συστοιχίας [59].

Για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, απαιτείται η χρήση μικροδιακοπών (MCB) τόσο στην πλευρά DC όσο και στην πλευρά AC, για τη σύνδεση και αποσύνδεση των κυκλωμάτων κατά τη συντήρηση. Επιπλέον, η επιλογή καλωδίων (χάλκινα με επικάλυψη PVC) και η σωστή διαστασιολόγησή τους ανάμεσα στις συστοιχίες, τα κουτιά διακλάδωσης και τους αντιστροφείς είναι κρίσιμη για την αποδοτική και ασφαλή μεταφορά ενέργειας [59,60].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

3.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

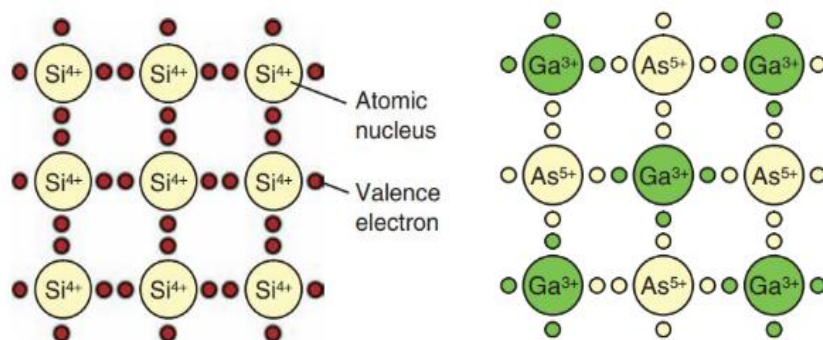
3.1.1 Εισαγωγή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στηρίζεται στις ιδιότητες των ημιαγωγών υλικών. Ουσιαστικά, το φως που προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε αντανακλάται, είτε διαπερνά, είτε απορροφά το υλικό της επιφάνειας. Όλη αυτή η διαδικασία διακρίνεται ως μετατροπή ενέργειας. Σημαντικός παράγοντας για τη λειτουργία αυτού του φαινομένου είναι η ένωση p-n, η οποία είναι ένας συνδυασμός θετικής πλευράς (p), στην οποία υπάρχουν κενές σπές και αρνητικής πλευράς (n), στην οποία περιέχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, αρνητικά φορτισμένα. Όταν καταφέρουν και συναντηθούν, τα ηλεκτρόνια αυτά αφήνουν ένα θετικό φορτίο στη μια πλευρά, ενώ στην άλλη πλευρά δημιουργείται ένα αρνητικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται από λεπτές μεταλλικές τσιμπίδες και μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια [58].

Οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες που υπάρχουν είναι τρεις. Η πρώτη τεχνολογία ονομάζεται ηλιακή κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου. Η δεύτερη τεχνολογία, η οποία αποτελείται από μια λεπτή μεμβράνη, ονομάζονται ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης. Η τρίτη τεχνολογία, η οποία είναι οικονομικά αποδοτική η παραγωγή τους και έχουν υψηλή απόδοση, ονομάζονται κυψέλες περοβσκίτη [61].

3.1.1.α Ημιαγωγοί

Το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge), είναι ημιαγωγοί που μπορούν να παρουσιάσουν ιδιότητες που εντάσσονται μεταξύ εκείνων των αγωγίων και των μονωτικών υλικών, ανάλογα με τις συνθήκες που υπόκεινται. Η θερμοκρασία αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει την συμπεριφορά τους, δηλαδή με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι ημιαγωγοί τείνουν να επιδεικνύουν αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα, προσεγγίζοντας τα χαρακτηριστικά των αγωγίων υλικών, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 23**.



Εικόνα 23 Κρυσταλλική δομή του πυριτίου: Ατομικοί πυρήνες και ηλεκτρόνια σθένους (αριστερά). Κρυσταλλικό πλέγμα του GaAs (δεξιά) [62].

Επιπρόσθετα, για την αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία, υπάρχει μια διαδικασία για την βελτίωση των χημικών επιδόσεων με την προσθήκη προσμίξεων σε υλικά με την ονομασία ντοπάρισμα (doping). Το ντοπάρισμα χρησιμοποιείται σε όλες τις εφαρμογές ημιαγωγών, όπως στην διαδικασία κατασκευής των ηλεκτρονικών ειδών, για παράδειγμα τρανζίστορ [2].

3.1.1.β Ημιαγωγοί ντοπαρίσματος

Οι ημιαγωγοί, από τη φύση τους, εμφανίζουν περιορισμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τα μέταλλα, γεγονός που τους καθιστά εγγενώς κακούς αγωγούς του ηλεκτρισμού. Ωστόσο, η ηλεκτρική τους συμπεριφορά μπορεί να τροποποιηθεί ουσιαστικά μέσω της διαδικασίας της προσθήκης ξένων ατόμων στον κρυσταλλικό τους πλέγμα, τεχνική που είναι γνωστή ως ντοπάρισμα (doping). Η εισαγωγή τέτοιων ατόμων αλλοιώνει τις ηλεκτρονικές ιδιότητες του υλικού, επιτρέποντας την αύξηση της αγωγιμότητάς του. Μία από τις βασικές κατηγορίες ντοπαρίσματος είναι το αρνητικού-τύπου (n-type) ντοπάρισμα, όπου χρησιμοποιούνται άτομα από την πέμπτη ομάδα του περιοδικού πίνακα, όπως ο φώσφορος (P), για τη ντοπαρισμένη ενίσχυση του πυριτίου (Si).

Τα άτομα αυτά διαθέτουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο σθένους σε σχέση με το πυρίτιο. Η ενσωμάτωσή τους δημιουργεί ενδογενείς ενεργειακές στάθμες ελαφρώς κάτω από τη ζώνη αγωγιμότητας, διευκολύνοντας τη μεταπήδηση των ηλεκτρονίων σε αυτή με την παροχή ελάχιστης ενέργειας (περίπου 1/50 eV). Τα άτομα που εισάγονται χαρακτηρίζονται ως δότες, καθώς προσφέρουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στο σύστημα. Παράλληλα, λόγω της περίσσειας αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων, οι οπές —δηλαδή τα κενά θέσεις ηλεκτρονίων— εμφανίζονται σε σαφώς μικρότερη συγκέντρωση, καθιστώντας τα ηλεκτρόνια τους κυρίαρχους φορείς φορτίου.

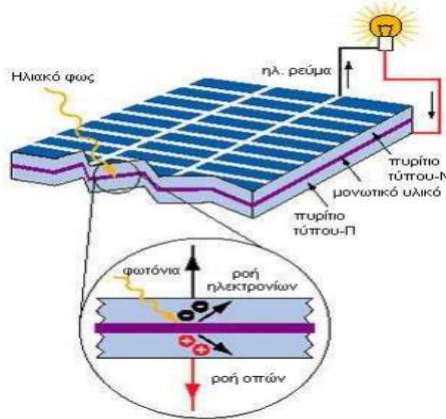
Αντίστροφα, η διαδικασία θετικού-τύπου (p-type) ντοπαρίσματος επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ατόμων από την τρίτη ομάδα του περιοδικού πίνακα, όπως το βόριο (B), τα οποία διαθέτουν τρία μόνο ηλεκτρόνια σθένους. Η ενσωμάτωσή τους στο πλέγμα του πυριτίου δημιουργεί ατελείς ομοιοπολικούς δεσμούς, αφήνοντας ένα δεσμό ακάλυπτο. Το κενό αυτό, γνωστό ως οπή, λειτουργεί ως φορέας θετικού φορτίου και διευκολύνει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα άτομα βορίου, σε αυτή την περίπτωση, χαρακτηρίζονται ως αποδέκτες.

Η δυνατότητα ελέγχου των ηλεκτρονικών ιδιοτήτων μέσω επιλεκτικού ντοπαρίσματος αποτελεί τη βάση για τη σχεδίαση και τη λειτουργία των σύγχρονων ηλεκτρονικών και μικροηλεκτρονικών διατάξεων, όπως τα τρανζίστορ, οι δίοδοι και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα [63].

3.1.1.γ Η ένωση p-n

Όταν ένας ημιαγωγός τύπου n συνδυάζεται με έναν ημιαγωγό τύπου p, δημιουργείται μια επαφή p-n, η οποία αποτελεί θεμελιώδη δομή σε πολλές ηλεκτρονικές διατάξεις. Στην περιοχή αυτή, παρατηρείται διάχυση φορέων φορτίου λόγω διαφορών στη συγκέντρωση: τα ηλεκτρόνια από την πλευρά n κινούνται

προς την πλευρά p, ενώ οι οπές από την πλευρά p κινούνται προς την πλευρά n, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 24**. Καθώς οι φορείς αυτοί διαχέονται, επανασυνδέονται με φορείς αντίθετου τύπου, οδηγώντας σε εξουδετέρωση των κινητών φορέων στην περιοχή κοντά στη διασταύρωση.



Εικόνα 24 Η ένωση P-N [64].

Αυτή η διαδικασία δημιουργεί μια περιοχή απογύμνωσης (depletion region), η οποία χαρακτηρίζεται από την απουσία κινητών φορέων φορτίου και την παρουσία σταθερών ιοντικών φορτίων από τους δότες και αποδέκτες. Η συσσώρευση αυτών των σταθερών φορτίων δημιουργεί ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο αντισταθμίζεται στη διάχυση των φορέων και οδηγεί σε ισορροπία. Το ηλεκτρικό αυτό πεδίο προκαλεί τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού, γνωστής ως ενσωματωμένη τάση (built-in potential) ή τάση διάχυσης, η οποία είναι κρίσιμη για τη λειτουργία της επαφής p-n.

Η περιοχή απογύμνωσης και η ενσωματωμένη τάση αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά της επαφής p-n και καθορίζουν τη συμπεριφορά της υπό εφαρμογή εξωτερικής τάσης, όπως στη λειτουργία των διόδων. Η κατανόηση αυτών των φαινομένων είναι ουσιώδης για την ανάλυση και το σχεδιασμό ημιαγωγικών διατάξεων [65].

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

3.2.1 Παραγωγή πολυπυριτίου

Η παραγωγή πολυπυριτίου υψηλής καθαρότητας αποτελεί μια πολυσταδιακή διαδικασία που ξεκινά από φυσικές πηγές πυριτίου, όπως ο χαλαζίτης και το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Αρχικά, το SiO_2 υποβάλλεται σε καρβοθερμική αναγωγή με άνθρακα (π.χ., γραφίτη ή κοκ) σε ηλεκτρικό κλίβανο βυθισμένου τόξου, όπου οι θερμοκρασίες φτάνουν περίπου τους 2000°C . Σε αυτή τη φάση, το SiO_2 ανάγεται σε μεταλλουργικό πυρίτιο (MG-Si) με καθαρότητα περίπου 98–99%.



Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την αντίδραση του MG-Si με άνυδρο υδροχλωρικό οξύ (HCl) σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης, σχηματίζοντας τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) και υδρογόνο. Το τριχλωροσιλάνιο καθαρίζεται μέσω κλασματικής απόσταξης για την απομάκρυνση των προσμίξεων.

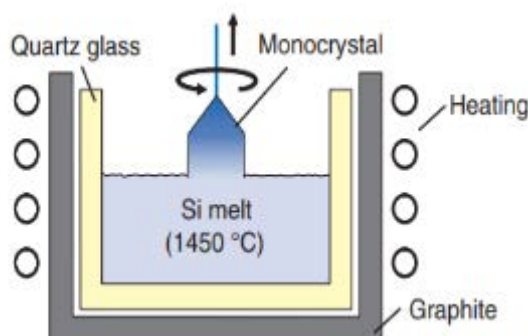


Στη συνέχεια, το καθαρό τριχλωροσιλάνιο χρησιμοποιείται στη διαδικασία Siemens, όπου αποσυντίθεται παρουσία υδρογόνου σε θερμοκρασίες περίπου 1000°C , εναποθέτοντας πολυπυρίτιο υψηλής καθαρότητας σε θερμαινόμενες ράβδους γραφίτη μέσω χημικής απόθεσης ατμών (CVD). Το τελικό προϊόν επιτυγχάνει καθαρότητα έως και 99,999999999% (11N), κατάλληλο για εφαρμογές στη μικροηλεκτρονική και τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Η διαδικασία Siemens, αν και ενεργοβόρα, παραμένει η κυρίαρχη μέθοδος για την παραγωγή πολυπυριτίου υψηλής καθαρότητας, λόγω της ικανότητάς της να απομακρύνει αποτελεσματικά μεταλλικές και άλλες προσμίξεις. Ωστόσο, συνεχίζονται οι προσπάθειες για την ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων που να προσφέρουν υψηλή καθαρότητα με μειωμένο ενεργειακό κόστος [63,65].

3.2.2 Παραγωγή μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία κατασκευάζονται από πυρίτιο, όπως παρουσιάζονται στην **Εικόνα 25**, έχουν υψηλή απόδοση σε σχέση από τα πολυκρυσταλλικά και τα ηλιακά κύτταρα η-λιακής μεμβράνης, αλλά είναι ένας ιδιαίτερος ακριβός τύπος πυριτίου ως προς την κατασκευή του και ενεργοβόρος.



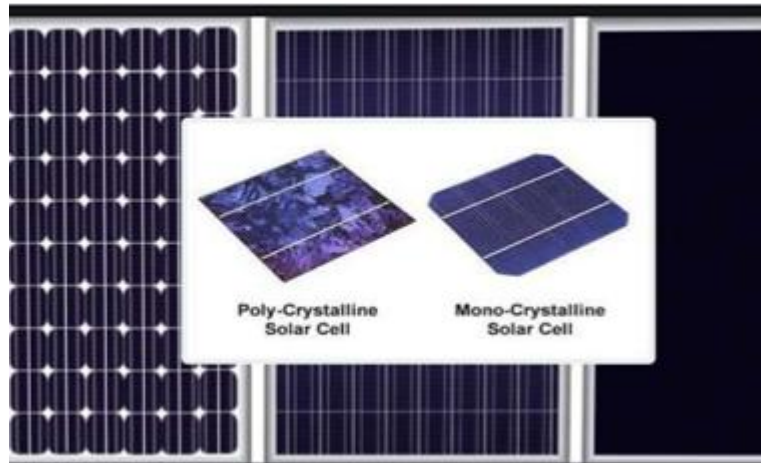
Εικόνα 25 Διαδικασία παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου [66].

Οι κυψέλες αυτές συνήθως παράγονται σε στρόγγυλο και τετράγωνο σχήμα, με το χρώμα τους να είναι μπλε και μαύρο. Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και των κενών που δημιουργούν μεταξύ τους, όταν τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο, η παραγωγή τους έχει αρχίσει και φθίνει [67].

3.2.3 Παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ, είναι κατασκευασμένα από λιγότερο πυρίτιο και με αυτόν τον τρόπο η κατασκευή τους είναι πιο οικονομική και λιγότερο πολύπλοκη, σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά.

Η απόδοση τους, βέβαια, είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, της τάξης του 15%. Οι κυψέλες αυτές κατασκευάζονται από ένα μπλοκ χυτού πυριτίου σε σχήμα ράβδου και στην συνέχεια τα κόβουν σε πλάκες, οι οποίες είναι τετράγωνες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην χάνεται αρκετό πυρίτιο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 26** [63].

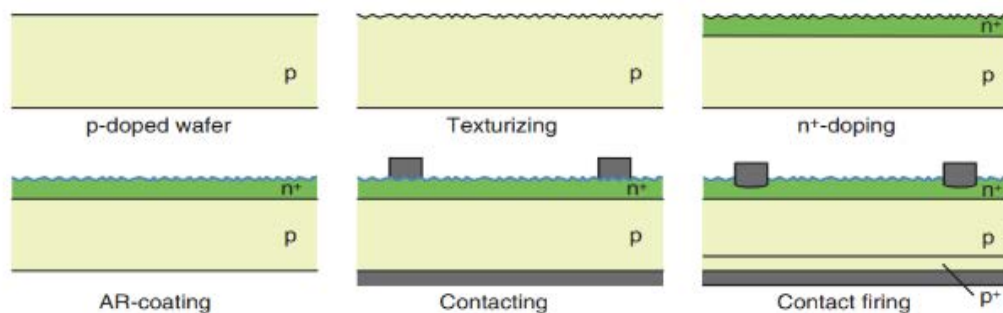


Εικόνα 26 Μονοκρυσταλλικό - Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο [68].

3.2.3.α Παραγωγή ηλιακών κυψελών

Οι ηλιακές κυψέλες για την παραγωγή ενός τυποποιημένου κελιού με βάση το πυρίτιο όπως φαίνεται στην **Εικόνα 27**, υπάρχουν τα εξής βήματα που πρέπει να ακολουθήσουν και συνήθως τεμαχίζονται σε γκοφρέτες χρησιμοποιώντας συρματοπρίονα υψηλής ταχύτητας. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί μια πάστα με βάση τη γλυκόλη που περιέχει σωματίδια καρβιδίου του πυριτίου, τα οποία είναι εξαιρετικά σκληρά και διευκολύνουν τη δράση κοπής εισερχόμενα στο διάκενο κοπής μεταξύ του πλινθίου πυριτίου και των συρμάτων. Το διάκενο κοπής μετράει τουλάχιστον 120 μm , και με το τρέχον πάχος πλακιδίων 180 μm , το υλικό που χάνεται κατά το πριόνισμα είναι σχεδόν ισοδύναμο με το αξιοποιήσιμο τμήμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική απώλεια υλικού, ένα κρίσιμο στοιχείο στη διαδικασία κατασκευής.

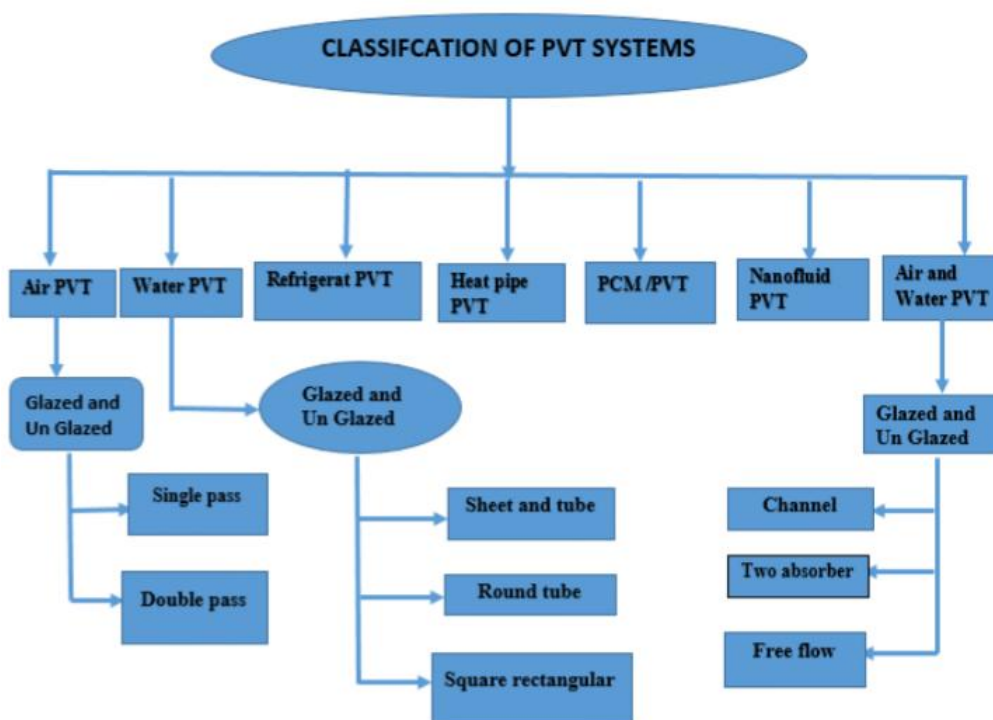
Η κατανόηση και η βελτιστοποίηση αυτών των διαδικασιών είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της απόδοσης και της οικονομικότητας στην παραγωγή ηλιακών κυψελών [69].



Εικόνα 27 Στάδια κατασκευής τυποποιημένων κυττάρων [69].

3.2.4 Τύποι ηλιακών συλλεκτών

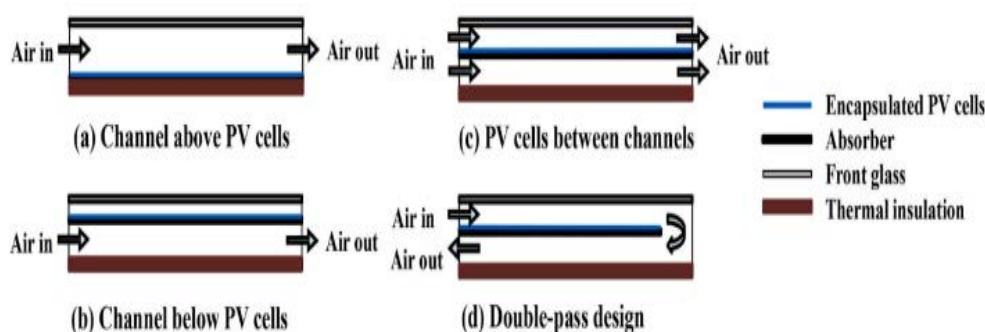
Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες των συστημάτων θερμικής ανταλλαγής και αποθήκευσης θερμότητας που βασίζεται σε διάφορους τύπους θερμικών ρευστών. Συνήθως δίνεται έμφαση στα συστήματα ψύξης που χρησιμοποιούν αέρα και νερό ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 28** [63].



Εικόνα 28 Τύποι συστημάτων PVT που κατηγοριοποιούνται με βάση τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας [63].

3.2.4.1 Συστήματα Αέρα (Air PVT)

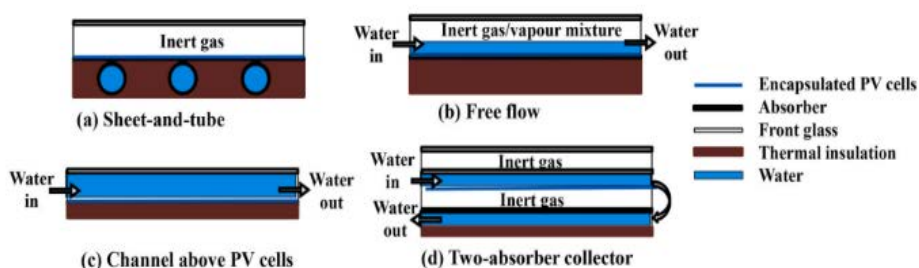
Τα συστήματα αέρα χρησιμοποιούν τον αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Ο αέρας κυκλοφορεί γύρω από θερμικούς συλλέκτες, όπου απορροφά θερμότητα και την μεταφέρει στο σημείο που απαιτείται. Τα συστήματα αυτά εφαρμόζονται για σκοπούς όπως ο εξαερισμός, η θέρμανση χώρων, η προθέρμανση του αέρα και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η **Εικόνα 29**, απεικονίζει διάφορες διαμορφώσεις ροής αέρα σε συλλέκτες φωτοβολταϊκών συστημάτων με βάση τον αέρα, συμπεριλαμβανομένων (α) κανάλια αέρα πάνω από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, (β) κανάλια αέρα κάτω από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, (γ) σχέδια διπλού καναλιού, και (δ) διπλά συστήματα διπλού περάσματος. Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων αέρα, οι οποίοι είναι οι συλλέκτες επίπεδης πλάκας και οι συλλέκτες CPVT (συμπυκνωμένου φωτοβολταϊκού θερμικού συστήματος). Παρά τα πλεονεκτήματά του, τα οποία είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής, υπάρχει περιορισμένη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας και χαμηλή θερμική χωρητικότητα [70].



Εικόνα 29 Διαμορφώσεις συστημάτων PVT με βάση τον αέρα [71].

3.2.4.2 Συστήματα Νερού (Water-Based Systems)

Τα συστήματα νερού χρησιμοποιούν το νερό ως θερμικό ρευστό, το οποίο διαθέτει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τον αέρα, καθιστώντας το ιδανικό για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Επιπλέον, το νερό είναι πιο αποτελεσματικό από τον αέρα στη μεταφορά θερμότητας, καθώς επιτυγχάνει γρηγορότερη και αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 30, υπάρχουν τέσσερις διατάξεις, οι οποίες είναι (α) Φύλλο και σωλήνας, όπου σωλήνες μεταφοράς νερού έρχονται σε άμεση επαφή με τον απορροφητή, (β) Ελεύθερης ροής, όπου το νερό ρέει ελεύθερα, (γ) Κανάλι πάνω από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, όπου το νερό κυκλοφορεί εντός καναλιού πάνω από τα φωτοβολταϊκά και (δ) Συλλέκτης δύο απορροφητών, όπου χρησιμοποιούνται δύο απορροφητές για αποτελεσματικότερο διαχωρισμό θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, για τη σωστή λειτουργία τους απαιτούνται σύνθετοι εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι αυξάνουν το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης [72].

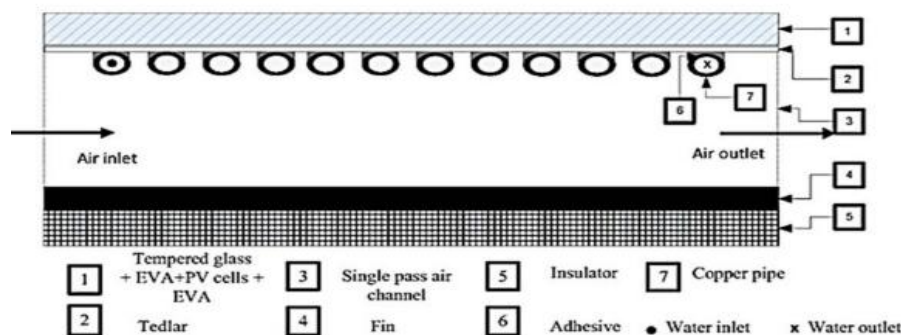


Εικόνα 30 Σχηματική απεικόνιση σχεδίων συλλεκτών με βάση το νερό [72].

3.2.4.3 Συστήματα Bi-fluid (Bi-fluid Systems)

Τα συστήματα Bi-fluid (ή διφασικά ρευστοδυναμικά συστήματα) αναφέρονται σε ροές που περιλαμβάνουν την παρουσία δύο διακριτών ρευστών φάσεων, οι οποίες μπορεί να είναι είτε δύο υγρά, είτε ένα υγρό και ένα αέριο. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 31, τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα φωτοβολταϊκό έλασμα, ένα φιδωτό χάλκινο σωλήνα για θέρμανση νερού και ένα κανάλι αέρα μονής διέλευσης για θέρμανση αέρα. Η συνύπαρξη αυτών των φάσεων μπορεί να λαμβάνει χώρα σε διάφορες

διαμορφώσεις — όπως διαστρωματωμένη, φυσαλιδώδης, σταγονιδιακή ή εναλλασσόμενη ροή (slug flow) — ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών, τη γεωμετρία του αγωγού και τις συνθήκες ροής. Η μαθηματική περιγραφή των Bi-fluid συστημάτων βασίζεται σε τροποποιημένες μορφές των εξισώσεων συνέχειας, ορμής και ενέργειας για κάθε φάση, λαμβάνοντας υπόψη τις διαπλεκόμενες διεπιφανειακές αλληλεπιδράσεις, όπως η τριβή, η μεταφορά μάζας και θερμότητας, καθώς και οι φαινομενολογικοί μηχανισμοί συνεπιφάνειας. Η πολυπλοκότητα αυξάνεται σημαντικά λόγω της ανάγκης για συζευγμένα μοντέλα και ειδικές συνθήκες διεπιφάνειας, ενώ απαιτούνται συχνά υπολογιστικές προσεγγίσεις (CFD) για την επίλυση των αντίστοιχων συστημάτων εξισώσεων.



Εικόνα 31 Διάγραμμα διατομής ενός αερόψυκτου και υδρόψυκτου φωτοβολταϊκού-θερμικού συλλέκτη μονής διέλευσης [73].

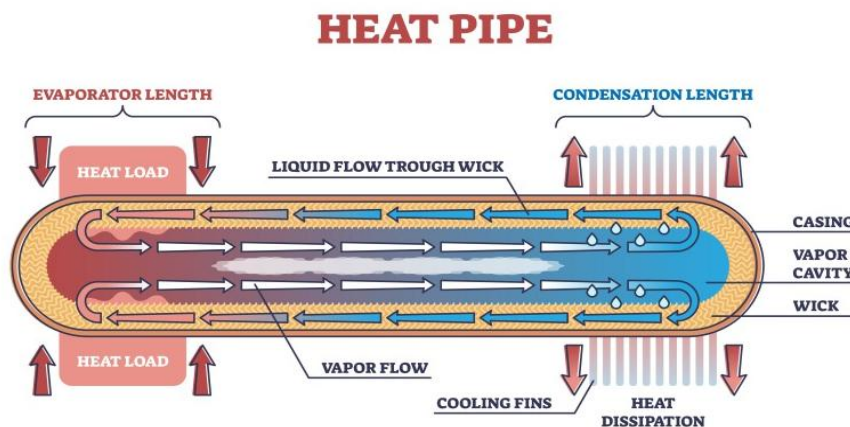
Τα Bi-fluid συστήματα παρουσιάζουν ευρεία εφαρμογή σε τομείς όπως η χημική και πετρελαϊκή μηχανική (π.χ. μεταφορά αργού πετρελαίου με συνοδό αέριο), οι εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής, οι τεχνολογίες μικρορευστονικής (μικροκανάλια με ροή δύο φάσεων), καθώς και οι σύγχρονες τεχνολογίες ενέργειας, όπως οι αντιδραστήρες βιοκαυσίμων και τα συστήματα απορρόφησης θερμότητας σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην κατανόηση φαινομένων όπως η σταθερότητα της διεπιφάνειας, ο διαχωρισμός φάσεων, καθώς και η ικανότητα ελέγχου της ροής μέσω εξωτερικών παραμέτρων (π.χ. πίεση, θερμοκρασία, πεδία δύναμης).

Συνολικά, η μελέτη των Bi-fluid συστημάτων αποτελεί ένα πεδίο ιδιαίτερης θεωρητικής και τεχνολογικής σημασίας, απαιτώντας τη διεπιστημονική προσέγγιση φυσικής, μηχανικής ρευστών, θερμοδυναμικής και αριθμητικής προσομοίωσης για την αποτελεσματική κατανόηση και αξιοποίησή τους [72].

3.2.4.4 Φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα βασισμένα σε σωλήνες θερμότητας (Heat Pipe based PVT Systems)

Τα φωτοβολταϊκά-θερμικά συστήματα που βασίζονται σε σωλήνες θερμότητας (Heat Pipe-based Photovoltaic/Thermal Systems, HP-PVT) συνιστούν μια προηγμένη τεχνολογική προσέγγιση για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Η ενσωμάτωση σωλήνων θερμότητας (heat pipes) επιτρέπει την αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας από τα

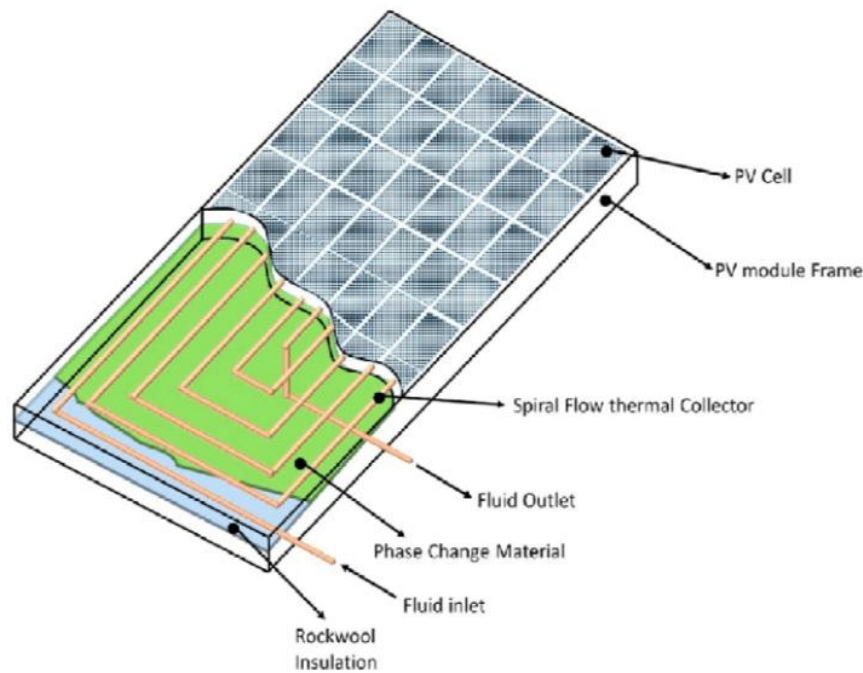
φωτοβολταϊκά στοιχεία, βελτιώνοντας την ηλεκτρική απόδοση και αξιοποιώντας τη θερμική ενέργεια για διάφορες εφαρμογές. Οι σωλήνες θερμότητας είναι παθητικές συσκευές μεταφοράς θερμότητας που λειτουργούν με την εξάτμιση και συμπύκνωση ενός ρευστού εργασίας εντός ενός σφραγισμένου σωλήνα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 32**. Στα φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα, οι σωλήνες θερμότητας τοποθετούνται πίσω από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, απομακρύνοντας τη θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία τους. Αυτό οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας των κυψελών, αυξάνοντας την ηλεκτρική απόδοση, ενώ η απομακρυνόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση νερού ή άλλες θερμικές εφαρμογές [70].



Εικόνα 32 Η δομή και οι μηχανισμοί των σωληνώσεων θερμότητας [70].

3.2.4.5 Φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα με βάση τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM PVT Systems)

Τα φωτοβολταϊκά-θερμικά συστήματα με ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials – PCMs), γνωστά ως PCM-PVT, αποτελούν μια καινοτόμο προσέγγιση για τη βελτίωση της απόδοσης και της θερμικής διαχείρισης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών θερμικών συστημάτων με βάση τα υλικά αλλαγής φάσης, επιτρέπει την αποθήκευση και αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας, συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πάνελ και στην αύξηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Τα υλικά αλλαγής φάσης, είναι υλικά που απορροφούν ή απελευθερώνουν λανθάνουσα θερμότητα κατά τη διάρκεια της φάσης μετάβασής τους από στερεά σε υγρή κατάσταση και αντίστροφα. Στα φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα με βάση τα υλικά αλλαγής φάσης, τα υλικά αλλαγής φάσης τοποθετούνται πίσω από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, απορροφώντας την υπερβολική θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία τους, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 33**. Αυτό οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας των κυψελών, βελτιώνοντας την ηλεκτρική απόδοση, ενώ η αποθηκευμένη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση νερού ή άλλες θερμικές εφαρμογές [72].



Εικόνα 33 Τοπικό διάγραμμα του συστήματος PCM [74].

3.2.5 Ηλιακές κυψέλες

Η παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου (multicrystalline silicon) αποτελεί κρίσιμο στάδιο στην κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών, προσφέροντας οικονομικά αποδοτική εναλλακτική σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Η διαδικασία περιλαμβάνει την τήξη πολυπυριτίου σε χωνευτήρι, ακολουθούμενη από ελεγχόμενη στερεοποίηση για τον σχηματισμό πλινθωμάτων με πολυκρυσταλλική δομή.

Σύμφωνα με μελέτες, η μέθοδος της κατευθυνόμενης στερεοποίησης (directional solidification) χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Σε αυτή τη διαδικασία, το πολυπυρίτιο τήκεται σε χωνευτήρι και στη συνέχεια ψύχεται με ελεγχόμενο ρυθμό, επιτρέποντας τον σχηματισμό κρυστάλλων που αναπτύσσονται κάθετα προς την κατεύθυνση ψύξης. Η χρήση επαγωγικής θέρμανσης (induction heating) σε συνδυασμό με χωνευτήρια υψηλής καθαρότητας συμβάλλει στη μείωση των ακαθαρσιών και στη βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου πυριτίου.

Επιπλέον, η τεχνολογία του ψυχρού χωνευτηρίου (cold crucible) προσφέρει πλεονεκτήματα όπως η ελαχιστοποίηση της επιμόλυνσης από το χωνευτήρι και η δυνατότητα ταχύτερης ανάπτυξης των πλινθωμάτων. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου υψηλής καθαρότητας, κατάλληλου για εφαρμογές στη φωτοβολταϊκή βιομηχανία.

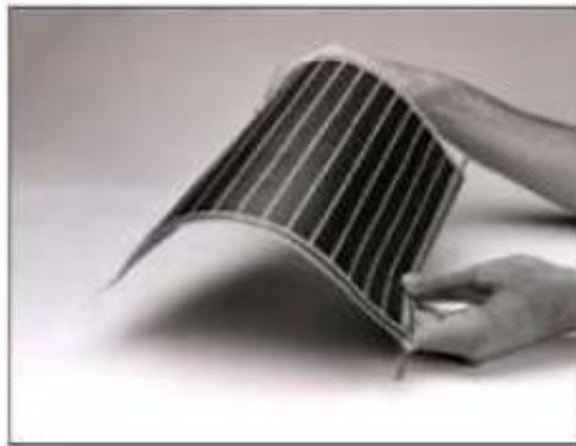
Συνοψίζοντας, η παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου μέσω κατευθυνόμενης στερεοποίησης και η χρήση προηγμένων τεχνολογιών όπως η επαγωγική θέρμανση και τα ψυχρά χωνευτήρια αποτελούν βασικά στοιχεία για την αποτελεσματική και ποιοτική παραγωγή υλικών κατάλληλων για φωτοβολταϊκές εφαρμογές [65].

3.2.6 Ηλιακές κυψέλες λεπτής μεμβράνης

Οι ηλιακές κυψέλες λεπτής μεμβράνης έχουν ως στόχο την αύξηση της απόδοσης και για αυτό τον λόγο κατασκευάζονται από λιγότερο πυρίτιο. Ωστόσο, οι επιδόσεις τους μειώνεται όταν αναπτύσσονται σε εξωτερικούς χώρους, κατατάσσοντάς τες λιγότερο παραγωγικές [76].

3.2.6.1 Κελιά άμορφου πυριτίου (a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του άμορφου πυριτίου, τα οποία έχουν πάρει την ονομασία τους από την τυχαία διάταξη των ατόμων του πυριτίου, κατασκευάζονται με μικρότερη ποσότητα πυριτίου, με χαμηλού κόστους υλικά για να τα πλαισιώσουν και είναι αρκετά εύκαμπτα, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 34**. Οι εργοστασιακές αποδόσεις τους κυμαίνονται στο 13%, ενώ στην πραγματικότητα κυμαίνονται στο 4-8%. Έχουν καλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, όμως απαιτείται διπλάσια επιφάνεια ώστε να παράγουν μια ιδανική ποσότητα ενέργειας, λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας [69].



Εικόνα 34 Κελί άμορφου πυριτίου [77].

3.2.6.2 Κελιά τελλουριούχου-κάδμιου (CdTe)

Τα κελιά τελλουριούχου-κάδμιου είναι μια ηλιακή κυψέλη λεπτής μεμβράνης, η οποία χρησιμοποιείται ως ημιαγώγιμο υλικό στα φωτοβολταϊκά πάνελ. Συνήθως τοποθετείται σε σχήμα σάντουιτς με το σουλφίδιο καδμίου για να σχηματίσει μια ηλιακή κυψέλη σύνδεσης p-n. Αποτελεί μια απλούστατη συσκευή, διότι κατασκευάζεται με χαμηλού κόστους υλικά. Επίσης, η απόδοση του σε καταστάσεις, όπως ασθενούς φωτός λόγω συννεφιάς, είναι αρκετά υψηλή, με υψηλό συντελεστή απορρόφησης και με εξαιρετικά χαμηλό τον συντελεστή χαμηλής θερμοκρασίας [78].

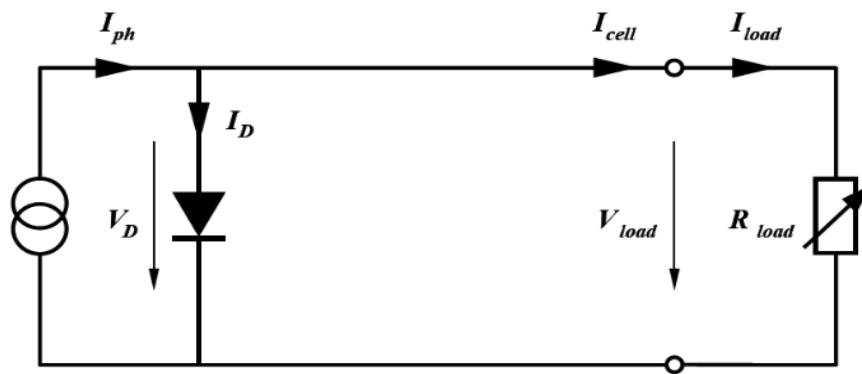
3.2.6.3 Ηλιακή κυψέλη σεληνιούχου-γαλλίου/ ινδίου-χαλκού (CIGS)

Η ηλιακή κυψέλη CIGS αποτελεί μια σημαντική τεχνολογία λεπτών μεμβρανών, λόγω της υψηλού συντελεστή απορρόφησης. Κατασκευάζεται από ηλεκτρόδια στην μπροστινή και στην πίσω όψη, με λεπτά

υλικά, με στόχο να είναι εύκαμπτα. Είναι μια υποσχόμενη αλλά όχι αρκετά ώριμη τεχνολογία, διότι υπερτερεί ως προς την απόδοση της [77].

3.3 Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ

Η λειτουργία ενός μοντέλου φωτοβολταϊκού στοιχείου συνήθως απαιτεί μια πηγή ρεύματος παράλληλη με μια δίοδο. Όταν το φως πέφτει στο στοιχείο που επηρεάζει την έξοδο της ρεύματος, το ρεύμα εξόδου είναι σταθερό υπό σταθερή θερμοκρασία. Δύο σημαντικοί παράγοντες που απαιτούνται είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος και η τάση ανοιχτού κυκλώματος, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 35**. Όσον αφορά τις τιμές τους, η τάση είναι ίση με το μηδέν όταν οι ακροδέκτες του ρεύματος είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους, ενώ το ρεύμα είναι ίσο με τον μηδέν, όταν οι ακροδέκτες δεν είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους.



Εικόνα 35 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών κελιών [78].

Το ρεύμα που διέρχεται από μια δίοδο από την παραπάνω εικόνα, παρουσιάζεται στον παρακάτω τύπο:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (1.1),$$

όπου:

I_{cell} : ρεύμα κελιού

q : φορτίο ηλεκτρονίου

I_{ph} : φωτορεύμα

V : τάση στα άκρα της διόδου

I_D : ρεύμαδιόδου

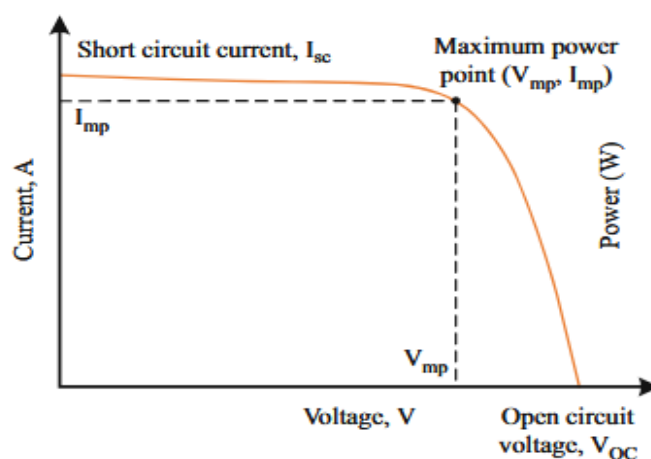
k : σταθερά Boltzmann

I_0 : ρεύμα διαρροής της διόδου

T : θερμοκρασία (K) [78]

3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V για ένα φωτοβολταϊκό πάνελ παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης. Για τον υπολογισμό της ισχύος και της ηλιακής απόδοσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαρακτηριστικά όπως το σημείο μέγιστης ισχύος (P_{max}). Το ρεύμα επηρεάζεται από την ένταση του ηλιακού φωτός, ενώ η τάση μειώνεται στις υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 36 Διάγραμμα Χαρακτηριστικής Καμπύλης I-V [61].

Η δημιουργία της καμπύλης I-V, πραγματοποιείται από τον πολλαπλασιασμό του ρεύματος επί της τάσης, με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), όπως φαίνεται στην Εικόνα 36. Η τάση αυξάνεται στο μηδενικό ρεύμα V_{oc} , ενώ το ρεύμα φτάνει στο μέγιστο στην μηδενική τάση I_{sc} . Το ιδανικό σημείο λειτουργίας, παρουσιάζεται στο ανώτατο σημείο μέγιστης ισχύος MPP.

Απαραίτητα χαρακτηριστικά για την παραπάνω καμπύλη:

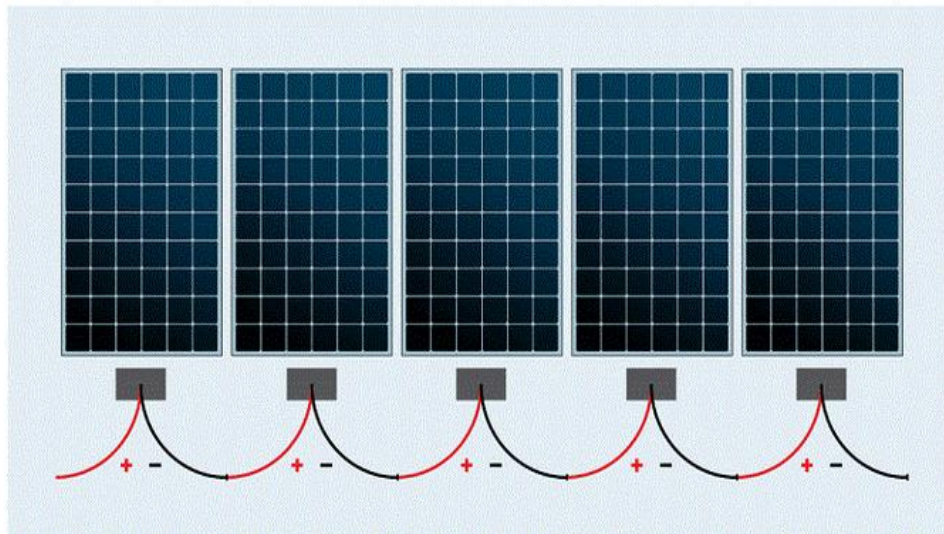
1. I_{sc} (Short-Circuit Current): Είναι υψηλότερο από το τυπικό ρεύμα λειτουργίας I_{mp} . Το συγκεκριμένο ρεύμα παρουσιάζεται όταν οι ακροδέκτες μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους.
2. V_{oc} (Open-Circuit Voltage): Η συγκεκριμένη τάση εξαρτάται από το πόσοι ηλιακοί συλλέκτες είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και είναι αισθητά υψηλότερη από την V_{mp} . Είναι η μέγιστη τάση σε ανοικτό κύκλωμα, όπου οι ακροδέκτες δεν είναι συνδεδεμένοι με κάποιο φορτίο.
3. MPP (Maximum Power Point): Το σημείο μέγιστης ισχύος μας παρουσιάζει το σημείο στην καμπύλη όπου η συστοιχία συνδέεται στο φορτίο και φτάνει στο μέγιστο, με την σχέση $MPP = I_{mp} \times V_{mp}$ (1.2) [80].

3.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΕΛΙΑ: ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Τα φωτοβολταϊκά κελιά συνήθως συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους με σκοπό την μεγαλύτερη ισχύς. Οι δύο κατηγορίες που διακρίνονται είναι η σύνδεση σε σειρά ή παράλληλα.

A. Σύνδεση σε σειρά

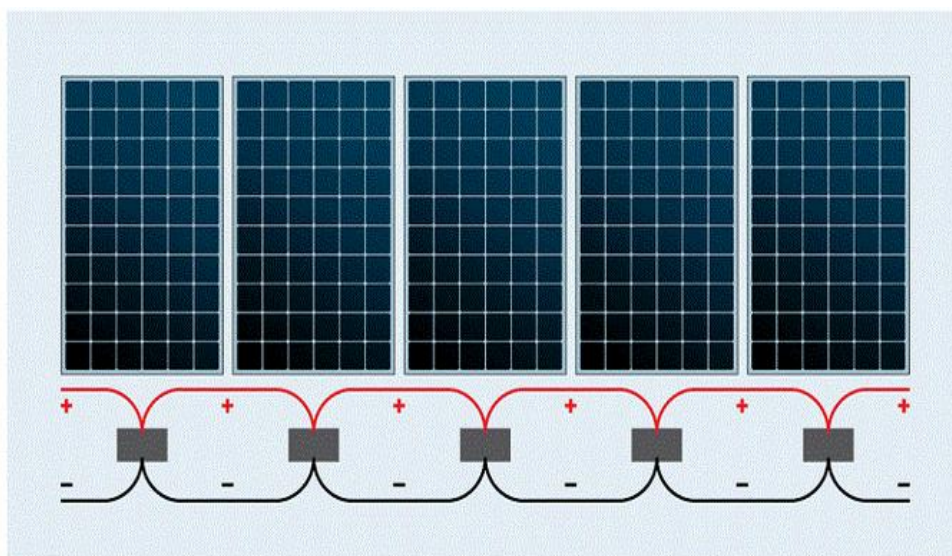
Τα ηλιακά πάνελ που συνδέονται σε σειρά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 37, παρουσιάζουν αύξηση τις τάσεις, ώστε ο μετατροπέας να λειτουργεί σωστά, ενώ το ρεύμα παραμένει σταθερό. Δεν απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός και είναι μια απλή τεχνολογία ως προς την χρήση. Βέβαια, όταν ένα και μόνο πάνελ είναι σκιασμένο, η ισχύς εξόδου του μειώνεται [1].



Εικόνα 37 Σύνδεση σε σειρά [82].

Β. Σύνδεση παράλληλη

Όταν τα ηλιακά πάνελ συνδέονται παράλληλα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 38, η τάση παραμένει σταθερή, ενώ το ρεύμα αυξάνεται. Τα ηλιακά πάνελ που μπορούν να τοποθετηθούν είναι περισσότερα σε σχέση με την σύνδεση σε σειρά [81].



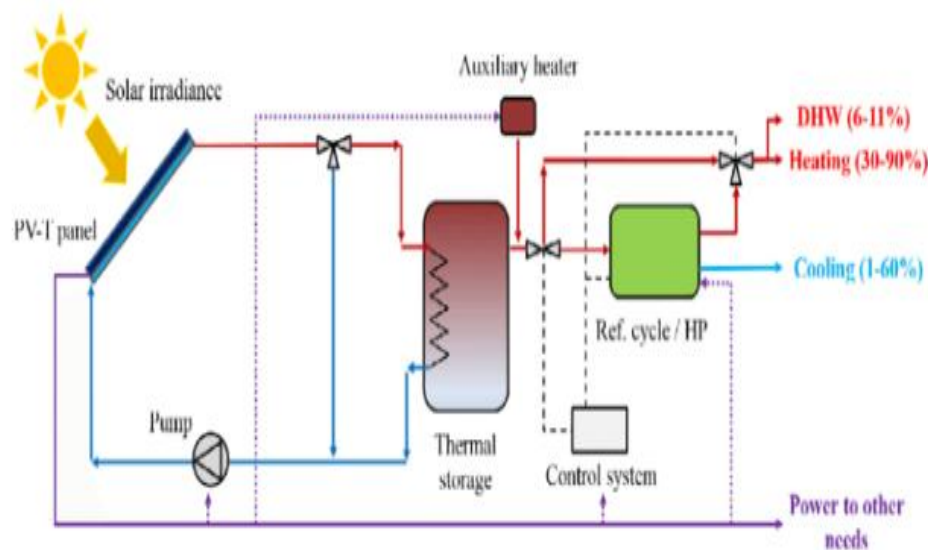
Εικόνα 38 Παράλληλη σύνδεση [82].

3.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ-ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.6.1 Θέρμανση πισίνας

Η θέρμανση πισίνας μέσω φωτοβολταϊκών-θερμικών συστημάτων αποτελεί μια καινοτόμο και αποδοτική λύση που συνδυάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την αξιοποίηση θερμικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η τεχνολογία παρέχει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για την ενεργειακή

κάλυψη των αναγκών θέρμανσης του νερού της πισίνας, μειώνοντας την εξάρτηση από συμβατικές πηγές ενέργειας και ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.



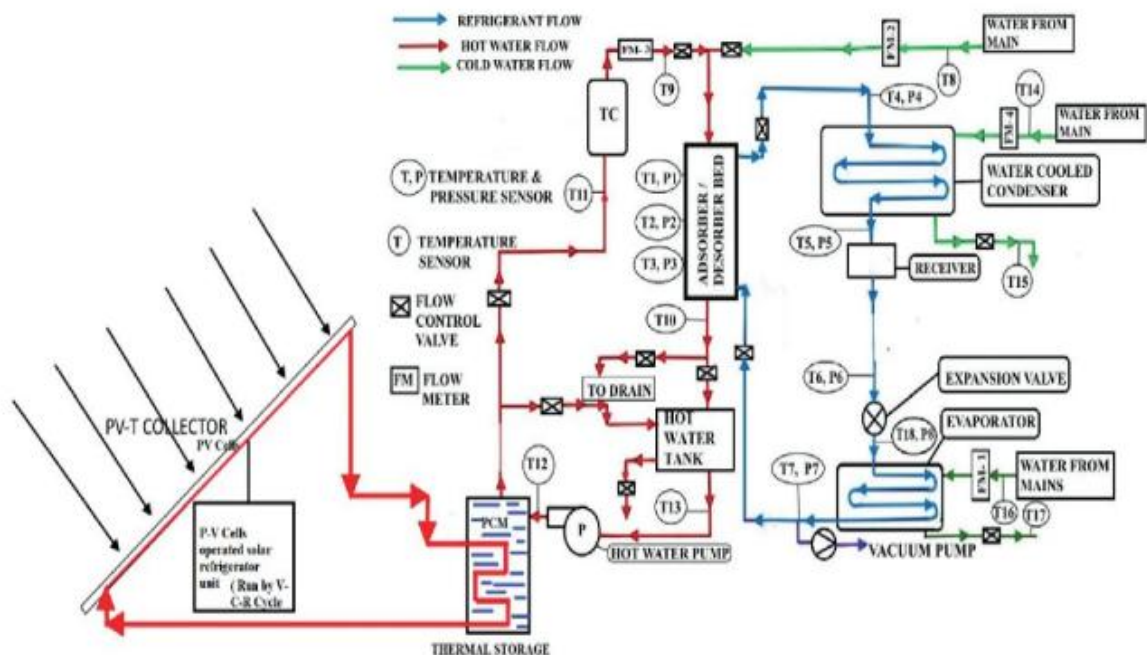
Εικόνα 39 Σχηματική απεικόνιση των φωτοβολταϊκών συστημάτων για εφαρμογή σε πισίνα [83].

Με την βοήθεια των φωτοβολταϊκών συστημάτων, η θερμότητα που συσσωρεύεται κατά τη λειτουργία τους απομακρύνεται μέσω ειδικών θερμικών συλλεκτών, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 39**. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται ως υγρό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του νερού της πισίνας, βελτιώνοντας έτσι την ενεργειακή αποδοτικότητα της εγκατάστασης [83].

3.6.2 Ηλιακή ψύξη με συλλέκτες φωτοβολταϊκών-θερμικών συστημάτων

Η ηλιακή ψύξη μέσω φωτοβολταϊκών-θερμικών συστημάτων αποτελεί μία εξελιγμένη και αποτελεσματική λύση για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας τόσο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για τη διαχείριση της θερμότητας. Σε αυτή την περίπτωση, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την ψύξη χώρων, διαδικασίες ή ακόμα και εφαρμογές βιομηχανικής φύσης, συνδυάζοντας τα οφέλη της φωτοβολταϊκής παραγωγής και της θερμικής συλλογής σε ένα ενιαίο σύστημα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 40**.

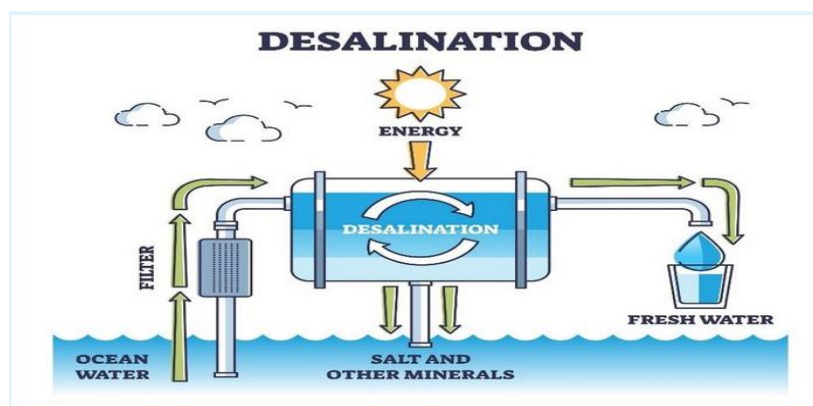
Παράλληλα, η θερμότητα που παράγεται κατά την ηλεκτρική παραγωγή απομακρύνεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ μέσω θερμικών συλλεκτών. Η απορροφηθείσα θερμότητα διοχετεύεται σε ένα κυκλωματικό σύστημα που χρησιμοποιεί ψυκτικό μέσο για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία ψύξης. Αυτή η ψύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση συστημάτων όπως απορροφητικές αντλίες θερμότητας ή αντλίες θερμότητας αναρρόφησης, οι οποίες αξιοποιούν την παραγόμενη θερμότητα από τα φωτοβολταϊκά-θερμικά συστήματα για να απομακρύνουν θερμότητα από τους χώρους ή τα αντικείμενα που χρειάζονται ψύξη [83].



Εικόνα 40 Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της ηλιακής ψύξης [84].

3.6.3 Αφαλάτωση Νερού

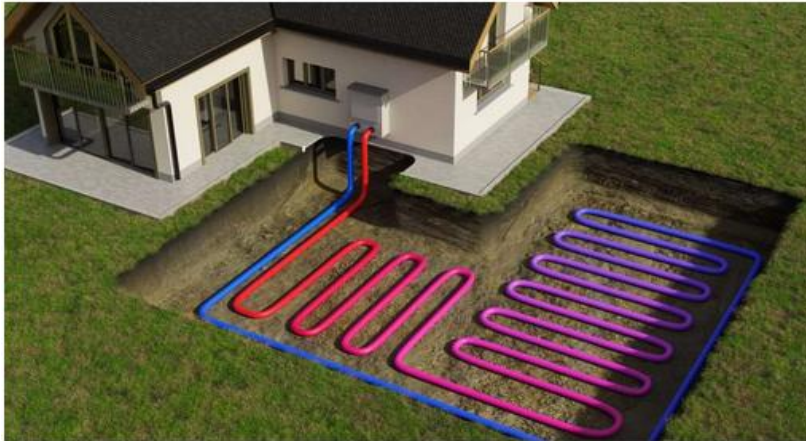
Η αφαλάτωση νερού, αποτελεί μια διαδικασία απομάκρυνσης αλάτων και ορυκτών από το νερό, με στόχο την κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό. Το αλατούχο νερό τροφοδοτείται στον συλλέκτη PVT από μια δεξαμενή μέσω μιας αντλίας που λειτουργεί με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πάνελ. Το αλατούχο νερό θερμαίνεται με τη μεταφορά θερμικής ενέργειας από τον θερμο-φωτοβολταϊκό συλλέκτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 41. Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα αφού το θερμαινόμενο νερό τοποθετηθεί μέσα σε έναν βαθμιδωτό ηλιακό αποστακτήρα. Αυτός ο ηλιακός αποστακτήρας είναι διαφανής στην ηλιακή ακτινοβολία και διαθέτει πλάκα απορρόφησης για να αυξήσει τη θερμική απόδοση. Καθώς το αλατούχο νερό μετατρέπεται σε ατμό και συμπυκνώνεται στις εσωτερικές επιφάνειες του αποστακτήρα, μπορεί να συλλεχθεί φρέσκο πόσιμο νερό σε ένα κανάλι βάσης [85].



Εικόνα 41 Σχηματική απεικόνιση της αφαλάτωσης [86].

3.6.4 Θερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας

Υπάρχουν διάφορες θερμικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας, δηλαδή της θερμότητας που αποθηκεύει η γη. Αυτή η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των εναλλακτικών πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αξιοπιστίας και της μεγάλης διάρκειας ζωής.



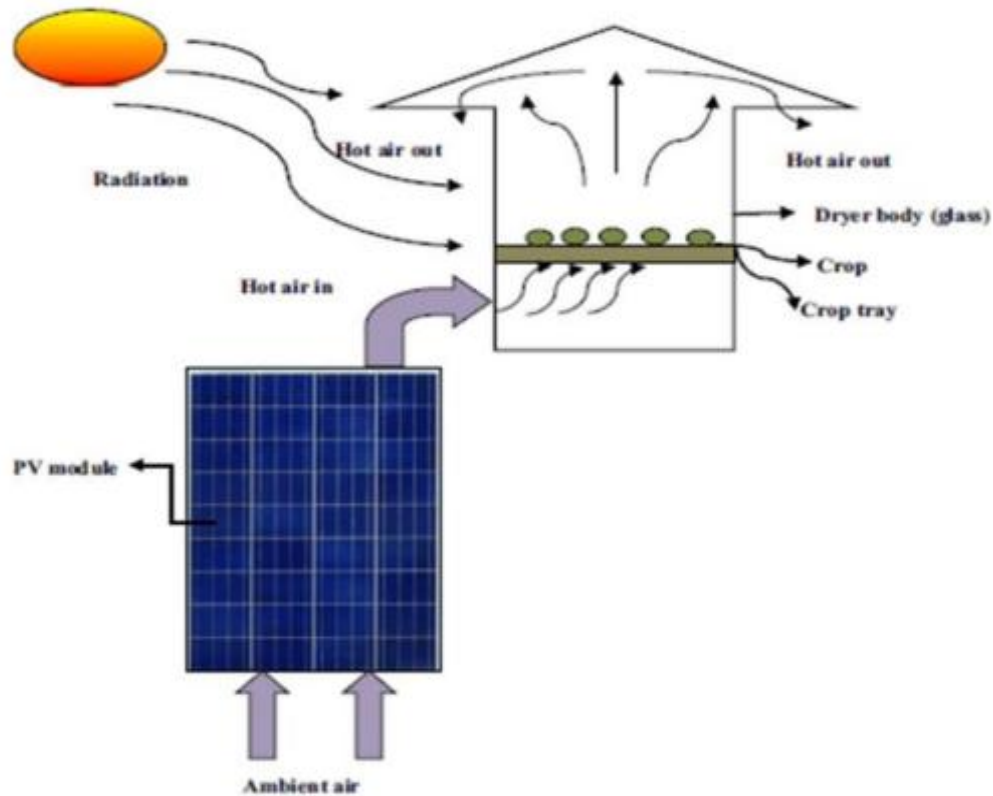
Εικόνα 42 Αντλία θερμότητας από το έδαφος για θέρμανση και ψύξη [88].

Η γεωθερμική ενέργεια έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή ζεστού νερού, η τηλεθέρμανση, η θέρμανση θερμοκηπίων και η θέρμανση και ψύξη χώρων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 42**. Η πιο δημοφιλής χρήση της γεωθερμίας είναι στον κατασκευαστικό κλάδο, όπου οι αντλίες θερμότητας συνδέονται με τη γη. Πιο συγκεκριμένα, η αντλία θερμότητας από το έδαφος χρησιμοποιεί το γεωθερμικό δυναμικό για να παράγει θερμότερες θερμοκρασίες από τον ψυχρό αέρα του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του χειμώνα [72].

3.6.5 Ηλιακός στεγνωντήρας

Η ξήρανση είναι δημοφιλής στη γεωργική βιομηχανία και προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως η μείωση του βάρους και του όγκου των καλλιεργείων και η μείωση των δαπανών που σχετίζονται με τη συσκευασία, την αποθήκευση και τη μεταφορά. Επιπλέον, η ξήρανση λειτουργεί καλά για την πρόληψη της ρύπανσης των τροφίμων και τη διακοπή της ανάπτυξης μικροοργανισμών. Τα ηλιακά ξηραντήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέρη με μεγάλες περιόδους ηλιοφάνειας και υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στο σύστημα που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 43**, το φωτοβολταϊκό πάνελ απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, πρωτίστως για την τροφοδοσία του ανεμιστήρα και δευτερευόντως, για την παροχή ενέργειας σε τυχόν άλλα εξαρτήματα του συστήματος. Τα ηλιακά ξηραντήρια για γεωργική χρήση διατίθενται σε διάφορες μορφές και μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες: ανοικτά, άμεσα, έμμεσα και μικτά. Ωστόσο, λόγω της μικρής χωρητικότητας της καλλιέργειας και του υπερβολικού χρόνου ξήρανσης, η απόδοση του άμεσου ηλιακού συστήματος

ξηράνσης είναι υποδεέστερη, σε σύγκριση με το άμεσο ηλιακό σύστημα ξήρανσης, το μικτό ηλιακό σύστημα ξήρανσης σύστημα αποδίδει πολύ καλύτερα, επειδή οι καλλιέργειες θερμαίνονται όχι μόνο μέσω της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και μέσω του συλλέκτη φωτοβολταϊκών κελιών [72].



Εικόνα 43 Σχηματική απεικόνιση για την λειτουργία του ξηραντήρα θερμοκηπίου [72].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΝΕΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

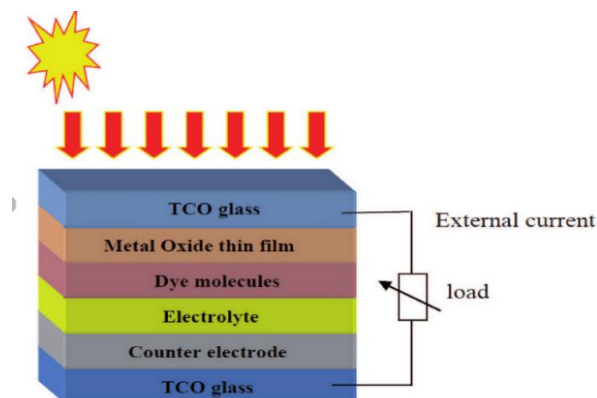
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης, της ανθεκτικότητας και της βιωσιμότητας των ηλιακών συστημάτων. Η παρούσα ενότητα εξετάζει τις πρόσφατες εξελίξεις σε υλικά όπως της βαφής-ευαισθητοποιημένης ηλιακής κυψέλης (DSSCs), της ηλιακής κυψέλης με κβαντικές κουκκίδες (QDSCs), τις εφαρμογές γραφενίου στα φωτοβολταϊκά, τα διπλής όψης (bifacial) πάνελ, τα ενσωματωμένα σε κτίρια φωτοβολταϊκά (BIPV) και τις πρακτικές κυκλικής οικονομίας στον τομέα των φωτοβολταϊκών [72].

4.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

4.2.1 ΒΑΦΗΣ – ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ (DSSCs)

Οι ηλιακές κυψέλες ευαισθητοποιημένες με χρωστική (Dye-Sensitized Solar Cells – DSSCs) αποτελούν μία ιδιαίτερα ελκυστική προσέγγιση στον τομέα των φωτοβολταϊκών, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής τους και της ικανοποιητικής τους απόδοσης υπό συνθήκες διάχυτου φωτισμού. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 44**, το φως διεγείρει τα μόρια της χρωστικής, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια που κινούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος παράγοντας ρεύμα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές πυριτικές τεχνολογίες, οι ηλιακές κυψέλες ευαισθητοποιημένες με βαφή παρουσιάζουν υψηλή απόκριση σε εσωτερικό φωτισμό και περιβάλλοντα χαμηλής φωτεινότητας, καθιστώντας τις κατάλληλες για πλήθος εξειδικευμένων εφαρμογών.



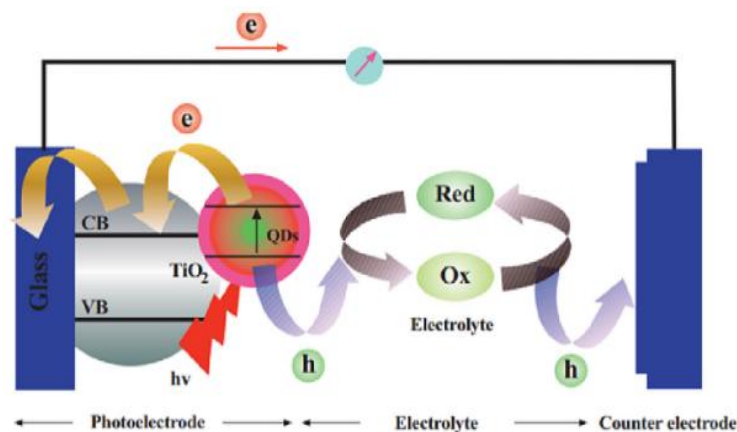
Εικόνα 44 Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας της ηλιακής κυψέλης ευαισθητοποιημένης με χρωστική ουσία [88].

Οι τρέχουσες ερευνητικές κατευθύνσεις επικεντρώνονται στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και της λειτουργικής σταθερότητας των κυψελών μέσω της ανάπτυξης προηγμένων

φωτοευαίσθητοποιητών, ηλεκτρολυτικών συστημάτων με μειωμένη πτητικότητα και υψηλότερη χημική ανθεκτικότητα, καθώς και της βελτιστοποίησης της μορφολογίας και της ηλεκτροκαταλυτικής συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων. Παράλληλα, ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στον σχεδιασμό ημιδιαφανών DSSCs, οι οποίες επιτρέπουν την αξιοποίησή τους σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών (Building-Integrated Photovoltaics – BIPV), καθώς και σε εσωτερικούς χώρους, διευρύνοντας σημαντικά το φάσμα των πιθανών χρήσεων της τεχνολογίας [89].

4.2.2 ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΜΕ ΚΒΑΝΤΙΚΕΣ ΚΟΥΚΚΙΔΕΣ (QDSCs)

Οι ηλιακές κυψέλες με κβαντικές κουκκίδες (Quantum Dot Solar Cells – QDSCs) αξιοποιούν τις ιδιαίτερες ηλεκτρονικές ιδιότητες των κβαντικών κουκκίδων, οι οποίες προκύπτουν από τον κβαντικό περιορισμό, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 45**. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των νανοδομών είναι η δυνατότητα ρύθμισης του ενεργειακού χάσματος (bandgap engineering) μέσω του ελέγχου του μεγέθους και της σύστασής τους, γεγονός που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της απορρόφησης του ηλιακού φάσματος. Επιπροσθέτως, οι κβαντικές κουκκίδες εμφανίζουν το φαινόμενο της πολλαπλής δημιουργίας εξιτονίων (Multiple Exciton Generation – MEG), κατά το οποίο η απορρόφηση ενός φωτονίου υψηλής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία περισσότερων του ενός εξιτονίων. Το χαρακτηριστικό αυτό προσφέρει τη θεωρητική δυνατότητα υπέρβασης του ορίου Shockley-Queisser για την απόδοση των συμβατικών ηλιακών κυψελών.



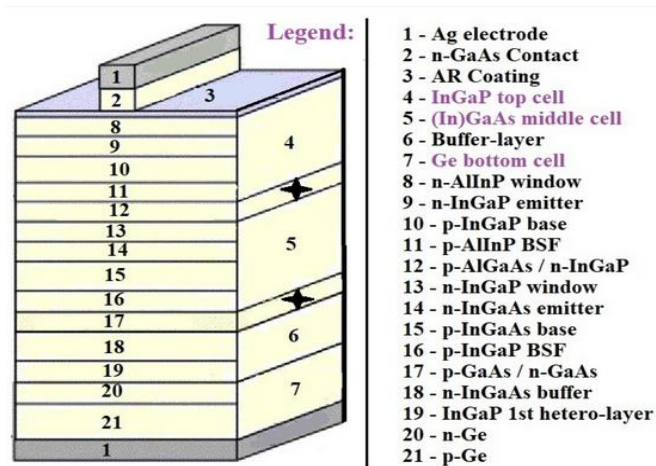
Εικόνα 45 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού λειτουργίας των QDSCs [91].

Τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στη βελτίωση τόσο της αποδοτικότητας όσο και της λειτουργικής σταθερότητας των QDSCs. Προς αυτήν την κατεύθυνση, αναπτύσσονται νέες συνθετικές μέθοδοι για την παραγωγή κβαντικών κουκκίδων με αυξημένη ομοιογένεια και χημική σταθερότητα, ενώ παράλληλα μελετώνται καινοτόμα υλικά περιβάλλοντος (matrix materials) και τεχνικές παθητικοποίησης επιφανειών. Οι εξελίξεις αυτές έχουν καθοριστική σημασία για την ενσωμάτωση των QDSCs σε εμπορικά φωτοβολταϊκά συστήματα και την επίτευξη ανταγωνιστικών αποδόσεων σε σχέση με τις καθιερωμένες τεχνολογίες [91,92].

4.2.3 ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΕΩΝ

Οι ηλιακές κυψέλες πολλαπλών επαφών αποτελούνται από πολλές επαφές p-n που αποτελούνται από διάφορα υλικά ημιαγωγών. Η απόδοση της διάταξης αυξάνεται και το προσπίπτον ηλιακό φως μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από κάθε επαφή, η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα σε απόκριση σε φως με διαφορετικό μήκος κύματος. Μια ηλιακή κυψέλη tandem χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερα φωτόνια χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά με διαφορετικά χάσματα ζώνης. Η κατασκευή ενός ολόκληρου κυττάρου από τα ίδια ή διαφορετικά υλικά θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια ποικιλία πιθανών σχεδίων.

Η προσαρμογή ρεύματος μεταξύ των κυψελών επιτυγχάνεται με τη μεταβολή του πάχους και του χάσματος ζώνης κάθε κυψέλης. Συνήθως, τα κύτταρα ενσωματώνονται μονολιθικά και συνδέονται σε σειρά μέσω μιας σύνδεσης σήραγγας. Προσδιορίστηκε ότι η θεωρητική βιωσιμότητα της χρήσης πολλαπλών διακένων ζώνης ήταν 44% για δύο διακένες ζώνης, 49% για τρεις διακένες ζώνης, 54% για τέσσερις διακένες ζώνης και 66% για άπειρο αριθμό διακένων. με την υψηλότερη πραγματική απόδοση άνω του 36%, οι τριπλές ηλιακές κυψέλες InGaP/(In)GaAs/Ge με αντιστοίχιση πλέγματος έχουν βρει εκτεταμένη εφαρμογή στα διαστημικά φωτοβολταϊκά. Στην **Εικόνα 46**, εμφανίζεται ένα σχήμα μιας τριπλής ηλιακής κυψέλης InGaP/(In)GaAs/Ge, στο οποίο παρουσιάζονται κρίσιμες τεχνολογίες για τη βελτίωση της απόδοσης της μετατροπής.



Εικόνα 46 Σχηματική απεικόνιση μιας κυψέλης τριπλής ένωσης και προσεγγίσεις για τη βελτίωση της απόδοσης της κυψέλης [132].

Στο διαστημικό περιβάλλον, ο έντονος βομβαρδισμός με ακτινοβολία από διάφορα ενεργητικά σωματίδια προκαλεί πάντοτε ζημιές στα ηλιακά κύτταρα και δημιουργεί περισσότερα κέντρα μη-ακτινικού ανασυνδυασμού, τα οποία μειώνουν τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας και μειώνουν την απόδοση των ηλιακών κυττάρων. Στις ηλιακές κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων, οι υποκυψέλες συνδέονται σε σειρά και η απόδοση της ηλιακής κυψέλης πολλαπλών συνδέσεων μειώνεται από την

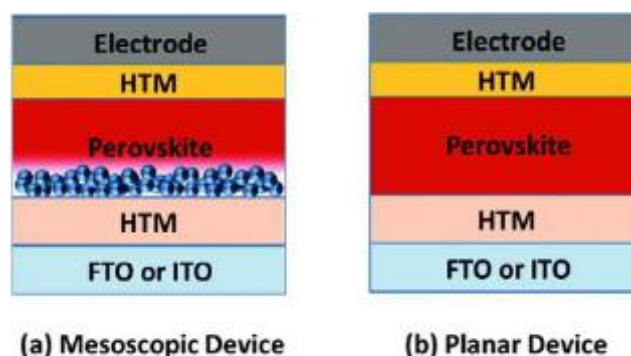
υποκυψέλη με την υψηλότερη υποβάθμιση από την ακτινοβολία. Μέτρα όπως η μείωση της συγκέντρωσης των προσμίξεων και του πάχους της περιοχής βάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της αντίστασης στην ακτινοβολία των υποκυττάρων (In)GaAs [132].

4.2.4 ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΠΕΡΟΒΣΚΙΤΗ

Οι περοβσκίτες αλογονιδίων μετάλλων (MHPs), όπως το ιωδιούχο μεθυλαμώνιο και το ιωδιούχο μόλυβδο φορμαμιδίνης (MAPbI₃ ή FAPbI₃, αντίστοιχα), αποτελούν τη βάση της πρωτοποριακής νέας τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών κυψελών, γνωστή ως ηλιακές κυψέλες περοβσκίτη (PSCs). Τα MHP συνδυάζουν διάφορα επιθυμητά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών απορροφητών, όπως άμεσο χάσμα ζώνης με υψηλό συντελεστή απορρόφησης, μεγάλη διάρκεια ζωής φορέων και μήκος διάχυσης, χαμηλή πυκνότητα ατελειών και δυνατότητα εύκολης ρύθμισης του χάσματος ζώνης και της σύνθεσης.

Η βελτίωση της ποιότητας του υλικού μέσω μιας ποικιλίας συνθετικών τεχνικών που αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια μιας βασικής κατανόησης των μηχανισμών ανάπτυξης της MHP είχε σημαντικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη των ηλιακών κυψελών περοβσκίτη. Μια ευρεία ποικιλία τρόπων ανάπτυξης υψηλής απόδοσης, όπως η ανάπτυξη ενός βήματος, η διαδοχική ανάπτυξη, η διαδικασία διάλυσης, η διαδικασία ατμών, η επεξεργασία μετά την εναπόθεση, η μη στοιχειομετρική ανάπτυξη, η ανάπτυξη με τη βοήθεια προσθετικών ουσιών και η λεπτομερής ρύθμιση των διαστάσεων της δομής, έχουν αναπτυχθεί με τη βοήθεια της κατανόησης των περίπλοκων και συσχετιζόμενων διαδικασιών της πυρηνοποίησης της ανάπτυξης του περοβσκίτη, της ανάπτυξης των κόκκων και της εξέλιξης της μικροδομής.

Οι πιο πρόσφατες εργασίες επικεντρώθηκαν στη μηχανική της διεπαφής, συγκεκριμένα στην εισαγωγή ενός δισδιάστατου επιφανειακού στρώματος περοβσκίτη για τη βελτίωση της σταθερότητας και τη μείωση των απωλειών τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Η σύνθεση του περοβσκίτη γίνεται απλούστερη λόγω της προόδου στον συνθετικό έλεγχο, κυρίως προς την κατεύθυνση του FAPbI₃. Οι δύο πιο συνηθισμένες αρχιτεκτονικές μιας ηλιακής κυψέλης περοβσκίτη είναι η λεγόμενη μεσοσκοπική και η επίπεδη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 47** [133].



Εικόνα 47 Μεσοσκοπική και επίπεδη αρχιτεκτονική συσκευής για ηλιακή κυψέλη περοβσκίτη [133].

4.2.5 ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ

Η τεχνολογία των οργανικών ηλιακών κυψελών είναι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία που χρησιμοποιεί οργανικά ηλεκτρονικά ημιαγωγών, η οποία ασχολείται με αγωγή οργανικά πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια, έτσι ώστε να απορροφάται το φως και να παράγονται φορείς φορτίου μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Είναι πολυμερείς ηλιακές κυψέλες που αποτελούνται από συζευγμένα πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια ημιαγωγών.

Οι οργανικές ηλιακές κυψέλες χαρακτηρίζονται από: α) συνδυάζουν τις αρετές των πλαστικών με εκείνες των ημιαγωγών, β) υψηλό οπτικό συντελεστή απορρόφησης, γ) ιδιότητες που συντονίζονται με ευέλικτη σύνθεση και δ) χαμηλό κόστος κατασκευής. Για την κατασκευή τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η αρχιτεκτονική διμερούς είτε η αρχιτεκτονική μαζικής ετεροεπαφής. Η μαζική ετεροεπαφή προτιμάται πάντα δεδομένου ότι τα οργανικά υλικά έχουν πολύ μικρότερα μήκη διαδρομής διάχυσης.

Μια διεπαφή μεταξύ ημιαγωγών δότη και δέκτη είναι το θεμέλιο για τη λειτουργία ενός οργανικού ηλιακού πάνελ. Τα οργανικά ημιαγωγικά υλικά είναι πολύ διαφορετικά από τους παραδοσιακούς κρυσταλλικούς ημιαγωγούς. Στην οργανική ηλιακή κυψέλη, το φωτόνιο του προσπίπτοντος φωτός απορροφάται και δημιουργείται ένα εξιτόνιο. Ο εξιτόνας αποτελεί κουλοουμπρικά ζεύγος ηλεκτρονίου και οπής που συνδέεται. Αυτά τα εξιτόνια διανέμονται ύστερα κατά μήκος της διεπιφάνειας του υλικού αποστολέα προς το υλικό παραλήπτη. Το πάχος του στρώματος του οργανικού ημιαγωγού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, επειδή παρατηρείται περιορισμένο το μήκος διάχυσης των εξιτονίων, γεγονός που περιορίζει την αποτελεσματική απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας.

Οι κύριες προκλήσεις για την επίτευξη υψηλής απόδοσης στις οργανικές ηλιακές κυψέλες περιλαμβάνουν την περιορισμένη και αναποτελεσματική μεταφορά εξιτονίων και φορέων φορτίου. Η σταθερότητα των οργανικών ηλιακών κυψελών επιδεινώνεται όταν εκτίθενται σε παρατεταμένη ηλιακή ακτινοβολία, οδηγώντας σε χαμηλότερη απόδοση. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια διαχωρισμένη δομή χύδην-ταξινομημένη τόσο για τους οργανικούς ημιαγωγούς-δότες όσο και για τους οργανικούς ημιαγωγούς-δέκτες και να ενισχυθεί η μεταφορά ελεύθερων φορέων φορτίου στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση. Μια πολλά υποσχόμενη οδός για έρευνα είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης υγρών μορίων ημιαγωγών κρυστάλλων σε οργανικά ηλιακά κύτταρα.

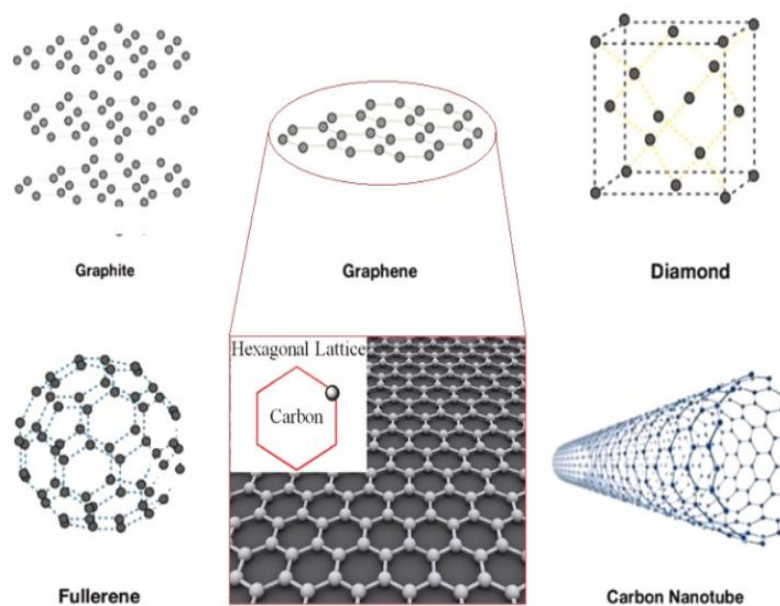
4.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΤΕΤΑΡΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

4.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Το γραφένιο έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον για εφαρμογές στα φωτοβολταϊκά συστήματα, κυρίως λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της διαφάνειάς του. Στην **Εικόνα 48**, παρουσιάζονται τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την παραγωγή ηλιακών κυψελών με βάση το

γραφένιο. Με τη χρήση λεπτών πολυμερικών στρωμάτων και μεταλλικών νανοσωματιδίων, καθώς και διαφόρων οξειδίων μετάλλων, νανοσωλήνων άνθρακα, γραφενίου και παραγώγων τους, η τέταρτη γενιά παρέχει εξαιρετική οικονομική προσιτότητα και ευελιξία. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο γραφένιο επειδή θεωρείται νανοϋλικό του μέλλοντος. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους, όπως η υψηλή κινητικότητα φορέων, η χαμηλή ειδική αντίσταση και διαπερατότητα και η δισδιάστατη διάταξη πλέγματος, τα υλικά με βάση το γραφένιο εξετάζονται για χρήση σε φωτοβολταϊκές διατάξεις αντί των υφιστάμενων συμβατικών υλικών. Ωστόσο, για να επιτευχθεί επαρκής απόδοση των διατάξεων, το κλειδί για τις πρακτικές εφαρμογές τους είναι η σύνθεση υλικών γραφενίου με κατάλληλη δομή και ιδιότητες.

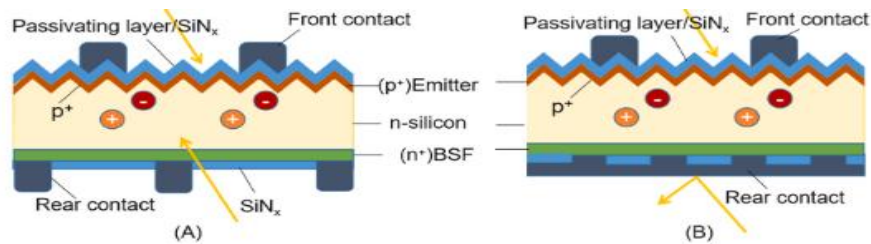
Δεδομένου ότι οι ιδιότητες του γραφενίου σχετίζονται θεμελιωδώς με τη διαδικασία κατασκευής του, η συνετή επιλογή των μεθόδων είναι απαραίτητη για στοχευμένες εφαρμογές. Ειδικότερα, το εξαιρετικά αγωγίμο γραφένιο είναι κατάλληλο για χρήση σε εύκαμπτες φωτοβολταϊκές διατάξεις, ενώ η υψηλή συμβατότητά του με οξείδια μετάλλων, μεταλλικές ενώσεις και αγωγίμα πολυμερή το καθιστά κατάλληλο για χρήση ως επιλεκτικό στοιχείο λήψης φορτίου και υλικό ενδιάμεσου στρώματος ηλεκτροδίων. [93].



Εικόνα 48 Σχηματική απεικόνιση της ηλιακής κυψέλης γραφενίου [94].

4.3.2 ΔΙΠΛΗΣ ΟΨΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΝΕΛ (BIFACIAL PV)

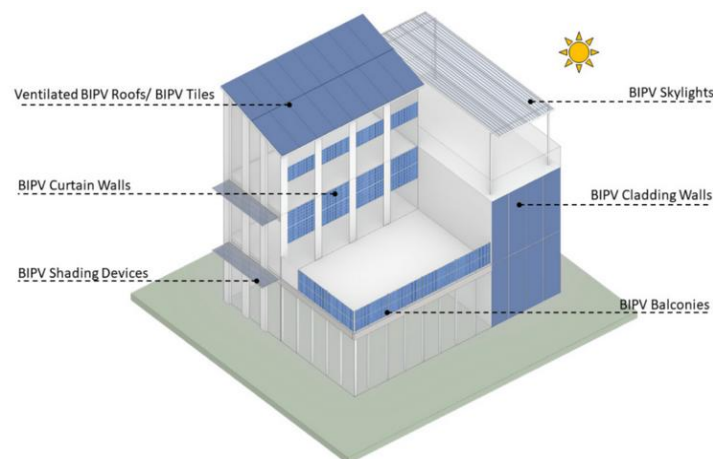
Τα διπλής όψης φωτοβολταϊκά πάνελ (bifacial) έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν ηλιακή ακτινοβολία τόσο από την εμπρόσθια όσο και από την οπίσθια πλευρά, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλότερη ισχύ εξόδου σε σύγκριση με τα συμβατικά μονοπλευρικά πάνελ. Στην **Εικόνα 49**, απεικονίζονται οι σχηματικές αναπαραστάσεις της μονοφασικής και της διφασικής όψης φωτοβολταϊκών πάνελ. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται σε συνεχή ανάπτυξη και εφαρμόζεται κυρίως σε περιβάλλοντα όπου το υπόστρωμα παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα. Η αποδοτικότητα των διπλής όψεως συστημάτων αξιολογείται ξεχωριστά για κάθε πλευρά, με στόχο την ακριβή εκτίμηση της συνολικής παραγωγής ενέργειας [83].



Εικόνα 49 (Α) Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας BPV, (Β) Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογία MPV [94].

4.3.3 ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ (BIPV)

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια (Building-Integrated Photovoltaics – BIPV) προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την απαίτηση επιπλέον χώρου, ενώ παράλληλα μπορεί να ενισχύσει την αισθητική του κελύφους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 50. Το αρχικό κόστος κατασκευής μπορεί να μετριαστεί, καθώς μειώνεται η ανάγκη για παραδοσιακά οικοδομικά υλικά και τις σχετικές εργασίες εγκατάστασης. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, ζητήματα όπως η θερμική διαχείριση και η μεταβολή της απόδοσης σε συνθήκες μεταβλητής γωνίας ηλιακής πρόσπτωσης συνεχίζουν να αποτελούν αντικείμενο έρευνας και τεχνολογικής βελτίωσης [95].

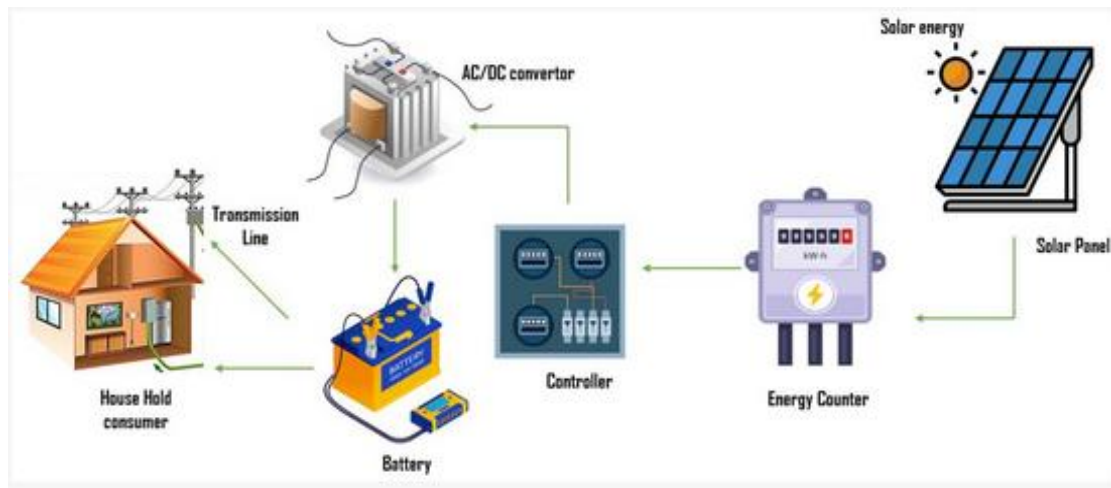


Εικόνα 50 Τύποι συστημάτων BIPV [96].

4.3.4 ΕΞΥΠΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (SMART GRIDS)

Ένας από τους πιο κρίσιμους άξονες για τη μελλοντική ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η ενσωμάτωσή τους σε έξυπνα ενεργειακά δίκτυα (smart grids) μέσω της αξιοποίησης προηγμένων τεχνολογιών, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI), οι αλγόριθμοι πρόβλεψης φορτίου και παραγωγής, καθώς και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Η διασύνδεση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με ψηφιακά εργαλεία επιτρέπει την αποδοτικότερη παρακολούθηση και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας, ενώ παράλληλα προσφέρει τη δυνατότητα δυναμικής απόκρισης στη ζήτηση. Η εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης (machine learning) επιτρέπει την πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα βάσει ιστορικών και καιρικών δεδομένων,

ενισχύοντας τη δυνατότητα προσαρμογής του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης – όπως συσσωρευτές ιόντων λιθίου ή τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης – συμβάλλει καθοριστικά στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων που προκαλούνται από τη στοχαστική φύση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Στην **Εικόνα 51**, παρουσιάζεται η γενική διαδικασία για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας σε κατοικημένα κτίρια.



Εικόνα 51 Γενική διαδικασία για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας για έξυπνα κτίρια [89].

Η αποτελεσματική ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στα έξυπνα δίκτυα βελτιώνει τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του συνολικού ενεργειακού συστήματος. Επιπλέον, ενισχύει τη δυνατότητα αποκεντρωμένης παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, προωθώντας μοντέλα ενεργειακής αυτονομίας και αυξάνοντας τη συμμετοχή των καταναλωτών ως ενεργών συμμετεχόντων (prosumers) στο ενεργειακό οικοσύστημα.

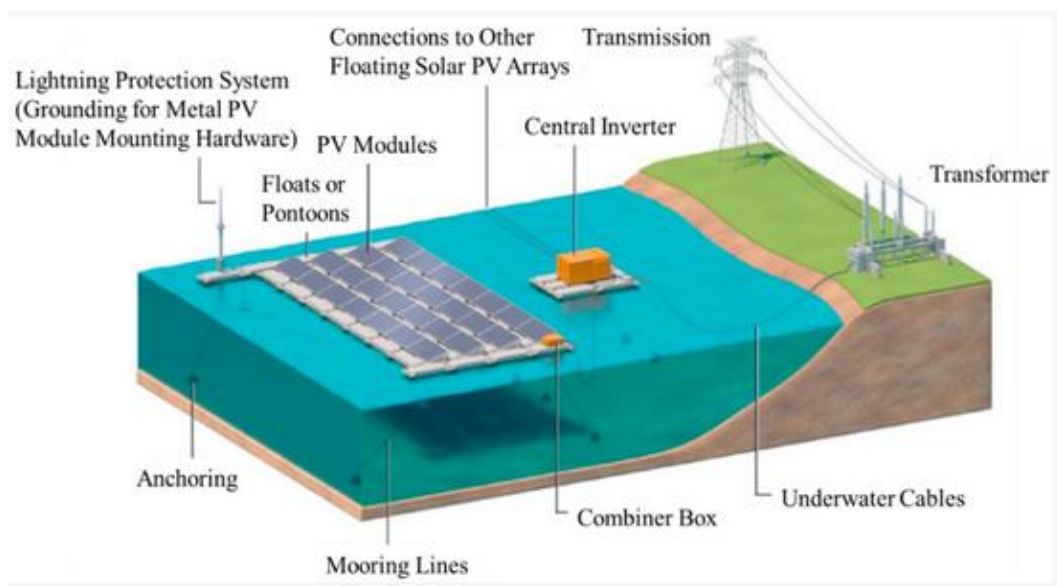
Η συνδυασμένη ανάπτυξη ψηφιακών τεχνολογιών και φωτοβολταϊκών εφαρμογών καθιστά εφικτή τη μετάβαση προς ένα πιο ευέλικτο, αποκεντρωμένο και βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο, το οποίο θα μπορεί να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις μελλοντικές ανάγκες και προκλήσεις του ενεργειακού τομέα [89].

4.3.5 ΠΛΩΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ (FLOATING PV PANELS)

Η ταχέως εξελισσόμενη τεχνολογία που είναι γνωστή ως πλωτά φωτοβολταϊκά ή FPV, συνδυάζει την παραγωγή ηλιακής ενέργειας με την αξιοποίηση υδάτινων επιφανειών, συμπεριλαμβανομένων λιμνών, ταμιευτήρων, υδροηλεκτρικών φραγμάτων, ακόμη και θαλασσών. Πρόκειται για μια δημιουργική λύση που έχει προταθεί, ιδίως σε μέρη με έλλειψη γης ή υψηλότερες απαιτήσεις για ενεργειακή ανεξαρτησία.

Οι μεμονωμένοι πλωτήρες έχουν σχεδιαστεί με ιδιαίτερα αρθρωτή δομή για εύκολη συναρμολόγηση, συχνά με ειδικά σχήματα που βοηθούν στη σύνδεση γειτονικών πλωτήρων. Για την αποφυγή ζημιών στη δομή του πλωτήρα και στον ηλεκτρικό εξοπλισμό, οι συσκευές πρόσδεσης και αγκύρωσης στα συστήματα FPV μπορούν να διατηρήσουν τη δομή του πλωτήρα σε σχετικά σταθερή θέση και να περιορίσουν την

ικανότητα του πλωτήρα να περιστρέφεται ή να παρασύρεται κάτω από τον άνεμο, τα κύματα και τα ρεύματα. Οι διακυμάνσεις της στάθμης του νερού, τα φορτία πίεσης του ανέμου, η δυναμική των ρευστών και οι γεωλογικές συνθήκες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των συσκευών πρόσδεσης και αγκύρωσης, ώστε να διασφαλίζεται ότι η αντοχή της γραμμής πρόσδεσης και η ικανότητα μεταφοράς φορτίου της αγκύρωσης είναι επαρκείς για την κάλυψη των απαιτήσεων λειτουργίας του συστήματος FPV υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι αγκυροβολίας είναι οι άγκυρες σύρσης, οι πασσαλόπηκτες άγκυρες και οι άγκυρες βαρύτητας. Οι γραμμές πρόσδεσης αποτελούνται συνήθως από χαλύβδινο συρματόσχοινο ή σχοινί από συνθετικές ίνες. Μεταξύ αυτών, οι άγκυρες βαρύτητας αποτελούνται κυρίως από χαλύβδινα ή τσιμεντένια μπλοκ, τα οποία είναι φθηνά, εύκολα στη συναρμολόγηση και χρησιμοποιούνται συχνά σε μικρά συστήματα FPV. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού και εγκατάστασης για τις συσκευές πρόσδεσης και αγκύρωσης θα συνεχίσουν να αυξάνονται καθώς αναπτύσσονται τα υπεράκτια συστήματα FPV. Στην **Εικόνα 52**, παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία που απαιτούνται για ένα πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα [134].

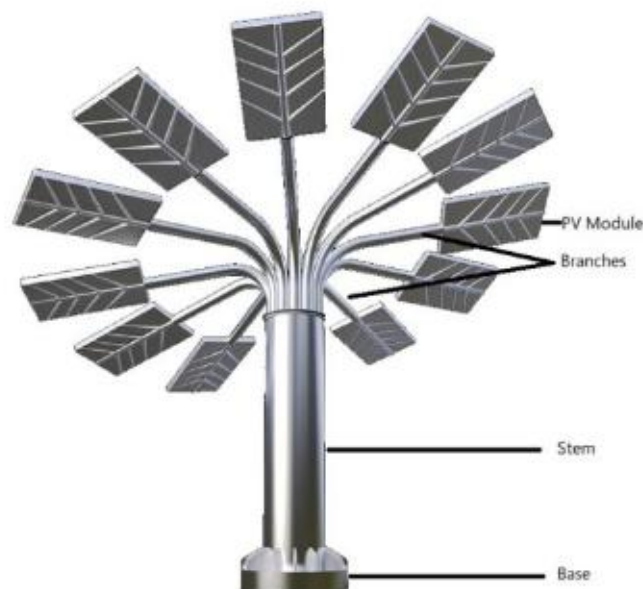


Εικόνα 52 Κύρια στοιχεία του πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος [134].

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά έρχονται άμεσα ή έμμεσα σε επαφή με το νερό, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη του συστήματος, λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες και βελτιώνουν την απόδοση παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου σκίαση από το ηλιακό φως και το νερό μπορεί εύκολα να καθαρίσει τη σκόνη που συσσωρεύεται στις φωτοβολταϊκές μονάδες. Επίσης, με την εγκατάσταση ενός πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να μειώσει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του νερού, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του νερού.

4.3.6 ΗΛΙΑΚΑ ΔΕΝΤΡΑ (SOLAR TREES)

Τα ηλιακά δέντρα αποτελούν μια εντυπωσιακή καινοτομία στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, συνδυάζοντας τεχνολογική λειτουργικότητα με αισθητική σχεδίαση, με στόχο την αποδοτική αξιοποίηση του ηλιακού φωτός σε αστικά και ημι-αστικά περιβάλλοντα. Πρόκειται για κατασκευές που μιμούνται τη μορφολογία φυσικών δέντρων, με κατακόρυλους κορμούς και βραχίονες που υποστηρίζουν φωτοβολταϊκά πάνελ σε διάταξη παρόμοια με τα κλαδιά και τα φύλλα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 53**. Η σχεδίασή τους επιτρέπει την τρισδιάστατη εγκατάσταση των πάνελ, βελτιστοποιώντας τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ παράλληλα μειώνεται το απαιτούμενο αποτύπωμα στο έδαφος σε σύγκριση με τα παραδοσιακά επίπεδα φωτοβολταϊκά συστήματα.



Εικόνα 53 Διάταξη ηλιακού δέντρου [135].

Ακαδημαϊκές μελέτες έχουν δείξει ότι η απόδοση των ηλιακών δέντρων μπορεί να ενισχυθεί μέσω έξυπνων συστημάτων προσανατολισμού (π.χ. ενεργούς παρακολούθησης του ήλιου – solar tracking), αλγορίθμων βελτιστοποίησης της γωνίας πρόσπτωσης, αλλά και με χρήση περροβσκίτη ή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών που προσαρμόζονται εύκολα στις καμπύλες επιφάνειες των «κλαδιών». Τα ηλιακά δέντρα έχουν ήδη αξιοποιηθεί σε εφαρμογές αστικής μικροπαραγωγής και φόρτισης μικροσυσκευών, όπως φορτιστές για e-bikes (ηλεκτρικά ποδήλατα), σταθμούς φόρτισης κινητών τηλεφώνων, έξυπνα παγκάκια και αυτόνομους φωτιστικούς ιστούς. Ορισμένα μοντέλα ενσωματώνουν αισθητήρες και αποθηκευτικά στοιχεία, ενισχύοντας τον ρόλο τους ως αυτόνομων ενεργειακών κόμβων.

Παρά τα εμφανή πλεονεκτήματα, η τεχνολογία ηλιακά δέντρα αντιμετωπίζει προκλήσεις σχετικές με το κόστος εγκατάστασης, την ανάγκη για εξειδικευμένο σχεδιασμό και συντήρηση, καθώς και την

ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα κόστους, η οποία παραμένει χαμηλότερη σε σχέση με τα μεγάλης κλίμακας επίπεδα φωτοβολταϊκά. Παρ' όλα αυτά, η αξιοποίηση ηλιακών δέντρων σε έξυπνες πόλεις, πάρκα και δημόσιους χώρους ενισχύει την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και την κοινωνική αποδοχή των ΑΠΕ, προσδίδοντας συμβολικό και εκπαιδευτικό χαρακτήρα στην ενεργειακή μετάβαση. Η διεπιστημονική φύση των εφαρμογών τους – που συνδυάζει αρχιτεκτονική, μηχανική, πληροφορική και ενεργειακές επιστήμες – καθιστά τα ηλιακά δέντρα ένα πεδίο ενεργούς ερευνητικού ενδιαφέροντος και καινοτομίας, το οποίο αναμένεται να επεκταθεί καθώς οι ανάγκες για αποκεντρωμένη, αισθητικά ενταγμένη και βιώσιμη παραγωγή ενέργειας αυξάνονται [135].

4.4 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Η κυκλική οικονομία αποτελεί ένα αναδυόμενο πρότυπο βιώσιμης ανάπτυξης, το οποίο προωθεί τη μεγιστοποίηση της αξίας των πόρων μέσω της επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης και ανάκτησης υλικών καθ' όλη τη διάρκεια ζωής των προϊόντων. Στο πλαίσιο αυτό, η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για την επίτευξη περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, και ιδίως οι ηλιακές κυψέλες πυριτίου, περιέχουν πολύτιμα και ενεργοβόρα υλικά όπως γυαλί, αλουμίνιο, πυρίτιο, άργυρο και άλλα μεταλλικά στοιχεία. Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών μονάδων στο τέλος της λειτουργικής τους ζωής (συνήθως 25–30 έτη) μπορεί να αποφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, περιορίζοντας την εξόρυξη πρώτων υλών και μειώνοντας τον όγκο των αποβλήτων. Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα ανάκτησης κρίσιμων υλικών, τα οποία μπορούν να επανενταχθούν στην παραγωγική διαδικασία, μειώνοντας το συνολικό κόστος και την εξάρτηση από μη ανανεώσιμες πηγές.

Η ένταξη της ανακύκλωσης φ/β στην κυκλική οικονομία απαιτεί την ανάπτυξη τεχνολογιών διαχωρισμού και ανάκτησης υλικών υψηλής απόδοσης, καθώς και την εφαρμογή κανονιστικών πλαισίων που θα ενισχύουν την ευθύνη των παραγωγών (extended producer responsibility). Η πρόβλεψη για το σχεδιασμό "ανακυκλώσιμων εξ αρχής" (design for recycling) φωτοβολταϊκών πάνελ, η βελτίωση των μεθόδων αποσυναρμολόγησης και η ενίσχυση της αλυσίδας αξίας ανακύκλωσης αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την επιτυχή εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

Επιπλέον, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η οδηγία για τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (WEEE Directive) περιλαμβάνει πλέον τα φωτοβολταϊκά στην κατηγορία των υποχρεωτικώς ανακυκλούμενων προϊόντων, επιβάλλοντας συγκεκριμένες υποχρεώσεις για τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών. Η συμμόρφωση με τις εν λόγω υποχρεώσεις μπορεί να ενισχύσει τη διαφάνεια και τη βιωσιμότητα του κλάδου, συμβάλλοντας στην οικοδόμηση ενός πιο κυκλικού και περιβαλλοντικά υπεύθυνου ενεργειακού μοντέλου.

Συνοψίζοντας, η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εντάσσεται πλήρως στη φιλοσοφία της κυκλικής οικονομίας, αποτελώντας ένα κρίσιμο βήμα προς την αειφόρο ενεργειακή μετάβαση. Η αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων με τρόπο αποδοτικό και η ενίσχυση των καινοτόμων τεχνολογιών ανακύκλωσης διαμορφώνουν το υπόβαθρο για ένα ενεργειακό μέλλον με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και αυξημένη κοινωνικοοικονομική αποδοτικότητα [97].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

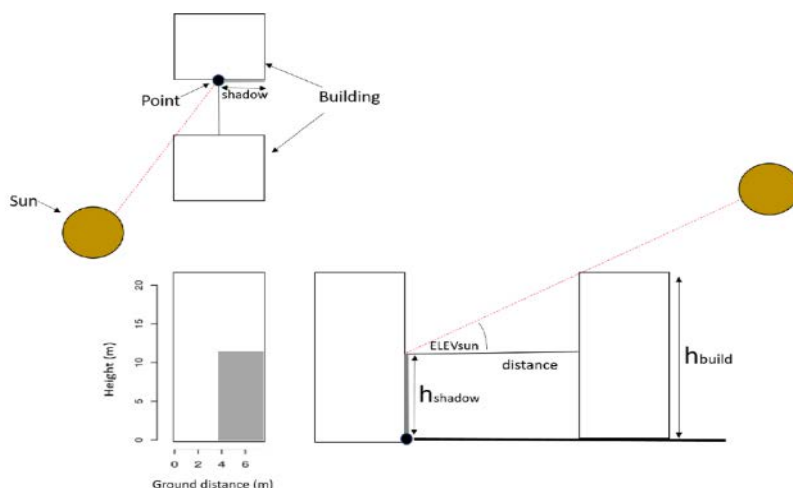
5.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η δυναμικότητα των φωτοβολταϊκών σταθμών αυξάνεται καθημερινά. Οι ηλιακές μονάδες μπορούν να τοποθετηθούν στις προσόψεις των κτιρίων, στις στέγες ή στο έδαφος με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων στήριξης. Είναι αδύνατο να υπερεκτιμηθεί η σημασία της κατανόησης των διαφόρων όψεων και ποικιλιών των δομών στήριξης. Η διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών μονάδων είναι 25-30 χρόνια.

Για την υποστήριξή τους για αυτό το εκτεταμένο χρονικό διάστημα, είναι ζωτικής σημασίας η επιλογή του κατάλληλου τύπου δομής στήριξης φωτοβολταϊκών. Αυτές οι δομές στήριξης μονάδων αποτελούνται συνήθως από ήπιο χάλυβα, γαλβανισμένο εν θερμώ σίδηρο και αλουμίνιο. Σε σύγκριση με τον γαλβανισμένο σίδηρο, το αλουμίνιο είναι ελαφρύ, ανθεκτικό στη διάβρωση και σε λογικές τιμές.

Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα είναι διαφορετικό όσον αφορά τις επιλογές τοποθέτησης και την κατασκευή των ραφιών και οι συνθήκες εγκατάστασης διαφέρουν από τοποθεσία σε τοποθεσία. Ως αποτέλεσμα, έχουν δημιουργηθεί πολυάριθμες λύσεις, όπως η τοποθέτηση σε στύλο, η επίγεια τοποθέτηση και η τοποθέτηση σε στέγη, για την κάλυψη διαφόρων αναγκών [1,100].

Επίσης, ο μελετητής καλείται να υπολογίσει την αζιμούθια γωνία και την κλίση των πλαισίων όπως φαίνεται στην **Εικόνα 54**. Τα πάνελ θα πρέπει να είναι στραμμένα προς το νότο με κλίση ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής για βέλτιστο ενεργειακό κέρδος. Μια συνήθης μέση χαρακτηριστική κλίση για τα ελληνικά δεδομένα είναι 30 μοίρες.



Εικόνα 54 Υπολογισμός ύψους σκιάς [99].

Ωστόσο, ο υπολογισμός της απόδοσης όταν δεν πληρούνται οι ιδανικές συνθήκες προσανατολισμού και κλίσης είναι ένα συχνό πρόβλημα. Όταν στην επιφάνεια τοποθέτησης μια φωτοβολταϊκής εγκατάστασης δίνεται προσανατολισμός και κλίση, το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συχνά. Από την άλλη πλευρά,

υπάρχει συνήθως αρκετός χώρος για τις επίγειες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ώστε να επιτευχθούν οι ιδανικές συνθήκες [88,89].

Όσον αφορά τη σκίαση, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να εξασφαλίζεται ότι η εγκατάσταση βρίσκεται σε περιοχή όπου δεν υπάρχουν εμπόδια. Επιπλέον, προκειμένου να αποφευχθεί η σκίαση των σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταξύ τους, ένας πρακτικός κανόνας είναι ότι η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σειρών πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την απόσταση μεταξύ των σειρών.

5.1.1 Επίγεια ηλιακή μονάδα (Σταθερή)

Οι ηλιακές μονάδες που τοποθετούνται σε ανοιχτή περιοχή στο έδαφος, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 55**, όπου θα δέχονται άπλετο ηλιακό φως, είναι γνωστές ως ηλιακές μονάδες εδάφους. Παρόλου που οι ηλιακές μονάδες στέγης είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες, η εγκατάσταση επίγειων ηλιακών μονάδων είναι απλούστερη. Ένας αντιστροφέας, ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί πίσω από το σύστημα στήριξης ή μέσα στο σπίτι, λαμβάνει ενέργεια από τις μονάδες, ενώ οι ηλιακές μονάδες 72 κελιών αποτελούν ένα επίγειο φωτοβολταϊκό σύστημα σε ηλιακά πάρκα μεγάλης κλίμακας, οι ηλιακές μονάδες 60 κελιών χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή οικιακών επίγειων ηλιακών εγκαταστάσεων. Ωστόσο, τα 120 ή 144 κελιά χρησιμοποιούνται σε σχέδια με δύο ή μισά κελιά [1].

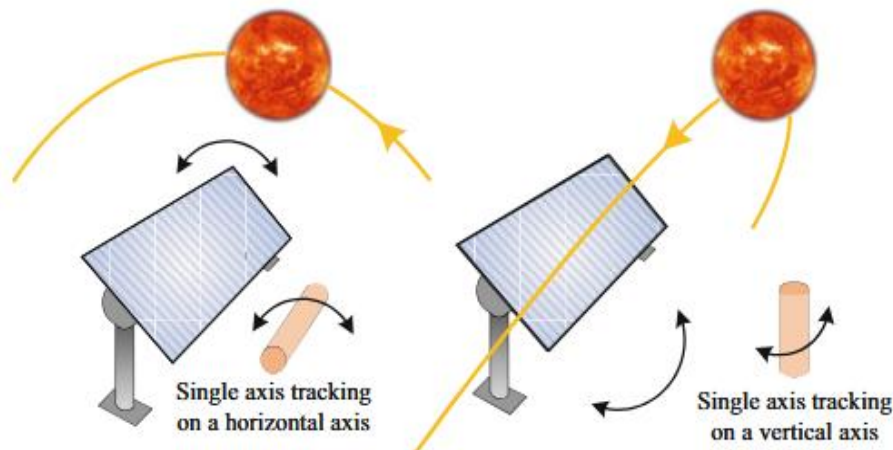


Εικόνα 55 Πάνελ εγκαταστημένα σε δώμα (Σταθερή εγκατάσταση) [1].

5.1.2 Συστήματα ηλιακής παρακολούθησης

Η μέγιστη ηλιακή ενέργεια μπορεί να ληφθεί από τη φωτοβολταϊκή μονάδα εάν η μονάδα είναι συνεχώς στραμμένη προς τον ήλιο, δεδομένου ότι ο ήλιος κινείται καθημερινά από την ανατολή προς τη δύση και επίσης μεταβάλλεται η θέση και η πορεία του στον ουρανό σε εποχιακή βάση. Το σύστημα αυτό έχει καλύτερη απόδοση, σε σχέση με τις σταθερές βάσεις.

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως μονοαξονικοί είτε ως διπλού άξονα, ανάλογα με τον άξονα παρακολούθησης, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 56**. Σε σύγκριση με τους ιχνηλάτες ενός άξονα, οι ιχνηλάτες δύο αξόνων παράγουν μεγαλύτερη ισχύ εξόδου. Παρακολουθώντας τον Ήλιο από την αυγή έως το σούρουπο, ένας μονοαξονικός ανιχνευτής μπορεί να περιστρέφεται από την ανατολή προς τη δύση. Αυτοί οι ιχνηλάτες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και πάλι ως οριζόντιοι μονοαξονικοί ιχνηλάτες (HSAT) και κατακόρυφοι μονοαξονικοί ιχνηλάτες (VSAT).



Εικόνα 56 Σύστημα ανίχνευσης ήλιου [1].

Παρατηρώντας την τροχιά του Ήλιου από το βόρειο ημισφαίριο είναι σαφές ότι, μετά την ανατολή του ήλιου, ο Ήλιος κινείται στον ουρανό τόσο προς τα νότια (αύξηση της γωνίας αζιμούθιου) όσο και προς τα δυτικά (αύξηση του ύψους). Ένας ηλιακός ανιχνευτής διπλού άξονα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της διπλής συνιστώσας της μετατόπισης του Ήλιου. Ένας ιχνηλάτης διπλού άξονα μπορεί να παρακολουθεί την πορεία του Ήλιου από βορρά προς νότο εκτός από την τυπική κατεύθυνση παρακολούθησης ανατολής-δύσης. Ο μηχανισμός εντοπισμού του άξονα βορρά-νότου ενός ανιχνευτή διπλού άξονα βοηθά μονάδα να προσαρμόζεται στα κυμαινόμενα υψόμετρα του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Αν και είναι πολύ πιο δαπανηρά και χρησιμοποιούν έναν πολύπλοκο μηχανισμό από τους ηλιακούς ιχνηλάτες ενός άξονα, οι ηλιακοί ιχνηλάτες δύο αξόνων παράγουν καλύτερη απόδοση της μονάδας και συγκεντρώνουν περισσότερη ενέργεια από το ηλιακό φως. Οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές, επίσης, είναι πιο επιρρεπείς στην μηχανική φθορά, επειδή έχουν περισσότερα κινούμενα μέρη, γεγονός που αυξάνει το κόστος συντήρησης και επισκευών.

Επιπλέον, οι ηλιακοί ιχνηλάτες μπορεί να είναι χειροκίνητοι ή αυτόματοι, ανάλογα με τον μηχανισμό ενεργοποίησης. Το λειτουργικό κόστος των χειροκίνητων ιχνηλατών είναι αυξημένο επειδή πρέπει να μετακινούνται με το χέρι και απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για την μετακίνηση της ηλιακής μονάδας.

Ωστόσο, λογικό είναι να εφαρμοστεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης με υψηλό κόστος εργασίας. Υπάρχουν δύο τύποι αυτοματοποιημένων συστημάτων: τα παθητικά και τα ενεργητικά. Ένα υγρό χαμηλού σημείου βρασμού βρίσκεται συνήθως στο εσωτερικό του περιστρεφόμενου άξονα των παθητικών συστημάτων παρακολούθησης. Χρησιμοποιώντας τη θερμότητα του ήλιου, το υγρό εξατμίζεται και δημιουργεί μια ανισορροπία στον άξονα, η οποία τελικά προκαλεί την κίνηση της μονάδας. Αντίθετα, τα συστήματα ενεργού εντοπισμού μετακινούν τη μονάδα χρησιμοποιώντας υδραυλικούς εμβολισμούς ή ηλεκτρικούς κινητήρες [101,102].

5.1.3 Συστήματα ηλιακής μονάδας στην οροφή

Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη ηλιακών μονάδων. Ανάλογα με το είδος της στέγης στην οποία εγκαθίστανται, μπορούν να εγκατασταθούν διαφορετικά είδη ηλιακών μονάδων. Η κατάσταση της στέγης, συμπεριλαμβανομένης της στεγανοποίησης, της δομικής ακεραιότητας και της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ηλεκτρικής ασφάλειας, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που τοποθετείται σε στέγη. Μεταξύ αυτών των συστημάτων τοποθέτησης σε στέγη είναι τα συστήματα τοποθέτησης με ράγα, χωρίς ράγα, με κιγκλιδώματα, με επίπεδη και κεκλιμένη στέγη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 57** [1].



Εικόνα 57 Σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων στη οροφή [1].

5.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΤΑΣΗΣ (INVERTERS)

Μια ηλεκτρονική συσκευή ισχύος γνωστή ως μετατροπέας ή αντιστροφέας τάσης, η οποία μετατρέπει την ισχύ συνεχούς ρεύματος σε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος σε συγκεκριμένη τάση και συχνότητα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτεί την πλειονότητα των ηλεκτρικών συσκευών, για παράδειγμα τα ψυγεία, τα φώτα και τα θερμαντικά σώματα. Από την άλλη πλευρά, ένα ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ισχύ συνεχούς ρεύματος.

Για τη μετατροπή της ισχύος εναλλασσόμενου-συνεχούς, πρέπει να προστεθούν στο φωτοβολταϊκό σύστημα μονάδες κλιματισμού ισχύος. Η ανάπτυξη των εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος τα τελευταία χρόνια έχει καταστήσει εφικτή τη μετατροπή των αντιστροφών σε DC-AC και τη ρύθμιση της φόρτισης και της εκφόρτισης των μπαταριών. Επιπλέον, με τη χρήση τεχνικών MPPT, οι μετατροπείς βοηθούν στη μεγιστοποίηση της παραγωγής από τις φωτοβολταϊκές μονάδες.

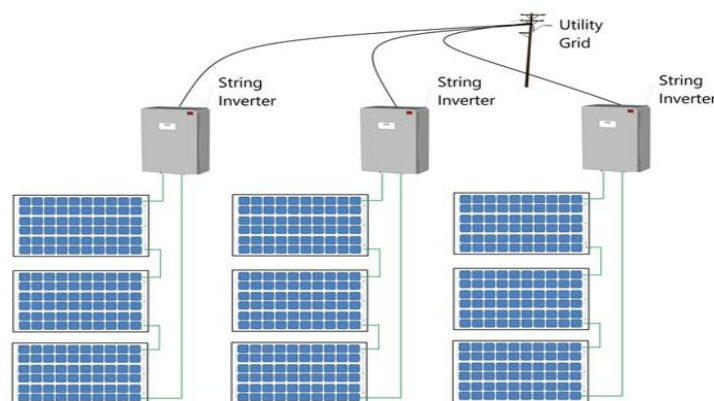
Προκειμένου να μειωθεί το ρεύμα εκκίνησης των επαγωγικών κινητήρων και να βελτιωθεί ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα, μεταβάλλουν επίσης τη συχνότητα και την τάση της εναλλασσόμενης ισχύος εξόδου για τη ρύθμιση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης περιστροφής των κινητήρων. Μεταβλητή μονάδα κίνησης συχνότητας (VFD), μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές ηλιακής άντλησης νερού, είναι το όνομα αυτής της μεθόδου ελέγχου. Οι μετατροπείς εκτός δικτύου και οι μετατροπείς συνδεδεμένοι στο δίκτυο είναι οι δύο κύριες ποικιλίες μετατροπών.

Επίσης, υπάρχουν επτά διαφορετικοί τύποι μετατροπών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα:

1. Αντιστροφείς κλάδων (string inverters)
2. Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)
3. Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters)
4. Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (module integrated inverters) [104].

1. Αντιστροφείς κλάδων (string inverters)

Στα περισσότερα συστήματα ηλιακής ενέργειας επί του δικτύου, αυτός ο μετατροπέας είναι η συνιστάμενη επιλογή επειδή είναι λιγότερο δαπανηρός και απλούστερος στη συντήρηση από τον κεντρικό μετατροπέα. Στην **Εικόνα 58**, παρουσιάζεται ένα σύστημα με αντιστροφείς κλάδων. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα της χρήσης αυτού του είδους μετατροπέα είναι ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τη συμβολοσειρά θα μειωθεί εάν ένα από τα πάνελ είναι εκτεθειμένο σε σκιά, για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να βεβαιωθείτε ότι δεν υπάρχουν αιτίες σκιάς [106].



Εικόνα 58 Φωτοβολταϊκό σύστημα με αντιστροφείς κλάδων [105].

2. Κεντρικοί Αντιστροφέες (Central Inverters)

Οι κεντρικοί μετατροπείς, οι οποίοι συνδέουν έναν μεγάλο αριθμό φωτοβολταϊκών μονάδων με το δίκτυο, αποτέλεσαν τη βάση της κεντρικής τεχνολογίας. Στην **Εικόνα 59**, παρουσιάζεται ένας πρότυπος κεντρικός μετατροπέας.



Εικόνα 59 Κεντρικός μετατροπέας [107].

Οι φωτοβολταϊκές μονάδες χωρίζονταν σε σειρές ή συνδέσεις σειράς, κάθε μία από τις οποίες παρήγαγε μια τάση αρκετά υψηλή ώστε να αποτρέπεται η πρόσθετη ενίσχυση [104].

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν δίοδοι συμβολοσειράς για την παράλληλη σύνδεση αυτών των συνδέσεων σειράς, επιτυγχάνοντας υψηλά επίπεδα ισχύος 10-250 kW. Καλώδια συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης που συνδέουν τις φωτοβολταϊκές μονάδες με τον αντιστροφέα, απώλειες ισχύος από ένα κεντρικό MPPT (σημείο βέλτιστης λειτουργίας), απώλειες διόδων συμβολοσειράς και ένας άκαμπτος σχεδιασμός που εμποδίζει τα πλεονεκτήματα της μαζικής παραγωγής είναι μερικά μόνο από τα σοβαρά μειονεκτήματα αυτού του τοποθετημένου κεντρικά μεταφορέα. Όταν ο κεντρικός αντιστροφέας παρουσιάσει βλάβη, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στο σύνολο της σταματά να λειτουργεί. Συνήθως χρησιμοποιούνταν θυρίστορ για τη μεταγωγή του συνδεδεμένου στο δίκτυο, με αποτέλεσμα πολλές αρμονικές ρεύματος και υποβαθμισμένη ποιότητα ισχύος [95].

3. Αντιστροφέες πολλαπλών κλάδων ή στοιχειοσειρών (multi-string inverters)

Ο αντιστροφέας πολλαπλών στοιχειοσειρών είναι μια εξέλιξη του αντιστροφέα στοιχειοσειρών στον οποίο πολλαπλές στοιχειοσειρές συνδέονται σε έναν ενιαίο αντιστροφέα DC-AC μέσω των ατομικών τους μετατροπέων DC-DC. Δεδομένου ότι κάθε στοιχειοσειρά μπορεί να διαχειρίζεται ανεξάρτητα, αυτό είναι πλεονέκτημα έναντι του κεντρικού συστήματος. Στην **Εικόνα 60**, απεικονίζεται ένας πρότυπος αντιστροφέας πολλαπλών κλάδων.



Εικόνα 60 Αντιστροφέας πολλαπλών κλάδων [109].

Ως αποτέλεσμα, τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών κεντρικής και κλαδών συνδυάζονται για να δημιουργηθεί μια μικρή και προσιτή λύση. Φωτοβολταϊκές σειρές διαφόρων τεχνολογιών και προσανατολισμών μπορούν να ενσωματωθούν χάρη σε αυτή την τοπολογία πολλαπλών σειρών. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν τη χρονική μετατόπιση της ηλιακής ενέργειας, η οποία μεγιστοποιεί τη λειτουργική απόδοση κάθε συμβολοσειράς ανεξάρτητα. Η περιοχή εφαρμογής του μετατροπέα πολλαπλών σειρών περιλαμβάνει φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις 3-10 kW [108].

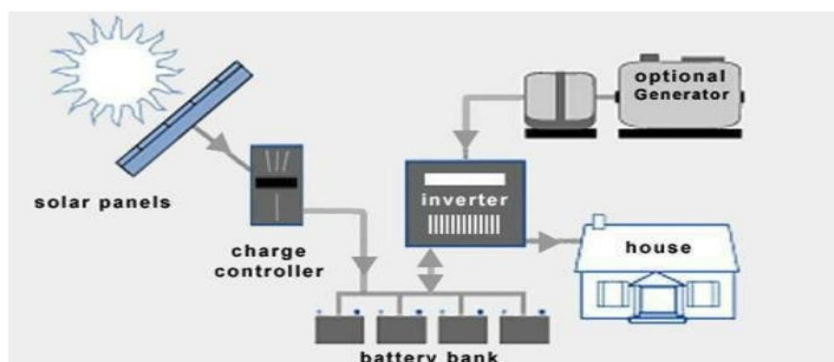
4. Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (Module integrated inverters)

Αυτοί οι μετατροπείς χαμηλής τάσης, οι οποίοι έχουν μέγιστη ισχύ περίπου 300W, είναι μια σχετικά νέα κατηγορία. Αυτοί οι μετατροπείς λαμβάνουν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ ως είσοδο, επειδή είναι ενσωματωμένοι. Ο στόχος είναι να απασχολούν τα πάνελ κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ανεξάρτητα για την καλύτερη δυνατή απόδοση [153].

5.2.1 Μετατροπέας εκτός δικτύου (off-grid)

Ένας μετατροπέας εκτός δικτύου, είναι ένας μετατροπέας ισχύος DC-AC που δεν είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο. Αντίθετα, χρησιμοποιεί τη μπαταρία για να μετατρέψει την ισχύ συνεχούς ρεύματος σε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία στη συνέχεια παρέχεται απευθείας στο φορτίο, όπως φαίνεται στην

Εικόνα 61.



Εικόνα 61 Λειτουργία Εκτός Δικτύου [112].

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκτός δικτύου μπορούν να χρησιμοποιούν μετατροπείς με βάση τη μπαταρία, ωστόσο ορισμένες ποικιλίες μπορούν επίσης να επιστρέφουν ενέργεια στο δίκτυο κοινής ωφέλειας.

Με βάση τη γεωμετρία της τάσης εξόδου, οι μετατροπείς εκτός δικτύου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

Ο απλούστερος και φθηνότερος αντιστροφέας με τις λιγότερες χρήσεις είναι ο **αντιστροφέας τετραγωνικού κύματος**. Για τη δημιουργία του σήματος εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας διακόπτης που επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς μία κατεύθυνση για το πρώτο μισό του κύκλου και αντιστρέφει την κατεύθυνση για το δεύτερο μισό του κύκλου.

Μια άλλη ονομασία για τον τροποποιημένο αντιστροφέα ημιτονοειδούς κύματος είναι ο **τροποποιημένος αντιστροφέας τετραγωνικού κύματος**. Η PWM επιτρέπει στον αντιστροφέα να παράγει πολυεπίπεδες τιμές τάσης. Ένα κύμα που είναι παρόμοιο με το καθαρό ημιτονοειδές κύμα παράγεται από το τροποποιημένο τετραγωνικό κύμα. Ωστόσο, λόγω της υψηλής αρμονικής τιμής του, η οποία μπορεί να κάψει γρήγορα τους κινητήρες μετά από μερικές λειτουργίες, δεν συνιστάται η χρήση αυτού του μετατροπέα για την τροφοδοσία ενός επαγωγικού κινητήρα.

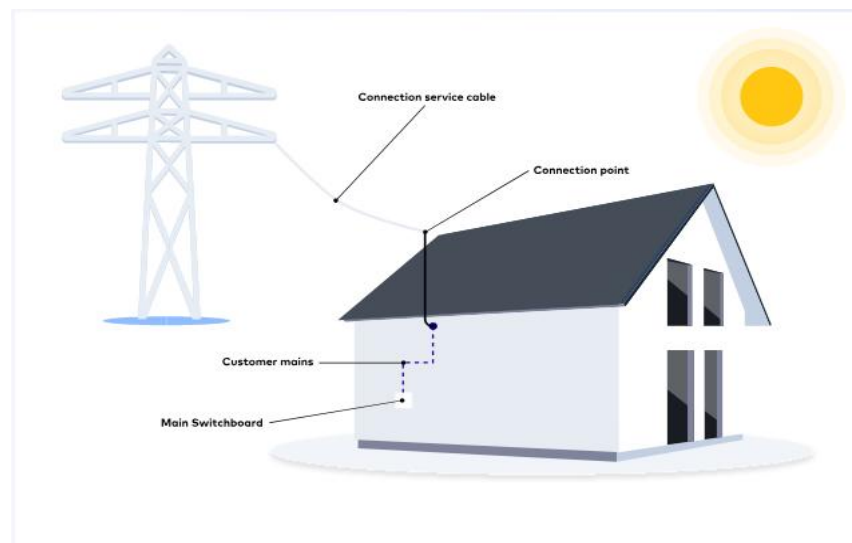
Το είδος του μετατροπέα που χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία με τον τροποποιημένο μετατροπέα ημιτονοειδούς κύματος, αλλά φιλτράρει χρησιμοποιώντας ορισμένα πηνία και πυκνωτές, ονομάζεται **μετατροπέας καθαρού ημιτονοειδούς κύματος**. Τα φίλτρα απαιτούνται για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων στοιχείων από το σήμα, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα σήματος. Χρησιμοποιούνται για να κάνουν τα σήματα εξόδου να μοιάζουν περισσότερο με το αρχικό σήμα κοινής ωφέλειας εξομαλύνοντάς τα και εξαλείφοντας τις αρμονικές. Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται συνήθως λόγω των εκτεταμένων διακοπών ρεύματος [106,111].

5.2.2 Μετατροπέας δικτύου (grid-connection)

Ένας μετατροπέας συνδεδεμένος στο δίκτυο βρίσκεται μεταξύ του δικτύου και των ηλιακών συλλεκτών σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη και τροφοδοτεί είτε τα συνδεδεμένα φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος είτε το δίκτυο κοινής ωφέλειας. Στην **Εικόνα 62**, απεικονίζεται μια κατοικία συνδεδεμένη με έναν μετατροπέα δικτύου. Η έξοδος του αντιστροφέα πρέπει να ταιριάζει με τη συχνότητα του δικτύου, την ακολουθία φάσεων, την τάση γραμμής, τη γωνία φάσης και την κυματομορφή, προκειμένου να εκτελείται με ασφάλεια αυτή η λειτουργία και να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις συγχρονισμού του δικτύου.

Είναι σαφές ότι ούτε οι μετατροπείς τετραγωνικού κύματος ούτε οι τροποποιημένοι ημιτονοειδείς μετατροπείς μπορούν να διατηρήσουν την ποιότητα ισχύος, με εξαίρεση τους μετατροπείς καθαρού ημιτονοειδούς κύματος, καθώς ο πρωταρχικός στόχος των μετατροπέων συνδεδεμένων στο δίκτυο είναι

η ενσωμάτωση της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας στο παραδοσιακό δίκτυο. Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος και τη διαμόρφωσή τους [1].



Εικόνα 62 Κατοικία συνδεδεμένη με μετατροπέα δικτύου [113].

5.2.3 Απαραίτητοι παράμετροι λειτουργίας

5.2.3.1 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα, ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου. Αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό λειτουργίας, διότι οι απώλειες ισχύος μεταφράζονται σε απώλειες εισοδήματος σε διασυνδεδεμένα συστήματα. Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα επηρεάζεται από την ύπαρξη ή μη μετασχηματιστή απομόνωσης.

Επίσης, η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που χάνεται ως απώλειες του μετατροπέα αντικατοπτρίζεται στην απόδοση [114].

5.2.3.2 Το φαινόμενο της νησιδοποίησης (islanding)

Ένα τμήμα του δικτύου με φωτοβολταϊκά συστήματα που έχει αποσυνδεθεί από την κύρια παροχή είναι γνωστό ως νησιδοποίηση. Ένας φωτοβολταϊκός σταθμός λειτουργεί ως νησίδα παραγωγής ενέργειας, και εάν οι αντιστροφείς παραμείνουν συνδεδεμένοι, μπορεί να υπάρξουν κίνδυνοι ασφαλείας για τα μέλη του προσωπικού που ενδέχεται να εργάζονται στο σημείο σύνδεσης ή για τον ίδιο τον εξοπλισμό λόγω φευγαλέων φαινομένων κατά την επαναφορά του δικτύου, είτε αυτή είναι αυτοματοποιημένη είτε χειροκίνητη.

Ο μετατροπέας πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίζει την εμφάνιση νησιδοποίησης με κατάλληλες μετρήσεις και να τη χειρίζεται με ιδιαίτερη προσοχή. Ο αντιστροφέας αποσυνδέεται αυτόματα από το δίκτυο εάν εντοπιστεί η κατάσταση νησιδοποίησης, η οποία συχνά επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση της κατάστασης του δικτύου με τη χρήση μετρήσεων τάσης συχνότητας και σύνθετης αντίστασης.

Ωστόσο, για λόγους ασφαλείας, ο μετατροπέας δεν πρέπει να επανασυνδέεται αυτόματα μόλις αποκατασταθεί το δίκτυο [64].

5.2.3.3 Έγχυση συνεχούς ρεύματος

Η ικανότητα έγχυσης συνεχούς ρεύματος στο δίκτυο αποτελεί κρίσιμη απαίτηση για τους μετατροπείς που συνδέονται στο δίκτυο, η ικανότητα αυτή συνδέεται επίσης με τη συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου. Η έγχυση συνεχούς ρεύματος στο δίκτυο έχει την αρνητική συνέπεια της μετατόπισης των σημείων λειτουργίας των μετασχηματιστών πιο κοντά στον κορεσμό, γεγονός που αυξάνει το πρωτεύον ρεύμα και μπορεί να ενεργοποιήσει τους μηχανισμούς προστασίας. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής και η απόδοση των μετασχηματιστών επηρεάζονται αρνητικά και η καλωδίωση υφίσταται πίεση. Όταν οι μετατροπείς δεν διαθέτουν μετασχηματιστές, το πρόβλημα της έγχυσης συνεχούς ρεύματος γίνεται σημαντικό. Οι μετατροπείς συχνότητας χαμηλής τάσης με μετασχηματιστή αποτρέπουν την έγχυση συνεχούς ρεύματος επιτυγχάνοντας γαλβανικό διαχωρισμό μεταξύ των πλευρών συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούνται πολύπλοκες μέθοδοι για τη μέτρηση του ρεύματος και τον ηλεκτρονικό έλεγχο σε μετατροπείς χωρίς μετασχηματιστή, όπου μπορεί να προκύψουν προβλήματα. Όσον αφορά το είδος της συσκευής προστασίας που επηρεάζεται χρησιμοποιείται για έμμεσες επαφές στην πλευρά DC, οι μετατροπείς με μετασχηματιστή απομόνωσης υψηλής συχνότητας αποτελούν μια ενδιάμεση κατάσταση [59].

5.2.3.4 Σημείο βέλτιστης λειτουργίας (MPPT)

Η παρακολούθηση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας (MPPT) είναι η διαδικασία προσαρμογής του σημείου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων ώστε να ικανοποιείται συνεχώς το σημείο στο οποίο λειτουργούν οι διάφοροι αλγόριθμοι MPPT. Μια απλή και δημοφιλής μεθοδολογία είναι η μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης (P&O). Η τεχνική αυτή ρυθμίζει σταδιακά την ισχύ και το σημείο λειτουργίας. Μια άλλη αλλαγή γίνεται μέχρι να πέσει η ισχύς, ένα η πρώτη παράγει θετική παράγωγο, η οποία αυξάνει την ισχύ.

Το μέγιστο επιτυγχάνεται όταν το λειτουργικό τελικό σημείο ταλαντώνεται μεταξύ αυτών των δύο θετικών και αρνητικών θέσεων παραγώγων [1].

5.2.3.5 Περιορισμένη λειτουργία ισχύος

Η απόκλιση μεταξύ της ονομαστικής και της τρέχουσας ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων υποδηλώνει ότι οι μετατροπείς πρέπει να προστατεύονται από τη λειτουργία υπερφόρτωσης, όπως όταν η ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια υπερβαίνει τη μέγιστη DC είσοδο του μετατροπέα. Για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του μετατροπέα σε αυτή την περίπτωση, οι εσωτερικοί αλγόριθμοι ελέγχου μετακινούν το σημείο λειτουργίας μακριά από το μέγιστο [116].

5.3 ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ

Τα αγωγίμα καλώδια που περικλείονται σε μονωτικό υλικό, χρησιμοποιούνται στη διαδικασία καλωδίωσης για να προστατεύουν τους χρήστες και τον περιβάλλοντα χώρο από ηλεκτροπληξία. Ο αγωγίμος πυρήνας του καλωδίου αποτελείται από ένα συμπαγές μεταλλικό σύρμα ή από πολλά μικρά συγκολλημένα σύρματα. Συνήθως, χρησιμοποιείται χαλκός ή αλουμίνιο για την κατασκευή αυτών των μεταλλικών αγωγών.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μεγέθη για καλώδια συνεχούς ρεύματος είναι $2,5 \text{ mm}^2$, 4 mm^2 και 6 mm^2 .

Επομένως, οι περισσότερες εγκαταστάσεις επιλέγουν ως πρότυπο τα καλώδια 4 mm^2 , καθώς παρέχουν μια καλή ισορροπία μεταξύ της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας, της μείωσης της πτώσης τάσης και της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος.

Κατάλληλο για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα καλώδιο είναι το νεοπρένιο τύπου H07 RN-F, το οποίο αποτελείται από μόνωση με καουτσούκ και μανδύα, ώστε να μπορεί να αντέξει θερμοκρασίας έως 60°C [116].

5.3.1 Καλωδίωση AC

Στην εγκατάσταση μας, θα τοποθετηθούν τα καλώδια τύπου H07RN-F διατομής $3 \times 25 \text{ mm}^2$, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά ισχύος από τους μετατροπείς στον κεντρικό πίνακα, διατηρώντας έτσι τις απώλειες από τη μεταφορά ισχύος μικρότερες.

Αυτά τα καλώδια είναι ανθεκτικά σε όλες τις καιρικές συνθήκες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στο νερό. Αντέχουν σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις και καίγονται αργά. Ο αγωγός είναι λεπτόκλωνος χαλκός, που παρέχει υψηλή αγωγιμότητα και ελαστικότητα, ενώ ο εξωτερικός και ο εσωτερικός μανδύας αποτελούνται από ελαστικό χλωροπρένιο και μόνωση από καουτσούκ, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 63** [117].



Εικόνα 63 Καλώδιο H07RN-F [117].

5.3.2 Καλωδίωση AC Ισχύος

Λόγω της μεγάλης ισχύος που θα μεταφέρουν τα καλώδια, για τη μεταφορά ισχύος από τον κεντρικό πίνακα στο σημείο σύνδεσης με τη ΔΕΗ, επιλέχθηκε καλώδιο XLPE PVC/SWA/PVC με διατομή $3 \times 120 \text{ mm}^2$, $1 \times 95 \text{ mm}^2$ και $1 \times 95 \text{ mm}^2$, με πρόσθετη μηχανική ενίσχυση.

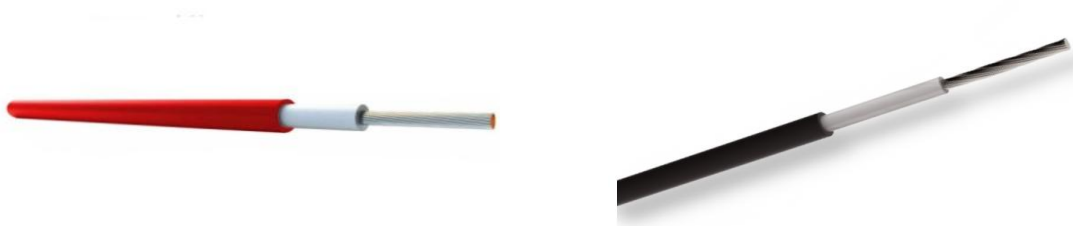
Το καλώδιο θα θαφτεί 80 cm κάτω από την επιφάνεια της γης μέσα σε στρώμα άμμου για να δημιουργηθεί χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και, κατά συνέπεια, βέλτιστη συμπεριφορά αγωγιμότητας. Το καλώδιο XLPE PVC/SWA/PVC διαθέτει πολύκλωνους αγωγούς από καθαρά χάλκινα σύρματα, μόνωση αγωγού XLPE, εσωτερική μόνωση PVC και μόνωση καλωδίου PVC. Μαύρη μόνωση, γαλβανισμένο χαλύβδινο σύρμα ενίσχυσης και μαύρο περίβλημα PVC εξωτερικά, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 64** [118].



Εικόνα 64 Καλώδιο XLPE PVC/SWA/PVC [118].

5.3.3 Καλωδίωση DC

Το ακόλουθο καλώδιο τύπου DC Solar 1x6 mm² θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση κάθε σειράς φωτοβολταϊκών στοιχείων με τον αντιστροφέα. Αυτό το εύκαμπτο καλώδιο διαθέτει περίβλημα και μόνωση από καουτσούκ υψηλής αντοχής, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 65 & 66**. Τα καλώδια αυτά ανταπεξέρχονται σε ανοικτούς χώρους που είναι ξηροί, υγροί ή βρεγμένοι. Ανάλογα με την πολικότητα της ισχύος που μεταφέρουν, τα καλώδια θα διακρίνονται χρησιμοποιώντας διαφορετικά χρώματα για καλύτερη διάκριση. Συγκεκριμένα, μαύρο-μαύρο για τον αρνητικό πόλο και κόκκινο-μαύρο για τον θετικό πόλο [119,120].



Εικόνα 65 Κόκκινο καλώδιο DC Solar 1x6 mm² [119]. **Εικόνα 66** Μαύρο καλώδιο DC Solar 1x6 mm² [120].

5.3.4 Καλωδίωση Σηματοδοσίας

Το καλώδιο Ftp Cat5e 4x2x0.51, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 67**, είναι κατάλληλο για τηλεπικοινωνιακά συστήματα υψηλής συχνότητας όπως ISDN, LAN και άλλα που μεταδίδουν δεδομένα, φωνή και σήματα. Αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ήπιες, προστατευμένες εξωτερικές συνθήκες, εγκαθίστανται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους. Θωρακίζονται από εξωτερικές παρεμβολές με ηλεκτροστατική θωράκιση. Τα καλώδια διατίθεται σε ποικιλίες με κοντό πυρήνα για εφαρμογές που απαιτούν επιπλέον προστασία από πυρκαγιά [121].



Εικόνα 67 Καλώδιο FTP Cat5e [121].

5.4 ΓΕΙΩΣΗ

Ένα από τα πιο σημαντικά σημεία ενός υποσταθμού είναι η γείωση, η οποία διαχωρίζεται σε προστατευτική και λειτουργική γείωση. Η γείωση των μεταλλικών περιβλημάτων είναι γνωστή ως γείωση προστασίας. Η προστασία των ανθρώπων από τάσεις επαφής είναι η πρωταρχική της λειτουργία σε έναν υποσταθμό. Η τάση αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος μεταξύ δύο μεταλλικών σημείων ή μεταξύ ενός μεταλλικού σημείου και της γης είναι γνωστή ως τάση επαφής.

Η γείωση κατά μήκος των θεμελίων θεωρείται ανώτερη από τη γείωση του υποσταθμού. Η αντοχή του αγωγού γείωσης σε σχέση με το ρεύμα κατά τη διάρκεια ενός μονοφασικού βραχυκυκλώματος και για τη διάρκεια του εν λόγω βραχυκυκλώματος καθορίζει τη διατομή του αγωγού.

Η προστατευτική γείωση χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι οποιαδήποτε αγώγιμη επιφάνεια που θα μπορούσε να έρθει σε επαφή με άνθρωπο δεν γειώνεται ποτέ με κατάσταση ηλεκτρικού δυναμικού. Εξαλείφουμε την πιθανότητα ατυχήματος με το σχεδιασμό μιας κατασκευής όπου κάθε επιφάνεια που εκτίθεται στην ατμόσφαιρα είναι είτε άμεσα είτε έμμεσα συνδεδεμένη με το σύστημα γείωσης. Εξαιτίας αυτού, κάθε εκτεθειμένη αγώγιμη δομή θα συνδέεται με έναν ακροδέκτη γείωσης.

Για να εξασφαλιστεί η ισοδυναμική σύνδεση της γείωσης μεταξύ όλων των σειρών του συστήματος, οι μεταλλικές επιφάνειες της ίδιας σειράς πρέπει να ισοδύναμα και ένας αγωγός με διατομή $1 \times 50 \text{ mm}^2$, θα συνδέει κάθε σειρά. Επιπλέον, τα πάνελ θα συνδεθούν στις μεταλλικές βάσεις μέσω κατάλληλου αγωγού $1 \times 6 \text{ mm}^2$. Ένας αγωγός $1 \times 6 \text{ mm}^2$ θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση των μεταλλικών ραφιών όπου θα οδηγηθούν τα καλώδια στην ισοδυναμική γείωση των σειρών του συστήματος.

Για να εξασφαλιστεί η υγρασία και η αντίσταση, τα πλαίσια αλουμινίου των ηλιακών μονάδων θα πρέπει να γειώνονται με το σύστημα τοποθέτησης, όπου το καλώδιο γείωσης κατεβαίνει σε υγρό έδαφος που πρέπει να συντηρείται τακτικά [122,123].

5.5 ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες μπορεί να είναι ευάλωτες σε κεραυνικά πλήγματα επειδή μπορούν να τοποθετηθούν σε υπερυψωμένες στέγες. Ο κεραυνός πρέπει να βρει μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης προς το έδαφος αφού χτυπήσει το μεταλλικό σύστημα τοποθέτησης και μπορεί να μεταφερθεί μέσω των καλωδίων για να φτάσει στην μπαταρία ή στο σύστημα μετατροπέα.

Αυτό το ρεύμα μπορεί να βλάψει όλα τα εμπλεκόμενα. Το σύστημα τοποθέτησης και το μεταλλικό πλαίσιο αλουμινίου των μονάδων θα πρέπει να είναι γειωμένα για να αποφευχθεί αυτή η περίπτωση.

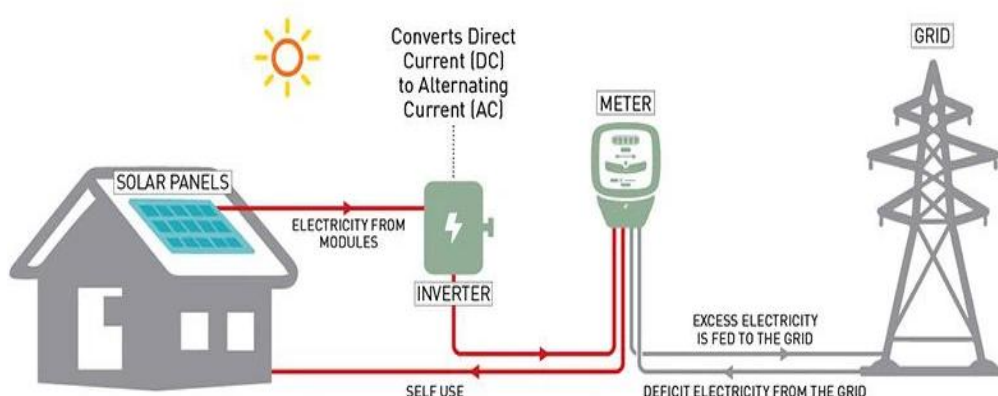
Ένα αλεξικέραυνο, το οποίο είναι ένας αγωγός χαμηλής αντίστασης τοποθετημένος ψηλότερα από τη συσκευή προς προστασία και συνδεδεμένος απευθείας με το έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία αυτού του είδους μηχανισμού γείωσης. Το αλεξικέραυνο δέχεται τον κεραυνό πριν από οποιαδήποτε άλλη συσκευή και οδηγεί την τάση απευθείας στο έδαφος.

Όσον αφορά την προστασία από κρουστικές υπερτάσεις, θα τοποθετηθούν στις γραμμές συνεχούς ρεύματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, απαγωγείς υπερτάσεων κατηγορίας T1+T2 και στη γραμμή εναλλασσόμενου ρεύματος, απαγωγείς υπερτάσεων κατηγορίας T1+T2 και T3 [125,126].

5.6 ΚΑΘΑΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ (NET METERING)

Κάθε χρήστης που έχει εγκαταστήσει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί την ενέργεια του συστήματος ή την ενέργεια του δικτύου κοινής ωφέλειας. Η χρήση του δικτύου για ενέργεια κατά τις ώρες αιχμής μπορεί να είναι δαπανηρή. Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται η ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων. Μια μπαταρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση επιπλέον ενέργειας εάν η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος υπερβαίνει την ποσότητα που απαιτείται. Μετά τον κατάλληλο συγχρονισμό, ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να τροφοδοτεί την πλεονάζουσα φωτοβολταϊκή ενέργεια στο δίκτυο κοινής ωφέλειας. Προκειμένου να μειώσει το κόστος χρήσης της ενέργειας του δικτύου, ο χρήστης μπορεί να κερδίσει μονάδες πουλώντας φωτοβολταϊκή ενέργεια στο δίκτυο. Αυτό το σύστημα χρέωσης αναφέρεται ως σύστημα καθαρής μέτρησης (net metering).

Το σύστημα αυτό περιέχει έναν αμφίδρομο μετρητή ενέργειας που μπορεί να καταγράφει την καθαρή ροή ενέργειας από τον χρήστη προς το δίκτυο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 68** [127].



Εικόνα 68 Διάγραμμα των ροών ενέργειας/πληροφοριών ενός νοικοκυριού που λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς για τη μελέτη περίπτωσης [128].

5.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΒΛΕΨΗΣ

Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα, περιλαμβάνει το σύστημα τηλεμετρίας ως θεμελιώδες στοιχείο. Το σύστημα τηλεπίβλεψης μπορεί να ειδοποιεί και να ενημερώνει τον ιδιοκτήτη συνέχεια ως προς την καταγραφή ενεργειακής απόδοσης και τον έγκαιρο εντοπισμό σφαλμάτων λειτουργίας. Μπορεί να κοστίζει ακριβά η παραγωγή ενέργειας, εάν δεν εντοπιστεί αμέσως μια πιθανή βλάβη του συστήματος και αποκρύπτεται η σωστή λειτουργία της εγκατάστασης.

Στη δική μας εγκατάσταση, το σύστημα τηλεπίβλεψης Sunny Webbox της εταιρίας SMA, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 69**, θα συνδεθεί στον κεντρικό πίνακα. Επίσης, συγχρονίζεται και με τον αντιστροφέα μας για καλύτερη επιτήρηση της εγκατάστασης [129].



Εικόνα 69 Σύστημα τηλεπίβλεψης Sunny Webbox [130].

5.8 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΕΡΩΝ

5.8.1 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Ο χώρος μελέτης βρίσκεται στην περιοχή του Δήμου Βόλου, Νομού Μαγνησίας, και έχει συνολικό εμβαδόν 86,2 m². Πρόκειται για οροφδιαμέρισμα δευτέρου ορόφου με δίριχτη στέγη, το οποίο δεν περιβάλλεται από υψηλά κτίρια ή εμπόδια που προκαλούν σκιάσεις, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 70**. Το γεγονός αυτό καθιστά τον χώρο ιδανικό για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος.



Εικόνα 70 Αεροφωτογραφία στέγης

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ προβλέπεται να τοποθετηθούν επί της στέγης, ενώ ο μετατροπέας (inverter) και οι πίνακες ελέγχου θα εγκατασταθούν στο εσωτερικό της κατοικίας, και συγκεκριμένα στον χώρο της σοφίτας. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει προστασία των κρίσιμων εξαρτημάτων από καιρικές συνθήκες και επιτρέπει εύκολη πρόσβαση για συντήρηση.

5.8.2 ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η βάση στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που επιλέχτηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 71** είναι κατάλληλη για τοποθέτηση σε στέγη ακολουθώντας την κλίση της οροφής, όπως στις περισσότερες περιπτώσεις. Για τις απαιτήσεις του συγκεκριμένης μελέτης, πραγματοποιείται εξατομικευμένη προσαρμογή των προδιαγραφών του στηρικτικού συστήματος από τον κατασκευαστή. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι διαστάσεις των χρησιμοποιούμενων Φ/Β πλαισίων, τα τοπικά δεδομένα των χιονοπτώσεων και ταχύτητας των ανέμων (αιολικό φορτίο) για τον υπολογισμό της ανεμοπίεσης, καθώς και τυχόν ιδιομορφίες της στέγης. Ο κατασκευαστής της βάσης είναι η εταιρεία ECOSOL, η οποία κατασκευάζει φωτοβολταϊκούς σταθμούς και άλλων ενεργειακών έργων. Η σειρά προϊόντων ECOSOL II περιλαμβάνει λύσεις για στήριξη Φ/Β πλαισίων σε κατοικίες και βιομηχανικά κτίρια, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Το υλικό κατασκευής τους είναι από κράμα αλουμινίου [136].

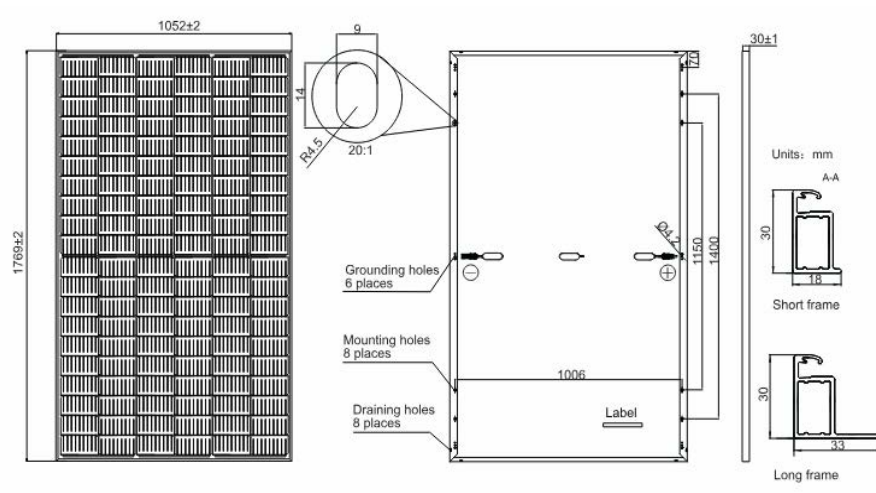


Εικόνα 71 Βάση στήριξης ECOSOL II [136].

5.8.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Για την εξεταζόμενη εγκατάσταση θα χρησιμοποιηθούν πάνελ από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο της εταιρείας JA SOLAR και συγκεκριμένα το μοντέλο JAM60-S20-370-MR, το οποίο φαίνεται στην **Εικόνα 72**. Αυτό το πλαίσιο είναι μονοκρυσταλλικού τύπου. Διαθέτει τεχνολογία μισής κυψέλης γεγονός που προσφέρει υψηλότερη ισχύ εξόδου, καλύτερη απόδοση ανάλογα με τη θερμοκρασία, μειωμένη επίδραση της σκίασης στην παραγωγή ενέργειας, χαμηλότερο κίνδυνο εμφάνισης θερμού σημείου, καθώς και αυξημένη ανοχής στη μηχανική φόρτιση. Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω πλαισίων εμφανίζονται στον

Πίνακα 1, τα οποία θα τοποθετηθούν στην βέλτιστη κλίση ενός πάνελ για τη μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή στις 30 μοίρες.



Εικόνα 72 Προφίλ και διαστάσεις JAM60-S20-370-MR [103].

Κατηγορία	Χαρακτηριστικά
Ικανότητα Ισορροπίας	Wp
Τάση Μέγιστης Ικανότητας (Vmp)	34.23 V
Ρεύμα Μέγιστης Ικανότητας (Impp)	10.81 A
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος (Voc)	41.3 V
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος (Isc)	11.35 A
Αποδοτικότητα	9.9%
Διαστάσεις	1769 × 1052 × 30 mm
Βάρος	20.2 kg
Θερμοκρασία Λειτουργίας	-40 °C έως +85 °C
Εγγύηση Προϊόντος	12 χρόνια
Εγγύηση Απόδοσης	25 χρόνια (84,8% απόδοση)
Συμβατότητα Συστήματος	Μέγιστη Τάση Συστήματος: 1500 V
Σύνδεση	MC4, IP68

Πίνακας 1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά από το μοντέλο JAM60-S20-370-MR [103].

5.8.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΤΑΣΗΣ

Με βάση τα προαναφερθέντα, αποφασίστηκε να γίνει εγκατάσταση του μετατροπέα SMA και συγκεκριμένα το μοντέλο **Sunny Tripower 8.0**, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 73**, του οποίου οι τεχνικές προδιαγραφές και όλες οι πληροφορίες εμφανίζονται στον **Πίνακα 2**. Ο αντιστροφές τάσης Sunny Tripower 8.0 καθιστά τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε ιδιωτικά νοικοκυριά και μικρές εμπορικές εφαρμογές ιδιαίτερα ισχυρά. Συνδυάζει κορυφαίες επιδόσεις αντιστροφέα με μέγιστη ευκολία και άνεση για τους χρήστες του. Με ολοκληρωμένες υπηρεσίες και λύσεις σκίασης, μπορεί να ανταποκριθεί σε κάθε πρόκληση που συναντάται στις στέγες. Ο αντιστροφέας τάσης που επιλέξαμε εξασφαλίζει αξιόπιστα τη μέγιστη δυνατή απόδοση ηλιακής ενέργειας και μειώνει το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [115].

Κατηγορία	Χαρακτηριστικά
Είσοδος (DC)	Μέγιστη Ικανότητα: 15000 Wp
	Μέγιστη Τάση: 1000 V
	Εύρος MPP: 260 V έως 800 V
	Ονομαστική Τάση: 580 V
	Ρεύμα: 20 A / 12 A
Έξοδος (AC)	Ονομαστική Ικανότητα: 8000 W
	Μέγιστη Ικανότητα: 8000 VA
	Ονομαστική Τάση: 220 V / 380 V
	Μέγιστο Ρεύμα: 12.1 A
Αποδοτικότητα	Μέγιστη: 98.3%
Προστασία	Αποσύνδεση Εισόδου, Παρακολούθηση Γείωσης
Γενικά Στοιχεία	Διαστάσεις: 460 x 497 x 176 mm
	Βάρος: 20.5 kg
	Θερμοκρασία: -25 °C έως +60 °C
Χαρακτηριστικά	Σύνδεση AC: SUNCLIX
	Διεπαφές: WLAN, Ethernet

Πίνακας 2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Sunny Tripower 8.0 [115].



Εικόνα 73 Έξυπνος μετατροπέας Sunny Tripower 8.0 [115].

5.8.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Στο σύστημα αυτό, για να προστατευθεί από τυχόν κεραυνοπτώσης, θα εγκατασταθούν τα συστήματα προστασίας Rayvoss, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 74**.



Εικόνα 74 Σύστημα Προστασία Rayvoss A [124].

Τα συγκροτήματα εξαρτημάτων Strikesorb που απαρτίζουν το σύστημα προστασίας Rayvoss είναι ιδανικά για μεγάλα ηλεκτρικά τροφοδοτικά, επειδή προστατεύουν τον εξοπλισμό που τροφοδοτούν. Ο

σχεδιασμός των στοιχείων Strikesorb επιτρέπει την εγκατάστασή τους εντός ενός μεταλλικού πίνακα IP 65 μαζί με εξειδικευμένες ασφάλειες τύπου VSP, οι οποίες δεν ενεργοποιούνται από κρούση ή ρεύμα κεραυνού. Στο σύστημα μπορεί να προστεθεί πίνακας παρακολούθησης και ελέγχου με ενσωματωμένο κρουστικό απαριθμητή.

5.9 ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Με βάση τη μελέτη και τα υλικά που επιλέχθηκαν για το υπό μελέτη έργο, ο ενδεικτικός **Πίνακας 3** κόστους έχει ως εξής:

	Μονάδες	Τιμή/μονάδα (€)	Σύνολο (€)
Φωτοβολταϊκά πάνελ (12x460W)	12	92,5	1.110
Αντιστροφέας Sunny Tripower 8.0	1	2.447,90	2.447,90
Βάσεις στήριξης ECOSOL II	12	—	561,05
Καλωδίωση DC	—	—	450
Καλωδίωση AC	—	—	490
Πίνακας Διανομής ABB	—	80,27	80,27
Σύστημα Τηλεπίβλεψης (Sunny WebBox)	1	320	320
Αντικεραυνική προστασία Rayvoss A	1	1205	1205
Μελέτη	--	--	500
Εγκατάσταση	--	--	1.500
Σύνολο			8.644,22 €

Πίνακας 3 Ανάλυση Κόστους Εξοπλισμού Φ/Β Εγκατάσταση

Το υπό μελέτη φωτοβολταϊκό σύστημα αφορά μία εγκατάσταση σε οικιακό κτήριο στον Βόλο, αποτελούμενη από 24 φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου JAM60-S20-370-MR της JA Solar, με ονομαστική ισχύ 370 Wp, που τοποθετούνται σε σταθερή διάταξη με νότιο προσανατολισμό (0°) και κλίση 30°, κατάλληλη για το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Η συνολική ισχύς της γεννήτριας φτάνει τα 8,88 kWp υπό συνθήκες STC, ενώ η πραγματική ισχύς εξόδου στα 50 °C (Pmpp) ανέρχεται σε 8,10 kWp, υποδεικνύοντας την επίδραση των θερμικών απωλειών. Η σύνδεση των πάνελ γίνεται σε δύο σειρές των 12 μονάδων και οδηγεί σε έναν αντιστροφέα Sunny Tripower 8.0-3SE-40, ισχύος 8,0 kWac με δύο MPPT εισόδους. Ο λόγος ονομαστικών DC/AC ισχύος είναι 1,11, επιλογή που βελτιστοποιεί τη λειτουργία του inverter σε πραγματικές συνθήκες ηλιοφάνειας. Οι συνολικές ηλεκτρικές απώλειες της εγκατάστασης παραμένουν χαμηλές, με απώλειες λόγω καλωδίωσης της τάξης του 1,5% και mismatch απώλειες 2,0%, ενώ η απώλεια από τη γωνία πρόσπτωσης (IAM) είναι περιορισμένη για γωνίες έως 60°, αλλά αυξάνεται σημαντικά για μεγαλύτερες κλίσεις, γεγονός που ενισχύει τη σημασία του σωστού προσανατολισμού. Η θερμική απώλεια έχει ληφθεί υπόψη μέσω συντελεστή $U_c = 20,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ και η μηδενική επίδραση ανέμου ($U_n = 0$) υποδηλώνει συντηρητική παραδοχή. Συνολικά, το σύστημα χαρακτηρίζεται από άρτιο σχεδιασμό, βέλτιστη τοποθέτηση, και χαμηλό προφίλ απωλειών, διασφαλίζοντας υψηλή ενεργειακή απόδοση σε ένα δίκτυο χωρίς σκιάσεις και με απεριόριστο φορτίο κατανάλωσης.

Σχεδιασμός Συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα περιλαμβάνει:

- **12 φωτοβολταϊκά πάνελ** (2 σειρές × 6)
- **2 αντιστροφέις MPPT**

Η διάταξη αυτή επιλέχθηκε ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ μέγιστης απόδοσης και αξιοπιστίας, ενώ τα MPPT εξασφαλίζουν βέλτιστο σημείο λειτουργίας ανά σειρά. Στην **Εικόνα 76**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος σε μια κατοικία.

Στο επάνω μέρος της εικόνας αναγράφονται τα κύρια αποτελέσματα του συστήματος. Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα ανέρχεται στις 13.314 kWh. Η ειδική παραγωγή, δηλαδή η παραγωγή ανά εγκατεστημένο kWp, φτάνει τις 1499 kWh/kWp ανά έτος. Ο λόγος απόδοσης (Performance Ratio – PR) του συστήματος υπολογίζεται στο 83,55%, τιμή που υποδηλώνει πολύ καλή απόδοση για οικιακή εγκατάσταση.

Στην αριστερή γραφική παράσταση απεικονίζεται η μηνιαία ομαλοποιημένη παραγωγή (ανά εγκατεστημένο kWp), περιλαμβάνοντας τρεις συνιστώσες: τις απώλειες συλλογής (Collection Loss - L_c), τις συστημικές απώλειες (System Loss - L_s) και την καθαρή παραγόμενη ενέργεια (Produced useful energy - Y_f). Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη καθαρή παραγωγή ενέργειας σημειώνεται τους καλοκαιρινούς μήνες, με αποκορύφωμα τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Η μέση καθαρή ημερήσια παραγωγή ανέρχεται σε 4.11 kWh

ανά εγκατεστημένο kWp, ενώ οι απώλειες συλλογής και συστήματος είναι 0.6 και 0.21 kWh/kWp/ημέρα αντίστοιχα.



PVsyst V8.0.6
VC0, Simulation date:
19/01/25 22:13
with V8.0.6

Project: My Home Volos

Variant: New simulation variant

Main results

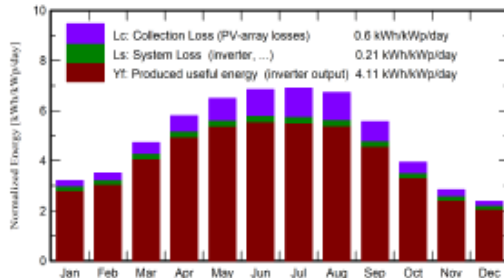
System Production
Produced Energy

13314 kWh/year

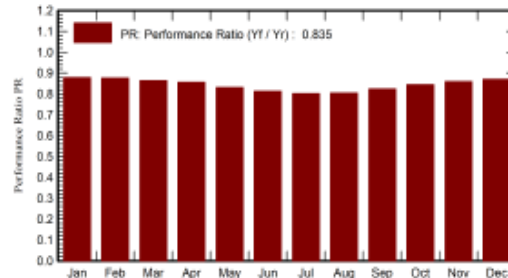
Specific production
Perf. Ratio PR

1499 kWh/kWp/year
83.55 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	61.7	26.12	7.88	99.6	97.9	827	777	0.879
February	73.8	39.87	9.11	98.0	96.2	809	763	0.876
March	121.9	59.97	12.12	146.5	143.6	1182	1124	0.864
April	160.5	75.17	14.79	173.8	170.3	1382	1320	0.855
May	203.8	79.81	20.19	201.1	196.2	1551	1484	0.831
June	216.1	78.18	24.88	205.4	200.2	1549	1481	0.812
July	220.3	76.01	27.83	213.8	208.5	1590	1521	0.801
August	197.9	69.34	27.47	208.3	203.7	1556	1487	0.804
September	142.4	57.18	22.49	166.9	163.6	1281	1220	0.823
October	94.4	47.08	18.01	122.1	119.8	969	916	0.845
November	58.9	33.73	13.51	85.2	83.5	695	650	0.859
December	49.1	30.32	9.12	73.9	72.4	615	571	0.870
Year	1600.7	672.79	17.33	1794.6	1755.8	14006	13314	0.835

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

Εικόνα 76 Αποτελέσματα λειτουργίας

Στη δεξιά γραφική παράσταση αποτυπώνεται ο μηνιαίος λόγος απόδοσης PR. Η τιμή κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 0.88, παραμένοντας σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, κάτι που φανερώνει

αξιόπιστη απόδοση του συστήματος ανεξαρτήτως εποχής. Η υψηλότερη μηνιαία τιμή PR παρατηρείται τον Νοέμβριο με 0.859 και η χαμηλότερη τον Αύγουστο με 0.804.

Το κάτω μέρος της εικόνας περιλαμβάνει έναν αναλυτικό πίνακα με τους μηνιαίους ενεργειακούς και κλιματικούς δείκτες. Παρουσιάζονται οι εξής παράμετροι: η οριζόντια παγκόσμια ακτινοβολία (GlobHor), η διάχυτη οριζόντια ακτινοβολία (DiffHor), η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{Amb}), η ακτινοβολία στο επίπεδο των φωτοβολταϊκών (GlobInc), η αποδοτική ακτινοβολία μετά από διορθώσεις (GlobEff), η παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα (EArray), η ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο (E_Grid) και ο μηνιαίος λόγος απόδοσης (PR).

Η συνολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για το έτος είναι 1600.7 kWh/m^2 , ενώ η συνολική ακτινοβολία στο επίπεδο κλίσης των πάνελ φτάνει τις 1794.6 kWh/m^2 . Η αποδοτική ακτινοβολία μετά τις διορθώσεις είναι 1755.8 kWh/m^2 . Η παραγόμενη ενέργεια στην έξοδο του συστήματος είναι 14.006 kWh και από αυτήν, οι 13.314 kWh διοχετεύονται στο δίκτυο, κάτι που δείχνει περιορισμένες εσωτερικές απώλειες. Η μέση ετήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την προσομοίωση είναι 17.33°C .

Στο κάτω μέρος της εικόνας παρατίθεται και ο πίνακας με τις επεξηγήσεις των μεταβλητών του πίνακα αποτελεσμάτων.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων καταδεικνύει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα παρουσιάζει υψηλή ενεργειακή απόδοση και αξιοποιεί ικανοποιητικά τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με περιορισμένες απώλειες από το σύστημα και το μετατροπέα.

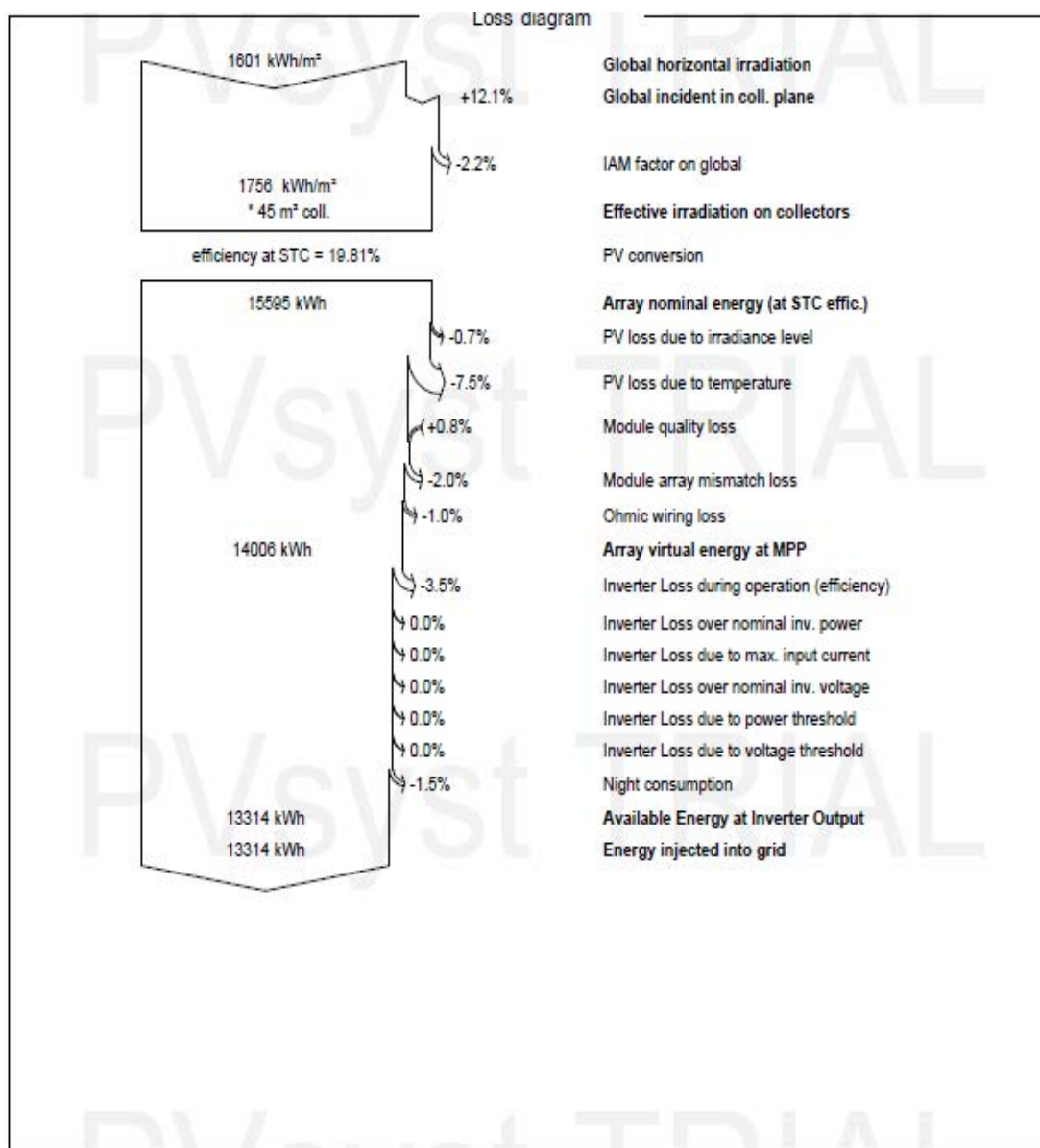
Στην **Εικόνα 77**, παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών του φωτοβολταϊκού συστήματος. Σκοπός του διαγράμματος είναι να καταδείξει τη σταδιακή μείωση της ηλιακής ενέργειας από τη στιγμή που προσπίπτει στην επιφάνεια του συστήματος μέχρι το τελικό στάδιο, όπου η ενέργεια εισάγεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το διάγραμμα αποτυπώνει τις ενεργειακές ροές και τις απώλειες σε κάθε στάδιο λειτουργίας, συνοδευόμενο από ποσοστά απωλειών και σύντομες περιγραφές των αιτιών.

Η διαδικασία ξεκινά με την **παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία**, η οποία είναι 1601 kWh/m^2 . Στη συνέχεια, μέσω γεωμετρικών και προσανατολιστικών διορθώσεων, υπολογίζεται η **παγκόσμια ακτινοβολία στο επίπεδο συλλογής**, που είναι 1758 kWh/m^2 , καταγράφοντας μια θετική προσαύξηση της τάξης του $+12.1\%$. Η ελαφρώς μειωμένη τιμή κατά -2.2% οφείλεται στον **παράγοντα IAM** (Incidence Angle Modifier), ο οποίος λαμβάνει υπόψη την απόδοση του συστήματος υπό λοξές γωνίες πρόσπτωσης.

Από το σημείο αυτό ξεκινά η διαδικασία μετατροπής της ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια που παράγεται στην ονομαστική απόδοση των φωτοβολταϊκών μονάδων (με βάση την απόδοση STC - Standard Test Conditions) είναι 15.595 kWh . Εδώ καταγράφονται απώλειες λόγω:

- **Χαμηλών επιπέδων ακτινοβολίας** (-0.7%)
- **Αύξησης θερμοκρασίας των πάνελ** (-7.5%)

- **Ποιότητας μονάδων** (+0.8%, θετικό πρόσημο που ενδέχεται να σχετίζεται με υπεραπόδοση σε σύγκριση με την ονομαστική απόδοση)
- **Ασυμφωνίας μεταξύ μονάδων** (-2.0%)
- **Απωλειών από καλωδίωση** (-1.0%)



Εικόνα 77 Διάγραμμα Απωλειών

Μετά την αφαίρεση αυτών των απωλειών, το σύστημα αποδίδει εικονική ενέργεια στην τιμή MPP (Maximum Power Point) ύψους 14.008 kWh.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι απώλειες που σχετίζονται με τη λειτουργία του μετατροπέα (inverter). Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε:

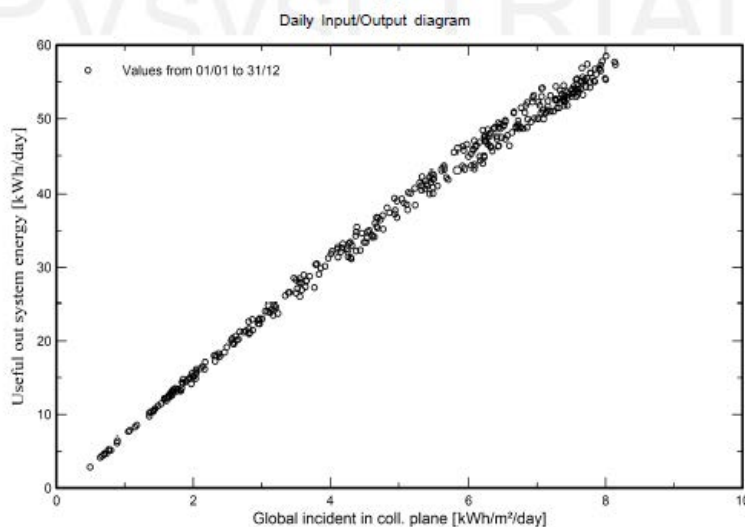
- Απώλεια λόγω απόδοσης του μετατροπέα (-3.5%)

- Άλλες πιθανές απώλειες (λόγω υπέρβασης ονομαστικής ισχύος, ρεύματος ή τάσης, κατώτατων ορίων, ή κατανάλωσης τη νύχτα) είναι μηδενικές ή αμελητέες, με μόνη αξιοσημείωτη την απώλεια λόγω νυχτερινής κατανάλωσης (-1.5%).

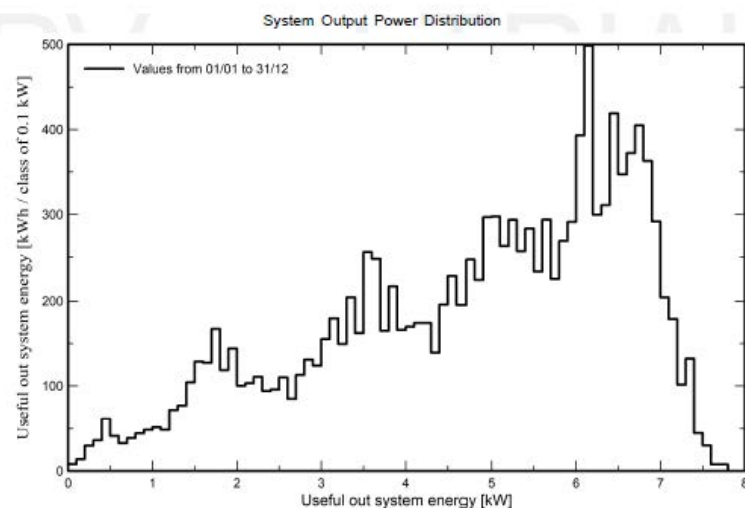
Τελικό αποτέλεσμα είναι διαθέσιμη ενέργεια στην έξοδο του μετατροπέα 13.314 kWh, η οποία διοχετεύεται εξ ολοκλήρου στο δίκτυο, χωρίς περαιτέρω εσωτερική κατανάλωση ή αποθήκευση, καθώς η τιμή παραμένει σταθερή.

Συνολικά, το διάγραμμα καταγράφει με σαφήνεια την ποσοστιαία συνεισφορά κάθε σταδίου απώλειας και επιβεβαιώνει την υψηλή συνολική απόδοση του συστήματος. Ιδιαίτερη σημασία έχει η θερμοκρασιακή απώλεια (-7.5%) και η απώλεια από τον μετατροπέα (-3.5%), οι οποίες μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό για περαιτέρω βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.

Στην **Εικόνα 78**, παρουσιάζεται το διάγραμμα ημερήσιας εισόδου/εξόδου και στην **Εικόνα 79** την κατανομή της ωφέλιμης ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος που μελετήσαμε.



Εικόνα 78 Χρήσιμη ενέργεια του συστήματος (ημερήσιες εισροές/εκροές)



Εικόνα 79 Χρήσιμη ενέργεια του συστήματος (Σύστημα διανομή ισχύος εξόδου)

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Y. A. Jieb, E. Hossain, "Photovoltaic Systems: Fundamentals and Applications",1-294,2021.
2. H. J. Mosleh, P. Behnam, M. A. Kamazani, O. Mohammadi, S. Kavian, P. Ahmadi, M. A. Rosen , "A comprehensive comparative investigation on solar heating and cooling technologies from a thermos-economic viewpoint- A dynamic simulation", Energy Science & Engineering,9 724-742,2020.
3. M. Romero, J. González-Aguilar, "Solar thermal CSP technology", WIREs Energy and Enviroment,3,42-59, 2014.
4. V. Devabhaktuni, M. Alam, S. S. S. R. Depuru, R. C. Green Ila, D. Nims, C. Near, "Solar energy: Trends and enabling technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19,555-564, 2013.
5. R. A. M. Lameirinhas, J. P. N. Torres, J. P. de Melo Cunha, "A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications", Journals, 15, 1823, 2022.
6. Maysun Solar, "Πλεονεκτήματα, μεικρονεκτήματα και ταξινόμηση της φωτοβολταϊκής ηλεκτροπαραγωγής, το γνωρίζετε".
7. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Photovoltaics Report (2020).
8. IRENA, "Renewable Power Generation Costs in 2022", 88-113,2022.
9. M. Mani, R. Pillai, "Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance: Research Status, Challenges and Recommendations", Renewable and Sustainable Energy Reviews ,14,3124–3131,2010.
10. B. Aboagye, S. Gyamfi, E. A. Ofosu, S. Djordjevic, "Investigation into the impacts of design, installation, operation and maintenance issues on performance and degradation of installed solar photovoltaic (PV) systems", Energy for Sustainable Development,66,165-176,2022.
11. M. K. G. Deshmukh, M. Sameeroddin, D. Abdul, M. A. Sattar, "Renewable energy in the 21st century: A review" , materialstoday: Proceedings,80,1145-1152,2023.
12. T.-Z. Ang, M. Salem, M. Kamarol, H. S. Das, M. A. Nazari, N. Prabakaran, "A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions" ,Energy Strategy Reviews,43,100939,2022.
13. W. C. Tan, L. H. Saw, H. S. Thiam, J. Xuan, Z. Cai, M. C. Yew, "Overview of porous media/metal foam application in fuel cells and solar power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96,181-197,2018.
14. R.A. Felseghi, E. Carcadea, M.S. Raboaca, C.N. Trufin, C. Filote, "Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications" , Journals, 12,1-28, 2019.
15. S.L. Douvartzides, F.A. Coutelieris, P. Tsiakaras, "On the Systematic Optimization of Ethanol Fed SOFC-Based Electricity Generating Systems in Terms of Energy and Exergy", Journal of Power Sources, 114, 203–212,2003.

16. C. Molochas, P. Tsiakaras, "Carbon Monoxide Tolerant Pt-Based Electrocatalysts for H₂-PEMFC Applications: Current Progress and Challenges", *Catalysts*, 11, 1127,2021.
17. A. Demin, E. Gorbova, A. Brouzgou, A. Volkov, P. Tsiakaras, "Sensors based on solid oxide electrolytes", *Solid Oxide-Based Electrochemical Devices*, 167-215,2020.
18. T. Ye, L. Li, Y. Zhang, "Recent Progress in Solid Electrolytes for Energy Storage Devices", *Advanced Functional Materials*, 30,2000077, 2020.
19. O. Gerard, A. Numan, S. Krishnan, M. Khalid, R. Subramaniam, R. Kasi, "A review of the recent advances in binder-free electrodes for electrochemical energy storage application", *Journal of Energy Storage*,50, 104283,2022.
20. M.S. Halper ,J.C. Ellenbogen, "Supercapacitors: A brief overview", 2006, 1-34
21. H. Choi , H. Yoon, "Nanostructured electrode materials for electrochemical capacitor applications" ,*Journals*, 5, 906-936,2015.
22. M. Vangari, T. Pryor , L. Jiang, "Supercapacitors: review of materials and fabrication methods", *Journal of Energy Engineering*,139, 72-79,2013.
23. J. Gao, Si-Qi Shi, H. Li, "Brief overview of electrochemical potential in lithium-ion batteries", *Chinese Physics B*,25, 1-25,2015.
24. S.M. Chen, R. Ramachandran, V. Mani, R.Saraswathi, "Recent advancements in electrode materials for the high-performance electrochemical supercapacitors: a review" , *International Journal of Electrochemical Science*,9, 4072-4085,2014.
25. P. Sharma, V.Kumar, "Current technology of supercapacitors: A review" , *Journal of Electronic Materials*, 49 1-13,2020.
26. G. Pistoia, "Lithium-Ion Batteries Advances and Applications",1-19,2013.
27. D. Zuo, G. Tian, X. Li, D. Chen, K. Shu, "Recent progress in surface coating of cathode materials for lithium ion secondary batteries", *Journal of Alloys and Compounds*, 706,24-40,2017.
28. A. D. Ballantyne, J. P. Hallet, D. J. Riley, N. Shah, D. J. Payne, "Lead acid battery recycling for the twenty-first century", 1-12,2018.
29. G. J. May, A. Davidson, B. Monahov, "Lead batteries for utility energy storage: A review", *Journal of Energy Storage*,15,145-157,2018.
30. D.A.J Rand, L.S. Holden, G.J. May, R.H. Newnham, K. Peters, "Valve-regulated lead/acid batteries", *Journal of Power Sources*,59,191-197,1996.
31. K. Yanamandra, D. Pinisetty, N. Gupta, "Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes: A review", *Renewable and Sustainable Energy*, 173,113078,2023.
32. C. J. Rydh, M. Karlström, "Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries", *Resources, Conservation and Recycling*, 34,289-309,2002.

33. M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency", *Renewable and Sustainable Energy*, 35, 499-514, 2014.
34. Y.-Y. Hung, L.-T. Yin, J.-W. Wang, C.-T. Wang, C.-H. Tsai, Y.-M. Kuo, "Recycling of spent nickel-cadmium battery using a thermal separation process", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37, 645-654, 2017.
35. SolarReviews, <https://www.solarreviews.com/blog/best-uses-for-nickel-cadmium-batteries>
36. M.A. Alemu, M.Z. Getie, A.K. Worku, "Advancement of electrically rechargeable multivalent metal-air batteries for future mobility," *Ionics*, 29, 3421–3431, 2023.
37. J. Kosek, Researrch Group, <http://www.kosekgroup.cz/equipment/zinc-air-battery/>.
38. G. Nazir, A. Rehman, J.-H. Lee, C.-H. Kim, J. Gautam, K. Heo, S. Hussain, M. Ikram, A. A. AlObaid, S.-Y. Lee, S.-J. Park, "A Review of Rechargeable Zinc–Air Batteries: Recent Progress and Future Perspectives", 1-44, 2024.
39. A. Braun, "Electrochemical Energy Systems: Foundations, Energy Storage and Conversion", 191-199, 2019.
40. UFineBlog, <https://www.ufinebattery.com/blog/the-ultimate-guide-to-lithium-air-battery/>.
41. G. Balkourani, A. Brouzgou, M. Archonti, N. Papandrianos, S. Song, P. Tsiakaras, "Emerging materials for the electrochemical detection of COVID-19", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 893, 115289, 2021.
42. A. Ajanovic, M. Sayer, R. Haas, "On the future relevance of green hydrogen in Europe", *Applied Energy*, 358, 122586, 2024.
43. X. Xu, Q. Zhou, D. Yu, "The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology", *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 33677-33698, 2022.
44. S. Padmapriya, M. Anand, K. Ranges, "Review on Electrochemical Biosensors in Seafood Quality Control", 24-31, 2022.
45. T. Li, M. Huang, X. Bai, Y.-X. Wang, "Metal-air batteries: A review on current status and future applications", *Progress in Natural Science: Materials International*, 33, 151-171, 2023.
46. A. Kalyakin, A. Demin, E. Gorbova, A. Volkov, P. Tsiakaras, "Combined amperometric-potentiometric oxygen sensor", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 313, 127999, 2020.
47. C. S. Kushwaha, S.K. Shukla, "Non-enzymatic potentiometric malathion sensing over chitosan-grafted polyaniline hybrid electrode", *Journal of Materials Science*, 54, 10846-10855, 2019.
48. M. M. Rashid, M. K. Al Mesfer, H. Naseem, M. Danish, "Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis", *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4, 1-14, 2015.

49. T. Wang, X. Cao, L. Jiao, "PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects", *Carbon Neutrality*,1, 1-19,2022.
50. S. Bin, Z. Chen, Y. Zhu, Y. Zhang, Y. Xia, S. Gong, F. Zhang, L. Shi, X. Duan, Z. Sun, "High-pressure proton exchange membrane water electrolysis: Current status and challenges in hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 390-405,2024.
51. W. Doenitz, R. Schmidberger, E. Steinheil, R. Streicher, "Hydrogen production by high temperature electrolysis of water vapour", *International Journal of Hydrogen Energy*, 5, 55-63,1980.
52. Wikipedia, "High-Temperature electrolysis", [https://en.wikipedia.org/wiki/High Temperature electrolysis](https://en.wikipedia.org/wiki/High_Temperature_electrolysis).
53. J. Peng, W. Dong, Z. Wang, Y. Meng, W. Liu, P. Song, Z. Liu, "Recent advances in 2D transition metal compounds for electrocatalytic full water splitting in neutral media", *Materialstoday Advances*,8, 100081,2020.
54. N.L. Reddy, V.N. Rao, M.M. Kumari, R.R. Kakarla, P. Ravi, Sathish, S.M.M. Venkatakrishnan, "Nanostructured semiconducting materials for efficient hydrogen generation", *Environmental Chemistry Letters*, 16, 765–796, 2018.
55. P. Xu, L. Qiu, L. Wei, Y. Liu, D. Yuan, Y. Wang, P. Tsiakaras, "Efficient overall water splitting over Mn doped Ni₂P microflowers grown on nickel foam", *Catalysis Today*,355, 815-821,2020.
56. J. Joy, J. Mathew, S. C. George, "Nanomaterials for photoelectrochemical water splitting-review", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 4804-4817,2018.
57. F. Obeidat, 'A comprehensive review of future photovoltaic systems', *Solar Energy*, 163, 545-551,2018.
58. V. R. Akshay, "What Are The Basic Components Of The Photovoltaic System?", *Arka360*, 2022. <https://arka360.com/ros/basic-components-of-photovoltaic-system/>.
59. R. Rajesh, M. C. Mabel, "A comprehensive review of photovoltaic systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,51, 231-248,2015.
60. G. Makrides, B. Zinsser, M. Norton, G. E. Georghiou, M. Schubert, J. H. Werner, "Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,14, 754-762,2010.
61. C. Lupangu, R.C. Bansal, "A review of technical issues on the development of solar photovoltaic systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,73, 950-965,2017.
62. A. A.Q. Hasan, A.W. M. Zuhdi, A. M. Al-Ghaili, A. Q. Al-Shetwi, M. A. Islam, K. P. Sankar, S. S. Gunasekaran, "A review on silicon photovoltaic module degradations and recent identification techniques", *Solar Energy*, 288, 113288,2025.
63. K. Mertens, "Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice", 1st Edition, John Wiley & Sons Ltd, 46-107, 2014.

64. Μπεμπεδέλης, "Μελέτη εγκατάστασης Φ/Β συστήματος ισχύος 10KW σε μόνιμη κατοικία, με διασύνδεση στο δίκτυο της ΔΕΗ", 2017.
<http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3843/%ce%a0%cf%84%cf%85%cf%87%ce%b9%ce%b1%ce%ba%ce%b7%20%ce%9c%cf%80%ce%b5%ce%bc%cf%80%ce%b5%ce%b4%ce%ad%ce%b%ce%b7%cf%82%20%ce%93%cf%81%ce%b7%ce%b3%cf%8c%cf%81%ce%b7%cf%82.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
65. B. G. Streetman, "Semiconductors and Transistors", Reference Data for Engineers, 9, 2002, 1-27, 2002.
66. W.Si, N. Wang, Y. Zong, G. Dai, F. Meng, Z. Yang, L. Zhao, Z. Xin, G. Jiang, "A revisit from CVD kinetics to CVD reactor: Investigating uniform growth mechanism of polysilicon in a reduction furnace", Chemical Engineering Science, 295, 1-15, 2024.
67. G. Müller, J. Friedrich, "Crystal Growth, Bulk: Methods", Encyclopedia of Condensed Matter Physics, 262-274, 2005.
68. Eshops.gr, "Φωτοβολταϊκά πάνελ",
<https://www.battery.com.gr/%CE%B1%CE%B3%CE%BF%CF%81%CE%B1-%CE%BA%CE%BF%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%82/photovoltaic-panels-2/>
69. M. Kumar, A. Kumar, "Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review", Renewable and Sustainable Energy, 78, 554-587, 2017.
70. M. Samykano "Hybrid Photovoltaic Thermal Systems: Present and Future Feasibilities for Industrial and Building Applications," Buildings, 13, 5–11, 14–15, 17–20, 2023.
71. A. Abdulalah, M. Suhaimi N. Tamaldin, M.A.M. Rosli, F. Sachit, "Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review", Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 59, 107-141, 2019.
72. M. Herrando, K. Wang, G. Huang, T. Otanicar, O.B. Mousa, R.A. Agathokleous, Y. Ding, S. Kalogirou, N. Ekins-Daukes, R.A. Taylor, C.N. Markides, "A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems," Progress in Energy and Combustion Science, 97, 7–16, 19–23, 37–41, 2023.
73. P. Jha, B. Das, R. Gupta, J.D. Mondol, M.A. Ehyaei, "Review of recent research on photovoltaic thermal solar collectors", Solar Energy, 257, 164-195, 2023.
74. DNP Products and Services, https://www.global.dnp.biz/column/detail/10162360_4117.html
75. E. Osterman, V.V. Tyagi, V. Butala, N.A. Rahim, U. Stritih, "Review of PCM based cooling technologies for buildings", 37-49, 2012. <https://pdf.sciencedirectassets.com/271089/1-s2.0-S0378778812X00057/1-s2.0-S0378778812001703/dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.022>
76. S. Senthilraja, R. Gangadevi, H. Köten, R. Marimuthu, M. Awad, "Performance analysis of a novel hydrogen production system incorporated with hybrid solar collector and phase change material", International Journal of Hydrogen Energy, 47, 26223-26237, 2021.

77. Y. Tai, X. Zhang, J. Li, Y. Zheng, G. Liu, J. Zhang, G. Zeng, K. Yakubov, C. Alla, "Research on ultra-thin cadmium telluride heterojunction thin film solar cells", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207,114996,2025.
78. Μ. Δαμιανίδης , Δρ. Γ. Κατσαρός , Τ. Ματθαίος, Φ. Στεργιόπουλος, «Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων», 1-176,2011, https://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf
79. A. Kakade, K. B. Chavan, S. Chaure, N. B. Chaure, "The role of window layers on the simulated performance of CIGS solar cell characteristics using SCAPS-1D", *Next Research*,2, 100334,2025.
80. J. Yuventi, "A Method for Evaluating the Influence of Wiring on the Performance of Components in a Photovoltaic System Design", *Solar Energy* ,86, 2996–3003,2012.
81. "Solar Cell I-V Characteristic Curves," *Alternative Energy Tutorials*. Available at: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>. Accessed October 22, 2024.
82. Slocable, "Είναι καλύτερο να συνδέσετε ηλιακούς συλλέκτες σε σειρά ή παράλληλα;", 2024, <https://www.slocable.com.cn/el/news/is-it-better-to-connect-solar-panels-in-series-or-parallel/>.
83. A. Ramos, M.A. Chatzopoulou, I. Guarracino, J. Freeman, C.N. Markides, "Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment", *Energy Conversion and Management*, 150, 838-850,2017.
84. D.Tripathi, R.K. Sharma, "Energy Systems and Nanotechnology," *Advances in Sustainability Science and Technology*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 150-151,2021.
85. Z. Xingxing, Z. Xudong, S. Stefan, X. Jihuan, X. Yu, "Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,16, 599-617,20212.
86. Safe Drinking Water Foundation, <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/5/desalination>
87. D.S. Vijayan, E. Koda, A. Sivasuriyan, J. Winkler, P. Devaragan, R.S. Kumar, A. Jakimiuk, P. Osinski, A. Podlasek, M.D. Vaverková, "Advancements in solar panel technology in civil engineering for revolutionizing renewable energy solutions—a review", *Journals*, 16, 6579,2023.
88. IGSHPA, <https://igshpa.org/igshpa-blog/what-is-the-best-type-of-ground-heat-exchanger/>
89. R. Agarwal, Y. Vyas, P. Chundawat, D. Ameta, C. Ameta. "Outdoor Performance and Stability Assessment of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs)", *Solar Radiation*, 1, 1-264,2022.
90. J. Gang, K. Sumathy, Q. Qiao, Z. Zhou, "Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,68, 234-246,2017.

91. G. Shilpa, P. M. Kumar, D. K. Kumar, P.R. Deepthi, V. Sadhu, A. Sukhdev, R. R. Kakarla, "Recent advances in the development of high efficiency quantum dot sensitized solar cells (QDSSCs): A review" , Materials Science for Energy Technologies,6, 533-546,2023.
92. Y. Zhang, Y. Wang, X. Li, "Dye-sensitized solar cells (DSSC): Principles, materials and working mechanisms" Renewable and Sustainable Energy Reviews, 180, 113456,2019.
93. L.M. Shaker, A. A. Abdulamie, A. A. Al-Amiery, "Graphene-enabled advancements in solar cell technology", Journal of Alloys and Compounds, 1020, 179583,2025.
94. J. Zhong , W. Zhang, L. Xie, O. Zhao, X. Wu, X. Zeng, J. Guo, "Development and challenges of bifacial photovoltaic technology and application in buildings: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 187, 113706.2023.
95. C. Şirin, J. Goggins, M. Hajdukiewicz, "A review on building-integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings", Applied Thermal Engineering,229, 120607,2023.
96. PLATIO, "Types of BIPV systems: From solar glass to solar pavement", 2023,
<https://platiosolar.com/blog-types-of-bipv-systems-from-solar-panels-to-solar-pavement/>.
97. C. Lamnatou, D. Chemisana, C. Cristofari, "Smart grids and smart technologies in relation to photovoltaics, storage systems, buildings and the environment", Renewable Energy,185, 1376-1391,2022.
98. M. K.H. Rabaia, N. Shehata, V. Olabi, M. A. Abdelkareem, C. Semeraro, K.-J. Chae, E. T. Sayed, "Enabling the circular economy of solar PV through the 10Rs of sustainability: Critical review conceptualization, barriers, and role in achieving SDGs", Sustainable Horizons,11, 100106,2024.
99. A. Vulkan, I. Kloog, M. Dorman, E. Erell, "Modeling the Potential for PV Installation in Residential Buildings in Dense Urban Areas", Energy and Buildings, 169 , 97–109,2018.
100. S. Freitas, C. Catita, P. Redweik, M.C. Brito, "Modelling Solar Potential in the Urban Environment: State-of-the-Art Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 915–31,2015.
101. N. Kuttybay, S. Mekhilef, N. Koshkarbay, A. Saymbetov, M. Nurgaliyev, G. Dosymbetova, S. Orynbassar, E. Yershov, A. Kapparova, B. Zholamanov, A. Bolatbek, "Assessment of Solar Tracking Systems: A Comprehensive Review", Sustainable Energy Technologies and Assessments,68,103879,2024.
102. A.R. Amelia, Y.M. Irwan, I. Safwati, W.Z. Leow, M.H. Mat, Mohd Shukor Abdul Rahim, "Technologies of solar tracking systems: A review", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 767,767,2020.
103. THERMALEARTH, "JAM60S20 370-395/MR",
<https://www.thermalearth.co.uk/content/1/pages/Brochures/JAM60S20%20MR.pdf>.
104. J. Worden, M. Zuercher-Martinson, "How Inverters Work", <https://terryrmiller.com/solar/How-Solar-Inverters-Work.pdf>.

105. Novergysolar, "Solar String inverters are better for utility-scale solar plants and industrial solar projects" , <https://www.novergysolar.com/solar-string-inverters-better-utility-scale-solar-plants-industrial-solar-projects/>
106. L. Hassaine, E. Olias, J. Quintero, V. Salas, "Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews,30,796-807,2014.
107. SMA, "SMA Introduces Sunny Central 2500-EV-US for 1,500 VDC Utility-Scale Applications", 2016, <https://www.sma-america.com/newsroom/news-details/sma-introduces-sunny-central-2500-ev-us-for-1500-vdc-utility-scale-applications>
108. M. Meinhardt, G. Cramer, B. Burger, P. Zacharias, "Multi-String-Converter with Reduced Specific Costs and Enhanced Functionality", Solar Energy ,69, 217–227,2001. -
109. Sunplus, "What is a string solar inverter and how does it work?", 2024, <https://www.sunplusenergy.com/news/what-is-a-string-solar-inverter-and-how-does-it-work.html>
110. J. Day, S. Senthilarasu, T. K. Mallick, "Improving spectral modification for applications in solar cells: A review", Renewable Energy, 132, 186-205,2019.
111. A. De Almeida, P. Moura, N. Quaresma, "Energy-Efficient off-Grid Systems—Review", Energy Efficiency,13, 349–376,2020.
112. A. Sharma, G.Singh, "Optimal Site Selection and Efficiency for Solar PV Power Plant", International Journal of Advance Research and Innovation, 6, 289-295,2018.
113. gridX, "Grid Connection Point", 2024, <https://www.gridx.ai/knowledge/what-is-a-grid-connection-point>.
114. H.X. Wang , M.A. Muñoz-García, G.P. Moreda, M.C. Alonso-García, "Optimum Inverter Sizing of Grid-Connected Photovoltaic Systems Based on Energetic and Economic Considerations", Renewable Energy, 118, 709–17,2018.
115. SMA, "SUNNY TRIPOWER 8.0 / 10.0 with SMA SMART CONNECTED", https://krannich-solar.com/fileadmin/user_upload/GR/Products/Inverter/SMA/SUNNY_TRIPOWER_8.0__10.0.pdf.
116. W. S. Ebhota, P. Tabakov, "Influence of Cabling on Photovoltaic System Performance: Wire Length, Diameter, and Material", Pure & Applied Science,10, 50–65,2025.
117. Kiriazis Batteries & more, "ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ H07RN-F", https://www.e-kiriazis.gr/ell/categories/%CE%9A%CE%B1%CE%BB%CF%8E%CE%B4%CE%B9%CE%B1_%CF%84%CF%8D%CF%80%CE%BF%CF%85_H07RN-F?srsltid=AfmBOorS6AVPxRFLPXcq_aC2PIWX6Vinu9LJte3eVQtU9LqZn8CrYgR.

118. Καυκάς, "Καλώδιο 0,6/1kV CU/XLPE/PVC1X95mm²", https://www.kafkas.gr/kalodia/exoterikon-egkatastaseon/nyy-j1vv-u-j1vv-r-j1vv-s/nyy-chalkou/hellenic-cables-s.a.kalodio-0-6-1kv-cu-xlpe-pvc1x95mm-_191796/?srsltid=AfmBOop7tGN9GDxoKBwgINx_3nWLCC0bFuU1kLDZ5J-vhPSS9Mi4w9g8.
119. Μειδάνης, "Καλώδιο Φωτοβολταϊκού Solar H1Z2Z2-K 1x6 Κόκκινο", https://www.meidanis.gr/el/kalodio-fotovoltaikou-solar-h1z2z2-k-1x6-kokkino-642-7040.html?srsltid=AfmBOopAPI5PKId_539JEKLz5InPtRVTj4Be-RpiUcAQM0IJyqM--Hhu
120. Μειδάνης, "Καλώδιο Εύκαμπτο Solar 1x6 (H1Z2Z2-K) Μαύρο", https://www.meidanis.gr/el/kalodio-eukampto-solar-cable-h1z2z2-k-1x6-black-73-gc00012021.html?srsltid=AfmBOoqTBt1B3aBDH7qTN8502aHtrvJAbec0gpgQnOyECa-a_HPzhYBx
121. Kousis, "Καλώδιο Ftp Cat5e 4X2X0,51", https://e-kousis.gr/product/kalodio-ftp-cat5e-4x2x0_51/?srsltid=AfmBOopVVgFfnjRnMROHox6lbH96C30bSomnteTHMPA6fOvvvTp7CyHs.
122. F. P. Mohamed, W. H. Siew, S. Mahmud, "Effect of group grounding on the potential rise across solar PV panels during lightning strike", 1–5,2019.
123. A. Barbón, C. Bayón-Cueli, L. Bayón, V. Carreira-Fontao, "A Methodology for an Optimal Design of Ground-Mounted Photovoltaic Power Plants", Applied Energy, 314, 118881,2022.
124. Raycap, "Rayvoss A", <https://www.raycap.com/products/rayvoss-a/>
125. I. Hetita, A. S. Zalhaf, D.-E. A. Mansour, Y.Han, P. Yang, C. Wang, "Modeling and Protection of Photovoltaic Systems during Lightning Strikes: A Review", Renewable Energy,184, 134–148,2022.
126. N.I. Ahmad, M.Z.A. Ab-Kadir, M. Izadi, N. Azis, M.A.M. Radzi, N.H. Zaini, M.S.M. Nasir, "Lightning Protection on Photovoltaic Systems: A Review on Current and Recommended Practices", Renewable and Sustainable Energy Reviews,82,1611–1619,2018.
127. P. Kumar, N. Malik, A. Garg, "Comparative analysis of solar-battery storage sizing in net metering and zero export systems", Energy for Sustainable Development,69, 41-50,2022.
128. DS New Energy, "Solar Net Metering Τι πρέπει να γνωρίζετε", 2022, <https://gr.dsnsolar.com/info/solar-net-metering-what-you-should-know-69446918.html>.
129. A. Bernard, G. Samuel, O. A. Eric, D. Sinisa, "Investigation into the Impacts of Design, Installation, Operation and Maintenance Issues on Performance and Degradation of Installed Solar Photovoltaic (PV) Systems", Energy for Sustainable Development,66, 165-176,2022.
130. SMA, "Device for Plant Monitoring SUNNY WEBBOX User Manual", <https://files.sma.de/downloads/SWebBox-BA-en-36.pdf>.
131. H. Abdulla, A. Sleptchenko, A. Nayfeh, 'Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions', Renewable and Sustainable Energy, 195,1-23,2024.
132. J. Pastuszak, "Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development", Journals, 15,5542,2022.

133. M.V. Damhare, B. Butey, S.V. Moharil, "Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends", Journal of Physics, 1913, 2021, 012053.
134. G. Liu, "Review of Recent Offshore Floating Photovoltaic Systems", Journals, 12, 1942,2024.
135. M. Almadhhachi, I. Seres, I. Farkas, "Significance of solar trees: Configuration, operation, types and technology commercialization", Energy Reports, 8, 6729-6743,2022.
136. Solarage, "Μονή βάση στήριξης 10 φωτοβολταϊκών πάνελ ECOSOL II", <https://solarage.gr/epipedis-stegis/1713-basi-stirixis-10-fotovoltaiikon-30-k2-system.html>.