



uowm.gr



ece.uowm.gr

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) με Συστήματα  
Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Α.Η.Ε.) και  
διασύνδεσή τους στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας**

**ΧΑΣΑΠΗΣ Δ. ΣΥΜΕΩΝ**

Αριθμός Μητρώου: HN08279

Επιβλέπων Καθηγητής

**ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑ ΕΟΡΔΑΙΑΣ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022**

A handwritten signature in black ink, reading 'Συμεών Χασάπης'.

(υπογραφή)

Χασάπης Δ. Συμεών

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε. • Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

© 2022 – Όλα τα δικαιώματα διατηρούνται



uowm.gr



ece.uowm.gr

**HELLENIC REPUBLIC**  
**UNIVERSITY of WESTERN MACEDONIA**  
**SCHOOL of ENGINEERING**  
**DEPARTMENT of ELECTRICAL**  
**& COMPUTER ENGINEERING**  
**CURRICULUM of TECHNOLOGICAL**  
**ELECTRICAL ENGINEERING**

**THESIS**

**Renewable Energy Sources with Energy Storage  
Systems and their connection to the Grid**

**CHASAPIS D. SYMEON**

Registration Number: HN08279

Supervisor

**DIMITRIADIS DIMITRIOS**

**PTOLEMAIDA of EORDEA**

**OCTOBER 2022**

A handwritten signature in black ink, written in a cursive style. The signature appears to be 'Συμεών Χασάπης' (Symeon Chasapis).

(signature)

Chasapis D. Symeon

Electrical Engineer • University of Western Macedonia

© 2022 – All rights reserved





uowm.gr



ece.uowm.gr

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

## **ΔΗΛΩΣΗ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2, 4, 6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Πτυχιακή Εργασία με τίτλο “*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) με Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Α.Η.Ε.) και διασύνδεσή τους στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας*”, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Δημητριάδη Δημητρίου, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής’ οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

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

Copyright © Χασάπης Δ. Συμεών, Πτολεμαΐδα Εορδαίας, Οκτώβριος 2022

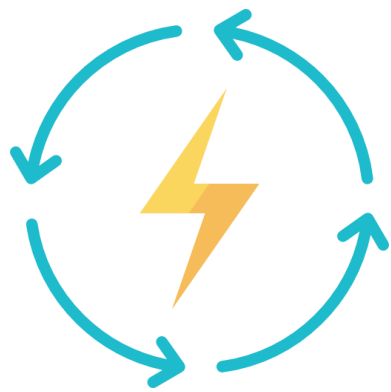
Copyright © Δημητριάδης Δημήτριος, Κοζάνη, Οκτώβριος 2022

Υπογραφή Φοιτητή:



*Στον Δημήτρη*

*Ἄμμες δὲ γ' ἐσόμεθα πολλῶ κάρρονες*  
(μτφ.) *Εμείς θα γίνουμε πολύ καλύτεροί σας*  
– Πλούταρχος  
(καταγραφή από αρχαία Σπάρτη)



# Περίληψη

---

Με αφορμή αφ' ενός των επιπτώσεων της κλιματικής κρίσης από τις δραστηριότητες της ανθρωπότητας τις τελευταίες δεκαετίες και αφ' ετέρου, της σημερινής και μελλοντικής προσπάθειας απεξάρτησης των Συστημάτων Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) με την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, ο άνθρωπος έχει στραφεί στη μελέτη, κατασκευή και χρήση τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια, σε αυτό το πλαίσιο συμβάλλει η διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και η ολοένα μεγαλύτερη συμμετοχή τους στο μίγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έναντι των συμβατικών μονάδων παραγωγής που γνωρίζαμε μέχρι σήμερα, τόσο σε ελληνικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Εξαιτίας αυτής της διεισδυτικότητας και της αύξησης του ποσοστού συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας και χρήσης Συστημάτων Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΑΗΕ). Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η αναλυτική παρουσίαση των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων (Φ/Σ) και των Συσσωρευτών ως τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, εγκατεστημένων σε κεραμοσκεπή κατοικίας, η ανάλυση της παραγωγής και κατανάλωσης από τη χρήση των ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένης της πιθανής σύνδεσης ΣΗΕ και την ταυτόχρονη διασύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους καθίσταται αναγκαία η μελέτη, κατασκευή και χρήση ΣΑΗΕ ως αντιστάθμιση έναντι των τεχνολογικών χαρακτηριστικών και ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ.

Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται μία σύντομη επισκόπηση των ειδών και των τεχνολογικών χαρακτηριστικών των ΑΠΕ.

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας και της σχετικής κίνησης ηλίου και γης, με σκοπό την κατανόηση, το σχεδιασμό και την ανάλυση των συστημάτων που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα υλικά ή οι συσκευές, οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια (τάση και ρεύμα) την ενέργεια των φωτονίων του φωτός που προέρχεται από τον ήλιο.

Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας, ο ρόλος και οι εφαρμογές τους στα ΣΗΕ.

Στο **6<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται και αναλύονται τα ηλεκτροχημικά στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας και ιδιαίτερα οι συσσωρευτές (μπαταρίες), ο τρόπος λειτουργίας, οι εφαρμογές, τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους.

Στο **7<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης των συσσωρευτών, με σκοπό τη βέλτιστη επιλογή συστήματος αποθήκευσης από το χρήστη.

Στο **8<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η εφαρμογή των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής, ενώ στο **9<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται και αναλύεται ένα μοντέλο συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συσσωρευτή με τη χρήση του λογισμικού DIgSILENT PowerFactory.

Στο **10<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται και αναλύεται η εγκατάσταση ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς ΣΑΗΕ στην κεραμοσκεπή μίας κατοικίας στην πόλη της Κοζάνης, ενώ στο **11<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναλύονται όλοι οι πιθανοί λειτουργικοί συνδυασμοί και η αλληλεπίδραση των ΑΠΕ και των ΣΑΗΕ με το ηλεκτρικό δίκτυο, περιλαμβάνοντας επιπλέον μία συνοπτική μελέτη διαστασιολόγησης και πρότασης για χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης μπαταρίας ιόντων-λιθίου για τη Φ/Β εγκατάσταση του 10<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

Στο **12<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν αφ' ενός μεν από τα θέματα που πραγματεύεται η εργασία αυτή, αφ' ετέρου δε από τη χρήση ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος σε μία μέση κατοικία στην πόλη της Κοζάνης.

Τέλος, στο **13<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι τεχνολογικές εξελίξεις του μέλλοντος όσον αφορά το υλικό και τις τεχνολογίες των ΑΠΕ και ΣΑΗΕ.



## Λέξεις Κλειδιά

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ηλεκτροχημικά Στοιχεία Αποθήκευσης Ενέργειας, Συσσωρευτές ή Μπαταρίες, Ηλιακή Ενέργεια, Ηλιακά Πάνελ ή Πλαίσια, Ηλιακές Κυψέλες ή Κελιά, Ηλεκτρικό Δίκτυο, BESS, Ενεργειακός Συμψηφισμός, Διαστασιολόγηση, Αυτοπαραγωγή, Οικιακός Καταναλωτής.

# Abstract

---

Considering, on the one hand, the effects of the climate crisis on the activities of mankind in recent decades, and on the other hand, the current and future efforts to detoxify Electricity Generation Systems by using fossil fuels, man has turned to study, construct and use environmentally friendly technologies. In recent years, the penetration of Renewable Energy Sources and their increasing participation in the electricity generation mix compared to the conventional production units we knew until today, both in Greece and worldwide, contributes to this context. Due to this penetration and the increase of the participation rate of Renewable Energy Sources in the energy mix, the need of creation and use of Storage Systems becomes imperative. The purpose of this thesis is the detailed presentation of Photovoltaic Systems and Electrochemical Elements (Batteries) as Energy Storage Technology, installed on the tiled roof of a house, the analysis of production and consumption from the use of Renewable Energy Sources, including the possible connection of Storage Systems by their simultaneous connection to the grid.

**Chapter 1** analyzes the reasons why it becomes necessary to study, build and use Energy Storage Systems as compensation against the technological characteristics and peculiarities of Renewable Energy Sources.

In **chapter 2** there is a brief overview of the types and technological characteristics of Renewable Energy Sources.

**Chapter 3** analyzes the basic characteristics of solar radiation and the relative motion of the sun and the earth, in order to understand, design and analyze the systems that use solar energy to generate electricity.

**Chapter 4** presents the materials or devices, their properties and characteristics, which have the ability to convert into electrical energy (voltage and current) the energy of the photons of light coming from the sun.

**Chapter 5** presents energy storage technologies, their role and applications in Electrical Systems.

**Chapter 6** presents and analyzes the electrochemical energy storage elements and especially the batteries, how they're working, their applications, technical and economic characteristics.

**Chapter 7** compares the properties of different storage technologies of batteries.

**Chapter 8** presents in detail the application of energy storage technologies in the transmission and distribution network, while **chapter 9** presents and analyzes a model of energy storage system (battery) using DIGSILENT PowerFactory software.

**Chapter 10** presents and analyzes the installation of an interconnected photovoltaic system without storage energy systems on the tiled roof of a house in the city of Kozani, while **chapter 11** analyzes all the possible functional combinations and the interaction of RES and ESS with the electrical grid, including a brief dimensioning study and proposal using a Li-ion battery storage system for the photovoltaic installation, which described in chapter 10.

**Chapter 12** presents the main conclusions that arise from the topics covered by this thesis, on the one hand, and from the use of an interconnected photovoltaic system in an average residence in the city of Kozani, on the other.

Finally, **chapter 13** presents the technological developments of the future regarding the material and the technologies of renewable energy sources and energy storage systems.



## **Keywords**

Renewable Energy Sources, Energy Storage Systems, Electrochemical Energy Storage Elements, Batteries, Solar Energy, Solar or Photovoltaic Panels, Solar Cells, Electric Grid, BESS, Net Metering, Sizing, Self – Producing, Residential Consumer.



# Ευχαριστίες

---

Για την διεκπεραίωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημητριάδη Δημήτριο για την αγαστή συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή του στην ολοκλήρωσή της, καθώς και για την εμπιστοσύνη του αναθέτοντάς μου το ιδιαίτερος ενδιαφέρον και επίκαιρο αυτό θέμα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους καθηγητές της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών για τη χρήσιμη και πολύτιμη γνώση που μου μεταλαμπάδευσαν, καθώς και τους συναδέλφους μου που μαζί μοιραστήκαμε γνώσεις και το “βάρος” των απαιτητικών εργασιών της σχολής. Ιδιαίτερα δε, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και καλό συνάδελφο Ίβαν Γκέτσεβιτς για την πολύτιμη βοήθεια, υποστήριξη και συμπαράστασή του, από τα δύσκολα απογεύματα στο ΕΠΑ.Λ. μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μας στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

Θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου, ιδιαίτερος τη σύζυγό μου Παρασκευή και τον γιο μου Δημήτρη, καθώς και φίλους και γνωστούς για την ηθική υποστήριξη, τη βοήθεια, την ανοχή και την υπομονή που έδειξαν κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών, καθώς και την περίοδο συγγραφής της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τη φιλόλογο Ανδρονίκη Δήμου για τον τελικό ορθογραφικό και συντακτικό έλεγχο της πτυχιακής μου εργασίας.



# Περιεχόμενα

---

Περίληψη.....	i
Λέξεις Κλειδιά.....	ii
Abstract .....	iii
Keywords.....	iv
Ευχαριστίες .....	v
Περιεχόμενα .....	vii
Κατάλογος Σχημάτων και Εικόνων .....	xv
Κατάλογος Πινάκων.....	xxiii
Εισαγωγή.....	1
<b>Κεφάλαιο 1 .....</b>	<b>3</b>
<i>Η Διεύθυνση των ΑΠΕ και η Ανάγκη για Αποθήκευση Ενέργειας</i>	
1.1 Η διεύθυνση των ΑΠΕ στον ηλεκτρικό τομέα .....	3
1.2 Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας.....	5
<b>Κεφάλαιο 2 .....</b>	<b>7</b>
<i>Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας</i>	
2.1 Ηλιακή ενέργεια .....	7
2.2 Αιολική ενέργεια .....	9
2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	11
2.4 Γεωθερμική ενέργεια.....	13
2.5 Κυματική – Ωκεάνια ενέργεια .....	15
2.6 Παλιρροιακή ενέργεια.....	16
2.7 Ενέργεια από Βιομάζα – Βιοενέργεια .....	16
2.8 Κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells, FC) .....	17
<b>Κεφάλαιο 3 .....</b>	<b>19</b>
<i>Ο Ήλιος ως Πηγή Ενέργειας</i>	
3.1 Ηλιακή ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία .....	19
3.1.1 Ακτινοβολία .....	21
3.1.2 Μάζα αέρα .....	24
3.1.3 Ενεργειακή πυκνότητα ή πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας.....	25
3.2 Θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο κάθε στιγμή της ημέρας.....	26
3.3 Η τροχιά της Γης και η σχετική κίνησή της με τον ήλιο.....	29
3.3.1 Ηλιακή απόκλιση .....	31

3.3.2	Ηλιακή ώρα, ωρολογιακή ώρα, εξίσωση χρόνου και φαινόμενος ηλιακός χρόνος.....	31
3.3.3	Ηλιακό μεσημέρι και ηλιακό ύψος.....	33
3.3.4	Ανατολή και δύση του ηλίου.....	34
3.3.5	Γεωγραφικές συντεταγμένες.....	35
3.4	Ανάλυση σκίασης και υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας.....	36
3.4.1	Ανάλυση σκίασης βάσει της ηλιακής πορείας.....	36
3.4.2	Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας.....	37
3.4.3	Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας.....	39
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>.....</b>	<b>41</b>
	<b><i>Ηλεκτρικά και Υλικοτεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Διατάξεων</i></b>	
4.1	Ημιαγωγοί.....	41
4.1.1	Βασική αρχή λειτουργίας ημιαγωγών και Φ/Β κυψέλης.....	42
4.1.2	Κατηγορίες και ατομικές διατάξεις των ημιαγωγών.....	43
4.1.3	Το ενεργειακό διάκενο και η επίδρασή του στην απόδοση των Φ/Β.....	44
4.1.3.1	Η επίδραση του ηλιακού φάσματος.....	45
4.1.3.2	Η επίδραση της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος.....	46
4.1.3.3	Η επίδραση του φαινομένου της επανασύνδεσης.....	46
4.1.3.4	Η αλληλεπίδραση της ισχύος ( $P = U \cdot I$ ) με το ενεργειακό διάκενο.....	46
4.1.3.5	Η επίδραση της θερμοκρασίας.....	47
4.1.4	Η επαφή $p-n$ .....	47
4.1.4.1	Χωρίς εφαρμογή πόλωσης (no bias).....	48
4.1.4.2	Ανάστροφη πόλωση (reverse bias).....	48
4.1.4.3	Ορθή πόλωση (forward bias).....	48
4.1.5	Η δίοδος επαφής $p-n$ .....	49
4.2	Υλικά φωτοβολταϊκών.....	52
4.2.1	Μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (sc-Si).....	53
4.2.2	Πολυκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (mc-Si).....	54
4.2.3	Ταινία πυριτίου (Ribbon-Si).....	55
4.2.4	Φ/Β στοιχεία λεπτού υμενίου (Thin Film).....	55
4.2.4.1	Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe <sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου: CIGS).....	55
4.2.4.2	Άμορφο πυρίτιο (a-Si).....	55
4.2.4.3	Τελουριούχο κάδμιο (CdTe).....	56
4.2.4.4	Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs).....	56
4.2.5	Υβριδικά Φ/Β στοιχεία.....	57
4.2.6	Άλλες τεχνολογίες Φ/Β στοιχείων.....	57
4.3	Ισχύς εξόδου Φ/Β μονάδων.....	58

4.4	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείων (κυψελών) .....	58
4.4.1	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β μονάδας (πάνελ) και παράμετροί του .....	59
4.4.2	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β διάταξης (συστοιχίας πάνελ) .....	62
4.5	Η καμπύλη $I-V$ σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.....	63
4.6	Παράγοντες επηρεασμού της καμπύλης $I-V$ .....	65
4.6.1	Θερμοκρασία .....	65
4.6.2	Ηλιακή ακτινοβολία.....	65
4.6.3	Σκίαση.....	66
4.6.4	Αντίσταση σειράς $R_s$ .....	69
4.6.5	Παράλληλη αντίσταση $R_{sh}$ .....	69
4.6.6	Ηλεκτρικές απώλειες .....	70
4.6.7	Οπτικές απώλειες.....	70
4.6.8	Άνεμος .....	70
4.6.9	Γήρανση.....	70
4.7	Φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς (Inverters) .....	71
4.7.1	Τρόπος λειτουργίας Φ/Β αντιστροφέων .....	71
4.7.2	Τρόποι σταθεροποίησης της DC τάσης .....	71
4.7.3	Μετατροπή του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα .....	72
4.7.4	Είδη Φ/Β αντιστροφέων.....	73
4.7.4.1	Off-grid inverters .....	73
4.7.4.2	On-grid inverters.....	73
4.7.5	Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).....	75
4.7.5.1	Μετατροπέας ανόρθωσης – υποβιβασμού .....	75
4.7.5.2	Ελεγκτές MPPT .....	77
4.7.6	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β αντιστροφέα.....	78
4.7.6.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά εισόδου .....	78
4.7.6.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά εξόδου .....	78
4.7.7	Οι Φ/Β αντιστροφείς σήμερα.....	79
4.8	Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	79
4.8.1	Αυτόνομα (off-grid ή standalone) Φ/Β συστήματα .....	79
4.8.2	Διασυνδεδεμένα (on-grid) Φ/Β συστήματα .....	82
4.8.2.1	Διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας .....	82
4.8.2.2	Διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα με αποθήκευση ενέργειας.....	86
4.8.2.3	Σύμβαση ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering).....	89
4.8.2.3.1	Μέρη του Φ/Β συστήματος net metering.....	90
4.8.2.3.2	Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα του net metering.....	91

4.8.2.3.3 Διαδικασία εγκατάστασης ενός Φ/Β συστήματος net metering (2022).....	92
4.8.3 Υβριδικά (hybrid) συστήματα .....	94
4.9 Επιλογή φωτοβολταϊκού συστήματος.....	95
<b>Κεφάλαιο 5 .....</b>	<b>97</b>
<b><i>Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας</i></b>	
5.1 Ηλεκτρομηχανικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	98
5.1.1 Αντλησιοταμίευση (PHSS).....	98
5.1.2 Αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα (CAES).....	99
5.1.3 Στρεφόμενοι σφόνδυλοι (Flywheels).....	100
5.2 Ηλεκτρομαγνητικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας .....	101
5.2.1 Υπερπυκνωτές (Ultracapacitors, UC) .....	101
5.2.2 Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (SMES).....	102
5.3 Ηλεκτροχημικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας .....	103
5.3.1 Υδρογόνο (Hydrogen Energy Storage System, HESS) .....	103
5.3.2 Συσσωρευτές (Μπαταρίες) .....	104
5.4 Τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης ενέργειας (TES).....	105
5.5 Άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	106
5.5.1 Vehicle-to-Grid (V2G) .....	106
5.6 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.....	107
5.6.1 Σύγκριση με κριτήριο τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ΣΑΕ .....	108
5.6.1.1 Πυκνότητα ισχύος (power density) και πυκνότητα ενέργειας (energy density) .....	108
5.6.1.2 Διάρκεια ζωής (lifetime cycles) .....	109
5.6.1.3 Χωρητικότητα αποθήκευσης/διάρκεια εκφόρτισης (storage capacity/discharge time duration).....	110
5.6.2 Σύγκριση των ΣΑΕ με κριτήριο το κόστος επένδυσης.....	111
5.6.3 Σύγκριση με κριτήριο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΣΑΕ .....	112
<b>Κεφάλαιο 6 .....</b>	<b>115</b>
<b><i>Ηλεκτροχημική Αποθήκευση Ενέργειας – Συσσωρευτές (Μπαταρίες)</i></b>	
6.1 Αρχή λειτουργίας των μπαταριών.....	118
6.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών .....	119
6.2.1 Τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{OC}$ ).....	119
6.2.2 Τάση αποκοπής (cut-off voltage) .....	120
6.2.3 Τάση εκφόρτισης (discharge voltage) .....	120
6.2.4 Χωρητικότητα (capacity, C) .....	121
6.2.5 Κατάσταση φόρτισης (SoC) .....	122
6.2.6 Ειδική ενέργεια και ειδική ισχύς.....	123
6.2.7 Κύκλος ζωής (lifecycle).....	124

6.2.8 Αυτό-εκφόρτιση (self-discharge) .....	125
6.3 Κύριοι τύποι μπαταριών.....	126
6.3.1 Μπαταρίες μολύβδου-οξέος.....	126
6.3.2 Μπαταρίες λιθίου.....	126
6.3.2.1 Μπαταρίες ιόντων-λιθίου (Li-ion) .....	128
6.3.2.1.1 Μπαταρίες λιθίου-οξείδιο του μαγγανίου (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ή li-manganese).....	129
6.3.2.1.2 Μπαταρίες λιθίου-οξείδιο του κοβαλτίου (LiCoO <sub>2</sub> ή li-co) .....	129
6.3.2.1.3 Μπαταρίες λιθίου-οξείδιο κοβαλτίου νικελίου (LiNiMnCoO <sub>2</sub> ή NMC) .....	129
6.3.2.1.4 Μπαταρίες λιθίου-οξείδιο αλουμινίου κοβαλτίου νικελίου (LiNiCoAlO <sub>2</sub> ή NCA/NCR).....	130
6.3.2.1.5 Μπαταρίες πολυμερών λιθίου (li-poly ή lipo ή RC lipo).....	130
6.3.2.2 Μπαταρίες λιθίου-φωσφορικού άλατος σιδήρου (LiFePO <sub>4</sub> ή LFE).....	131
6.3.2.3 Μπαταρίες τιτανικού λιθίου (Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> ή LTO).....	131
6.3.3 Μπαταρίες θείου-νατρίου (NaS) .....	132
6.3.4 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd).....	133
6.3.5 Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH).....	133
6.3.6 Μπαταρίες γλωριούχου νατρίου νικελίου (NaNiCl) .....	134
6.3.7 Μπαταρίες ροής (Flow batteries, FBES) .....	134
6.3.7.1 Μπαταρίες οξειδοαναγωγής βαναδίου (Vanadium Redox Flow Batteries, VRB)..	136
6.3.7.2 Μπαταρίες βρωμιούχου ψευδαργύρου (Zinc Bromine Flow Batteries, ZnBr) .....	136
6.3.7.3 Μπαταρίες βρωμιούχου πολυσουλφιδίου (Polysulfide Bromine Flow Batteries, PSB) .....	137
6.4 Εναλλακτικοί τύποι μπαταριών.....	137
6.4.1 Μπαταρίες ψευδαργύρου-αέρα .....	137
6.4.2 Μπαταρίες σιδήρου-αέρα.....	138
<b>Κεφάλαιο 7 .....</b>	<b>139</b>
<b><i>Σύγκριση και Αξιολόγηση Ηλεκτροχημικών Πηγών Αποθήκευσης Ενέργειας</i></b>	
7.1 Χαρακτηριστικά μπαταριών μολύβδου-οξέος.....	139
7.2 Χαρακτηριστικά μπαταριών με βάση το νικέλιο .....	140
7.3 Χαρακτηριστικά μπαταριών ιόντων-λιθίου.....	142
7.4 Χαρακτηριστικά εναλλακτικών τύπων μπαταριών.....	143
7.5 Χαρακτηριστικά μελλοντικών τύπων μπαταριών .....	146
7.6 Συγκριτικός πίνακας χαρακτηριστικών μπαταριών .....	147
<b>Κεφάλαιο 8 .....</b>	<b>149</b>
<b><i>Εφαρμογή Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας στο Ηλεκτρικό Δίκτυο</i></b>	
8.1 Ο ρόλος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς .....	151

8.1.1 Συμβολή στη ρύθμιση συχνότητας .....	151
8.1.2 Συμβολή στη ρύθμιση τάσης .....	152
8.1.3 Τριτεύουσα ρύθμιση συχνότητας .....	152
8.1.4 Εκκίνηση χωρίς τάση ή μαύρη εκκίνηση (black start) .....	153
8.1.5 Διαχείριση συμφόρησης .....	153
8.2 Ο ρόλος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο διανομής .....	155
8.2.1 Ανακατανομή φορτίου (περιορισμός μέγιστου φορτίου) .....	155
8.2.2 Τοπική ρύθμιση τάσης .....	156
8.2.3 Μείωση της κατανομής των απωλειών Joule .....	158
8.2.4 Αντιστάθμιση άεργης ισχύος .....	158
8.2.5 Ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας .....	159
8.2.6 Ο ρόλος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στα μικροδίκτυα .....	160
8.3 Κύριες υπηρεσίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας .....	160
8.3.1 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας .....	161
8.3.2 Μείωση των εκπομπών CO <sub>2</sub> .....	161
8.3.3 Μείωση κόστους και χρόνου συντήρησης .....	161
8.3.4 Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών .....	161
<b>Κεφάλαιο 9 .....</b>	<b>163</b>
<i><b>Μοντέλο Συστήματος Μπαταρίας για Αποθήκευση Ενέργειας με τη Βοήθεια του Λογισμικού DIgSILENT PowerFactory</b></i>	
9.1 Μοντέλο προσομοίωσης BESS .....	163
9.1.1 Μοντέλο μπαταρίας .....	163
9.1.2 Μοντέλο μετατροπέα πηγής τάσης (VSC) .....	167
9.1.3 Ο ελεγκτής BESS .....	169
9.2 Δοκιμή του συστήματος BESS .....	171
<b>Κεφάλαιο 10 .....</b>	<b>175</b>
<i><b>Πρακτική Εφαρμογή: Διασυνδεδεμένο Φ/Β Σύστημα χωρίς Αποθήκευση Ενέργειας σε κεραμοσκεπή οικίας στην πόλη της Κοζάνης</b></i>	
10.1 Διάταξη και μέρη του διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος .....	175
10.1.1 Φ/Β πλαίσια της Canadian Solar .....	176
10.1.2 Σύστημα συλλογής ενέργειας της SolarEdge .....	177
10.1.2.1 Βελτιστοποιητής ισχύος (Power Optimizer) .....	178
10.1.2.2 Αντιστροφέας με διακόπτη ασφαλείας (Inverter with Safety Switch) .....	179
10.1.2.3 Πλατφόρμα επιτήρησης (Monitoring Platform) .....	180
10.2 Παραγωγή ενέργειας Φ/Β συστήματος .....	181
10.3 Κατανάλωση ενέργειας φορτίων .....	185



<b>Κεφάλαιο 11</b> .....	<b>191</b>
<i>Σύμπραξη ΑΠΕ και ΣΑΗΕ, με Διασύνδεσή τους στο Ηλεκτρικό Δίκτυο</i>	
11.1 Εισαγωγή.....	191
11.2 Συστήματα, ενσωμάτωση και διατάξεις φορτίων .....	192
11.2.1 Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (ΑΠΕ) .....	192
11.2.2 Σύστημα Διαχείρισης Ισχύος και Ενέργειας (PEMS).....	193
11.2.3 Συσκευές Αποθήκευσης Ενέργειας (ESD) – Διαστασιολόγηση .....	194
11.2.4 Φορτίο συστήματος .....	198
11.3 Σύμπραξη ΑΠΕ και ΣΑΗΕ – Τοπολογίες.....	199
11.3.1 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β που υποστηρίζεται από το Δίκτυο .....	199
11.3.2 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β που υποστηρίζεται από το Δίκτυο και το ΣΑΗΕ.....	199
11.3.3 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β που υποστηρίζεται από το ΣΑΗΕ.....	200
11.3.4 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β σε ώρες αιχμής .....	200
11.3.5 Τρόπος λειτουργίας Δικτύου .....	201
11.4 Αρχιτεκτονικές σύνδεσης Φ/Β – ΣΑΗΕ (μπαταρίες).....	202
11.4.1 Απ’ ευθείας σύνδεση στη γραμμή .....	202
11.4.2 DC σύνδεση .....	203
11.4.3 AC σύνδεση .....	204
11.4.4 DC/AC σύνδεση.....	205
11.4.5 Επιλογή βέλτιστης αρχιτεκτονικής.....	205
 <b>Κεφάλαιο 12</b> .....	 <b>207</b>
<i>Συμπεράσματα</i>	
 <b>Κεφάλαιο 13</b> .....	 <b>209</b>
<i>Μελλοντικές Τεχνολογικές Εξελίξεις</i>	
13.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	209
13.1.1 Διαφανή ηλιακά πάνελ (transparent solar panels) .....	209
13.1.2 Οργανικά ηλιακά στοιχεία (organic solar cells) .....	211
13.1.3 Ηλιακά στοιχεία πυριτίου–περοβσκίτη (silicon–perovskite solar cells) .....	212
13.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	213
13.2.1 Μπαταρία διοξειδίου του άνθρακα (carbon–dioxide battery) .....	213
13.2.2 Σύλληψη διοξειδίου του άνθρακα με χρήση ηλιακής ενέργειας .....	215
13.2.3 Βαρυντική αποθήκευση ενέργειας (Gravity Energy Storage, GES) .....	215
13.2.4 Βιομπαταρίες (biobatteries) .....	216
13.2.5 Μπαταρίες με βάση το νερό (water–based batteries) .....	217
13.2.6 Μπαταρίες με βάση τα νανοσύρματα (nanowire–based batteries).....	217
13.2.7 Μπαταρίες άμμου (sand batteries).....	218

13.2.8 Μπαταρίες ιόντων–λιθίου με προσθήκη γραφενίου .....	219
<b>Παράρτημα.....</b>	<b>221</b>
— <i>Ενρετήριο</i> .....	221
— <i>Παράρτημα Α΄</i> .....	222
— <i>Παράρτημα Β΄</i> .....	231
— <i>Παράρτημα Γ΄</i> .....	239
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>247</b>
<b>Συνομογραφίες · Αρκτικόλεξα · Ακρωνύμια .....</b>	<b>255</b>
<b>Απόδοση Ξενόγλωσσων Όρων.....</b>	<b>259</b>
<b>Σύμβολα και Μονάδες Μέτρησης (Μ.Μ.) .....</b>	<b>265</b>

# Κατάλογος Σχημάτων και Εικόνων

## — Σχήματα

### — Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1 – Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [25] .....	3
Σχήμα 1.2 – Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο αερίου στην Ελλάδα [25] .....	4
Σχήμα 1.3 – Μοντέλο ενός έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου (Smart Grid) [101] .....	6

### — Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1 – Τυπική διαμόρφωση ενός Φ/Β συστήματος [14] .....	8
Σχήμα 2.2 – Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου [14] .....	10
Σχήμα 2.3 – Τυπικό σύστημα αιολικής ενέργειας με μετατροπείς PWM [14] .....	11
Σχήμα 2.4 – Υδροηλεκτρικός σταθμός μεγάλης κλίμακας [65] .....	12
Σχήμα 2.5 – Υδροηλεκτρικός σταθμός μικρής κλίμακας [65] .....	13
Σχήμα 2.6 – Αρχή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός σταθμού εκτόνωσης διαφασικού ρευστού [14] .....	14
Σχήμα 2.7 – Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλες καυσίμου και μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [14] .....	17

### — Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1 – Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [31] .....	19
Σχήμα 3.2 – Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη (για οριζόντιο επίπεδο) [32] .....	21
Σχήμα 3.3 – Το ολικό ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας [33] .....	22
Σχήμα 3.4 – Το ολικό ηλιακό δυναμικό σε Καστοριά, Φλώρινα, Γρεβενά και Κοζάνη [33] .....	23
Σχήμα 3.5 – Η ατμοσφαιρική μάζα αέρα και η ακτινοβολία που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης [34] .....	24
Σχήμα 3.6 – Ηλιακή ακτινοβολία και πυκνότητα ισχύος [35] .....	25
Σχήμα 3.7 – Θερινό/χειμερινό ηλιοστάσιο και εαρινή/φθινοπωρινή ισημερία [36] .....	26
Σχήμα 3.8 – Γωνία ηλιακού ύψους ( $\alpha_s$ ), γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ) και αζιμούθιο του ηλίου ( $\gamma_s$ ) [37] .....	27
Σχήμα 3.9 – Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο [37] .....	28
Σχήμα 3.10 – Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας ( $\omega_s$ ) του ηλίου [37] .....	29
Σχήμα 3.11 – Σχέση μεταξύ της αξονικής κλίσης της Γης ( $\epsilon$ ) προς τους τροπικούς και πολικούς κύκλους [40] .....	30
Σχήμα 3.12 – Ηλιακός χάρτης (διάγραμμα) για το Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος $40^\circ$ [39] .....	34
Σχήμα 3.13 – Οι γεωγραφικές συντεταγμένες στη σφαίρα [41] .....	35

Σχήμα 3.14 – Μετρητής σκιασμού για τον προσδιορισμό της σκίασης από παραπλήσια εμπόδια [39] .....	36
Σχήμα 3.15 – Η χρήση του ηλιακού χάρτη για τον προσδιορισμό του σκιασμού από τον περιβάλλοντα χώρο [39] .....	37

## — Κεφάλαιο 4

Σχήμα 4.1 – Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο [12] .....	42
Σχήμα 4.2 – Δομή και αρχή λειτουργίας Φ/Β κυψέλης [13] .....	43
Σχήμα 4.3 – Οι έξι δομές για ένα υλικό ημιαγωγών [12] .....	44
Σχήμα 4.4 – Απεικόνιση ομοιοπολικών δεσμών: (α) σε κρύσταλλο καθαρού πυριτίου, (β) ημιαγωγού πρόσμιξης αρσενικού–πυριτίου (τύπου $n$ ), (γ) ημιαγωγού πρόσμιξης βορίου–πυριτίου (τύπου $p$ ) [55] .....	45
Σχήμα 4.5 – Ηλιακό φάσμα AM1.5 με απεικόνιση της μη χρήσιμης ενέργειας σε Φ/Β κυψέλη πυριτίου [02,56] .....	46
Σχήμα 4.6 – Κατανομή περίσσειας ηλεκτρονίων και οπών στην περιοχή της επαφής $p-n$ [55] .....	47
Σχήμα 4.7 – Συνθήκες (α) ανάστροφης και (β) ορθής πόλωσης της επαφής $p-n$ [55] .....	49
Σχήμα 4.8 – Τα βασικά μέρη και ο συμβολισμός της διόδου επαφής $p-n$ [55] .....	50
Σχήμα 4.9 – Θεωρητικές και πραγματικές χαρακτηριστικές $I-V$ μίας τυπικής διόδου ημιαγωγών [58] .....	51
Σχήμα 4.10 – Ορθά πολωμένη δίοδος επαφής $p-n$ [59] .....	51
Σχήμα 4.11 – Ανάστροφα πολωμένη δίοδος επαφής $p-n$ [59] .....	52
Σχήμα 4.12 – Τα στάδια παραγωγής Φ/Β πλαισίων [60] .....	53
Σχήμα 4.13 – Οπτική απεικόνιση των κύριων τύπων κυψελών των Φ/Β στοιχείων [62] .....	55
Σχήμα 4.14 – Η εξέλιξη της απόδοσης των Φ/Β κυψελών μέχρι σήμερα (06/2022) [63] .....	57
Σχήμα 4.15 – Απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου [12] .....	58
Σχήμα 4.16 – Απεικόνιση της υπέρθεσης για το Φ/Β στοιχείο (ροή ρεύματος) [12] .....	59
Σχήμα 4.17 – Από το Φ/Β στοιχείο στο Φ/Β πλαίσιο και από το Φ/Β πλαίσιο στη Φ/Β συστοιχία [80] .....	60
Σχήμα 4.18 – Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β πλαισίου [12] .....	61
Σχήμα 4.19 – Άθροιση τάσεων για κάθε δεδομένη στιγμή του ρεύματος σε σειριακή σύνδεση Φ/Β πλαισίων [82] .....	62
Σχήμα 4.20 – Άθροιση ρευμάτων για κάθε δεδομένη στιγμή της τάσης σε παράλληλη σύνδεση Φ/Β πλαισίων [82] .....	62
Σχήμα 4.21 – Σειριακή, παράλληλη και σειριακή – παράλληλη σύνδεση Φ/Β πλαισίων [83] ....	63
Σχήμα 4.22 – Οι καμπύλες $I-V$ και $P-V$ που δείχνουν το μέγιστο σημείο ισχύος $P_m$ του Φ/Β στοιχείου [83] .....	64
Σχήμα 4.23 – Επίδραση: (α) θερμοκρασίας και (β) διαφορετικών επιπέδων ηλιοφάνειας στα χαρακτηριστικά της καμπύλης $I-V$ του Φ/Β στοιχείου [12,13] .....	66
Σχήμα 4.24 – Γεωμετρία σκίασης Φ/Β πλαισίων [84] .....	67

Σχήμα 4.25 – Μεταβολή της χαρακτηριστικής λειτουργίας λόγω σκίασης [85] .....	68
Σχήμα 4.26 – Σκιασμένο Φ/Β στοιχείο με προστασία διόδου παράκαμψης [85] .....	69
Σχήμα 4.27 – Επίδραση της: (α) $R_s$ και (β) $R_{sh}$ στα χαρακτηριστικά της καμπύλης $I-V$ του Φ/Β στοιχείου [12] .....	70
Σχήμα 4.28 – Μονοφασικός αντιστροφέας: (α) ημιγέφυρας και (β) πλήρους γέφυρας με IGBT [13] .....	72
Σχήμα 4.29 – Αυτόνομος τριφασικός αντιστροφέας τεσσάρων αγωγών [13] .....	73
Σχήμα 4.30 – Διαφορετικές δομές Φ/Β αντιστροφέων συνδεδεμένων στο δίκτυο: (α) αντιστροφείς μονάδων συνδεδεμένοι σε κοινό δίαυλο dc, (β) string/multistring αντιστροφέας που εφαρμόζεται σε μονοφασικά ή τριφασικά συστήματα (οικιακές και εμπορικές εφαρμογές) και (γ) κεντρικοί αντιστροφείς για εμπορικές ή χρηστικές εφαρμογές (υψηλής ισχύος, π.χ. 100 kW) [12] .....	74
Σχήμα 4.31 – Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ανόρθωσης τάσης (boost converter) [13] .....	76
Σχήμα 4.32 – Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck converter) [13] ....	76
Σχήμα 4.33 – Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ανόρθωσης – υποβιβασμού τάσης (boost–buck converter) [13] .....	76
Σχήμα 4.34 – Διάγραμμα απλοποιημένης αυτόνομης Φ/Β συστοιχίας [16] .....	80
Σχήμα 4.35 – Σχηματικό διάγραμμα αυτόνομου Φ/Β συστήματος [16] .....	81
Σχήμα 4.36 – Διάγραμμα απλοποιημένης διασυνδεδεμένης Φ/Β συστοιχίας χωρίς αποθήκευση ενέργειας [16] .....	83
Σχήμα 4.37 – Σχηματικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς αποθήκευση ενέργειας [16] .....	84
Σχήμα 4.38 – Σχηματικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μικροαντιστροφέας [16] .....	85
Σχήμα 4.39 – Διάγραμμα απλοποιημένης διασυνδεδεμένης Φ/Β συστοιχίας με αποθήκευση ενέργειας [16] .....	87
Σχήμα 4.40 – Σχηματικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με αποθήκευση ενέργειας [16] .....	88
Σχήμα 4.41 – Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας και τρόπος λειτουργίας του Net Metering [87] .....	91
Σχήμα 4.42 – Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [16] .....	94

## — Κεφάλαιο 5

Σχήμα 5.1 – Τεχνολογίες (μέθοδοι) αποθήκευσης ενέργειας [69] .....	97
Σχήμα 5.2 – Ένας τυπικός υδροηλεκτρικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με αντλησιοταμίευση [72] .....	98
Σχήμα 5.3 – Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης CAES [19] .....	99
Σχήμα 5.4 – Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου [73] .....	100
Σχήμα 5.5 – Η κατασκευαστική δομή ενός υπερπυκνωτή [74] .....	101
Σχήμα 5.6 – Η κατασκευαστική δομή ενός συστήματος SMES [76] .....	102

Σχήμα 5.7 – Χρήση υδρογόνου ως Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας (ΣΑΕ) [77] .....	103
Σχήμα 5.8 – Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας αποθήκευσης συσσωρευτών [79] .....	105
Σχήμα 5.9 – Αρχή λειτουργίας των θερμικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [24] .....	106
Σχήμα 5.10 – Σύγκριση πυκνότητας ισχύος και πυκνότητας ενέργειας των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79] .....	109
Σχήμα 5.11 – Σύγκριση κύκλου ζωής και απόδοσης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79] .....	110
Σχήμα 5.12 – Σύγκριση ονομαστικής ισχύος, χωρητικότητας ενέργειας και διάρκειας του χρόνου εκφόρτισης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79] .....	111
Σχήμα 5.13 – Σύγκριση κόστους κεφαλαίου και ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79] .....	112

## — Κεφάλαιο 6

Σχήμα 6.1 – Η αρχή λειτουργίας της μπαταρίας [88] .....	118
Σχήμα 6.2 – Τυπικό προφίλ τάσης–χρόνου εκφόρτισης του κελιού μιας μπαταρίας [88] .....	119
Σχήμα 6.3 – Τυπικά προφίλ τάσης για διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης [88] .....	121
Σχήμα 6.4 – Διάγραμμα Ragone για διαφορετικά είδη μπαταριών και πυκνωτών [91] .....	124
Σχήμα 6.5 – Συνάρτηση του κύκλου ζωής μίας μπαταρίας μολύβδου–οξέος με το βάθος εκφόρτισης (DoD) [16] .....	125
Σχήμα 6.6 – Σχηματική απεικόνιση των κύριων μερών ενός κελιού μπαταρίας λιθίου σχήματος θήκης [17] .....	127
Σχήμα 6.7 – Τα σχήματα των κελιών μίας μπαταρίας λιθίου: (α) θήκης, (β) πρισματικό και (γ) κυλινδρικό [17] .....	127
Σχήμα 6.8 – Σχηματικό διάγραμμα ενός κελιού και μίας μονάδας μπαταρίας NaS [88] .....	132
Σχήμα 6.9 – Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος μπαταρίας ροής [68] .....	134

## — Κεφάλαιο 8

Σχήμα 8.1 – Η αρχή της χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε περίπτωση συμφόρησης [45] .....	154
Σχήμα 8.2 – Γραφική αναπαράσταση του περιορισμού του φορτίου αιχμής χρησιμο–ποιώντας ΣΑΗΕ [49] .....	155
Σχήμα 8.3 – Πτώση τάσης κατά μήκος μίας ΓΜ ΜΤ με και χωρίς κατανεμημένη παρα–γωγή [45] .....	157
Σχήμα 8.4 – Η διαδικασία ενεργού φιλτραρίσματος του ρεύματος που εξάγεται από το δίκτυο μεταφοράς [45] .....	159
Σχήμα 8.5 – Υπηρεσίες των ΣΑΗΕ στο ΣΗΕ [68] .....	162

## — Κεφάλαιο 9

Σχήμα 9.1 – Ισοδύναμο μοντέλο ηλεκτρικής μπαταρίας [50] .....	164
Σχήμα 9.2 – Τυπικό προφίλ εκφόρτισης μιας μπαταρίας μολύβδου–οξέος [52] .....	165

Σχήμα 9.3 – Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μετατροπέα PWM [52] .....	167
Σχήμα 9.4 – Κορεσμός ενός VSC με ημιτονοειδές PWM [52] .....	168
Σχήμα 9.5 – Το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος BESS [52] .....	170
Σχήμα 9.6 – Η δομή του συστήματος BESS [52] .....	171
Σχήμα 9.7 – Ένα απλό δίκτυο δοκιμής του συστήματος BESS [52] .....	172
Σχήμα 9.8 – Αρχικές ροές ισχύος του δικτύου δοκιμής του συστήματος BESS [50] .....	172
Σχήμα 9.9 – Ενεργή ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας [50] .....	173
Σχήμα 9.10 – Ενεργή ισχύς της πηγής DC (μπαταρία) [50] .....	174

## — Κεφάλαιο 10

Σχήμα 10.1 – Χωροθέτηση των Φ/Β πλαισίων στην κεραμοσκεπή της οικίας .....	176
Σχήμα 10.2 – Τα στοιχεία του συστήματος συλλογής ενέργειας της SolarEdge .....	178
Σχήμα 10.3 – Συνολική μεταβολή παραγωγής από 01/2015 έως και 08/2022 .....	181
Σχήμα 10.4 – Μέση μεταβολή παραγωγής από 01/2015 έως και 08/2022, ανά διάστημα 10 ημερών .....	182
Σχήμα 10.5 – Παραγωγή νότιας ομάδας 18 Φ/Β πλαισίων από 01/2022 έως και 08/2022 .....	182
Σχήμα 10.6 – Παραγωγή ανατολικής ομάδας 13 Φ/Β πλαισίων από 01/2022 έως και 08/2022 .....	183
Σχήμα 10.7 – Παραγωγή δυτικής ομάδας 9 Φ/Β πλαισίων από 01/2022 έως και 08/2022 .....	183
Σχήμα 10.8 – Θερμοκρασιακή μεταβολή από 08/2021 έως και 08/2022 .....	184
Σχήμα 10.9 – Μεταβολή υγρασίας από 08/2021 έως και 08/2022 .....	184
Σχήμα 10.10 – Μεταβολή ταχύτητας ανέμου από 08/2021 έως και 08/2022 .....	185
Σχήμα 10.11 – Συνολική μεταβολή κατανάλωσης από 01/2015 έως και 08/2022 .....	185
Σχήμα 10.12 – Μέση μεταβολή κατανάλωσης από 01/2015 έως και 08/2022, ανά διάστημα 10 ημερών .....	186
Σχήμα 10.13 – Μέση ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022 .....	186
Σχήμα 10.14 – Μέγιστη ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022 .....	187
Σχήμα 10.15 – Συνολική μέση ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022 .....	187
Σχήμα 10.16 – Συνολική μέγιστη ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022 ..	188
Σχήμα 10.17 – Μεταβολή του συντελεστή ισχύος για περίοδο κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022 .....	189
Σχήμα 10.18 – Μεταβολή των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος για κάθε λεπτό μεταξύ 12:00 – 13:00 .....	190

## — Κεφάλαιο 11

Σχήμα 11.1 – Αναλυτικό διάγραμμα της μονάδας ενσωμάτωσης [117] .....	192
Σχήμα 11.2 – Διακύμανση του συνολικού φορτίου μίας κατοικίας σε ωριαία βάση [117] .....	198
Σχήμα 11.3 – Φ/Β και Δίκτυο τροφοδοτούν τα οικιακά φορτία [117] .....	199

Σχήμα 11.4 – Φ/Β, ΣΑΗΕ και Δίκτυο τροφοδοτούν τα οικιακά φορτία [117] .....	200
Σχήμα 11.5 – Φ/Β και ΣΑΗΕ τροφοδοτούν τα οικιακά φορτία [117] .....	200
Σχήμα 11.6 – Το Φ/Β τροφοδοτεί τα οικιακά φορτία, το Δίκτυο και φορτίζει το ΣΑΗΕ [117] .....	201
Σχήμα 11.7 – Το Δίκτυο τροφοδοτεί τα οικιακά φορτία και φορτίζει το ΣΑΗΕ [117] .....	201
Σχήμα 11.8 – Αρχιτεκτονικές σύνδεσης Φ/Β – ΣΑΗΕ (μπαταρίες): (α) απ’ ευθείας σύνδεσης στη γραμμή, (β) DC σύνδεσης, (γ) AC σύνδεσης και (γ) DC/AC σύνδεσης [119] .....	202
Σχήμα 11.9 – Διανομή μονού ζυγού DC μίας τυπικής κατοικίας [118] .....	203
Σχήμα 11.10 – Τυπική μονοφασική διανομή AC μίας κατοικίας [118] .....	204

## — Κεφάλαιο 13

Σχήμα 13.1 – Αρχή λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης μπαταρίας CO <sub>2</sub> [109] .....	214
--	-----

## — Παραρτήματα

Σχήμα Β.1 – Ηλεκτρομηχανολογικό φυλλάδιο δεδομένων των Φ/Β πλαισίων .....	231
Σχήμα Β.2 – Φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων του βελτιστοποιητή ισχύος .....	233
Σχήμα Β.3 – Φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων του τριφασικού αντιστροφέα (inverter) .....	235
Σχήμα Β.4 – Φυλλάδιο επισκόπησης της πλατφόρμας επιτήρησης .....	237
Σχήμα Γ.1 – Ετήσια τριφασική παραγωγή ενέργειας (από 01/2015 έως και 08/2022) σε Watt .....	239
Σχήμα Γ.2 – Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (από 01/2015 έως και 08/2022) σε Watt .....	243

## — Εικόνες

### — Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1 – Μετατροπείας ενέργειας κυμάτων της εταιρείας PELAMIS WAVE POWER (PWP) [66] .....	15
---	----

### — Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1 – Πυρανόμετρο της εταιρείας KIPP & ZONEN [42] .....	39
Εικόνα 3.2 – Πυρηλιόμετρο της εταιρείας KIPP & ZONEN [42] .....	40

### — Κεφάλαιο 6

Εικόνα 6.1 – Χαρακτηριστική εικόνα ενός κελιού και μίας μονάδας μπαταρίας ροής [92] .....	135
---	-----

### — Κεφάλαιο 13

Εικόνα 13.1 – Διαφανές ηλιακό στοιχείο [106] .....	210
--	-----



Εικόνα 13.2 – Οργανικό ηλιακό στοιχείο [107] .....	211
Εικόνα 13.3 – Ηλιακό στοιχείο πυριτίου–περοβσκίτη [108] .....	213
Εικόνα 13.4 – Βιομπαταρίες plug and play [112] .....	216
Εικόνα 13.5 – Νανοσύρμα σε σύγκριση με μία ανθρώπινη τρίχα [114] .....	218
Εικόνα 13.6 – Η μπαταρία άμμου στο ψηλό γκρι σιλό της [115] .....	219
Εικόνα 13.7 – (α) Στρώμα γραφενίου πάχους ατόμου, (β) Σκόνη γραφενίου [116] .....	220



# Κατάλογος Πινάκων

---

## — Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1 – Ταξινόμηση υδροηλεκτρικών σταθμών βάσει της εγκατεστημένης ισχύος [65] .12

## — Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1 – Αριθμός ημέρας για την πρώτη ημέρα κάθε μήνα [02] .....30

Πίνακας 3.2 – Συντελεστής ανάκλασης επιφανειών  $r$  [03] .....38

Πίνακας 3.3 – Συντελεστές διόρθωσης  $r_0$ ,  $r_l$  και  $r_k$  [03] .....38

## — Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1 – Τμήμα του περιοδικού πίνακα με ορισμένους επιλεγμένους ημιαγωγούς που αποτελούνται από στοιχεία των ομάδων II έως VI [15] .....41

Πίνακας 4.2 – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων [16] .....82

Πίνακας 4.3 – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων χωρίς αποθήκευση ενέργειας [16] .....86

Πίνακας 4.4 – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων με αποθήκευση ενέργειας [16] .....89

Πίνακας 4.5 – Όρια ισχύος Φ/Β net metering στην ηπειρωτική Ελλάδα και στα διασυνδεδεμένα νησιά (συμπεριλαμβανομένης της Κρήτης) [86] .....93

Πίνακας 4.6 – Ανώτατα όρια ισχύος (kW) σταθμών παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) ανά αυτόνομο νησιωτικό σύστημα [86] .....93

## — Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.1 – Λειτουργικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας [19] .....107

Πίνακας 5.2 – Εκτιμώμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [18] .....113

## — Κεφάλαιο 6

Πίνακας 6.1 – Χημικές αντιδράσεις και τάσεις μονάδας βασικών τύπων μπαταριών που διατίθενται στα Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ESS) [79,88,89,90] .....115

Πίνακας 6.2 – Τιμές ρεύματος και χρόνου φόρτισης για διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης μίας ιδανικής μπαταρίας [68] .....122

## — Κεφάλαιο 7

Πίνακας 7.1 – Σύνοψη χαρακτηριστικών των συστημάτων αποθήκευσης μολύβδου–οξέος [95] .....	139
Πίνακας 7.2 – Σύνοψη χαρακτηριστικών των συστημάτων αποθήκευσης με βάση το νικέλιο [96] .....	141
Πίνακας 7.3 – Σύνοψη χαρακτηριστικών των κύριων τύπων των συστημάτων αποθήκευσης ιόντων–λιθίου [97] .....	142
Πίνακας 7.4 – Σύνοψη χαρακτηριστικών των κοινών εναλλακτικών συστημάτων αποθήκευσης και ισοδύναμων [98] .....	143
Πίνακας 7.5 – Σύνοψη των πιο συνηθισμένων συστημάτων αποθήκευσης που αποκλίνουν από την ηλεκτροχημική έννοια της μπαταρίας [98] .....	145
Πίνακας 7.6 – Σύνοψη των πιο κοινών, μελλοντικών τύπων μπαταριών [100] .....	146
Πίνακας 7.7 – Σύνοψη χαρακτηριστικών των συχνά χρησιμοποιούμενων επαναφορτιζόμενων μπαταριών [100] .....	147

## — Κεφάλαιο 8

Πίνακας 8.1 – Τεχνικά δεδομένα για βοηθητικές υπηρεσίες ελέγχου συχνότητας [45] .....	151
---	-----

## — Κεφάλαιο 9

Πίνακας 9.1 – Παράμετροι του μοντέλου της μπαταρίας [50] .....	166
--	-----

## — Κεφάλαιο 10

Πίνακας 10.1 – Ηλεκτρικά δεδομένα των Φ/Β πλαισίων .....	176
Πίνακας 10.2 – Μηχανικά δεδομένα των Φ/Β πλαισίων .....	177
Πίνακας 10.3 – Ηλεκτροτεχνικά δεδομένα του βελτιστοποιητή ισχύος .....	179
Πίνακας 10.4 – Ηλεκτροτεχνικά δεδομένα του αντιστροφέα .....	180

## — Κεφάλαιο 11

Πίνακας 11.1 – Τάση μπαταριών βάσει της ισχύος του Φ/Β συστήματος [123] .....	195
Πίνακας 11.2 – Βάθος εκφόρτισης μπαταριών βάσει ημερών αυτονομίας [123] .....	195
Πίνακας 11.3 – Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας μπαταρίας BYD HVM 8.3 [124] .....	197

## — Παραρτήματα

Πίνακας A.1 – Ηλιοφάνεια σε ώρες ανά μήνα, εποχή και έτος [09] .....	222
Πίνακας A.2 – Μέσος όρος ημερήσιας θερμοκρασίας ανά μήνα, εποχή και έτος [09] .....	223
Πίνακας A.3 – Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης σε kWh/m <sup>2</sup> ανά μήνα, εποχή και έτος [09] .....	224
Πίνακας A.4 – Τιμές του συντελεστή R ανά μήνα για την περιοχή της Κοζάνης, Γ.Π. 40.31' [09] .....	225
Πίνακας A.5 – Ολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο με κλίση στην επιφάνεια της Γης σε kWh/m <sup>2</sup> ανά μήνα, εποχή και έτος για την περιοχή της Κοζάνης, Γ.Π. 40.31' [09] ...	226

Πίνακας A.6 – Βέλτιστη κλίση $B^\circ$ ανά μήνα, συντελεστής διόρθωσης $R$ και ολική ηλιακή ακτινοβολία $H_k$ σε kWh/m <sup>2</sup> στο επίπεδο με τη βέλτιστη κλίση, ανά μήνα, εποχή και έτος [09] .....	227
Πίνακας A.7 – Μόνιμη κλίση και ολική ηλιακή ακτινοβολία $H_k$ σε kWh/m <sup>2</sup> στο επίπεδο με τη ετήσια μόνιμη βέλτιστη κλίση, ανά μήνα, εποχή και έτος [09] .....	228
Πίνακας A.8 – Τιμές του συντελεστή $h_1$ και $h_2$ για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των Φ/Β πλαισίων με μόνιμο προσανατολισμό το νότο και για μόνιμη κλίση ίση με τη βέλτιστη μηνιαία κλίση (Δεκέμβριος) για ασκίαστα πλαίσια [09] .....	229
Πίνακας A.9 – Τιμές του συντελεστή $h_1$ και $h_2$ για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των Φ/Β πλαισίων με μόνιμο προσανατολισμό το νότο και για μόνιμη κλίση ίση με τη βέλτιστη ετήσια μόνιμη κλίση για ασκίαστα πλαίσια [09] .....	230



# Εισαγωγή

---

Η ανάπτυξη της ανθρώπινης δραστηριότητας του τελευταίου αιώνα και ιδιαίτερα των τελευταίων δεκαετιών, από τα στάδια της παραγωγής αγαθών και υπηρεσιών μέχρι και την κατανάλωσή τους, αποτελεί το βασικό παράγοντα για την αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι τα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασίστηκε, κατά κόρον, στη χρήση ορυκτών καυσίμων και της πυρηνικής ενέργειας. Ωστόσο, η ανάγκη απεξάρτησης από τη χρήση των ανωτέρω πηγών, αφ' ενός για περιβαλλοντικούς λόγους (φαινόμενο του θερμοκηπίου, αύξηση εκπομπών CO<sub>2</sub>, καταστροφή της στρωβάδας του όζοντος, προστασία των φυσικών πόρων για τις μελλοντικές γενεές, κ.λπ.) και αφ' ετέρου για την επίτευξη πιο βιώσιμης διαχείρισης της ενέργειας, οδήγησε αναπόφευκτα στην αναζήτηση νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), βασιζόμενες στην αξιοποίηση ανεξάντλητων πόρων, όπως η ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, γεωθερμική και κυματική ενέργεια, αναπτύχθηκαν για να δώσουν τις απαιτούμενες λύσεις στα παραπάνω προβλήματα.

Όμως, η ανάγκη εξισορρόπησης της προσφοράς (παραγωγής) και ζήτησης (κατανάλωσης) ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελεί μία αρνητική ιδιαιτερότητα των ΑΠΕ (π.χ. παραγωγή εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες), καθώς και η ολοένα και μεγαλύτερη συμμετοχή τους στο ενεργειακό παραγωγικό μίγμα, κάνει επιτακτική την ανάγκη χρήσης Συστημάτων Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΑΗΕ).

Στις μέρες μας, η ανάπτυξη των ΣΑΗΕ εμφανίζει ολοένα και μεγαλύτερη άνθιση, λαμβάνοντας υπόψη τις ωφέλιμες επιπτώσεις που εμφανίζουν ως προς τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και αναλύει τα δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης ενός διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο φωτοβολταϊκού συστήματος (Φ/Σ) εγκατεστημένου σε κεραμοσκεπή κατοικίας στην πόλη της Κοζάνης, δίχως τη χρήση διατάξεων ΣΑΗΕ μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές/μπαταρίες).



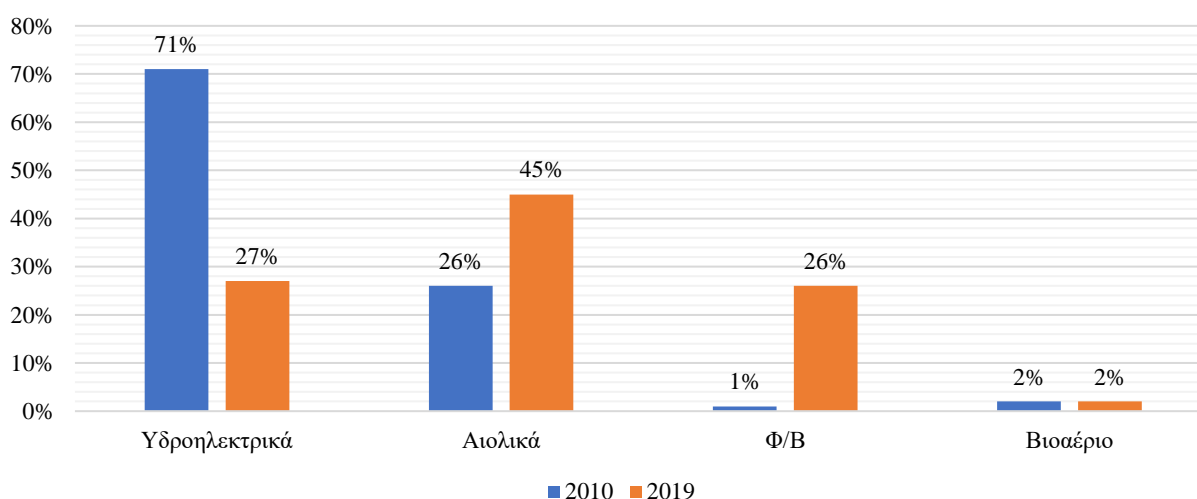


# Κεφάλαιο 1

## Η Διείσδυση των ΑΠΕ και η Ανάγκη για Αποθήκευση Ενέργειας

### 1.1 Η διείσδυση των ΑΠΕ στον ηλεκτρικό τομέα

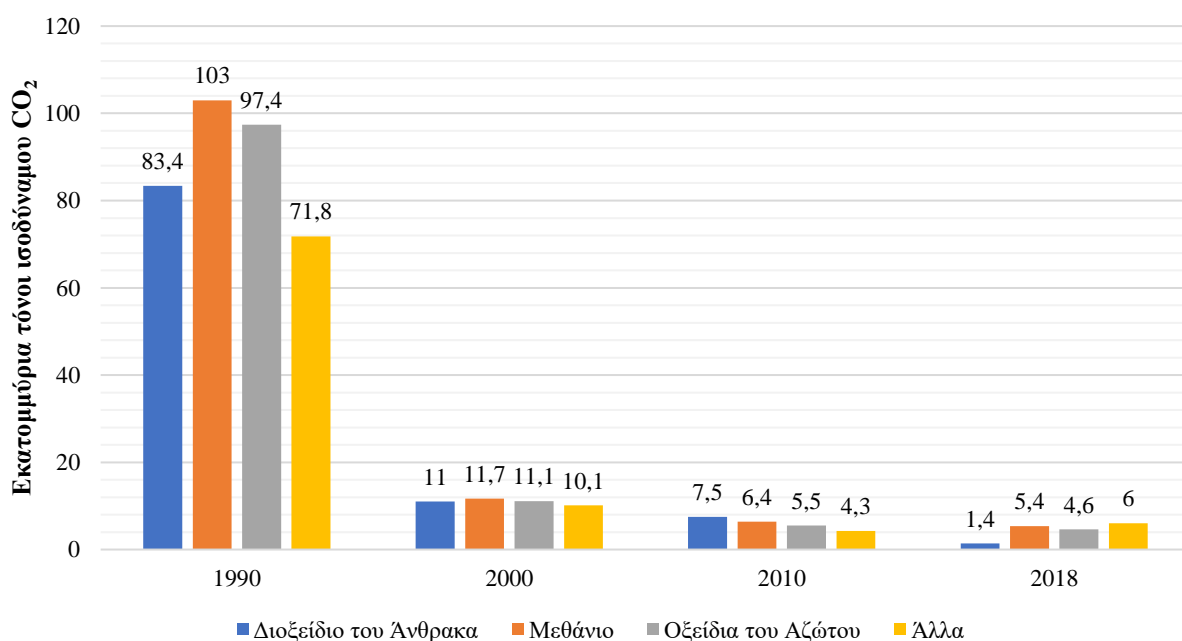
Η διείσδυση και χρήση των ΑΠΕ έχει αυξηθεί σημαντικά σε όλο τον πλανήτη, ιδιαίτερα τις τελευταίες δύο δεκαετίες, καθώς μειώνει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα [27]. Στην Ε.Ε. των 27 χωρών μελών, το ποσοστό των εκλυόμενων αερίων που αποτελεί την κύρια αιτία για την εμφάνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου, στον ενεργειακό τομέα και σε όλα τα στάδια από την παραγωγή μέχρι και την τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ανέρχεται σε 79%. Σημαντική συμμετοχή στο σχηματισμό του ποσοστού αυτού έχουν ο ενεργειακός εφοδιασμός και η μεταφορά ενέργειας. Στο πλαίσιο της απεξάρτησης από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων με κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και εν γένει την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, το υφιστάμενο σύστημα ενέργειας οδηγείται στην «ενεργειακή μετάβαση», εισάγοντας όλο και περισσότερο στο ενεργειακό μίγμα τις ΑΠΕ [22,28].



Σχήμα 1.1 – Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [25]

Η προσπάθεια αυτή αποτυπώνεται από το ποσοστό της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας προερχόμενης από ΑΠΕ σε επίπεδο Ε.Ε., το οποίο το 2019 ανερχόταν σε 39%, έναντι 16% το 2004 (αύξηση 143,75%). Στόχος της Ε.Ε. για την επίτευξη της ενεργειακής μετάβασης σ’

ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών CO<sub>2</sub> αποτελεί το γεγονός ότι έχει θέσει τη χρήση των ΑΠΕ στην τελική ακαθάριστη ενεργειακή κατανάλωση για το 2030 σε ποσοστό 32%, εκτιμώντας μία μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό τουλάχιστον 40% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 [29]. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), η συνεισφορά των ΑΠΕ στην κατανάλωση ενέργειας εμφανίζει μια αξιόλογη αύξηση κατά την περίοδο 2006 – 2017, καθώς η συνολική συνεισφορά τους το 2017 ως μερίδιο στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ανήλθε στο 24,5%, υπερδιπλασιάζοντας το σχετικό μερίδιό τους το 2006, το οποίο ήταν στο 9%. Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ με χαρακτηριστικά μεταβλητής, μη ελεγχόμενης παραγωγής (φωτοβολταϊκοί και αιολικοί σταθμοί), το ποσοστό αυτού του μεριδίου ανέρχεται ήδη πάνω από 15% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [30]. Οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα το 2018 κατέγραψαν μείωση κατά 31% σε σχέση με το 2005. Στη μείωση αυτή έχουν συντελέσει η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας, τα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και η μειωμένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της οικονομικής κρίσης των τελευταίων ετών [22,25,28].



**Σχήμα 1.2** – Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο αερίου στην Ελλάδα [25]

Για την επίτευξη του στόχου της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> σπουδαίο ρόλο αναμένεται να διαδραματίσουν τα ΣΑΗΕ σε συνδυασμό με τις ΑΠΕ. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA), μία αύξηση της ισχύος των ΣΑΗΕ κατά 450 GW μέχρι το 2050 θα μπορούσε να συμβάλει στη μείωση της θέρμανσης του πλανήτη μας κατά 2 °C [22].

## 1.2 Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) έχει αναπτυχθεί σύμφωνα με τις ανάγκες των πρόσφατων τεχνολογικών τάσεων. Οι συμβατικές λύσεις του ΣΗΕ αποτυγχάνουν να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη ζήτηση, τις προσδοκίες των καταναλωτών, την ασφάλεια των δεδομένων, την αξιοπιστία κ.λπ. Τα ζητήματα αυτά οδήγησαν στην έννοια του *Έξυπνου Δικτύου (Smart Grid)*<sup>1</sup> ως αποτέλεσμα του μετασχηματισμού του συμβατικού δικτύου, με στόχο την αύξηση της διείσδυσης της **κατανεμημένης παραγωγής**, αντικαθιστώντας το συμβατικό φορτίο και δίνοντας τη δυνατότητα στους καταναλωτές να ανταποκρίνονται οι ίδιοι στη ζήτηση. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη και ενσωμάτωση των ΣΑΗΕ αποτελεί μια συνολική και βέλτιστη λύση σε ζητήματα που αντιμετωπίζει το συμβατικό δίκτυο. Η μείωση των συμβατικών πηγών ενέργειας (ορυκτά καύσιμα) και το ζήτημα της προστασίας του περιβάλλοντος επιταχύνουν την ανάπτυξη καθαρής και βιώσιμης ενέργειας. Καθώς οι ΑΠΕ ενσωματώνονται όλο και περισσότερο στο δίκτυο, έχουν προκύψει νέα ζητήματα και προκλήσεις που αφορούν το σχεδιασμό και τη λειτουργία του [26].

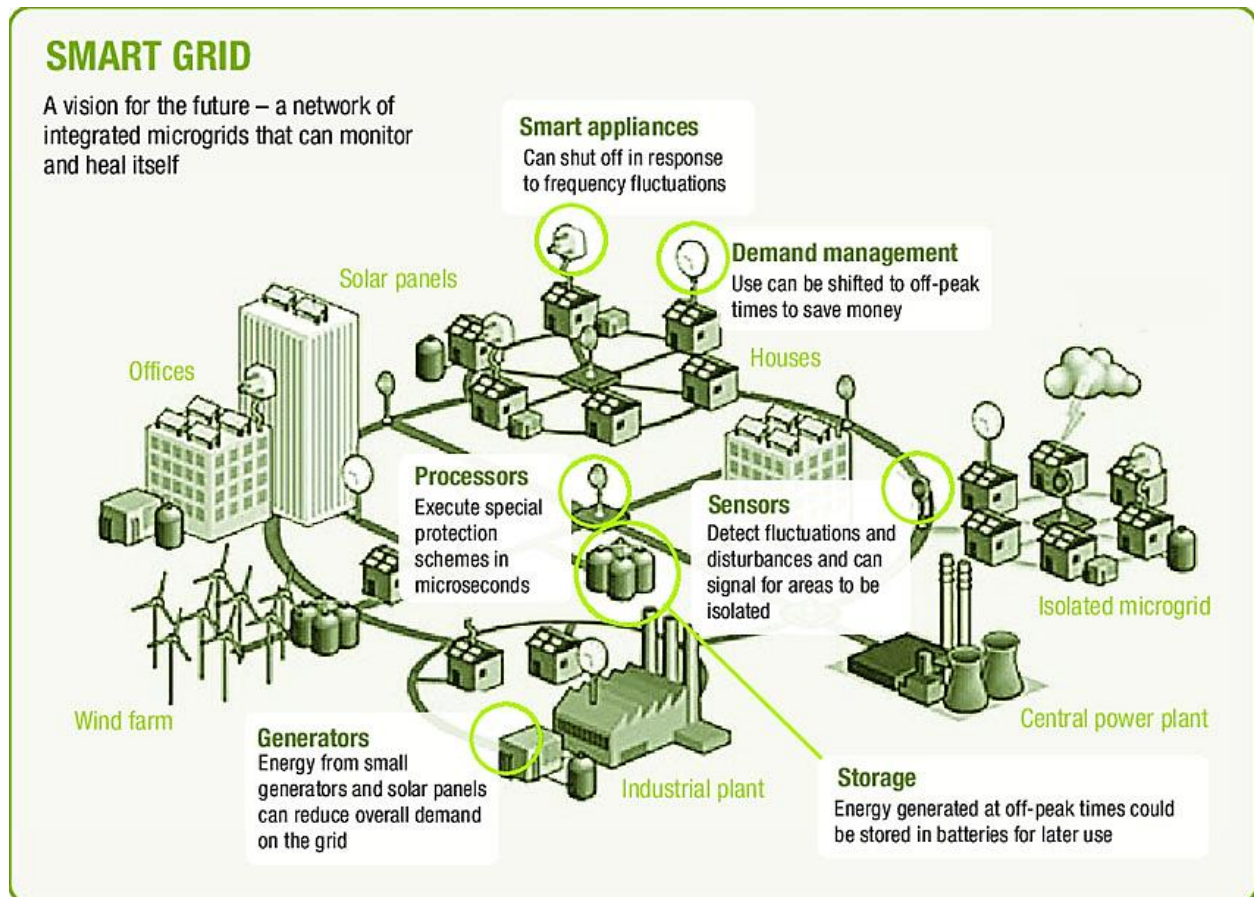
Η φύση της διακοπτόμενης και μεταβλητής παραγωγής των ΑΠΕ εξαιτίας των καιρικών συνθηκών (ήλιος, αέρας, κ.λπ.) δημιουργεί μια σειρά ζητημάτων, όπως η *ποιότητα της ενέργειας*, η *αξιοπιστία*, η *εξασφάλιση της διανομής* και η *προστασία*. Τα ΣΑΗΕ έχουν συλληφθεί ως εργαλείο για τον μετριασμό των επιπτώσεων της αβεβαιότητας των ΑΠΕ. Σε συνδυασμό με τα υψηλά επίπεδα διείσδυσης των ΑΠΕ, το δίκτυο διανομής χρειάζεται μεγαλύτερη ευελιξία για την **εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης** με σκοπό τη διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος (συχνότητα και τάση) με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Ένα επιπλέον ζήτημα για το οποίο υφίσταται η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας είναι η αποτροπή της **συμφόρησης** του δικτύου και των γραμμών μεταφοράς από υψηλή ροή ενέργειας, παρέχοντας υποστήριξη τάσης για την ομαλή διακύμανση της παραγωγής και την άμεση απόκριση σε περιπτώσεις σφαλμάτων που αφορούν τις γραμμές μεταφοράς [22,26].

Εξαιτίας του αυξανόμενου ποσοστού διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα, με κυριότερες μορφές την ηλιακή και αιολική ενέργεια, τα ΣΗΕ θα πρέπει να προσαρμοστούν σε αυτήν την αύξηση. Βασική αιτία του γεγονότος αυτού αποτελεί η κοστοβόρα απεμπλοκή από το σύστημα των γεννητριών των ΑΠΕ σε περιόδους μειωμένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το λειτουργικό κόστος των ΑΠΕ είναι χαμηλό, εντούτοις το αρχικό κόστος επένδυσης για την κατασκευή τους είναι αρκετά υψηλό και ως εκ τούτου, η παραγωγή ενέργειας είναι δαπανηρή. Με

---

<sup>1</sup> Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission), “Τα **έξυπνα δίκτυα** είναι δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να παρακολουθούν αυτόματα τις ροές ενέργειας και να προσαρμόζονται ανάλογα στις αλλαγές της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας. Όταν συνδυάζονται με έξυπνα συστήματα μέτρησης, τα έξυπνα δίκτυα φτάνουν σε καταναλωτές και προμηθευτές παρέχοντας πληροφορίες για την κατανάλωση σε πραγματικό χρόνο.”, [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en)

στόχο τη διατήρηση της υψηλής σταθερότητας της τάσης και συχνότητας του δικτύου, καθώς και την εξισορρόπηση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας καλούνται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο [22].



Σχήμα 1.3 – Μοντέλο ενός έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου (Smart Grid) [101]

# Κεφάλαιο 2

## Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

---

Οι επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η ανάγκη για μείωση των εκπομπών ρύπων και η τεράστια εξάρτηση από τα ακριβά ορυκτά καύσιμα έχουν οδηγήσει, τις τελευταίες δεκαετίες, στην ανάπτυξη νέων πηγών ενέργειας που βασίζονται σε ανανεώσιμα συστήματα [14].

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι περιβαλλοντικά καθαρές (αποκαλούνται και ως «πράσινη ενέργεια»), βρίσκονται σε αφθονία στη φύση και ως εκ τούτου, λαμβάνουν πολύ μεγάλη έμφαση παγκοσμίως. Μελέτη<sup>2</sup> προβλέπει ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από μόνες τους (με συστήματα επαρκούς αποθήκευσης) μπορούν να καλύψουν όλες τις ενεργειακές ανάγκες του κόσμου. Μία άλλη μελέτη<sup>3</sup> αναφέρει ότι το 50% της συνολικής παγκόσμιας ενέργειας μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2050. Οι αιολικές και ηλιακές πηγές, οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη μετατροπή και τον έλεγχο της ενέργειας, είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών μας αναγκών και τη μείωση των προβλημάτων της υπερθέρμανσης του πλανήτη [14].

Οι κύριες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι οι εξής:

- Ηλιακή ενέργεια
- Αιολική ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Γεωθερμική ενέργεια
- Κυματική – Ωκεάνια ενέργεια
- Παλιρροιακή ενέργεια
- Ενέργεια από Βιομάζα – Βιοενέργεια
- Κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells, FC)

### 2.1 Ηλιακή ενέργεια

Η *ηλιακή ενέργεια* είναι ανεξάντλητη και διατίθεται σε άμεση (ηλιακή ακτινοβολία υπό μορφή θερμότητας) και έμμεση μορφή (ηλεκτρική ενέργεια μετά από μετατροπή) [18]. Το ποσό της αξιοποιήσιμης σε καθημερινή βάση ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρικής

---

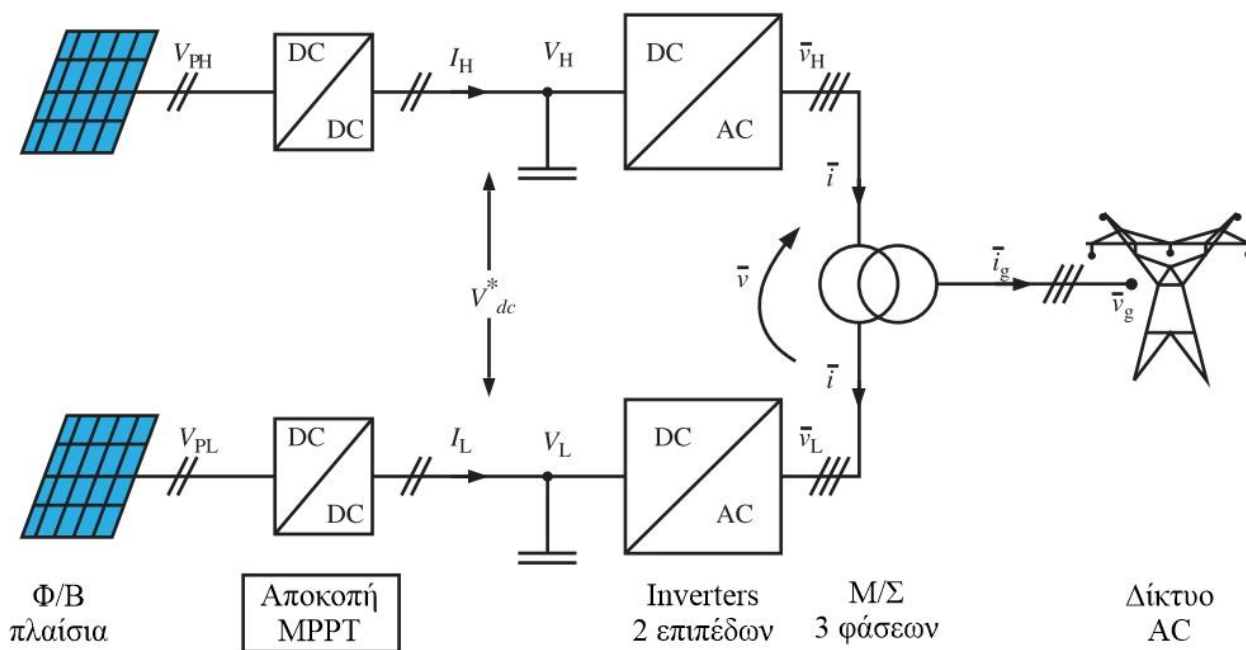
<sup>2</sup> Jacobson M.Z., Delunocchi M.A. (2009), *A path to sustainable energy by 2030*. Scientific American, 282, 58–65.

<sup>3</sup> IPCC Summary for Policy Makers (2011), *Special Report, Renewable Energy Sources*, UAE, May 5–8, 2011.

ενέργειας είναι πολύ μικρό έναντι της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που κινητοποιεί την επιστημονική κοινότητα και τις βιομηχανίες για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη και βέλτιστη αξιοποίησή της [21]. Οι συσκευές ή τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια διακρίνονται στα [64]:

- ενεργητικά ηλιακά συστήματα,
- παθητικά ηλιακά συστήματα και
- φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα.

Τα ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα βασίζονται στην εκμετάλλευση της θερμότητας που εκπέμπεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν απευθείας το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη συνεχής τάση (DC) στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη (AC), η οποία τροφοδοτεί το δίκτυο ή απομονωμένα φορτία. Σε ένα αυτόνομο σύστημα, υπάρχει συνήθως μια εφεδρική πηγή ενέργειας μπαταρίας. Στο **Σχήμα 2.1** διακρίνεται μια τυπική διαμόρφωση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, όπου μια στοιχειοσειρά φωτοβολταϊκών αποτελείται από συνδυασμό κυψελών συνδεδεμένων σε σειρά ή/και παράλληλα [14,64].



**Σχήμα 2.1** – Τυπική διαμόρφωση ενός Φ/Β συστήματος [14]

Η παραγόμενη DC τάση ενισχύεται από έναν μετατροπέα DC–DC πριν από την αναστροφή σε AC τάση με τη χρήση ενός ημιτονοειδούς μετατροπέα PWM. Ο μετατροπέας DC–DC ελέγχει τη μέγιστη ισχύ εξόδου της στοιχειοσειράς με έλεγχο MPPT. Τα κανάλια είναι παράλληλα στην πλευρά AC, των οποίων η τάση ενισχύεται από το Μ/Σ πριν συνδεθούν στο δίκτυο AC.



Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι στατικά, ασφαλή, αξιόπιστα, περιβαλλοντικά καθαρά και δεν απαιτούν καθόλου επισκευή και συντήρηση όπως τα συστήματα αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, με βάση τη σημερινή τεχνολογική κατάσταση, η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι πιο δαπανηρή από την αιολική και εξαρτάται από το κόστος εγκατάστασης και τον παράγοντα χρήσης. Το κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μικρότερο σε σύγκριση με το κόστος των φωτοβολταϊκών κυψελών [64].

Αν και, επί του παρόντος, η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι ακριβότερη από την ηλιακή θερμική, η συνεχής και εκτεταμένη έρευνα που συντελείται οδηγεί σε μεγάλη πτώση του κόστους παραγωγής, καθιστώντας την πιο ανταγωνιστική στο μέλλον. Η φωτοβολταϊκή ενέργεια αναμένεται να γνωρίσει σημαντική επέκταση σε όλο τον κόσμο. Ο οργανισμός IEEE προβλέπει ότι έως το 2050 τα φωτοβολταϊκά θα παρέχουν το 11% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθώντας τις τρέχουσες τεχνολογικές τάσεις, είναι πολύ πιθανό μελλοντικά η ισχύς των φωτοβολταϊκών να υπερβεί εκείνη του ανέμου [64].

## 2.2 Αιολική ενέργεια

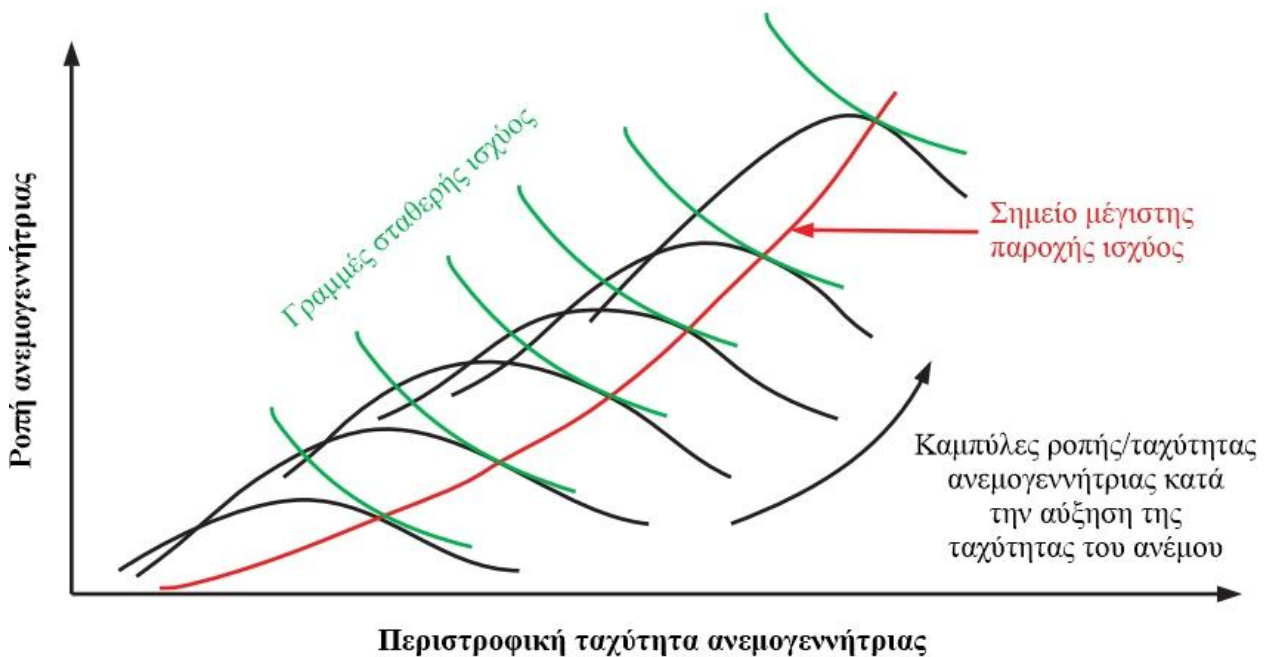
Ο άνεμος αποτελεί μία πολύ διαδεδομένη και ουσιαστικά, ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, βιώνοντας μεγάλη τεχνολογική ανάπτυξη. Οι άνεμοι δημιουργούνται από την ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της Γης και, καθώς αποτελούν θερμές μάζες μικρού βάρους, κινούνται ανοδικά. Εκτιμάται ότι, σε ετήσια βάση, το παγκόσμιο αιολικό δυναμικό ανέρχεται στις 26.000 TWh, εκ των οποίων οι περίπου 9.000 TWh είναι πρακτικά αξιοποιήσιμες, λόγω οικονομικών και άλλων παραγόντων [18,21,64].

Οι *ανεμογεννήτριες (wind turbines)* είναι τα συστήματα που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ή/και ηλεκτρική ενέργεια. Πολλές υφιστάμενες εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο χρησιμοποιούν επαγωγικές μηχανές σταθερής ταχύτητας, τύπου κλωβού [14].

Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται σε δύο στάδια: Στο πρώτο στάδιο, η περιστροφική κίνηση του άξονα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας οδηγεί σε μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική και εν συνεχεία, στο δεύτερο στάδιο, η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική [64].

Η εγκατάσταση ενός *αιολικού πάρκου (wind farm)*, δηλαδή μίας συστοιχίας ανεμογεννητριών σε χερσαίες, αλλά και υπεράκτιες περιοχές όπου υπάρχει σημαντικό αιολικό δυναμικό, γίνεται με σκοπό τη διοχέτευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, κάτι που αποτελεί η σημαντικότερη εφαρμογή των ανεμογεννητριών. Πέραν από τη διασύνδεση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο, είναι δυνατή και η αυτόνομη εγκατάστασή τους με σκοπό την ηλεκτρική τροφοδότηση μεμονωμένων, μη ηλεκτροδοτούμενων εγκαταστάσεων, καθώς και για την παραγωγή θερμότητας [21].

Το **Σχήμα 2.2** δείχνει τη ροπή που αναπτύσσεται στην ανεμογεννήτρια ως συνάρτηση της ταχύτητας σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Εάν η ταχύτητα του ανέμου παραμείνει σταθερή και η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας αυξηθεί, τότε η ροπή αυξάνεται, φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται. Στην οικογένεια των καμπυλών υπερτίθεται ένα σύνολο καμπυλών σταθερής ισχύος μέγιστης τιμής που εφάπτονται στις αντίστοιχες καμπύλες ροπής – ταχύτητας. Για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας μπορεί να μεταβάλλεται έτσι ώστε να μπορεί να αποδίδει τη μέγιστη ισχύ (μέγιστη αεροδυναμική απόδοση) μέσω του συστήματος ελέγχου παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (*Maximum Power Point Tracker, MPPT*) [14].

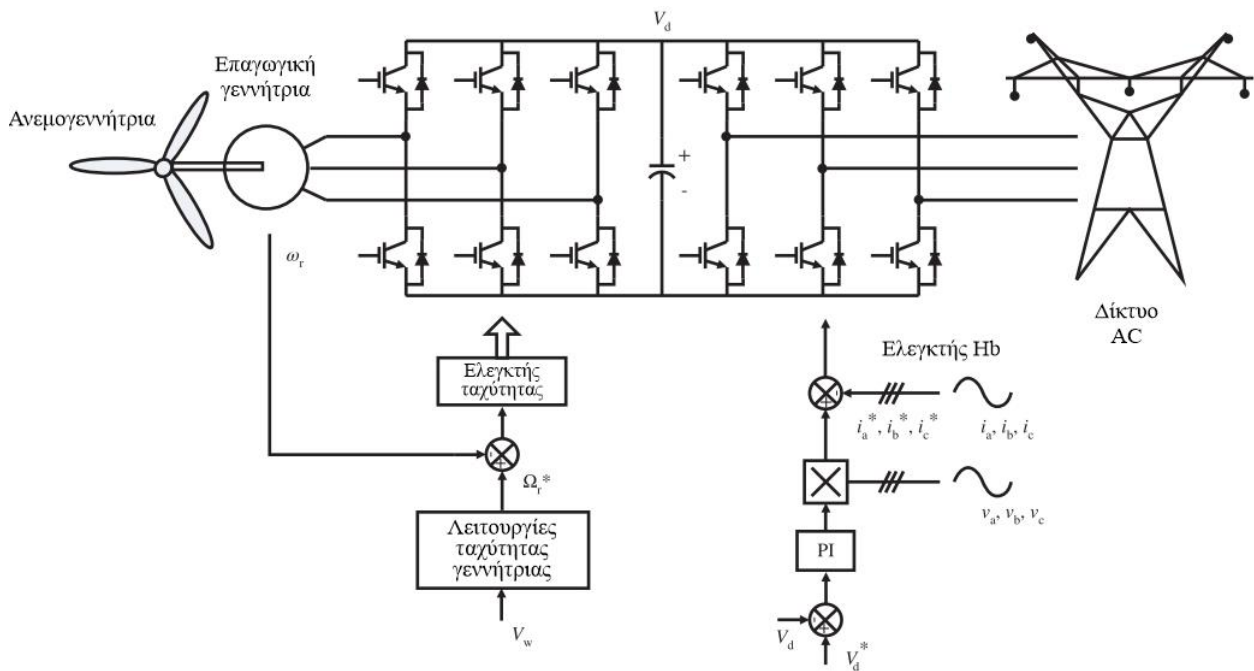


**Σχήμα 2.2** – Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου [14]

Η διέγερση της γεννήτριας παρέχεται από το μετατροπέα PWM, προκειμένου να διατηρείται σταθερό το ρεύμα διέγερσης ή η ροή. Ο διανυσματικός έλεγχος εντός του βρόχου ελέγχου ταχύτητας ελέγχει τα ενεργά ρεύματα και τα ρεύματα διέγερσης. Ο ελεγκτής MPPT αναλαμβάνει το προγραμματισμό της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η ισχύς μεταβλητής τάσης/μεταβλητής συχνότητας μετατρέπεται στη συνέχεια σε σταθερή τάση και συχνότητα μέσω ενός συστήματος μετατροπέα DC-link, πριν τροφοδοτηθεί στο δίκτυο. Ο ρόλος του μετατροπέα της γραμμής είναι να διατηρεί σταθερή την τάση DC-link. [14].

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας, των ηλεκτρονικών ισχύος και των drives μηχανών έχουν καταστήσει την αιολική ενέργεια πολύ ανταγωνιστική, σχεδόν ίση με αυτή της ισχύος από ορυκτά καύσιμα [14].





Σχήμα 2.3 – Τυπικό σύστημα αιολικής ενέργειας με μετατροπείς PWM [14]

Μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι ότι η διαθεσιμότητά της είναι σποραδικής φύσης και μπορεί να απαιτεί εφεδρική ισχύ από σταθμούς παραγωγής με χρήση ορυκτών καυσίμων ή πυρηνικής ενέργειας. Φυσικά, η πλεονάζουσα αιολική ενέργεια, όταν υπάρχει ισχυρό αιολικό δυναμικό, μπορεί να αποθηκευτεί για αξιοποίηση σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα προσφέρουν γενικά υψηλότερη ενεργειακή απόδοση από τα χερσαία, αν και η εγκατάσταση και η συντήρησή τους είναι πιο δαπανηρές [14].

### 2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την πιο διαδεδομένη και μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το 1/5 της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή της βασίζεται στα υδρολογικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, δηλαδή την ποσότητα των βροχοπτώσεων ανά χρονολογική περίοδο, τη μορφολογία του εδάφους, την ύπαρξη υδάτινων πόρων κ.ά. [21,64].

Η φυσική, επιφανειακή υδάτινη ροή μεταξύ δύο σημείων διαφορετικού υψομέτρου δημιουργεί υδροστατική πίεση, ικανή να κινήσει έναν υδροστρόβιλο (μετατροπή δυναμικής ή/και κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική), θέτοντας με τη σειρά του σε περιστροφική κίνηση μία γεννήτρια (μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική) προκειμένου να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια [21,64].

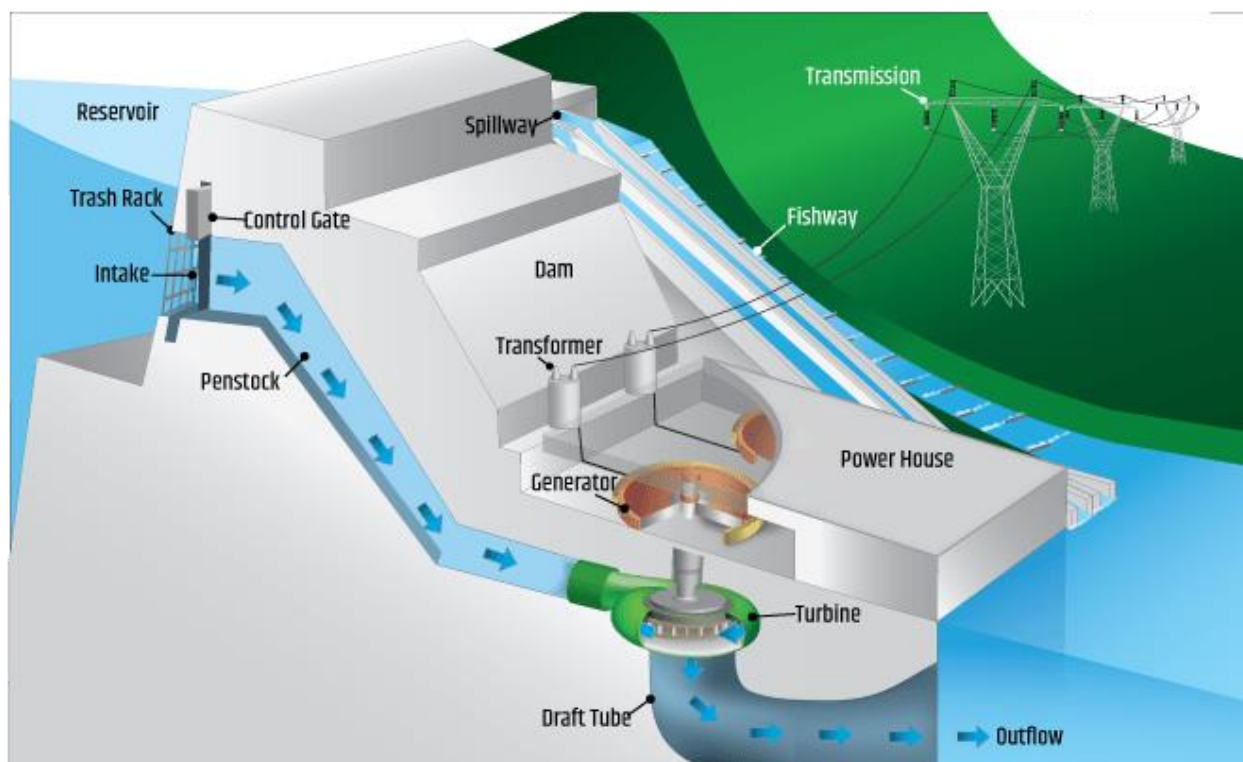
Καθώς η υδάτινη επάρκεια καθορίζεται από τη διαδοχή των εποχών και τα κλιματικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, καθίσταται η ανάγκη κατασκευής τεχνητών ταμιευτήρων νερού

με χρήση φραγμάτων σε ποτάμια ή λίμνες για την παροχή ύδατος προς την υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο σημείων (ταμιευτήρας – υδροηλεκτρική μονάδα) και η χωρητικότητα του ταμιευτήρα αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες για την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [21,64].

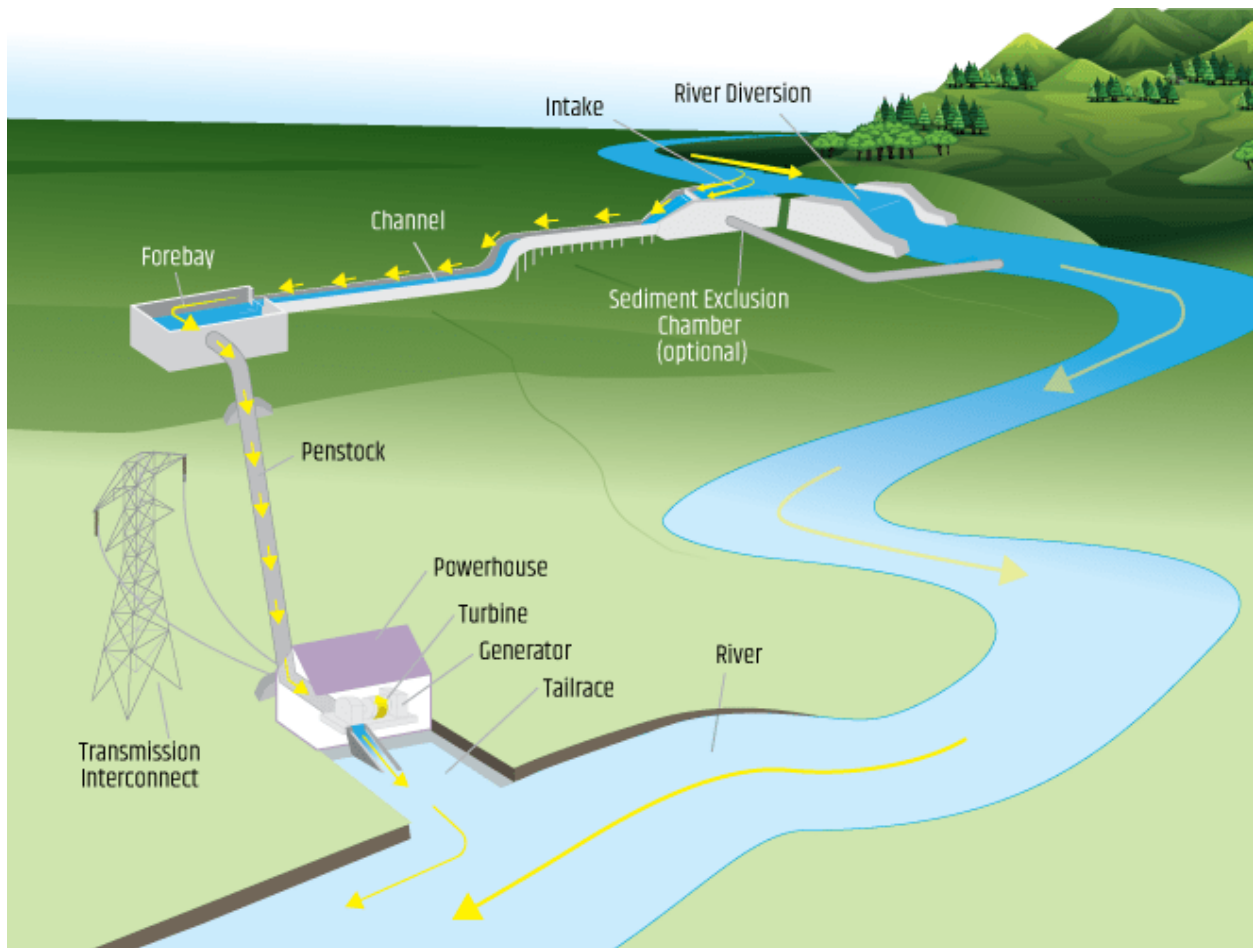
Αν και η παραγωγή ενέργειας από υδροηλεκτρικές μονάδες δεν είναι ρυπογόνος, εντούτοις, τα έργα κατασκευής μεγάλων εγκαταστάσεων ταμιευτήρων, φραγμάτων και σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζουν αρνητικά και σε πολύ μεγάλο βαθμό το οικοσύστημα (φυσικό περιβάλλον, άγρια χλωρίδα και πανίδα), ενέχοντας παράλληλα κοινωνικοοικονομικούς κινδύνους. Μικρότερης κλίμακας εγκαταστάσεις που εκμεταλλεύονται τη ροή υδάτων ποταμιών και καναλιών παρουσιάζουν μικρότερη περιβαλλοντική όχληση [21,64].

**Πίνακας 2.1** – Ταξινόμηση υδροηλεκτρικών σταθμών βάσει της εγκατεστημένης ισχύος [65]

Υδροηλεκτρικός σταθμός	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)
Μεγάλης κλίμακας	30
Μεσαίας κλίμακας	10
Μικρής κλίμακας	100



**Σχήμα 2.4** – Υδροηλεκτρικός σταθμός μεγάλης κλίμακας [65]



Σχήμα 2.5 – Υδροηλεκτρικός σταθμός μικρής κλίμακας [65]

## 2.4 Γεωθερμική ενέργεια

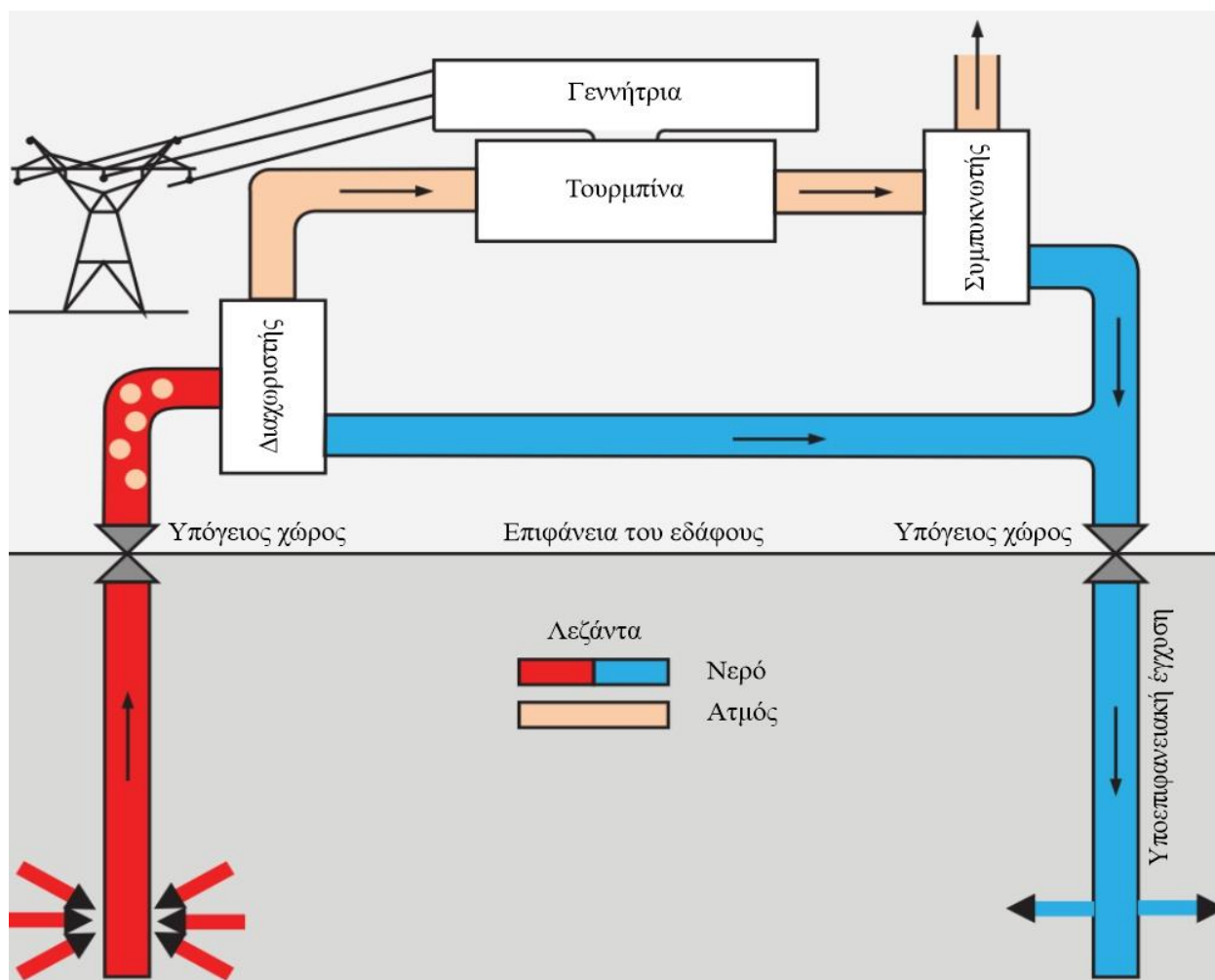
Η *γεωθερμική ενέργεια* εξάγεται από τη θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται και παράγεται κάτω από τον εξωτερικό φλοιό της Γης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ύπαρξης αυτής της ενέργειας είναι τα ηφαίστεια, οι θερμές πηγές κ.λπ. Στην τελευταία περίπτωση, το νερό της βροχής εισχωρεί στη Γη και θερμαίνεται από τη γεωθερμική ενέργεια. Η προερχόμενη από τη Γη αποθηκευμένη ενέργεια είναι αποτέλεσμα δημιουργίας από τον ήλιο (αποτελεί μορφή έμμεσης ηλιακής ενέργειας), ενώ η παραγόμενη ενέργεια προέρχεται από τη ραδιενεργή αποσύνθεση ορυκτών που βρίσκονται μέσα στη Γη. Οι πηγές γεωθερμικής ενέργειας προέρχονται από τις περιφερειακές γεωθερμικές ζώνες θερμότητας της Γης, έχοντας θερμοκρασιακό εύρος από 25 °C έως 350 °C. Υπάρχουν τρεις (3) βασικοί τύποι γεωθερμικής ενέργειας [14,21,64]:

- Για *άμεση χρήση* (π.χ. το σύστημα τηλεθέρμανσης), όπου η ενέργεια ρέει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια της γης (π.χ. μια πηγή ζεστού νερού).
- Οι *γεωθερμικές αντλίες θερμότητας* (*αβαθής γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας*) για την παροχή θέρμανσης σε κατοικίες, όπου το από υψηλότερα στρώματα της γης προερχόμενο

νερό εγχέεται σε ένα οριζόντιο ή κάθετο σύστημα σωλήνων με σκοπό την απορρόφηση της θερμότητας.

- Η γεωθερμική παραγωγή ηλεκτρισμού (βαθιά γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας), όπου το νερό αντλείται από βαθύτερα στρώματα της γης, εγχέεται μέσω μίας σωλήνας, μεταφέρει γεωθερμική θερμότητα και μετατρέπεται σε ατμό. Στη συνέχεια, ο παραγόμενος ατμός δίνει κίνηση σε μια στροβιλογεννήτρια, όπως συμβαίνει σ' ένα συμβατικό ατμοηλεκτρικό σταθμό.

Το **Σχήμα 2.6** δείχνει την αρχή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τη γεωθερμία από ένα σταθμό εκτόνωσης διαφασικού ρευστού (*Flash Steam Plant*). Σε αυτή τη μέθοδο, το νερό εγχέεται σε μία σωλήνα βάθους περίπου 1.5 έως 3 km και επιστρέφει πλέον ζεστό ή σε μορφή ατμού υπό πίεση μέσω μίας άλλης σωλήνας. Το νερό διαχωρίζεται από τον ατμό μέσω ενός διαχωριστή και ανακυκλώνεται. Ο ατμός οδηγεί ένα σύστημα στροβιλογεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σ' ένα σταθμό παραγωγής ξηρού ατμού (*Dry Steam Plant*), το νερό μετατρέπεται πλήρως σε ξηρό ατμό, ενώ σε μια μονάδα δευτερεύοντος ρευστού (*Binary Cycle Power Plant*), το ζεστό νερό ανταλλάσσει θερμότητα με ένα ρευστό χαμηλού σημείου βρασμού για τη μετατροπή του σε ατμό και την κίνηση ενός στροβίλου [14,18].



**Σχήμα 2.6** – Αρχή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός σταθμού εκτόνωσης διαφασικού ρευστού [14]

Η γεωθερμική ενέργεια είναι οικονομική, αξιόπιστη και πάντα διαθέσιμη σε αντίθεση με την αιολική και την ηλιακή ενέργεια. Η χρήση της είναι ευρέως διαδεδομένη σε πολλές εφαρμογές, όπως τα συστήματα αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού, τα δίκτυα τηλεθέρμανσης, οι ιχθυοκαλλιέργειες και η θέρμανση θερμοκηπίων [14,64].

## 2.5 Κυματική – Ωκεάνια ενέργεια

Η παραγόμενη ενέργεια των κυμάτων της επιφάνειας του ωκεανού που προκαλούνται από τον άνεμο καλείται *κυματική ενέργεια*. Η συγκεκριμένη τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Η επιφάνεια του ωκεανού διέρχεται από ανοδικές και καθοδικές ταλαντωτικές κινήσεις εξαιτίας των κυμάτων. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη χρήση ενός μετατροπέα ενέργειας κυμάτων (Wave Energy Converter, WEC). Υπάρχουν περισσότερες από 1000 πατέντες για το WEC. Ένας δημοφιλής τύπος είναι ο μετατροπέας Pelamis (βλ. **Εικόνα 2.1**). Ένας αριθμός κυλινδρικών τμημάτων του μετατροπέα Pelamis, που βρίσκεται αγκυρωμένος στον πυθμένα του ωκεανού, συνδέονται με αρθρώσεις, οι οποίες παράγουν την ανοδική και καθοδική κίνηση προκειμένου να αντληθεί λάδι με χρήση ενός εμβόλου, το οποίο με τη σειρά του κινεί έναν υδραυλικό κινητήρα. Ο κινητήρας συνδέεται με μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG). Η παραγόμενη, ακανόνιστης κυματομορφής AC τάση ανορθώνεται σε DC, η οποία ενισχύεται με μία διάταξη μονάδων συνδεδεμένων σε σειρά. Στη συνέχεια, η DC τάση αναστρέφεται σε AC για την παροχή ρεύματος σε τοπικούς καταναλωτές ή ενισχύεται με τη χρήση μετασχηματιστή για σύνδεση στο δίκτυο [14].



*Εικόνα 2.1* – Μετατροπέας ενέργειας κυμάτων της εταιρείας PELAMIS WAVE POWER (PWP) [66]

Ωστόσο, η συνολική διαθέσιμη κυματική ισχύς είναι χαμηλή και ακριβή, αλλά το κόστος ανά κιλοβατώρα είναι γενικά χαμηλό. Η κυματική ισχύς έχει το πλεονέκτημα ότι είναι σταθερή και προβλέψιμη, σε αντίθεση με αυτή των αιολικών και Φ/Β συστημάτων, αλλά είναι ευάλωτη σε άσχημες καιρικές συνθήκες. Το πρώτο πειραματικό πάρκο κυματικής ενέργειας εγκαταστάθηκε στην Πορτογαλία το 2008, με ισχύ 2.25 MW [14].



## 2.6 Παλιρροιακή ενέργεια

Η *παλιρροιακή ενέργεια* είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που εκμεταλλεύεται την ενέργεια από τις παλίρροιες λόγω της βαρυτικής έλξης γης – σελήνης και της περιστροφικής κίνησης της γης. Η σεληνιακή έλξη έχει μια περίοδο κύκλου 12 ωρών, δηλαδή, ανά 12 ώρες η στάθμη του νερού φτάνει σε ένα ανώτατο επίπεδο (πλημμυρίδα) κι έπειτα σ' ένα κατώτερο (άμπωτη). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τη χρήση μιας κομπλαρισμένης σύγχρονης γεννήτριας μ' ένα βυθισμένο στο νερό υδροστρόβιλο αξονικής ροής (όπως μια ανεμογεννήτρια) που περιστρέφεται αργά προς μία κατεύθυνση. Υπάρχουν και συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται το νερό που αποθηκεύεται σε μια τεχνητή δεξαμενή (λίμνη) με φράγμα στη φάση της πλημμυρίδας. Κατά την άμπωτη, το χαμηλό δυναμικό του νερού της δεξαμενής κινεί έναν υδροστρόβιλο, ο οποίος με τη σειρά του οδηγεί μια σύγχρονη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η δυναμική παλιρροιακή ισχύς συνδυάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυξομειώσεις της στάθμης του νερού κατά μήκος του φράγματος της δεξαμενής. Μειονέκτημα της παραπάνω εγκατάστασης που εκμεταλλεύεται την παλιρροιακή ενέργεια αποτελεί το ιδιαίτερα δαπανηρό κόστος κατασκευής [14,21].

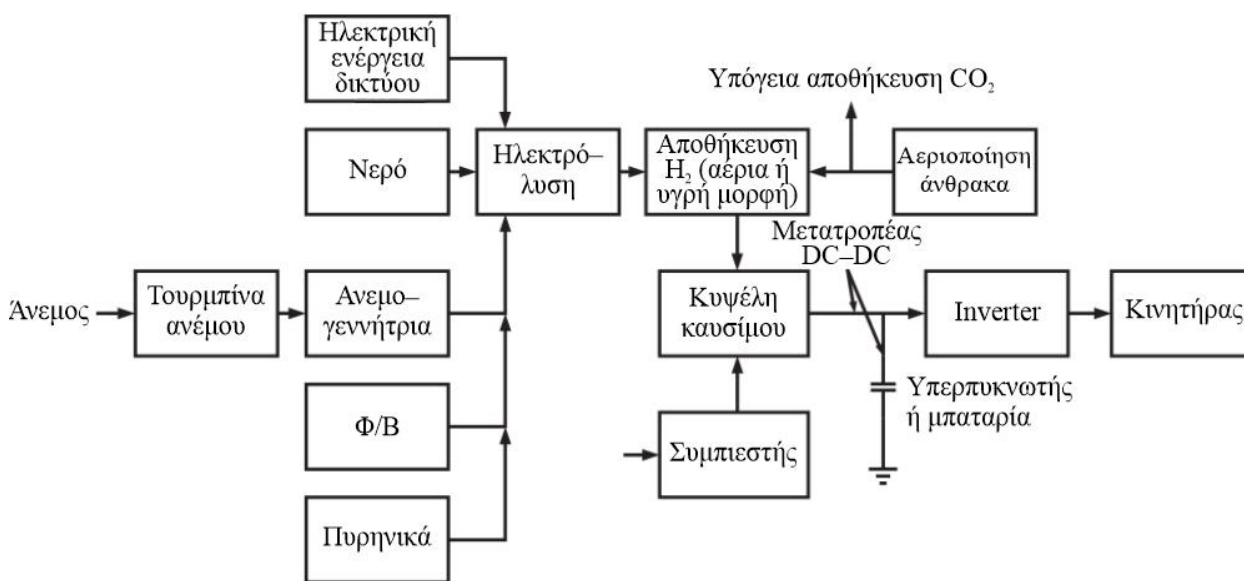
## 2.7 Ενέργεια από Βιομάζα – Βιοενέργεια

*Βιομάζα* είναι η ύλη οργανικής (βιολογικής) προέλευσης. Περιλαμβάνει βιοαποικοδομήσιμα προϊόντα, υπολείμματα και απόβλητα, παράδειγμα των οποίων αποτελούν οι ενεργειακές γεωργικές καλλιέργειες (ελαιοκράμβη, ηλιάνθος, καλάμια, σόργο, ευκάλυπτος κ.λπ.), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, ζωικά λίπη, έλαια κ.λπ.), την ιχθυοκαλλιέργεια, τα προϊόντα δασικών κατεργασιών/διαδικασιών (πριονίδια, κλαδιά, καυσόξυλα, κουκούτσια κ.λπ.), καθώς και τα προϊόντα με βιολογικό χαρακτήρα που προέρχονται από τη βιομηχανία τροφίμων και τα οικιακά σκουπίδια [18,21,64,67]. Η διαδικασία της φωτοσύνθεσης των φυτικών οργανισμών έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή της βιομάζας, ως προϊόν της αποθηκευμένης ηλιακής ενέργειας εντός της οργανικής ύλης. Η παραγόμενη ενέργεια που πραγματοποιείται με την αντιστροφή της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης των φυτικών οργανισμών και της εκμετάλλευσης του ποσού της αποθηκευμένης ενέργειας των ζωικών οργανισμών που προσλαμβάνουν από την τροφή τους, αλλά και των αποβλήτων τους, ονομάζεται *βιοενέργεια*, και αποδίδεται από τη βιομάζα προς εκμετάλλευσή της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας, ψύξης και υγρών βιοκαυσίμων (βιοντίζελ, βιοαιθανόλη) [18,21,64]. Με την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας επιτυγχάνεται ανακύκλωση του άνθρακα και δεν απελευθερώνεται επιπλέον CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, όπως π.χ. γίνεται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, λόγοι για τους οποίους θεωρείται ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας [18,21].

## 2.8 Κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells, FC)

Η *κυψέλη καυσίμου* είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή, στην οποία το υδρογόνο ( $H_2$ ) είναι το αέριο καύσιμο που συνδυάζεται με το οξυγόνο ( $O_2$ ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού. Οι στοιβές των κυψελών καυσίμου μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμες με μπαταρίες χαμηλής τάσης συνδεδεμένες σε σειρά. Η παραγόμενη DC τάση από την κυψέλη καυσίμου, αφού πρώτα ενισχυθεί από ένα μετατροπέα DC–DC, μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω ενός μετατροπέα για AC τροφοδοσία ή άλλες εφαρμογές. Χαρακτηριστικές ιδιότητες των κυψελών καυσίμου είναι η *υψηλή αντίσταση εξόδου* και η *αργή μεταβατική απόκριση* [14].

Το υδρογόνο παράγεται από νερό με τη διαδικασία της *ηλεκτρόλυσης* ή από *καύσιμα υδρογονανθράκων* (βενζίνη και μεθανόλη). Η κυψέλη καυσίμου ορίζεται ως πηγή καθαρής ενέργειας εάν η παραγωγή του υδρογόνου πραγματοποιείται με τη χρήση περιβαλλοντικά καθαρών πηγών ενέργειας (ανεμογεννήτριες, Φ/Β συστήματα), ενώ παρέχει ασφαλή χρήση επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση (συνήθως 54%). Τα είδη των κυψελών καυσίμου ορίζονται από τους τύπους των ηλεκτρολυτών τους και ταξινομούνται σε *κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων* (*Proton Exchange Membrane FC, PEMFC*), *φωσφορικού οξέος* (*Phosphoric Acid FC, PAFC*), *άμεσης μεθανόλης* (*Direct Methanol FC, DMFC*) και *στερεής κατάστασης* (*Solid–State FC, SoFC*). Όλα τα είδη είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, με το PEMFC να είναι το πιο οικονομικό, με υψηλή πυκνότητα ισχύος και χαμηλή θερμοκρασία ( $60\text{ }^\circ\text{C} - 100\text{ }^\circ\text{C}$ ), βρίσκοντας σημαντική εφαρμογή στη βιομηχανία των *ηλεκτρικών οχημάτων* (*Electric Vehicles, EV*) που βασίζονται στις κυψέλες καυσίμου. Η εντατική έρευνα και ανάπτυξη μείωσε δραματικά το κόστος και τον όγκο των κυψελών καυσίμου. Στο **Σχήμα 2.7** περιγράφεται η αρχή λειτουργίας ενός EV που βασίζεται στις κυψέλες καυσίμου και συνοψίζονται οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [14].



Σχήμα 2.7 – Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλες καυσίμου και μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [14]

Πιο αναλυτικά, ένα PEMFC ενός ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλες καυσίμου παράγει DC ισχύ, η οποία ενισχύεται από ένα μετατροπέα DC–DC και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ισχύ μεταβλητής τάσης/μεταβλητής συχνότητας για να θέσει σε λειτουργία τον AC κινητήρα του οχήματος. Εφόσον η κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να απορροφήσει την αναγεννητική ισχύ του οχήματος, απαιτείται η χρήση μπαταρίας ή υπερπυκνωτή (Ultracapacitor, UC) στον ακροδέκτη της (μέσω άλλου μετατροπέα DC–DC). Η μπαταρία/υπερπυκνωτής παρέχει επίσης ισχύ κατά την επιτάχυνση, λόγω της αργής απόκρισης της κυψέλης καυσίμου. Το καύσιμο υδρογόνο τροφοδοτείται από μια δεξαμενή, όπου μπορεί να αποθηκευτεί με τη μορφή κρυογονικά ψυχόμενου υγρού ή συμπιεσμένου αερίου. Όπως προαναφέραμε, το υδρογόνο παράγεται συνήθως από νερό που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο ή από περιβαλλοντικά καθαρές πηγές όπως ο άνεμος, τα φωτοβολταϊκά ή τα πυρηνικά. Το δε οξυγόνο, για την κυψέλη καυσίμου, λαμβάνεται από τον αέρα μέσω ενός συμπιεστή [14].



# Κεφάλαιο 3

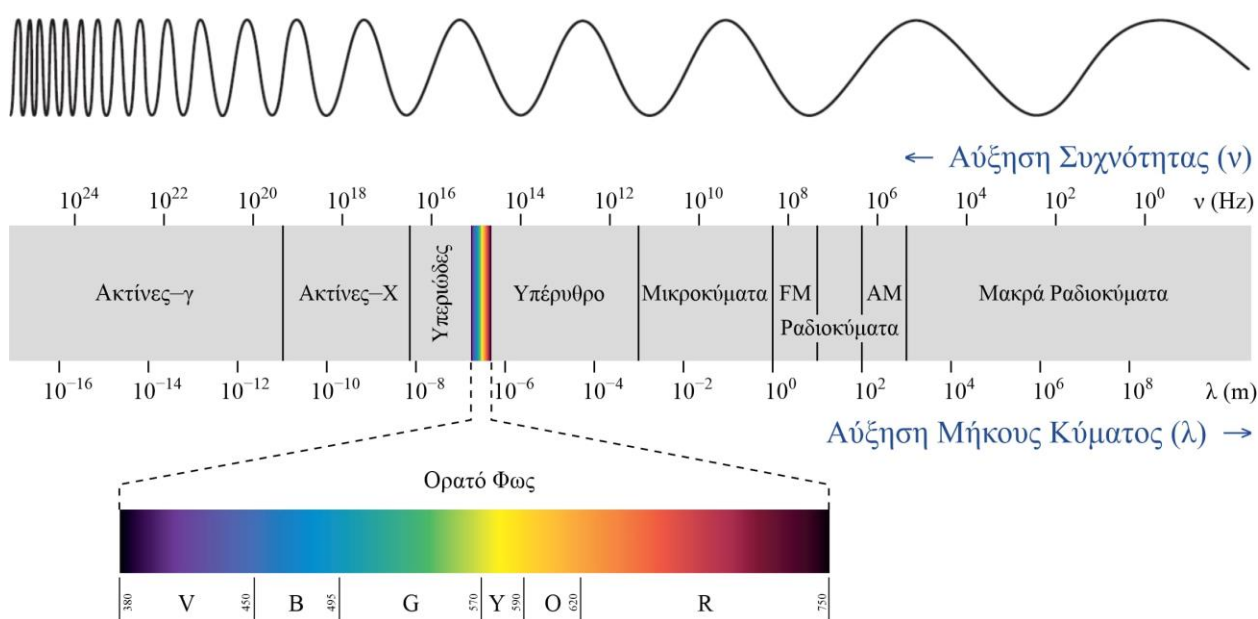
## Ο Ήλιος ως Πηγή Ενέργειας

Ο ήλιος είναι ένας τεράστιος πυρηνικός αντιδραστήρας που βρίσκεται στο κέντρο του ηλιακού μας συστήματος, σε απόσταση περίπου 150 εκατομμυρίων χιλιομέτρων από τη Γη. Παράγει τεράστιες ποσότητες ενέργειας που εκπέμπονται στο διάστημα, κυρίως με τη μορφή φωτός και θερμότητας [16].

Μόνο ένα μικρό μέρος της ημερήσιας παραγωγής του ηλίου φτάνει στη Γη, θερμαίνοντας τον πλανήτη και τροφοδοτώντας σχεδόν όλες τις μορφές ζωής. Κάθε γραμμάριο ενέργειας που χρειάζεται το σώμα του ανθρώπου προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια. Μόνο ένα μικρό μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας θα παρείχε παραπάνω από αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσει τον κόσμο μας [16].

### 3.1 Ηλιακή ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ενέργεια του ηλίου είναι γνωστή ως *ηλιακή ακτινοβολία* (αναφέρεται και ως *ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία*). Περιλαμβάνει ακτίνες-X, υπεριώδη ακτινοβολία, φως και θερμότητα. Αρκετές άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας απελευθερώνονται επίσης από τον ήλιο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1** [16].



Σχήμα 3.1 – Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [31]

Η θερμοκρασία επιφάνειας του ηλιακού δίσκου εκτιμάται στους  $T_{\text{sun}} = 5778 \text{ }^\circ\text{K}$ . Δεδομένης της υψηλής αυτής θερμοκρασίας, ο ήλιος θεωρείται ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας και απορρόφησης, δηλαδή εκπέμπει ως ένα μέλαν σώμα (*blackbody*) με φασματική κατανομή παραπλήσια αυτής στο διάστημα. Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με το μήκος κύματος, δίνεται από το νόμο του Planck [01,02,03]:

$$u(\lambda) = \frac{2h_p\pi c^3}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h_p c/\lambda}{kT_{\text{sun}}}\right) - 1} \quad (3.1)$$

όπου:

- u** η φασματική ένταση εκπομπής του ηλίου (σε  $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ )
- λ** το μήκος κύματος (σε  $\mu\text{m}$ )
- T<sub>sun</sub>** η απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας του ηλιακού δίσκου σε  $^\circ\text{Kelvin}$  ( $T_{\text{sun}} = 5778 \text{ }^\circ\text{K}$ )
- h<sub>p</sub>** η σταθερά του Planck ( $h_p = 6.625 \times 10^{-34} \text{ W}$ )
- k** η σταθερά του Boltzmann ( $k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )
- c** η ταχύτητα του φωτός στο κενό ( $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

Έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση [03]:

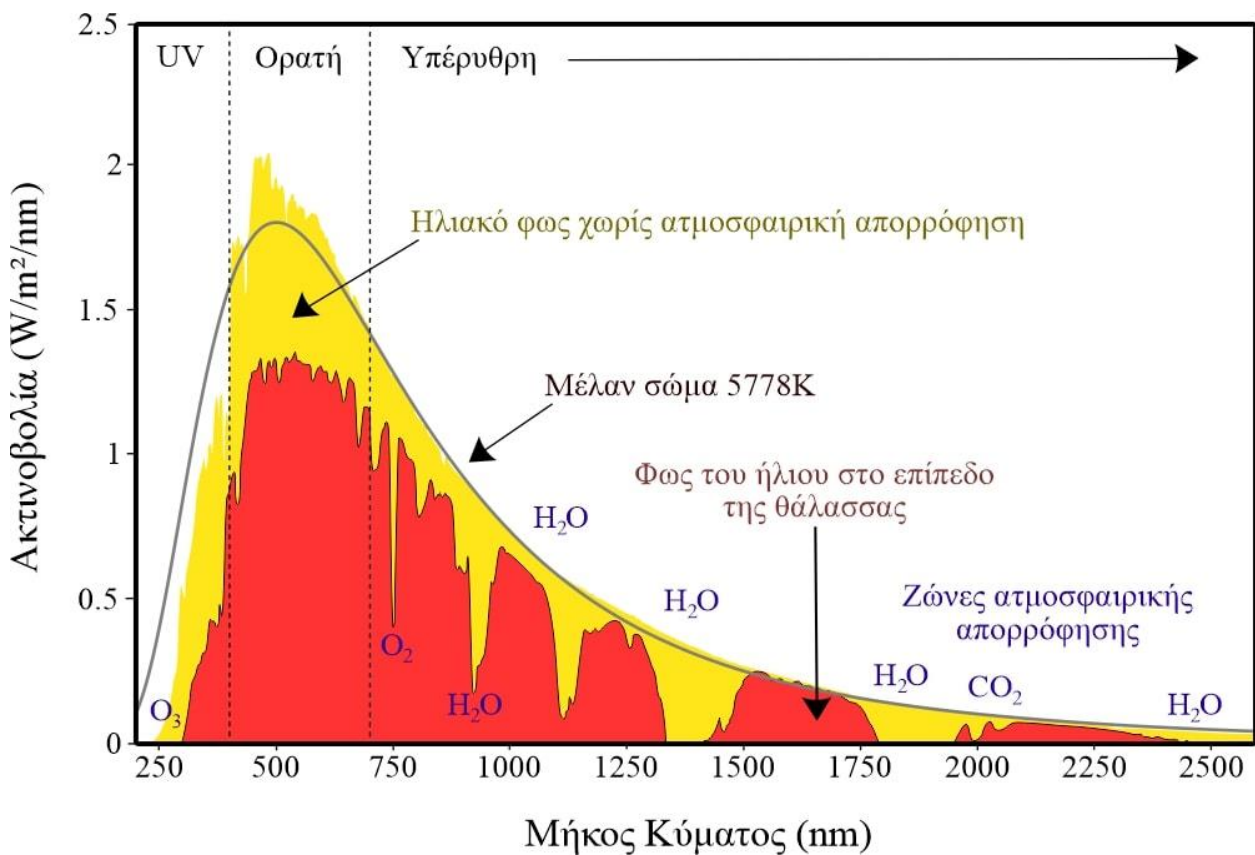
$$u_0(\lambda) = \frac{4pD_{\text{sun}}^2/4}{4\pi AU^2} u(\lambda) \quad (3.2)$$

όπου:

- D<sub>sun</sub>** η διάμετρος του ηλίου ( $\simeq D_{\text{sun}} = 1.39 \times 10^6 \text{ km}$ )
- AU** (αστρονομική μονάδα) η μέση απόσταση ηλίου – Γης ( $AU = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ )

Αν και ο ήλιος απελευθερώνει πολλές μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, το μεγαλύτερο μέρος της (περίπου 40%) αποτελείται από υπέρυθη ακτινοβολία (ή θερμότητα) και ορατό φως (περίπου 55%). Οι Φ/Β μονάδες συλλαμβάνουν μόνο ένα μέρος αυτής της ενέργειας – κυρίως την ενέργεια που περιέχεται στο ορατό και κάτω άκρο των υπέρυθρων τμημάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία) [16].

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ηλίου ταξιδεύει σχεδόν ανεμπόδιστα στο διάστημα μέχρι να συναντήσει την ατμόσφαιρα της Γης. Μόλις εισέλθει στην ατμόσφαιρα, το στρώμα του όζοντος, τα σύννεφα, οι υδρατμοί και οι ατμοσφαιρικοί ρύποι (συμπεριλαμβανομένης της σκόνης) είτε απορροφούν είτε αντανακλούν μεγάλο μέρος της ενέργειας του ηλίου, είτε την ακτινοβολούν πίσω στο διάστημα [16].



Σχήμα 3.2 – Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη (για οριζόντιο επίπεδο) [32]

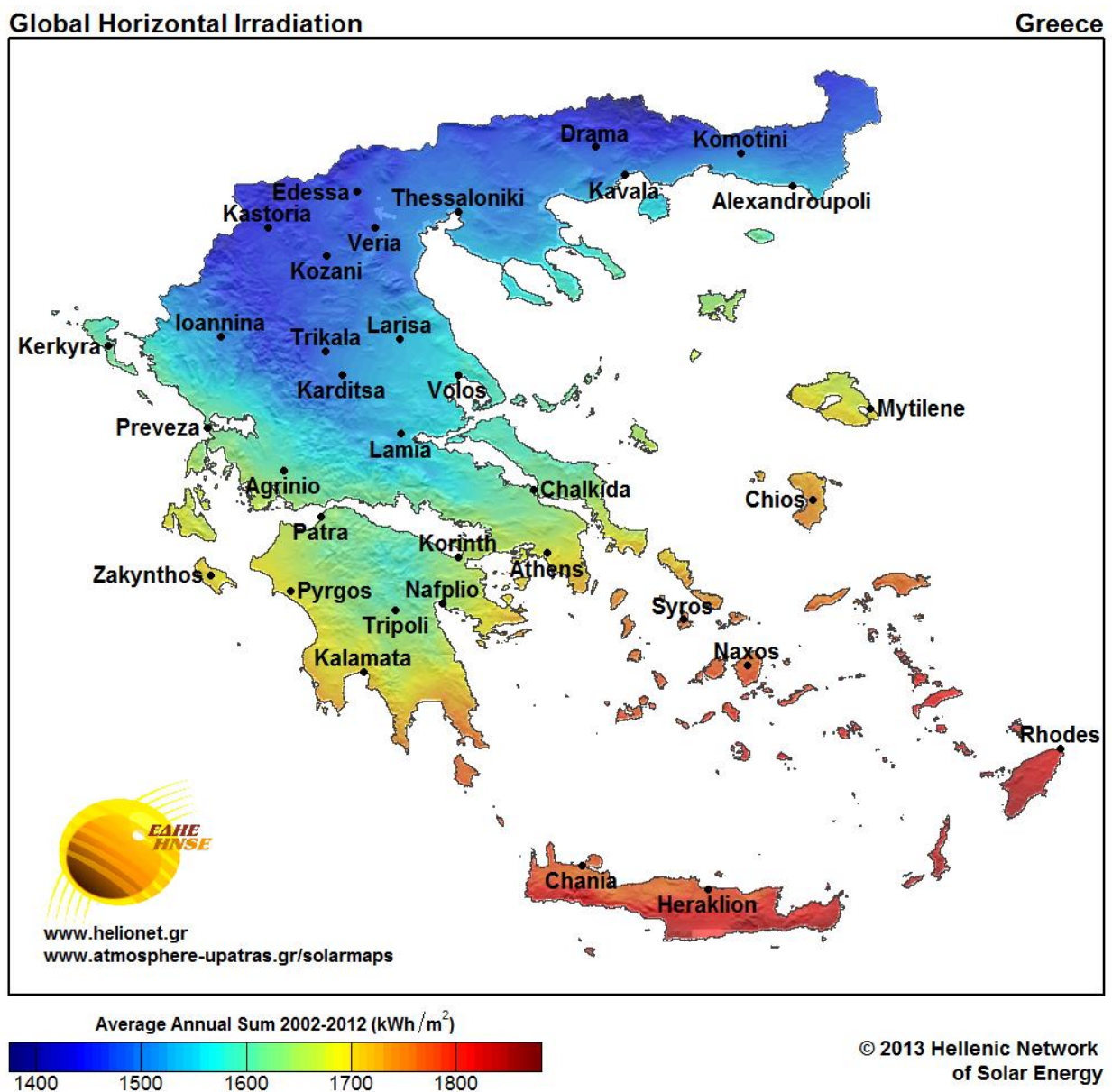
### 3.1.1 Ακτινοβολία

Η ποσότητα ηλιακής ενέργειας (ροή ενέργειας) που προσπίπτει σε μια κάθετη προς αυτήν επιφάνεια στο διάστημα είναι γνωστή ως *ακτινοβολία*. Η ακτινοβολία μετρείται σε watt ανά τετραγωνικό μέτρο ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Τα watt είναι ένα μέτρο της παραγωγής ή της κατανάλωσης ενέργειας [16].

Το μετρήσιμο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας λίγο πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα της Γης είναι περίπου  $1367 \text{ W}/\text{m}^2$  και ονομάζεται *ηλιακή σταθερά* (*solar constant*). Σε μια ηλιόλουστη ημέρα, σχεδόν το 30% της ακτινοβολούμενης ενέργειας του ηλίου επηρεάζεται από τρεις (3) συνιστώσες: **ανάκλασης** από την επιφάνεια του εδάφους (3%), **άμεσης** ή **απευθείας** ως αποτέλεσμα αφ' ενός της πορείας του ηλίου και αφ' ετέρου, της μερικής απορρόφησης εξαιτίας των συστατικών της ατμόσφαιρας (όζον, οξυγόνο, υδρατμοί,  $\text{CO}_2$ ) (18%) και **διάχυσης** εξαιτίας της σκέδασης (αέρας, σκόνη, ρύποι) (7%) στην ατμόσφαιρα της Γης. Όπως ήδη αναφέραμε, μέχρι να φτάσει η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος, το ποσό των  $1366 \text{ W}/\text{m}^2$  μειώνεται στα  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  ή  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ , εξαιτίας παραγόντων όπως η ατμοσφαιρική σύνθεση, οι κλιματολογικές συνθήκες και η φαινομενική κίνηση του ηλίου [01,16,23]. Η ακτινοβολία αυτή είναι η υψηλότερη που συναντάται στις περισσότερες τοποθεσίες ανά τον κόσμο και αναφέρεται ως *ηλιακό μέγιστο*

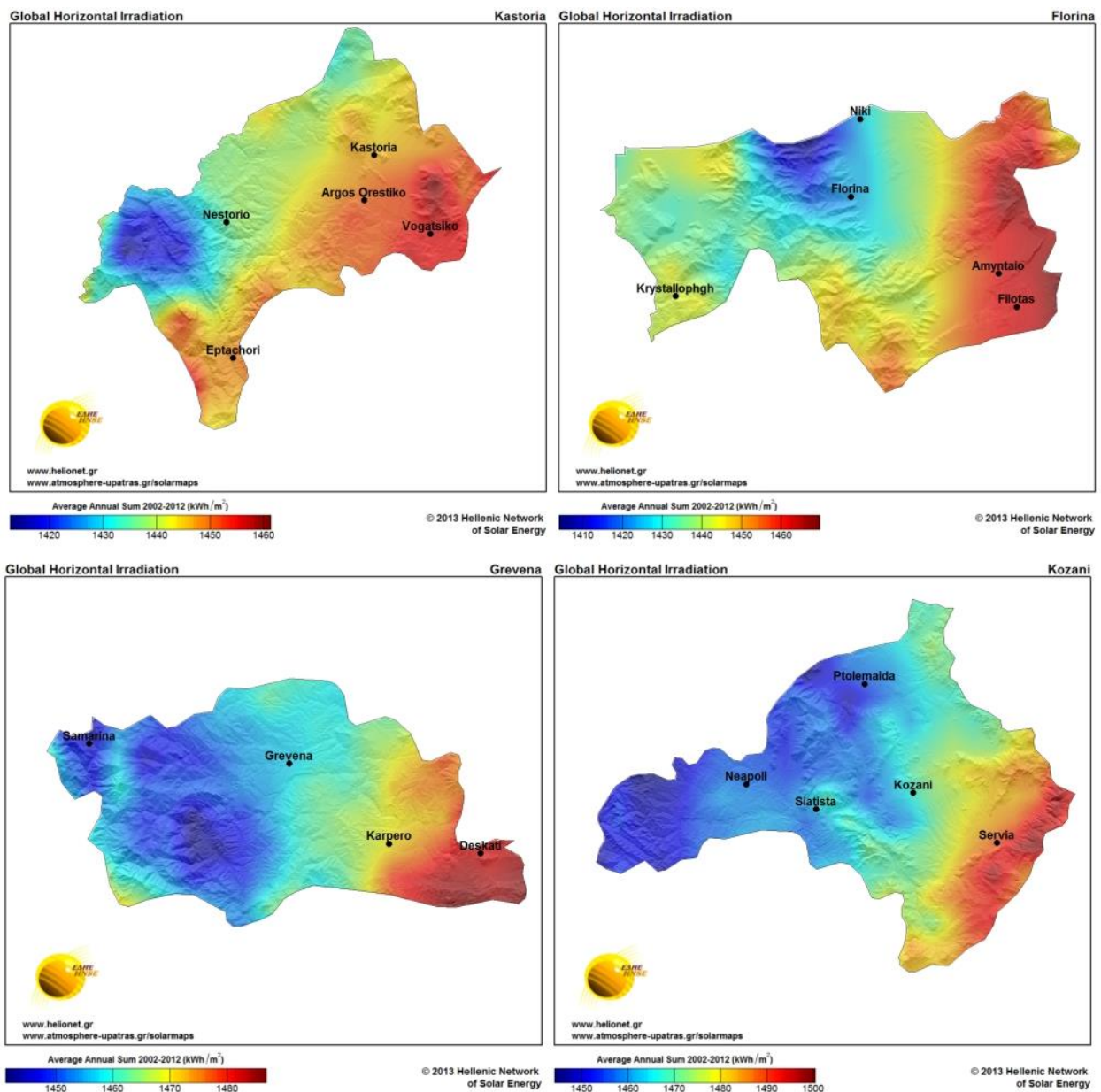
(*peak sun*). Αποτελεί, επίσης, το μέγεθος της έντασης του φωτός που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ονομαστικής ισχύος μιας Φ/Β μονάδας [16].

Παρόλο που ο ήλιος βιώνει μακροχρόνιους, 11ετείς κύκλους κατά τη διάρκεια των οποίων η παραγωγή του ποικίλλει, βραχυπρόθεσμα δε, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία του παραμένει σταθερή. Ωστόσο στη Γη, η ηλιακή ακτινοβολία (ένταση ηλιακού φωτός) ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας σε οποιαδήποτε τοποθεσία. Τη νύχτα, η ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδενική. Καθώς ο ήλιος ανατέλλει, η ακτινοβολία αυξάνεται αργά αλλά σταθερά, αποδίδοντας τις μέγιστες τιμές της μεταξύ 10 π.μ. και 3 μ.μ. Στη συνέχεια, η ακτινοβολία μειώνεται αργά, πέφτοντας για άλλη μια φορά στο μηδέν με την έλευση της νύχτας [16].



Σχήμα 3.3 – Το ολικό ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας [33]





Σχήμα 3.4 – Το ολικό ηλιακό δυναμικό σε Καστοριά, Φλώρινα, Γρεβενά και Κοζάνη [33]

Οι αλλαγές στην ακτινοβολία καθορίζονται από τη γωνία με την οποία οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν στην επιφάνεια της Γης. Επειδή η θέση του ηλίου στον ουρανό αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας (χάρη στην περιστροφή της Γης γύρω από τον κάθετο άξονά της), η γωνία της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας [16].

Η γωνία με την οποία οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν στη Γη επηρεάζει δύο άλλους παράγοντες: το λόγο της μάζας αέρα (*Air Mass – AM*), την ποσότητα δηλαδή της ατμόσφαιρας μέσω της οποίας πρέπει να ταξιδέψει το ηλιακό φως για να φτάσει στην επιφάνεια της Γης και την ενεργειακή πυκνότητα (*energy density*) της ηλιακής ακτινοβολίας [16]. Οι δύο αυτοί παράγοντες αναλύονται παρακάτω.

### 3.1.2 Μάζα αέρα

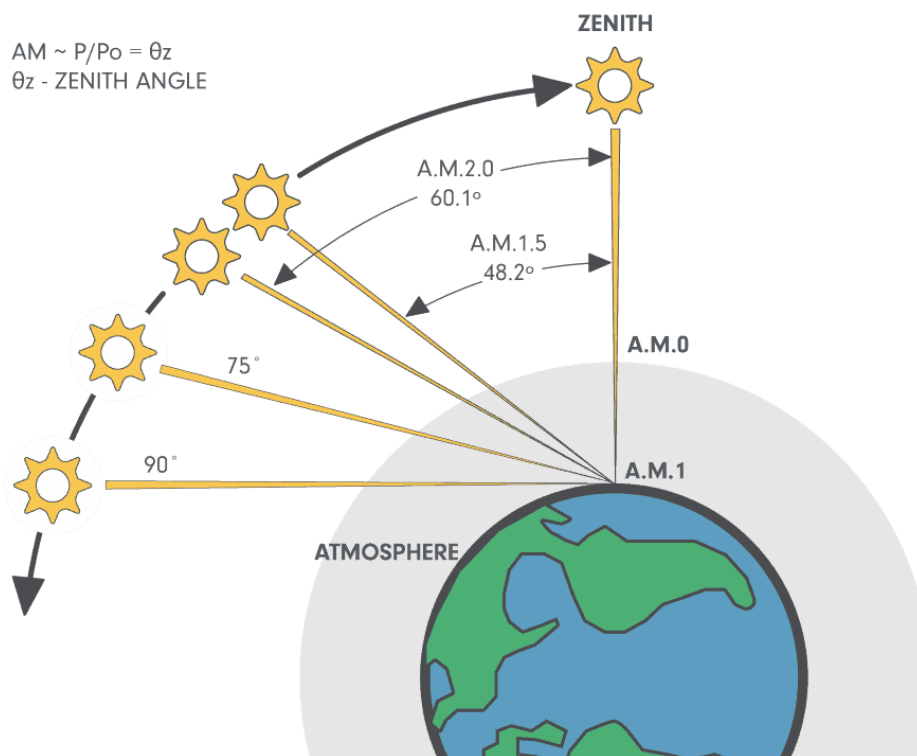
Ο συντελεστής μάζας αέρα καθορίζει πόση ατμόσφαιρα υπάρχει ανάμεσα στη γήινη επιφάνεια και τον ήλιο. Εναλλακτικά, προσδιορίζει τη σχετική απόσταση (ή το μήκος διαδρομής) που πρέπει να διανύσει η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα πριν φτάσει στην επιφάνεια της Γης και δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση [01,03]:

$$AM \cong \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3.3)$$

όπου:

$\theta_z$  η γωνία του ζενίθ για  $0^\circ < \theta_z < 70^\circ$  στο επίπεδο της θάλασσας

Ως γωνία ζενίθ ορίζεται η μεταβαλλόμενη γωνία της θέσης του ηλίου στον ουρανό σε σχέση με τη γήινη επιφάνεια και επηρεάζει τη φασματική κατανομή και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια αυτή [01,09]. Η ένταση της ηλιακής ενέργειας χωρίς την επίδραση της ατμόσφαιρας ή της επιφάνειας του γήινου εδάφους ονομάζεται μηδενική μάζα αέρα, AM0 και ανέρχεται σε  $AM0 = 135.3 \text{ mW/cm}^2$ . Η ένταση της ηλιακής ενέργειας μετά τη διέλευση μίας μάζας αέρα κάθετης στη γη (όταν δηλαδή ο ήλιος βρίσκεται στη θέση ζενίθ προς την επιφάνεια της θάλασσας) ονομάζεται μάζα αέρα 1, AM1, αντιπροσωπεύει την περιοχή κάτω από την καμπύλη φασματικής ακτινοβολίας και ανέρχεται σε  $AM1 = 92.5 \text{ mW/cm}^2$  [12].



Σχήμα 3.5 – Η ατμοσφαιρική μάζα αέρα και η ακτινοβολία που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης [34]

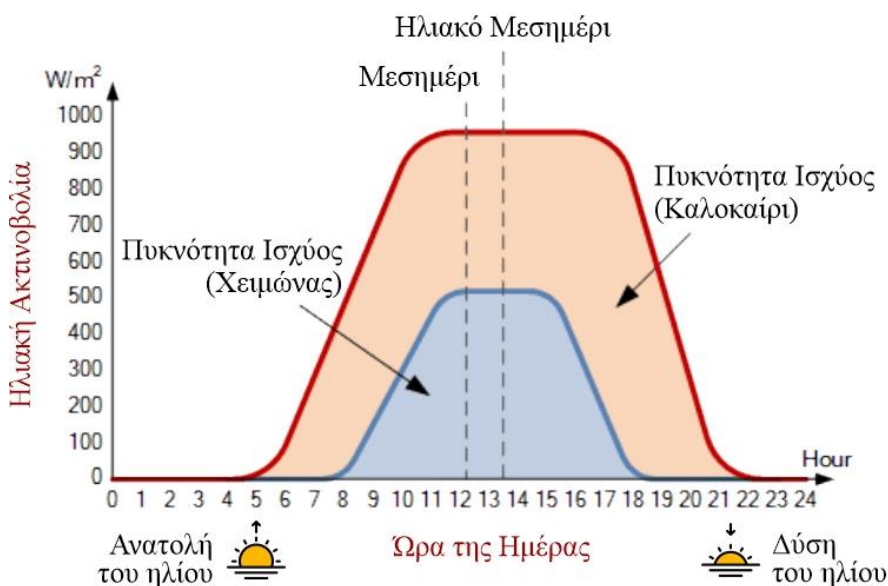
### 3.1.3 Ενεργειακή πυκνότητα ή πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία είναι ένα μέτρο της στιγμιαίας ισχύος, δηλαδή πόσα watt προσπίπτουν στη Γη σε επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου, κάθε στιγμή ( $W/m^2$ ). Αν και η ακτινοβολία είναι μια σημαντική μέτρηση, αυτό που πρέπει να γνωρίζουμε για μια Φ/Β εγκατάσταση είναι η ακτινοβολία με την πάροδο του χρόνου, η ποσότητα δηλ. της ενέργειας που αναμένουμε να συλλαμβάνουμε κάθε μέρα. Η ακτινοβολία σε μια χρονική περίοδο αναφέρεται ως *ενεργειακή πυκνότητα* ή *πυκνότητα ισχύος* (*irradiation*) [16].

Έτσι, 100 W ηλιακού φωτός που προσπίπτουν σ' ένα τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας για μία ώρα είναι 100 *βατώρες* ανά τετραγωνικό μέτρο ( $Wh/m^2$ ). Η ηλιακή ακτινοβολία 500 W ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σ' ένα τετραγωνικό μέτρο για μία ώρα είναι  $500 Wh/m^2$  ακτινοβολίας, κ.ο.κ. Ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απόδοσης ενός ηλιακού ηλεκτρικού συστήματος [16].

Συμπερασματικά, η *ακτινοβολία* εκφράζει ένα στιγμιαίο μέτρο ισχύος. Η *πυκνότητα ισχύος*, από την άλλη πλευρά, είναι ένα μέτρο της ισχύος που παρέχεται σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (π.χ. μίας ώρας) [16].

Στο **Σχήμα 3.6** αποτυπώνεται μία γραφική απεικόνιση των παραπάνω εννοιών. Όπως φαίνεται, η ακτινοβολία είναι η έντονη κόκκινη (καλοκαιρινές ημέρες) και μπλε γραμμή (χειμωνιάτικες ημέρες) και εκφράζει τον αριθμό των watt ανά τετραγωνικό μέτρο κάθε δεδομένη στιγμή. Το εμβαδόν κάτω από την κόκκινη και μπλε καμπύλη είναι η συνολική ηλιακή



Σχήμα 3.6 – Ηλιακή ακτινοβολία και πυκνότητα ισχύος [35]

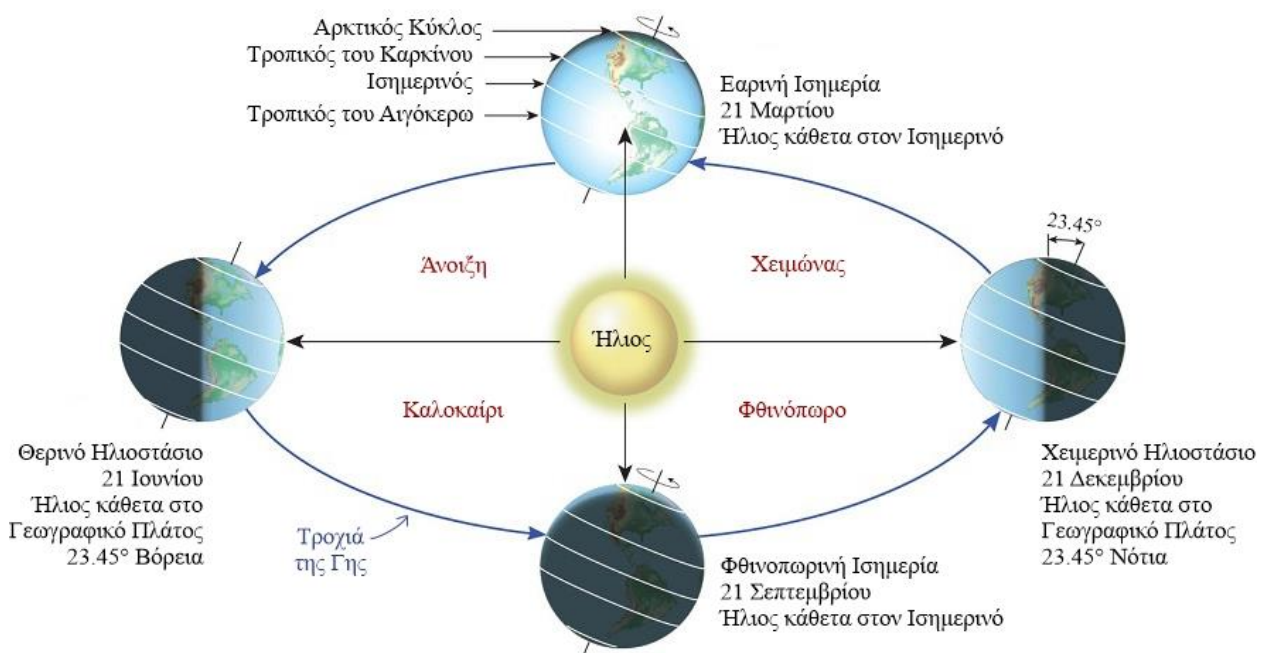
ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου (σε αυτήν την περίπτωση, μίας ημέρας). Η συνολική ακτινοβολία σε μία ημέρα εκφράζεται από την πυκνότητα ισχύος. Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε υποψήφια προς δημιουργία Φ/Β μονάδας τοποθεσία, είναι απαραίτητη για τον

προσδιορισμό του μεγέθους του συστήματος που απαιτείται για την κάλυψη των ηλεκτρικών απαιτήσεων των καταναλωτών [16].

## 3.2 Θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο κάθε στιγμή της ημέρας

Η φαινόμενη κίνηση (διαδρομή) του ηλίου ξεκινά από την Ανατολή και καταλήγει στη Δύση, διαγράφοντας έτσι τον ουράνιο θόλο. Ανάλογα με την τοποθεσία (γεωγραφικό πλάτος (βλ. **Ενότητα 3.4.5**) από τον ισημερινό ως το Βόρειο Πόλο), οι ημέρες που χαρακτηρίζουν την πορεία του ηλίου είναι οι εξής (για το βόρειο ημισφαίριο) [09]:

- 21 Μαρτίου (εαρινή ισημερία  $\rightarrow \delta = 0^\circ$ )
- 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο  $\rightarrow \delta = 23.45^\circ$ )
- 21 Σεπτεμβρίου (φθινοπωρινή ισημερία  $\rightarrow \delta = 0^\circ$ )
- 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο  $\rightarrow \delta = -23.45^\circ$ )



Σχήμα 3.7 – Θερινό/χειμερινό ηλιοστάσιο και εαρινή/φθινοπωρινή ισημερία [36]

Η θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο κάθε στιγμή της ημέρας προσδιορίζεται από τη συνάρτηση δύο γωνιών, της γωνίας του ηλιακού ύψους  $\alpha_s$  και του ζενίθ αζιμουθιακής γωνίας  $\gamma_s$  [03]. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μεγέθη εξετάζονται, μεταξύ άλλων, τοποθετώντας ένα συλλέκτη σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (μεταξύ  $0^\circ$  και  $90^\circ$ ) τα οποία έχουν ως εξής [09]:

Η αζιμουθιακή γωνία  $\gamma_s$  (solar azimuth angle) εκφράζει τη γωνία μεταξύ της προβολής της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (ορίζοντας) και της κατεύθυνσης προς το Νότο [03]. Στο βόρειο ημισφαίριο, η μέτρηση των αζιμουθιακών γωνιών γίνεται σε μοίρες ως προς τον άξονα του Νότου. Αντιθέτως, στο νότιο ημισφαίριο η μέτρηση γίνεται ως προς τον άξονα του Βορρά.



Παίρνει θετικές τιμές το πρωί όταν ο ήλιος βρίσκεται στη Ανατολή και αρνητικές το βράδυ, όταν ο ήλιος βρίσκεται στη Δύση [02]. Δίνεται από τη σχέση [03]:

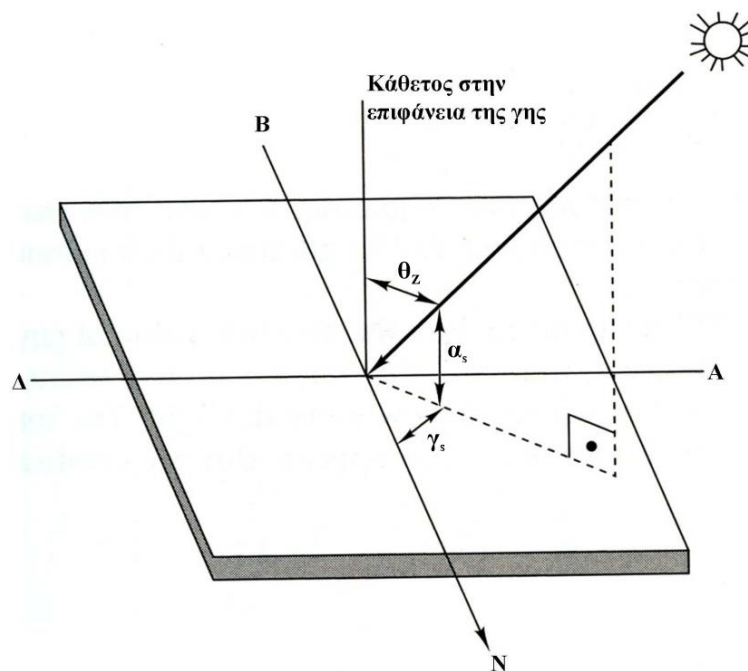
$$\gamma_s = \begin{cases} \cos^{-1} \left[ \frac{\sin(a_s) \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(a_s) \cos(\varphi)} \right] & 12:00 > \text{AST} > 24:00 \\ -\cos^{-1} \left[ \frac{\sin(a_s) \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(a_s) \cos(\varphi)} \right] & 10:00 > \text{AST} > 12:00 \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου:

**AST** ο φαινόμενος ηλιακός χρόνος (βλ. **Ενότητα 3.3.2**)

Γωνία ηλιακού ύψους  $a_s$  (*solar altitude* ή *elevation angle*) είναι αυτή που σχηματίζεται μεταξύ της ηλιακής ακτίνας και του ορίζοντα. Στο βόρειο ημισφαίριο παίρνει τη μέγιστη τιμή της κατά το θερινό ηλιοστάσιο, ενώ την ελάχιστη κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο [38]. Ισούται με [03]:

$$a_s = \frac{\pi}{2} - \theta_z \quad (3.5)$$

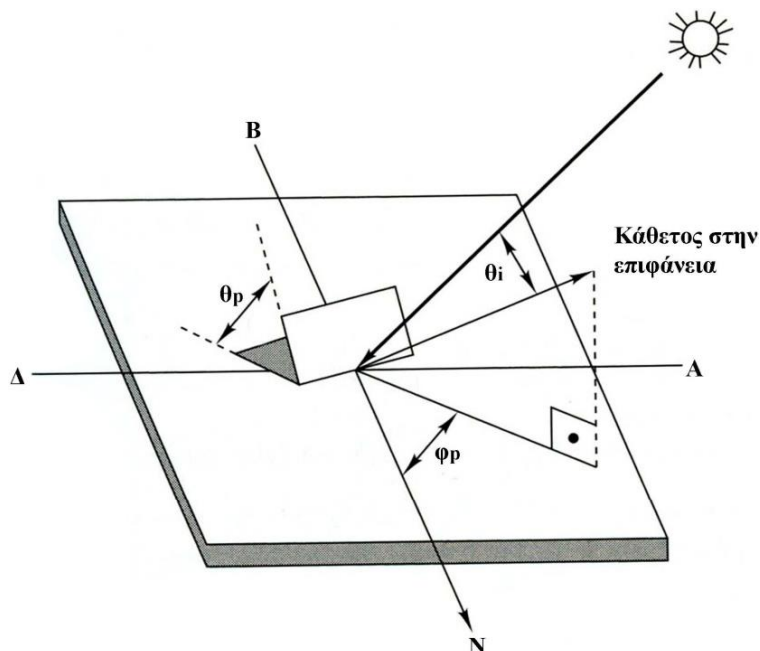


**Σχήμα 3.8** – Γωνία ηλιακού ύψους ( $a_s$ ), γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ) και αζιμούθιο του ηλίου ( $\gamma_s$ ) [37]

Γωνία ζενίθ  $\theta_z$  (*solar zenith angle*) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και της καθέτου στο επίπεδο του ορίζοντα [03,38]. Μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ των  $-180^\circ$  έως  $+180^\circ$ , με τις θετικές τιμές να παρουσιάζονται ανατολικά του Βορρά (δεξιόστροφη κίνηση) [01]. Δίνεται από τη σχέση [03]:

$$\theta_z = \cos^{-1}[\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)] \quad (3.6)$$

Γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  (*incidence angle*) καλείται η γωνία που δημιουργείται μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της καθέτου σ' ένα σημείο του επιπέδου. Για  $\theta = 0$  τότε  $\theta_z = \theta$  [09].



Σχήμα 3.9 – Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο [37]

Η *αζιμούθια γωνία επιφάνειας συλλέκτη*  $\gamma$  (*surface azimuth angle*) προκύπτει μεταξύ της νότιας κατεύθυνσης και της προβολής της καθέτου της επιφάνειας πάνω στον ορίζοντα. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του συλλέκτη, ισχύει ότι [03,09,38]:

- Προσανατολισμός προς Νότο  $\rightarrow \gamma = 0^\circ$
- Προσανατολισμός προς Ανατολή  $\rightarrow \gamma = 0^\circ$  έως  $-180^\circ$  ( $-90^\circ$  για την Ανατολή)
- Προσανατολισμός προς Δύση  $\rightarrow \gamma = 0^\circ$  έως  $180^\circ$  ( $90^\circ$  για τη Δύση)
- Προσανατολισμός προς Βορρά  $\rightarrow \gamma = 180^\circ$

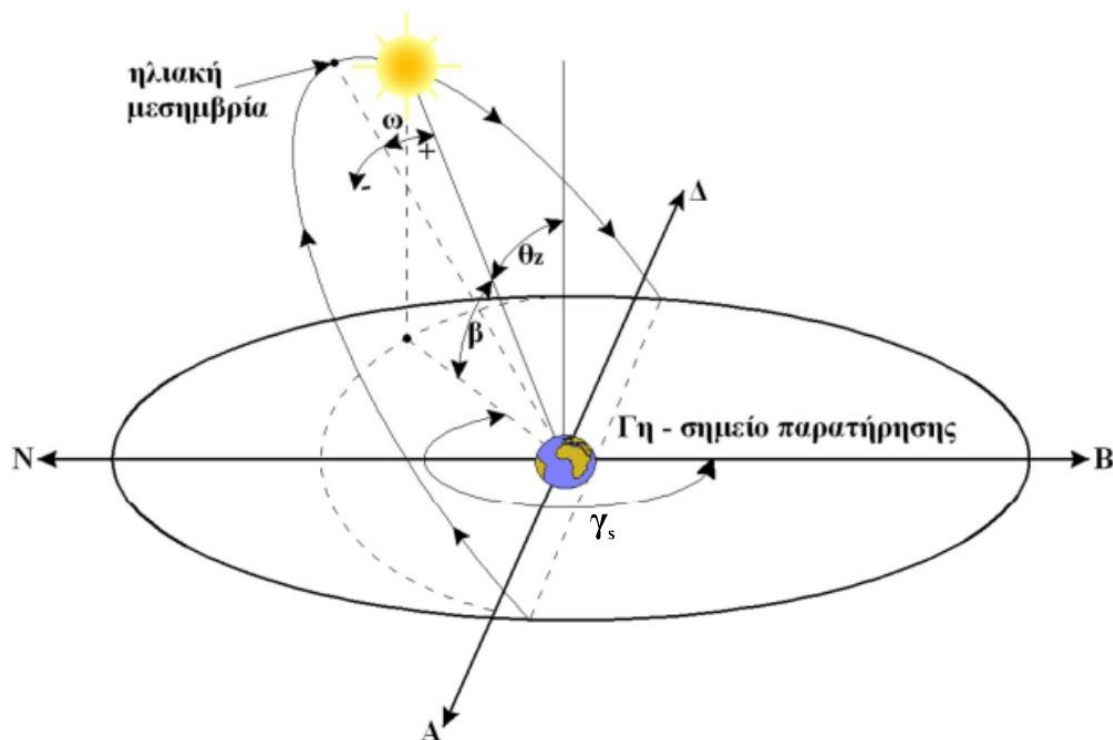
Κλίση συλλέκτη  $\beta$  (*slope*) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια του συλλέκτη και του οριζόντιου επιπέδου. Όταν η επιφάνεια έχει κατεύθυνση προς τον ισημερινό, η κλίση παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 90 μοιρών, δηλαδή:  $0^\circ < \beta < 90^\circ$  [38].

Ωριαία γωνία δύσης  $\omega_s$  είναι η γωνία μεταξύ της θέσης του ηλίου και του τοπικού μεσημβρινού. Παρουσιάζει αρνητικές τιμές το πρωί, μηδέν τη μεσημβρία και θετικές τιμές το απόγευμα. Υπολογίζεται με χρήση της Σχέσης 3.6 και για  $\theta_z = 0$ , ισχύει [03,09]:

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (3.7)$$

...ενώ, ο χρόνος δύσης του ηλίου σε *πραγματική ηλιακή ώρα (True Solar Time – TST)* δίνεται από τη σχέση [03]:

$$t_s = \omega_s \frac{1h}{15^\circ} \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.10 – Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας ( $\omega_s$ ) του ηλίου [37]

### 3.3 Η τροχιά της Γης και η σχετική κίνησή της με τον ήλιο

Παρατηρώντας τον ουράνιο θόλο κατά τη διάρκεια της νύχτας διαπιστώνουμε ότι περιστρέφεται μαζί με τα ουράνια σώματα σε διεύθυνση από Ανατολή προς Δύση. Ουσιαστικά όμως, η φαινομενική αυτή κίνηση οφείλεται στην περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της, η οποία διαγράφει αντίθετη πορεία, δηλαδή από Δύση προς Ανατολή και διαρκεί 24 ώρες [09].

Η Γη περιφέρεται γύρω από τον ήλιο, ολοκληρώνοντας μία πλήρη περιφορά σε διάρκεια 365 ημερών (1 έτος). Η τροχιά της είναι ελαφρώς ελλειπτική (βλ. Σχήμα 3.7 και 3.11), έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της απόστασής της από τον ήλιο κατά τη διάρκεια του έτους. Στις 2 Ιανουαρίου η Γη βρίσκεται στην κοντινότερη απόστασή της από τον ήλιο (*περιήλιο*, περίπου 147 εκατομμύρια χιλιόμετρα), ενώ στις 3 Ιουλίου η Γη βρίσκεται στη μακρινότερη απόσταση (*αφήλιο*, περίπου 152 εκατομμύρια χιλιόμετρα) [01,03,16]. Η διαφορά αυτή της απόστασης δίνεται από τη σχέση [02]:

$$d = 1.5 \cdot 10^8 \left\{ 1 + 0.017 \sin \frac{360(n - 93)}{365} \right\} km \quad (3.9)$$

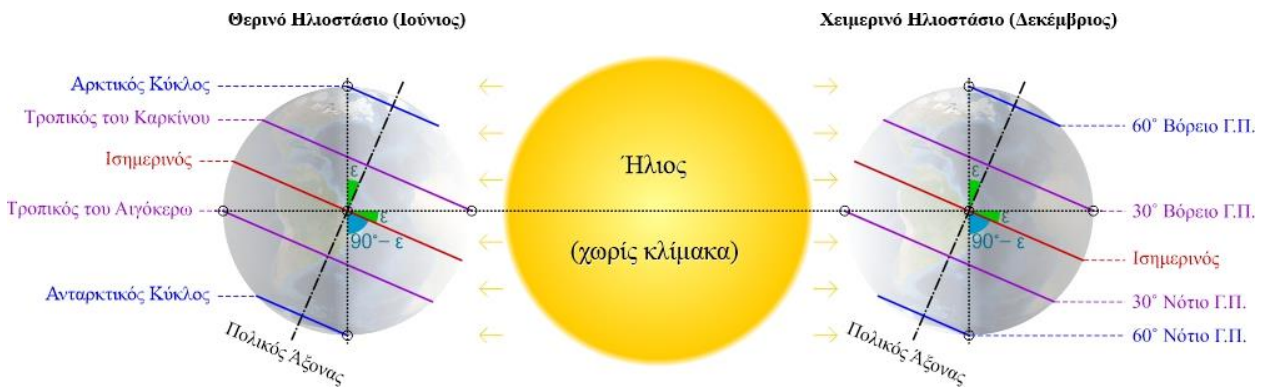
όπου:

$n$  ο αριθμός της ημέρας (1 για 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου και 365 για 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου)

Στον Πίνακα 3.1 αποτυπώνονται οι αριθμοί των ημερών την 1<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα.

**Πίνακας 3.1** – Αριθμός ημέρας για την πρώτη ημέρα κάθε μήνα [02]

Μήνας	Αριθμός Ημέρας	Μήνας	Αριθμός Ημέρας
Ιανουάριος	$n = 1$	Ιούλιος	$n = 182$
Φεβρουάριος	$n = 32$	Αύγουστος	$n = 213$
Μάρτιος	$n = 60$	Σεπτέμβριος	$n = 244$
Απρίλιος	$n = 91$	Οκτώβριος	$n = 274$
Μάιος	$n = 121$	Νοέμβριος	$n = 305$
Ιούνιος	$n = 152$	Δεκέμβριος	$n = 335$



**Σχήμα 3.11** – Σχέση μεταξύ της αξονικής κλίσης της Γης ( $\epsilon$ ) προς τους τροπικούς και πολικούς κύκλους [40]

Ο άξονας της Γης έχει κλίση  $23.45^\circ$  με την κάθετη στην ελλειπτική τροχιά. Η Γη διατηρεί αυτή τη γωνία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους κατά τη περιφορά της γύρω από τον ήλιο. Όπως ήδη αναφέραμε, επειδή η κλίση της Γης παραμένει σταθερή, το βόρειο ημισφαίριο γέρνει μακριά από τον ήλιο κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Ως αποτέλεσμα, οι ακτίνες του ηλίου διαπερνούν την ατμόσφαιρα της Γης σε πολύ χαμηλή γωνία. Αυτό μειώνει την ενεργειακή πυκνότητα και αυξάνει την ποσότητα του ηλιακού φωτός που απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Αυτός είναι ένας λόγος που οι χειμώνες είναι πιο κρύοι, καθώς επίσης και ο λόγος που οι Φ/Β μονάδες παράγουν λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια το χειμώνα. Το ηλιακό κέρδος μειώνεται επίσης το χειμώνα, επειδή οι μέρες

είναι μικρότερες – δηλαδή, υπάρχουν λιγότερες ώρες φωτός της ημέρας κατά τους χειμερινούς μήνες. Και οι τρεις (3) παράγοντες συνδυάζονται για να μειώσουν την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που είναι διαθέσιμη σ' ένα Φ/Β σύστημα το χειμώνα [02,16].

Από την άλλη πλευρά, το καλοκαίρι το βόρειο ημισφαίριο γέρνει κοντά στον ήλιο, με αποτέλεσμα ο ήλιος να βρίσκεται πιο ψηλά στον ουρανό. Το γεγονός αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, ενώ ταυτόχρονα μειώνει την απορρόφηση και τη διασπορά της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Και οι δύο παράγοντες αυξάνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την ενεργειακή πυκνότητα. Η αυξημένη ακτινοβολία αυξάνει την ισχύ στην έξοδο μιας Φ/Β μονάδας και σε συνδυασμό με τις μεγαλύτερες σε διάρκεια ημέρες του καλοκαιριού, η απόδοσή της είναι επίσης λίγο μεγαλύτερη αυτή την εποχή του χρόνου [16].

### 3.3.1 Ηλιακή απόκλιση

Η *ηλιακή απόκλιση*  $\delta$  ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει η θέση του ηλίου κατά την ηλιακή μεσημβρία από το ελλειπτικό επίπεδο του ισημερινού. Η μεταβολή της γωνίας αυτής οφείλεται στην περιστροφή της Γης γύρω από τον ήλιο, παίρνει τιμές από  $-23.45^\circ$  (χειμερινό ηλιοστάσιο) έως  $+23.45^\circ$  (θερινό ηλιοστάσιο) κατά τη διάρκεια του έτους και εξαιτίας αυτής έχουμε την ύπαρξη των εποχών. Για κάθε ημέρα του έτους (βλ. **Πίνακα 3.1**) υπολογίζεται από τη σχέση [01,02,03]:

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360^\circ \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3.10)$$

### 3.3.2 Ηλιακή ώρα, ωρολογιακή ώρα, εξίσωση χρόνου και φαινόμενος ηλιακός χρόνος

Έχοντας ως σημείο αναφοράς τον ορίζοντα, η θέση του ηλίου μπορεί να προσδιοριστεί από τις γωνίες *ζενίθ*  $\alpha$  και *αζιμούθιου*  $\theta_z$ , οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται τόσο από τη γεωγραφική θέση ενός τοπικού σημείου και από την ώρα της ημέρας, όσο και αναφορικά με τον ισημερινό, δηλαδή με αναφορά στο γεωγραφικό πλάτος (ηλιακή απόκλιση) και γεωγραφικό μήκος (γωνία ώρας) ενός τοπικού σημείου. Πολλούς αιώνες πριν, η μέτρηση του χρόνου πραγματοποιούνταν με χρήση ηλιακών ρολογιών. Έτσι, η *φαινόμενη ηλιακή ώρα* (*solar time*) της ημέρας και της εποχής του χρόνου προσδιοριζόταν από τη θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο [01,03].

Το πρόβλημα όμως της χρήσης των ηλιακών ρολογιών ήταν η αποκλίνουσα ηλιακή ώρα σε περιοχές με διαφορετική γεωγραφική θέση. Λύση στο πρόβλημα αυτό έδωσε η χρήση των μηχανικών ρολογιών, τα οποία μετρούσαν τη *μέση ηλιακή ώρα* (*ωρολογιακή ώρα – mean time*). Τις ημέρες των ισημεριών, τη στιγμή του ηλιακού μεσημεριού (βλ. **Ενότητα 3.3.3**), το μηχανικό ρολόι ρυθμιζόταν ώστε να δείχνει 12 ακριβώς. Με την ελλειπτική περιστροφή της Γης γύρω από

τον ήλιο, αλλά και γύρω από τον άξονά της κάθε μέρα του έτους μεταβάλλεται η μέση ηλιακή ώρα, τη στιγμή του ηλιακού μεσημεριού [01,03].

Η ηλιακή ώρα και η ωρολογιακή ώρα (ή ώρα Γκρίνουιτς) συνδέονται από τη σχέση [01]:

$$T_{solar} = UT + \frac{\lambda}{15^\circ} + \frac{EqT[min]}{60} \quad (3.11)$$

όπου:

**T<sub>solar</sub>** η ηλιακή ώρα (ή AST)

**UT** η ωρολογιακή ώρα (παγκόσμια ώρα UT (Universal Time) ή ώρα Γκρίνουιτς)

**λ** το γεωγραφικό μήκος του τόπου σε μοίρες

**EqT** η εξίσωση χρόνου

Η διαφορά μεταξύ της φαινόμενης ηλιακής ώρας ενός ηλιακού ρολογιού και της μέσης (ωρολογιακής) ώρας ενός μηχανικού ρολογιού για κάθε ημέρα του έτους (n), δίνεται από την εξίσωση χρόνου (*equation of time*), η οποία κατά προσέγγιση είναι [01]:

$$EqT[min] = 9.85 \sin\left(\frac{4\pi(n-80)}{365.2422}\right) - 7.65 \sin\left(\frac{2\pi(n-3)}{365.2422}\right) \quad (3.12)$$

Ο φαινόμενος ηλιακός χρόνος (*Apparent Solar Time – AST*) μετρίεται σύμφωνα με την κίνηση του ηλίου στον ουράνιο θόλο. Για τον προσδιορισμό της διαφοράς του φαινόμενου (AST) από το μέσο ηλιακό χρόνο (t) γίνεται χρήση της παρακάτω σχέσης, η οποία δίνεται σε λεπτά [03]:

$$AST - t[min] = \begin{cases} ET - 4(LSM - \psi) & 180^\circ > \psi > 0^\circ \\ ET + 4(LSM - \psi) & 0^\circ > \psi > -180^\circ \end{cases} \quad (3.13)$$

όπου:

**ET** η σχέση χρόνου (διαφορά AST και t σε λεπτά)

**LSM** ο κεντρικός μεσημβρινός Γκρίνουιτς (Local Standard Meridian) που είναι 0 μοίρες

Η γωνία ώρας  $\omega$  (ή γωνιακή μετατόπιση  $\omega$ ) μεταβάλλεται κατά 15° την ώρα ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού εξαιτίας της περιστροφικής κίνησης της Γης και δίνεται από τη σχέση [01,03]:

$$\omega = (AST - 12) \frac{360^\circ}{24} \quad (3.14)$$

### 3.3.3 Ηλιακό μεσημέρι και ηλιακό ύψος

Η τοπική ώρα ενός γεωγραφικού σημείου κατά την οποία ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο του ουρανού, καλείται *ηλιακό μεσημέρι* (*solar noon*). Χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η τοποθεσία, κατά το ηλιακό μεσημέρι η ηλιακή ώρα είναι πάντα 12:00 και ο ήλιος βρίσκεται πάνω από τον τοπικό μεσημβρινό οποιασδήποτε ορισμένης τοποθεσίας, με τη γωνία ώρας να έχει μηδενική τιμή ( $\omega = 0^\circ$ ). Για την εύρεση της τοπικής ώρας που αντιστοιχεί στο ηλιακό μεσημέρι ( $T_{local\_sn}$ ), θέτοντας ως  $T_{solar} = 12$ , κάνουμε χρήση του τύπου [01,03]:

$$UT_{sn} = 12 - \frac{\lambda}{15^\circ} - \frac{EqT[min]}{60} \quad (3.15)$$

και

$$T_{local\_sn} = UT_{sn} + \Delta \quad (3.16)$$

όπου:

$\Delta$  η απόκλιση ως προς την παγκόσμια ώρα (ώρα Γκρίνουιτς)

Το ηλιακό μεσημέρι συμβαίνει σε γεωγραφικά πλάτη:

- άνω του Τροπικού του Καρκίνου → ήλιος ακριβώς νότια του παρατηρητή
- κάτω του Τροπικού του Αιγόκερω → ήλιος ακριβώς βόρεια του παρατηρητή
- στους Τροπικούς → ήλιος ακριβώς από πάνω ή βόρεια ή νότια του παρατηρητή

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ηλίου και του ορίζοντα οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας αναφέρεται ως γωνία *ηλιακού ύψους*  $\beta$  (*altitude angle*). Η γωνία ηλιακού ύψους μειώνεται κατά την πορεία από το θερινό στο χειμερινό ηλιοστάσιο. Μετά το χειμερινό ηλιοστάσιο αυξάνεται, μεγαλώνοντας λίγο κάθε μέρα μέχρι το θερινό ηλιοστάσιο. Το μήκος της ημέρας μεταβάλλεται μαζί με τη γωνία ηλιακού ύψους, μειώνοντας περίπου δύο λεπτά την ημέρα για έξι μήνες από το θερινό στο χειμερινό ηλιοστάσιο και στη συνέχεια, αυξάνοντας δύο λεπτά την ημέρα μέχρι να φτάσει ξανά στο θερινό ηλιοστάσιο. Υπολογίζεται με χρήση της σχέσης [02,16]:

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (3.17)$$

όπου:

$L$  το γεωγραφικό πλάτος του τόπου σε μοίρες

Τα μέσα των εξαμηνιαίων κύκλων μεταξύ του θερινού και του χειμερινού ηλιοστασίου ονομάζονται *ισημερίες*. Στις ισημερίες, οι ώρες του φωτός της ημέρας είναι σχεδόν ίσες με τις ώρες του σκότους [16].

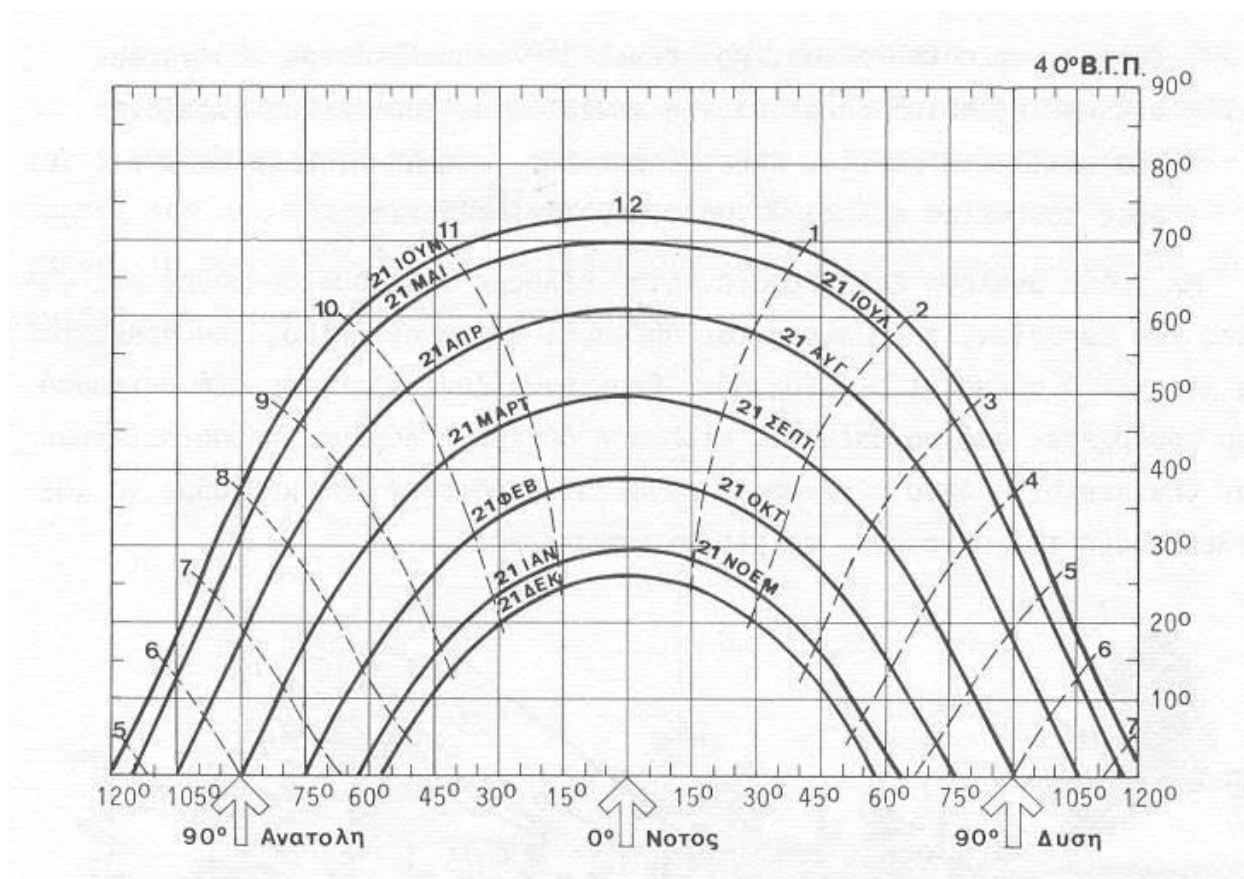


Η γωνία ύψους του ηλίου αλλάζει μέρα με τη μέρα, καθώς μετακινείται από και προς τα ηλιοστάσια, αλλά ποικίλλει και ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Η αλλαγή αυτή της γωνίας ύψους καθορίζεται επίσης από την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της, αυξάνεται μεταξύ της ανατολής και του μεσημεριού και στη συνέχεια μειώνεται στο μηδέν κατά τη δύση του ηλίου [16].

Εκτός από την αλλαγή στη γωνία ύψους του ηλίου, η θέση του ηλίου στον ουρανό σε σχέση με τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας (γωνία αζιμούθιου  $\theta_z$ ) [16].

### 3.3.4 Ανατολή και δύση του ηλίου

Για την κατά προσέγγιση εύρεση των χρόνων ανατολής και δύσης του ηλίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ηλιακοί χάρτες [02]. *Ηλιακοί χάρτες* ονομάζονται τα διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν τις φαινόμενες τροχιές του ηλίου στο επίπεδο ορθής προβολής για συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος. Με τα διαγράμματα αυτά προσδιορίζεται η θέση – ύψος και αζιμούθιο – του ηλίου για κάθε μήνα – συνήθως την 21<sup>η</sup> ημέρα του μήνα – για όλες τις ώρες της ημέρας [39].



Σχήμα 3.12 – Ηλιακός χάρτης (διάγραμμα) για το Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος 40° [39]

Οι χρόνοι ανατολής ( $T_{sr}$ ) και δύσης ( $T_{ss}$ ) μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις (αναφορικά με την ηλιακή ώρα  $T_{solar}$ ) [01]:



$$T_{sr} = 12 - \frac{12}{180^\circ} \omega_s \quad (3.18)$$

$$T_{ss} = 12 + \frac{12}{180^\circ} \omega_s \quad (3.19)$$

όπου:

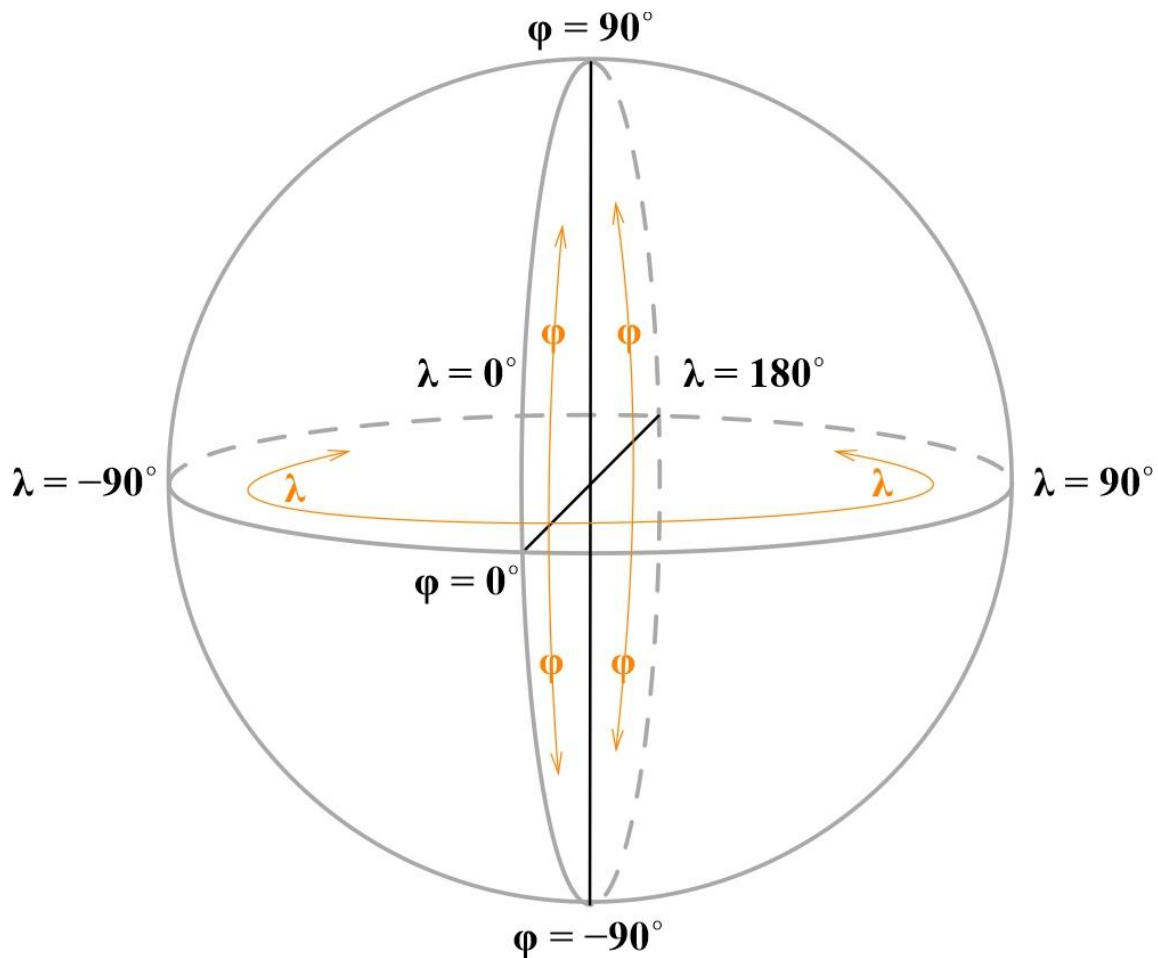
$$\cos \omega_s = -\tan \delta \cdot \tan \varphi \quad (3.20)$$

$\omega_s$  η γωνία ώρας σε μοίρες

### 3.3.5 Γεωγραφικές συντεταγμένες

Ο προσδιορισμός της θέσης κάθε τόπου στην επιφάνεια της Γης γίνεται με χρήση των γεωγραφικών συντεταγμένων, οι οποίες βασίζονται [01]:

- στους κύκλους που παραλληλίζονται με τον ισημερινό (*equator*) και λέγονται *παράλληλοι* (*parallels*),
- στις κάθετες ημικυκλίες που διέρχονται από τους πόλους και λέγονται *μεσημβρινοί* (*meridians*). Ο ισημερινός σε συνδυασμό με τον πρώτο μεσημβρινό (*first meridian*) λαμβάνονται ως η αρχή στο σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων.



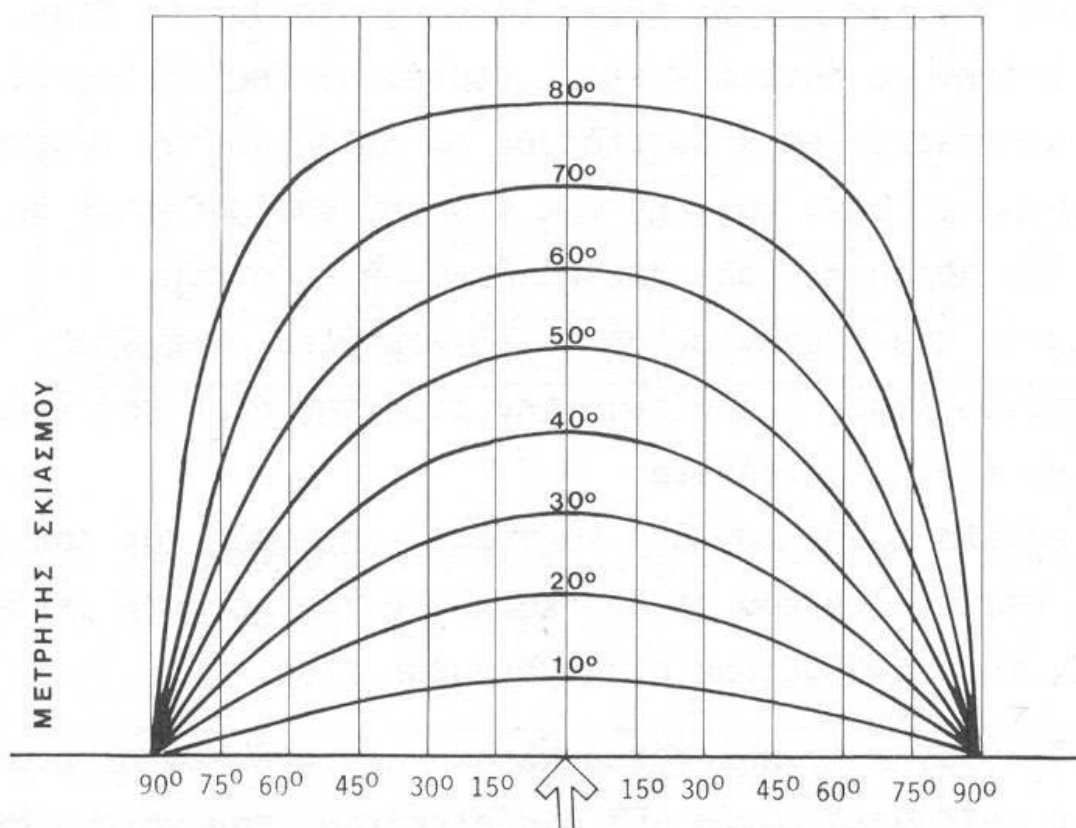
Σχήμα 3.13 – Οι γεωγραφικές συντεταγμένες στη σφαίρα [41]

Τις γεωγραφικές συντεταγμένες συγκροτούν το *γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  (latitude)* και το *γεωγραφικό μήκος  $\lambda$  (longitude)*. Γεωγραφικό πλάτος ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος του τόπου με το επίπεδο του ισημερινού. Γεωγραφικό μήκος ενός σημείου στην επιφάνεια της Γης είναι η στερεή γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού [41].

### 3.4 Ανάλυση σκίασης και υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας

#### 3.4.1 Ανάλυση σκίασης βάσει της ηλιακής πορείας

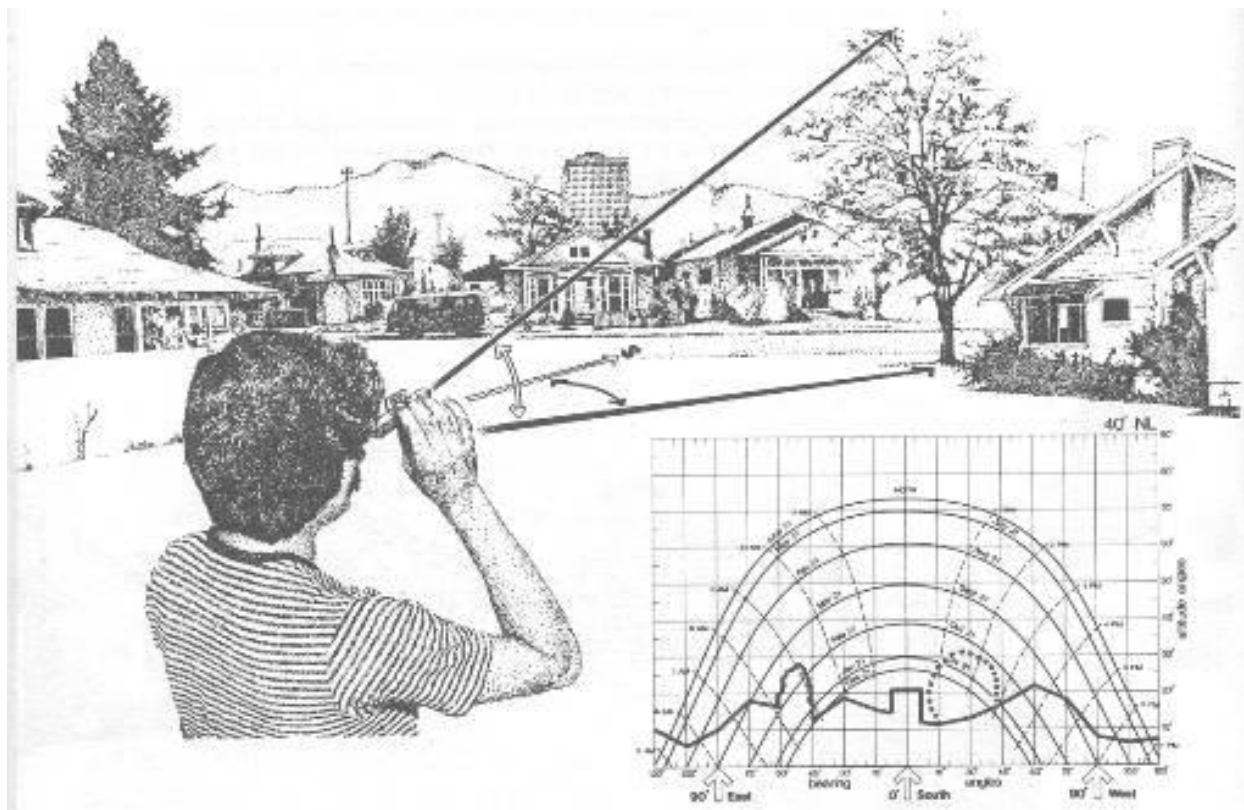
Ένα βασικό πρόβλημα στο πεδίο εφαρμογής ενός Φ/Β είναι η σκίαση που μπορεί να προέρχεται από τα απέναντι ή τα κάθετα προς το κτίριο ή το οικόπεδο εμπόδια (π.χ. τοίχοι κτιρίων, δέντρα κ.λπ.), για τα οποία αναζητείται ο ηλιασμός τους καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Για τον προσδιορισμό της σκίασης, η οποία αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την απόδοση των Φ/Β, χρησιμοποιούνται τα *διαγράμματα ηλιακής πορείας* ή ο *μετρητής σκιασμού* [02,39].



Σχήμα 3.14 – Μετρητής σκιασμού για τον προσδιορισμό της σκίασης από παραπλήσια εμπόδια [39]

Με την καταγραφή των γωνιών ύψους και αζιμούθιου των εμποδίων με νότιο προσανατολισμό πάνω σ' ένα διάγραμμα ηλιακής πορείας, είναι δυνατός ο χρονικός

προσδιορισμός κατά τον οποίο ο ήλιος βρίσκεται πίσω από τα εν λόγω εμπόδια, με συνέπεια τη σκίαση του πεδίου εφαρμογής ( $\Phi/B$ ). Οι γωνίες ύψους απεικονίζονται με τις καμπύλες, από  $0^\circ$  έως  $80^\circ$  και ορίζουν τη γωνία ύψους των απέναντι εμποδίων ως προς την οριζόντια ευθεία [02,39].



Σχήμα 3.15 – Η χρήση του ηλιακού χάρτη για τον προσδιορισμό του σκιασμού από τον περιβάλλοντα χώρο [39]

### 3.4.2 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας

Για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας που βρίσκεται μέσα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται κάποια μοντέλα. Το *Μοντέλο Μέσης Ακτινοβολίας (Lui–Jordan)* και το *Μοντέλο Αίθριας Ημέρας (Hottel)* [03].

Με την εφαρμογή του μοντέλου Lui–Jordan υπολογίζεται η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο με τη χρήση του *συντελεστή αιθριότητας*, ο οποίος αναφέρεται στο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας στο υψηλότερο σημείο της ατμόσφαιρας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης σ' ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Υπολογίζεται από τη σχέση [03]:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (3.21)$$

όπου:

**H<sub>0</sub>** η ηλιακή ακτινοβολία στο υψηλότερο σημείο της ατμόσφαιρας

**H** η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του μοντέλου Lui-Jordan είναι ο συντελεστής ανάκλασης επιφάνειας  $r$ , ο οποίος εξαρτάται από το χαρακτήρα της περιοχής. Δίνεται από τον **Πίνακα 3.2** [03]:

**Πίνακας 3.2** – Συντελεστής ανάκλασης επιφανειών  $r$  [03]

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης $r$
Επιφάνεια νερού	0.05
Ασφαλτικός τάπητας	0.07
Αγρός με χώμα	0.08
Πράσινος αγρός	0.15
Βράχια	0.20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου	0.30
Χιόνι	0.60

Με την εφαρμογή του μοντέλου Hottel υπολογίζεται ο συντελεστής ατμοσφαιρικής διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας όταν ο ουρανός είναι καθαρός και δίνεται από τη σχέση [03]:

$$t_{st} = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{|\cos(\theta_z)|}} \quad (3.22)$$

Οι συντελεστές  $a_0$ ,  $a_1$  και  $k$  υπολογίζονται για τυπική αίθρια ατμόσφαιρα και για υψόμετρο  $h$  κάτω των 2.5 km. Για τα  $a_0$ ,  $a_1$  και  $k$  εφαρμόζονται συντελεστές διόρθωσης  $r_0$ ,  $r_1$  και  $r_k$  αντίστοιχα, οι οποίοι εξαρτώνται από τον χαρακτήρα της περιοχής. Οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης δίνονται στον **Πίνακα 3.3** [03]:

**Πίνακας 3.3** – Συντελεστές διόρθωσης  $r_0$ ,  $r_1$  και  $r_k$  [03]

Κλίμα	Συντελεστής διόρθωσης		
	$r_0$	$r_1$	$r_k$
Τροπικό	0.95	0.98	1.02

Ήπιο (καλοκαίρι)	0.97	0.99	1.02
Ήπιο (χειμώνας)	1.03	1.01	1.00
Πολικό	0.99	0.99	1.01

### 3.4.3 Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας

Για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται όργανα υψηλής αξιοπιστίας. Ως επί το πλείστον, όλα τα βασικά όργανα αποτελούν παραλλαγές δύο βασικών οργάνων: του πυρανόμετρου και του πυρηλιόμετρου. Επειδή η πυκνότητα ηλιακής ισχύος αποτελεί ένα μέγεθος που είναι δύσκολο να μετρηθεί άμεσα, τα αισθητήρια των οργάνων αυτών μετρούν τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνειά τους εξαιτίας της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [08].

Το πυρανόμετρο (pyranometer) χρησιμοποιείται αφ' ενός για τη μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (σε  $W/m^2$ ) που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια, αφ' ετέρου δε, για τη μέτρηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (από 300 nm έως 3000 nm), όταν τοποθετείται απέναντι στη θάλασσα [01,08,43]. Το βασικό αισθητήριο του πυρανόμετρου είναι μια επίπεδη θερμοστήλη (*thermopile*), καλυμμένη από ειδικό μαύρο επίχρισμα με απορροφητική ικανότητα ανεξάρτητη του μήκους κύματος. Η απόκριση του οργάνου είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η πλευρά του αισθητήρα που είναι επιχρισμένη καλύπτεται από δύο ομόκεντρες, διαφανείς, ημισφαιρικές επιφάνειες.

Το πυρανόμετρο τοποθετείται κοντά σε ηλιακούς συλλέκτες με την επιφάνεια του αισθητήρα στο επίπεδο του πίνακα, σε οριζόντια θέση χωρίς ταλαντώσεις, ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται οι σκιάσεις από άλλα αντικείμενα και να μη γίνονται παρεμβολές ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής [43].



Εικόνα 3.1 – Πυρανόμετρο της εταιρείας KIPP & ZONEN [42]

Το πυρηλιόμετρο (pyrheliometer) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, αυτής δηλαδή που προσπίπτει στη Γη κι έχει απαλλαχτεί από τη διάχυτη ακτινοβολία. Η αρχή λειτουργίας του πυρηλιόμετρου είναι όμοια με αυτήν του πυρανόμετρου. Διαθέτει μηχανισμό (tracker) που ακολουθεί την πορεία του ηλίου με σκοπό την κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο αισθητήριο όργανό του. Ο αισθητήρας του πυρηλιόμετρου είναι ένα *θερμοηλεκτρικό ζεύγος* που είναι συνδεδεμένο με ένα γαλβανόμετρο, προκειμένου να δέχεται μόνο την επίδραση της δέσμης παράλληλων ακτίνων του ηλίου, διερχόμενων από μία σωλήνα. Η μεταλλική σωλήνα προστατεύει τη θερμοηλεκτρική στήλη τόσο από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος (διάχυτη ακτινοβολία) όσο και από τους ανέμους [01,44].

Η ακτινοβολία διέρχεται από παράθυρο εισόδου κατασκευασμένο από χαλαζία, το οποίο δρα ως φίλτρο, επιτρέποντας τη διέλευση της ακτινοβολίας με μήκη κύματος από 200 nm έως 4000 nm [01].



*Εικόνα 3.2 – Πυρηλιόμετρο της εταιρείας KIPP & ZONEN [42]*

Υπάρχει διαθέσιμο ένα άλλο είδος πυρανόμετρου, το οποίο μετρά την *πυκνότητα διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας*, συνδυάζοντας τις λειτουργίες ενός μηχανισμού (tracker) παρακολούθησης της πορείας του ηλίου κι ενός σκιάστρου που επιτρέπει την αποκοπή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας [01].



# Κεφάλαιο 4

## Ηλεκτρικά και Υλικοτεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Διατάξεων

### 4.1 Ημιαγωγοί

Οι ημιαγωγοί αποτελούν το βασικό υλικό πολλών ηλεκτρονικών συσκευών, παρουσιάζοντας ενδιάμεση ηλεκτρική συμπεριφορά (αγωγιμότητα) μεταξύ των μεταλλικών αγωγών και των μονωτών. Κατά συνέπεια, τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά ελέγχονται τόσο με την προσθήκη προσμίξεων, όσο και με το φως (Φ/Β κυψέλες) [04,12,54]. Ο αριθμός των στοιχειωδών ημιαγωγών είναι μικρός, με τους ευρέως διαδεδομένους να είναι το γερμάνιο (Ge) και το πυρίτιο (Si). Στις μέρες μας, μόνο το πυρίτιο χρησιμοποιείται ευρύτατα. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι σύνθετοι ημιαγωγοί που βρίσκουν εφαρμογές σε διόδους εκπομπής φωτός (Light Emitting Diodes – LEDs), λέιζερ ημιαγωγών, συσκευές μικροκυμάτων και άλλους εξειδικευμένους τομείς. Οι περισσότεροι από αυτούς βασίζονται σε στοιχεία από τις ομάδες III και V του περιοδικού πίνακα και περιστασιακά από τις ομάδες II και VI. Αυτές είναι γνωστές, αντίστοιχα, ως ενώσεις III–V και II–VI, με παραδείγματα να είναι το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), το φωσφίδιο του γαλλίου (GaP) και το θειούχο κάδμιο (CdS) [54]. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται και άλλα είδη ημιαγωγών, τα οποία είναι ενώσεις ινδίου (InP και InAs) και καρβίδιο του πυριτίου (SiC) [53].

Ένα τμήμα του περιοδικού πίνακα που δείχνει στοιχεία από τα οποία κατασκευάζονται πολλοί σημαντικοί ημιαγωγοί φαίνεται στον **Πίνακα 4.1**, μαζί με μια λίστα επιλεγμένων ημιαγωγών και το ενεργειακό τους διάκενο [15].

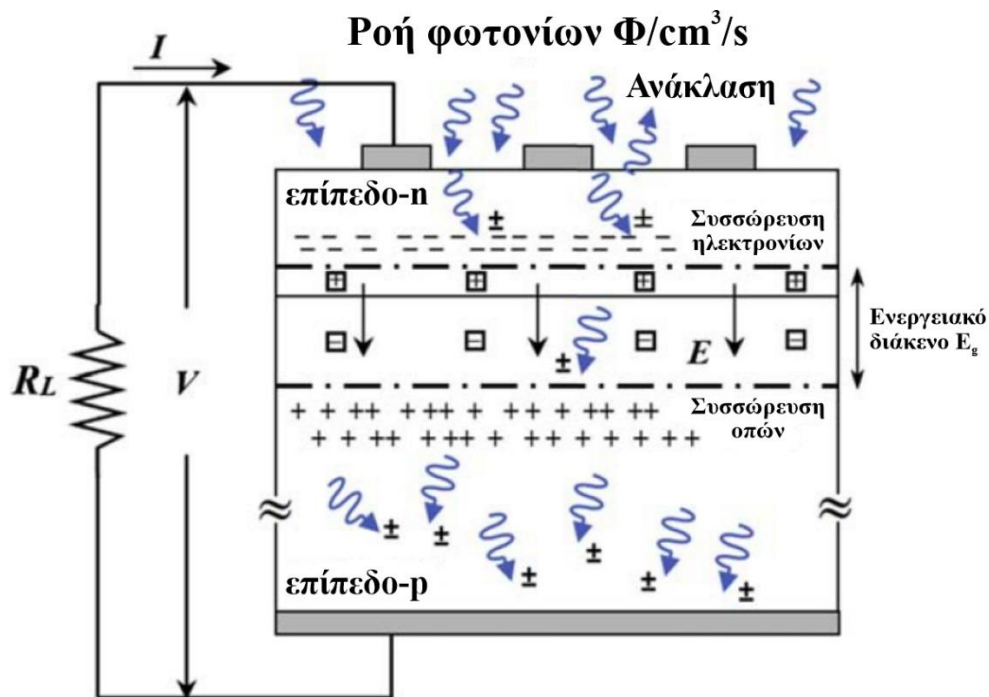
**Πίνακας 4.1** – Τμήμα του περιοδικού πίνακα με ορισμένους επιλεγμένους ημιαγωγούς που αποτελούνται από στοιχεία των ομάδων II έως VI [15]

Ομάδα	II	III	IV	V	VI
Στοιχείο		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Cd	In	Sn	Sb	Te

Ομάδα	IV	IV	IV	IV	III-V	III-V	III-V	III-V	III-V	III-V	II-V	II-V
Στοιχείο/α	C	Si	Ge	Sn	GaN	AlP	GaP	AlAs	GaAs	InSb	ZnSe	CdTe
Ενεργειακό διάκενο (eV)	6	1.12	0.67	0	3.4	2.45	2.26	2.16	1.43	0.18	2.7	1.58

#### 4.1.1 Βασική αρχή λειτουργίας ημιαγωγών και Φ/Β κυψέλης

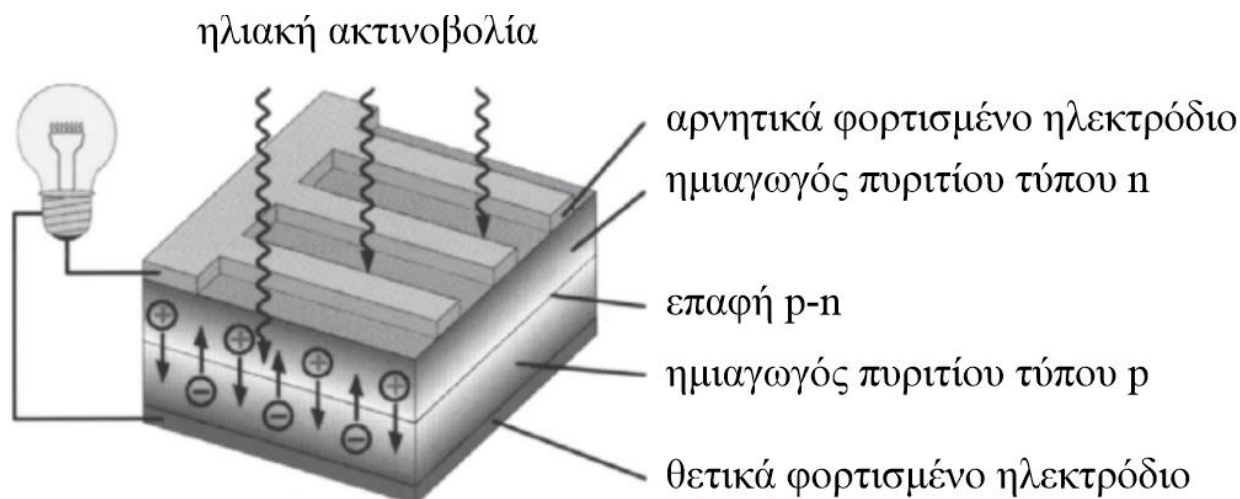
Οι Φ/Β κυψέλες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική (τάση και ρεύμα) μέσω μιας κβαντικής διαδικασίας που καλείται *φωτοβολταϊκό φαινόμενο (PV effect)*.



Σχήμα 4.1 – Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο [12]

Σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (φωτόνια)  $\sigma'$  ένα υλικό ημιαγωγών πυροδοτεί τη δημιουργία φορτισμένων σωματιδίων (ηλεκτρόνια και οπές). Ένας ημιαγωγός διαθέτει έναν πολύ μικρό αριθμό ηλεκτρονίων, το δε ενεργειακό του διάκενο ( $E_g$ ) είναι εξαιρετικά μικρό, επιτρέποντας τη μεταπήδηση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Ένας *αγωγός* έχει μικρό ενεργειακό διάκενο κι έναν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας, ενώ ένας *μονωτής* έχει την αντίθετη συμπεριφορά, δηλαδή έχει μεγάλο ενεργειακό διάκενο και ως εκ τούτου μηδαμινό αριθμό ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας [01,08,11].





Σχήμα 4.2 – Δομή και αρχή λειτουργίας Φ/Β κυψέλης [13]

Βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι η ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας να υπερτερεί των χαρακτηριστικών του υλικού του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα τη παραγωγή των φορέων αγωγιμότητας (ηλεκτρονίων και οπών). Η ενέργεια των φωτονίων  $E$  δίνεται από τη σχέση [01,08]:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} [J] = \frac{1240}{\lambda [nm]} [eV] \quad (4.1)$$

όπου:

**h** η σταθερά του Planck ( $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )

**H** η ταχύτητα του φωτός ( $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

**f** η συχνότητα των φωτονίων

**λ** το μήκος κύματος των φωτονίων

#### 4.1.2 Κατηγορίες και ατομικές διατάξεις των ημιαγωγών

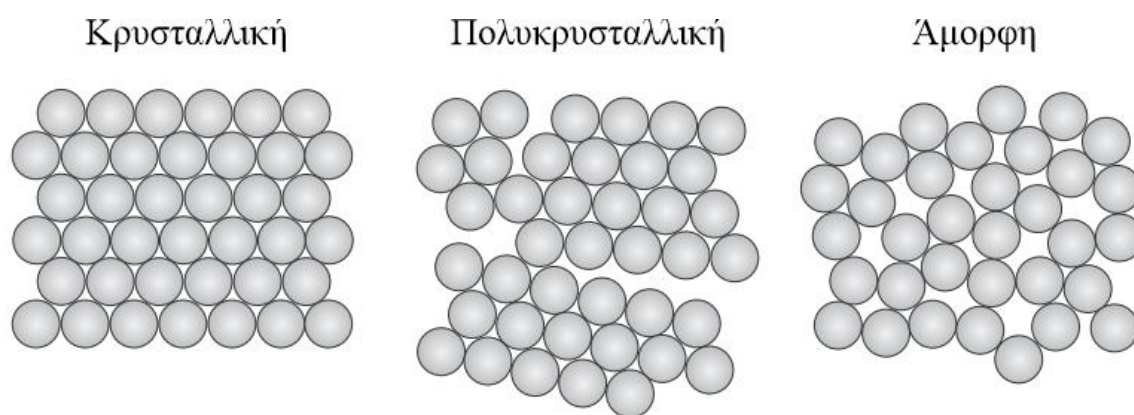
Οι ημιαγωγοί κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους ενδογενείς (*intrinsic semiconductors*) και τους εξωγενείς (*extrinsic semiconductors*). Οι ημιαγωγοί διαφέρουν από τους μονωτές λόγω της αγωγιμότητας που προκαλείται από θερμικά παραγόμενους φορείς φορτίου (ενδογενής αγωγιμότητα) ή με την προσθήκη ελεγχόμενης ποσότητας προσμίξεων (εξωγενής αγωγιμότητα). Στις περισσότερες συσκευές ημιαγωγών είναι επιθυμητή μόνο η εξωγενής αγωγιμότητα. Οι φορείς φορτίου είναι τα ηλεκτρόνια και οι οπές, οι οποίες δρουν ακριβώς όπως τα θετικά φορτισμένα ηλεκτρόνια. Με την προσθήκη του σωστού είδους προσμίξεων, είναι δυνατή η κατασκευή υλικού ημιαγωγού που άγει είτε μόνο με ηλεκτρόνια (υλικό τύπου n), είτε μόνο με οπές (υλικό τύπου p), οι οποίες δημιουργούνται στην αρχική θέση των αντίστοιχων ηλεκτρονίων, τα οποία μεταπηδούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας [04,54].

Μεταξύ των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους, το ενεργειακό χάσμα ανέρχεται στα 2 eV, ενώ η αγωγιμότητα από  $10^{-4}$  έως  $10^6 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$  [04].

Όλοι οι ημιαγωγοί έχουν κοινές διακριτές ιδιότητες που διέπουν την απόδοσή τους. Η πρώτη ιδιότητα είναι οι ατομικές δομές των υλικών, η οποία έχει μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοσή τους. Τρεις (3) είναι οι ξεχωριστές ατομικές διατάξεις για οποιοδήποτε υλικό ημιαγωγών [12]:

- *Κρυσταλλική*, όπου τα άτομα είναι τέλεια διατεταγμένα σε μια τρισδιάστατη διάταξη,
- *Πολυκρυσταλλική*, όπου το υλικό αποτελείται από κρυσταλλογραφικούς κόκκους ενωμένους μεταξύ τους με οριοθέτηση αυτών,
- *Άμορφη*, όπου τα άτομα του υλικού έχουν τυχαία σειρά σε σύγκριση με τις αρχικές τους θέσεις στο μονοκρύσταλλο.

Το **Σχήμα 4.3** απεικονίζει τις τρεις πιθανές δομές ενός υλικού ημιαγωγών. Οι Φ/Β κυψέλες (photovoltaic cells) που κατασκευάζονται από κρυστάλλους έχουν υψηλότερη απόδοση έναντι των κυψελών που κατασκευάζονται από άμορφα υλικά, οι οποίες έχουν χαμηλότερη απόδοση. Απαιτείται ένα πολύ παχύτερο στρώμα κρυσταλλικού πυριτίου για να απορροφήσει το φως (περίπου 300  $\mu\text{m}$ ) σε σύγκριση με το άμορφο πυρίτιο (a-Si), που απαιτεί περίπου 5  $\mu\text{m}$ . Επομένως, υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση υλικού χρησιμοποιώντας a-Si [12].



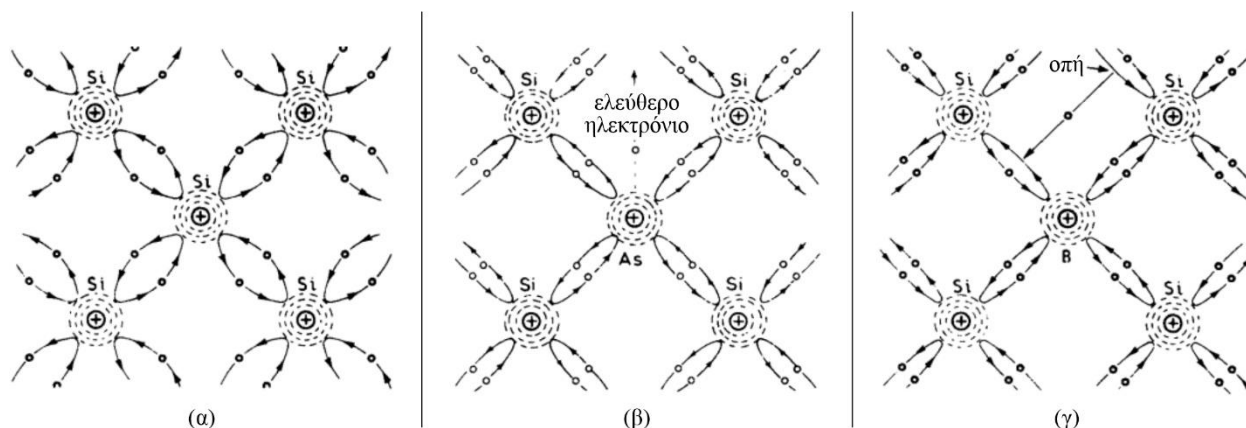
**Σχήμα 4.3** – Οι τρεις (3) ατομικές δομές για ένα υλικό ημιαγωγών [12]

### 4.1.3 Το ενεργειακό διάκενο και η επίδρασή του στην απόδοση των Φ/Β

Όπως περιγράφηκε στην **Ενότητα 4.1.2**, η ενέργεια που απαιτείται να αποκτήσουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ώστε να καταφέρουν να μεταπηδήσουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, ονομάζεται *ενεργειακό διάκενο* και συμβολίζεται με  $E_g$ . Μονάδα μέτρησης του ενεργειακού διακένου είναι τα *electron volts (eV)* και δηλώνει την ενέργεια που συσσωρεύει ένα ηλεκτρόνιο για κάθε 1 V αύξησης της τάσης του (ισούται με:  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ) [02].

Λαμβάνοντας ως παράδειγμα το πυρίτιο, ο ρυθμός αύξησης των ηλεκτρονίων του είναι ανάλογος της αύξησης της θερμοκρασίας, δηλαδή η αγωγιμότητα του πυριτίου αυξάνεται όταν αυξάνεται και η θερμοκρασία. Το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου αντιστοιχεί σε 1.12 eV, που σημαίνει ότι η ηλιακή ενέργεια που θα πρέπει να απορροφηθεί από τη Φ/Β κυψέλη ικανή για να αποδεσμευτεί ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους και να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, θα πρέπει να είναι αυτής της τάξης [02].

Στο **Σχήμα 4.4** αποτυπώνονται παραστατικά οι ομοιοπολικό δεσμοί της κρυσταλλικής δομής ενός ημιαγωγού πυριτίου πριν και μετά την προσθήκη προσμίξεων [55].

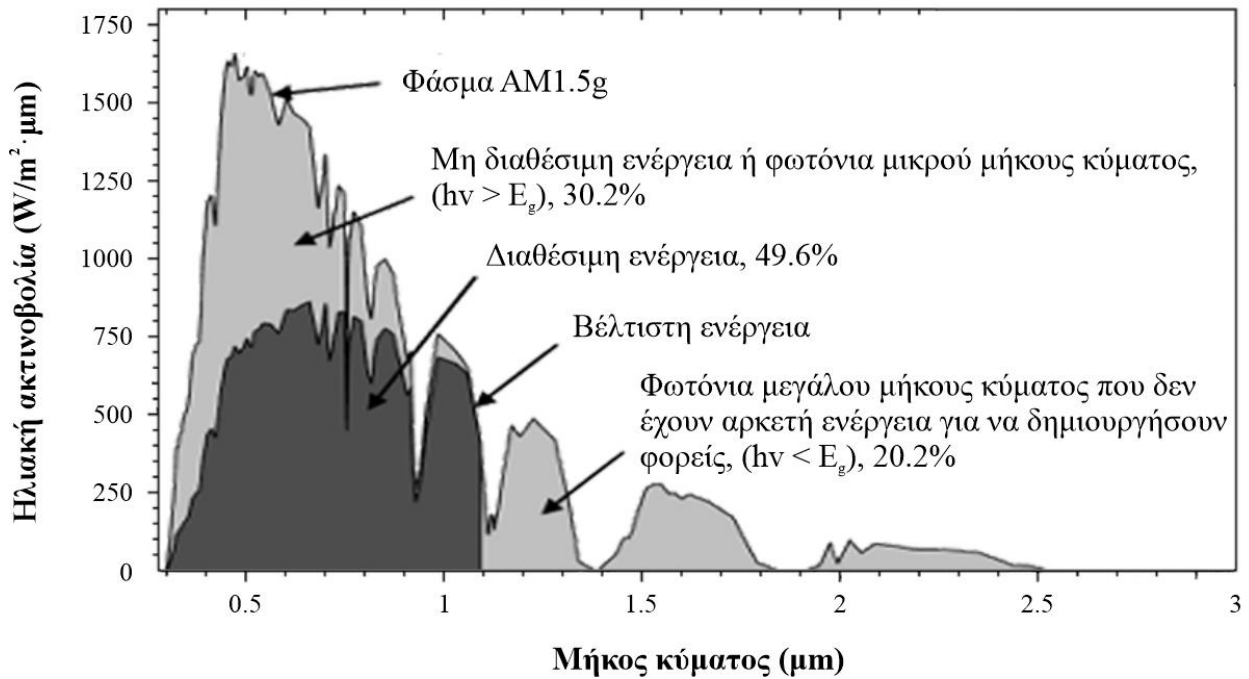


**Σχήμα 4.4** – Απεικόνιση ομοιοπολικών δεσμών: **(α)** σε κρύσταλλο καθαρού πυριτίου, **(β)** ημιαγωγού πρόσμιξης αρσενικού–πυριτίου (τύπου *n*), **(γ)** ημιαγωγού πρόσμιξης βορίου–πυριτίου (τύπου *p*) [55]

Η απόδοση των Φ/Β συστημάτων επηρεάζεται από έναν αριθμό περιοριστικών παραγόντων, με τους πιο σημαντικούς να αποτελούν το ηλιακό φάσμα, η ακτινοβολία του μέλανος σώματος και το φαινόμενο της επανασύνδεσης. Πρόσθετοι παράγοντες αποτελούν η αλληλεπίδραση της ενέργειας ανά μονάδα φορτίου (τάση) με το ενεργειακό διάκενο, καθώς και η θερμοκρασία [02].

#### 4.1.3.1 Η επίδραση του ηλιακού φάσματος

Το πυρίτιο, όπως έχουμε προαναφέρει, έχει ενεργειακό διάκενο της τάξης των 1.12 eV. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 1.11 μm, επομένως ενέργεια του ηλιακού φάσματος ( $h\nu$ ) με μήκος κύματος μεγαλύτερο των 1.11 μm ( $h\nu > E_g$ ) αδυνατεί να μετακινήσει ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και αντίστοιχα, ενέργεια με μήκος κύματος μικρότερο των 1.11 μm ( $h\nu < E_g$ ) αποτυγχάνει στη διατήρηση της επιπλέον ενέργειας του ηλιακού φάσματος, με αποτέλεσμα να υφίστανται απώλειες. Αθροιστικά, οι δύο αυτές περιπτώσεις για AM1.5 (βλ. **Ενότητα 3.1.2**) οδηγούν σε απώλειες της τάξης του 50.4%, με το υπόλοιπο 49.6% να αντιστοιχεί στην ενέργεια που συλλέγεται από τη Φ/Β κυψέλη (βλ. **Σχήμα 4.5**) και είναι άμεσα αξιοποιήσιμη για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος [02].



Σχήμα 4.5 – Ηλιακό φάσμα AM1.5 με απεικόνιση της μη χρήσιμης ενέργειας σε Φ/Β κυψέλη πυριτίου [02,56]

#### 4.1.3.2 Η επίδραση της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος

Όταν θερμανθεί η επιφάνεια μίας Φ/Β κυψέλης από τις ηλιακές ακτίνες, απελευθερώνει ενέργεια ισοδύναμη με τη θερμοκρασία στην τέταρτη δύναμη, οδηγώντας κατά προσέγγιση σε απώλειες της τάξης του 7% [02].

#### 4.1.3.3 Η επίδραση του φαινομένου της επανασύνδεσης

Όταν η κίνηση των οπών της Φ/Β κυψέλης γίνεται με αργούς ρυθμούς, καθίσταται δυσκολότερη η μεταπήδηση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας δίχως να επανασυνδεθούν στις οπές, έχοντας ως επίπτωση ένα πρόσθετο ποσοστό απωλειών περί του 10% [02].

#### 4.1.3.4 Η αλληλεπίδραση της ισχύος ( $P = U \cdot I$ ) με το ενεργειακό διάκενο

Όταν το ενεργειακό διάκενο είναι μικρό, τα φωτόνια διαθέτουν ικανή ποσότητα ενέργειας ώστε να επιτρέψουν στα ηλεκτρόνια να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας (ροή ηλεκτρισμού). Όταν όμως υφίσταται μικρό διάκενο έχουμε πλεόνασμα ενέργειας των φωτονίων, με αποτέλεσμα τον κορεσμό του δυναμικού τους εξαιτίας της αδυναμίας δημιουργίας ζευγών ηλεκτρονίων και οπών. Αντιθέτως, όταν το ενεργειακό διάκενο είναι μεγάλο, τότε ο μικρός αριθμός των φωτονίων δεν είναι σε θέση να παράσχει ικανό ενεργειακό δυναμικό προκειμένου να δημιουργήσει τα απαραίτητα ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών, άρα και ροής ενέργειας (ρεύματος). Επιπροσθέτως, μικρό ενεργειακό πλεόνασμα των φωτονίων συνεπάγεται μεγάλη τάση [02].

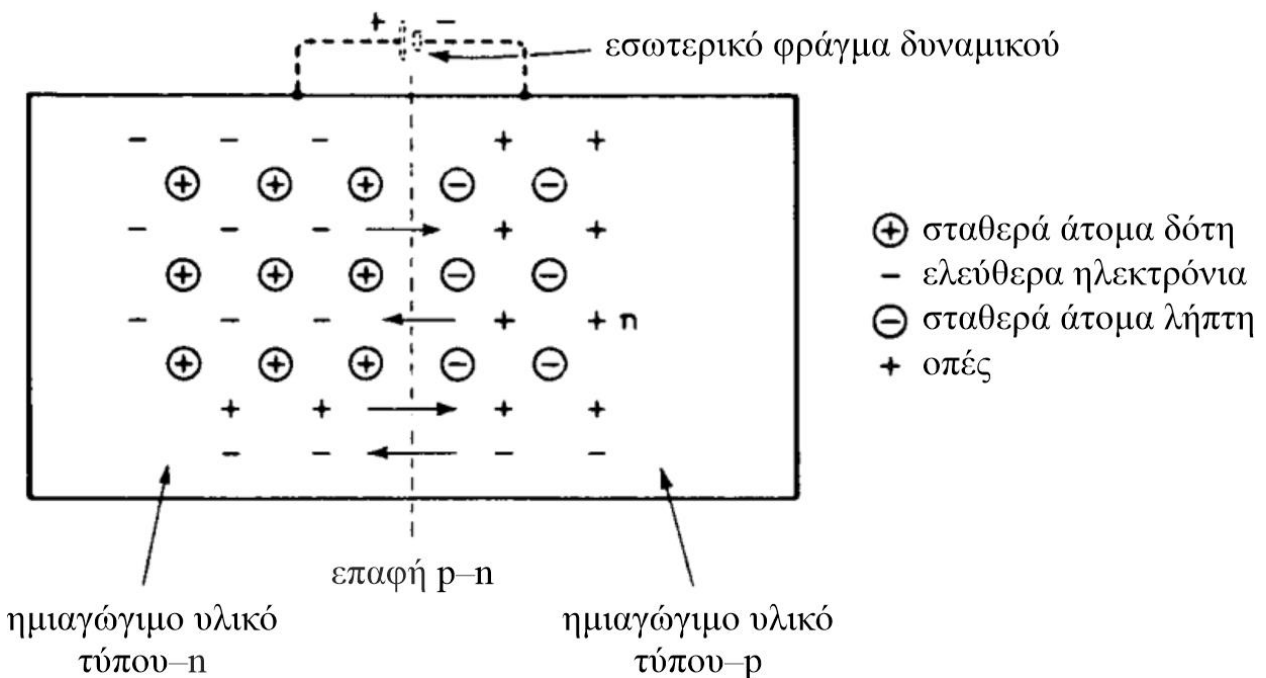
Από την παραπάνω ανάλυση, προκύπτει το συμπέρασμα ότι μεγάλο ενεργειακό διάκενο συνεπάγεται μεγαλύτερη τάση και μικρότερο ρεύμα, ενώ, αντιθέτως, μικρό ενεργειακό διάκενο συνεπάγεται μικρότερη τάση και μεγαλύτερο ρεύμα [02].

#### 4.1.3.5 Η επίδραση της θερμοκρασίας

Μία αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλλει στον εμπλουτισμό των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη ζώνη σθένους με περισσότερη κινητική ενέργεια, ώστε να μεταπηδήσουν με μεγαλύτερη ευκολία στη ζώνη αγωγιμότητας, μην απαιτώντας έτσι μεγάλη ηλιακή ενέργεια (φωτόνια) για την επίτευξη του ίδιου σκοπού. Έτσι, μειώνεται το ενεργειακό διάκενο. Με μείωση της θερμοκρασίας έχουμε ακριβώς την αντίθετη συμπεριφορά [02].

#### 4.1.4 Η επαφή $p-n$

Το αν ένα συγκεκριμένο κομμάτι ημιαγωγού είναι τύπου  $p$ , τύπου  $n$  ή ενδογενές, δεν επηρεάζει την κατεύθυνση της (συμβατικής) ροής ρεύματος όταν εφαρμόζεται τάση στα άκρα του, αν και το μέγεθος του ρεύματος θα εξαρτηθεί από το επίπεδο των εφαρμοζόμενων προσμίξεων. Όταν ενώνονται υλικά τύπου  $p$  και  $n$  ή σχηματίζεται μια επαφή  $p-n$ , το ρεύμα ρέει πολύ πιο εύκολα προς τη μία κατεύθυνση, παρά προς την άλλη. Τυπικά παραδείγματα επαφών αποτελούν οι ανορθωτές και οι δίοδοι. Οι επαφές  $p-n$ , μεμονωμένες ή σε συνδυασμό δύο ή περισσότερων, είναι απαραίτητες για τη λειτουργία πολλών συσκευών ημιαγωγών. Το Σχήμα 4.6 δείχνει τη δομή μιας επαφής  $p-n$ , χωρίς εξωτερικά εφαρμοσμένο δυναμικό (τάση) [54].



Σχήμα 4.6 – Κατανομή περισσειας ηλεκτρονίων και οπών στην περιοχή της επαφής  $p-n$  [55]



Πριν διαμορφωθεί η επαφή, το υλικό τύπου  $n$  αποτελείται από σταθερά, θετικά φορτισμένα ιόντα δότη και ίσο αριθμό ηλεκτρονίων, ενώ το υλικό τύπου  $p$  αποτελείται από σταθερά, αρνητικά φορτισμένα ιόντα δέκτη και ίσο αριθμό οπών. Όταν σχηματίζεται η επαφή, τα ηλεκτρόνια από την περιοχή τύπου  $n$  διαχέονται στην περιοχή τύπου  $p$  (αφήνοντας ένα σταθερό θετικό φορτίο πίσω) και συνδυάζονται με οπές. Ταυτόχρονα, οπές από την περιοχή τύπου  $p$  διαχέονται στην περιοχή τύπου  $n$  (αφήνοντας ένα σταθερό αρνητικό φορτίο πίσω) και συνδυάζονται με ελεύθερα ηλεκτρόνια, προκαλώντας έτσι την απουσία κινητών φορέων φορτίου στην περιοχή της επαφής [54].

Δεδομένου ότι η δίοδος αποτελείται από δύο τερματικές συσκευές, η εφαρμογή τάσης στους ακροδέκτες της αφήνει τρεις (3) δυνατότητες (συνθήκες): *χωρίς πόλωση* ( $V_{bi} = 0 \text{ V}$ ), *ορθή πόλωση* ( $V_{bi} > 0 \text{ V}$ ) και *ανάστροφη πόλωση* ( $V_{bi} < 0 \text{ V}$ ) [57].

#### 4.1.4.1 Χωρίς εφαρμογή πόλωσης (no bias)

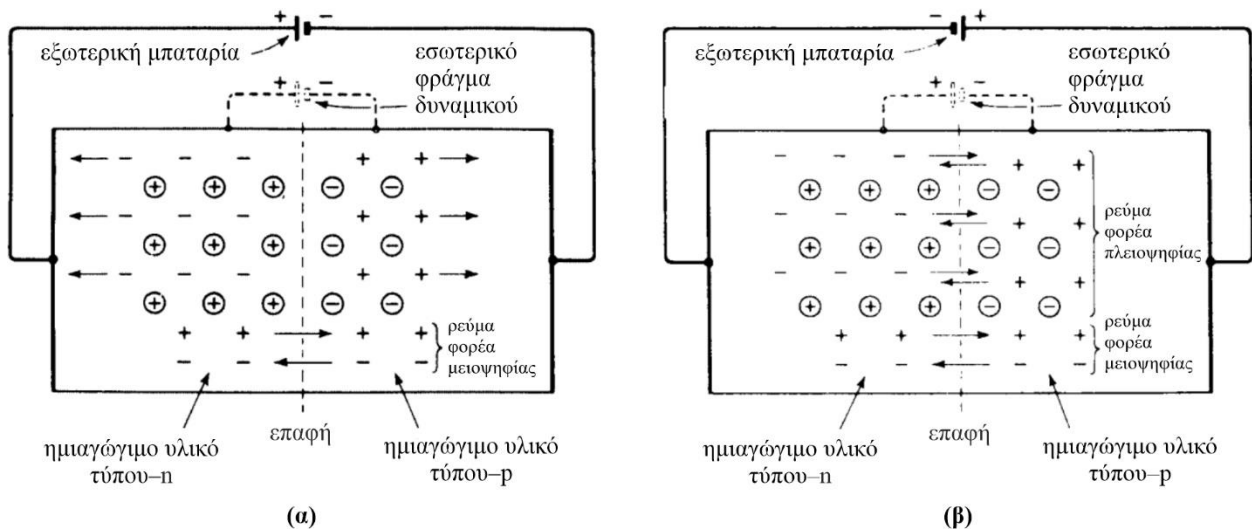
Στην περιοχή ή ζώνη απογύμνωσης κοντά στην επαφή, δημιουργείται μια τάση που ονομάζεται *εσωτερικό δυναμικό*  $V_{bi}$ , η οποία αντιτίθεται στη διάχυση των φορέων (ιόντων) φορτίου κατά μήκος της επαφής. Το  $V_{bi}$  έχει τάση 0.7 V στο πυρίτιο (Si), 1.2 V στο αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και 0.3 V στο γερμάνιο (Ge). Έτσι, όταν η δίοδος δεν είναι πολωμένη, το ρεύμα διάχυσης για τα ηλεκτρόνια (από την περιοχή  $n$ ) είναι ακριβώς ίσο με το ρεύμα  $I_{eg}$  (λόγω των θερμικά δημιουργούμενων ηλεκτρονίων στην περιοχή  $p$ ), που παράγεται από το  $V_{bi}$ . Το ίδιο ισχύει για τα ρεύματα οπών  $I_{hg}$  και  $I_{hr}$ . Οι οπές και τα ηλεκτρόνια κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις, αν και τα συμβατικά ρεύματα βρίσκονται στην ίδια κατεύθυνση λόγω του αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου, επομένως ισχύει ότι:  $I_g = I_{eg} + I_{hg}$  [54].

#### 4.1.4.2 Ανάστροφη πόλωση (reverse bias)

Όταν εφαρμόζεται στην επαφή *ανάστροφη πόλωση*, δηλαδή η πλευρά τύπου  $p$  γίνεται πιο αρνητική από την τύπου  $n$ , η περιοχή απογύμνωσης γίνεται μεγαλύτερη καθώς η τάση πόλωσης προστίθεται στο  $V_{bi}$ . Το ρεύμα διάχυσης  $I_r$  που ρέει κατά μήκος της επαφής είναι πολύ μικρό, αφού μόνο οι φορείς με αρκετή ενέργεια μπορούν να ξεπεράσουν το φράγμα δυναμικού. Το ρεύμα  $I_g$ , λόγω των θερμικά παραγόμενων μειοψηφικών φορέων, παραμένει ανεπηρέαστο από το πεδίο πόλωσης, με αποτέλεσμα ένα καθαρό αντίστροφο ρεύμα  $I_g - I_r$  [54].

#### 4.1.4.3 Ορθή πόλωση (forward bias)

Όταν η επαφή πολωθεί ορθά (η πλευρά τύπου  $p$  γίνει θετικότερη σε σχέση με την τύπου  $n$ ), η ζώνη απογύμνωσης είναι στενότερη από αυτήν της μηδενικής πόλωσης και το  $I_r$  είναι τώρα πολύ μεγαλύτερο από το  $I_g$  [54].



Σχήμα 4.7 – Συνθήκες (α) ανάστροφης και (β) ορθής πόλωσης της επαφής  $p-n$  [55]

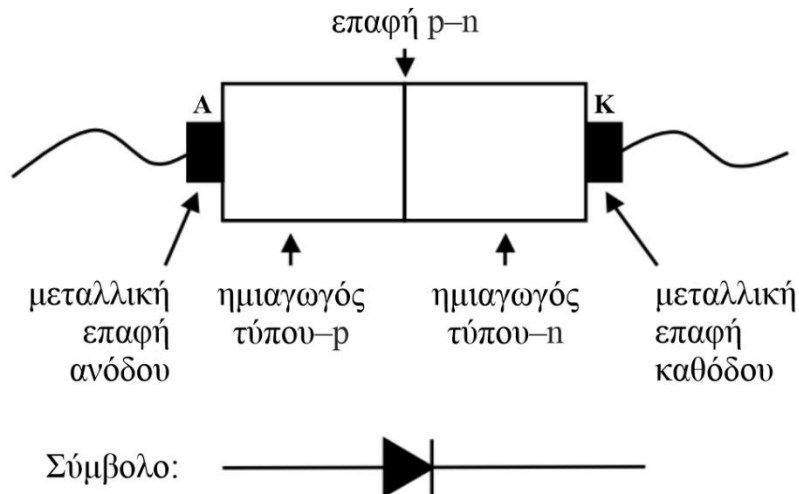
Το ανάστροφο ρεύμα ονομάζεται *ρεύμα διαρροής (leakage current)*, με το μέγεθός του να εξαρτάται από το υλικό και το μέγεθος της διόδου. Οι διόδους γερμανίου έχουν υψηλό ρεύμα διαρροής, περίπου 1000 φορές περισσότερο από αυτό των διόδων πυριτίου (μια δίοδος πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου έχει συνήθως διαρροή περίπου 1 nA). Το φως προκαλεί τη δημιουργία πρόσθετων ζευγών ηλεκτρονίων – οπών στους ημιαγωγούς, αυξάνοντας έτσι το ρεύμα διαρροής. Το λεγόμενο *σκοτεινό ρεύμα (dark current)* είναι το ρεύμα διαρροής όταν δεν προσπίπτει φως στο υλικό ημιαγωγών [54].

#### 4.1.5 Η δίοδος επαφής $p-n$

Η *δίοδος* είναι μία παθητική, μη γραμμική, δύο τερματικών σημείων συσκευή, η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος σ' ένα κύκλωμα. Υπάρχουν επίσης οπτικές διόδους που χρησιμοποιούνται ως δείκτες (δίοδοι εκπομπής φωτός ή LED), πηγές σήματος (LED και διόδους λείζερ) ή οπτικοί ανιχνευτές (φωτοδίοδοι avalanche και διόδους PIN). Το ηλιακό στοιχείο ή κυψέλη είναι ένας ειδικός τύπος οπτικής διόδου που μετατρέπει την ενέργεια του φωτός απευθείας σε ηλεκτρική [54]. Μια συσκευή ημιαγωγών που περιλαμβάνει μια *δίοδο επαφής  $p-n$* , αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη [15]:

- Μία μεταλλική επαφή *ανόδου (A)* που εφαρμόζεται σε έναν ημιαγωγό τύπου  $p$ , η οποία σχηματίζει μια ένωση μετάλλου–ημιαγωγού,
- Έναν ημιαγωγό τύπου  $p$ ,
- Μία ημιαγωγική *επαφή  $p-n$*  μεταξύ των ημιαγωγών τύπου  $p$  και τύπου  $n$ ,
- Έναν ημιαγωγό τύπου  $n$ ,
- Μία μεταλλική επαφή *καθόδου (K)* που εφαρμόζεται σε έναν ημιαγωγό τύπου  $n$ , η οποία σχηματίζει μια άλλη ένωση μετάλλου–ημιαγωγού.

Αρχικά, η διόδος ημιαγωγών χρησιμοποιήθηκε για την **παροχή ροής ρεύματος προς τη μία κατεύθυνση και παρεμπόδισης ροής ρεύματος προς την άλλη**. Βρήκε ευρεία εφαρμογή στα πρώιμα λογικά κυκλώματα ως διάταξη σύσφιξης και ως λογικός αθροιστής. Χρησιμοποιείται ευρέως ως ανορθωτής σε τροφοδοτικά και ως ανιχνευτής σημάτων σε ραδιοκυκλώματα [15].



**Σχήμα 4.8** – Τα βασικά μέρη και ο συμβολισμός της διόδου επαφής  $p-n$  [55]

Όταν μία διόδος πολωθεί ορθά, η ροή του ρεύματος ακολουθεί συμβατική φορά, από την άνοδο προς την κάθοδο, ενώ αν πολωθεί ανάστροφα, συμβαίνει το αντίθετο (βλ. **Σχήμα 4.10** και **4.11**, αντίστοιχα) [54].

Η **σχέση ρεύματος-τάσης ( $I-V$ )** για μια διόδο επαφής  $p-n$  δίνεται από την **εξίσωση ανορθωτή**<sup>4</sup> [54]:

$$I = I_s[\exp(qV_{AK}/kT) - 1] \quad (4.2)$$

όπου:

$V_{AK}$  το δυναμικό στα άκρα της διόδου (θετικό σε ορθή και αρνητικό σε ανάστροφη πόλωση)

$I_s$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού (saturation current) (πολύ μικρή ποσότητα)

$q$  το μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου ( $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C)

$k$  η σταθερά του Boltzmann ( $k = 1.38065 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$  η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

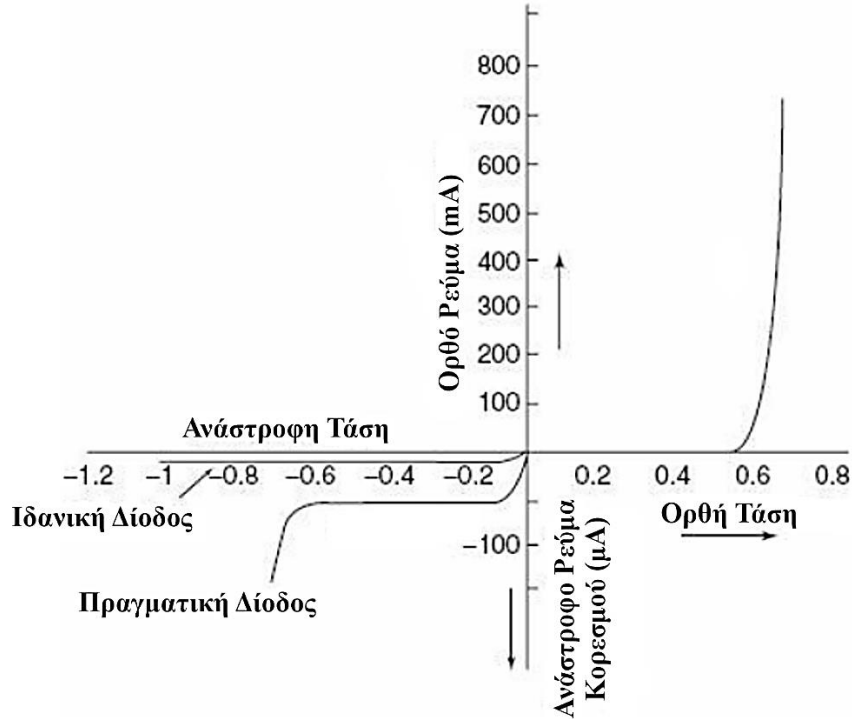
Αντικαθιστώντας τις τιμές των  $q$ ,  $k$  και  $T$  (290 °K), η **Εξίσωση 4.2** για ρεύματα ορθά πολωμένης διόδου διαμορφώνεται ως εξής [54]:

$$I = I_s \exp(40V_{AK}) \quad (4.3)$$

<sup>4</sup> Η απόκλιση της σχέσης ρεύματος-τάσης από την **Εξίσωση 4.2** μπορεί να υπολογιστεί με την προσθήκη ενός παράγοντα ιδανικότητας  $\eta$  στον εκθέτη. Επομένως:  $I = I_s[\exp(qV_{AK}/\eta kT) - 1]$ , όπου  $1 \leq \eta \leq 2$ .

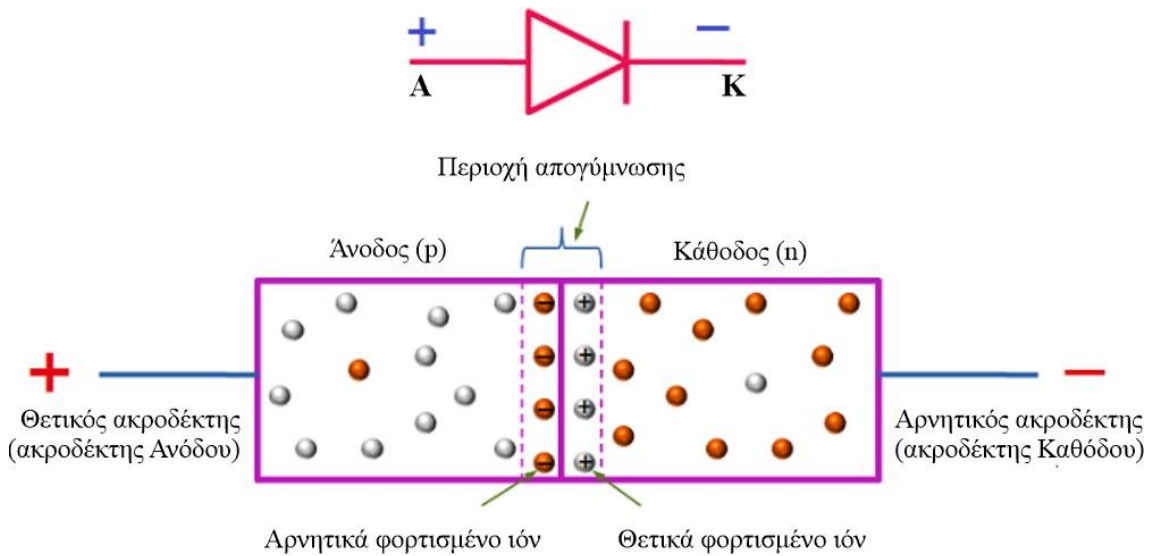


Η τιμή  $-I$  στην **Εξίσωση 4.2** μπορεί να αγνοηθεί σε κανονικά ρεύματα ορθά πολωμένης διόδου. Όταν η διάδος πολωθεί ανάστροφα, το  $V$  είναι αρνητικό και η **Εξίσωση 4.2** μειώνεται σε  $I \approx -I_s \approx 0$ . Επειδή η σχέση  $I-V$  στην εξίσωση ανορθωτή δεν είναι γραμμική (δηλαδή, δεν είναι της μορφής  $I = \alpha V + \beta$ , όπου  $\alpha$  και  $\beta$  είναι σταθερές) οι διόδοι είναι μη γραμμικές συσκευές.

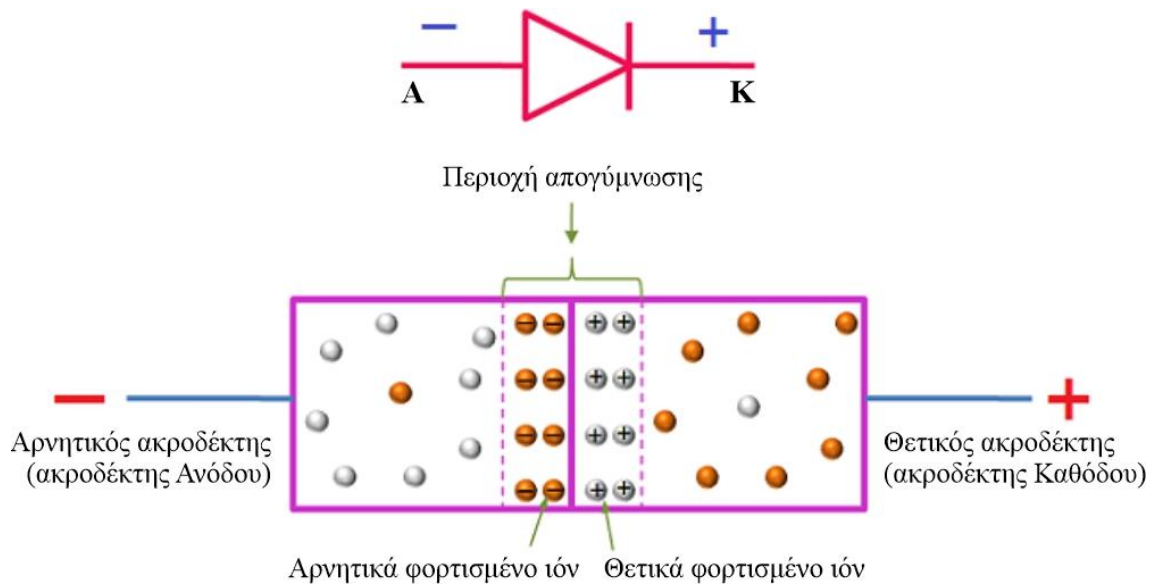


**Σχήμα 4.9** – Θεωρητικές και πραγματικές χαρακτηριστικές  $I-V$  μίας τυπικής διόδου ημιαγωγών [58]

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η ροή του ανάστροφου ρεύματος είναι αμελητέα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και από το υλικό κατασκευής της διόδου (πυρίτιο, γερμάνιο κ.λπ.), ενώ σχεδόν διπλασιάζεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται κατά  $10^\circ\text{K}$  [54].



**Σχήμα 4.10** – Ορθά πολωμένη διάδος επαφής  $p-n$  [59]



Σχήμα 4.11 – Ανάστροφα πολωμένη δίοδος επαφής  $p-n$  [59]

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της δίοδου επαφής  $p-n$  έχουν ως εξής [59]:

- Η δίοδος επαφής  $p-n$  είναι η απλούστερη μορφή όλων των συσκευών ημιαγωγών. Ωστόσο, οι δίοδοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές.
- Η δίοδος επαφής  $p-n$  χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC). Βρίσκουν, επίσης, πεδίο εφαρμογής σε συσκευές παροχής ρεύματος.
- Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, επιτρέπει τη ροή του ρεύματος. Αντιθέτως, εάν είναι πολωμένη ανάστροφα, μπλοκάρει τη ροή του ρεύματος. Με άλλα λόγια, η δίοδος επαφής  $p-n$  ενεργοποιείται όταν πολώνεται ορθά, ενώ απενεργοποιείται όταν πολώνεται ανάστροφα (δηλαδή λειτουργεί ως διακόπτης). Ο τρόπος της λειτουργίας της δίοδου επιτρέπει τη χρησιμοποίησή της ως ηλεκτρονικός διακόπτης σε ψηφιακά λογικά κυκλώματα.

## 4.2 Υλικά φωτοβολταϊκών

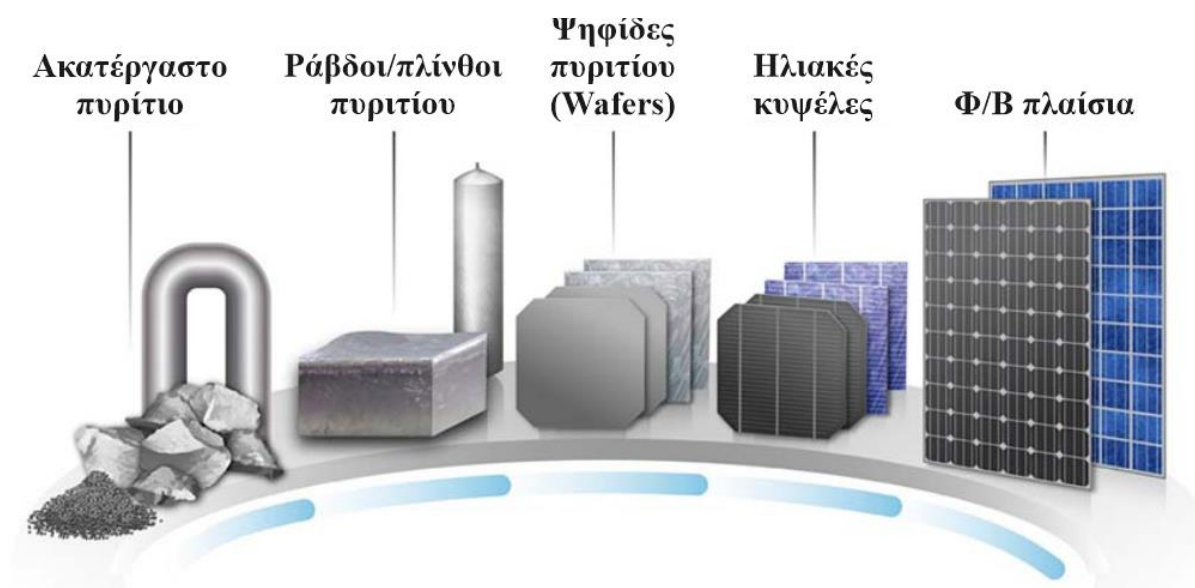
Οι ηλιακές κυψέλες μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά, με το πιο διαδεδομένο σήμερα να είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο βρίσκεται σε αφθονία στη φύση και είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Επιπλέον, μπορεί εύκολα να κατεργαστεί, με την αντοχή του σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες να αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση του σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (διατηρεί τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά σε θερμοκρασίες άνω των 100 °C) [61]. Παρόλο που υπάρχουν άλλα υλικά που είναι πιο αποτελεσματικά στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, οι ημιαγωγοί πυριτίου κυριαρχούν στην αγορά επειδή υπερτερούν στο λόγο απόδοσης/κόστους, δηλαδή παράγουν την περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια με το χαμηλότερο κόστος. Τρεις (3) είναι οι μορφές του πυριτίου που βρίσκονται σε ηλιακές μονάδες: *μονοκρυσταλλικό*, *πολυκρυσταλλικό* και *λεπτού υμενίου* [16].

### 4.2.1 Μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (sc-Si)

Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου ήταν οι πρώτες που κατασκευάστηκαν και κυκλοφόρησαν στο εμπόριο, από τις αρχές της δεκαετίας του 1950. Κατασκευάζονται από εξαιρετικά λεπτές ψηφίδες πυριτίου (wafers), κομμένες σε τεμάχια από έναν μόνο κρύσταλλο καθαρού πυριτίου, γνωστό ως *ράβδος πυριτίου* [16].

Οι μεγάλου μήκους, κυλινδρικές μονοκρυσταλλικές ράβδοι κατασκευάζονται με τήξη κομματιών πυριτίου υψηλής καθαρότητας και μικρής ποσότητας βορίου. Μόλις τηχθεί η πρώτη ύλη, ένας κόκκος κρυστάλλου βυθίζεται, περιστρέφεται και αποσύρεται αργά από το *τήγμα*. Κατά την απόσυρσή του, άτομα πυριτίου και βορίου προσκολλώνται στον κόκκο, αυξάνοντας την κρυσταλλική του δομή. Τελικά, το μέγεθος της ράβδου μπορεί να αυξηθεί σε μήκος 100 cm και διαμέτρου 15 έως 20 cm [16].

Μόλις ολοκληρωθεί πλήρως η προηγούμενη διαδικασία, η ράβδος ψύχεται. Στη συνέχεια, η στρογγυλή ράβδος κόβεται σε μία άλλη, τετραγωνισμένη ράβδο με στρογγυλεμένες γωνίες και τέλος, τεμαχίζεται εκ νέου με χρήση κοπτικού συστήματος διαμαντιού, παράγοντας εξαιρετικά λεπτά wafers. Τα απορριπτόμενα μέρη (απόβλητα) αυτής της διαδικασίας τήκονται εκ νέου και επαναχρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού τύπου ηλιακών κυψελών [16].



Σχήμα 4.12 – Τα στάδια παραγωγής Φ/Β πλαισίων [60]

Η κοπή της ράβδου πυριτίου πριν από τον τεμαχισμό της, επιτρέπει στους κατασκευαστές την τοποθέτηση περισσότερων ηλιακών κυψελών σε ένα Φ/Β πλαίσιο, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοση ανά τετραγωνικό εκατοστό. Επειδή οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες έχουν τετραγωνισμένο σχήμα, τα Φ/Β πλαίσια που κατασκευάζονται από αυτές μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν από το χαρακτηριστικό λευκό χώρο στη συμβολή τεσσάρων κυψελών [16].

Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου διαθέτουν την υψηλότερη απόδοση απ' όλες τις συμβατικές Φ/Β κυψέλες, με τις εμπορικά διαθέσιμες κυψέλες να επιτυγχάνουν αποδόσεις από 15% έως 20%. Η απόδοση είναι ένα μέτρο της εισόδου έναντι της εξόδου ενέργειας. Όταν μια μονάδα αναφέρεται πως έχει απόδοση 16%, σημαίνει ότι παράγει 16 μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε 100 μονάδες ενέργειας του ηλιακού φωτός [16].

#### 4.2.2 Πολυκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (mc-Si)

Οι πολυκρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες κυκλοφόρησαν στο εμπόριο το 1981. Όμοια όπως και με τις μονοκρυσταλλικές, είναι κατασκευασμένες από καθαρό πυρίτιο με προσθήκη μικρής ποσότητας βορίου, έχοντας πάχος περίπου 0.3 mm. Κύριες μέθοδοι παραγωγής είναι η *απ' ευθείας στερεοποίηση DS (Directional Solidification)*, η *ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (χύτευση)* και η *ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC [16,61]*.

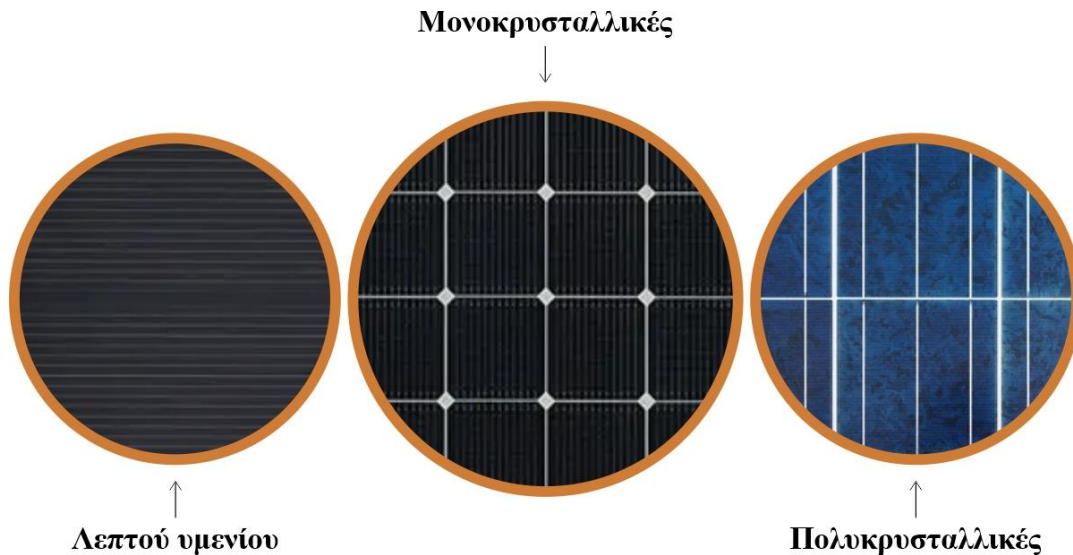
Κατά τη διαδικασία της χύτευσης, το τηγμένο υλικό εγχέεται σ' ένα τετράγωνο καλούπι και στη συνέχεια αφήνεται να κρυώσει πολύ αργά. Καθώς το πλινθίο ψύχεται, σχηματίζονται εσωτερικά πολλοί μικρότεροι κρύσταλλοι και όταν ολοκληρωθεί η ψύξη, το πλινθίο αφαιρείται από το καλούπι. Έπειτα τεμαχίζεται σε λεπτές φέτες με τη χρήση κοπτικού συστήματος διαμαντιού, δημιουργώντας wafers που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ηλιακών κυψελών [16].

Οι πολυκρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες που κατασκευάζονταν τις προηγούμενες δεκαετίες περιείχαν κρυστάλλους αρκετά μεγαλύτερου μεγέθους. Ωστόσο, σήμερα, οι κρύσταλλοι είναι συχνά τόσο μικροί που δεν μπορούν να ανιχνευθούν με γυμνό μάτι. Σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά, τα Φ/Β πλαίσια πολυκρυσταλλικών ηλιακών κυψελών είναι ελαφρώς λιγότερο αποδοτικά, κατά μέσο όρο σε ποσοστό 15% έως 17%. Ο λόγος είναι ότι τα όρια μεταξύ των κρυστάλλων σε μία ηλιακή κυψέλη μειώνουν τη ροή των ηλεκτρονίων διαμέσου του στοιχείου, μειώνοντας την ισχύ στην έξοδό τους. Παρόλο που η απόδοση των πολυκρυσταλλικών ηλιακών κυψελών είναι ελαφρώς μικρότερη, αυτά απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια για την κατασκευή τους, με αποτέλεσμα να είναι μικρότερο το κόστος παραγωγής τους [16].

Ως προς την εμφάνιση, τα πλαίσια που κατασκευάζονται από πολυκρυσταλλικές κυψέλες χαρακτηρίζονται από το τετράγωνο ή ορθογώνιο σχήμα τους και είναι σφιχτά ενσωματωμένα σε μια ενιαία μονάδα, χωρίς να εμφανίζουν το χαρακτηριστικό ανοιχτό χώρο στη διασταύρωση των ηλιακών κυψελών, όπως στα πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ο σφιχτός τρόπος με τον οποίο είναι ενσωματωμένες οι κυψέλες αντισταθμίζει τη χαμηλότερη απόδοσή τους, καθώς η υψηλότερης πυκνότητας συσκευασία και το ελαφρώς μεγαλύτερο μέγεθος του πλαισίου, οδηγεί σε παραγωγή ίδιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με ένα πιο δαπανηρό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [16].

### 4.2.3 Ταινία πυριτίου (Ribbon-Si)

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της ταινίας πυριτίου αποτελεί η κατά 50% μείωση χρήσης πυριτίου έναντι των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών Φ/Β κυψελών. Έχει πάχος 0.3 χιλιοστά και η απόδοσή της κυμαίνεται μεταξύ 12 – 13% [61].



Σχήμα 4.13 – Οπτική απεικόνιση των κύριων τύπων κυψελών των Φ/Β στοιχείων [62]

### 4.2.4 Φ/Β στοιχεία λεπτού υμενίου (Thin Film)

#### 4.2.4.1 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου: CIGS)

Η εξαιρετική δυνατότητα απορρόφησης του ηλιακού φωτός από το συγκεκριμένο ημιαγώγιμο υλικό, έχει οδηγήσει σε απόδοση της τάξης του 11 έως 12%. Σε εργαστηριακό περιβάλλον η απόδοση αγγίζει το 19 – 20%. Με την προσθήκη γαλλίου, η απόδοση αυξάνεται ακόμη περισσότερο. Μειονέκτημα αποτελεί η περιορισμένη ύπαρξη ποσοτήτων ινδίου στη φύση [08,61].

#### 4.2.4.2 Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Η κατασκευή των Φ/Β στοιχείων a-Si χαρακτηρίζεται από τη σε μεγάλο βαθμό έλλειψη της κρυσταλλικής δομής των ατόμων του πυριτίου (τυχαίος τρόπος διάταξή τους), διατηρώντας όμως παράλληλα τις ημιαγώγιμες τους ιδιότητες σε ικανοποιητικό βαθμό. Η απόδοση των στοιχείων αυτών είναι χαμηλότερη συγκριτικά με τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά στοιχεία, γεγονός που οφείλεται στην ατομική τους δομή και είναι της τάξης του 6 – 8%. Σε εργαστηριακό περιβάλλον, η απόδοση μπορεί να φτάσει μέχρι και 14%. Η κατασκευή τους γίνεται με την εναπόθεση πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης από χαμηλού κόστους γυαλί ή αλουμίνιο του ημιαγώγιμου υλικού (πυρίτιο). Με την πρόσμιξη και άλλων ημιαγωγικών στοιχείων (υδρογόνου,

γερμανίου, άνθρακα κ.λπ.) επιτυγχάνεται η καλύτερη αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους ηλιακού φάσματος, λόγω του διαφορετικού ενεργειακού διακένου των υλικών [02,08,61].

Βασικά πλεονεκτήματα αποτελούν η ελάχιστη ποσότητα πυριτίου που απαιτείται, η οποία οδηγεί σε οικονομικότερο τελικό προϊόν και η δυνατότητα εύκολης κατεργασίας εξαιτίας της ατομικής δομής του στοιχείου. Αποτέλεσμα από τα προηγούμενα αποτελεί η τελική παραγωγή πολύ λεπτών κι εύκαμπτων Φ/Β στοιχείων. Το πιο σημαντικό όμως πλεονέκτημα των Φ/Β στοιχείων a-Si αποτελεί η αντοχή τους στις υψηλές θερμοκρασίες και η αξιοποίηση της απόδοσής τους σε συνθήκες συννεφιάς (διάχυτη ακτινοβολία). Αντιθέτως, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας των στοιχείων a-Si, απαιτείται μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια για την παραγωγή ενέργειας, συγκριτικά με τα κρυσταλλικά στοιχεία, γεγονός που αποτελεί βασικό μειονέκτημα [08,61].

Ενδεικτικά, το πάχος του ημιαγώγιμου υλικού (πυρίτιο) ανέρχεται σε περίπου 0.0001 χιλιοστά, ενώ το πάχος του υποστρώματος υποστήριξης (γυαλί ή αλουμίνιο) κυμαίνεται από 1 – 3 χιλιοστά [61].

#### 4.2.4.3 Τελουριούχο κάδμιο (CdTe)

Το ενεργειακό διάκενο του CdTe είναι περίπου 1.5 eV, έχοντας ως πλεονέκτημα τη σχεδόν πλήρη απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (AM1). Η απόδοση των πλαισίων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 6 – 12%, ενώ στο εργαστήριο μπορεί να φτάσει μέχρι και σε ποσοστό 17%. Για την κατασκευή Φ/Β στοιχείων CdTe απαιτούνται μικρότερες ποσότητες πρώτων υλών έναντι των κρυσταλλικών στοιχείων πυριτίου, γεγονός που αντισταθμίζει τη χαμηλή απόδοσή και επιτρέπει τη μαζική παραγωγή και χρήση τους. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η μεγάλη τοξικότητα του καδμίου, ενέχοντας σοβαρούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία [02,08,61].

#### 4.2.4.4 Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)

Το γάλλιο αποτελεί παραπροϊόν της ρευστοποίησης μετάλλων, όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Τα γάλλιο χαρακτηρίζεται για τη σπανιότητά του στη φύση. Το αρσενικό, ωστόσο, δεν είναι σπάνιο, άλλα μειονεκτεί στο ότι είναι εξαιρετικά δηλητηριώδες [61].

Το ενεργειακό διάκενο του αρσενικούχου γαλλίου είναι 1.43 eV, καθιστώντας το ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας [61].

Η απόδοση του GaAs είναι αρκετή υψηλή, αγγίζοντας το 29%. Η απόδοση αυτή οφείλεται στη μορφή *πολλαπλών συνενώσεων (multijunction)* που διαθέτει. Τα Φ/Β στοιχεία GaAs είναι πολύ ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που επιβάλλει σε μεγάλο ποσοστό τη χρήση τους σε εφαρμογές *ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators)*. Πλεονεκτούν αφ' ενός στο ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και αφ' ετέρου λόγω της

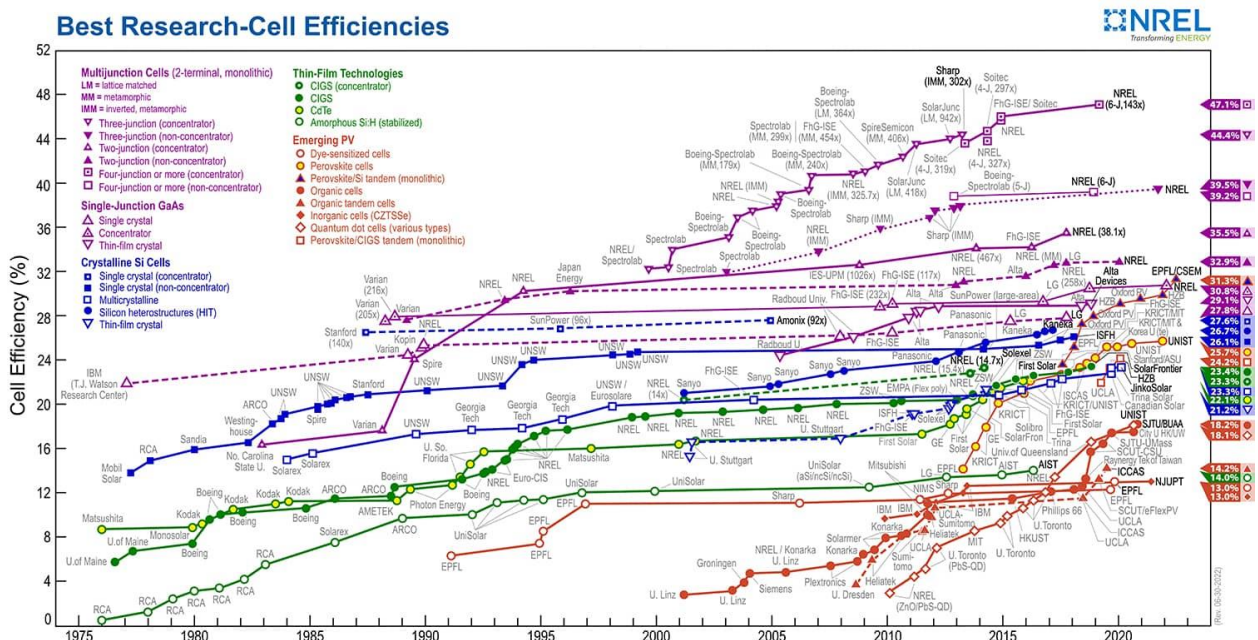


πολύ υψηλής απόδοσης τους, καθιστώντας τα ιδανικά για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αποτελεί το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού υποστρώματος GaAs [61].

### 4.2.5 Υβριδικά Φ/Β στοιχεία

Ένα υβριδικό Φ/Β στοιχείο (*Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HIT*) αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο δημοφιλή υβριδικά Φ/Β στοιχεία αποτελούνται από μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου, η οποία καλύπτεται (επάνω και κάτω) από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου [61].

Το ισχυρό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου, φτάνοντας σε εμπορικές εφαρμογές άνω του 17%, κάτι που σημαίνει ότι απαιτείται μικρότερη επιφάνεια για την επίτευξη της ίδιας εγκατεστημένης ισχύος. Πρόσθετα πλεονεκτήματα αποτελούν η μεγάλη τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και στη διαχεόμενη ακτινοβολία. Μειονέκτημα των υβριδικών Φ/Β έναντι των συμβατικών Φ/Β πλαισίων αποτελεί το υψηλότερο κόστος [61].



Σχήμα 4.14 – Η εξέλιξη της απόδοσης των Φ/Β κυψελών μέχρι σήμερα (06/2022) [63]

### 4.2.6 Άλλες τεχνολογίες Φ/Β στοιχείων

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των Φ/Β στοιχείων που λαμβάνει χώρα στα ερευνητικά εργαστήρια, οδηγεί στην ανάπτυξη τεχνολογιών που αναμένεται στο μέλλον να έχουν ευρεία απήχηση. Παράδειγμα τέτοιων τεχνολογιών αποτελούν τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (*nc-Si*) και τα οργανικά/πολυμερή στοιχεία [61].

### 4.3 Ισχύς εξόδου Φ/B μονάδων

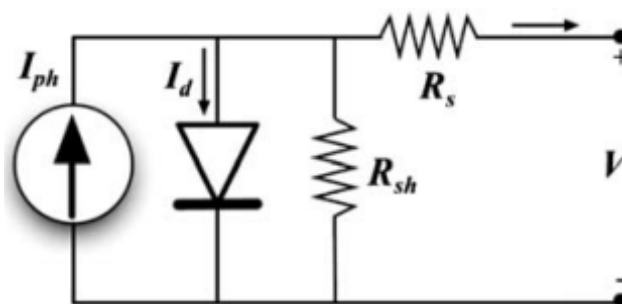
Η ισχύς που παράγουν οι Φ/B μονάδες στην έξοδό τους, εξαρτάται από τη λειτουργική συνθήκη φόρτισής τους και εκφράζεται σε *Watt peak* ( $W_p$ ). Η παραγόμενη ισχύς ορίζεται βάσει *πρότυπων συνθηκών ελέγχου* (*Standard Test Conditions, STC*) ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, οι οποίες αναφέρονται [01]:

- στη θερμοκρασία των κυψελών της Φ/B μονάδας ( $25^\circ\text{C}$ ),
- στην πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ( $1\text{ kW/m}^2$ ),
- στη φασματική κατανομή AM1.5 και
- στην πρόσπτωση με κάθετη φορά.

Σε πραγματικές συνθήκες, όμως, οι παραπάνω τιμές είναι αρκετά διαφορετικές. Ενδεικτικά: η θερμοκρασία των κυψελών είναι μεγαλύτερη των  $25^\circ\text{C}$ , συνήθως κυμαινόμενη μεταξύ  $40^\circ\text{C}$  έως  $60^\circ\text{C}$ . Η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη του  $1\text{ kW/m}^2$ , συνήθως μεταξύ  $200\text{ W/m}^2$  έως  $800\text{ W/m}^2$  και η ένταση της φασματικής κατανομής έχει διαφορετική τιμή ( $\neq\text{AM1.5}$ ) [01].

### 4.4 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/B στοιχείων (κυψελών)

Όταν στην επιφάνεια ενός Φ/B προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία, θεωρείται ως μία ιδανική πηγή ρεύματος, του οποίου η ισχύς εξαρτάται από την πυκνότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Με την παράλληλη σε αυτήν την πηγή σύνδεση μίας διόδου προκύπτει το *απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/B στοιχείου*, όπως εικονίζεται στο **Σχήμα 4.15** [02,08].



**Σχήμα 4.15** – Απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/B στοιχείου [12]

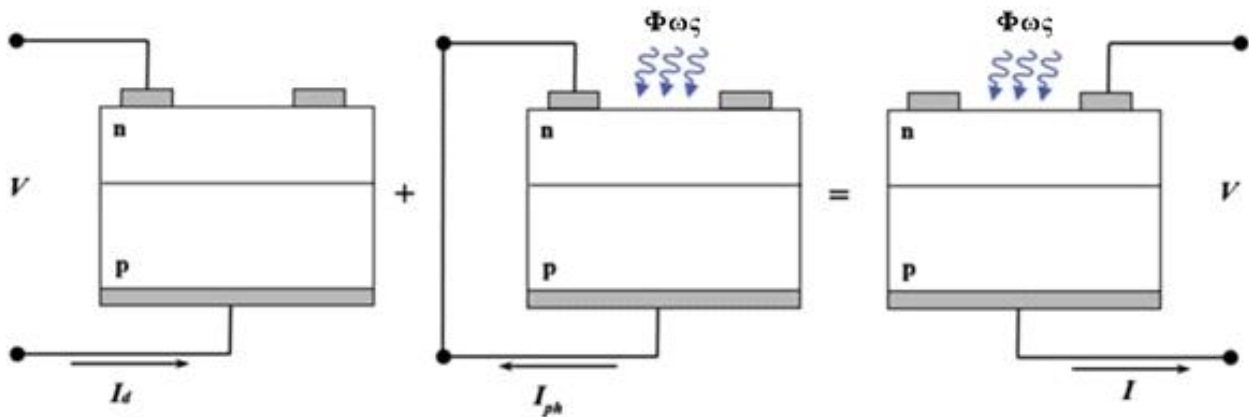
Δύο σημαντικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν ένα πραγματικό Φ/B στοιχείο και το ισοδύναμο κύκλωμά του είναι το *ρεύμα βραχυκύκλωσης* ( $I_{sc}$ ), που ρέει όταν τα άκρα του κυκλώματος είναι βραχυκυκλωμένα και η *τάση ανοικτού κυκλώματος* ( $V_{oc}$ ), η τάση δηλαδή που εμφανίζεται στα άκρα του κυκλώματος όταν αυτά είναι ανοικτά [02]. Τα ρεύματα στο απλό ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.15**, είναι τα εξής [08]:



- το ρεύμα της ιδανικής πηγής  $I_{ph}$ , το οποίο παράγεται και είναι ανάλογο της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου,
- το ρεύμα  $I_d$  που διαρρέει τη δίοδο και περιγράφεται από την εξίσωση του Shockley ή εξίσωση ανορθωτή (βλ. Σχέση 4.2),
- το ρεύμα  $I$  που διαρρέει το κύκλωμα στο σύνολό του, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (4.4)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV_{AK}}{kT}} - 1 \right) \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.16 – Απεικόνιση της υπέρθεσης για το Φ/Β στοιχείο (ροή ρεύματος) [12]

Με την απουσία ηλιακού φωτός, το Φ/Β στοιχείο λειτουργεί ως μία συνηθισμένη δίοδος. Όταν όμως το ηλιακό φως προσπίπτει στην επιφάνειά του, τότε λειτουργεί και ως πηγή ρεύματος. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.2, η *ωμική αντίσταση*  $R_s$  που είναι συνδεδεμένη σε σειρά αφορά τόσο την εσωτερική αντίσταση της διόδου όταν αυτή διαρρέεται από ρεύμα, όσο και την αντίσταση των καλωδιώσεων και των επαφών του ισοδύναμου κυκλώματος. Η *αντίσταση*  $R_{sh}$  ή *αντίσταση διαρροής* (*shunt resistance*) είναι η σε παράλληλη σύνδεση αντίσταση της διαρροής ρεύματος μεταξύ των άκρων ανόδου και καθόδου της διόδου επαφής  $p-n$  [08].

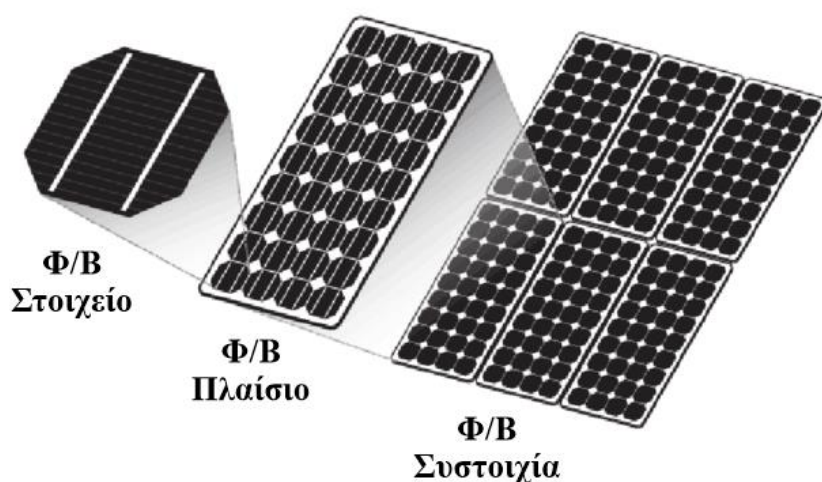
Αναλύοντας ένα πιο ακριβές μοντέλο του ισοδύναμου κυκλώματος ενός Φ/Β στοιχείου, παρατηρούμε ότι η επίπτωση της σκίασης σ' έναν κλάδο εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος για την τροφοδότηση του συνδεδεμένου φορτίου [02].

#### 4.4.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β μονάδας (πάνελ) και παράμετροί του

Όταν πολλαπλά Φ/Β στοιχεία συνδεθούν σε σειρά περικλειόμενα σ' ένα περίβλημα υψηλής αντοχής, τότε η λειτουργική μονάδα που προκύπτει καλείται *Φ/Β μονάδα* ή *Φ/Β πλαίσιο*. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης όλο και περισσότερων Φ/Β στοιχείων στο ίδιο πλαίσιο συμβάλλει στη

μείωση του αριθμού των πλαισίων και των απαιτούμενων συνδέσεων μεταξύ αυτών, αποτελώντας σημαντικό πλεονέκτημα για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους [02].

Καθώς η τάση που δημιουργείται σε κάθε κυψέλη είναι πολύ μικρή, για να αντλήσουμε περισσότερη ενέργεια θα πρέπει να δημιουργήσουμε συστοιχίες από Φ/Β στοιχεία. Η εν σειρά σύνδεση των Φ/Β στοιχείων οδηγεί σε αύξηση (άθροιση) της συνολικής τάσης, διατηρώντας παράλληλα σταθερό και ίδιας τιμής το ρεύμα που διαρρέει κάθε Φ/Β στοιχείο. Οι κατασκευαστές Φ/Β πλαισίων δημιουργούν συστοιχίες έως και 72 στοιχείων, επιτυγχάνοντας διαφορετικές τάξεις ισχύος, σύμφωνα με τις ανάγκες της αγοράς. Πλέον, τα Φ/Β πλαίσια έχουν ξεπεράσει σε ισχύ τα 600 W και συνεχώς αναπτύσσονται τεχνολογίες που βελτιώνουν ακόμα περισσότερο την απόδοσή τους. Για τη συνδεσμολογία τους με άλλα πλαίσια ή τους αντιστροφείς (inverters), τα Φ/Β πλαίσια διαθέτουν δύο ακροδέκτες τύπου MC4 [02,81].



Σχήμα 4.17 – Από το Φ/Β στοιχείο στο Φ/Β πλαίσιο και από το Φ/Β πλαίσιο στη Φ/Β συστοιχία [80]

Για τον υπολογισμό της συνολικής τάσης ενός Φ/Β πλαισίου  $V_{module}$  με  $n$  αριθμό Φ/Β στοιχείων, χρησιμοποιούμε τη σχέση [02]:

$$V_{module} = n(V_d - IR_s) \quad (4.6)$$

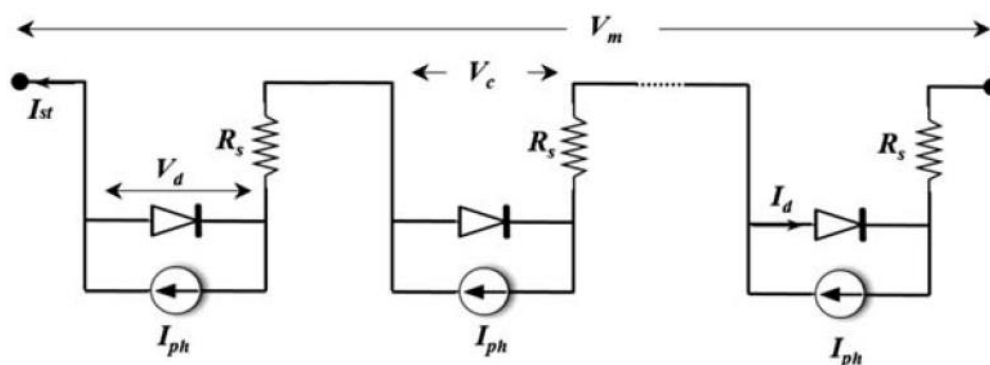
Οι παράμετροι ή τεχνικά χαρακτηριστικά που καθορίζονται από τον κατασκευαστή του Φ/Β πλαισίου είναι τα ακόλουθα [81]:

- **Συνθήκες STC (Standard Test Conditions):** Είναι οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιούνται οι δοκιμές λειτουργίας. Δεδομένου ότι η τάση και το ρεύμα αλλάζουν με βάση τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αλλά και την ένταση του φωτός, στις συνθήκες STC χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά απόλυτης ηλιοφάνειας ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) και θερμοκρασία πλαισίου  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , αντιπροσωπεύοντας την ιδανική απόδοση του πλαισίου.

- $V_{max}$  – **Μέγιστη τάση κυκλώματος**: Μέγιστη τάση κυκλώματος είναι η μέγιστη δυνατή τάση που μπορεί να δεχτεί το πλαίσιο όταν βρίσκεται σε μία Φ/Β στοιχειοσειρά (PV string). Η συνολική τάση της στοιχειοσειράς που μπορεί να παραχθεί με αυτό το πλαίσιο δε θα πρέπει να ξεπερνά αυτήν την τάση.
- $P_{max}$  – **Μέγιστη ισχύς εξόδου του πλαισίου**: Όταν οι συνθήκες είναι ιδανικές, η ισχύς αυτή είναι η μέγιστη δυνατή που περιμένουμε να μας αποδώσει το πλαίσιο.
- $V_{oc}$  – **Τάση ανοικτού κυκλώματος**: Είναι η τάση του πλαισίου όταν δεν υπάρχει συνδεδεμένο φορτίο. Με τη χρήση ενός βολτόμετρου, είναι η μετρήσιμη διαφορά δυναμικού στα καλώδια συν (+) και πλην (-) ενός ελεύθερου πλαισίου.
- $I_{sc}$  – **Ρεύμα βραχυκύκλωσης**: Είναι το μέγεθος του ρεύματος που δημιουργεί το πλαίσιο όταν βραχυκυκλωθούν τα καλώδια συν (+) και πλην (-). Αυτό το στοιχείο είναι πολύ σημαντικό γιατί μας δείχνει τη μέγιστη τιμή του ρεύματος που αποδίδει το πλαίσιο.
- $V_{mpp}$  – **Τάση κατά τη μέγιστη ισχύ**: Είναι η τάση κατά τη μέγιστη ισχύ εξόδου, όταν το πλαίσιο είναι συνδεδεμένο στον αντιστροφέα σε ιδανικές συνθήκες λειτουργίας.
- $I_{mpp}$  – **Ρεύμα κατά τη μέγιστη ισχύ**: Είναι το ρεύμα κατά τη μέγιστη ισχύ εξόδου, όταν το πλαίσιο είναι συνδεδεμένο στον αντιστροφέα σε ιδανικές συνθήκες λειτουργίας.

Άλλα σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά ενός Φ/Β πλαισίου είναι:

- **Διαστάσεις (Dimensions)**: Διαστάσεις Y x Π x B και
- **Βάρος (Weight)**: Βάρος σε κιλά (kg),  
που μας βοηθούν να εκτιμήσουμε την απαιτούμενη αντοχή και έκταση που θα πρέπει να έχει ο χώρος εγκατάστασης,
- **Θερμοκρασιακοί συντελεστές (Temperature coefficients)**:  $V_{oc}/I_{sc}/P_{mpp}$  (% / °C),  
οι οποίοι εισάγονται μαζί με όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά σε ειδικά λογισμικά διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, ώστε να μπορούν να εκτιμήσουν τη συνολική ετήσια απόδοση που μπορεί να προσφέρει.

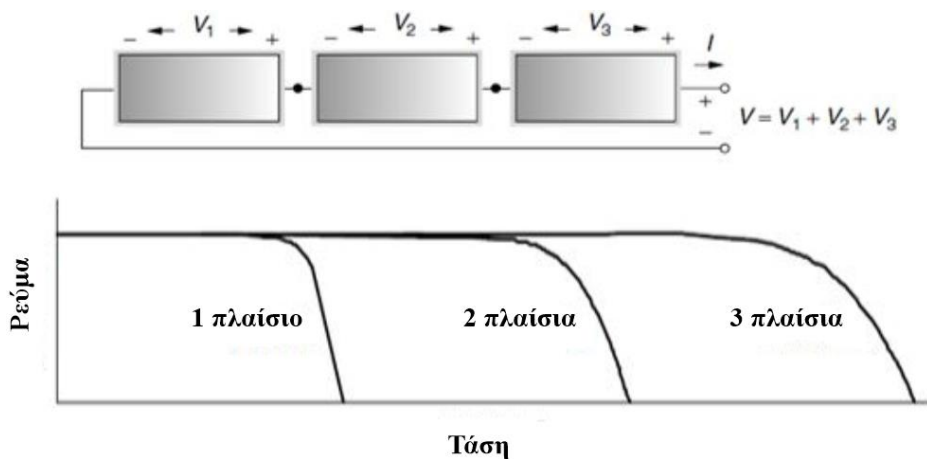


Σχήμα 4.18 – Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β πλαισίου [12]

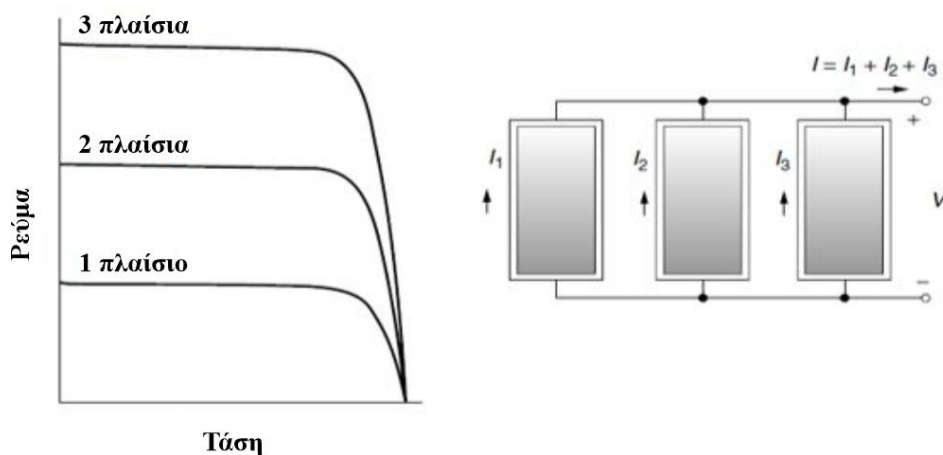
#### 4.4.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β διάταξης (συστοιχίας πάνελ)

Μία Φ/Β διάταξη ή Φ/Β συστοιχία αποτελείται από Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σύμφωνα με συγκεκριμένη διαμόρφωση για να ικανοποιήσουν τα μεγέθη της τάσης, του ρεύματος και των απαιτήσεων ισχύος [12]. Τα Φ/Β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα και να δημιουργήσουν φωτοβολταϊκές γεννήτριες αρκετών kilowatt. Οι γεννήτριες αυτές ονομάζονται *στοιχειοσειρές (strings)* [81].

Στη **σειριακή σύνδεση**, η ονομαστική ένταση της στοιχειοσειράς ισούται με την ονομαστική ένταση του Φ/Β πλαισίου που χρησιμοποιείται, ενώ η ονομαστική τάση του ισούται με την τάση του Φ/Β πλαισίου επί τον αριθμό των πλαισίων της στοιχειοσειράς. Επιπλέον, επειδή τα Φ/Β στοιχεία δεν είναι απολύτως πανομοιότυπα, το συνολικό ρεύμα που διαρρέει μια στοιχειοσειρά είναι ίσο με τη χαμηλότερη τιμή του Φ/Β στοιχείου [82]. Στην **παράλληλη σύνδεση**, η ονομαστική ένταση της στοιχειοσειράς ισούται με την ονομαστική ένταση του Φ/Β πλαισίου επί τον αριθμό των πλαισίων της στοιχειοσειράς, ενώ η ονομαστική τάση του ισούται με την τάση του Φ/Β πλαισίου [81].

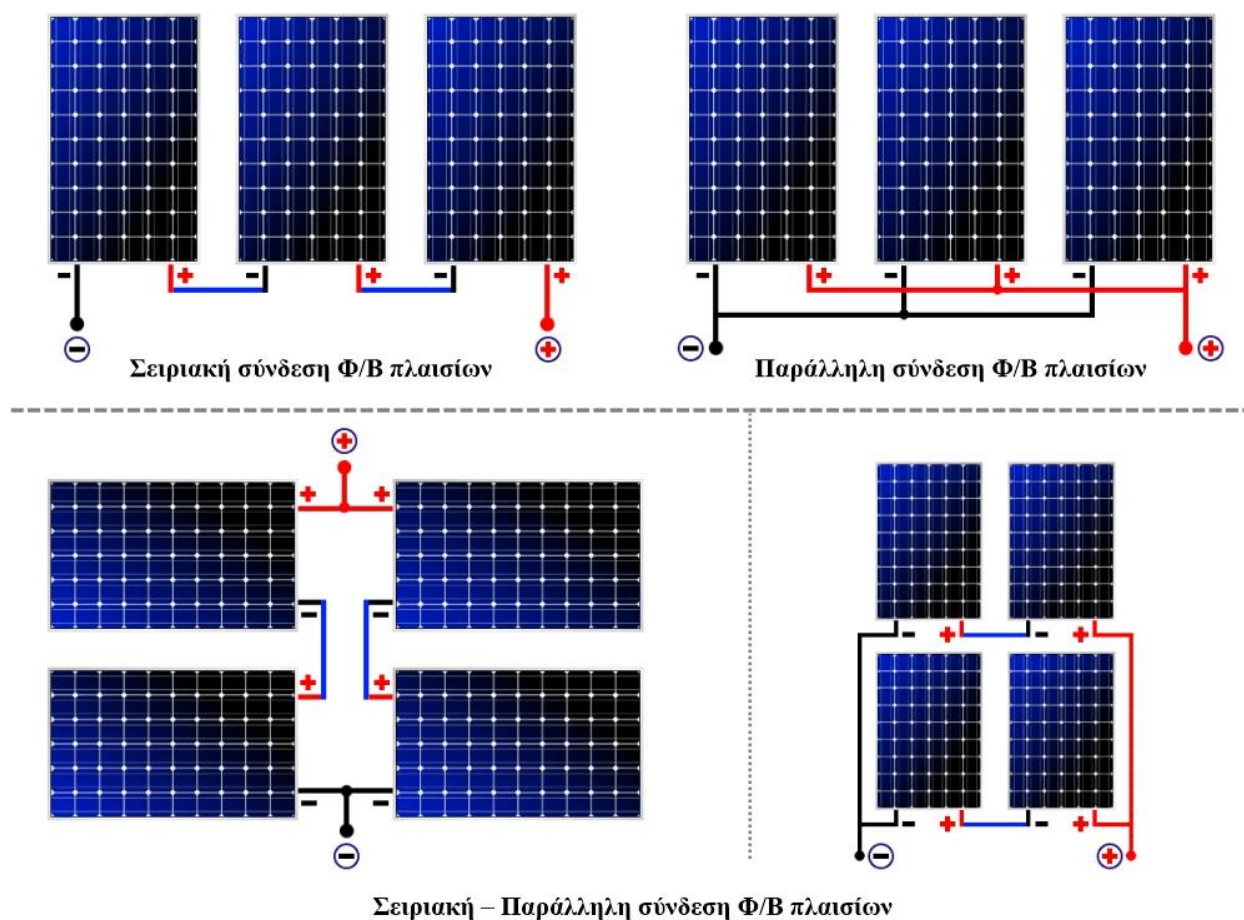


Σχήμα 4.19 – Άθροιση τάσεων για κάθε δεδομένη στιγμή του ρεύματος σε σειριακή σύνδεση Φ/Β πλαισίων [82]



Σχήμα 4.20 – Άθροιση ρευμάτων για κάθε δεδομένη στιγμή της τάσης σε παράλληλη σύνδεση Φ/Β πλαισίων [82]

Με πιο απλά λόγια, στη σειριακή σύνδεση προστίθενται οι τάσεις των πλαισίων, ενώ στην παράλληλη σύνδεση προστίθενται τα ρεύματα [81]. Μία καλή πρακτική σύνδεσης για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών (Joule) ισχύος  $I^2R$  των καλωδίων είναι η σύνδεση των Φ/Β πλαισίων πρώτα σε σειρά προκειμένου να αυξηθεί η τάση του κλάδου ή της σειράς, πάντα σε ανώτατα επίπεδα ασφαλείας καθορισμένα από τον κατασκευαστή και στη συνέχεια η παράλληλη σύνδεση της σειράς για αύξηση της ισχύος [02].



Σχήμα 4.21 – Σειριακή, παράλληλη και σειριακή – παράλληλη σύνδεση Φ/Β πλαισίων [83]

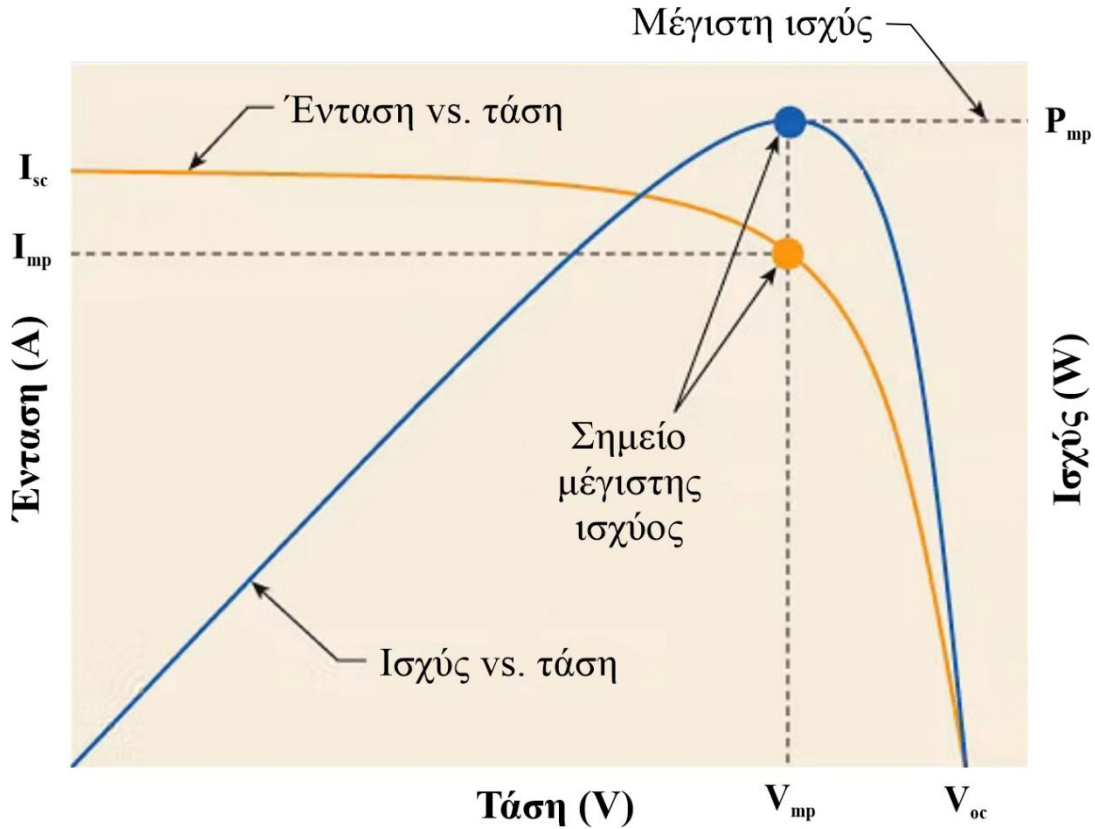
Σε μία στοιχειοσειρά δε θα πρέπει να συνδέονται ποτέ πλαίσια με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Συνδέονται πάντα πανομοιότυπα πλαίσια ίδιου κατασκευαστή και μοντέλου. Επίσης, δεν θα πρέπει να συνδέονται ποτέ πλαίσια με διαφορετικό προσανατολισμό ή κλίση, ενώ η ομαδοποίησή τους πρέπει να γίνεται ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση τους. Έτσι, αποφεύγονται προβλήματα και είναι δυνατή η υψηλότερη παραγωγή ενέργειας [81].

#### 4.5 Η καμπύλη $I-V$ σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας

Ένα Φ/Β στοιχείο μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της χαρακτηριστικής του καμπύλης ρεύματος-τάσης ( $I-V$ ). Δύο σημαντικά σημεία σε αυτή την



καμπύλη είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι η μέγιστη τάση σε μηδενικό ρεύμα, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το μέγιστο ρεύμα σε μηδενική τάση. Με μια καλή προσέγγιση, το  $I_{sc}$  είναι ανάλογο με το επίπεδο φωτισμού, ενώ η  $V_{oc}$  είναι ανάλογη με το λογάριθμο του επιπέδου φωτισμού [12,13].



Σχήμα 4.22 – Οι καμπύλες  $I-V$  και  $P-V$  που δείχνουν το μέγιστο σημείο ισχύος  $P_m$  του Φ/Β στοιχείου [83]

Ένα διάγραμμα της ισχύος  $P$  σε σχέση με την τάση  $V$  δείχνει ότι υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στην καμπύλη  $I-V$ , στο οποίο το Φ/Β στοιχείο θα παράγει μέγιστη ισχύ. Αυτό είναι γνωστό ως το σημείο μέγιστης ισχύος (*Maximum Power Point*) ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ). Για τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου, συνήθως σε όλα τα στάδια κατασκευής του, λαμβάνονται υπόψη οι τρεις (3) βασικές παράμετροι του Φ/Β στοιχείου, δηλαδή η τάση ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης και ο συντελεστής πλήρωσης (*Fill Factor*,  $FF$ ) – ένα μέτρο που περιγράφει το “τετράγωνο” της καμπύλης  $I-V$ . Με την αύξηση του συντελεστή πλήρωσης, αυξάνεται και η απόδοση. Οι κατασκευαστές των Φ/Β στοιχείων προσπαθούν συνεχώς να μεγιστοποιήσουν το συντελεστή πλήρωσης, ο οποίος αυξάνεται μειώνοντας τα  $I_s$  και  $R_s$  και αυξάνοντας την  $R_{sh}$ . Για ένα Φ/Β στοιχείο πυριτίου, ο συντελεστής πλήρωσης έχει τιμή συνήθως 0.6 – 0.8 [12] και δίνεται από τη σχέση [08]:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (4.7)$$

Ο αριθμητής του κλάσματος της **Σχέσης 4.7** προσδιορίζει τη *μέγιστη παραγόμενη ισχύ*  $P_m$  του Φ/Β στοιχείου σε συγκεκριμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, ενώ ο παρονομαστής προσδιορίζει τη σε *θεωρητικό επίπεδο παραγόμενη μέγιστη ισχύ* του Φ/Β στοιχείου, αν η τάση και η ένταση έπαιρναν μέγιστες τιμές [08].

## 4.6 Παράγοντες επηρεασμού της καμπύλης $I-V$

### 4.6.1 Θερμοκρασία

Καθώς τα Φ/Β στοιχεία υπόκεινται στις περιβαλλοντικές συνθήκες όπου η θερμοκρασία ποικίλλει σε μεγάλο εύρος, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδρασή της στην απόδοσή τους.

Το **Σχήμα 4.23a** παρουσιάζει ένα παράδειγμα για τις μεταβολές της καμπύλης  $I-V$  με τη θερμοκρασία. Βλέπουμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  αυξάνεται με τη θερμοκρασία ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  μειώνεται. Το συνδυασμένο αποτέλεσμα οδηγεί σε μείωση του  $P_m$  επειδή η μείωση της  $V_{oc}$  υπερκαλύπτει την αύξηση του  $I_{sc}$ . Η αύξηση του  $I_{sc}$  οφείλεται στην ενίσχυση της απορρόφησης φωτονίων με αυξημένη θερμοκρασία. Η μείωση της  $V_{oc}$  χρονολογείται από μια εκθετική αύξηση του ρεύματος ανάστροφου κορεσμού  $I_s$ , ενώ η αύξηση του  $I_{sc}$  είναι μικρή, η μείωση της  $V_{oc}$  είναι υπολογίσιμη. Οι κατασκευαστές Φ/Β στοιχείων παρέχουν φύλλα δεδομένων σχετικά με τους συντελεστές θερμοκρασίας των  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  και  $P_m$ , ώστε να λάβουν υπόψη αυτές τις παραλλαγές κατά το σχεδιασμό και κατασκευή της διάταξης των Φ/Β στοιχείων [12].

### 4.6.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η επιλογή της γεωγραφικής θέσης τοποθέτησης μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα χαρακτηριστικά της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στη συγκεκριμένη περιοχή και συνεπώς, αποτελεί τον παράγοντα που καθορίζει την ισχύ εξόδου των Φ/Β πλαισίων. Ως εκ τούτου, ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία συνεπάγεται αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Σε πρακτικές εφαρμογές, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και το φωτορεύμα θεωρούνται ανάλογα μεγέθη και εκφράζονται από τη σχέση [11]:

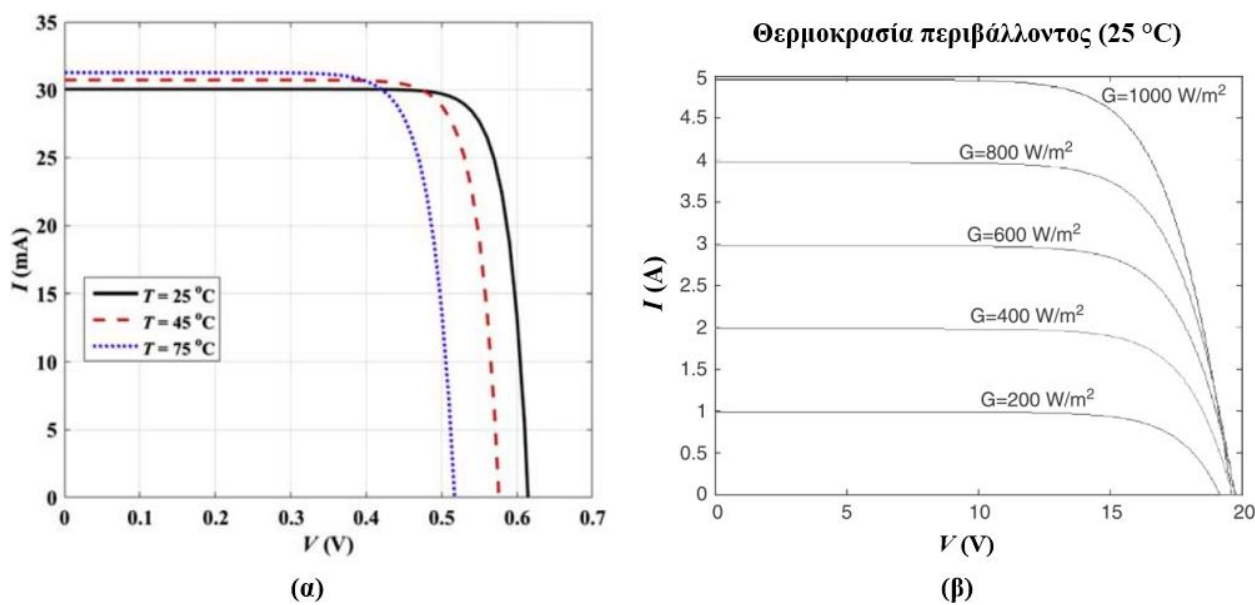
$$I_i = I_{i,STC} \frac{G}{G_{STC}} \quad (4.8)$$

όπου:

$I_{i,STC}$  η ένταση του φωτορεύματος σε συνθήκες STC

Συνεπώς, η ένταση του ρεύματος που αποδίδει το Φ/Β στοιχείο στο ηλεκτρικό κύκλωμα είναι ανάλογο του γινομένου της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και του εμβαδού της

επιφάνειας του Φ/Β στοιχείου όπου προσπίπτει το φως [11]. Επιπλέον, από το **Σχήμα 4.23α** και **4.23β**, μπορεί επίσης να φανεί ότι οι χαρακτηριστικές  $I-V$  των Φ/Β στοιχείων σε μια δεδομένη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία αποτελούνται από ένα τμήμα σταθερής τάσης κι ένα τμήμα σταθερού ρεύματος. Το ρεύμα είναι περιορισμένο, καθώς το Φ/β στοιχείο είναι βραχυκυκλωμένο. Η *συνθήκη μέγιστης ισχύος* εμφανίζεται στο “γόνατο” της χαρακτηριστικής καμπύλης όπου συναντώνται τα δύο τμήματα (βλ. **Σχήμα 4.22**) [13].



**Σχήμα 4.23** – Επίδραση: (α) θερμοκρασίας και (β) διαφορετικών επιπέδων ηλιοφάνειας στα χαρακτηριστικά της καμπύλης  $I-V$  του Φ/Β στοιχείου [12,13]

### 4.6.3 Σκίαση

Ένας παράγοντας που οδηγεί σε αναντιστοιχίες μεταξύ των Φ/Β στοιχείων ή ολόκληρων Φ/Β πλαισίων και την υποβάθμιση της ισχύος μέσα σε μια Φ/Β συστοιχία είναι το *φαινόμενο της σκίασης*, δηλαδή η παρεμπόδιση του ηλιακού φωτός πάνω στο Φ/Β στοιχείο ή στο Φ/Β πλαίσιο από την ύπαρξη βλάστησης, δέντρων, κτιρίων ή κεραιών. Επιπλέον, σημαντικό πρόβλημα σκίασης μπορεί να προκύψει από την εγκατάσταση σειρών Φ/Β πλαισίων σε περιορισμένο χώρο (π.χ. στέγες σπιτιών), όπου η σκίαση της μίας σειράς συλλεκτών μπορεί να επηρεάζει την άλλη, λόγω γεωμετρικής αστοχίας (λανθασμένες αποστάσεις). Για το λόγο αυτό, κατά τη μελέτη εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων λαμβάνεται υπόψη η δυσμενέστερη περίπτωση σκίασης, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο του ορίζοντα, δηλαδή στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.24**, η συνολική απόσταση των Φ/Β πλαισίων για κάθε σειρά μπορεί να αναπαρασταθεί ως [11,84,85]:

$$Panel_{sp} = Panel_g + Panel_{sh} \quad (4.9)$$

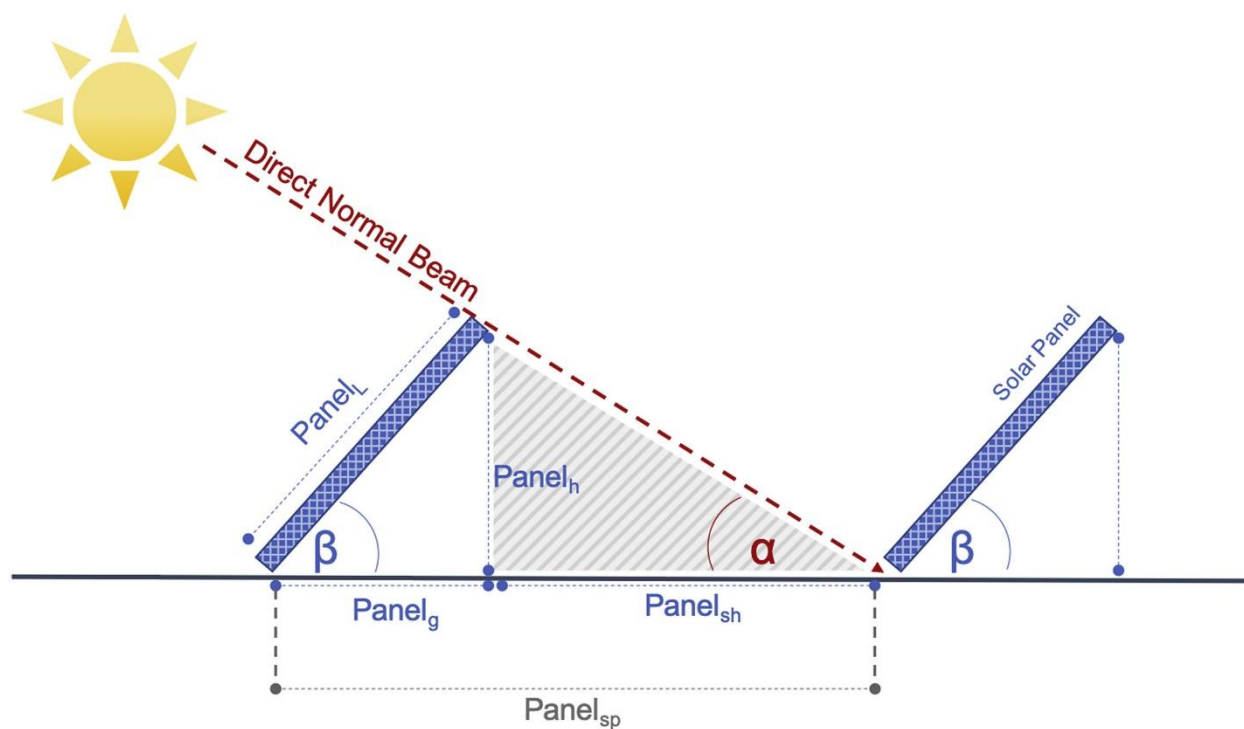


όπου:

$Panel_g$  το μήκος του Φ/Β πλαισίου που προβάλλεται κατά μήκος του εδάφους

$Panel_{sh}$  το μήκος της σκιάς που ρίχνεται πίσω από το Φ/Β πλαίσιο

Σημειώνεται πως σε υψηλότερες γωνίες κλίσης το  $Panel_g$  ελαττώνεται, ενώ το  $Panel_{sh}$  αυξάνεται.



Σχήμα 4.24 – Γεωμετρία σκίασης Φ/Β πλαισίων [84]

Οι εξισώσεις που ακολουθούν αντιπροσωπεύουν τη γεωμετρία που σχετίζεται με το  $Panel_g$  και το  $Panel_{sh}$ , όπου το  $Panel_L$  είναι το μήκος της φωτοβολταϊκής μονάδας και το  $Panel_h$  είναι το ύψος του υψηλότερου τμήματος του Φ/Β πλαισίου στο έδαφος [84].

$$Panel_g = Panel_L (\cos \beta) \quad (4.10)$$

$$Panel_{sh} = \frac{Panel_h}{\tan \alpha} \quad (4.11)$$

$$Panel_h = Panel_L (\sin \beta) \quad (4.12)$$

όπου:

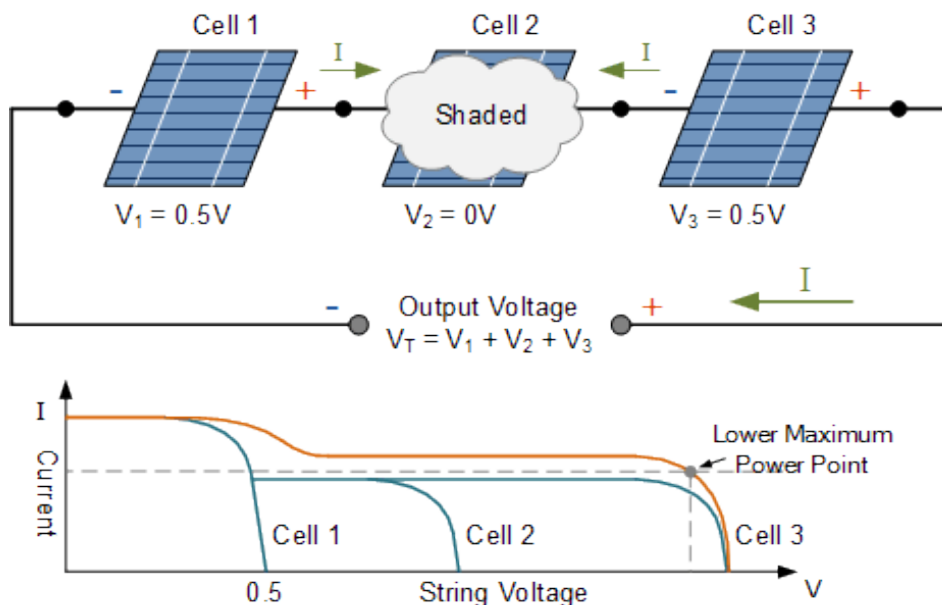
$\alpha$  η γωνία ηλιακού υψομέτρου (υπολογισμένη στις 10 π.μ. της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου)

Με το συνδυασμό των Σχέσεων 4.10, 4.11 και 4.12 στη Σχέση 4.9, προκύπτει τελικά:

$$Panel_{sp} = Panel_L \left( \cos \beta + \frac{\sin \beta}{\tan \alpha} \right) \quad (4.13)$$

Η σκίαση μπορεί να είναι είτε πλήρης, είτε μερική και ανάλογα με το βαθμό της προκαλεί ανάλογη μείωση της ισχύος εξόδου [85].

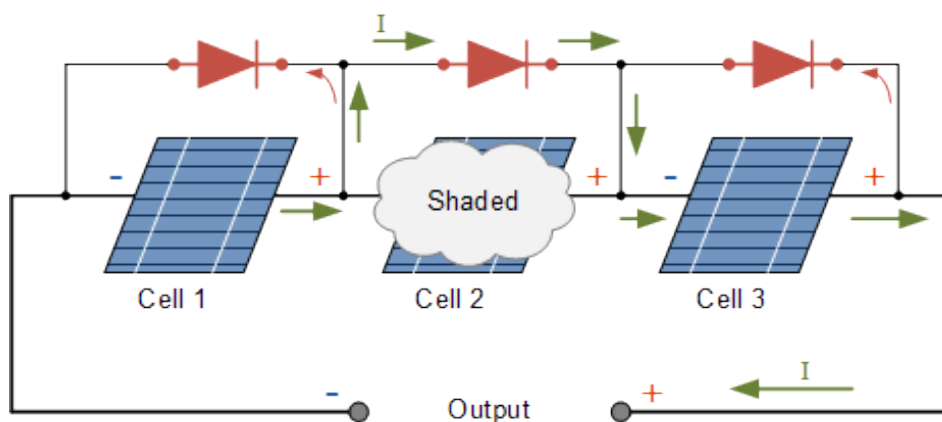
Υποθέτοντας ότι το Φ/Β στοιχείο Νο 2 της στοιχειοσειράς του Σχήματος 4.25 είναι μερικώς ή πλήρως σκιασμένο, ενώ τα υπόλοιπα δύο εν σειρά Φ/Β στοιχεία της στοιχειοσειράς παραμένουν πλήρως υπό έντονο φωτισμό, τότε η έξοδος της σειριακά συνδεδεμένης στοιχειοσειράς θα μειωθεί δραματικά, διότι το σκιασμένο Φ/Β στοιχείο σταματά να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ημιαγώγιμη αντίσταση. Το σκιασμένο Φ/Β στοιχείο παράγει λιγότερο ρεύμα από τα άλλα δύο Φ/Β στοιχεία, μειώνοντας σημαντικά την παραγωγή ενέργειας της στοιχειοσειράς. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ισχύς που παράγεται από τα έντονα φωτισμένα Φ/Β στοιχεία διαχέεται τώρα από το σκιασμένο Φ/Β στοιχείο, η οποία μπορεί, με την πάροδο του χρόνου, να προκαλέσει υπερθέρμανση (φαινόμενο **Hot Spot** – κατάσταση “θερμής κηλίδας”) και τελικά την καταστροφή του σκιασμένου Φ/Β στοιχείου [11,85].



Σχήμα 4.25 – Μεταβολή της χαρακτηριστικής λειτουργίας λόγω σκίασης [85]

Καθώς το σκιασμένο Φ/Β στοιχείο προκαλεί πτώση του παραγόμενου ρεύματος, τα έντονα φωτισμένα Φ/Β στοιχεία προσαρμόζονται σε αυτήν την πτώση ρεύματος αυξάνοντας την τάση ανοικτού κυκλώματος κατά μήκος των χαρακτηριστικών καμπυλών  $I-V$  τους, με αποτέλεσμα το σκιασμένο Φ/Β στοιχείο να πολώνεται ανάστροφα, δηλαδή να εμφανίζεται στους ακροδέκτες του αρνητική τάση (προς την αντίθετη κατεύθυνση). Αυτή η αρνητική τάση αναγκάζει το ρεύμα να ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση μέσω του σκιασμένου Φ/Β στοιχείου, με αποτέλεσμα να καταναλώνει ισχύ με ρυθμό που εξαρτάται από το  $I_{sc}$  και το ρεύμα λειτουργίας  $I$ . Έτσι, ένα πλήρως σκιασμένο Φ/Β στοιχείο θα παρουσιάσει αντίστροφη πτώση τάσης υπό οποιοσδήποτε τρέχουσες συνθήκες κι έτσι θα διαρρέει ή θα καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια, αντί να την παράγει [85].

Ένας απλός και αποτελεσματικός τρόπος για την προστασία των Φ/Β στοιχείων από τις καταστροφικές συνέπειες της σκίασης είναι η σύνδεση μίας *διόδου παράκαμψης (bypass diode)* σε κάθε Φ/Β στοιχείο μιας εν σειρά συνδεδεμένης στοιχειοσειράς [85].



**Σχήμα 4.26** – Σκιασμένο Φ/Β στοιχείο με προστασία διόδου παράκαμψης [85]

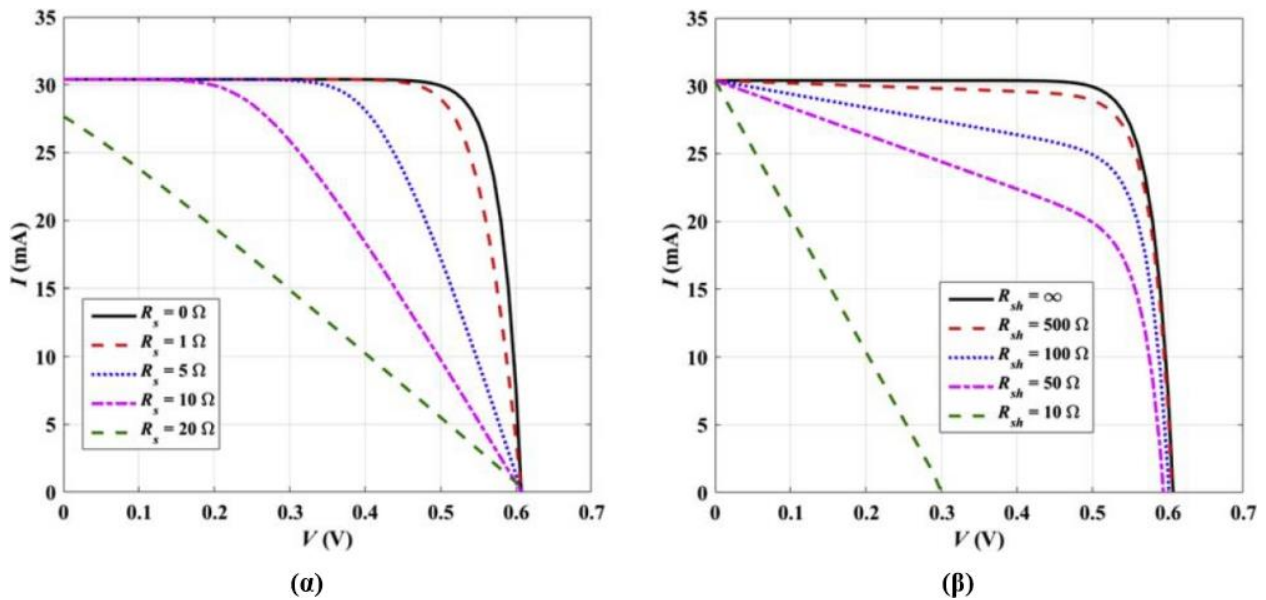
Οι διόδους παράκαμψης συνδέονται εξωτερικά και σε αντίστροφο παραλληλισμό με ένα Φ/Β στοιχείο (ο ακροδέκτης της καθόδου της διόδου συνδέεται στη θετική πλευρά του Φ/Β στοιχείου, ενώ ο ακροδέκτης της ανόδου της διόδου συνδέεται στην αρνητική πλευρά του Φ/Β στοιχείου, έτσι η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη) για να παρέχουν μια εναλλακτική ηλεκτρική διαδρομή για τη ροή του παραγόμενου ρεύματος, καθώς αυτό δεν μπορεί να ρέει μέσα από το σκιασμένο Φ/Β στοιχείο. Αυτό βοηθά στη διατήρηση της απόδοσης της στοιχειοσειράς, περιορίζοντας την ανάστροφα πολωμένη τάση που παράγεται σε οποιοδήποτε μερικώς σκιασμένο Φ/Β στοιχείο και ως εκ τούτου, μειώνει την ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να διαχέεται από αυτό [85].

#### 4.6.4 Αντίσταση σειράς $R_s$

Η επίδραση της  $R_s$  στην καμπύλη  $I-V$  ενός Φ/Β στοιχείου απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.27α** (λαμβάνοντας  $R_{sh} = \infty$ ). Καθώς η  $R_s$  αυξάνεται, το ρεύμα βραχυκύκλωσης αρχίζει να μειώνεται πρώτα σε υψηλές τιμές της αντίστασης σειράς, ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος παραμένει σταθερή. Η μέγιστη ισχύς εξόδου μειώνεται λόγω της κατανάλωσης ενέργειας στην αντίσταση  $R_s$ . Επομένως, οι τιμές των αντιστάσεων  $R_s$  πρέπει να ελαχιστοποιηθούν [12].

#### 4.6.5 Παράλληλη αντίσταση $R_{sh}$

Το **Σχήμα 4.27β** δείχνει την επίδραση της  $R_{sh}$  στην καμπύλη  $I-V$  ενός Φ/Β στοιχείου (λαμβάνοντας  $R_s = 0$ ). Σύμφωνα με αυτό, η τάση ανοικτού κυκλώματος και η ισχύς εξόδου μειώνονται λόγω της απώλειας ισχύος στην  $R_{sh}$ . Επομένως, η  $R_{sh}$  πρέπει να αυξηθεί στην υψηλότερη κατάλληλη τιμή [12].



Σχήμα 4.27 – Επίδραση της: (α)  $R_s$  και (β)  $R_{sh}$  στα χαρακτηριστικά της καμπύλης  $I-V$  του Φ/Β στοιχείου [12]

#### 4.6.6 Ηλεκτρικές απώλειες

Οι ηλεκτρικές απώλειες εμφανίζονται στους αγωγούς σύνδεσης των Φ/Β πλαισίων στις Φ/Β συστοιχίες, αλλά και σε συνδέσεις με άλλα μέρη του συστήματος της Φ/Β εγκατάστασης, όπως μετατροπείς, συσσωρευτές (μπαταρίες), διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου κ.λπ. [11].

#### 4.6.7 Οπτικές απώλειες

Οι οπτικές απώλειες αφορούν τη διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών ανάκλασης των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένο ένα Φ/Β πλαίσιο. Άλλοι λόγοι οπτικών απωλειών: μεταβολή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας (έτος), αλλά και η διαφοροποίηση της πυκνότητας ισχύος της, όπως και η πόλωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (ημέρα) [11].

#### 4.6.8 Άνεμος

Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να επηρεάσει σε αρκετά μεγάλο βαθμό τη θερμοκρασία ενός Φ/Β στοιχείου. Μεγάλη ταχύτητα του ανέμου συνεπάγεται μικρότερη θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου [11].

#### 4.6.9 Γήρανση

Τα Φ/Β πλαίσια παράγουν όλο και λιγότερη ενέργεια με την πάροδο του χρόνου, λόγω της φθοράς που υφίστανται συμπεριλαμβανομένων των υπόλοιπων μερών που τα απαρτίζουν. Η ισχύς εξόδου υποβαθμίζεται περίπου κατά 0.5% κάθε χρόνο, κάτι που σημαίνει ότι η παραγωγή ενέργειας ενός πλαισίου μετά από 20 χρόνια θα είναι περίπου στο 90% της αρχικής του απόδοσης [11,81].

## 4.7 Φωτοβολταϊκοί αντιστροφεείς (Inverters)

Οι συνηθισμένες οικιακές ηλεκτρικές συσκευές λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα τάσης 230 V και συχνότητας 50 Hz. Μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια παράγει συνεχές ρεύμα με τάση που κυμαίνεται από 120 V έως 1500 V. Για να μπορέσει ένα φωτοβολταϊκό να τροφοδοτήσει με ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια τις καταναλώσεις, θα πρέπει πρώτα να σταθεροποιήσει την τάση εξόδου στα 230 V και να εναλλάσσει τη φορά του ρεύματός του 50 φορές το δευτερόλεπτο [81].

### 4.7.1 Τρόπος λειτουργίας Φ/B αντιστροφών

Ο αντιστροφέας, κατά τη διάρκεια της ημέρας, μετατρέπει το παραγόμενο από τις στοιχειοσειρές (strings) συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο 230 V, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις ηλεκτρικές συσκευές και να καλύψει τις καθημερινές μας ανάγκες. Ο αντιστροφέας διαθέτει μία ή περισσότερες εισόδους όπου μπορούν να συνδεθούν οι στοιχειοσειρές και μία έξοδο, όπου το παραγόμενο ρεύμα είναι πλέον τροποποιημένο και κατάλληλο για χρήση από τις οικιακές συσκευές ή άλλες καταναλώσεις [81].

### 4.7.2 Τρόποι σταθεροποίησης της DC τάσης

Ο μετασχηματισμός και η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου στα 230 V μπορεί να γίνει με δύο τρόπους [81]:

- Ο πρώτος τρόπος είναι με τη βοήθεια μίας ηλεκτρονικής διάταξης με μετασχηματιστή, είτε τύπου TP – DC/DC στην είσοδό του, είτε στην έξοδο με μετασχηματιστή TR – AC (LF) χαμηλής συχνότητας.
- Ο δεύτερος τρόπος είναι με τη βοήθεια μίας ηλεκτρονικής διάταξης χωρίς μετασχηματιστή (μετατροπέας DC/AC), όπου τα ηλεκτρονικά, μέσω μίας προγραμματισμένης διαδικασίας πολλαπλών βημάτων:
  1. Πρώτα μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια DC ρεύματος σε AC ρεύμα υψηλής συχνότητας.
  2. Στη συνέχεια, η ηλεκτρική αυτή ενέργεια AC ρεύματος μετατρέπεται ξανά σε DC ρεύμα.
  3. Μετατρέπεται, τέλος, το DC ρεύμα σε συμβατικό AC ρεύμα υψηλής συχνότητας 230 V / 50 Hz.

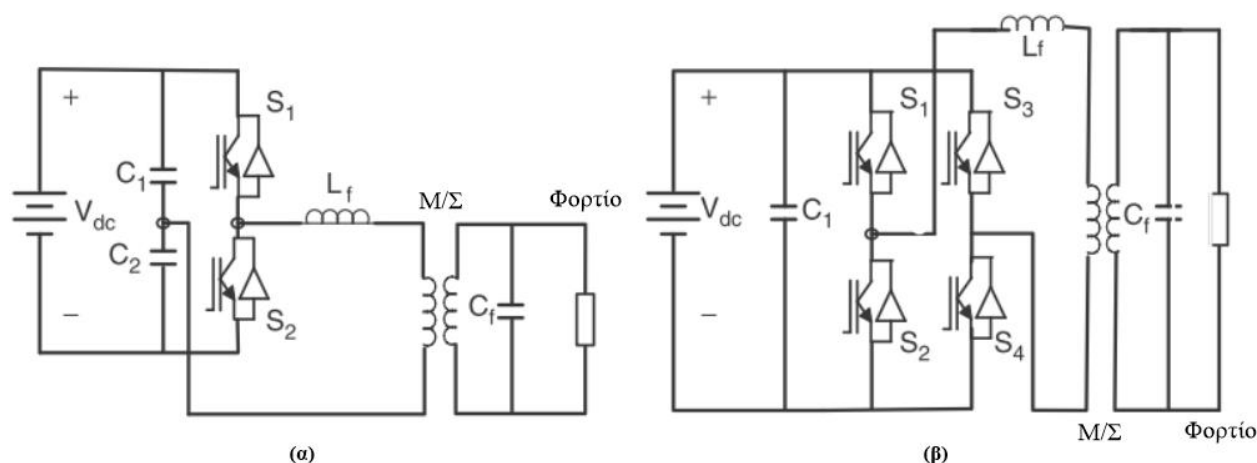
Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται από τους λεγόμενους *transformerless inverters* και είναι πλέον ο πιο διαδεδομένος, γιατί προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως [81]:

- φθηνότερο κόστος κατασκευής,
- φθηνότερη μεταφορά και

- ευκολότερη εγκατάσταση.

### 4.7.3 Μετατροπή του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα

Η αρχή λειτουργίας για τη μετατροπή του DC σε AC μπορεί να εξηγηθεί με ένα κύκλωμα μίας DC πηγής, τεσσάρων (4) διακοπών (κύκλωμα γέφυρας), σε συνδεσμολογία όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.28β**. Στην έξοδο συνδέεται μία κατανάλωση.



**Σχήμα 4.28** – Μονοφασικός αντιστροφέας: **(α)** ημιγέφυρας και **(β)** πλήρους γέφυρας με IGBT [13]

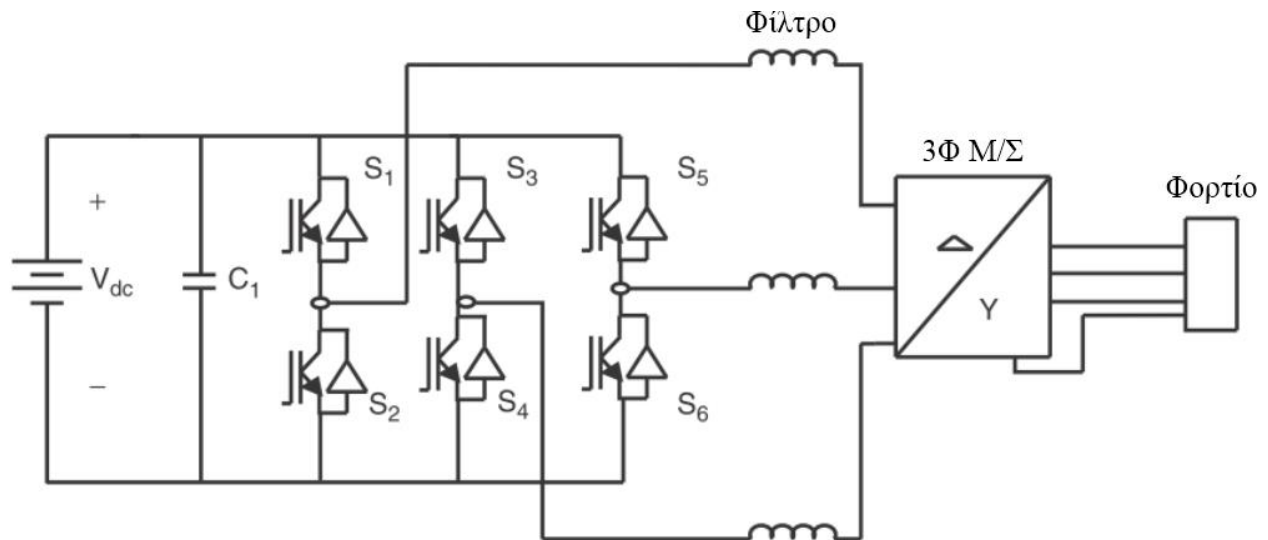
Αν κλείσουν ταυτόχρονα οι διακόπτες  $S_1$  και  $S_4$ , το ρεύμα καθοδηγείται μέσω του καταναλωτή με συγκεκριμένη φορά. Η φορά αυτή μπορεί να αλλάξει αν, τώρα, κλείσουν οι διακόπτες  $S_3$  και  $S_2$ . Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία περιοδική, μη ημιτονοειδής κυματομορφή, η οποία έχει τη μορφή διαδοχικών παλμών, των οποίων το πλάτος εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια που παραμένει κλειστό το εκάστοτε ζεύγος επαφών [81].

Για να δημιουργηθεί το πλήρες ημιτονοειδές σήμα, θα πρέπει σε κάθε παλμό το κάθε ζεύγος να ανοιγοκλείσει στους σωστούς χρόνους. Εφόσον η συχνότητα του δικτύου είναι 50 Hz, η συγκεκριμένη διαδικασία θα πρέπει να επαναλαμβάνεται 50 φορές το δευτερόλεπτο. Η διαδικασία αυτή, όμως, δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί χειροκίνητα ή με χρήση μηχανικών διακοπών. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις που ονομάζονται IGBT και που μπορούν να ανοιγοκλείσουν χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο. Οι ημιαγωγοί IGBT [81]:

1. Έχουν την ικανότητα να χειρίζονται υψηλές τάσεις,
2. Οι χρόνοι μεταγωγής του είναι βραδύτεροι από άλλους ημιαγωγούς,
3. Οι ιδιότητές τους βοηθούν στη δημιουργία του ημιτονοειδούς σήματος.

Με την ίδια ακριβώς λογική σχεδιάζονται και οι τριφασικοί αντιστροφείς χρησιμοποιώντας έξι IGBT, ώστε να προσφέρουν τρεις (3) φάσεις AC με την ιδανική απόκλιση των  $120^\circ$ . Για την άριστη ποιότητα του τελικού σήματος χρησιμοποιούνται επιπλέον ηλεκτρονικές διατάξεις

(φίλτρα) που φιλτράρουν και εξομαλύνουν το σήμα, κάνοντάς το να πλησιάζει σχεδόν απόλυτα το AC ρεύμα που μας προσφέρουν οι συμβατικές γεννήτριες ρεύματος [81].



Σχήμα 4.29 – Αυτόνομος τριφασικός αντιστροφέας τεσσάρων αγωγών [13]

#### 4.7.4 Είδη Φ/Β αντιστροφέων

Υπάρχουν πολλά είδη Φ/Β αντιστροφέων, ανάλογα με τη χρήση και τον τρόπο διαχείρισης της φωτοβολταϊκής παραγωγής [81].

##### 4.7.4.1 Off-grid inverters

Οι *off-grid inverters* είναι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται σε Φ/Β συστήματα, τα οποία είναι εγκατεστημένα μακριά από το ηλεκτρικό δίκτυο και λειτουργούν εντελώς ανεξάρτητα από αυτό. Με τη βοήθεια των *off-grid inverters* μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όλες τις συμβατικές οικιακές συσκευές και άλλα φορτία, καταναλώνοντας φωτοβολταϊκή ενέργεια είτε απευθείας, είτε αφού την αποθηκεύσουμε σε μπαταρίες. Στα περισσότερα συστήματα, τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται με έναν *ελεγκτή φόρτισης*, ο οποίος φορτίζει τις μπαταρίες και στη συνέχεια οι μπαταρίες στέλνουν στον inverter, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτεί τις καταναλώσεις [81].

##### 4.7.4.2 On-grid inverters

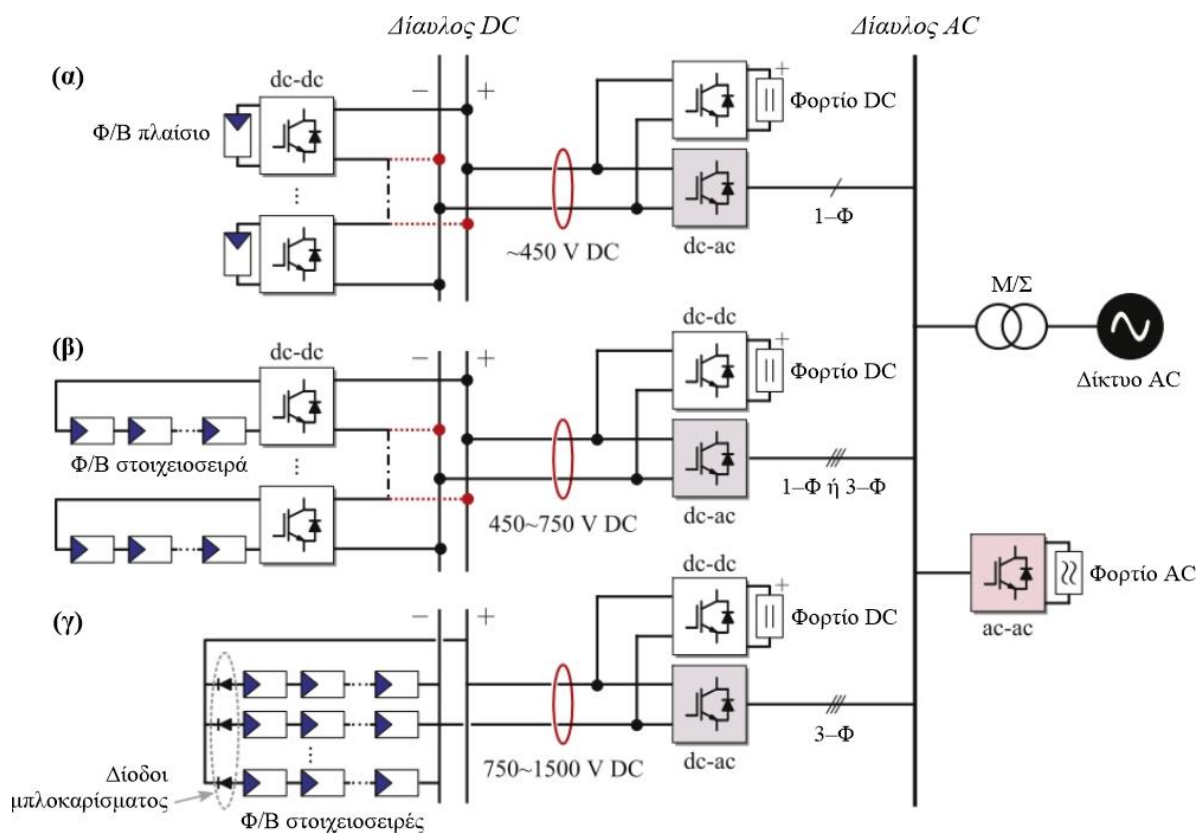
Οι *on-grid inverters* είναι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα στο ηλεκτρικό δίκτυο και χρησιμοποιούνται είτε για ιδιοκατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας, είτε για πώλησή της στον πάροχο του ηλεκτρικού δικτύου. Υπάρχουν πολλά είδη *on-grid inverters* [81]:

- **Κεντρικός αντιστροφέας (center inverter).** Οι *κεντρικοί inverters* χρησιμοποιούνται σε συστήματα με ισχύ μεγαλύτερη από 30 kW. Στην DC τους πλευρά διαθέτουν πολλές εισόδους



συνδεδεμένες παράλληλα για την είσοδο των Φ/Β στοιχειοσειρών. Έχουν χαμηλότερο κόστος για μια εγκατάσταση, αλλά έχουν περιορισμένες δυνατότητες, καθώς διαθέτουν μεγάλο μήκος καλωδίων και συνήθως έχουν μόνον έναν MPP trackers.

- **Αντιστροφείας στοιχειοσειράς (string inverter).** Οι αντιστροφείς στοιχειοσειράς ή *string inverters*, χρησιμοποιούνται σε συστήματα με εύρος ισχύος από 1 kW έως μερικά MW. Στην αγορά υπάρχουν σε μοντέλα ισχύος από 1 kW έως 250 kW, με μετασχηματιστή ή χωρίς, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα μονοφασικά, αλλά και τριφασικά μοντέλα. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι διαθέτουν πολλούς MPP trackers και μπορούν να διαχειριστούν με απόλυτα ικανοποιητική απόδοση πολλές στοιχειοσειρές από διαφορετικούς προσανατολισμούς και κλίσεις.
- **Μικροαντιστροφείς (micro inverters).** Οι micro inverters χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρά συστήματα, καθώς συνδέονται ένας – ένας ξεχωριστά σ' έναν ελάχιστο αριθμό Φ/Β πλαισίων και τροφοδοτούν την παραγόμενη ενέργεια απευθείας στο δίκτυο. Βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι διαχειρίζονται ξεχωριστές ομάδες πλαισίων με ξεχωριστούς MPP trackers, προσφέροντας μεγάλη απόδοση και φθηνότερη καλωδίωση, ενώ, βασικό μειονέκτημα είναι το αρχικό κόστος τους, καθώς και η δυσκολία στη συντήρησή τους.



**Σχήμα 4.30** – Διαφορετικές δομές Φ/Β αντιστροφέων συνδεδεμένων στο δίκτυο: **(α)** αντιστροφείς μονάδων συνδεδεμένοι σε κοινό δίαυλο dc, **(β)** string/multistring αντιστροφείας που εφαρμόζεται σε μονοφασικά ή τριφασικά συστήματα (οικιακές και εμπορικές εφαρμογές) και **(γ)** κεντρικοί αντιστροφείς για εμπορικές ή χρηστικές εφαρμογές (υψηλής ισχύος, π.χ. 100 kW) [12]

## 4.7.5 Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

Πολύ σημαντική επιπλέον διάταξη αποτελεί ο *ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος* (*Maximum Power Point Tracker, MPP Tracker*). Πρόκειται για ένα σύστημα διαχείρισης της φωτοβολταϊκής ενέργειας με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης. Ουσιαστικά, ο MPP tracker είναι ένας DC/DC μετατροπέας, ο οποίος ελέγχεται από ένα μικροελεγκτή (micro controller) και σαρώνει περιοδικά την καμπύλη της ισχύος. Η καμπύλη ισχύος επηρεάζεται από [81]:

- τη θέση του ηλίου,
- τη θερμοκρασία,
- τις πιθανές σκιάσεις και
- τις καιρικές συνθήκες

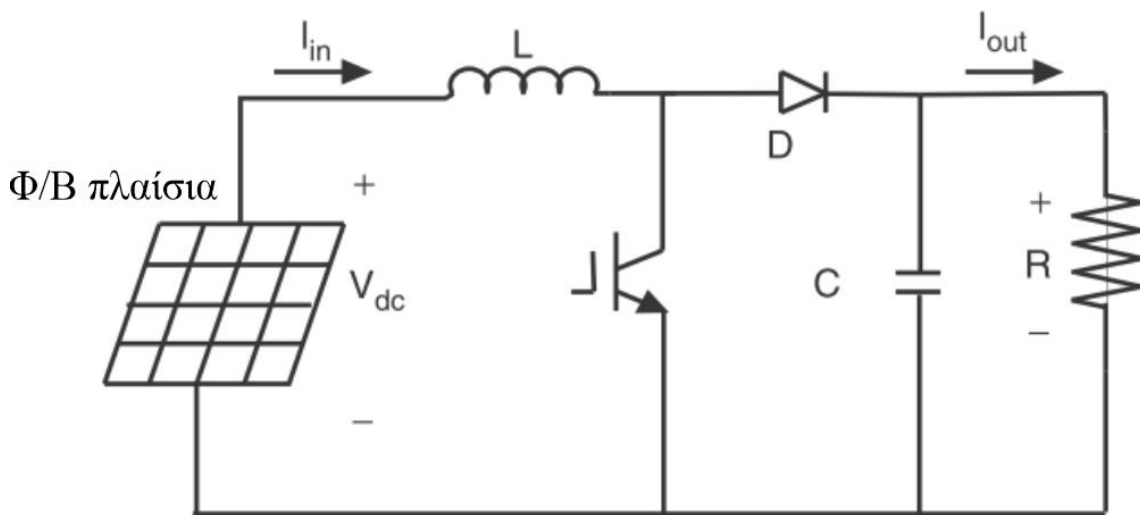
Ο MPP tracker ανιχνεύει το σημείο μέγιστης ισχύος, ώστε να εξάγεται πάντα η μέγιστη δυνατή ισχύς από το φωτοβολταϊκό. Η παρουσία περισσότερων από έναν MPP tracker θεωρείται μεγάλο πλεονέκτημα για έναν αντιστροφέα και αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση σε εγκαταστάσεις με στοιχειοσειρές που λειτουργούν υπό διαφορετικές συνθήκες, με μερικές σκιάσεις και σύνθετο προσανατολισμό ή κλίση [81].

### 4.7.5.1 Μετατροπέας ανόρθωσης – υποβιβασμού

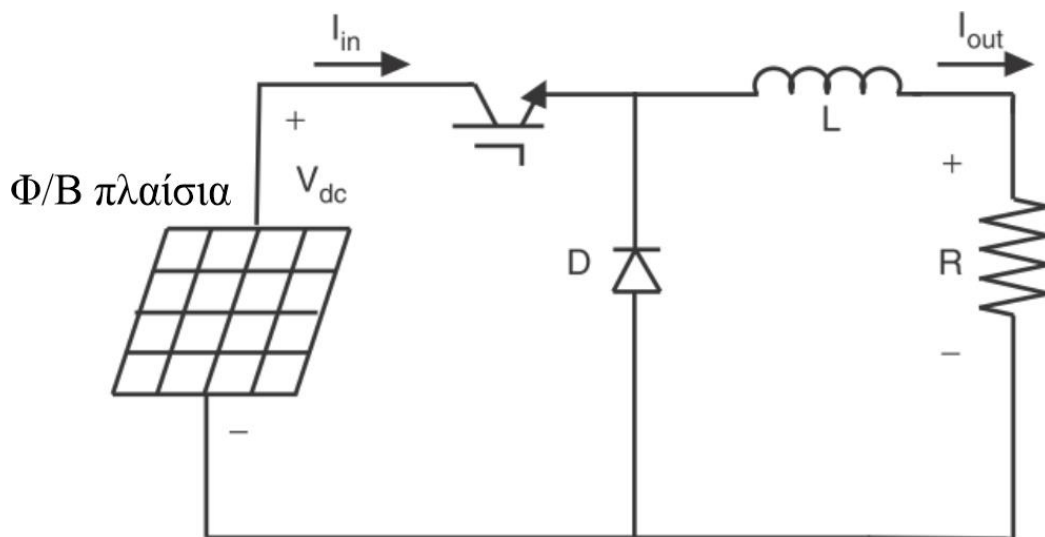
Η δυνατότητα μετατροπής της DC τάσης από ένα επίπεδο σε άλλο έγινε εύκολα εφικτή με τη διαθεσιμότητα των *τρανζίστορ επίδρασης πεδίου* (*Field-Effect Transistors, FET*) τη δεκαετία του 1980 και τον *διπολικών τρανζίστορ μονωμένης πύλης* (*Insulated-Gate Bipolar Transistors, IGBT*) τη δεκαετία του 1990. Οι μετατροπείς λειτουργίας μεταγωγής DC–DC χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση της εξόδου μιας Φ/Β συστοιχίας σε ένα μεταβλητό φορτίο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων DC–DC όπως [11,13]:

- Μετατροπέας ανόρθωσης τάσης (boost converter) (βλ. **Σχήμα 4.31**)
- Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (buck converter) (βλ. **Σχήμα 4.32**)
- Μετατροπέας ανόρθωσης – υποβιβασμού τάσης (boost–buck converter) (βλ. **Σχήμα 4.33**)

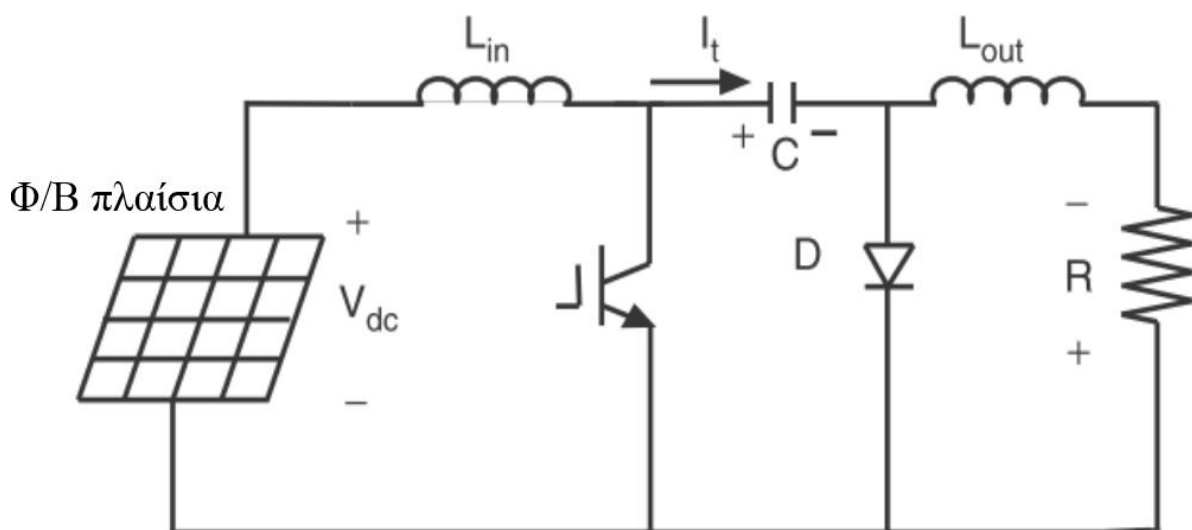
Οι βασικές λειτουργικές μονάδες των μετατροπέων αυτών είναι ένας *ηλεκτρονικός διακόπτης*, ένας *επαγωγέας* για την αποθήκευση ενέργειας και μια *δίοδος flywheel*, που μεταφέρει το ρεύμα κατά τη διάρκεια αυτού του τμήματος του κύκλου μεταγωγής όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός. Οι μετατροπείς DC–DC επιτρέπουν τη συνεχή μείωση του ρεύματος φόρτισης με τέτοιο τρόπο ώστε η προκύπτουσα τάση της μπαταρίας να διατηρείται σε μια καθορισμένη τιμή [13].



Σχήμα 4.31 – Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ανόρθωσης τάσης (boost converter) [13]



Σχήμα 4.32 – Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (buck converter) [13]



Σχήμα 4.33 – Σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα ανόρθωσης – υποβιβασμού τάσης (boost-buck converter) [13]

#### 4.7.5.2 Ελεγκτές MPPT

Υπάρχουν γενικά δύο τρόποι λειτουργίας των Φ/Β μονάδων στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτοί οι τρόποι εκμεταλλεύονται τον **αναλογικό** ή/και **ψηφιακό** έλεγχο υλικού για την παρακολούθηση του MPP των Φ/Β συστοιχιών.

Υφίστανται πολλοί **αναλογικοί μηχανισμοί** που επιτρέπουν στους ελεγκτές να εντοπίζουν το MPP. Μερικοί από αυτούς είναι η μέθοδος κλασματικού ρεύματος βραχυκύκλωσης (*fractional short-circuit current,  $I_{sc}$* ), η μέθοδος κλασματικής τάσης ανοικτού κυκλώματος (*fractional open-circuit method,  $V_{oc}$* ) και η μέθοδος ελέγχου συσχέτισης κυματισμού (*ripple correlation control, RCC*). Η μέθοδος της κλασματικής τάσης ανοικτού κυκλώματος είναι μια από τις απλές μεθόδους αναλογικού ελέγχου. Βασίζεται στην υπόθεση ότι η τάση μέγιστου σημείου ισχύος  $V_{MPP}$ , είναι μια γραμμική συνάρτηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Για παράδειγμα  $V_{MPP} = kV_{oc}$ , όπου  $k \approx 0.76$ . Αυτή η υπόθεση είναι αρκετά ακριβής ακόμη και για μεγάλες διακυμάνσεις στο ρεύμα και τη θερμοκρασία βραχυκυκλώματος του στοιχείου. Αυτός ο τύπος MPPT είναι ίσως ο πιο κοινός. Μια παραλλαγή αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει περιοδικό ορισμό της στοιχειοσειράς σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος και μέτρηση της τάσης αυτού. Η κατάλληλη τιμή του  $V_{MPP}$  μπορεί στη συνέχεια να ληφθεί με έναν απλό διαιρέτη τάσης.

Αντίστοιχα με τους αναλογικούς, υπάρχουν και πολλοί **ψηφιακοί μηχανισμοί** ελέγχου, παραδείγματα των οποίων αποτελούν οι μηχανισμοί διαταραχής και παρατήρησης (*perturb & observe, P&O*) ή αναρρίχησης λόφων (*hill climbing*), ασαφούς λογικής (*fuzzy logic*), νευρωνικού δικτύου (*neural network*) και αυξητικής αγωγιμότητας (*incremental conductance, IncCond*). Ο έλεγχος P&O ή αναρρίχησης λόφων περιλαμβάνει τη μεταβολή της τάσης εισόδου γύρω από τη βέλτιστη τιμή, δίνοντάς της μια μικρή αύξηση ή μείωση, εναλλάξ. Στη συνέχεια αξιολογείται η επίδραση στην ισχύ εξόδου και γίνεται μια περαιτέρω μικρή διόρθωση στην τάση εισόδου. Η ισχύς εξόδου της Φ/Β συστοιχίας δειγματοληπτείται σε κάθε καθορισμένη περίοδο δειγματοληψίας και συγκρίνεται με την προηγούμενη τιμή. Σε περίπτωση αύξησης της ισχύος, η τάση της Φ/Β συστοιχίας οδηγείται προς την ίδια κατεύθυνση με τον προηγούμενο χρόνο δειγματοληψίας, ενώ σε μείωση της ισχύος, η τάση της Φ/Β συστοιχίας οδηγείται σε αντίθετη φορά, επιχειρώντας να τη θέσει σε λειτουργία, στη θέση του σημείου βέλτιστης/μέγιστης ισχύος.

Για τη λειτουργία της Φ/Β συστοιχίας στο MPP, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος P&O ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το ρεύμα που δειγματοληπτείται κάθε λίγα δευτερόλεπτα και η προκύπτουσα ισχύς εξόδου των Φ/Β στοιχείων, παρακολουθούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Όταν η αύξηση του ρεύματος οδηγήσει σε υψηλότερη ισχύ, τότε αυξάνεται περαιτέρω έως ότου η ισχύς εξόδου αρχίσει να μειώνεται. Αντιθέτως, εάν το αυξημένο Φ/Β ρεύμα έχει ως αποτέλεσμα παραγωγή μικρότερης ποσότητας ισχύος σε σχέση με το προηγούμενο δείγμα, τότε το ρεύμα μειώνεται μέχρι να επιτευχθεί το MPP [13].

## 4.7.6 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β αντιστροφέα

### 4.7.6.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά εισόδου

- **Μέγιστη φωτοβολταϊκή ισχύς (*Maximum PV Power –  $P_{DCmax}$* )**. Είναι η μέγιστη συνολική φωτοβολταϊκή ισχύς που μπορεί να εγκατασταθεί στο αντιστροφέα. Η συνολική ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρόκειται να συνδεθούν σε αυτόν τον inverter δεν θα πρέπει να ξεπερνά αυτό το όριο.
- **Μέγιστη φωτοβολταϊκή ισχύς ανά DC είσοδο ( *$P_{DCmax}$  per input*)**. Είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εγκατασταθεί στην κάθε διαθέσιμη είσοδο του αντιστροφέα. Η συνολική ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρόκειται να συνδεθούν σε κάθε είσοδο δεν θα πρέπει να ξεπερνά αυτό το όριο.
- **Ονομαστική τάση εισόδου ( *$V_{DCnom}$* )**. Είναι η ιδανική τιμή τάσης DC των στοιχειοσειρών για την επίτευξη της μέγιστης ισχύος εξόδου, π.χ. 550 V.
- **Τάση εκκίνησης εισόδου ( *$V_{DCmin}$* )**. Είναι η ελάχιστη τάση που χρειάζεται για να ξεκινήσει τη λειτουργία του ο αντιστροφέας, π.χ. 90 V.
- **Εύρος τάσης MPP ( *$U_{MPPmin} – U_{MPPmax}$* )**. Είναι το εύρος της τάσης DC των στοιχειοσειρών, ώστε να λειτουργήσει σωστά το MPP tracking. Αν θέλουμε ιδανικά αποτελέσματα, θα πρέπει να φροντίσουμε ώστε η τάση των στοιχειοσειρών να βρίσκεται εντός αυτών των ορίων.
- **Μέγιστη τάση εισόδου ( *$U_{DCmax}$* )**. Είναι η μέγιστη τάση DC που μπορεί να δεχτεί στην είσοδο ο αντιστροφέας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος των στοιχειοσειρών δεν θα πρέπει να ξεπερνά αυτήν την τιμή, π.χ. 1000 V.
- **Μέγιστο ρεύμα εισόδου ( *$I_{DCmax}$* )**. Είναι το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα DC μίας στοιχειοσειράς που μπορεί να λειτουργήσει ο αντιστροφέας χωρίς απώλειες ισχύος, π.χ. 12 A.
- **Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ( *$I_{DCsc}$* )**. Είναι το μέγιστο ρεύμα DC μίας στοιχειοσειράς που αντέχει ο αντιστροφέας, π.χ. 16 A [81].

### 4.7.6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξόδου

- **Βαθμός απόδοσης**. Είναι το ποσοστό που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη απόδοση του αντιστροφέα.
- **Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης**. Είναι μία μέση λειτουργική απόδοση σε ετήσια κατανομή ισχύος που αντιστοιχεί στο μέσο κλίμα της Ευρώπης.
- **Ονομαστική AC ισχύς**. Είναι η ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα, δηλαδή η ισχύς εξόδου του σε ιδανικές συνθήκες.
- **Ονομαστικό AC ρεύμα**. Είναι το ρεύμα εξόδου όταν έχει επιτευχθεί η ονομαστική ισχύς.

- **Δίκτυο σύνδεσης.** Είναι ο τύπος δικτύου με το οποίο είναι συμβατός ο αντιστροφέας. Για παράδειγμα, η ένδειξη *Grid: 3N – 400V/50Hz* αναφέρεται σε τριφασική παροχή με ουδέτερο αγωγό στα 400 V και συχνότητα 50 Hz [81].

#### 4.7.7 Οι Φ/Β αντιστροφείς σήμερα

Πλέον, οι σύγχρονοι αντιστροφείς αποτελούν την καρδιά του Φ/Β συστήματος και λειτουργούν ως ένα κέντρο διαχείρισης ενέργειας, καταγραφής, επεξεργασίας και μεταφοράς των δεδομένων λειτουργίας, καθώς και διαχείρισης της φόρτισης και χρήσης των μπαταριών των υβριδικών συστημάτων. Διαθέτουν, δηλαδή, επιπλέον [81]:

- Υβριδική λειτουργία (on-grid inverters συμβατοί με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας),
- Data loggers για την καταγραφή των δεδομένων λειτουργίας,
- Κάρτα επικοινωνίας για την αποστολή των δεδομένων λειτουργίας σε τοπικό δίκτυο ή απομακρυσμένα, μέσω διαδικτύου,
- Θύρες Ethernet, WiFi, καθώς και σειριακές διεπαφές (RS485, digital inputs),
- Συμβατότητα με εφαρμογές Smart Home,
- Μικροεπεξεργαστές διαχείρισης σκίασης, όπου ουσιαστικά κάνουν ταχύτατο MPP tracking χρησιμοποιώντας τις καταγεγραμμένες πληροφορίες tracking από προηγούμενες ημέρες,
- Διατάξεις ασφάλειας (DC διακόπτες, αντικεραυνική προστασία).

Από το 2019 η απόδοση των αντιστροφέων έχει ξεπεράσει το 98%. Οι string inverters χρησιμοποιούνται πλέον όχι μόνο σε οικιακά και μεσαίου μεγέθους εμπορικά Φ/Β συστήματα, αλλά καλύπτουν εξίσου ανάγκες μεγάλων έργων έως μερικά MW, κερδίζοντας συνεχώς έδαφος σε σύγκριση με τους κεντρικούς αντιστροφείς. Το μερίδιο αγοράς για τους κεντρικούς αντιστροφείς και τους αντιστροφείς στοιχειοσειρών (string inverters), είναι περίπου 36% και 61%, αντίστοιχα, αφήνοντας λιγότερο από 2% στους micro inverters [81].

## 4.8 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

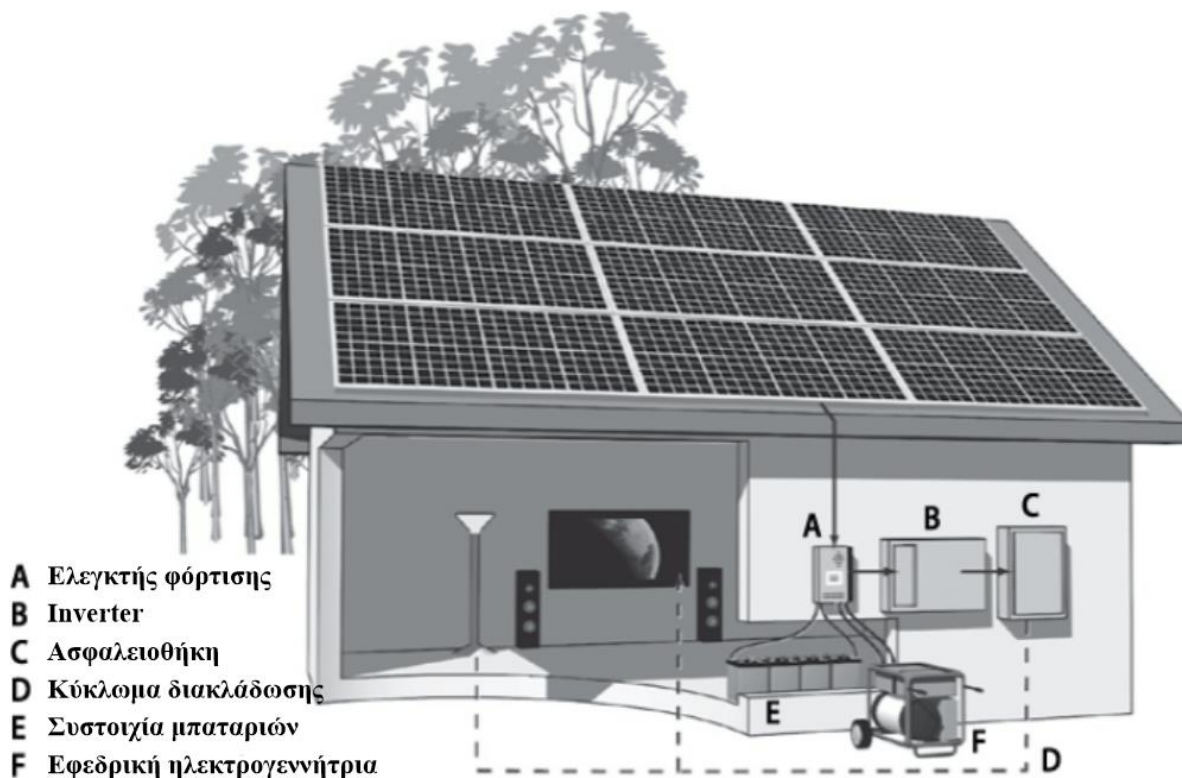
### 4.8.1 Αυτόνομα (off-grid ή standalone) Φ/Β συστήματα

Τα *off-grid ή standalone Φ/Β συστήματα* είναι εντελώς αυτόνομα, δηλαδή δεν υπάρχει σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται εξ ολοκλήρου από τις καταναλώσεις, είτε απευθείας, είτε μέσω μπαταριών στις οποίες αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας [81].

Η κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σ' ένα αυτόνομο Φ/Β σύστημα είναι η Φ/Β συστοιχία. Η ηλεκτρική ενέργεια ρέει αρχικά από τη Φ/Β συστοιχία στον ελεγκτή φόρτισης. Ο ελεγκτής



φόρτισης παρέχει ρεύμα συνεχούς ρεύματος στη συστοιχία μπαταριών, η οποία με τη σειρά της παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια όπου αυτή απαιτείται. Ο αντιστροφέας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος από τη συστοιχία μπαταριών, συνήθως ενσύρματη στα 24 ή 48 V, σε εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλότερης τάσης 230 V που απαιτείται από τα ενεργά κυκλώματα των καταναλωτών των αυτόνομων νοικοκυριών και επιχειρήσεων, μέσω του κύριου πίνακα συνδέσεων.



Σχήμα 4.34 – Διάγραμμα απλοποιημένης αυτόνομης Φ/Β συστοιχίας [16]

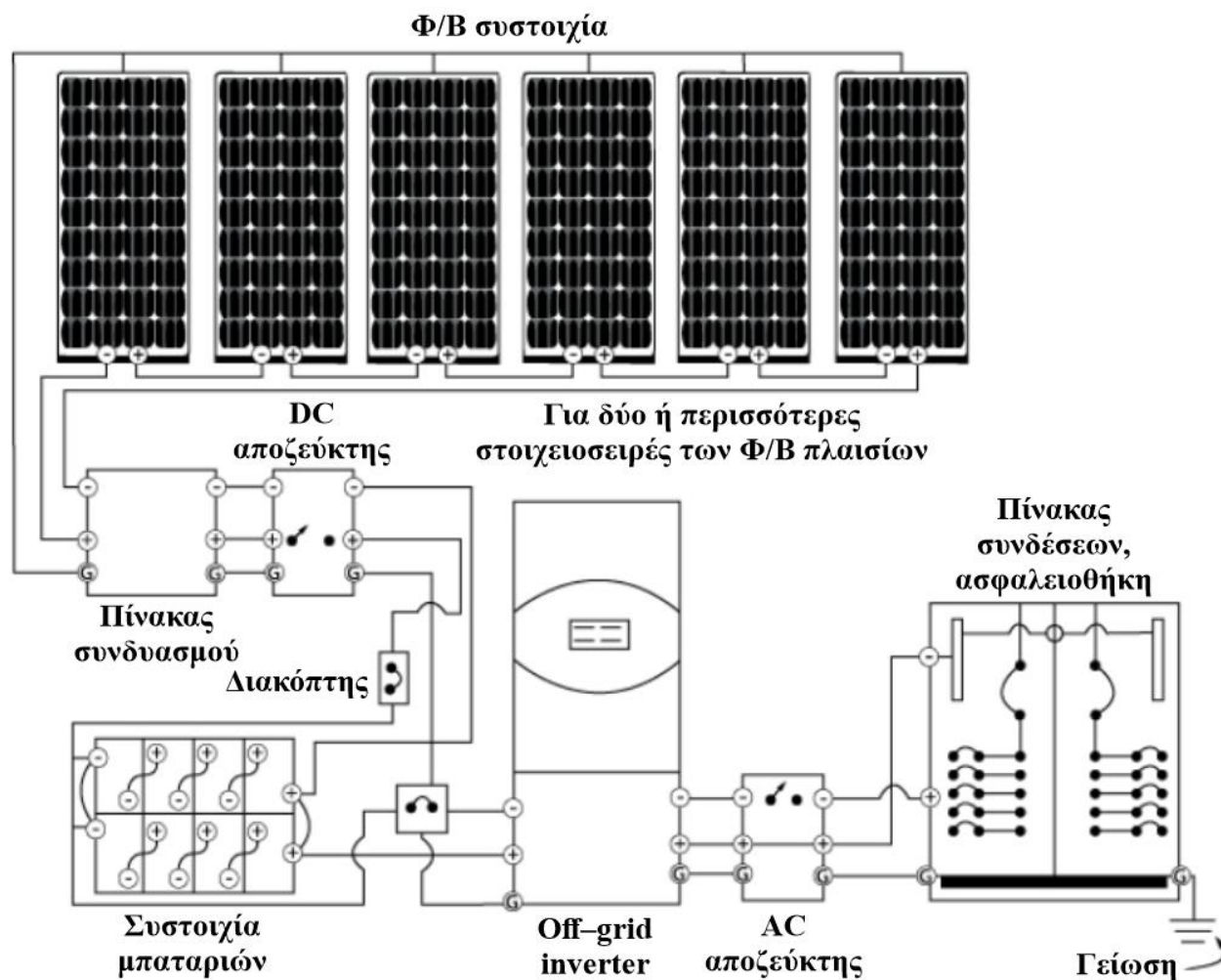
Η πλειοψηφία των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων απαιτούν συχνά την υποστηρικτική συνδρομή ενός αναφερόμενου συνόλου γεννητριών (*gen-sets*), τα οποία μπορούν να έχουν τη μορφή ανεμογεννήτριας, μικρουδροτουρμπίνας, γεννήτριας βενζίνης ή ντίζελ. Μία ή περισσότερες από αυτές τις πηγές ενέργειας συμβάλλει στην κάλυψη των ελλείψεων, παρέχοντας πλεόνασμα ενέργειας. Επιπλέον, το σύνολο των γεννητριών μπορεί να καλύψει την παροχή ενέργειας εάν ένα κρίσιμο στοιχείο ενός υβριδικού Φ/Β συστήματος τεθεί προσωρινά εκτός λειτουργίας, μέχρις ότου επιτευχθεί η πλήρης επαναφορά του. Τέλος, το σύνολο των γεννητριών μπορεί να διαδραματίσει βασικό ρόλο στη συντήρηση των μπαταριών.

Επειδή οι περισσότερες εφεδρικές γεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα, για τη φόρτιση των μπαταριών θα πρέπει να μετατραπεί πρώτα σε συνεχές. Η λειτουργία αυτή ελέγχεται από το φορτιστή μπαταρίας που είναι ενσωματωμένος στον αντιστροφέα. Για το λόγο αυτό οι



αντιστροφείς σε Φ/Β συστήματα που βασίζονται σε μπαταρίες αναφέρονται ως *αντιστροφείς/φορτιστές (inverters/chargers)*.

Για την ασφαλή συντήρηση του αυτόνομου Φ/Β συστήματος απαιτείται η ύπαρξη *διατάξεων αποσυνδέσεων (αποζεύξεων) ασφαλείας*. Η διάταξη απόζευξης DC θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ της Φ/Β συστοιχίας και του ελεγκτή φόρτισης, ενώ η διάταξη απόζευξης AC μεταξύ του αντιστροφέα και του κύριου πίνακα παροχής (ασφαλειοθήκη).



Σχήμα 4.35 – Σχηματικό διάγραμμα αυτόνομου Φ/Β συστήματος [16]

Τα αυτόνομα Φ/Β απαιτούν επίσης τη χρήση *ελεγκτών φόρτισης* για την προστασία των μπαταριών. Οι ελεγκτές φόρτισης περιέχουν επίσης το κύκλωμα παρακολούθησης *σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)*. Οι ελεγκτές φόρτισης **αποτρέπουν** αφ' ενός την υπερφόρτιση των μπαταριών, αφ' ετέρου τη ροή ανάστροφου ρεύματος από την μπαταρία πίσω στη Φ/Β συστοιχία κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αν και η ροή του ανάστροφου ρεύματος είναι συνήθως πολύ μικρή, καλό είναι να αποφεύγεται, λύση η οποία είναι αυτονόητα δεδομένη για τους σύγχρονους ελεγκτές φόρτισης [16].

Στον **Πίνακα 4.2** συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων.

**Πίνακας 4.2** – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων [16]

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Παρέχουν μία αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας	Γενικά, αποτελούν τα πιο δαπανηρά Φ/Β ηλεκτρικά συστήματα
Παρέχουν ελευθερία από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	Λιγότερο αποδοτικά από τα διασυνδεδεμένα συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας
Μπορεί να είναι φθηνότερα στην εγκατάσταση από τα διασυνδεδεμένα συστήματα εάν βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 300 μέτρων από το δίκτυο	Απαιτούν περισσότερη συντήρηση από τα διασυνδεδεμένα συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας (ο ιδιοκτήτης αναλαμβάνει όλες τις εργασίες λειτουργίας και το κόστος συντήρησης του συστήματος)

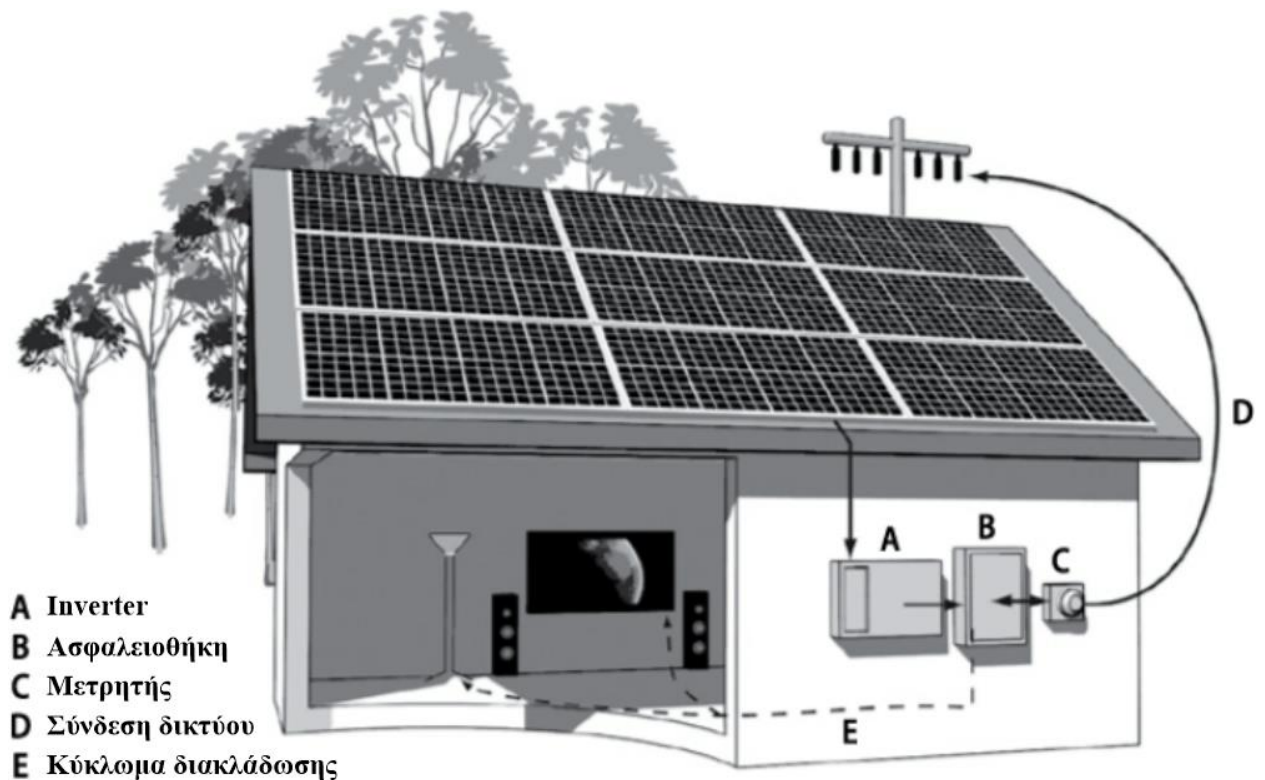
## 4.8.2 Διασυνδεδεμένα (on-grid) Φ/Β συστήματα

Στα *on-grid* Φ/Β συστήματα υπάρχει παράλληλη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται είτε από τις καταναλώσεις, είτε διαχέεται στο δίκτυο. Η ροή αυτής της ενέργειας προς το δίκτυο θα πρέπει να είναι συμφωνημένη με το διαχειριστή του δικτύου με σχετική σύμβαση ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering) ή πώλησης της ενέργειας (Feed In Tariff) [81].

### 4.8.2.1 Διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Σύμφωνα με το **Σχήμα 4.37**, τα κύρια στοιχεία που συνθέτουν ένα τέτοιου είδους σύστημα είναι [16]:

1. Φ/Β συστοιχία,
2. αντιστροφείας σχεδιασμένος ειδικά για σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας,
3. πίνακας συνδέσεων (ασφαλειοθήκη),
4. διατάξεις ασφαλείας και
5. μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας.



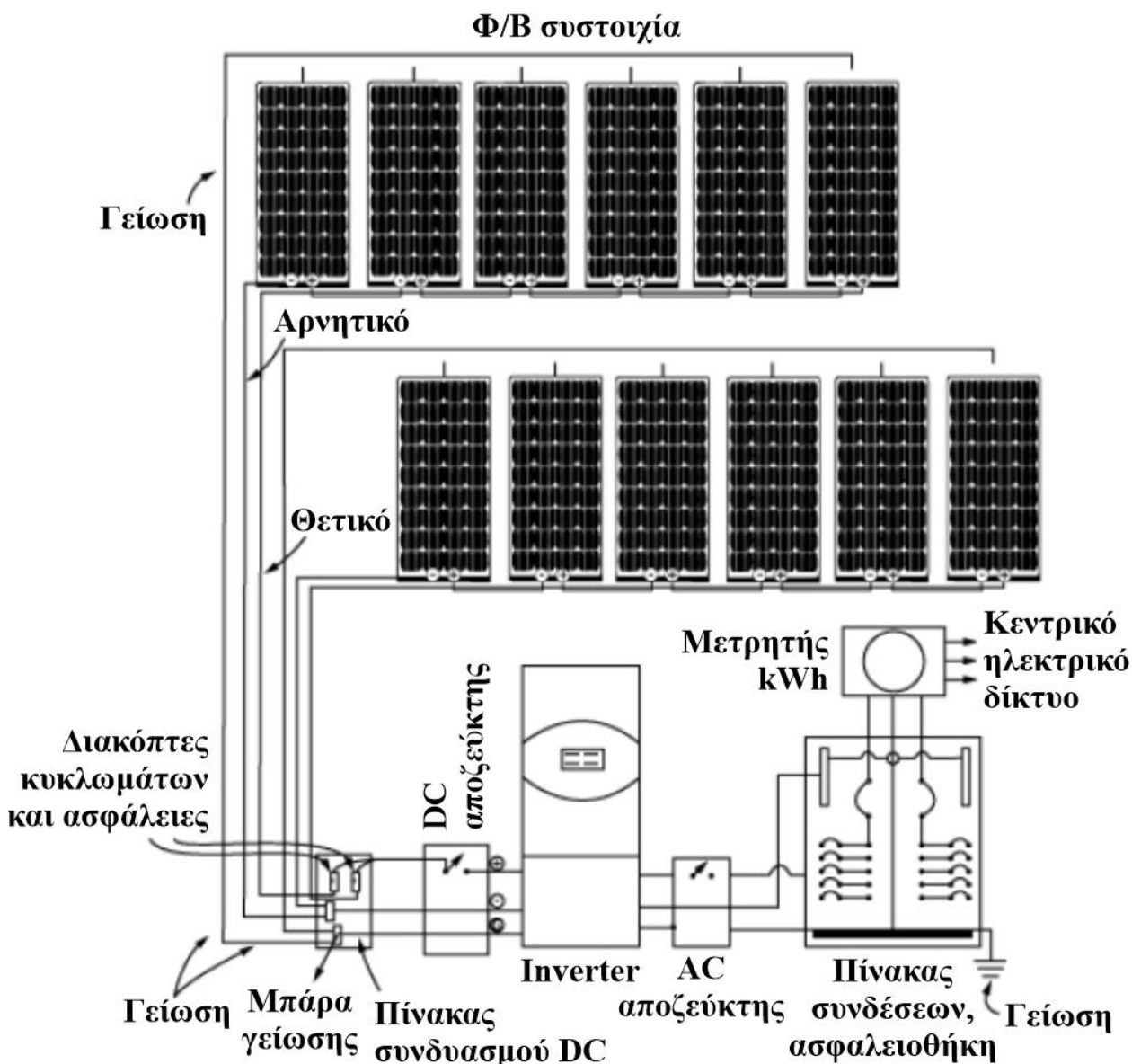
Σχήμα 4.36 – Διάγραμμα απλοποιημένης διασυνδεδεμένης Φ/Β συστοιχίας χωρίς αποθήκευση ενέργειας [16]

Οι διατάξεις ασφαλείας περιλαμβάνουν τους αποζεύκτες AC και DC. Το σύστημα μπορεί επίσης να περιέχει έναν πίνακα συνδυασμού DC.

Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινά από τη Φ/Β συστοιχία. Οι Φ/Β συστοιχίες παράγουν συνεχές ρεύμα, το οποίο ρέει μέσω καλωδίων στον αντιστροφέα. Εν συνεχεία, ο αντιστροφέας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα και, συνήθως, είναι καλωδιωμένος σε μία (1) έως τέσσερις (4) σειρές Φ/Β πλαισίων. Για το λόγο αυτό, αναφέρεται ως *αντιστροφέας στοιχειοσειράς (string inverter)*. Οι αντιστροφείς στοιχειοσειράς έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους.

Ένα άλλο είδος ολοένα και πιο δημοφιλούς αντιστροφέα με χρήση σε διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα είναι ο *μικροαντιστροφέας (micro inverter)*. Οι μικροαντιστροφείς έχουν μικρό μέγεθος και συνδέονται απευθείας στα Φ/Β πλαίσια – ένας μικροαντιστροφέας ανά πλαίσιο – μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τα Φ/Β πλαίσια σε εναλλασσόμενο ρεύμα 230 V. Η σύνδεση πολλαπλών μικροαντιστροφέων μεταξύ τους οδηγεί στην ενίσχυση της έντασης του ρεύματος. Έπειτα, η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος καταλήγει στον κύριο πίνακα συνδέσεων (ασφαλειοθήκη), μέσω του αποζεύκτη AC και, τέλος, καταλήγει στα επιμέρους ενεργά φορτία (οικιακές συσκευές). Κάθε κύκλωμα αναφέρεται ως *κύκλωμα διακλάδωσης*. Εάν το Φ/Β σύστημα παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια απ' ό,τι χρειάζεται

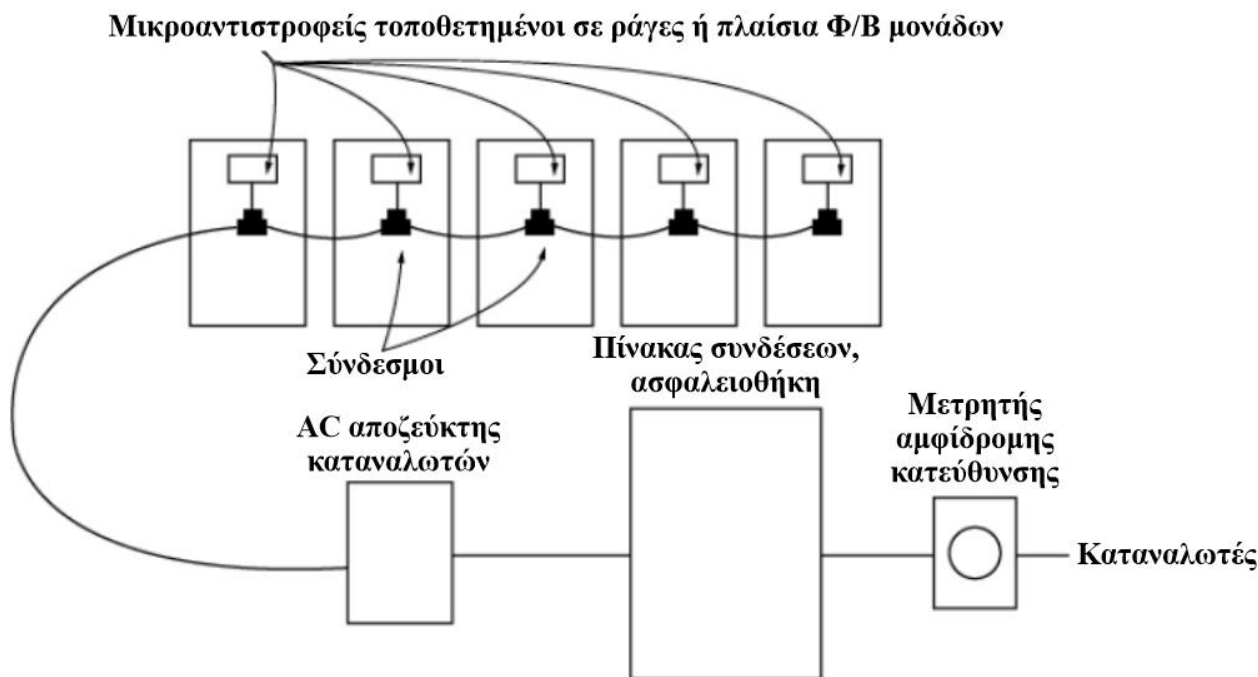
για να καλύψει αυτές τις απαιτήσεις – πράγμα που συμβαίνει συχνά τις ηλιόλουστες μέρες - η περίσσεια ισχύος ρέει αυτόματα στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 4.37 – Σχηματικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς αποθήκευση ενέργειας [16]

Αξίζει να σημειωθεί πως τα Φ/Β συστήματα που βασίζονται σε μικροαντιστροφείς είναι αρκετά δημοφιλή για πολλούς λόγους. Πρώτα απ' όλα, είναι τα απλούστερα απ' όλα τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα με καλωδιακή σύνδεση. Επιπλέον, τα Φ/Β συστήματα με μικροαντιστροφείς είναι ελαφρώς πιο αποδοτικά σε σύγκριση με αυτά που διαθέτουν αντιστροφείς στοιχειοσειρών. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι μειώνουν τις δυσμενείς επιπτώσεις της σκίασης. Ενώ η σκίαση μέρους μίας Φ/Β συστοιχίας συνδεδεμένης μ' έναν αντιστροφέα συχνά μειώνει την απόδοση ολόκληρης της συστοιχίας, η σκίαση ενός ή περισσότερων Φ/Β πλαισίων εξοπλισμένων με μικροαντιστροφείς επηρεάζει μόνο την έξοδο

αυτών. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των μικροαντιστροφών είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, συνοδευόμενη από πολυετή εγγύηση. Οι inverters δε μετατρέπουν απλώς την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, αλλά τη μετατρέπουν σε **εναλλασσόμενο ρεύμα συμβατό (σε συγχρονισμό) με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (230 V, 50 Hz)** και για το λόγο αυτό αναφέρονται συχνά ως *σύγχρονοι αντιστροφείς (synchronous inverters)*.



**Σχήμα 4.38** – Σχηματικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μικροαντιστροφείς [16]

Η ηλεκτρική ενέργεια που ανατροφοδοτείται στο ηλεκτρικό δίκτυο “μετρείται” από ένα *μετρητή ενέργειας*. Ο μετρητής ενέργειας μετρά την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που ρέει από (όταν δεν υπάρχει παραγωγή από τα Φ/Β πλαίσια) και προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Σήμερα, οι περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν ένα μόνο ψηφιακό μετρητή ενέργειας, που αναφέρεται ως *μετρητής αμφίδρομης κατεύθυνσης (bidirectional meter)*.

Κατά τη συντήρηση ενός Φ/Β συστήματος παρέχονται *διατάξεις αποζευκτών ασφαλείας AC/DC*. Πρόκειται για χειροκίνητους διακόπτες που επιτρέπουν στους ηλεκτρολόγους να τερματίζουν τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε βασικά σημεία ενός Φ/Β συστήματος όσο και με το ηλεκτρικό δίκτυο, για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας ή άλλων ζητημάτων ασφαλείας.

Η λειτουργία των αντιστροφών διακόπτεται κυρίως όταν υφίστανται οι εξής δύο συνθήκες: *μερική διακοπή (brownout)* και *ολική διακοπή (blackout) λειτουργίας*. Η μερική διακοπή λειτουργίας συμβαίνει όταν η ζήτηση ηλεκτρικού ρεύματος είναι εξαιρετικά υψηλή (π.χ. μία ζεστή καλοκαιρινή μέρα όταν υπάρχει έντονη χρήση κλιματιστικών). Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να υπάρξει πτώση τάσης και συχνότητας στη γραμμή. Ο αντιστροφέας αντιλαμβάνεται αυτή τη



διαταραχή και απενεργοποιείται. Κατά τη διάρκεια ολικής διακοπής ρεύματος υπάρχει πλήρης απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω απώλειας ή βλάβης της γραμμής ή του μετασχηματιστή. Και σε αυτήν την περίπτωση, ο αντιστροφέας αντιλαμβάνεται τη διακοπή και απενεργοποιείται αυτομάτως [16].

Στον **Πίνακα 4.3** συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων χωρίς αποθήκευση ενέργειας.

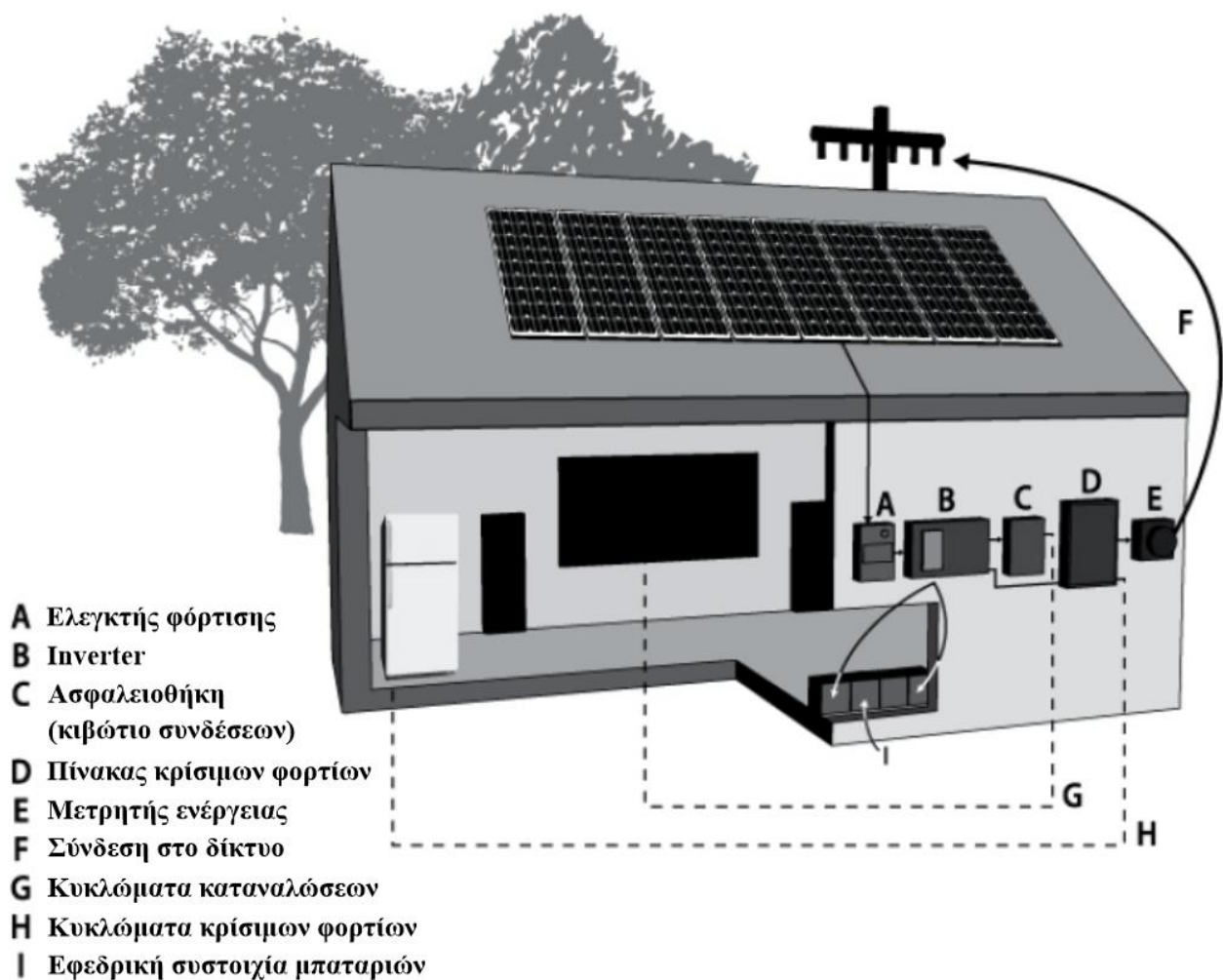
**Πίνακας 4.3** – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων χωρίς αποθήκευση ενέργειας [16]

<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Απλούστερα συγκριτικά με άλλα συστήματα	Ευάλωτα σε αστοχία δικτύου, εκτός κι αν έχει εγκατασταθεί εφεδρική γεννήτρια ή αδιάλειπτη παροχή ρεύματος (Uninterruptible Power Supply, UPS)
Συστήματα μικρότερου κόστους	
Απαιτούν λιγότερη συντήρηση	
Προσφέρουν απεριόριστη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (εκτός κι αν υφίσταται αστοχία δικτύου)	
Πιο αποτελεσματικά από τα συστήματα που βασίζονται σε μπαταρίες	
Προσφέρουν απεριόριστη αποθήκευση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας (εκτός κι αν υφίσταται αστοχία δικτύου)	
Περιβαλλοντικά φιλικότερα από τα συστήματα που βασίζονται σε μπαταρίες	

#### 4.8.2.2 Διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα με αποθήκευση ενέργειας

Τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα με αποθήκευση ενέργειας (μπαταρίες) εξασφαλίζουν συνεχή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, ακόμη κι όταν υφίστανται περίοδοι απώλειας τροφοδοσίας από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (βλάβες, καιρικές συνθήκες κ.λπ.). Τα συστήματα αυτά απαιτούν την ύπαρξη συστοιχιών μπαταριών και περιέχουν όλα τα στοιχεία που βρίσκονται στα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας, ωστόσο, υπάρχουν μερικές βασικές διαφορές.

Η πρώτη διαφορά είναι ο τύπος του αντιστροφέα, που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε συνδυασμό συστοιχιών μπαταριών και δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συστοιχίες μπαταριών είναι συνήθως μικρές, το 1/3 έως 1/4 του μεγέθους μιας συστοιχίας μπαταριών που απαιτείται για ένα αυτόνομο Φ/Β σύστημα. Απαιτούνται μικρές συστοιχίες μπαταριών, διότι ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων έχει γίνει με σκοπό την παροχή επαρκούς αποθηκευτικού χώρου για την τροφοδότηση μερικών κρίσιμων φορτίων για χρονικό ορίζοντα από μερικές ώρες έως μία ή δύο ημέρες, ενώ ταυτόχρονα ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας θα αποκαθιστά τυχόν διακοπή της ηλεκτρικής παροχής. Για ανάγκες πλήρους ισχύος κατά τη διάρκεια διακοπών της ηλεκτρικής παροχής, θα πρέπει να εγκαθίστανται πολύ μεγαλύτερες και ακριβότερες συστοιχίες μπαταριών ή εφεδρικές γεννήτριες. Η ενεργοποίηση λειτουργίας των μπαταριών, οι οποίες παραμένουν συνεχώς σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, γίνεται μόνο σε διακοπή του δικτύου, αυστηρά για την παροχή εφεδρικής ισχύος. Δεν εγκαθίστανται για την παροχή πρόσθετης ισχύος, π.χ. για την εκτέλεση φορτίων που υπερβαίνουν την ισχύ εξόδου του Φ/Β συστήματος, εργασία για την οποία είναι επιφορτισμένο το δίκτυο.



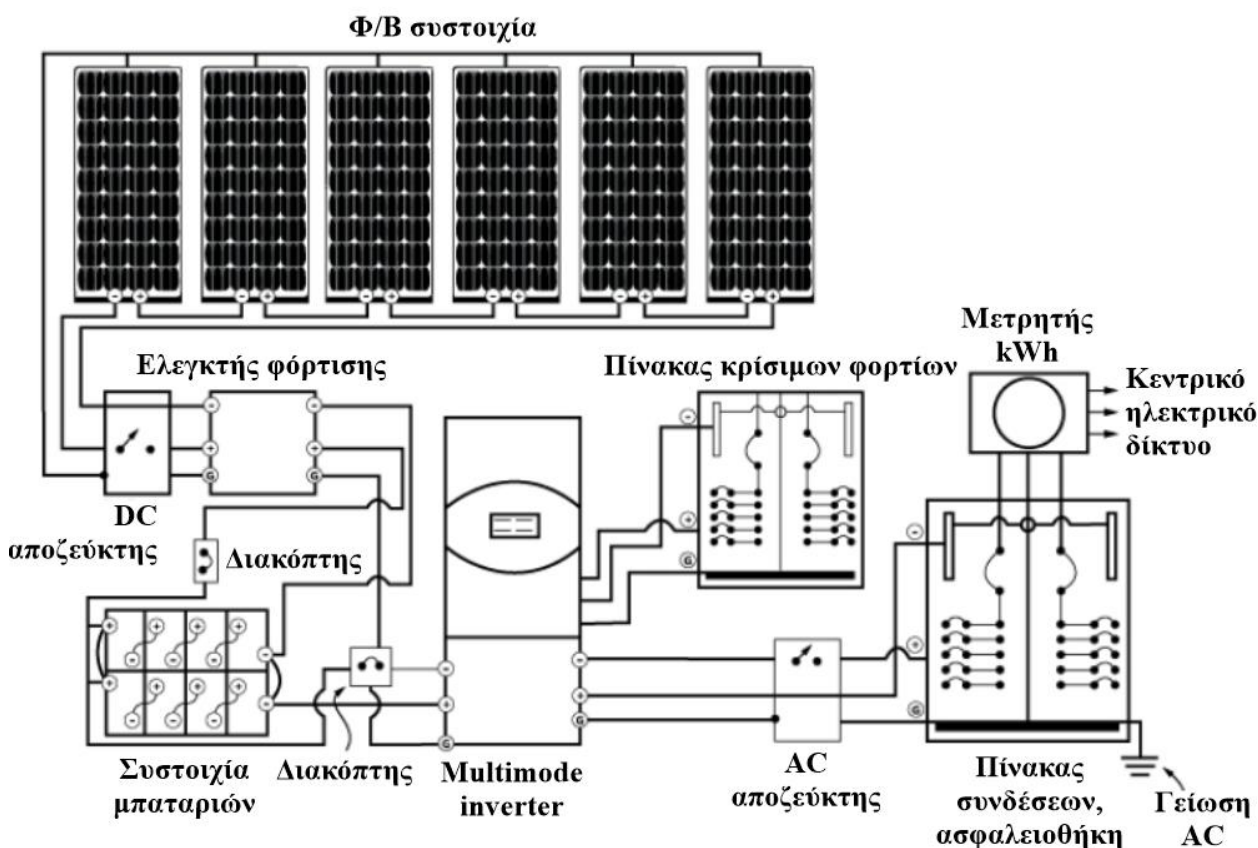
Σχήμα 4.39 – Διάγραμμα απλοποιημένης διασυνδεδεμένης Φ/Β συστοιχίας με αποθήκευση ενέργειας [16]



Η διατήρηση μιας πλήρως φορτισμένης συστοιχίας μπαταριών απαιτεί μικρή ποσότητα ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Δηλαδή, ένα μικρό μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ένα Φ/Β σύστημα προορίζεται για την πλήρη διατήρηση της αποθηκευτικής ικανότητας των μπαταριών, ανά πάσα στιγμή. Ως αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος αποτελεί η μείωση τη συνολικής απόδοσης του συστήματος κατά 5% έως 10%.

Οι συστοιχίες μπαταριών σε διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα δεν απαιτούν προσεκτική παρακολούθηση, όπως αυτές των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων, αλλά προτείνεται η συχνή επιτήρησή τους για αποφυγή διακοπών ρεύματος σε περίπτωση πλήρους αστοχίας τους.

Ένα πρόσθετο βασικό στοιχείο των συστημάτων αυτών είναι ο *ελεγκτής φόρτισης* (*charge controller*), όπως φαίνεται στα **Σχήματα 4.39** και **4.40**. Ο ελεγκτής φόρτισης εκτελεί πολλές ζωτικές λειτουργίες. Για παράδειγμα, ρυθμίζει τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μια συστοιχία μπαταριών όταν φορτίζεται, με τρόπο που διασφαλίζει ότι οι μπαταρίες φορτίζονται γρήγορα και αποτελεσματικά. Οι ελεγκτές φόρτισης αποτρέπουν επίσης την **υπερφόρτιση** και **υπερεκφόρτιση** των μπαταριών, δύο καταστάσεις οι οποίες μπορούν να βλάψουν μόνιμα π.χ. τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος.



**Σχήμα 4.40** – Σχηματικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με αποθήκευση ενέργειας [16]

Οι σύγχρονοι ελεγκτές φόρτισης για οικιακά Φ/Β συστήματα διαθέτουν ως χαρακτηριστικό την παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Όπως αναφέραμε στην **Ενότητα 4.7.4**, το MPPT βελτιστοποιεί την έξοδο μιας Φ/Β συστοιχίας, διασφαλίζοντας έτσι την υψηλότερη δυνατή έξοδο ανά πάσα στιγμή, βελτιώνοντας παράλληλα την απόδοση του Φ/Β συστήματος κατά περίπου 15%.

Τέλος, ένα ακόμη βασικό στοιχείο των συστημάτων αυτών είναι ο *πίνακας κρίσιμων φορτίων*, ένας ξεχωριστός πίνακας με διακοπτικό υλικό που εξυπηρετεί κρίσιμα φορτία [16].

Στον **Πίνακα 4.4** συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων με αποθήκευση ενέργειας.

**Πίνακας 4.4** – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων με αποθήκευση ενέργειας [16]

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Παρέχουν μία αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας	Πιο δαπανηρά από τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας
Παρέχουν ρεύμα έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος	Λιγότερο αποδοτικά από τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας
	Λιγότερο φιλικά προς το περιβάλλον από τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας
	Απαιτούν περισσότερη συντήρηση από τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας

#### 4.8.2.3 Σύμβαση ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering)

Το *net metering* ή αλλιώς *ενεργειακός συμψηφισμός* είναι ένα πρόγραμμα που δίνει τη δυνατότητα της ιδιοκατανάλωσης της παραγόμενης ενέργειας μίας Φ/Β εγκατάστασης. Η ενέργεια αυτή μπορεί να καταναλωθεί άμεσα την ώρα που παράγεται στη σκεπή ενός κτιρίου ή να διοχετευθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο με την εκ νέου λήψη της οποιαδήποτε στιγμή κατά την οποία δεν υπάρχει παραγωγή, αλλά ζήτηση ενέργειας. Όταν υπάρχει ανάγκη για ακόμα περισσότερη ενέργεια, τότε μόνο καταναλώνεται η ενέργεια του δικτύου. Ουσιαστικά, με το πρόγραμμα net metering, όχι μόνο μπορεί να καταναλωθεί το ρεύμα που παράγεται από τον ιδιοκτήτη, αλλά χρησιμοποιείται

επιπλέον το ηλεκτρικό δίκτυο ως μπαταρία αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας για μελλοντική χρήση. Ο συμψηφισμός καταναλισκόμενης ενέργειας από το δίκτυο και συνολικής παραγόμενης ενέργειας καθορίζει το ποσό του λογαριασμού ρεύματος.

Ο συμψηφισμός του ρεύματος παραγωγής και κατανάλωσης γίνεται από τον ΔΕΔΔΗΕ σε ετήσια βάση. Κάθε χρόνο ο ΔΕΔΔΗΕ μεταφέρει τυχόν περίσσειμα ενέργειας στο λογαριασμό του επόμενου έτους, ενώ κάθε τρία (3) χρόνια κάνει εκκαθάριση καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας. Αν υπάρχει επιθυμία για μηδενισμό του λογαριασμού ρεύματος, θα πρέπει να υπολογιστεί πόση ενέργεια καταναλώνεται ετησίως και να εγκατασταθεί στη στέγη του κτιρίου ένα Φ/Β σύστημα, το οποίο θα μπορεί να παράγει αυτήν την ενέργεια. Ιδανικό σύστημα metering θεωρείται αυτό με το οποίο η ετήσια παραγόμενη ισχύς του Φ/Β συστήματος ταυτίζεται με τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες. Έτσι, η αποφυγή δαπάνης επιπλέον κεφαλαίου για ένα μεγαλύτερο Φ/Β σύστημα από αυτό που χρειάζεται, μπορεί να οδηγήσει στην επίτευξη πολύ ταχύτερης απόσβεσης της επένδυσης.

Ιδανικές συνθήκες μίας νέας εγκατάστασης έχουμε όταν ο προσανατολισμός των Φ/Β πλαισίων είναι νότιος, η κλίση τους 30° και δεν υπάρχουν σκιάσεις από διπλανά κτίρια, δέντρα ή καμινάδες. Αυτό σημαίνει, ότι για τη σωστή μελέτη χρειάζονται εξειδικευμένες γνώσεις. Ένας ειδικός εγκαταστάτης ή σχεδιαστής Φ/Β συστημάτων θα μελετήσει και θα μετρήσει το διαθέσιμο χώρο για την εγκατάστασή και θα μπορέσει να εκτιμήσει με ακρίβεια το απαιτούμενο μέγεθός της, καθώς και την ετήσια παραγωγή ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί [81].

#### 4.8.2.3.1 Μέρη του Φ/Β συστήματος net metering

Ένα Φ/Β σύστημα net metering αποτελείται από [81]:

1. τα Φ/Β πλαίσια,
2. τον on-grid inverter,
3. την καλωδίωση AC και DC,
4. τους ηλεκτρικούς πίνακες με το διακοπτικό υλικό,
5. ένα δεύτερο μετρητή ενέργειας και
6. τη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Αίτηση για net metering μπορούν να κάνουν ιδιώτες, αγρότες, εταιρίες, δημόσιες υπηρεσίες, νομικά πρόσωπα και ενεργειακές κοινότητες, σε οποιοδήποτε μέρος της ηπειρωτικής ή νησιωτικής Ελλάδας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει παροχή ρεύματος στο χώρο, δηλαδή ενεργή σύνδεση με τον ΔΕΔΔΗΕ. Το πρόγραμμα παρέχει 25ετή σύμβαση σύνδεσης με συμψηφισμό σε τριετή βάση, ενώ η ισχύς του Φ/Β συστήματος μπορεί να ανέλθει στο 100% της

εγκατάστασης (έως 3 MW), ενώ σε βάθος χρόνου η δηλωμένη ισχύς μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί, ανάλογα με τις ανάγκες [81].



Σχήμα 4.41 – Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας και τρόπος λειτουργίας του Net Metering [87]

#### 4.8.2.3.2 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα του net metering

Υπάρχουν δύο μειονεκτήματα [81]:

1. Είναι αναγκαία η ύπαρξη διαθέσιμου χώρου (ταράτσα, στέγη, πάρκινγκ, αποθήκη ή γη) για την εγκατάσταση των Φ/Β πλαισίων. Για περιπτώσεις νομικών προσώπων ιδιωτικού (ΝΠΙΔ) ή δημοσίου δικαίου (ΝΠΙΔΔ) που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλους δημοσίου ενδιαφέροντος σκοπούς ή αγροτών εγγεγραμμένων στο μητρώο αγροτών, υπάρχει δικαίωμα ένταξης στο πρόγραμμα του εικονικού (virtual) net metering. Σε αυτό, είναι επιτρεπτός ο συμψηφισμός της παραγόμενης ενέργειας ενός Φ/Β συστήματος με την καταναλισκόμενη ενέργεια του παραγωγού σε άλλο χώρο.
2. Το απαιτούμενο κεφάλαιο που θα χρειαστεί. Αυτήν τη στιγμή (2022), για ένα Φ/Β σύστημα net metering θα πρέπει να υπολογιστεί ένα κόστος της τάξης του 1.5€ ανά εγκατεστημένο watt. Η τιμή αυτή μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί, ανάλογα με τις αυξήσεις στις τιμές των πρώτων υλών στις αγορές, αλλά και την ποιότητα των υλικών της εγκατάστασης.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα [81]:

1. Δραματική μείωση του λογαριασμού ρεύματος. Αν οι υπολογισμοί για την κατανάλωσή είναι σωστοί, ο λογαριασμός ρεύματος σχεδόν θα μηδενιστεί.
2. Καθώς ο συμψηφισμός είναι ενεργειακός και όχι λογιστικός, δε θα προκύψουν ποτέ ξανά οποιεσδήποτε μελλοντικές αυξήσεις στα τιμολόγια του ρεύματος. Για τον ιδιοκτήτη της Φ/Β

εγκατάστασης δε θα παίζει πλέον κανένα ρόλο η τιμή της κιλοβατώρας (kWh), όσο κι αν αυξηθεί.

3. Ασφάλεια του προγράμματος, καθώς είναι δοκιμασμένο σε πάρα πολλές χώρες για πολλά χρόνια, χωρίς να έχει αναθεωρηθεί.

#### 4.8.2.3.3 Διαδικασία εγκατάστασης ενός Φ/Β συστήματος net metering (2022)

Σύμφωνα με τον οδηγό net metering του Συνδέσμου Εταιριών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ)<sup>5</sup>, η διαδικασία έχει τα εξής επτά (7) βήματα [81]:

- Υποβολή αίτησης στην αρμόδια τοπική μονάδα του ΔΕΔΔΗΕ, με την οποία γνωστοποιείται η πρόθεση σύνδεσης του σταθμού παραγωγής. Στην αίτηση αυτή θα πρέπει να δηλωθεί ο τόπος και ο χώρος της εγκατάστασης, ο αριθμός παροχής που συνδέεται ο σταθμός, η ισχύς του Φ/Β συστήματος, τα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων και των αντιστροφών, καθώς και να προσκομιστούν όλα τα έγγραφα που αναφέρονται στην αίτηση. Θα πρέπει, όμως, να έχει εκπονηθεί η τεχνική μελέτη από κατάλληλης ειδικότητας μηχανικό, με την επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την ολοκλήρωση της εγκατάστασης.
- Εφόσον ο φάκελος της αίτησης είναι πλήρης και τα στοιχεία του είναι ορθά, ο Διαχειριστής εντός δεκαπέντε (15) ημερών ενημερώνει τον ιδιοκτήτη σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη της αιτούμενης αίτησης.
- Υπογραφή της σύμβασης της σύνδεσης με ταυτόχρονη καταβολή της σχετικής δαπάνης εντός εξήντα (60) ημερών. Ο Διαχειριστής, στη συνέχεια, προβαίνει στην κατασκευή των έργων σύνδεσης.
- Υποβολή αίτησης κατάρτισης της σύμβασης ενεργειακού συμψηφισμού προς τον προμηθευτή που εκπροσωπεί την παροχή με την οποία θα γίνει ο συμψηφισμός.
- Υπογραφή της σύμβασης ενεργειακού συμψηφισμού με τον προμηθευτή. Η σύμβαση υπογράφεται εντός δεκαπέντε (15) ημερών από την παραλαβή του αιτήματος.
- Υποβολή της αίτησης ενεργοποίησης της σύνδεσης. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής του σταθμού παραγωγής, ο ενδιαφερόμενος δηλώνει ετοιμότητα και αιτείται στο Διαχειριστή την ενεργοποίηση της σύνδεσης του σταθμού.
- Ενεργοποίηση της σύνδεσης εντός του χρονικού διαστήματος δώδεκα (12) μηνών. Με την ενεργοποίηση της σύνδεσης τίθεται σε ισχύ η σύμβαση ενεργειακού συμψηφισμού. Από αυτή τη στιγμή και για τα επόμενα εικοσιπέντε (25) χρόνια δεν θα πρέπει να υπάρχει σημαντική όχληση ή ανησυχία του ιδιοκτήτη σχετικά με τους λογαριασμούς ρεύματος.

---

<sup>5</sup> Hellenic Association of Photovoltaic Companies (HELAPCO), <https://helapco.gr>

**Πίνακας 4.5** – Όρια ισχύος Φ/B net metering στην ηπειρωτική Ελλάδα και στα διασυνδεδεμένα νησιά (συμπεριλαμβανομένης της Κρήτης) [86]

Επίπεδο τάσης	Τυποποιημένο μέγεθος παροχής	Συμφωνημένη Ισχύς (Σ.Ι.) παροχής (kVA)	Μέγιστη επιτρεπτή ισχύς φωτοβολταϊκού σταθμού (kW <sub>p</sub> )
Χαμηλή Τάση	03	8	5
	05	12	5
	1	15	15
	2	25	25
	3	35	35
	4	55	55
	5	85	85
	6	135	135
7	250	250	
Μέση Τάση			100% της Συμφωνημένης Ισχύος και μέχρι 3000 kW <sub>p</sub> *

\* Για το νομικό πρόσωπο του κράτους ή νομικά πρόσωπα δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλου δημοσίου συμφέροντος σκοπούς, γενικής ή τοπικής εμβέλειας δεν ισχύει ο περιορισμός των 3000 kW<sub>p</sub>.

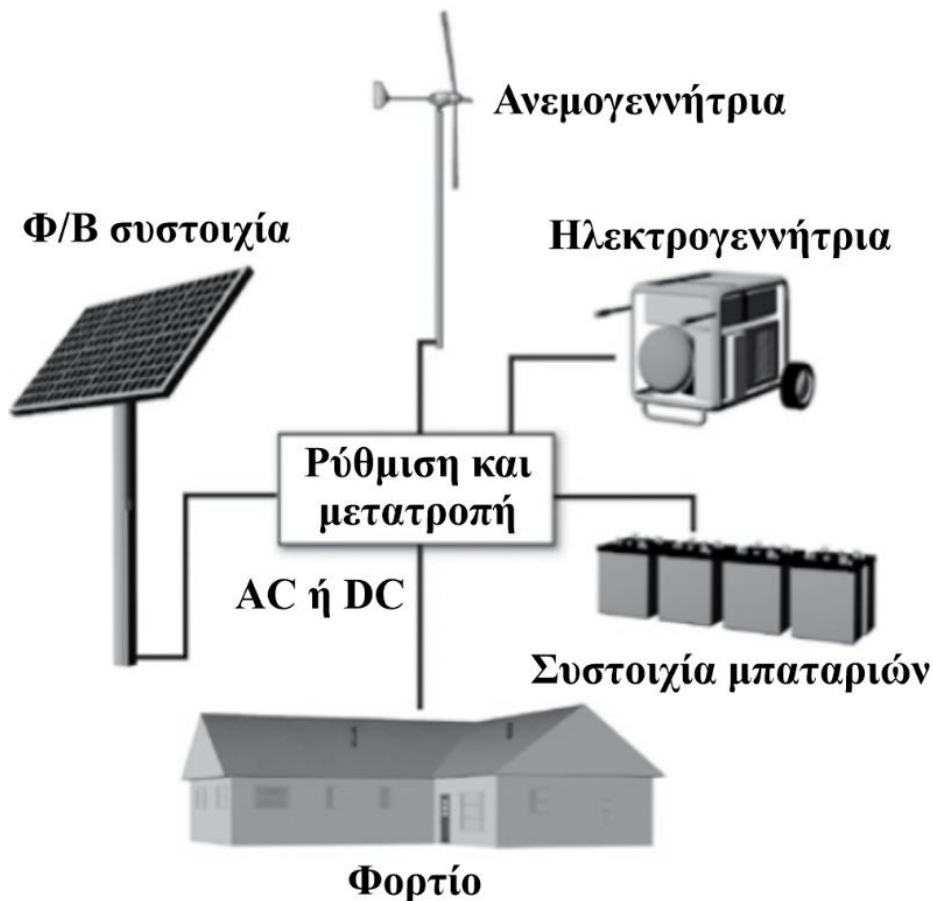
**Πίνακας 4.6** – Ανώτατα όρια ισχύος (kW) σταθμών παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) ανά αυτόνομο νησιωτικό σύστημα [86]

Αυτόνομο Νησιωτικό Σύστημα	Σταθμοί που εγκαθίστανται από Ε. Κοιν.	Σταθμοί που εγκαθίστανται από νομικά πρόσωπα δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου, που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλους δημόσιου ενδιαφέροντος σκοπούς γενικής ή τοπικής εμβέλειας	Λοιποί σταθμοί
Ρόδος (Σύμπλεγμα)	1000	500	100
Κως (Σύμπλεγμα)	300	100	50

Λέσβος (Σύμπλεγμα)	300	100	50
Θήρα (Σύμπλεγμα)	200	100	50
Χίος (Σύμπλεγμα)	200	100	50
Σάμος (Σύμπλεγμα)	200	100	50
Λοιπά Συστήματα	100	100	20

### 4.8.3 Υβριδικά (hybrid) συστήματα

Καθένα από αυτά προαναφερόμενα Φ/Β συστήματα μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να περιλαμβάνει πρόσθετες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Το αποτέλεσμα είναι γνωστό ως *υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Hybrid RES System)* [16].



Σχήμα 4.42 – Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [16]

Τα υβριδικά συστήματα είναι εξαιρετικά δημοφιλή μεταξύ των ιδιοκτητών κατοικιών σε αγροτικές ή απομακρυσμένες από το ηλεκτρικό δίκτυο περιοχές, καθώς σε πολλές από αυτές υφίστανται κατάλληλες συνθήκες που συνδυάζουν μεγάλο αιολικό και ηλιακό ενεργειακό



δυναμικό. Σε αυτές τις περιοχές, ένα κατάλληλου μεγέθους υβριδικό φωτοβολταϊκό/αιολικό σύστημα όχι μόνο μπορεί να παρέχει το 100% της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά μπορεί να εξαλείψει την ανάγκη για τη χρήση εφεδρικής γεννήτριας. Μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί ένα αιολικό σύστημα για τη συντήρηση των μπαταριών, κάτι που θα συμβάλει στην παράταση της διάρκειας της ζωής τους.

Σε περιόδους που δεν υπάρχει ικανοποιητικό αιολικό/ηλιακό δυναμικό ή το υβριδικό σύστημα είναι μικρού μεγέθους, τότε απαιτείται η χρήση εφεδρικών γεννητριών (gen-sets) για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εφεδρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται επίσης για τη διατήρηση των μπαταριών σε κατάσταση πλήρους φόρτισης και επιτρέπουν τη χρήση μικρότερης συστοιχίας μπαταριών.

Παρά τα πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων, αντί για την εγκατάσταση δύο ξεχωριστών συστημάτων, θα ήταν προτιμότερη η απλή επέκταση του Φ/Β συστήματος. Η λύση της εγκατάστασης ενός μεγαλύτερου Φ/Β συστήματος θα μπορούσε να είναι πολύ φθηνότερη από αυτήν της εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας, ως επεκτάσιμο σύστημα [16].



Από τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιγράφηκαν στην **Ενότητα 4.8**, τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα με αποθήκευση ενέργειας (συσσωρευτές) είναι τα πιο περίπλοκα. Δεύτερα από άποψη πολυπλοκότητας ακολουθούν τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα [16].

## 4.9 Επιλογή φωτοβολταϊκού συστήματος

Συνοψίζοντας όσα περιγράφηκαν στην **Ενότητα 4.8**, υπάρχει η δυνατότητα τριών βασικών επιλογών όταν υπάρχει σχεδιασμός για εγκατάσταση ενός Φ/Β. Εάν υπάρχει πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο, μπορεί να εγκατασταθεί ένα διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα χωρίς αποθήκευση ενέργειας, αποτελώντας την οικονομικά πιο συμφέρουσα επιλογή. Εναλλακτικά, μπορεί να εγκατασταθεί ένα διασυνδεδεμένο σύστημα με αποθήκευση ενέργειας. Εάν δεν υπάρχει πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο, μπορεί να εγκατασταθεί ένα αυτόνομο Φ/Β σύστημα. Όλα αυτά τα συστήματα μπορούν να συνδυάσουν δύο ή περισσότερες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργώντας υβριδικά συστήματα.

Όταν υπάρχει ανάγκη για κατασκευή κατοικιών παθητικής ηλιακής/ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας, συνήθως προτείνονται διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα για όσους ζουν κοντά στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει στους ιδιοκτήτες να χρησιμοποιούν το δίκτυο για να αποθηκεύουν την περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια, παρέχοντάς τους σημαντικό οικονομικό όφελος.

Τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα με συστοιχίες μπαταριών είναι κατάλληλα για όσους θέλουν να παραμείνουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο, αλλά θέλουν επίσης να προστατευτούν από περιστασιακές διακοπές ρεύματος. Το κόστος αυτών των συστημάτων είναι μεγαλύτερο, αλλά παρέχουν ουσιαστική ασφάλεια.

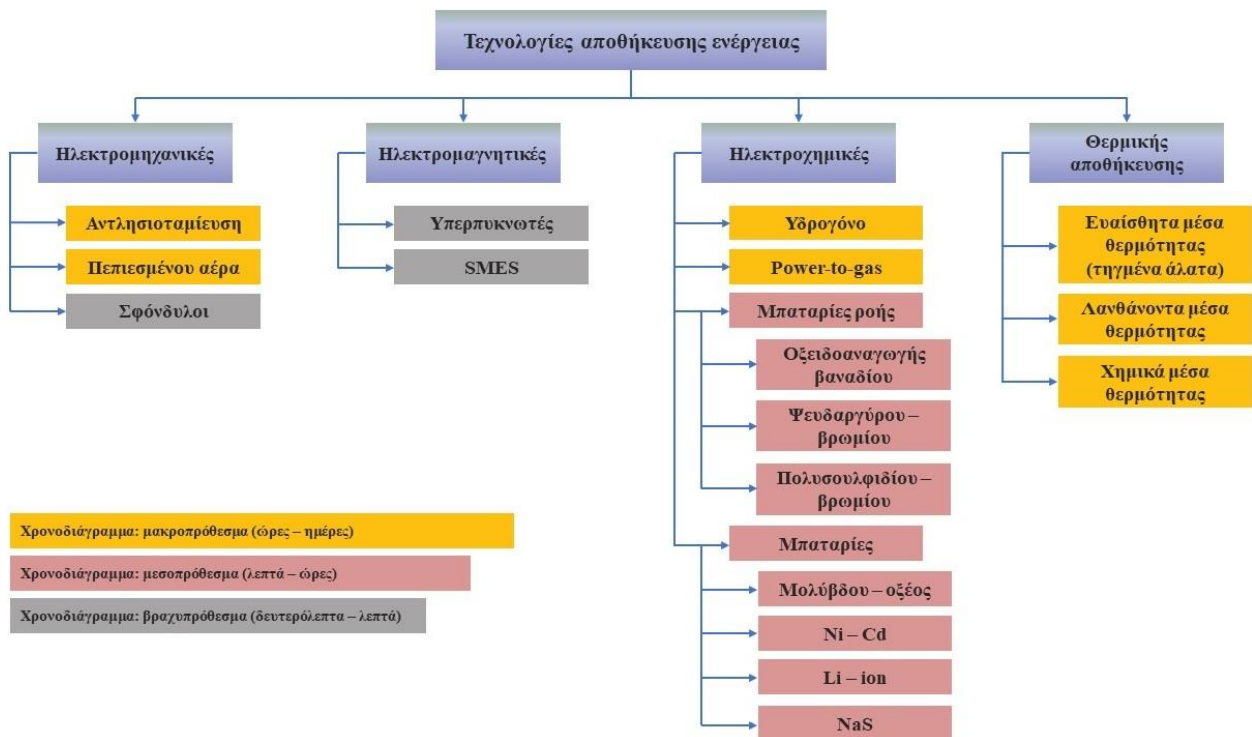
Τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα αποτελούν την κύρια επιλογή για ιδιοκτήτες εγκαταστάσεων σε απομακρυσμένες από το δίκτυο αγροτικές τοποθεσίες. Η εξοικονόμηση των χρημάτων από τη μη διασύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο αντισταθμίζεται από την απαίτηση υπεραποδοτικών Φ/Β συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [16].

# Κεφάλαιο 5

## Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όπως ο άνεμος και τα φωτοβολταϊκά, χαρακτηρίζονται από τη μεταβλητότητα στην προσφορά ενέργειας, λόγω της εξάρτησής τους από τις καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ως εκ τούτου, απαιτούν μαζική αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας για να συμβαδίζουν με την επίσης κυμαινόμενου χαρακτήρα καμπύλη ζήτησης φορτίου στο δίκτυο (εξαιτίας της υψηλής διεισδυτικότητας των ΑΠΕ σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους, με σκοπό τη διατήρηση της ισορροπίας παραγωγής – ζήτησης). Από την άλλη πλευρά, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, μπορούν εύκολα να προσαρμόσουν την παραγωγή τους ώστε να ταιριάζουν με τα κυμαινόμενα πρότυπα κατανάλωσης, με συνέπεια η αποθήκευση ενέργειας συχνά να μην είναι απαραίτητη. Ωστόσο, η μαζική αποθήκευση μπορεί να είναι επιθυμητή για σταθμούς παραγωγής ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπλέον απώλειες ενέργειας λόγω περιόδων μη λειτουργίας ή λειτουργίας υπό μερικό φορτίο [02,14].

Στο Σχήμα 5.1 εμφανίζονται οι κυριότερες τεχνολογίες (μέθοδοι) αποθήκευσης ενέργειας.



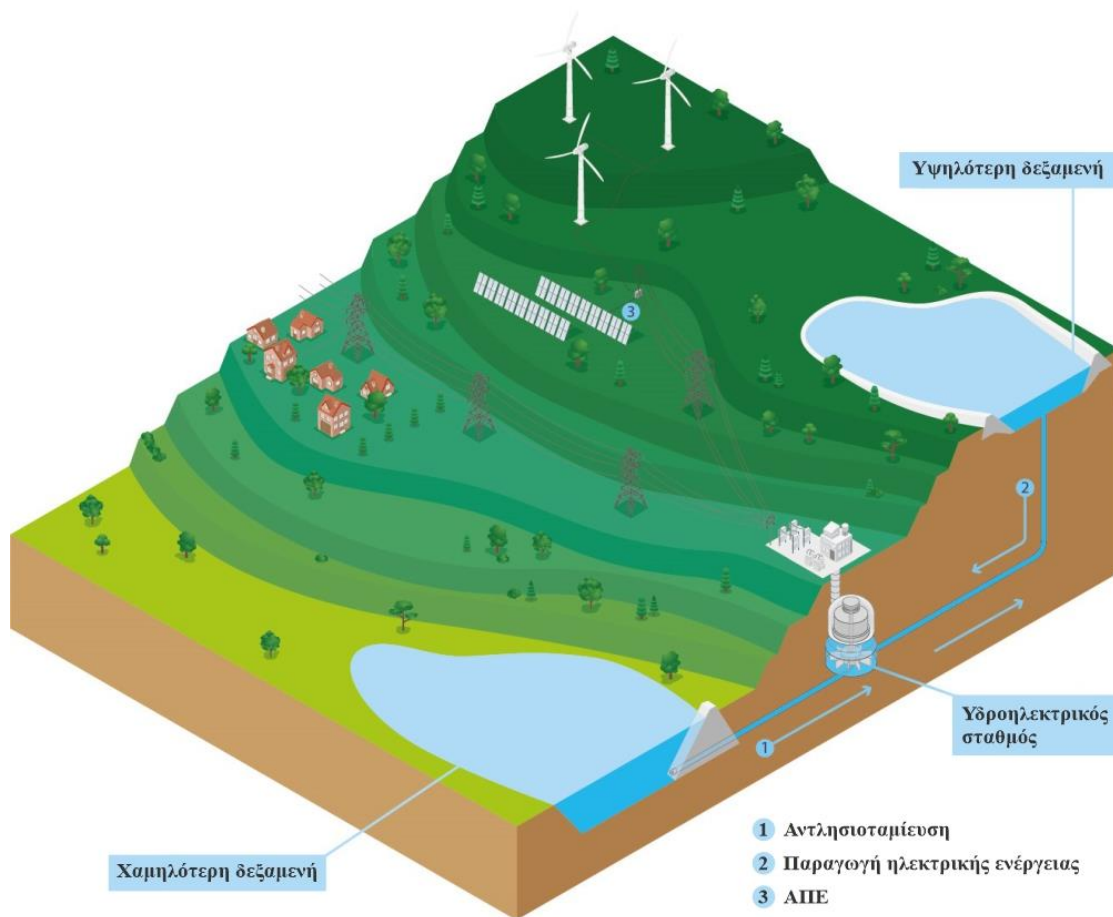
Σχήμα 5.1 – Τεχνολογίες (μέθοδοι) αποθήκευσης ενέργειας [69]

Ανάλογα με τη μορφή της ενέργειας που χρησιμοποιούν, τα Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας ταξινομούνται σε συστήματα ηλεκτρομηχανικής, ηλεκτρομαγνητικής, ηλεκτροχημικής και θερμικής αποθήκευσης [68].

## 5.1 Ηλεκτρομηχανικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

### 5.1.1 Αντλησιοταμίευση (PHSS)

Η αντλησιοταμίευση (*Pumped Hydro Storage System, PHSS*) αποτελεί τη δημοφιλέστερη τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Η τεχνολογία απορροφά την πλεονάζουσα ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και την επαναποδίδει όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Ένας τυπικός αντλησιοταμιευτικός σταθμός περιλαμβάνει δύο ταμιευτήρες (δεξαμενές) σε διαφορετικό υψόμετρο, συνήθως μερικών εκατοντάδων μέτρων [68,71].



Σχήμα 5.2 – Ένας τυπικός υδροηλεκτρικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με αντλησιοταμίευση [72]

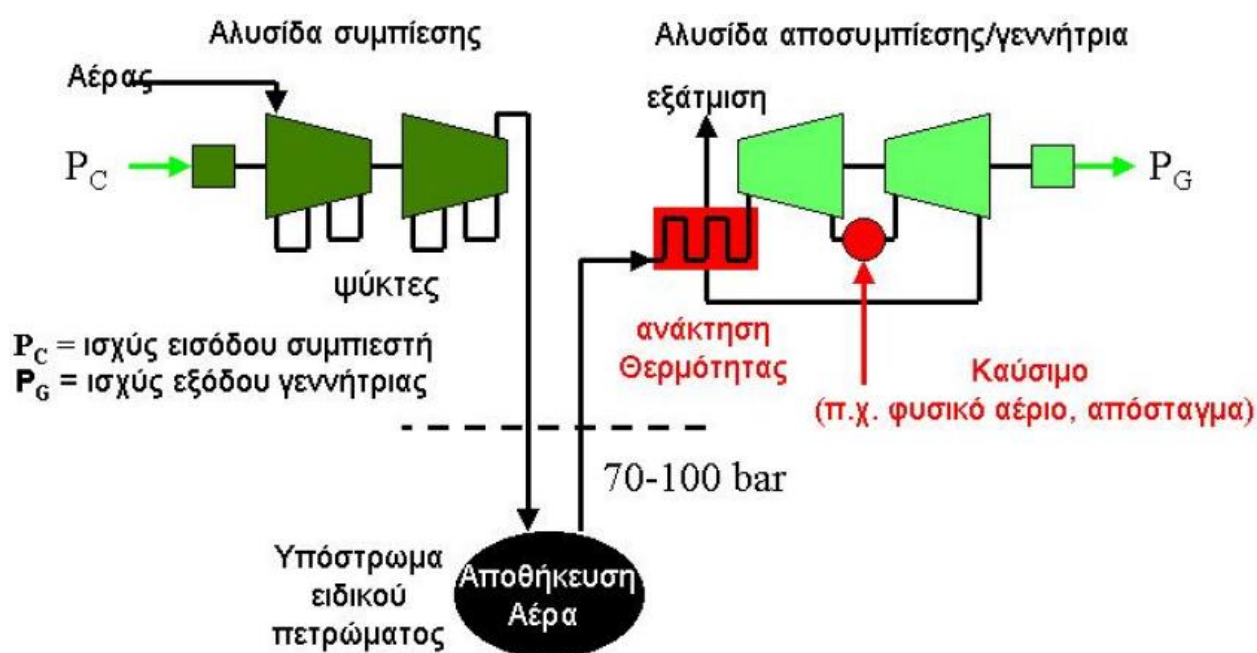
Η αντλησιοταμίευση χρησιμοποιεί τη δύναμη της βαρύτητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας νερό που έχει προηγουμένως αντληθεί από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη δεξαμενή. Το νερό αντλείται στην υψηλότερη δεξαμενή σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περιόδους υψηλής ζήτησης και

υψηλότερων τιμών, το νερό ακολουθεί αντίστροφη ροή, απελευθερώνεται από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη δεξαμενή για να κινήσει ένα στρόβιλο σ' ένα υδροηλεκτρικό σταθμό και να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο. Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με αντλησιοταμίευση εξαρτάται από το μέγεθος των δύο δεξαμενών της, ενώ η ποσότητα της παραγόμενης ισχύος συνδέεται με το μέγεθος του στρόβιλου [68,71,72]. Για παράδειγμα, μια εγκατάσταση με δύο δεξαμενές μεγέθους περίπου δύο ολυμπιακών πισινών και μια διαφορά ύψους 500 μέτρων μεταξύ τους, θα μπορούσε να παρέχει ισχύ 3 MW και να αποθηκεύει έως και 3.5 μεγαβατώρες (MWh) ηλεκτρικής ενέργειας [72].

Μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αντλησιοταμίευσης αποτελεί η ωριμότητά της, που οφείλεται στη μεγάλη χρονική διάρκεια εφαρμογής της (αρκετές δεκαετίες), με πρόσθετο χαρακτηριστικό τη μεγάλη διάρκεια ζωής των υποδομών της. Επιπλέον, είναι μία οικονομική τεχνολογία μεγάλης χωρητικότητας. Ως μειονεκτήματα μπορούν να θεωρηθούν το μεγάλο μέγεθος των έργων που απαιτούνται και, συνεπώς, η σημαντική παρέμβαση στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης και τα μεγάλα χρονικά περιθώρια ωρίμανσης και κατασκευής νέων έργων μεγάλης κλίμακας [71].

### 5.1.2 Αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα (CAES)

Η αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα (*Compressed Air Energy Storage, CAES*) είναι μία άλλη μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας, όπου η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση του αέρα μέσω ενός μηχανισμού κίνησης μεταβλητής ταχύτητας και την υπόγεια αποθήκευσή του, καθιστώντας μικρό το επιφανειακό αποτύπωμά της.

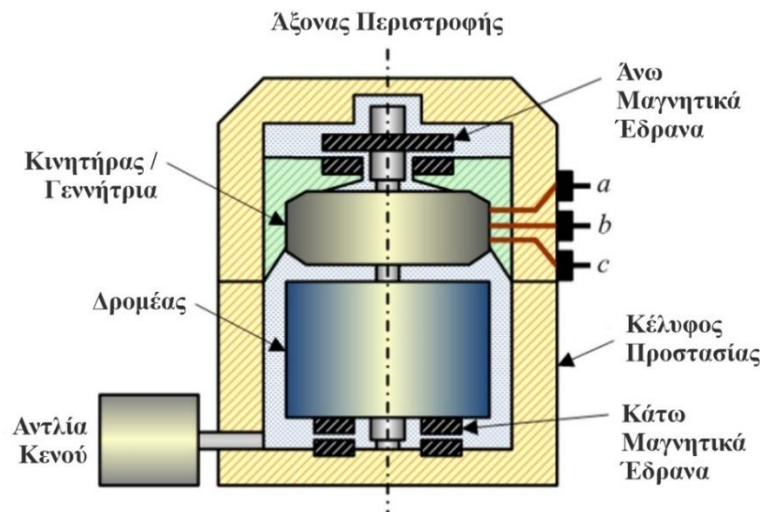


Σχήμα 5.3 – Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης CAES [19]

Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή, ο πεπιεσμένος αέρας θερμαίνεται με μια μικρή ποσότητα φυσικού αερίου (μη καθαρή πηγή ενέργειας) και στη συνέχεια καίγεται σε έναν αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στην Ευρώπη [14,68]. Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας CAES είναι το μικρό κόστος αποθήκευσης, η μεγάλη διάρκεια ζωής και η μεγάλη χρονική διάρκεια αποθήκευσης (μετά τους σταθμούς αντλησιοταμίευσης) [68].

### 5.1.3 Στρεφόμενοι σφόνδυλοι (Flywheels)

Σε αυτήν την τεχνολογία αποθήκευσης, η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου μετατρέπεται σε μηχανική μέσω ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης, τροφοδοτούμενο από μετατροπέα που φορτίζει ένα σφόνδυλο. Στη συνέχεια, η ενέργεια ανακτάται από την ίδια μονάδα, έχοντας τώρα ρόλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σφόνδυλος τοποθετούνται σε κελύφη κενού ή υδρογόνου. Για τη μείωση των απωλειών ενέργειας χρησιμοποιούνται ενεργά μαγνητικά έδρανα, ενώ για την αντοχή στην υψηλή φυγόκεντρο δύναμη εξαιτίας της μεγάλης αναπτυσσόμενης ταχύτητας, οι σφόνδυλοι κατασκευάζονται από χάλυβα ή συνθετικά υλικά. Η αποθήκευση ενέργειας σε σφονδύλους είναι οικονομικότερη συγκριτικά με την αποθήκευση σε μπαταρίες, παρουσιάζοντας όμως το μειονέκτημα της μηχανικής καταπόνησης του εξοπλισμού [14].



Σχήμα 5.4 – Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου [73]

Η ενέργεια που αποθηκεύεται στους σφονδύλους υπολογίζεται από τη σχέση [68,73]:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (5.1)$$

όπου:

**I** η συνολική αδράνεια του σφονδύλου και της κινητήριας μηχανής (σε Kg $m^2$ )

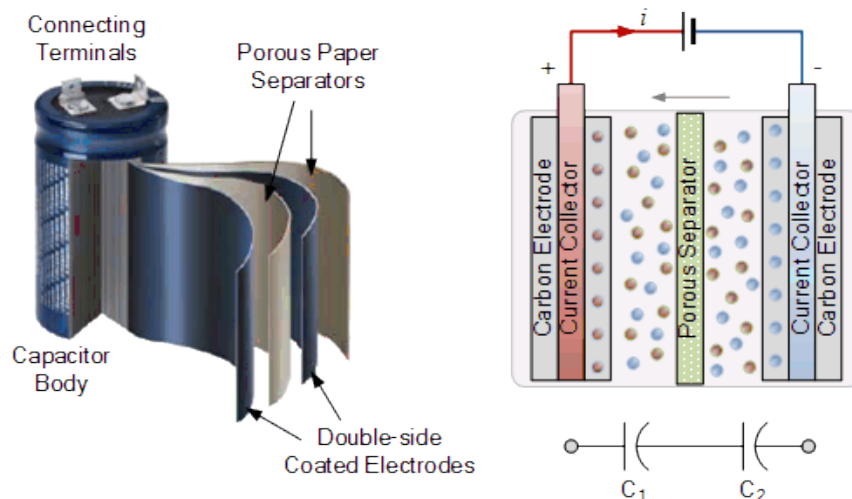
**$\omega$**  η περιστροφική ταχύτητα (σε rad/sec)



## 5.2 Ηλεκτρομαγνητικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

### 5.2.1 Υπερπυκνωτές (Ultracapacitors, UC)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας είναι παρόμοια με τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές (Electrolytic Capacitors, EC), με τη διαφορά ότι η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι έως και 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή των EC. Οι υπερπυκνωτές λειτουργούν σε χαμηλή ονομαστική τάση (συνήθως 2.5 V), με την τιμή της χωρητικότητάς τους να φτάνει σε υψηλές τιμές, έως και αρκετές χιλιάδες Farad. Οι μονάδες υπερπυκνωτών συνδέονται είτε σε σειρά για την επίτευξη υψηλότερης τάσης, είτε παράλληλα για υψηλότερες τιμές χωρητικότητας. Ωστόσο, η πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg) παρουσιάζει μικρότερη τιμή σε σύγκριση με αυτή μιας μπαταρίας. Η πυκνότητα ισχύος (W/kg) του υπερπυκνωτή είναι πολύ υψηλή, με συνέπεια, όταν μεγάλη ποσότητα ισχύος κυκλοφορήσει μέσα από αυτόν να μην προκαλεί φθορές. Επί του παρόντος, οι υπερπυκνωτές αποτελούν μία ακριβή τεχνολογία μαζικής αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο. [14].



Σχήμα 5.5 – Η κατασκευαστική δομή ενός υπερπυκνωτή [74]

Η ενέργεια που αποθηκεύεται σ' έναν πυκνωτή δίνεται από τη σχέση [74]:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \text{ [Joule]} \quad (5.2)$$

Η χωρητικότητα του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση [74]:

$$E = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{A}{d} \text{ [Farad]} \quad (5.3)$$

όπου:

C η χωρητικότητα του πυκνωτή (σε Farad)



- V** η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών του πυκνωτή
- $\epsilon$**  η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού
- $\epsilon_0$**  η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  στο S.I.)
- A** το εμβαδόν των πλακών του πυκνωτή
- d** η απόσταση μεταξύ των πλακών του πυκνωτή

### 5.2.2 Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (SMES)

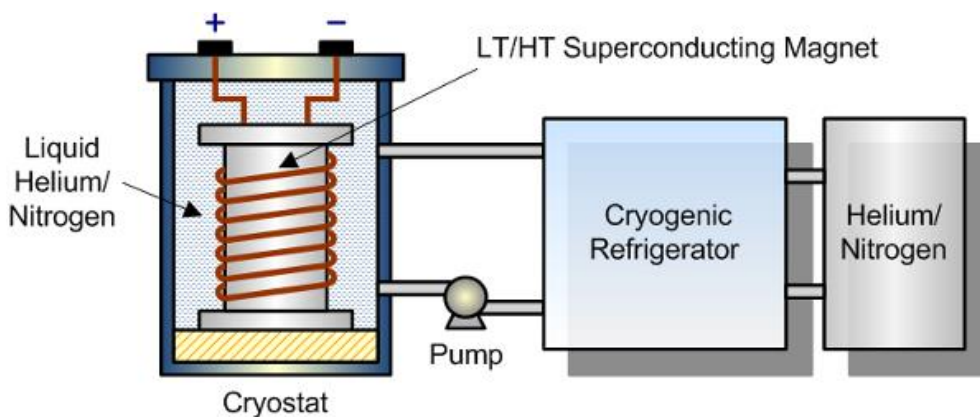
Στη μέθοδο *υπεραγώγιμης αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας (Super Conductive Magnetic Storage, SMES)*, η εναλλασσόμενη ενέργεια του δικτύου ανορθώνεται σε συνεχές ρεύμα φορτίζοντας ένα πηνίο SMES με σκοπό την αποθήκευση ενέργειας σε μαγνητική μορφή. Στη συνέχεια, η ενέργεια ανακτάται με την αντίστροφη διαδικασία. Το πηνίο ψύχεται κρυογονικά, έτσι ώστε η διαχεόμενη επαγωγική αντίδρασή του να τείνει προς το μηδέν, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα της επ' αορίστου αποθήκευσης της ενέργειας. Για την ψύξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε υγρό ήλιο (0 °K), είτε υλικό *υπεραγωγού υψηλής θερμοκρασίας (High-Temperature Superconductor, HTS)* σε υγρό άζωτο (77 °K). Η απόδοση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 95%, καθιστώντας την τεχνολογία από τις πιο αποδοτικές. Η μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας SMES χαρακτηρίζεται από το πολύ υψηλό κόστος της, λόγω των ενεργειακών απαιτήσεων της ψύξης και του υψηλού κόστους του υπεραγώγιμου τυλίγματος του πηνίου. Για τους λόγους αυτούς, η μέθοδος SMES χρησιμοποιείται κυρίως για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος [14,75].

Η μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύεται σ' ένα αγώγιμο πηνίο δίνεται από τη σχέση [76]:

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \tag{5.4}$$

όπου:

- L** η αυτεπαγωγή του πηνίου (σε Henry)
- I** η ένταση (σε Amperes)

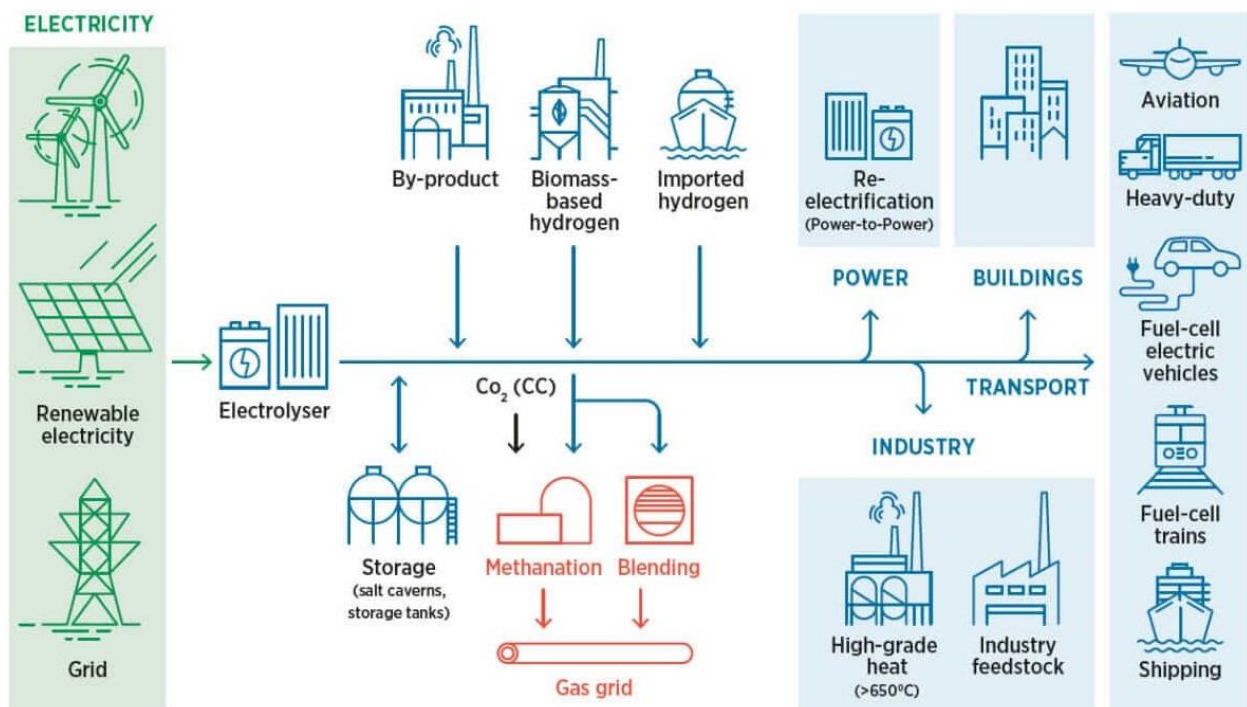


Σχήμα 5.6 – Η κατασκευαστική δομή ενός συστήματος SMES [76]

## 5.3 Ηλεκτροχημικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

### 5.3.1 Υδρογόνο (Hydrogen Energy Storage System, HESS)

Το υδρογόνο ( $H_2$ ) μπορεί να παραχθεί από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (πράσινο υδρογόνο) μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης και να αποθηκευτεί σε συμπιεσμένη ή υγροποιημένη μορφή αερίου ως καύσιμο υψηλής πυκνότητας, για μεγάλες χρονικές περιόδους. Μπορεί επίσης να παραχθεί από καύσιμα υδρογονανθράκων (ορυκτά καύσιμα) με υπόγεια δέσμευση και αποθήκευση του εκλυόμενου  $CO_2$ . Τα τελευταία χρόνια διερευνάται η μαζική παραγωγή υδρογόνου με χρήση βιομάζας και η υπόγεια αποθήκευσή του σε σπήλαια, θόλους (σπήλαια) αλατιού, καθώς και εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η συνολική ενεργειακή απόδοση του υδρογόνου κυμαίνεται μεταξύ 50 – 60%, χαμηλότερη από αυτήν των συστημάτων αποθήκευσης σε μπαταρίες ή συστημάτων αντλησιοταμίευσης (PHSS) [14,24].



Σχήμα 5.7 – Χρήση υδρογόνου ως Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας (ΣΑΕ) [77]

Οι τεχνολογίες πράσινου υδρογόνου μπορούν να βρουν πεδίο εφαρμογής στη βιομηχανία, τις μεταφορές, τα κτίρια, στην παραγωγή χημικών προϊόντων, αλλά και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποθηκεύοντας την πλεονάζουσα ενέργεια από τις ΑΠΕ και διοχετεύοντάς τη στο δίκτυο σε περιόδους υψηλής ζήτησης [14,24].

Τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούν και τα συστήματα *Power-to-Gas (P2G)* για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο είτε χρησιμοποιείται απευθείας, είτε μετατρέπεται σε συνθετικό αέριο, μεθάνιο ή υγραέριο (LPG). Για την παραγωγή μεθανίου χρησιμοποιείται και η

τεχνολογία αναστρέψιμης κυψέλης στερεού οξειδίου (*reversible Solid Oxide Cell, rSOC*). Το αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χημική πρώτη ύλη ή να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας συμβατικές γεννήτριες, όπως ατμοστρόβιλους. Η τεχνολογία P2G επιτρέπει την αποθήκευση και τη μεταφορά ενέργειας προερχόμενη από ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή συμπιεσμένου αερίου, χρησιμοποιώντας συχνά την υπάρχουσα υποδομή για μακροπρόθεσμη μεταφορά και αποθήκευση φυσικού αερίου. Το P2G θεωρείται πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την εποχιακή αποθήκευση ΑΠΕ [78].

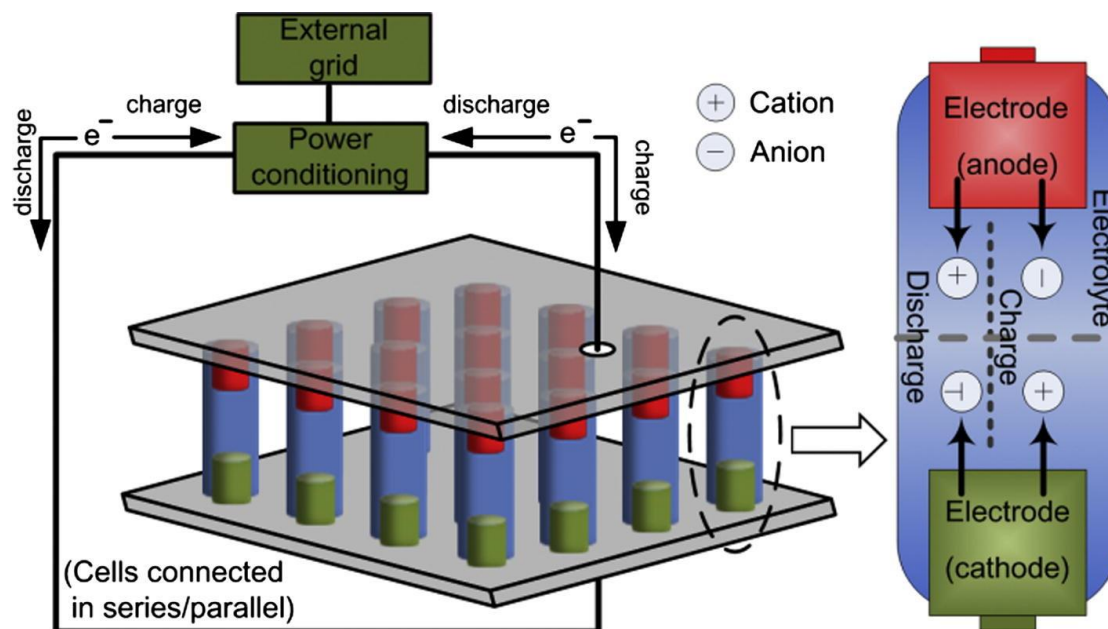
### 5.3.2 Συσσωρευτές (Μπαταρίες)

Οι *συσσωρευτές (μπαταρίες)* αποτελούν την πιο κοινή μορφή αποθήκευσης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτή τη μέθοδο, η ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα και αποθηκεύεται σε μπαταρία σε χημική μορφή. Στη συνέχεια, η αποθηκευμένη ενέργεια ανακτάται μέσω του ίδιου συστήματος μετατροπεία για την τροφοδοσία του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η αρχή λειτουργίας των μπαταριών στηρίζεται στη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο διαφορετικών στοιχείων (ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου), τα οποία εμπεριέχονται μέσα σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική πραγματοποιείται μέσω αντιδράσεων οξειδοαναγωγής. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στα ηλεκτροχημικά στοιχεία που συνθέτουν μία μπαταρία [14,24].

Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αποθήκευσης των μπαταριών αποτελούν η υψηλή απόδοση κύκλου ζωής τους (άνω του 90%), η πολύ μεγάλη ταχύτητα απόκρισης εξαιτίας απουσίας μηχανικών μερών και ο μικρός χρόνος κατασκευής τους. Επιπλέον, προσφέρουν ευρύ πλήθος υπηρεσιών, όπως επανεκκίνηση μετά από διακοπή (*black-start*), ρύθμιση συχνότητας (*frequency regulation*), εξομάλυνση αιχμών (*peak shaving*), αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και απόδοσή της σε περιόδους υψηλής ζήτησης (*load leveling*), τάχιση προσαρμογή της παροχής ενέργειας συναρτήσει των αυξομειώσεων της ζήτησης (*load following*). Βασικά μειονεκτήματα αποτελούν ο μικρός χρόνος ζωής σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, γεγονός που οφείλεται στη σταδιακή απώλεια μέρους της ονομαστικής τους ισχύος μετά από συγκεκριμένο αριθμό φορτίσεων – εκφορτίσεων. Παράλληλα, η πεπερασμένη ποσότητα πρώτων υλών για την κατασκευή τους και η μη ορθή απόρριψη και διαχείριση των μπαταριών μετά το πέρας της περιόδου ζωής τους έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για το λόγο αυτό καθίσταται απολύτως αναγκαία η ανάπτυξη και διάδοση της ανακύκλωσης, καθώς και της επαναχρησιμοποίησής τους [24].

Ιστορικά, η ευρύτατα χρησιμοποιημένη κατηγορία μπαταριών ήταν οι μπαταρίες μολύβδου–οξέος (γνωστές και ως κλειστού τύπου), στις μέρες μας όμως προτιμώνται οι *μπαταρίες ροής*, *NiCd*, *NaS*, *Li-ion* και *οξειδοαναγωγής βαναδίου* [14].

Οι μπαταρίες ροής (*flow batteries*) έχουν γρήγορη απόκριση και μπορεί να είναι πιο οικονομικές σε αποθήκευση μεγάλης κλίμακας, αλλά η εκτελούμενη χημική διαδικασία συνεχούς κυκλοφορίας του ηλεκτρολύτη με χρήση αντλιών την χαρακτηρίζουν ως πολύπλοκη τεχνολογία [14].



Σχήμα 5.8 – Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας αποθήκευσης συσσωρευτών [79]

Λεπτομερής επισκόπηση και συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας συσσωρευτών (μπαταριών) γίνονται στο **Κεφάλαιο 6** και **7**, αντίστοιχα.

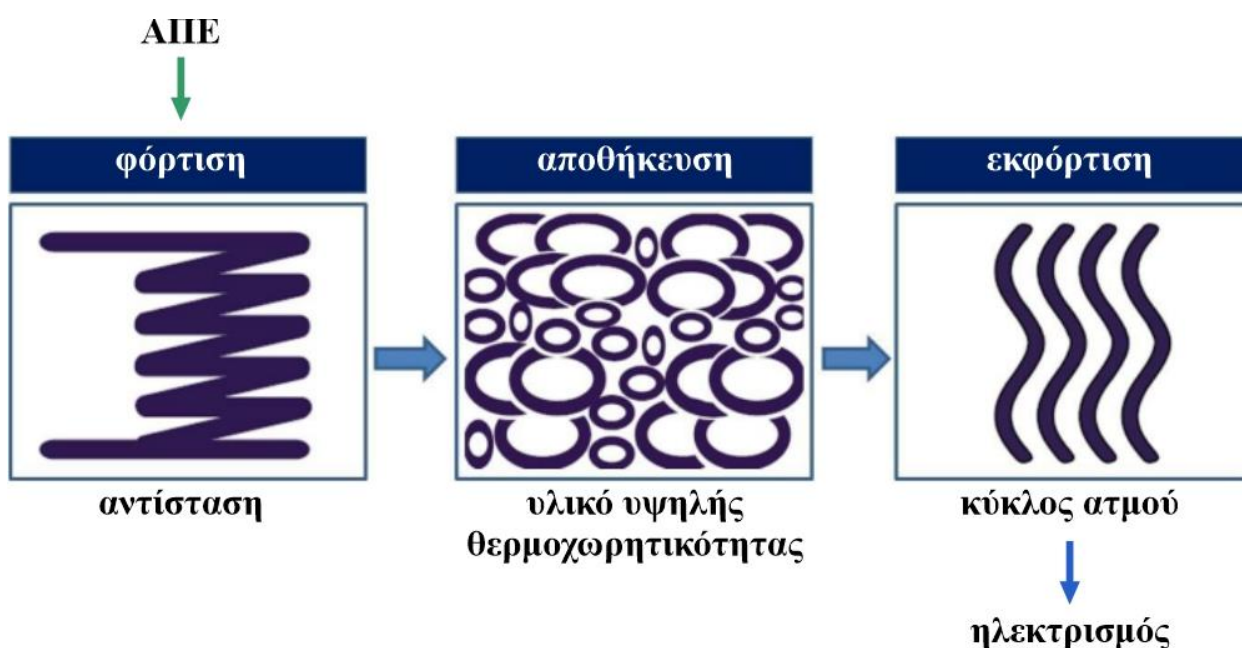
## 5.4 Τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης ενέργειας (TES)

Οι τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης ενέργειας (*Thermal Energy Storage, TES*) χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ηλιοθερμικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας τη δυνατότητα να καλύπτουν τη ζήτηση ενέργειας ακόμα και σε περιόδους μικρής ηλιοφάνειας. Βασική αρχή των τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από τις ΑΠΕ σε θερμική, με σκοπό τη δημιουργία ατμού που οδηγεί αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κύριες τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης είναι οι ακόλουθες [24]:

- *Τηγμένα άλατα*: Θεωρείται ώριμη τεχνολογία, η οποία λειτουργεί συνδυαστικά με ηλιοθερμικά συστήματα. Τα άλατα που χρησιμοποιούνται είναι το νιτρικό νάτριο και το νιτρικό κάλιο, τα οποία χαρακτηρίζονται για τα υψηλά ποσοστά θερμοχωρητικότητάς τους. Η τεχνολογία αυτή αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας σε συνεργασία με δύο δεξαμενές αλάτων, χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας. Η ηλεκτρική ενέργεια που

προέρχεται από τις ΑΠΕ μετατρέπεται σε θερμική υψηλής θερμοκρασίας (600 °C) με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας των αλάτων υγρής μορφής. Στη συνέχεια, η ροή των θερμών αλάτων περνά από τον εναλλάκτη όπου παράγεται ατμός για την κίνηση των ατμοστρόβιλων και την παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας, όπως γίνεται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και καταλήγει στη δεύτερη δεξαμενή.

- *Ηφαιστειακές πέτρες*: Η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια με αυτή των τηγμένων αλάτων, έχοντας ως διαφορά ότι η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται και αντλείται από ηφαιστειακές πέτρες αντί για άλατα για την παραγωγή ατμού και εν συνεχεία ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των ατμοστρόβιλων.



Σχήμα 5.9 – Αρχή λειτουργίας των θερμικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [24]

## 5.5 Άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

### 5.5.1 Vehicle-to-Grid (V2G)

Η *Vehicle-to-Grid (V2G)* είναι μία νέα μέθοδος μαζικής αποθήκευσης ενέργειας, που έχει ως βασική προϋπόθεση ένας μεγάλος αριθμός μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων να είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να πουλά ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της ζήτησης αιχμής και στη συνέχεια να φορτίζει την μπαταρία του σε ώρες εκτός αιχμής. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία V2G, κάθε ηλεκτρικό όχημα με τυπικό μέγεθος μπαταρίας 20 – 50 kWh μπορεί να μετατραπεί σε κατανομημένη συσκευή εξισορρόπησης φορτίου ή πηγή ενέργειας έκτακτης ανάγκης. Ωστόσο, οι κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης μπορούν να μειώσουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας [14].



## 5.6 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας

Πίνακας 5.1 – Λειτουργικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας [19]

Χαρακτηριστικά	Τεχνολογίες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας			
	Μπαταρίες (ροής, NaS)	Συστήματα αντλιοσταμείωσης (PHSS)	Συστήματα πεπιεσμένου αέρα (CAES)	Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου
<b>Αποθηκευτική ικανότητα</b>	μερικές 100 MWh (NaS)	500 – 8000 MWh	500 – 2500 MWh	μερικές 1000 MWh
<b>Χωρητικότητα ισχύος</b>	μερικές 100 MW	100 – 1000 MW	μερικές 100 MW	μερικές 100 MW
<b>Ενέργεια / Ισχύς</b>	εκτιμώμενη ισχύς για ώρες ή μέρες, πολύ υψηλή ισχύ για λεπτά	εκτιμώμενη ισχύς για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους	εκτιμώμενη ισχύς για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους	εκτιμώμενη για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους
<b>Ενεργειακή απόδοση</b>	70 – 90%	75 – 85%	80% (σύστημα Αλαμπάμα)	25 – 58%
<b>Διάρκεια ζωής</b>	15 έτη (NaS)	50 έτη	40 έτη	10 <sup>4</sup> ώρες
<b>Κόστος</b>	750 – 1000 €/kWh (δεκάδες MW, 2 hrs) 500 – 600 €/kWh (δεκάδες MW, 0.5 hr)	140 εκ. € έως > 680 εκ. € για ένα έργο 1000 MW	400 €/kWh (σύστημα Αλαμπάμα)	6000 – 30000 €/kWh
<b>Ανάπτυξη</b>	NaS: διαθέσιμες Zn-Br: αρχικό στάδιο εμπορευματοποίησης	διαθέσιμη	διαθέσιμη	έρευνα/υπό ανάπτυξη/εμπορικά διαθέσιμες
<b>Διάδοση</b>	περιορισμένη	διαδεδομένη – 90 GW παγκοσμίως	περιορισμένη, ένα στην Αμερική κι ένα στη Γερμανία	περιορισμένη
<b>Πλεονεκτήματα</b>	ανακύκλωση υλικών	υψηλή χωρητικότητα, σχετικά χαμηλό κόστος/χωρητικότητα μονάδας	υψηλή χωρητικότητα, σχετικά χαμηλό κόστος/χωρητικότητα μονάδας	αποθήκευση για μεγάλες περιόδους, ποικιλία τύπων κυψελών για διαφορετικές εφαρμογές
<b>Μειονεκτήματα</b>	υψηλό κόστος, ανακύκλωση νατρίου	σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις	προβληματική στην εύρεση τοποθεσιών για χρήση	συχνά απαιτούνται ακριβείς καταλύτες ή επεξεργασία
<b>Εφαρμογές</b>	–Στρεφόμενη εφεδρεία –Ενσωμάτωση σε ΑΠΕ –Ποιότητα ισχύος –Εξομάλυνση αιχμών –Εφαρμογές μεταφοράς και διανομής	–Εξισορρόπηση φορτίου –Στρεφόμενη εφεδρεία –Εφαρμογή παράλληλα με αιολικά πάρκα ή/και θερμικά συστήματα	–Στρεφόμενη εφεδρεία –Εξομάλυνση αιχμών –Εφαρμογές μεταφοράς και διανομής –Συνδυασμός με αιολικά πάρκα	–Ποιότητα ισχύος –Συνδυασμός με ανεμογεννήτριες
<b>Περιβαλλοντική επίπτωση</b>	μεσαία	υψηλή	μεσαία	μεσαία

Τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι αυτά που καθορίζουν το πεδίο χρήσης τους. Καθεμία από τις τεχνολογίες αυτές μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα στάδια του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλοντας στην *ευελιξία και σταθερότητα του δικτύου*, στην *εξασφάλιση ικανού αποθέματος ενέργειας* κ.λπ. [18].

Για μικρά και μεσαία συστήματα παραγωγής προτιμάται η τεχνολογία των μπαταριών μολύβδου–οξέος, χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των οποίων αποτελεί η σχέση κόστους/απόδοσης, καθώς και η αυτονομία τους. Οι μπαταρίες ιόντων–λιθίου (Li-ion) έχουν καλύτερες επιδόσεις, αλλά αποτελούν ακόμα μία δαπανηρή, πλην όμως πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Όπου απαιτείται μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας για μεγάλες χρονικές περιόδους, ιδανικότερες τεχνολογίες είναι αυτές της αντλησιοταμίευσης (PHSS), του πεπιεσμένου αέρα (CAES) και των μπαταριών ροής. Οι τεχνολογίες των στρεφόμενων σφονδύλων (flywheels) και των υπερπυκνωτών είναι οι πλέον κατάλληλες, με βάση τα κριτήρια της χωρητικότητας ενέργειας και των κύκλων φόρτισης, ενώ για ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας από διαλείπουσες πηγές, ενδείκνυται η χρήση των θερμικών τεχνολογιών αποθήκευσης για μεγάλο εύρους εφαρμογές και της υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (SMES) για εφαρμογές μικρού εύρους [18,19].

Στις ενότητες που ακολουθούν, γίνεται σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας με κριτήριο *τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, το κόστος επένδυσης και το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο*.

## 5.6.1 Σύγκριση με κριτήριο τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ΣΑΕ

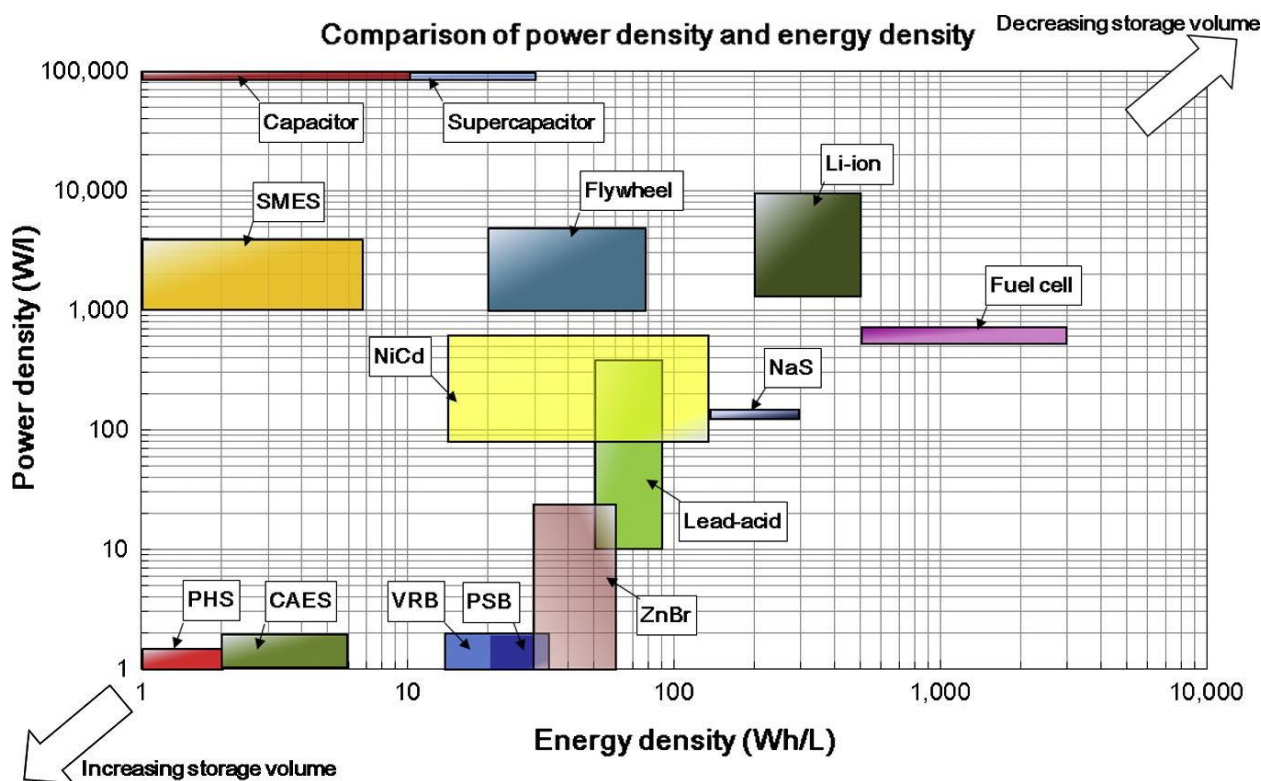
### 5.6.1.1 Πυκνότητα ισχύος (power density) και πυκνότητα ενέργειας (energy density)

Η **πυκνότητα ισχύος** εκφράζει την ταχύτητα με την οποία ένα ΣΑΕ συγκεκριμένης μάζας και όγκου παρέχει ενέργεια (μέγιστο ρεύμα) ή εναλλακτικά, εκφράζει το λόγο της αποδιδόμενης ισχύος του ΣΑΕ προς το βάρος του και μετριέται σε W/kg (για υπερπυκνωτές και στρεφόμενους σφονδύλους, ο λόγος ισχύος/βάρους μετριέται σε kW/kg). Η **πυκνότητα ενέργειας** είναι ένα μέγεθος αρκετά διαφορετικό, το οποίο δείχνει το ποσό της ενέργειας που δύναται να αποθηκευτεί σ' ένα ΣΑΕ ανά μονάδα μάζας και όγκου και μετριέται σε Wh/kg [68].

Στο **Σχήμα 5.10** γίνεται σύγκριση μεταξύ της πυκνότητας ισχύος και της ενεργειακής πυκνότητας διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Για μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας, όσο μεγαλύτερες είναι οι πυκνότητες ισχύος και ενέργειας, τόσο μικρότερος θα είναι ο όγκος του απαιτούμενου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Οι εξαιρετικά συμπαγείς τεχνολογίες, οι οποίες είναι κατάλληλες για εφαρμογές περιορισμένου όγκου, εμφανίζονται στην επάνω δεξιά γωνία, ενώ τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας των οποίων η κατασκευή τους



καταλαμβάνει μεγάλο όγκο, εμφανίζονται στην κάτω αριστερή γωνία. Μπορεί να φανεί ότι οι περισσότεροι τύποι μπαταριών, οι περιστρεφόμενοι σφόνδυλοι και οι κυψέλες καυσίμου εμφανίζουν σχετικά μέτρια πυκνότητα ισχύος και πυκνότητα ενέργειας [79].



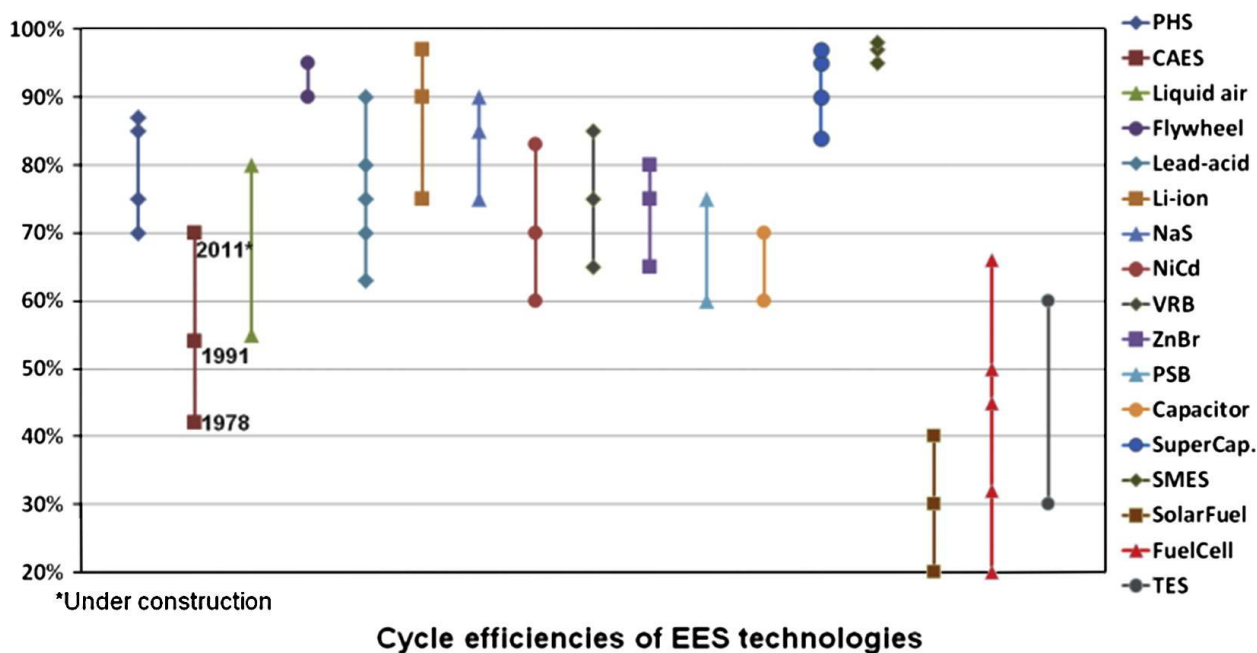
Σχήμα 5.10 – Σύγκριση πυκνότητας ισχύος και πυκνότητας ενέργειας των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79]

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης (PHSS) και αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (CAES), χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθερά συστήματα αποθήκευσης και απαιτούν μεγάλες δεξαμενές για εφαρμογές κλίμακας δικτύου, λόγω των χαμηλών πυκνοτήτων ισχύος και ενέργειας. Οι υπερπυκνωτές, συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτροχημικών πυκνωτών, εμφανίζουν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος, αλλά χαμηλή πυκνότητα ενέργειας. Οι πυκνότητες των μπαταριών ροής είναι συνήθως χαμηλότερες από αυτές των συμβατικών μπαταριών. Αντιθέτως, η μπαταρία ιόντων-λιθίου έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και πυκνότητα ισχύος, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη τεχνολογία για ευρεία χρήση σε φορητές συσκευές και, ταυτόχρονα, αναμένεται μελλοντικά να προσφέρει εξαιρετικές δυνατότητες στον τομέα των μεταφορών και σε άλλες εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας μικρής κλίμακας [79].

### 5.6.1.2 Διάρκεια ζωής (lifetime cycles)

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την επιλογή μίας τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι η *διάρκεια ζωής*. Ο παράγοντας αυτός επηρεάζει το συνολικό κόστος επένδυσης, καθώς προτιμώνται

συστήματα με μεγάλη διάρκεια ζωής, ακόμη κι αν τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών είναι ίσης αξίας. Αντιθέτως, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μικρή διάρκεια ζωής αυξάνουν το κόστος συντήρησης και πιθανής αντικατάστασης [18].



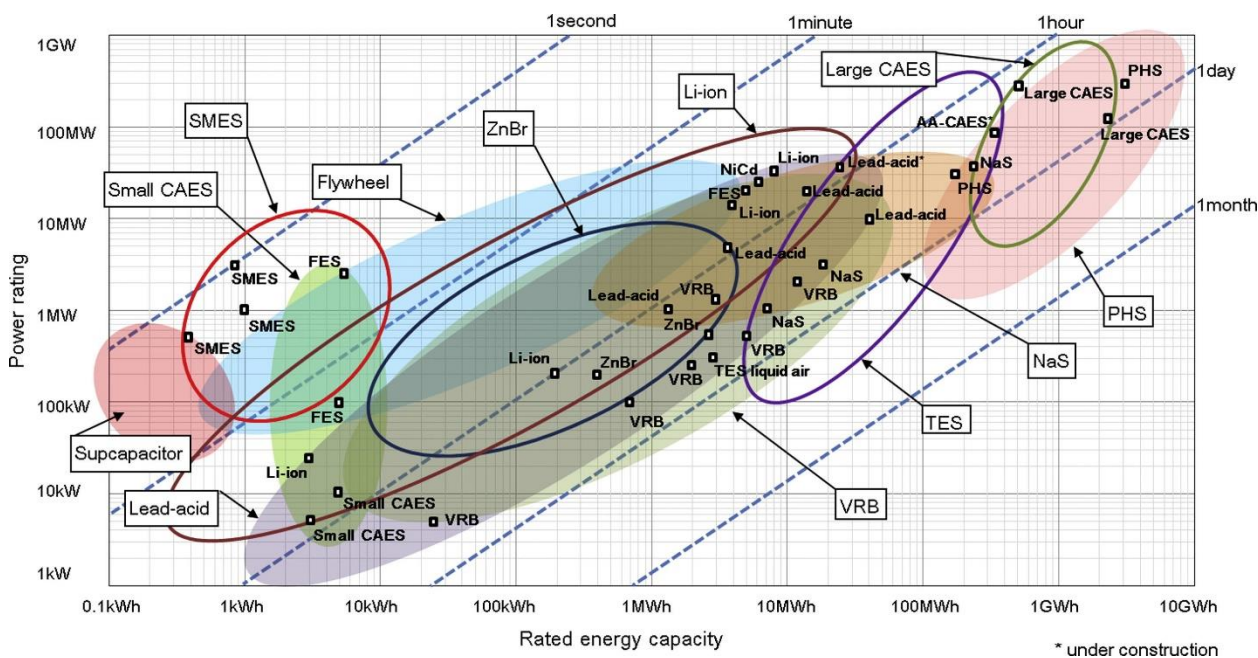
Σχήμα 5.11 – Σύγκριση κύκλου ζωής και απόδοσης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79]

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11, τα συστήματα μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των PHSS, CAES και σφονδύλων, έχουν συνήθως μεγάλο χρόνο ζωής, καθώς εξαρτώνται κυρίως από τα μηχανικά τους στοιχεία. Οι χρόνοι ζωής για ηλεκτρομαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως SMES, πυκνωτές και υπερπυκνωτές, είναι συνήθως υψηλότεροι από των συστημάτων μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας. Ο χρόνος ζωής των συμβατικών μπαταριών δεν είναι τόσο υψηλός συγκριτικά με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, κυρίως λόγω της χημικής φθοράς που υφίστανται κατά το χρόνο λειτουργίας [79].

### 5.6.1.3 Χωρητικότητα αποθήκευσης/διάρκεια εκφόρτισης (storage capacity/discharge time duration)

Η έννοια της χωρητικότητας αποθήκευσης αναφέρεται στη συνολική διαθέσιμη ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη μονάδα αποθήκευσης και μετριέται σε βατώρες (Wh). Εξαιτίας του ατελούς χαρακτήρα της εκφόρτισης, η χωρητικότητα διαφέρει από την ανακτώμενη ενέργεια των μονάδων αποθήκευσης. Για εμπορική χρήση, το μεγάλο μέγεθος της χωρητικότητας των συστημάτων αποθήκευσης αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες επιλογής, συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου της αυτοεκφόρτισης, κατά το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο αυτοεκφόρτισης ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για τον καθορισμό της σχετικής

κατάλληλης διάρκειας αποθήκευσης [18,79]. Στο **Σχήμα 5.12** εικονίζονται τα συγκριτικά δεδομένα της ενεργειακής ισχύος και ενεργειακής χωρητικότητας σε συνδυασμό με την ονομαστική διάρκεια του χρόνου εκφόρτισης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας (δευτερόλεπτα έως μήνες).



**Σχήμα 5.12** – Σύγκριση ονομαστικής ισχύος, χωρητικότητας ενέργειας και διάρκειας του χρόνου εκφόρτισης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79]

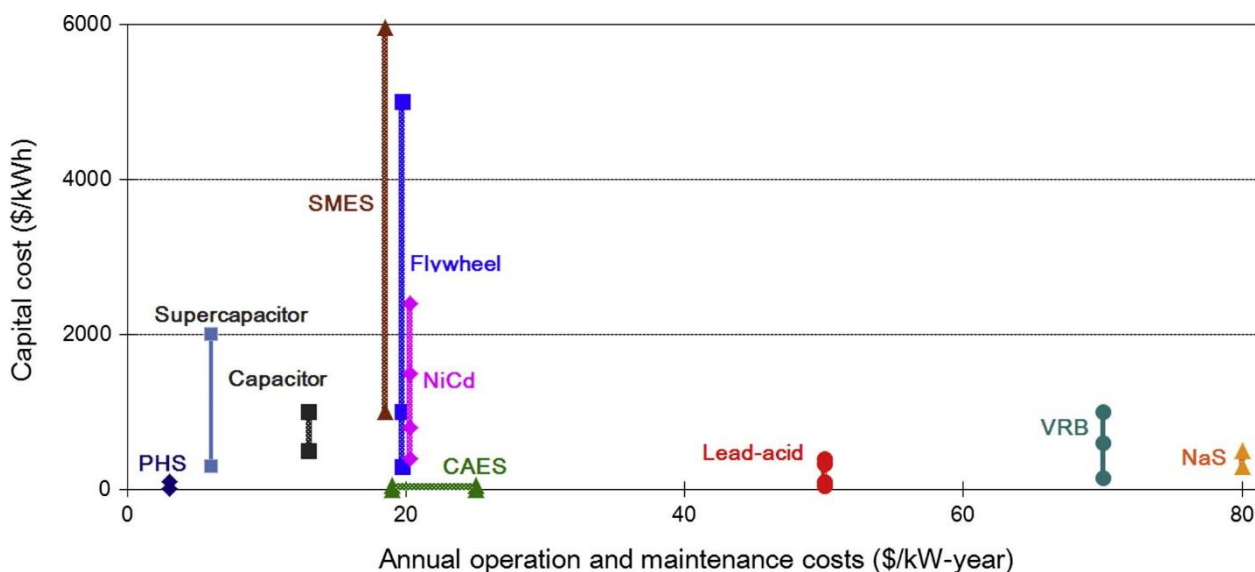
Παρατηρώντας το **Σχήμα 5.12**, διαπιστώνουμε ότι οι τεχνολογίες αποθήκευσης PHSS και CAES εμφανίζουν μεγάλες τιμές χωρητικότητας αποθήκευσης, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για χρήσεις ευρείας κλίμακας δικτύου [18,79].

### 5.6.2 Σύγκριση των ΣΑΕ με κριτήριο το κόστος επένδυσης

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (EES) έχουν άμεσο υποστηρικτικό ρόλο για τη συνεχή προσπάθεια για αύξηση της σταθερότητας και αποδοτικότητας των συστημάτων παραγωγής ενέργειας και της διαρκούς προσπάθειας ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στα συστήματα αυτά. Το ποσοστό της διεισδυτικότητας των EES στα συστήματα παραγωγής ενέργειας είναι ανάλογο με την αύξηση της απόδοσής τους [18].

Μια ολοκληρωμένη οικονομική ανάλυση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να λαμβάνει υπόψη το κόστος κεφαλαίου, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και τον αντίκτυπο της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. Παράδειγμα αποτελεί η τεχνολογία των μπαταριών μολύβδου–οξέος, της οποίας αν και το κόστος κεφαλαίου είναι σχετικά χαμηλό, ενδεχομένως να μην είναι κατάλληλη επιλογή για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, λόγω του

σχετικά υψηλούς κόστους λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και της μικρής διάρκειας ζωής της. Η συνεχής προσπάθεια έρευνας & ανάπτυξης, με τις συνεπακόλουθες τεχνολογικές ανακαλύψεις, συμβάλλουν στη μείωση του κόστους ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας [79].



**Σχήμα 5.13** – Σύγκριση κόστους κεφαλαίου και ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [79]

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.13**, μεταξύ των ώριμων και εμπορικά εκμεταλλεύσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, τα PHS και CAES έχουν το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος κεφαλαίου σε σύγκριση με όλες τις άλλες τεχνολογίες. Υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης εμφανίζουν τα συστήματα αποθήκευσης των μπαταριών θεικού νατρίου (NaS), και μολύβδου–οξέος (Lead–Acid). Οι τεχνολογίες SMES και των σφονδύλων είναι κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ισχύος και μικρής κλίμακας, καθώς είναι οικονομικότερες ως προς το κόστος κεφαλαίου ισχύος, αλλά πιο δαπανηρές ως προς το κόστος ενεργειακού κεφαλαίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος κεφαλαίου ενός συγκεκριμένου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ποικίλλει ως προς το μέγεθός του, την τοποθεσία της μονάδας/εγκατάστασης και το χρονοδιάγραμμα κατασκευής [79].

### 5.6.3 Σύγκριση με κριτήριο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΣΑΕ

Η ανάγκη για μεγάλες εκτάσεις προς εγκατάσταση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, η συμβολή στην αλλαγή του κλίματος, η χημική ρύπανση εξαιτίας των συστατικών των μπαταριών κατά τη χρήση τους, η δημιουργία περιβαλλοντικά επιβλαβών υποπροϊόντων ως αποτέλεσμα χημικών διαδικασιών κ.λπ., αποτελούν κάποιες από τις αρνητικές επιπτώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [18].

Στον **Πίνακα 5.2** συνοψίζονται κάποιες από τις εκτιμώμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, δίνοντας έμφαση στις εκλυόμενες εκπομπές αερίων που προκύπτουν με χρήση συστημάτων μπαταριών [18].

**Πίνακας 5.2** – Εκτιμώμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [18]

Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας	Κατασκευαστικές Επιπτώσεις	Λειτουργικές Επιπτώσεις			Επιπτώσεις Διάθεσης
		Αέρας	Νερό	Έδαφος	
CAES	Σχετικά χαμηλές	Όχι σημαντικές εκτός από τους στροβίλους καύσης	Όχι σημαντικές	Όχι σημαντικές	Σχετικά χαμηλές
Σφόνδυλοι	Σχετικά χαμηλές	Όχι σημαντικές	Όχι σημαντικές	Όχι σημαντικές	Σχετικά χαμηλές
Κυψέλες Καυσίμου	Σχετικά χαμηλές (εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και υλικά)	Όχι σημαντικές	Πιθανότατα δεν είναι σημαντικές, το νερό εκκένωσης μπορεί να έχει χαμηλό pH	Όχι σημαντικές	Σχετικά χαμηλές (εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και υλικά)
Μπαταρίες Μολύβδου–Οξέος	Πιθανές σημαντικές εκπομπές μολύβδου και SO <sub>2</sub>	Όχι σημαντικές	Όχι σημαντικές	Όχι σημαντικές	Μόλυνση από ηλεκτρολύτη μολύβδου και θειικού οξέος προκαλούν σοβαρή ανησυχία
PHSS	Σχετικά χαμηλές	Όχι σημαντικές όταν αντλείται ενέργεια από καθαρές ανανεώσιμες πηγές	Όχι σημαντικές	Όχι σημαντικές	Σχετικά χαμηλές



# Κεφάλαιο 6

## Ηλεκτροχημική Αποθήκευση Ενέργειας – Συσσωρευτές (Μπαταρίες)

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα Συστήματα ή Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ESS), με σημαντικές εφαρμογές στη βιομηχανία (περιλαμβάνοντας την ποιότητα ισχύος, τη διαχείριση ενέργειας, τα συστήματα τροφοδοσίας και μεταφοράς) και την καθημερινή ζωή. Ανάλογα με την ικανότητά της ηλεκτρικής επαναφόρτισής τους, χαρακτηρίζονται σε πρωτογενείς (μη επαναφορτιζόμενες) και δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενες) [68,79,88].

Ένα Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας Συσσωρευτών ή Μπαταρίας (BESS) μετατρέπει την ηλεκτρική σε χημική ενέργεια κατά τη φόρτιση και εκτελεί την ακριβώς αντίθετη διαδικασία κατά την εκφόρτιση. Αποτελείται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα, τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με την επιθυμητή τάση μέσω ενός συνόλου ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, τις αντιδράσεις αναγωγής και οξείδωσης (κοινώς αποκαλούμενες αντιδράσεις οξειδοαναγωγής). Μια ηλεκτροχημική αντίδραση αναγωγής είναι αυτή που επιτρέπει στο εμπλεκόμενο συστατικό να αποκτήσει ηλεκτρόνια, ενώ μια αντίδραση οξείδωσης επιτρέπει στο συστατικό να απωλέσει ηλεκτρόνια. Οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής παράγουν νέες ενεργές, ηλεκτροχημικά δραστικές ουσίες με μη ουδέτερο ηλεκτρικό φορτίο, τα *ιόντα*. Σε μεγάλη κλίμακα, η κατασκευή των συστημάτων BESS υλοποιείται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (συνήθως εντός 12 μηνών) [79,88]. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε δημοφιλείς τύπους μπαταριών [79].

**Πίνακας 6.1** – Χημικές αντιδράσεις και τάσεις μονάδας βασικών τύπων μπαταριών που διατίθενται στα Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ESS) [79,88,89,90]

Τύπος μπαταρίας	Χημική αντίδραση Ανόδου, Καθόδου και Συνολική (κατά σειρά)	Τάση μονάδας
Μολύβδου–οξέος (PbO <sub>2</sub> )	$\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightleftharpoons \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$ $\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	2.0 V



Ιόντων–Λιθίου (Li-ion)	$\text{LiC} \rightleftharpoons \text{Li}^+ + \text{e}^-$ $\text{Li}^+ + \text{e}^- + \text{CoO}_2 \rightleftharpoons \text{LiCoO}_2$ $\text{LiC} + \text{CoO}_2 \rightleftharpoons \text{LiCoO}_2$	3.7 V
Θείου–Νατρίου (NaS)	$2\text{Na} \rightleftharpoons 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$ $x\text{S} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{S}_x^{2-}$ $2\text{Na} + x\text{S} \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{S}_x$	~2.08 V
Νικελίου–Καδμίου (NiCd)	$\text{Cd} + 2\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$ $2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$ $2\text{NiOOH} + \text{Cd} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{Cd}(\text{OH})_2$	1.0 – 1.3 V
Νικελίου–Υδριδίου μετάλλου (NiMH)	$\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{H}_2 + \text{OH}^-$ $\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$ $\text{NiOOH} + \text{MH} \rightleftharpoons \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{M}$	1.0 – 1.3 V
Χλωριούχου Νατρίου Νικελίου (NaNiCl)	$2\text{Na} \rightleftharpoons 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$ $\text{NiCl}_2 + 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni} + 2\text{NaCl}$ $\text{NiCl}_2 + 2\text{Na} \rightleftharpoons \text{Ni} + 2\text{NaCl}$	~2.58 V
Οξειδοαναγωγής Βαναδίου (Μπαταρίες Ροής)	$\text{V}^{2+} \rightleftharpoons \text{V}^{3+} + \text{e}^-$ $\text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{V}^{2+} + \text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{V}^{3+} + \text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	> 1.6 V
Βρωμιούχου Ψευδαργύρου (Μπαταρίες Ροής)	$\text{Zn}_{(s)} \rightleftharpoons \text{Zn}_{(aq)}^{2+} + 2\text{e}^-$ $\text{Br}_{2(aq)} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Br}_{(aq)}^- + 2\text{e}^-$ $\text{Zn}_{(s)} + \text{Br}_{2(aq)} \rightleftharpoons 2\text{Br}_{(aq)}^- + \text{Zn}_{(aq)}^{2+}$	1.8 V
Βρωμιούχου Πολυσουλφιδίου (Μπαταρίες Ροής)	$2\text{Na}_2\text{S}_2 \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{S}_4 + 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$ $\text{NaBr}_3 + 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{NaBr}$ $2\text{Na}_2\text{S}_2 + \text{NaBr}_3 \rightleftharpoons 3\text{NaBr} + \text{Na}_2\text{S}_2$	~1.5 V

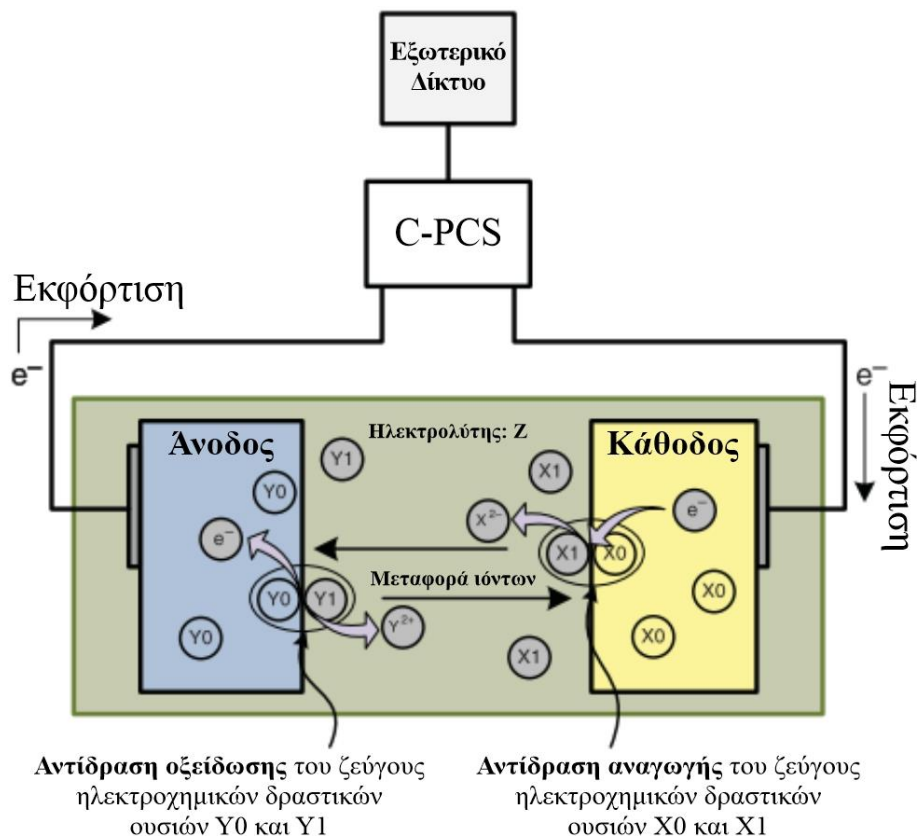
Το βασικότερο στοιχείο μίας μπαταρίας είναι το *γαλβανικό κελί*, μία συσκευή που παρέχει τις κατάλληλες εκείνες συνθήκες, ώστε να συμβούν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, δημιουργώντας έτσι μια ροή ιόντων και ηλεκτρονίων μεταξύ των περιοχών στις οποίες λαμβάνουν χώρα. Η ροή ηλεκτρονίων και ιόντων υφίσταται εφόσον υπάρχει ενεργειακή διαφορά μεταξύ των ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών που εμπλέκονται στις αντιδράσεις αναγωγής και οξείδωσης. Για να ενεργοποιηθεί αυτή η ροή ιόντων και ηλεκτρονίων, το κελί της μπαταρίας έχει δύο κυκλώματα,

ένα εξωτερικό κι ένα εσωτερικό. Το εσωτερικό κύκλωμα αποτελείται από το ίδιο το κελί της μπαταρίας, παρέχοντας τη διαδρομή μέσω της οποίας ρέουν τα προκύπτοντα ιόντα. Το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει με την προσθήκη του εξωτερικού κυκλώματος, παρέχοντας έτσι τη διαδρομή μέσω της οποίας μπορούν να ρέουν τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής. Η εξωτερική διαδρομή παρέχεται από το εξωτερικό σύστημα (φορτίο ή πηγή ενέργειας) στο οποίο είναι συνδεδεμένη η μπαταρία. Το κελί της μπαταρίας απαρτίζεται από τα ακόλουθα στοιχεία [07,88]:

- **Τα ηλεκτρόδια.** Κατά την εκφόρτιση, οι αντιδράσεις οξείδωσης πραγματοποιούνται στην άνοδο της μπαταρίας ή το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο συλλαμβάνει τα ηλεκτρόνια που χάνονται από το συστατικό. Από την άλλη, οι αντιδράσεις αναγωγής πραγματοποιούνται στην κάθοδο της μπαταρίας ή το θετικό ηλεκτρόδιο, το οποίο παρέχει τα ηλεκτρόνια που αποκτώνται από το μειωμένο συστατικό.
- **Δύο ζεύγη ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών.** Το ένα ζεύγος βρίσκεται στην περιοχή της ανόδου, ενώ το άλλο στην περιοχή της καθόδου. Τα υλικά που συνθέτουν το ηλεκτρόδιο της ανόδου και το συστατικό ή η ουσία που το περιβάλλει πρέπει να αντιδράσουν, προκαλώντας μια αντίδραση οξείδωσης (κατά την εκφόρτιση), προσφέροντας ηλεκτρόνια. Αντίστοιχα, η ηλεκτροχημική αλληλεπίδραση μεταξύ των υλικών που περιλαμβάνουν το ηλεκτρόδιο της καθόδου και της ουσίας ή του συστατικού που το περιβάλλει δίνει μια αντίδραση αναγωγής. Τα παραπάνω ορίζουν τα δύο ζεύγη ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών.
- **Τον ηλεκτρολύτη.** Κατά τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, εκτός από ηλεκτρόνια παράγονται και ιόντα (σωματίδια με μη ουδέτερο ηλεκτρικό φορτίο). Για να εξασφαλιστεί η ισορροπία του φορτίου μεταξύ των ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών της ανόδου και της καθόδου, γίνεται ανταλλαγή (μεταφορά) ιόντων, διαδικασία η οποία ενεργοποιείται από τον ηλεκτρολύτη, μία ηλεκτρομονωτική ουσία στερεάς ή υγρής κατάστασης.
- **Το διαχωριστή.** Μεταξύ των ηλεκτροχημικά δραστικών ουσιών στις περιοχές της ανόδου και της καθόδου υπάρχει διαφορά δυναμικού. Σκοπός του διαχωριστή είναι η εξασφάλιση αποφυγής της άμεσης επαφής των δραστικών ουσιών, αποτρέποντας τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα της μπαταρίας. Ανάλογα με τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας, η διαφορά δυναμικού (τάση κελιού ή τάση ανοικτού κυκλώματος) μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να είναι από 1 έως 4 V.
- **Το δοχείο.** Οι μπαταρίες αποτελούνται από έναν αριθμό κελιών, συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα για την επίτευξη των επιθυμητών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. Όλα τα κελιά συσκευάζονται εντός του δοχείου, σε ένα ελεγχόμενο και απομονωμένο περιβάλλον, διαθέτοντας ένα σετ ακροδεκτών.

## 6.1 Αρχή λειτουργίας των μπαταριών

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και σύμφωνα με το Σχήμα 6.1, το κελί της μπαταρίας αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, αποτελούμενα από δύο υλικά, τα  $Y0$  (για την άνοδο) και  $X0$  (για την κάθοδο). Και τα δύο περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη  $Z$ . Η άνοδος (αρνητικό ηλεκτρόδιο) περιβάλλεται από την ουσία ή το συστατικό  $Y1$  και η κάθοδος περιβάλλεται από το στοιχείο  $X1$ . Τα υλικά  $X0-X1$  και  $Y0-Y1$  ορίζουν δύο ζεύγη ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών. Η διαφορά στην ενεργειακή κατάσταση των δύο ζευγών των ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών μεταφράζεται σε διαφορά δυναμικού.



Σχήμα 6.1 – Η αρχή λειτουργίας της μπαταρίας [88]

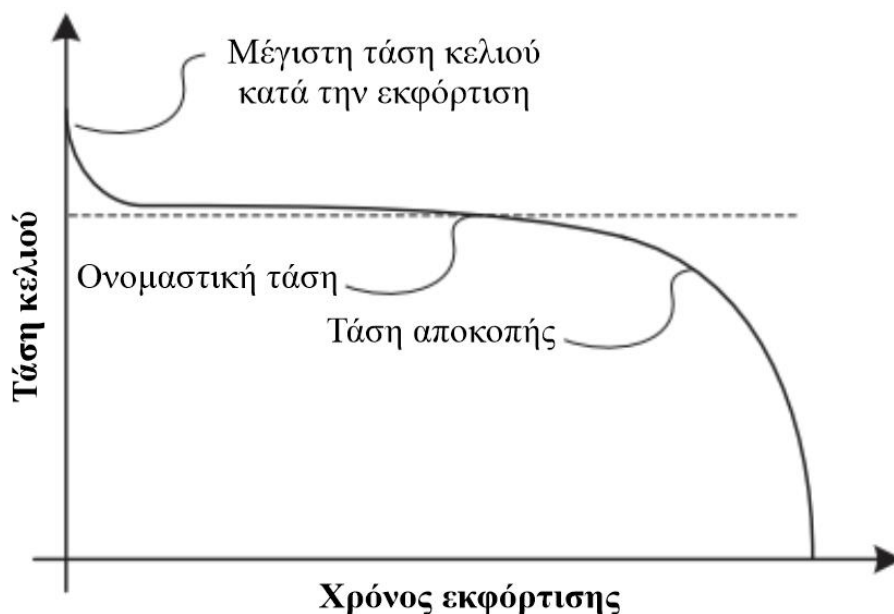
Το κύκλωμα κλείνει με την προσθήκη εξωτερικού φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στη συνέχεια, η μπαταρία αποφορτίζεται, σηματοδοτώντας έτσι την πραγματοποίηση αντιδράσεων οξειδοαναγωγής, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φορτίου. Τα ηλεκτρόνια ρέουν από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (την άνοδο, περιοχή με τη μέγιστη ενεργειακή κατάσταση) στο θετικό (την κάθοδο, περιοχή με την ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση). Ως αποτέλεσμα της αντίδρασης οξειδωσης μεταξύ των ουσιών  $Y0$  και  $Y1$  έχουμε την παραγωγή των ηλεκτρονίων  $e^-$  και των θετικών ιόντων  $Y^{2+}$ . Τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο της καθόδου, δίνοντας μια αντίδραση αναγωγής μεταξύ των ουσιών  $X0$  και  $X1$ , η οποία με τη σειρά της οδηγεί στην

παραγωγή του ιόντος  $X^{2-}$ . Το εσωτερικό κύκλωμα επιτρέπει την ιοντική ανταλλαγή, τα ιόντα της οποίας εξαρτώνται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται και είναι συνήθως αυτά που παρουσιάζουν την υψηλότερη κινητικότητα. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, καθένα από τα ζεύγη των ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών εξασθενεί, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων μπορεί να αποκατασταθεί με την αντιστροφή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή με την εφαρμογή μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας για τη φόρτιση της μπαταρίας [88].

## 6.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών

### 6.2.1 Τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{OC}$ )

Η προκύπτουσα από τις χημικές αντιδράσεις διαφορά δυναμικού των δύο ζευγών των ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών, που μετρείται στην κατάσταση πλήρους φόρτισης του κελιού όταν αποσυνδεθεί από οποιοδήποτε κύκλωμα, ονομάζεται *τάση ανοικτού κυκλώματος*  $V_{OC}$ . Η τάση αυτή καθορίζει την *ελεύθερη ενέργεια αντίδρασης (Gibbs)* των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων στο κελί της μπαταρίας.



Σχήμα 6.2 – Τυπικό προφίλ τάσης-χρόνου εκφόρτισης του κελιού μιας μπαταρίας [88]

Η τάση ανοικτού κυκλώματος μπορεί να μετρηθεί με τη χρήση βολτομέτρου και αντιστοιχεί σε συνθήκες ισορροπίας. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να μετρηθεί αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας φόρτισης της μπαταρίας, αλλά μόνο λίγες ώρες αργότερα, επιτρέποντας έτσι στην μπαταρία να «χαλαρώσει» μετά τη διαδικασία (ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας και τη μέθοδο φόρτισης). Μία άλλη, στατιστική μέθοδος για την εκτίμηση της τάσης

ανοικτού κυκλώματος βασίζεται στην αξιολόγηση ικανού αριθμού καμπυλών τάσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης χρησιμοποιώντας μια φθίνουσα ακολουθία ρευμάτων<sup>6</sup>.

Είναι πολύ σημαντικό να διαφοροποιηθεί η έννοια της τάσης ανοικτού κυκλώματος από την τάση που μετριέται στο κελί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκφόρτισης, όπως συνήθως παρουσιάζεται στα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστών. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.2**, τέτοιου είδους γραφικές παραστάσεις δείχνουν το προφίλ τάσης κατά την εκφόρτιση σε καθορισμένες τιμές ρεύματος [88].

### 6.2.2 Τάση αποκοπής (cut-off voltage)

Εξαιτίας της εσωτερικής αντίστασης του κελιού και του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μέσα από αυτό, εμφανίζεται πτώση τάσης κι επομένως δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μετρήσιμη τάση του κελιού κατά την αρχή της διαδικασίας εκφόρτισης (υπό συνθήκες πλήρους φόρτισης) ως ίση με την τάση ανοικτού κυκλώματος. Με την εκφόρτιση του κελιού, η τάση διασπάται από τη μέγιστη τιμή (σε συνθήκες πλήρους φόρτισης), στη λεγόμενη *τάση αποκοπής*, η οποία ορίζει το εύρος της χρησιμοποιήσιμης τάσης του κελιού. Από αυτό το σημείο και μετά, η τάση μειώνεται δραματικά, περιορίζοντας έντονα τη χρηστικότητα της μπαταρίας.

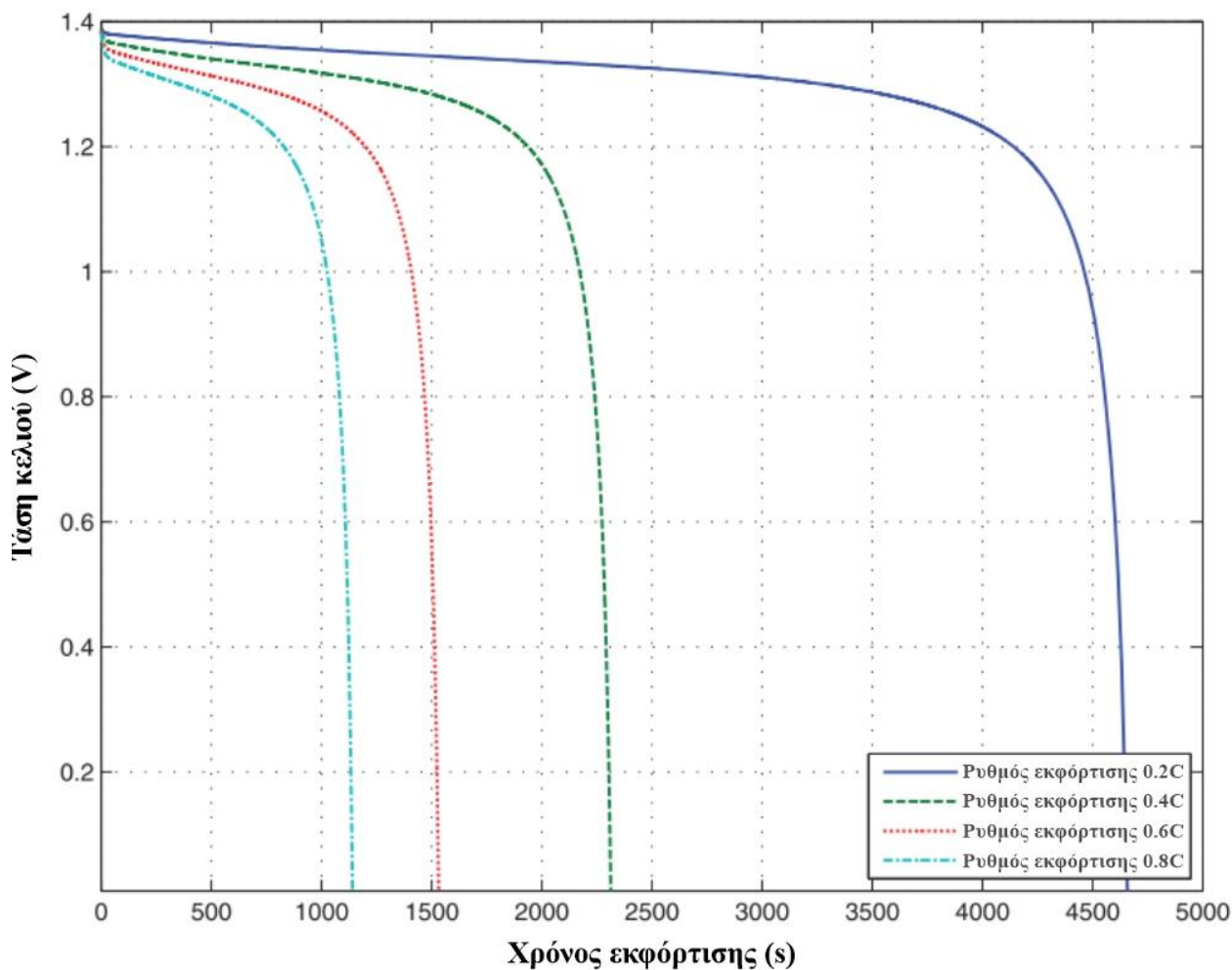
Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως υποδεικνύουν μια *ονομαστική τάση κελιού*, η οποία αποτελεί τη μέση τιμή μεταξύ της μέγιστης τάσης και της τάσης αποκοπής. Η μέση τάση, σε συνδυασμό με τον ρυθμό του ρεύματος εκφόρτισης, χρησιμεύει στον υπολογισμό της ισοδύναμης εσωτερικής αντίστασης του κελιού [88].

### 6.2.3 Τάση εκφόρτισης (discharge voltage)

Το προφίλ της *τάσης εκφόρτισης* του κελιού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η πίεση και η θερμοκρασία, καθώς επηρεάζουν την απόδοση των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μέσα στο κελί. Υπάρχει συσχέτιση της τάσης του κελιού και του ρυθμού του ρεύματος εκφόρτισης, επηρεάζοντας την ενεργειακή χωρητικότητα. Αυτός είναι ένας λόγος για τον οποίο οι κατασκευαστές αναφέρουν τη χωρητικότητα των κελιών για διαφορετικούς ρυθμούς ρεύματος εκφόρτισης, υποδεικνύοντας επιπλέον την εφαρμοζόμενη *μέθοδο ελέγχου εκφόρτισης*<sup>7</sup>. Όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης του ρεύματος, τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη τάση και η τάση αποκοπής του κελιού, μειώνοντας έτσι την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας [88].

<sup>6</sup> Snihir, I., Rey, S., Verbitskiy, E. (2010) *Battery Open-Circuit Voltage Estimation by a Method of Statistical Analysis*, <https://www.eurandom.tue.nl/reports/2005/046-report.pdf> (Προσπελάστηκε: Αύγουστος 2022).

<sup>7</sup> IEEE Power & Energy Society (2010) *IEEE Recommended Practice for the Characterization and Evaluation of Emerging Energy Storage Technologies in Stationary Applications*, IEEE Std 1679–2010, IEEE, New York.



Σχήμα 6.3 – Τυπικά προφίλ τάσης για διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης [88]

## 6.2.4 Χωρητικότητα (capacity, C)

Η *χωρητικότητα*  $C$  των μπαταριών ορίζεται ως το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποδώσει μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία υπό καθορισμένες συνθήκες εκφόρτισης (ρυθμός εκφόρτισης, θερμοκρασία, τάση). Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι τα *αμπέρ ανά ώρα* ή *αμπερώρια* (Ah). Γενικά ισχύει ότι **όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο μικρότερη η ωφέλιμη χωρητικότητα**. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εμπειρική σχέση που εκφράζει την εξάρτηση της ενεργειακής χωρητικότητας με το χρόνο και το ρεύμα, είναι η σχέση του Peukert [68,88]:

$$C = I^n t \quad (6.1)$$

όπου:

- C** η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας
- I** η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κελί
- t** ο χρόνος εκφόρτισης
- n** ο συντελεστής Peukert

Ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης μιας μπαταρίας μπορεί να εκφραστεί ως πολλαπλάσιο της συνολικής χωρητικότητας (C-rate). C-rate ίσο με τη μονάδα (1C), δηλώνει ότι μία μπαταρία ονομαστικού ρεύματος  $n$  A, μπορεί να αποδώσει  $n$  A για 1 ώρα (h) [68].

Για παράδειγμα, μπορούμε να διαβάσουμε στα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστών ότι μια μπαταρία έχει ονομαστική τιμή 10 Ah με ρυθμό φόρτισης 2C ή 10 Ah με ρυθμό φόρτισης C/5. Στη δεύτερη περίπτωση, η μπαταρία θα παρέχει  $10 \text{ Ah}/5 \text{ h} = 2 \text{ A}$  σε 5 ώρες, μέχρι να φτάσει στην τάση αποκοπής. Ομοίως, στην πρώτη περίπτωση, η μπαταρία θα παρέχει  $10 \text{ Ah}/0.5 \text{ h} = 20 \text{ A}$  για 30 λεπτά. Στον Πίνακα 6.2 συνοψίζονται οι τιμές ρεύματος και χρόνου φόρτισης για διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης μίας ιδανικής μπαταρίας (χωρίς απώλειες) [68,88].

**Πίνακας 6.2** – Τιμές ρεύματος και χρόνου φόρτισης για διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης μίας ιδανικής μπαταρίας [68]

C-rate	Χρόνος (min)	Ρεύμα (A)
5C	12	$5n$
2C	30	$2n$
1C	60	$n$
0.5C (C/2)	120	$n/2$
0.1C (C/10)	600	$n/10$

### 6.2.5 Κατάσταση φόρτισης (SoC)

Η αναλογία μεταξύ της υπολειπόμενης ενεργειακής χωρητικότητας και της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας (σε καθορισμένο ρυθμό εκφόρτισης) καθορίζει την κατάσταση φόρτισης (*State of Charge, SoC*) του συστήματος. Οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης δεν είναι ιδανικές, αλλά επηρεάζονται από απώλειες που οδηγούν σε πτώσεις τάσης και αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, η ενεργειακή απόδοση μπορεί να διαμορφωθεί ως προς την τάση του κελιού και τη θεωρητική μέγιστη τάση που παράγεται κατά τη χημική αντίδραση εντός του κελιού, τη λεγόμενη *θερμοδυναμική τάση (thermodynamic voltage)*.

Κατά τη φόρτιση, η ενεργειακή απόδοση του κελιού ορίζεται ως:

$$\mu_c = \frac{V}{V_{th}} \quad (6.2)$$



και κατά την εκφόρτιση, διαμορφώνεται ως:

$$\mu_d = \frac{V_{th}}{V} \quad (6.3)$$

όπου:

$V_{th}$  η θερμοδυναμική τάση του κελιού

$V$  η τάση μεταξύ των ακροδεκτών του κελιού

Αυτές οι μετρήσεις διατυπώνονται διαφορετικά, καθώς η τάση του κελιού είναι υψηλότερη από τη θερμοδυναμική τάση κατά την εκφόρτιση και χαμηλότερη κατά τη διαδικασία της φόρτισης, γεγονός που οφείλεται στην επίδραση της εσωτερικής αντίστασης του κελιού.

Σχετικά με τον ορισμό της ενεργειακής απόδοσης και την εξάρτηση της τάσης του κελιού από την SoC, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η απόδοση της εκφόρτισης αυξάνεται με την SoC, ενώ, αντιθέτως, η απόδοση της φόρτισης μειώνεται με την SoC. Επομένως, για να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση κατά τη διάρκεια ενός βρόχου πλήρους φόρτισης και εκφόρτισης, θα πρέπει να υπολογιστεί ένας βέλτιστος μέσος όρος SoC, εργασία με την οποία είναι επιφορτισμένα τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών (*Battery Management Systems, BMS*) [88].

## 6.2.6 Ειδική ενέργεια και ειδική ισχύς

Δύο επιπλέον κύρια μεγέθη για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας γενικά, και για τις μπαταρίες ειδικότερα, είναι η *ειδική ενέργεια* και η *ισχύς*, μεγέθη που **συσχετίζουν την ενέργεια και τη χωρητικότητα ισχύος με το βάρος της μπαταρίας**. Στον υπολογισμό των μεγεθών αυτών εμπλέκονται μόνο τα αντιδραστήρια των κελιών, παραλείποντας έτσι άλλα δομικά στοιχεία, όπως διαχωριστές κελιών και καλωδίωση. Η ενεργειακή χωρητικότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{sp} = \frac{nFV_{th}}{3.6 \sum M_i} [Wh/kg] \quad (6.4)$$

όπου:

$n$  ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται σε μια χημική αντίδραση

$F$  η σταθερά Faraday (σε coulomb/mol)

$V_{th}$  η θεωρητική θερμοδυναμική τάση του κελιού

$\sum M_i$  το άθροισμα των μοριακών βαρών των αντιδραστηρίων του κελιού.

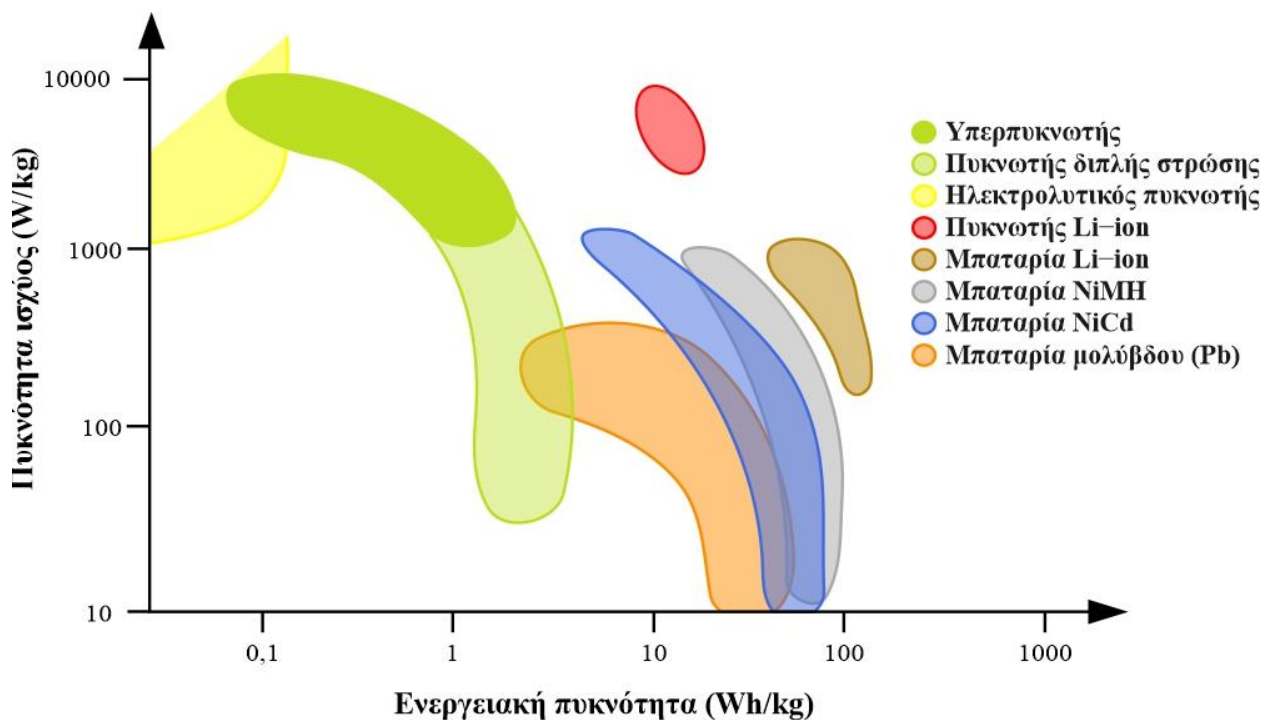
Επομένως, για τη βελτιστοποίηση της ειδικής ενέργειας, θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί η  $V_{th}$  και να ελαχιστοποιηθεί το  $\sum M_i$ . Το άθροισμα επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση κελιών που

βασίζονται σε αντιδραστήρια χαμηλού ατομικού βάρους, ενώ η  $V_{th}$  λαμβάνεται με τη δημιουργία δύο ζευγών ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών, ένα εξαιρετικά ηλεκτροθετικό κι ένα εξαιρετικά ηλεκτραρνητικό κελί. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, οι χημικές αντιδράσεις θα δώσουν μία υψηλή θερμοδυναμική τάση  $V_{th}$ .

Τέλος, η ειδική ισχύς καθορίζει τη **μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει το στοιχείο σε σχέση με το βάρος του** και εξαρτάται από την τάση ανοικτού κυκλώματος του κελιού  $V_{OC}$ , και μια εσωτερική αντίσταση  $R_{int}$ , εκτός από την ωμική αντίσταση των αγωγών  $R_c$ . Έτσι:

$$P_{sp} = \frac{V_{OC}}{4(R_c + R_{int})} [W/kg] \quad (6.5)$$

Η μεταβλητή εσωτερική αντίσταση, που συνήθως ονομάζεται *υπερδυναμικό (overpotential)*, μοντελοποιεί μία πτώση τάσης στο κελί και εξαρτάται από την ποσότητα του ρεύματος που αντλείται [88]. Ένας πολύ χρηστικός τρόπος που αποτυπώνει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά διάφορων τύπων μπαταριών αποτελεί το *διάγραμμα Ragone*. Ουσιαστικά, το διάγραμμα αυτό μας δίνει τις καμπύλες της πυκνότητας ισχύος συναρτήσει της πυκνότητας ενέργειας [07].

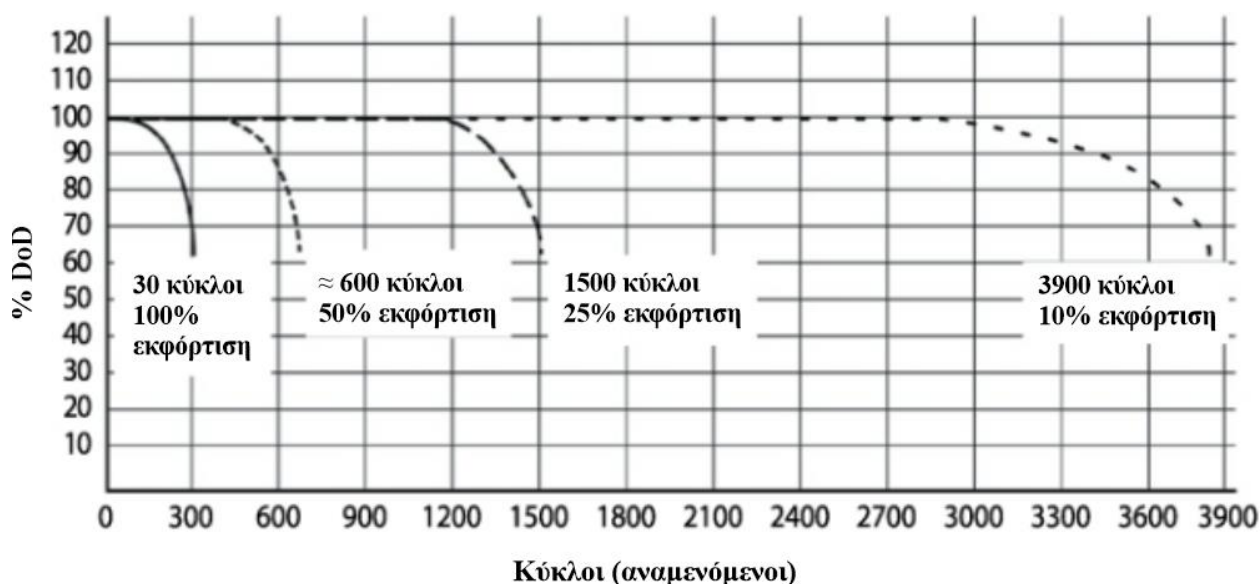


Σχήμα 6.4 – Διάγραμμα Ragone για διαφορετικά είδη μπαταριών και πυκνωτών [91]

### 6.2.7 Κύκλος ζωής (lifecycle)

Ο όρος *κύκλος* περιγράφει την επαναλαμβανόμενη διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης που λαμβάνει χώρα σε μία μπαταρία και ισοδυναμεί με μία εκφόρτιση, ακολουθούμενη από μία πλήρη φόρτιση.

Ο όρος *κύκλος ζωής* εκφράζει το μέτρο του αριθμού των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης που μπορεί να ολοκληρώσει μία μπαταρία κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της. Αντιστοιχεί στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για συγκεκριμένο *βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge, DoD)* που είναι σε θέση να πραγματοποιήσει η μπαταρία, πριν η διαθέσιμη χωρητικότητά της πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αρχικής της χωρητικότητας (συνήθως 80%). Εξαρτάται, επομένως, σε μεγάλο ποσοστό από το DoD.



Σχήμα 6.5 – Συνάρτηση του κύκλου ζωής μίας μπαταρίας μολύβδου-οξέος με το βάθος εκφόρτισης (DoD) [16]

Ο όρος *κύκλος λειτουργίας* περιγράφει τη διαδικασία, σύμφωνα με την οποία εκτελείται μία πλήρης φόρτιση και στη συνέχεια μία εκφόρτιση, σε συγκεκριμένο DoD και σε καθορισμένες συνθήκες, όπως θερμοκρασία και υγρασία. Όταν η μπαταρία εκφορτίσει σε μεγάλο ποσοστό, με τη διαδικασία αυτή να συμβαίνει πολύ συχνά, τότε λιγοστεύουν οι κύκλοι ζωής της (διάρκεια ζωής μπαταρίας).

Επομένως, ο παράγοντας που καθορίζει την πραγματική διάρκεια ζωής μίας μπαταρίας είναι ο συνολικός αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης, συνεπικουρούμενος από συγκεκριμένα κριτήρια και μέχρι το σημείο όπου η μπαταρία θα αρχίσει να δυσλειτουργεί [68].

### 6.2.8 Αυτό-εκφόρτιση (self-discharge)

Ο παράγοντας της *αυτό-εκφόρτισης* είναι ένας από εκείνους που μπορούν να επηρεάσουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, συνθέτοντας το αποτέλεσμα διεργασιών που εκτελούνται τόσο σε ένα εκ των ηλεκτροδίων, όσο και στην μπαταρία στο σύνολό της. Ο ρυθμός της αυτό-εκφόρτισης καθορίζει τους *χρόνους αποθήκευσης* (μέγιστος χρόνος από την παραγωγή στη χρήση) και *λειτουργίας* (σύνολο κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης) των μπαταριών [07].

## 6.3 Κύριοι τύποι μπαταριών

### 6.3.1 Μπαταρίες μολύβδου–οξέος

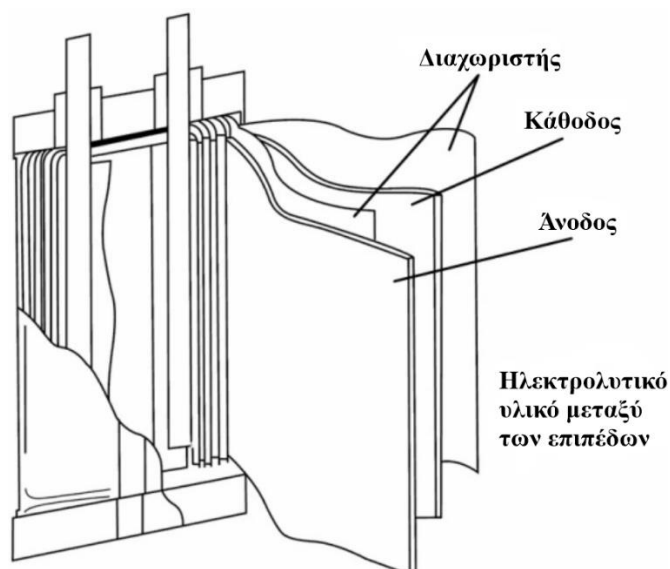
Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος επαναφορτιζόμενος τύπος μπαταρίας είναι η μπαταρία μολύβδου–οξέος. Η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από  $PbO_2$ , η άνοδος από  $Pb$  και το χημικό στοιχείο του ηλεκτρολύτη είναι το θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ). Έχουν γρήγορους χρόνους απόκρισης, μικρούς ημερήσιους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης (<0,3%), σχετικά υψηλή απόδοση κύκλου (~63–90%) και χαμηλό κόστος κεφαλαίου. Οι μπαταρίες μολύβδου–οξέος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σταθερές συσκευές ως εφεδρικά τροφοδοτικά για συστήματα δεδομένων και τηλεπικοινωνιών και εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί ως πηγές ενέργειας για υβριδικά ή πλήρως ηλεκτρικά οχήματα. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμένες εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο ως κλίμακα χρησιμότητας ESS, κυρίως λόγω των σχετικά χαμηλών χρόνων κύκλου (έως ~2000), της ενεργειακής πυκνότητας (50–90 Wh/L) και της ειδικής ενέργειας (25–50 Wh/kg). Επιπλέον, έχουν αρκετά μειωμένη απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες, επομένως απαιτείται συνήθως ένα σύστημα θερμικής διαχείρισης, γεγονός που αυξάνει το κόστος [79,88].

Επί του παρόντος, η έρευνα και η ανάπτυξη μπαταριών μολύβδου–οξέος επικεντρώνεται: (1) στα καινοτόμα υλικά για τη βελτίωση της απόδοσης, όπως η επέκταση του χρόνου των κύκλων και η ενίσχυση της ικανότητας βαθιάς εκφόρτισης, (2) στην εφαρμογή της τεχνολογίας μπαταριών για πλήρη ενσωμάτωση σε εφαρμογές των τομέων της αιολικής ενέργειας, των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αρκετές προηγμένες τεχνολογίες μπαταριών μολύβδου–οξέος που έχουν γρήγορες αποκρίσεις, συγκρίσιμες με σφονδύλους και υπερπυκνωτές, αναπτύσσονται ή βρίσκονται σε φάση επίδειξης, όπως τα έξυπνα συστήματα UltraBattery της εταιρίας Ecoult και το προηγμένο “Dry Cell” της εταιρίας Xtreme Power [79].

### 6.3.2 Μπαταρίες λιθίου

Οι μπαταρίες λιθίου υφίστανται σε διάφορες μορφές από τη δεκαετία του 1970, με τις καινοτομίες που ακολούθησαν στις δεκαετίες του 1980 και 1990 να έχουν οδηγήσει στα κελιά μπαταριών λιθίου που γνωρίζουμε σήμερα. Η τρέχουσα έρευνα έχει συμβάλει στη δημιουργία κελιών μπαταριών ικανών να προσφέρουν εξαιρετική απόδοση, π.χ. επαναφόρτιση στο 100% εντός ολίγων δευτερολέπτων. Ωστόσο, οι τρέχουσες εξελίξεις είναι αυστηρά πειραματικές και ενδεχομένως θα αργήσουν να γίνουν εμπορικά διαθέσιμες, όσον αφορά το άμεσο μέλλον.

Πέρα από την προχωρημένη διαδικασία έρευνας και ανάπτυξης, οι ηλεκτρικές και χημικές διεργασίες που επιτρέπουν στις μπαταρίες λιθίου να λειτουργούν είναι στην πραγματικότητα αρκετά απλές [17].

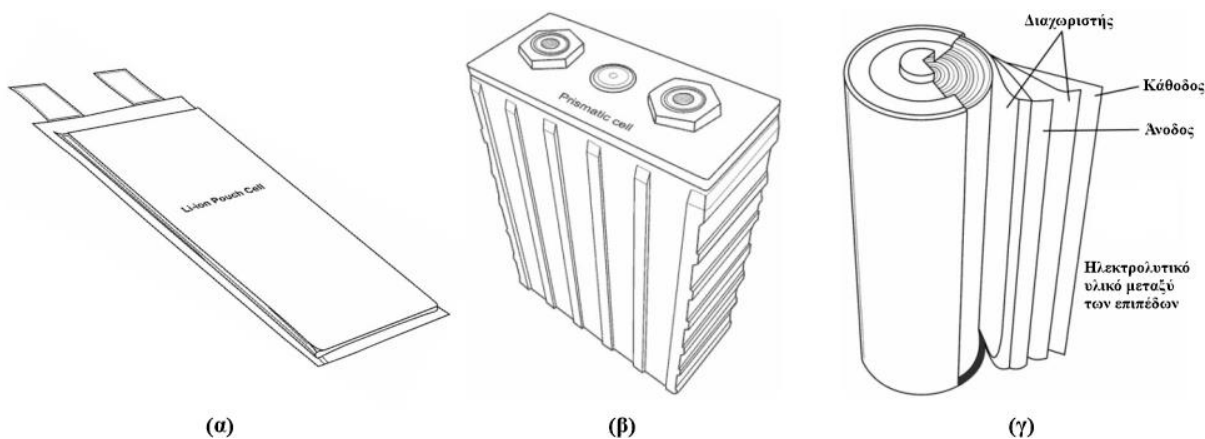


Σχήμα 6.6 – Σχηματική απεικόνιση των κύριων μερών ενός κελιού μπαταρίας λιθίου σχήματος θήκης [17]

Ένα κελί μπαταρίας ιόντων-λιθίου αποτελείται από τέσσερα (4) κύρια μέρη [17]:

- την κάθοδο (ή το θετικό ακροδέκτη)
- την άνοδο (ή τον αρνητικό ακροδέκτης)
- τον ηλεκτρολύτη και
- τον πορώδη διαχωριστή

Η κάθοδος ποικίλλει μεταξύ διαφορετικών τύπων κελιών, αποτελώντας όμως πάντα μία ένωση λιθίου αναμειγμένη με άλλα υλικά. Η άνοδος αποτελείται σχεδόν πάντα από γραφίτη και μερικές φορές περιλαμβάνει ίχνη άλλων στοιχείων. Ο ηλεκτρολύτης είναι γενικά μια οργανική ένωση που περιέχει άλατα λιθίου για τη μεταφορά των ιόντων-λιθίου. Ο πορώδης διαχωριστής επιτρέπει στα ιόντα λιθίου να διαπεράσουν τον εαυτό τους, ενώ παράλληλα διαχωρίζει την άνοδο και την κάθοδο εντός του κελιού [17].



Σχήμα 6.7 – Τα σχήματα των κελιών μίας μπαταρίας λιθίου: (α) θήκης, (β) πρισματικό και (γ) κυλινδρικό [17]

Όταν το κελί εκφορτίζεται, τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο, περνώντας από τον ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης εναποθέτει ηλεκτρόνια στην πλευρά της ανόδου τροφοδοτώντας το κύκλωμα, κι εν τέλει, οποιαδήποτε συσκευή συνδεδεμένη σε αυτό. Όταν το κελί επαναφορτίζεται, η διαδικασία αντιστρέφεται και τα ιόντα λιθίου οδηγούνται πίσω, από την κάθοδο στην άνοδο. Η πραγματική διαδικασία είναι αρκετά απλή. Οι κύριες διαφορές βρίσκονται με βάση το σχήμα των κελιών (θήκης, πρισματικά, κυλινδρικά) και κάποιων μικρών χημικών διαφοροποιήσεων [17].

### 6.3.2.1 Μπαταρίες ιόντων–λιθίου (Li-ion)

Η μπαταρία *ιόντων–λιθίου* είναι ο πιο κοινός τύπος μπαταρίας λιθίου που χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, όπως κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, ηλεκτρικά εργαλεία κ.λπ. Έχουν την υψηλότερη αναλογία ενέργειας ανά μονάδα βάρους, διαθέτοντας κελιά μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας, κάτι που σημαίνει ότι μπορεί να “συσκευαστεί” μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε έναν μικρό όγκο υλικού [17].

Σε μια μπαταρία ιόντων–λιθίου, η κάθοδος αποτελείται από ένα οξείδιο μετάλλου λιθίου, όπως το  $\text{LiCoO}_2$  και το  $\text{LiMO}_2$ , ενώ η άνοδος είναι κατασκευασμένη από άνθρακα γραφίτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα μη υδατικό οργανικό υγρό που περιέχει διαλυμένα άλατα λιθίου, όπως το  $\text{LiClO}_4$ . Η μπαταρία ιόντων–λιθίου θεωρείται ιδανική λύση για εφαρμογές όπου ο χρόνος απόκρισης, η μικρή διάσταση ή/και το βάρος του εξοπλισμού είναι σημαντικά (χρόνος απόκρισης χιλιοστών του δευτερολέπτου, ~1500–10.000 W/L, ~75–200 Wh/kg, ~150–2000 W/kg). Οι μπαταρίες ιόντων–λιθίου έχουν επίσης υψηλή απόδοση κύκλου, έως και ~97%. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι ότι: (1) Ο κύκλος DoD μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, (2) Η μπαταρία συνήθως απαιτεί μία ενσωματωμένη μονάδα επεξεργασίας για τη διαχείριση της λειτουργίας της, γεγονός που αυξάνει το συνολικό της κόστος, (3) Λανθασμένος, μη ασφαλής τρόπος φόρτισης/εκφόρτισης, καθώς και μη πλημμελής χρήση της, μπορεί να προκαλέσει δυσάρεστες και επικίνδυνες καταστάσεις, όπως ανάφλεξη ή/και έκρηξη, με αρνητικές επιπτώσεις στον άνθρωπο και τον εξοπλισμό [79].

Η τρέχουσα έρευνα που αφορά αυτού του τύπου τις μπαταρίες επικεντρώνεται: (1) στην αύξηση της ικανότητας ισχύος της μπαταρίας με τη χρήση υλικών νανοκλίμακας και (2) στην ενίσχυση της ειδικής ενέργειας της μπαταρίας με την ανάπτυξη προηγμένων υλικών ηλεκτροδίων και διαλυμάτων ηλεκτρολυτών. Παγκοσμίως υπάρχουν αρκετές εταιρείες στην ενεργειακή αγορά, οι οποίες έχουν αποκτήσει εμπειρία στη χρήση μπαταριών ιόντων–λιθίου, προσφέροντας λύσεις οι οποίες συμβάλλουν στην υποστήριξη και την περαιτέρω ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο, στην εξισορρόπηση της διαλείπουσας λειτουργίας των ΑΠΕ, την παροχή ρύθμισης συχνότητας κ.λπ. Επιπλέον, οι μπαταρίες ιόντων–λιθίου εφαρμόζονται σε υβριδικά και πλήρως



ηλεκτρικά οχήματα (HEVs και EVs), τα οποία χρησιμοποιούν κυψέλες και πακέτα μεγάλου μεγέθους με χωρητικότητα 15–20 kWh για τα HEVs και έως 50 kWh για τα EVs [79].

#### **6.3.2.1.1 Μπαταρίες λιθίου–οξειδίου του μαγγανίου ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ή li–manganese)**

Η μπαταρία λιθίου–οξειδίου του μαγγανίου πήρε το όνομά της από τη χρήση μιας δομής μήτρας (matrix structure) μαγγανίου στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 με αρχές του 1980, καθιστώντας την μία από τις πρώτες εμπορικές λύσεις χημικών ενώσεων ιόντων–λιθίου. Οι μπαταρίες  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  μπορούν να χειριστούν σχετικά υψηλή ισχύ σε πολύ σύντομες περιόδους απόδοσης ισχύος, προσφέροντας παράλληλα υψηλή θερμική σταθερότητα. Το γεγονός αυτό τις καθιστά από τις ασφαλέστερες χημικές ενώσεις ιόντων–λιθίου, επειδή απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες για να προκαλέσουν θερμική διαφυγή. Τα κελιά των μπαταριών αυτών μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα, προσφέροντας είτε μεγαλύτερη ισχύ, είτε μεγαλύτερη χωρητικότητα, αλλά όχι ταυτόχρονα. Μειονέκτημα αποτελεί η σχετικά χαμηλότερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με άλλες χημικές ενώσεις ιόντων–λιθίου [17].

#### **6.3.2.1.2 Μπαταρίες λιθίου–οξειδίου του κοβαλτίου ( $\text{LiCoO}_2$ ή li–co)**

Η μπαταρία λιθίου–οξειδίου του κοβαλτίου αναπτύχθηκε περίπου την ίδια εποχή με την  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  συναποτελώντας μία από τις πρώτες μορφές εμπορικά διαθέσιμων κελιών ιόντων–λιθίου. Χρησιμοποιεί μια πολυεπίπεδη δομή κοβαλτίου στο ηλεκτρόδιο της καθόδου της. Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα των μπαταριών  $\text{LiCoO}_2$  είναι το σχετικά χαμηλό κόστος και η υψηλή χωρητικότητά τους. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται η χαμηλότερη τιμή ρεύματος, η μέτρια διάρκεια ζωής και η χαμηλότερη θερμική θερμοκρασία διαφυγής, καθιστώντας τις λιγότερο ασφαλείς από άλλες χημικές ενώσεις ιόντων–λιθίου [17].

#### **6.3.2.1.3 Μπαταρίες λιθίου–οξειδίου κοβαλτίου νικελίου ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ή NMC)**

Η μπαταρία λιθίου–οξειδίου κοβαλτίου νικελίου είναι μια αρκετά νέα τεχνολογία που εξακολουθεί να βρίσκεται υπό συνεχή ανάπτυξη. Οι μπαταρίες NMC είναι προϊόν βελτίωσης των μειονεκτημάτων πολλών προηγούμενων τύπων κελιών ιόντων–λιθίου, διατηρώντας παράλληλα τα πλεονεκτήματά τους, συνδυάζοντας ταυτόχρονα πολλά από τα πλεονεκτήματα των μπαταριών  $\text{LiCoO}_2$  και  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . Συνδυάζοντας κοβάλτιο και μαγγάνιο, συμπεριλαμβανομένου του νικελίου, τα κελιά NMC μπορούν να αποδώσουν σχετικά υψηλή ισχύ, έχοντας αυξημένες τιμές χωρητικότητας και επιπέδων ασφάλειας. Με την προσαρμογή της αναλογίας κοβαλτίου, μαγγανίου και νικελίου στην κάθοδο, καθώς και με τη συμπερίληψη άλλων στοιχείων στα ηλεκτρόδια τόσο της καθόδου, όσο και της ανόδου, τα κελιά NMC μπορούν να τροποποιηθούν για βελτιωμένη απόδοση σχεδόν σε οποιαδήποτε κατηγορία μετρήσεων. Με την προσθήκη άλλων



χημικών ουσιών μπορούν να επιτευχθούν καλύτερες επιδόσεις σε ορισμένες κατηγορίες, ωστόσο όμως, οι μπαταρίες NMC παρουσιάζουν μερικά από τα υψηλότερα ποσοστά συνολικής απόδοσης από οποιονδήποτε άλλο τύπο μπαταρίας με χημικές ενώσεις ιόντων-λιθίου [17].

#### **6.3.2.1.4 Μπαταρίες λιθίου-οξειδίου αλουμινίου κοβαλτίου νικελίου (LiNiCoAlO<sub>2</sub> ή NCA(R))**

Η μπαταρία λιθίου-οξειδίου αλουμινίου κοβαλτίου νικελίου είναι πανομοιότυπη με την NMC, αλλά με μόνη διαφορά την προσθήκη αλουμινίου αντί μαγγανίου στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Το αλουμίνιο δίνει τη δυνατότητα στα κελιά της NCA να επιτύχουν την υψηλότερη χωρητικότητα έναντι όλων των μπαταριών χημικών ενώσεων ιόντων-λιθίου. Παρουσιάζει το μειονέκτημα της μικρής μείωσης στη διάρκεια και την ισχύ του κύκλου ζωής σε σύγκριση με τα περισσότερα κελιά άλλων τύπων μπαταριών ιόντων-λιθίου.

Όπως και με τις μπαταρίες NMC, η μπαταρία NCA αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για μελλοντική ανάπτυξη των κελιών ιόντων-λιθίου. Είναι μία καλή επιλογή για εφαρμογές υψηλής χωρητικότητας και ενεργειακής πυκνότητας, αφού υπερέχει στην ικανότητα συσσώρευσης περισσότερης ενέργειας σε μικρότερο χώρο. Με χρήση μίας αρκετά μεγάλης μπαταρίας μπορούν να ελεγχθούν χαμηλά ποσά σχετικής ισχύος. Ωστόσο, η συνεχής έρευνα και οι σταδιακές βελτιώσεις συμβάλλουν στην αύξηση της ισχύος αυτού του τύπου κελιών, καθιστώντας τον τύπο της συγκεκριμένης μπαταρίας αρκετά ανταγωνιστικό [17].

#### **6.3.2.1.5 Μπαταρίες πολυμερών λιθίου (Li-poly ή li-po ή RC li-po)**

Οι μπαταρίες πολυμερών λιθίου αποτελούν ένα σύνολο χημικών ενώσεων βασιζόμενες στα στοιχεία λιθίου-κοβαλτίου και είναι οι πλέον κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Μπορούν να παρέχουν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης για μεγάλες, αλλά και σύντομες χρονικές περιόδους.

Χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στη βιομηχανία οχημάτων τηλεχειρισμού για εφαρμογές όπως RC drones, ελικόπτερα, αεροπλάνα, αυτοκίνητα κ.λπ. Οι συσκευές αυτές απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης από μια μικρή και ελαφριά μπαταρία. Επιπλέον, οι μπαταρίες RC li-po είναι οι φθηνότερες διαθέσιμες, διότι κοστίζουν πολύ λιγότερο από τα κελιά μπαταριών ιόντων-λιθίου και LiFePO<sub>4</sub> (βλ. **Ενότητα 6.3.2.2**), καθιστώντας τα ελκυστικά για άλλες εφαρμογές, όπως τα ηλεκτρικά ποδήλατα.

Βασικό και πολύ σημαντικό μειονέκτημα αυτού τύπου μπαταριών είναι η μεγάλη επικινδυνότητά τους, όταν δεν ακολουθείται σωστά η διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης, αλλά και η χρήσης τους. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να προκαλέσουν πολύ επικίνδυνες εκρήξεις και καταστροφές. Στα μειονεκτήματα μπορούν να συμπεριληφθούν επίσης: (1) Ο μικρός κύκλος ζωής (η επίτευξη 200 κύκλων θεωρείται ικανοποιητική απόδοση), (2) Η περιπλοκότητα της διαδικασίας

φόρτισης, διότι απαιτούν πιο ακριβούς φορτιστές ισορροπίας για να διασφαλιστεί ότι όλα τα κελιά της μπαταρίας διατηρούνται στη σωστή τάση και σε συνθήκες εξισορρόπησης μεταξύ τους. Ο λόγος για τον οποίο απαιτείται ο συγκεκριμένος τύπος φορτιστών είναι ότι οι μπαταρίες RC lipo πρέπει να φορτίζονται και λειτουργούν εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τάσης (3 – 4.2 V, ονομαστική τάση 3.7 V), διότι σε αντίθετη περίπτωση, μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα ασταθείς. Εξαιρετικά χαμηλό ποσοστό εκφόρτισης, κάτω των 3 V και εν συνεχεία προσπάθεια φόρτισης, ενδέχεται να προκαλέσει έκρηξη των κελιών, ειδικά σε υψηλότερα ρεύματα φόρτισης. Για το λόγο αυτό, τα κελιά των μπαταριών RC lipo θα πρέπει να παρακολουθούνται προσεκτικά κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης για να διασφαλιστεί ότι δεν θα φτάσουν σε επικίνδυνα χαμηλά όρια [17].

### 6.3.2.2 Μπαταρίες λιθίου–φωσφορικού άλατος σιδήρου (LiFePO<sub>4</sub> ή LFE)

Οι μπαταρίες λιθίου–φωσφορικού άλατος σιδήρου είναι βαρύτερες και διαθέτουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα από τους περισσότερους τύπους μπαταριών ιόντων–λιθίου. Αυτό σημαίνει, ότι οι μπαταρίες που κατασκευάζονται από κελιά LiFePO<sub>4</sub> είναι πιο ογκώδεις από τις μπαταρίες ιόντων–λιθίου ή RC lipo ίδιας τάσης και χωρητικότητας. Η ακριβής ποσότητα ποικίλλει ανάλογα με τη μορφή του κελιού, αλλά συνήθως μία μπαταρία LiFePO<sub>4</sub> να είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη και δύο φορές βαρύτερη από μια αντίστοιχη μπαταρία ιόντων–λιθίου. Ένα επιπλέον αρνητικό χαρακτηριστικό είναι ο χαμηλός ρυθμός εκφόρτισης, που σημαίνει ότι τα κελιά δεν μπορούν να παρέχουν μεγάλη ποσότητα ισχύος, χωρίς αυτό όμως να αποτελεί τον κανόνα.

Δύο μεγάλα πλεονεκτήματα των μπαταριών LiFePO<sub>4</sub> είναι: (1) Η *μεγάλη διάρκεια ζωής*, καθώς έχει τη μεγαλύτερη ονομαστική διάρκεια ζωής από όλες τις διαθέσιμες μπαταρίες λιθίου, άνω των 2000 κύκλων, και (2) η *ενισχυμένη ασφάλεια*, αποτελώντας τον ασφαλέστερο (δεν εκρήγνυται) τύπο μπαταρίας λιθίου που είναι διαθέσιμος. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στα κελιά των μπαταριών LiFePO<sub>4</sub> οξειδώνεται σε πολύ αργούς ρυθμούς και απαιτεί εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες για θερμική διαφυγή, συχνά υψηλότερες από τη θερμοκρασία καύσης πολλών υλικών [17].

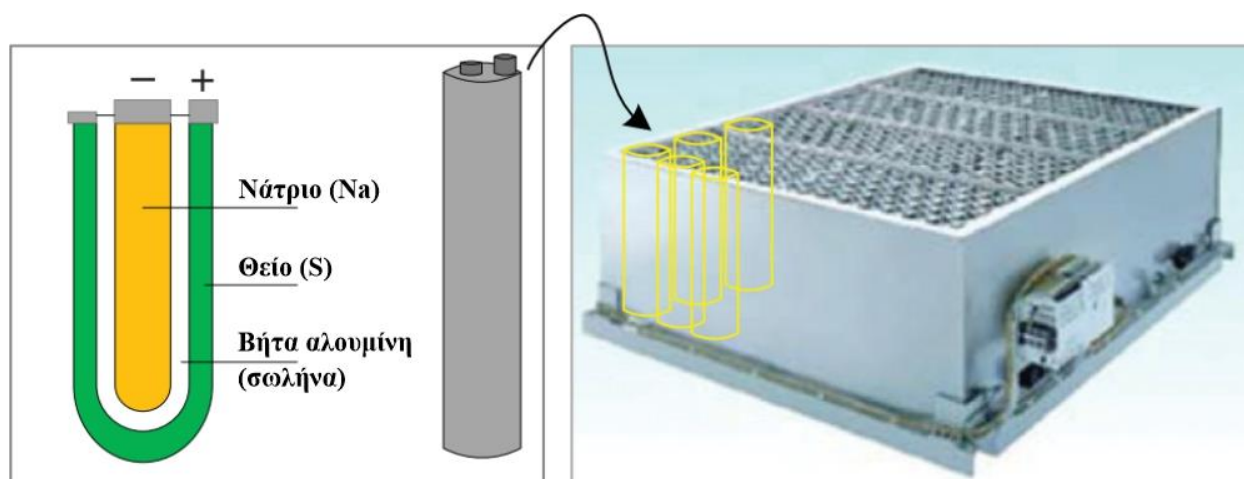
### 6.3.2.3 Μπαταρίες τιτανικού λιθίου (Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> ή LTO)

Οι μπαταρίες με ανόδους τιτανικού λιθίου είναι γνωστές από τη δεκαετία του 1980. Το τιτανικό λίθιο αντικαθιστά τον γραφίτη στην άνοδο μιας τυπικής μπαταρίας ιόντων–λιθίου και το υλικό σχηματίζεται σε μια δομή σπινελίου. Η κάθοδος μπορεί να είναι οξείδιο του λιθίου–οξειδίου του μαγγανίου ή NMC. Η ονομαστική τάση ενός κελιού του τιτανικού λιθίου είναι 2.4 V και μπορεί να φορτιστεί γρήγορα, παρέχοντας υψηλό ρεύμα εκφόρτισης 10C ή 10 φορές την ονομαστική χωρητικότητα. Ο αριθμός των κύκλων είναι υψηλότερος από αυτόν της μπαταρίας ιόντων–λιθίου. Οι μπαταρίες τιτανικού λιθίου είναι ασφαλείς, έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά εκκένωσης

χαμηλής θερμοκρασίας και πετυχαίνουν χωρητικότητα 80% στους  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Το LTO (συνήθως  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με το συμβατικό ιόν λιθίου με ανάμειξη κοβαλτίου, ανόδου γραφίτη, επιτυγχάνοντας το χαρακτηριστικό μηδενικής τάσης, χωρίς σχηματισμό φιλμ SEI<sup>8</sup> και χωρίς επιμετάλλωση λιθίου κατά τη γρήγορη φόρτιση ή φόρτιση σε χαμηλή θερμοκρασία. Η θερμική σταθερότητα σε υψηλή θερμοκρασία είναι επίσης καλύτερη από άλλα συστήματα ιόντων – λιθίου. Αρνητικό χαρακτηριστικό της μπαταρίας LTO είναι το υψηλό της κόστος. Έχοντας χαμηλή ειδική ενέργεια ( $65\text{ Wh/kg}$ ), η συγκεκριμένη τεχνολογία μπαταρίας ανταγωνίζεται αυτήν της NiCd. Φορτίζει στα  $2.8\text{ V/κελί}$ , ενώ στο τέλος της εκφόρτισης φτάνει το  $1.80\text{ V/κελί}$ . Τυπικές χρήσεις των μπαταριών αυτού του τύπου είναι τα ηλεκτρικά συστήματα μετάδοσης κίνησης, UPS και φωτισμός δρόμων με ηλιακή ενέργεια [93].

### 6.3.3 Μπαταρίες θείου–νατρίου (NaS)

Μία μπαταρία θείου–νατρίου χρησιμοποιεί νάτριο και θείο σε υγρή μορφή ως δύο ηλεκτρόδια και χρησιμοποιεί βήτα αλουμίνη ως στερεό ηλεκτρολύτη. Οι αντιδράσεις συνήθως απαιτούν θερμοκρασία  $300\text{--}360\text{ }^{\circ}\text{C}$  για να διασφαλιστεί ότι τα ηλεκτρόδια βρίσκονται σε υγρή κατάσταση, γεγονός που οδηγεί σε υψηλή αντιδραστικότητα. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των μπαταριών NaS περιλαμβάνουν σχετικά υψηλές ενεργειακές πυκνότητες ( $150\text{--}300\text{ Wh/L}$ ), σχεδόν μηδενικά ημερήσια επίπεδα αυτοεκφόρτισης, υψηλότερη ονομαστική χωρητικότητα από άλλους τύπους μπαταριών (έως  $244.8\text{ MWh}$ ) και ικανότητα υψηλής παλμικής ισχύος.



Σχήμα 6.8 – Σχηματικό διάγραμμα ενός κελιού και μίας μονάδας μπαταρίας NaS [88]

Η μπαταρία NaS χρησιμοποιεί φθηνά, μη τοξικά υλικά που οδηγούν σε υψηλή δυνατότητα ανακύκλωσης ( $\sim 99\%$ ). Ως περιοριστικοί παράγοντες θεωρούνται το υψηλό ετήσιο κόστος

<sup>8</sup> Ενδιάμεση φάση στερεού ηλεκτρολύτη (Solid Electrolyte Interphase, SEI), <https://doi.org/10.1038/s41524-018-0064-0> (Προσπελάστηκε: Αύγουστος 2022)

λειτουργίας και η χρήση ενός επιπλέον συστήματος που απαιτείται για τη διασφάλιση της θερμοκρασίας λειτουργίας των μπαταριών αυτών. Η NaS θεωρείται ως ένας από τους πιο υποσχόμενους υποψήφιους τύπους μπαταριών για εφαρμογές ESS υψηλής ισχύος. Η έρευνα και η ανάπτυξη επικεντρώνονται κυρίως στη βελτίωση των δεικτών απόδοσης των κελιών και στη μείωση/εξάλειψη των περιορισμών λειτουργίας υψηλής θερμοκρασίας [79].

### 6.3.4 Μπαταρίες νικελίου–καδμίου (NiCd)

Μια μπαταρία νικελίου–καδμίου χρησιμοποιεί υδροξείδιο του νικελίου και μεταλλικό κάδμιο ως δύο ηλεκτρόδια και ένα υδατικό διάλυμα αλκαλίου ως ηλεκτρολύτη. Συνήθως έχει σχετικά υψηλή και στιβαρή αξιοπιστία με χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Οι αδυναμίες των μπαταριών NiCd είναι: (1) Το κάδμιο και το νικέλιο είναι τοξικά βαρέα μέταλλα, με αποτέλεσμα να ενέχουν σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους, (2) η μπαταρία NiCd υποφέρει από το “φαινόμενο μνήμης”, δηλαδή η μέγιστη χωρητικότητά της μπορεί να μειωθεί δραματικά εάν η μπαταρία επαναφορτιστεί επανειλημμένα αφού έχει αποφορτιστεί μόνο μερικώς.

Μέχρι σήμερα, οι μπαταρίες NiCd έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολύ λίγες εμπορικές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας σε κλίμακα χρησιμότητας. Προσφέρουν υπηρεσίες περιστρεφόμενης εφεδρείας, παροχής ρεύματος και αντιστάθμισης σ’ ένα “ηλεκτρικό σύστημα νησίδας” λόγω των γεωγραφικών περιορισμών, δηλαδή απομακρυσμένων περιοχών. Περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες είναι ιδανικές για την επιλογή και την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών NiCd [79].

### 6.3.5 Μπαταρίες νικελίου–υδριδίου μετάλλου (NiMH)

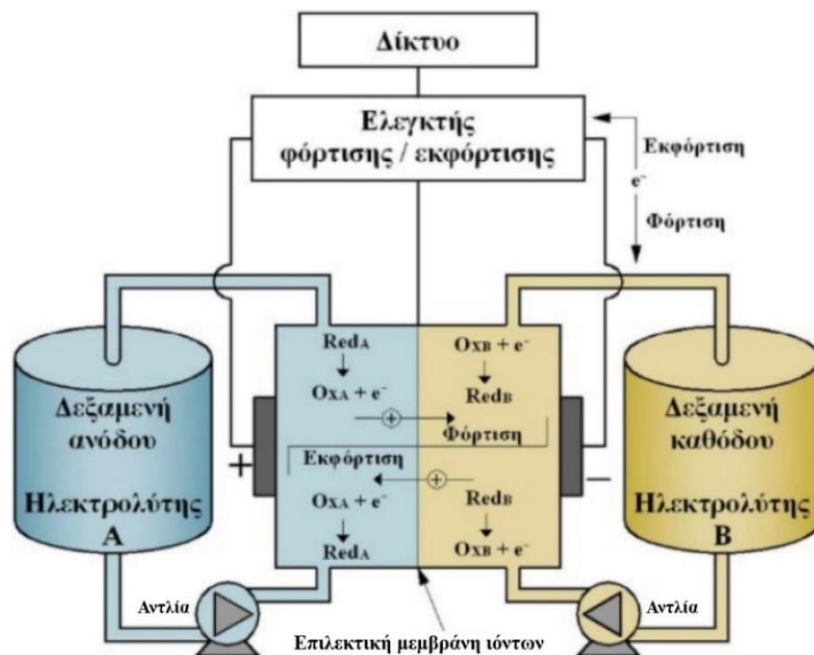
Η μπαταρία νικελίου-υδριδίου μετάλλου είναι παρόμοια με την μπαταρία NiCd, με τη διαφορά ότι ως ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ένα κράμα που απορροφά υδρογόνο αντί για κάδμιο. Έχει μέτρια ειδική ενέργεια (~70–100 Wh/kg) και σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (~170–420 Wh/L), σημαντικά καλύτερη από αυτήν της μπαταρίας NiCd. Άλλα πλεονεκτήματα των μπαταριών NiMH έναντι των μπαταριών NiCd περιλαμβάνουν το περιορισμένο “φαινόμενο μνήμης” και είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Έχουν μεγαλύτερη διάρκεια κύκλου ζωής σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων–λιθίου. Βρίσκουν πεδίο χρήσης σε πληθώρα εφαρμογών, από φορητά προϊόντα έως HEV & EV και πιθανές βιομηχανικές εφαρμογές αναμονής, όπως συσκευές UPS. Ωστόσο, σημαντικός περιορισμός για τις εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας είναι ο υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης, χάνοντας περίπου 5–20% της χωρητικότητάς τους μέσα στις πρώτες 24 ώρες μετά την πλήρη φόρτιση. Έχουν επίσης μεγάλη ευαισθησία σε περιόδους βαθέως κύκλου, με την απόδοση να μειώνεται μετά από μερικές εκατοντάδες πλήρεις κύκλους [79].

### 6.3.6 Μπαταρίες χλωριούχου νατρίου νικελίου (NaNiCl)

Η τεχνολογία της μπαταρίας χλωριούχου νατρίου νικελίου (γνωστή και ως μπαταρία ZEBRA) είναι παρόμοια με αυτή της μπαταρίας NaS. Η μπαταρία ZEBRA έχει μέτρια ειδική ενέργεια (~94–120 Wh/kg), ενεργειακή πυκνότητα (~150 Wh/L), ειδική ισχύ (150–170 W/kg) και υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (~250–350 °C). Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται η καλή ικανότητα παλμικής ισχύος, μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης των κελιών, πολύ μικρή αυτοεκφόρτιση και σχετικά υψηλή διάρκεια ζωής. Όσον αφορά το μειονέκτημά της, η μπαταρία χρειάζεται 12–15 ώρες για να θερμανθεί αφού στερεοποιηθεί (παγώσει). Επιπλέον, μόνο λίγες εταιρείες έχουν συμμετάσχει στην ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας παράγοντας αυτόν τον τύπο μπαταρίας, λόγος ο οποίος μπορεί να περιορίσει τις δυνατότητές του [79].

### 6.3.7 Μπαταρίες ροής (Flow batteries, FBES)

Μια μπαταρία ροής αποθηκεύει ενέργεια σε δύο διαλυτά ζεύγη οξειδοαναγωγής που περιέχονται σε εξωτερικές δεξαμενές υγρών ηλεκτρολυτών. Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να αντληθούν από τις δεξαμενές προς τη στοιβία κελιών, αποτελούμενη από δύο διαμερίσματα ροής ηλεκτρολυτών που διαχωρίζονται από επιλεκτικές μεμβράνες ιόντων. Η λειτουργία βασίζεται σε αντιδράσεις αναγωγής–οξείδωσης των διαλυμάτων ηλεκτρολυτών. Κατά τη φάση της φόρτισης, ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται στην άνοδο κι ένας άλλος ελατώνεται στην κάθοδο, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μετατροπή της ηλεκτρικής σε χημική ενέργεια. Η παραπάνω διαδικασία αντιστρέφεται κατά τη φάση της εκφόρτισης [79].

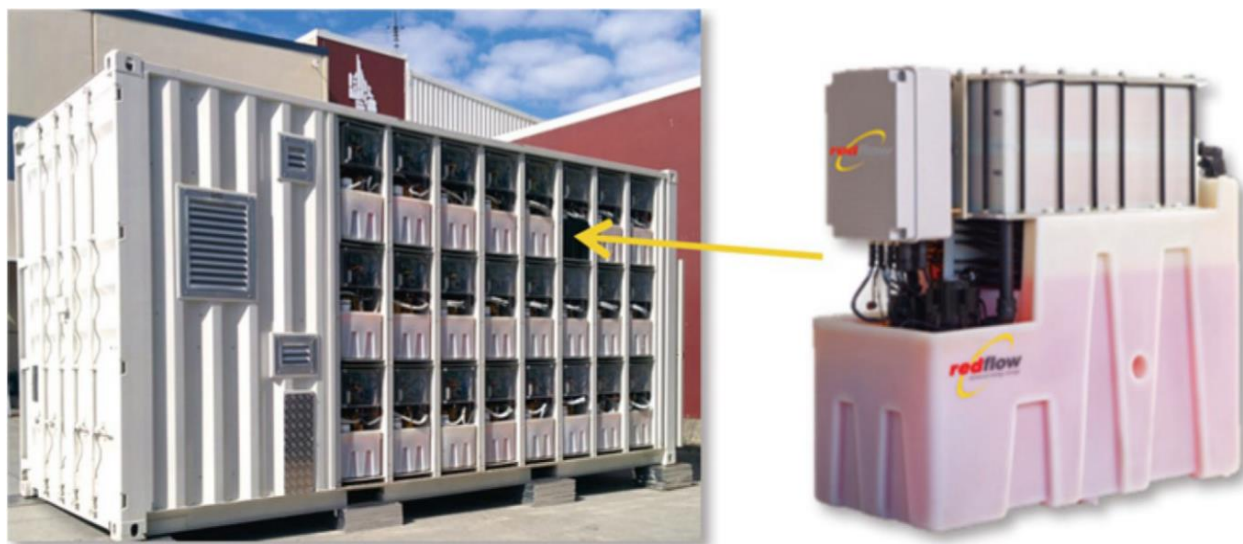


Σχήμα 6.9 – Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος μπαταρίας ροής [68]



Οι μπαταρίες ροής μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες μπαταριών *οξειδοαναγωγικής ροής* και μπαταρίες *υβριδικής ροής*, ανάλογα με το αν το σύνολο των ηλεκτροενεργών συστατικών μπορούν να διαλυθούν στον ηλεκτρολύτη. Ένα κρίσιμο πλεονέκτημα είναι ότι **η ισχύς ενός συστήματος FBES είναι ανεξάρτητη από την αποθηκευτική του ικανότητα**. Η ισχύς του συστήματος FBES καθορίζεται από το μέγεθος των ηλεκτροδίων και τον αριθμό των κελιών της στοιβάς, ενώ η χωρητικότητα αποθήκευσης καθορίζεται από τη συγκέντρωση και την ποσότητα του ηλεκτρολύτη. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα αφορά το πολύ μικρό ποσοστό αυτοεκφόρτισης εξαιτίας της αποθήκευσης των ηλεκτρολυτών σε ξεχωριστές, σφραγισμένες δεξαμενές, κάτι που αποκλείει τη μεταξύ τους αντίδραση.

Τα μειονεκτήματα των μπαταριών ροής περιλαμβάνουν τη χαμηλή απόδοση που προκύπτει από τις μη ομοιόμορφες πτώσεις πίεσης και τον περιορισμό της μεταφοράς μάζας των αντιδραστηρίων, το σχετικά υψηλό κόστος κατασκευής και τις πιο περίπλοκες απαιτήσεις συστήματος σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες [68,79].



*Εικόνα 6.1* – Χαρακτηριστική εικόνα ενός κελιού και μίας μονάδας μπαταρίας ροής [92]

Οι εγκαταστάσεις μπαταριών ροής έχει αποδειχθεί ότι λειτουργούν σε επίπεδα μερικών εκατοντάδων kW, ακόμη και πολλών MW. Επί του παρόντος, τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα FBES είναι πολύ λίγα. Οι τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες πάνω στα συστήματα FBES καλύπτουν την ανάπτυξη αποδοτικών, αξιόπιστων και χαμηλού κόστους ηλεκτροδίων, τις μεμβράνες υψηλής διαπερατότητας και αντοχής, τη διαχείριση ενέργειας και ισχύος σε μεγάλης κλίμακας συστήματα FBES, κ.λπ. Ορισμένοι τύποι τεχνολογιών μπαταριών ροής έχουν χρησιμοποιηθεί ή μπορούν δυνητικά να χρησιμοποιηθούν για χρηστικές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, όπως της *οξειδοαναγωγής βαναδίου*, του βρωμιούχου ψευδαργύρου και του βρωμιούχου πολυσουλφιδίου, που περιγράφονται στις ακόλουθες τρεις (3) υποενότητες [79].

### 6.3.7.1 Μπαταρίες οξειδοαναγωγής βαναδίου (Vanadium Redox Flow Batteries, VRB)

Το VRB θεωρείται ένα από τα πιο ώριμα συστήματα μπαταριών ροής. Όπως περιγράφεται στο **Σχήμα 6.9**, το σύστημα VRB αποθηκεύει ενέργεια χρησιμοποιώντας ζεύγη οξειδοαναγωγής βαναδίου ( $\text{Red}_A^+/\text{Ox}_A^+$  και  $\text{Red}_B^+/\text{Ox}_B^+$ ) σε δύο δεξαμενές ηλεκτρολυτών. Το γεγονός της εκμετάλλευσης του βαναδίου σε αυτές τις τέσσερις (4) καταστάσεις οξείδωσης, κάνει τη μπαταρία ροής να έχει μόνο ένα ενεργό στοιχείο τόσο στην άνοδο, όσο και στην κάθοδο. Κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης, τα ιόντα  $H^+$  ανταλλάσσονται μέσω της επιλεκτικής μεμβράνης ιόντων. Η τάση του κελιού είναι περίπου 1.4 V [68,79].

Τα συστήματα VRB έχουν γρήγορες αποκρίσεις (γρηγορότερα από 0.001 s) και μπορούν να λειτουργήσουν για 10000 έως περισσότερους από 16000 κύκλους. Έχουν σχετικά υψηλές αποδόσεις, έως και ~85%, παρέχοντας ταυτόχρονα συνεχή ισχύ (διάρκεια εκφόρτισης 24+ ώρες). Παρ' όλο το γεγονός ότι τα συστήματα αυτά έχουν την τάση επέκτασης σε μεγαλύτερο φάσμα εφαρμογών, ενισχύοντας τη φυσική κλίμακα, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν, όπως η χαμηλή σταθερότητα και διαλυτότητα των ηλεκτρολυτών, οδηγώντας σε χαμηλή ποιότητα ενεργειακής πυκνότητας. Επίσης, η προσπάθεια μείωσης του σχετικά υψηλού κόστους λειτουργίας των συστημάτων VRB είναι ένας λόγος που θα συντελέσει στη αύξηση της χρήσης τους.

Τα συστήματα VRB μπορούν να βρουν πεδίο χρήσης σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης κυρίως της βελτίωσης της ποιότητας ισχύος που χρησιμοποιείται για σταθερές εφαρμογές και συσκευές UPS, βελτιώνοντας την εξισορρόπηση του φορτίου και την ασφάλεια ισχύος, υποστηρίζοντας τη διακοπτόμενη φύση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [79].

### 6.3.7.2 Μπαταρίες βρωμιούχου ψευδαργύρου (Zinc Bromine Flow Batteries, ZnBr)

Οι μπαταρίες ροής ZnBr ανήκουν στην κατηγορία των μπαταριών υβριδικής ροής. Εντός μίας μπαταρίας ZnBr, δύο υδατικά διαλύματα ηλεκτρολυτών περιέχουν τα αντιδραστικά συστατικά, τα οποία βασίζονται σε στοιχεία ψευδάργυρου και βρωμίου, αποθηκευμένα σε δύο εξωτερικές δεξαμενές. Κατά τη διάρκεια των φάσεων φόρτισης/εκφόρτισης, τα δύο διαλύματα ηλεκτρολυτών ρέουν μέσω της στοιβάς κελιών που αποτελείται από σύνθετα ηλεκτρόδια άνθρακα-πλαστικού με διαμερίσματα (τμήματα). Οι αναστρέψιμες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις συμβαίνουν σε αυτά τα ηλεκτρολυτικά κελιά.

Η μπαταρία ροής ZnBr έχει σχετικά υψηλή πυκνότητα ενέργειας (~30–65 Wh/L) και τάση κυψέλης (1.8 V). Έχει επίσης ικανότητα βαθιάς εκφόρτισης και καλή αναστρεψιμότητα. Τα μεγέθη των μονάδων ποικίλλουν από 3 kW έως 500 kW, με εκτιμώμενη διάρκεια ζωής 10 έως 20 χρόνια και διάρκεια εκφόρτισης έως και 10 ώρες.



Τα μειονεκτήματα της μπαταρίας ZnBr είναι: διάβρωση υλικού, σχηματισμός δενδρίτη και σχετικά χαμηλή απόδοση κύκλου (περίπου 65–75%) σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τις εφαρμογές της. Επιπλέον, οι μπαταρίες ZnBr λειτουργούν συνήθως σε στενό εύρος θερμοκρασίας [79].

### 6.3.7.3 Μπαταρίες βρωμιούχου πολυσουλφιδίου (Polysulfide Bromine Flow Batteries, PSB)

Ένα σύστημα PSB χρησιμοποιεί βρωμιούχο και πολυθειούχο νάτριο ως ηλεκτρολύτες διαλύματος άλατος. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων PSB είναι: τα υλικά δύο ηλεκτρολυτών είναι άφθονα, οικονομικά και εξαιρετικά διαλυτά σε υδατικούς ηλεκτρολύτες. Η τάση που παράγεται κατά μήκος της μεμβράνης είναι περίπου 1.5 V, με γρήγορο χρόνο απόκρισης, αντιδρώντας εντός 20 ms. Τα PSB έχουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών πεδίων εφαρμογής, ειδικά για τον έλεγχο συχνότητας του συστήματος ισχύος και τον έλεγχο τάσης λόγω της χαρακτηριστικής της γρήγορης απόκρισής τους. Η παραγωγή κατά τη διάρκεια των χημικών αντιδράσεων κρυσταλλών βρωμίου και θειικού νατρίου, ενδέχεται να ενέχει περιβαλλοντικούς κινδύνους [79].

## 6.4 Εναλλακτικοί τύποι μπαταριών

### 6.4.1 Μπαταρίες ψευδαργύρου–αέρα

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου–αέρα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας οξείδωσης ψευδαργύρου και οξυγόνου από τον αέρα. Κάθε κελί μπορεί να παράγει τάση 1.65 V. Ωστόσο, τα κελιά με τάση 1.4 V και χαμηλότερη, επιτυγχάνουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Για την ενεργοποίηση της μπαταρίας, ο χρήστης αφαιρεί μια γλωττίδα στεγανοποίησης που επιτρέπει τη ροή αέρα. Η μπαταρία φτάνει σε πλήρη τάση λειτουργίας μέσα σε 5 δευτερόλεπτα. Η ροή αέρα μπορεί να ελέγξει τον ρυθμό της αντίδρασης και μετά την ενεργοποίησή της, η μπαταρία δεν μπορεί να επανέλθει σε κατάσταση αναμονής. Με την προσθήκη μίας ταινίας σταματά η ροή του αέρα και επιβραδύνεται μόνο η χημική δραστηριότητα της μπαταρίας, μέχρις ότου αποφορτιστεί πλήρως (σύντομη διαδικασία). Οι ομοιότητες των μπαταριών ψευδαργύρου–αέρα με τις κυψέλες καυσίμου (PEMFC) είναι πολλές, αφού και οι δύο χρησιμοποιούν οξυγόνο από τον αέρα για να τροφοδοτήσουν το θετικό ηλεκτρόδιο. Θεωρείται ως κύρια μπαταρία, δοκιμασμένη για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Η επαναφόρτιση πραγματοποιείται με την αντικατάσταση των χρησιμοποιημένων ηλεκτροδίων ψευδαργύρου, τα οποία μπορεί να έχουν τη μορφή πάστας ηλεκτρολυτών ψευδαργύρου. Άλλες μπαταρίες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν σφαιρίδια ψευδαργύρου.

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου–αέρα έχουν υψηλή ειδική ενέργεια (300–400 Wh/kg), αλλά χαμηλή ειδική ισχύ. Το κόστος κατασκευής είναι χαμηλό και σε κλειστή κατάσταση, παρουσιάζουν ποσοστό αυτοεκφόρτισης 2% σε ετήσια βάση. Είναι ευαίσθητες σε ζεστές/κρύες

θερμοκρασίες και στην υψηλή υγρασία. Η ρύπανση επηρεάζει επίσης την απόδοση τους. Η υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα μειώνει την απόδοση αυξάνοντας την εσωτερική αντίσταση. Τυπικές εφαρμογές είναι τα ακουστικά βαρηκοΐας, ενώ σε μεγαλύτερη κλίμακας συστήματα βρίσκουν εφαρμογή στη σηματοδότηση των σιδηροδρόμων, τους λαμπτήρες ασφαλείας εργοταξίων κ.λπ. [94].

#### **6.4.2 Μπαταρίες σιδήρου–αέρα**

Οι μπαταρίες σιδήρου–αέρα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω διαδικασίας πανομοιότυπης με αυτήν των μπαταριών ψευδαργύρου–αέρα, με μόνη διαφορά το είδος των τελικών προϊόντων της ανοδικής οξειδωσης, τα οξείδια του σιδήρου  $Fe_2O_3$  και  $Fe_3O_4$ . Ο τύπος της μπαταριών αυτών θεωρείται ο φθηνότερος μεταξύ των ηλεκτροχημικών πηγών ενέργειας. Παλαιότερα, χρησιμοποιούνταν σε απομακρυσμένα, μη επανδρωμένα συστήματα, όπως την τροφοδοσία συστημάτων σηματοδότησης σιδηροδρόμων, εξαιτίας της μεγάλης χωρητικότητας και φυσικού μεγέθους τους. Η περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη των μπαταριών σιδήρου – αέρα οδήγησε σε βελτίωση της χωρητικότητας των κελιών και των κύκλων λειτουργίας τους. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το πρόβλημα της διάβρωσης του σιδήρου λόγω της έκλυσης υδρογόνου, κάτι που όμως αντιμετωπίστηκε με την προσθήκη των  $FeS$  και  $K_2S$  [07].

# Κεφάλαιο 7

## Σύγκριση και Αξιολόγηση Ηλεκτροχημικών Πηγών Αποθήκευσης Ενέργειας

### 7.1 Χαρακτηριστικά μπαταριών μολύβδου–οξέος

Οι μπαταρίες μολύβδου–οξέος διατηρούν μια ισχυρή βάση, αποτελώντας στιβαρή και αξιόπιστη λύση με χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με άλλες χημικές ουσίες. Η παγκόσμια αγορά μπαταριών μολύβδου–οξέος βρίσκεται σε διαρκή ανάπτυξη, παρά το γεγονός ότι υφίστανται πλέον αποδοτικότερα συστήματα αποθήκευσης. Η χρήση τους συνιστάται για εφαρμογές αναμονής που απαιτούν μικρό αριθμό κύκλων βαθιάς εκφόρτισης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις μπαταρίες εκκίνησης [95]. Ο Πίνακας 7.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης μολύβδου–οξέος.

Πίνακας 7.1 – Σύνοψη χαρακτηριστικών των συστημάτων αποθήκευσης μολύβδου–οξέος [95]

Χημεία	Starter (SLI) Flooded, Sealed	Deep-cycle Flooded, Sealed	AGM VRLA*	Gel VRLA*	Advanced Lead Carbon (ALC)
Τύπος	Πολλές λεπτές πλάκες αυξάνουν την επιφάνεια για παροχή υψηλού ρεύματος, μη αδιάβροχο	Λιγότερες παχιές πλάκες δίνουν υψηλή χωρητικότητα και ανθεκτικότητα, μη αδιάβροχο	Το θειικό οξύ απορροφάται από ένα λεπτό στρώμα από fiberglass, αδιάβροχο	Ο ηλεκτρολύτης εναιωρείται σε γέλη τύπου silica, αδιάβροχο	Η άνοδος άνθρακα βελτιώνει την απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης
Ονομαστική τάση	2.0 V				
Τάση πλήρους φόρτισης	2.45 V σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλότερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες		2.40 V ή μεγαλύτερη	2.40 V ή μικρότερη	2.45 V
Τάση φόρτισης επίπλευσης	2.30 V σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλότερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες		2.25 – 2.30 V, ευαισθησία στην υπερφόρτιση		2.30 V
Τάση πλήρους εκφόρτισης	1.75 V, πρέπει να επαναφορτιστεί για να αποφευχθεί η θείωση				1.75 V
Ειδική ενέργεια	30 – 50 Wh/kg				20 – 30 Wh/kg, ορισμένα είναι υψηλότερα
Ρυθμός φόρτισης	0.1 – 0.05C (χρόνος φόρτισης 16 ωρών για πλήρη κορεσμό)				2 – 4 φορές γρηγορότερα
Ρυθμός εκφόρτισης	Υψηλό στιγμιαίο ρεύμα	Συνεχές μέτριο ρεύμα	Μέτριο έως υψηλό ρεύμα		Υψηλό ρεύμα

<b>Κύκλος ζωής (πλήρες DoD)</b>	12 – 15	150 – 200, μεγαλύτερος αν δεν εκφορτιστεί κάτω από 60% SoC	5 – 10 χρόνια για UPS	Καλύτερος από τυπικό σύστημα μολύβδου–οξέος	
<b>Συντήρηση</b>	Ο τύπος “flooded” χρειάζεται νερό, φόρτιση 16 ωρών κάθε 6 μήνες για να αποφευχθεί η θείωση	Χωρίς συντήρηση, λιγότερο επιρρεπές στη θείωση, δεν μπορεί να προστεθεί νερό		Λιγότερο επιρρεπές στη θείωση	
<b>Λειτουργίες αστοχίας</b>	Θείωση, απόρριψη, εξάντληση δραστικού υλικού, διάβρωση			Άγνωστες	
<b>Συσκευασία</b>	Πρότυπη για τοποθέτηση στη βάση οχήματος	Πρότυπη, μοναδικά μεγέθη	30 – 100 Ah τυπική, μοναδικά μεγέθη	Μικρά και μεγάλα μεγέθη	Πρότυπη για την τοποθέτηση σε οχήματα, κ.ά.
<b>Περιβαλλοντικές επιπτώσεις</b>	Ο μολύβδος είναι τοξικός, ο ηλεκτρολύτης είναι καυστικός		Το AGM και το Gel περιέχουν λιγότερο μολύβδο και ηλεκτρολύτη, να αποφεύγεται η θερμότητα, χρήση ειδικού φορτιστή		Τοξικό
<b>Ιστορικό</b>	Η παλαιότερη επαναφορτιζόμενη μπαταρία από τον Gaston Planté (1859), επικάλυψη φύλλου μολύβδου με οξειδία μολύβδου (1880)		Gates Energy, ΗΠΑ, στις αρχές της δεκαετίας του 1970	Sonnenschein, Γερμανία, δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στα μέσα της δεκαετίας του 1950	Νέα τεχνολογία, πειραματισμός, εξατομίκευση
<b>Εφαρμογές</b>	SLI (μίζα, φωτισμός, ανάφλεξη) για οχήματα	UPS, τροχοφόρα κινητικότητα	Στρατός, αεροσκάφη, start-stop, racing, NASCAR, ναυτιλία	UPS, τροχοφόρα κινητικότητα, λεωφορεία, φορτηγά, βιομηχανία	Οχήματα, στρατός, αποθήκευση ενέργειας
<b>Σχόλια</b>	Κατάλληλο για SLI, χαμηλή τιμή, μεγάλο εύρος θερμοκρασίας	Ιδανικό για UPS που απαιτούν λίγους κύκλους	Υψηλές πωλήσεις, οικονομικά αποδοτικό, γρήγορη φόρτιση, υψηλή ισχύς χωρίς να μεταφέρει θερμότητα (όπως και το Gel), αποδίδει καλά όταν είναι κρύο	Περιβαλλοντικά φιλικότερο, υψηλός αριθμός κύκλων, λιγότερο επιρρεπές στη θείωση, χρειάζεται σωστή φόρτιση, δαπανηρό, ανεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες. χαμηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης	Καλύτερη αποδοχή φόρτισης για αναγεννητική πέδηση, μεγαλύτερης διάρκειας

\* Το AGM και το Gel είναι μπαταρίες VRLA (μπαταρίες μολύβδου–οξέος ρυθμιζόμενες με βαλβίδες – Valve Regulated Lead Acid, VRLA). Ο ηλεκτρολύτης έχει ακινητοποιηθεί.

## 7.2 Χαρακτηριστικά μπαταριών με βάση το νικέλιο

Οι μπαταρίες με βάση το νικέλιο βρίσκονται μεταξύ των μπαταριών μολύβδου–οξέος και ιόντων–λιθίου. Είναι ασφαλείς, οικονομικές, διαρκούν πολλά χρόνια, αλλά διατίθενται όλο και περισσότερο σε εξειδικευμένες αγορές [96]. Ο Πίνακας 7.2 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης (του παρελθόντος, του παρόντος και του μέλλοντος) με βάση το νικέλιο.

**Πίνακας 7.2** – Σύνοψη χαρακτηριστικών των συστημάτων αποθήκευσης με βάση το νικέλιο [96]

Χημεία	Νικελίου – Καδμίου	Νικελίου – Υδριδίου μετάλλου	Νικελίου – Σιδήρου	Νικελίου – Ψευδαργύρου	Νικελίου – Υδρογόνου
<b>Συντομογραφία</b>	NiCd	NiMH	NiFe	NiZn	NiH
<b>Τύπος</b>	Κάθοδος νικελίου, άνοδος καδμίου	Κάθοδος νικελίου, άνοδος απορρόφησης του υδρογόνου	Κάθοδος οξειδίου– υδροξειδίου, άνοδος σιδήρου με ηλεκτρολύτη υδροξειδίου του καλίου	Παρόμοιο με το NiCd, χρησιμοποιεί αλκαλικό ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόδιο νικελίου	Ηλεκτρόδια νικελίου, ηλεκτρόδια υδρογόνου, σε δοχείο υπό πίεση
<b>Ονομαστική τάση</b>	1.20 V/κελί (1.25 V)		1.20 V	1.65 V	1.25 V
<b>Φόρτιση</b>	Φορτιστής Taper, σταθερό ρεύμα, τάση επίτευξης		Φορτιστής Taper, παρόμοια με το NiCd	Φορτιστής Taper, παρόμοια με το NiCd	Ακαθόριστη
<b>Τάση πλήρους φόρτισης</b>	Παρατηρείται πτώση τάσης, τάση plateau ως παράκαμψη			1.9 V	Ακαθόριστη
<b>Τελική τάση</b>	0.1C	0.05C	Ακαθόριστη	Χωρίς τελική τάση	Ακαθόριστη
<b>Ειδική ενέργεια</b>	45 – 80 Wh/kg	60 – 120 Wh/kg	50 Wh/kg	100 Wh/kg	40 – 75 Wh/kg
<b>Ρυθμός φόρτισης</b>	Μπορεί να είναι πάνω από 1C	0.5 – 1C	Ακαθόριστος	Τακτική φόρτιση	Ακαθόριστος
<b>Ρυθμός εκφόρτισης</b>	Μπορεί να είναι πάνω από 1C	1C	Μέτριος	Σχετικά υψηλής ισχύος	Ακαθόριστος
<b>Κύκλος ζωής (πλήρες DoD)</b>	1000	300 – 500	20 χρόνια με UPS	200 – 300	Πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (μερικώς >70000)
<b>Συντήρηση</b>	Πλήρης αποφόρτιση κάθε 3 μήνες (μηνίμη)	Πλήρης αποφόρτιση κάθε 6 μήνες	Ακαθόριστο	Ακαθόριστο	Χωρίς συντήρηση, χαμηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης
<b>Λειτουργίες αστοχίας</b>	Η μνήμη μειώνει τη χωρητικότητα, αναστρέψιμη	Μνήμη (λιγότερο επηρεασμένη από το NiCd)	Η υπερφόρτιση προκαλεί ξήρανση	Μικρή διάρκεια ζωής λόγω ανάπτυξης δενδρίτη	Ελάχιστη διάβρωση
<b>Συσκευασία</b>	A, AA, C, επίσης σε κλασματικά μεγέθη	A, AA, AAA, C, πρισματική	Ακαθόριστη	AA και άλλοι τύποι	Κατά παραγγελία, κάθε κελί κοστίζει άνω των 1000€
<b>Περιβαλλοντικές επιπτώσεις</b>	Ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, τοξικό	Θεωρείται μη τοξικό	Κακή απόδοση όταν είναι κρύο	Καλό εύρος θερμοκρασίας	Λειτουργεί από –28 °C έως +54 °C
<b>Ιστορικό</b>	1899, σφραγισμένη έκδοση που έγινε εμπορική το 1947	Η έρευνα ξεκίνησε το 1967, εμπορική τη δεκαετία του 1980, προέρχεται από νικέλιο–υδρογόνο	1901, ο Thomas Edison κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και προώθησε το NiFe αντί του μολύβδου– οξέος, απέτυχε να	1901, ο Thomas Edison έλαβε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας των ΗΠΑ για την μπαταρία NiZn	Προβλήματα αστάθειας το 1967 προκάλεσαν μία στροφή από το NiMH στο NiH

			πιστοποιηθεί κατά ICE και EV		
<b>Εφαρμογές</b>	Κύρια μπαταρία σε αεροσκάφη (flooded), μεγάλο εύρος θερμοκρασίας	Υβριδικά αυτοκίνητα, καταναλωτές, UPS	Γερμανικές ιπτάμενες βόμβες V-1, πύραυλοι V-2, σιδηροδρομική σηματοδότηση, UPS, εξόρυξη	Ανανεωμένο ενδιαφέρον για την εμπορική αγορά με βελτιώσεις	Αποκλειστικά για δορυφόρους, πολύ ακριβό για επίγεια χρήση
<b>Σχόλια</b>	Στιβαρό, λανθάνουσας μνήμης, υψηλή συντήρηση, μόνο με μπαταρία που μπορεί να φορτιστεί εξαιρετικά γρήγορα με μικρή πίεση	Πιο ευαίσθητο από το NiCd, μεγαλύτερης χωρητικότητας, λιγότερη συντήρηση	Το 1990, το Cd αντικαταστάθηκε με Fe για εξοικονόμηση χρημάτων, υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης και κόστος κατασκευής	Υψηλή ισχύς, καλό εύρος θερμοκρασίας, χαμηλό κόστος, υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, μικρή διάρκεια ζωής	Χρησιμοποιεί ένα μεταλλικό κάθιστρο για την αποθήκευση υδρογόνου στα 8270 kPa (1200 psi)

### 7.3 Χαρακτηριστικά μπαταριών ιόντων–λιθίου

Ο όρος “ιόντα–λιθίου” υποδηλώνει μία οικογένεια μπαταριών που μοιράζονται πολλές ομοιότητες, αλλά η χημεία τους μπορεί να διαφέρει κατά πολύ. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες λιθίου–οξείδιο του κοβαλτίου, λιθίου–οξείδιο του μαγγανίου, NMC και λιθίου–αλουμινίου κοβαλτίου νικελίου είναι όμοιες στην παροχή υψηλής χωρητικότητας και χρησιμοποιούνται σε φορητές εφαρμογές. Οι μπαταρίες λιθίου–φωσφορικού άλατος σιδήρου και τιτανικού λιθίου παρουσιάζουν χαμηλότερες τάσεις κι έχουν μικρότερη χωρητικότητα, αλλά είναι πολύ ανθεκτικές, βρίσκοντας χρήση κυρίως σε τροχοφόρα οχήματα και άλλες στάσιμες χρήσεις [97]. Ο Πίνακας 7.3 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των κύριων μπαταριών ιόντων–λιθίου (οι πειραματικές και λιγότερο συνηθισμένες μπαταρίες λιθίου δεν αναφέρονται).

**Πίνακας 7.3** – Σύνοψη χαρακτηριστικών των κύριων τύπων των συστημάτων αποθήκευσης ιόντων–λιθίου [97]

Χημεία	Λιθίου–οξείδιο του κοβαλτίου	Λιθίου–οξείδιο του μαγγανίου	Λιθίου–οξείδιο νικελίου μαγγανίου	Λιθίου–φωσφορικού άλατος σιδήρου	Λιθίου–αλουμινίου κοβαλτίου νικελίου	Οξείδιο τιτανικού λιθίου
<b>Σύντομη μορφή</b>	Li–cobalt	Li–manganese	NMC	Li–phosphate	Li–aluminum	Li–titanate
<b>Συντομογραφία</b>	LiCoO <sub>2</sub> (LCO)	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	LiNiMnCoO <sub>2</sub> (NMC)	LiFePO <sub>4</sub> (LFP)	LiNiCoAlO <sub>2</sub> (NCA)	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> (LTO)
<b>Ονομαστική τάση</b>	3.60 V	3.70 V (3.80 V)	3.60 V (3.70 V)	3.20 V, 3.30 V	3.60 V	2.40 V
<b>Τάση πλήρους φόρτισης</b>	4.20 V	4.20 V	4.20 V (ή υψηλότερη)	3.65 V	4.20 V	2.85 V

<b>Τάση πλήρους εκφόρτισης</b>	3.00 V	3.00 V	3.00 V	2.50 V	3.00 V	1.80 V
<b>Ελάχιστη τάση</b>	2.50 V	2.50 V	2.50 V	2.00 V	2.50 V	~1.50 V
<b>Ειδική ενέργεια</b>	150 – 200 Wh/kg	100 – 150 Wh/kg	150 – 220 Wh/kg	90 – 120 Wh/kg	200 – 260 Wh/kg	70 – 80 Wh/kg
<b>Ρυθμός φόρτισης</b>	0.7 – 1C (3 ώρες)	0.7 – 1C (3 ώρες)	0.7 – 1C (3 ώρες)	1C (3 ώρες)	1C	1C (5C μέγιστο)
<b>Ρυθμός εκφόρτισης</b>	1C (1 ώρα)	1C, με δυνατότητα 10C	1 – 2C	1C (25C rule)	1C	Δυνατότητα 10C
<b>Κύκλος ζωής (ιδανικός)</b>	500 – 1000	300 – 700	1000 – 2000	1000 – 2000	500	3000 – 7000
<b>Θερμική εκφυγή</b>	150 °C (υψηλότερη όταν είναι αφορτιστη)	250 °C (υψηλότερη όταν είναι αφορτιστη)	210 °C (υψηλότερη όταν είναι αφορτιστη)	270 °C (ασφαλής σε πλήρη φόρτιση)	150 °C (υψηλότερη όταν είναι αφορτιστη)	Από τις πιο ασφαλείς μπαταρίες ιόντων – λιθίου
<b>Συντήρηση</b>	Συντήρηση σε συνθήκες δροσιάς, αποθήκευση σε κατάσταση μερικής φόρτισης, αποτροπή κύκλων πλήρους φόρτισης, χρησιμοποίηση μέτριων ρευμάτων φόρτισης και εκφόρτισης					
<b>Συσκευασία (τυπική)</b>	18650, πρισματική και θήκης	Πρισματική	18650, πρισματική και θήκης	26650, πρισματική	18650	Πρισματική
<b>Ιστορικό</b>	1991 (SONY)	1996	2008	1996	1999	2008
<b>Εφαρμογές</b>	Κινητά τηλέφωνα, tablet, φορητοί υπολογιστές, κάμερες	Ηλεκτρικά εργαλεία, ιατρικές συσκευές, κινητήρες	Ηλεκτρονικά ποδήλατα, ιατρικές συσκευές, EVs, βιομηχανία	Σταθερές εφαρμογές με υψηλά ρεύματα και μεγάλη αντοχή	Ιατρική, βιομηχανία, EVs (TESLA)	UPS, EVs, ηλιακός φωτισμός δρόμων
<b>Σχόλια</b>	Υψηλή ενέργεια, περιορισμένη ισχύς, το μερίδιο αγοράς έχει σταθεροποιηθεί	Υψηλή ισχύς, λιγότερη χωρητικότητα, ασφαλέστερο από το Li-cobalt, συχνά αναμιγνύεται με NMC για βελτίωση της απόδοσης	Υψηλή χωρητικότητα, υψηλή ισχύς, το μερίδιο αγοράς αυξάνεται, επίσης NCM, CMN, MNC, MCN	Επίπεδη τάση εκφόρτισης, υψηλή ισχύς χαμηλής χωρητικότητας, πολύ ασφαλής, αυξημένο ποσοστό αυτοεκφόρτισης	Υψηλότερη χωρητικότητα με μέτρια ισχύ, παρόμοιο με το Li-cobalt.	Μεγάλη διάρκεια ζωής, γρήγορη φόρτιση, μεγάλο εύρος θερμοκρασίας, ασφαλές, χαμηλή χωρητικότητα, δαπανηρό.

## 7.4 Χαρακτηριστικά εναλλακτικών τύπων μπαταριών

Ο Πίνακας 7.4 συνοψίζει τις λιγότερο κοινές μπαταρίες που εξυπηρετούν διάφορες εξειδικευμένες αγορές.

**Πίνακας 7.4** – Σύνοψη χαρακτηριστικών των κοινών εναλλακτικών συστημάτων αποθήκευσης και ισοδύναμων [98]



Χημεία	Θείου–νατρίου, χλωριούχου νατρίου νικελίου (ZEBRA)	Ψευδαργύρου–αέρα (όλων των βαθμίδων)	Ψευδαργύρου–ασημιού, οξειδίο του αργύρου	Επαναχρησιμοποιήσιμες αλκαλικές
Τύπος	Τετηγμένο αλάτι (Na) και θείο (S), οικονομικό με μεγαλύτερα μεγέθη (σύμβολο: NaS)	Κυρίως πρωτοβάθμιος, πολλές ομοιότητες με τις κυψέλες καυσίμου	Ο τύπος ψευδαργύρου–ασημιού είναι επαναφορτιζόμενος, προτεύον είναι το οξειδίο του αργύρου	Αλκαλικές μίας χρήσης, καθίστανται επαναχρησιμοποιήσιμες, κόστος παρόμοιο με τους κανονικούς τύπους
Τάση ανά κελί	2.58 V	1.40 – 1.65 V	1.60 V	1.50 V
Ειδική ενέργεια	90 – 120 Wh/kg	300 – 400 Wh/kg	250 Wh/kg	200 Wh/kg, ελάττωση σε κάθε επόμενη φόρτιση
Ενεργοποίηση	Λειτουργία στους 270 – 350 °C	Η αφαίρεση της σφράγισης επιτρέπει τη ροή του αέρα	Άμεση	Άμεση
Φόρτιση	Ολονύκτια φόρτιση	Φόρτιση με αντικατάσταση ηλεκτροδίων ψευδαργύρου	Παρόμοια με το Li-ion	Περιορισμός τάσης (1.60 – 1.70 V)
Εκφόρτιση	“Εκρηξη” υψηλής ισχύος	Χαμηλό φορτίο	Παρόμοια με το Li-ion	Χαμηλό φορτίο (200 – 400 mA)
Κύκλος ζωής	3000 κύκλοι, 8 χρόνια	Μόλις ενεργοποιηθεί, η μπαταρία καταναλώνεται	Μικρή διάρκεια ζωής, 2 χρόνια	50, ανάλογα με το DoD, απαιτεί συχνή φόρτιση
Συντήρηση	Διατήρηση της μπαταρίας ζεστή	Ενεργοποίηση μόνο όταν χρειάζεται	Διατήρηση αποθέματος σε χαμηλά επίπεδα	Να μην εκφορτίζεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα
Λειτουργίες αστοχίας	Βραχυκύκλωμα λόγω διάβρωσης	Ευαίσθητο στο κρύο, τη ζέστη, την υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση	Αποσύνθεση ηλεκτροδίων ψευδαργύρου και διαχωριστή. Οι κύκλοι προκαλούν σχηματισμό δενδρίτη	50% πτώση χωρητικότητας στη 2 <sup>η</sup> φόρτιση, αυξανόμενη εσωτερική αντίσταση
Συσκευασία	Μεγάλα συστήματα 10 kWh και άνω	Κυρίως μικρά μεγέθη	Σχήμα κουμπιού (ασήμι–ψευδάργυρος)	AA, AAA, C, D, 9V
Ιστορικό	Επινοήθηκε από Γερμανούς στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, το NaS απέκτησε νέο ενδιαφέρον τη δεκαετία του 1970	Το “Breathing” που ανακαλύφθηκε από τον Leclanché το 1878, προσφέρθηκε σε αγοραστές το 1932	Χρήση σε διαστημικά σκάφη λόγω υψηλής χωρητικότητας (αντικαταστάθηκε από μπαταρίες ιόντων–λιθίου)	Παρουσιάστηκε το 1992, εναλλακτική λύση έναντι των αναλώσιμων μορφών, χωρίς διαρροές
Εφαρμογές	Κύρια: Πύραυλοι μίας βολής, Δευτερεύουσα: UPS, ισοστάθμιση φορτίου, EVs, φορτηγά παραδόσεων	Ακουστικά βαρηκοΐας, μεγάλες μονάδες σιδηροδρομικής σηματοδότησης, λαμπτήρες ασφαλείας ορυχείων	Κύρια: Ρολόγια, δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας μνήμης, Δευτερεύουσα: αεροδιαστημική, βλήματα, στρατός, τηλεοπτικές κάμερες	Φακοί, παιχνίδια, συσκευές ψυχαγωγίας
Σχόλια	Η θέρμανση καταναλώνει το 14% της ενέργειας της μπαταρίας ανά ημέρα	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος, μίας μόνο χρήσης	Τα νέα σχέδια δείχνουν αύξηση χωρητικότητας σε σχέση με το Li-ion: ακριβή πρώτη ύλη	Οι κοινές αλκαλικές μπαταρίες δεν πρέπει να φορτίζονται: κίνδυνος διαρροής, αερίου, έκρηξης

Ο Πίνακας 7.5 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά συσκευών, οι οποίες αναφέρονται ως “ημι-μπαταρίες”, λόγω της ομοιότητας των ηλεκτροχημικών αντιδράσεών τους με αυτές μίας πραγματικής μπαταρίας. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι οι υπερπυκνωτές και οι κυψέλες καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια μπαταρία αντίστροφης διαδικασίας. Η υπερφόρτιση της μπαταρίας μετατρέπει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο (αεριοποίηση), ενώ η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρισμό και νερό συνδυάζοντας υδρογόνο και οξυγόνο [98].

**Πίνακας 7.5** – Σύνοψη των πιο συνηθισμένων συστημάτων αποθήκευσης που αποκλίνουν από την ηλεκτροχημική έννοια της μπαταρίας [98]

Χημεία	Υπερπυκνωτής	Μπαταρία ροής	Κυψέλη καυσίμου
<b>Τύπος</b>	Πυκνωτής διπλής στρώσης, αποθηκεύει ενέργεια με στατικό φορτίο σε αντίθεση με την ηλεκτροχημική αντίδραση	Επαναφορτιζόμενη, λειτουργεί με χρήση αντλίας, ο ηλεκτρολύτης αποθηκεύεται σε δεξαμενή	Ο συνδυασμός υδρογόνου και οξυγόνου παράγει ηλεκτρισμό
<b>Τάση ανά κελί</b>	Περιορισμένη στα 2.30 – 2.75 V	1.15 – 1.55 V	0.6 – 0.8 V
<b>Ειδική ενέργεια</b>	5 Wh/kg (τυπική)	40 Wh/kg	40 Wh/kg
<b>Ενεργοποίηση</b>	Άμεση	Υποτονική ράμπα	Υποτονική ράμπα
<b>Φόρτιση</b>	1 – 10 s, απλή φόρτιση, το ρεύμα σταματά όταν φορτιστεί πλήρως	Ολονύκτια φόρτιση	Τροφοδοσία υδρογόνου μέσω της δεξαμενής
<b>Εκφόρτιση</b>	Πολύ υψηλή ισχύς	Χαμηλό ρεύμα φορτίου	Χαμηλό ρεύμα φορτίου
<b>Κύκλος ζωής</b>	1 εκ. κύκλοι, 10 – 15 χρόνια	10000 κύκλοι, 20 χρόνια.	2000 – 4000 ώρες, σταθερός έως και 40000 ώρες
<b>Συντήρηση</b>	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
<b>Λειτουργίες αστοχίας</b>	Η υπέρβαση των ορίων τάσης μειώνει τη διάρκεια ζωής	Υψηλή διάβρωση, το βανάδιο διατηρεί υπό έλεγχο τη διάβρωση	Ζημιές της στοιβας από την παγωνιά και τη θερμότητα, η χωρητικότητα εξασθενεί με τους κύκλους
<b>Συσκευασία</b>	Κυρίως σε κυλινδρικές μορφές	Μεγάλα συστήματα, 20 kWh και άνω	Μεγάλη και φορητή
<b>Περιβαλλοντικές επιπτώσεις</b>	Ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, μη τοξικός	Λειτουργεί περισσότερο σαν διυλιστήριο παρά σαν μπαταρία	Πρέπει να έχει σωστή περιεκτικότητα σε υγρασία, δεν μπορεί να παράγει
<b>Ιστορικό</b>	Η GE πειραματίστηκε το 1956, η Standard Oil ανακάλυψε τη διπλή στρώση το 1966, η NEC τον εμπορευματοποίησε το 1978	Πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1954, οι τρέχοντες τύποι κατοχυρώθηκαν το 1986	Αναπτύχθηκε από τον William Grove το 1839, διαστημικό πρόγραμμα της δεκαετίας του 1960
<b>Εφαρμογές</b>	Εφεδρική μνήμη, εκκίνηση γεννήτριας, συστήματα πολλών MW, σε ανταγωνισμό με σφόνδυλο	Μεγάλο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, οικονομικό όταν έχει μεγάλο μέγεθος	Περονοφόρα, EVs, UPS, φορητή χρήση στον στρατό
<b>Σχόλια</b>	Ακριβό ανά Wh	Η χωρητικότητα ορίζεται από το μέγεθος της δεξαμενής, μπορεί να αυξηθεί εάν απαιτηθεί	Καθαρή μορφή ενέργειας, αλλά ακριβή, ελλειπής ζώνη ισχύος

## 7.5 Χαρακτηριστικά μελλοντικών τύπων μπαταριών

Οι περισσότεροι μελλοντικοί τύποι μπαταριών λειτουργούν πολύ ικανοποιητικά (σε θεωρητικό επίπεδο) αποτυγχάνοντας πολλές φορές να ικανοποιήσουν τις βασικές απαιτήσεις των μπαταριών (υψηλή ειδική ενέργεια και ισχύς, ανταγωνιστική τιμή, μεγάλη διάρκεια ζωής, ασφάλεια, ευρύ φάσμα λειτουργίας, γρήγορη φόρτιση, τοξικότητα). Η μικρή διάρκεια του κύκλου ζωής και τα περιορισμένα ρεύματα φορτίου συχνά εμποδίζουν την εμπορευματοποίηση των καινοτομιών που πηγαίνουν από τη συνεχή έρευνα. Ενώ οι μελλοντικοί τύποι μπαταριών μπορεί να βρουν πεδίο εφαρμογής σε εξειδικευμένες αγορές, πολλοί από αυτούς δεν βγαίνουν ποτέ έξω από το εργαστηριακό περιβάλλον [99]. Ο Πίνακας 7.6 συνοψίζει τους πιο κοινούς, μελλοντικούς τύπους μπαταριών.

**Πίνακας 7.6** – Σύνοψη των πιο κοινών, μελλοντικών τύπων μπαταριών [99]

Χημεία	Λιθίου-αέρα	Λιθίου-μέταλλου	Λιθίου στερεάς κατάστασης	Λιθίου-θείου (Li-S)	Νατρίου-σιδήρου (Na-ion)
Τύπος	Άνοδος λιθίου, κάθοδος αέρα	Άνοδος λιθίου, κάθοδος γραφίτη	άνοδος λιθίου διαχωριστής πολυμερών	άνοδος λιθίου, κάθοδος θείου	Άνοδος άνθρακα, ποικίλες κάθοδοι
Τάση ανά κελί	1.70 – 3.20 V	3.60 V	3.60 V	2.10 V	3.60 V
Ειδική ενέργεια	13 kWh/kg (θεωρητικά)	300 Wh/kg	300 Wh/kg (εκτίμηση)	500 Wh/kg ή λιγότερο	90 Wh/kg
Φόρτιση	Άγνωστη	Ταχεία φόρτιση	Ταχεία φόρτιση	0.2C (5 ώρες)	Άγνωστη
Εκφόρτιση	Χαμηλή ενέργεια, κατώτερη όταν είναι ακόμα κρύα	Μπάντα υψηλής ισχύος	Κακή αγωγιμότητα όταν είναι κρύα	Υψηλή ισχύς (2500 W/kg)	Άγνωστη
Κύκλος ζωής	50 κύκλοι στο εργαστήριο	2500	100, πρωτότυπα	50, αμφισβητείται	50, τυπικός
Συσκευασία	Ακαθόριστη	Ακαθόριστη	Πρισματική	Ακαθόριστη	Ακαθόριστη
Ασφάλεια	Άγνωστη	Απαιτεί βελτιώσεις	Απαιτεί βελτιώσεις	Απαιτείται κύκλωμα προστασίας	Ασφαλής, είναι δυνατή η αεροπορική αποστολή
Λειτουργίες αστοχίας	Το φιλμ υπεροξειδίου του λιθίου σταματά την κίνηση των ηλεκτρονίων με τη χρήση, οι ακαθαρσίες του αέρα προκαλούν ζημιά	Η ανάπτυξη δενδρίτη προκαλεί ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα κατά τη χρήση	Η ανάπτυξη δενδρίτη προκαλεί ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα, κακή χαμηλή θερμοκρασία, επιδόσεις	Το θείο υποβαθμίζεται με τους κύκλους, ασταθείς όταν είναι ζεστές, κακή αγωγιμότητα	Λίγη έρευνα σε αυτόν τον τομέα

<b>Ιστορικό</b>	Ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970, ανανέωσε το ενδιαφέρον τη δεκαετία του 2000, έρευνα και ανάπτυξη από τους IBM, MIT, UC, κ.λπ.	Παραγόταν τη δεκαετία του 1980 από την Moli Energy, προκάλεσε ανάκληση ασφαλείας	Παρόμοιο με το Li-polymer που ξεκίνησε το 1970	Νέα τεχνολογία, έρευνα και ανάπτυξη από την Oxis Energy, την Bosch και άλλες εταιρίες	Αγνοήθηκε στη δεκαετία του 1980 υπέρ του λιθίου, έχει ανανεώσει το ενδιαφέρον
<b>Εφαρμογές</b>	Μη καθορισμένες, δυνατότητα για EVs	EVs, βιομηχανικές και φορητές χρήσεις	ESS, τροχοφόρα κινητικότητα, EVs	Πτήση αεροπλάνου με ηλιακή ενέργεια τον Αύγουστο του 2008	Αποθήκευση ενέργειας
<b>Σχόλια</b>	Δανεισμένο από την ιδέα του “breathing” ψευδάργυρου-αέρα και κυψελών καυσίμου	Η καλή χωρητικότητα, η γρήγορη φόρτιση και η υψηλή ισχύς διατηρούν το ενδιαφέρον σε υψηλά επίπεδα	Παρόμοια με τις μπαταρίες λιθίου-μετάλλου, ενδέχεται να είναι έτοιμη έως το 2030, EVs το 2025	Μπορεί να διαδεχθεί το Li-ion λόγω χαμηλότερου κόστους και υψηλότερης χωρητικότητας	Χαμηλό κόστος στο ίδιο επίπεδο με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, μπορεί να αποφορτιστεί πλήρως

## 7.6 Συγκριτικός πίνακας χαρακτηριστικών μπαταριών

Στον **Πίνακα 7.7** που ακολουθεί συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων πιο συχνά χρησιμοποιούμενων συστημάτων επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου χωρίζονται σε διαφορετικούς τύπους με βάση τα ενεργά υλικά τους, τα οποία είναι το κοβάλτιο, το μαγγάνιο και το φωσφορικό άλας [100].

**Πίνακας 7.7** – Σύνοψη χαρακτηριστικών των συχνά χρησιμοποιούμενων επαναφορτιζόμενων μπαταριών [100]

Χαρακτηριστικά	Μολύβδου-οξέος	NiCd	NiMH	Ιόντων-λιθίου		
				Κοβάλτιο	Μαγγάνιο	Φωσφορικό άλας
Ειδική ενέργεια (Wh/kg)	30 – 50	45 – 80	60 – 120	150 – 250	100 – 150	90 – 120
Εσωτερική αντίσταση	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Μεσαία	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Κύκλος ζωής (80% του DoD)	200 – 300	1000	300 – 500	500 – 1000	500 – 1000	1000 – 2000
Χρόνος φόρτισης	8 – 16 ώρες	1 – 2 ώρες	2 – 4 ώρες	2 – 4 ώρες	1 – 2 ώρες	1 – 2 ώρες
Ανοχή υπερφόρτισης	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή, χωρίς φόρτιση “trickle”		
Αυτοεκφόρτιση ανά μήνα (σε 25 °C)	5%	20%	30%	<5% Το κύκλωμα προστασίας καταναλώνει 3%/μήνα		

<b>Ονομαστική τάση κελιού</b>	2.0 V	1.20 V	1.20 V	3.60 V	3.70 V	3.20 – 3.30 V
<b>Τάση αποκοπής φόρτισης (V/κελί)</b>	2.40 V, επί-πλευσης: 2.25 V	Ανίχνευση πλήρους φόρτισης από τα χαρακτηριστικά της τάσης		4.20 V τυπική, ορισμένες μπαταρίες αποκόπτουν σε μεγαλύτερη τάση		3.60 V
<b>Τάση αποκοπής εκφόρτισης (V/κελί, 1C)</b>	1.75 V	1.00 V		2.50 – 3.00 V		2.50 V
<b>Ρεύμα αιχμής φορτίου (καλύτερο)</b>	5C 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
<b>Θερμοκρασία φόρτισης</b>	-20 έως +50 °C	0 έως +45 °C		0 έως +45 °C		
<b>Θερμοκρασία εκφόρτισης</b>	-20 έως +50 °C	-20 έως +65 °C		-20 έως +60 °C		
<b>Απαιτηση συντήρησης</b>	3 – 6 μήνες (αλλαγή κορυφής)	Πλήρης αποφόρτιση κάθε 90 ημέρες σε πλήρη χρήση		Δεν απαιτείται συντήρηση		
<b>Απαιτήσεις ασφαλείας</b>	Θερμικά σταθερή	Θερμικά σταθερή, προστασία με ασφάλειες		Υποχρεωτικό κύκλωμα προστασίας		
<b>Σε χρήση από...</b>	Τέλη 1980	1950	1990	1991	1996	1999
<b>Τοξικότητα</b>	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή		
<b>Κουλομβική απόδοση</b>	~90%	~70% σε αργή φόρτιση ~90% σε γρήγορη φόρτιση		99%		
<b>Κόστος</b>	Χαμηλό	Μέτριο		Υψηλό		

# Κεφάλαιο 8

## *Εφαρμογή Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας στο Ηλεκτρικό Δίκτυο*

---

Ένα Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας ορίζεται γενικά ως ένα σύνολο στοιχείων που έχει τρεις (3) δυνατότητες [45]:

- να καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια,
- να συσσωρεύει μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας, και στη συνέχεια,
- να χρησιμοποιεί αυτήν την ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Λόγω της αλληλεξάρτησης αυτών των δυνατοτήτων, απαιτείται μια κατάλληλη στρατηγική διαχείρισης. Για παράδειγμα, ένα ΣΑΗΕ μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μόνο αφού καταναλώσει ένα άλλο είδος ενέργειας. Ομοίως, δεδομένου ότι η μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συσσωρευτεί είναι φυσικά περιορισμένη, η ικανότητα του συστήματος να καταναλώνει ενέργεια μπορεί να μειωθεί εάν δεν υφίστανται φάσεις παραγωγής (εκφόρτισης) [45].

Το ηλεκτρικό σύστημα αντιμετωπίζει σήμερα μεγάλες προκλήσεις, όσον αφορά τον προγραμματισμό και τη διαχείριση σε πραγματικό χρόνο, λόγω της εισαγωγής νέων μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση μεταβλητών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και της επιταχυνόμενης ανάπτυξης νέων καταναλωτών, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διατήρηση της ποιότητας και της τιμής της παραδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης προσφέρουν ευελιξία που είναι πολύ χρήσιμη για το ηλεκτρικό σύστημα και τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Η ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να συμβάλλει στη βιώσιμη ανάπτυξη και ως εκ τούτου είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η συμβολή αυτών των συστημάτων προκειμένου να μειωθούν οι επιβλαβείς εκπομπές CO<sub>2</sub> [45].

Τα ΣΑΗΕ είναι κοστοβόρα κι επίσης, το επιπλέον κόστος που προκύπτει από τη χρήση τους στο σύστημα παραγωγής και κατανάλωσης μπορεί να είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με το κόστος εγκατάστασης. Είναι, συνεπώς, απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι η οικονομική βελτίωση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους, θα αντισταθμίσει το επενδυτικό κόστος και το κόστος συντήρησης. Το κόστος αποθήκευσης εξαρτάται από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, από το βαθμό ανάπτυξης τους και αποτελούν προς το παρόν

αντικείμενο πολλών ερευνών. Οι μηχανισμοί της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν επίσης να επηρεάσουν την κερδοφορία των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μηχανισμοί αυτοί διαφέρουν από χώρα σε χώρα και σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον οι καταναλωτές, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα και οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, εξελίσσονται προκειμένου να ευνοήσουν την ανάπτυξη ΑΠΕ. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, μπορούν να θεωρηθούν είτε ως καταναλωτής είτε ή ως πηγή, ανάλογα με το αν αποθηκεύουν ή παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Το γεγονός αυτό επιφέρει το διπλάσιο κόστος για την εγκατάσταση και διασύνδεση των τεχνολογιών αυτών (τόσο ως καταναλωτής, όσο και ως παραγωγός) [45].

Τα οφέλη που αποφέρει η αποθήκευση ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα εξαρτώνται από τον τρόπο εφαρμογής των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν. Με τη σύνδεση στο δίκτυο, τα ΣΑΗΕ παρέχουν μια σειρά υπηρεσιών στους συμμετέχοντες στο ηλεκτρικό σύστημα, από παραγωγούς έως καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένων των φορέων εκμετάλλευσης δικτύου. Οι υπηρεσίες που μπορούν να παρέχουν οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στους διαχειριστές, τους παραγωγούς και τους καταναλωτές στο ΣΗΕ περιλαμβάνουν [45]:

- τοπικό ακριβή και δυναμικό έλεγχο τάσης,
- υποστήριξη δικτύου σε περίπτωση βλάβης,
- επιστροφή τάσης σε τμήματα του δικτύου,
- αντιστάθμιση άεργου ισχύος για διαχειριστές δικτύου και τελικούς καταναλωτές,
- μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας,
- βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας,
- υποστήριξη μονάδων παραγωγής,
- διατήρηση σταθερής συχνότητας, καθώς και ρύθμιση της πρωτεύουσας συχνότητας,
- διαχείριση συμφόρησης δικτύου,
- μετριασμός του φορτίου αιχμής,
- ποιοτική και αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι προαναφερόμενες υπηρεσίες βασίζονται στις επιτελούμενες λειτουργίες των ΣΑΗΕ, όπως: την προγραμματισμένη, έγκαιρη μετεγκατάσταση ενεργειακών μονάδων παραγωγής, τη δημιουργία ικανού αποθεματικού ηλεκτρικής ενέργειας που εξυπηρετεί την κάλυψη των αναγκών του συστήματος ισχύος σε περίπτωση διακοπής, την τροφοδοσία άεργου ισχύος και την εξάλειψη διαταραχών φιλτραρίσματος που επηρεάζουν την κυματομορφή της τάσης (ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών, ανισορροπία, κτλ.) [45].



## 8.1 Ο ρόλος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς

Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς καθορίζει τις υπηρεσίες που πρέπει να παρέχονται από τις τεχνολογίες αποθήκευσης για να διασφαλίζεται η ασφάλεια του συστήματος σε περίπτωση προβλημάτων. Αυτές οι υπηρεσίες συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως *βοηθητικές υπηρεσίες* [45].

### 8.1.1 Συμβολή στη ρύθμιση συχνότητας

Η υπηρεσία ρύθμισης συχνότητας περιλαμβάνει τη διατήρηση της συχνότητας του συστήματος εντός των καθορισμένων ορίων. Αυτό επιτυγχάνεται διατηρώντας μια ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενεργής ισχύος. Η διατήρηση της συχνότητας επιτυγχάνεται με πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα ρύθμιση. Εάν εμφανιστεί κάποια διαταραχή στο σύστημα, επηρεάζεται η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενεργής ισχύος και προκύπτει απόκλιση συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Οι πρωτεύοντες ρυθμιστές στροβίλων ενεργούν σε περίπτωση απόκλισης της συχνότητας μεταβάλλοντας την ισχύ παραγωγής, διαδικασία η οποία ονομάζεται *πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας*. Με τη ρύθμιση αυτή, το σύστημα επανέρχεται σε σταθερή κατάσταση, όμως η συχνότητα διαφέρει από την ονομαστική. Ο ρόλος της *δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας* είναι να καθορίσει την ονομαστική συχνότητα. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, είναι απαραίτητο να μεταβληθούν οι καθορισμένες τιμές της ισχύος παραγωγής των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα ή χειροκίνητα [46].

Σήμερα, η παροχή των υπηρεσιών αυτών βρίσκεται σε ανοδική πορεία κι έτσι οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να βασίζονται στη συμβολή άλλων παραγωγικών πηγών στο ΣΗΕ για να καλύψουν τις απαιτήσεις τους [46].

**Πίνακας 8.1** – Τεχνικά δεδομένα για βοηθητικές υπηρεσίες ελέγχου συχνότητας [45]

Υπηρεσία	Ελάχιστο απόθεμα ισχύος	Χρονική διάρκεια παράδοσης	Μέγιστος χρόνος απόκρισης
Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας	$P_{inst} \geq 40 \text{ MW}$ $P_{res} \geq 2.5\% \text{ από } P_{max}$	$\geq 15 \text{ λεπτά}$	Στο 100% για $\leq 30 \text{ s}$ Στο 50% για $\leq 15 \text{ s}$
Δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας	$P_{inst} \geq 120 \text{ MW}$ $P_{res} \geq 4.5\% \text{ από } P_{max}$	Παραμένει όσο απαιτείται	2 – 13 λεπτά

### 8.1.2 Συμβολή στη ρύθμιση τάσης

Η αρχή της ρύθμισης της τάσης βασίζεται κυρίως στη ρύθμιση της άεργης ισχύος. Η συμβολή στη ρύθμιση της τάσης επιτυγχάνεται μέσω της κατανάλωσης ή της παραγωγής άεργης ισχύος, έχοντας πολύ μικρή επίδραση στο μέγεθος του ΣΑΗΕ (ενώ παράλληλα έχοντας μηδενική επίδραση στην ικανότητα αποθήκευσης). Για παράδειγμα, στην περίπτωση των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών σταθμών και δεξαμενών πεπιεσμένου αέρα (CAES), η γεννήτρια πρέπει να είναι προσαρμοσμένη γι' αυτήν την υπηρεσία, με τους ακόλουθους φυσικούς περιορισμούς: μέγιστη ένταση στάτη, μέγιστη ένταση ρότορα, μέγιστη εσωτερική γωνία, ελάχιστη και μέγιστη τάση στάτη σε σταθερή κατάσταση κ.λπ. Οι πηγές ή τα ΣΑΗΕ συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ενέργειας και παίζουν το ρόλο των ρυθμιστών άεργης ισχύος στο σημείο σύνδεσης. Στην περίπτωση μετατροπέων τάσης, οι περιορισμοί εξαρτώνται από την πραγματική ισχύ εξόδου, τη συνεχή τάση του μετατροπέα και την επαγωγή του συνδεδεμένου φίλτρου [45].

Υπάρχει, επίσης, ένας αριθμός πρόσθετων υπηρεσιών που βοηθούν το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς να εξασφαλίσει τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

### 8.1.3 Τριτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

Ο *τριτεύων έλεγχος* αποτελεί την αυτόματη ή χειροκίνητη ρύθμιση των παραμέτρων των συσκευών που συμμετέχουν στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, για να διασφαλιστεί το απαιτούμενο απόθεμα δευτερεύοντος ελέγχου ή η βέλτιστη κατανομή της ισχύος δευτερεύοντος ελέγχου στις μονάδες παραγωγής που συμμετέχουν στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας [46].

Υπάρχουν πολλά τριτεύοντα αποθέματα ισχύος που χρησιμοποιούνται σε περίπτωση ανάγκης και διαφέρουν ως προς τον χρόνο εκτέλεσης. Η *τριτεύουσα ρύθμιση και στρεφόμενη εφεδρεία* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λιγότερο από 15 λεπτά, ενώ κατά τη διάρκεια της απόκρισης μεταξύ 15 και 30 λεπτών, χρησιμοποιείται η *τριτεύουσα μη στρεφόμενη εφεδρεία* [46].

Προκειμένου να διασφαλιστεί η διαθεσιμότητα τριτευόντων αποθεμάτων ισχύος, συνάπτεται σύμβαση μεταξύ του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς και των ενδιαφερομένων (προμηθευτές, πελάτες). Με αυτόν τον τρόπο, τα αποθέματα ισχύος είναι άμεσα διαθέσιμα στους μηχανισμούς εξισορρόπησης. Απαιτείται σημαντική διαστασιολόγηση της ενέργειας για τα ΣΑΗΕ, λόγω της προϋπόθεσης ότι το απόθεμα ισχύος θα τεθεί σε λειτουργία σ' ένα χρονικό διάστημα αρκετών ωρών. Επιπλέον, το γεγονός ότι αυτή η υπηρεσία πρέπει να είναι διαθέσιμη, περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα χρήσης του συστήματος αποθήκευσης για άλλους σκοπούς [45].

### 8.1.4 Εκκίνηση χωρίς τάση ή μαύρη εκκίνηση (black start)

*Εκκίνηση χωρίς τάση ή μαύρη εκκίνηση* ορίζεται ως η εκκίνηση μιας μονάδας παραγωγής από κατάσταση εκτός λειτουργίας χωρίς την παρουσία τάσης δικτύου, σε κατάσταση ετοιμότητας για συγχρονισμό, δηλαδή ετοιμότητας ανάληψης φορτίου [47].

Μετά από έκτακτα συμβάντα που έχουν προκαλέσει βλάβη ή διακοπή λειτουργίας του συστήματος ισχύος, ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς πρέπει να επανεκκινήσει το δίκτυο προκειμένου να συνεχιστεί η παροχή ρεύματος προς τους καταναλωτές. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, χρησιμοποιούνται σταθμοί παραγωγής ενέργειας που μπορούν να εκκινήσουν χωρίς σύνδεση στο δίκτυο (μαύρη εκκίνηση) ή σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που εξακολουθούν να λειτουργούν ανεπηρέαστα ακόμη και κατά τη διάρκεια αυτών των συμβάντων (λειτουργία νησίδας). Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συμβάλουν στην ανάκτηση του δικτύου, αλλά πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες απαιτήσεις [45]:

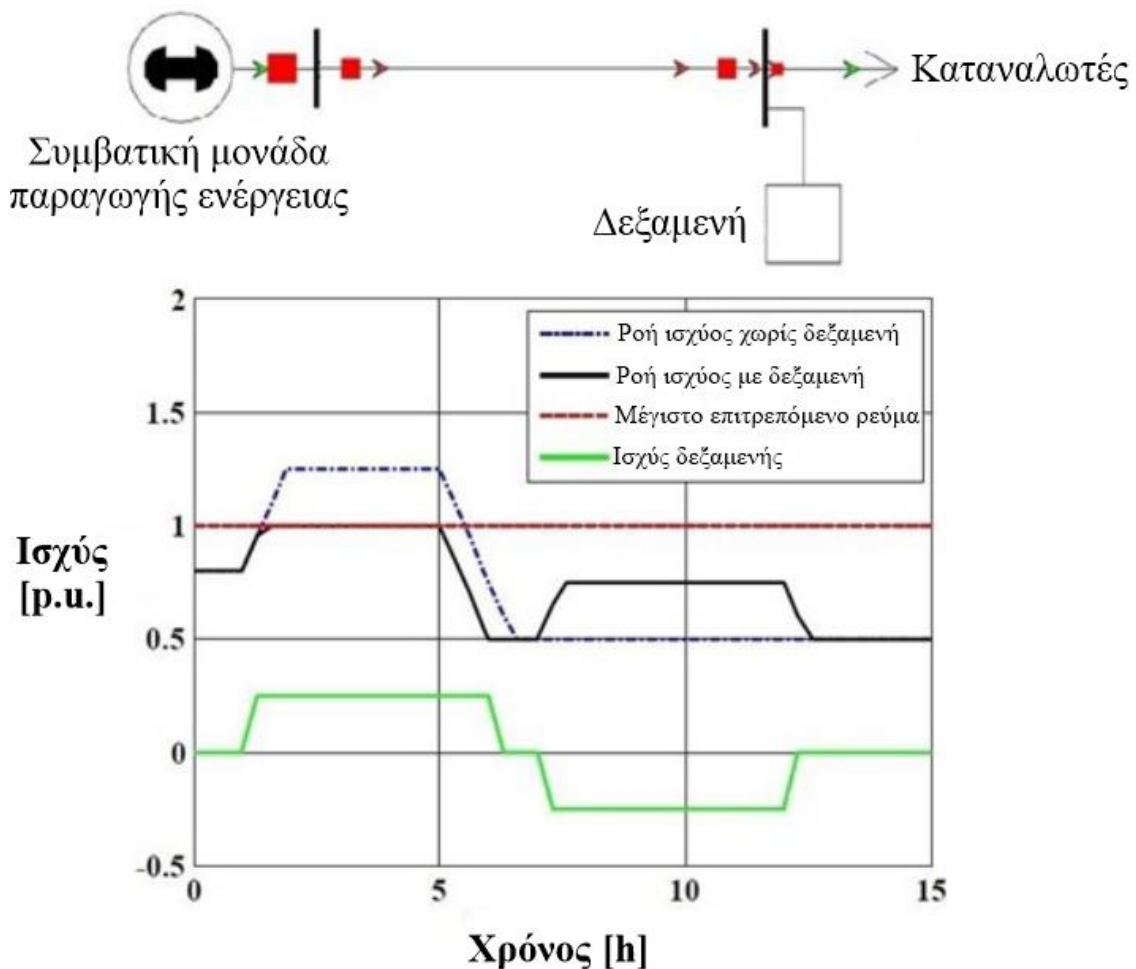
- *Παροχή δυνατότητας ελέγχου της μεταβατικής κατάστασης που προκαλείται από τη μεταγωγή μπλοκ φορτίου:* Το σύστημα αποθήκευσης πρέπει να παρέχει ισχύ τουλάχιστον 5 – 10% της καθαρής συνεχούς ισχύος, κατόπιν αιτήματος σε μεμονωμένες φάσεις,
- *Σταθεροποίηση του δικτύου ανεξάρτητα από το επίπεδο ισχύος που απαιτείται από τους καταναλωτές:* Το σύστημα αποθήκευσης πρέπει να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος ισχύος, ειδικά σε χαμηλά επίπεδα ισχύος, διατηρώντας σε αυτά τη λειτουργία,
- *Διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η συχνότητα είναι εντός αποδεκτών ορίων:* Το σύστημα πρέπει να παρέχει δεδομένα σχετικά με τη συχνότητα του απομονωμένου δικτύου κατόπιν αιτήματος του διαχειριστή συστήματος μεταφοράς, εφόσον έχει πρόσβαση σε αποθέματα ισχύος,
- *Διατήρηση σταθερής λειτουργίας χωρίς ταλαντώσεις συχνότητας ή τάσης:* Το σύστημα πρέπει να διαθέτει κατάλληλους ρυθμιστές τάσης και ταχύτητας,
- *Έλεγχος υπερτάσεων που παρουσιάζονται κατά την επανασύνδεση τμημάτων δικτύου.*

### 8.1.5 Διαχείριση συμφόρησης

Η συμφόρηση του δικτύου μεταφοράς αποτελεί μια κατάσταση του συστήματος μεταφοράς κατά την οποία οι παραγωγοί ή οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν και καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια με τρόπο που θα προκαλούσε την οριακή λειτουργία του συστήματος μεταφοράς. Σε κατάσταση συμφόρησης προκαλείται αστάθεια στη λειτουργία του συστήματος και υπέρβαση των οριακών τιμών φορτίου των στοιχείων που το απαρτίζουν. Η διαχείριση της συμφόρησης αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τη διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος ισχύος [48].

Στόχος της διαχείρισης της συμφόρησης στο σύστημα ισχύος είναι η μείωση του φορτίου μίας προσωρινά υπερφορτωμένης γραμμής μεταφοράς με ροές ισχύος πάνω από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Τα ΣΑΗΕ λόγω της αναστρεψιμότητάς τους αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέσο για τη μείωση της συμφόρησης. Στο **Σχήμα 8.1** παρουσιάζεται η αρχή της χρήσης ΣΑΗΕ για την επίλυση προβλημάτων συμφόρησης. Η γραμμή μεταφοράς είναι υπερφορτωμένη σε ποσοστό 125% λόγω της αυξημένης ζήτησης των καταναλωτών, από τις 2:00 έως τις 5:00. Η δεξαμενή εγγχεί ισχύ (ηλεκτρική ενέργεια) κατά τη διάρκεια μιας περιόδου υψηλής κατανάλωσης για να επιτύχει μείωση του φορτίου στη γραμμή μεταφοράς και επαναφορτίζεται εκ νέου, όταν η ροή ισχύος μέσω της γραμμής μεταφοράς είναι ελάχιστη [45].

Συχνή εμφάνιση κατάστασης συμφόρησης υποδεικνύει ότι η υποδομή του δικτύου έχει φτάσει στα όρια της κανονικής λειτουργίας. Επομένως, ο διαχειριστής συστήματος μεταφοράς θα πρέπει να ενισχύσει το δίκτυο με την κατασκευή πρόσθετων γραμμών ισχύος. Ωστόσο, το κόστος κατασκευής είναι υψηλό και η διαδικασία κατασκευής μπορεί να είναι εξαιρετικά χρονοβόρα. Ως εκ τούτου, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν μια καταλληλότερη λύση για τη μείωση της συμφόρησης [45].



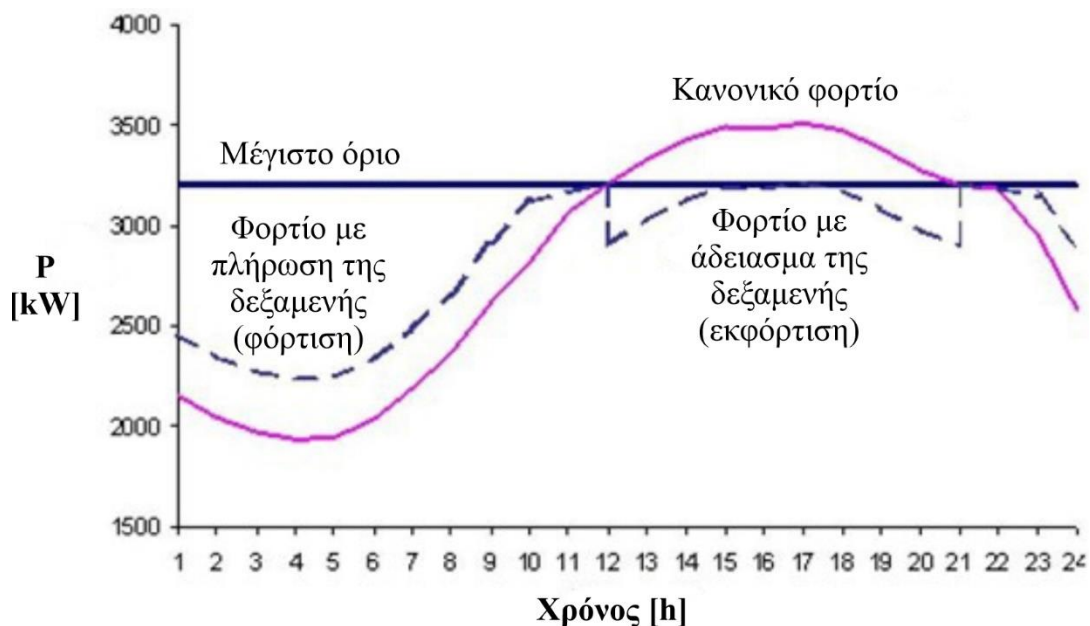
**Σχήμα 8.1** – Η αρχή της χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε περίπτωση συμφόρησης [45]

## 8.2 Ο ρόλος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο διανομής

### 8.2.1 Ανακατανομή φορτίου (περιορισμός μέγιστου φορτίου)

Ο περιορισμός του μέγιστου φορτίου, προκειμένου να καθυστερήσει ή να αποφευχθεί η επέκταση του δικτύου διανομής, είναι μια υπηρεσία που παρέχεται από αποκεντρωμένα ΣΑΗΕ. Όταν ξεπεραστεί το μέγιστο όριο φορτίου ενός στοιχείου του δικτύου (μετασχηματιστής ή γραμμή μεταφοράς), ο διαχειριστής του συστήματος διανομής μπορεί να εφαρμόσει συμβατικά μέτρα για την επίλυση αυτού του προβλήματος, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση της υπάρχουσας υποδομής ή σε κατασκευή νέων τμημάτων του δικτύου. Τα ΣΑΗΕ χρησιμοποιούνται ως προσωρινή λύση για τον περιορισμό του μέγιστου φορτίου που μπορεί να ξεπεράσει τις επιτρεπόμενες τιμές των στοιχείων του δικτύου [49].

Στο **Σχήμα 8.2** η σταθερή μπλε γραμμή δείχνει το ημερήσιο διάγραμμα φόρτισης γραμμής τροφοδοσίας που υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο της στο φορτίο αιχμής. Η διακεκομμένη μπλε γραμμή δείχνει το ημερήσιο διάγραμμα φόρτισης της γραμμής τροφοδοσίας με το εγκατεστημένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας [49].



**Σχήμα 8.2** – Γραφική αναπαράσταση του περιορισμού του φορτίου αιχμής χρησιμοποιώντας ΣΑΗΕ [49]

Το σύστημα αποθήκευσης φορτίζεται όταν η ροή ισχύος είναι μικρή, ώστε να έχει αρκετή ενέργεια για έγχυση στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του φορτίου αιχμής κι έτσι να καταστεί δυνατή η ελάττωση των μεγάλων ρευμάτων που ρέουν μέσω των στοιχείων του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, η δεξαμενή ενέργειας αντιπροσωπεύει το φορτίο για κεντρικό στοιχείο (μετασχηματιστής ή γραμμή παροχής). Το ΣΑΗΕ λειτουργεί ως πηγή και εκφορτίζεται στο χρόνο

που υφίσταται το φορτίο αιχμής. Με την έγχυση ενέργειας στο δίκτυο, μειώνει το φορτίο αιχμής των στοιχείων του δικτύου εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε περιόδους μεγάλης παραγωγής (π.χ. από ΑΠΕ) [49].

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται για την αποφυγή ή την καθυστέρηση της επέκτασης της υποδομής του δικτύου διανομής. Το μέγεθος του ΣΑΗΕ εξαρτάται από το παρατηρούμενο φορτίο και τον ρυθμό ανάπτυξης αυτού του φορτίου. Για παράδειγμα, μια αύξηση φορτίου 2% ετησίως απαιτεί τουλάχιστον 20 kW (1 έτος), 104 kW (5 έτη) και 220 kW (10 έτη) για κάθε MW αρχικού φορτίου αιχμής. Θεωρείται ότι απαιτείται ικανή ισχύς που θα μπορεί να περιορίσει το μέγιστο φορτίο μεταξύ 500 kW και πολλών MW για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής υψηλής τάσης και αρκετών εκατοντάδων kW για σταθμούς χαμηλής τάσης. Ο απαιτούμενος χρόνος εκφόρτισης εξαρτάται από το σχήμα του προφίλ φορτίου και εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 2 και 10 ωρών. Δεν υπάρχουν περιορισμοί κατά την αποθήκευση ενέργειας [45].

Όταν ολοκληρωθεί η χρονική περίοδος της επένδυσης, δημιουργούνται οι απαραίτητες υποδομές ενίσχυσης του δικτύου, με τις δυνατότητες των προστιθέμενων υποδομών να αξιοποιούνται καλύτερα απ' ό,τι αν είχαν κατασκευαστεί αρκετά χρόνια πριν. Το ΣΑΗΕ μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για άλλη υπηρεσία ή μπορεί να μετακινηθεί σε άλλο κόμβο του δικτύου [45].

Η υπηρεσία αυτή αποκτά μεγάλη σημασία σε ειδικές περιπτώσεις, π.χ. όταν ορισμένοι περιορισμοί (περιβαλλοντικοί, νομικοί κ.λπ.) εμποδίζουν την ενίσχυση ή/και επέκταση του δικτύου, η οποία μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ποιότητα της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ή όταν το κόστος ανάπτυξης της υποδομής δικτύου είναι υψηλό. Όταν υπάρχει κίνδυνος προσέγγισης των τεχνικών ορίων, ο διαχειριστής του δικτύου αποφασίζει ποιες ενέργειες πρέπει να ακολουθήσει. Αυτή η απόφαση δεν σχετίζεται μόνο με την οικονομική αιτιολόγηση, αλλά εάν υπάρχουν διάφορες λύσεις (ενίσχυση υφιστάμενων στοιχείων, κατασκευή νέων γραμμών), θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα επενδυτικά κόστη, το κόστος συντήρησης, οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας και οι επιπτώσεις εξαιτίας των βλαβών. Είναι απαραίτητο να γίνει σύγκριση της επιλογής χρήσης μεταξύ των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και άλλων διαθέσιμων λύσεων [45].

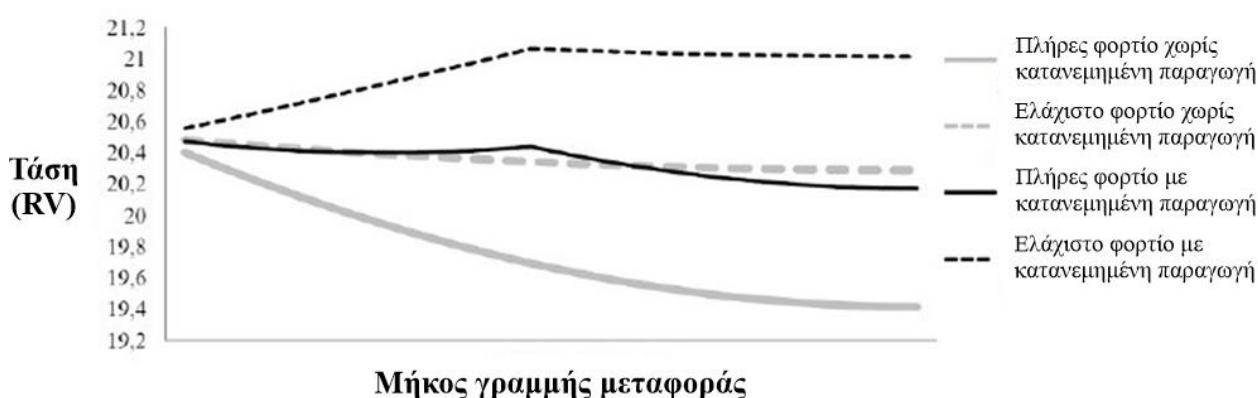
### 8.2.2 Τοπική ρύθμιση τάσης

Είναι απαραίτητο να διατηρηθεί μια σταθερή τιμή της παρεχόμενης τάσης προκειμένου να καταστεί δυνατή η κανονική λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών και να διασφαλιστεί η μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Επομένως, ορίζεται ένα επιτρεπτό εύρος για την RMS τιμή της τάσης. Για



παράδειγμα, για χρήστες μέσης τάσης (MT) ή χαμηλής τάσης (XT) επιτρέπεται ανοχή  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τάσης [45].

Οι διαχειριστές συστημάτων διανομής έχουν πρόσβαση σε διάφορα μέσα για την κάλυψη κανονιστικών ή συμβατικών απαιτήσεων που σχετίζονται με τα επίπεδα τάσης, και αυτά τα μέσα περιλαμβάνουν διακόπτες ελέγχου στους μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ. Για παράδειγμα, η τάση στην πλευρά ΜΤ θα πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή αναφοράς, αλλάζοντας την σχέση μετάδοσης του μετασχηματιστή μέσω ενός διακόπτη ελέγχου. Χωρίς αποκεντρωμένη παραγωγή, η τάση μειώνεται από τον υποσταθμό προς το τέλος της γραμμής μεταφοράς (ΓΜ), όπου βρίσκονται οι τελικοί καταναλωτές (γκρι καμπύλη στο **Σχήμα 8.3**). Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση της γραμμής ρυθμίζεται κοντά στο ανώτερο όριο για να αποφευχθεί πτώση τάσης στην πλευρά των καταναλωτών, με αρνητικές επιπτώσεις στις συσκευές αυτών. Συνδέοντας μία μονάδα καταναλωμένης παραγωγής, διατηρούνται τα επίπεδα της τάσης κατά μήκος της ΓΜ, ενώ ταυτόχρονα η ροή ισχύος ελαττώνεται (μαύρη καμπύλη στο **Σχήμα 8.3**) [45].



**Σχήμα 8.3** – Πτώση τάσης κατά μήκος μίας ΓΜ ΜΤ με και χωρίς καταναλωμένη παραγωγή [45]

Η υπηρεσία ρύθμισης τάσης συνίσταται στη ρύθμιση της έγχυσης ενεργής και πιθανώς άεργης ισχύος του ΣΑΗΕ σε ορισμένα σημεία του συστήματος μεταφοράς, για την παροχή επαρκούς τάσης κατά τη διάρκεια του χρόνου φορτίου αιχμής (προστασία χαμηλής τάσης) ή κατά την παραγωγή φορτίου αιχμής (προστασία υψηλής τάσης). Σε τέτοιες περιπτώσεις, πρέπει να γίνουν πρόσθετες εναλλακτικές επενδύσεις προκειμένου να διατηρηθεί η ποιότητα της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εντός των επιτρεπόμενων συμβατικών ή κανονιστικών ορίων [45].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τάση στον υποσταθμό ρυθμίζεται από διακόπτη ελέγχου, επομένως η ρύθμιση της τάσης από το σύστημα αποθήκευσης είναι δυνατή μόνο σε ορισμένη ηλεκτρική απόσταση από τον υποσταθμό και είναι πιο αποτελεσματική όταν η σύνθετη αντίσταση μεταξύ αυτού και του σημείου σύνδεσης είναι μεγαλύτερη. Σε αντίθεση με την ανακατανομή φορτίου, όπου τα συστήματα αποθήκευσης τοποθετούνται κάτω από περιορισμένα τμήματα του δικτύου για να μπορούν να ενεργούν στη ροή ισχύος μέσω αυτών, η συγκεκριμένη υπηρεσία



παρέχει περισσότερη ελευθερία. Οι κακώς τροφοδοτούμενοι με τάση καταναλωτές στο τέλος της ΓΜ μπορούν να επωφεληθούν από την υποστήριξη που παρέχεται από το προφίλ τάσης σε ενδιάμεσα σημεία. Τέτοιου είδους ευελιξία απαιτεί την εισαγωγή ενός δικτύου επικοινωνίας ή μιας μεθόδου αξιολόγησης για την άρση των περιορισμών από απομακρυσμένες τοποθεσίες [45].

### 8.2.3 Μείωση της κατανομής των απωλειών Joule

Η ηλεκτρική αντίσταση του δικτύου προκαλεί απώλειες Joule, οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος. Τα ΣΑΗΕ επηρεάζουν τη μεταβολή της ροής ισχύος στο δίκτυο, συνεπώς και αυτές τις απώλειες, επειδή οι κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης επιτυγχάνουν, θεωρητικά, ενεργειακό ισοζύγιο. Η αρχή της μείωσης των απωλειών Joule χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας εφαρμόζεται ως εξής [45]:

- Η φόρτιση πραγματοποιείται σε χρόνο χαμηλής κατανάλωσης και αυξάνοντας την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο διανομής, αυξάνονται επίσης και οι απώλειες ( $\Delta P_{J,1} > 0$ ).
- Η εκφόρτιση πραγματοποιείται τη στιγμή της μέγιστης κατανάλωσης και η επιτευχθείσα μείωση του ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών στην τιμή του  $\Delta P_{J,2} < 0$ .
- Λόγω της εξάρτησης των απωλειών με το τετράγωνο του ρεύματος, το σύνολο των απωλειών κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου είναι  $\Delta P_{J,1} + \Delta P_{J,2} < 0$ , κάτι που σημαίνει ότι ο διαχειριστής δικτύου σε τεχνοοικονομικό επίπεδο θα έχει μεγαλύτερα οφέλη.

### 8.2.4 Αντιστάθμιση άεργης ισχύος

Οι γραμμές υψηλής τάσης είναι ως επί το πλείστον επαγωγικές ( $X \gg R$ ). Οι πτώσεις τάσης στο δίκτυο μεταφοράς σχετίζονται κυρίως με τις ροές άεργης ισχύος. Ως εκ τούτου, η ρύθμιση τάσης συνεπάγεται ρύθμιση των ροών άεργης ισχύος λόγω κατανάλωσης στο δίκτυο (μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς). Επίσης, οι ροές άεργης ισχύος αυξάνουν το ρεύμα και συνεπώς τις απώλειες Joule. Στο δίκτυο διανομής, η αντιστάθμιση πραγματοποιείται μέσω συστημάτων πυκνωτών που είναι ειδικά εγκατεστημένα στους κεντρικούς σταθμούς μετασχηματιστών (ΥΤ/ΜΤ). Τα συστήματα πυκνωτών ελέγχονται αυτόματα από ρελέ [45].

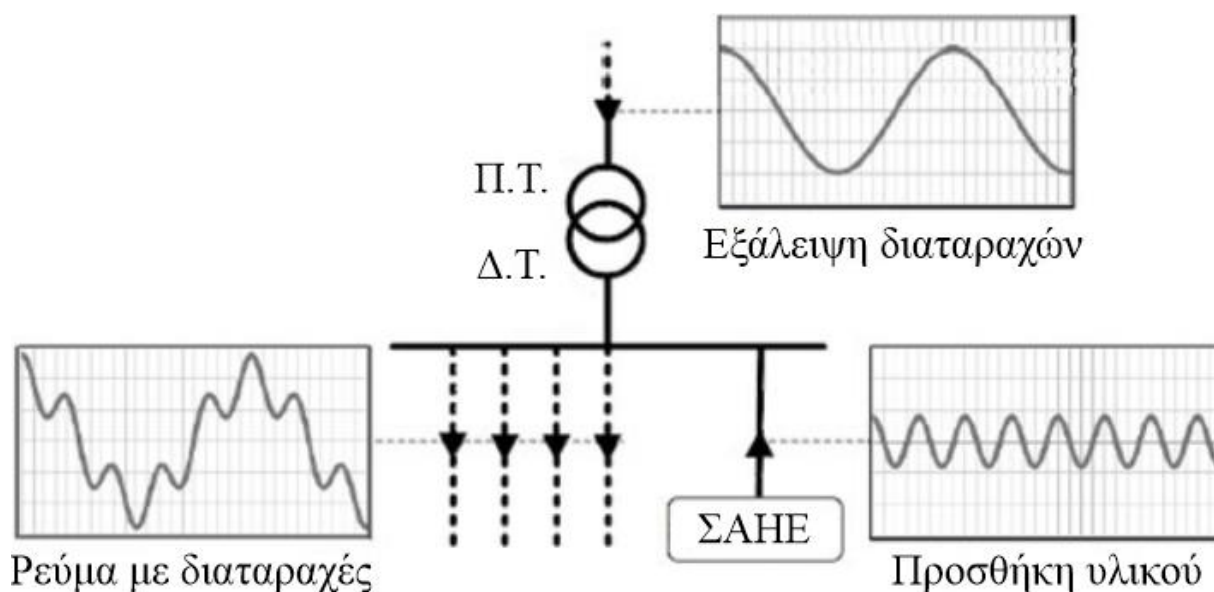
Με την εγκατάσταση του ΣΑΗΕ όσο το δυνατόν πιο κοντά στους καταναλωτές, επιτυγχάνεται η διαθεσιμότητα αποθεμάτων άεργης ισχύος σε κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τα οποία χρησιμοποιούνται για δυναμική ρύθμιση της τάσης και για υποστήριξη σε περιπτώσεις διαταραχών δικτύου. Ένα αποκεντρωμένο ΣΑΗΕ που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, παρέχει τη δυνατότητα τοπικής αντιστάθμισης άεργης ισχύος. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ο πιο ακριβής έλεγχος σε περίπτωση που η άεργη ισχύς εγχυθεί στο δίκτυο. Η

χρήση ΣΑΗΕ για την αντιστάθμιση της άεργης ισχύος αποτρέπει τη στροφή προς επενδύσεις σε συστήματα πυκνωτών που χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος [45].

### 8.2.5 Ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας

Λόγω των διαφορετικών δυνατοτήτων που μπορούν να παρέχουν οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, οι αποκεντρωμένες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που συνδέονται με τους μετατροπείς αυτούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξάλειψη ηλεκτρικών διαταραχών ή για την εκτέλεση ενεργού φιλτραρίσματος. Δύο βασικές υπηρεσίες που αποσκοπούν στη βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής [45]:

- *Βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στους καταναλωτές.* Ο διαχειριστής του συστήματος διανομής χρησιμοποιεί ΣΑΗΕ για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις που σχετίζονται με τα επίπεδα διαταραχών στην κυματομορφή της τάσης που παρέχει στους χρήστες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (γρήγορες διακυμάνσεις, πτώσεις τάσης κ.λπ.). Στην πράξη, οι καταναλωτές που επιθυμούν να έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια υψηλότερης ποιότητας επιβαρύνονται οικονομικά περισσότερο.
- *Βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από το δίκτυο μεταφοράς.* Ο διαχειριστής του συστήματος διανομής χρησιμοποιεί το ΣΑΗΕ για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις που σχετίζονται με τα επίπεδα διαταραχών της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παρέχεται από το δίκτυο μεταφοράς.



Σχήμα 8.4 – Η διαδικασία ενεργού φιλτραρίσματος του ρεύματος που εξάγεται από το δίκτυο μεταφοράς [45]

### 8.2.6 Ο ρόλος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στα μικροδίκτυα

Το *μικροδίκτυο* συστήνουν ένας αριθμός συνδεδεμένων ελεγχόμενων καταναλωτών, συσκευών αποθήκευσης ενέργειας και διανεμημένων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελούν μια ελεγχόμενη μονάδα του συστήματος ισχύος. Τα μικροδίκτυα μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης, αλλά το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ικανότητα λειτουργίας σε λειτουργία νησίδας [50]. Επιτρέπουν τη βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας διατηρώντας την τάση σταθερή, αυξάνουν την αξιοπιστία του συστήματος και μειώνουν τις εκπομπές επιβλαβών αερίων προς την ατμόσφαιρα [51].

Στα μικροδίκτυα, η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα, ειδικά σε περιπτώσεις που οι κατανεμημένες πηγές εντός του μικροδικτύου δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες κατανάλωσης. Τα ΣΑΗΕ βελτιώνουν τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων παρέχοντας τις ακόλουθες υπηρεσίες [51]:

- Σταθεροποίηση της κατανεμημένης παραγωγής, διατήρηση σταθερών τιμών τάσης και συχνότητας κατά τη διάρκεια μεταβολών του φορτίου,
- Υποστήριξη της λειτουργίας του συστήματος με χρήση μεταβλητών ΑΠΕ (ήλιος, άνεμος),
- Εξασφάλιση και διατήρηση συνεχούς κατανεμημένης παραγωγής.

Οι υπερπυκνωτές, οι σφόνδυλοι, οι μπαταρίες και τα υπεραγωγία συστήματα αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας (SMES) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ενεργειακά δίκτυα ως ΣΑΗΕ. Η λειτουργία αυτών των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας απαιτεί τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της αποθηκευμένης ενέργειας στην απαιτούμενη τιμή εναλλασσόμενου ρεύματος ονομαστικής συχνότητας [51].

### 8.3 Κύριες υπηρεσίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Εκτός από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ένας κεντρικός παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επίσης να βασιστεί σε ΣΑΗΕ υψηλής ισχύος, όπως αναστρέψιμους υδροηλεκτρικούς σταθμούς ή συστήματα με μπαταρίες, για τη βελτίωση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων παραγωγής του. Για αυτήν την εφαρμογή, τα κοινά μέρη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταφέρονται σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για την εκτέλεση των ακόλουθων υπηρεσιών [45]:

- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας,
- Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>,
- Μείωση κόστους και χρόνου συντήρησης,
- Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών.

### **8.3.1 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας**

Δεδομένου ότι η απόδοση των θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παραγόμενη ενέργεια, τα ΣΑΗΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της παραγωγής σε ένα βέλτιστο οικονομικό επίπεδο λειτουργίας. Επιπλέον, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας παρακάμπτει τη χρήση σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με υψηλό λειτουργικό κόστος. Τα ΣΑΗΕ θα πρέπει να έχουν διαστασιολογηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να ανταποκρίνονται σε καθημερινούς κύκλους φόρτισης σε χαμηλούς χρόνους κατανάλωσης και εκφόρτισης σε ώρες αιχμής, διάρκειας 1 έως 5 ωρών. Επομένως, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σταθμοί υψηλής ισχύος και υψηλής ενέργειας, όπως αναστρέψιμοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και σταθμοί πεπιεσμένου αέρα [45].

### **8.3.2 Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>**

Λόγω των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τις μονάδες παραγωγής αυξάνονται κατά τη διάρκεια της μέγιστης κατανάλωσης και του μεταβατικού χρόνου. Επίσης, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καλυφθεί εν μέρει από την αποθήκευση, ώστε να διατηρηθούν οι εκπομπές σε χαμηλά επίπεδα. Πρέπει να αναλυθεί το οικονομικό όφελος ως προς το κόστος παραγωγής κατά τη διάρκεια της μέγιστης κατανάλωσης και το κόστος αυτό θα πρέπει να περιλαμβάνει τη μελλοντική αύξηση του κόστους εκπομπών CO<sub>2</sub> [45].

### **8.3.3 Μείωση κόστους και χρόνου συντήρησης**

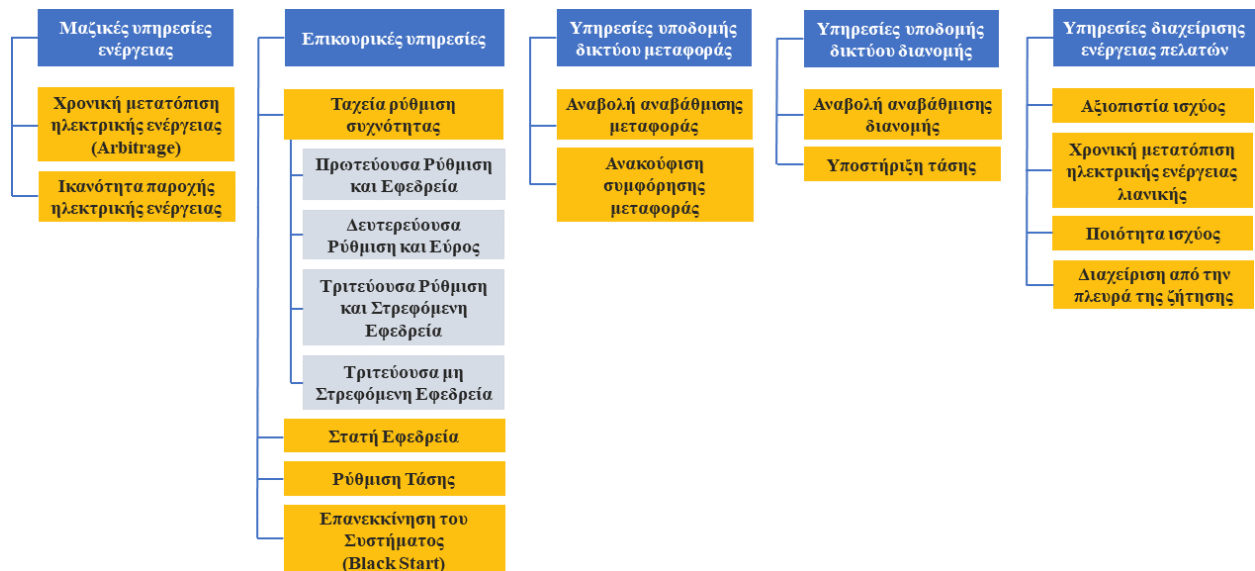
Τα ΣΑΗΕ υποστηρίζουν τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής αποφεύγοντας τις δυναμικές καταπονήσεις των υφιστάμενων, παλαιών γεννητριών. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της γήρανσης των υλικών, στη μείωση του κόστους συντήρησης και να επιτρέψουν τη βέλτιστη χρήση, αυξάνοντας παράλληλα τη μέγιστη ισχύ. Η επιλογή της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί επηρεάζεται άμεσα από τα απαιτούμενα δυναμικά χαρακτηριστικά [45].

### **8.3.4 Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών**

Τεχνικά, οι υπηρεσίες που παρέχονται στον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς μπορούν να μεταφερθούν σε ένα σύστημα αποθήκευσης που ανήκει στον κατασκευαστή. Το μέγεθος του συστήματος από άποψη ισχύος, ενέργειας και χρόνου απόκρισης εξαρτάται άμεσα από την παρεχόμενη υπηρεσία. Το σημείο όπου αυτή η εφαρμογή των ΣΑΗΕ αποκτά ιδιαίτερη σημασία

αντιστοιχεί στο οικονομικό όφελος όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί με μικρούς περιορισμούς στην παραγωγή ισχύος [45].

Στο **Σχήμα 8.5** συνοψίζονται οι υπηρεσίες των Συστημάτων Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας [68].



**Σχήμα 8.5** – Υπηρεσίες των ΣΑΗΕ στο ΣΗΕ [68]

# Κεφάλαιο 9

## *Μοντέλο Συστήματος Μπαταρίας για Αποθήκευση Ενέργειας με τη Βοήθεια του Λογισμικού DIgSILENT PowerFactory*

---

Τα μεγάλα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας Μπαταριών (*Battery Energy Storage Systems – BESS*) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε *Ευέλικτα Συστήματα Μετάδοσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος (Flexible Alternating Current Transmission Systems – FACTS)* με σκοπό τη βελτίωση της τάσης, της συχνότητας, της ταλαντευτικής και μεταβατικής σταθερότητας και την αύξηση της αξιοπιστίας της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Στις εφαρμογές αυτές, τα ΣΑΗΕ συνδέονται με το σύστημα ισχύος χρησιμοποιώντας *Μετατροπείς Πηγής Τάσης (Voltage Source Converters – VSC)* συνδεδεμένων σε σειρά [52].

### **9.1 Μοντέλο προσομοίωσης BESS**

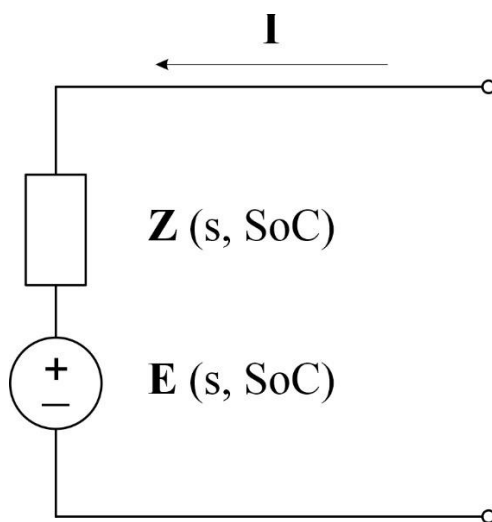
Το BESS αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος χρησιμεύει για την αποθήκευση ενέργειας κατά την ηλεκτροχημική διαδικασία. Το δεύτερο μέρος είναι ένας μετατροπέας που μετατρέπει την τάση DC από το τμήμα αποθήκευσης σε τάση AC που απαιτείται για το δίκτυο και αντίστροφα. Ο μετατροπέας αυτός βασίζεται συνήθως σε ένα μετατροπέα με δυνατότητα *διαμόρφωσης πλάτους παλμού (Pulse Width Modulation – PWM)* με πύλη τάσης (VSC). Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι πολύ γνωστό και διαθέσιμο στο πακέτο λογισμικού DIgSILENT PowerFactory. Στην περίπτωση αυτή, το ΣΑΗΕ είναι μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, το είδος της οποίας εξαρτάται από την πραγματική εφαρμογή. Το πρόβλημα με τις μπαταρίες είναι η μεγάλη ποικιλομορφία των τεχνολογιών και η ποικιλομορφία σε κάθε μεμονωμένη τεχνολογία, γι' αυτό και δεν υπάρχει απλό και ακριβές μοντέλο που να ισχύει για όλους τους τύπους μπαταριών [52].

#### **9.1.1 Μοντέλο μπαταρίας**

Υπάρχουν δύο προβλήματα με τη μοντελοποίηση μπαταριών. Το πρώτο πρόβλημα αφορά στην απόκτηση ενός μοντέλου που δεν πρέπει να είναι πολύ περίπλοκο, αλλά πρέπει να είναι αρκετά ακριβές. Το δεύτερο πρόβλημα είναι η λήψη των παραμέτρων που απαιτούνται για το μοντέλο, οι οποίες μπορούν να ληφθούν είτε από τον κατασκευαστή, είτε με βάση τη λήψη μετρήσεων από

τους ιδίους χρήστες. Μόνο ένα μοντέλο με τις σωστές παραμέτρους μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται συχνότερα στη βιομηχανία, αλλά υπάρχουν και άλλοι τύποι, όπως νικελίου-καδμίου (NiCd), υδριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH) και μπαταρίες ιόντων-λίθιου. Κάθε τύπος μπαταρίας έχει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [52].

Το μοντέλο της μπαταρίας περιγράφεται από την τάση και την εσωτερική αντίσταση, τα οποία είναι συνάρτηση πολλών εσωτερικών μεταβλητών, όπως η κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SoC), η ηλικία και η θερμοκρασία της μπαταρίας. Η κατάσταση φόρτισης αποτελεί ένα δείκτη της τρέχουσας ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία. Η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη όταν η τιμή SoC είναι μονάδα και πλήρως αφόρτιστη όταν η τιμή SoC είναι μηδέν [52].



Σχήμα 9.1 – Ισοδύναμο μοντέλο ηλεκτρικής μπαταρίας [50]

Ένα απλό ηλεκτρικό ισοδύναμο για μια μπαταρία αποτυπώνεται στο Σχήμα 9.1. Υπάρχει μια σημαντική εξίσωση για τη χωρητικότητα όλων των μπαταριών μολύβδου-οξέος, που ονομάζεται νόμος του Peukert (Σχέση 9.1). Εκφράζει τη χωρητικότητα μιας μπαταρίας ως προς τον ρυθμό με τον οποίο αποφορτίζεται. Καθώς ο ρυθμός αποφόρτισης αυξάνεται, η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται [52].

$$C_p = I^k t \quad (9.1)$$

όπου:

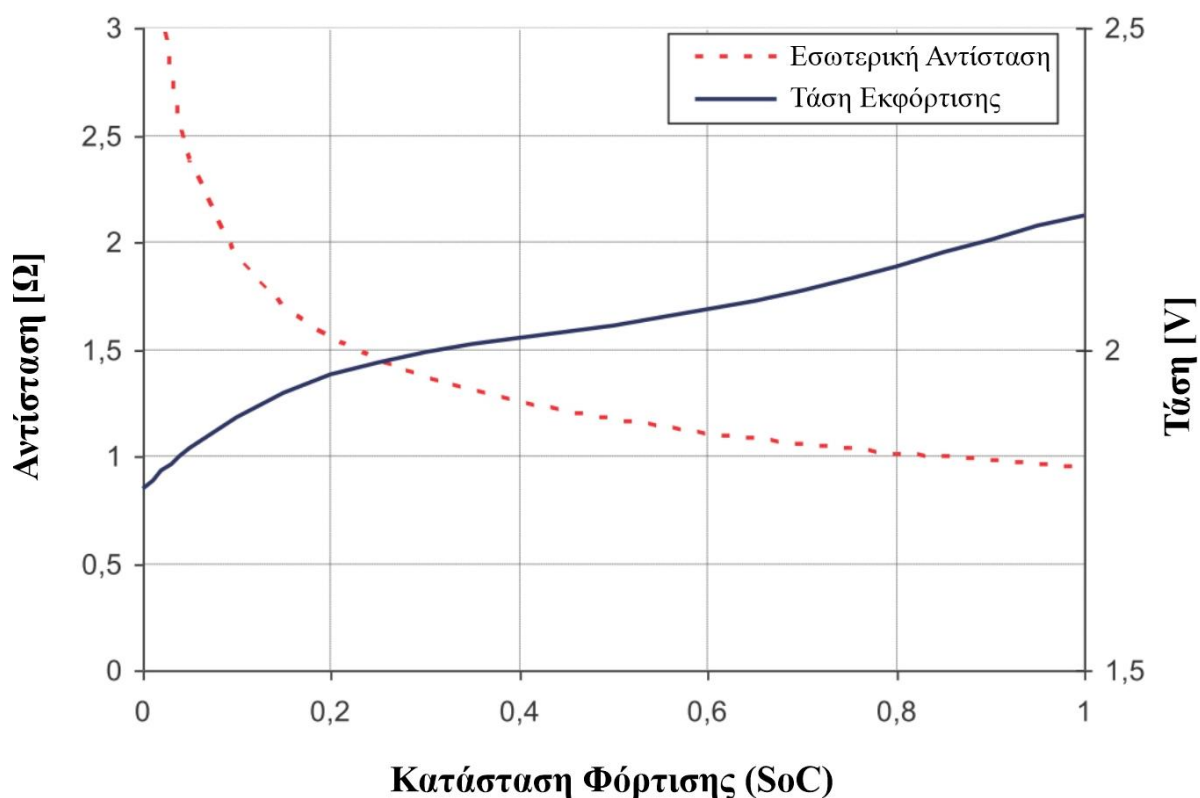
- $C_p$  η χωρητικότητα σύμφωνα με το νόμο Peukert, σε ρυθμό εκφόρτισης ενός Αμπέρ (σε Ah)
- $I$  το ρεύμα εκφόρτισης (σε A)
- $k$  η σταθερά του Peukert (αδιαστασιολόγητο μέγεθος)
- $t$  ο χρόνος εκφόρτισης (σε ώρες)



Η τιμή της σταθεράς Peukert για τις μπαταρίες μολύβδου κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1,1 και 1,3. Διάφοροι παράγοντες, όπως το βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge – DoD), η θερμοκρασία, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η φόρτιση, επηρεάζουν τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος εκφόρτισης. Το πρόβλημα με τον νόμο του Peukert είναι ότι όταν το ρεύμα εκφόρτισης είναι ίσο με το μηδέν, η διαθέσιμη χωρητικότητα γίνεται άπειρη [52].

Η χωρητικότητα της μπαταρίας μπορεί επίσης να εκφραστεί από την ενέργεια που μπορεί να δώσει, οπότε στην περίπτωση αυτή η μονάδα μέτρησης είναι οι βατώρες (Wh) αντί για τα αμπερώρια (Ah). Λαμβάνεται ως γινόμενο της χωρητικότητας εκφραζόμενο σε Ah και της τάσης της μπαταρίας. Με τη σύνδεση των μπαταριών σε σειρά αυξάνεται η τάση και το ποσοστό αποθήκευσης ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα σταθερή τη χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah. Αντιθέτως, η παράλληλη σύνδεση των μπαταριών αυξάνει την χωρητικότητα σε Ah και την αποθήκευση ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα την τάση σταθερή [50,52].

Η τάση εκφόρτισης της μπαταρίας εξαρτάται από την τιμή SoC, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9.2**. Σύμφωνα με αυτό, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η τάση της μπαταρίας εξαρτάται μη γραμμικά από την τιμή του SoC, ειδικά στο εύρος τιμών  $0 < \text{SoC} < 0,2$ . Επίσης, η εσωτερική αντίσταση εξαρτάται και αυτή από την τιμή SoC. Μπορεί, επίσης, να παρατηρηθεί η μη γραμμικότητα της αντίστασης, ειδικά για χαμηλές τιμές SoC [50,52].



**Σχήμα 9.2** – Τυπικό προφίλ εκφόρτισης μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος [52]

Στην εργασία αυτή θα παρουσιαστεί ένα απλοποιημένο μοντέλο μπαταρίας, κάνοντας κάποιες υποθέσεις για να παραμείνει το μοντέλο απλό και λειτουργικό. Αρχικά, θεωρούμε ότι η μπαταρία αποφορτίζεται σε ποσοστό 20%, διότι σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η τάση εξαρτάται γραμμικά από την τιμή SoC. Μια άλλη υπόθεση είναι ότι η εσωτερική αντίσταση είναι σταθερή. Επιπλέον, θεωρούμε ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι σταθερή, εφόσον το ρεύμα εκφόρτισης είναι γνωστό εκ των προτέρων. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η αναμενόμενη τιμή της χωρητικότητας της μπαταρίας και τα δεδομένα αυτά εν συνεχεία να εισαχθούν στο μοντέλο. Με αυτές τις παραδοχές, το μοντέλο της μπαταρίας θα είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο ισοδύναμο μοντέλο της ηλεκτρικής μπαταρίας που φαίνεται στο **Σχήμα 9.1**, με σταθερή εσωτερική αντίσταση  $Z(s, SoC) = Z$  και μια πηγή τάσης, της οποίας η τάση εξαρτάται από την τιμή του SoC. Στο λογισμικό DiGSILENT PowerFactory, η μπαταρία θα μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας πηγή συνεχούς ρεύματος.

Η εξίσωση που ακολουθεί περιγράφει το απλοποιημένο μοντέλο μπαταρίας [50,52]:

$$U_{DC} = U_{max} \cdot SoC + U_{min} \cdot (1 - SoC) - I \cdot Z_i \quad (9.2)$$

όπου:

- $U_{DC}$  η DC τάση της μπαταρίας
- $U_{max}$  η τάση μιας πλήρως φορτισμένης μπαταρίας
- $U_{min}$  η τάση μιας αφόρτιστης μπαταρίας
- SoC** η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας
- I** το ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας
- Z<sub>i</sub>** η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας

Η πηγή τάσης παρέχει τάση στους ακροδέκτες σύμφωνα με την τιμή που λαμβάνεται από το μοντέλο της μπαταρίας. Το μοντέλο της μπαταρίας στην προσομοίωση διαμορφώνεται σύμφωνα με τις παραμέτρους που δίνονται στον **Πίνακα 9.1** [50]:

**Πίνακας 9.1** – Παράμετροι του μοντέλου της μπαταρίας [50]

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
Χωρητικότητα ανά κελί	Ah	50
Τάση αφόρτιστου κελιού (u_min)	V	12
Τάση φορτισμένου κελιού (u_max)	V	13.85
Αριθμός κελιών συνδεδεμένων παράλληλα (m)	–	50

Αριθμός κελιών συνδεδεμένων σε σειρά (n)	–	67
Ονομαστική τάση πηγής ( $U_{nom}$ )	kV	0.8
Εσωτερική αντίσταση ανά κελί ( $R_i$ )	$\Omega$	0.001

Η αντίστοιχη τάση μπαταρίας DC είναι 800 V. Ωστόσο, η τάση της μπαταρίας DC μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή SoC της μπαταρίας. Η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 2500 Ah. Η ονομαστική τάση και η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις [50]:

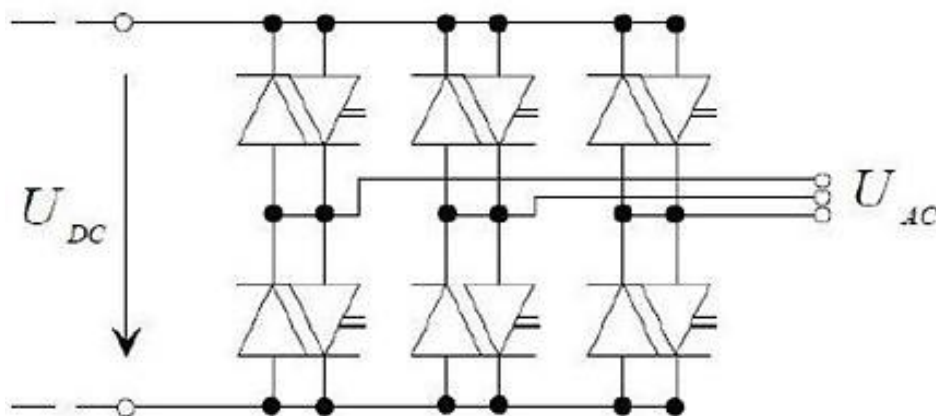
$$\text{Ονομαστική τάση} = \text{τάση ενός κελιού} \times \text{αριθμός κελιών συνδεδεμένων σε σειρά}$$

$$\text{Συνολική χωρητικότητα} = \text{χωρητικότητα ανά κελί} \times \text{αριθμός κελιών συνδεδεμένων παράλληλα}$$

Η διαστασιολόγηση της μπαταρίας είναι μία περίπλοκη διαδικασία, κατά την εκτέλεση της οποίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλά επιμέρους κριτήρια, όπως η στρατηγική παροχής ενέργειας (*dispatch strategy*) από το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [50].

### 9.1.2 Μοντέλο μετατροπέα πηγής τάσης (VSC)

Ο μετατροπέας VSC μετατρέπει την DC τάση από την μπαταρία σε AC τάση, χρησιμοποιώντας την ταχύτητα διακοπτικής εναλλαγής ενός IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor – Διπολικό Τρανζίστορ Μονωμένης Πύλης). Στο **Σχήμα 9.3** εμφανίζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μετατροπέα PWM [52].



**Σχήμα 9.3** – Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μετατροπέα PWM [52]

Το μοντέλο του μετατροπέα περιγράφεται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις [52]:

$$U_{ACr} = K_0 P m_r U_{DC} \quad (9.3)$$

$$U_{ACi} = K_0 P_m U_{DC} \quad (9.4)$$

όπου:

$U_{ACr}$  το πραγματικό μέρος της εναλλασσόμενης τάσης

$U_{ACi}$  το φανταστικό μέρος της εναλλασσόμενης τάσης

$P_m$  ο συντελεστής ενίσχυσης

$U_c$  η DC τάση της μπαταρίας

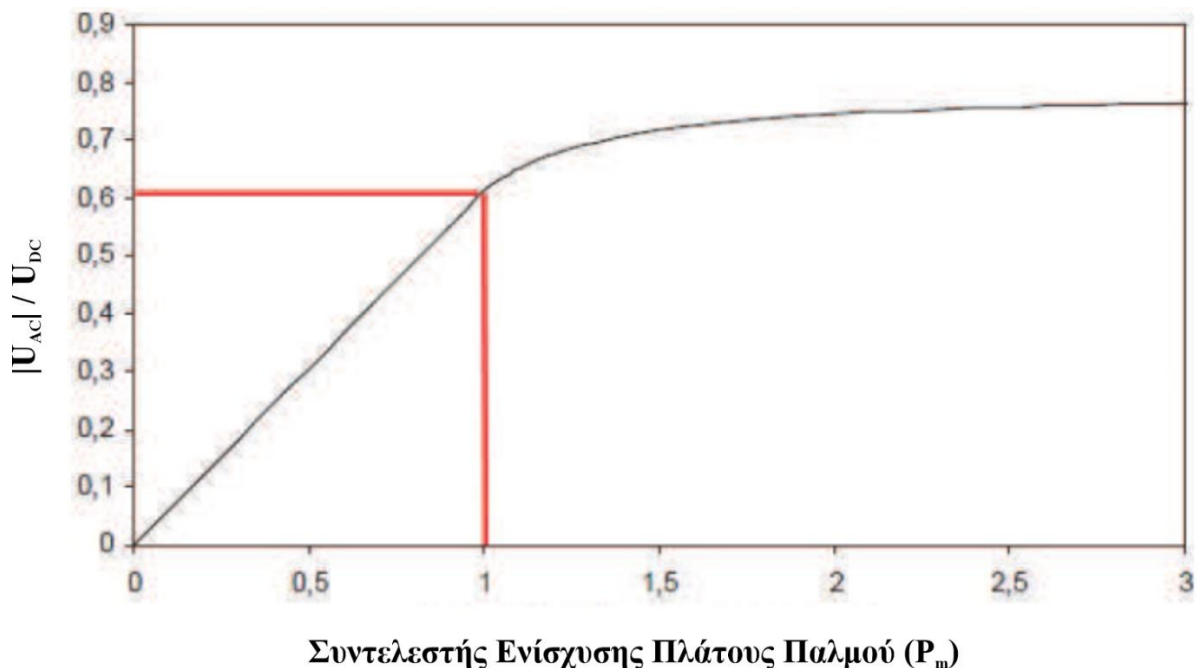
$K_0$  ένας σταθερός παράγοντας, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο PWM

Για ημιτονοειδή διαμόρφωση, το  $K_0$  δίνεται από τη σχέση [52]:

$$K_0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \quad (9.5)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν αν  $P_m \leq 1$ . Αν το  $P_m$  γίνει μεγαλύτερο του 1, προκύπτουν προβλήματα αρμονικών. Για το λόγο αυτό, πρέπει να διασφαλιστεί ότι η τάση DC είναι πάντα πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή (βλ. Σχήμα 9.4) [52]:

$$U_{DC} \geq \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} |U_{AC}| \quad (9.6)$$



Σχήμα 9.4 – Κορεσμός ενός VSC με ημιτονοειδές PWM [52]

Στο DIgSILENT PowerFactory, το μοντέλο μετατροπέα PWM διαθέτει διαφορετικούς πιθανούς συνδυασμούς δεδομένων εισόδου. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είσοδοι είναι οι

"id\_ref" και "iq\_ref", αποτελώντας το ρεύμα φάσης του μετατροπέα PWM που μετατρέπεται στο σύστημα αναφοράς  $dq$ . Το πλεονέκτημα του μετασχηματισμού είναι ότι το μέγεθος "id\_ref" ισοδυναμεί με την ενεργή ισχύ και το μέγεθος "iq\_ref" ισοδυναμεί με την άεργη ισχύ του μετατροπέα PWM. Επομένως, είναι εύκολο να εφαρμοστεί ο ελεγκτής για το σύστημα BESS. Το μοντέλο PWM χρησιμοποιεί έναν εσωτερικό ρυθμιστή ρεύματος για τη δημιουργία του πραγματικού σήματος για τον παράγοντα διαμόρφωσης [52].

### 9.1.3 Ο ελεγκτής BESS

Στην περίπτωση του συστήματος BESS με μετατροπέα IGBT ρυθμίζονται δύο παράμετροι, μία στον άξονα  $d$  και μία στον άξονα  $q$ , οι οποίες αντιστοιχούν στην ενεργή και άεργο ισχύ, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την ενεργή ισχύ, είναι δυνατή η ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου με σύγχρονες γεννήτριες και χρησιμοποιώντας την άεργη ισχύ, είναι δυνατή η ρύθμιση της εναλλασσόμενης τάσης. Η άεργη ισχύς του BESS δε σχετίζεται με τη χωρητικότητα της μπαταρίας, επομένως η τάση AC μπορεί να ρυθμίζεται συνεχώς. Αλλά η φαινόμενη ισχύς του μετατροπέα PWM είναι περιορισμένη, όπως και η άεργη ισχύς [52].

Υπάρχει ένας αριθμός οριακών συνθηκών που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως [52]:

- Το BESS μπορεί να καταναλώνει ενεργή ισχύ μόνο αν η μπαταρία δεν είναι πλήρως φορτισμένη ( $SoC < 1$ ).
- Το BESS μπορεί να παράγει ενεργή ισχύ μόνο αν η μπαταρία δεν είναι αποφορτισμένη ( $SoC > 0$ ).
- Η μπαταρία πρέπει να επαναφορτιστεί εάν το SoC βρίσκεται κάτω από μια ορισμένη τιμή. Έτσι, το BESS έχει πάντα τη δυνατότητα να ρυθμίζει την ενεργή ισχύ και με τους δύο τρόπους.
- Η συνολική παραγωγή ενεργής και άεργης ισχύος μαζί, δε θα πρέπει να υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ, σύμφωνα με τη σχέση:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9.7)$$

όπου:

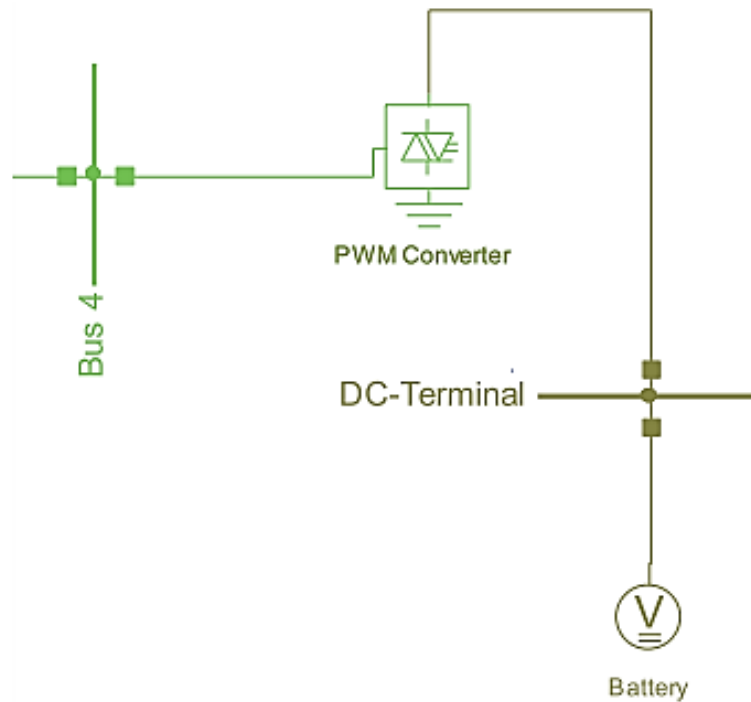
**S** η φαινόμενη ισχύς

**P** η ενεργή ισχύς

**Q** η άεργη ισχύς

Όλες οι παραπάνω συνθήκες μπορούν να εκπληρωθούν από έναν ελεγκτή φόρτισης. Σε μια πραγματική εφαρμογή, το SoC πρέπει να υπολογίζεται από το ρεύμα και την τάση της μπαταρίας. Για βέλτιστη επισκόπηση, ο ρυθμιστής μπορεί να χωριστεί στα εξής μικρότερα μέρη:

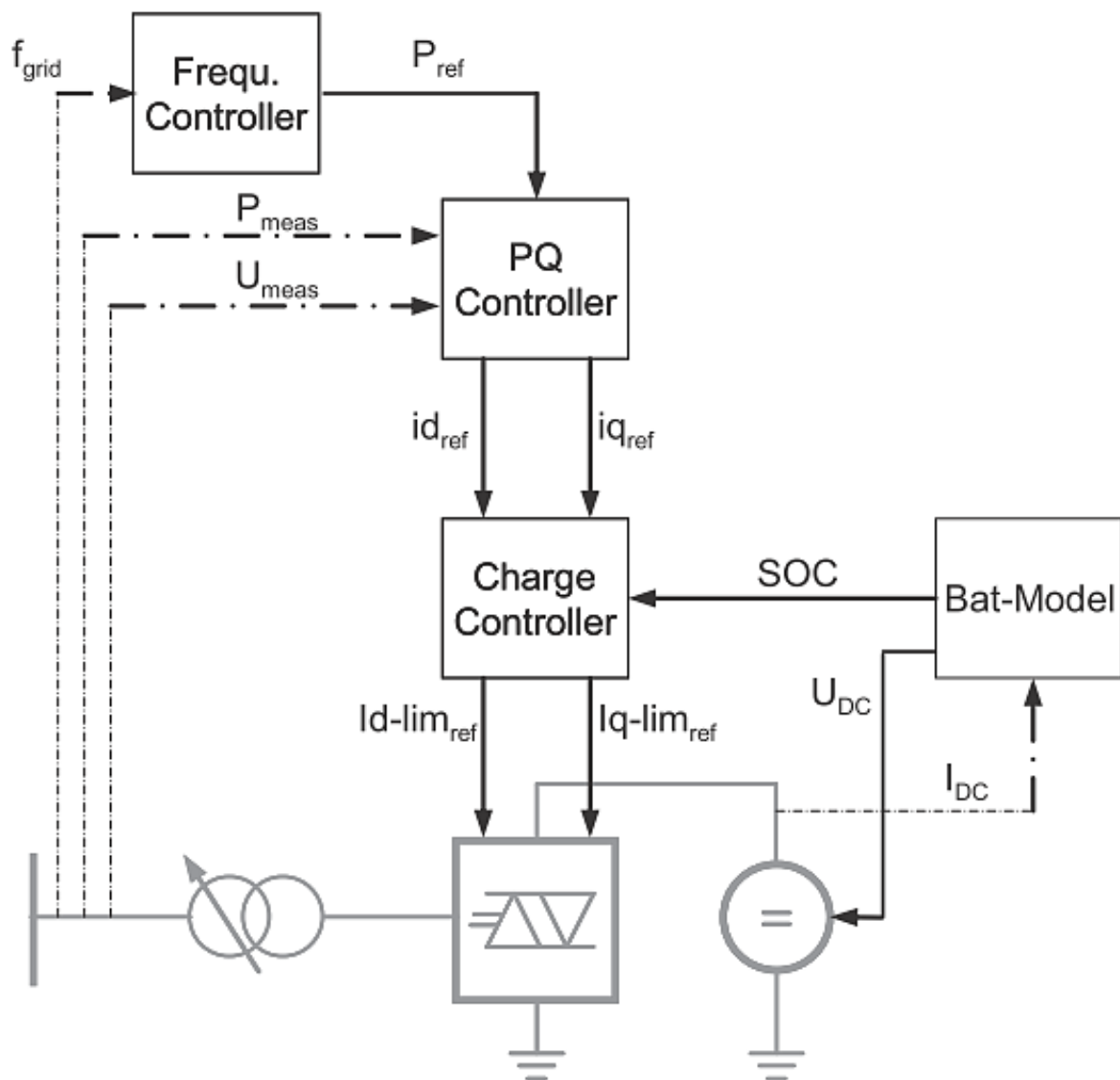
- Ρυθμιστής συχνότητας,
- Ρυθμιστής ενεργής/άεργης ισχύος,
- Ρυθμιστής φόρτισης.



Σχήμα 9.5 – Το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος BESS [52]

Το μοντέλο για το σύστημα BESS στο DIgSILENT PowerFactory φαίνεται στο **Σχήμα 9.5**, είναι όμως απαραίτητο να εισαχθούν τα βασικά δεδομένα των στοιχείων στο διάγραμμα. Τα στοιχεία αυτά έχουν διαφορετικά δεδομένα για τις καρτέλες *Basic Data*, *Load Flow*, κ.λπ. Για την πηγή DC, πρέπει να διαμορφωθεί μόνο η επιλογή *Basic Data*. Είναι πολύ σημαντικό βήμα να γίνει εισαγωγή της τιμής της ονομαστικής τάσης ( $U_{nom}$ )· στη συγκεκριμένη περίπτωση η ονομαστική τάση είναι 0.8 kV. Τα δεδομένα για το μοντέλο της μπαταρίας θα πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε η **Εξίσωση 9.6** να πληρείται για όλες τις καταστάσεις φόρτισης της μπαταρίας. Ο μετατροπέας PWM μπορεί να φτάσει σε κορεσμό και το σύστημα BESS δεν θα λειτουργήσει σωστά εάν δεν πληρείται αυτή η προϋπόθεση [50].

Θα πρέπει επίσης να διαμορφωθεί ο μετατροπέας PWM. Στην καρτέλα *Basic Data*, είναι απαραίτητο να γίνει εισαγωγή τιμών για την εναλλασσόμενη και συνεχή τάση ( $U_{nom}/U_{nom.dc}$ ), καθώς και την ονομαστική ισχύ ( $S_{nom}$ ). Τα δεδομένα της καρτέλας *Load Flow* είναι σημαντικά για την έναρξη των ροών ισχύος. Μία συνθήκη ελέγχου πρέπει να είναι  $P = 0$  (συνθήκη για τον άξονα d). Μια άλλη συνθήκη θα μπορούσε να είναι μια καθορισμένη τιμή για άεργη ισχύ ή τάση AC σε έναν επιλεγμένο κόμβο (άξονας q). Με τους μετατροπείς PWM, είναι εξίσου σημαντικά τα δεδομένα στην καρτέλα *RMS-Simulation* [50,52].



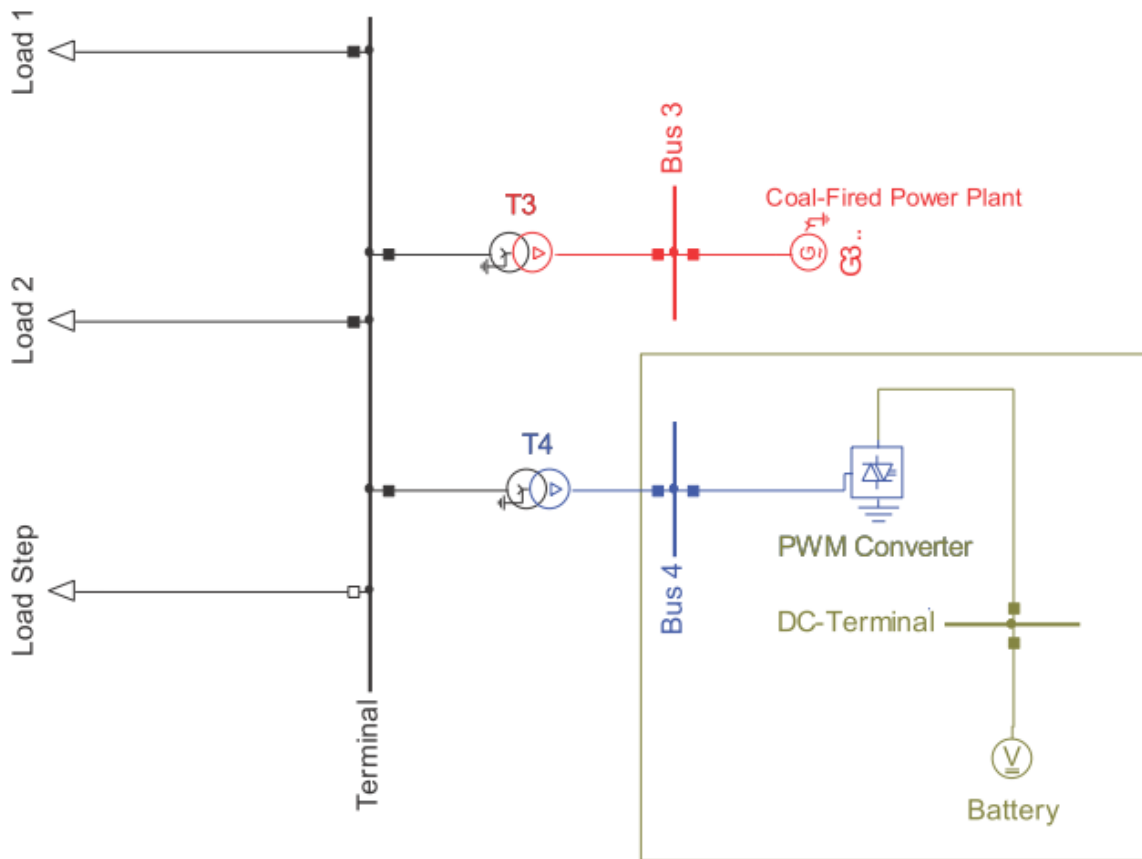
Σχήμα 9.6 – Η δομή του συστήματος BESS [52]

## 9.2 Δοκιμή του συστήματος BESS

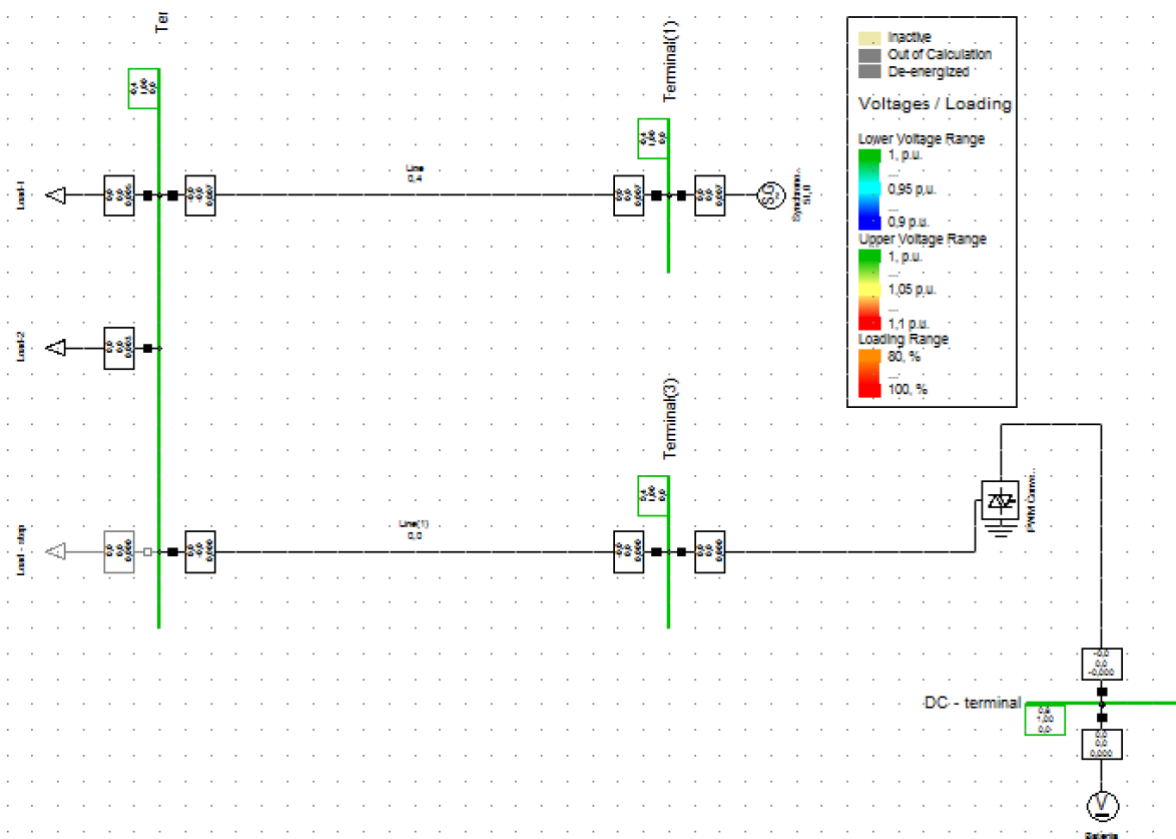
Το μοντέλο συστήματος BESS θα δοκιμαστεί σε ένα απλό δίκτυο για να επαληθευτεί η λειτουργικότητα του συστήματος. Το δίκτυο αποτελείται από τρία φορτία, δύο γραμμές μεταφοράς, μια σύγχρονη γεννήτρια και ένα σύστημα BESS, και φαίνεται στο **Σχήμα 9.7** [50].

Τα φορτία *Load 1* ενεργής ισχύος 3 kW και *Load 2* ενεργής ισχύος 2 kW είναι συνδεδεμένα στη γραμμή μεταφοράς, τάσης 0.4 kV. Μετά την έναρξη της RMS (Root Mean Square) προσομοίωσης, η σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτεί το δίκτυο με 5 kW ενεργής ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα BESS δεν τροφοδοτεί το δίκτυο με ενεργή ισχύ. Στο **Σχήμα 9.8** εμφανίζεται η αρχική κατάσταση του δικτύου πριν από τη σύνδεση του φορτίου *Load Step*. Μπορεί να φανεί ότι οι τάσεις του γραμμής μεταφοράς είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων και η γεννήτρια δεν είναι υπερφορτωμένη [50].





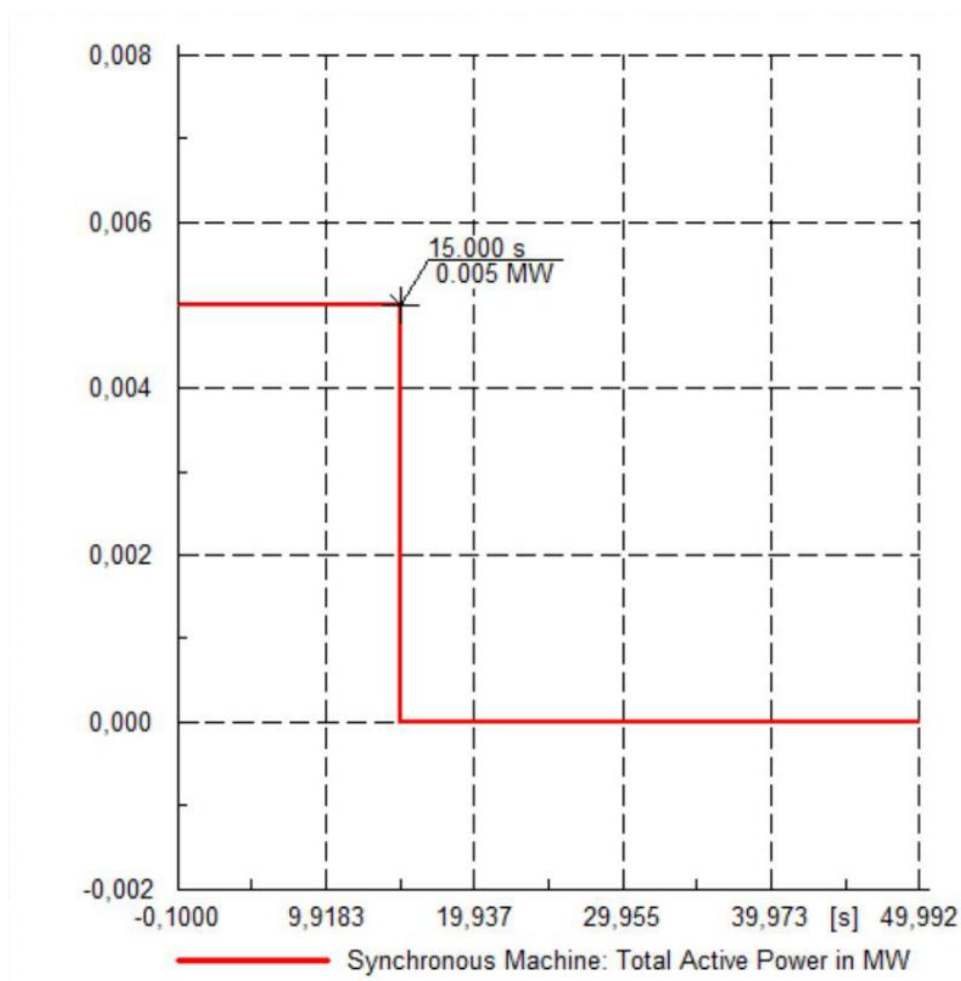
Σχήμα 9.7 – Ένα απλό δίκτυο δοκιμής του συστήματος BESS [52]



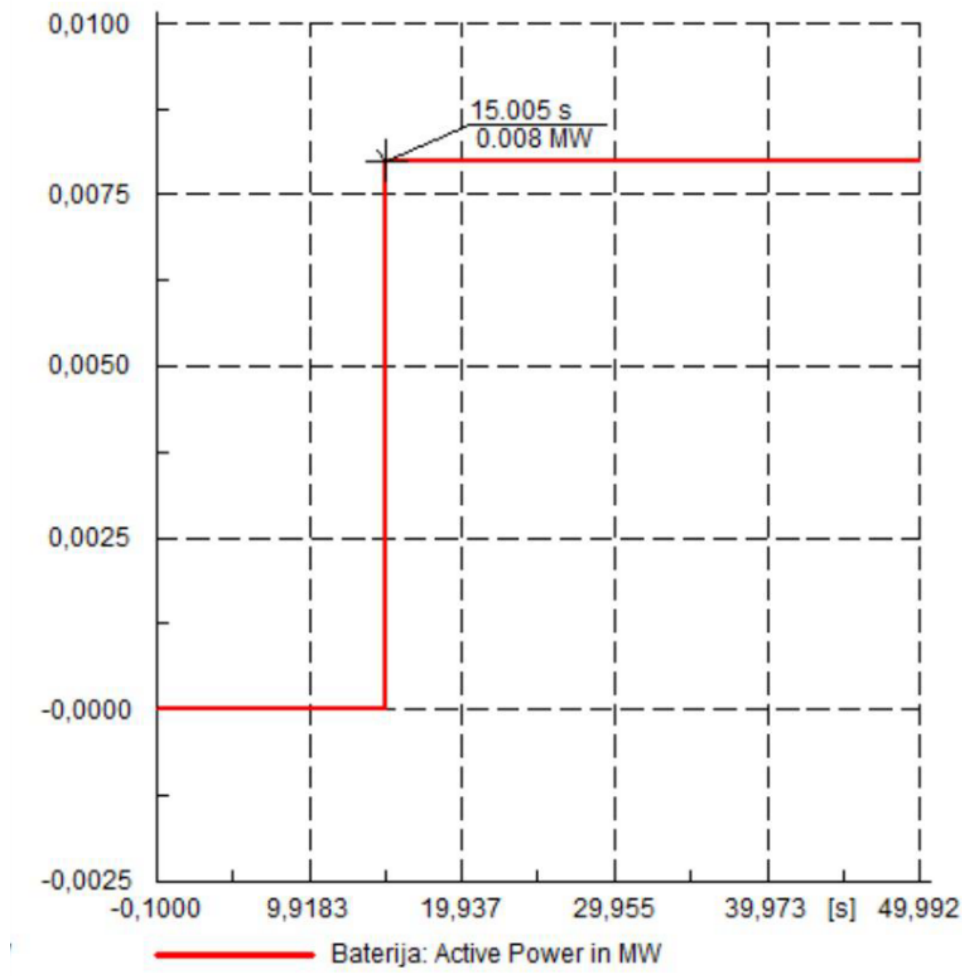
Σχήμα 9.8 – Αρχικές ροές ισχύος του δικτύου δοκιμής του συστήματος BESS [50]

Η συμβολή του συστήματος BESS αποδεικνύεται από το γεγονός ότι μετά από 15 δευτερόλεπτα συνδέεται στο δίκτυο ένα πρόσθετο φορτίο *Load Step* ενεργής ισχύος 3 kW και η γεννήτρια αποτυγχάνει. Το σύστημα BESS τροφοδοτεί το δίκτυο με την απαραίτητη ισχύ μετά την αποτυχία της γεννήτριας και την απενεργοποίηση του φορτίου, δηλαδή παρέχει 8 kW ενεργής ισχύος στο δίκτυο. Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι 50 δευτερόλεπτα, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να παρουσιάζονται στα **Σχήματα 9.9** και **9.10** [50].

Στο **Σχήμα 9.9** παρουσιάζεται το διάγραμμα της ενεργής ισχύος της σύγχρονης γεννήτριας, στο οποίο φαίνεται ότι η γεννήτρια τροφοδοτεί 5 kW ενεργής ισχύος στο δίκτυο μέχρι τη στιγμή της αστοχίας, μετά την εμφάνιση της οποίας η ισχύς της γεννήτριας πέφτει στο μηδέν. Στο **Σχήμα 9.10** παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της ενεργής ισχύος μιας πηγής DC με την οποία μοντελοποιείται η μπαταρία. Παρατηρείται ότι η ενεργή ισχύς της πηγής DC είναι αρχικά ίση με μηδέν και μετά την προσθήκη του φορτίου και της αστοχίας της γεννήτριας σε χρόνο  $t = 15s$ , αυξάνεται στην τιμή των 8 kW. Ενώ λειτουργεί η σύγχρονη γεννήτρια, η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς επαναφόρτισης. Όταν η γεννήτρια αποτύχει, η μπαταρία ή το σύστημα BESS αναλαμβάνει την παροχή ρεύματος στον καταναλωτή και εξασφαλίζει αδιάκοπη τάση [50].



**Σχήμα 9.9** – Ενεργή ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας [50]



Σχήμα 9.10 – Ενεργή ισχύς της πηγής DC (μπαταρία) [50]

Δεδομένου ότι η εγκατεστημένη ισχύς των καταναλωτών στο δίκτυο είναι 8 kW, με συντελεστή ταυτοχρονισμού 0,4 (που σημαίνει ότι λειτουργεί το 40% του συνόλου των καταναλωτών) και με ονομαστική τάση πηγής 800 V, το ρεύμα είναι 4 A. Εάν η συνολική χωρητικότητα του συστήματος BESS (2500 Ah) διαιρεθεί με το ρεύμα, προκύπτει ότι η χρονική σταθερά του συστήματος είναι ίση με 625 ώρες [50].

Το σύστημα BESS διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των αλλαγών ισχύος στο δίκτυο. Είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο συνεχώς, ακόμη και όταν φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και γεννήτριες τροφοδοτούν το δίκτυο με ηλεκτρισμό με τον κατάλληλο τρόπο. Το BESS μπορεί να καλύψει την ανισορροπία μεταξύ της παρεχόμενης ισχύος και του φορτίου του δικτύου, αποθηκεύοντας περίσσεια ενέργειας ή καλύπτοντας την υπόλοιπη ζήτηση. Φορτίζεται όταν αυξάνεται η συχνότητα και αποφορτίζεται όταν αυτή μειώνεται. Το πλεονέκτημα της εισαγωγής του συστήματος BESS είναι η ταχύτερη παροχή ρεύματος σε σύγκριση με τις γεννήτριες ντίζελ. Επιπλέον, το BESS αποθηκεύει περίσσεια ενέργειας στο δίκτυο, ειδικά όταν η ισχύς εξόδου του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερη από τη ζήτηση [50].

# Κεφάλαιο 10

## *Πρακτική Εφαρμογή: Διασυνδεδεμένο Φ/Β Σύστημα χωρίς Αποθήκευση Ενέργειας σε κεραμοσκεπή οικίας στην πόλη της Κοζάνης*

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία τυπική διάταξη ενός υφιστάμενου **διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας**, εγκατεστημένο σε κεραμοσκεπή οικίας στην πόλη της Κοζάνης και αναλύονται πρωτογενή δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

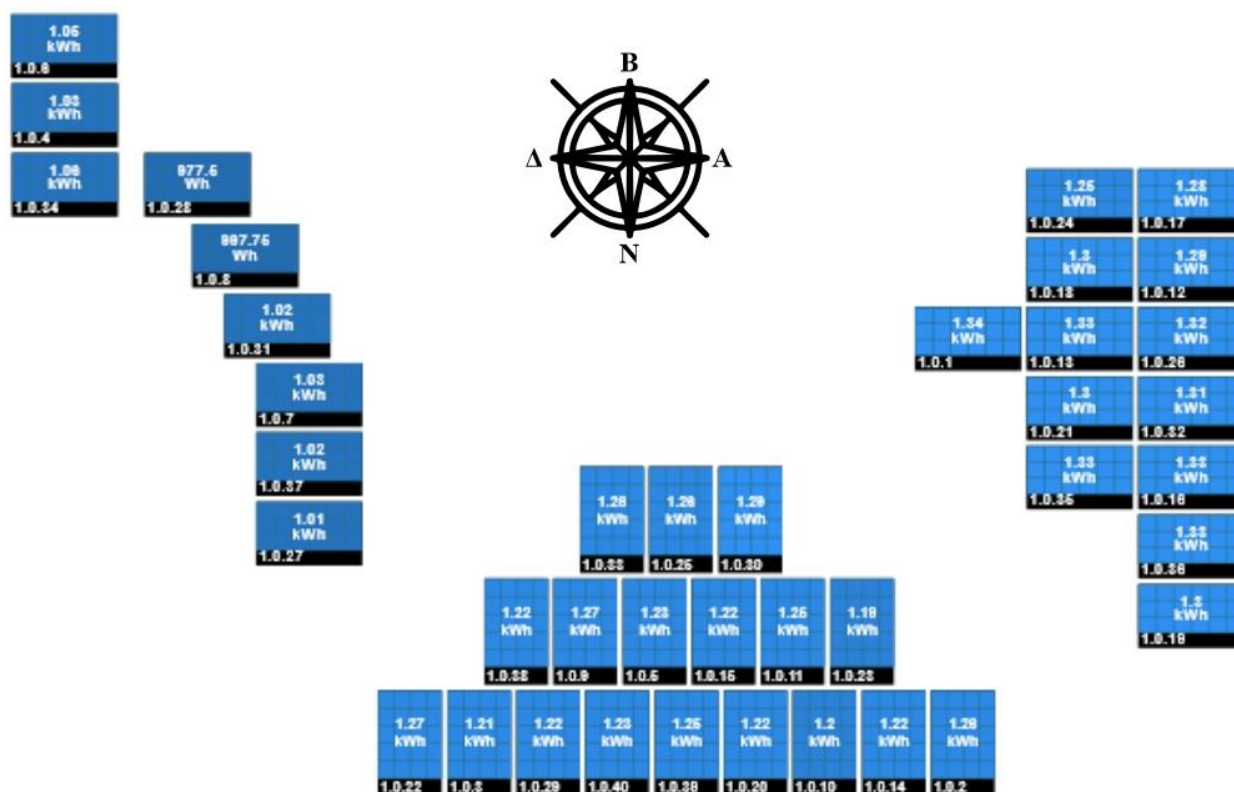
### 10.1 Διάταξη και μέρη του διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος

Τα μέρη που απαρτίζουν το ηλεκτρικό μέρος του διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος αναφέρονται παρακάτω, με τα τεχνικά δεδομένα να παρουσιάζονται στο **Παράρτημα Β'**:

- 40 Φ/Β πλαίσια (Canadian Solar CS6P–250P 250 W).
- 40 Power Optimizers (SolarEdge OP250–LV/MC4), τα οποία είναι διατάξεις ενίσχυσης και προστασίας εγκατεστημένες κάτω από τα Φ/Β πλαίσια. Ο ρόλος τους είναι: (1) η ενίσχυση της ισχύος εξόδου και εν τέλει της απόδοσής του Φ/Β πλαισίου και (2) η απομόνωση ενός Φ/Β πλαισίου σε περίπτωση δυσλειτουργίας (π.χ. βλάβη, σκίαση κ.λπ.), διατηρώντας τα υπόλοιπα Φ/Β πάνελ της στοιχειοσειράς ανεπηρέαστα, σε λειτουργική κατάσταση.
- 1 τριφασικός αντιστροφέας (inverter), ισχύος 10 kW (SolarEdge SE10K), για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Ο αντιστροφέας διαθέτει ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος (MPP tracker).
- Σύστημα γείωσης στον ηλεκτρικό πίνακα του τριφασικού αντιστροφέα (inverter).
- 1 τριφασικός μετρητής της παραγόμενης ενέργειας που εγγέται στο δίκτυο.
- Διατάξεις ελέγχου, καταγραφής και απεικόνισης δεδομένων (τηλε-επιτήρηση).

Στο **Σχήμα 10.1** απεικονίζεται η χωροταξική διάταξη των Φ/Β πλαισίων στην κεραμοσκεπή της οικίας. Πιο συγκεκριμένα:

- Σε νότια διεύθυνση και με γωνία κλίσης 45° είναι εγκατεστημένα 18 Φ/Β πλαίσια.
- Σε ανατολική διεύθυνση και με γωνία κλίσης 45° είναι εγκατεστημένα 13 Φ/Β πλαίσια.
- Σε δυτική διεύθυνση και με γωνία κλίσης 15° είναι εγκατεστημένα 9 Φ/Β πλαίσια.



Σχήμα 10.1 – Χωροθέτηση των Φ/Β πλαισίων στην κεραμοσκεπή της οικίας

### 10.1.1 Φ/Β πλαίσια της Canadian Solar

Στους Πίνακες 10.1 και 10.2 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα βασικά ηλεκτρικά και μηχανικά τεχνικά δεδομένα των Φ/Β πλαισίων, αντίστοιχα. Στο Σχήμα Β.1 του Παραρτήματος Β' παρουσιάζεται το πλήρες τεχνικό φυλλάδιο δεδομένων των Φ/Β πλαισίων, όπως δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

Πίνακας 10.1 – Ηλεκτρικά δεδομένα των Φ/Β πλαισίων [102]

Ηλεκτρικά δεδομένα	Τιμή
Μέγιστη ονομαστική ισχύς σε συνθήκες STC <sup>9</sup> ( $P_{max}$ )	250 W
Μέγιστη τάση λειτουργίας ( $V_{mp}$ )	30.1 V
Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας ( $I_{mp}$ )	8.30 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ )	37.2 V
Ρεύμα ανοικτού κυκλώματος ( $I_{sc}$ )	8.87 A

<sup>9</sup> STC = Standard Test Conditions, πρότυπες συνθήκες δοκιμής

Θερμοκρασία λειτουργίας		-40 °C έως περίπου +85 °C
Μέγιστη ισχύς συστήματος		1000 V (IEC) / 600 V (UL)
Μέγιστη ονομαστική τιμή ασφάλειας στοιχειοσειράς		15 A
Ανοχή ισχύος		+5 W
Θερμοκρασιακός συντελεστής	$P_{max}$	-0.43% / °C
	$V_{oc}$	-0.34% / °C
	$I_{sc}$	0.065% / °C
	NOCT <sup>10</sup>	45 °C
Κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC) ακτινοβολίας τιμής 1000 W/m <sup>2</sup> , ηλιακού φάσματος AM1.5 και θερμοκρασίας Φ/Β κελιού 25 °C.		

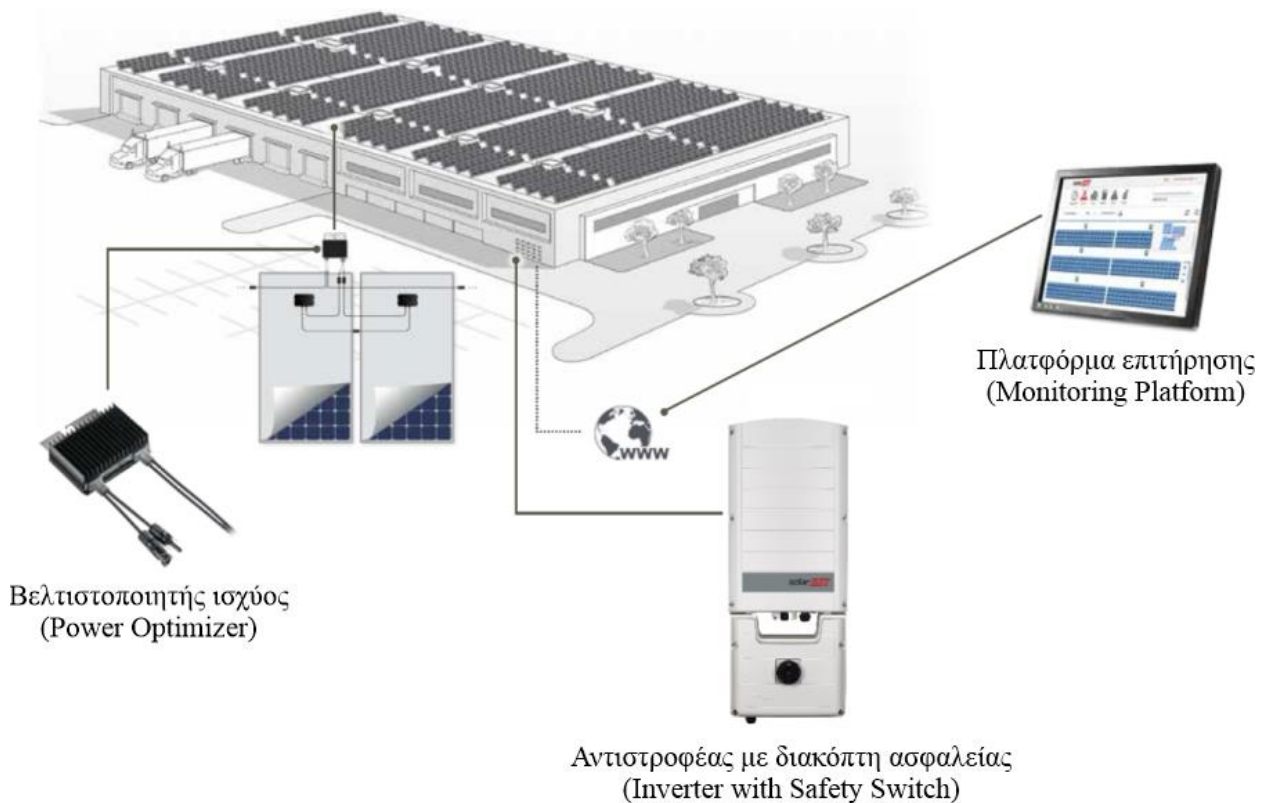
**Πίνακας 10.2** – Μηχανικά δεδομένα των Φ/Β πλαισίων [102]

Μηχανικά δεδομένα	
Τύπος (δομή) Φ/Β κελιών	Πολυκρυσταλλική δομή
Διάταξη Φ/Β κελιών	60 (6 x 10)
Διαστάσεις	1638 x 982 x 40 mm
Βάρος	18 kg
Εμπρόσθιο κάλυμμα	Σκληρυμένο γυαλί
Υλικό πλαισίου	Ανοδιωμένο κράμα αλουμινίου

### 10.1.2 Σύστημα συλλογής ενέργειας της SolarEdge

Η εγκατεστημένη λύση συλλογής ενέργειας της SolarEdge μπορεί να μεγιστοποιήσει την ισχύ εξόδου από κάθε τύπο εγκατάστασης ηλιακών φωτοβολταϊκών, ενώ είναι σε θέση να μειώσει το μέσο κόστος ανά παραγόμενο watt. Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν καθένα από τα στοιχεία του συστήματος, ενώ στο **Σχήμα 10.2** αποτυπώνεται οπτικά καθένα από αυτά τα στοιχεία [103].

<sup>10</sup> NOCT = Nominal Operating Cell Temperature, ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας Φ/Β κελιού



Σχήμα 10.2 – Τα στοιχεία του συστήματος συλλογής ενέργειας της SolarEdge [103]

### 10.1.2.1 Βελτιστοποιητής ισχύος (Power Optimizer)

Οι βελτιστοποιητές ισχύος είναι μετατροπείς DC–DC συνδεδεμένοι σε Φ/Β μονάδες προκειμένου να μεγιστοποιήσουν τη συλλογή ισχύος, εκτελώντας ανεξάρτητη παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) σε επίπεδο μονάδας. Επίσης, ρυθμίζουν την τάση της στοιχειοσειράς σε σταθερό επίπεδο, ανεξάρτητα από το μήκος της στοιχειοσειράς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι βελτιστοποιητές ισχύος ενσωματώνουν μία λειτουργία τάσης ασφαλείας που μειώνει αυτόματα την έξοδο κάθε βελτιστοποιητή ισχύος στο 1 Vdc στις ακόλουθες περιπτώσεις [103]:

- Σε συνθήκες σφάλματος,
- Όταν οι βελτιστοποιητές ισχύος έχουν αποσυνδεθεί από τον αντιστροφέα,
- Όταν ο ασφαλειοδιακόπτης του διακόπτη ασφαλείας είναι ανοικτός,
- Όταν ο διακόπτης AC του αντιστροφέα είναι ανοικτός,
- Όταν ο γρήγορος τερματισμός λειτουργίας (PVRSS) πραγματοποιείται με μία από τις ακόλουθες μεθόδους:
  - Ο διακόπτης AC του αντιστροφέα ανοίγει ή το AC στον αντιστροφέα αποσυνδέεται με άλλη μέθοδο (σκόπιμα ή ως αποτέλεσμα σφάλματος)
  - Ο διακόπτης ON/OFF του μετατροπέα είναι ανοικτός,
  - Ο διακόπτης ασφαλείας είναι ανοικτός,



- Για μετατροπείς με χειροκίνητο, γρήγορο τερματισμό λειτουργίας, η εκκίνηση πραγματοποιείται με απενεργοποίηση (άνοιγμα) του διακόπτη ασφαλείας

Κάθε βελτιστοποιητής ισχύος μεταδίδει επίσης δεδομένα απόδοσης της Φ/Β μονάδας στον αντιστροφέα μέσω της γραμμής ισχύος DC. Υπάρχουν δύο τύποι βελτιστοποιητών ισχύος [103]:

- Με πρόσθετη μονάδα (Module Add-on), συνδεδεμένο σε μία ή περισσότερες Φ/Β μονάδες,
- Έξυπνες μονάδες (Smart Modules), με το βελτιστοποιητή ισχύος να είναι ενσωματωμένος σε καθεμία Φ/Β μονάδα.

Στον Πίνακα 10.3 παρουσιάζονται τα βασικά ηλεκτροτεχνικά δεδομένα, ενώ στο Σχήμα Β.2 του Παραρτήματος Β' παρουσιάζεται το πλήρες τεχνικό φυλλάδιο δεδομένων του βελτιστοποιητή ισχύος, όπως δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

**Πίνακας 10.3** – Ηλεκτροτεχνικά δεδομένα του βελτιστοποιητή ισχύος [103]

Ηλεκτροτεχνικά δεδομένα	
Ονομαστική ισχύς εισόδου DC	250 W
Απόλυτη μέγιστη τάση εισόδου ( $V_{oc}$ )	55 Vdc
Εύρος λειτουργίας MPPT	5 – 55 Vdc
Μέγιστο συνεχές ρεύμα εισόδου ( $I_{sc}$ )	10 Adc
Μέγιστη απόδοση	99.5%
Σταθμισμένη απόδοση	98.8%
Κατηγορία υπέρτασης	II
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	15 Adc
Τάση λειτουργίας εξόδου	5 – 60 Vdc
Ασφαλής τάση εξόδου ανά Power Optimizer	1 Vdc

#### 10.1.2.2 Αντιστροφέας με διακόπτη ασφαλείας (Inverter with Safety Switch)

Ο αντιστροφέας μετατρέπει αποτελεσματικά την ισχύ DC από τις Φ/Β μονάδες σε ισχύ AC, τροφοδοτώντας ένα σύνολο τοπικών φορτίων π.χ. μίας οικίας ή επιχείρησης, και εν συνεχεία του ηλεκτρικού δικτύου. Ο αντιστροφέας λαμβάνει επίσης τα δεδομένα επιτήρησης από κάθε

βελτιστοποιητή ισχύος και τα μεταδίδει σ' έναν κεντρικό διακομιστή (η πλατφόρμα επιτήρησης απαιτεί σύνδεση στο διαδίκτυο). Υποστηρίζει την τροφοδοσία τριφασικών AC (400 V πολική τάση, L–L), αλλά και μονοφασικών AC φορτίων (230 V φασική τάση, L–N) [103].

Ο διακόπτης ασφαλείας διαθέτει χειροκίνητο διακόπτη για την αποσύνδεση της τροφοδοσίας DC του Φ/Β συστήματος, βρίσκεται δε κάτω από τον αντιστροφέα και συνδέεται με αυτόν με τη χρήση καλωδίων AC και DC. Στον **Πίνακα 10.4** παρουσιάζονται τα βασικά ηλεκτροτεχνικά δεδομένα, ενώ στο **Σχήμα Β.3** του **Παραρτήματος Β'** παρουσιάζεται το πλήρες τεχνικό φυλλάδιο δεδομένων του αντιστροφέα, όπως δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

**Πίνακας 10.4** – Ηλεκτροτεχνικά δεδομένα του αντιστροφέα [103]

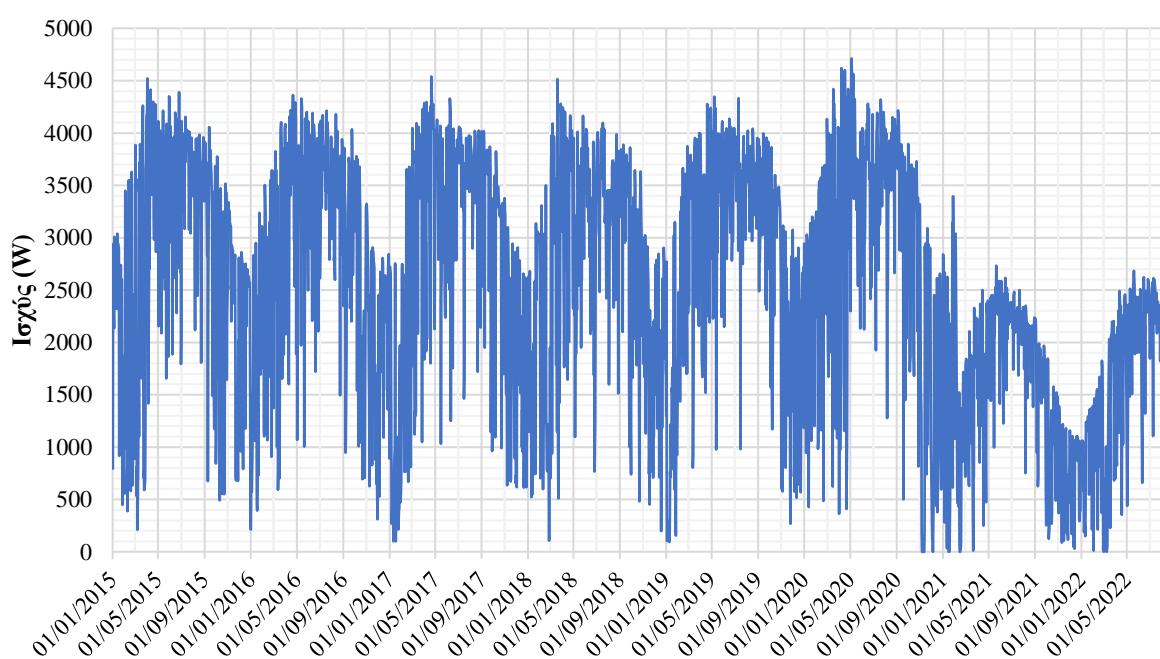
Ηλεκτροτεχνικά δεδομένα	
Μέγιστη τάση DC	950 Vdc
Εύρος τάσης λειτουργίας	680 – 950 Vdc
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	16.4 Adc
Μέγιστη ισχύς εξόδου	10 kVA
Ονομαστική τάση λειτουργίας	220 – 230 Vac, L–N / 380 – 400 Vac, L–L
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	16 Aac, RMS
Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας	50/60 Hz
Εύρος συντελεστή ισχύος (cosφ)	± 0.9 έως 1
Κλάση προστασίας	I
Προστασία	IP65

### 10.1.2.3 Πλατφόρμα επιτήρησης (Monitoring Platform)

Η πλατφόρμα επιτήρησης επιτρέπει την παρακολούθηση της τεχνικής και οικονομικής απόδοσης μίας ή περισσότερων Φ/Β εγκαταστάσεων. Παρέχει πληροφορίες του παρελθόντος και του παρόντος αναφορικά με την απόδοση του συστήματος, τόσο σε επίπεδο συστήματος όσο και σε επίπεδο Φ/Β μονάδας [103]. Στο **Σχήμα Β.4** του **Παραρτήματος Β'** παρουσιάζεται ένα συνοπτικό φυλλάδιο επισκόπησης της πλατφόρμας επιτήρησης, όπως δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

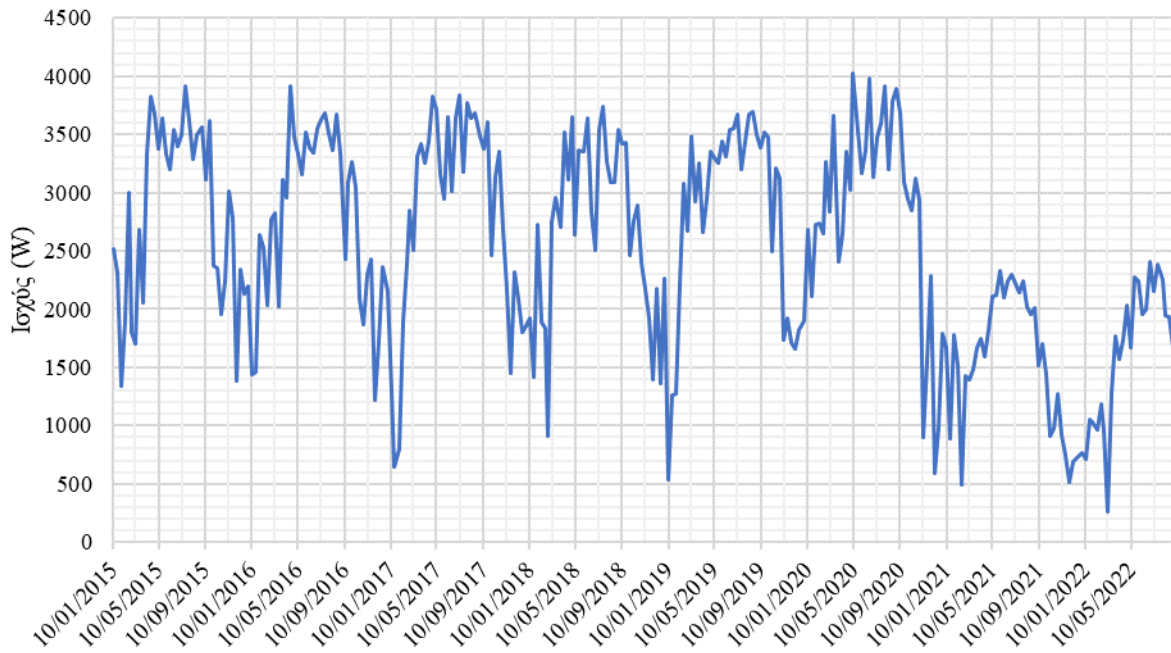
## 10.2 Παραγωγή ενέργειας Φ/Β συστήματος

Η διαθεσιμότητα των πρωτογενών δεδομένων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των Φ/Β πλαισίων από 01/01/2015 έως και τα τέλη Αυγούστου 2022 παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες, οι οποίες είναι συνάρτηση της τοποθεσίας εγκατάστασης, της μεταβολής του μικροκλίματος της περιοχής των τελευταίων ετών και της επίδρασης άλλων σημαντικών παραγόντων στην απόδοση της παραγωγής (π.χ. σκίαση, θερμοκρασία, ακτινοβολία, γήρανση κ.λπ.), όπως αναλύθηκαν στο **Κεφάλαιο 4.6**. Ο κατασκευαστής των Φ/Β πλαισίων παρέχει εγγύηση γραμμικής μείωσης απόδοσης 0.7% σε διάρκεια 25 ετών λειτουργίας. Στη γραφική παράσταση του **Σχήματος 10.3** αποτυπώνεται η συνολική, τριφασική παραγωγή του προαναφερόμενου χρονικού διαστήματος.



**Σχήμα 10.3** – Συνολική μεταβολή παραγωγής από 01/2015 έως και 08/2022

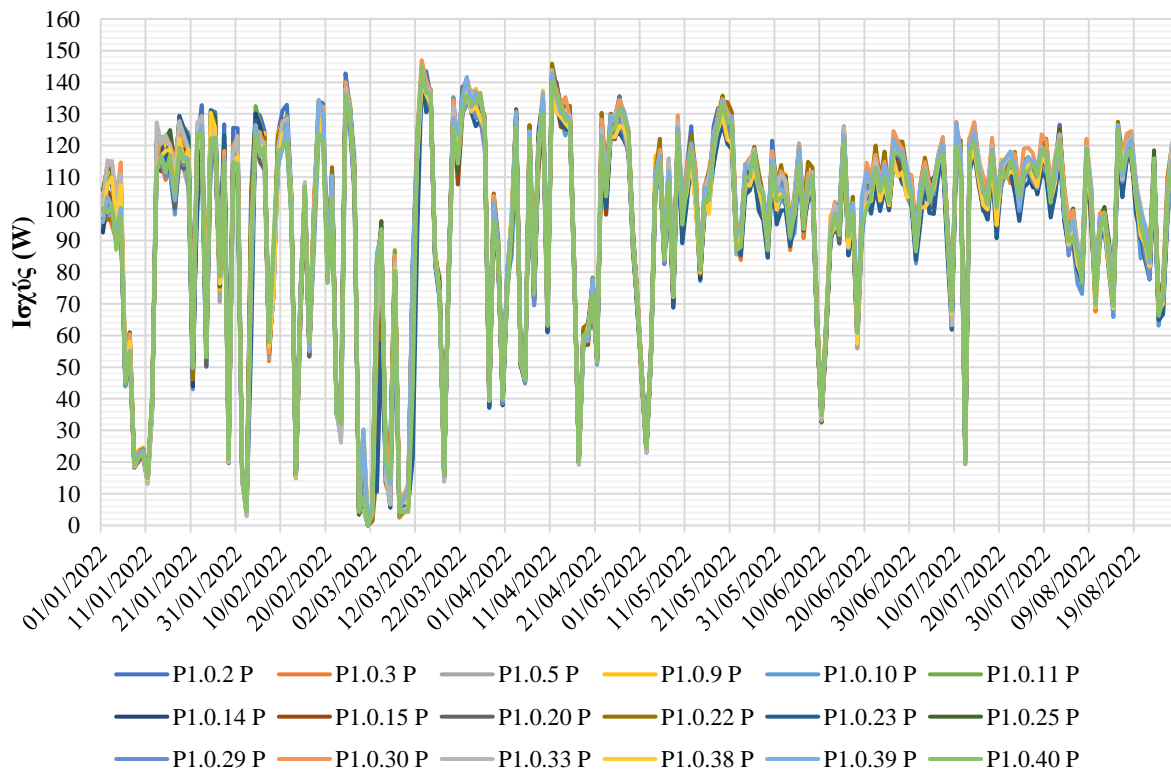
Όπως είναι αναμενόμενο και αποτυπώνεται παραστατικά στη γραφική παράσταση, η παραγωγή αυξάνεται από τον Μάρτιο, εμφανίζοντας τις μέγιστες τιμές το τρίμηνο Ιουνίου – Ιουλίου – Αυγούστου, ενώ αντιθέτως, παρουσιάζει πτωτικές τάσεις από τον Σεπτέμβριο, εμφανίζοντας τις ελάχιστες τιμές το τρίμηνο Δεκεμβρίου – Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου. Απότομες μειώσεις της παραγωγής, ανεξαρτήτως εποχής, οφείλονται κυρίως στην επίδραση των καιρικών και ατμοσφαιρικών συνθηκών (συννεφιά, βροχή, χιόνι, σκόνη κ.λπ.) και σε μικρότερο (σπανιότερο) βαθμό σε παροδική δυσλειτουργία του εξοπλισμού. Στη γραφική παράσταση του **Σχήματος 10.4** αποτυπώνεται η μέση, τριφασική παραγωγή του προαναφερόμενου χρονικού διαστήματος, ανά διάστημα 10 ημερών. Επιπλέον, στο **Σχήμα Γ.1** του **Παραρτήματος Γ'** παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της ετήσιας, τριφασικής παραγωγής (από 01/2015 έως και 08/2022).



**Σχήμα 10.4** – Μέση μεταβολή παραγωγής από 01/2015 έως και 08/2022, ανά διάστημα 10 ημερών

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν αποτυπώνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά ομάδα Φ/Β πλαισίων, σύμφωνα με τον προσανατολισμό τους, από 01/2022 έως και τα τέλη Αυγούστου 2022.

### Νότια ομάδα 18 Φ/Β πλαισίων



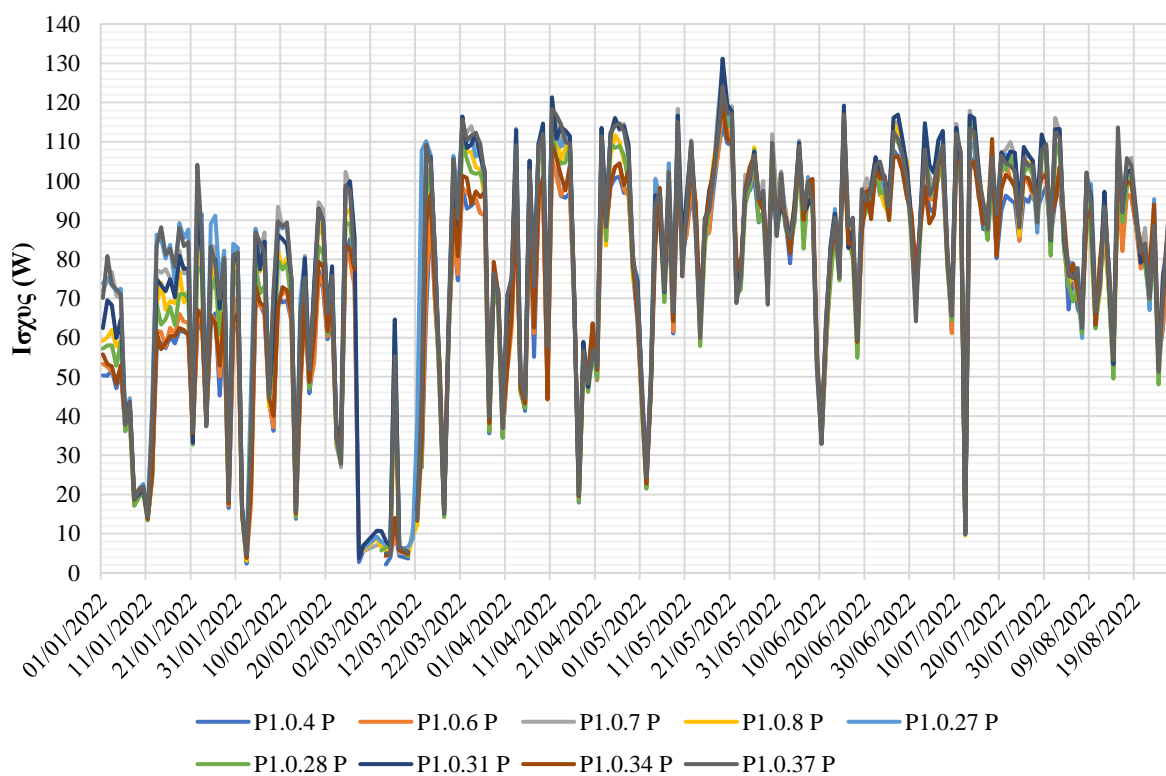
**Σχήμα 10.5** – Παραγωγή νότιας ομάδας 18 Φ/Β πλαισίων από 01/2022 έως και 08/2022

### Ανατολική ομάδα 13 Φ/Β πλαισίων



Σχήμα 10.6 – Παραγωγή ανατολικής ομάδας 13 Φ/Β πλαισίων από 01/2022 έως και 08/2022

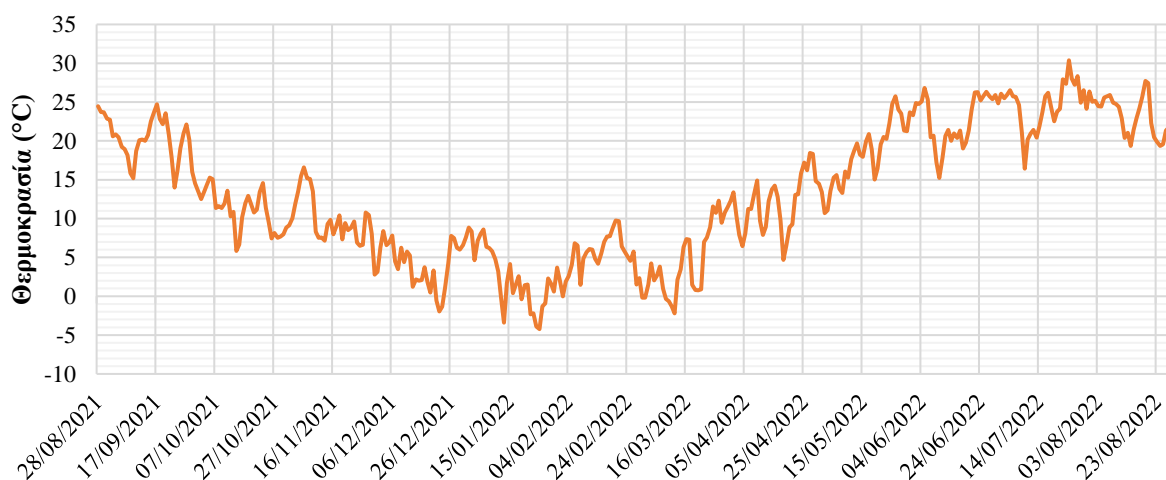
### Δυτική ομάδα 9 Φ/Β πλαισίων



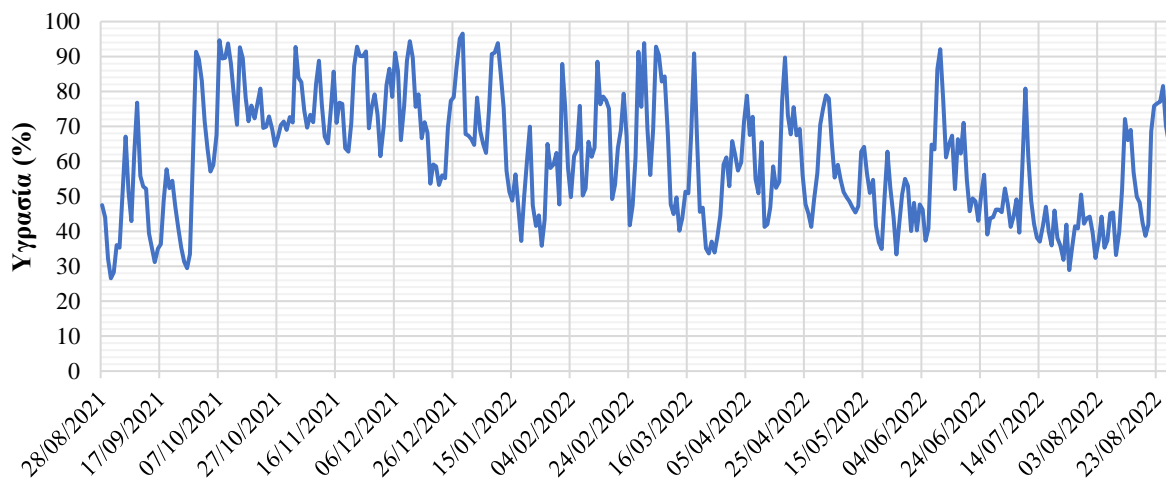
Σχήμα 10.7 – Παραγωγή δυτικής ομάδας 9 Φ/Β πλαισίων από 01/2022 έως και 08/2022

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις διαπιστώνουμε ότι η ομάδα των Φ/Β πλαισίων που έχουν κατεύθυνση προς το νότο έχουν και την καλύτερη απόδοση, ακολουθώντας πολύ κοντά η ομάδα των Φ/Β πλαισίων με κατεύθυνση ανατολικά. Η γωνία κλίσης των 45° στην κεραμοσκεπή, ο αριθμός των πλαισίων και η μεγαλύτερη χρονικά έκθεση προς τη φαινόμενη πορεία του ηλίου είναι οι κυριότεροι λόγοι που οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα. Τα Φ/Β πλαίσια που έχουν κατεύθυνση προς τη δύση εμφανίζουν μικρότερη απόδοση, λόγω της μικρής γωνίας κλίσης τους πάνω στη κεραμοσκεπή (15°) και της θέσης ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία του ηλίου.

Τέλος, στις ακόλουθες τρεις (3) γραφικές παραστάσεις γίνεται ενδεικτική αποτύπωση των μεταβολών της θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης των Φ/Β πλαισίων (Κοζάνη), για διάστημα ενός έτους (τέλη Αυγούστου 2021 έως τέλη Αυγούστου 2022). Η σημαντικότητα καταγραφής των μεγεθών αυτών έγκειται στο γεγονός ότι επηρεάζουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό τη συνολική απόδοση του Φ/Β συστήματος, ενώ ταυτόχρονα δίνουν σημαντικές πληροφορίες για πιθανή μελλοντική επέκταση του συστήματος.

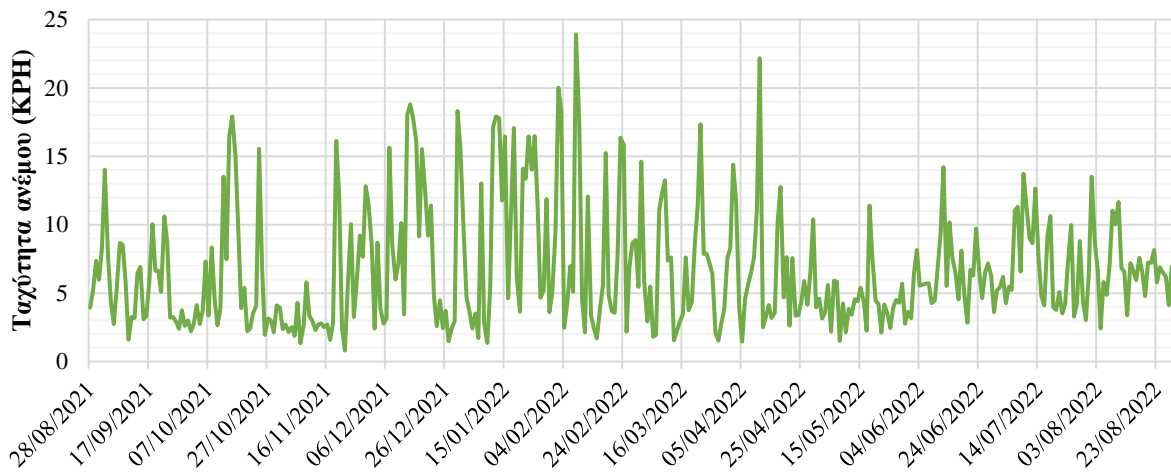


Σχήμα 10.8 – Θερμοκρασιακή μεταβολή από 08/2021 έως και 08/2022



Σχήμα 10.9 – Μεταβολή υγρασίας από 08/2021 έως και 08/2022

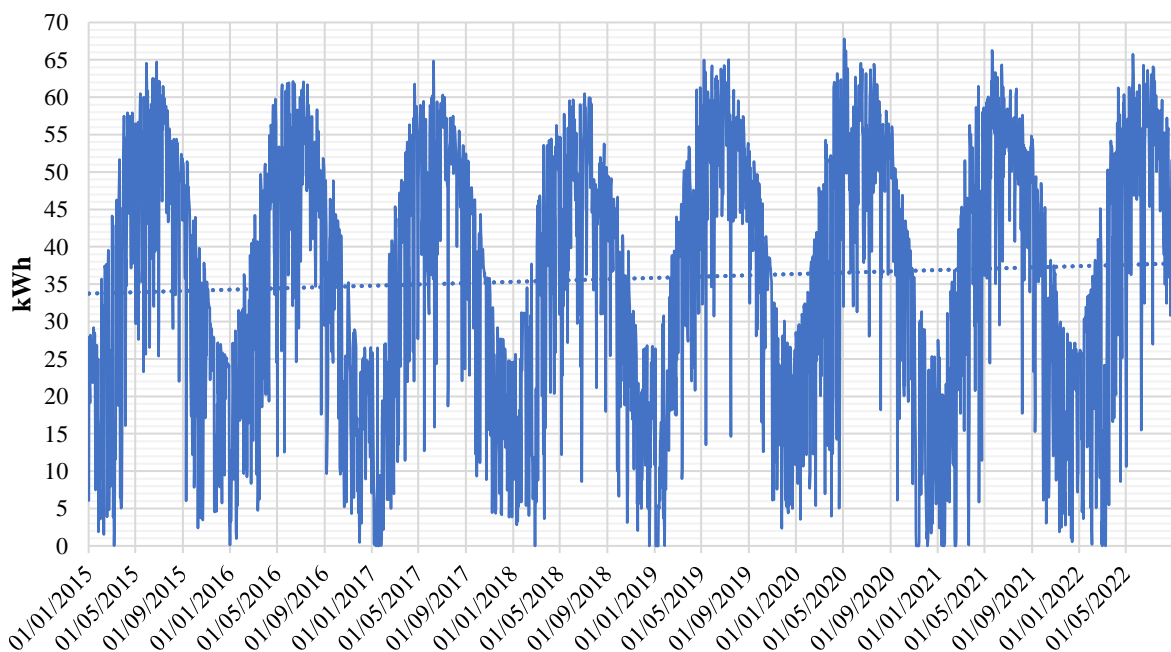




Σχήμα 10.10 – Μεταβολή ταχύτητας ανέμου από 08/2021 έως και 08/2022

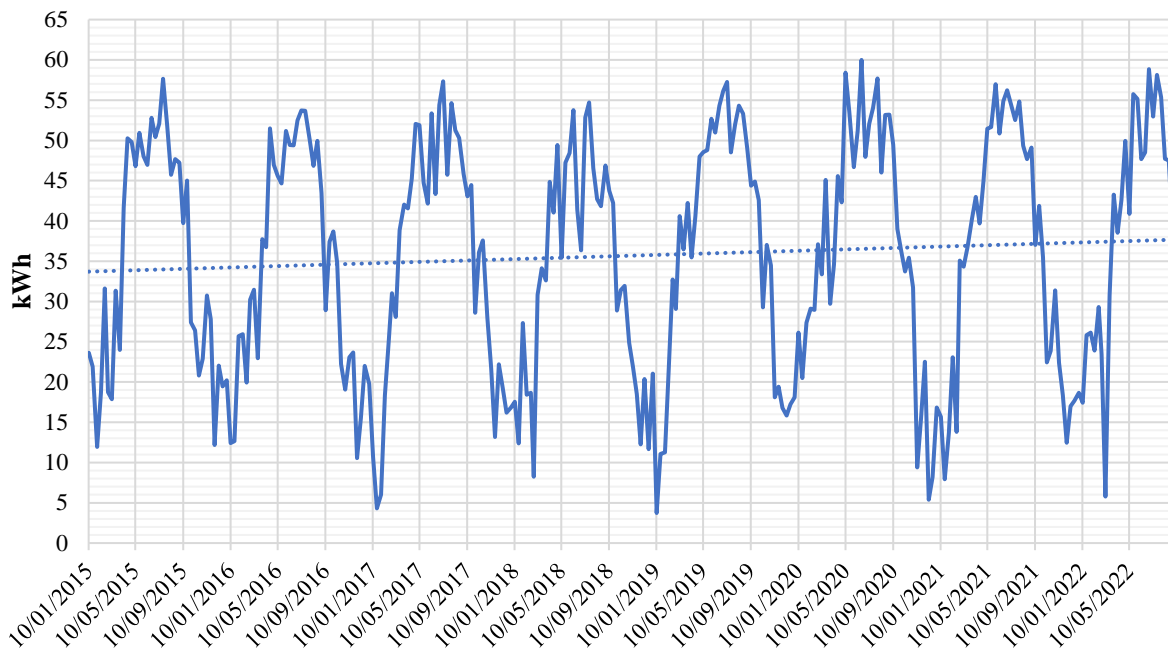
### 10.3 Κατανάλωση ενέργειας φορτίων

Ο αντιστροφέας, εφόσον δεχθεί τη συνεχή τάση από τα Φ/Β πλαίσια και τη μετατρέψει σε εναλλασσόμενη, την αποδίδει στα φορτία της κατοικίας προς κατανάλωση. Οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 10.11 και 10.12 αποτυπώνουν τη συνολική, αλλά και τη μέση (ανά διάστημα 10 ημερών) μεταβολή της κατανάλωσης από 01/2015 έως και 08/2022. Παρατηρώντας τη γραμμή τάσης, συμπεραίνουμε ότι οι ανάγκες των συσκευών σε ενέργεια αυξάνονται γραμμικά μεταξύ των ετών 2015 – 2022 που έχουν καταγραφεί από την πλατφόρμα επιτήρησης της Φ/Β εγκατάστασης. Πιθανοί λόγοι της μικρής αυτής αύξησης είναι η προσθήκη περισσότερων φορτίων στην κατοικία και η ονομαστική χαμηλή ενεργειακή απόδοση παλαιότερων συσκευών.



Σχήμα 10.11 – Συνολική μεταβολή κατανάλωσης από 01/2015 έως και 08/2022

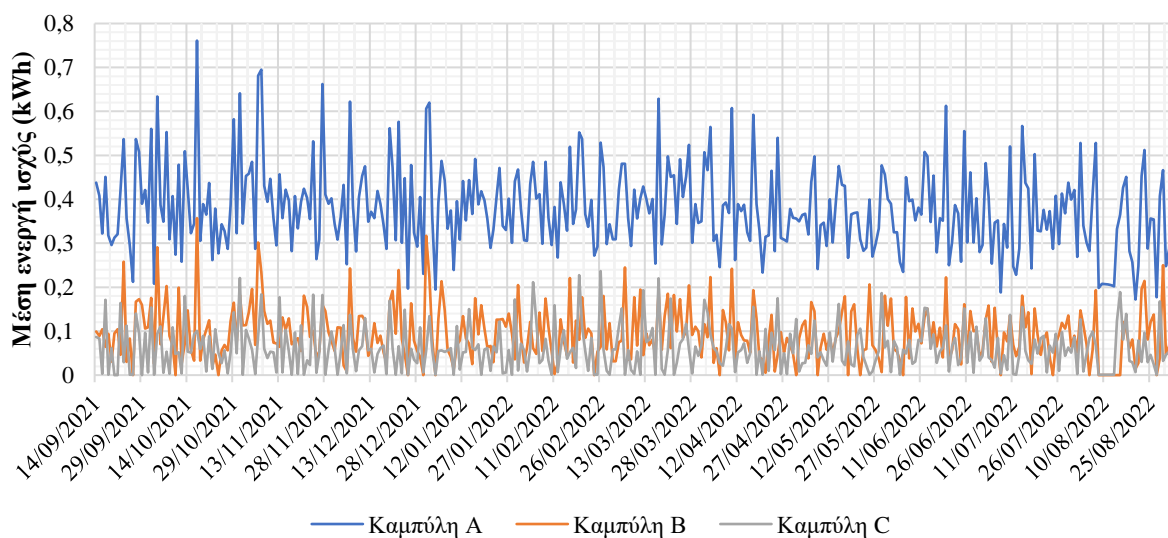




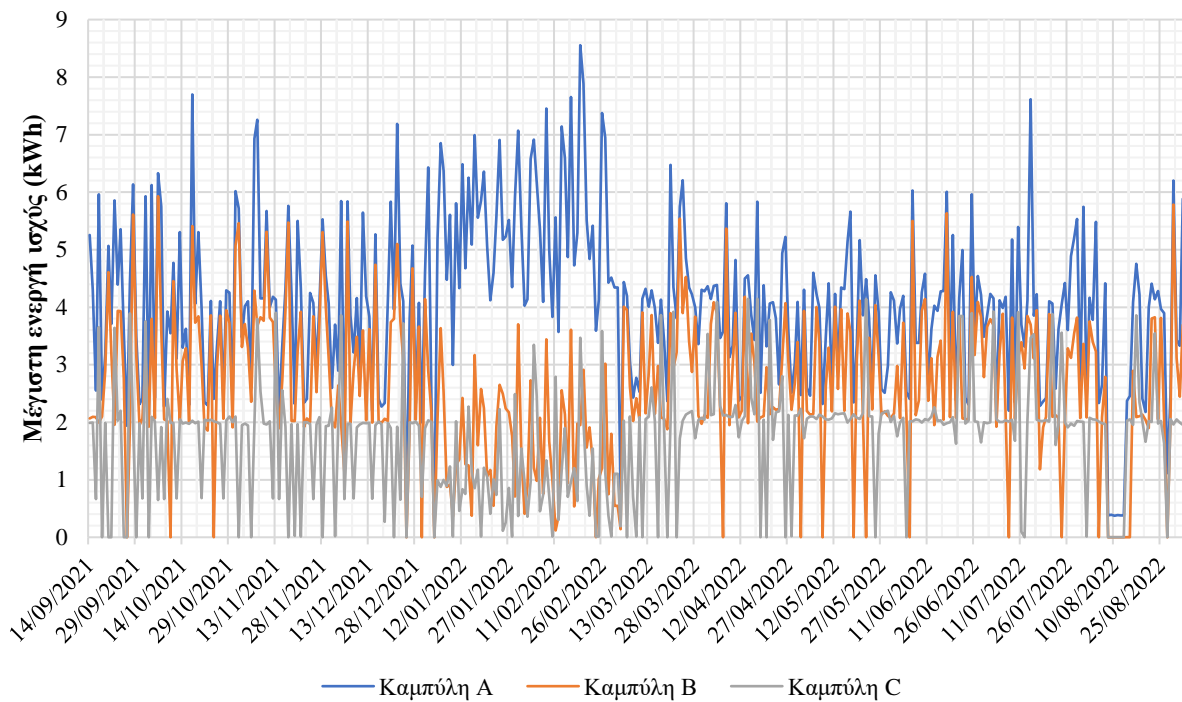
Σχήμα 10.12 – Μέση μεταβολή κατανάλωσης από 01/2015 έως και 08/2022, ανά διάστημα 10 ημερών

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση της κατοικίας είναι **μονοφασική**. Ο τριφασικός μετρητής της Φ/Β εγκατάστασης είναι **τριών (3) φάσεων**. Οι γραφικές παραστάσεις των σχημάτων που ακολουθούν, δίνουν πληροφορίες για τα μεγέθη κατανάλωσης **ενεργής ισχύος** μίας φάσης για χρονικό διάστημα περίπου ενός έτους (09/2021 – 08/2022). Κάθε γραφική παράσταση έχει τρεις (3) καμπύλες, οι οποίες αντιστοιχούν στα εξής:

- **Καμπύλη Α:** Η συνολική κατανάλωση ενέργειας της κατοικίας.
- **Καμπύλη Β:** Η κατανάλωση του ηλεκτρικού φούρνου (κουζίνα).
- **Καμπύλη C:** Η κατανάλωση του πλυντηρίου, ψυγείου και λοιπών συσκευών.

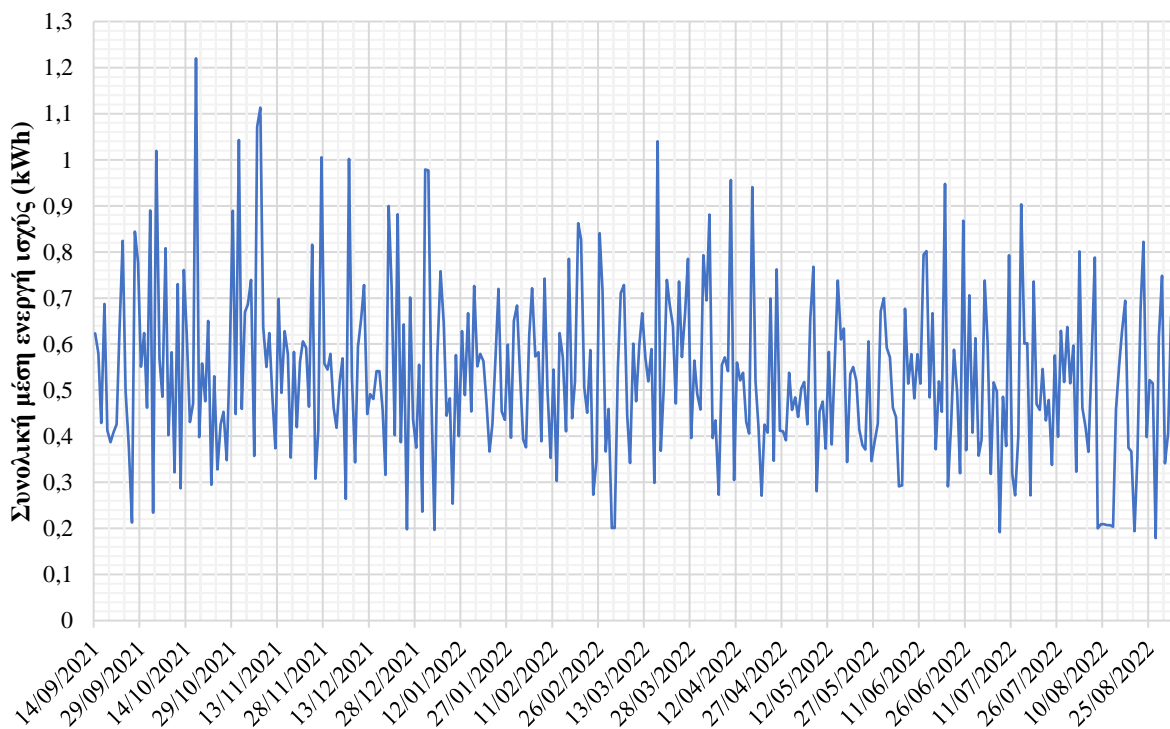


Σχήμα 10.13 – Μέση ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022

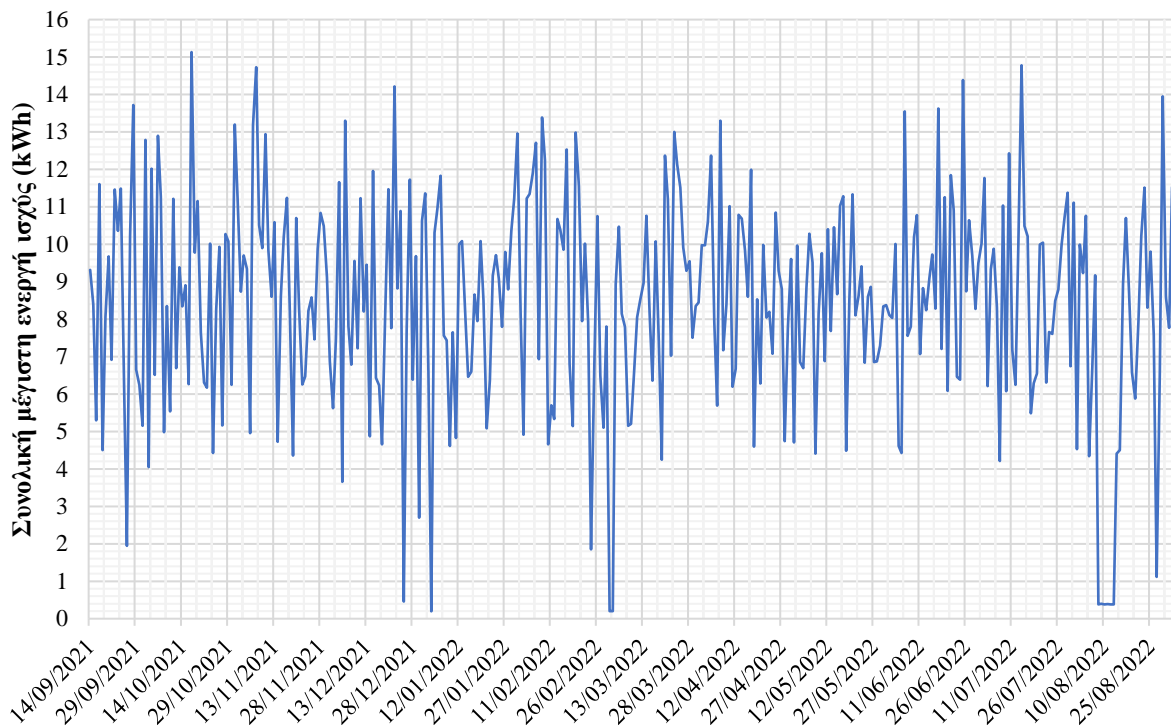


**Σχήμα 10.14** – Μέγιστη ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022

Τα **Σχήματα 10.13** και **10.14** μας δείχνουν ξεκάθαρα ότι ο ηλεκτρικός φούρνος καταναλώνει ένα μεγάλο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας έναντι άλλων συσκευών. Ακολούθως, στα **Σχήματα 10.15** και **10.16** έχουμε μία γενικότερη εικόνα της συνολικής μέσης και μέγιστης ενεργής ισχύος, αντίστοιχα, για το προαναφερθέν χρονικό διάστημα.



**Σχήμα 10.15** – Συνολική μέση ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022



Σχήμα 10.16 – Συνολική μέγιστη ενεργή ισχύς κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022

Δύο άλλες σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του Φ/Β συστήματος και επιβαρύνουν το ηλεκτρικό δίκτυο, είναι ο **συντελεστής ισχύος (cosφ)** και η εμφάνιση **αρμονικών συνιστωσών** (τρίτη, πέμπτη, έβδομη κ.λπ.).

Αν και οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας δε χρεώνουν το συντελεστή ισχύος σε μία οικιακή εγκατάσταση (θεωρώντας πάντα  $\cos\phi = 1$ ), εντούτοις δεν θα μπορούσαμε να αγνοήσουμε την επίδραση της άεργης ισχύος στην οικιακή ηλεκτρική εγκατάσταση. Ο *συντελεστής ισχύος* ισούται με το πηλίκο της πραγματικής ισχύος  $P$  (αυτής που εκμεταλλευόμαστε και ουσιαστικά χρεωνόμαστε) προς τη φαινόμενη ισχύ  $S$ , υποδηλώνοντας το ποσοστό μεταξύ ζητούμενης και απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου, δηλαδή [104]:

$$\cos\phi = \frac{P (kW)}{S (kVA)} \quad (10.1)$$

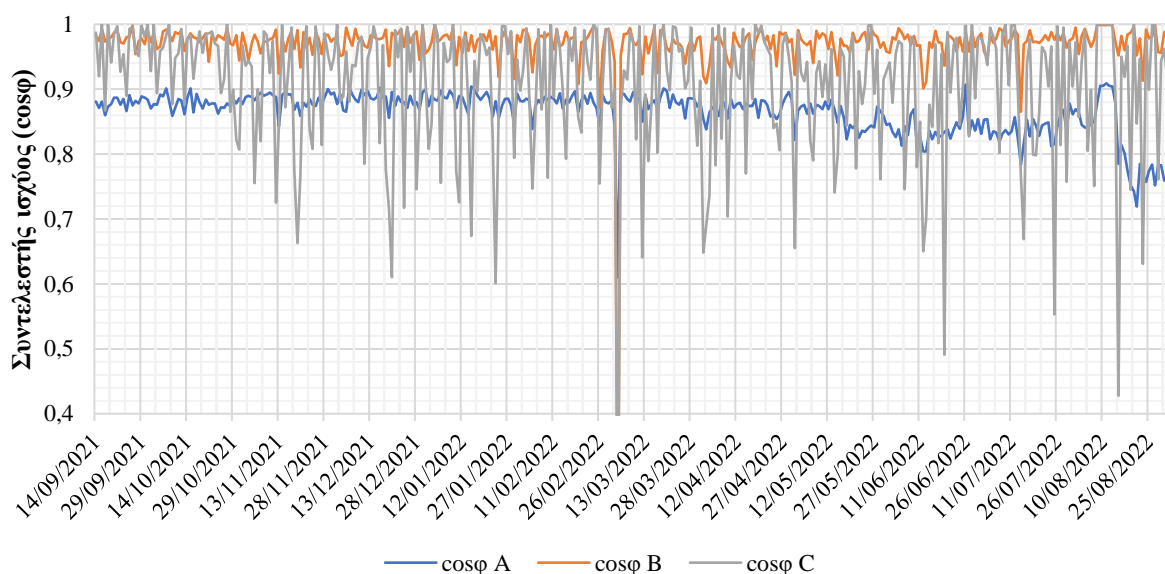
Η φαινόμενη ισχύς  $S$  ισούται με το άθροισμα της πραγματικής ισχύος  $P$  και της άεργης ισχύος  $Q$  (η οποία δεν αξιοποιείται, υπάρχει δε στο δίκτυο και το επιβαρύνει), δηλαδή [104]:

$$S = P + jQ \quad (10.2)$$

όπου:

**j** η φανταστική μονάδα:  $j^2 = -1$

Σε μία οικιακή εγκατάσταση, τα φορτία που απορροφούν άεργο ισχύ (μειώνοντας το  $\cos\phi$ ) είναι αυτά που διαθέτουν κινητήρες, δηλαδή αυτά που διαθέτουν επαγωγικά ή χωρητικά στοιχεία, όπως: κλιματιστικό, πλυντήριο, στεγνωτήρας ρούχων, ψυγείο, ανεμιστήρας κ.λπ. [104]



Σχήμα 10.17 – Μεταβολή του συντελεστή ισχύος για περίοδο κατανάλωσης από 09/2021 έως και 08/2022

Η μεγαλύτερη διεισδυτικότητα και συχνότερη χρήση οικιακών συσκευών με κινητήρες (όπως προαναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο) που παρατηρείται την τελευταία δεκαετία στα νοικοκυριά και η επίδρασή τους στο ποσοστό παραγωγής άεργης ισχύος, παρουσιάζοντας σε μεγαλύτερη συχνότητα μικρότερο συντελεστή ισχύος (κάτω του 0.7), αποτυπώνεται με σαφήνεια από την **καμπύλη C** του **Σχήματος 10.17**.

Οι *αρμονικές συνιστώσες* εμφανίζονται στο ηλεκτρικό δίκτυο με συνήθη αιτία την ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων, δηλαδή όπου γίνεται χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονικών ισχύος (ανορθωτές, μετατροπείς, αντιστροφείς κ.λπ.) και ημιαγωγικών στοιχείων, όπως ημιαγωγοί πυριτίου στα Φ/Β στοιχεία κ.λπ. *Βασική συχνότητα* του ηλεκτρικού δικτύου είναι αυτή των 50 Hz, με τις αρμονικές να αποτελούν ακέραια πολλαπλάσιά της. Για παράδειγμα, η 3<sup>η</sup> αρμονική αναφέρεται στη συχνότητα των 150 Hz, η 5<sup>η</sup> στα 250 Hz, η 7<sup>η</sup> στα 350 Hz κ.ο.κ. Ως εκ τούτου, οι συνιστώσες τάσης και ρεύματος των υψηλών αυτών συχνοτήτων ονομάζονται *αρμονικές τάσης* και *αρμονικές ρεύματος*, αντίστοιχα. Σε επίπεδο δικτύου, μείωση εμφάνισης των αρμονικών συνιστωσών μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλη σύνθετη αντίσταση. Τα συνηθέστερα προβλήματα που προκύπτουν από την ύπαρξη των αρμονικών, περιλαμβάνουν [105]:

- τη μείωση του συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ ,
- την καταπόνηση του εξοπλισμού, οδηγώντας πιο συχνά σε βλάβες,
- την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας

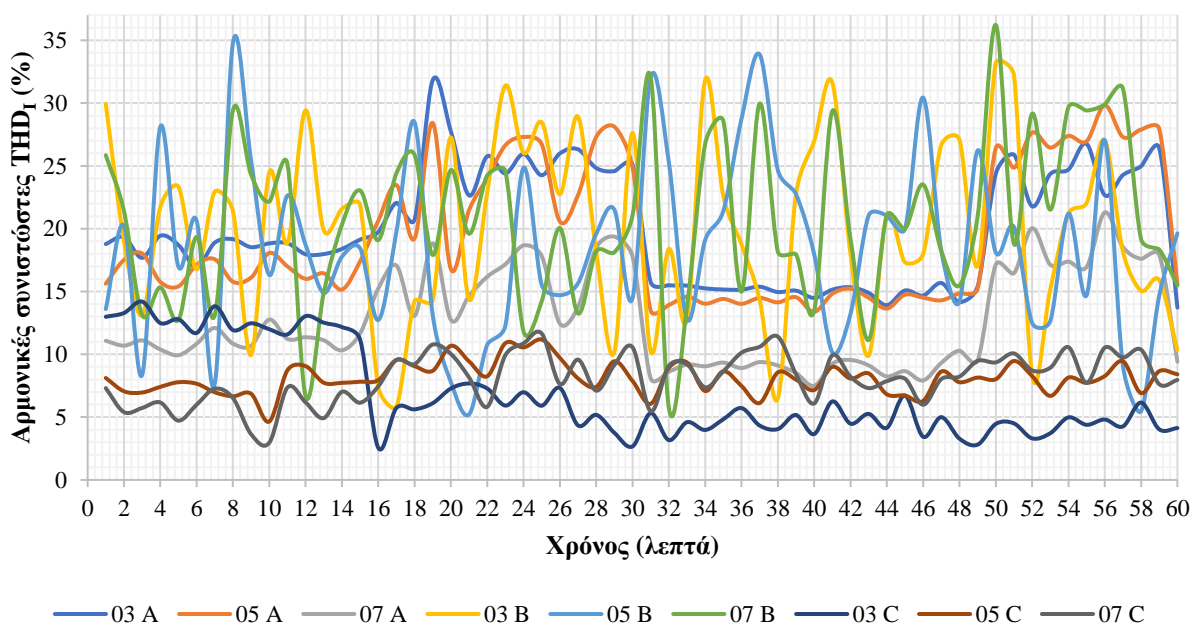
- την αύξηση των θερμικών απωλειών λόγω υψηλών ρευμάτων (φαινόμενο joule),
- παραμόρφωση τάσης (βυθίσεις, οδοντώσεις κ.λπ.),
- υπερτάσεις εξαιτίας του συντονισμού,
- καταστροφή ηλεκτρονικού εξοπλισμού,
- διαταραχές σε εξοπλισμό παραγωγής, κ.λπ.

Η παρουσία αρμονικών συνιστωσών διαπιστώνεται με τη διενέργεια ειδικών μετρήσεων, κάνοντας χρήση εξειδικευμένων οργάνων μέτρησης από κατάλληλα καταρτισμένο προσωπικό. Οι αρμονικές, εν συνεχεία, αξιολογούνται χρησιμοποιώντας τους δείκτες **συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης THD (Total Harmonic Distortion)**, τόσο για τις τάσεις ( $THD_V$ ), όσο και για τα ρεύματα ( $THD_I$ ), με τη χρήση των ακόλουθων σχέσεων [105]:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (10.3)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (10.4)$$

Οι δείκτες THD δείχνουν πόσο μεγαλύτερη (%) είναι η επίδραση των αρμονικών συνιστωσών σε σχέση με τη βασική συνιστώσα τάσης ή ρεύματος των 50 Hz. Μία εγκατάσταση θεωρείται ασφαλής όταν ο δείκτης  $THD_V$  είναι κάτω του 5% (3% για ειδικές εφαρμογές) [105]. Στο **Σχήμα 10.18** εμφανίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες A, B και C της μεταβολής των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος  $THD_I$  της 04/01/2022, για κάθε λεπτό, μεταξύ 12:00 – 13:00.



**Σχήμα 10.18** – Μεταβολή των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος για κάθε λεπτό μεταξύ 12:00 – 13:00

# Κεφάλαιο 11

## *Σύμπραξη ΑΠΕ και ΣΑΗΕ, με Διασύνδεσή τους στο Ηλεκτρικό Δίκτυο*

Ένας από τους κύριους στόχους των συστημάτων βιώσιμης ενέργειας είναι η παροχή καθαρής, οικονομικά προσιτής, προσβάσιμης ενέργειας, χωρίς σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για την ικανοποίηση των στόχων αυτών απαιτείται η ανάπτυξη αξιόπιστων ενεργειακών συστημάτων χωρίς τοξικά υποπροϊόντα, για τη διατήρηση της περιβαλλοντικής σταθερότητας και τις ανάγκες τροφοδοσίας του μέλλοντος. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στο σχεδιασμό και την υλοποίηση συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση **Φ/Β (PV)** και **Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Devices, ESD)**. Επί του παρόντος, υφίσταται υπερβολική αύξηση στο κόστος των ορυκτών καυσίμων λόγω της αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας του ηλεκτρικού δικτύου και της αδυναμίας του να ανταποκριθεί στη ζήτηση. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής, αποθήκευσης και χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Φ/Β) και συσκευών αποθήκευσης θα ενισχύσει την απόδοση, την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της ενεργειακής κατανάλωσης [45]:

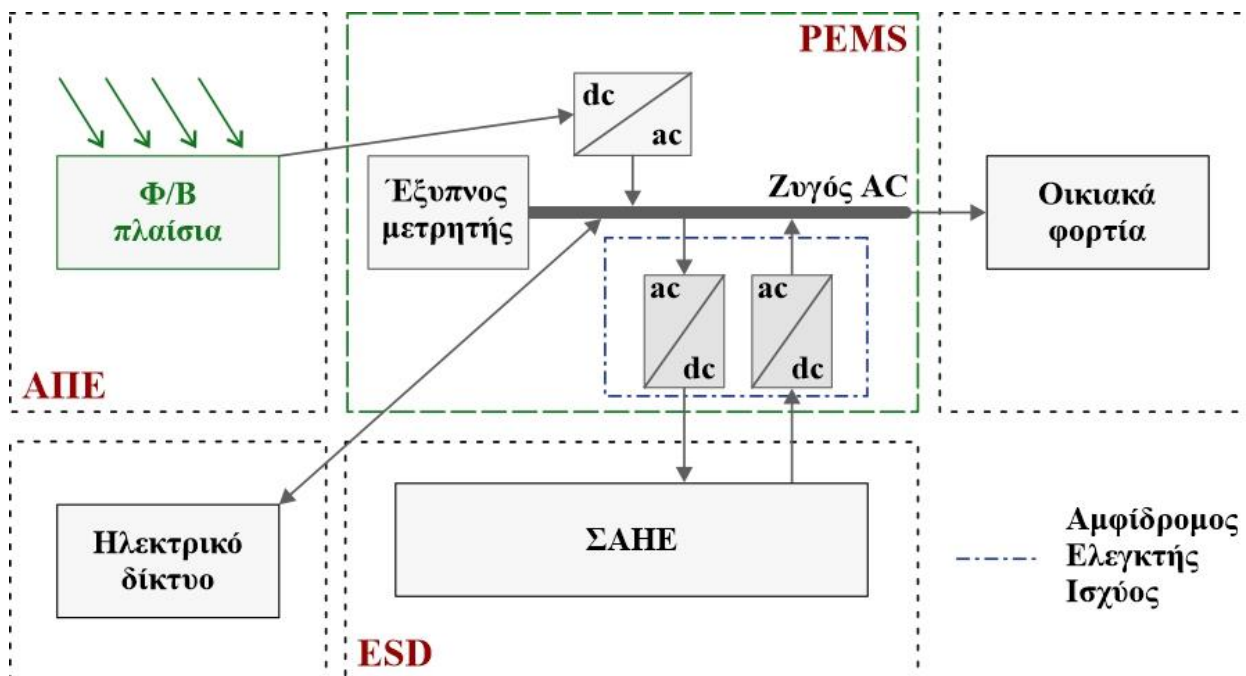
Στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται μία αποτελεσματική προσέγγιση για την ενσωμάτωση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Φ/Β) και των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Σκοπός της διαστασιολόγησης μπαταρίας είναι μόνο ο καθορισμός της χωρητικότητάς της για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του υφιστάμενου Φ/Β συστήματος στην πόλη της Κοζάνης (βλ. **Κεφάλαιο 10**), σε χρονικό βάθος πέντε (5) ημερών.

### 11.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία και ταχεία αύξηση της παραγωγής ενέργειας από Φ/Β των τελευταίων ετών, οδηγεί αναπόφευκτα στη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία χρησιμεύουν ως αποθηκευτικό μέσο για την υπερβολική (περίσσεια) παραγωγή, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους υψηλής ζήτησης, όπου απαιτείται. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χρησιμεύουν, επίσης, ως μέσο αύξησης της χρησιμοποίησης και του ποσοστού κατανάλωσης ενέργειας. Η εφαρμογή αποθήκευσης μπαταριών είναι περιορισμένη, λόγω του σχετικά υψηλού κόστους. Σε ορισμένα συνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα, όπως π.χ. τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV) χρησιμοποιείται ως αποθήκευση που μπορεί να λειτουργήσει με τη μορφή **συστημάτων διπλής χρήσης**. Τα μελλοντικά **έξυπνα δίκτυα**,



μικροδίκτυα και νανοδίκτυα θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τη λειτουργία διπλής χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων, ως μέρος του ενεργειακού δικτύου για την παροχή υπηρεσιών από **όχημα σε δίκτυο (V2G)**. Στο **Σχήμα 11.1** εικονίζεται η ιδέα της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Φ/Β) με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας για λειτουργίες διπλής χρήσης [117].



Σχήμα 11.1 – Αναλυτικό διάγραμμα της μονάδας ενσωμάτωσης [117]

## 11.2 Συστήματα, ενσωμάτωση και διατάξεις φορτίων

Το διάγραμμα του συστήματος του Σχήματος 11.1 αποτελείται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Σύστημα Διαχείρισης Ισχύος και Ενέργειας (Power and Energy Management System, PEMS), Ηλεκτρικό Δίκτυο, Συσκευές Αποθήκευσης Ενέργειας (ESD) και Οικιακά Φορτία. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να ενσωματώνει ΑΠΕ και ESD, χρησιμοποιώντας το PEMS [117].

### 11.2.1 Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (ΑΠΕ)

Για την παραγωγή ενέργειας, τόσο του συστήματος του Σχήματος 11.1, όσο και για την Φ/Β εγκατάσταση στην πόλη της Κοζάνης που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 10**, χρησιμοποιούνται Φ/Β πλαίσια, τα οποία αποδίδουν συνολική ισχύ **10 kWp**, καταλαμβάνουν χώρο περίπου **64 m<sup>2</sup>** στην κεραμοσκεπή της κατοικίας κι έχουν απόδοση άνω του **96.5%**<sup>11</sup>. Έχουμε ήδη αναφέρει ότι τα Φ/Β στοιχεία μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη από τον

<sup>11</sup> Συνθήκες PTC (PV USA Test Conditions): Ακτινοβολία 1 kW/m<sup>2</sup>, AM1.5, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C σε υψόμετρο 10 m από το επίπεδο του εδάφους, ταχύτητα ανέμου 1 m/s. Πιο ρεαλιστικές συνθήκες έναντι του STC.



ήλιο ενέργεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα του ηλιακού φωτός. Η μέγιστη παραγωγή επιτυγχάνεται συνήθως κατά τη διάρκεια εμφάνισης της μέγιστης τιμής ηλιακής ακτινοβολίας της ημέρας (ήλιος στην υψηλότερη θέση), με το πλεόνασμά της να αποθηκεύεται σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ιόντων-λιθίου για μεταγενέστερη χρήση κατά τις ώρες εκτός αιχμής, συνήθως νωρίς το πρωί και αργά το βράδυ. Η ισχύς του Φ/Β συστήματος προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μοντέλο με βάση το επίπεδο ακτινοβολίας. Η εξίσωση που αντιπροσωπεύει το απλοποιημένο μοντέλο δίνεται από τη σχέση [117]:

$$PV_{output(t)} = GHI \cdot S \cdot PV_{\eta} \quad (11.1)$$

όπου:

**GHI** η παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiation) (σε W/m<sup>2</sup>)

**S** το συνολικό εμβαδόν των Φ/Β πλαισίων (σε m<sup>2</sup>)

**η** η απόδοση των Φ/Β πλαισίων

Η Φ/Β συστοιχία συνδέεται στο σύστημα μέσω ενός αντιστροφέα (inverter) DC σε AC με παρακολούθηση μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT) και σταθερή απόδοση. Δεν λαμβάνονται υπόψη η μεταβολή της απόδοσης του αντιστροφέα ανάλογα με την είσοδο και την απαιτούμενη έξοδο, καθώς και η επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρούνται, δηλαδή, παράγοντες που δεν παρεμποδίζουν σημαντικά τη λειτουργικότητα του συστήματος [117].

### 11.2.2 Σύστημα Διαχείρισης Ισχύος και Ενέργειας (PEMS)

Στο σχεδιασμό του συστήματος, το PEMS χρησιμεύει για τον έλεγχο της μετατροπής και της ροής ενέργειας από τις ΑΠΕ, το ηλεκτρικό δίκτυο και τα ΣΑΗΕ. Περιέχει τα ηλεκτρονικά ισχύος που απαιτούνται για τη διασύνδεση των συστημάτων ισχύος και του φορτίου. Η Φ/Β συστοιχία συνδέεται με τον ζυγό AC μέσω ενός αντιστροφέα, ενώ η συσκευή αποθήκευσης ενέργειας συνδέεται με τον ζυγό AC μέσω ενός ελεγκτή αμφίδρομης κατεύθυνσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 13.1**. Το Net Metering αναλαμβάνει τον έλεγχο της υπερβολικής ροής ισχύος στο δίκτυο, ενώ ο έξυπνος μετρητής παρακολουθεί τη χρήση ενέργειας από διαφορετικού τύπου εξαρτήματα. Στο PEMS χρησιμοποιούνται δύο (2) μετατροπείς ενίσχυσης DC-DC (boost converters) κι ένας (1) αντιστροφέας. Η χρήση τους οφείλεται στις διαφορές της εξόδου του Φ/Β και στην τάση της συσκευής αποθήκευσης. Ο μετατροπέας Φ/Β συστοιχιών λειτουργεί επίσης ως ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Η ροή ισχύος του κυκλώματος παρακολουθείται και ελέγχεται από τη λογική ελέγχου τρόπου λειτουργίας που είναι ενσωματωμένη στο PEMS [117].

### 11.2.3 Συσκευές Αποθήκευσης Ενέργειας (ESD) – Διαστασιολόγηση

Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη διαδικασία μετάβασης σε ενός τύπου καθαρής, αποδοτικής και αξιόπιστης πηγής ενέργειας, με τελικό στόχο την ενεργειακή βιωσιμότητα. Σε επίπεδο αυτοπαραγωγής, συμβάλλουν στην **επίλυση ζητημάτων που οφείλονται στη μεταβλητή παραγωγή των ΑΠΕ**, προσφέροντας παράλληλα **οικονομικά οφέλη** στους αυτοπαραγωγούς (πώληση περίσσειας ενέργειας όταν η τιμή λιανικής είναι αυξημένη και σε περιόδους αιχμής, ενώ από την άλλη, φόρτιση των μπαταριών από το δίκτυο σε περιόδους χαμηλής ζήτησης), αλλά και σε εμπορικούς καταναλωτές. Επίσης, **ενισχύουν την αυτοκατανάλωση και την αυτονομία (μικρότερη εξάρτηση) από το δίκτυο**. Σε διασυνδεδεμένα οικιακά Φ/Β συστήματα, **διατηρούν την παροχή ισχύος σε κρίσιμα φορτία κατά τη διάρκεια διακοπής με το δίκτυο**, δίχως να απαιτείται η αποσύνδεση του Φ/Β συστήματος από αυτό και κατ' επέκταση, η μη χρηστή εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, **μεγιστοποιούν την ποιότητα ισχύος**, μειώνοντας την αντιστροφή ισχύος λόγω της σταθερής παραγωγής των ΑΠΕ σε συνδυασμό με μικρή ζήτηση ενέργειας από τα οικιακά φορτία. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη μετατόπιση του προβλήματος στην πλευρά του διαχειριστή (ΔΕΔΔΗΕ), ως λύση για τη μείωση εμφάνισης των υπερτάσεων. Σε επίπεδο κοινής ωφέλειας, **παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες**, όπως περιγράφηκαν λεπτομερώς στο **Κεφάλαιο 8 [117,120]**.

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί/διαστασιολογηθεί σύστημα αποθήκευσης μπαταρίας ιόντων-λιθίου για την Φ/Β εγκατάσταση σε κεραμοσκεπή στην πόλη της Κοζάνης, όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 10**. Οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά των μπαταριών λιθίου αναλύθηκαν στην **Ενότητα 6.3 του 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου**.

Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου παρουσιάζουν μεγάλη ζήτηση για χρήση σε φορητές ηλεκτρικές/ηλεκτρονικές συσκευές και εμπορικές εφαρμογές, κερδίζοντας παράλληλα έδαφος για χρήση ως εφεδρική πηγή ενέργειας σε κατοικίες. Συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος (ώριμη τεχνολογία), είναι ελαφρύτερες, πιο αποδοτικές, εμφανίζουν υψηλότερο βάθος εκφόρτισης (DoD), ταχύτερους ρυθμούς φόρτισης – εκφόρτισης και παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, άρα απαιτούν μικρότερη συντήρηση. Από την άλλη, είναι αρκετά ακριβότερες, αφού χαρακτηρίζονται από υψηλότερο επενδυτικό κόστος [117].

Για τη διαστασιολόγηση της χωρητικότητας της μπαταρίας, θα πρέπει γενικά να ακολουθούνται οι παρακάτω κανόνες [121,122]:

- Αν και υπάρχουν πολλών τύπων μπαταρίες, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας δεν θα πρέπει να επιτρέπεται βάθος εκφόρτισης άνω του 50%, με εξαίρεση ειδικές εφαρμογές όπου το ποσοστό μπορεί να προσεγγίσει ή/και να ξεπεράσει το 80%. Η τεχνολογική εξέλιξη αναμένεται να οδηγήσει στη δυνατότητα επίτευξης ακόμα μεγαλύτερων DoD, χωρίς

σημαντικές επιπτώσεις στην ζωή των μπαταριών. Σε γενικές γραμμές όμως, βαθιά εκφόρτιση των μπαταριών μπορεί να οδηγήσει στη σταδιακή καταστροφή τους. Είναι προτιμότερη η παροχή μικρότερου ποσοστού ισχύος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (μεγαλύτερος ρυθμός εκφόρτισης) και όχι το αντίθετο.

- Η χωρητικότητα των μπαταριών που θα επιλεγούν θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την αρχικά υπολογισμένη, βάσει των ημερήσιων αναγκών τροφοδοσίας φορτίων για τις οποίες προορίζεται (υπολογίζοντας τις ημέρες αυτονομίας). Ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα, τόσο αυξάνεται και η διάρκεια ζωής των μπαταριών. Οι υπολογισμοί, συνήθως, εκτελούνται για 3 – 5 ημέρες αυτονομίας, δηλαδή για αντίστοιχες ημέρες έλλειψης ηλιοφάνειας και κατά τη διάρκεια της νύχτας, χωρίς βέβαια η χρονική αυτή διάρκεια να είναι δεσμευτική.
- Παράλληλη σύνδεση των μπαταριών ίδιου τύπου οδηγεί σε αύξηση της συνολικής χωρητικότητας της συστοιχίας μπαταριών.
- Εξαιτίας της ύπαρξης πρόσθετων απωλειών και άλλων καταναλώσεων, η προσθήκη ενός συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 15% – 30% στο μέγεθος της χωρητικότητας μπορεί να επιδράσει θετικά στην επιλογή των μπαταριών.
- Η επιλογή της τάσης των μπαταριών, καθώς και ο υπολογισμός της καλωδίωσης, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την ορθή ολοκλήρωση της μελέτης διαστασιολόγησης.

**Πίνακας 11.1** – Τάση μπαταριών βάσει της ισχύος του Φ/Β συστήματος [123]

Ισχύς Φ/Β (kWp)	Τάση μπαταριών (V)
0 – 0.5	12
0.5 – 3	24
3 – 10	48
> 10	> 48

**Πίνακας 11.2** – Βάθος εκφόρτισης μπαταριών βάσει ημερών αυτονομίας [123]

Ημέρες αυτονομίας	Βάθος εκφόρτισης
1 – 3	40% ή 0.4
4 – 6	60% ή 0.6
7 – 10	80% ή 0.8

Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της **συνολικής μέγιστης ημερήσιας ενεργής ισχύος κατανάλωσης του Σχήματος 10.14**, το μέσο όρο της **συνολικής μέγιστης ενεργής ισχύος κατανάλωσης του Σχήματος 10.16**, καθώς και τα δεδομένα του **Πίνακα 11.1**, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι υπολογισμοί εύρεσης της χωρητικότητας των μπαταριών για την κάλυψη των αναγκών αποθήκευσης του Φ/Β συστήματος του **Κεφαλαίου 10** θα εκτελεστούν για ημερήσια συνολική κατανάλωση της τάξης των **~8550 Wh** (ανώτατη τιμή). Επομένως, για μία (1) ημέρα αυτονομίας [121]:

$$C_1 = \frac{8550 \text{ Wh}}{48 \text{ V}} = \mathbf{178.12 \text{ Ah}} \quad (11.2)$$

Για 5 ημέρες αυτονομίας, θα έχουμε αντίστοιχα:

$$C_5 = C_1 \cdot 5 = \mathbf{890.6 \text{ Ah}} \quad (11.3)$$

Ένας πιο ακριβής τύπος για τον υπολογισμό της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι [123]:

$$C_{1,νέο} = \frac{(N + p) \cdot m \cdot E_{Wh} \cdot 10^{-1}}{\sigma_\gamma \cdot \sigma_\mu \cdot \beta_{DoD} \cdot V} \quad (11.4)$$

όπου:

- N** ο αριθμός ημερών αυτονομίας (συνήθως: 3 – 5)
- p** το ποσοστό των φορτίων που τροφοδοτούνται από την μπαταρία (0 – 1, συνήθως: 0.6)
- m** το περιθώριο (συνήθως: 1.2)
- E<sub>Wh</sub>** η ημερήσια ενέργεια σε Wh (από το **Σχήμα 10.14**)
- σ<sub>γ</sub>** ο συντελεστής απωλειών γήρανσης (συνήθως: 0.8)
- σ<sub>μ</sub>** ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς (συνήθως: 0.6)
- β<sub>DoD</sub>** το βάθος εκφόρτισης (από τον **Πίνακα 11.2**)
- V** η τάση (από τη χαρακτηριστική *P-I*, σε V)

Με τη χρήση της παραπάνω σχέσης και για 5 ημέρες αυτονομίας, θα έχουμε:

$$C_{5,νέο} = \frac{(5 + 0.8) \cdot 2 \cdot 8550 \cdot 10^{-1}}{0.65 \cdot 0.6 \cdot 0.6 \cdot 48} = \mathbf{883.01 \text{ Ah}} \quad (11.5)$$

Συνεπώς, από τους παραπάνω υπολογισμούς, τη συνολική μέγιστη ημερήσια κατανάλωση των 8.55 kWh (ανώτατη τιμή) και λαμβάνοντας υπόψη: (α) το γεγονός ότι απαιτούνται 5 ημέρες αυτονομίας σε περιόδους απουσίας ηλιοφάνειας, συμπεριλαμβανομένων των ωρών της νύχτας για την περιοχή της Κοζάνης, και (β) τις ανάγκες των φορτίων της κατοικίας, προτείνεται η λύση της

εταιρείας **BYD HVM 8.3**. Η συγκεκριμένη συστοιχία αποτελείται από 3 μονάδες μπαταριών συνδεδεμένες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη και ασφαλής παροχή ισχύος για το προαναφερθέν χρονικό διάστημα [124]. Στον **Πίνακα 11.3** παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λύσης αποθήκευσης.

**Πίνακας 11.3** – Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας μπαταρίας BYD HVM 8.3 [124]

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μονάδα μπαταρίας	HVM (2.76 kWh, 54 Ah, 51.2 V, 38 kg)
Αριθμός μονάδων μπαταρίας	3
Χρησιμοποιήσιμη ενέργεια [1]	8.28 kWh
Μέγιστο ρεύμα εξόδου [2]	50 A
Μέγιστο ρεύμα εξόδου (peak) [2]	75 A, 3 s
Ονομαστική τάση	153.6 V
Τάση λειτουργίας	120 ~ 177 V
Τύπος μπαταρίας	LiFePO <sub>4</sub>
Θερμοκρασία λειτουργίας	-10 °C έως +50 °C
Επικοινωνία	CAN/RS485
Κλάση προστασίας	I
Βαθμός προστασίας	IP55
Συνολικός βαθμός απόδοσης	≥ 96%
Πιστοποιήσεις	VDE2510-50 / IEC62619 / CEC / CE / UN38.3
Εφαρμογές	ON Grid / ON Grid + Backup / OFF Grid
Χαρακτηρισμός μπαταρίας	IFpP/47/174/120/16S/M/-10+50/90
Διαστάσεις (Υ x Μ x Β)	995 x 585 x 298 mm
Βάρος	129 kg

[1] Χρησιμοποιήσιμη DC ενέργεια υπό τις ακόλουθες συνθήκες δοκιμής: 100% DoD, 0.2C φόρτιση και εκφόρτιση στους +25 °C. Η χρησιμοποιήσιμη ενέργεια του συστήματος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή και τον τύπο των αντιστροφών.

[2] Η μείωση της φόρτισης θα συμβεί μεταξύ  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Πίνακα 11.3, βρίσκουμε ότι για διάρκεια μίας (1) ημέρας, η χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταρίας που απαιτείται για να καλύψει πλήρως την ζήτηση ενέργειας των οικιακών φορτίων, θα είναι:

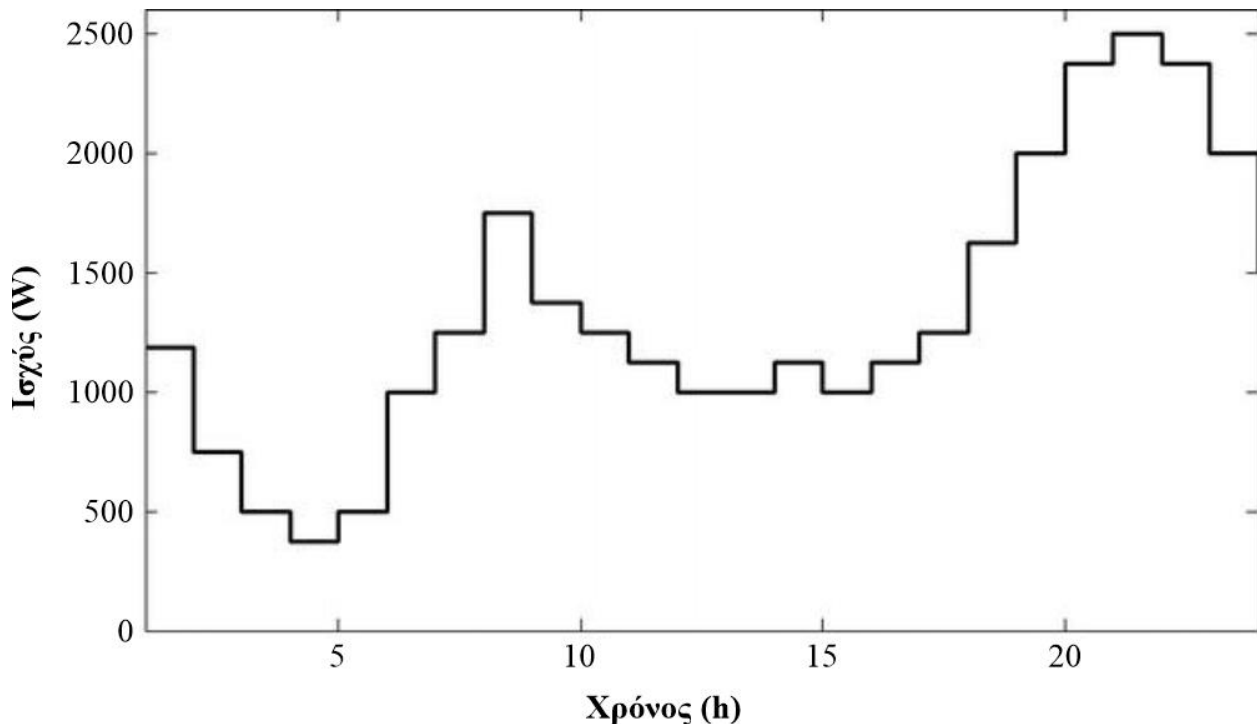
$$C_{1,BYD} = \frac{8550\text{ Wh}}{51,2\text{ V}} = 167\text{ Ah} \times 3\text{ μονάδες} = \mathbf{501\text{ Ah}} > \mathbf{178.12\text{ Ah}} \quad (11.6)$$

$$C_{5,BYD} = C_{1,BYD} \times 5\text{ ημέρες} = \mathbf{2505\text{ Ah}} \quad (11.7)$$

Συμπεραίνουμε ότι η χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών BYD HVM 8.3 υπερκαλύπτει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του συνόλου των οικιακών φορτίων, ακόμα και σε χειμερινή περίοδο, καλύπτοντας αρκετές ημέρες απουσίας ηλιοφάνειας, συμπεριλαμβανομένων και των ωρών της νύχτας.

#### 11.2.4 Φορτίο συστήματος

Η διακύμανση του συνολικού φορτίου μίας κατοικίας κατά τη διάρκεια της ημέρας φαίνεται στο Σχήμα 11.2 [117].



Σχήμα 11.2 – Διακύμανση του συνολικού φορτίου μίας κατοικίας σε ωριαία βάση [117]

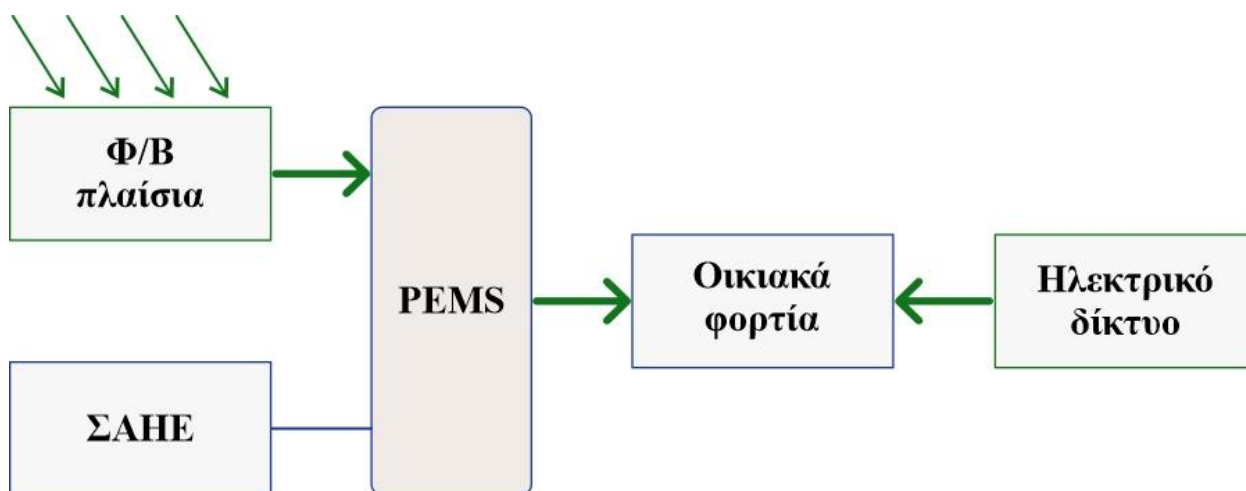
## 11.3 Σύμπραξη ΑΠΕ και ΣΑΗΕ – Τοπολογίες

Η μεγιστοποίηση της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ και των ΣΑΗΕ (ESD) μπορεί να μειώσει την υπερβολική εξάρτηση από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου.

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται διάφοροι τρόποι ολοκλήρωσης και λειτουργίας υπό διαφορετικές συνθήκες, που μπορούν να επηρεάσουν τις ΑΠΕ, τα ΣΑΗΕ και το δίκτυο κατά τη διάρκεια μίας περιόδου 24 ωρών, από τις πρώτες πρωινές έως και προχωρημένες νυχτερινές ώρες [117].

### 11.3.1 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β που υποστηρίζεται από το Δίκτυο

Το **Σχήμα 11.3** περιγράφει τις περιπτώσεις όπου το Φ/Β παράγει ενέργεια, αλλά η ενέργεια αυτή δεν επαρκεί για να τροφοδοτήσει τα οικιακά φορτία. Σε αυτήν την περίπτωση επιστρατεύεται το δίκτυο, συμπληρώνοντας την απαιτούμενη ισχύ για την τροφοδοσία των οικιακών φορτίων. Επιπλέον, είναι δυνατή η φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και χαμηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα εκφόρτισης δεν είναι διαθέσιμη, λόγω των απωλειών εξαιτίας του συνολικού βαθμού απόδοσης από τον ζυγό AC προς την μπαταρία και πάλι πίσω προς τον ζυγό AC, όπως αποτυπώνεται στο **Σχήμα 11.1** [117].

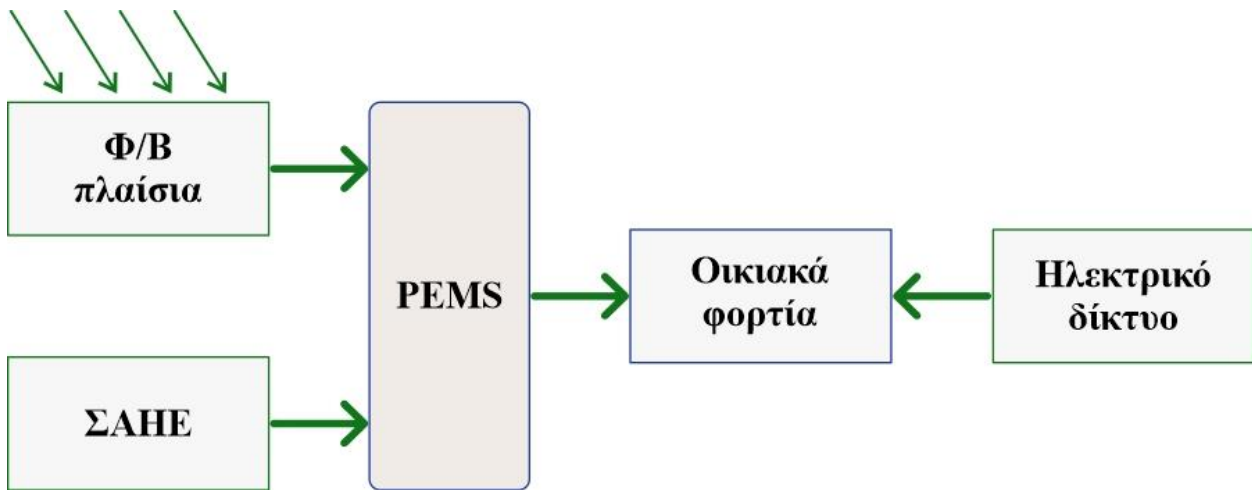


*Σχήμα 11.3* – Φ/Β και Δίκτυο τροφοδοτούν τα οικιακά φορτία [117]

### 11.3.2 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β που υποστηρίζεται από το Δίκτυο και το ΣΑΗΕ

Σε περιπτώσεις όπου η παραγωγή του Φ/Β δεν επαρκεί για τις ενεργειακές απαιτήσεις των οικιακών φορτίων, τότε η απαιτούμενη ισχύς μπορεί να συμπληρωθεί τόσο από το ΣΑΗΕ, όσο και από το δίκτυο. Το **Σχήμα 11.4** απεικονίζει αυτόν τον τρόπο λειτουργίας [117].

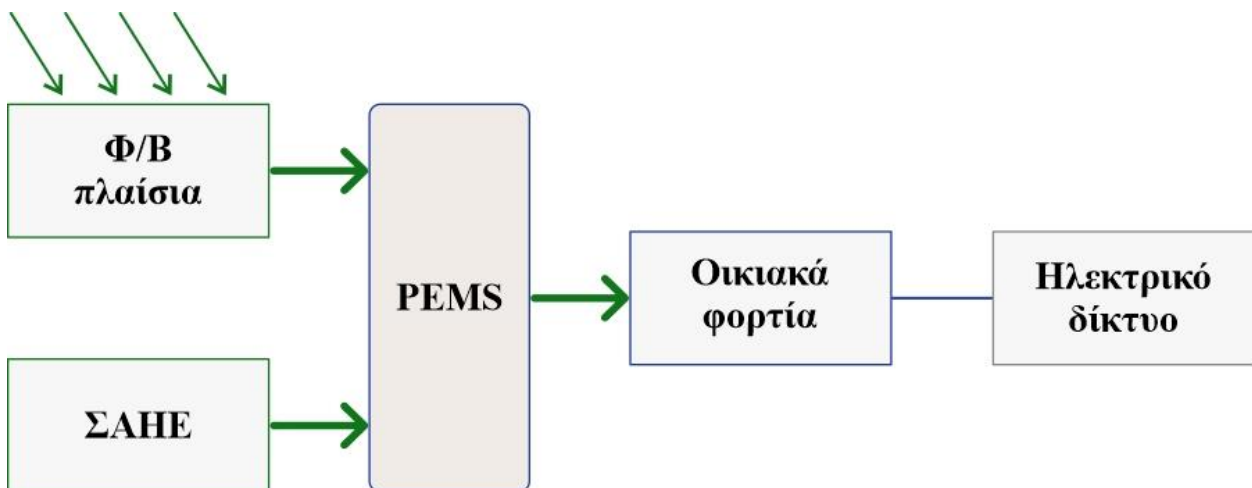




Σχήμα 11.4 – Φ/Β, ΣΑΗΕ και Δίκτυο τροφοδοτούν τα οικιακά φορτία [117]

### 11.3.3 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β που υποστηρίζεται από το ΣΑΗΕ

Ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας στηρίζεται στην τροφοδοσία των οικιακών φορτίων από το ΣΑΗΕ, όταν αυτό είναι διαθέσιμο και δεν επαρκεί η παραγόμενη ισχύς από το Φ/Β. Χαρακτηριστική περίοδος εφαρμογής αυτής της λειτουργίας είναι όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξημένη (ώρες αιχμής), ενώ οι μπαταρίες του ΣΑΗΕ φορτίζονται όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή. Το Σχήμα 11.5 απεικονίζει αυτόν τον τρόπο λειτουργίας [117].

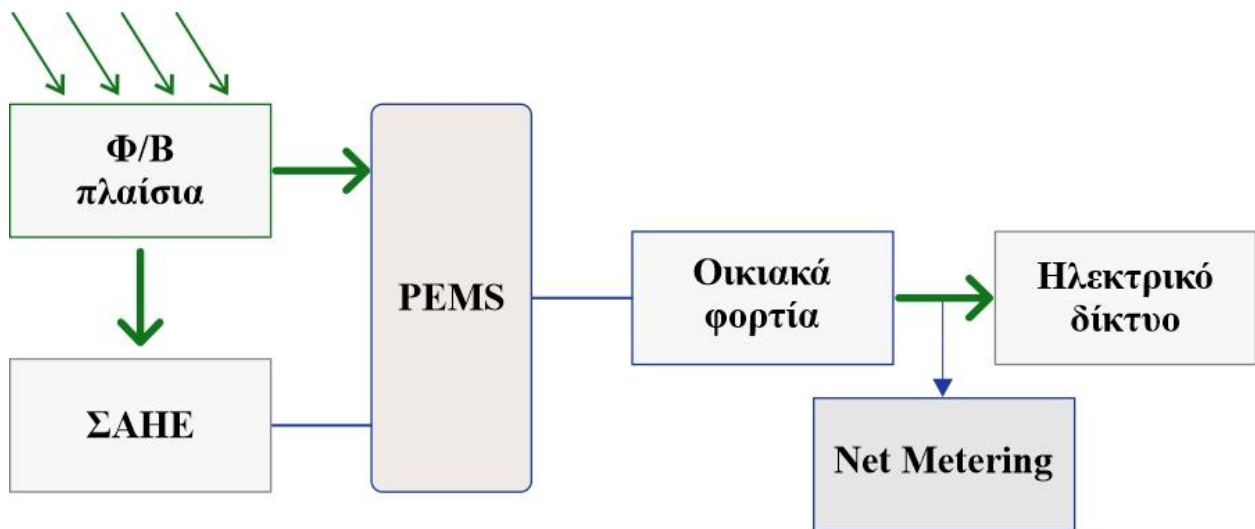


Σχήμα 11.5 – Φ/Β και ΣΑΗΕ τροφοδοτούν τα οικιακά φορτία [117]

### 11.3.4 Τρόπος λειτουργίας Φ/Β σε ώρες αιχμής

Ο τρόπος λειτουργίας της τρέχουσας ενότητας εφαρμόζεται κατά τις ώρες αιχμής της παραγωγής του Φ/Β. Σε αυτό το σενάριο, το Φ/Β τροφοδοτεί τα οικιακά φορτία, φορτίζει το ΣΑΗΕ και

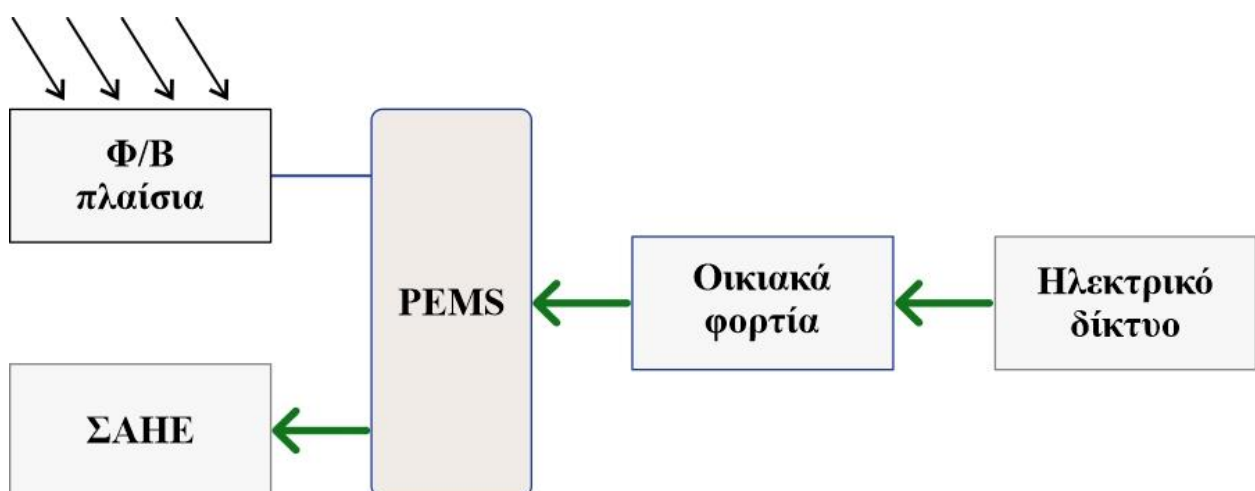
παρέχει (πουλάει) ισχύ στο δίκτυο. Όπως έχουμε περιγράψει στην **Ενότητα 4.8.2.3** του **4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**, η διαδικασία παροχής ενέργειας πίσω στο δίκτυο ονομάζεται Net Metering (σύμβαση ενεργειακού συμψηφισμού) [117].



*Σχήμα 11.6* – Το Φ/Β τροφοδοτεί τα οικιακά φορτία, το Δίκτυο και φορτίζει το ΣΑΗΕ [117]

### 11.3.5 Τρόπος λειτουργίας Δικτύου

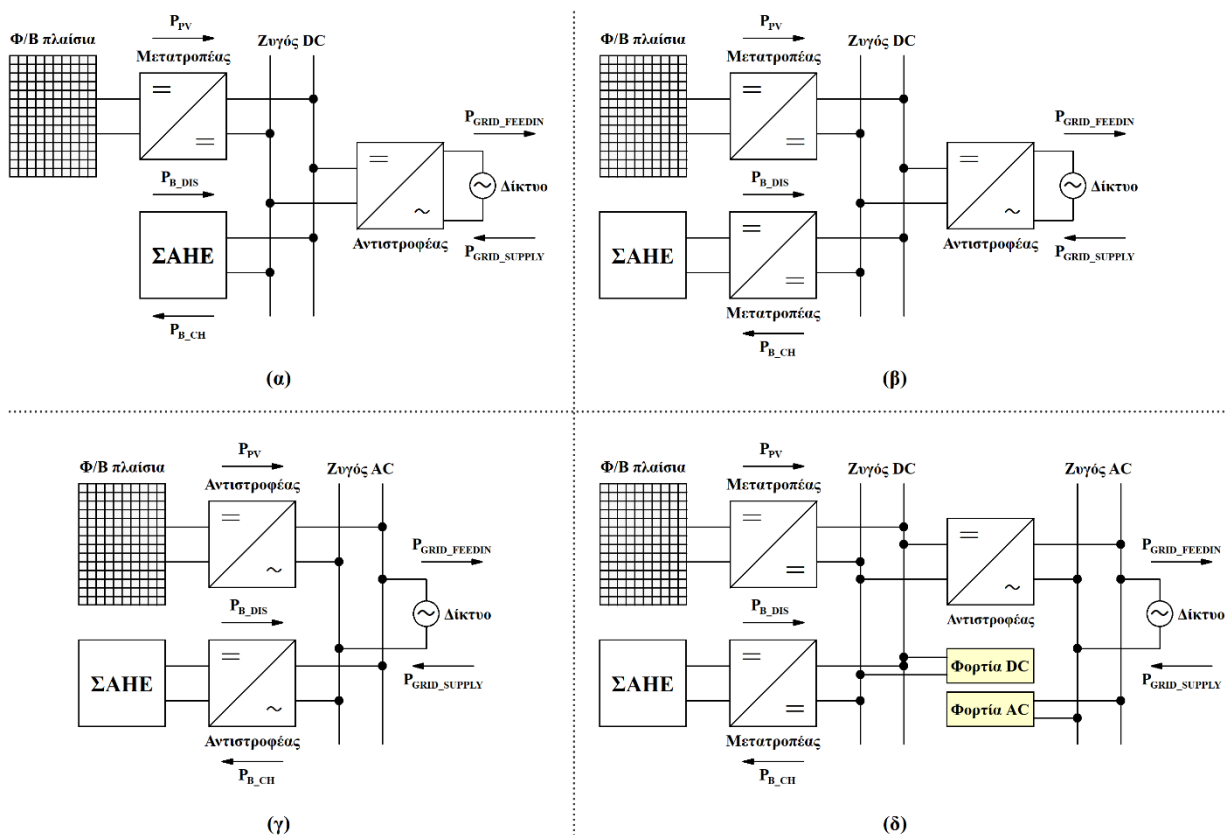
Ο τρόπος λειτουργίας δικτύου περιγράφει περιπτώσεις κατά τις οποίες το Φ/Β δεν παράγει ισχύ. Η ισχύς που χρειάζονται τα οικιακά φορτία παρέχεται από το δίκτυο, φορτίζοντας ταυτόχρονα το ΣΑΗΕ, όταν η κατάσταση φόρτισής του (SoC) είναι μικρότερη από το κατώτατο όριο (μέγιστη φόρτιση). Η φόρτιση πραγματοποιείται συνήθως σε ώρες εκτός αιχμής δικτύου για εξοικονόμηση κόστους (βλ. *Σχήμα 11.7*) [117].



*Σχήμα 11.7* – Το Δίκτυο τροφοδοτεί τα οικιακά φορτία και φορτίζει το ΣΑΗΕ [117]

## 11.4 Αρχιτεκτονικές σύνδεσης Φ/Β – ΣΑΗΕ (μπαταρίες)

Η ενσωμάτωση ενός συστήματος αποθήκευσης (μπαταρίες) σε μία υφιστάμενη οικιακή Φ/Β εγκατάσταση μπορεί να επιτευχθεί με ένα σύνολο μεθόδων, εκ των οποίων τέσσερις (4) είναι οι επικρατέστερες και αναλύονται παρακάτω. Τα χαρακτηριστικά διαφοροποίησης των αρχιτεκτονικών αυτών αφορούν τη μεθοδολογία χρήσης των ζυγών εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης (AC/DC bus), το είδος και τον αριθμό των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα στάδια λειτουργίας τους. Στην τρέχουσα ενότητα εξειδικεύονται οι τοπολογίες της **Ενότητας 11.3 [119]**.



**Σχήμα 11.8** – Αρχιτεκτονικές σύνδεσης Φ/Β – ΣΑΗΕ (μπαταρίες): (α) απ' ευθείας σύνδεσης στη γραμμή, (β) DC σύνδεσης, (γ) AC σύνδεσης και (γ) DC/AC σύνδεσης [119]

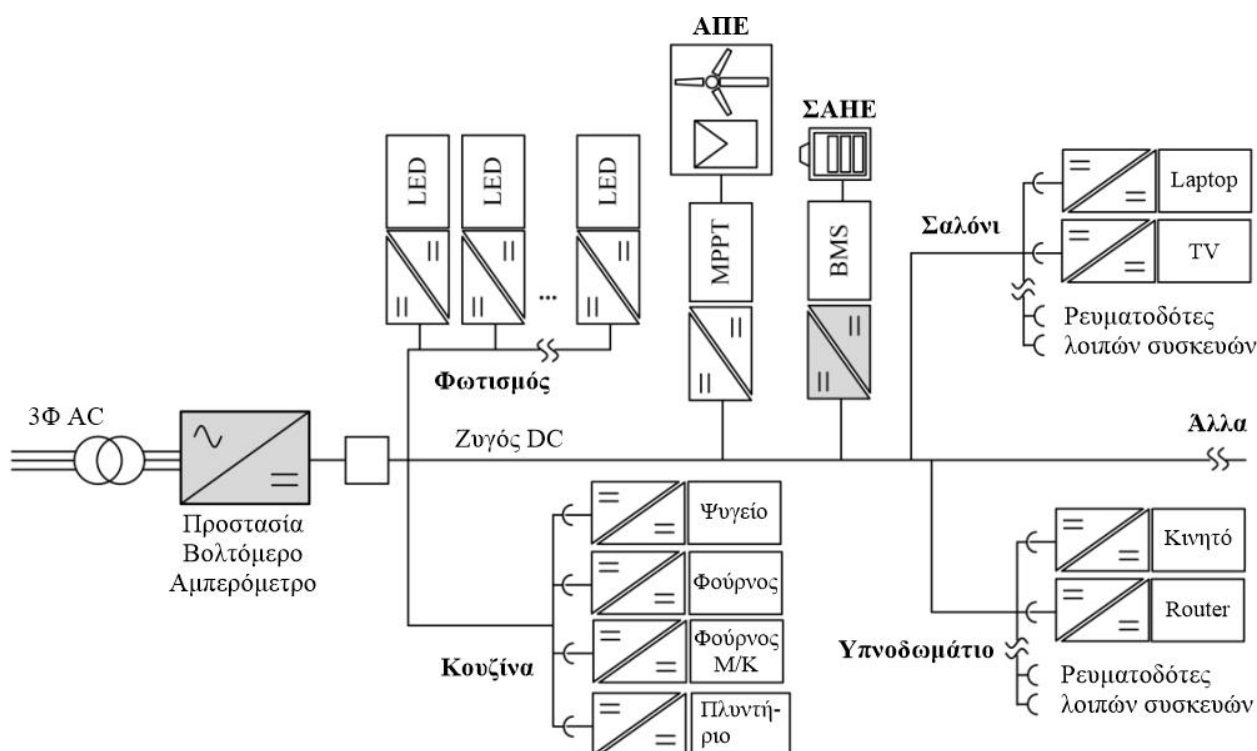
### 11.4.1 Απ' ευθείας σύνδεση στη γραμμή

Στην αρχιτεκτονική (βλ. **Σχήμα 11.8α**) αυτή έχουμε παράλληλη σύνδεση του Φ/Β συστήματος με το σύστημα αποθήκευσης (μπαταρία), ενώ η μπαταρία συνδέεται απ' ευθείας στον ζυγό DC. Για τη λειτουργία αυτής της διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται ένας **μετατροπέας DC–DC μονής κατεύθυνσης** κι ένας **αντιστροφέας DC–AC**. Ο μετατροπέας έχει διττό ρόλο. Από τη μία, ελέγχει το μέγιστο σημείο ισχύος (MPPT) των Φ/Β πλαισίων και από την άλλη, τροφοδοτεί με ενέργεια

το σύστημα αποθήκευσης και τον αντιστροφέα. Ο αμφίδρομος χαρακτήρας του αντιστροφέα προσδίδει ευελιξία, αναφορικά με τη ροή ισχύος από το δίκτυο προς το σύστημα αποθήκευσης. Κριτήριο επιλογής μεγέθους του μετατροπέα και του αντιστροφέα αποτελεί το μέγεθος της ονομαστικής ισχύος των Φ/Β συστοιχιών. Για τον έλεγχο της ροής ισχύος, βασική προϋπόθεση είναι η επικοινωνία μεταξύ του μετατροπέα και του αντιστροφέα [119].

### 11.4.2 DC σύνδεση

Στην αρχιτεκτονική αυτού του είδους της σύνδεσης (βλ. **Σχήμα 11.8β**), το Φ/Β σύστημα και το σύστημα αποθήκευσης, τα οποία βρίσκονται σε παραλληλία, διαθέτουν το δικό τους **μετατροπέα DC–DC**. Ο μετατροπέας του Φ/Β συστήματος ελέγχει το μέγιστο σημείο ισχύος (MPPT) των Φ/Β πλαισίων. Ο ρόλος του αμφίδρομου μετατροπέα του συστήματος αποθήκευσης είναι η προσθήκη δυνατότητας φόρτισης/εκφόρτισής του. Ο ζυγός DC συνδέεται με το δίκτυο μέσω ενός αμφίδρομου αντιστροφέα DC–AC. Η ξεχωριστή διαστασιολόγηση της μπαταρίας και του ελεγκτή φόρτισης έναντι του Φ/Β συστήματος, προσδίδει αυξημένη ευελιξία στο σύστημα [119]. Στο **Σχήμα 11.9** εμφανίζεται ένα κλασικό παράδειγμα μίας μονοφασικής διανομής DC μίας τυπικής κατοικίας, με τους αμφίδρομους μετατροπείς ισχύος να επισημαίνονται με γκρι χρώμα [118].



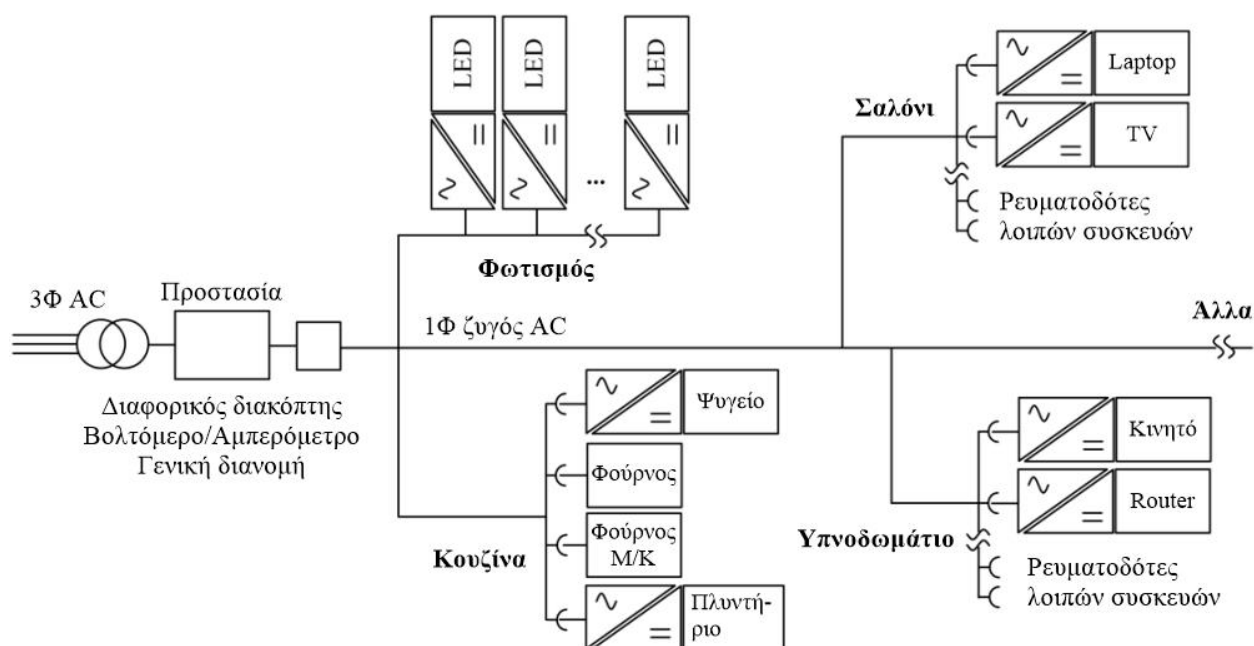
**Σχήμα 11.9** – Διανομή μονού ζυγού DC μίας τυπικής κατοικίας [118]

Η αρχιτεκτονική αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει το πιο ευέλικτο σενάριο για ένα δίκτυο DC, το οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει με τρεις (3) διαφορετικούς τρόπους [118]:

- **Παροχή δικτύου.** Η λειτουργία που εκτελείται όταν υπάρχει ρεύμα που ρέει από το ηλεκτρικό δίκτυο στο δίκτυο DC. Με άλλα λόγια, καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια από αυτή που παράγεται ή αποθηκεύεται.
- **Βύθιση δικτύου.** Το δίκτυο DC εισέρχεται σε αυτή τη λειτουργία όταν η ΑΠΕ παράγει περισσότερη ισχύ από αυτή που καταναλώνεται και το ΣΑΗΕ είναι πλήρως φορτισμένο. Σε μια τέτοια περίπτωση, η τροφοδοσία μπορεί να επανέλθει στο δίκτυο.
- **Νησιδοποίηση.** Εάν δεν υπάρχει ροή ρεύματος από το ηλεκτρικό δίκτυο, το δίκτυο DC λειτουργεί σε λειτουργία νησίδας. Ανάλογα με την ισχύ που απαιτείται από τα φορτία, την ισχύ που παράγεται από τις ΑΠΕ και την κατάσταση φόρτισης του ΣΑΗΕ, το δίκτυο DC θα μπορούσε να παραμείνει σε αυτήν τη λειτουργία για ορισμένο χρονικό διάστημα.

### 11.4.3 AC σύνδεση

Στον ζυγό AC της αρχιτεκτονικής αυτής (βλ. **Σχήμα 11.8γ**) συνδέονται το Φ/Β σύστημα, το σύστημα αποθήκευσης (μπαταρία) και τα οικιακά φορτία. Απαιτούνται δύο (2) **DC-AC αντιστροφείς**, ο ένας για το Φ/Β σύστημα και ο άλλος (αμφίδρομος) για το σύστημα αποθήκευσης. Βασικό γνώρισμα της αρχιτεκτονικής αυτής αποτελεί η πλήρης ανεξαρτησία των συστημάτων, διότι χρησιμοποιούνται δύο ξεχωριστοί αντιστροφείς (και όχι ένας κεντρικός) για τη μετατροπή και ανταλλαγή ισχύος από και προς τα οικιακά φορτία ή/και το δίκτυο [119]. Στο **Σχήμα 11.10** εικονίζεται ένα παράδειγμα μίας μονοφασικής διανομής AC σε μία τυπική κατοικία. Ορισμένα φορτία απεικονίζονται ως παράδειγμα πιθανών καταναλωτών στο δίκτυο [118].



**Σχήμα 11.10** – Τυπική μονοφασική διανομή AC μίας κατοικίας [118]

#### 11.4.4 DC/AC σύνδεση

Η αρχιτεκτονική αυτή (βλ. **Σχήμα 11.8δ**) διαθέτει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτήν της DC σύνδεσης, με διαφορά τη δυνατότητα απ' ευθείας σύνδεσης οικιακών DC φορτίων στον ζυγό DC. Η τροφοδότηση των φορτίων αυτών μπορεί να γίνει είτε από το Φ/Β σύστημα, είτε από την μπαταρία, χωρίς την παρέμβαση του αντιστροφέα. Σε περίπτωση ανεπαρκούς παροχής ισχύος από τα δύο παραπάνω συστήματα, ο αντιστροφέας μπορεί να προσδώσει ισχύ στα DC φορτία, την οποία λαμβάνει από το δίκτυο (αμφίδρομη λειτουργία). Η δυνατότητα διανομής ισχύος ανάλογα με τη φύση των φορτίων (AC ή DC), αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής αυτής. Επιπλέον, η ύπαρξη DC οικιακών φορτίων, συμπεριλαμβανομένων του Φ/Β συστήματος και της μπαταρίας, δίνει τη δυνατότητα στη διάταξη αυτή να εντείνει την αποδοτικότητα του συστήματος, εξαιτίας της μη αναγκαιότητας μετατροπών μεταξύ AC και DC (κάτι βέβαια που απαιτεί περίπλοκους αλγόριθμους ελέγχου) [119].

#### 11.4.5 Επιλογή βέλτιστης αρχιτεκτονικής

Η αρχιτεκτονική της AC σύνδεσης υπερισχύει έναντι των άλλων τριών (3) αρχιτεκτονικών, για τους παρακάτω λόγους:

- Η ύπαρξη των δύο αντιστροφέων, αν και αυξάνει το συνολικό κόστος της εγκατάστασης, διατηρεί ανεξάρτητα τα συστήματα των Φ/Β και της αποθήκευσης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η στοιχειοποίηση του συστήματος και η μείωση περιοριστικών παραγόντων έναντι των άλλων αρχιτεκτονικών, εξαιτίας της ανεξάρτητης διαστασιολόγησης των επιμέρους συστημάτων.
- Η μη χρήση μεγάλου αριθμού αντιστροφέων και μετατροπέων ελαττώνει τις πρόσθετες απώλειες.
- Το γεγονός της ύπαρξης ενός κεντρικού αντιστροφέα στις άλλες τρεις (3) αρχιτεκτονικές, απαιτεί υψηλής ποιότητας και ανθεκτικότητας υλικό (hardware), λόγω του συνόλου του ρεύματος που ρέει μέσα από αυτόν.

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποκτά αυξημένη ευελιξία κατά τη διαδικασία φόρτισης – εκφόρτισης, κάτι που αποδίδεται στην απ' ευθείας σύνδεση με το δίκτυο και τα τοπικά φορτία. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται πιο χρηστή διαχείριση των ωρών αιχμής [119].





# Κεφάλαιο 12

## Συμπεράσματα

---

Οι συνεχείς προσπάθειες για απεξάρτηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, έχοντας ως σκοπό τη μείωση έκλυσης αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα, την ανάσχεση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου του θερμοκηπίου, οδήγησαν στην αύξηση της διεισδυτικότητας και χρήσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), σε παγκόσμιο επίπεδο. Δημοφιλείς τεχνολογίες ΑΠΕ είναι αυτές που βασίζονται σε ανεξάντλητες και περιβαλλοντικά “καθαρές” μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, ενώ ακολουθούν άλλες, εξίσου σημαντικές μορφές ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική, η κυματική, η παλιρροιακή κ.λπ. Στόχος της Ε.Ε. είναι η αύξηση της διείσδυσης και χρήσης των ΑΠΕ που βασίζονται στις προαναφερόμενες ενεργειακές πηγές έως το 2050.

Από τη μία πλευρά, ο μη προβλέψιμος χαρακτήρας των ΑΠΕ εξαιτίας της εξάρτησής τους από τις καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες και από την άλλη, η ανάγκη για εξισορρόπηση της παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό τη διατήρηση της σταθερότητας του ηλεκτρικού δικτύου (π.χ. ρύθμιση τάσης και συχνότητας, μείωση απωλειών, βελτίωση ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, μείωση κόστους κ.λπ.), οδήγησαν στην εισαγωγή των Συστημάτων Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΑΗΕ), με δημοφιλέστερες τεχνολογίες αυτές της αντλησιοταμίευσης και των συσσωρευτών, ενώ η συνεχής έρευνα σε νέες τεχνολογίες αποσκοπεί στη βελτίωση υφιστάμενων και στην εισαγωγή νέων τεχνολογιών (π.χ. συστήματα υδρογόνου), ικανοποιώντας το σκοπό για τον οποίο προορίζονται.

Αναφορικά με τα ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, στα οποία ανήκουν οι συσσωρευτές (μπαταρίες), σημαντική, ευρεία και διαδεδομένη χρήση έχουν οι μπαταρίες μολύβδου–οξέος, καθώς και αυτές που βασίζονται στο λίθιο (με συνδυασμό και άλλων στοιχείων). Τα κριτήρια επιλεξιμότητας των ΣΑΗΕ βασίζονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, καθώς και στις ανάγκες του πεδίου χρήσης τους (εφαρμογές).

Η τεχνολογική εξέλιξη στο πεδίο των ημιαγωγών πυριτίου που συντελέστηκε τις τελευταίες δεκαετίες, είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της αποδοτικότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, τη βελτίωση της ποιότητας των συστημάτων υποστήριξης του ηλεκτρικού δικτύου. Η χώρα μας χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά ηλιοφάνειας και διάρκειάς της, σε ετήσιο επίπεδο. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία αύξηση στην εγκατάσταση και χρήση Φ/Β

συστημάτων, τόσο σε μεγάλη (Φ/Β πάρκα), μεσαία (οργανισμοί, βιομηχανίες), όσο και σε μικρότερη κλίμακα (στέγες κατοικιών, γραφείων, κ.λπ.). Σημαντική, επίσης, αύξηση παρουσιάζουν και τα συστήματα αιολικής ενέργειας. Αίτια της αύξησης αυτής αποτελούν αφ' ενός μεν η προσπάθεια για παραγωγή “πράσινης, καθαρής” ενέργειας, με ταυτόχρονη περιβαλλοντική βελτίωση, αφ' ετέρου δε η μείωση του κόστους παραγωγής και χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μελέτη, κατασκευή, εγκατάσταση και χρήση Φ/Β συστημάτων, των ΣΑΗΕ και ο συνδυασμός αυτών, έχει ως σκοπό την ικανοποίηση των αναγκών και στόχων που αφορούν, τελικά, την εξοικονόμηση ενέργειας και οικονομικών πόρων. Ταυτόχρονα, η σύμπραξη των ανωτέρω συστημάτων καθίσταται απαραίτητη, προκειμένου να επιτευχθούν ενεργειακά βιώσιμα συστήματα, αυξημένης αξιοπιστίας και απόδοσης. Η σωστή εφαρμογή διαφορετικών τρόπων λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση λειτουργίας των ΑΠΕ, των ΣΑΗΕ και του ηλεκτρικού δικτύου, θα μειώσει κατά πολύ την υπερβολική εξάρτηση από το δίκτυο, ειδικά κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής (αυξημένο κόστος ενέργειας). Το διαρκώς αυξανόμενο περιβαλλοντικό πρόβλημα μπορεί να μειωθεί δραστικά με τη χρήση ΑΠΕ, σε συνδυασμό με επαρκή χωρητικότητα αποθήκευσης. Η βελτίωση της χωρητικότητας των ΣΑΗΕ είναι απαραίτητη, αλλά ενέχει επίσης κινδύνους για την ασφάλεια, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, τόσο υψηλότερος είναι ο κίνδυνος ασφάλειας που σχετίζεται με αυτήν (αναφορικά με μπαταρίες που βασίζονται στο λίθιο). Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη αποτελεσματικής εξισορρόπησης κατά την ενσωμάτωση των συστημάτων, προκειμένου να δημιουργηθούν ασφαλή και υψηλής απόδοσης συστήματα.

Σε τοπικό επίπεδο, όπως π.χ. σε μια εγκατάσταση Φ/Β συστήματος σε κεραμοσκεπή μίας τυπικής κατοικίας, το όφελος μέσω σύναψης συμφωνίας ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering) μεταξύ του αυτοπαραγωγού και του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι αρκετά σημαντικό, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή και οικονομική συγκυρία της παρούσας χρονικής περιόδου.

Τέλος, η συνεχής προσπάθεια στον τομέα της έρευνας & ανάπτυξης, που πραγματοποιείται από πανεπιστήμια και ερευνητικούς οργανισμούς, οδηγεί στην ανάπτυξη νέων, αποδοτικότερων και ασφαλέστερων συστημάτων ΑΠΕ και ΣΑΗΕ, συντελώντας ταυτόχρονα στην αύξηση της διεισδυτικότητάς τους και συμβάλλοντας σε μεγαλύτερο βαθμό στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, τη βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών και τη διατήρηση της ευστάθειας του ηλεκτρικού δικτύου.

# Κεφάλαιο 13

## Μελλοντικές Τεχνολογικές Εξελίξεις

---

Η συνεχής ερευνητική διαδικασία των τμημάτων Έρευνας και Ανάπτυξης (Research & Development, R&D) που συντελείται στους τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί αφ' ενός μεν στην αναβάθμιση και βελτίωση των υπάρχουσών τεχνολογιών, αφ' ετέρου δε στην ανάπτυξη νέων υλικών, μεθόδων και τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες αυτές αποσκοπούν στη δημιουργία ή/και αναβάθμιση συστημάτων που προάγουν την απόδοση, τη σταθερότητα, την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητά τους στο πεδίο εφαρμογής τους. Στις ενότητες που ακολουθούν αναφέρονται εν συντομία αξιολογες τεχνολογίες με σκοπό την ικανοποίηση των προαναφερθέντων στόχων.

### 13.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

#### 13.1.1 Διαφανή ηλιακά πάνελ (transparent solar panels)

Εν μέσω προσπαθειών προς ένα μέλλον χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τον περιορισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, η επιστήμη ερευνά λύσεις για μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από παράθυρα σε γραφεία, σπίτια, ηλιοροφές αυτοκινήτων ή ακόμα και έξυπνων συσκευών (smart devices). Απώτερος σκοπός είναι η μετατροπή των οικιστικών συνόλων από σημαντικούς χρήστες ενέργειας σε παρόχους ενέργειας, προστατεύοντας ταυτόχρονα το οικοσύστημα.

Τα *διαφανή ηλιακά πάνελ* αποτελούν μία νέα τεχνολογία αιχμής, συγκεντρώνοντας και χρησιμοποιώντας την ενέργεια του φωτός μέσα π.χ. από τα παράθυρα ή οποιαδήποτε γυάλινη επιφάνεια, ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης, δίνοντας τη δυνατότητα διεύρυνσης του πεδίου εφαρμογής της ηλιακής ενέργειας.

Όσον αφορά τη μηχανική, οι ερευνητές έχουν δημιουργήσει πολλά μέσα διαφανούς ηλιακής τεχνολογίας (φωτοβολταϊκό γυαλί, photovoltaic glass), παρέχοντας κυμαινόμενα επίπεδα διαφάνειας. Γενικότερα όμως, η πλειονότητά τους λειτουργεί περισσότερο ως διαφανείς ηλιακοί συμπυκνωτές, κάτι που σημαίνει ότι είναι κατασκευασμένοι για να απορροφούν συγκεκριμένα μήκη κύματος UV και υπέρυθρου φωτός μη ορατών με γυμνό μάτι και τη μετέπειτα μετατροπή τους σε ενέργεια ικανή να τροφοδοτήσει ηλεκτρονικές συσκευές.

Μέχρι και σήμερα, οι επιστήμονες στις ΗΠΑ και την Ευρώπη έχουν επιτύχει επίπεδα διαφάνειας του Φ/Β γυαλιού στο 100%, φέρνοντάς μας ένα βήμα πιο κοντά στον στόχο ενός βιώσιμου μέλλοντος που δε θα βασίζεται στο δίκτυο της βιομηχανίας ορυκτών καυσίμων.

Η σημαντικότητα των διάφανων ηλιακών πάνελ έγκειται στο γεγονός ότι, στη σύγχρονη κοινωνία, το γυαλί βρίσκεται σχεδόν παντού. Υπολογίζεται ότι υπάρχουν 5 έως 7 δισεκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα γυάλινων επιφανειών μόνο στις ΗΠΑ. Η δυνατότητα αξιοποίησης της ισχύος αυτής θα μπορούσε να οδηγήσει στην παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας.



*Εικόνα 13.1* – Διαφανές ηλιακό στοιχείο [106]

Τα συμβατικά ηλιακά πάνελ απαιτούν μία μεγάλη περιοχή εγκατάστασης καθώς κι ένα σημαντικό αρχικό κόστος. Λόγω αυτών των περιορισμών, είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε μητροπολιτικές τοποθεσίες. Τα διαφανή ηλιακά πάνελ, από την άλλη πλευρά, μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτές τις περιοχές, ανοίγοντας το δρόμο για κτίρια καθαρής ενέργειας και μηδενικών ρύπων, βοηθώντας ταυτόχρονα τις πόλεις να επιτύχουν τους κλιματικούς στόχους.

Τροχοπέδη για την κλιμάκωση της τεχνολογίας αυτής αποτελεί το ζήτημα αύξησης της απόδοσης, καθώς θα πρέπει να υπάρξει αντιστάθμιση του λόγου της απόδοσης ως προς το ποσοστό διαφάνειας των ηλιακών πάνελ. Όσο πιο διαφανές είναι το πάνελ, τόσο λιγότερο αποδοτικό είναι, γι' αυτό και τα διαφανή ηλιακά πάνελ δεν αναμένεται να υπερβούν ή να αντικαταστήσουν τα τυπικά ηλιακά πάνελ σε σύντομο χρονικό διάστημα. Παρά ταύτα όμως, η τεχνολογία αυτή θα μπορούσε ενδεχομένως να βοηθήσει την ανθρωπότητα να φτάσει σε ένα πραγματικά βιώσιμο και πιο πράσινο μέλλον [106].

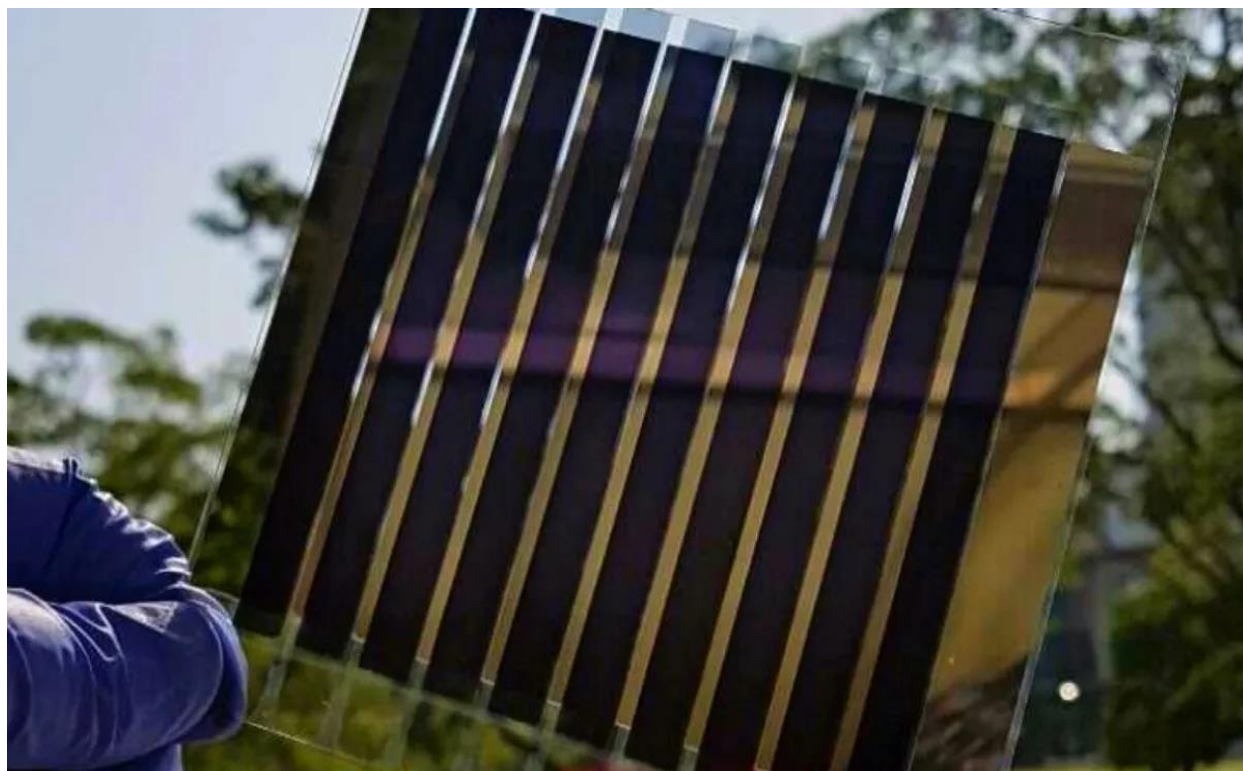
### 13.1.2 Οργανικά ηλιακά στοιχεία (organic solar cells)

Τα *οργανικά ηλιακά στοιχεία* αποτελούνται από ένα νέας τεχνολογίας πρόσθετο υλικό πολυμερών, αποσκοπώντας στην ανάπτυξή τους σε μεγάλες επιφάνειες, αντισταθμίζοντας ταυτόχρονα τις συνέπειες ενός συνόλου παραγόντων που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή τους.

Η εμπορευματοποίηση της έρευνας πάνω στα οργανικά ηλιακά στοιχεία θα μπορούσε να ανοίξει το δρόμο για παραγωγή ενέργειας σε αυτάρκεια και φιλική προς το περιβάλλον. Είναι αξιοσημείωτο ότι τέτοια στοιχεία μπορούν να τοποθετηθούν με απλό τρόπο στο εξωτερικό των κτιρίων και των αυτοκινήτων, καθώς και να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας για κινητές συσκευές και συσκευές IoT (Internet of Things).

Τα οργανικά ηλιακά στοιχεία, τα οποία αποτελούν μέρος της τρίτης γενιάς ηλιακών στοιχείων, κερδίζουν συνεχώς έδαφος ως βασική τεχνολογία για την παραγωγή ενέργειας από αστική ηλιακή ακτινοβολία, επειδή μπορούν να εκτυπωθούν και να τοποθετηθούν σε εξωτερικούς τοίχους κτιρίων ή γυάλινα παράθυρα.

Μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής αποτελεί το πολύ μικρό μέγεθος της φωτοδραστικής περιοχής της ( $< 0.1 \text{ cm}^2$ ), η οποία συλλέγει το ηλιακό φως και το μετατρέπει σε ενέργεια, γεγονός που παρεμποδίζει την εμπορευματοποίησή της εξαιτίας αρκετών ζητημάτων απόδοσης και επαναληψιμότητας που προκύπτουν, όταν η επιφάνεια του στοιχείου αυξάνεται σε αρκετά  $\text{m}^2$ , όπου είναι διαθέσιμα βιώσιμα επίπεδα παροχής ενέργειας.



*Εικόνα 13.2* – Οργανικό ηλιακό στοιχείο [107]

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη μίας σύνθετης μορφής φωτοενεργού στρώματος των οργανικών ηλιακών στοιχείων, καθώς και στη διαδικασία διαλύματος. Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται και που ονομάζεται *επίστρωση περιδίνησης*, παράγει ένα ομοιογενές μείγμα φωτοενεργού στρώματος εξατμίζοντας γρήγορα τον διαλύτη, ενώ το υπόστρωμα περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Ωστόσο, η τεχνική διαλύματος μεγάλου εύρους περιοχής που αναπτύχθηκε για βιομηχανική χρήση οδήγησε σε μείωση της απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Αυτό συνέβη, διότι ο ρυθμός εξατμίστη του διαλύτη που αποτελεί μέρος του διαλύματος υλικού των ηλιακών στοιχείων ήταν πολύ αργός, με αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη συσσωμάτωση μεταξύ των φωτοδραστικών συστατικών.

Για να αποφευχθεί αυτή η συμπεριφορά, οι ερευνητές δημιούργησαν ένα πολυμερές πρόσθετο που αλληλεπιδρά με υλικά επιρρεπή σε αδρανές πρόσμιγμα. Έτσι, με την τροποποίηση της δομής σε νανοεπίπεδο (δημιουργία τριμερών φωτοενεργών στρωμάτων συμπεριλαμβάνοντας πολυμερή πρόσθετα), επιτεύχθηκαν βελτιώσεις της απόδοσης, της ασφάλειας και της σταθερότητας έναντι των αυξήσεων της θερμοκρασίας που προκαλούνται από το φως κατά τη λειτουργία των ηλιακών στοιχείων.

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά το συνολικό κόστος ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας, καθιστώντας το ευρείας χρήσης και αποτελώντας ταυτόχρονα καθαρή πηγή ενέργειας [107].

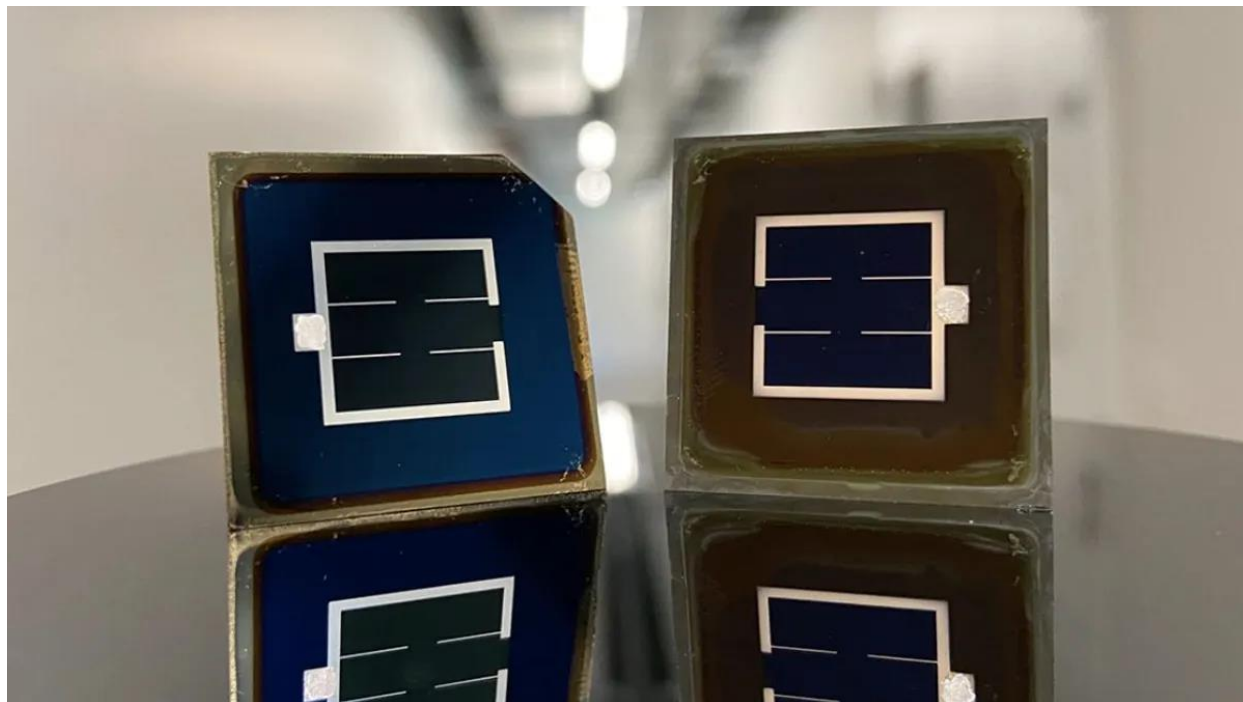
### **13.1.3 Ηλιακά στοιχεία πυριτίου–περοβσκίτη (silicon–perovskite solar cells)**

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δεσμευμένα στα όρια του υλικού από το οποίο κατασκευάστηκαν. Σήμερα, το πυρίτιο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για ηλιακά στοιχεία. Ωστόσο, παρά την επιτυχία του έχει τα μειονεκτήματά του, καθώς έχει ένα θεωρητικό όριο απόδοσης περίπου 29%. Οι τρέχουσες αποδόσεις αυτής της τεχνολογίας αντιστοιχούν σε ποσοστό ελαφρώς λιγότερο από 27%, δίνοντας ένα πολύ μικρό περιθώριο για πιθανές βελτιώσεις.

Οι ερευνητές κατάφεραν να ξεπεράσουν το ορόσημο απόδοσης του 30%, χρησιμοποιώντας υλικά χαμηλού κόστους, ωθώντας την τεχνολογία πέρα από τα όρια του πυριτίου. Πρόσθεσαν περισσότερα συμπληρωματικά ηλιακά στοιχεία στο πυρίτιο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των *διαδοχικών ηλιακών στοιχείων*. Το υψηλότερης ενέργειας ορατό φως του ηλίου απορροφάται στο επάνω (εμπρός) μέρος του στοιχείου πυριτίου, ενώ το χαμηλότερης ενέργειας υπέρυθρο φως απορροφάται στο πίσω μέρος της σειράς του στοιχείου πυριτίου. Οι *περοβσκίτες αλογονιδίου* συστήνουν το πλέον κατάλληλο στοιχείο που συνεργάζεται με το πυρίτιο, καθώς μπορούν να μετατρέψουν το ορατό φως σε ηλεκτρική ενέργεια πιο αποτελεσματικά σε σύγκριση με το πυρίτιο. Επιπλέον, δεν επηρεάζουν σημαντικά το κόστος κατασκευής.



Το επάνω μέρος αποτελείται από στρώματα περοβσκίτη που εναποτίθενται από ένα υγρό διάλυμα σε μια επίπεδη επιφάνεια πυριτίου, πετυχαίνοντας απόδοση τη τάξης του 30.93% σε ηλιακό στοιχείο δοκιμής εμβαδού 1 cm<sup>2</sup>. Το κάτω μέρος αποτελείται από μία προσέγγιση υβριδικού αέριου και υγρού διαλύματος για την εναπόθεση περοβσκίτη σε ανάγλυφη επιφάνεια πυριτίου, επιτυγχάνοντας απόδοση 31.25% σε ηλιακό στοιχείο δοκιμής εμβαδού 1 cm<sup>2</sup>.



*Εικόνα 13.3* – Ηλιακό στοιχείο πυριτίου–περοβσκίτη [108]

Σύμφωνα με τους επιστήμονες, απαιτείται περισσότερη έρευνα για τον καθορισμό της δυνατότητας κλιμάκωσης της τεχνολογίας αυτής σε μεγαλύτερες επιφάνειες, διασφαλίζοντας ότι τα νέα αυτά στοιχεία θα μπορέσουν να διατηρήσουν σταθερή ισχύ εξόδου για μια τυπική διάρκεια ζωής [108].

## **13.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας**

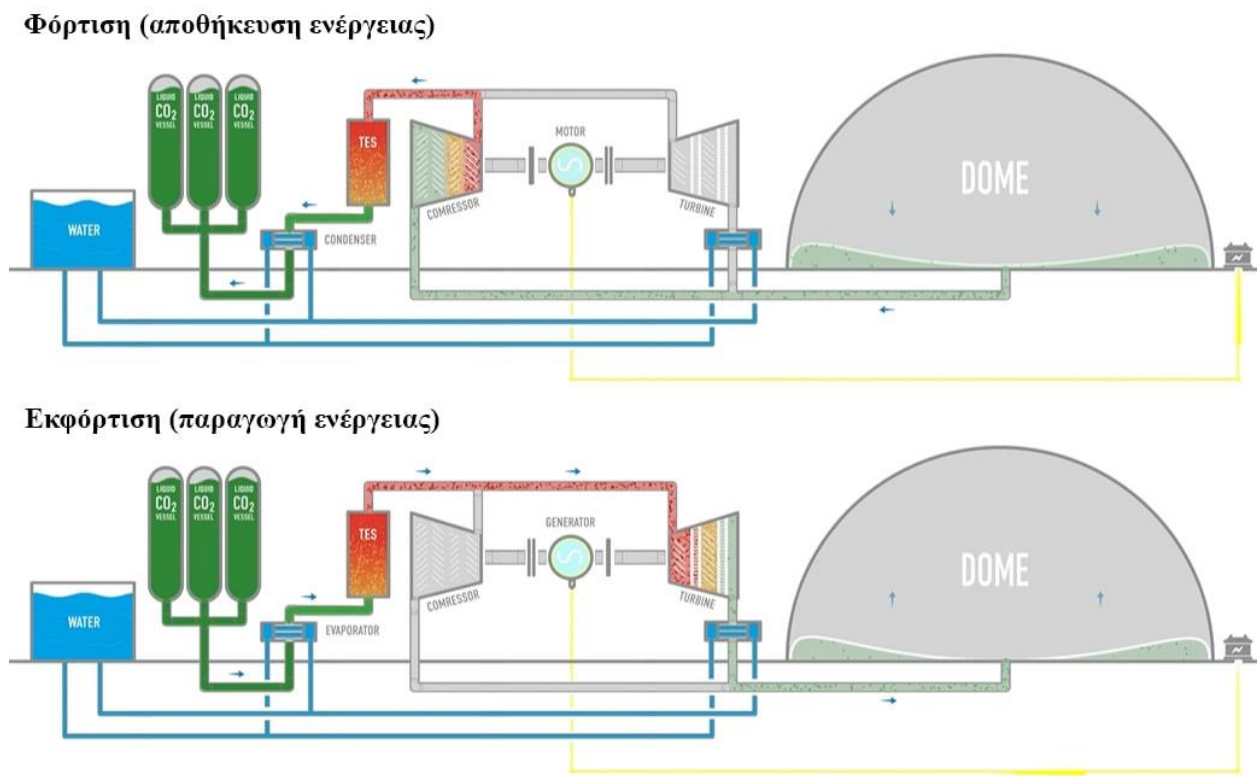
### **13.2.1 Μπαταρία διοξειδίου του άνθρακα (carbon–dioxide battery)**

Είναι γνωστός ο ρόλος και οι επιπτώσεις της έκλυσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην αύξηση της θέρμανσης του πλανήτη. Ενώ οι χώρες καταβάλλουν προσπάθειες για να περιορίσουν τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, υπάρχει ταυτόχρονα η ανάγκη παγίδευσης/συγκράτησης του CO<sub>2</sub> που απελευθερώνεται αυτήν τη στιγμή, για να διασφαλιστεί ο έλεγχος της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη.



Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, γίνονται προσπάθειες απευθείας σύλληψης του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα και αποθήκευσής του. Μία νέα startup εταιρεία που εδρεύει στη Σαρδηνία της Ιταλίας, η Energy Dome, σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει το CO<sub>2</sub> για αποθήκευση ενέργειας, χρησιμοποιώντας μία εξαιρετικά επεκτάσιμη μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί προϊόντα εκτός αγοράς.

Βασική αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής είναι η χρησιμοποίηση αερίου CO<sub>2</sub>, έχοντας τη δυνατότητα συμπίκνωσης και αποθήκευσης σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία δωματίου. Το CO<sub>2</sub> σε συνθήκες κανονικής θερμοκρασίας και πίεσης (αποθηκευμένο σ' έναν μεγάλο θόλο) συμπιέζεται για να μετατραπεί σε υγρή μορφή. Στη συνέχεια, η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, αποθηκεύεται. Ο κύκλος αυτός αποτελεί τη διαδικασία φόρτισης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της εισερχόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, όπως η ηλιακή ή η αιολική. Όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση, η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του υγρού CO<sub>2</sub>, το οποίο μετατρέπεται σε αέριο και στη συνέχεια ωθείται μέσω ενός στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 13.1 – Αρχή λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης μπαταρίας CO<sub>2</sub> [109]

Η όλη διαδικασία συστήνει ένα σύστημα κλειστού βρόχου, όπου δεν απελευθερώνεται CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Επίσης, η τεχνολογία αυτή δε χρησιμοποιεί στοιχεία σπάνιων γαιών, όπως λίθιο ή κοβάλτιο, αλλά χρησιμοποιεί μόνο χάλυβα και νερό. Επομένως, μπορεί να εφαρμοστεί

οπουδήποτε, με λιγότερο από το μισό κόστος εν συγκρίσει με μία εγκατάσταση αποθήκευσης μπαταριών ιόντων-λιθίου παρόμοιας χωρητικότητας.

Οι μπαταρίες CO<sub>2</sub> μπορούν να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας υπάρχουσες αλυσίδες εφοδιασμού χωρίς σημαντικά σημεία συμφόρησης. Στις μέρες μας, γίνεται προσπάθεια για την ανάπτυξη μίας μονάδας πλήρους κλίμακας 20 – 200 MWh [109].

### 13.2.2 Σύλληψη διοξειδίου του άνθρακα με χρήση ηλιακής ενέργειας

Η εταιρεία AspiraDAC σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Σύδνευ ανέπτυξαν μία τεχνολογία, η οποία βασίζεται σε ένα σύστημα που περιέχει ως κύριο συστατικό μία ουσία όμοια με σπόγγο, η οποία παγιδεύει μόρια CO<sub>2</sub> όταν ο αέρας ταξιδεύει μέσα από αυτήν. Ένα σύστημα ανεμιστήρων αναρροφά αέρα σε δοχεία γεμάτα με την παραπάνω ουσία, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιείται θερμότητα για την εξαγωγή καθαρού CO<sub>2</sub> που μπορεί να διοχετευτεί και να αποθηκευτεί υπόγεια. Η ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος αυτού παράγεται εξ ολοκλήρου από ηλιακά πάνελ.

Οι μηχανές δέσμευσης CO<sub>2</sub> που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια κι έχουν κλιμακωθεί για χρήση σε παγκόσμιο επίπεδο, μπορεί να αποτελέσουν μία από τις πολλές λύσεις που θα απαιτηθούν για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης [110].

### 13.2.3 Βαρυτική αποθήκευση ενέργειας (Gravity Energy Storage, GES)

Η *βαρύτητα* υφίσταται πάντα, αποτελώντας ένα ισχυρό εργαλείο στον κόσμο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εταιρεία Energy Vault με έδρα την Ελβετία έχει αναπτύξει ένα πρωτότυπο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο στη δύναμη της βαρύτητας.

Η βασική ιδέα απαιτεί περίσσειμα ανανεώσιμης ενέργειας, συμβάλλοντας στην έλξη ενός βάρους στην κορυφή ενός πύργου ή ενός άξονα. Το βάρος αυτό παραμένει σε κατάσταση αναμονής έως ότου υπάρξει ύφεση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, επιτρέποντας την αργή μείωση του βάρους και συνεπώς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η βαρύτητα το έλκει προς τα κάτω. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να συμβάλει στην κάλυψη των ενεργειακών κενών που προκύπτουν όταν άλλες ΑΠΕ σταματήσουν να αποδίδουν (μειωμένη ένταση ανέμου, μηδενική απόδοση Φ/Β συστημάτων λόγω της νύχτας κ.λπ.). Οι βαρυτικές λύσεις αποθήκευσης ενέργειας βασίζονται στις βασικές αρχές της φυσικής και της μηχανολογικής μηχανικής της αντλούμενης υδροηλεκτρικής αποθήκευσης ενέργειας (PHSS), στην περίπτωση όμως αυτή το νερό αντικαθίσταται από μπλοκ κατασκευασμένα από διάφορα ανακυκλωμένα υλικά. Η ικανότητα αποθήκευσης της τεχνολογίας αυτής ανέρχεται σε αρκετές δεκάδες έως εκατοντάδες MWh [111].

### 13.2.4 Βιοπαταρίες (biobatteries)

Με τις τεχνολογικές εξελίξεις, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), που επιτρέπουν στις συσκευές και τους αισθητήρες να συνδέονται μεταξύ τους και να λειτουργούν συγχρονισμένα, υπάρχει επίσης η ανάγκη διατήρησης της τροφοδοσίας των συσκευών αυτών, σε οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, ιδιαίτερα όταν βρίσκονται εγκατεστημένες σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Στο σημείο αυτό μπορούν να συμβάλλουν οι *βιολογικές μπαταρίες*.

Οι *βιοπαταρίες* είναι ένας νέος, επερχόμενος τρόπος τροφοδοσίας συσκευών που λειτουργούν μιμούμενες τη διάσπαση της ενέργειας στα βιολογικά κύτταρα. Η γλυκόζη είναι η πιο κοινή πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα όντα εν ζωή. Κατά τη διάσπαση της γλυκόζης από τα ένζυμα των κυττάρων, απελευθερώνονται ηλεκτρόνια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία συσκευών. Η βακτηριακή αλληλεπίδραση μπορεί να παράγει αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσει συσκευές για λίγες ώρες.



*Εικόνα 13.4* – Βιοπαταρίες plug and play [112]

Μια ομάδα ερευνητών στο Πανεπιστήμιο του Binghamton βρήκε έναν τρόπο ώστε να τροφοδοτεί βιοπαταρίες για εβδομάδες, χρησιμοποιώντας τρεις (3) διαφορετικούς τύπους βακτηρίων τοποθετημένους σε ξεχωριστούς θαλάμους. Ένα φωτοσυνθετικό βακτήριο παράγει οργανική τροφή που χρησιμοποιείται ως θρεπτική ουσία για τα άλλα βακτηριακά κύτταρα που βρίσκονται από κάτω. Στο κάτω μέρος βρίσκονται τα βακτήρια που παράγουν ηλεκτρισμό, ενώ τα βακτήρια στη μεσαία θέση παράγουν ορισμένες χημικές ουσίες για τη βελτίωση της μεταφοράς ηλεκτρονίων. Ο τύπος των μπαταριών αυτών εγκαινιάζει μία νέα μέθοδο συναρμολόγησης. Οι

βιομπαταρίες περιέχονται σε μπλοκ διαστάσεων περίπου 3 x 3 cm, που μπορούν να συνδυαστούν και να αναδιαμορφωθούν πολύ εύκολα (plug and play). Ανάλογα με τη συσκευή για την οποία προορίζονται, τα μπλοκ μπορούν να αναδιαταχθούν για την παροχή των απαραίτητων ποσοτήτων τάσης και ρεύματος.

Μελλοντικός στόχος της τεχνολογίας των βιομπαταριών είναι η κατασκευή όλο και μικρότερων μονάδων για ευρεία χρήση, οι οποίες θα έχουν τη δυνατότητα αυτοεπισκευής όταν αντιμετωπίζουν ζημιές και βλάβες σε σκληρά περιβάλλοντα [112].

### 13.2.5 Μπαταρίες με βάση το νερό (water-based batteries)

Η Alsym Energy, μία startup εταιρεία στην περιοχή της Βοστώνης των ΗΠΑ, παρουσίασε μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία που θα μπορούσε να προσεγγίσει την απόδοση και τη λειτουργία των μπαταριών ιόντων-λιθίου.

Η μπαταρία με βάση το νερό χρησιμοποιεί οικονομικά, εύκολα προσβάσιμα υλικά όπως το μαγγάνιο και το οξείδιο του μετάλλου. Το σημαντικότερο στοιχείο είναι ότι δεν περιέχει κοβάλτιο, ένα ιδιαίτερα τοξικό, δαπανηρό, κρίσιμο συστατικό των μπαταριών λιθίου. Αυτό σημαίνει ότι αποφεύγει ορισμένα από τα κύρια μειονεκτήματα των σημερινών μπαταριών, όπως η πιθανότητα ανάφλεξης των μπαταριών ιόντων-λιθίου και οι αρνητικές επιπτώσεις της εξόρυξης λιθίου στο περιβάλλον. Χάρη στη χρήση μη τοξικών υλικών, η νέα σχεδίαση της μπαταρίας την καθιστά οικονομική, διότι δεν απαιτεί ειδικές διατάξεις προστασίας, φιλική στο περιβάλλον κι εύκολα ανακυκλώσιμη.

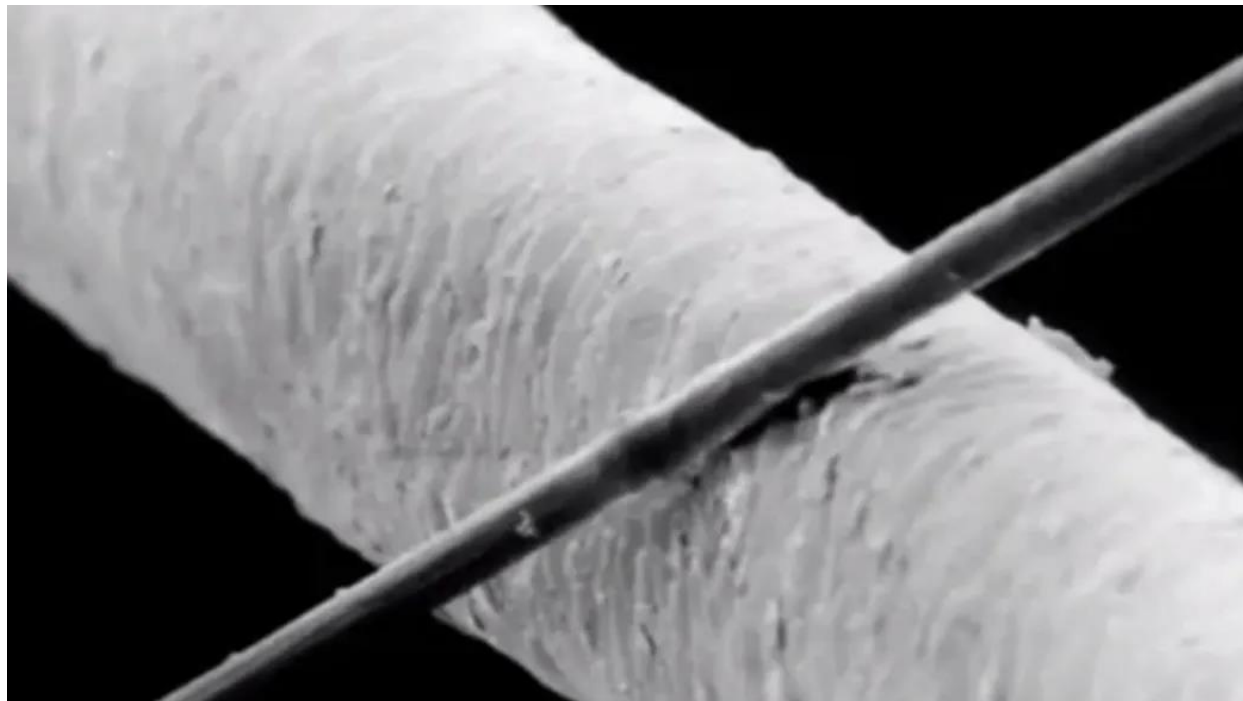
Λόγω την ασφάλειας που παρέχει ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας, βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα εφαρμογών, όπως η ηλεκτροκίνηση, η ναυτιλία κ.λπ. Εξαιτίας του χαμηλού της κόστους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αναπτυσσόμενες χώρες για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας εκτός δικτύου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για άτομα που δεν έχουν επί του παρόντος πρόσβαση στην ενέργεια [113].

### 13.2.6 Μπαταρίες με βάση τα νανοσύρματα (nanowire-based batteries)

Ερευνητές από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια ανακάλυψαν μία μπαταρία που βασίζεται σε νανοσύρματα και που μπορεί να επαναφορτιστεί εκατοντάδες χιλιάδες φορές, κάνοντας ένα σημαντικό άλμα προς μία μπαταρία που δε θα χρειάζεται αντικατάσταση, παράγοντα που αποτελεί ίσως το μεγαλύτερο πρόβλημα στις μέρες μας με τη πληθώρα των ηλεκτρονικών συσκευών που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής και αυτονομία των μπαταριών.

Τα νανοσύρματα διαθέτουν αρκετά ιδανικά χαρακτηριστικά για την αποθήκευση και μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι εξαιρετικά αγωγά και χιλιάδες φορές πιο λεπτά από

μια ανθρώπινη τρίχα, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να τοποθετηθούν κατά τέτοιο τρόπο, παρέχοντας μία μεγάλη επιφάνεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων. Μειονέκτημα των νανοσυρμάτων είναι η μεγάλη ευθραυστότητά τους, μη λειτουργώντας ικανοποιητικά μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους φορτίσεων και εκφορτίσεων.



*Εικόνα 13.5 – Νανοςύρμα σε σύγκριση με μία ανθρώπινη τρίχα [114]*

Οι ερευνητές, εξελίσσοντας την εργασία τους, επικάλυψαν νανοςύρματα χρυσού σε διοξείδιο του μαγγανίου και τα τοποθέτησαν σ' ένα πηκτώμα που μοιάζει με plexiglass. Αυτός ο συνδυασμός διατηρεί ανέπαφες όλες τις ιδιότητες των νανοσυρμάτων και τα κάνει ανθεκτικά σε σπασίματα, επιτρέποντας τη φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας έως και 200 χιλιάδες φορές, χωρίς τη θραύση των νανοσυρμάτων και χωρίς απώλεια χωρητικότητας. Ένας άλλος συνδυασμός, αυτός του ηλεκτρολύτη γέλης PMMA (όπως το plexiglass) και του οξειδίου του μαγνησίου μπορεί να δώσει ευελιξία και δομή στα νανοςύρματα, αποτρέποντας το σχηματισμό ρηγματώσεων και επεκτείνοντας, έτσι, τη λειτουργική τους διάρκεια [114].

### **13.2.7 Μπαταρίες άμμου (sand batteries)**

Η λειτουργία του συστήματος αυτού είναι όμοια με αυτή των συμβατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, στα οποία το περίσσειμα ισχύος που παράγεται μέσω των ανανεώσιμων πηγών κατευθύνεται προς την *μπαταρία άμμου*. Αντί να προσπαθεί να μετακινήσει ηλεκτρόνια από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο ή σε αντλίες τροφοδοσίας για την άντληση νερού σε υψηλότερη δεξαμενή, η μπαταρία άμμου χρησιμοποιεί θέρμανση με αντίσταση για να αυξήσει τη



θερμοκρασία του αέρα, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στην άμμο μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας.

Με τη θερμοκρασία τήξης της άμμου σε εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου, ένας πύργος από άμμο έχει μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Σημαντικό πλεονέκτημα της άμμου είναι ότι επιτρέπει την αποθήκευση της ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα (για μήνες), καθιστώντας τη μία βιώσιμη λύση μακροπρόθεσμης αποθήκευσης.



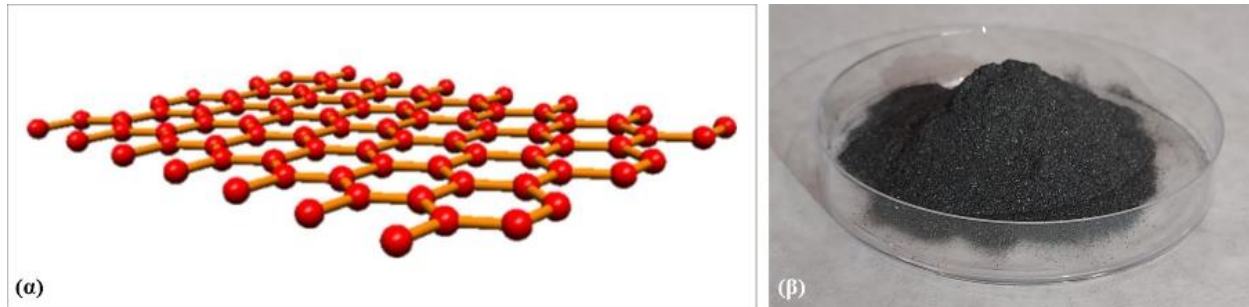
*Εικόνα 13.6 – Η μπαταρία άμμου στο ψηλό γκρι σιλό της [115]*

Όταν οι τιμές της ενέργειας είναι υψηλότερες, ο ζεστός αέρας της μπαταρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του νερού και στη συνέχεια να αντληθεί σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, γραφεία και κατοικίες, αποτελώντας μία οικονομικά συμφέρουσα, αποδοτική και εύκολα υλοποιήσιμη λύση [115].

### **13.2.8 Μπαταρίες ιόντων–λιθίου με προσθήκη γραφενίου**

Το *γραφένιο* είναι πιο σκληρό από το διαμάντι, πιο ηλεκτρικά αγώγιμο από το χαλκό κι ένα εκατομμύριο φορές πιο λεπτό από το χαρτί. Η προσθήκη εξαιρετικά λεπτού γραφενίου σε παραδοσιακές κυψέλες ιόντων–λιθίου προσφέρει αυξημένη πυκνότητα ισχύος, ταχεία φόρτιση βελτιωμένη χωρητικότητα και διάρκεια ζωής για μπαταρίες με πεδίο εφαρμογής τη διαστημική βιομηχανία, οι οποίες μπορούν πλέον να κατασκευαστούν με φθηνότερο, πιο πράσινο τρόπο, αντικαθιστώντας τον τοξικό διαλύτη με νερό και νανοκρυστάλλους φυτικής κυτταρίνης, λύση κατά πολύ οικονομικότερη.

Πιο συγκεκριμένα, το νανο-μέγεθος του γραφενίου εξασφαλίζει ενισχυμένη κινητικότητα των ιόντων-λιθίου στην καρδιά του συστήματος, οδηγώντας σε βελτιωμένη χωρητικότητα για την ίδια ποσότητα υλικού και υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς να υποβαθμίζεται το σύστημα. Υπάρχει δυνατότητα για νέες, φθηνές, αλλά αξιόπιστες μπαταρίες κατάλληλες για μικρούς δορυφόρους και ειδικά για μικροδορυφόρους “CubeSats”.



*Εικόνα 13.7 – (α) Στρώμα γραφενίου πάχους ατόμου, (β) Σκόνη γραφενίου [116]*

Συνολικά, το γραφένιο προσφέρει περίπου 20% υψηλότερη ειδική χωρητικότητα από τον γραφίτη, ενώ η αντοχή του σε υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος θα πρέπει να σημαίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για τις μπαταρίες, ασφαλέστερη λειτουργία λόγω χαμηλότερης θερμοκρασίας και συνολική μείωση της κατανάλωσης υλικού και επομένως του κόστους [116].



# Παραρτήματα

## — Ευρετήριο

Παράρτημα Α'		
1.	Πίνακας Α.1 – Ηλιοφάνεια σε ώρες ανά μήνα, εποχή και έτος	222
2.	Πίνακας Α.2 – Μέσος όρος ημερήσιας θερμοκρασίας ανά μήνα, εποχή και έτος	223
3.	Πίνακας Α.3 – Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης σε kWh/m <sup>2</sup> ανά μήνα, εποχή και έτος	224
4.	Πίνακας Α.4 – Τιμές του συντελεστή R ανά μήνα για την περιοχή της Κοζάνης. Γ.Π. 40.31'	225
5.	Πίνακας Α.5 – Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση στην επιφάνεια της Γης σε kWh/m <sup>2</sup> ανά μήνα, εποχή και έτος για την περιοχή της Κοζάνης. Γ.Π. 40.31'	226
6.	Πίνακας Α.6 – Βέλτιστη κλίση $B^\circ$ ανά μήνα, συντελεστής διόρθωσης $R$ και ολική ηλιακή ακτινοβολία $H_k$ σε kWh/m <sup>2</sup> στο επίπεδο με τη βέλτιστη κλίση, ανά μήνα, εποχή και έτος	227
7.	Πίνακας Α.7 – Μόνιμη κλίση και ολική ηλιακή ακτινοβολία $H_k$ σε kWh/m <sup>2</sup> στο επίπεδο με τη ετήσια μόνιμη βέλτιστη κλίση, ανά μήνα, εποχή και έτος	228
8.	Πίνακας Α.8 – Τιμές του συντελεστή $h_1$ και $h_2$ για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των Φ/Β πλαισίων με μόνιμο προσανατολισμό το νότο και για μόνιμη κλίση ίση με τη βέλτιστη μηνιαία κλίση (Δεκέμβριος) για ασκίαστα πλαίσια	229
9.	Πίνακας Α.9 – Τιμές του συντελεστή $h_1$ και $h_2$ για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των Φ/Β πλαισίων με μόνιμο προσανατολισμό το νότο και για μόνιμη κλίση ίση με τη βέλτιστη ετήσια μόνιμη κλίση για ασκίαστα πλαίσια	230

Παράρτημα Β'		
1.	Σχήμα Β.1 – Ηλεκτρομηχανολογικό φυλλάδιο δεδομένων των Φ/Β πλαισίων	231
2.	Σχήμα Β.2 – Φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων του βελτιστοποιητή ισχύος	233
3.	Σχήμα Β.3 – Φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων του τριφασικού αντιστροφέα (inverter)	235
4.	Σχήμα Β.4 – Φυλλάδιο επισκόπησης της πλατφόρμας επιτήρησης	237

Παράρτημα Γ'		
1.	Σχήμα Γ.1 – Ετήσια τριφασική παραγωγή ενέργειας (από 01/2015 έως και 08/2022) σε Watt	239
2.	Σχήμα Γ.2 – Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (από 01/2015 έως και 08/2022) σε Watt	243

Πίνακας Α.1 – Ηλιοφάνεια σε ώρες ανά μήνα, εποχή και έτος [09]

Πόλη Μέτρηση	ΚΑΣΤΟΡΙΑ	ΚΟΖΑΝΗ
Γεωγραφικό Πλάτος	40.31´	40.18´
Γεωγραφικό Μήκος	21.16´	21.47´
Υψόμετρο (m)	661	627
Ιανουάριος	100,00	109,00
Φεβρουάριος	99,00	94,00
Μάρτιος	136,00	126,00
Απρίλιος	194,00	140,00
Μάιος	235,00	150,00
Ιούνιος	286,00	211,00
Ιούλιος	316,00	240,00
Αύγουστος	294,00	261,00
Σεπτέμβριος	240,00	203,00
Οκτώβριος	169,00	129,00
Νοέμβριος	120,00	100,00
Δεκέμβριος	105,00	114,00
Ανοιξη	565,00	416,00
Καλοκαίρι	896,00	712,00
Φθινόπωρο	529,00	432,00
Χειμώνας	304,00	317,00
Έτος	2294,00	1877,00

**Πίνακας Α.2** – Μέσος όρος ημερήσιας θερμοκρασίας ανά μήνα, εποχή και έτος [09]

<b>Πόλη</b> <b>Μέτρηση</b>	<b>ΓΡΕΒΕΝΑ</b>	<b>ΚΑΣΤΟΡΙΑ</b>	<b>ΚΟΖΑΝΗ</b>	<b>ΦΛΩΡΙΝΑ</b>
<b>Γεωγραφικό Πλάτος</b>	40.05´	40.31´	40.18´	40.47´
<b>Γεωγραφικό Μήκος</b>	21.26´	21.16´	21.47´	21.24´
<b>Ιανουάριος</b>	5,00	3,00	3,00	3,00
<b>Φεβρουάριος</b>	7,00	5,00	5,00	4,00
<b>Μάρτιος</b>	9,00	8,00	8,00	8,00
<b>Απρίλιος</b>	13,00	12,00	12,00	11,00
<b>Μάιος</b>	19,00	18,00	18,00	18,00
<b>Ιούνιος</b>	24,00	23,00	23,00	22,00
<b>Ιούλιος</b>	26,00	25,00	25,00	24,00
<b>Αύγουστος</b>	25,00	25,00	24,00	24,00
<b>Σεπτέμβριος</b>	20,00	20,00	19,00	19,00
<b>Οκτώβριος</b>	16,00	16,00	15,00	15,00
<b>Νοέμβριος</b>	11,00	10,00	10,00	9,00
<b>Δεκέμβριος</b>	6,00	4,00	4,00	3,00
<b>Άνοιξη</b>	13,67	12,67	12,67	12,33
<b>Καλοκαίρι</b>	25,00	24,33	24,00	23,33
<b>Φθινόπωρο</b>	15,67	15,33	14,67	14,33
<b>Χειμώνας</b>	6,00	4,00	4,00	3,33
<b>Έτος</b>	15,08	14,08	13,83	13,33

**Πίνακας Α.3** – Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης σε kWh/m<sup>2</sup> ανά μήνα, εποχή και έτος [09]

<b>Πόλη</b> <b>Μέτρηση</b>	<b>ΓΡΕΒΕΝΑ</b>	<b>ΚΑΣΤΟΡΙΑ</b>	<b>ΚΟΖΑΝΗ</b>	<b>ΦΛΩΡΙΝΑ</b>
<b>Γεωγραφικό Πλάτος</b>	40.05´	40.31´	40.18´	40.47´
<b>Γεωγραφικό Μήκος</b>	21.26´	21.16´	21.47´	21.24´
<b>Ιανουάριος</b>	53,00	56,00	53,00	56,00
<b>Φεβρουάριος</b>	67,00	68,00	69,00	71,00
<b>Μάρτιος</b>	109,00	110,00	109,00	112,00
<b>Απρίλιος</b>	149,00	150,00	149,00	151,00
<b>Μάιος</b>	183,00	183,00	181,00	182,00
<b>Ιούνιος</b>	202,00	205,00	201,00	202,00
<b>Ιούλιος</b>	208,00	209,00	207,00	209,00
<b>Αύγουστος</b>	183,00	190,00	182,00	191,00
<b>Σεπτέμβριος</b>	137,00	142,00	137,00	145,00
<b>Οκτώβριος</b>	100,00	101,00	101,00	101,00
<b>Νοέμβριος</b>	60,00	60,00	61,00	60,00
<b>Δεκέμβριος</b>	39,00	39,00	39,00	39,00
<b>Άνοιξη</b>	441,00	443,00	439,00	445,00
<b>Καλοκαίρι</b>	593,00	604,00	590,00	602,00
<b>Φθινόπωρο</b>	297,00	303,00	299,00	306,00
<b>Χειμώνας</b>	159,00	163,00	161,00	166,00
<b>Έτος</b>	1490,00	1513,00	1489,00	1519,00

Πίνακας Α.4 – Τιμές του συντελεστή R ανά μήνα για την περιοχή της Κοζάνης. Γ.Π. 40.31' [09]

Γωνία κλίσης Συλλέκτη	Μήνας											
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
0°	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5°	1,098	1,071	1,045	1,021	<b>1,004</b>	0,996	0,999	1,014	1,040	1,073	1,099	1,080
10°	1,191	1,138	1,085	1,038	1,004	0,988	0,994	1,024	1,074	1,140	1,192	1,155
15°	1,278	1,198	1,119	1,049	0,999	0,976	0,985	<b>1,029</b>	1,102	1,200	1,279	1,224
20°	1,358	1,252	1,148	<b>1,055</b>	0,989	0,959	0,971	1,027	1,124	1,254	1,358	1,287
25°	1,430	1,299	1,170	1,055	0,975	0,938	0,953	1,021	1,400	1,300	1,430	1,344
30°	1,494	1,338	1,185	1,049	0,956	0,913	0,930	1,009	1,148	1,338	1,494	1,394
35°	1,549	1,370	1,194	1,037	0,932	0,883	0,902	0,991	<b>1,150</b>	1,368	1,548	1,436
40°	1,595	1,394	<b>1,196</b>	1,020	0,904	0,850	0,870	0,969	1,146	1,391	1,593	1,471
45°	1,632	1,410	1,191	0,998	0,871	0,813	0,834	0,941	1,135	1,404	1,629	1,498
50°	1,659	<b>1,418</b>	1,180	0,970	0,835	0,772	0,795	0,908	1,117	<b>1,409</b>	1,654	1,516
55°	1,676	1,417	1,162	0,938	0,794	0,728	0,751	0,871	1,093	1,406	1,670	1,526
60°	<b>1,683</b>	1,409	1,138	0,900	0,751	0,682	0,705	0,829	1,062	1,394	<b>1,675</b>	<b>1,528</b>
65°	1,680	1,392	1,108	0,858	0,704	0,633	0,657	0,783	1,026	1,374	1,671	1,521
70°	1,667	1,367	1,072	0,812	0,655	0,582	0,606	0,734	0,983	1,345	1,655	1,506
75°	1,644	1,335	1,029	0,762	0,604	0,531	0,553	0,681	0,936	1,308	1,630	1,483
80°	1,611	1,294	0,982	0,708	0,551	0,478	0,500	0,626	0,883	1,264	1,595	1,451
85°	1,569	1,247	0,929	0,652	0,498	0,426	0,446	0,569	0,826	1,212	1,550	1,412
90°	1,517	1,193	0,872	0,594	0,444	0,375	0,393	0,510	0,764	1,153	1,496	1,365

**Πίνακας Α.5** – Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση στην επιφάνεια της Γης σε kWh/m<sup>2</sup> ανά μήνα, εποχή και έτος για την περιοχή της Κοζάνης. Γ.Π. 40.31' [09]

Γωνία κλίσης Συλλέκτη	Μήνας												Εποχή				Έτος
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ανοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας	
0°	53,00	69,00	109,00	149,00	181,00	<b>201,00</b>	<b>207,00</b>	182,00	137,00	101,00	61,00	39,00	439,00	590,00	299,00	343,89	1489,00
5°	58,23	73,96	113,97	152,27	<b>181,79</b>	200,24	206,92	184,71	142,50	108,37	67,05	42,12	448,03	<b>591,87</b>	317,92	316,01	1532,13
10°	63,16	78,54	118,34	154,75	181,77	198,66	205,95	186,49	147,20	115,14	72,74	45,05	454,86	591,10	335,08	186,75	1567,79
15°	67,75	82,69	122,07	156,41	180,89	196,22	204,03	<b>187,28</b>	151,07	121,24	78,04	47,76	459,37	587,53	350,35	198,20	1595,45
20°	71,98	86,40	125,14	<b>157,24</b>	179,14	198,88	201,14	187,08	154,07	126,65	82,89	50,23	<b>461,52</b>	581,10	363,61	208,61	1614,84
25°	75,80	89,63	127,53	157,22	176,52	188,67	197,30	185,89	156,18	131,31	87,27	52,44	461,27	571,86	374,76	217,87	1625,76
30°	79,18	92,35	129,20	156,36	173,05	183,58	192,51	183,69	157,39	135,19	91,13	54,38	458,61	559,78	383,71	225,91	<b>1628,01</b>
35°	82,11	94,55	130,16	154,65	168,75	177,66	186,79	180,51	<b>157,68</b>	138,26	94,45	56,03	453,56	544,96	390,39	232,69	1621,60
40°	84,56	96,21	<b>130,40</b>	152,12	163,63	170,94	180,20	176,37	157,05	140,49	97,21	57,38	446,15	527,51	394,75	238,15	1606,56
45°	86,51	97,31	129,90	148,77	157,75	163,46	172,77	171,30	155,51	141,88	99,38	58,42	436,42	507,53	<b>396,77</b>	242,24	1582,96
50°	87,94	<b>97,85</b>	128,69	144,64	151,15	155,29	164,56	165,33	153,07	<b>142,40</b>	100,95	59,14	424,48	485,18	396,42	244,93	1551,01
55°	88,55	97,82	126,76	139,76	143,88	146,49	155,65	158,52	149,75	142,06	101,90	59,54	410,40	460,66	393,71	<b>246,21</b>	1510,98
60°	<b>89,22</b>	97,23	124,13	134,17	135,99	137,15	146,10	150,93	145,57	140,85	<b>102,23</b>	<b>59,60</b>	394,29	434,18	388,65	246,05	1463,17
65°	89,06	96,07	120,82	127,90	127,57	127,34	136,01	142,60	140,57	138,80	101,93	59,34	376,29	405,95	381,30	244,47	1408,01
70°	88,37	94,37	116,85	121,02	118,69	117,17	125,47	133,62	134,78	135,90	101,01	58,75	356,56	376,26	371,69	241,49	1346,00
75°	87,15	92,12	112,26	113,57	109,43	106,75	114,60	124,07	128,24	132,19	99,47	57,84	223,00	345,42	359,90	237,11	1165,43
80°	85,41	89,35	107,09	105,63	99,89	96,20	103,51	114,02	121,02	127,69	97,33	56,61	312,61	313,73	346,04	231,37	1203,75
85°	83,16	86,07	101,36	97,25	90,18	85,68	92,37	103,60	113,16	122,44	94,60	55,08	288,79	281,65	330,20	224,31	1124,95
90°	80,42	82,32	95,12	88,52	80,44	75,39	81,35	92,90	104,72	116,47	91,30	53,26	264,08	249,64	312,49	216,00	1042,21

**Πίνακας Α.6** – Βέλτιστη κλίση  $B^\circ\kappa$  ανά μήνα, συντελεστής διόρθωσης  $R$  και ολική ηλιακή ακτινοβολία  $H\kappa$  σε kWh/m<sup>2</sup> στο επίπεδο με τη βέλτιστη κλίση, ανά μήνα, εποχή και έτος [09]

Μέτρηση \ Πόλη	ΓΡΕΒΕΝΑ			ΚΑΣΤΟΡΙΑ			ΚΟΖΑΝΗ			ΦΛΩΡΙΝΑ		
	$B^\circ\kappa$	R	$H\kappa$	$B^\circ\kappa$	R	$H\kappa$	$B^\circ\kappa$	R	$H\kappa$	$B^\circ\kappa$	R	$H\kappa$
Γεωγραφικό Πλάτος	40.05'			40.31'			40.18'			40.47'		
Γεωγραφικό Μήκος	21.26'			21.16'			21.47'			21.24'		
Ιανουάριος	61,00	1,6640	88,196	62,00	1,7689	99,062	61,00	1,6837	89,238	63,00	1,7956	100,554
Φεβρουάριος	51,00	1,3891	93,073	52,00	1,4184	96,455	52,00	1,4190	97,912	54,00	1,4617	103,782
Μάρτιος	39,00	1,1926	129,999	40,00	1,2032	132,359	39,00	1,1964	130,413	40,00	1,2141	135,987
Απρίλιος	22,00	1,0547	157,163	23,00	1,0577	158,659	22,00	1,0559	157,336	23,00	1,0598	160,035
Μάιος	7,00	1,0047	183,869	8,00	1,0052	183,961	7,00	1,0049	181,889	8,00	1,0055	183,009
Ιούνιος	0,00	1,0000	202,000	0,00	1,0000	205,000	0,00	1,0000	201,000	0,00	1,0000	202,000
Ιούλιος	2,00	1,0003	208,064	2,00	1,0004	209,092	2,00	1,0003	207,077	3,00	1,0005	209,111
Αύγουστος	16,00	1,0287	188,255	17,00	1,0317	196,023	17,00	1,0292	187,327	17,00	1,0329	197,286
Σεπτέμβριος	34,00	1,1483	157,337	35,00	1,1608	164,840	34,00	1,1510	157,699	35,00	1,1684	169,426
Οκτώβριος	50,00	1,3968	139,687	51,00	1,4179	143,213	51,00	1,4099	142,406	51,00	1,4279	144,227
Νοέμβριος	59,00	1,6420	98,522	60,00	1,6761	100,568	60,00	1,6759	102,230	61,00	1,6979	101,877
Δεκέμβριος	58,00	1,5089	58,849	59,00	1,5491	60,415	59,00	1,5287	59,619	60,00	1,5752	61,433
Άνοιξη	—	—	571,031	—	—	474,979	—	—	469,638	—	—	479,031
Καλοκαίρι	—	—	598,319	—	—	610,115	—	—	595,404	—	—	608,397
Φθινόπωρο	—	—	395,546	—	—	408,621	—	—	402,335	—	—	415,530
Χειμώνας	—	—	240,118	—	—	255,932	—	—	246,769	—	—	265,769
Έτος	—	—	1705,014	—	—	1749,647	—	—	1714,146	—	—	1768,727



**Πίνακας Α.7** – Μόνιμη κλίση και ολική ηλιακή ακτινοβολία  $H_k$  σε kWh/m<sup>2</sup> στο επίπεδο με τη ετήσια μόνιμη βέλτιστη κλίση, ανά μήνα, εποχή και έτος [09]

Πόλη Μέτρηση	ΓΡΕΒΕΝΑ			ΚΑΣΤΟΡΙΑ			ΚΟΖΑΝΗ			ΦΛΩΡΙΝΑ		
	Μόνιμη κλίση											
	27°	28°	29°	28°	29°	30°	28°	29°	30°	29°	30°	31°
Γεωγραφικό Πλάτος	40.05´			40.31´			40.18´			40.47´		
Γεωγραφικό Μήκος	21.26´			21.16´			21.47´			21.24´		
Ιανουάριος	76,644	<b>77,303</b>	77,944	85,027	<b>85,808</b>	86,569	77,886	<b>78,546</b>	79,187	86,655	<b>87,442</b>	88,207
Φεβρουάριος	86,913	<b>87,403</b>	87,873	89,963	<b>90,479</b>	90,975	91,330	<b>91,854</b>	92,357	96,471	<b>97,045</b>	97,597
Μάρτιος	127,981	<b>128,307</b>	128,604	130,382	<b>130,709</b>	131,007	128,622	<b>128,930</b>	129,208	134,048	<b>134,377</b>	134,676
Απρίλιος	156,770	<b>156,590</b>	156,377	158,176	<b>157,977</b>	157,744	156,807	<b>156,600</b>	156,360	159,416	<b>159,192</b>	158,933
Μάιος	177,024	<b>176,314</b>	175,571	176,679	<b>175,948</b>	175,182	174,547	<b>173,819</b>	173,057	175,206	<b>174,453</b>	173,666
Ιούνιος	187,463	<b>186,432</b>	185,367	189,521	<b>188,450</b>	187,344	185,725	<b>184,674</b>	183,589	186,010	<b>184,933</b>	183,822
Ιούλιος	196,232	<b>195,260</b>	194,251	196,609	<b>195,609</b>	194,571	194,541	<b>193,545</b>	192,512	195,878	<b>194,849</b>	193,782
Αύγουστος	185,971	<b>185,522</b>	185,034	193,465	<b>192,978</b>	192,449	184,692	<b>184,214</b>	183,695	194,368	<b>193,847</b>	193,283
Σεπτέμβριος	156,474	<b>156,705</b>	156,900	163,947	<b>164,191</b>	164,397	157,020	<b>157,225</b>	157,393	168,620	<b>168,855</b>	169,050
Οκτώβριος	130,822	<b>131,564</b>	132,275	134,242	<b>135,002</b>	135,729	133,737	<b>134,481</b>	135,193	135,655	<b>136,402</b>	137,116
Νοέμβριος	86,286	<b>87,010</b>	87,713	88,167	<b>88,907</b>	89,626	89,654	<b>90,406</b>	91,136	89,668	<b>90,410</b>	91,130
Δεκέμβριος	52,826	<b>53,200</b>	53,563	54,097	<b>54,488</b>	54,867	53,643	<b>54,020</b>	54,386	55,084	<b>55,482</b>	55,867
Άνοιξη	461,775	<b>461,211</b>	460,552	465,237	<b>464,634</b>	463,933	459,976	<b>459,349</b>	458,625	468,670	<b>468,022</b>	467,275
Καλοκαίρι	569,666	<b>567,214</b>	564,652	579,595	<b>577,037</b>	574,364	564,958	<b>562,433</b>	559,796	520,632	<b>573,629</b>	570,887
Φθινόπωρο	373,582	<b>375,279</b>	376,888	386,356	<b>388,100</b>	389,752	380,411	<b>382,112</b>	383,722	557,094	<b>395,667</b>	397,296
Χειμώνας	216,383	<b>217,906</b>	219,380	229,087	<b>230,775</b>	232,411	222,859	<b>224,420</b>	225,930	576,256	<b>239,969</b>	241,671
Έτος	1621,406	<b>1621,610</b>	1621,472	1660,275	<b>1660,546</b>	1660,460	1628,204	<b>1628,314</b>	1628,073	1677,079	<b>1677,287</b>	1677,129

**Πίνακας Α.8** – Τιμές του συντελεστή  $h_1$  και  $h_2$  για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των Φ/Β πλαισίων με μόνιμο προσανατολισμό το νότο και για μόνιμη κλίση ίση με τη βέλτιστη μηνιαία κλίση (Δεκέμβριος) για ασκίαστα πλαίσια [09]

Πόλη Μέτρηση	ΓΡΕΒΕΝΑ			ΚΑΣΤΟΡΙΑ			ΚΟΖΑΝΗ			ΦΛΩΡΙΝΑ		
	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>
Γεωγραφικό Πλάτος	40.05´			40.31´			40.18´			40.47´		
Γεωγραφικό Μήκος	21.26´			21.16´			21.47´			21.24´		
-5°	53,00	2,206	0,602	54,00	2,244	0,588	54,00	2,228	0,588	55,00	2,271	0,574
-4°	54,00	2,213	0,588	55,00	2,251	0,574	55,00	2,235	0,574	56,00	2,277	0,559
-3°	55,00	2,219	0,574	56,00	2,256	0,559	56,00	2,240	0,559	57,00	2,282	0,545
-2°	56,00	2,224	0,559	57,00	2,262	0,545	57,00	2,245	0,545	58,00	2,287	0,530
-1°	57,00	2,229	0,545	58,00	2,266	0,530	58,00	2,250	0,530	59,00	2,291	0,515
<b>Μηνιαία βέλτιστη κλίση</b>	<b>58,00</b>	<b>2,233</b>	<b>0,530</b>	<b>59,00</b>	<b>2,270</b>	<b>0,515</b>	<b>59,00</b>	<b>2,253</b>	<b>0,515</b>	<b>60,00</b>	<b>2,294</b>	<b>0,500</b>
+1°	59,00	2,237	0,515	60,00	2,273	0,500	60,00	2,256	0,500	61,00	2,297	0,485
+2°	60,00	2,239	0,500	61,00	2,275	0,485	61,00	2,258	0,485	62,00	2,299	0,469
+3°	61,00	2,242	0,485	62,00	2,277	0,469	62,00	2,260	0,469	63,00	2,300	0,454
+4°	62,00	2,243	0,469	63,00	2,278	0,454	63,00	2,261	0,454	64,00	2,300	0,438
+5°	63,00	2,244	0,454	64,00	2,278	0,438	64,00	2,261	0,438	65,00	2,300	0,423

**Πίνακας Α.9** – Τιμές του συντελεστή  $h_1$  και  $h_2$  για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των Φ/Β πλαισίων με μόνιμο προσανατολισμό το νότο και για μόνιμη κλίση ίση με τη βέλτιστη ετήσια μόνιμη κλίση για ασκίαστα πλαίσια [09]

Πόλη Μέτρηση	ΓΡΕΒΕΝΑ			ΚΑΣΤΟΡΙΑ			ΚΟΖΑΝΗ			ΦΛΩΡΙΝΑ		
	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	Β°κ	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>
Γεωγραφικό Πλάτος	40.05´			40.31´			40.18´			40.47´		
Γεωγραφικό Μήκος	21.26´			21.16´			21.47´			21.24´		
-5°	23,00	1,705	0,921	24,00	1,746	0,914	24,00	1,738	0,914	25,00	1,782	0,906
-4°	24,00	1,731	0,914	25,00	1,772	0,906	25,00	1,763	0,906	26,00	1,807	0,899
-3°	25,00	1,755	0,906	26,00	1,796	0,899	26,00	1,788	0,899	27,00	1,832	0,891
-2°	26,00	1,779	0,899	27,00	1,820	0,891	27,00	1,812	0,891	28,00	1,856	0,883
-1°	27,00	1,803	0,891	28,00	1,844	0,883	28,00	1,835	0,883	29,00	1,879	0,875
<b>Μηνιαία βέλτιστη κλίση</b>	<b>28,00</b>	<b>1,826</b>	<b>0,883</b>	<b>29,00</b>	<b>1,867</b>	<b>0,875</b>	<b>29,00</b>	<b>1,858</b>	<b>0,875</b>	<b>30,00</b>	<b>1,902</b>	<b>0,866</b>
+1°	29,00	1,848	0,875	30,00	1,890	0,866	30,00	1,880	0,866	31,00	1,924	0,857
+2°	30,00	1,870	0,866	31,00	1,912	0,857	31,00	1,902	0,857	32,00	1,946	0,848
+3°	31,00	1,892	0,857	32,00	1,933	0,848	32,00	1,923	0,848	33,00	1,967	0,839
+4°	32,00	1,912	0,848	33,00	1,945	0,839	33,00	1,943	0,839	34,00	1,987	0,829
+5°	33,00	1,933	0,839	34,00	1,974	0,829	34,00	1,963	0,829	35,00	2,007	0,819

Σχήμα Β.1 – Ηλεκτρομηχανολογικό φυλλάδιο δεδομένων των Φ/Β πλαισίων



## CS6P-250 | 255 | 260P

High quality and reliability in all Canadian Solar modules is ensured by 13 years' experience in module manufacturing, well-engineered module design, stringent BOM quality testing, an automated manufacturing process and 100% EL testing.

### KEY FEATURES

-  Excellent module efficiency up to 16.16 %
-  Outstanding low irradiance performance > 96.5 %
-  Positive power tolerance up to 5 W
-  High PTC rating up to 91.96 %
-  IP67 junction box for long-term weather endurance
-  Heavy snow load up to 5400 Pa  
wind load up to 2400 Pa
-  Salt mist, ammonia and blown sand resistance, for seaside, farm and desert environments

 **CanadianSolar**



\*Black frame product can be provided upon request.

**25**  
years

**insurance-backed warranty**  
**non-cancellable, immediate warranty insurance**  
**linear power output warranty**

**10**  
years

**product warranty on materials**  
**and workmanship**

### MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES

ISO 9001: 2008 / Quality management system  
ISO/TS 16949:2009 / The automotive industry quality management system  
ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system  
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

### PRODUCT CERTIFICATES

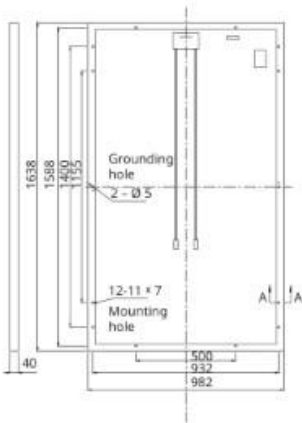
IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / MCS / JET / SII / CEC AU / INMETRO / CQC  
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / FSEC (US Florida)  
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: TÜV / IEC 60068-2-68: SGS  
PV CYCLE (EU) / UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1



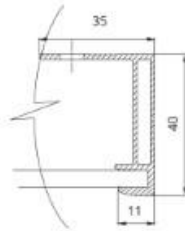
**CANADIAN SOLAR INC.** is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading manufacturer of solar modules and PV project developer with about 8 GW of premium quality modules deployed around the world since 2011, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies

## MODULE / ENGINEERING DRAWING (mm)

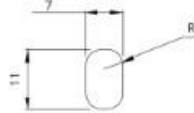
Rear View



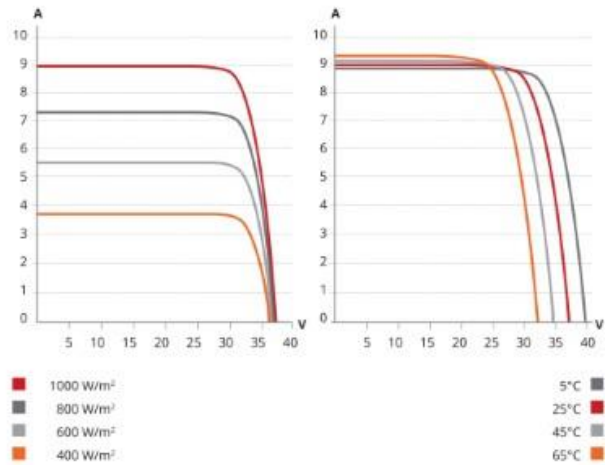
Frame Cross Section A-A



Mounting Hole



## CS6P-255P / I-V CURVES



### ELECTRICAL DATA | STC\*

Electrical Data CS6P	250P	255P	260P
Nominal Max. Power (Pmax)	250 W	255 W	260 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	30.1 V	30.2 V	30.4 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.30 A	8.43 A	8.56 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.2 V	37.4 V	37.5 V
Short Circuit Current (Isc)	8.87 A	9.00 A	9.12 A
Module Efficiency	15.54%	15.85%	16.16%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C		
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL) or 600 V (UL)		
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC61730)		
Max. Series Fuse Rating	15 A		
Application Classification	Class A		
Power Tolerance	0 ~ + 5 W		

\* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

### ELECTRICAL DATA | NOCT\*

Electrical Data CS6P	250P	255P	260P
Nominal Max. Power (Pmax)	181 W	185 W	189 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	27.5 V	27.5 V	27.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	6.60 A	6.71 A	6.80 A
Open Circuit Voltage (Voc)	34.2 V	34.4 V	34.5 V
Short Circuit Current (Isc)	7.19 A	7.29 A	7.39 A

\* Under Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), irradiance of 800 W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

### PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Industry leading performance at low irradiation, +96.5 % module efficiency from an irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup> to 200 W/m<sup>2</sup> (AM 1.5, 25°C).

As there are different certification requirements in different markets, please contact your sales representative for the specific certificates applicable to your products. The specification and key features described in this Datasheet may deviate slightly and are not guaranteed. Due to on-going innovation, research and product enhancement, Canadian Solar Inc. reserves the right to make any adjustment to the information described herein at any time without notice. Please always obtain the most recent version of the datasheet which shall be duly incorporated into the binding contract made by the parties governing all transactions related to the purchase and sale of the products described herein.

### MODULE | MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (6 × 10)
Dimensions	1638 × 982 × 40 mm (64.5 × 38.7 × 1.57 in)
Weight	18 kg (37.9 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-BOX	IP67, 3 diodes
Cable	4 mm <sup>2</sup> (IEC) or 4 mm <sup>2</sup> & 12 AWG 1000 V (UL1000 V) or 12 AWG (UL 600 V), 1000 mm (650 mm is optional)
Connectors	MC4 or MC4 comparable
Stand. Packaging	24 pcs, 480 kg (quantity & weight per pallet)
Module Pieces per Container	672 pcs (40'HQ)

### TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.43% / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.34% / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.065% / °C

### PARTNER SECTION





**solar**edge

## SolarEdge Power Optimizer

Module Add-On

OP250-LV / OP300-MV / OP400-MV / OP400-EV



### PV power optimization at the module-level

- Up to 25% more energy
- Superior efficiency (99.5%)
- Mitigates all types of modules mismatch-loss, from manufacturing tolerance to partial shading
- Flexible system design for maximum space utilization
- Next generation maintenance with module level monitoring
- Module-level voltage shutdown for installer and firefighter safety



# SolarEdge Power Optimizer Module Add-On

OP250-LV / OP300-MV / OP400-MV / OP400-EV

	OP250-LV	OP300-MV	OP400-MV	OP400-EV	
<b>INPUT</b>					
Rated Input DC Power*	250	300	400	400	W
Absolute Maximum Input Voltage (Voc)	55	75	75	125	Vdc
MPPT Operating Range	5 - 55	5 - 75	5 - 75	15 - 125	Vdc
Maximum Continuous Input Current (Isc)	10	10	10	7	Adc
Maximum Efficiency	99.5				%
Weighted Efficiency	98.8				%
Overvoltage Category	II				
<b>OUTPUT DURING OPERATION (POWER OPTIMIZER CONNECTED TO OPERATING INVERTER)</b>					
Maximum Output Current	15				Adc
Operating Output Voltage	5 - 60				Vdc
<b>OUTPUT DURING STANDBY (POWER OPTIMIZER DISCONNECTED FROM INVERTER OR INVERTER OFF)</b>					
Safety Output Voltage per Power Optimizer	1				Vdc
<b>STANDARD COMPLIANCE</b>					
EMC	FCC Part15 Class B, IEC61000-6-2, IEC61000-6-3				
Safety	IEC62109-1 (class II safety), UL1741				
Material	UL-94 (5-VA), UV Resistant				
RoHS	Yes				
<b>INSTALLATION SPECIFICATIONS</b>					
Maximum Allowed System Voltage	1000				Vdc
Dimensions (W x L x H)	143 x 210 x 45 / 5.63 x 8.26 x 1.75				mm / in
Weight	450 / 1.0				gr / lb
Input Connector	MC4 / Tyco / H+S / Amphenol				
Output Wire Type	6mm <sup>2</sup> : MC4				
Output Wire Length	0.95 / 3.0	1.2 / 3.9		1.6 / 5.25	m / ft
Operating Temperature Range	-40 - +65 / -40 - +150				°C / °F
Protection Rating	IP65 / NEMA4				
Relative Humidity	0 - 100				%

\* Rated STC power of the module. Module of up to +5% power tolerance allowed.

PV SYSTEM DESIGN USING A SOLAREEDGE INVERTER	SINGLE PHASE		THREE PHASE	
	Minimum String Length (Power Optimizers)	8		16
Maximum String Length (Power Optimizers)	25		50	
Maximum Power per String	5250		11250	W
Parallel Strings of Different Lengths or Orientations	Yes			



© SolarEdge Technologies, Inc. All rights reserved. SOLAREEDGE, the SolarEdge logo, OPTIMIZED BY SOLAREEDGE are trademarks or registered trademarks of SolarEdge Technologies, Inc. All other trademarks mentioned herein are trademarks of their respective owners. 07/2013. V01. Subject to change without notice.



# SolarEdge Home Wave Inverter

## Three Phase, for Europe

SE3K - SE10K



**INVERTERS**

### Specifically designed to work with power optimizers

- ▮ Noise level suitable for residential environments – no external fan
- ▮ Superior efficiency (98%)
- ▮ Battery-ready – one inverter for both PV and battery-storage<sup>(\*)</sup>
- ▮ Small, lightest in its class, and easy to install
- ▮ Built-in module-level monitoring
- ▮ Quick and easy inverter commissioning directly from a smartphone using the SolarEdge SetApp
- ▮ Internet connection through Ethernet or Wireless (Wi-Fi, ZigBee Gateway, Cellular)
- ▮ IP65 – Outdoor and indoor installation
- ▮ Fixed voltage inverter for longer strings
- ▮ Smart Energy Management control

(\*) Pending battery availability and firmware upgrade

[solaredge.com](http://solaredge.com)

**solaredge**

# SolarEdge Home Wave Inverter

## Three Phase, for Europe

### SE3K-SE10K<sup>(1)</sup>

	SE3K <sup>(2)(3)</sup>	SE4K <sup>(2)</sup>	SE5K	SE6K <sup>(2)</sup>	SE7K	SE8K	SE9K	SE10K	UNITS
Applicable to inverters with part number	SEXXX-XXXTXBXX4								
<b>OUTPUT</b>									
Rated AC Power Output	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	VA
Maximum AC Power Output	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	VA
AC Output Voltage - Line to Line / Line to Neutral (Nominal)	380 / 220 ; 400 / 230								Vac
AC Output Voltage - Line to Neutral Range	184 - 264.5								Vac
AC Frequency	50/60 ± 5								Hz
Maximum Continuous Output Current (per Phase)	5	6.5	8	10	11.5	13	14.5	16	A
Grids Supported - Three Phase	3 / N / PE (WYE with Neutral)								
Utility Monitoring, Islanding Protection, Configurable Power Factor, Country Configurable Thresholds	Yes								
<b>INPUT</b>									
Maximum DC Power (Module STC)	4050 <sup>(4)</sup>	5400	6750	8100	9450	10800	12150	13500	W
Transformer-less, Ungrounded	Yes								
Maximum Input Voltage	900								Vdc
Nominal DC Input Voltage	750								Vdc
Maximum Input Current	5	7	8.5	10	12	13.5	15	16.5	Adc
Reverse-Polarity Protection	Yes								
Ground-Fault Isolation Detection	700kΩ Sensitivity								
Maximum Inverter Efficiency	98								%
European Weighted Efficiency	96.7	97.3	97.3	97.3	97.4	97.6	97.5	97.6	%
Nighttime Power Consumption	< 2.5								W
<b>ADDITIONAL FEATURES</b>									
Supported Communication Interfaces <sup>(5)</sup>	RS485, Ethernet, ZigBee (optional), wireless SolarEdge Home Network (optional) <sup>(6)</sup> , Wi-Fi (optional), Cellular (optional)								
Smart Energy Management	Export Limitation, Home Energy Management (Device Control)								
Inverter Commissioning	With the SetApp mobile application using built-in Wi-Fi access point for local connection								
<b>STANDARD COMPLIANCE</b>									
Safety	IEC-62103 (EN50178), IEC-62109								
Grid Connection Standards <sup>(7)</sup>	VDE 0126-1-1, VDE-AR-N-4105, AS-4777, G83 / G59								
Electromagnetic Compatibility (EMC)	EN/IEC 61000-6-1, EN/IEC 61000-6-2, EN/IEC 61000-6-3, EN/IEC 61000-6-4, EN 55011, FCC Part 15, EN/IEC 61000-3-2, EN/IEC 61000-3-3, EN/IEC 61000-3-11, EN/IEC 61000-3-12								
RoHS	Yes								
<b>INSTALLATION SPECIFICATIONS</b>									
AC Output	Cable Gland - diameter 15-21								mm
DC Input	2 MC4 pairs								
Dimensions (HxWxD)	540 x 315 x 191								mm
Weight	16.4								kg
Operating Temperature Range	-40 to +60 <sup>(8)</sup>								°C
Cooling	Internal Fan								
Noise	< 40								dBA
Protection Rating	IP65 - Outdoor and Indoor								
Mounting	Bracket Provided								

<sup>(1)</sup> For higher power models refer to: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-three-phase-inverter-extended-power-datasheet.pdf>.

<sup>(2)</sup> Available in some countries; refer to Certifications category in Downloads page: <http://www.solaredge.com/groups/support/downloads>.

<sup>(3)</sup> SE3K-RW010BNN4 is dedicated for connection of exactly 10 P404/P405/P485/P505 optimizers.

<sup>(4)</sup> Maximum allowed DC power is 3700W with SE3K-RW010BNN4.

<sup>(5)</sup> Refer to Datasheets -> Communications category in Downloads page for specifications of optional communication options: <http://www.solaredge.com/groups/support/downloads>.

<sup>(6)</sup> For more information, refer to: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-energy-net-plug-in-datasheet.pdf>.

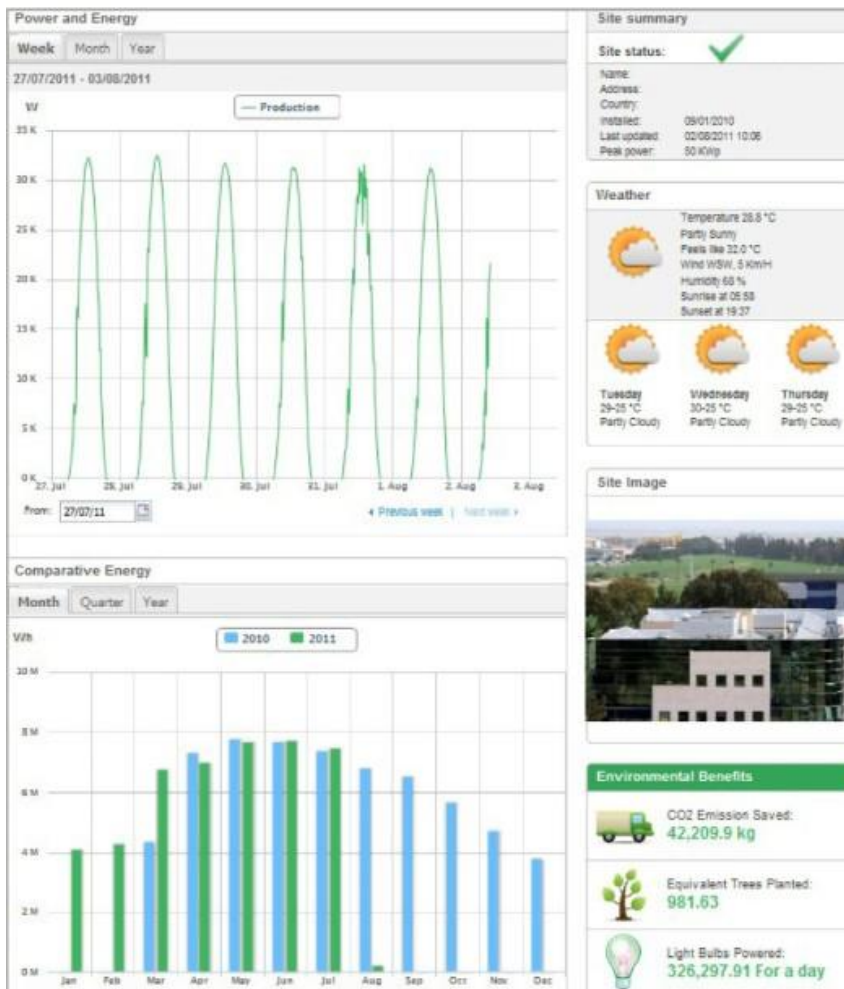
<sup>(7)</sup> For all standards refer to Certifications category in Downloads page: <http://www.solaredge.com/groups/support/downloads>.

<sup>(8)</sup> For power de-rating information refer to: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-temperature-derating-note.pdf>.

Σχήμα Β.4 – Φυλλάδιο επισκόπησης της πλατφόρμας επιτήρησης



## SolarEdge Monitoring Portal Product Overview



- Web-based application provides PV Performance monitoring of each and every PV module
- Physical mapping of the modules enables to instantly visualize and pinpoint irregular patterns
- Intelligent Data analysis software automatically detects and locates significant phenomena, supplying root cause analysis
- iPhone application available for remote monitoring - anywhere
- Multi-Tiered Interface





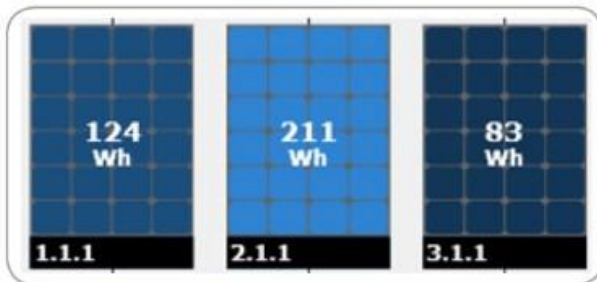
# SolarEdge Monitoring Portal Product Overview

## PLAYBACK BAR



Playback bar allows to visualize site performance over a day or a week, highlighting shading, mismatch and underperformance issues.

## MODULES COLOR CODING



Color coding instantly visualizes modules with lower outputs in either daily, weekly, monthly or yearly views.

## SMART ALERTS



In depth analysis allows insightful warnings, here shown on the iPhone monitoring application, offering production stats and site map as well.

## PHYSICAL/LOGICAL SITE MAPPING



Physical mapping allows immediate useful insights about the plant performance, and makes troubleshooting a breeze.

## GRAPHIC PERFORMANCE ANALYSIS

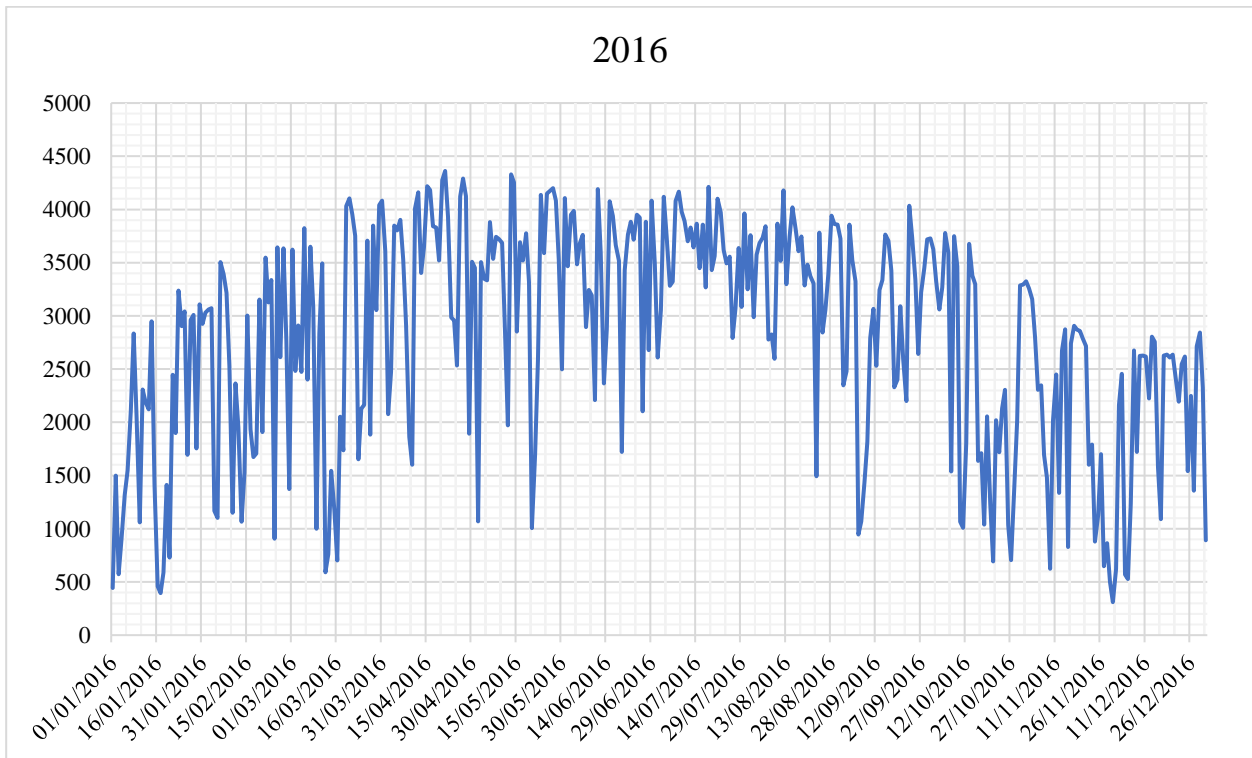
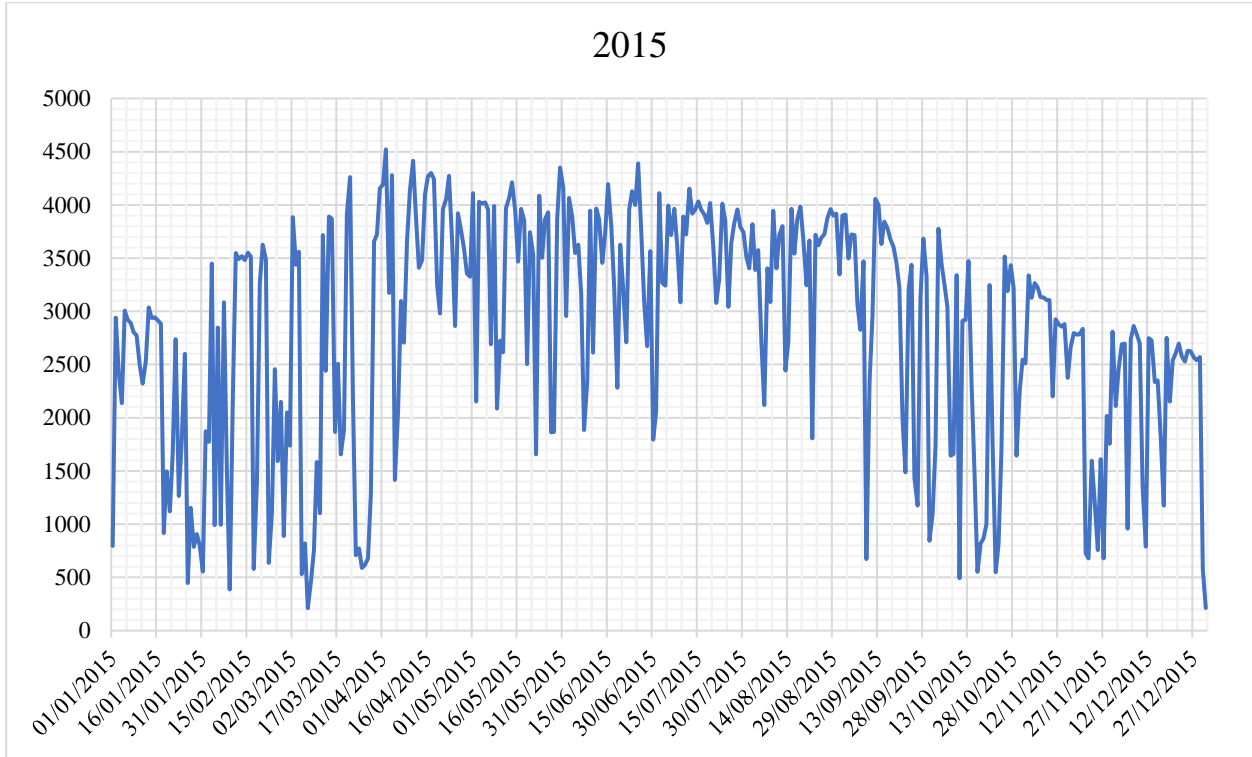


Powerful graphing engine enables analysis of various measures such as voltage, current, power and energy in any scale from module to plant level. Multiple measurements may be displayed on a single graph. Zooming is limited only by the update interval of 5 minutes.

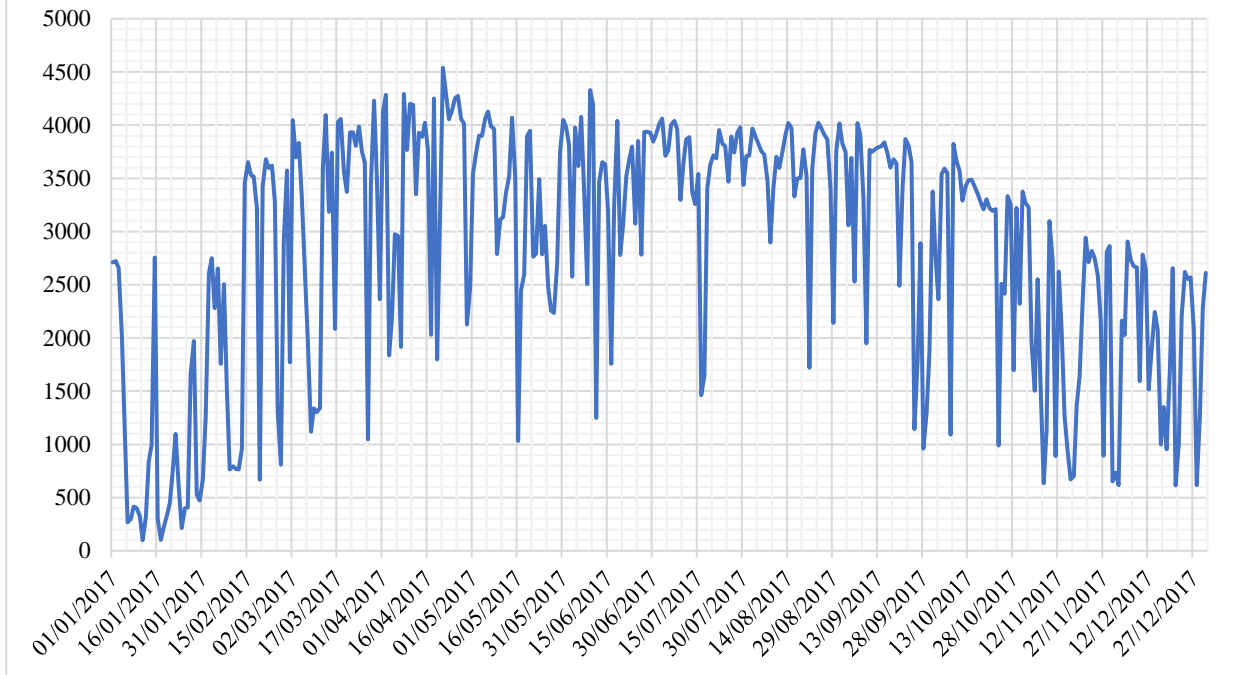
Visit:  
[monitoring.solaredge.com](http://monitoring.solaredge.com)  
for a live demo



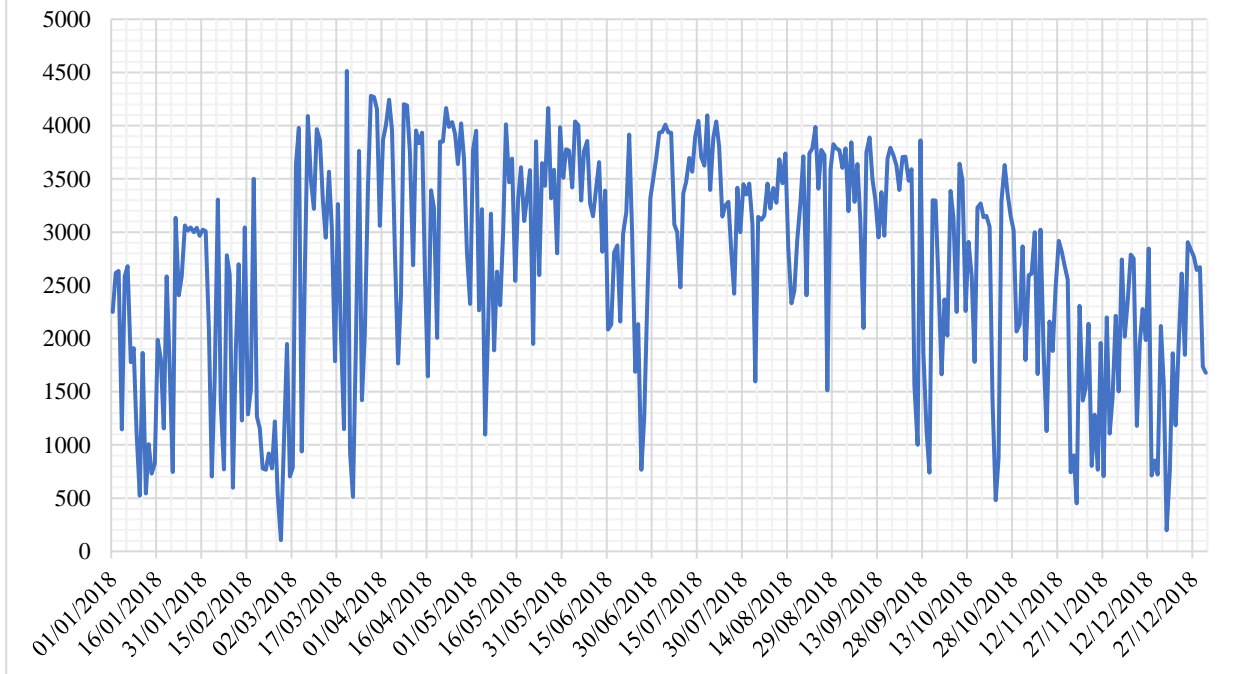
Σχήμα Γ.1 – Ετήσια τριφασική παραγωγή ενέργειας (από 01/2015 έως και 08/2022) σε Watt



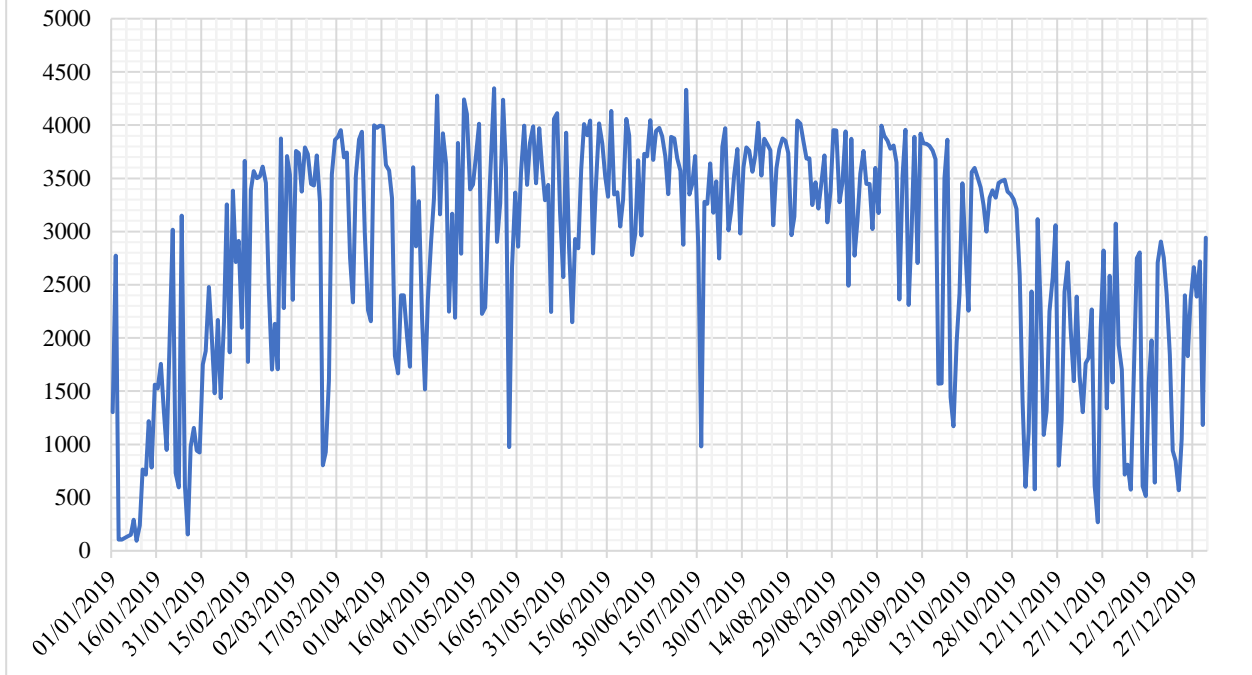
### 2017



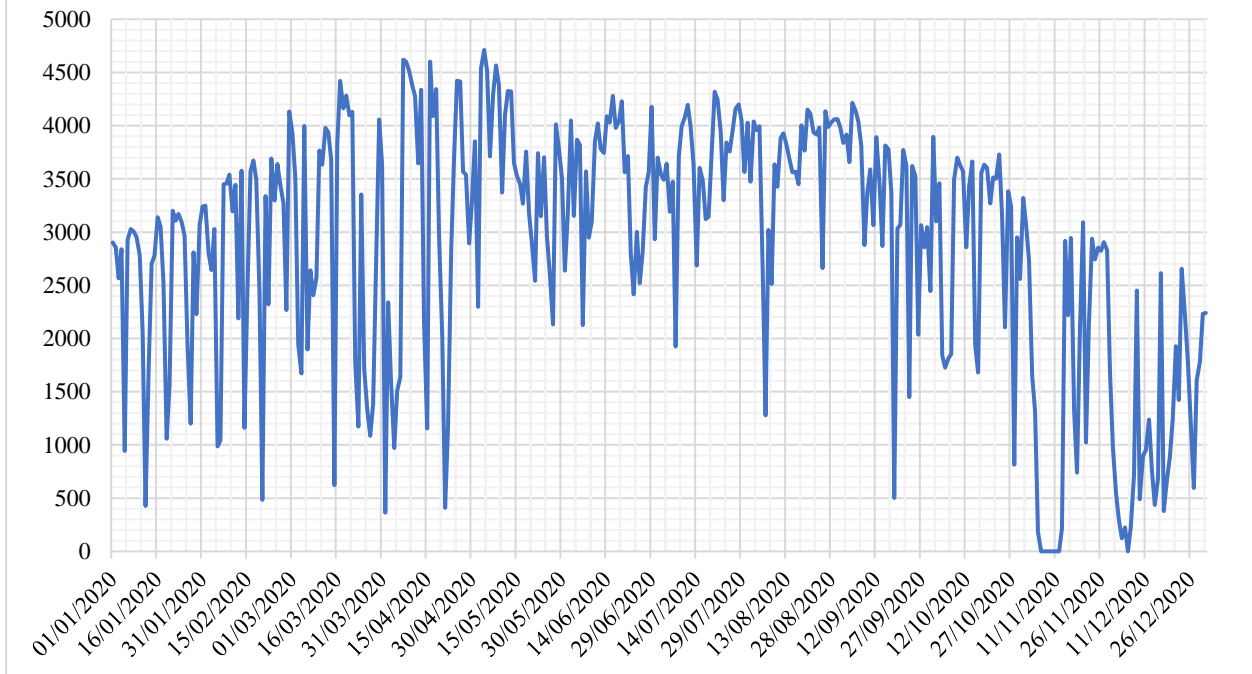
### 2018



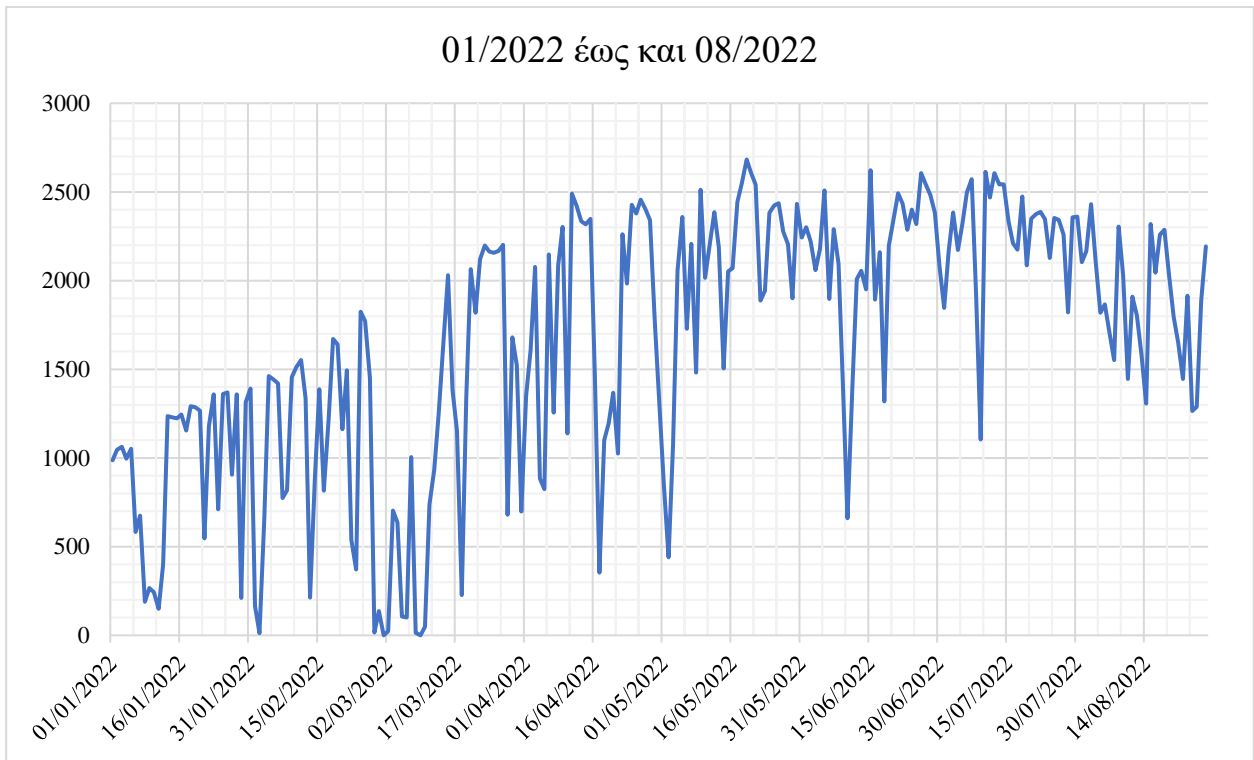
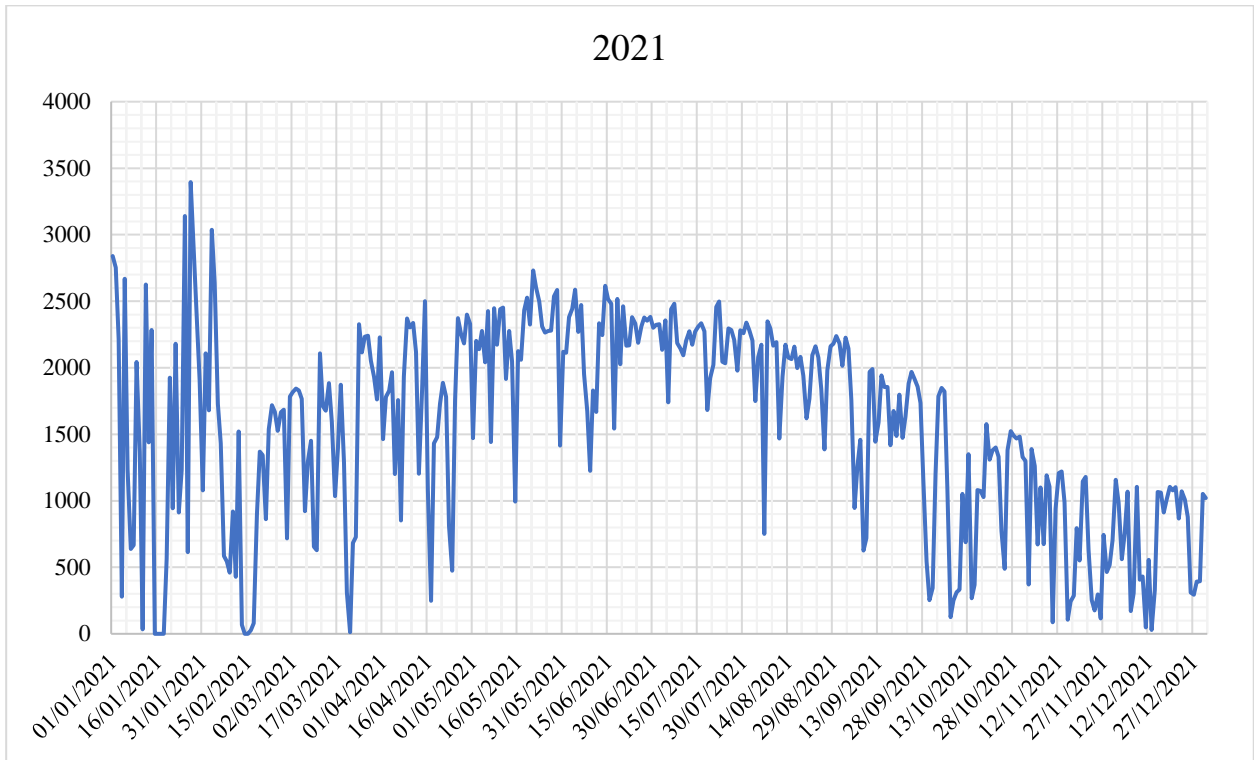
### 2019



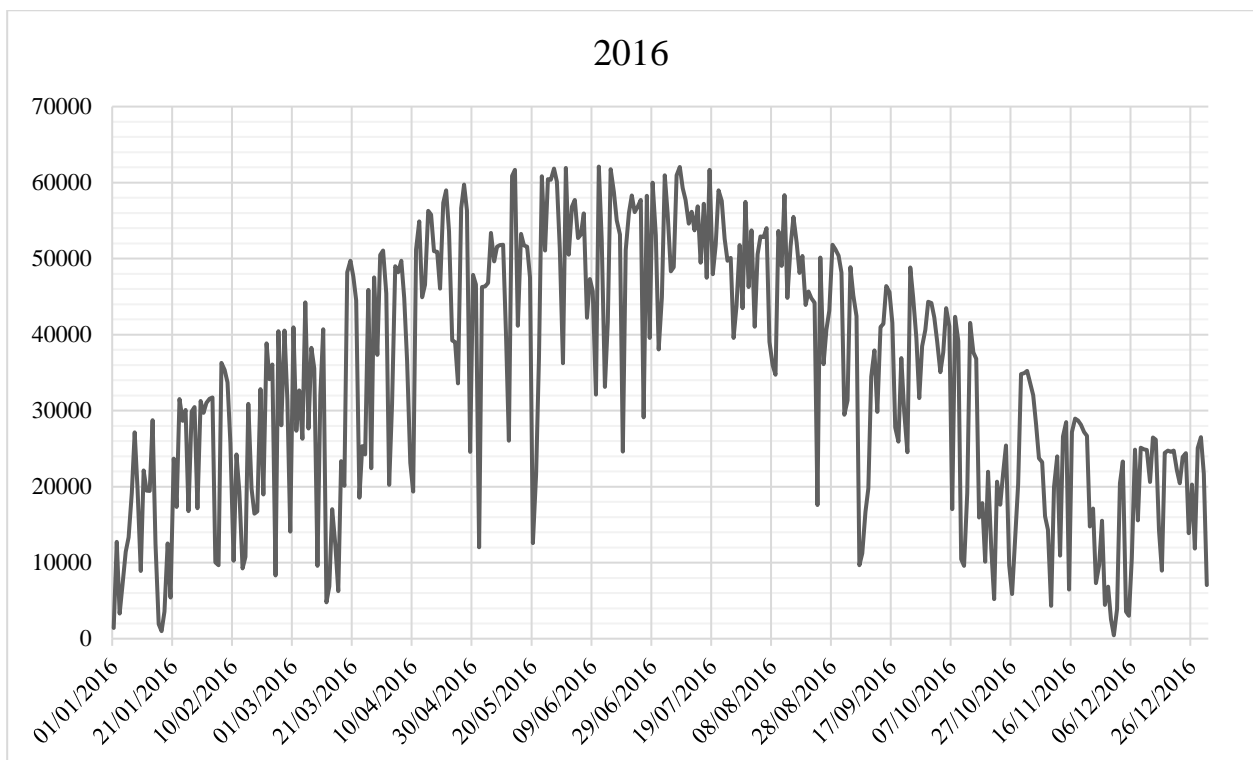
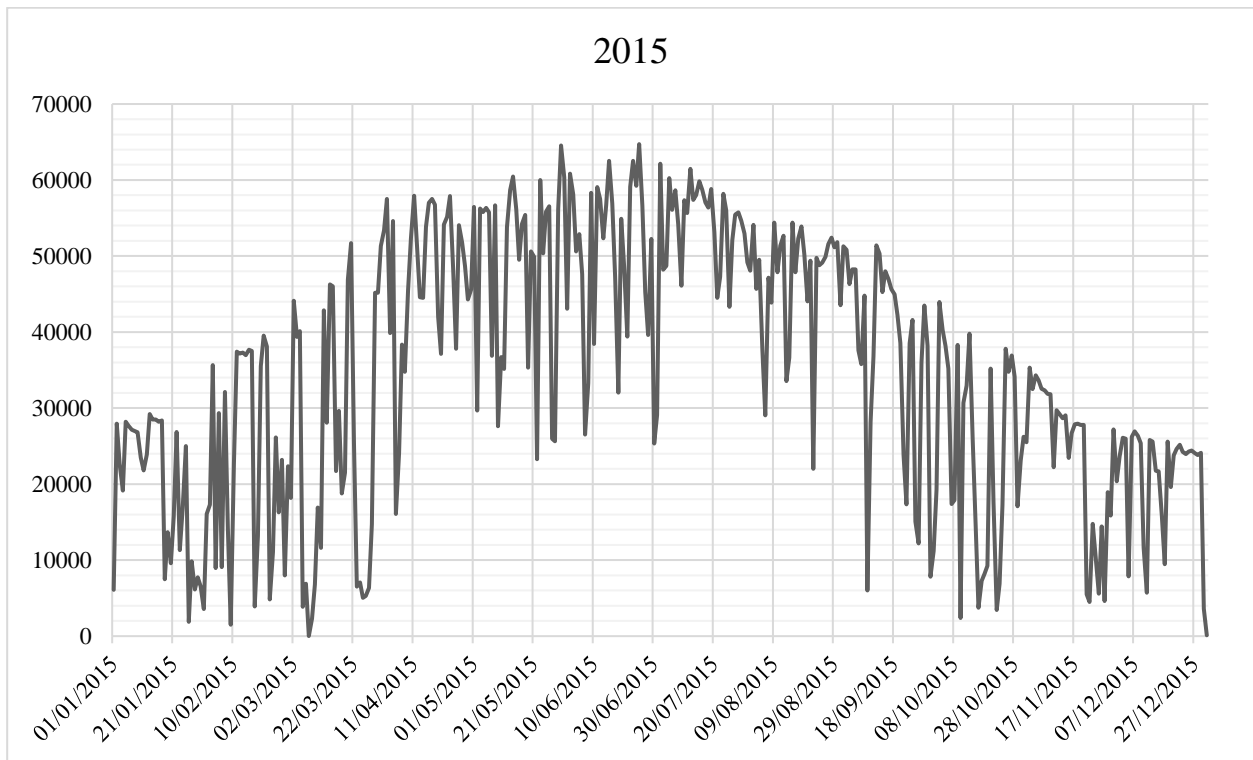
### 2020

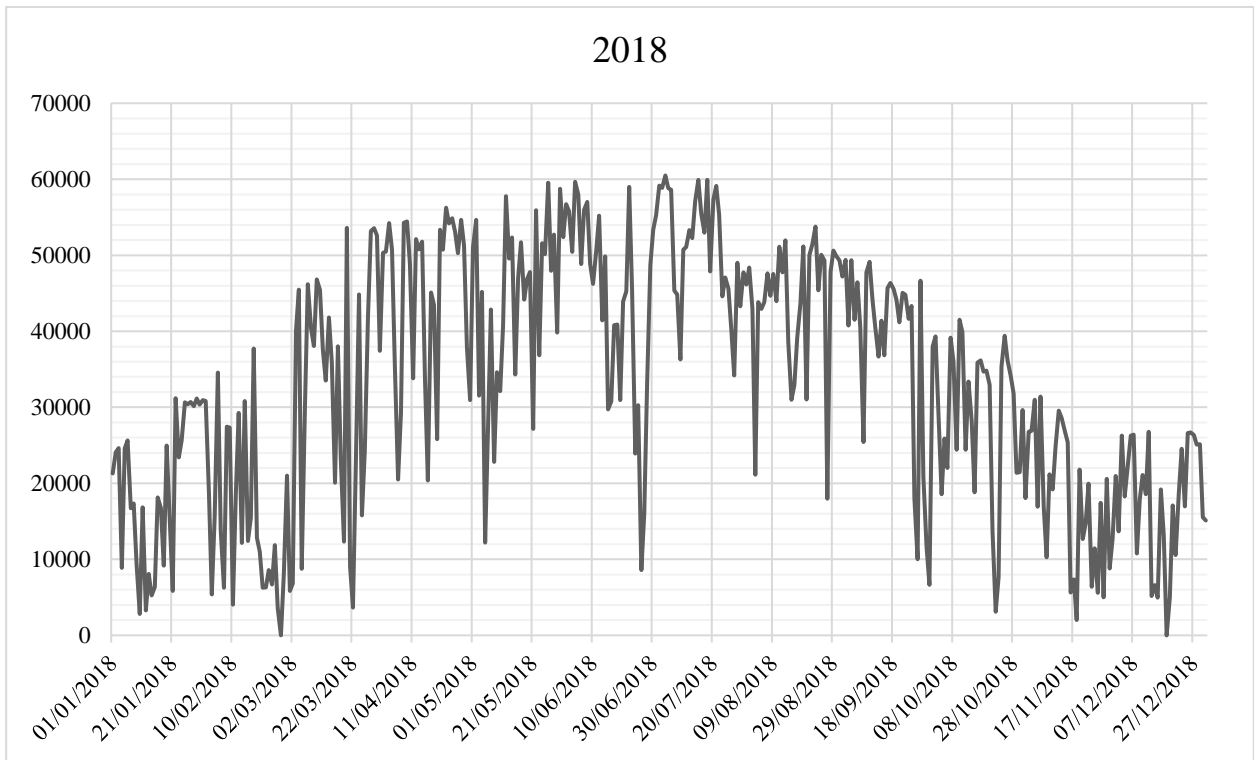
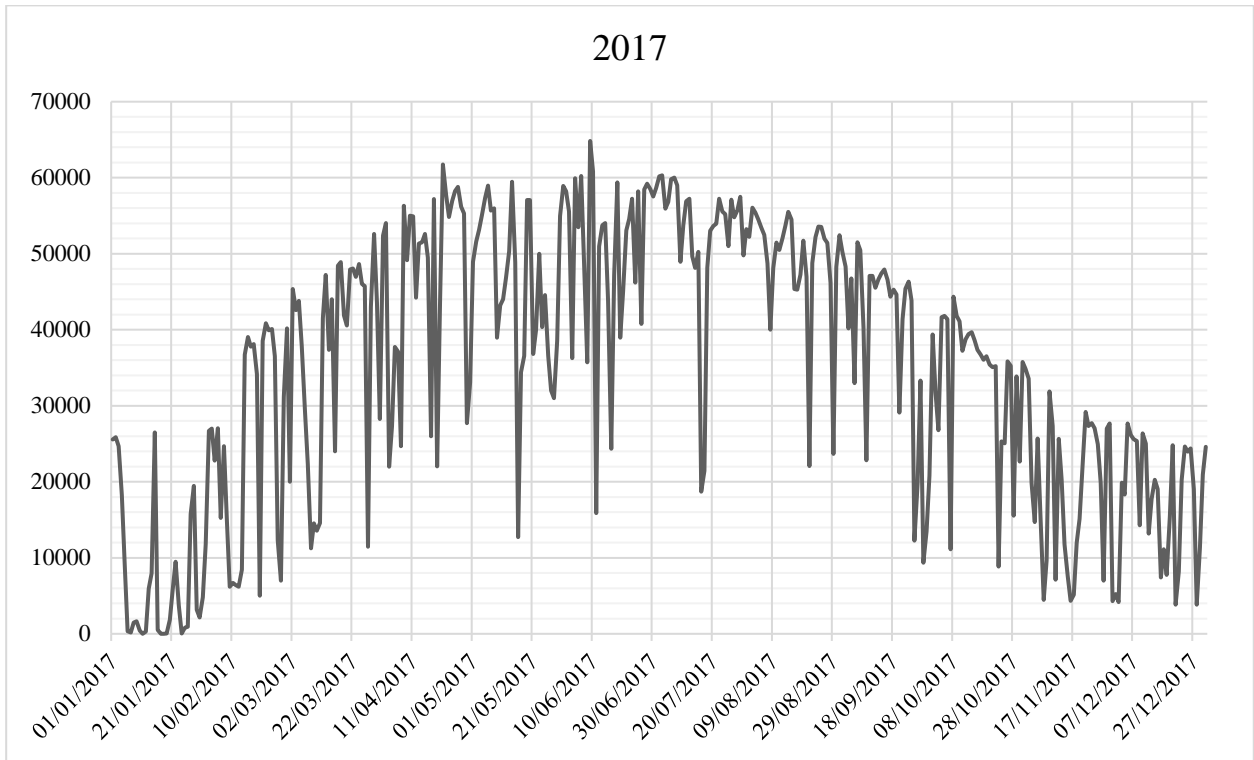


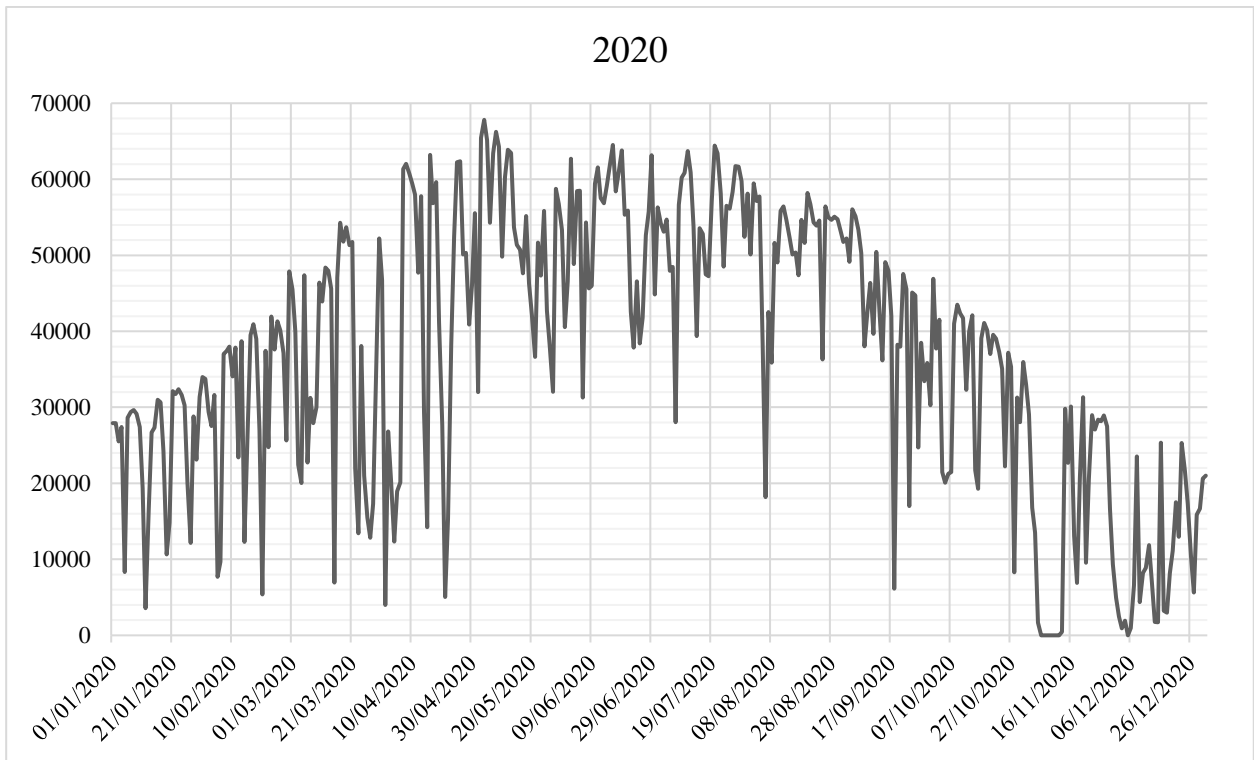
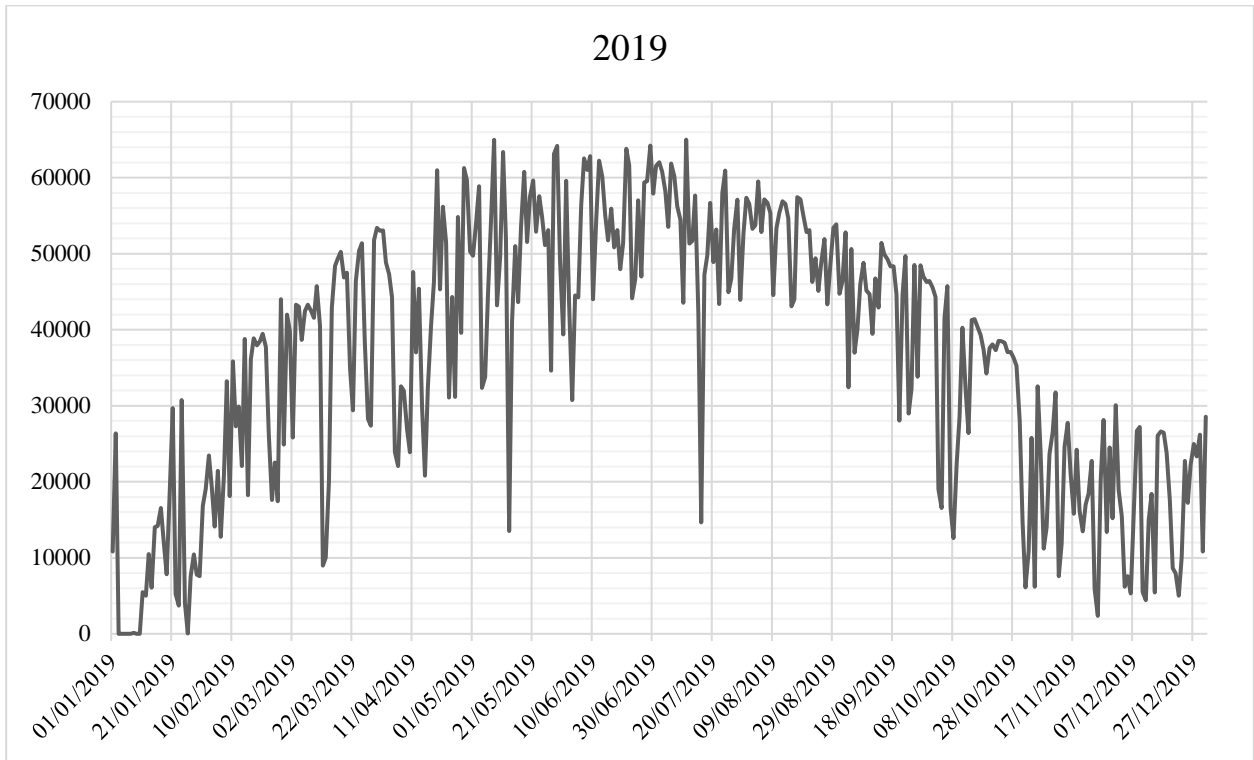


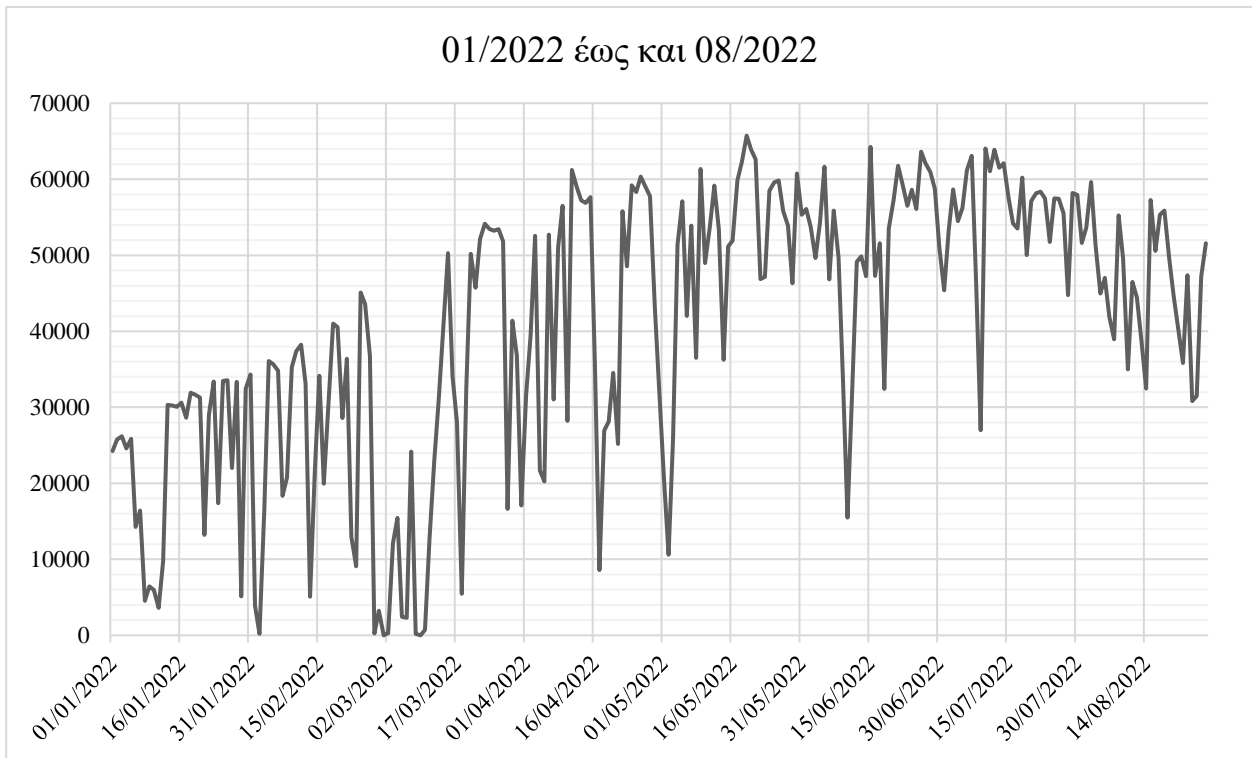
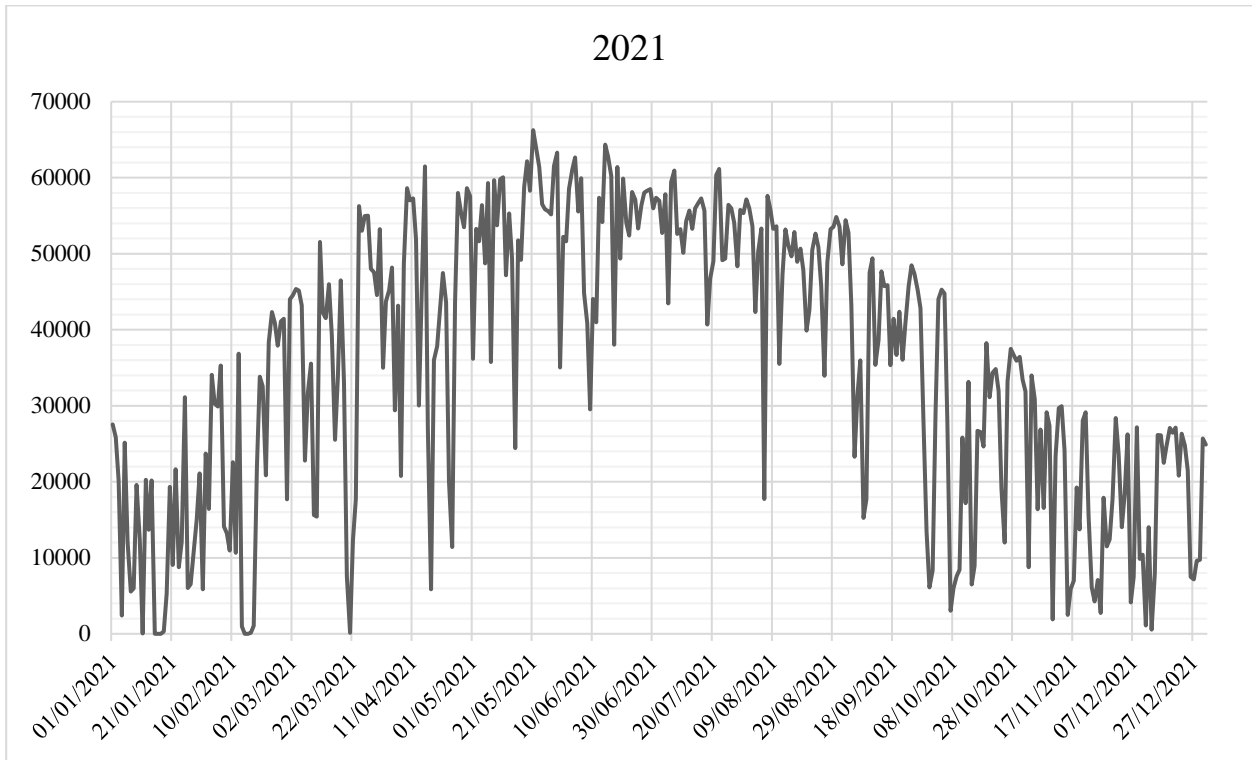


Σχήμα Γ.2 – Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (από 01/2015 έως και 08/2022) σε Watt









# Βιβλιογραφία

---

- [01] Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος*, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [02] Gilbert M. Masters, *Συστήματα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Εκδόσεις Πεδίο & Γεώργιος Παπαδάκης, 2016.
- [03] Απόστολος Λ. Πολυζάκης, *Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος, Θεωρία – Λυμένες Ασκήσεις*, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Power Heat Cool, 2020.
- [04] Αργύρης Σ. Βατάλης, *Επιστήμη & Τεχνολογία Υλικών*, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 2009.
- [05] Παύλος Σ. Γεωργιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Σ.Ε.Α.Β., 2015.
- [06] Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, *Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων*, Σ.Ε.Α.Β., 2015.
- [07] Vladimir S. Bagotsky, Alexander M. Skundin, Yury M. Volkovich, *Ηλεκτροχημικές Πηγές Ενέργειας – Συσσωρευτές, Κελιά Κανσίμου & Υπερπυκνωτές*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2020.
- [08] Θεοχάρης Δ. Τσούτσος, Ιωάννης Ν. Κανάκης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Τεχνολογίες & Περιβάλλον*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2013.
- [09] Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης, *Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2011.
- [10] Διονύσης Ασημακόπουλος, Γεώργιος Αραμπατζής, Αθανάσιος Αγγελής – Δημάκης, Αβραάμ Καρταλίδης, Γεώργιος Τσιλιγκιρίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Δυναμικό & Τεχνολογίες*, Εκδόσεις Σοφία, 2015.
- [11] Απόστολος Λ. Πολυζάκης, *Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη*, Εκδόσεις Power Heat Cool, 2019.
- [12] Imene Yahyaoui, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies – Volume 1: Solar and Wind Energies*, Elsevier Inc., 2018.
- [13] Muhammad H. Rashid, *Alternative Energy in Power Electronics*, Elsevier Inc., 2015.
- [14] Haitham Abu-Rub, Mariusz Malinowski, Kamal Al-Haddad, *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportations and Industrial Applications*, IEEE Press, John Wiley & Sons Ltd., 2014.
- [15] Adrian Kitai, *Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes – The role of the PN junction*, John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [16] Dan Chiras, *Solar Electricity Basics – Powering your Home or Office with Solar Energy*, 2<sup>nd</sup> Edition, New Society Publishers, 2020.
- [17] Micah L. Toll, *DIY Lithium Batteries – How to Build your Own Battery Packs*, 2017.

- [18] Νικόλαος Γκίκας, Μεταπτυχιακή Εργασία: *Διερεύνηση και Αξιολόγηση Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας Παραγόμενης από ΑΠΕ*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αθήνα, 2019.
- [19] Αγγελική Σαγάνη, Διπλωματική Εργασία: *Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
- [20] Αστέριος Ριμπάκης, Διπλωματική Εργασία: *Η αξία της αποθήκευσης ενέργειας για το ηλεκτρικό σύστημα*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2018.
- [21] Ευθύμιος Τέγος, Πτυχιακή Εργασία: *Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας Παραγόμενης από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα, 2011.
- [22] Λάμπρος Ματίκας, Πτυχιακή Εργασία: *Εφαρμογές Βαρυτικής Αποθήκευσης Ενέργειας*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2021.
- [23] Αθηνά Αλεξοπούλου, Πτυχιακή Εργασία: *Μετρήσεις Ηλιακής Ακτινοβολίας και Υπολογισμός Παραγόμενης Ηλεκτρικής Ενέργειας από Φωτοβολταϊκά Πλαίσια στη Σχολή Θετικών Επιστημών Θεσσαλονίκης*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2010.
- [24] Νίκος Μάντζαρης, Ιόλη Χριστοπούλου, *Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας: Προκλήσεις και Προοπτικές*, The Green Tank, 2020.
- [25] Νίκος Βέττας, Svetoslav Danchev, Γιώργος Μανιάτης, Νίκος Παρατσιώκας, Κώστας Βαλάσκας, *Ο Τομέας Ενέργειας στην Ελλάδα: Τάσεις, Προοπτικές και Προκλήσεις*, Οργανισμός Έρευνας και Ανάλυσης διαΝΕΟσις, 2021.
- [26] Morteza Zare Oskouei, Ayşe Aybike Şeker, Süleyman Tunçel, Emin Demirbaş, Tuba Gözel, Mehmet Hakan Hocaoglu, Mehdi Abapour, Behnam Mohammadi-Ivatloo, *A Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network*, MDPI, 2022. [Προσπελάστηκε από: <https://doi.org/10.3390/su14042110> (Μάιος 2022)]
- [27] Md. Shafiul Alam, Fahad Saleh Al-Ismael, Aboubakr Salem, Mohammad A. Abido, *High-Level Penetration of Renewable Energy Sources into Grid Utility: Challenges and Solutions*, IEEE (DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3031481), 2020. [Προσπελάστηκε από: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9224611> (Μάιος 2022)]
- [28] European Commission, Directorate-General for Energy, *EU energy in figures: statistical pocketbook 2021*, Publications Office, 2021. [Προσπελάστηκε από: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/511498> (Μάιος 2022)]
- [29] Ινστιτούτο Ενέργειας ΝΑ Ευρώπης (IENE), *Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές για τις Περιοχές σε Ενεργειακή Μετάβαση στην Ελλάδα*, Αθήνα, 2020.
- [30] Ινστιτούτο Ενέργειας ΝΑ Ευρώπης (IENE), *Ο Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας*, Αθήνα, 2020.
- [31] Wikipedia, *Electromagnetic Radiation*. [Προσπελάστηκε από: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation) (Μάιος 2022)]
- [32] Robert A. Rohde μέσω Wikimedia Commons, *Solar Radiation Spectrum*. [Προσπελάστηκε από: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_Spectrum.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png) (Μάιος 2022)]



- [33] Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Πανεπιστημίου Πατρών (ΕΦΑΠ<sup>2</sup>), *Κλιματολογικοί χάρτες ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.atmosphereupatras.gr/solarmaps/> (Μάιος 2022)]
- [34] G2V, *Solar Simulation Technology*. [Προσπελάστηκε από: <https://g2voptics.com/solar-simulation> (Μάιος 2022)]
- [35] Alternative Energy Tutorials, *Solar Irradiance*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/solar-irradiance.html> (Ιούνιος 2022)]
- [36] Ecozen, *Ισημερία*. [Προσπελάστηκε από: <https://ecozen.gr/2018/03/isimeries-ke-iliostasia/isimeria/> (Ιούνιος 2022)]
- [37] Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Μύρων Μονιάκης, *Θέρμανση – Ψύξη – Κλιματισμός*, Κεφάλαιο 5, Σ.Ε.Α.Β., 2015.
- [38] Τάνια Λιάρτση, Πτυχιακή Εργασία: *Υπολογισμός ηλιακής ενέργειας σε επιφάνειες με διάφορες κλίσεις από συνδυασμό μετρήσεων και μοντέλου*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2018.
- [39] Wildwaterwall, *Ηλιασμός Κτιρίου*. [Προσπελάστηκε από: <https://sites.google.com/site/wildwaterwall/eliaka-spitia/2-eliasmos-ktiriou> (Ιούνιος 2022)]
- [40] cmglee, NASA, Wikipedia, *Relationship between Earth's axial tilt ( $\epsilon$ ) to the tropical and polar circles*. [Προσπελάστηκε από: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Axial\\_tilt\\_vs\\_tropical\\_and\\_polar\\_circles.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Axial_tilt_vs_tropical_and_polar_circles.svg) (Ιούνιος 2022)]
- [41] Βικιπαίδεια, *Γεωγραφικές συντεταγμένες*. [Προσπελάστηκε από: [https://el.wikipedia.org/wiki/Γεωγραφικές\\_συντεταγμένες](https://el.wikipedia.org/wiki/Γεωγραφικές_συντεταγμένες) (Ιούνιος 2022)]
- [42] KIPP & ZONEN, *Solar Instruments*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.kippzonen.com/ProductGroup/1/Solar-Instruments> (Ιούνιος 2022)]
- [43] Βικιπαίδεια, *Πυρανόμετρο*. [Προσπελάστηκε από: <https://el.wikipedia.org/wiki/Πυρανόμετρο> (Ιούνιος 2022)]
- [44] Βικιπαίδεια, *Ακτινόμετρο*. [Προσπελάστηκε από: <https://el.wikipedia.org/wiki/Ακτινόμετρο> (Ιούνιος 2022)]
- [45] Benoît Robyns, Bruno François, Gauthier Delille, Christophe Saudemont, *Energy Storage in Electric Power Grids*, ISTE Ltd & John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [46] I. Kuzle, S. Tešnjak, D. Bošnjak, *Λειτουργία και διαχείριση ηλεκτρικού συστήματος*, 8<sup>ο</sup> Συνέδριο HRO CIGRE, Cavtat, 2007.
- [47] Narodne Novine, *Mrežna pravila elektroenergetskog sustava (μτφ.: Κανόνες δικτύου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας)*. [Προσπελάστηκε από: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006\\_03\\_36\\_907.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_03_36_907.html) (Ιούλιος 2022)]
- [48] G. Majstrović, N. Dizdarević, D. Bajš, M. Majstrović, *Διαχείριση συμφόρησης μετάδοσης*. [Προσπελάστηκε από: <http://www.eihp.hr/~ndizdar/CIGRE04-2.pdf> (Ιούλιος 2022)]
- [49] V. Ećimović, *Νέα τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας*, HEP OPS d.o.o., 8<sup>ο</sup> Συνέδριο HRO CIGRE, Cavtat, 2007.

- [50] Ana Crnolatac, *Moguće akumulacije energije u elektroenergetskoj mreži* (μτφ.: Πιθανή συσσώρευση ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο). [Προσπελάστηκε από: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:334106> (Ιούνιος 2022)]
- [51] M. Živić Đurović, D. Škrlec, B. Kezele, *Εφαρμογή μικροδικτύων σε δίκτυα διανομής*, HEP ODS-a, 8<sup>ο</sup> Συνέδριο HO CIRED, Umag, 2010.
- [52] Academia, *DIgSILENT PowerFactory Application Example, Battery Energy Storing Systems (BESS)* [Προσπελάστηκε από: [https://www.academia.edu/31789820/DIgSILENT\\_PowerFactory\\_Application\\_Example\\_Battery\\_Energy\\_Storing\\_Systems](https://www.academia.edu/31789820/DIgSILENT_PowerFactory_Application_Example_Battery_Energy_Storing_Systems) (Ιούλιος 2022)]
- [53] Yuriy Rozanov, Sergey Ryvkin, Evgeny Chaplygin, Pavel Voronin, *Power Electronic Basics – Operating Principles, Design, Formulas and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [54] Lionel Warnes, *Electronic and Electrical Engineering, Principles and Practice*, 3<sup>rd</sup> Edition, Palgrave Macmillan, 2003.
- [55] Stan Amos, Mike James, *Principles of Transistor Circuits*, 9<sup>th</sup> Edition, Newnes, 2000.
- [56] Loic Tous, PhD Thesis, *Nickel/Copper Plated Contacts as an Alternative to Silver Screen Printing for the Front Side Metallization of Industrial High Efficiency Silicon Solar Cells*, 2014.
- [57] EduRev, *P–N Junction Diode*. [Προσπελάστηκε από: [https://edurev.in/studytube/P-N-Junction-Diode/a335d78c-4053-4f63-bec4-11e5c4a4688e\\_t](https://edurev.in/studytube/P-N-Junction-Diode/a335d78c-4053-4f63-bec4-11e5c4a4688e_t) (Ιούλιος 2022)]
- [58] Debashis De, Kamakhya Prasad Ghatak, *Basic Electronics*, Pearson, 2010.
- [59] Physics and Radio Electronics, *P-N junction semiconductor diode*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/pn-junction-semiconductor-diode.html> (Ιούλιος 2022)]
- [60] NREL, *Solar Technology Cost Analysis*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.nrel.gov/solar-market-research-analysis/solar-cost-analysis.html> (Ιούλιος 2022)]
- [61] HELIOSYSTEMS, *Πυρίτιο & Thin film*. [Προσπελάστηκε από: <https://new.selasenergy.gr/fotovoltaika/πυρίτιο-thin-film> (Ιούλιος 2022)]
- [62] DEEGE SOLAR, *The different types of solar panels*. [Προσπελάστηκε από: [https://www.deegesolar.co.uk/types\\_of\\_solar\\_panels/](https://www.deegesolar.co.uk/types_of_solar_panels/) (Ιούλιος 2022)]
- [63] NREL, *Best Research-Cell Efficiencies (2022)*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies-rev220630.pdf> (Ιούλιος 2022)]
- [64] Χρυσούλα Μπάκα, Μεταπτυχιακή Εργασία: *Διερεύνηση Ευελιξίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2021.
- [65] Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, *Types of Hydropower Plants*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants> (Ιούλιος 2022)]
- [66] EMEC, *Pelamis Wave Power*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power> (Ιούλιος 2022)]

- [67] Επιχειρώ, 8 καλλιέργειες για βιοντίζελ. [Προσπελάστηκε από: <https://www.epixeiro.gr/article/12958> (Ιούλιος 2022)]
- [68] Δρ. Κόντης Ελευθέριος, *Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας. [Προσπελάστηκε από: <https://eclass.teiwm.gr/modules/document/?course=EE193> (Μάιος 2022)]
- [69] Francisco Díaz-González, Andreas Sumper, and Oriol Gomis-Bellmunt, *Energy Storage in Power Systems*, Wiley, 2016.
- [70] Konstantin O. Papailiou, *Springer Handbook of Power Systems*, Springer, 2021.
- [71] Ο.Δ.Ε. Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας της ΓΓΕΟΠΥ/ΥΠΕΝ, Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/118233/4341/8.12.2021 – ΦΕΚ 5619, τ.Β, 21.12.2020.
- [72] International Hydropower Association (IHA), *Pumped hydro*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage> (Αύγουστος 2022)]
- [73] ELECTRICALFUNDABLOG.com, *Flywheel as Energy Storage Device, Calculations and Rotor Requirements*. [Προσπελάστηκε από: <https://electricalfundablog.com/flywheel-energy-storage-calculations-rotor/> (Αύγουστος 2022)]
- [74] Electronics Tutorials, *Ultracapacitors*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/ultracapacitors.html> (Αύγουστος 2022)]
- [75] Wikipedia, *Superconducting magnetic energy storage*. [Προσπελάστηκε από: [https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting\\_magnetic\\_energy\\_storage](https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_magnetic_energy_storage) (Αύγουστος 2022)]
- [76] Energy Systems and Energy Storage Lab, *Superconducting Magnetic Energy Storage*. [Προσπελάστηκε από: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/SMES-page> (Αύγουστος 2022)]
- [77] FUELCELLStore.com, *The Use of Hydrogen as an Energy Storage System*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/use-of-hydrogen-as-an-energy-storage-system> (Αύγουστος 2022)]
- [78] Wikipedia, *Power-to-Gas*. [Προσπελάστηκε από: <https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-gas> (Αύγουστος 2022)]
- [79] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke, *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, Elsevier. [Προσπελάστηκε από: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081> (Αύγουστος 2022)]
- [80] Demetrio Iero, *High efficiency DC-AC converters for renewable energy systems*, Mediterranea University of Reggio Calabria, 2014.
- [81] Greek Photovoltaics (απομαγνητοφώνηση από YouTube). [Προσπελάστηκε από: <https://www.youtube.com/c/GreekPhotovoltaics/videos> (Αύγουστος 2022)]
- [82] Northern Illinois University, Virtual Renewable Energy Laboratory, *Experiment 2: Series and Parallel Connections of Solar Cells*. [Προσπελάστηκε από: <https://renewablelab.niu.edu/experiments/seriesParallelSolarCells> (Αύγουστος 2022)]

- [83] ELECTRICALTECHNOLOGY.org, *Series, Parallel & Series-Parallel Connection of Solar Panels*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.electricaltechnology.org/2020/09/series-parallel-and-series-parallel-connection-of-solar-panels.html> (Αύγουστος 2022)]
- [84] Jennifer Kafka, Mark A. Miller, *The dual angle solar harvest (DASH) method: An alternative method for organizing large solar panel arrays that optimizes incident solar energy in conjunction with land use*, Rutgers University, 2020. [Προσπελάστηκε από: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.025> (Αύγουστος 2022)]
- [85] Alternative Energy Tutorials, *Bypass Diode for Solar Panel Protection*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/bypass-diode.html> (Αύγουστος 2022)]
- [86] HELAPCO – Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ), *Net-Metering, Αυτοπαραγωγή με ενεργειακό συμψηφισμό και εικονικό ενεργειακό συμψηφισμό για ιδιώτες, επιχειρήσεις και ενεργειακές κοινότητες με ή χωρίς αποθήκευση*. [Προσπελάστηκε από: [https://helapco.gr/pdf/HELAPCO\\_Net\\_Metering.pdf](https://helapco.gr/pdf/HELAPCO_Net_Metering.pdf) (Αύγουστος 2022)]
- [87] OLYMPIC Engineering & Consulting, *Net Metering, πρόγραμμα ενεργειακού συμψηφισμού*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.oleng.eu/net-metering/> (Αύγουστος 2022)]
- [88] Francisco Díaz González, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, *Energy Storage in Power Systems*, Wiley, 2016.
- [89] ScienceDirect, *Sodium Nickel Chloride*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sodium-nickel-chloride> (Αύγουστος 2022)]
- [90] PowerStream, *Nickel Metal Hydride (NiMH) Chemistry FAQ*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.powerstream.com/BatteryFAQ-nickel-metal-hydride.html> (Αύγουστος 2022)]
- [91] Wikipedia, *Diagrama de Ragone*. [Προσπελάστηκε από: [https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama\\_de\\_Ragone](https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Ragone) (Αύγουστος 2022)]
- [92] B. Robyns, B. Francois, G. Delile, C. Saudemont, *Energy Storage in Electric Power Grids*, Wiley, 2015.
- [93] BATTERY UNIVERSITY, *BU-205: Types of Lithium-ion*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3QLajpb> (Αύγουστος 2022)]
- [94] BATTERY UNIVERSITY, *BU-211: Alternate Battery Systems*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3DFsUQi> (Αύγουστος 2022)]
- [95] BATTERY UNIVERSITY, *BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3xwIwSy> (Αύγουστος 2022)]
- [96] BATTERY UNIVERSITY, *BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3qMGpX2> (Αύγουστος 2022)]
- [97] BATTERY UNIVERSITY, *BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3QRCUJh> (Αύγουστος 2022)]
- [98] BATTERY UNIVERSITY, *BU-217: Summary Table of Alternate Batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3BpUHBz> (Αύγουστος 2022)]
- [99] BATTERY UNIVERSITY, *BU-218: Summary Table of Future Batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3S8Bc7s> (Αύγουστος 2022)]

- [100] BATTERY UNIVERSITY, *BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3Uke4EQ> (Αύγουστος 2022)]
- [101] Vijayapriya, Tamilaran, Dwarkadas Pralhaddas Kothari. “Smart Grid: An Overview” *Smart Grid and Renewable Energy* 2 (2011): 305-311.
- [102] Εταιρική ιστοσελίδα της Canadian Solar. [Προσπελάστηκε από: <https://www.canadiansolar.com> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [103] Εταιρική ιστοσελίδα της SolarEdge. [Προσπελάστηκε από: <https://www.solaredge.com> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [104] Βικιπαίδεια, *Ηλεκτρική ισχύς*. [Προσπελάστηκε από: [https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρική\\_ισχύς](https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρική_ισχύς) (Σεπτέμβριος 2022)]
- [105] EMMIS, *Αρμονικές: Βασικές έννοιες που πρέπει να γνωρίζετε*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3SbLEv2> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [106] INTERESTING ENGINEERING, *Transparent solar panels could replace windows in the future. Here's how*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3R4ZsXn> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [107] INTERESTING ENGINEERING, *Scientists just developed a novel material to upgrade organic solar cell printing*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3UkUEQu> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [108] INTERESTING ENGINEERING, *In a world first, perovskite-silicon solar cells break the 30% efficiency barrier*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3qJFHcZ> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [109] ENERGY DOME, *CO<sub>2</sub> Battery*. [Προσπελάστηκε από: <https://energydome.com/co2-battery> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [110] AspiraDAC, *Direct Air Capture (DAC) project*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.aspiradac.com> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [111] POPULAR MECHANICS, *Gravity is the Next Frontier for Batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3BMnqlu> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [112] INTERESTING ENGINEERING, *Biobatteries that run for weeks? Behold the power of 3 bacteria*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3BKmK0a> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [113] INTERESTING ENGINEERING, *A novel water-based battery is safer than lithium at half the cost*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3RSXM46> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [114] IFLSCIENCE, *A researcher accidentally developed a battery that could last a lifetime*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3eWKUM2> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [115] INTERESTING ENGINEERING, *The world's first operational 'sand battery' can store energy for months*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3BL7NLk> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [116] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency, ESA), *Just add graphene for greener Li-ion batteries*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3Utf2im> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [117] Omonayo Bolufawi, *Renewable Energy Integration with Energy Storage Systems and Safety*, 2018. [Προσπελάστηκε από: <https://www.intechopen.com/chapters/61848> (Σεπτέμβριος 2022)]



- [118] Aitor Vazquez, Kevin Martin, Manuel Arias, Javier Sebastian, *On Bidirectional DC Nano-Grids: Design Considerations and an Architecture Proposal*, 2019. [Προσπελάστηκε από: <https://doi.org/10.3390/en12193715> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [119] Ευάγγελος Σαπουντζόπουλος, Διπλωματική Εργασία: *Διαστασιολόγηση και Διαχείριση οικιακού φωτοβολταϊκού συστήματος με αποθήκευση*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2019.
- [120] Παναγιώτης Γιδάς, Ιωάννης Δεληγιάννης, Διπλωματική Εργασία: *Χρήση Μπαταριών για αύξηση Φ/B Διείσδυσης σε δίκτυο ΧΤ*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2018.
- [121] GREEN ENERGY PARTS, *Υπολογισμός Αναγκών Αυτόνομου Συστήματος*. [Προσπελάστηκε από: <https://www.greenenergyparts.com/help> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [122] TECHNOLYSIS HTS, *Υπολογισμός αυτόνομου φωτοβολταϊκού*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3Sym5o7> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [123] MP ENERGY, *Υπολογισμοί για αυτόνομα φωτοβολταϊκά*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3BRnQps> (Σεπτέμβριος 2022)]
- [124] BYD, *BydBatteryBox HVS & HVM*. [Προσπελάστηκε από: <https://bit.ly/3Sy771i> (Σεπτέμβριος 2022)]

# Συντομογραφίες · Αρκτικόλεξα · Ακρωνύμια

---

AC	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
AM	Μάζα Αέρα
a-Si	Άμορφο Πυρίτιο
AST	Ηλιακή Ώρα
AU	Αστρονομική Μονάδα
BCPP	Μονάδα Δευτερεύοντος Ρευστού
BESS	Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας Μπαταρίας
BMS	Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών
CAES	Αποθήκευση Πεπιεσμένου Αέρα
CdTe	Τελουριούχο Κάδμιο
CIS	Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός
DC	Συνεχές Ρεύμα
DMFC	Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης
DoD	Βάθος Εκφόρτισης
DS	Directional Solidification
DSP	Σταθμός Παραγωγής Ξηρού Ατμού
EC	Ηλεκτρολυτικός Πυκνωτής
EMC	Ηλεκτρομαγνητική Χύτευση
ESD	Συσκευές Αποθήκευσης Ενέργειας
ESS	Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας
EV	Ηλεκτρικό Όχημα
FACTS	Ευέλικτα Συστήματα Μετάδοσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος
FC	Κυψέλες Καυσίμου
FET	Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου
FF	Συντελεστής Πλήρωσης
FOC	Κλασματικής Τάση Ανοικτού Κυκλώματος



FSCC	Κλασματικό Ρεύμα Βραχυκύκλωσης
FSP	Σταθμός Εκτόνωσης Διφασικού Ρευστού
GaAs	Αρσενικούχο Γάλλιο
GES	Βαρυτική Αποθήκευση Ενέργειας
GHI	Παγκόσμια Οριζόντια Ακτινοβολία
HESS	Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας Υδρογόνου
HIT	Υβριδικό Φ/Β Στοιχείο
HTS	Υπεραγωγός Υψηλής Θερμοκρασίας
IEA	Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας
IGBT	Διπολικό Τρανζίστορ Μονωμένης Πύλης
IoT	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
LED	Δίοδος Εκπομπής Φωτός
Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> ή LTO	Μπαταρίες Τιτανικού Λιθίου
LiCoO <sub>2</sub> ή li-co	Μπαταρίες Λιθίου–Οξειδίου του Κοβαλτίου
LiFePO <sub>4</sub> ή LFE	Μπαταρίες Λιθίου–Φωσφορικού Άλατος Σιδήρου
Li-ion	Μπαταρίες Ιόντων–Λιθίου
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ή li-manganese	Μπαταρίες Λιθίου–Οξειδίου του Μαγγανίου
LiNiCoAlO <sub>2</sub> ή NCA/NCR	Μπαταρίες Λιθίου–Οξειδίου Αλουμινίου Κοβαλτίου Νικελίου
LiNiMnCoO <sub>2</sub> ή NMC	Μπαταρίες Λιθίου–Οξειδίου Κοβαλτίου Νικελίου
li-poly ή lipo ή RC lipo	Μπαταρίες Πολυμερών Λιθίου
LSM	Κεντρικός Μεσημβρινός Γκρίνουιτς
mc-Si	Πολυκρυσταλλικά Στοιχεία Πυριτίου
MPPT	Ανίχνευση Μέγιστου Σημείου Ισχύος
NaNiCl	Μπαταρίες Χλωριούχου Νατρίου Νικελίου
NaS	Μπαταρίες Θείου–Νατρίου
nc-Si	Νανοκρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πυριτίου
NiCd	Μπαταρίες Νικελίου–Καδμίου
NiMH	Μπαταρίες Νικελίου–Υδριδίου Μετάλλου
NOCT	Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας Φ/Β Κελιού
P&O	Διαταραχή και Παρατήρηση

P2G	Power-to-Gas
PAFC	Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος
PEMFC	Κυψέλες Καυσίμου Ανταλλαγής Πρωτονίων
PEMS	Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και Ισχύος
PHEV	Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα
PHSS	Αντλησιοταμίευση
PMSG	Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη
PSB	Μπαταρίες Βρωμιούχου Πολυσουλφιδίου
PTC	Συνθήκες Δοκιμής Φ/Β ΗΠΑ
PV	Φωτοβολταϊκό
PWM	Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού
R&D	Έρευνα και Ανάπτυξη
RCC	Έλεγχος Συσχέτισης Κυματισμού
Ribbon-Si	Ταινία Πυριτίου
RMS	Μέση Τετραγωνική Ρίζα
rSOC	Αναστρέψιμη Κυψέλη Στερεού Οξειδίου
sc-Si	Μονοκρυσταλλικά Στοιχεία Πυριτίου
SEI	Ενδιάμεση Φάση Στερεού Ηλεκτρολύτη
SMES	Υπεραγώγιμη Αποθήκευση Μαγνητικής Ενέργειας
SoC	Κατάσταση Φόρτισης
SoFC	Κυψέλες Καυσίμου Στερεής Κατάστασης
STC	Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου ή Δοκιμής
TESS	Σύστημα Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας
THD	Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση
TST	Πραγματική Ηλιακή Ώρα
UC	Υπερπυκνωτής
UPS	Αδιάλειπτη Παροχή Ρεύματος
UT	Ωρολογιακή Ώρα (Γκρίνουιτς)
UV	Υπεριώδης Ακτινοβολία
V2G	Vehicle-to-Grid

VRB	Μπαταρίες Οξειδοαναγωγής Βαναδίου
VSC	Μετατροπείς Πηγής Τάσης
WEC	Μετατροπέας Ενέργειας Κυμάτων
ZnBr	Μπαταρίες Βρωμιούχου Ψευδαργύρου
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΓΜ	Γραμμή Μεταφοράς
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
Ε.Ε.	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΙΕΕΕ	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΜΤ	Μέση Τάση
ΝΠΔΔ	Νομικό Πρόσωπο Δημοσίου Δικαίου
ΝΠΙΔ	Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου
ΣΑΗΕ ή ΣΑΕ	Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΥΤ	Υψηλή Τάση
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
Φ/Π	Φωτοβολταϊκό Πάνελ
Φ/Σ	Φωτοβολταϊκό Σύστημα
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

---

βλ.	βλέπε
δηλ.	δηλαδή
κ.ά.	και άλλα
κ.λπ.	και λοιπά
κ.ο.κ.	και ούτω καθεξής
μτφ.	μετάφραση

# Απόδοση Ξενόγλωσσων Όρων

---

## — Απόδοση

Αδιάλειπτη Παροχή Ρεύματος  
Αζιμούθια Γωνία Επιφάνειας  
Αζιμουθιακή Γωνία  
Αιολικό Πάρκο  
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας  
Αναστρέψιμη Κυψέλη Στερεού Οξειδίου  
Ανάστροφη Πόλωση  
Ανάστροφο Ρεύμα Κορεσμού  
Ανεμογεννήτριες  
Ανίχνευση Μέγιστου Σημείου Ισχύος  
Αντίσταση Διαρροής  
Αντιστροφέας  
Αντιστροφέας Στοιχειοσειράς  
Αντλησιοταμίευση  
Απ' Ευθείας Στερεοποίηση  
Αποθήκευση Πεπιεσμένου Αέρα  
Ασαφής Λογική  
Αστρονομική Μονάδα  
Αυξητική Αγωγιμότητα  
Αυτό-Εκφόρτιση  
Αυτόνομο Φ/Β Σύστημα  
Βάθος Εκφόρτισης  
Βαρυτική Αποθήκευση Ενέργειας  
Βελτιστοποιητής Ισχύος  
Βιολογικές Μπαταρίες

## — Ξενόγλωσσος Όρος

Uninterruptible Power Supply  
Surface Azimuth Angle  
Solar Azimuth Angle  
Wind Farm  
Renewable Energy Sources  
reversible Solid Oxide Cell  
Reverse Bias  
Saturation Current  
Wind Turbines  
Maximum Power Point Tracking  
Shunt Resistance  
Inverter  
String Inverter  
Pumped Hydro Storage System  
Directional Solidification  
Compressed Air Energy Storage  
Fuzzy Logic  
Astronomical Unit  
Incremental Inductance  
Self-Discharge  
Standalone (Off-Grid) PV System  
Depth of Discharge  
Gravity Energy Storage  
Power Optimizer  
Biobatteries

Γεννήτρια	Generator
Γεωγραφικό Μήκος	Longitude
Γεωγραφικό Πλάτος	Latitude
Γωνία Ζενίθ	Solar Zenith Angle
Γωνία Ηλιακού Ύψους	Altitude Angle
Γωνία Πρόσπτωσης	Incidence Angle
Διαδίκτυο των Πραγμάτων	Internet of Things
Διακόπτης Ασφαλείας	Safety Switch
Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού	Pulse Width Modulation
Διάρκεια Χρόνου Εκφόρτισης	Discharge Time Duration
Διασυνδεδεμένο Φ/Β Σύστημα	On-Grid PV System
Διαταραχή και Παρατήρηση	Perturb & Observe
Διαφανή Ηλιακά Πάνελ	Transparent Solar Panels
Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας	International Energy Agency
Δίοδος Εκπομπής Φωτός	Light Emitting Diode
Δίοδος Παράκαμψης	Bypass Diode
Διπολικό Τρανζίστορ Μονωμένης Πύλης	Insulated Gate Bipolar Transistor
Ελεγκτής Φόρτισης	Charge Controller
Έλεγχος Συσχέτισης Κυματισμού	Ripple Correlation Control
Εναλλασσόμενο Ρεύμα	Alternating Current
Ενδιάμεση Φάση Στερεού Ηλεκτρολύτη	Solid Electrolyte Interphase
Ενδογενείς Ημιαγωγοί	Intrinsic Semiconductors
Ενεργειακή Πυκνότητα	Energy Density
Ενεργειακός Συμψηφισμός	Net Metering
Εξισορρόπηση Προσφοράς – Ζήτησης	Load Leveling
Εξίσωση του Χρόνου	Equation of Time
Εξομάλυνση Αιχμών	Peak Shaving
Έξυπνες Μονάδες	Smart Modules
Έξυπνες Συσκευές	Smart Devices
Έξυπνο Δίκτυο	Smart Grid

Εξωγενείς Ημιαγωγοί	Extrinsic Semiconductors
Έρευνα και Ανάπτυξη	Research & Development
Ευέλικτα Συστήματα Μετάδοσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος	Flexible Alternating Current Transmission Systems
Ηλεκτρικό Δίκτυο	Power Grid
Ηλεκτρικό Όχημα	Electric Vehicle
Ηλεκτρολυτικός Πυκνωτής	Electrolytic Capacitor
Ηλιακά Συγκεντρωτικά Συστήματα	Solar Concentrators
Ηλιακή Σταθερά	Solar Constant
Ηλιακό Μέγιστο	Peak Sun
Ηλιακό Μεσημέρι	Solar Noon
Θερμή Κηλίδα	Hot Spot
Θερμοδυναμική Τάση	Thermodynamic Voltage
Θερμοκρασιακοί Συντελεστές	Temperature Coefficients
Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Ισημερινός	Equator
Κατάσταση Φόρτισης	State of Charge
Κεντρικός Αντιστροφέας	Center Inverter
Κεντρικός Μεσημβρινός Γκρίνουιτς	Local Standard Meridian
Κινητήρας	Motor
Κλασματικής Τάση Ανοικτού Κυκλώματος	Fractional Open–Circuit
Κλασματικό Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	Fractional Short–Circuit Current
Κλίση	Slope
Κύκλος ζωής	Lifecycle
Κυψέλες Καυσίμου	Fuel Cells
Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης	Direct Methanol Fuel Cells
Κυψέλες Καυσίμου Ανταλλαγής Πρωτονίων	Proton Exchange Membrane Fuel Cells
Κυψέλες Καυσίμου Στερεής Κατάστασης	Solid–State Fuel Cells
Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος	Phosphoric Acid Fuel Cells
Λεπτό Υμένιο	Thin Film

Μάζα Αέρα	Air Mass
Μέση Ηλιακή Ώρα	Mean Time
Μέση Τετραγωνική Ρίζα	Root Mean Square
Μετασχηματιστής	Transformer
Μετατροπέας	Converter
Μετατροπέας Ανόρθωσης – Υποβιβασμού τάσης	Boost–Buck Converter
Μετατροπέας Ανόρθωσης Τάσης	Boost Converter
Μετατροπέας Ενέργειας Κυμάτων	Wave Energy Converter
Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης	Buck Converter
Μετατροπείς Πηγής Τάσης	Voltage Source Converters
Μετρητής Αμφίδρομης Κατεύθυνσης	Bi–Directional Meter
Μικροαντιστροφέας	Micro Inverter
Μονάδα Δευτερεύοντος Ρευστού	Binary Cycle Power Plant
Μπαταρίες Άμμου	Sand Batteries
Μπαταρίες Βρωμιούχου Πολυσουλφιδίου	Polysulfide Bromine Flow Batteries
Μπαταρίες Βρωμιούχου Ψευδαργύρου	Zinc Bromine Flow Batteries
Μπαταρίες Νανοσυρμάτων	Nanowire Batteries
Μπαταρίες Νερού	Water Batteries
Μπαταρίες Οξειδοαναγωγής Βαναδίου	Vanadium Redox Flow Batteries
Μπαταρίες Ροής	Flow Batteries
Νευρωνικά Δίκτυα	Neural Networks
Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας Φ/Β Κελιού	Nominal Operating Cell Temperature
Οργανικά Ηλιακά Στοιχεία	Organic Solar Cells
Ορθή Πόλωση	Forward Bias
Παγκόσμια Οριζόντια Ακτινοβολία	Global Horizontal Irradiation
Πλατφόρμα Επιτήρησης	Monitoring Platform
Πολλαπλή Συνένωση	Multijunction
Πραγματική Ηλιακή Ώρα	True Solar Time
Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου ή Δοκιμής	Standard Test Conditions



Πυκνότητα Ισχύος	Power Density
Πυκνότητα Ισχύος	Irradiation
Ρεύμα Διαρροής	Leakage Current
Ρύθμιση Συχνότητας	Frequency Regulation
ΣΑΗΕ	Energy Storage Systems
Σκοτεινό Ρεύμα	Dark Current
Σταθμός Εκτόνωσης Διφασικού Ρευστού	Flash Steam Plant
Σταθμός Παραγωγής Ξηρού Ατμού	Dry Steam Plant
Στοιχειοσειρές	Strings
Στρατηγική Παροχής Ενέργειας	Dispatch Strategy
Στρεφόμενοι Σφόνδυλοι	Flywheels
Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη	Permanent Magnet Synchronous Generator
Συνεχές Ρεύμα	Direct Current
Συνθήκες Δοκιμής Φ/Β ΗΠΑ	PV USA Test Conditions
Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση	Total Harmonic Distortion
Συντελεστής Πλήρωσης	Fill Factor
Συσκευές Αποθήκευσης Ενέργειας	Energy Storage Devices
Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας Μπαταρίας	Battery Energy Storage System
Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας Υδρογόνου	Hydrogen Energy Storage System
Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και Ισχύος	Power and Energy Management System
Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών	Battery Management System
Σύστημα Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας	Thermal Energy Storage System
Τάση Αποκοπής	Cut-Off Voltage
Τάση Εκφόρτισης	Discharge Voltage
Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας	Energy Storage Systems
Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου	Field Effect Transistor
Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα	Plug-in Hybrid Electric Vehicles
Υβριδικό Σύστημα	Hybrid System

Υβριδικό Φ/Β Στοιχείο	Heterojunction with Intrinsic Thin-layer
Υπεραγώγιμη Αποθήκευση Μαγνητικής Ενέργειας	Super Conductive Magnetic Storage
Υπεραγωγός Υψηλής Θερμοκρασίας	High Temperature Superconductor
Υπερδυναμικό	Overpotential
Υπεριώδης Ακτινοβολία	UltraViolet Radiation
Υπερπυκνωτής	Ultracapacitor
Φαινόμενη Ηλιακή Ώρα	Solar Time
Φωτοβολταϊκό	Photovoltaic
Φωτοβολταϊκό Γυαλί	PV Glass
Φωτοβολταϊκό Πάνελ	Photovoltaic Panel
Φωτοβολταϊκό Στοιχείο/Κελί/Κυψέλη	Photovoltaic Cell
Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	PV Effect
Χωρητικότητα Αποθήκευσης	Storage Capacity
Ψηφίδες Πυριτίου	Silicon Wafers
Ωρολογιακή Ώρα (Γκρίνουιτς)	Universal Time

# Σύμβολα και Μονάδες Μέτρησης (M.M.)

— Σύμβολο — Περιγραφή — M.M.

## — Μεταβλητές

$AM$	Συντελεστής μάζα αέρα	$W/m^2$
$AST, T_{solar}$	Ηλιακή ώρα	h
$C$	Χωρητικότητα πυκνωτή	F
$C$	Χωρητικότητα μπαταρίας	Ah
$d$	Απόσταση αφηλίου – περιηλίου	km
$E$	Ενέργεια φωτονίων	eV
$E_g$	Ενεργειακό διάκενο	eV
$E_{qT}$	Εξίσωση του χρόνου	h
$E_{sp}$	Ενεργειακή χωρητικότητα κελιού	Wh/kg
$ET$	Σχέση χρόνου	min
$E_{wh}$	Ημερήσια Ενέργεια	Wh
$f$	Συχνότητα	Hz
$G$	Αγωγιμότητα	$S \cdot m^{-1}$
$GHI$	Παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία	$W/m^2$
$I$	Ρεύμα	A
$I_{Shockley}$	Εξίσωση του Shockley ή εξίσωση ανορθωτή	A
$I_d$	Ρεύμα διαρροής διόδου	A
$I_{DCmax}$	Μέγιστο DC ρεύμα εισόδου	A
$I_{DCsc}$	Μέγιστο DC ρεύμα βραχυκύκλωσης	A
$I_{i,STC}$	Ένταση φωτορεύματος σε συνθήκες STC	A
$I_{ph}$	Ρεύμα ιδανικής πηγής	A
$I_s$	Ανάστροφο ρεύμα κορεσμού	A

$I_{sc}$	Ρεύμα βραχυκύκλωσης	A
$L$	Αυτεπαγωγή πηνίου	H
$LSM$	Κεντρικός μεσημβρινός Γκρίνουιτς	μοίρες
$m$	Περιθώριο	—
$N$	Αριθμός ημερών αυτονομίας	—
$NOCT$	Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας Φ/Β κελιού	C
$P$	Ενεργή ισχύς	W
$P$	Ποσοστό των φορτίων που τροφοδοτούνται από την μπαταρία	%
$P_{DCmax}$	Μέγιστη φωτοβολταϊκή ισχύς	W
$P_{sp}$	Μέγιστη ισχύς κελιού	W/kg
$PV_{output(t)}$	Ισχύς εξόδου Φ/Β (απλοποιημένο μοντέλο)	W
$Q$	Άεργη ισχύς	VAr
$R$	Αντίσταση	$\Omega$
$R_s$	Αντίσταση σειράς (παράλληλη)	$\Omega$
$R_{sh}$	Αντίσταση διαρροής	$\Omega$
$S$	Φαινόμενη ισχύς	VA
$t$	Χρόνος	sec
$T_{sr}$	Χρόνος ανατολής ηλίου	h
$T_{ss}, t_s$	Χρόνος δύσης ηλίου	h
$t_{st}$	Συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας ηλιακής ακτινοβολίας	$Ns^2/C^2$
$u$	Φασματική ένταση εκπομπής του ηλίου	$W/m^2 \mu m$
$u(\lambda)$	Νόμος του Planck	$m^2 kg/s$
$U_{ACi}$	Φανταστικό μέρος της εναλλασσόμενης τάσης	V
$U_{ACr}$	Πραγματικό μέρος της εναλλασσόμενης τάσης	V
$U_{DC}$	DC τάση	V
$U_{DCmax}$	Μέγιστη DC τάση εισόδου	V
$U_{max}$	Τάση μιας πλήρως φορτισμένης μπαταρίας	V

$U_{min}$	Τάση μιας αφόρτιστης μπαταρίας	V
$U_{tsn}$	Τοπική ώρα ηλιακού μεσημεριού	h
$V$	Τάση	V
$V_{AK}$	Δυναμικό στα άκρα της διόδου	V
$V_{bi}$	Εσωτερικό δυναμικό	V
$V_{DCmin}$	DC τάση εκκίνησης εισόδου	V
$V_{DCnom}$	Ονομαστική DC τάση εισόδου	V
$V_{module}$	Συνολική τάση Φ/Β πλαισίου	V
$V_{mpp}$	Τάση σημείου μέγιστης ισχύος	V
$V_{oc}$	Τάση ανοικτού κυκλώματος	V
$V_{OP}$	Κλασματική τάση ανοικτού κυκλώματος	V
$V_{th}$	Θεωρητική θερμοδυναμική τάση κελιού	V
$X$	Αντίδραση	$\Omega$
$Z$	Εσωτερική αντίσταση	$\Omega$
$A$ ή $S$	Εμβαδόν	$m^2$
$\alpha_s$	Γωνία ηλιακού ύψους	μοίρες
$\beta$	Κλίση συλλέκτη	μοίρες
$\beta_{DoD}$	Βάθος εκφόρτισης	—
$\beta_N$	Γωνία ηλιακού ύψους	μοίρες
$\gamma_s$	Αζιμουθιακή γωνία	μοίρες
$\delta$	Ηλιακή απόκλιση	μοίρες
$\Delta$	Απόκλιση ως προς την ώρα Γκρίνουιτς	μοίρες
$E$	Ενέργεια	J
$H$	Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια	$W/m^2$
$\eta$	Βαθμός απόδοσης	%
$H_0$	Ηλιακή ακτινοβολία στο υψηλότερο σημείο της ατμόσφαιρας	$W/m^2$
$\theta_Z$	Γωνία ζενίθ	μοίρες

$I_{mpp}$	Ρεύμα σημείου μέγιστης ισχύος	A
$\lambda$	Μήκος κύματος	$\mu\text{m}$
$\lambda$	Γεωγραφικό μήκος	μοίρες
$\mu$	Ενεργειακή απόδοση	%
$\sigma_\gamma$	Συντελεστής απωλειών γήρανσης	—
$\sigma_\mu$	Συντελεστής απωλειών μεταφοράς	—
$T_{local\_sn}$	Ώρα ηλιακού μεσημεριού	h
$\varphi, L$	Γεωγραφικό πλάτος	μοίρες
$\omega$	Περιστροφική ταχύτητα	rad/sec
$\omega_s$	Ωριαία γωνία δύσης	μοίρες
$\omega_s$	Γωνία ώρας ή γωνιακή μετατόπιση	μοίρες

### — Σταθερές

$AU$	Αστρονομική μονάδα	$1.5 \times 10^8 \text{ km}$
$c$	Ταχύτητα του φωτός στο κενό	$2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
$D_{sun}$	Διάμετρος ηλίου	$1.39 \times 10^6 \text{ km}$
$eV$	Electro Volt	$1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
$F$	Σταθερά Faraday	C/mol
$h_p$	Σταθερά Planck	$6.625 \times 10^{-34} \text{ W}$
$k$	Σταθερά Boltzmann	$1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
$n, k$	Σταθερά Peukert	(αδιαστασιολόγητο)
$q$	Ηλεκτρικό φορτίο	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
$T_{sun}$	Απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας ηλιακού δίσκου	5778 °K
$\epsilon_0$	Απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού	$8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
$K_0$	Σταθερός παράγοντας μεθόδου PWM	(αδιαστασιολόγητο)
$T$	Απόλυτη θερμοκρασία	290 °K