



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
Ιωάννη Κοτρώτσου
(ΑΜ: 2018018006)

Επιβλέπουσα: Καθηγήτρια Ειρήνη Καρανάσιου

Αθήνα, 12 Μαρ 2021





ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
Ιωάννη Κοτρώτσου
(ΑΜ: 2018018006)

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΕΙΡΗΝΗ ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΥ, Καθηγήτρια ΣΣΕ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΡΑΔΗΜΑΣ, Επίκ. Καθηγητής ΣΣΕ

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΔΟΪΤΣΙΔΗΣ, Επίκ. Καθηγητής ΣΜΠΔ,
Πολυτεχνείο Κρήτης

Eleftheri
os
Doitsidis
Digitally signed
by Eleftherios
Doitsidis
Date: 2021.03.15
10:24:58 +02'00'



Copyright © Ιωάννης Κοτρώτσος, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναλυθεί η μελέτη εγκατάστασης αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος σε σύγχρονη μονοκατοικία χωρίς να συνδεθεί στο υφιστάμενο δίκτυο της ΔΕΗ (χωρίς net metering) αλλά για το σκοπό της ιδιοκατανάλωσης και ικανοποίησης των βασικών και απαραίτητων ενεργειακών αναγκών μιας τετραμελούς οικογένειας.

Στο **1° Κεφάλαιο** αναφέρεται το υπάρχον ενεργειακό πρόβλημα, οι ενεργειακοί πόροι της Ελλάδας και η εξέλιξη της τεχνολογίας που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια τις τελευταίες δεκαετίες.

Το **2° Κεφάλαιο** επικεντρώνεται στην ηλιακή ενέργεια, το δυναμικό της παγκοσμίως, τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε και τι μπορούμε να κερδίσουμε από τη χρήση της.

Στο **3° Κεφάλαιο** περιγράφεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, οι κατηγορίες και οι εφαρμογές των Φ/Β συστημάτων και αναφέρονται οι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν ένα Φ/Β σύστημα.

Στο **4° Κεφάλαιο** γίνεται εκτεταμένη αναφορά στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας των Φ/Β συστημάτων που θα καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας όταν η απόδοση των συλλεκτών δεν επαρκεί λόγω περιορισμένης ηλιοφάνειας.

Στο **5° Κεφάλαιο** αναλύονται τα βασικά υποσυστήματα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Το **6° Κεφάλαιο** αναφέρεται στα αρχιτεκτονικά επίπεδα και τις προκλήσεις εφαρμογής ενός σύγχρονου ενεργειακού δικτύου με μελλοντικές προεκτάσεις και ευελιξία διασυνδεσιμότητας.

Στο **7° Κεφάλαιο** γίνεται η μελέτη του αυτόνομου υβριδικού συστήματος για μία σύγχρονη κατοικία, αναλύονται τα φορτία, οι καταναλώσεις και τα υποσυστήματα που πρέπει να εγκατασταθούν για να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις.

Τέλος, αναφέρεται η βιβλιογραφία και οι διαδικτυακές πηγές απ' όπου αντλήθηκαν οι απαραίτητες πληροφορίες για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά

Ενεργειακό πρόβλημα, ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκό φαινόμενο, αυτόνομα, υβριδικά, εφαρμογές, ισχύς αιχμής, απόδοση, συλλέκτες, ανεμογεννήτρια, υποδομή και αρχιτεκτονική έξυπνων δικτύων, διαχείρισης υβριδικής ενέργειας, μοντέλα πρόβλεψης



ABSTRACT

The scope of the present thesis is the study of the installation of an autonomous hybrid Photovoltaic (PV) System on a modern detached housing structure without a connection to the electricity provider (void net metering), but solely for the purpose of meeting the basic and mandatory needs of a four-member family.

Chapter one focuses on the current energy problem, the energy resources of Greece and the evolution of technology that exploits solar energy in the past decades until now.

Chapter two is dedicated to the principles of solar energy, its global potential, usage and exploitation capabilities and corresponding benefits.

In **chapter three** a description of the photovoltaic effect, the categories and the applications of a PV system and the important factors that affect are in detail presented.

In **chapter four**, the main energy storage systems (battery arrays) that support the energy needs of modern housing are extensively analyzed in the case of lack of energy sufficiency due to low sunshine conditions.

In **chapter five**, the subsystems of a PV installation are presented.

In **chapter six**, the architectural layering and the challenges of implementing a modern energy grid with future perspectives and flexible interconnectivity are analyzed.

In **chapter seven**, the study of an autonomous hybrid PV system for a modern housing structure along with the necessary energy loads, the required consumption and the subsystems that individually need to be installed to meet those requirements is in detail carried out.

The final part of the thesis contains the literature and other sources on which the present research is based

Keywords

Energy problem, solar energy, photovoltaic phenomenon, autonomous, hybrid, applications, peak power, efficiency, panel, wind turbine, smart grid infrastructure and architecture, hybrid energy management, prediction models



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

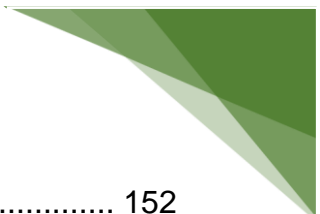
Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων Δρα Ειρήνη Καρανάσιου για την υποστήριξη που μου προσέφερε καθώς και την προθυμία της να με καθοδηγήσει στις απορίες και στα προβλήματα που συνάντησα. Ακόμα, ευχαριστίες οφείλω στη σύζυγό μου Βασιλική που με υπέμεινε μέχρι το πέρας αυτής της πτυχιακής εργασίας και στα παιδιά μου Μαριάνθη και Άγγελο για τις ώρες που μου χάρισαν απ' τη δική τους παιδική ηλικία προκειμένου να ολοκληρώσω τις σπουδές μου και που εύχομαι να τις επιστρέψω στο έπακρο. Οφείλω να ευχαριστήσω επίσης τους γονείς μου Φωκίωνα και Μαριάνθη για την αθόρυβη αλλά πάντα παρούσα αρωγή τους. Τέλος είμαι υποχρεωμένος να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Δάρα, Κοσμήτορα της ΣΣΕ 2015-2019, που μου έδωσε την ευκαιρία να συμμετάσχω στο ΔΔΠΜΣ της ΣΣΕ και του Πολυτεχνείου της Κρήτης.

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	17
1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα.....	17
1.2 Συμβατικοί ενεργειακοί πόροι της Ελλάδας	18
1.3 Η χρήση της ηλιακής ενέργειας ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα και η εξέλιξη της βιομηχανικής υποδομής την τελευταία δεκαετία	19
1.4 Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών το 2019 και σταδιακή άνοδος .	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	25
2.1 Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας	25
2.2 Δυναμικό	27
2.3 Υπολογίζοντας την ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της Γης	28
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας	31
2.5 Στατιστικά ηλιοφάνειας	32
2.6 Η εφαρμογή PVGIS και εφαρμογές εύρεσης ιδανικής γωνίας πάνελ.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	43
3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	43
3.2 Οι ημιαγωγοί και οι ιδιότητές τους στη Φωτοβολταϊκή διαδικασία.....	43
3.3 Ημιαγωγοί πρόσμιξης.....	45
3.4 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	47
3.4.1 Απομονωμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (stand alone ή off grid)	47
3.4.1.1 Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα.....	48
3.4.1.2 Υβριδικά Φ/Β Συστήματα	49
3.4.2 Συνδεδεμένα στο δίκτυο Φ/Β συστήματα (on grid)	50
3.5 Εφαρμογές Φ/Β Συστημάτων	51
3.6 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση	52
3.7 Χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Τάσης ($I - V$) Φ/Β στοιχείου	53
3.8 Τεχνολογία και υλικά Φωτοβολταϊκών	54
3.9 Απόδοση Φωτοβολταϊκών συστημάτων και συντελεστές απώλειας.....	59
3.10 Απώλεια ισχύος Φ/Β κυψελών εξαιτίας του Φαινόμενο Hot Spot (hot spot heating)	65
3.11 Ισχύς αιχμής του Φ/Β πλαισίου	67
3.12 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φ/Β συστημάτων	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	71
4.1 Εισαγωγή.....	71
4.2 Δομή των Συσσωρευτών	72

4.3	Διάκριση Συσσωρευτών	74
4.3.1	Πρωτογενείς μπαταρίες (μη επαναφορτιζόμενες).....	75
4.3.2	Δευτερογενείς μπαταρίες (επαναφορτιζόμενες)	76
4.4	Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών	77
4.4.1	Χωρητικότητα	77
4.4.2	Τάση.....	78
4.4.3	Στάθμη φόρτισης.....	79
4.4.4	Βάθος εκφόρτισης	80
4.4.5	Κύκλος ζωής	80
4.4.6	Αποδοτικότητα	81
4.4.7	Ρεύμα μπαταρίας	81
4.4.8	Χρόνος ζωής	81
4.4.9	Ειδική ενέργεια / ενεργειακή πυκνότητα	82
4.4.10	Αυτοεκφόρτιση	82
4.4.11	Κατάσταση υγείας	82
4.4.12	Ρυθμός φόρτισης / εκφόρτισης.....	83
4.4.13	Ειδική ισχύς.....	83
4.4.14	Εσωτερική αντίσταση	83
4.4.15	Ειδικό βάρος	84
4.5	Συσσωρευτές Φ/Β Συστημάτων.....	84
4.5.1	Τρόπος λειτουργίας συσσωρευτών στα Φ/Β συστήματα.....	85
4.5.2	Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν.....	85
4.6	Συσσωρευτές οξέος μολύβδου (PbSO ₄)	86
4.6.1	Συσσωρευτές οξέος μολύβδου ανοικτής ή κλειστής κατασκευής	88
4.6.2	Μπαταρίες μαζικής παραγωγής ή βιομηχανικού τύπου	91
4.7	Η ιδανική μπαταρία αποθήκευσης ενέργειας για Φ/Β Συστήματα.....	92
4.8	Μεθοδολογία επιλογής κατάλληλου συσσωρευτή	93
4.9	Ονομαστική Χωρητικότητα και Παρεχόμενη Ισχύς από τους Συσσωρευτές κατά τη Λειτουργία τους σε Φωτοβολταϊκό Σύστημα.....	93
4.10	Νέες Τεχνολογίες Συσσωρευτών για Φ/Β Συστήματα	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	97
5.1	Φωτοβολταϊκό πάνελ ή συλλέκτες.....	97
5.2	Συστήματα Στήριξης πάνελ.....	104
5.3	Αντιστροφείς τάσης (Μετατροπέας AC – DC).....	106
5.3.1	Κατηγορίες αντιστροφέων	107
5.3.2	Χαρακτηριστικά και λειτουργία Φ/Β αντιστροφέων	108
5.3.3	Εφαρμογές Φ/Β αντιστροφέων.....	110

5.4	Μετρητής Ενέργειας (αυτόνομο Φ/Β χωρίς net metering).....	111
5.5	Ελεγκτές φόρτισης συσσωρευτών	112
5.6	Ηλεκτρολογική εγκατάσταση	113
5.7	Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (σε περίπτωση αυτόνομου Φ/Β συστήματος) υγρού καυσίμου (Diesel – βενζίνης).....	115
5.8	Ανεμογεννήτρια (σε περίπτωση αυτόνομου Φ/Β συστήματος)	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		119
6.1	Το τέλος του εξηλεκτρισμού – Γενικά.....	119
6.2	Ενσωμάτωση υβριδικών Φ/Β συστημάτων σε οικουμενικό δίκτυο και προβλήματα	119
6.3	Έξυπνα δίκτυα.....	121
6.4	Χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων και προκλήσεις	123
6.5	Τεχνολογία έξυπνων δικτύων	125
6.6	Αρχιτεκτονική έξυπνων δικτύων και στόχοι	127
6.6.1	Ο πελάτης	129
6.6.2	Η αγορά.....	129
6.6.3	Οι πάροχοι	130
6.6.4	Η λειτουργία	130
6.6.5	Η παραγωγή.....	130
6.6.6	Η μετάδοση	131
6.6.7	Η διανομή.....	131
6.7	Επίπεδα αρχιτεκτονικής.....	131
6.7.1	Το επίπεδο αντίληψης (εννοιολογικό).....	133
6.7.2	Το λογικό επίπεδο	134
6.7.3	Το φυσικό επίπεδο	134
6.7.4	Το επίπεδο εφαρμογής	135
6.8	Υβριδικό σύστημα διαχείρισης ΑΠΕ έξυπνου σπιτιού για ευφυή δίκτυα	135
6.9	Πρόβλεψη διαχείρισης ηλιακής ενέργειας σε έξυπνα δίκτυα και μοντέλα πρόβλεψης.....	141
6.9.1	Στατιστικά Μοντέλα	143
6.9.2	Μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης	144
6.9.3	Φυσικά μοντέλα.....	145
6.9.4	Υβριδικά μοντέλα	146
6.10	Εφαρμογές έξυπνων δικτύων, αντιδράσεις και ανησυχίες.....	146
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		147
7.1	Πρόβλημα υπό Εξέταση	147
7.2	Διαστασιολόγηση Προβλήματος.....	150



7.3	Επιλογή Φ/Β Συστήματος.....	152
7.3.1	Επιλογή Ανεμογεννήτριας.....	156
7.3.2	Επιλογή συλλεκτών.....	157
7.3.3	Επιλογή Συσσωρευτών.....	159
7.3.4	Επιλογή Ρυθμιστή Φόρτισης.....	160
7.3.5	Επιλογή Μετατροπέα.....	161
7.3.6	Επιλογή Γεννήτριας.....	162
7.3.7	Συντήρηση Εγκατάστασης.....	164
7.3.8	Κόστος Εγκατάστασης.....	165
7.4	Συμπερασματικά.....	167
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ		169
ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ		171



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έννοια της ενέργειας είναι άρρηκτα συνυφασμένη με την οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη της ανθρώπινης κοινωνίας στο βάθος του χρόνου. Η αναζήτηση της ενέργειας ήταν πάντα ένα έργο ισορροπίας. Όσο ο άνθρωπος αποκτούσε μεγαλύτερο έλεγχο στο περιβάλλον που ζούσε, τόσο αυξάνονταν και οι πόροι που ανακάλυπτε προκειμένου να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που συναντούσε και που απειλούσαν την επιβίωσή του.

Η ανάγκη να ενισχυθεί η δύναμη του ανθρώπινου πολιτισμού και να επιταχυνθούν οι καθημερινές διαδικασίες της ζωής μας οδήγησαν στην αυξημένη κατανάλωση πρώτων υλών και σε ένα αέναο κυνήγι ενέργειας με αμέτρητες επιπτώσεις στο περιβάλλον και τον ίδιο τον άνθρωπο, που ξεκίνησε πολλές χιλιάδες χρόνια πριν.

Η πρώτη ενεργειακή πηγή ήταν ο ήλιος που παρείχε θερμότητα και φως και που χωρίς αυτόν δε θα ήταν δυνατή η επιβίωση κανενός είδους ζωής στον πλανήτη. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας δεν είναι κάτι καινούριο αλλά από τον 7^ο αι. π.Χ. [1] χρησιμοποιώντας μεγεθυντικούς φακούς και ελλειπτικούς μπρούτζινους καθρέπτες οι αρχαίοι Έλληνες και οι Ρωμαίοι κατηύθυναν το φως προκειμένου να ξεκινήσουν φωτιές για θρησκευτικές τελετές, ή να θερμάνουν φυσικά, απομακρυσμένα δωμάτια που δεν είχαν άμεση πρόσβαση στο ηλιακό φως.

Με τη βιομηχανική επανάσταση, ο Γάλλος φυσικός Alexandre Edmond Becquerel¹ [2] παρουσίασε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ή την ικανότητα μιας ηλιακής κυψέλης² να μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό, το 1839, κάνοντας πειράματα με κυψέλη μεταλλικών ηλεκτροδίων σε αγώγιμο διάλυμα, παρατηρώντας ότι η κυψέλη παρήγαγε περισσότερο ηλεκτρισμό όταν ήταν εκτεθειμένη σε φυσικό φως. Το 1876, ο William Grylls Adams³ μαζί με τον φοιτητή του Richard Day εφάρμοσαν επιτυχώς την παραπάνω φωτοβολταϊκή αρχή σε μια κυψέλη σεληνίου⁴ χωρίς την ύπαρξη θερμότητας ή κινητών μερών, γεγονός στο οποίο ο ειδήμονας ηλεκτρολογίας της εποχής Werner von Siemens⁵ αντιστάθηκε σθεναρά, δηλώνοντάς το ως επιστημονικά ασήμαντο, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής αποδοτικότητας κυψελών σεληνίου.

Τέσσερις δεκαετίες αργότερα, ο Αμερικανός εφευρέτης Charles Fritts⁶ κατασκεύασε την πρώτη ηλιακή συστοιχία συλλεκτών στη Νέα Υόρκη, το 1883, ένα

¹ 24 Μαρτίου 1820 – 11 Μαΐου 1891

² Ηλιακή ή φωτοβολταϊκή κυψέλη (PV cell) είναι το ηλεκτρικό κύκλωμα που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική κάνοντας χρήση του φωτοβολταϊκού φαινομένου που είναι μια φυσική και χημική διεργασία. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της όπως η ένταση, η τάση και η αντίσταση ποικίλλουν όταν εκτεθούν στο φυσικό φως

³ 18 Φεβρουαρίου 1836 – 10 Απριλίου 1915

⁴ Se (Z=34)

⁵ 13 Δεκεμβρίου 1816 – 6 Δεκεμβρίου 1892

⁶ 1850 – 1903

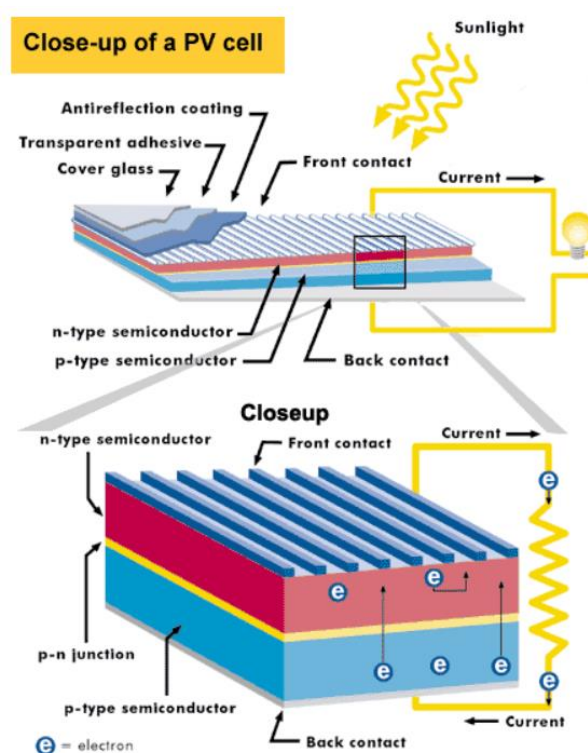
χρόνο μετά την ίδρυση του πρώτου εργοστασίου επεξεργασίας λιγνίτη από τον Thomas Edison⁷. Παρόλο που στους σύγχρονους συλλέκτες χρησιμοποιούμε πυρίτιο, η ηλιακή κυψέλη σεληνίου ήταν ο πρόδρομος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται σήμερα.

Η διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική δεν έγινε ευρέως αντιληπτή μέχρι την έκδοση της διατριβής του Albert Einstein⁸, το 1905, εξηγώντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, χαρίζοντάς του το βραβείο Νόμπελ Φυσικής, το 1921. Η έρευνα του Becquerel και του Einstein δημιούργησαν τις βάσεις της μελλοντικής ανάπτυξης της ηλιακής τεχνολογίας.

Το 1953 οι Calvin Fuller⁹, Gerald Pearson¹⁰, and Daryl Chapin¹¹ εφηύραν την ηλιακή κυψέλη πυριτίου, παράγοντας αρκετή ενέργεια ώστε να είναι αποδοτική για τη λειτουργία μικρών ηλεκτρικών συσκευών. Η ηλιακή κυψέλη που χρησιμοποιείται σήμερα αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια Bell το 1954, και παρόλο που για την εποχή, το κόστος για εμπορική χρήση ήταν πολύ υψηλό¹², ο αμερικανικός στρατός χρηματοδότησε την έρευνα για την εφαρμογή του φωτοβολταϊκού φαινομένου στην παροχή ενέργειας σε δορυφόρους.

Το Αμερικανικό Ναυτικό εργαστήριο ερευνών¹³ εκτόξευσε το πρώτο διαστημικό όχημα¹⁴ με ηλιακά πάνελ¹⁵ συλλογής ηλιακής ενέργειας το 1958 και η NASA εκτόξευσε τον πρώτο δορυφόρο¹⁶ με πάνελ ανίχνευσης του ήλιου, το 1964, θέτοντας τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία στο διάστημα ως το απαραίτητο στάνταρ για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών έξω από την ατμόσφαιρα της Γης.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, μετά από μια έρευνα που ξεκίνησε η Exxon Mobil προκειμένου να τροφοδοτήσει τον προειδοποιητικό φωτισμό στις θαλάσσιες



Εικόνα 1. Βασική δομή ενός ηλιακού κελιού [1]

⁷ 11 Φεβρουαρίου 1847 – 18 Οκτωβρίου 1931

⁸ 14 Μαρτίου 1879 – 18 Απριλίου 1955

⁹ 25 Μαΐου 1902 – 28 Οκτωβρίου 1994

¹⁰ 31 Μαρτίου 1905 – 25 Οκτωβρίου 1987

¹¹ 21 Ιουλίου 1906 – 19 Ιανουαρίου 1995

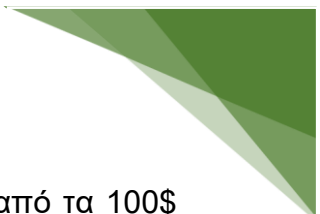
¹² 300\$ για ηλιακή κυψέλη 1Watt

¹³ United States Naval Research Laboratory (USNSL)

¹⁴ Vanguard I, 17 Μαρτίου 1958

¹⁵ Συστοιχία φωτοβολταϊκών κυψελών (PV array) τοποθετημένη σε συγκεκριμένη επιφάνεια προς εγκατάσταση

¹⁶ Nimbus I, 28 Αυγούστου 1964



πετρελαιοπηγές της με ηλιακές κυψέλες, η τιμή της τεχνολογίας έπεσε από τα 100\$ ανά παραγόμενο Watt στα 20\$/Watt. Από το 1970 ως το 1990 άρχισε η ευρεία χρήση των φωτοβολταϊκών πάνελ σε σιδηροδρομικές διασταυρώσεις, σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς πρόσβαση στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο, σε πύργους εκπομπής μικροκυμάτων για αύξηση της εμβέλειας της τηλεπικοινωνιακής ικανότητάς τους ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις υλοποίησης μεγάλων έργων, όπως η υδροδότηση άγονων περιοχών με ηλιακή ενέργεια.

Σήμερα η τεχνολογία είναι ευρέως διαδεδομένη σε πολλές πτυχές της ανθρώπινης ζωής όπως στα τροχοφόρα οχήματα, αεροσκάφη, στις μεταφορές, στη δόμηση και λειτουργία σύγχρονων κατοικιών και στην απεξαρτητοποίησή τους από το ηλεκτρικό δίκτυο όπου η παραγωγή βασίζεται συνήθως σε ορυκτά καύσιμα, λιγνίτη, πετρέλαιο, πυρηνική ενέργεια. Είναι δυνατή η εκτύπωση της επιφάνειας των ηλιακών πάνελ σε διαφορετικά χρώματα, η κατασκευή εύκαμπτου ηλιακού υφασμάτινου πάνελ για να καλυφθεί ένα σπίτι, ηλιακά κεραμίδια ενώ η τιμή έχει πέσει σε λιγότερο από 1€/Watt.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΖΗΤΗΜΑ ΚΑΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Μέχρι τα μέσα του 19ου αιώνα, η ανθρωπότητα κάλυπτε τις βασικές ενεργειακές της ανάγκες, με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική(ανεμόμυλοι) ή η υδραυλική (νερόμυλοι) [3]. Με τη βιομηχανική επανάσταση, τα ορυκτά καύσιμα – φυσικοί πόροι της Γης(πετρέλαιο, γαιάνθρακες, φυσικό αέριο) έγιναν οι κύριες μορφές ενέργειας για την ανθρώπινη κοινωνία και την οικονομία. Η ανεξέλεγκτη χρήση τους, όμως, οδήγησε στον κορεσμό και την έλλειψή τους, δημιουργώντας εδώ και μερικές δεκαετίες, το αποκαλούμενο «ενεργειακό ζήτημα».

Τα τελευταία εκατό χρόνια, έχει δαπανηθεί μεγάλο μέρος των αποθεμάτων των πρώτων υλών και των πηγών ενέργειας που αποταμιεύθηκαν κατά τη διάρκεια της μέχρι σήμερα ζωής του πλανήτη. Τα βεβαιωμένα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων, επαρκούν με το ιδανικότερο σενάριο για έναν αιώνα ακόμη, κατ' εκτίμηση. Θεωρώντας ακόμα και την ιδεατή περίπτωση να ανακαλυφθούν στο μέλλον ικανά και αξιόλογα αποθέματα συμβατικών καυσίμων, με τους σημερινούς ρυθμούς της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, ένας επικείμενος ενεργειακός χειμώνας μπορεί να παραταθεί το πολύ για άλλα 150 περίπου χρόνια.

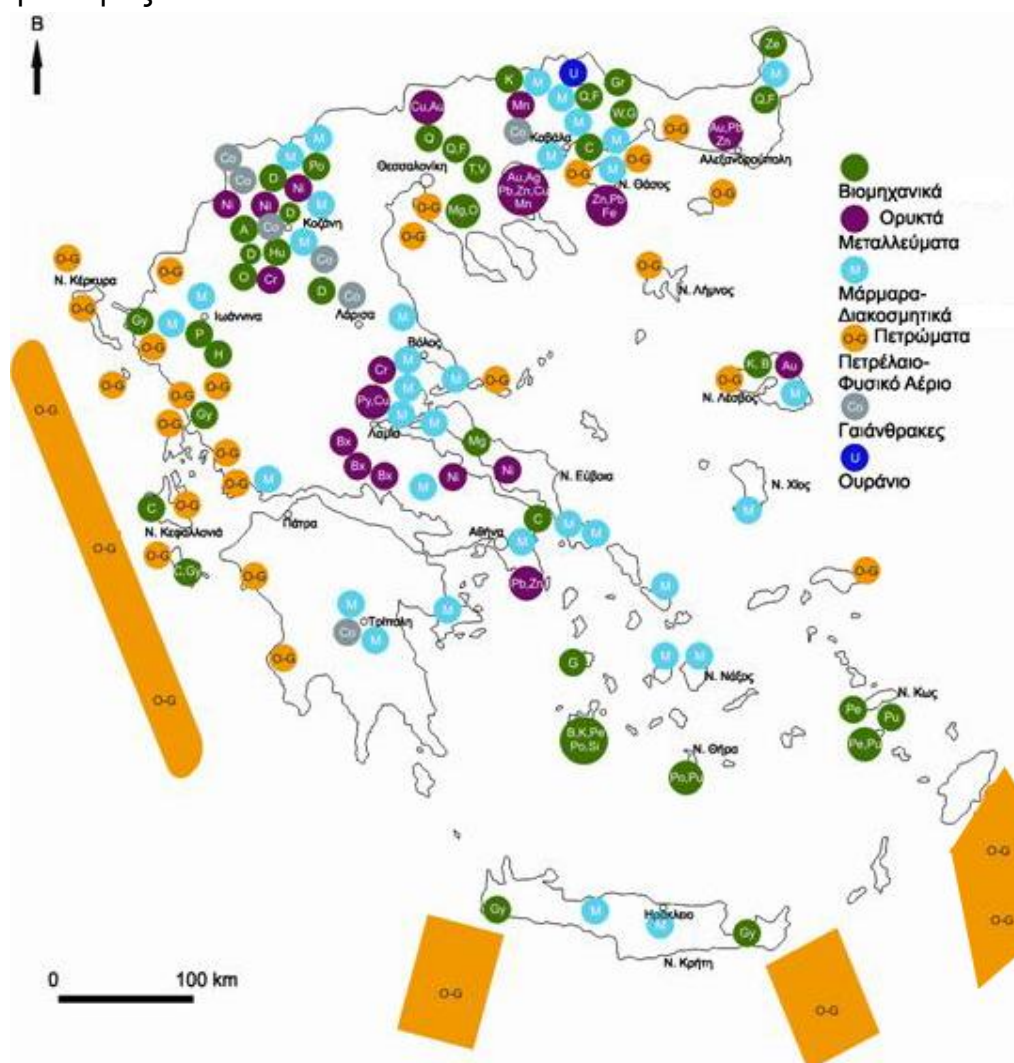
Είναι αξιοσημείωτο ότι οι πλούσιες χώρες (δηλ. το 20% του πληθυσμού της Γης) καταναλώνουν το 60% των ενεργειακών αποθεμάτων, ενώ οι υπόλοιπες χώρες (το 80% του πληθυσμού της Γης) καταναλώνουν μόνο το 40% των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη. Όταν όμως οι υπανάπτυκτες χώρες αναπτυχθούν και φθάσουν το μέσο επίπεδο ανάπτυξης των πλουσιότερων χωρών, η απαιτούμενη ενέργεια για τον πληθυσμό της Γης δε θα είναι αρκετή και η μόλυνση του περιβάλλοντος θα φθάσει σε καταστροφικά επίπεδα για όλα τα έμβια όντα.

Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η τεχνολογική ανάπτυξη, αύξησαν τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας. Οι ενεργειακές αυτές απαιτήσεις καλύπτονται κατά 85% από το διαθέσιμο ορυκτό πλούτο ο οποίος δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμος σε κάθε χώρα, αλλά σε μια μειοψηφία χωρών, ενώ οι υπόλοιπες πρέπει να κάνουν εισαγωγή. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί έντονες διακυμάνσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων και οδηγεί στην οικονομική και πολιτική εξάρτηση από τις προμηθεύτριες χώρες των χωρών που εισάγουν καύσιμα ενώ η χρήση των ορυκτών καυσίμων προκαλεί δυσμενέστερες συνέπειες στα οικοσυστήματα, στην υγεία και γενικότερα στη διαβίωση του ανθρώπου.


1.2 Συμβατικοί ενεργειακοί πόροι της Ελλάδας

Το ενεργειακό πρόβλημα στην Ελλάδα είναι έντονο κι επηρεάζει άμεσα την εθνική οικονομία λόγω της εξάρτησης της χώρας από την εισαγόμενη ή μη ανανεώσιμη ενέργεια και της χαμηλής απόδοσης του ενεργειακού τομέα. Επιπρόσθετα, η υψηλή εξάρτηση της ελληνικής κοινωνίας από τα συμβατικά καύσιμα (πετρέλαιο, λιγνίτη), που αποτελούν και τα πλέον ρυπογόνα, καθιστούν την ενεργειακή πολιτική της Ελλάδας μη φιλική προς το περιβάλλον.

Στη βιομηχανία, το 50 % των ενεργειακών αναγκών καλύπτεται από πετρέλαιο [3]. Στον οικιακό και τριτογενή τομέα, η ηλεκτρική ενέργεια καλύπτει το 37% των καταναλωτικών αναγκών, τα προϊόντα πετρελαίου το 51% και η βιομάζα το 12%. Στις μεταφορές το 97,7% του συνόλου της ενέργειας καλύπτεται από προϊόντα πετρελαίου και το υπόλοιπο καλύπτεται με ηλεκτρική ενέργεια κι ένα πολύ μικρό ποσοστό από υγραέριο για την κίνηση ενός πολύ μικρού αριθμού ταξί. Τα τελευταία χρόνια εξαπλώνεται η χρήση του φυσικού αερίου στη βιομηχανία και σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας.



Εικόνα 2. Ορυκτός πλούτος της Ελλάδας [2]



Βασική πλουτοπαραγωγική πηγή της χώρας μας είναι ο λιγνίτης. Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, της Φλώρινας και του Αμύνταιου, της Δράμας, της Ελασσόνας και στην Πελοπόννησο (περιοχή Μεγαλόπολης). Υπάρχει, επίσης, μεγάλο κοίτασμα τύρφης στους Φιλίππους της Ανατολικής Μακεδονίας. Τα παραπάνω κοιτάσματα, με βάση τα υπάρχοντα αποθέματα και τις αυξανόμενες καταναλωτικές ανάγκες μας θα επαρκέσουν για άλλα 60 ως 100 χρόνια περίπου.

Εκμεταλλεύσιμα πετρελαϊκά κοιτάσματα υπάρχουν στη Θάσο (περιοχή Πρίνου), που όμως καλύπτουν ένα πολύ μικρό ποσοστό των ενεργειακών αναγκών μας. Το μεγαλύτερο μέρος των κοιτασμάτων αργού πετρελαίου στον Πρίνο, καθώς και το ανάλογο κοίτασμα φυσικού αερίου νότια της Καβάλας θεωρείται ότι έχει αντληθεί. Τέλος, η χώρα μας διαθέτει βεβαιωμένα αποθέματα ουρανίου στο Παρανέστι Δράμας. Συγκεντρώσεις ουρανίου υπάρχουν, επίσης, σε λιγνίτες, αργίλους και φωσφορικά κοιτάσματα που όμως δε θεωρούνται σήμερα τεχνικοοικονομικά απολήψιμα.

1.3 Η χρήση της ηλιακής ενέργειας ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα και η εξέλιξη της βιομηχανικής υποδομής την τελευταία δεκαετία

Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό σε ΑΠΕ, αλλά δυστυχώς μένει ανεκμετάλλευτο. Η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική κατανάλωση ενέργειας περιορίζεται περίπου στο 6%. Το υπάρχον ηλιακό δυναμικό εκτιμάται ότι μπορεί να καλύψει το ένα τρίτο των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Τα τελευταία χρόνια ενθαρρύνεται η εκμετάλλευση της ηλιακής θερμικής ενέργειας και μέχρι σήμερα πολλοί κρατικοί φορείς, βιομηχανίες, τουριστικές μονάδες και πλήθος μικρών και μεσαίων εταιρειών έχουν δείξει ενδιαφέρον για τη χρήση φωτοβολταϊκής ενέργειας.

Στη χώρα λειτούργησαν πέντε μονάδες παραγωγής φωτοβολταϊκών πάνελ [4], για να τροφοδοτούν την αγορά με τον κατάλληλο εξοπλισμό, καθώς και μια μονάδα επεξεργασίας πυριτίου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πάνελ, σύμφωνα με τα πρόσφατα απολογιστικά στοιχεία του Συνδέσμου Εταιρειών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ). Ωστόσο, η ανάπτυξή της δεν είναι αυτή που θα έπρεπε, γιατί το κόστος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι αρκετά υψηλό. Αυτό λειτουργεί αποτρεπτικά, ειδικά στην περίπτωση που ασχολούνται με τα οικιακά και τα άτομα που σχεδιάζουν μια στροφή προς την ηλιακή ενέργεια.

Τα εν λόγω εργοστάσια παρήγαγαν ετήσια δυναμικότητα 51 MW το 2010, το ένα τρίτο των οποίων εξήχθη σε Γερμανία, Ισπανία, Ιταλία, και άλλες χώρες, ενώ παράλληλα έδωσαν δουλειά σε περίπου 800 εργαζόμενους. Τα πέντε αυτά εργοστάσια, είναι οι μονάδες της *Heliosphera* στην Τρίπολη με παραγωγή πέρυσι 24 MWp¹⁷, της *Solar Cells Hellas* σε Πάτρα και Θήβα (10 MWp), της *Silcio-Piritium* στην

¹⁷ Μονάδα μέτρησης στη φωτοβολταϊκή βιομηχανία, Mega Watt peak σε ιδανικές συνθήκες μέτρησης



Πάτρα (7,76 MWp), καθώς επίσης των *Exel Group* και *Stel Solar* στο Κιλκίς, (με 8 MWp και 1,3 MWp αντίστοιχα).

Ανά κατηγορία προϊόντων, το 2010 τα εργοστάσια αυτά εξήγαγαν 40 MWp wafers¹⁸, MWp, 48 MWp κυψέλες, και 19 MWp φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αλλά και στον τομέα των βάσεων εγκατάστασης σημειώνεται σημαντική ανάπτυξη, με πιο χαρακτηριστική περίπτωση εξαγωγικής εταιρείας την *Mechatron*¹⁹, που θεωρείται ηγέτης στο χώρο εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας στην ελληνική αγορά, και, πέραν της Βαλκανικής, έχει ανοίξει ήδη τις πόρτες απαιτητικών αγορών όπως η Γερμανία και η Γαλλία.

Σε επίπεδο απασχόλησης, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΣΕΦ, στο τέλος του 2010 είχαν δημιουργηθεί στον κλάδο των φωτοβολταϊκών 4.250 ισοδύναμες θέσεις πλήρους απασχόλησης (ο λόγος που χρησιμοποιείται ο όρος είναι ότι αρκετές θέσεις στον κλάδο είναι ημιαπασχόλησης). Σημειωτέων ότι μια ισοδύναμη θέση πλήρους απασχόλησης αντιστοιχεί σε 1.840 εργατώρες ετησίως.

Από τα ανωτέρω εργοστάσια το *Heliosphera* έκλεισε το 2012 λόγω οικονομικών εκκρεμοτήτων, οι δύο γραμμές παραγωγής της *Silcio-Piritium* πέρασαν σε τουρκικά συμφέροντα το 2018 με τη μία να μεταφέρεται στην περιοχή Ντιλόβασι της Κωνσταντινούπολης και την άλλη να παραμένει στην Πάτρα μέχρι το 2015, οπότε και διεκόπη η λειτουργία της ενώ η *Exel Group* πλέον κατασκευάζει υψηλής ποιότητας ολοκληρωμένα συστήματα στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο για εδάφη (διαμορφωμένα ή επικλινή) όσο και για οροφές (επίπεδες ή επικλινείς). Ωστόσο, τα λειτουργικά σήμερα εργοστάσια, αντιμετωπίζουν προβλήματα ζωτικής σημασίας με κυρίαρχο αυτό της άνισης μάχης που δίδουν καθημερινά προκειμένου να αντιμετωπίσουν τον έντονο ανταγωνισμό που δέχονται κυρίως από τις αντίστοιχες Κινέζικες βιομηχανίες.

Το πρόβλημα της «επιδρομής των Κινέζων» [4] έχει απασχολήσει και άλλα Κράτη, τα οποία όμως έλαβαν εγκαίρως σοβαρά μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος και κατ' επέκταση για τη στήριξη και ενδυνάμωση της εγχώριας παραγωγής. Ενδεικτικά, στον πρόσφατο νόμο που ψηφίστηκε στην Ιταλία προβλέπεται επαύξηση κατά 10% στο «Feed in Tariff²⁰» εάν τουλάχιστον το 60% του κόστους της επένδυσης για τη δημιουργία ενός Φωτοβολταϊκού Πάρκου αφορά στη προμήθεια εξοπλισμού που παράχθηκε εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Περαιτέρω, η Ιταλική ENEI προκειμένου να ανακοπεί η «επιδρομή των Κινέζων» και να αποφευχθούν οι διαγωνισμοί για τη προμήθεια φωτοβολταϊκού εξοπλισμού συνέπραξε με ιδιώτες και αυτή τη στιγμή κατασκευάζει στην Ιταλία μια υπερσύγχρονη μονάδα

¹⁸ Επίπεδη επιφάνεια (λεπτό υμένιο) κρυσταλλικού πυριτίου (ως ημιαγωγός) που λειτουργεί ως υπόστρωμα κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων φωτοβολταϊκών με εξαιρετικά υψηλή καθαρότητα (99,99999999%)

¹⁹ Προμηθευτής εξοπλισμού ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα

²⁰ Πολιτικοοικονομικός μηχανισμός σχεδιασμένος να επιταχύνει την επένδυση σε τεχνολογίες ΑΠΕ προσφέροντας μακροπρόθεσμα συμβόλαια σε παραγωγικούς φορείς

παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων. Πέραν της Ιταλίας, αντίστοιχα μέτρα ελήφθησαν και στη γειτονική μας Τουρκία, όπου πλέον δίδεται αυξημένο «Feed in Tariff» στα Φωτοβολταϊκά Πάρκα που κατασκευάζονται με εξοπλισμό που παράχθηκε στη Τουρκία.

Στην Ελλάδα ωστόσο, όπου η ανάγκη στήριξης και ενδυνάμωσης της εγχώριας παραγωγής είναι επιβεβλημένη περισσότερο από ποτέ, η έμπρακτη υποστήριξη της Πολιτείας είναι μέχρι στιγμής ανύπαρκτη με αποτέλεσμα οι Ελληνικές βιομηχανικές μονάδες παραγωγής φωτοβολταϊκού εξοπλισμού να οδηγούνται σε παρακμή και να απειλείται η βιωσιμότητά τους. Στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα Ελληνικά εργοστάσια πρέπει επίσης να προστεθεί και ο βραδύς ρυθμός υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών, Κι αυτό δεν οφείλεται στη ΡΑΕ²¹, η οποία σημειωτέων έχει παρουσιάσει αξιοσημείωτη ενεργοποίηση κατά τους τελευταίους δεκαπέντε μήνες, αλλά στην απροθυμία των Τραπεζών να χρηματοδοτήσουν τις επενδύσεις με αποτέλεσμα η πλειοψηφία των έργων να μένει δυστυχώς στα χαρτιά.

1.4 Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών το 2019 και σταδιακή άνοδος

Το 2019 η αγορά έδειξε τα πρώτα ουσιαστικά σημάδια ανάκαμψης [5], καθώς η τάση είναι να επανέλθει σύντομα σε μεγέθη της τάξης των εκατοντάδων μεγαβάτ ετησίως. Το 2019, η αγορά των συστημάτων αυτοπαραγωγής παρουσίασε μια αύξηση 3,1% σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά, παραμένοντας σε επίπεδα σημαντικά χαμηλότερα του δυναμικού της χώρας. Για ακόμη μια χρονιά, τα φωτοβολταϊκά κάλυψαν περίπου το 7% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια, φέρνοντας την Ελλάδα στην τέταρτη θέση διεθνώς (μετά από Ονδούρα, Ιταλία και Γερμανία) σε ότι αφορά στη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

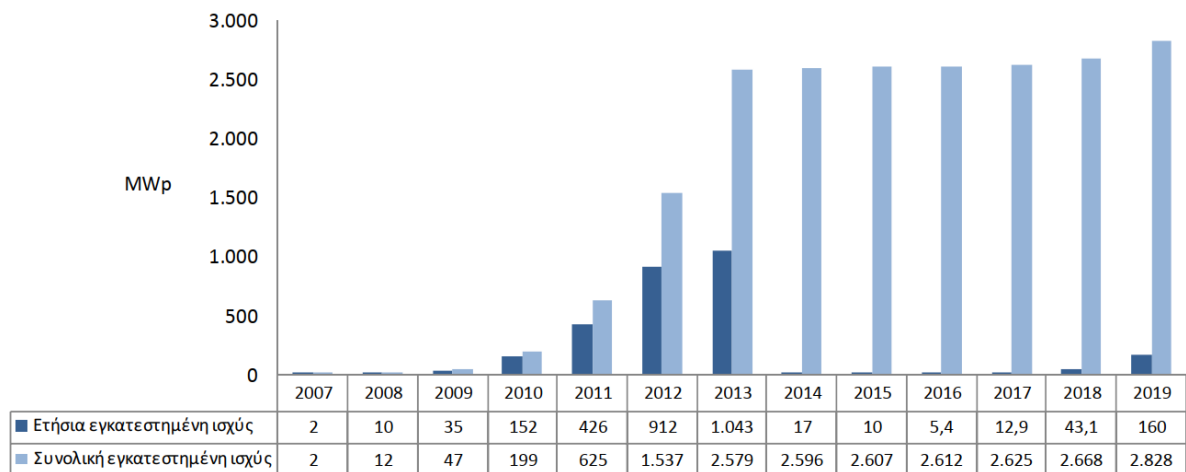
Διασυνδεδεμένα συστήματα	MWp
Νέα εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών το 2019	160
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ως και το 2019	2.828

Εικόνα 3. Διασυνδεδεμένα συστήματα [3]

Η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς σε σχέση με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ φαίνεται στην ελληνική αγορά Φ/Β²² στο παρακάτω ραβδόγραμμα.

²¹ Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

²² Φωτοβολταϊκό



Εικόνα 4. Ελληνική Αγορά Φωτοβολταϊκών [4]

Αναλυτικά, οι νέες εγκαταστάσεις που διασυνδέθηκαν το 2019 φαίνονται στον πίνακα:


Νέες εγκαταστάσεις που διασυνδέθηκαν		Εντός του 2019	
		Αριθμός συστημάτων	Ισχύς (MWp)
Χαμηλή Τάση	Φωτοβολταϊκά πάρκα	38	3,61
	Φωτοβολταϊκά Ειδικού Προγράμματος (έληξε 31.12.2019)	17	0,16
	Φωτοβολταϊκά Net Metering	344	4,98
	Σύνολο	399	8,76
Μέση Τάση	Φωτοβολταϊκά πάρκα	208	146,68
	Φωτοβολταϊκά Net Metering	18	4,59
	Σύνολο	226	151,27
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ		625	160

Εικόνα 5. Νέες Εγκαταστάσεις Φ/Β [5]

Ενώ σε ότι αφορά ειδικότερα στα συστήματα αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό, η εξέλιξή τους έχει ως εξής:

Έτος	Αριθμός νέων λειτουργούντων συστημάτων αυτοπαραγωγής	Ισχύς (kWp)	Μέση ισχύς ανά σύστημα (kWp)
2015	116	1.821	15,7
2016	447	5.686	12,7
2017	360	6.490	18,0
2018	420	9.281	22,1
2019	362	9.570	26,4
Σύνολο	1.705	32.848	19,3

Εικόνα 6. Συστήματα αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό (net metering) [6]



Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ως ενεργειακός συμψηφισμός νοείται ο συμψηφισμός της παραγόμενης από το Φ/Β σύστημα ενέργειας με την καταναλισκόμενη στις εγκαταστάσεις του αυτοπαραγωγού, ο οποίος διενεργείται σε ετήσια βάση.

Επειδή ο ενεργειακός συμψηφισμός πραγματοποιείται σε ετήσια βάση και τυχόν πλεόνασμα παραγόμενης ενέργειας μετά τον ετήσιο συμψηφισμό δεν αποζημιώνεται, η ετήσια παραγόμενη από το Φ/Β σύστημα ενέργεια δεν ενδείκνυται να υπερβαίνει τη συνολική ετήσια κατανάλωση, κατά την έννοια ότι δεν προκύπτει κάποιο όφελος για τον αυτοπαραγωγό. Επομένως, η ισχύς του Φ/Β συστήματος θα πρέπει να επιλέγεται με βάση τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας

Ο ήλιος είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί είτε άμεσα είτε έμμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκμεταλλεύονται απευθείας την ηλιακή ενέργεια μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρική εξαιτίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υψηλό δυναμικό της Ελλάδας καθιστά την αξιοποίηση της παραπάνω τεχνολογίας ιδιαίτερα αποδοτική. Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού είτε με θερμικές (παραγωγή θερμότητας για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για κίνηση τουρμπινών) είτε με φωτοβολταϊκές εφαρμογές.

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, αυτή διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών:

- Παθητικά ηλιακά συστήματα
 - Ενεργητικά ή Ηλιοθερμικά συστήματα
 - Φωτοβολταϊκά συστήματα
- Εκμετάλλευση θερμότητας
Φ/Β εφαρμογές



Εικόνα 7. Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας

Ως ηλιακή ενέργεια ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμότητα που φτάνουν στην επιφάνεια της γης από τον ήλιο και η οποία αξιοποιείται από τον άνθρωπο μέσω διαρκώς εξελισσόμενων τεχνολογιών όπως ηλιακή θέρμανση, φωτοβολταϊσμό, ηλιακή θερμική ενέργεια, ηλιακή αρχιτεκτονική και τεχνητή φωτοσύνθεση. Θεωρείται η βασικότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί είναι

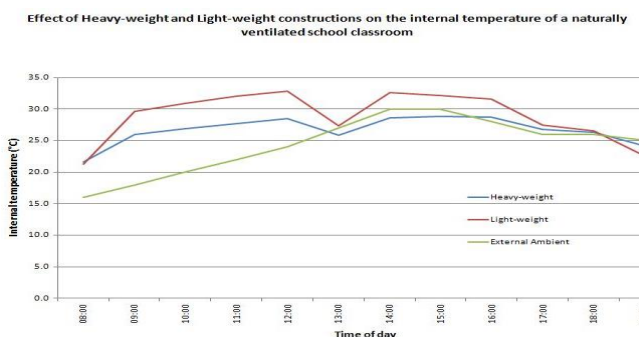
πρακτικά ανεξάντλητη και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευσή της διακρίνονται σε ενεργητικές και παθητικές, ανάλογα με το πώς τη συλλέγουν, τη διοχετεύουν ή τη μετατρέπουν σε άλλη μορφή ενέργειας.

Ενεργητικές τεχνικές είναι αυτές των Φ/Β, της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας και της θέρμανσης του νερού από την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Ως συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP, concentrated solar power) ονομάζουμε την ενέργεια που παράγεται από συστήματα που χρησιμοποιούν καθρέπτες, φακούς και την τεχνική των αντανάκλασεων ώστε να συγκεντρώνουν το ηλιακό φως σε ένα συλλέκτη/δέκτη. Από εκεί ο ηλεκτρισμός παράγεται από τη μετατροπή του φωτός σε θερμότητα με μια ατμομηχανή (τουρμπίνα κυρίως) συνδεδεμένη με μια ηλεκτρική γεννήτρια ή ενεργοποιώντας θερμοχημικές αντιδράσεις.



Εικόνα 8. Εφαρμογή συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας [7]

Οι παθητικές τεχνικές περιλαμβάνουν την εκμετάλλευση του προσανατολισμού της εγκατάστασης, τη χρήση υλικών με επιθυμητή θερμική μάζα²³, τις ιδιότητες διάχυσης του φωτός και το σχεδιασμό χώρων που έχουν τη φυσική ικανότητα μεταφοράς και ροής αέριων μαζών.



Εικόνα 9. Επίδραση Φ/Β εγκατάστασης στην εσωτερική θερμοκρασία αεριζόμενης αίθουσας [8]

Οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις του ανθρώπου στην καθημερινή ζωή, στη βιομηχανία, τη γεωργία, την αλιεία, την εργασία, τις μεταφορές, τη διαβίωση, τη βελτίωση της ποιότητας ζωής οδηγούν και σε μεγαλύτερες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Το πολύ μεγάλο μέγεθος της ηλιακής ενέργειας την κάνει εξαιρετικά δελεαστική πηγή ηλεκτρισμού. Το αναπτυξιακό πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών κατά την εκτίμηση ενέργειας το 2000, διαπίστωσε ότι το ετήσιο δυναμικό της ηλιακής ενέργειας ήταν 1575000 ως 49837000 EJ²⁴, ποσό πολύ μεγαλύτερο από την παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση το 2012 που ήταν 559,8 EJ.

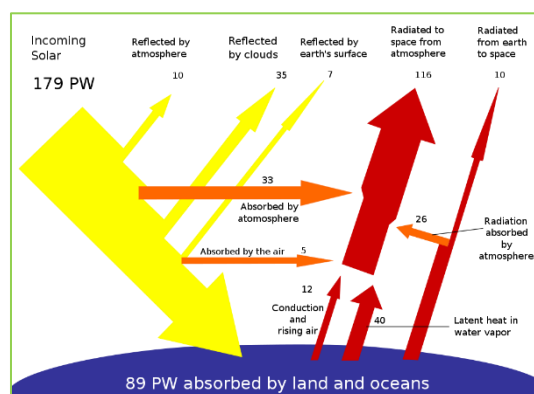
²³ Ως θερμική μάζα καλούμε τη χαρακτηριστική ιδιότητα της μάζας ενός κτιρίου να αποθηκεύει θερμότητα και να αντιστέκεται στις θερμοκρασιακές μεταβολές.

²⁴ (EJ) Exajoule ήτοι 10^{18} Joule

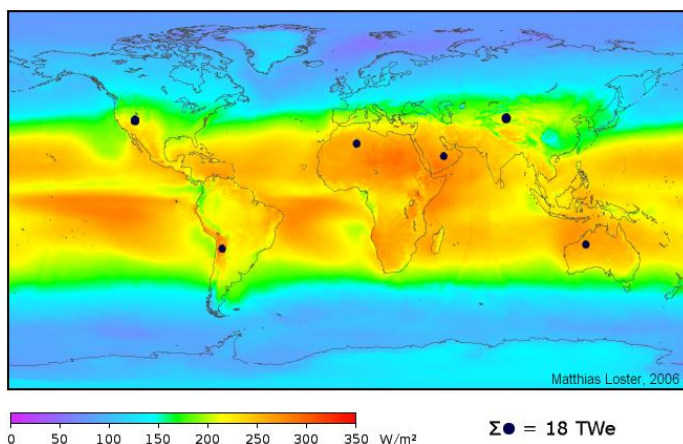
Το 2011, η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας δήλωσε στο πρακτικό της ότι η ανάπτυξη οικονομικών τεχνολογιών, ανεξάντλητης και καθαρής ηλιακής ενέργειας θα έχουν τεράστια μακροπρόθεσμα οφέλη. Η ασφάλεια των χωρών θα εξασφαλιστεί μέσω εγχώριων και ανεξάρτητων από εισαγωγή πηγών, θα αυξηθεί η βιωσιμότητά τους, θα μειωθεί η μόλυνση του περιβάλλοντος και το κόστος μετριασμού της υπερθέρμανσης του πλανήτη, θα προστατευτεί η χλωρίδα και η πανίδα του οικοσυστήματος και θα ελαττωθεί η τιμή των καυσίμων που προέρχονται από συμβατικές και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επομένως το επιπλέον κόστος για το κίνητρο πρόωρης ανάπτυξης πρέπει να αξιοποιηθεί και να μοιραστεί ορθολογιστικά.

2.2 Δυναμικό

Η Γη λαμβάνει ανά πάσα στιγμή 179 PetaWatts εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Περίπου το 30% ανακλάται στο διάστημα ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από τους ωκεανούς, την ξηρά και τα σύννεφα. Το φάσμα του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της Γης διαμοιράζεται στο ορατό και το σχεδόν υπέρυθρο εύρος, ενώ ένα μικρό ποσοστό αφορά το σχεδόν υπεριώδες. Το μεγαλύτερο μέρος του ανθρώπινου πληθυσμού διαβιώνει σε επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας $150 - 300 \text{ watt/m}^2$ ή $3.5 - 7 \text{ KWh/m}^2$ την ημέρα. Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την ξηρά και τους ωκεανούς εκτιμάται στο 71% ενώ το υπόλοιπο 29% απορροφάται από την ατμόσφαιρα και αυτή η απορρόφηση διατηρεί μία μέση θερμοκρασία του πλανήτη στους 14°C . Η συνολική ετήσια ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από την ατμόσφαιρα, την ξηρά και τους ωκεανούς της Γης είναι περίπου 3850000 EJ. Το 2002 αυτή η ποσότητα σε μία ώρα



Εικόνα 10. Ακτινοβολούμενη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία [9]



Εικόνα 11. Μέση ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης [10]

ήταν παραπάνω από τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλανήτη σε ένα έτος, δεδομένου ότι η ετήσια διαδικασία της φωτοσύνθεσης απαιτεί 3000 EJ για τη βιομάζα. Το ποσό λοιπόν της ηλιακής ενέργειας που φτάνει την επιφάνεια του πλανήτη, αν εκμεταλλευτεί σωστά είναι διπλάσιο από τη μέγιστη ενέργεια που μπορούμε να παράξουμε από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο

και ουράνιο) αθροιστικά σε ετήσια βάση.

Το δυναμικό αυτό διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση, χρονική περίοδος, νέφωση και διαθέσιμη επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ενέργειας. Οι περιοχές κοντά στον Ισημερινό δέχονται μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ενέργειας. Με τη χρήση Φ/Β που «ακολουθούν» τον ήλιο οι περιοχές που βρίσκονται μακριά απ' τον Ισημερινό μπορούν να αντισταθμίσουν τις απώλειες σε σχέσεις με τις εγγύτερες σ' αυτόν. Επιπλέον η χρονική περίοδος που λαμβάνουμε την ηλιακή ακτινοβολία έχει εξίσου μεγάλη σημασία διότι κατά τη νύχτα αυτή είναι πολύ χαμηλή ενώ η ύπαρξη συννεφιάς προφανώς επηρεάζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που λαμβάνουν τα πάνελ. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον άνθρωπο απαιτεί συγκεκριμένες εγκαταστάσεις που πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα γεωγραφικά κριτήρια, αντιλαμβανόμαστε ότι αυτό έχει επιπτώσεις στο ποσό της ενέργειας που πρακτικά μπορούμε να παράξουμε.

Εφαρμόζοντας αυτούς τους περιορισμούς, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας που εκπονήθηκε το 2000 από το αναπτυξιακό πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών, το Διεθνές Συμβούλιο Ενέργειας και το Αμερικάνικο Υπουργείο Οικονομικών.

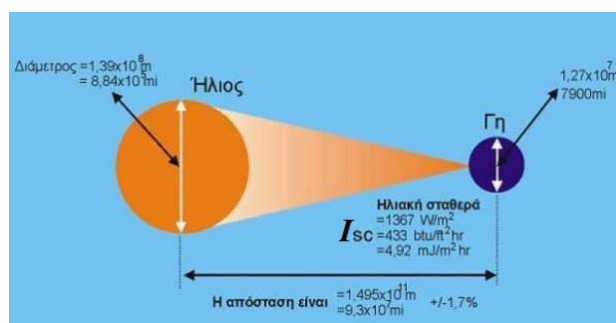
Ετήσιο δυναμικό ηλιακής ενέργειας ανά περιοχή (ExaJoules)											
Περιοχή	Βόρεια Αμερική	Λατινική Αμερική και Καραϊβική	Δυτική Ευρώπη	Κεντρική και Ανατολική	Ρωσία	Μέση Ανατολή και Βόρεια	Κεντρική Αφρική	Δυτική Ασία	Νότια Ασία	Κεντρική Ασία	Περιοχές του Ειρηνικού
Ελάχιστο	181,1	112,6	25,1	4,5	199,3	412,4	371,9	41,0	38,8	115,5	72,6
Μέγιστο	7,41	3,385	914	154	8,655	11,06	9,528	994	1,339	4,135	2,263

Εικόνα 12. Ετήσιο δυναμικό ηλιακής ενέργειας [11]

Οι εκτιμήσεις έδειξαν ότι το δυναμικό της ηλιακής ενέργειας που είναι εκμεταλλεύσιμη ξεκινά από 1600 και φτάνει τα 49800 EJ (4.4×10^{14} ως 1.4×10^{16} KWh) ανά έτος. Μέχρι το 2050 η ενέργεια αυτή αναμένεται να είναι η μεγαλύτερη πηγή ηλεκτρισμού, με τα Φ/Β και τα συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας να αποτελούν το 16% και το 11% αντίστοιχα της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης.

2.3 Υπολογίζοντας την ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της Γης

Ο ήλιος, όπως προαναφέραμε είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να παράγει σταθερή ισχύ με ένταση επιφάνειας της τάξεως των $6,33 \times 10^7$ Watt/m² (ποσότητα που ποικίλλει, ανάλογα με την ύπαρξη ηλιακών κηλίδων και άλλων παραγόντων). Όσο οι ηλιακές ακτίνες ταξιδεύουν στο



Εικόνα 13. Υπολογισμός ηλιακής σταθεράς [12]

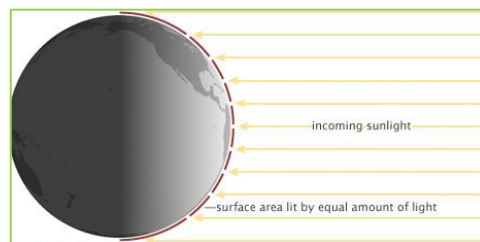
διάστημα η έντασή τους μειώνεται, ως αποτέλεσμα της γενικής σχέσης $intensity \propto \frac{1}{d^2}$.

Η μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο νοητό άκρο της ατμόσφαιρας καλείται ηλιακά σταθερά I_{sc} . Παρόλο που αυτή η ποσότητα ονομάζεται σταθερά, η τιμή της έχει απόκλιση περίπου 7% ανάμεσα σε δύο ημερομηνίες, την 4 Ιανουαρίου (περιήλιο²⁵) και την 4 Ιουλίου (αφήλιο²⁶) κάθε έτους. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μία μέση τιμή η οποία είναι 1367 Watt/m^2 . Η τιμή αυτή προκύπτει από τη σχέση:

$$I_{sc} = \left(\frac{6.33 \cdot 10^{27} \text{ W}}{4 \cdot \pi^2} \right) \cdot \frac{\text{επιφάνεια του ήλιου}}{(\text{απόσταση Γης απ' τον Ήλιο})^2} \quad (2.1)$$

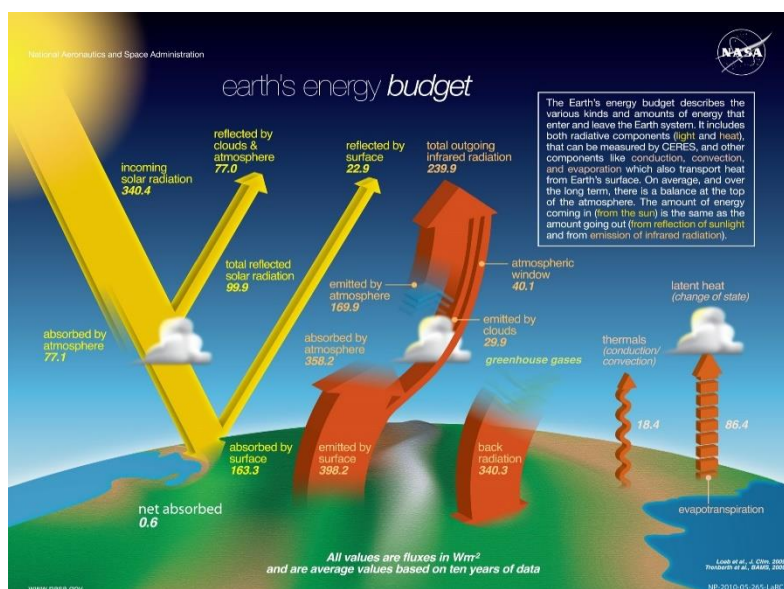
Επειδή όμως ανά πάσα στιγμή η Γη φαίνεται κατά το ήμισυ από τον ήλιο (πλην εξαιρέσεων, εκλείψεων κλπ), η πραγματική ακτινοβολία που λαμβάνουμε είναι η $\frac{I_{sc}}{2}$.

Επιπλέον, η μέγιστη ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει μια επιφάνεια είναι αυτή που προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια. Επειδή το σχήμα της Γης είναι σφαιρικό, μόνο τα μέρη κοντά στον Ισημερινό πλησιάζουν αυτή τη γωνία πρόσπτωσης (90°), ενώ τα υπόλοιπα λαμβάνουν διαθλώμενη ακτινοβολία. Με τη γωνία αυτή να μειώνεται συνεχώς όσο απομακρυνόμαστε απ' τον Ισημερινό, μειώνεται ταυτόχρονα και το ποσό της λαμβανόμενης ακτινοβολίας, οπότε η τιμή της I_{sc} μειώνεται κι άλλο με την τελική της τιμή να φτάνει τη $I'_{sc} = 340 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις απώλειες λόγω διάθλασης και απορρόφησης.



Εικόνα 14. Ένταση ηλιακού φωτός ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος [13]

Εδώ πρέπει να αναφερθεί το Γήινο Ενεργειακό κέρδος (earth energy budget), το οποίο είναι η ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που φτάνει στη Γη και αυτής που χάνεται από το Γήινο οικοσύστημα προς το διάστημα αφού διανεμηθεί στα συστατικά του κλιματικού συστήματος του πλανήτη (νερό, πάγος, ατμόσφαιρα, ξηρά – φλοιός, έμβια όντα). Αναλογιζόμενη



Εικόνα 15. Ενεργειακό κέρδος από ηλιακή ακτινοβολία [14]

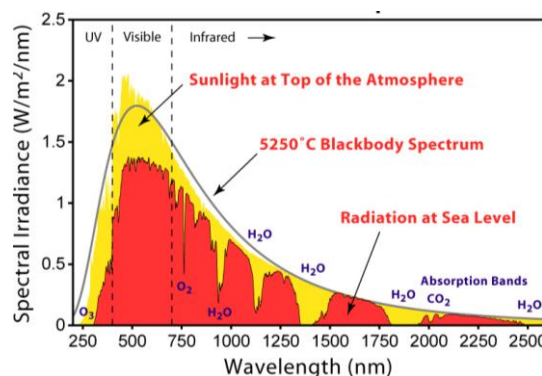
²⁵ **Περιήλιο** είναι το σημείο της τροχιάς ενός σώματος (π.χ. ενός πλανήτη) του Ηλιακού Συστήματος που βρίσκεται στη μικρότερη απόσταση από τον Ήλιο

²⁶ **Αφήλιο** είναι το σημείο της τροχιάς ενός σώματος (π.χ. ενός πλανήτη) του Ηλιακού Συστήματος που βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από τον Ήλιο

αυτό το κέρδος, λόγω απωλειών, μπορούμε να πούμε ότι το 70% της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην ατμόσφαιρα λαμβάνεται από την επιφάνεια της Γης και ισοδυναμεί με

$$H = 0.7 * 340 \left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \right) = 238 \left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \right)$$

Η ακριβής ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη δεν είναι ακριβώς αυτή, κι αυτό γιατί σε μια καθαρή μέρα χωρίς σύννεφα, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ιδανικό σημείο μέγιστης λήψης ακτινοβολίας από τη Γη, έχουμε απώλειες 16% λόγω απορρόφησης και 6% λόγω διάθλασης από σωματίδια (CO₂, O₂, O₃, H₂O με τη μορφή υδρατμών) στην ατμόσφαιρά της. Αυτό το 22% θα είναι ακόμα μεγαλύτερο επειδή ο ήλιος δε θα βρίσκεται διαρκώς σε ιδεατή θέση (ανώγειο – zenith).



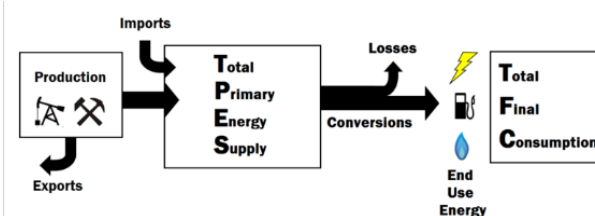
Εικόνα 16. Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας [15]

Για να κανονικοποιήσουμε αυτή τη μέτρηση εισάγουμε την ποσότητα Αέριας Μάζας (AM²⁷) που χρησιμοποιείται για να ορίσουμε το ηλιακό φάσμα σε διαφορετικά ύψη και συνθήκες στη Γη. Ως φάσμα AM0 ορίζουμε την ακτινοβολία έξω απ' την ατμόσφαιρα της Γης και ισούται με 1367 Watt/m², ενώ AM1.5 είναι η κανονική ποσότητα και αναπαριστά ισχύ εντάσεως 1000 Watt/m².

Τιμή AM	Συμβατικές Συνθήκες	Ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας (W/m ²)
AM0	Στο διάστημα, έξω απ' την ατμόσφαιρα	1350
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	1060
AM2	Απόσταση ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880
AM3	Απόσταση ήλιου 70,5° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750


Εικόνα 17. Πρότυπες τιμές AM

Η ποσότητα $1000 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$, ορίζεται ως μονάδα ηλιακής ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται ως μία σταθερά για να ελέγξουμε και να βαθμολογήσουμε την απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών και των ηλιακών πάνελ. Αυτό σημαίνει ότι ένα ηλιακό πάνελ απόδοσης 250 Watt θα αποδώσει τη μέγιστη ισχύ όταν εκτεθεί σε ακτινοβολία



Εικόνα 18. Ενεργειακή ισορροπία [16]

²⁷ Air Mass



εντάσεως $1000 \frac{Watt}{m^2}$ σε ιδανικές συνθήκες. Παρόλο που η αναφερόμενη ποσότητα ενέργειας είναι εξαιρετικά σημαντική, δεν είναι αυτή η πραγματική και αυτή που θα εκμεταλλευθούμε πρακτικά. Οι συννεφιασμένες μέρες, η έλλειψη ενός αποδοτικού μέσου αποθήκευσης, η ιδανική αποδοτικότητα ενός πάνελ να μετατρέψει στο μέγιστο της ικανότητάς του την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική είναι σημαντικοί παράγοντες απωλειών, γι' αυτό είναι απαραίτητο να μελετήσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας.

2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή είναι ενέργεια, όπως προαναφέρθηκε, είναι η κυριότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε σε όλες της περιοχές του κόσμου και είναι διαθέσιμη καθημερινά. Είναι ανεξάντλητη και θα διαρκέσει όσο η ζωή του ήλιου.

Με τη χρήση της μειώνουμε το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, λειτουργούμε τις οικιακές συσκευές με την ενέργεια του ήλιου, εξοικονομούμε από τους περιοδικούς λογαριασμούς ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο του παρόχου και είναι δυνατή η σύνδεση της Φ/Β εγκατάστασής μας με αυτό ώστε να αποζημιωνόμαστε, ανάλογα με την παραγωγή μας (net metering²⁸) παρόλο που αυτό δεν είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή τη θέρμανση (ηλιακοί θερμοσίφωνες) η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών ενώ το κόστος συντήρησης είναι εξαιρετικά χαμηλό. Γενικά είναι μια τεχνολογία που διαρκώς αναπτύσσεται και έχει ισχυρή μελλοντική προοπτική. Οι καινοτομίες στην κβαντική φυσική και τη νανοτεχνολογία μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών πάνελ ώστε να παράγουμε περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια και να συμβάλλουμε σε χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα στον πλανήτη.

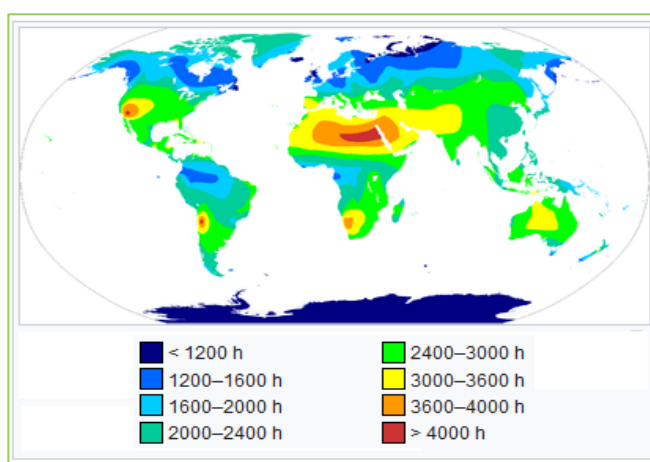
Από την άλλη πλευρά πρέπει να αναφερθεί το υψηλό αρχικό κόστος που περιλαμβάνει την εγκατάσταση όπως τα πάνελ, τον αντιστροφέα (inverter), τους συσσωρευτές και την καλωδίωση. Απαιτεί μεγάλη επιφάνεια εγκατάστασης ώστε να είναι αποδοτική και εξαρτάται κυρίως από τις καιρικές συνθήκες με αποτέλεσμα να απαιτείται ενδελεχής μελέτη πριν την έναρξη της υλοποίησης μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Τέλος, σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας, μία εγκατάσταση συνοδεύεται από έμμεση και μικρή μόλυνση του περιβάλλοντος σχετιζόμενη με την έκλυση τοξικών και επικίνδυνων αερίων κατά την κατασκευή των πάνελ, η οποία είναι όμως αδιαμφισβήτητα πολύ χαμηλότερη από τη μόλυνση που προκαλούν άλλες μορφές ενέργειας.

²⁸ Αυτοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλιακών πάνελ

2.5 Στατιστικά ηλιοφάνειας

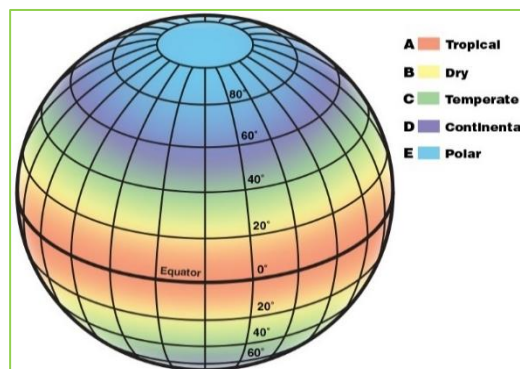
Η διάρκεια ηλιοφάνειας είναι ένας κλιματολογικός δείκτης που μετρά πόσες ώρες σε μια χρονική περίοδο (μέρα ή έτος) ο ήλιος «βλέπει» μια συγκεκριμένη γεωγραφική τοποθεσία και συνήθως εκφράζεται σαν τη μέση τιμή σε μια μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Είναι επίσης γενικός δείκτης νέφωσης μιας περιοχής και μας επιτρέπει να κάνουμε σύγκριση είτε διαφορετικών χρονικών περιόδων ή εποχών είτε διαφορετικών περιοχών. Από τα εξαγόμενα στοιχεία μπορούμε να καταλήξουμε σε σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν την ψυχολογική επιρροή της ηλιακής ακτινοβολίας στον άνθρωπο, τη κατασκευή και τον προσανατολισμό οικισμών και οικιών, την προώθηση του τουρισμού και την εγκατάσταση Φ/Β.

Η ηλιοφάνεια ακολουθεί ένα γεωγραφικό μοτίβο. Στα υποτροπικά γεωγραφικά πλάτη (25° ως 40° βόρεια και νότια) βρίσκονται οι υψηλότερες τιμές ηλιοφάνειας επειδή αυτές βρίσκονται στις ανατολικές πλευρές υποτροπικών αέριων συστημάτων υψηλής πίεσης και σχετίζονται με την κάθοδο μεγάλων όγκων αέριων μαζών από το άνω μέρος της τροπόσφαιρας. Τα πιο ξηρά κλίματα βρίσκονται πλησίον αυτών των πλευρών, προκαλώντας σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες, χαμηλή μεταγωγή (convection)²⁹ και υγρασία και περιορισμένη νέφωση. Τέτοιες περιοχές είναι η βόρεια Αφρική, η νοτιοδυτική Αμερικανική ήπειρος, η δυτική Αυστραλία και η Μέση Ανατολή, όπως φαίνονται στην εικόνα.



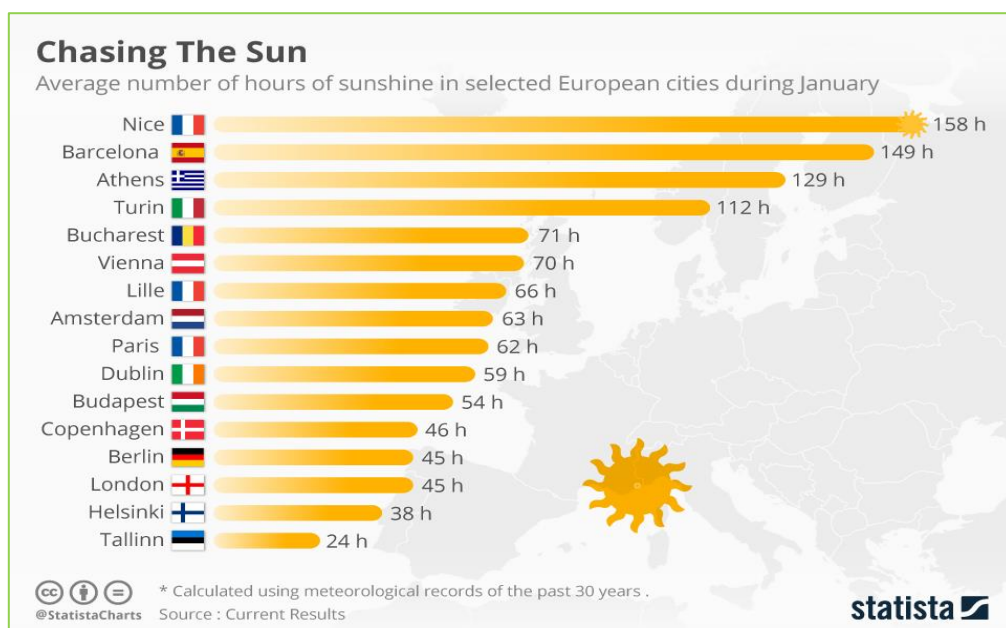
Εικόνα 19. Χάρτης ωρών ηλιοφάνειας ανά έτος [17]

Η Ελλάδα, με γεωγραφικές συντεταγμένες 37° 58' βόρεια του Ισημερινού και 23° 43' ανατολικά (Αθήνα) του πρώτου Μεσημβρινού, βρίσκεται σε ένα εύκρατο κλίμα. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο η Ελλάδα κατέχει την Τρίτη θέση σε ηλιοφάνειας τον Ιανουάριο του 2018 με συνολικό αριθμό 129 ωρών με τη γαλλική Νίκαια να κατέχει την πρώτη θέση με 158 ώρες, τη Βαρκελώνη στη δεύτερη θέση με 149 ώρες και την πρωτεύουσα της Εσθονίας Ταλίν στην τελευταία θέση με 24 ώρες ηλιοφάνειας, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:



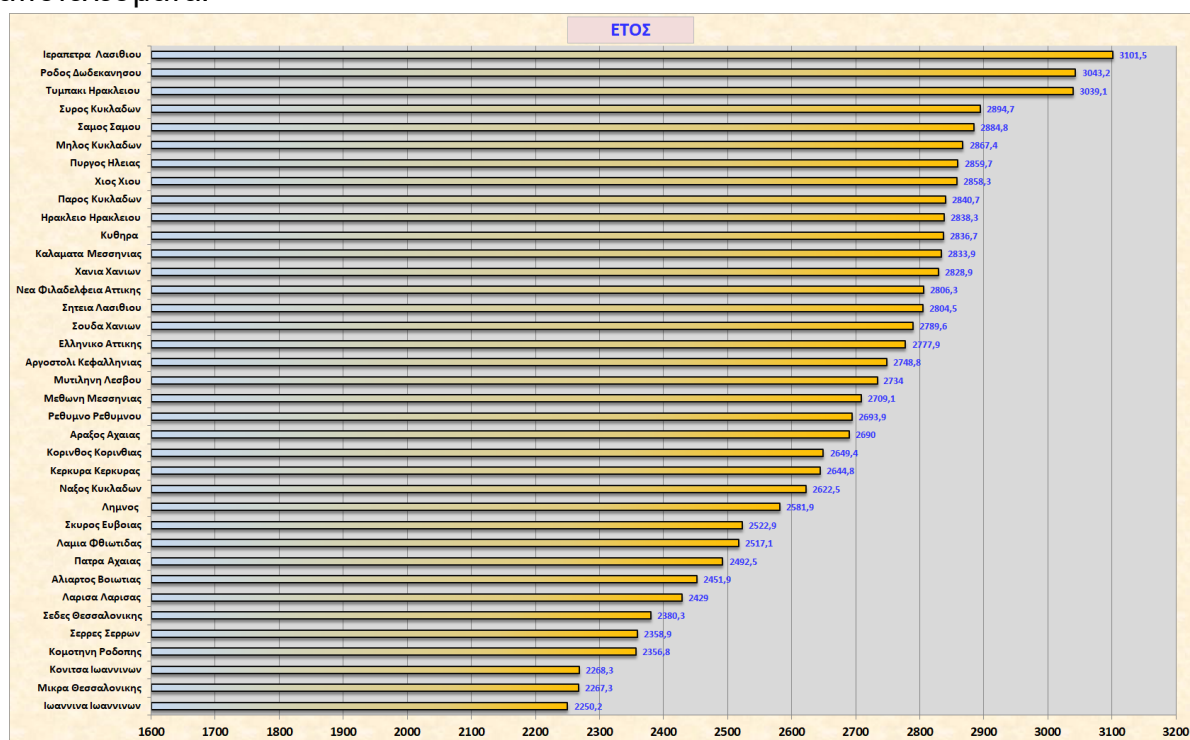
Εικόνα 20. Μοτίβο παγκόσμιας κυκλοφορίας αέριων μαζών του Hadley [18]

²⁹ Η κίνηση των μορίων εντός ενός υγρού ή αερίου εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς.



Εικόνα 21. Ώρες ηλιοφάνειας κατά μέσο όρο σε Ευρωπαϊκές χώρες [19]

Από στατιστικά διάρκειας ηλιοφάνειας (σε ώρες) από 37 σταθμούς της ΕΜΥ³⁰ με ακριβείς μετρήσεις από ηλιογράφους Campbell – Stokes [6] οι οποίες έγιναν την περίοδο 1960-1990 για ελληνικές πόλεις προκύπτουν τα παρακάτω ετήσια αποτελέσματα:



Εικόνα 22. Ώρες ηλιοφάνειας κατά μέσο όρο ανά έτος σε Ελληνικές πόλεις [20]

³⁰ Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία

Βλέπουμε, ένα πολύ γνωστό γεγονός για το κλίμα της Ελλάδας, ότι τα Ιωάννινα, όπως και γενικά η Ήπειρος, έχουν την λιγότερη ηλιοφάνεια πανελλαδικώς για όλο το έτος. Έπειτα έρχεται η Μίκρα στην Θεσσαλονίκη (είτε λόγω κλασικών νεφώσεων, είτε λόγω πολύ συχνών χαμηλών νεφώσεων από στρωματονέφη).

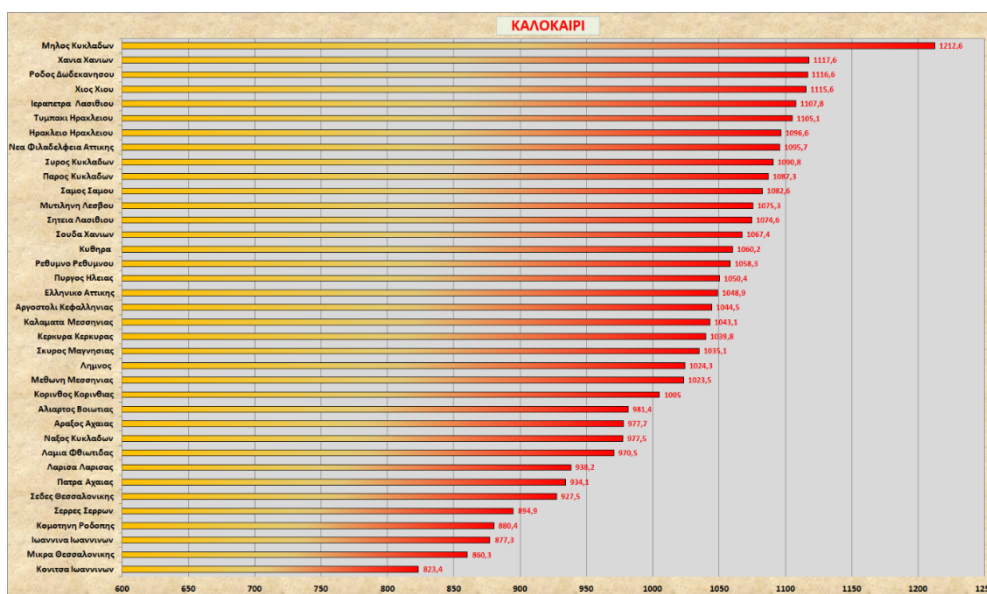
Εντυπωσιακό το γεγονός ότι η Ιεράπετρα και το Τυμπάκι στην Κρήτη καθώς και η Ρόδος ξεπερνούν τις 3000 ώρες ηλιοφάνειας ετησίως. Η μεν θεωρητική μέγιστη τιμή ωρών ηλιοφάνειας (εάν δεν είχε ποτέ συννεφιά δηλαδή) για πέντε πόλεις της Ελλάδας έχει ως εξής:

Πόλη	Ώρες ηλιοφάνειας	Ποσοστό (%) διαθέσιμης ηλιοφάνειας
Ιεράπετρα	4447	70
Ιωάννινα	4453	50,5
Νέα Φιλαδέλφεια	4451	63
Λάρισα	4453	54,6
Μίκρα	4455	50,9

Εικόνα 23. Παράδειγμα ωρών ηλιοφάνειας ανά έτος για 5 ελληνικές πόλεις [21]

Μπορεί μεν, η Ιεράπετρα να έχει λιγότερες ώρες θεωρητικής ηλιοφάνειας από βορειότερες περιοχές, αλλά αυτό οφείλεται στο ότι ανάμεσα στην Εαρινή και Φθινοπωρινή ισημερία, οι βορινότερες περιοχές έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ημέρας ενώ το αντίστροφο συμβαίνει στο υπόλοιπο διάστημα (κατά το χειμώνα) όπου οι βορινότερες περιοχές έχουν μικρότερη διάρκεια ημέρας, ενώ συνολικά στο έτος η διαφορά είναι υπέρ των βορειότερων περιοχών στην διάρκεια ημέρας, όπου η διάρκειά της είναι μεγαλύτερη.

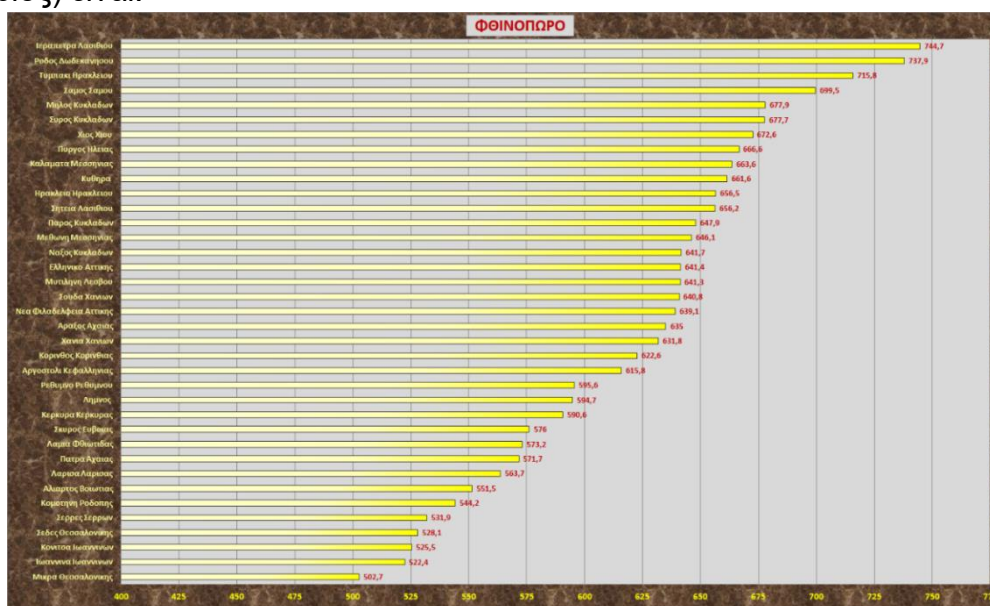
Στις νοτιότερες περιοχές όπου ο ήλιος βρίσκεται ψηλότερα σε κάθε χρονική στιγμή και εποχή, ισχύει ότι η συνολική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται κάθε περιοχή μεγαλώνει όσο πηγαίνουμε προς τα νοτιά. Όσον αφορά το καλοκαίρι (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος) προκύπτουν τα στατιστικά της παρακάτω εικόνας:



Εικόνα 24. Ώρες ηλιοφάνειας κατά το καλοκαίρι σε Ελληνικές πόλεις [22]

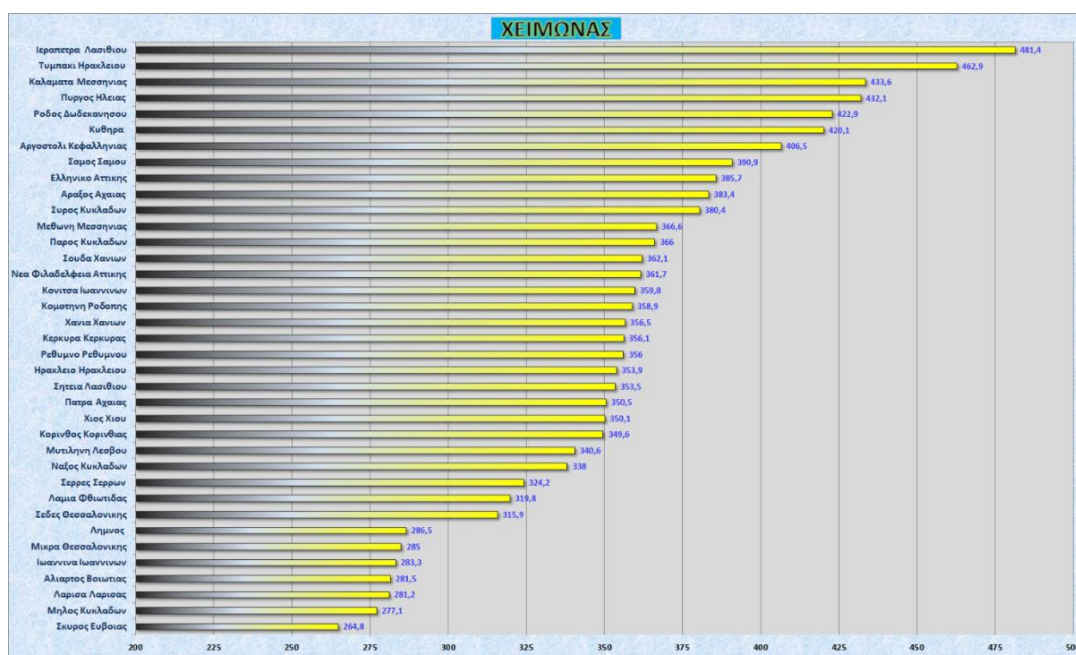
Παρατηρούμε ότι η Μήλος έχει πολλές ώρες ηλιοφάνειας. Από τις συνολικά 1302 ώρες ηλιοφάνειας που θα μπορούσε να έχει τους 3 καλοκαιρινούς μήνες, εάν δεν είχε ποτέ συννεφιά, έχει 1213 ώρες, δηλαδή 93% επί της θεωρητικής τιμής ενώ τα Ιωάννινα και η Θεσσαλονίκη είναι οι πιο συννεφιασμένες πόλεις κατά το καλοκαίρι (από αυτές που αναφέρει η έρευνα), κυρίως λόγω των καταγεγραμμένων καταιγίδων του Ιουνίου.

Ενώ οι ώρες ηλιοφάνειας για το Φθινόπωρο (Σεπτέμβριος, Οκτώβριος, Νοέμβριος) είναι:



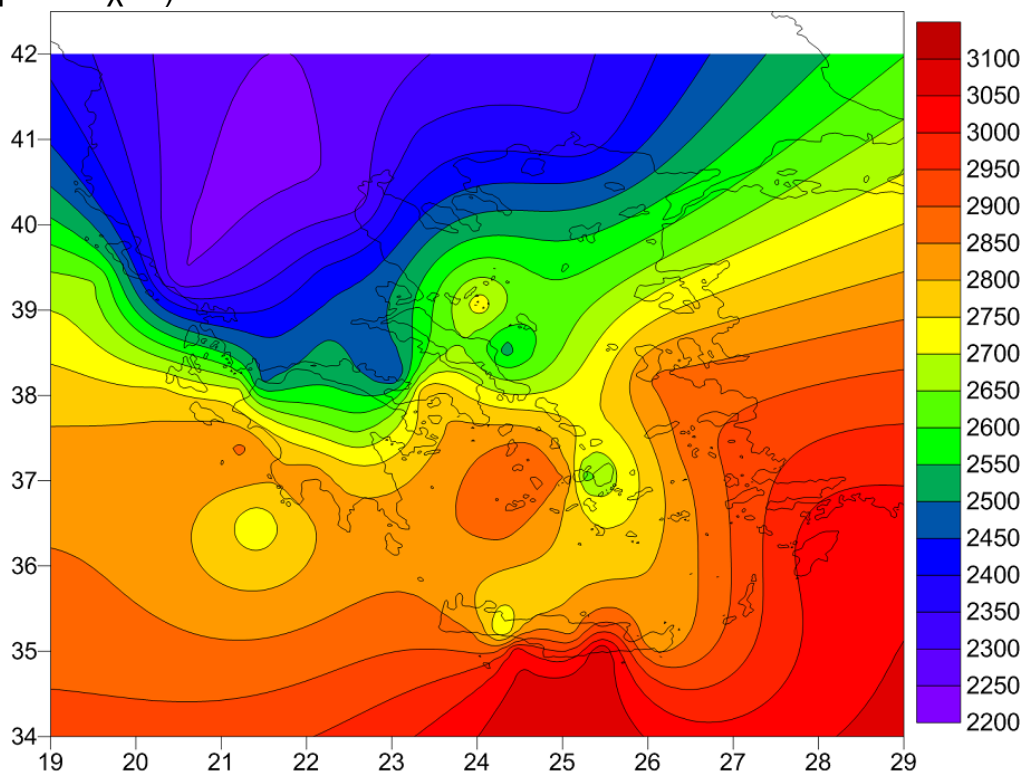
Εικόνα 25. Ώρες ηλιοφάνειας κατά το φθινόπωρο σε Ελληνικές πόλεις [23]

Και για το χειμώνα (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος):



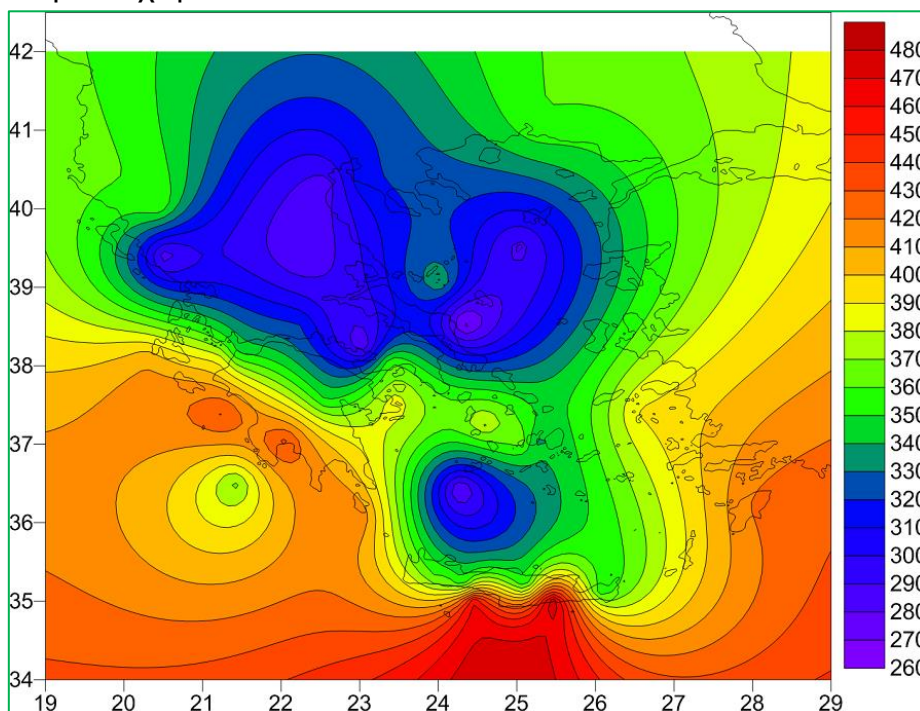
Εικόνα 26. Ώρες ηλιοφάνειας κατά το χειμώνα σε Ελληνικές πόλεις [24]

Μια εποπτική εικόνα για το πώς κυμαίνεται η ηλιοφάνεια στην Ελλάδα για όλο το έτος φαίνεται από το παρακάτω interpolation γράφημα (λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω στοιχεία):



Εικόνα 27. Θερμική απεικόνιση ωρών ηλιοφάνειας στην Ελλάδα ανά έτος [25]

Ενώ για το χειμώνα:



Εικόνα 28. Θερμική απεικόνιση ωρών ηλιοφάνειας στην Ελλάδα το χειμώνα [26]

Παρατηρούμε πως ενώ για όλο το έτος η ελάχιστη ηλιοφάνεια είναι στην ΒΔ Ελλάδα, Ήπειρο και κεντρική Μακεδονία, τον χειμώνα είναι φανερό η ύπαρξη ελάχιστου και στην κεντρική Ελλάδα πλέον, όπως Θεσσαλία, Φθιώτιδα, Βοιωτία, μαζί με Ήπειρο και δυτική και κεντρική Μακεδονία αλλά πλέον ελάχιστο υπάρχει και στην περιοχή Σκύρου Ευβοίας λόγω του ΒΑ ρεύματος που δημιουργεί υετό (βροχή ή χιόνι) και νεφώσεις που συνήθως επικρατούν στο Αιγαίο αλλά και λόγω της συχνής σύγκλισης μαζών που επικρατεί εκεί τον χειμώνα.

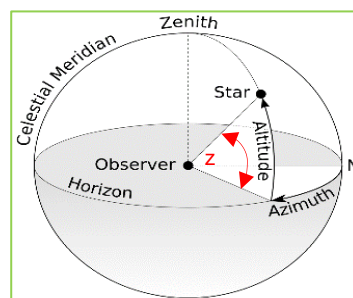
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία προκύπτει ο χάρτης της κανονικής ακτινοβολίας για την Ελλάδα της διπλανής εικόνας (DNI³¹). Ως κανονική ακτινοβολία ορίζεται το ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται ανά μονάδα εμβαδού σε μια επιφάνεια που είναι κάθετη στις ακτίνες που φτάνουν σε ευθεία γραμμή από την κατεύθυνση του ήλιου, ανάλογα με τη θέση του στον ουρανό. Αυτή η ποσότητα είναι απαραίτητη κατά την κατασκευή εγκαταστάσεων συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμότητας οι οποίες ανιχνεύουν διαρκώς την ηλιακή θέση.



Εικόνα 29. Χάρτης κανονικής ακτινοβολίας (DNI) Ελλάδας [27]

Αντίθετα, η οριζόντια (DHI³²) ακτινοβολία είναι εκείνη στην επιφάνεια της Γης από το φως που διασκορπίζεται από την ατμόσφαιρα και μετρείται σε μια οριζόντια επιφάνεια από την ακτινοβολία που λαμβάνεται από όλα τα σημεία της ατμόσφαιρας εξαιρουμένων από την ακτινοβολία που λαμβάνεται απ' τον ηλιακό δίσκο.

Η συνολική οριζόντια ακτινοβολία (GHI³³) είναι το ολικό ποσό ακτινοβολίας που λαμβάνεται από τον ήλιο στην επιφάνεια της Γης λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία z που σχηματίζεται από ένα παρατηρητή σε ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας που μας ενδιαφέρει και τον ήλιο.



Εικόνα 30. Υπολογισμός γωνίας z για συνολική οριζόντια ακτινοβολία [28]

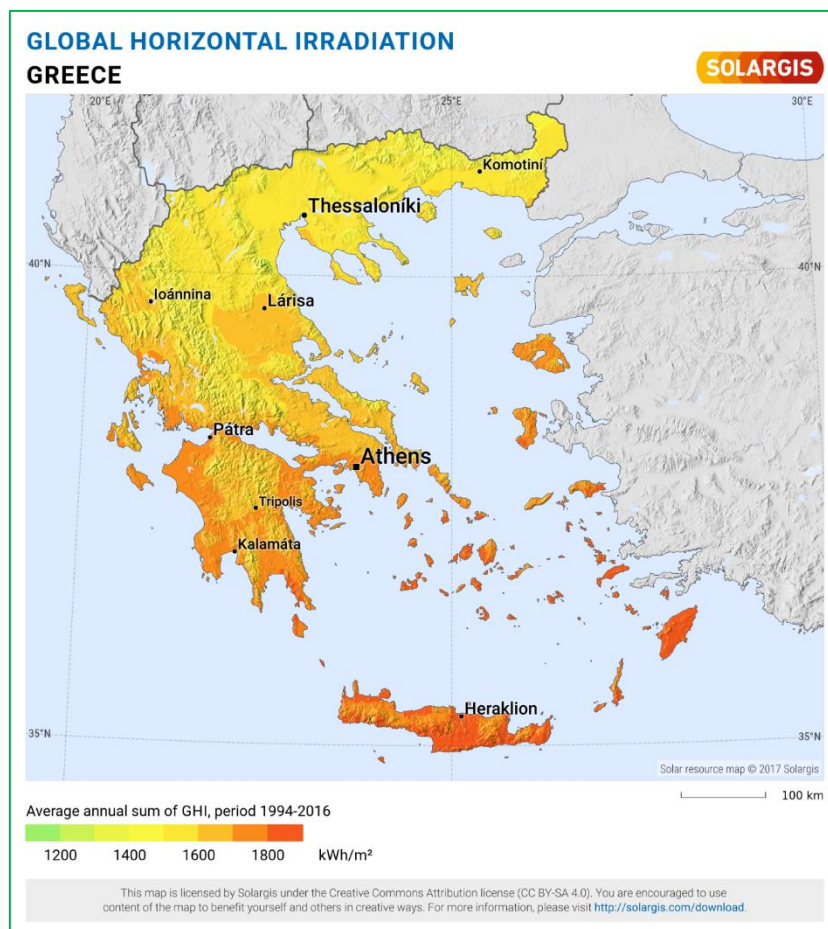
$$(GHI) = (DHI) + (DNI) * \cos(z) \quad (2.2)$$

Οπότε προκύπτει ο επόμενος χάρτης:

³¹ Direct Normal Irradiation (Κανονική Ακτινοβολία)

³² Direct Horizontal Irradiation (Οριζόντια Ακτινοβολία)

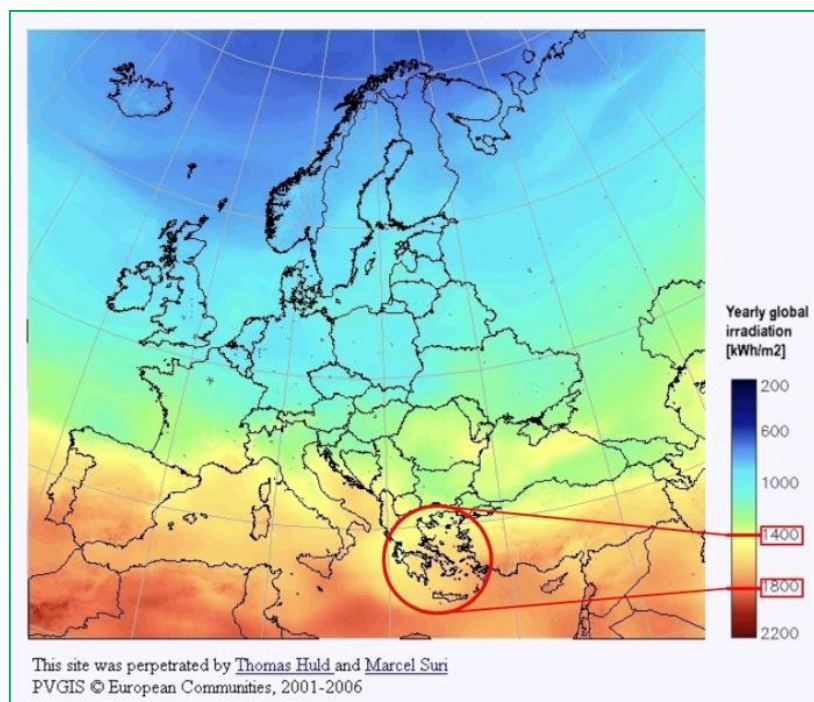
³³ Global Horizontal Irradiation (Συνολική Ακτινοβολία = Κανονική + Οριζόντια Ακτινοβολία)



Εικόνα 31. Χάρτης συνολικής οριζόντιας ακτινοβολίας (GHI) Ελλάδας [29]

Πρέπει να σημειωθεί ότι η Ελλάδα είναι ιδιαίτερα ευνοημένη από τον ήλιο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αν σκεφτεί κανείς ότι πολλά από τα συστήματα για τα οποία μιλάμε έχουν αναπτυχθεί και αποδίδουν στη βόρεια Ευρώπη, γίνεται κατανοητό ότι οι συνθήκες ηλιοφάνειας στη χώρα μας προσφέρονται για τη συμφέρουσα παραγωγή ενέργειας.

Σε γενικές γραμμές, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στην Ελλάδα παράγει ετησίως περί τις 1.100-1.500 κιλοβατώρες ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ (KWh/έτος/KW). Προφανώς στις νότιες και πιο ηλιόλουστες περιοχές της χώρας ένα φωτοβολταϊκό παράγει περισσότερο ηλιακό ηλεκτρισμό απ' ότι στις βόρειες. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στην Αθήνα αποδίδει 1300-1400 KWh/έτος, στη Θεσσαλονίκη 1150-1250 KWh/έτος και στην Κρήτη ή στη Ρόδο 1350-1500 KWh/έτος.



Εικόνα 32. Δυναμικό ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη [30]

Από τα προαναφερθέντα στοιχεία, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε το φωτοβολταϊκό δυναμικό μιας περιοχής και στην προκειμένη περίπτωση, της Ελλάδας ώστε να γνωρίζουμε την ικανότητα απόδοσης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που πρόκειται να εγκαταστήσουμε, είτε αυτά αφορούν έκταση, γήπεδο, πάρκο ή κατοικία.



Εικόνα 33. Φωτοβολταϊκό Δυναμικό στην Ελλάδα [31]

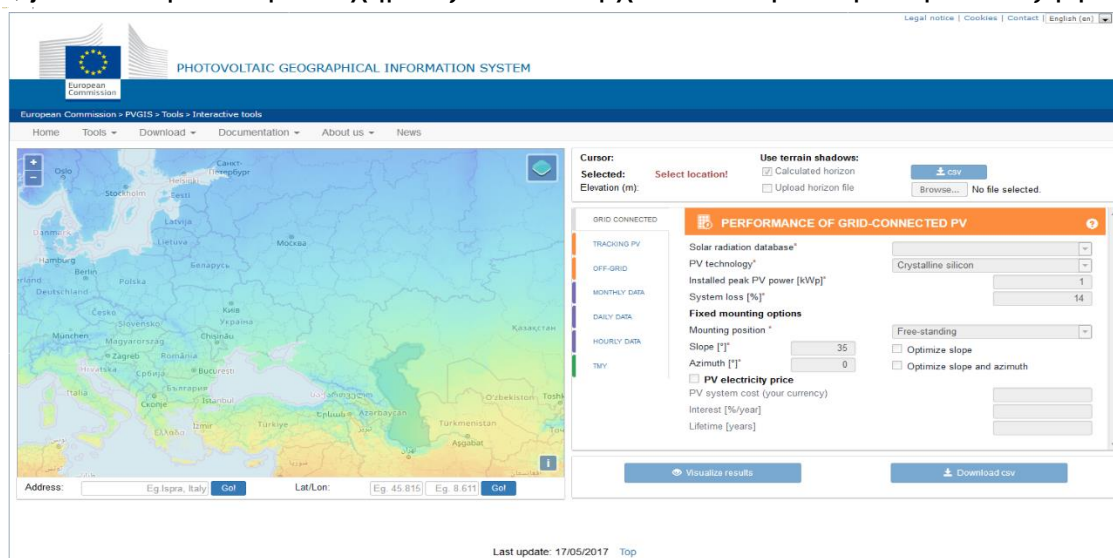
2.6 Η εφαρμογή PVGIS και εφαρμογές εύρεσης ιδανικής γωνίας πάνελ

Στη σελίδα <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> βρίσκεται η εφαρμογή PVGIS³⁴ η οποία επιτρέπει στο χρήστη να λάβει δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία και την παραγόμενη ενέργεια από εγκατεστημένα Φ/Β συστήματα σε οποιοδήποτε σημείο του κόσμου. Η χρήση της είναι δωρεάν, χωρίς περιορισμούς στη χρήση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και χωρίς απαίτηση εγγραφής. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εξαγωγή εύχρηστων στοιχείων είναι η εισαγωγή στοιχείων από το χρήστη όπως γεωγραφικό μήκος και πλάτος που θα εγκατασταθεί το σύστημα, τεχνολογία πάνελ (κρυσταλλικό πυρίτιο, CIS³⁵, CdTe), μέγιστη ισχύς (KWp) συστήματος, χωρητικότητα συσσωρευτών, ημερήσια κατανάλωση εφαρμογής

Η εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρκετούς υπολογισμούς όπως:

- Υπολογισμός απόδοσης Φ/Β συνδεδεμένων με το δίκτυο
- Υπολογισμός απόδοσης Φ/Β που «ακολουθούν» την πορεία του ήλιου
- Υπολογισμός απόδοσης αυτόνομων Φ/Β
- Ετήσια, μηνιαία και ημερήσια στατιστικά (έτη 2005-2016) θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου, ατμοσφαιρικής πίεσης και άλλα

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα εξάγονται γραφικά ή με τη μορφή αρχείων pdf, csv, json και erw και μετασχηματίζονται σε αρχεία excel για περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 34. Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής PVGIS [32]

Οι βάσεις δεδομένων παρέχονται από τα παρακάτω σύνολα δεδομένων:

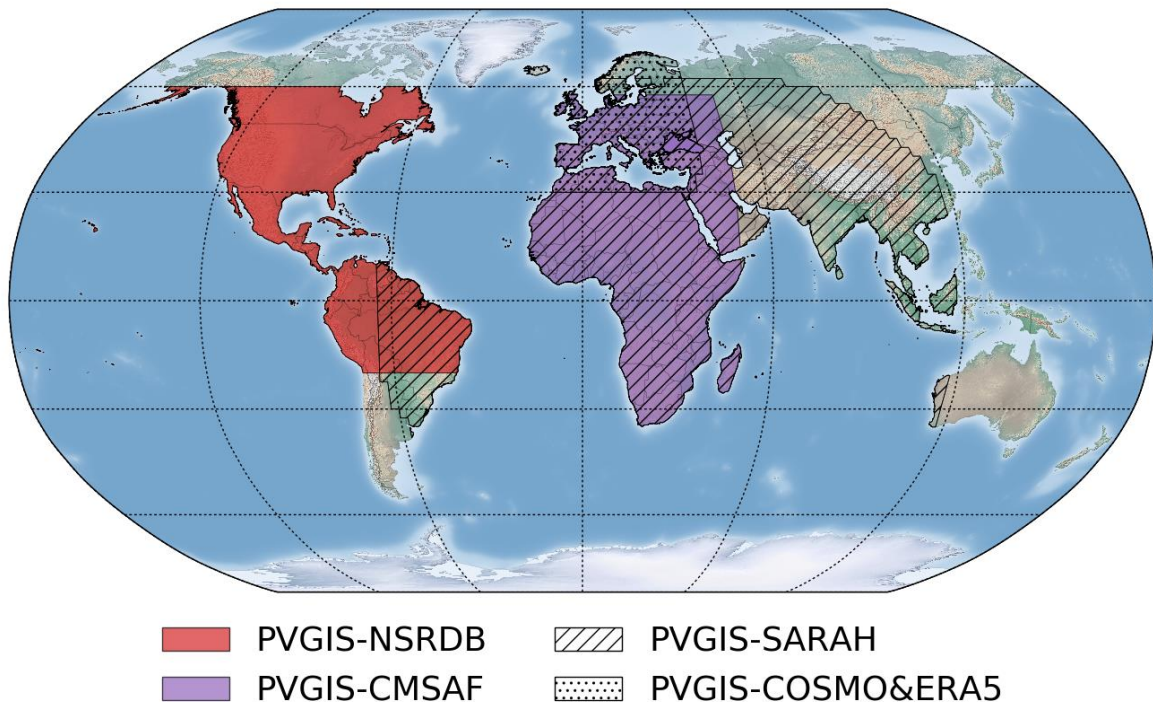
³⁴ PhotoVtaic Geographical Information System (web interface)

³⁵ Copper Indium Selenium

- PVGIS-SARAH (Ευρώπη, Αφρική, μεγαλύτερο μέρος της Ασίας και Βόρεια Αμερική)
- PVGIS-NSRDB (παρέχεται από το NREL³⁶)
- PVGIS-CMSAF (παρέχεται από τη συνεργασία CMSAF³⁷ και καλύπτει περιοχές Ευρώπης, Αφρικής και Βόρειας Αμερικής για χρονική περίοδο 2007-2016)

Επειδή ορισμένες περιοχές υψηλού γεωγραφικού μήκους δεν καλύπτονται από δορυφορικά δεδομένα, γίνεται η χρήση δύο επιπλέον βάσεων δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας:

- PVGIS-ERA5 (παρέχεται από το ECMWF και η κάλυψη είναι παγκόσμια σε ωριαία βάση με ανάλυση 0.28° lat/lon)
- PVGIS-COSMO (παρέχεται από το COSMO-REA6 και καλύπτει την Ευρώπη με ωριαία ανάλυση και υψομετρική ανάλυση 6 χιλιομέτρων)



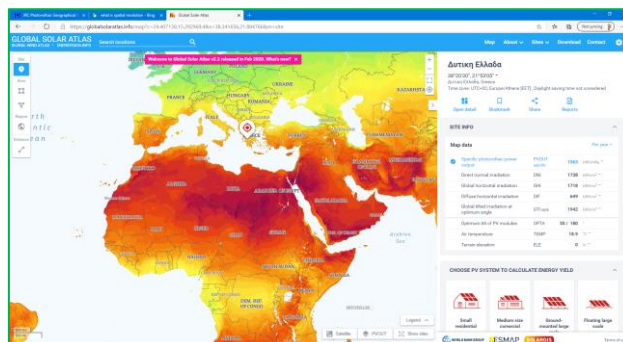
Εικόνα 35. Βάσεις Δεδομένων εφαρμογής PVGIS [33]

Πέρα απ' αυτή την εφαρμογή, στο διαδίκτυο υπάρχουν αρκετές δωρεάν ή εμπορικές επί πληρωμή που αποδίδουν εξίσου αξιόλογα ή και καλύτερα αποτελέσματα αποδιδόμενης ενέργειας Φ/Β συστημάτων, όπως η www.globalsolaratlas.info. Παράλληλα υπάρχει πληθώρα λοιπών χρήσιμων και απαραίτητων εφαρμογών που υπολογίζουν απαραίτητο αριθμό πάνελ και ισχύ ανάλογα με την εγκατάσταση, αζιμούθια και κατάλληλες γωνίες κλίσης εγκατάστασης συλλεκτών που χρειάζεται κάθε μηχανικός ή εγκαταστάτης και που θα

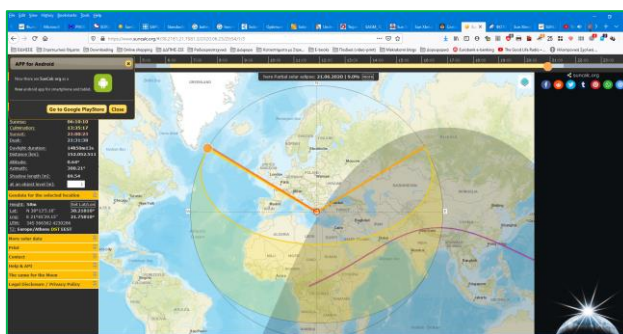
³⁶ National Renewable Energy Laboratory

³⁷ Climate Monitoring Satellite Application Facility

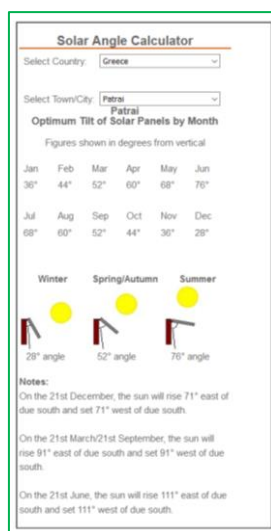
χρησιμοποιήσουμε στο 6^ο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας, όπως www.suncalc.org, <https://keisan.casio.com/exec/system/1224682331>, www.solarpaneltilt.com solar angle calculators και άλλα.



Εικόνα 36. Web based εφαρμογή Globalsolaratlas



Εικόνα 37. Web based εφαρμογή Suncalc



Εικόνα 38. Web based εφαρμογή Solar angle calculator

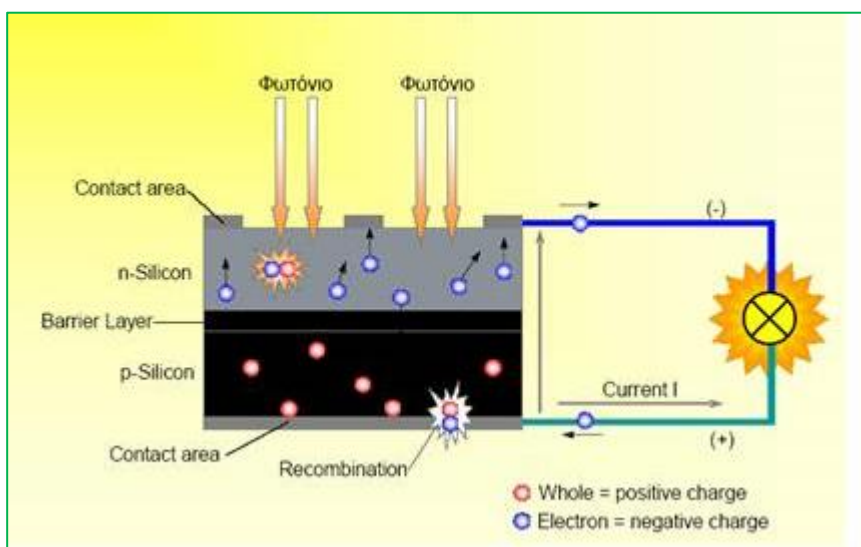
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων που συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά όταν αυτά εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία. Κάτι τέτοιο παρατηρείται στα φυσικά στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των ημιαγωγών καθώς και στις τεχνητές ημιαγωγικές διατάξεις. Η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων μεταφράζεται ως δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δημιουργούμενων πόλων, δηλαδή έχουμε μια υποτυπώδη ηλεκτρική γεννήτρια.

Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική γεννήτρια θα μπορούσε να παρομοιαστεί σαν μια ανεπίστροφη βαλβίδα ηλεκτρονίων, δια της οποίας τα ηλεκτρόνια μπορούν να διέρχονται μόνο προς την μια κατεύθυνση. Όταν λοιπόν κάποιο φωτόνιο προσκρούσει πάνω σε ηλεκτρόνιο του υλικού, τότε θα του μεταδώσει μέρος της ενέργειάς του, αναγκάζοντάς το να εκτροχιαστεί από την θέση ηρεμίας του. Εάν τώρα, η κατεύθυνση που θα λάβει το «εκσφενδονισμένο» ηλεκτρόνιο συμπίπτει με την φορά της βαλβίδας ηλεκτρονίων τότε αυτό θα μετατοπισθεί σε σχέση με την αρχική του θέση και θα παγιδευτεί εκεί αφού η βαλβίδα αποτρέπει την επαναφορά του στην αρχική θέση. Απ' αυτή τη διαδικασία διαπιστώνουμε ότι σε μία «πλευρά» του υλικού (πλευρά παγίδευσης) θα έχουμε περίσσεια ενός ηλεκτρονίου ενώ στην άλλη πλευρά (πλευρά εκσφενδονισμού) θα έχουμε έλλειμμα ενός ηλεκτρονίου, που συνεπάγεται διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού.



Εικόνα 39. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο [34]

3.2 Οι ημιαγωγοί και οι ιδιότητές τους στη Φωτοβολταϊκή διαδικασία

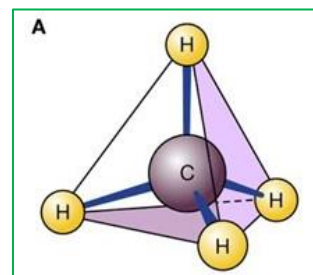
Ως γνωστόν, τα υλικά ανάλογα με την ηλεκτρική τους ικανότητα διακρίνονται σε μονωτές, αγωγούς και ημιαγωγούς. Τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα χαρακτηρίζονται ως αγωγοί όταν η ζώνη σθένους τους είναι συμπληρωμένη από ηλεκτρόνια επιτρέπουν τη διέλευση ροή φορτίων. Μονωτές είναι τα στοιχεία που τα

άτομά τους έχουν τη στιβάδα σθένους τους συμπληρωμένη και δεν επιτρέπουν την ελεύθερη ροή ηλεκτρονίων από άτομο σε άτομο. Ημιαγωγοί από την άλλη πλευρά είναι τα στοιχεία που η τιμή της αγωγιμότητάς τους βρίσκεται μεταξύ ενός αγωγού και ενός μονωτή.

Τα κυριότερα ημιαγώγιμα υλικά είναι το διαμάντι (η αλλότροπη μορφή του άνθρακα – C, όπου τα άτομα του άνθρακα είναι κατανεμημένα σε ένα κυβικό πλέγμα), το πυρίτιο (Si), το Γερμάνιο (Ge), το θείο (S), το σελήνιο (Se), ο κασσίτερος (Sn), το φωσφορούχο βάριο (BP) και κάποιες ενώσεις τους. Αυτό που βρίσκεται όμως άφθονο στη φύση, κατασκευάζεται εύκολα και η αξιοπιστία του επηρεάζεται δύσκολα από το περιβάλλον του είναι το πυρίτιο.

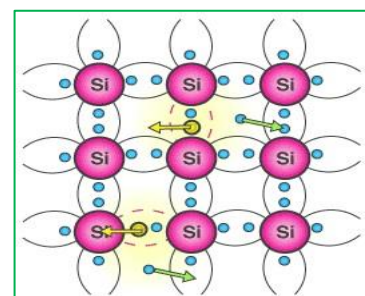
Τα άτομα των στοιχείων στη φύση αποτελούνται από τον πυρήνα και από τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν, τοποθετημένα πάνω σε στιβάδες. Από τα ηλεκτρόνια τα πιο απομακρυσμένα από τον πυρήνα, αυτά της εξωτερικής στιβάδας, λέγονται ηλεκτρόνια σθένους και η αντίστοιχη στιβάδα σθένους. Κάθε άτομο επιδιώκει να συμπληρώσει την εξωτερική του στιβάδα με 8 ηλεκτρόνια.

Το άτομο του πυριτίου στην στιβάδα σθένους περιέχει 4 ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στις κορυφές μιας κανονικής τριγωνικής πυραμίδας, στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ο πυρήνας, όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Για να συμπληρώσει τη στιβάδα σθένους του με 8 ηλεκτρόνια, κάθε άτομο πυριτίου συνεργάζεται με άλλα 4 άτομα, που το περιβάλλουν στο χώρο και συνεισφέρουν ανά δύο από ένα ηλεκτρόνιο.



Εικόνα 40. Τετραεδρική δομή ατόμου Si [35]

Έτσι σχηματίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου. Στους αγωγούς του ηλεκτρισμού τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ευκίνητα και σ' αυτήν την ευκινησία οφείλονται οι αγώγιμες ιδιότητες του υλικού. Αντίθετα στους μονωτές τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ισχυρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα και εδώ οφείλονται οι μονωτικές τους ιδιότητες (υψηλή και χαμηλή αγωγιμότητα).

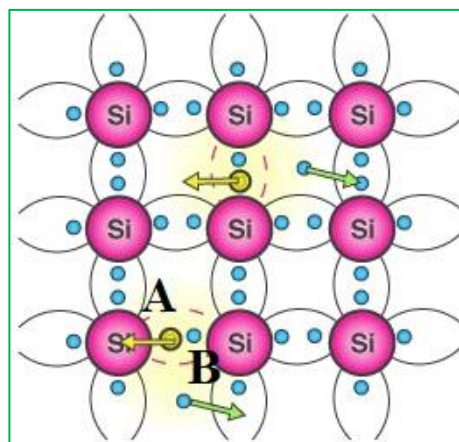


Εικόνα 41. Κρυσταλλικό πλέγμα Si [36]

Στους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια σθένους συνδέονται σχετικά χαλαρά με τον πυρήνα, χωρίς να έχουν την ευκινησία των ηλεκτρονίων των αγωγών. Αν όμως, ένα ηλεκτρόνιο πάρει με κάποιον τρόπο πρόσθετη ενέργεια, τότε αποκόπτεται ο δεσμός του με τον πυρήνα και απομακρύνεται απ' αυτόν. Η θέση από την οποία φεύγει το ηλεκτρόνιο είναι περιοχή με ηλεκτρονικό έλλειμμα, παρουσιάζει θετικό φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου και ονομάζεται οπή. Η πρόσθετη αυτή ενέργεια που πρέπει να αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια για να

απομακρυνθούν από το άτομο λαμβάνεται με θερμότητα, ηλιακή ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Τα φωτόνια από τα οποία αποτελείται το φως έχει αποδειχθεί ότι μεταφέρουν ενέργεια ίση με $E = h \cdot f^{38}$. Φωτίζοντας τον ημιαγωγό, κάποια από τα φωτόνια συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια σθένους και μεταβιβάζουν σ' αυτά όλη τους την ενέργεια. Αν προσπέσει φως σε ένα κρύσταλλο πυριτίου, κάποια ηλεκτρόνια στο άτομο θα εγκαταλείψουν τα αντίστοιχα άτομα και θα προσκολληθούν σε γειτονικό άτομο. Στον κρύσταλλο υπάρχουν άτομα με 9 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (αρνητικά φορτισμένα) και άτομα με 7 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα ή ισοδύναμα, με μια οπή στην εξωτερική στοιβάδα (θετικά φορτισμένα). Αυτό, όταν συμβαίνει σε μεγάλο αριθμό ατόμων έχει ως αποτέλεσμα μια ακανόνιστη μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών, η οποία δεν ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο είναι στην πραγματικότητα μετακίνηση ηλεκτρονίων προς συγκεκριμένη φορά. Αυτό επιτυγχάνεται με τους ημιαγωγούς πρόσμιξης, όπου, όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά σε άλλο άτομο, η θέση που είχε, μετατρέπεται σε οπή (θέση Α). Αν το ηλεκτρόνιο Α καταλάβει την οπή Β, στη θέση Α θα σχηματιστεί οπή. Η οπή Β θα μετακινηθεί στη θέση Α (εικόνα 42).



Εικόνα 42. Κίνηση ηλεκτρονίων στο κρυσταλλικό πλέγμα Si [37]

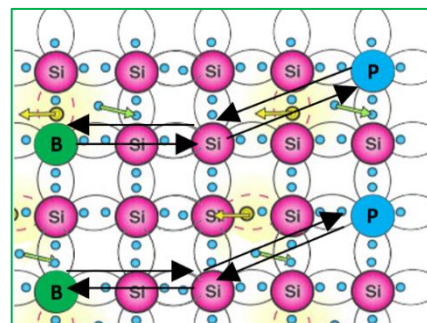
3.3 Ημιαγωγοί πρόσμιξης

Εξαιτίας της άτακτης κίνησης των ηλεκτρονίων και των οπών στο κρυσταλλικό πλέγμα, ένας καθαρός χημικά ημιαγωγός δεν μπορεί να λειτουργήσει ως φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Αν πάρουμε όμως ένα κρύσταλλο πυριτίου και το νοθεύσουμε με φωσφόρο (P) από τη δεξιά και με βάριο (B) από την αριστερή πλευρά του, που έχουν αντίστοιχα 5 και 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στιβάδα θα προκύψει ένα ποσοστό της νοθείας των 10^{14} ως 10^{17} ατόμων P ή B ανά κυβικό εκατοστό κρυστάλλου πυριτίου.

Με την πρόσμιξη στο κρυσταλλικό πλέγμα, κάποια άτομα Si αντικαθίστανται από άτομα P και B. Έτσι κάποια άτομα Si έχουν στη στοιβάδα σθένους 9 ηλεκτρόνια από την πλευρά που νοθεύσαμε με P και 7 ηλεκτρόνια από την πλευρά που νοθεύσαμε με B. Από την πλευρά του P λοιπόν έχουμε πλεονάζοντα ηλεκτρόνια στις στοιβάδες σθένους, ενώ από την πλευρά του B έχουμε έλλειμα ηλεκτρονίων στις στοιβάδες σθένους, δηλαδή οπές.

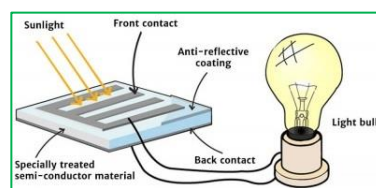
³⁸ Εξίσωση του Planck, όπου E η ενέργεια (Joule), h η σταθερά του Planck ($h=6.626 \cdot 10^{-34}$ J·sec) και f η συχνότητα σε Hertz

Οι μπλε σφαίρες είναι πυρήνες φωσφόρου και οι πράσινες πυρήνες βορίου. Αν ο νοθευμένος κρύσταλλος λάβει ηλιακή ακτινοβολία, από την πλευρά του P θα ελευθερωθούν ηλεκτρόνια, τα οποία θα μετακινηθούν προς την πλευρά του B, για να καταλάβουν τα ηλεκτρονικά κενά (οπές) με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή του B (αρνητικά φορτία) και τη συγκέντρωση οπών στην περιοχή του P (θετικά φορτία).



Εικόνα 43. Νοθευμένο κρυσταλλικό πλέγμα Si με άτομα P και B [38]

Μεταξύ των δύο νοθευμένων επιφανειών θα αναπτυχθεί ηλεκτρική τάση και ο κρύσταλλος του πυριτίου θα λειτουργεί ως ηλεκτρική πηγή με το θετικό πόλο από την πλευρά του P και αρνητικό από την πλευρά του B. Η σύνδεση των ακροδεκτών ενός λαμπτήρα με τις δύο νοθευμένες περιοχές του κρυσταλλικού πυριτίου, θα συνοδεύεται από μετακίνηση ηλεκτρονίων και επομένως από ηλεκτρική τάση.



Εικόνα 44. Κύκλωμα ενεργοποίησης λαμπτήρα από ηλιακό κελί [39]

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αξιοποιούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά το οποίο έχουμε την ανάπτυξη μιας διαφοράς δυναμικού (τάσης) μεταξύ των ακροδεκτών όταν στο σύστημα προσπίπτει φωτεινή δέσμη (ηλιακή ακτινοβολία), όπως προαναφέραμε. Η τάση αυτή αντιστοιχεί στην ορθή πόλωση της διόδου $n - p$, κατά την πρόσπτωση του φωτός (φωτόνια) στην επιφάνεια της, με ενέργεια $E = h \cdot f$, μεγαλύτερη της ενέργειας E_g του χάσματος των ζωνών σθένους – αγωγιμότητας, (με $E_g = 1,12 \text{ eV}$ για το πυρίτιο στους 3000° K). Η μεγαλύτερη των $1,12 \text{ eV}$ ³⁹ ενέργεια του κάθε φωτονίου, ουσιαστικά χάνεται καθώς το ζεύγος ηλεκτρονίων – οπών είναι το ίδιο και μετατρέπεται σε θερμότητα. Λόγω του γεγονότος αυτού, το 41% της ενέργειας των φωτονίων δεν προσφέρεται στη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και μόνο το 59 % είναι χρήσιμη ενέργεια. Πολλαπλασιάζοντας αυτό το 59% με τα φωτόνια του ηλιακού φάσματος που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του 1.12 eV (74% περίπου) προκύπτει ο μέγιστος βαθμός ή το ανώτερο όριο μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική για το πυρίτιο.

Η ένταση του φαινομένου εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- την διαθεσιμότητα ηλεκτρονίων που μπορούν να «εκτροχιαστούν» (ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού)
- την πιθανότητα σύγκρουσης φωτονίου – ηλεκτρονίου (στατιστική πιθανότητα)

³⁹ Ποσότητα ηλεκτρονιοβόλτ (electronvolt), αφορά κινητική ενέργεια που κερδίζεται ή χάνεται όταν ένα ηλεκτρόνιο επιταχύνεται από αδράνεια μέσω διαφοράς δυναμικού 1Volt στο κενό

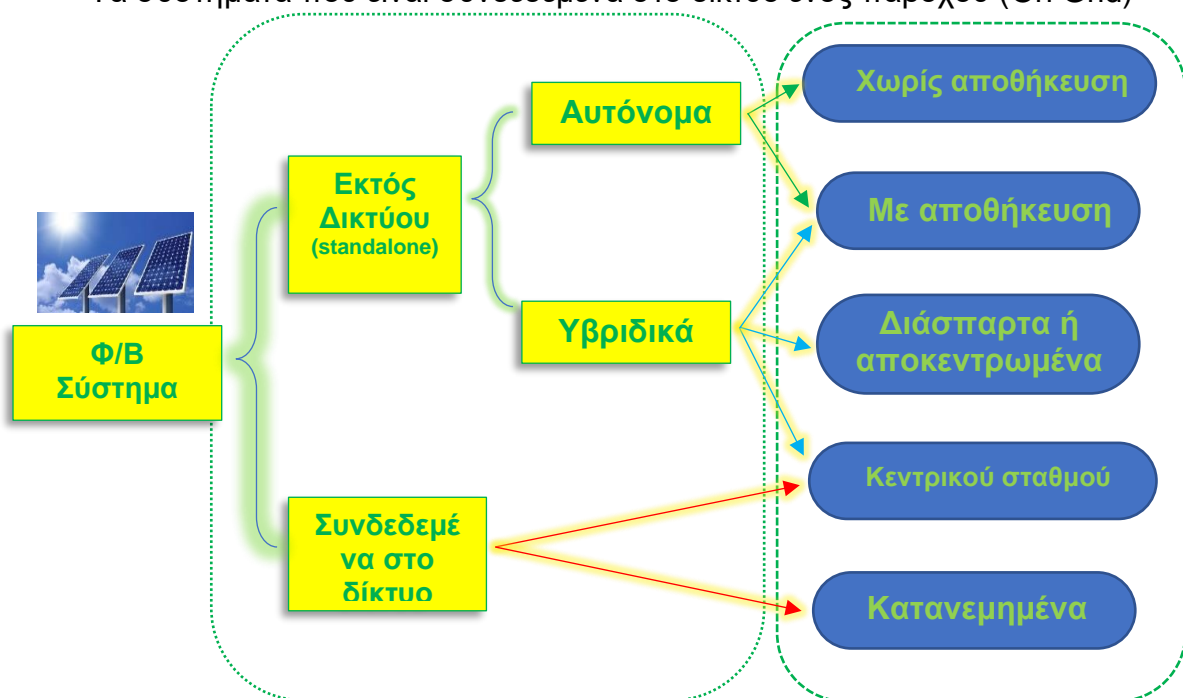
- την ικανότητα της σύγκρουσης να μεταφέρει ενέργεια στο ηλεκτρόνιο με κατάλληλη ταχύτητα και διεύθυνση ώστε αυτό να μεταπηδήσει στην πλευρά παγίδευσης

Από αυτούς τους παράγοντες γίνεται αντιληπτό ότι ένα μικρό ποσοστό της φωτεινής ακτινοβολίας λαμβάνει μέρος επί του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

3.4 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Ανάλογα με την απαίτηση ισχύος που μας ενδιαφέρει τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Από την κάλυψη μικρών καταναλωτικών προϊόντων (ρολόγια, αριθμομηχανές τσέπης, μικρές οικιακές συσκευές) μέχρι την κάλυψη ολόκληρης οικιακής εγκατάστασης, επιχειρήσεων, ηλιακών πάρκων, απομακρυσμένων οικισμών που δεν είναι συνδεδεμένα στο υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, τα Φ/Β συστήματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

- Τα απομονωμένα ή εκτός δικτύου Φ/Β συστήματα (Stand alone – Off Grid)
- Τα συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ενός παρόχου (On Grid)



Εικόνα 45. Κατηγορίες Φ/Β συστημάτων

3.4.1 Απομονωμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (stand alone ή off grid)

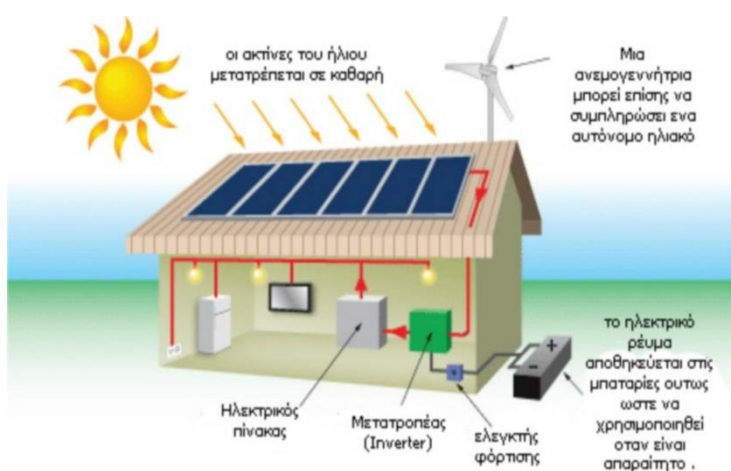
Απομονωμένα Φ/Β συστήματα ονομάζουμε εκείνα που δεν είναι συνδεδεμένα σε οποιοδήποτε κεντρικό ή ευρύτερο υφιστάμενο δίκτυο που παρέχεται από ένα μεγάλο οργανισμό που δεν είναι φυσικό πρόσωπο. Σε απομακρυσμένες περιοχές

όπου η ηλεκτροδότηση δεν είναι εφικτή ή υπάρχει ανάγκη για πλήρη αυτονομία ηλεκτρικής ενέργειας και απεξάρτηση απ' το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιούνται απομονωμένα Φ/Β συστήματα που έχουν συνήθως τη δυνατότητα απόδοσης 100 ως 200 KWp⁴⁰. Αυτά διακρίνονται στα αυτόνομα και τα υβριδικά Φ/Β συστήματα.

3.4.1.1 Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα

Τα αυτόνομα συστήματα καλούνται εκείνα όπου η απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται εξολοκλήρου από Φ/Β συστοιχίες. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να καταναλώνεται άμεσα από τις ηλεκτρικές συσκευές ή να αποθηκεύεται σε συσσωρευτές και να καταναλώνεται στην συνέχεια.

Στην περίπτωση που η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτεί άμεσα το φορτίο μας, έχουμε άμεση κατανάλωση (άμεση τροφοδοσία του φορτίου – Direct coupled). Χρησιμοποιείται κυρίως σε φορτία που δεν απαιτούν συνεχή παροχή ρεύματος ή εφαρμογές που δεν έχουν τακτική λειτουργία (συστήματα άντλησης νερού για παράδειγμα). Διακρίνεται επίσης η περίπτωση που γίνεται αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα σε συσσωρευτές κατά την οποία, επιθυμούμε τη μετέπειτα χρήση της αποθηκευμένης ενέργεια από το φορτίο. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε το μέγεθος των συσσωρευτών να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου. Τέτοια περίπτωση είναι τα Φ/Β συστήματα που είναι τοποθετημένα σε φωτισμούς οδών και τα οποία διαθέτουν συσσωρευτές (επαναφορτιζόμενες μπαταρίες) ώστε να λειτουργούν κατά τις νυχτερινές ώρες.

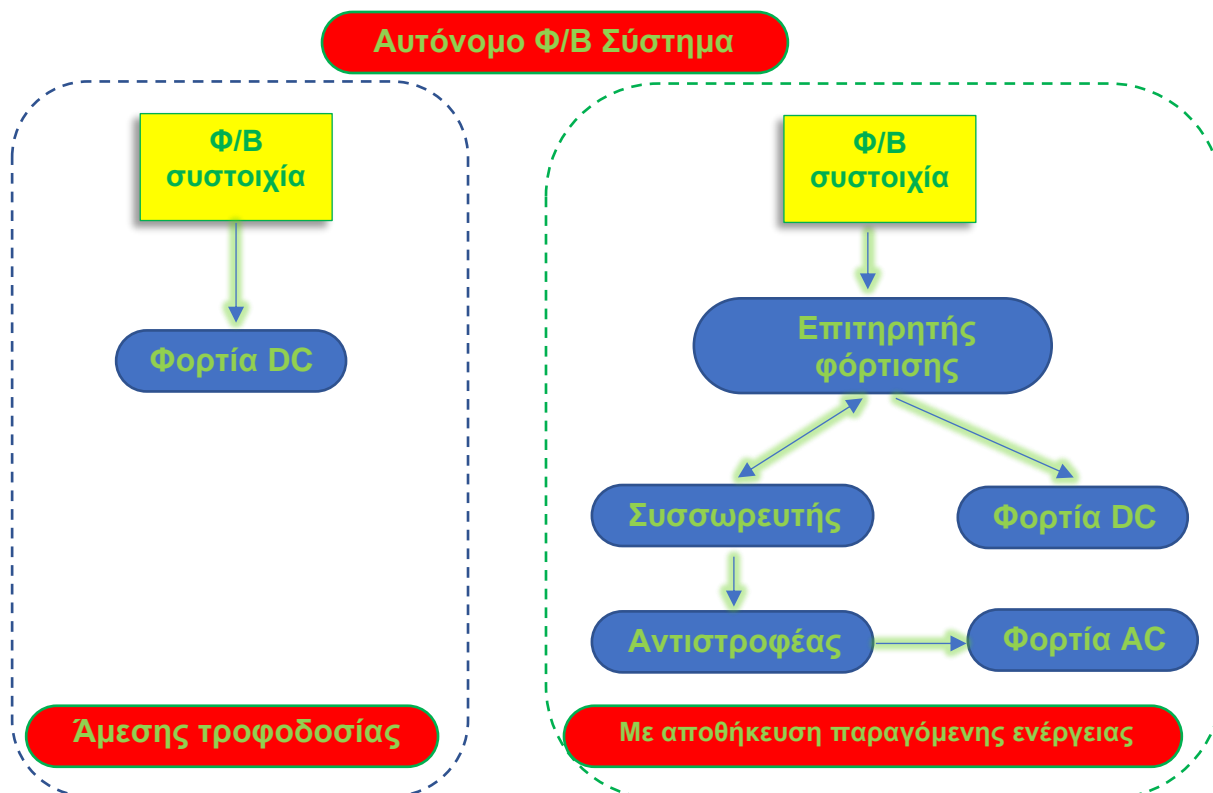


Εικόνα 46 . Αυτόνομο Φ/Β σύστημα σε κατοικία (off grid) [40]

Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παρέχεται είτε με συνεχή είτε με εναλλασσόμενη τάση (DC ή AC). Ένα αυτόνομο Φ/Β αποτελείται από:

- Φωτοβολταϊκούς συλλέκτες (πάνελ)
- Αντιστροφή
- Μετατροπέα τάσης DC/AC
- Ελεγκτές φόρτισης συσσωρευτών
- Συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης

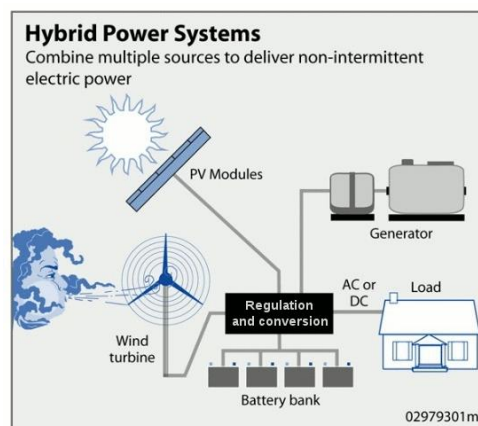
⁴⁰ KW peak



Εικόνα 47. Είδη Αυτόνομων Φ/Β συστημάτων (off grid)

3.4.1.2 Υβριδικά Φ/Β Συστήματα

Όπως φαίνεται και από την ορολογία, υβριδικά καλούνται τα Φ/Β συστήματα όπου η απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται από τη συνεργασία φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και έτερης πηγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε προέρχεται από κάποια συμβατική πηγή είτε από ΑΠΕ. Είναι δυνατό ένα Φ/Β να αδυνατεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις μιας ανάγκης. Όταν αδυνατεί να καλύψει όλες τις ανάγκες του φορτίου τότε ο συνδυασμός του με άλλες πηγές ενέργειας είναι μια αποδοτική λύση στην συμπλήρωση του ελλείματος. Η συμπληρωματική πηγή ενέργειας μπορεί να προέρχεται είτε από άλλη ΑΠΕ (αιολική ενέργεια) είτε να είναι πηγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος). Στην περίπτωση αυτή είτε χρησιμοποιούνται συσσωρευτές για να αποθηκεύσουν και τις δύο (ή και περισσότερες) πηγές ενέργειας είτε μπορεί να γίνει άμεση τροφοδοσία του δικτύου από τις πηγές ενέργειας. Τέτοιες περιπτώσεις έχουμε σε εξοχικές κατοικίες ή στις Ιερές Μονές για να καλυφθούν οι υφιστάμενες ανάγκες.



Εικόνα 48. Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας [41]

3.4.2 Συνδεδεμένα στο δίκτυο Φ/Β συστήματα (on grid)

Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν τα Φ/Β συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ηλεκτρικής παροχής ενός παρόχου, αντλώντας από αυτό την ηλεκτρική ισχύ την οποία δε μπορούν να καλύψουν, καθιστώντας μη απαραίτητη την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αθροιστικά παράγουν σημαντική ποσότητα ισχύος του δικτύου ενώ και είναι δυνατό να περιλαμβάνουν μεγάλης ισχύος κεντρικούς Φ/Β σταθμούς με ισχύ μεγαλύτερη των 50 KWp, η οποία διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο (Centralized systems) ή να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ως κατανεμημένα συστήματα (Distributed).



Εικόνα 49. On grid Φ/Β σύστημα



Εικόνα 50. Διάγραμμα Φ/Β συστήματος ιδιοκατανάλωσης (on grid)

Τα κατανεμημένα συστήματα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των παγκοσμίων συνδεδεμένων στο δίκτυο Φ/Β συστημάτων με τυπικό μέγεθος 1,5 KWp έως 20 KWp. Διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασης τους με το δίκτυο:

- Φ/Β συστήματα που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας όπου το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις μέσες μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Στις περιπτώσεις έκτακτης ενεργειακής ζήτησης ή αστοχίας του Φ/Β συστήματος το δίκτυο καλύπτει τη ζήτηση ισχύος.
- Φ/Β συστήματα τα οποία λειτουργούν με συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο όπου το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην ιδανική περίπτωση, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση ή μεγαλύτερη με την ενέργεια του δικτύου προς την εφαρμογή. Χαρακτηριστική εφαρμογή αποτελεί η ενσωμάτωση συστημάτων σε κατοικίες και κτίρια.

3.5 Εφαρμογές Φ/Β Συστημάτων

Τα Φ/Β συστήματα απευθύνονται σε περιοχές εφαρμογών , όπου το σχετικά υψηλό κόστος τους δεν αποτελεί σημαντικό εμπόδιο. Οι εφαρμογές αυτές συνήθως χαρακτηρίζονται από χαμηλές ενεργειακές ανάγκες, έλλειψη εναλλακτικών τρόπων παροχής ενέργειας ή όπου υπάρχουν, αυτοί είναι πολύ ακριβοί (σύνδεση με ένα απομακρυσμένο δίκτυο) και απαιτήσεις υψηλής αξιοπιστίας ή χαμηλές ανάγκες συντήρησης.

Σαν κυριότερες κατηγορίες εφαρμογών Φ/Β συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

- Καταναλωτικά προϊόντα (0,001– 100 Wp) → Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο ή σε τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, για την εξυπηρέτηση αναγκών φωτισμού και ψύξης και για προϊόντα όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φακοί, ραδιόφωνα και μικροσυσκευές.

- Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100Wp – 200 KWp) → Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για:

- ο Αφαλάτωση, άντληση και καθαρισμό νερού.
- ο Φωτισμό (δρόμων , πάρκων , αεροδρομίων)
- ο Συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων και συναγερμού
- ο Συστήματα σηματοδότησης (οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας)
- ο Ψύξη αγροτικών προϊόντων, φαρμάκων

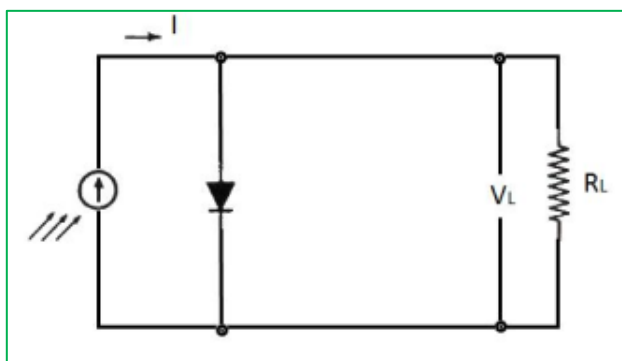
- Συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο (200 KWp - αρκετά MWp) → Στην κατηγορία αυτή, που σύμφωνα με τις συμβατικές θεωρήσεις προς το παρόν δεν αξιολογείται σαν οικονομικά βιώσιμη, διακρίνονται δύο κατηγορίες συστημάτων:

- ο Φ/Β συστήματα μεγέθους έως μερικών εκατοντάδων KWp που τροφοδοτούν κατοικίες, συγκροτήματα κατοικιών ή άλλα κτίρια και όπου η τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια τροφοδοτείται (πωλείται) προς το δίκτυο

- ο Φ/Β σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο. Για τα Φ/Β συστήματα που αναρτώνται σε κτίρια (σε προσόψεις, οροφές , κλπ), σε σύνδεση με το δίκτυο, τελευταία έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τα οφέλη που προκύπτουν είναι ο συγχρονισμός Ψυκτικών φορτίων κτιρίων με μέγιστη παραγόμενη ισχύ από Φ/Β, η αποφυγή χρήσης γης και η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας

3.6 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση

Για να γίνει μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο και περιγράφεται από το απλοποιημένο διάγραμμα της διπλανής εικόνας. Στο ισοδύναμο αυτό δε συμπεριλαμβάνεται η



Εικόνα 51. Ιδανικό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείου [42]

αντίσταση λόγω της κίνησης των φορτίων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, όπως ακόμα και η μη άπειρη αντίσταση διαμέσου της διόδου και τα αναπόφευκτα ρεύματα διαρροής.

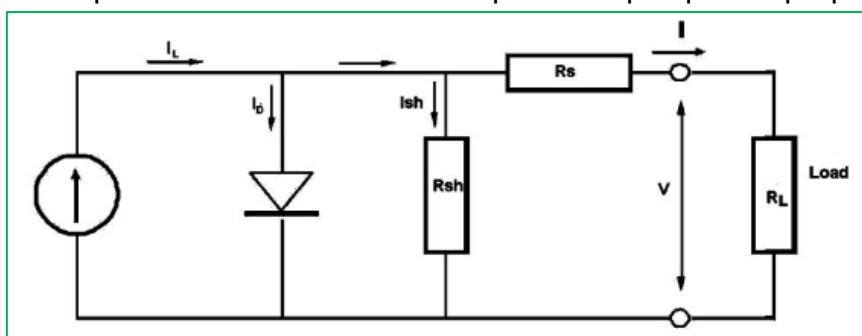
Η βασική εξίσωση του ιδανικού ηλιακού κυττάρου είναι η εξής:

$$I = I_o * \left(e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right) - I_l \quad (3.1)$$

με

- I: το ρεύμα του ηλιακού κυττάρου
- V: η τάση του κυττάρου
- I_l : το φωτόρευμα
- I_o : το ρεύμα κόρου της διόδου

Στην πράξη όμως κανένα ηλιακό κύτταρο δεν είναι ιδανικό γι' αυτό τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, που είναι παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου, αφετέρου δε, την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



Εικόνα 52. Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου με αντιστάσεις σειράς R_s και παράλληλες αντιστάσεις R_{sh} [43]

Η χαρακτηριστική εξίσωση για το παραπάνω ηλιακό κύτταρο είναι η εξής:

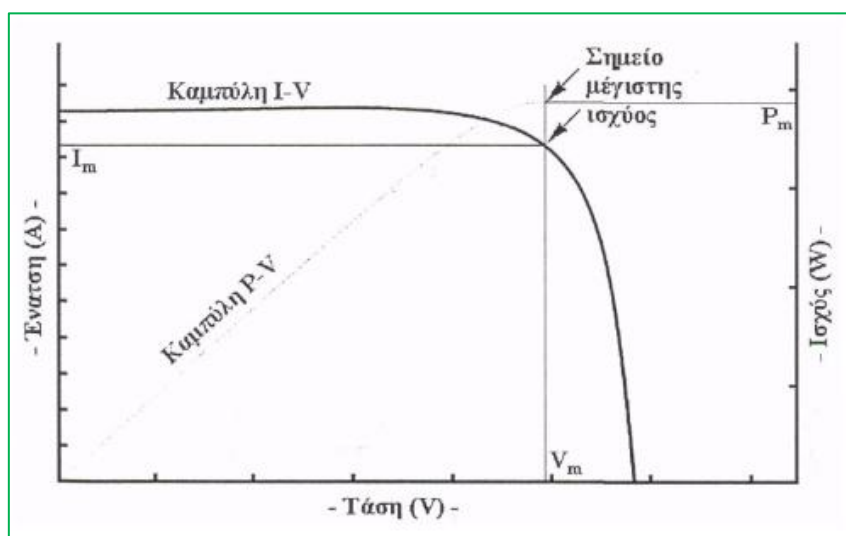
$$I = I_L - I_o * \left(\left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} \quad (3.2)$$

όπου:

- I = το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου
- I_L = το φωτόρευμα
- I_o = το ρεύμα κόρου διόδου
- q = το φορτίο ηλεκτρονίου
- V = η τάση στην έξοδο του κυττάρου
- R_s = σε σειρά αντίσταση του κυττάρου
- $V+IR_s=V_D$: η τάση της διόδου επαφής μέσα στο κύτταρο.
- A = σταθερά ($A=1,2$). Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.
- K = Σταθερά Boltzmann.
- T = απόλυτη θερμοκρασία.
- R_{sh} = παράλληλη αντίσταση του κυττάρου η οποία σχετίζεται με τη διαρροή του ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p – n.

3.7 Χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Τάσης (I – V) Φ/B στοιχείου

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το Φ/B στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ολοκληρωτικά και μη γραμμικά, συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, ακόμα κι αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος και τάσεως στην έξοδο ενός ηλιακού κυττάρου καλείται χαρακτηριστική καμπύλη I – V.



Εικόνα 53. Καμπύλες I-V και P-V Φ/B στοιχείου Si για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [44]

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και κατά συνέπεια θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος I_{sc} ⁴¹ και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc} ⁴²)

Οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν την καμπύλη είναι:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}
- Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc}
- Σημείο μέγιστης ισχύος P_m
- Ο συντελεστής πλήρωσης ff (Fill factor)
- Μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας
- Μεταβολή της θερμοκρασίας

3.8 Τεχνολογία και υλικά Φωτοβολταϊκών

Ανάλογα με τα υλικά και το είδος ημιαγωγών [9], που χρησιμοποιούνται, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται στα παρακάτω:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία Κρυσταλλικού Πυριτίου (Crystalline Silicon)

Ως γνωστόν, το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Οι μεγάλες (συγκριτικά) αποδόσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου στο εμπόριο δίνουν και ένα σημαντικό πλεονέκτημα στο συγκεκριμένο υλικό. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι:



Εικόνα 54. Κρυσταλλικό Si] [45]

ο Συναντάται ευρέως στη φύση και ο χειρισμός του είναι απλός, είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό μετά το οξυγόνο και οι ενώσεις του (διοξείδιο του πυριτίου – SiO_2 και χαλαζίτης) συνιστούν το 28% του φλοιού της γης ενώ είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον και δεν προκαλεί αντενέργειες σε ζώντες οργανισμούς.

ο Τήκεται και μορφοποιείται εύκολα και η μετατροπή του σε μονοκρυσταλλική μορφή δεν είναι περίπλοκη.

⁴¹ Short circuit

⁴² Open circuit

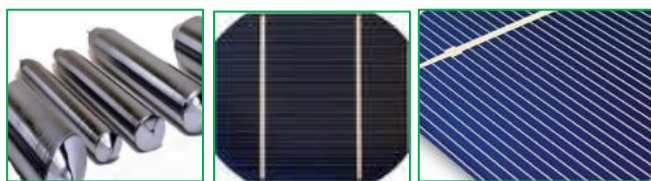
ο Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες διατηρούνται μέχρι και τους 125° C, κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες κάνοντάς το ανθεκτικό και αποδοτικό σε θερμοκρασίες της Ελλάδας. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

ο Η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου στον τομέα της ηλεκτρονικής (H/Y, οθόνες, PCBs⁴³) συνέβαλε στην ταχεία ανάπτυξη των Φ/Β στοιχείων τα τελευταία χρόνια ενώ το 2007 ήταν και η πρώτη χρονιά που είχαμε τη μεγαλύτερη ζήτηση (σε τόνους κρυσταλλικού πυριτίου) στην αγορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με αυτήν των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής.

ο Μια κατηγοριοποίηση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.

- Μονοκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (sc – Si)

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά και η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο.



Εικόνα 55. Φ/Β κελιά μονοκρυσταλλικού Si [56]

Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%.

Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή «ενεργειακής πυκνότητας». Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone) που βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.

Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, είναι της SunPower με απόδοση πλαισίου 22,8%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.

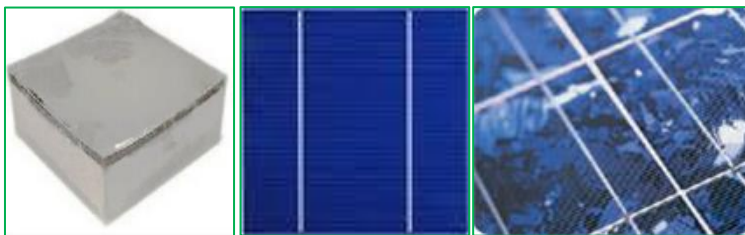
- Πολυκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (mc – Si)

⁴³ Printed Circuit Boards

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά και η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη.

Βασικότερες τεχνολογίες

παραγωγής είναι η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου («χύτευση») και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Εικόνα 56. Φ/Β κελιά πολυκρυσταλλικού Si [47]

Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές οι οποίες όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά.

Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ).

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου ταινίας πυριτίου (Ribbon Si)

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων, αναπτύσσεται από την Evergreen Solar και προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις «παραδοσιακές τεχνικές» κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά και στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.



Εικόνα 57. Φ/Β κελιά ταινίας Si [48]

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου (thin film).

- ο Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)

Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή η απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το κόστος του είναι υψηλότερο όμως επειδή το ίδιο

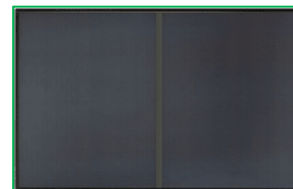


Εικόνα 58. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός με προσθήκη γαλλίου [49]

υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

- ο Άμορφο πυρίτιο (a – Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο ενώ λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι αρκετά χαμηλότερη.



Εικόνα 59. Φ/Β στοιχεία άμορφου Si [50]

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a – Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.

- ο Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%.



Εικόνα 60. Τελουριούχο Κάδμιο [51]

Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe είναι η First Solar. Η χρήση του όμως

αναμένεται να είναι περιορισμένη διότι σύμφωνα με υπάρχουσες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι το κάδμιο είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα ενδεχομένως να μη χρησιμοποιηθεί για εμπορικές εφαρμογές ενώ ιδιαίτερο ζήτημα αποτελεί και η έλλειψη του Τελούριου στη φύση. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).

- ο Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

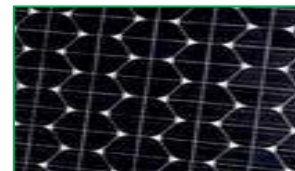
Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος και έχει ενεργειακό διάκενο $1,43\text{eV}$ που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που τα καθιστά απαραίτητα σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.



Εικόνα 61. Αρσενικούχο Γάλλιο [52]

- Υβριδικό Φωτοβολταϊκό (HIT - Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 62. Υβριδικό Φ/B [53]

Κατασκευάζεται από τη Sanyo Solar. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

- Άλλες Τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

- Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc Si)
- Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

Ένας συγκριτικός πίνακας Φ/Β τεχνολογιών φαίνεται παρακάτω [7]:

Τύπος	Λεπτού υμενίου	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Απόδοση ανά Μονάδα επιφάνειας	<i>a-Si</i> : 4,5-6,5% <i>μ-Si</i> : 8-9% <i>CIS-CIGS</i> : 6-12% <i>CdTe</i> : 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά KWp	9-25m ²	7-9m ²	5,5-9m ²

Εικόνα 63. Συγκριτικός Πίνακας Φ/Β τεχνολογιών

3.9 Απόδοση Φωτοβολταϊκών συστημάτων και συντελεστές απώλειας

Απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει αυτό προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου κυμαίνεται στο 5 - 21%. Με την προοδευτική αύξησή του, δημιουργήθηκαν οι αναστροφείς με σκοπό να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με αυτόν τον τρόπο το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, παραγωγική μονάδα) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).

Ο συντελεστής απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου δίνεται από τη σχέση:

$$n_p = \frac{P_p}{H \cdot S} \quad (3.3)$$

με

- n_p : ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου
- P_p : η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (ισχύς αιχμής, W_p)
- H : η ηλιακή ακτινοβολία
- S : η επιφάνεια φωτοβολταϊκού πλαισίου (m²)

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως:

$$n_p = \frac{E}{\Pi \cdot S} \quad (3.4)$$

με

Ε: η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια

- Π: η πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (KW/m²)

Επίσης ισχύει η σχέση:

$$n_p = n * P_F \quad (3.5)$$

Όπου

- n: η μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων
- P_F: ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου

Ο συντελεστής κάλυψης πλαισίου P_F ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας όπου γίνεται η απορρόφηση προς τη συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η τιμή του εξαρτάται από το σχήμα και την πυκνότητα τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και κυμαίνεται από 0,78 έως 0,98.

Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου και τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία περιβάλλοντος διαφέρει αρκετά από τους 25° C, που είναι η συμβατική θερμοκρασία για την οποία δίνεται ο συντελεστής απόδοσης. Εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας και των ηλεκτρικών απωλειών στις αντιστάσεις σειράς, η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων ξεπερνά αυτήν του περιβάλλοντος έως και κατά 30° C. Για να διορθωθεί αυτό το σφάλμα όταν η θερμοκρασία είναι διαφορετική από την συμβατική, πολλαπλασιάζουμε τον αδιάστατο συντελεστή σ_θ με τον συντελεστή απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και ο συντελεστή απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$n_{\theta} = n_p * \sigma_{\theta} \quad (3.6)$$

με

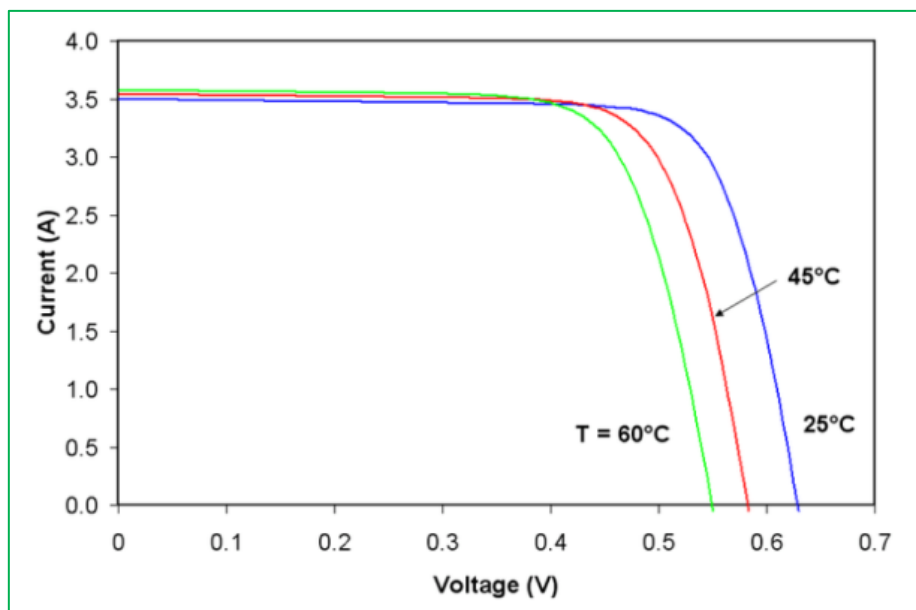
- n_θ: διορθωμένος συντελεστής απόδοσης εξαιτίας της θερμοκρασίας
- σ_θ: ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης

Για θερμοκρασία ίση με 25° C (STC⁴⁴) ο συντελεστής σ_θ ισούται με τη μονάδα και για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτούς, μειώνεται κατά 0.005. Για παράδειγμα αν η μέση θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι 60° C, τότε ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης του πλαισίου είναι: σ_θ = 1 - (60 - 25) x 0,005 = 0,825⁴⁵.

Η τάση του πλαισίου επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία και ειδικά η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} αυξάνεται σημαντικά όταν μειώνεται η θερμοκρασία.

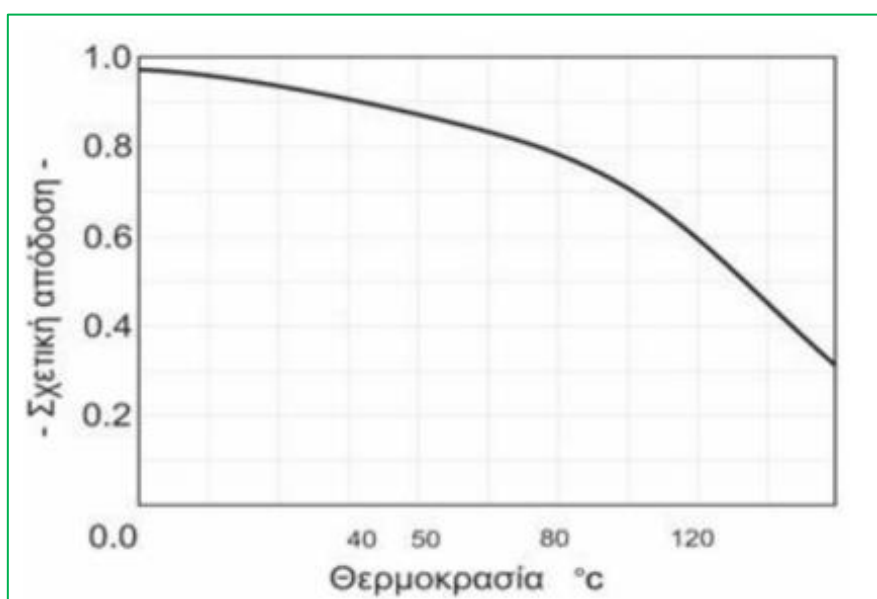
⁴⁴ Standard Test Conditions (οι συνθήκες STC λαμβάνονται συνήθως ως 1000 W/m², 25 °C and 1.5 AM)

⁴⁵ Για το κρυσταλλικό πυρίτιο ο συντελεστής θερμοκρασίας ισχύος είναι συνήθως γ=0.005, σ_θ= 1-(30 + T_c - T_{STC})x0.005, ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης (όπου T_c η θερμοκρασία αναφοράς του Φ/Β κελιού στην περιοχή που μας ενδιαφέρει, T_{STC}= 25° C)



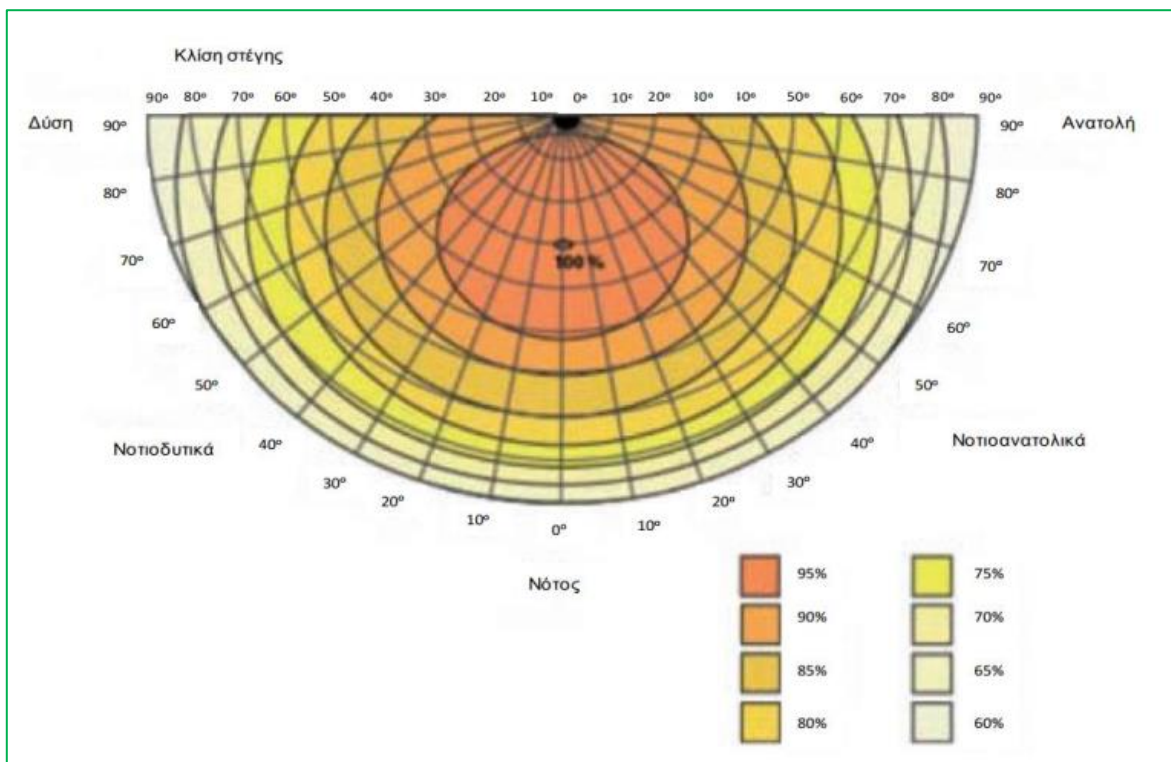
Εικόνα 64. Χαρακτηριστική Φ/B στοιχείου εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία [54]

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης επηρεάζεται σημαντικά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όσο αυξάνεται η ένταση τόσο αυξάνει και το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ενώ εντοπίζεται και μια μικρή αύξηση στην τάση ανοιχτού κυκλώματος. Ανάλογα επιδρά η ηλιακή ακτινοβολία και κατ' επέκταση η θερμοκρασία και στην απόδοση του Φ/B στοιχείου.



Εικόνα 65. Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των Φ/B Si σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους [55]

Καθοριστικά για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι η περιοχή εγκατάστασης, ο προσανατολισμός και η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σε σύγκριση με τις άλλες Ευρωπαϊκές χώρες η απόδοση στην Ελλάδα είναι αρκετά μεγαλύτερη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μείωση στο ποσοστό απόδοσης σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης και τον προσανατολισμό της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.



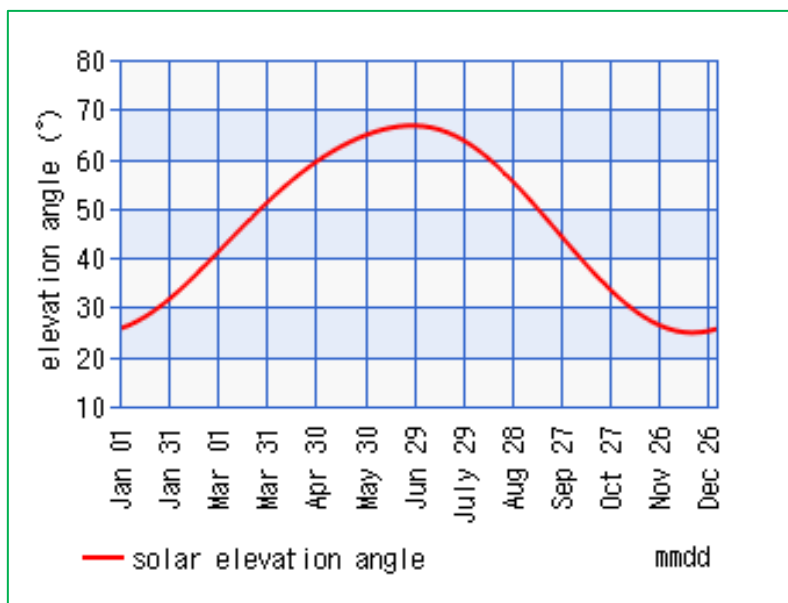
Εικόνα 66. Απόδοση σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης και τον προσανατολισμό [56]

Στην Ελλάδα τα φωτοβολταϊκά έχουν τη μέγιστη απόδοση όταν έχουν νότιο προσανατολισμό. Αποκλίσεις είναι επιτρεπτές μειώνοντας όμως την απόδοση. Η βέλτιστη κλίση είναι εξαρτάται από περιοχή σε περιοχή και διαφέρει για κάθε εποχή, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι είναι απαραίτητη εγκατάσταση tracking⁴⁶ Φ/Β συστήματος. Στον πίνακα παρακάτω φαίνονται ορισμένα ποσοστά από το πως η κλίση και ο προσανατολισμός επηρεάζουν την απόδοση.

Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο	Προσανατολισμός		
	Νότιος	Νοτιοανατολικός Νοτιοδυτικός	Ανατολικός Δυτικός
0°	90%	90%	90%
15°	98%	95%	88%
30°	100%	95%	85%
90°	60%	60%	50%

Εικόνα 67. Απόδοση ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση [57]

⁴⁶ Φ/Β σύστημα που «ακολουθεί» την τροχιά του ήλιου. Δεν προτείνεται για οικιακή εγκατάσταση λόγω περιορισμένης επιφάνειας και άλλων τεχνικών δυσκολιών.



Εικόνα 68. Κλίση Φ/Β σε ετήσια βάση (2020) για συντεταγμένες Lon:21.758859, Lat:38.218094⁴⁷ [58]

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί επίσης από τη ρύπανση της επιφάνειάς του λόγω σκόνης και ακαθαρσιών, ειδικά αν έχουν μικρή κλίση. Η μείωση είναι εντονότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, κυρίως λόγω της αιθάλης που προσκολλάται στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών και δεν απομακρύνεται με το νερό των βροχών. Τα πλαίσια είναι απαραίτητο σ' αυτή την περίπτωση να καθαριστούν με ειδικά απορρυπαντικά.

Αν η περιοχή έχει συχνά χιονοπτώσεις, τα πλαίσια συνήθως τοποθετούνται με κλίση πλησίον της κάθετης ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση όγκων χιονιού. Αν το Φ/Β σύστημα θα τοποθετηθεί σε μέρος με υψηλή ρύπανση, λαμβάνεται υπόψη η μείωση στην απόδοση των πλαισίων με τη χρήση του αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας σ_p . Ο αδιάστατος συντελεστής σ_p ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπαρό φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνειά του είναι καθαρή. Όσο περισσότερη είναι η ρύπανση και όσο λιγότερο βρέχει, τόσο μικρότερος από τη μονάδα είναι ο συντελεστής. Με τη χρήση των δύο βελτιώσεων για τη θερμοκρασία και τη ρύπανση η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια γράφεται ως εξής:

$$E = \Pi * S * n_{\pi} * \sigma_{\theta} * \sigma_p \quad (3.7)$$

με

- σ_p : ο αδιάστατος συντελεστής ρύπανσης

Πέραν του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_{θ} και του αδιάστατου συντελεστή ρύπανσης σ_p λαμβάνονται υπόψη και οι παρακάτω συντελεστές απώλειας της απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου:

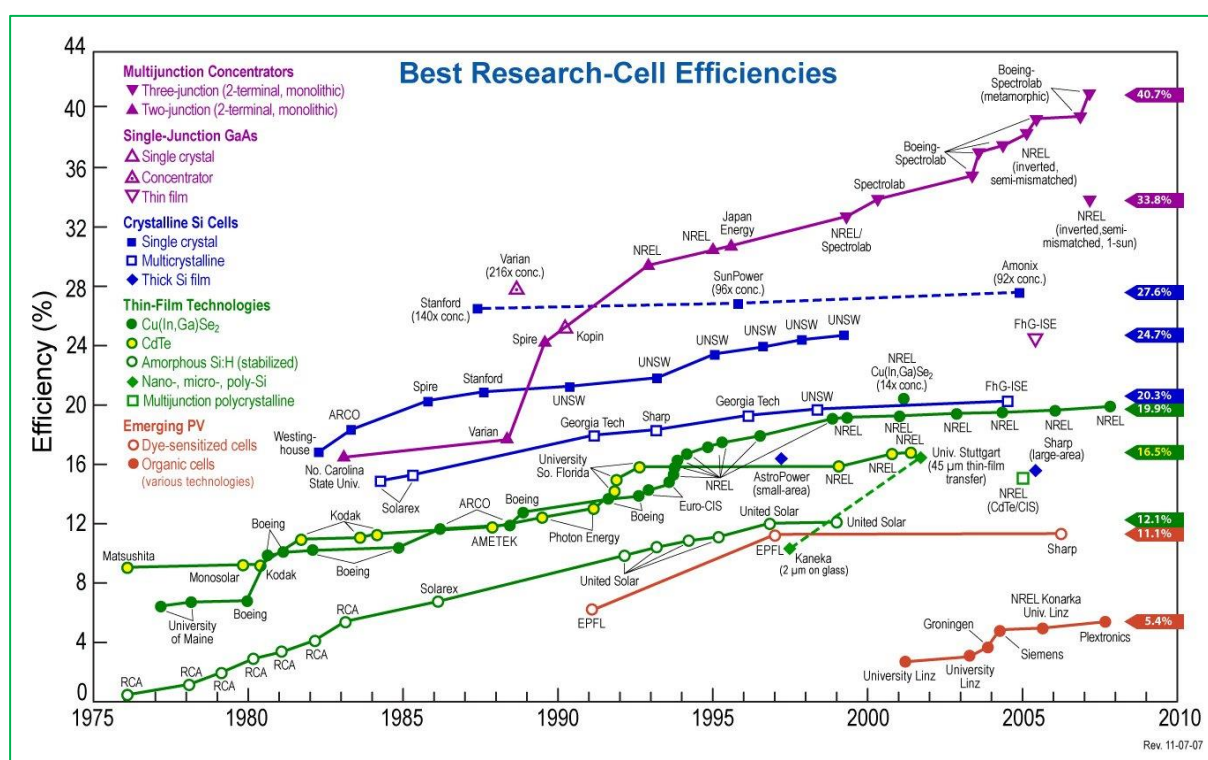
⁴⁷ <https://keisan.casio.com/keisan/graph/php/graphForm.php>

Συντελεστής	Ορισμός	Ορίζεται ως
Συντελεστής απωλειών αγωγών (καλωδιώσεων)	Εκφράζει τις απώλειες στα καλώδια σύνδεσης της Φ/Β συστοιχίας	$\sigma_k=0,98$
Συντελεστής ανομοιογένειας	Εκφράζει την ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών I – V των Φ/Β πλαισίων. Αυτές οι διαφορές μπορεί να δημιουργηθούν από εξωτερικούς παράγοντες (σκίαση), ή από διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες (πχ διαφορετική θερμοκρασία Φ/Β πλαισίων ή να είναι κατασκευαστικές	$\sigma_a=0,98$
Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας	περιλαμβάνει όλες τις απώλειες του ΦΒ συστήματος από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο προς την κατανάλωση. Εξαρτάται από το είδος των διατάξεων που υπάρχουν στο σύστημα και διακρίνουμε δύο περιπτώσεις	<p>➤ <u>Χωρίς ηλεκτρικό συσσωρευτή</u></p> <p>→ Με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter και DC-DC inverter: $\sigma_\mu=0,85-0,90$</p> <p>→ Μόνο με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter: $\sigma_\mu=0,96-0,98$</p> <p>→ Χωρίς μετατροπείς τάσεως: $\sigma_\mu=0,99$</p>
		<p>➤ <u>Με ηλεκτρικό συσσωρευτή</u></p> <p>→ Με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter και DC-DC inverter: $\sigma_\mu=0,75-0,80$</p> <p>→ Μόνο με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter: $\sigma_\mu=0,85-0,90$</p> <p>→ Χωρίς μετατροπείς τάσεως: $\sigma_\mu=0,92$</p>
Συντελεστής γήρανσης	Η απόδοση των Φ/Β πλαισίων μειώνεται λόγω της αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των Φ/Β πλαισίων. Η μείωση λαμβάνεται περίπου με 1% για κάθε έτος λειτουργίας	$\sigma_\gamma=0,9$
Συντελεστής απωλειών διόδου	Εκφράζει τις απώλειες ηλεκτρικής ισχύος κατά τη λειτουργία της διόδου αντεπιστροφής, που εμποδίζει την εκφόρτιση του συσσωρευτή δια μέσου του Φ/Β πλαισίου, όταν αυτό δε λαμβάνει ακτινοβολία. Οι απώλειες αυτές είναι περίπου 1%	$\sigma_\delta=0,99$
Συντελεστής ανακλαστικότητας υαλοπίνακα	Οφείλεται στην απόκλιση λόγω διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας σε γωνίες πρόσπτωσης διαφορετικές της καθέτου του Φ/Β πλαισίου	σ_R
Συντελεστής καθαρότητας υαλοπίνακα	Αφορά καθαρότητα της επιφάνειας του πάνελ	$\sigma_{καθ}$
Συντελεστής απόκλισης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας	Αφορά την απόκλιση σε περιοχές όπου η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας παίρνει χαμηλές τιμές	σ_{LI}
Συντελεστής φασματικής απόκλισης	Λόγω διαφορετικού φάσματος σε σχέση με το φάσμα AM1,5 (STC)	σ_s
Συντελεστής απόκλισης	Εξαιτίας της πόλωσης της ηλιακής ακτινοβολίας	σ_p
Συντελεστής απόδοσης Φ/Β πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες STC	Η τελική τιμή του συντελεστή απόδοσης καθορίζεται και από τον παράγοντα γήρανσης του ΦΒ πλαισίου σ_γ	$\eta_{m,STC}$

Εικόνα 69. Συντελεστές απώλειες απόδοσης Φ/Β πλαισίου

Αν θέλουμε να είμαστε απολύτως σχολαστικοί στη μελέτη μας, τότε η τιμή του συνολικού στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης του Φ/Β συστήματος η_{π} δίνεται ως το γινόμενο των στιγμιαίων συντελεστών ενεργειακών απωλειών του ανωτέρω πίνακα.

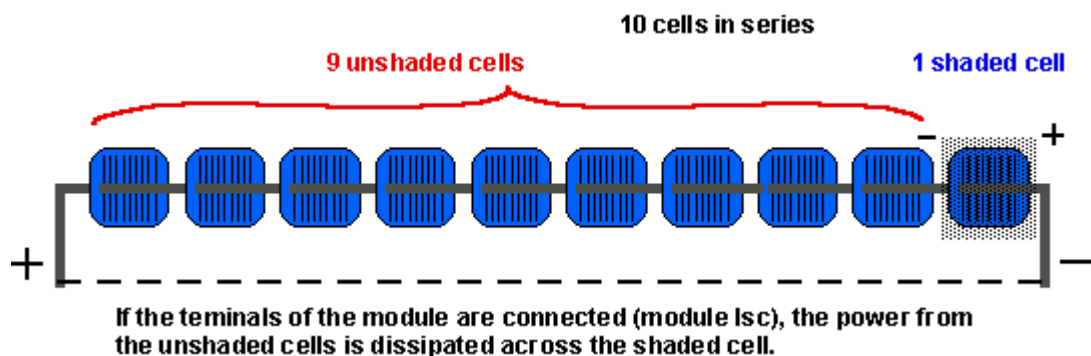
Για να δώσουμε ένα παράδειγμα υπολογισμού των απωλειών ενός Φ/Β πάνελ από τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής ας θεωρήσουμε ένα πάνελ ονομαστικής ισχύος $P_{\max}=330\text{W}$ με συντελεστή θερμοκρασίας $0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Αν θέλουμε να δούμε την απόδοση του πάνελ για παράδειγμα στους 65°C , αφαιρούμε 25°C που είναι η θερμοκρασία του πάνελ σε συνθήκες δοκιμής (STC): $65-25=40^{\circ}\text{C}$. Πολλαπλασιάζοντας $40 \times 0,4=16\%$ που είναι το ποσοστό ισχύος που χάνει το πάνελ στους 65°C . Οπότε $330 \times (1-0,16)=277,2\text{Watt}$ αποδίδει το πάνελ στους 65°C .



Εικόνα 70. Εξέλιξη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων [59]

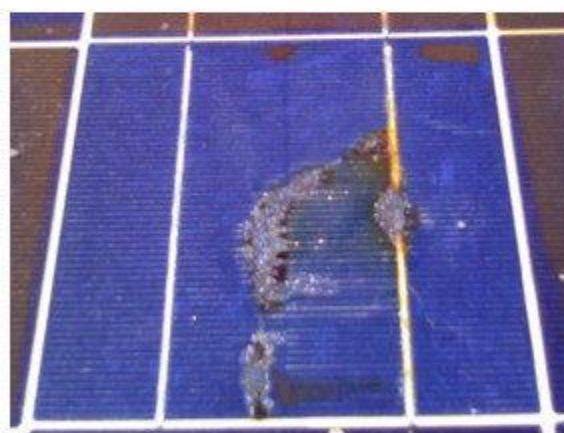
3.10 Απώλεια ισχύος Φ/Β κυψελών εξαιτίας του Φαινόμενο Hot Spot (hot spot heating)

Το φαινόμενο hot spot εμφανίζεται όταν το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός σκιασμένου ή προβληματικού κυττάρου είναι χαμηλότερο από το ρεύμα βραχυκύκλωσης των υπόλοιπων «υγιών» κυττάρων σε μια αλυσίδα κυττάρων, όπως στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 71. Φαινόμενο Hot Spot [60]

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να ελαττώνεται η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τα υπόλοιπα κύτταρα που βρίσκονται σε καλή κατάσταση λόγω υψηλότερων τάσεων που παράγουν αυτά και η οποία προκαλεί την ανάστροφη πόλωση του σκιαζόμενου στοιχείου (κυττάρου). Αυτό οδηγεί όλη την «υγιή» σειρά κυττάρων να τείνει να αποκτήσει την ένταση βραχυκύκλωσης του ελαττωματικού κυττάρου, τη συνολική ένταση που διαρρέει την αλυσίδα να μειωθεί και την ενέργεια που χάνεται στο σκιασμένο στοιχείο να μετατρέπεται σε θερμότητα που είναι δυνατό να προκαλέσει φθορά στο πλαίσιο. Φυσικά αίτια που προκαλούν το φαινόμενο μπορεί να είναι η φύλλωση, το χώμα, η σκόνη, το χιόνι ή η σκίαση από γειτονικές κατασκευές που καλύπτουν μέρος της κυψέλης. Ένα σκιασμένο κύτταρο που αντιμετωπίζει το φαινόμενο μπορεί να αντέξει ανάστροφη πόλωση της τάξεως 10 – 12Volt μέχρι να απομακρυνθεί η σκίαση, ειδάλλως θα υπάρξει διαρροή αντίστροφης έντασης ρεύματος και η αύξηση της θερμοκρασίας θα προκαλέσει μόνιμη φθορά. Υπάρχουν επίσης και κατασκευαστικοί λόγοι που μπορεί να δώσουν τα ίδια αποτελέσματα, όπως ατελής μόνωση στα άκρα, ελαττώματα στις διακλαδώσεις κρυσταλλικού πυριτίου, μεταλλικά σωματίδια πίσω από το κύτταρο, σημάδια υψηλής αντίστασης ή ασυμφωνία κυττάρων με συνέπεια τη διάβρωση και την απώλεια ισχύος όλης της αλυσίδας.



Εικόνα 72. Παραδείγματα φαινομένου hot spot σε κελί κρυσταλλικού πυριτίου [61]



Εικόνα 73. Ραγισμένο κελί εξαιτίας αυξημένης θερμοκρασίας σε σκιασμένο κελί [62]

3.11 Ισχύς αιχμής του Φ/Β πλαισίου

Είναι δυνατό κατά την προμήθεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, ο κατασκευαστής να μη διαθέτει όλα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πλαισίου (συντελεστής κάλυψης και απόδοσης, διαστάσεις) αλλά να δίνει μόνο την ονομαστική ισχύ αιχμής του η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ όταν το Φ/Β πλαίσιο λαμβάνει ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1KW/m^2 (1 ήλιος). Η ισχύς αιχμής συμβολίζεται με P_a , η μονάδα της είναι το KWp και δίνεται από τη σχέση:

$$P_a(\text{KWp}) = 1 \left(\frac{\text{KW}}{\text{m}^2} \right) * S(\text{m}^2) * n_{\pi} \quad (3.8)$$

Σε περίπτωση που είναι γνωστή μόνο η ισχύς αιχμής P_a , τότε ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Φ/Β πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

$$E \left(\frac{\text{KWh}}{d} \right) = E_{HA} \left(\frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 * d} \right) * \frac{P_a(\text{KWp})}{1 * \left(\frac{\text{KW}}{\text{m}^2} \right)} * \sigma_{\theta} * \sigma_{\rho} \quad (3.9)$$

Τέλος η ισχύς αιχμής της Φ/Β συστοιχίας του συστήματός μας για τις ενεργειακές απαιτήσεις αυτονομίας μίας ημέρας δίνεται από τον τύπο:

$$P_{p\Sigma} = \frac{E_{\kappa} * P_{STC} * N}{E_{HA} * \sigma_{A\Sigma} * \sigma_{\mu} * (N - n)} \quad (3.10)$$

Με:


- $P_{SRC} = 1\text{KW/m}^2$, η ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες STC
- E_{κ} : KWh, η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης το χειμώνα.

- E_{HA} : $KWh/m^2/ημέρα$ (για το μήνα Δεκέμβριο), ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας
 - $\sigma_{AS}=0,8\sigma_{\theta}$, ο συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα
 - t_a : $^{\circ}C$, η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα την ημέρα αναφοράς
 - $\sigma_{\theta}= 1-(T_c-T_{STC})\times 0.005$, ο συντελεστής θερμοκρασίας (όπου T_c η θερμοκρασία του Φ/Β κελιού στην περιοχή που μας ενδιαφέρει, $T_{STC}= 25^{\circ}C$)
 - $\sigma_{\mu}= 0,9$, ο συντελεστής μεταφοράς απωλειών ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει ηλεκτρικό συσσωρευτή, ελεγκτή φόρτισης και inverter
 - $N=31$ ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς)
 - $n=1$ Ημέρα (ημέρες αυτονομίας)

3.12 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φ/Β συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι τα ιδανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας καθώς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την πλέον διαθέσιμη και ανεξάντλητη μορφή ενέργεια στον άνθρωπο, την ηλιακή. Τα οφέλη από τη χρησιμοποίησή τους είναι αρκετά και μερικά από αυτά:

- Είναι ανεξάρτητα από ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα
- Η τεχνολογία τους είναι φιλική στο περιβάλλον
- Έχουν τη δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες κάθε εγκατάστασης
- Η εγκατάστασή τους δεν απαιτεί τροποποίηση του υφιστάμενου δικτύου διανομής του παρόχου
 - Η λειτουργία τους είναι αθόρυβη και με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
 - Είναι αξιόπιστα και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής
 - Είναι παραγωγικά ακόμα και με νεφοσκεπή ουρανό αποθηκεύοντας ενέργεια
 - Το πυρίτιο που είναι το βασικό στοιχείο κατασκευής τους βρίσκεται σε μεγάλη αφθονία
 - Ανταποκρίνονται γρήγορα σε απότομες αλλαγές των καιρικών συνθηκών
 - Η εγκατάστασή τους μπορεί να γίνει σε υπάρχουσα κατασκευή, όπως οι στέγες, η πρόσοψη ενός κτιρίου, ένα πεζοδρόμιο ή μία πέργκολα
 - Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν τόσο σε αυτόνομα συστήματα όσο και ως υβριδικά αν συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας με την χρήση των απαραίτητων συσσωρευτών για την αποθήκευση της ενέργειας
 - Είναι ικανά να ανταποκριθούν στις ενεργειακές απαιτήσεις μιας σύγχρονης κατοικίας, ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης
 - Δεν αφήνουν επικίνδυνα κατάλοιπα
 - Είναι αποδοτικά ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες
 - Έχουν μεγάλο εύρος παραγωγής (από mW μέχρι MW)



- Τα ηλιακά πάνελ είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα αν πάθει ένα βλάβη, τα υπόλοιπα πάνελ της αλυσίδας να συνεχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια

- Δεν έχουν σχετικά μεγάλο βάρος και δεν επιβαρύνουν την κατασκευή στην οποία θα τοποθετηθούν

- Δεν έχουν τυποποιημένο μέγεθος και μπορούν, ανάλογα με το σχεδιασμό τους να καλύψουν μεγάλο εύρος αναγκών με αισθητικό αποτέλεσμα

Για κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από συμβατικά καύσιμα, εκλύεται στην ατμόσφαιρα ένα κιλό διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Για την απορρόφηση αυτής της ποσότητας χρειάζονται δύο περίπου στρέμματα δάσους ή εκατό δέντρα. Επιπλέον, με την αντικατάσταση των ρυτογόνων καυσίμων περιορίζεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου και μειώνονται οι εκπομπές των επικίνδυνων ρύπων, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια των οξειδίων του αζώτου και οι ενώσεις του θείου. Αν αναλογιστούμε ότι ένα μέσο σπίτι καταναλώνει ετησίως περίπου 6000 KWh, αντιλαμβανόμαστε ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι αδιαμφισβήτητα.

Πέρα από τα πλεονεκτήματα, όμως υπάρχουν και κάποια στοιχεία που αποτρέπουν υποψήφιους καταναλωτές να προβούν στην εγκατάσταση ενός σύγχρονου Φ/Β συστήματος, όπως:

- Τα Φ/Β συστήματα, όπως και η εκμετάλλευση κάθε μορφής ΑΠΕ έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και εγκατάστασης

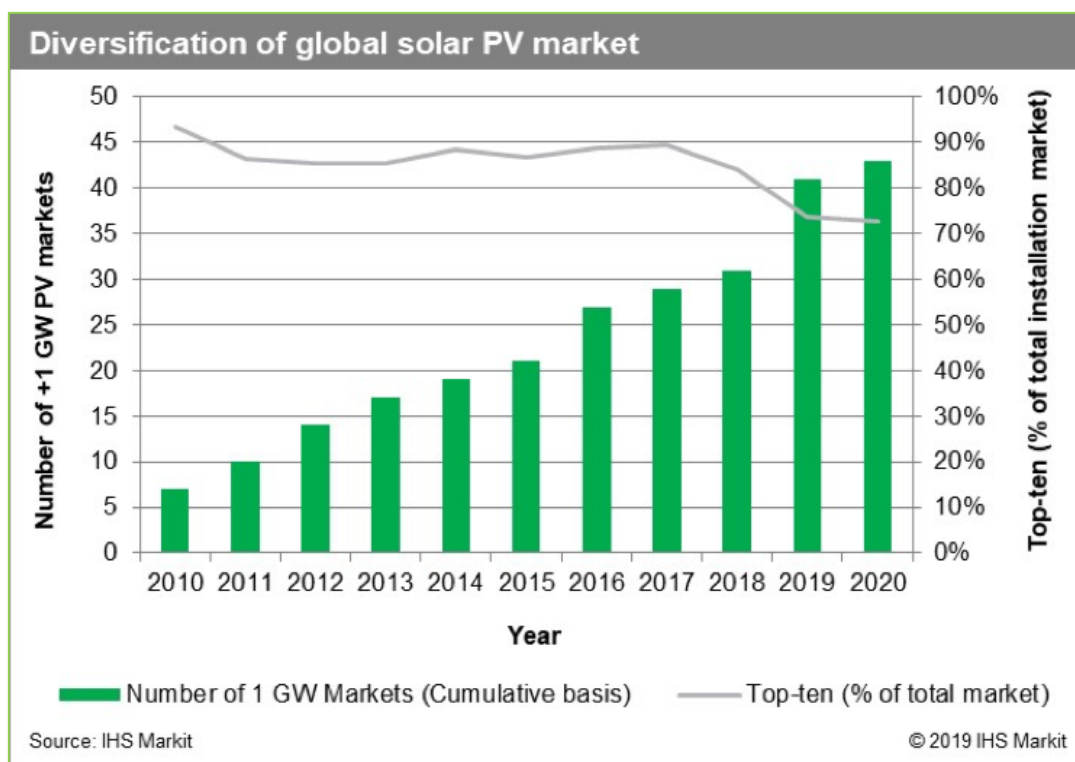
- Απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για να γίνει η απόσβεση αυτού του κόστους

- Εξαιτίας της συνεχούς διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας, απαιτείται η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που είναι δαπανηρή

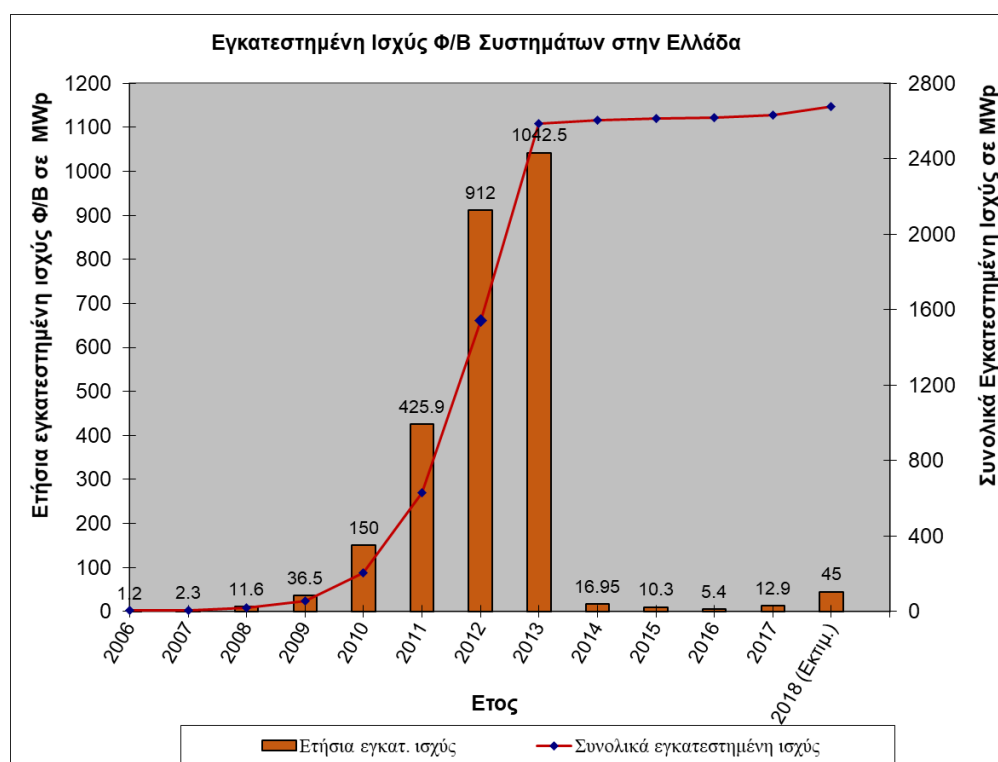
- Απαιτείται επιπλέον συχνός καθαρισμός του Φ/Β πλαισίου για να μη μειώνεται η απόδοσή του, κάτι που δε συνιστά κόστος αλλά είναι χρονοβόρο

- Λόγω της μικρής πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, γίνεται χρήση αρκετά μεγάλων επιφανειών, οι οποίες δύναται να αυξηθούν ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις

Συγκρίνοντας τα παραπάνω στοιχεία, παρατηρούμε πως υπάρχει μια χαρακτηριστική υπερίσχυση των οφελών της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας με την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων, που θα πρέπει να μας παροτρύνει να οδηγηθούμε με γοργούς ρυθμούς σ' αυτή την κατεύθυνση. Δεν είναι άλλωστε τυχαίο η ραγδαία ανάπτυξή τους την τελευταία δεκαετία και η συνεχής βελτίωση της τεχνολογίας.



Εικόνα 74. Εγκαταστάσεις Φ/Β, παγκοσμίως, άνω του 1GW παραγόμενης ενέργειας, για τα έτη 2010-2020 [63]



Εικόνα 75. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα, για τα έτη 2006-2018 [64]

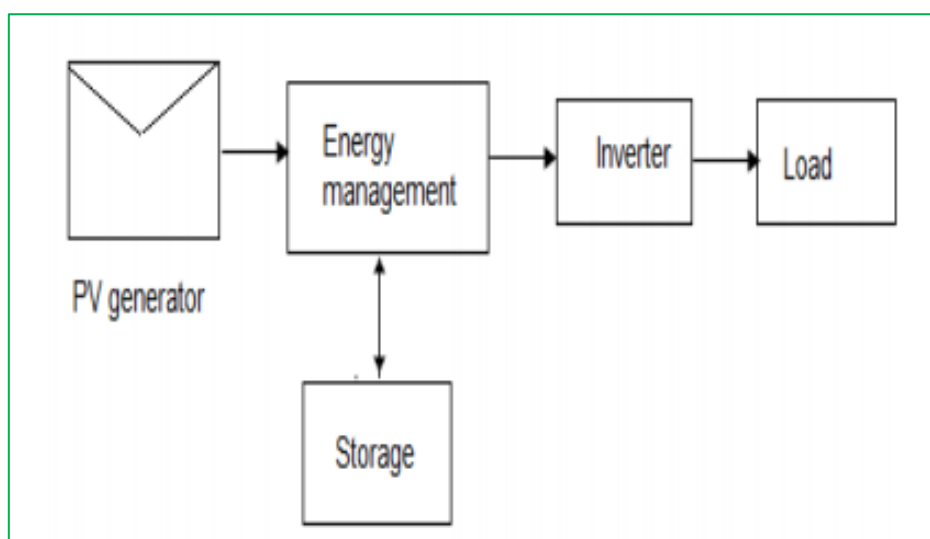
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

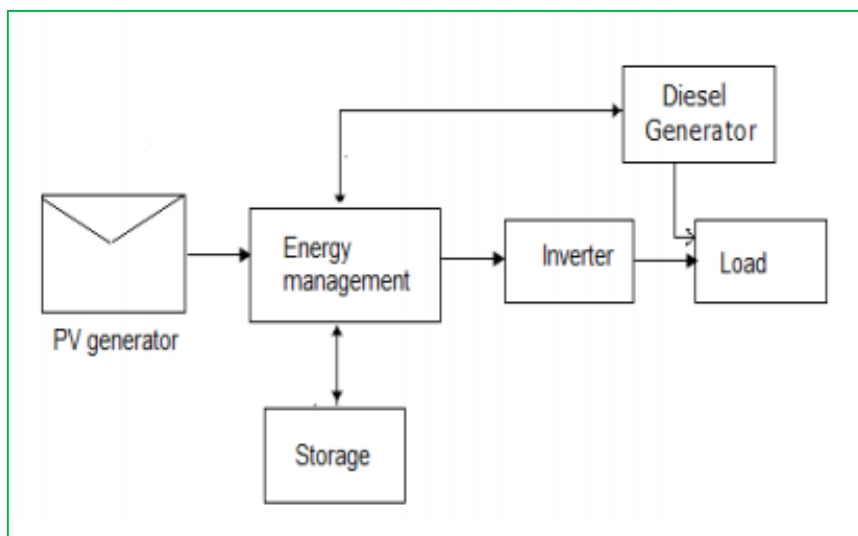
4.1 Εισαγωγή

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία ενός Φ/Β συστήματος είναι η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αυτόνομα ή τα υβριδικά Φ/Β συστήματα είναι απαραίτητο να αποθηκεύουν τη λαμβανόμενη ενέργεια (που έχει μετατραπεί σε ηλεκτρική από ηλιακή) τις ημέρες ηλιοφάνειας ώστε να είναι σε θέση να την παρέχουν για την ικανοποίηση των καταναλωτικών αναγκών κάτω από μεταβλητές καιρικές συνθήκες (έντονη συννεφιά, καταιγίδες, χιονοπτώσεις, νυχτερινή περίοδος) [11]. Η απόδοση ενός Φ/Β συστήματος εξαρτάται κυρίως από το σχεδιασμό των συσσωρευτών, την κατάλληλη συντήρηση και τις συνθήκες λειτουργίας τους.

Η παραγόμενη ενέργεια και οι απαιτήσεις του φορτίου ενέργειας σε ένα Φ/Β σύστημα δεν είναι ίδια (είτε στα αυτόνομα είτε στα υβριδικά Φ/Β συστήματα). Γι' αυτό δημιουργήθηκε η ανάγκη ενός κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για να περιορίσει το φαινόμενο πιθανής μελλοντικής απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως μεταβαλλόμενη ένταση και θερμοκρασία της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση ειδικά των αυτόνομων Φ/Β, η χωρητικότητα των συσσωρευτών πρέπει να είναι αρκετή για παρέχει αδιάλειπτη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη χειμερινή περίοδο. Το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος χωρητικότητας των συσσωρευτών είναι πάντα υποκειμενικό αφού εξαρτάται από τις καταναλωτικές ανάγκες κάθε κατοικίας.



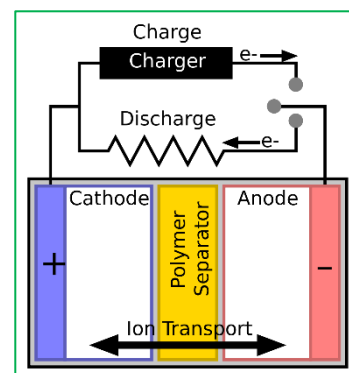
Εικόνα 76. Αυτόνομο Φ/Β σύστημα με συστοιχία συσσωρευτών [65]



Εικόνα 77. Αυτόνομο Φ/Β σύστημα με συστοιχία συσσωρευτών και Η/Ζ [66]

4.2 Δομή των Συσσωρευτών

Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής (μπαταρία) είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που εμπεριέχεται στα ενεργά υλικά της, απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Στην περίπτωση ενός επαναφορτιζόμενου αποθηκευτικού συστήματος, η μπαταρία επαναφορτίζεται με αντιστροφή αυτής της διαδικασίας. Ο τύπος αυτός της αντίδρασης ονομάζεται οξειδοαναγωγή και περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε ένα άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Επειδή η μπαταρία μετατρέπει τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική, δεν υπόκειται στους περιορισμούς του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου όπως στις μηχανές εσωτερικής καύσης γι' αυτό παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση [13] κατά τη μετατροπή ενέργειας.

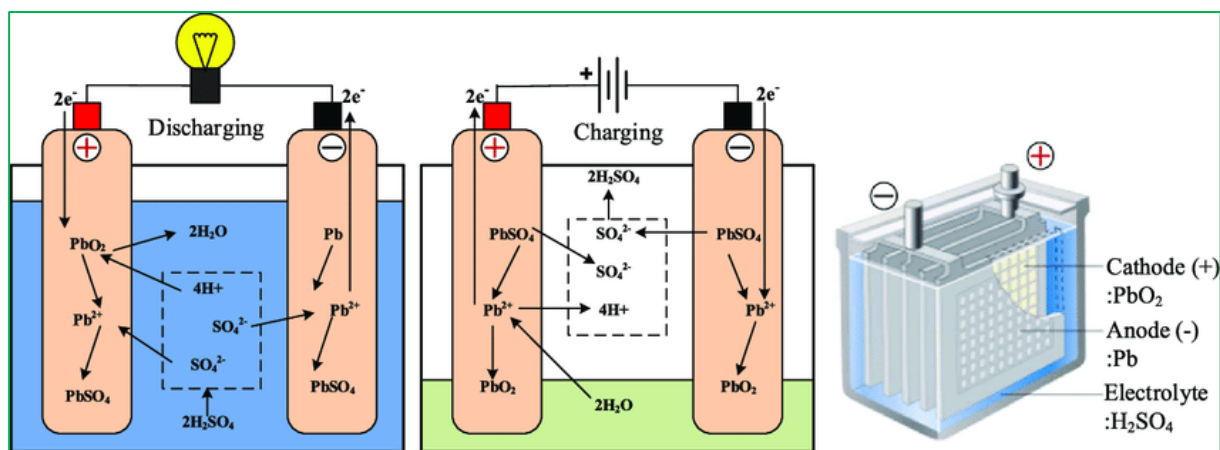


Εικόνα 78. Μεταφορά ιόντων κατά τη φόρτιση/αποφόρτιση [67]

Ενώ συχνά χρησιμοποιείται ο όρος «μπαταρία» ή συσσωρευτής, η βασική ηλεκτροχημική μονάδα στην οποία αναφέρεται είναι το «στοιχείο». Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα τέτοια στοιχεία, σε συνδεσμολογία σειράς ή παράλληλη ή συνδυασμό των δύο ανάλογα με την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα εξόδου. Το στοιχείο αποτελείται από τα παρακάτω συστατικά:

- Το ηλεκτρόδιο ανόδου ή αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο μεταφέρει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
- Το ηλεκτρόδιο καθόδου ή θετικό ηλεκτρόδιο, το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και μειώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας.
- Τον ηλεκτρολύτη (ιοντικό αγωγό), ο οποίος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά του φορτίου, με τη μορφή ιόντων, μέσα στο στοιχείο ανάμεσα στην άνοδο και την

κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι τυπικά ένα υγρό, όπως το νερό ή άλλοι διαλύτες, με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια που διεκπεραιώνουν την ιοντική αγωγιμότητα. Μερικές μπαταρίες χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.



Εικόνα 79. Πρόσωση συσσωρευτή κατά τη φόρτιση/αποφόρτιση [68]

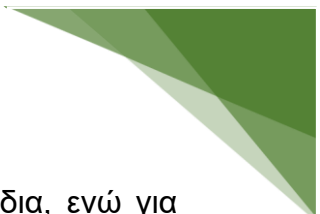
Τα ηλεκτρόδια δεν έρχονται ποτέ σε επαφή μεταξύ τους, αλλά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω του ηλεκτρολύτη. Οι πιο επωφελείς συνδυασμοί των υλικών της ανόδου και της καθόδου είναι εκείνοι που θα δώσουν υψηλή τάση στο στοιχείο και θα είναι οι ελαφρύτεροι. Τέτοιοι συνδυασμοί μπορεί να μην είναι πάντα πρακτικοί εξαιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως η αντίδραση του υλικού με άλλα υλικά του στοιχείου, η πόλωση, η δυσκολία στο χειρισμό και το υψηλό κόστος. Η άνοδος επιλέγεται έχοντας υπόψη τις ακόλουθες ιδιότητες:

- αποτελεσματικότητα ως αναγωγικό μέσο (δηλαδή να προκαλεί αναγωγή, ενώ η ίδια οξειδώνεται)
- υψηλή απόδοση Ah⁴⁸
- καλή αγωγιμότητα
- σταθερότητα
- ευκολία κατασκευής και χαμηλό κόστος

Κατάλληλα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα ως αρνητικά ηλεκτρόδια είναι το υδρογόνο, ο ψευδάργυρος και το λίθιο (Li). Η κάθοδος πρέπει:

- να είναι ένας αποτελεσματικός οξειδωτικός παράγοντας (δηλαδή να προκαλεί οξείδωση, ενώ η ίδια ανάγεται)
- να είναι σταθερή όταν έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη
- να έχει ικανοποιητική τάση λειτουργίας

⁴⁸ Ah (αμπερώριο): πρακτική μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου, εκφράζει την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται από έναν αγωγό όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης ενός αμπέρ σε χρόνο μίας ώρας



Τα πιο συνηθισμένα υλικά για την κάθοδο είναι μεταλλικά οξείδια, ενώ για ειδικά συστήματα συσσωρευτών χρησιμοποιούνται τα αλογόνα, το θείο και τα οξειδιά του και άλλα χημικά συστατικά που περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο ενωμένα με κάποιο άλλο χημικό στοιχείο. Τέλος, ο ηλεκτρολύτης θα πρέπει:

- να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα, αλλά να μην είναι ηλεκτρικά αγωγίμος, καθώς τότε θα δημιουργούνταν εσωτερικά βραχυκυκλώματα.
- να μην αντιδρά με τα ηλεκτρόδια
- να μην επηρεάζεται από τη θερμοκρασία
- να είναι ασφαλής και χαμηλού κόστους

Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδατικά διαλύματα, αλλά υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα οι «θερμικές μπαταρίες» ή οι συσσωρευτές με λίθιο στην άνοδο, όπου ο ηλεκτρολύτης είναι τήγμα άλατος ή άλλοι μη υδατικοί ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται για την αποφυγή αντίδρασης με την άνοδο.

Τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου είναι ηλεκτρικά απομονωμένα στα στοιχεία της μπαταρίας για να αποφεύγονται τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, όπως προαναφέραμε αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε πρακτικούς σχεδιασμούς των στοιχείων υπάρχει μηχανισμός που διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια, με το διαχωριστή να είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη για να διατηρείται η ιοντική αγωγιμότητα.

Επιπλέον, ηλεκτρικοί αγωγοί με δομή πλέγματος μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για να μειώσουν την εσωτερική αντίσταση. Κάθε στοιχείο μπορεί να κατασκευασθεί σε διάφορες διατάξεις και σχήματα (κυλινδρικό, επίπεδο, πρισματικό) και για αυτό τα ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να χωρούν στο επιθυμητό σχήμα του στοιχείου του συσσωρευτή.

Τα στοιχεία στη συνέχεια σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για την αποφυγή διαρροής ή ξήρανσης των υλικών τους. Μερικά είναι εξοπλισμένα με συσκευές εξαερισμού ή άλλα μέσα που επιτρέπουν στα συγκεντρωμένα αέρια να διαφύγουν. Η κατασκευή των ηλεκτροχημικών στοιχείων ολοκληρώνεται με κατάλληλα κιβώτια ή δοχεία, με μέσα σύνδεσης του ακροδέκτη και με τη σήμανσή τους.

4.3 Διάκριση Συσσωρευτών

Οι μπαταρίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, με βάση την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται ή όχι, τις πρωτογενείς δηλαδή (μη επαναφορτιζόμενες) και τις δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενες). Αυτές οι δύο μεγάλες κατηγορίες περιέχουν υποκατηγορίες που έχουν να κάνουν με συγκεκριμένες δομές ή σχεδιασμούς και ταξινομούνται ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται.

4.3.1 Πρωτογενείς μπαταρίες (μη επαναφορτιζόμενες)

Οι πρωτογενείς μπαταρίες δεν έχουν τη δυνατότητα εύκολης ή αποτελεσματικής επαναφόρτισης και για το λόγο αυτό, εκφορτίζονται μια φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται ή ανακυκλώνονται. Οι πρωτογενείς συσσωρευτές είναι μια εύκολη, γρήγορη, πρακτική και συνήθως οικονομική και ελαφριά πηγή ενέργειας για φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές. Τα γενικά τους πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η ελάχιστη ή μηδενική συντήρηση και η ευκολία στη χρήση.

Οι πρωτογενείς μπαταρίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό, φωτογραφικό εξοπλισμό, παιχνίδια, εφεδρικές μνήμες και πολλές άλλες εφαρμογές. Στα πλεονεκτήματα των πρωτογενών μπαταριών συγκαταλέγονται η καλή διάρκεια ζωής και η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς εκφόρτισης. Παρόλο που μεγάλες πρωτογενείς μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, στη σηματοδότηση και την ενέργεια αναμονής, η συντριπτική πλειοψηφία των πρωτογενών μπαταριών είναι οι γνωστές σε όλους μας μπαταρίες ενός ή περισσότερων κυλινδρικών στοιχείων. Διάφοροι τύποι πρωτογενών συσσωρευτών με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους και τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Τύπος συσσωρευτή	Χαρακτηριστικά	Εφαρμογές
Ψευδαργύρου-άνθρακα (Leclanche)	κοινοί, χαμηλού κόστους, διαθέσιμοι σε πολλά μεγέθη	φακοί, ραδιοφωνάκια, παιχνίδια, μικροαντικείμενα
Μαγνησίου	υψηλή χωρητικότητα, μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης	στρατιωτικοί ασύρματοι, πομποί εκτάκτου ανάγκης αεροσκαφών
Αλκαλικοί Μαγγανίου Υδραργύρου	οι πιο δημοφιλείς για γενική χρήση, μέτριο κόστος, καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	ο πιο κοινός πρωτογενής τύπος, χρησιμοποιούνται σε ποικιλία φορητών συσκευών που λειτουργούν με μπαταρίες
Υδραργύρου	υψηλότερη χωρητικότητα κατ' όγκο μεταξύ των πρωτογενών, επίπεδη εκφόρτιση, καλή διάρκεια αποθήκευσης	ακουστικά βοηθήματα, ιατρικές συσκευές (βηματοδότες), ανιχνευτές, στρατιωτικός εξοπλισμός, περιορισμένη χρήση λόγω περιβαλλοντικής ρύπανσης
Καδμίου-Υδραργύρου	μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, καλή απόδοση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα	περιορισμένη χρήση, ειδικές εφαρμογές που απαιτούν μεγάλης διάρκειας λειτουργία σε ακραίες θερμοκρασίες
Οξειδίου αργύρου	υψηλότερη χωρητικότητα κατά βάρος μεταξύ των	ακουστικά βοηθήματα, φωτογραφικές μηχανές,

	πρωτογενών, επίπεδη εκφόρτιση, καλή διάρκεια αποθήκευσης, δαπανηροί	ηλεκτρονικά ρολόγια, πύραυλοι, υποθαλάσσιες εφαρμογές και εφαρμογές σε διαστημόπλοια
Ψευδαργύρου – αέρα	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, εξαρτώνται από περιβαλλοντικές συνθήκες, χαμηλό κόστος	ειδικές εφαρμογές, βομβητές, ακουστικά βοηθήματα, ιατρικές συσκευές
Λιθίου	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, καλή απόδοση σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών	διάφορες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: μετρητές (ενέργειας, νερού, αερίου) έως στρατιωτικές εφαρμογές
Λιθίου με στερεό υλικό καθόδου	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, ανταγωνιστικού κόστους, καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	Αντικαθιστούν συμβατικούς συσσωρευτές σχήματος κουμπιού και κυλινδρικού σχήματος
Λιθίου με στερεό ηλεκτρολύτη	πολύ μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης, χαμηλής ισχύος	ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές, κυκλώματα μνήμης, δίοδοι

Εικόνα 80 - Εφαρμογές συσσωρευτών [69]

Στην περίπτωση των Φ/Β συστημάτων όμως θα μας απασχολήσουν αποκλειστικά οι δευτερογενείς συσσωρευτές που αναλύονται παρακάτω.

4.3.2 Δευτερογενείς μπαταρίες (επαναφορτιζόμενες)

Αυτές οι μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά, μετά από την εκφόρτιση τους, στην αρχική τους κατάσταση με τη διαδικασία ροής ρεύματος μέσα από αυτές στην αντίθετη όμως κατεύθυνση από αυτή του ρεύματος εκφόρτισης. Είναι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και είναι επίσης γνωστές σαν «μπαταρίες αποθήκευσης» (storage batteries). Οι εφαρμογές των δευτερογενών μπαταριών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

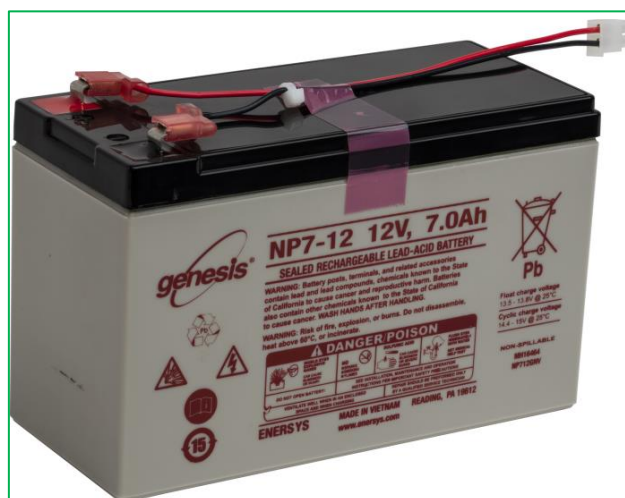
- Εφαρμογές στις οποίες η δευτερογενής μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, που συνήθως είναι συνδεδεμένη και φορτίζεται από μια κύρια πηγή ενέργειας και μεταφέρει την ενέργειά της στο φορτίο όταν της ζητηθεί. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι συστήματα αυτοκινήτων και αεροσκαφών, πηγές ενέργειας αναμονής (UPS⁴⁹), υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα στάσιμης ενεργειακής αποθήκευσης (SES⁵⁰) για ηλεκτρική χρήση ανύψωσης φορτίου.

- Εφαρμογές στις οποίες η δευτερογενής μπαταρία χρησιμοποιείται ή εκφορτίζεται ουσιαστικά σαν μια πρωτογενή μπαταρία, αλλά αντί να απορρίπτεται μετά τη χρήση επαναφορτίζεται. Οι δευτερογενείς μπαταρίες χρησιμοποιούνται κατ' αυτό τον τρόπο σε φορητές ηλεκτρονικές καταναλώσεις, ηλεκτρικά εργαλεία, ηλεκτρικά οχήματα, κινητά τηλέφωνα, για μείωση του κόστους (αφού μπορούν να

⁴⁹ Uninterruptable Power Supply

⁵⁰ Stationery energy systems

επαναφορτιστούν αντί να αντικατασταθούν) και σε εφαρμογές που απαιτούν άντληση ενέργειας πέρα από τα όρια μιας πρωτογενούς μπαταρίας.



Εικόνα 81. Δευτερογενής συσσωρευτής [70]


Οι δευτερογενείς μπαταρίες χαρακτηρίζονται εκτός από την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται, από υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι ενεργειακές τους πυκνότητες είναι γενικά χαμηλότερες από αυτές των πρωτεύουσών μπαταριών και η κατακράτηση φορτίου είναι χαμηλότερης ποιότητας από τις περισσότερες πρωτογενείς μπαταρίες με τη διαφορά ότι η χωρητικότητα που χάνεται σε μια δευτερογενή μπαταρία μπορεί να ανακτηθεί με την επαναφόρτιση.

4.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών

Κάθε συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από διάφορα βασικά μεγέθη που αποτελούν τα χαρακτηριστικά του και συμβάλλουν μεταξύ άλλων στη δυνατότητα της σύγκρισης των διαφόρων τύπων συσσωρευτών και στην διαδικασία της επιλογής του κατάλληλου συσσωρευτή για κάθε εφαρμογή. Τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των συσσωρευτών αναλύονται παρακάτω.

4.4.1 Χωρητικότητα

Η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μπορούν να αποθηκεύσουν οι μπαταρίες είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Ως χωρητικότητα μιας μπαταρίας θεωρείται η ποσότητα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων που παράγονται από το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου και καταναλώνονται από το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου. Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Coulomb (Cb), επειδή όμως το 1 Coulomb είναι μικρή μονάδα, χρησιμοποιούνται τα Αμπερώρια (1 Ah=3600Cb). Για παράδειγμα, αν η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή είναι 10Ah, αυτό σημαίνει ότι ο συσσωρευτής μπορεί να παρέχει ρεύμα έντασης 1A για 10 ώρες ή 2A για 5 ώρες κοκ [13].



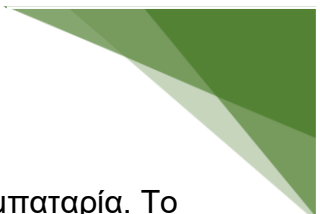
Η χωρητικότητα εξαρτάται από την ποσότητα των ενεργών υλικών του συσσωρευτή. Ένα πολύ μικρό ηλεκτροχημικό στοιχείο έχει μικρότερη χωρητικότητα από ένα μεγαλύτερο στοιχείο ίδιας χημικής σύστασης. Επίσης, η χωρητικότητα επηρεάζεται από τις συνθήκες εκφόρτισης όπως είναι ο ρυθμός εκφόρτισης (μεγάλος ρυθμός εκφόρτισης συνεπάγεται μικρή χωρητικότητα συσσωρευτή), το ρεύμα εκφόρτισης, η τάση και η θερμοκρασία [15].

Η χωρητικότητα της μπαταρίας ποικίλει, όπως αναφέραμε, για διάφορους ρυθμούς εκφόρτισης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα του στοιχείου. Χαμηλότεροι ρυθμοί εκφόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές συσσωρευτών συνήθως ορίζουν μερικούς ρυθμούς εκφόρτισης (σε αμπέρ) μαζί με τους χρόνους εκφόρτισης που συνδέονται με αυτούς (σε ώρες). Η χωρητικότητα της μπαταρίας για κάθε έναν από αυτούς τους ρυθμούς εκφόρτισης υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η ονομαστική χωρητικότητα για τις μπαταρίες μολύβδου συνήθως καθορίζεται για ρυθμούς 8, 10 ή 20 ωρών (C/8, C/10, C/20) [16].

Η χωρητικότητα όλων των μπαταριών μολύβδου οξέος για δεδομένη τελική τάση μειώνεται στις χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει λόγω πολλών παραγόντων μεταξύ των οποίων είναι η αυξημένη αντίσταση και ο μειωμένος ρυθμός διάχυσης στον ηλεκτρολύτη. Το δεύτερο φαινόμενο σημαίνει ότι οι μπαταρίες μολύβδου οξέος με μεγάλο απόθεμα οξέος τείνουν να χάνουν περισσότερη χωρητικότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες από ότι αυτές που έχουν μικρότερο όγκο οξέος. Οι ονομαστικές χωρητικότητες συνήθως αναφέρονται σε θερμοκρασία λειτουργίας 20° C. Στις χωρητικότητες που δίνονται από τον κατασκευαστή πρέπει να αναφέρεται η τελική τάση στην οποία αυτές εφαρμόζονται. Για μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η τάση αυτή είναι συνήθως μεταξύ 1.75V και 1.85V ανά στοιχείο. Όταν συγκρίνονται δύο διαφορετικές μπαταρίες, πρέπει οι χωρητικότητές τους να συγκρίνονται ως προς την ίδια τελική τάση. Προφανώς, όσο χαμηλότερη είναι η τελική τάση, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαθέσιμη χωρητικότητα.

4.4.2 Τάση

Η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος και η διάθεση του σε ένα εξωτερικό κύκλωμα οφείλεται στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου. Αυτή η διαφορά δυναμικού, η οποία μετρείται σε Volt αναφέρεται ως τάση του στοιχείου ή της μπαταρίας. Ένα μόνο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού συνήθως 2V υπό φορτίο. Ένα πλήρως εκφορτισμένο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού περίπου 1.75V, ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης [16]. Η τάση ισορροπίας ενός στοιχείου είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος



(OCV⁵¹) μπορεί να μετρηθεί εάν κανένα εξωτερικό ρεύμα δε διαρρέει τη μπαταρία. Το λίθιο χρησιμοποιείται ευρέως ως άνοδος σε πρωτογενείς και δευτερογενείς μπαταρίες γιατί προσφέρει το υψηλότερο πρότυπο δυναμικό από όλες τις χημείες των μπαταριών [17]. Η τάση του στοιχείου υπό φορτίο, ή τάση κλειστού κυκλώματος (CCV⁵²), εξαρτάται από το ρεύμα, τη στάθμη φόρτισης και το ιστορικό του στοιχείου, όπως τη διάρκεια ζωής του ή το χρόνο αποθήκευσης. Η τελική τάση φόρτισης (ECV⁵³) καθορίζει ένα άνω όριο για την τάση. Η φόρτιση μιας μπαταρίας δε σταματά όταν φτάσει την τελική τάση φόρτισης, όπως συμβαίνει με την τελική τάση εκφόρτισης (EDV⁵⁴), αλλά όταν το ρεύμα φόρτισης μειώνεται κατάλληλα για να διατηρεί την τελική τάση φόρτισης με πάροδο του χρόνου.

4.4.3 Στάθμη φόρτισης

Η στάθμη φόρτισης ή κατάσταση φόρτισης (SOC⁵⁵) μας πληροφορεί για τη χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή και εκφράζεται μέσω ποσοστού. Το 100% στάθμης φόρτισης σημαίνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ 0% στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί [15]. Για τη λειτουργία και τη διαχείριση της ενέργειας στα συστήματα παραγωγής ενέργειας, η χωρητικότητα της μπαταρίας και η στάθμη φόρτισης αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους.

Εξαιτίας των συνθηκών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (στοχαστικά φαινόμενα), οι μπαταρίες πολλές φορές δεν επαναφορτίζονται πλήρως (λόγω περιορισμένου αριθμού ωρών φόρτισης). Η μέγιστη στάθμη φόρτισης λοιπόν που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη φυσιολογική λειτουργία του συστήματος ονομάζεται στάθμη φόρτισης πλήρους ακτινοβολίας. Επίσης, το σύστημα καθορίζει ένα κριτήριο τέλους εκφόρτισης για να αποφευχθεί η βαθιά εκφόρτιση της μπαταρίας και κατά συνέπεια η μείωση του ρυθμού γήρανσης, το οποίο συνήθως διαφέρει από τα κριτήρια τέλους εκφόρτισης που χρησιμοποιούνται στους ελέγχους της χωρητικότητας. Έτσι, η πρακτική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα [15]. Επομένως, η ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται ως η χωρητικότητα για εκφόρτιση 10 ωρών (C/10). Αυτή είναι η βάση και για τον καθορισμό της στάθμης φόρτισης. Η ονομαστική χωρητικότητα δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ η μετρούμενη χωρητικότητα μεταβάλλεται με το χρόνο αλλά και τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας και συντήρησης των μπαταριών.

⁵¹ Open Circuit Voltage

⁵² Closed Circuit Voltage

⁵³ End of Charge Voltage

⁵⁴ End of Discharge Voltage

⁵⁵ State of Charge

4.4.4 Βάθος εκφόρτισης

Το βάθος εκφόρτισης (DOD⁵⁶) είναι το κλάσμα ή το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Το αντίθετο, δηλαδή, από τη στάθμη φόρτισης που όπως είδαμε παραπάνω, είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που είναι ακόμα διαθέσιμο στη μπαταρία. Παρακάτω φαίνεται η σχέση μεταξύ στάθμης φόρτισης και βάθους εκφόρτισης.

Σχέση Στάθμης Φόρτισης και Βάθους Εκφόρτισης	
Στάθμη Φόρτισης (SOC) – %	Βάθος εκφόρτισης (DOD) – %
100	0
75	25
50	50
25	75
0	100

Εικόνα 82. Σχέση Στάθμης φόρτισης και βάθους εκφόρτισης [71]

Οι τιμές αυτές, για τη στάθμη φόρτισης και το βάθος εκφόρτισης συνήθως αναφέρονται στην ονομαστική χωρητικότητα (χωρητικότητα για το ρυθμό των 10 ωρών). Για χαμηλότερα ρεύματα εκφόρτισης, μπορεί να συναντήσουμε αναφορές για DOD μεγαλύτερο του 100%. Αυτό απλά σημαίνει ότι η μπαταρία μπορεί να παράγει περισσότερο από το 100% της ονομαστικής της χωρητικότητας σε ρυθμούς εκφόρτισης χαμηλότερους από τον ονομαστικό ρυθμό εκφόρτισης [14].

4.4.5 Κύκλος ζωής

Με τον όρο κύκλο ζωής, εννοούμε την επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία. Ένας κύκλος ισοδυναμεί με μια εκφόρτιση που ακολουθείται από μια φόρτιση. Ο κύκλος ζωής αποτελεί ένα χρήσιμο μέτρο που μας πληροφορεί για τον αριθμό των κύκλων που μια μπαταρία μπορεί να δώσει κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής της. Συνήθως αντιστοιχεί στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο DOD που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η διαθέσιμη χωρητικότητά της μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό (περίπου 80%) της αρχικής χωρητικότητας. Ο κύκλος ζωής εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το βάθος του κάθε κύκλου.

Κατά τις εργαστηριακές δοκιμές του κύκλου ζωής των συσσωρευτών πραγματοποιείται μια πλήρης επαναφόρτιση μετά από κάθε εκφόρτιση. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η επαναφόρτιση δεν είναι τόσο πλήρης λόγω των συνεχών ατελών φορτίσεων και εκφορτίσεων με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κύκλος ζωής όταν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χρόνων ζωής στα εν λόγω συστήματα γι' αυτό

⁵⁶ Depth of Discharge

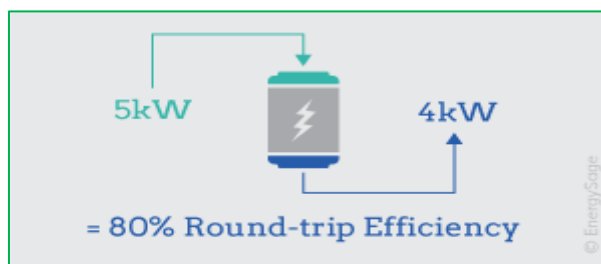
ένα ποσοστό της τάξεως του 80% είναι αρκετό για να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα [14].

4.4.6 Αποδοτικότητα

Η αποδοτικότητα ενός συσσωρευτή (η_{Ah}) ορίζεται ως ο λόγος των Αμπερωρίων που εκφορτίζονται από τη μπαταρία προς τα αμπερώρια που φορτίζονται στην μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (ένας μήνας συνήθως ή μία περίοδος ανάμεσα σε δύο διαδικασίες πλήρους φόρτισης). Συχνά, αντί για την αποδοτικότητα Amp – hour χρησιμοποιείται ο παράγοντας φόρτισης, ο οποίος ορίζεται ως $\frac{1}{nAh}$. Για μια βιώσιμη λειτουργία μπαταρίας είναι απαραίτητοι παράγοντες φόρτισης μεγαλύτεροι της μονάδας ενώ συνήθως χρησιμοποιείται και η σχέση:

$$Energy\ efficiency = \frac{Charged\ energy(KW)}{Discharged\ Energy(KW)} \quad (4.1)$$

Η αποδοτικότητα ενέργειας είναι ο λόγος της ενέργειας που εκφορτίζεται από μια μπαταρία προς την ενέργεια που φορτίζεται σε μια μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο [14].




Εικόνα 83. Απόδοση συσσωρευτή κατά τη λειτουργία του [72]

4.4.7 Ρεύμα μπαταρίας

Τα ρεύματα μπαταρίας δίνονται συναρτήσει με το μέγεθος της μπαταρίας επειδή οι εντάσεις και οι εξαρτώμενες από το ρεύμα ηλεκτρικές ιδιότητες σχετίζονται με συγκεκριμένα φορτία στα ηλεκτρόδια. Για μεγαλύτερες χωρητικότητες που έχουν δημιουργηθεί από την παράλληλη σύνδεση ηλεκτροδίων ή κυττάρων ή από μεγαλύτερα ηλεκτρόδια, η κανονικοποίηση (normalization) του ρεύματος ως προς την χωρητικότητα είναι ένα κατάλληλο μέτρο. Γι' αυτό, τα ρεύματα μπαταρίας εκφράζονται ως πολλαπλάσια της χωρητικότητας σε αμπερώρια ή ως πολλαπλάσια του ρεύματος εκφόρτισης που καθορίζεται από τη χωρητικότητα. Για μια μπαταρία με χωρητικότητα $C = 100\text{ Ah}$, ένα ρεύμα 10 A ορίζεται ως $0.1 \times C$ ή $C/10$ [15].

4.4.8 Χρόνος ζωής

Ο χρόνος ζωής μιας μπαταρίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας και από τις στρατηγικές ελέγχου. Ο χρόνος ζωής στις πρωτογενείς μπαταρίες περιορίζεται από την αυτοεκφόρτισή τους και ορίζεται συνήθως σαν ο χρόνος που χρειάζεται η μπαταρία για να φτάσει το 90% της αρχικής της χωρητικότητας. Αντίθετα, ο χρόνος ζωής των δευτερογενών μπαταριών ορίζεται σαν



τη διάρκεια ικανοποιητικής επίδοσης που μετريέται σε χρόνια (ημερολογιακός χρόνος ζωής) ή σαν τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης (κύκλος ζωής). Το κριτήριο τέλους ζωής για τις δευτερογενείς μπαταρίες καθορίζεται συνήθως από το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η μπαταρία το 80% της αρχικής της χωρητικότητας. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης τυπικά αυξάνεται καθώς μειώνεται το DOD. Και οι δύο τύποι χρόνου ζωής των δευτερογενών μπαταριών, επηρεάζονται από τη θερμοκρασία κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, το DOD, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, τη μέθοδο ελέγχου της φόρτισης, την έκθεση σε υπερφόρτιση και την υπερεκφόρτιση και τη διάρκεια και τις συνθήκες αποθήκευσης.

4.4.9 Ειδική ενέργεια / ενεργειακή πυκνότητα

Ως ειδική ενέργεια ενός συσσωρευτή ορίζεται η ενεργειακή χωρητικότητα ανά μονάδα βάρους του συσσωρευτή (Wh/kg^{57}). Η θεωρητική ειδική ενέργεια είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα βάρους του ενεργού υλικού του συσσωρευτή. Οι πρακτικές τιμές της ειδικής ενέργειας είναι αρκετά χαμηλότερες από τις θεωρητικές. Για παράδειγμα, στο συσσωρευτή μολύβδου – οξέος που χρησιμοποιείται σε οχήματα αποδεικνύεται ότι μόνο το 26% του συνολικού του βάρους συμμετέχει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως ενεργειακή πυκνότητα ορίζεται η ενέργεια που παρέχεται ανά μονάδα όγκου του συσσωρευτή (Wh/l^{58} ή Wh/cm^3) [16].

4.4.10 Αυτοεκφόρτιση

Αυτοεκφόρτιση καλούμε την απώλεια φορτίου σε μια μπαταρία αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για ένα χρονικό διάστημα. Σε μια καινούρια πρωτογενή μπαταρία που δεν έχει χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα η χωρητικότητά της θα έχει μειωθεί χαρακτηριστικά σε σχέση με την ονομαστική της τιμή. Όσον αφορά τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισής τους συνήθως αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό χωρητικότητας που χάνεται σε μία περίοδο ενώ είναι δυνατό ο ρυθμός αυτός να διπλασιάζεται για κάθε αύξηση $\sim 10^\circ \text{C}$ στη θερμοκρασία της μπαταρίας. Στους περισσότερους υπολογισμούς για φωτοβολταϊκές μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης των συσσωρευτών που πρέπει να επιλέγουμε, επιβάλλεται να είναι χαμηλός (1 – 4% ανά μήνα σε θερμοκρασία $20 - 25^\circ \text{C}$) και η αυτοεκφόρτιση να απαιτεί πολύ μικρό ποσοστό επιπρόσθετης φόρτισης συγκριτικά με το φορτίο που μπορεί να αμεληθεί [14].

4.4.11 Κατάσταση υγείας

Ορίζουμε ως κατάσταση της υγείας ενός συσσωρευτή το λόγο της μετρούμενης χωρητικότητας προς την ονομαστική του χωρητικότητα. Η κατάσταση υγείας μας δείχνει πόσο η μπαταρία είναι ακόμα ικανή να εξυπηρετεί το σύστημα που

⁵⁷ Watt hour/kilogram

⁵⁸ Watt hour/litre

υποστηρίζει. Οι συσσωρευτές μολύβδου – οξέος λειτουργούν αξιόπιστα όσο η κατάσταση της υγείας τους είναι πάνω από 80%. Δύνανται δε να λειτουργούν ακόμα και όταν αυτό το ποσοστό μειωθεί με μειωμένο διάστημα αυτονομίας. Στα υβριδικά συστήματα συναντάμε και συσσωρευτές με ακόμη χαμηλότερο ποσοστό υγείας τα οποία συνεχίζουν να καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις, ιδίως όταν συνδυάζονται και με άλλα μέσα παραγωγής ενέργειας όπως τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη με επακόλουθο την αύξηση του φορτίου της γεννήτριας [15].

4.4.12 Ρυθμός φόρτισης / εκφόρτισης

Οι ρυθμοί εκφόρτισης και φόρτισης είναι κλίμακες με τις οποίες συγκρίνουμε το ρεύμα που φορτίζονται οι συσσωρευτές, ανεξάρτητα από τη χωρητικότητά τους. Εκφράζονται ως ένας αριθμός ωρών όπως ο ρυθμός 10 ωρών ή 10 ημερών ενώ το ρεύμα στο οποίο αντιστοιχούν είναι ο λόγος της συνολικής χωρητικότητας εκφόρτισης προς το χρόνο στον οποίο φορτίζονται ή εκφορτίζονται [14]:

$$Ρυθμός = \frac{Χωρητικότητα(Ah)}{Χρόνος(h)} \quad (4.2)$$

Για ένα χρονικό διάστημα 240 ωρών, ο ρυθμός που προκύπτει είναι ο λόγος της ονομαστικής χωρητικότητας σε Ah προς 240.

4.4.13 Ειδική ισχύς

Η ειδική ισχύς ενός συσσωρευτή ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς ανά μονάδα βάρους που μπορεί να παραχθεί σε ένα συγκεκριμένο μικρό χρονικό διάστημα. Είναι χαρακτηριστικό της χημικής σύστασης του συσσωρευτή και εξαρτάται κυρίως από την εσωτερική του αντίσταση. Έχει μονάδα μέτρησης το W/kg και καθορίζει το βάρος του συσσωρευτή που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση [16].

4.4.14 Εσωτερική αντίσταση

Η εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας συνήθως διαφέρει στη φόρτιση και την εκφόρτιση (χαμηλότερη στην εκφόρτιση και υψηλότερη στη φόρτιση). Εξαρτάται από τη χημική σύσταση της μπαταρίας και επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το μέγεθος της μπαταρίας, την ηλικία της και το ρεύμα εκφόρτισης. Είναι απαραίτητο η εσωτερική αντίσταση κάθε συσσωρευτή να είναι σημαντικά μικρότερη της αντίστασης του φορτίου ειδάλλως, όσο αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή, η απόδοση και η θερμική του ευστάθεια συσσωρευτή μειώνονται λόγω μετατροπής της ενέργειάς του σε θερμότητα [14].

4.4.15 Ειδικό βάρος

Ειδικό βάρος (relative density) ονομάζεται ο λόγος ενός διαλύματος προς έναν ίσο όγκο νερού σε μια καθορισμένη θερμοκρασία. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται σα δείκτης για τη στάθμη φόρτισης ενός στοιχείου ή μιας μπαταρίας [16].


4.5 Συσσωρευτές Φ/Β Συστημάτων

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Μερικά παραδείγματα επαναφορτιζόμενων αποθηκευτικών συστημάτων είναι:

- Μολύβδου οξέος (Lead acid – PbSO_4)
- Νικελίου καδμίου (Nickel Cadmium – NiCd)
- Νικελίου σιδήρου (Nickel Iron - NiFe)
- Υδριδικές νικελίου (Nickel hydride)
- Ιόντων λιθίου (Li-ion)

Από αυτές μόνο οι μολύβδου οξέος, οι ιόντων λιθίου και σε μικρότερο βαθμό οι νικελίου καδμίου χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα σήμερα. Οι μπαταρίες νικελίου σιδήρου σπάνια χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές εξαιτίας του υψηλού ρυθμού αυτοεκφόρτισής τους, κάτι το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Οι υδριδικές μπαταρίες νικελίου και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου είναι σχετικά σύγχρονες εξελίξεις συσσωρευτών και οι κύριες εφαρμογές τους μέχρι σήμερα είναι σε υψηλής αξίας ηλεκτρονικά αγαθά όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί Η/Υ. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αρχίζουν να γίνονται ευρέως διαθέσιμες και σε πιο μεγάλες χωρητικότητες (εκατοντάδες Ah) που απαιτούνται σε μικρά (οικιακά) φωτοβολταϊκά συστήματα. Είναι αρκετά πιο ακριβές ανά KWh σήμερα σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος και απαιτούν περίπλοκη προστασία για το κύκλωμα φόρτισής τους, κάτι το οποίο δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί με τη μεταβλητή φύση των ρευμάτων φόρτισης που συναντάμε στα Φ/Β συστήματα.

Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, η πρόοδος που έχει σημειωθεί στις μπαταρίες λιθίου έχει ανοίξει το δρόμο για τη χρησιμοποίησή τους και σε μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα (χιλιάδων Ah). Μεγάλες εταιρίες ηλεκτρονικών αυξάνουν την παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου και ήδη από το 2013 έχει προκύψει μαζική παραγωγή μπαταριών λιθίου που έχουν σχεδιαστεί για σπίτια που τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά συστήματα. Η τιμή των μπαταριών ιόντων λιθίου όμως είναι ακόμα αρκετά υψηλή αλλά αναμένεται να γίνουν εξαιρετικά ανταγωνιστικές στην αγορά λόγω των χαρακτηριστικών τους. Υπάρχουν και άλλοι τύποι επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών υπό ανάπτυξη ή σε πειραματικό στάδιο για μελλοντικές εφαρμογές σε



ηλεκτρικά οχήματα ή ανύψωση φορτίων, οι οποίοι παρόλο που δεν είναι ακόμα εμπορικά διαθέσιμοι, ενδεχομένως να αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες συμβατικές μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β συστήματα.

4.5.1 Τρόπος λειτουργίας συσσωρευτών στα Φ/Β συστήματα

Υπάρχουν τρεις κύριες λειτουργίες που μια μπαταρία εκτελεί σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα:

- Δρα σαν ένα βοηθητικό ποσό ενέργειας για να εξαλείψει την αναντιστοιχία μεταξύ της διαθέσιμης από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ισχύος και της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος. Η ισχύς που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή συστοιχία κάθε στιγμή ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που προσκρούει σε αυτή (μηδενική το βράδυ). Το αποθηκευτικό σύστημα παρέχει ισχύ όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν παράγει ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν παράγει λιγότερη ισχύ από όση απαιτεί το ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, απορροφά την περίσσεια ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία όταν αυτή παράγει περισσότερη ισχύ από ότι το φορτίο απαιτεί.
- Παρέχει ένα αποθεματικό ενέργειας (αυτονομία του συστήματος) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια μερικών ημερών συννεφιασμένου καιρού (περιορισμένης ηλιοφάνειας) ή σε κάποια περίπτωση ανάγκης εάν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιο τμήμα του φωτοβολταϊκού συστήματος (αυτόνομα Φ/Β συστήματα).
- Αποτρέπει μεγάλες διακυμάνσεις τάσης. Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να αποδώσει ισχύ σε κάθε σημείο μεταξύ βραχυκυκλώματος και ανοικτού κυκλώματος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτήν. Σε ένα σύστημα ονομαστικής τάσης 12V, οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0V και περίπου 20V είναι πιθανό να προκύψει από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Πολλά φορτία δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα τόσο μεγάλο εύρος τάσεων. Η τοποθέτηση μιας μπαταρίας μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του φορτίου διασφαλίζει ότι το φορτίο δε θα βλέπει τίποτα έξω από το εύρος τάσεων στο οποίο η μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει – στην περίπτωση ενός συστήματος 12V από περίπου 9,5 V σε βαθιά εκφόρτιση μέχρι περίπου 16V υπό συνθήκες ακραίας [14].

4.5.2 Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν

Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα συστήματα αποθήκευσης σε ένα σύστημα παραγωγής ισχύος είναι πολυάριθμες. Μερικές από αυτές έρχονται σε αντίθεση η μία με την άλλη και επομένως δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

- Υψηλή ενεργειακή απόδοση


- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Μεγάλη διάρκεια ζωής από την άποψη της απόδοσης χωρητικότητας
- Χαμηλό κόστος
- Καλή αποδοτικότητα φόρτισης ακόμα και σε πολύ μικρά ρεύματα
- Χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης
- Μικρές απαιτήσεις συντήρησης
- Υψηλή διαθεσιμότητα παγκοσμίως
- Υψηλή διαθεσιμότητα ενέργειας
- Εύκολη εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης
- Χαμηλή έκθεση σε ακατάλληλες συνθήκες
- Εύκολα ανακυκλώσιμη
- Χαμηλή τοξικότητα των υλικών
- Ασφαλής συμπεριφορά σε περίπτωση υπερφόρτισης ή βαθιάς εκφόρτισης
- Εύκολη επεκτασιμότητα τάσης και χωρητικότητας μέσω συνδέσεων σε σειρά και παράλληλα
- Μικρό χάσμα τάσης μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης (επιτρέπει τη σύνδεση φορτίων κατευθείαν στη μπαταρία)
- Ικανότητα γρήγορης φόρτισης
- Κανένα φαινόμενο μνήμης
- Χαμηλές εκρηκτικές δυνατότητες
- Υψηλή αξιοπιστία στη λειτουργία – πολύς χρόνος μεταξύ αστοχιών

Ο σχεδιασμός συστημάτων παροχής ενέργειας θα πρέπει να εξετάζει τις ιδιότητες και τις απαιτήσεις του συστήματος αποθήκευσης από την αρχή. Αν σχεδιαστεί το σύστημα και στη συνέχεια προστεθεί το σύστημα αποθήκευσης, δε θα έχουμε λάβει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στη μπαταρία, τα περιφερειακά και συνολικά στο σχεδιασμό και τον έλεγχο όλου του συστήματος με αποτέλεσμα το σύστημα να λειτουργεί σε απογοητευτικό επίπεδο. Απαιτείται λοιπόν ένας ολοκληρωμένος προγραμματισμός του συστήματος ώστε αυτό να αποδίδει σε ικανοποιητικό επίπεδο για μεγάλο χρονικό διάστημα [15].

4.6 Συσσωρευτές οξέος μολύβδου (PbSO₄)

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead Acid, L – A) εφευρέθηκαν το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Plante⁵⁹ και είναι ο παλιότερος τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Είναι εμπορικά διαθέσιμες για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας για περισσότερο από έναν αιώνα και παραμένουν ακόμα και σήμερα το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

⁵⁹ 22 Απριλίου 1834 – 21 Μαΐου 1889



Οι πωλήσεις τους αγγίζουν το 40% με 45% της αξίας των πωλήσεων όλων των συσσωρευτών παγκοσμίως. Η ευρεία χρήση τους οδήγησε στην κατασκευή συσσωρευτών σε μεγάλο αριθμό κατασκευαστικού σχεδιασμού, μεγέθους και επιπέδου τάσης, κάτι το οποίο οφείλεται ιδίως στη χαμηλή τιμή και στην ευκολία της κατασκευής τους. Σχεδόν το 60% του βάρους των συσσωρευτών μολύβδου – οξέος είναι μολύβδος ή συστατικά του, και αποτελούν τη βασικότερη χρήση του μολύβδου παγκοσμίως. Στις αρχές του 2000, η συνολική ζήτηση μολύβδου για όλους τους τύπους των μπαταριών μολύβδου-οξέος αποτελούσε το 88% της συνολικής κατανάλωσης μολύβδου στις ΗΠΑ, ενώ ανάλογα με την εφαρμογή που προορίζονται, καθορίζεται ο σχεδιασμός, το μέγεθος, οι ποσότητες και οι τύποι των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή τους [18].


Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών από SLI⁶⁰ μπαταρίες σε αυτοκίνητα και φορτηγά μέχρι UPS, από μπαταρίες ανύψωσης φορτίων για σταθεροποίηση του δικτύου μέχρι μπαταρίες έλξης (περνοφόρα ανυψωτικά οχήματα) και αυτόνομα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι μακράν ο φθηνότερος τύπος μπαταρίας συγκριτικά με όλα τα άλλα άμεσα διαθέσιμα συστήματα αποθήκευσης με κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που θέτει ένα σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι η μπαταρία μολύβδου οξέος είναι η λιγότερο ακριβή μπαταρία αποθήκευσης για κάθε σχεδόν εφαρμογή, τα χαρακτηριστικά και η απόδοσή της είναι πολύ ικανοποιητικά. Ένα αρκετά σημαντικό μειονέκτημα των μπαταριών μολύβδου οξέος είναι το χαμηλό ειδικό σταθμικό ενεργειακό περιεχόμενο λόγω του υψηλού μοριακού βάρους του μολύβδου. Παραταύτα, αυτή δεν είναι μια παράμετρος μεγάλης σημασίας για τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αφού η μπαταρία είναι γενικά σταθερή [15].

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος αποτέλεσαν για πολλά χρόνια την πρώτη επιλογή στα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και με αρκετά καλή αποτελεσματικότητα. Η δυναμική ανάπτυξη των μπαταριών ιόντων λιθίου από την άλλη πλευρά όμως καθώς και η πολύ καλή απόδοση που παρουσιάζουν πιθανώς οδηγήσει στην αντικατάσταση των συσσωρευτών μολύβδου οξέος, που χρησιμοποιούνται σήμερα στα Φ/Β συστήματα, κυρίως όταν η τιμή τους γίνει πιο ανταγωνιστική.

Η αγορά των φωτοβολταϊκών σήμερα δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δικαιολογεί την κατασκευή ενός ριζικά διαφορετικού σχεδιασμού μπαταρίας μολύβδου οξέος από αυτούς που κατασκευάζονται σε μεγάλες ποσότητες για άλλες χρήσεις, αν και κάποιοι ελαφρώς τροποποιημένοι τύποι μπαταριών είναι διαθέσιμοι που αποδίδουν καλύτερα σε αυτά τα συστήματα και ικανοποιούν τις προϋποθέσεις

⁶⁰ Staring, Lighting and Ignition



εγκατάστασης, απόδοσης και αντοχής. Η κατασκευή των συσσωρευτών μολύβδου οξέος κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Ανοικτή ή κλειστή κατασκευή
- Μαζικής παραγωγής ή βιομηχανικού τύπου

Υπάρχει μια ευρεία γκάμα μπαταριών μολύβδου οξέος από τις οποίες μπορούμε να επιλέξουμε όταν σχεδιάζουμε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και απαιτείται πάντα να συμβιβάζομαστε ανάμεσα στο κόστος και στο προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας.

4.6.1 Συσσωρευτές οξέος μολύβδου ανοικτής ή κλειστής κατασκευής

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος διακρίνονται σε δύο τύπους με βάση τη μέθοδο κατασκευής τους. Αυτές οι μπαταρίες είναι οι ανοικτού τύπου ή πλημμυρισμένες ή εξαεριζόμενες (flooded/vented) και οι κλειστού τύπου ή σφραγισμένες (sealed). Οι ανοικτές και οι κλειστές μπαταρίες διαφέρουν επίσης και στη λειτουργία τους. Όλες οι μπαταρίες μολύβδου οξέος παράγουν αέρια υδρογόνου και οξυγόνου (αεριοποίηση) στα ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση εξαιτίας της ηλεκτρόλυσης. Αυτά τα αέρια διαφεύγουν από ένα ανοικτό στοιχείο ενώ το κλειστό στοιχείο είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε τα αέρια να συγκρατούνται και να αναμιγνύονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αέρια υδρογόνου είναι εκρηκτικά στον αέρα μόνο σε 4% κατ' όγκο.

- Ανοικτού τύπου μπαταρίες μολύβδου οξέος

Τα ανοικτά στοιχεία είναι εκείνα στα οποία τα ηλεκτρόδια (πλάκες) είναι βυθισμένα στον ηλεκτρολύτη. Εφόσον τα αέρια που δημιουργούνται κατά την φόρτιση διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα, επιβάλλεται περιστασιακά να προστίθεται απεσταγμένο νερό για να επαναφέρει τον ηλεκτρολύτη στο απαιτούμενο επίπεδο.

Προς το τέλος της φόρτισης και κατά την υπερφόρτιση, ο ηλεκτρολύτης θειικού οξέος στις μπαταρίες μολύβδου οξέος υποβάλλεται σε ηλεκτρόλυση για την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά συνέπεια, το επίπεδο του ηλεκτρολύτη πέφτει και η συγκέντρωση του θειικού οξέος αυξάνεται. Και οι δύο αυτές συνέπειες είναι επιβλαβείς για την απόδοση της μπαταρίας και οδηγούν στην καταστροφή της αν δε συμπληρωθεί εγκαίρως ο ηλεκτρολύτης. Η ανάγκη για συχνή συμπλήρωση νερού έχει περιορίσει στο παρελθόν τις εφαρμογές στις οποίες οι μπαταρίες μολύβδου οξέος μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι, οι κατασκευαστές χρησιμοποίησαν δύο μεθόδους για την αποφυγή της συμπλήρωσης με νερό [16]:

➤ Την ανάπτυξη συσσωρευτών μερικής ανάμιξης, στις οποίες με προσοχή στο σχεδιασμό της μπαταρίας (νέα κράματα μολύβδου για το πλέγμα κλπ.) και με

χρήση πιο εξειδικευμένων μεθόδων φόρτισης, η παραγωγή αερίων περιορίζεται στο ελάχιστο και αποφεύγεται η συμπλήρωση.

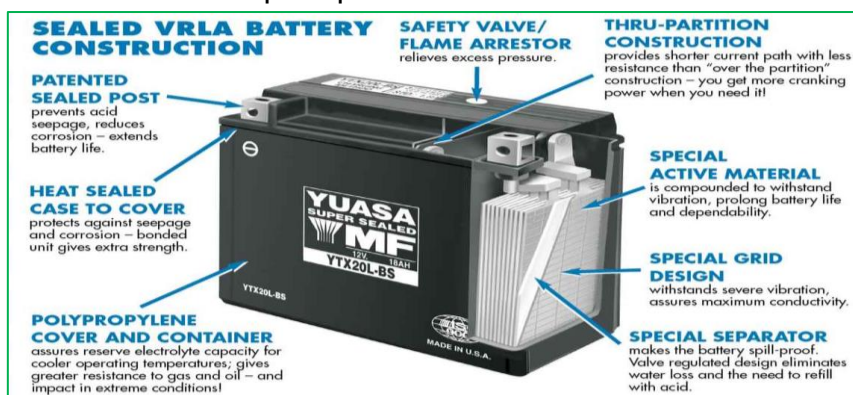
➤ Την ανάπτυξη μπαταριών πλήρους ανάμιξης, στις οποίες όσο υδρογόνο και οξυγόνο παράγεται κατά την αεριοποίηση αναμιγνύεται πλήρως σε νερό αποφεύγοντας έτσι απώλεια του όγκου του ηλεκτρολύτη.

Και οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ενός εύρους μπαταριών κλειστού τύπου που χρησιμοποιούνται πλέον σε ολοένα αυξανόμενες εφαρμογές.

- Κλειστού τύπου μπαταρίες μολύβδου οξέος

Αυτός ο τύπος μπαταριών διατηρεί τον όγκο του ηλεκτρολύτη και διαθέτει μια βαλβίδα για να επιτρέπει στα αέρια να διαφεύγουν εάν η εσωτερική πίεση ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο. Τυπικά όρια για την πίεση είναι από 2 έως 5 psi⁶¹, ανάλογα με το σχεδιασμό της μπαταρίας. Κατά τη φόρτιση, μια μπαταρία μολύβδου οξέος παράγει αέρια οξυγόνου στο θετικό ηλεκτρόδιο [16].

Οι κλειστές μπαταρίες μολύβδου οξέος, οι οποίες συχνά αναφέρονται ως μπαταρίες μολύβδου οξέος ρυθμιζόμενες από βαλβίδα (VRLA⁶²), είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε το οξυγόνο που παράγεται κατά τη φόρτιση να εγκλωβίζεται και να αναμιγνύεται στη μπαταρία. Αυτό συμβαίνει επειδή το κενό μεταξύ των πλακών δεν είναι τελείως γεμάτο με οξύ και έτσι το οξυγόνο που παράγεται στο θετικό ηλεκτρόδιο μπορεί να φτάσει στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και να μετατραπεί ξανά σε νερό. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται κύκλος ανάμιξης του οξυγόνου και λειτουργεί καλά όσο ο ρυθμός φόρτισης δεν είναι πολύ μεγάλος. Εάν το ρεύμα φόρτισης είναι πολύ μεγάλο, τότε το οξυγόνο θα δημιουργήσει πίεση στο εσωτερικό του στοιχείου και η βαλβίδα ασφαλείας θα απελευθερώσει οξυγόνο στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη μόνιμη απώλεια νερού από το συσσωρευτή.



Εικόνα 84. Συσσωρευτής τύπου VRLA [73]

⁶¹ 1psi=0.068 atm

⁶² Valve Regulated Lead Acid

- Πλεονεκτήματα κλειστού τύπου:

- Ευκολία στη συντήρηση
- Δεν εμφανίζουν φαινόμενα μνήμης (σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου καδμίου)
- Υψηλή αποδοτικότητα φόρτισης
- Η στάθμη φόρτισης μπορεί συνήθως να καθοριστεί μετρώντας την τάση
- Σχετικά χαμηλό κόστος
- Διαθέσιμες από μικρές μονάδες ενός στοιχείου (2 V) μέχρι μεγάλες μπαταρίες των 48V

- Μειονεκτήματα κλειστού τύπου:

- Δεν πρέπει να αποθηκεύονται σε κατάσταση εκφόρτισης
- Σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
- Χαμηλότερος κύκλος ζωής από ότι οι κλειστές μπαταρίες νικελίου καδμίου
- Καταστροφή λόγω θερμότητας μπορεί να συμβεί με εσφαλμένη φόρτιση ή ακατάλληλη διαχείριση της θερμότητας
- Μεγαλύτερη ευαισθησία σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας από ότι οι συμβατικές μπαταρίες μολύβδου οξέος

Υπάρχουν δύο τύποι VRLA μπαταριών, ο τύπος AGM⁶³ και ο τύπος gel. Ο τύπος AGM παίρνει το όνομά του από ένα απορροφητικό στρώμα γυαλιού που βρίσκεται ανάμεσα στις σφικτά τοποθετημένες επίπεδες πλάκες. Όλο το οξύ απορροφάται από το γυάλινο διαχωριστικό στρώμα, του οποίου όμως οι πόροι δε γεμίζουν πλήρως. Οι άδειοι (ή σχεδόν άδειοι) πόροι παρέχουν ένα διάδρομο ώστε το οξυγόνο που σχηματίζεται στο θετικό ηλεκτρόδιο κατά τη φόρτιση να κατευθυνθεί προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο για ανάμιξη. Οι AGM μπαταρίες αναπτύχθηκαν κυρίως για να έχουν μια καλή επίδοση σε υψηλό ρεύμα (μικρός χρόνος εκφόρτισης). Περιέχουν πολύ μικρή ποσότητα οξέος, κάτι το οποίο σημαίνει ότι είναι πολύ επιρρεπείς σε απώλειες νερού που συμβαίνουν κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά δεν πέφτουν σε επικίνδυνα χαμηλές θερμοκρασίες, αφού υπάρχει χώρος για επέκταση μέσα στην AGM [14].

Στις gel μπαταρίες μολύβδου οξέος (τύπου ζελέ), το θειικό οξύ αναμειγνύεται με σκόνη πυριτίου και σχηματίζει μια παχιά πάστα ή ζελέ (gel). Το πρόσφατα αναμειγμένο gel χύνεται στο δοχείο του στοιχείου πριν στερεοποιηθεί. Καθώς το gel στεγνώνει, σχηματίζονται μικροσκοπικές ρωγμές που επιτρέπουν τη διέλευση του αερίου μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου που απαιτείται για τη διαδικασία της ανάμιξης.

⁶³ Absorbent glass mat

4.6.2 Μπαταρίες μαζικής παραγωγής ή βιομηχανικού τύπου

Οι μαζικής παραγωγής μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι κατά βάση ο τύπος που χρησιμοποιείται σε αυτοκίνητα για χρήση εκκίνησης, φωτισμού και ανάφλεξης (SLI). Έχουν σχετικά λεπτές επίπεδες πλάκες που είναι βελτιστοποιημένες για να παράγουν τα υψηλά ρεύματα που χρειάζονται για την εκκίνηση μιας μηχανής οχήματος. Αντίθετα, οι λεπτές πλάκες έχουν σαν αποτέλεσμα μικρότερη διάρκεια ζωής ανεξάρτητα των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται, είτε αφορούν κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης είτε λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι περισσότερες SLI μπαταρίες είναι ανοικτού τύπου. Για φορτηγά και σκάφη, κατασκευάζονται μπαταρίες με πιο χοντρές πλάκες και με κάποιες τροποποιήσεις μπορούν να αποτελέσουν μια καλή φωτοβολταϊκή μπαταρία για ελαφριά χρήση ενώ μπαταρίες κλειστού τύπου με πιο παχιές πλάκες κατασκευάζονται για χρήσεις όπως σε μικρά οχήματα (μονοθέσια), αναπηρικά καροτσάκια και παρόμοιες εφαρμογές. Παρ' όλο που δεν είναι τόσο μαζικής παραγωγής όσο οι SLI μπαταρίες, είναι ικανές να κατασκευάζονται σε αρκετά μεγάλες ποσότητες με σχετικά χαμηλό κόστος.

Οι βιομηχανικές μπαταρίες κατασκευάζονται γενικά για εφαρμογές καταστάσεως αναμονή και εφαρμογές βαθέως κύκλου. Ειδικά στην Ευρώπη, η κατασκευή των σωληνωτών πλακών συχνά χρησιμοποιείται και για τους δύο τύπους. Η μπαταρία αναμονής με σωληνωτές πλάκες, είτε ανοικτού τύπου είτε τύπου gel, είναι συχνά η μπαταρία που επιλέγεται για μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου απαιτείται η υψηλότερη δυνατή διάρκεια ζωής από μία μπαταρία μολύβδου οξέος. Η μπαταρία με σωληνωτές πλάκες διατίθεται επίσης από ορισμένους κατασκευαστές σε εκδόσεις «ηλιακές» ή βαθέων κύκλων. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί ο κύκλος ζωής οδηγούν σχεδόν πάντα στη μείωση του χρόνου αναμονής και με αναμενόμενο το μικρότερο χρόνο λειτουργίας σε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα εκτός εάν υπάρχουν απαιτήσεις βαθέων κύκλων όπως στην περίπτωση των διασυνδεδεμένων. Βιομηχανικές μπαταρίες μολύβδου οξέος με πολύ χοντρές επίπεδες πλάκες κατασκευάζονται επίσης για χρήση σε αναμονή και είναι διαθέσιμες σε ανοικτούς, gel ή AGM τύπους με το πάχος των επίπεδων πλακών τους να καθορίζει το μέγιστο χρόνο ζωής τους σε κατάσταση αναμονής.

Οι βιομηχανικές μπαταρίες μολύβδου οξέος υψηλής χωρητικότητας είναι κυρίως διαθέσιμες σε μονά στοιχεία των 2V, τα οποία συναρμολογούνται σε μπαταρίες με την απαιτούμενη τάση ενώ οι βιομηχανικές μπαταρίες χαμηλής χωρητικότητας διατίθενται συνήθως σε μονάδες των 6 ή 12V και η διάρκεια ζωής τους καθορίζεται από τον κατασκευαστή υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις.










4.7 Η ιδανική μπαταρία αποθήκευσης ενέργειας για Φ/Β Συστήματα

Εν κατακλείδι, ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων πρέπει να συμψηφιστεί προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα ιδανικό συσσωρευτή που ικανοποιεί τις ανάγκες του κάθε καταναλωτή. Κυριότερα χαρακτηριστικά πρέπει να είναι η χρυσή τομή χωρητικότητας και αποδιδόμενης ενέργειας, το βάθος εκφόρτισης, ο κύκλος απόδοσης (αν για παράδειγμα η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 5KWh αλλά αυτή που πραγματικά λαμβάνω και χρησιμοποιώ είναι 4KWh, τότε έχω κύκλο απόδοσης $4/5=80\%$), η διάρκεια ζωής και ικανότητα διατήρησης φορτίου για μεγάλο χρονικό διάστημα και η εγγύηση του κάθε κατασκευαστή. Συγκριτικά, στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα στοιχεία για κάθε τύπο μπαταρίας:

Τύπος	Lead - acid	NiCd	NiMH	Li-ion	NaS ⁶⁴	VRB ⁶⁵
Πυκνότητα ενέργειας (WH/kg)	25–50	50–60	60–120	75–200	150–240	10–30
Πυκνότητα ισχύος (W/kg)	75–300	~200	250–1000	500–2000	150–230	80–150
Κύκλος ζωής (100% DOD)	200–1000	>1500	180–2000	1000–10,000	2500–4000	>12,000
Κόστος (\$/KWh)	100–300	300–600	900–3500	300–2500	300–500	150–1000
Κύκλος απόδοσης (round trip efficiency - %)	75-85	70–75	65–80	85–97	75–90	75–90
Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	Χαμηλός	Υψηλός	Υψηλός	Κανονικός	-	Αμελητέος

Εικόνα 85. Χαρακτηριστικά συσσωρευτών [74]

Κατά κοινή ομολογία οι συσσωρευτές Li-ion θεωρούνται ως ιδανική λύση για αποθήκευση ενέργειας σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα γιατί είναι πιο ελαφριές και συμπαγείς από τον ανταγωνισμό, έχουν υψηλότερο βάθος εκφόρτισης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, πλεονεκτήματα που αξίζει να ληφθούν σοβαρά υπόψη παρά το υψηλότερο για τώρα κόστος τους.

Battery	Cost	Lifespan	Depth of Discharge
Lead Acid			
Lithium			
Saltwater			

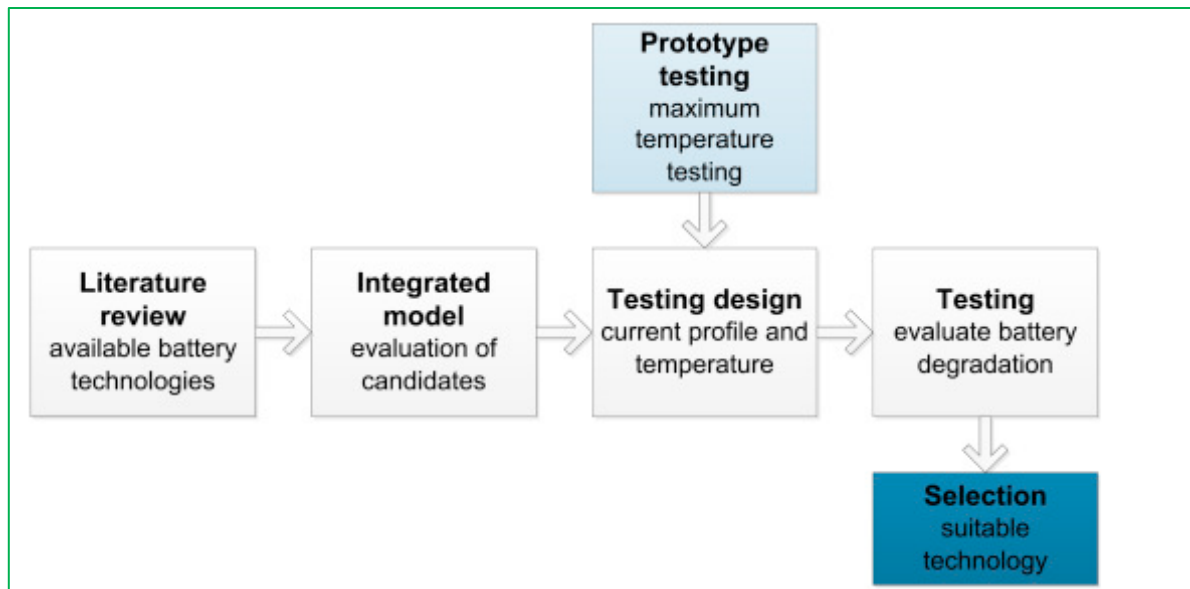
Εικόνα 86. Γενικός κανόνας επιλογής συσσωρευτών [75]

⁶⁴ Sodium – Sulfur Batteries

⁶⁵ Vanadium Redox Batteries

4.8 Μεθοδολογία επιλογής κατάλληλου συσσωρευτή

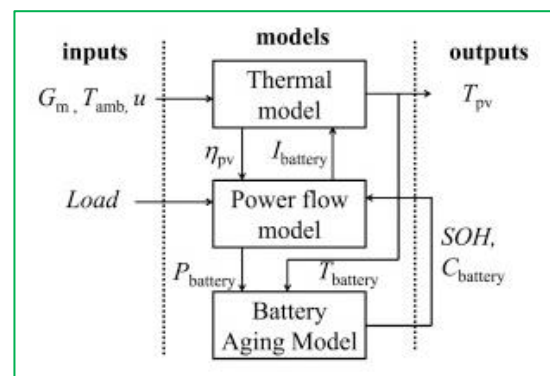
Η διαδικασία επιλογής κατάλληλης τεχνολογίας συσσωρευτών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 87. Μεθοδολογία επιλογής συσσωρευτών [76]

Συγκρίνοντας τις υπάρχουσες τεχνολογίες και εξαιρώντας αυτές που δεν είναι υλοποιήσιμες και εφαρμόσιμες εξαιτίας θερμοκρασίας λειτουργίας, πολυπλοκότητας εφαρμογής και κόστους, προκύπτει το παρακάτω μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη:

- Την αξιολόγηση τεχνολογίας συσσωρευτών
- Το σχεδιασμό του απαραίτητου Φ/Β συστήματος ανάλογα με τις απαιτήσεις
- Την επίδραση των προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης ενός αυτόνομου και εκτός δικτύου Φ/Β συστήματος



Εικόνα 88. Δυναμικό μοντέλο ροής διαχείρισης συσσωρευτή [77]

4.9 Ονομαστική Χωρητικότητα και Παρεχόμενη Ισχύς από τους Συσσωρευτές κατά τη Λειτουργία τους σε Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καταλήγουμε σε ένα συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας C_N . Η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα C δίνεται από τη σχέση:

$$C = C_N * \beta \quad (4.3)$$

Με

- β : το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή

Η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποταμιευθεί και να ανακτηθεί σε ιδανικές συνθήκες, σε κάθε κύκλο φόρτισης- εκφόρτισης είναι:

$$E = C * \beta = C_n * \beta * V \quad (4.4)$$

Ο συντελεστής απόδοσης των συσσωρευτών μολύβδου «α», δηλαδή ο λόγος της μέγιστης ποσότητας της ενέργειας που ανακτάται προς την ενέργεια που είχε απορροφηθεί από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε κάθε κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης είναι περίπου 85%. Επομένως, αν η ηλεκτρική ενέργεια που ζητάμε να δίνει ο συσσωρευτής είναι E , η ενεργός χωρητικότητα του C θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ενέργεια φόρτισης E_ϕ , ίση με:

$$C_n = \frac{E}{\alpha} \quad (4.5)$$

Οπότε η ονομαστική χωρητικότητά του θα είναι:

$$C_n = \frac{E_\phi}{\beta * V} = \frac{E}{\alpha * \beta * V} \quad (4.6)$$

Ως προς την παρεχόμενη ισχύ, βρίσκουμε εύκολα ότι αν ένας συσσωρευτής απαιτείται να τροφοδοτεί την κατανάλωση με μέση ισχύ P επί μ συνεχείς μέρες, τότε η ενεργός χωρητικότητα θα πρέπει να είναι:

$$C = \frac{24 * \mu * P}{\alpha * V} \quad (4.7)$$

4.10 Νέες Τεχνολογίες Συσσωρευτών για Φ/Β Συστήματα

Οφείλουμε σ' αυτό το σημείο να αναφέρουμε μία υψηλών προδιαγραφών επαναφορτιζόμενη μπαταρία Li-ion που αποτελεί μία ιδανική λύση για ένα αυτόνομο Φ/Β σύστημα. Η Tesla Powerwall είναι μία σταθερή μπαταρία που είναι κατάλληλη για οικιακή χρήση (ιδιοκατανάλωση, backup power) ενώ εκδόσεις της χρησιμοποιούνται και για εμπορικές χρήσεις μεγαλύτερων ενεργειακών απαιτήσεων.

Πρωτοεμφανίστηκε το 2015 και κατασκευάστηκε στο εργοστάσιο της Tesla Inc. Στη Νεβάδα των ΗΠΑ. Η δεύτερη γενιά (Powerwall²) ανακοινώθηκε τον Οκτώβριο του

2016. Η ανάπτυξη ξεκίνησε το 2012 ενώ πρωτότυπα του συσσωρευτή χρησιμοποιήθηκαν σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις μειώνοντας το ηλεκτρικό κόστος από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά 20%. Η αρχική ισχύς εξόδου το 2015 ήταν 2KW (σταθερή) και 3.3KW (peak ισχύς) ενώ αργότερα αυτές οι τιμές σχεδόν διπλασιάστηκαν σε 5KW (σταθερή) και 7KW (peak) και το κόστος διατηρήθηκε ίδιο για την εποχή (500 US\$).



Εικόνα 89. Tesla Powerwall [78]

Αυτή τη στιγμή είναι διαθέσιμη η δεύτερη έκδοση (Οκτώβριος 2016) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Τεχνολογία	Τιμή	Χωρητικότητα	Wh/\$	\$/KWh	Ισχύς	Θερμοκρασία λειτουργίας	Βάρος	Διαστάσεις	Κύκλοι φόρτισης
Li-ion	6500\$	13.5 KWh	2.46	437	7KW peak, 5KW συνεχής	-20 ως 50° C	114 κιλά	115,1x75,2x14,6 cm	Απεριόριστοι στην εγγύηση με τη χρήση ηλιακής ενέργειας

Εικόνα 90. Χαρακτηριστικά Tesla Powerwall 2nd Gen [79]

Από το Μάιο του 2015 είχαν ήδη 50000 μονάδες μέχρι τα μέσα του 2016 αυξάνοντας τα καθαρά έσοδα της εταιρείας στα 179 εκατομμύρια δολάρια ενώ παράλληλα ήταν διαθέσιμο και το Tesla Powerpack που αφορούσε βιομηχανικές ανάγκες σε τρεις εκδόσεις (100, 200 και 210 KWh).




Εικόνα 91. Tesla Powerpack [80]

Από τον Οκτώβριο του 2019 η τιμή του Powerwall² είναι 14600\$ (αφορά δύο μονάδες για απαιτήσεις σύγχρονης κατοικίας) με 2500 ως 4500\$ που αφορούν το κόστος εγκατάστασης.

Το σύστημα είναι βελτιστοποιημένο για καθημερινή συνεχή φόρτιση και εκφόρτιση καθώς επίσης για τη διαχείριση τις ενέργειας ανάλογα με τις απαιτήσεις τις κατοικίας κάθε στιγμή (από ώρες υψηλής απαίτησης μέχρι την ελάχιστη κατανάλωση), χρησιμοποιώντας πατενταρισμένη τεχνολογία ψύξης των κελιών του συσσωρευτή με ψυκτικό υγρό. Ο ημερήσιος κύκλος είναι 7KWh χρησιμοποιώντας συνδυασμό στοιχείων Ni-Mg-Cb (νικελίου – μαγνησίου – κοβαλτίου) και η αρχική εγγύηση του συστήματος έδινε 5000 κύκλους πλήρους φόρτισης.



Εικόνα 92. Tesla Powerwall σε οικιακή εγκατάσταση [81]



Έχει υψηλό κύκλο απόδοσης που φτάνει το 92.5% (round trip efficiency) όταν φορτίζει ή εκφορτίζεται από ένα σύστημα 400 – 450V στα 2KW σε θερμοκρασία 25° C όταν το προϊόν είναι καινούριο ενώ η απόδοσή του πέφτει με τη σταδιακή γήρανσή του, όταν θερμοκρασία είναι πάνω ή κάτω από 25° C και όταν οι ρυθμοί φόρτισης και εκφόρτισης είναι πάνω από 2KW. Τέλος, είναι ασφαλές και δοκιμασμένο σε συνθήκες πυρκαγιάς με αξιόλογες δικλείδες ασφαλείας και περιορισμού της φωτιάς εντός του συστήματος ενώ μπορεί να λειτουργήσει και σε συστοιχίες μεγάλου αριθμού Powerwall ή Powerpack ώστε να αντιμετωπίσει σοβαρές και εκτεταμένες βλάβες του υπάρχοντος δικτύου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μέχρι αποκατάστασης της βλάβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν διεξοδικά οι τύποι και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των συσσωρευτών, ένα απ' τα κυριότερα μέρη ενός Φ/Β συστήματος. Μπορεί μάλιστα να απαιτείται να δοθεί η μεγαλύτερη σημασία στον τρόπο αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή, κατά την εγκατάσταση αυτόνομων Φ/Β συστημάτων, κυρίως λόγω του υψηλότερου κόστους, ειδικά αν μας ενδιαφέρει μία γρήγορη και βραχυπρόθεσμη απόσβεση αλλά το σύστημα δεν αποτελείται μόνο από το συσσωρευτή ή τη συστοιχία συσσωρευτών.

Εκτός λοιπών από τους συσσωρευτές το σύστημα αποτελείται από:

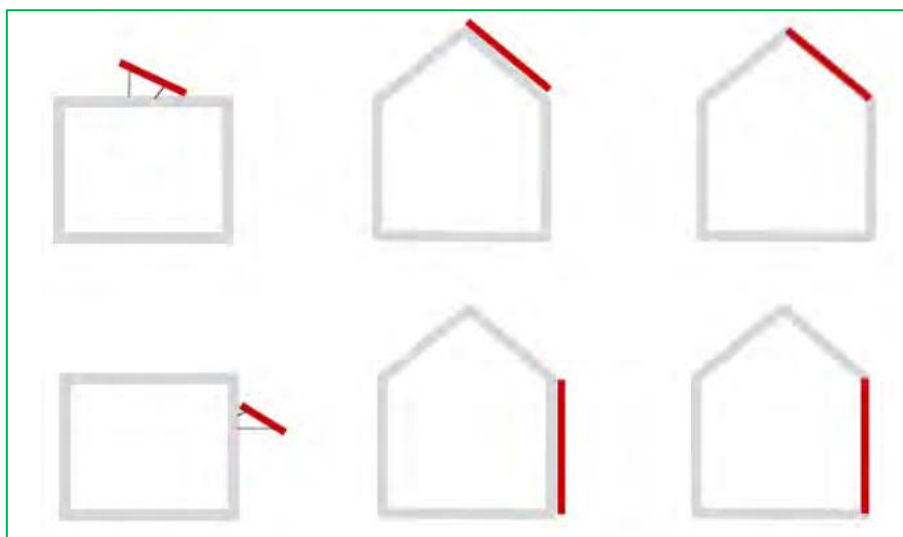
- Τα Φ/Β πάνελ ή συλλέκτες
- Τα συστήματα στήριξης
- Τους αντιστροφείς τάσης (Μετατροπέας AC – DC ή inverter)
- Τους μετρητές ενέργειας
- Τους ελεγκτές φόρτισης συσσωρευτών
- Την ηλεκτρολογική εγκατάσταση
- Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (σε περίπτωση αυτόνομου Φ/Β συστήματος)
- Ανεμογεννήτρια (σε περίπτωση αυτόνομου Φ/Β συστήματος)

5.1 Φωτοβολταϊκό πάνελ ή συλλέκτες

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ και ο τρόπος λειτουργίας αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συνοψίζοντας το πάνελ είναι ένας συλλέκτης ηλιακής ενέργειας που έχει τη μορφή ενός πλακιδίου, συνήθως σε τετράγωνο σχήμα και είναι απαραίτητο για τη διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό, ενώ τοποθετείται σε οροφές κτηρίων, σε δώματα, αλλά και στο έδαφος.

Τα πάνελ που υπάρχουν στην αγορά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [10], τα πάνελ σε διασυνδεδεμένα συστήματα, σε αυτόνομα συστήματα και σε συστήματα ενσωματωμένα στην δομή των κτιρίων (πόρτες, παράθυρα, κιγκλιδώματα). Τα σημαντικότερα στοιχεία που διαφοροποιούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ μεταξύ τους και πρέπει να προσέξουμε είναι η ονομαστική ισχύς σε Watt, η τάση που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ, η ένταση ρεύματος που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ, η τάση ανοιχτού κυκλώματος, η ένταση ρεύματος βραχυκυκλώματος, η μέγιστη τάση συστήματος, οι συντελεστές επίδρασης θερμοκρασίας και φυσικά η εγγύησή τους. Πριν την επένδυση και την επιλογή κατάλληλου πάνελ απαιτείται ο έλεγχος για τις κατάλληλες πιστοποιήσεις και την εγγύηση καλής λειτουργίας για την εφαρμογή που προορίζεται.

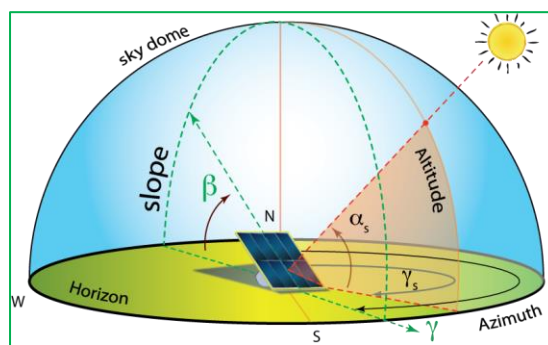
Τα φωτοβολταϊκά παράγονται σε διάφορα μεγέθη και είδος επιφάνειας για κάθε εφαρμογή του καταναλωτή, υπό ορισμένες προϋποθέσεις βέβαια (κατάλληλη κλίση λήψεως μέγιστης δυνατής ηλιακής ακτινοβολίας). Δεν υπάρχουν συνεπώς συγκεκριμένες τυποποιήσεις που να χαρακτηρίζουν όλα τα συστήματα ενώ δεν υπάρχει τυποποίηση και στον τρόπο εγκατάστασης. Στη διεθνή αγορά κυκλοφορούν χιλιάδες διαφορετικά συστήματα με μεγάλη ποικιλία μεγεθών και ισχύος.



Εικόνα 93. Τρόποι ενσωμάτωσης Φ/Β σε κτίρια [82]

Έτσι, είναι δυνατό να τοποθετηθούν σε οροφή κτιρίου, πάνω σε ειδική βάση στήριξης, πάνω σε κεκλιμένη σκεπή με χαμηλό σύστημα στήριξης, ενσωματωμένα σε κεκλιμένη σκεπή, σε σύστημα στήριξης σε πέργκολα σκίασης, σε κάθετο τοίχο πρόσοψης, να αντικαθιστούν και να έχουν το ρολό παραθύρου ή να βρίσκονται σε αυτοματοποιημένο περιστρεφόμενο στήριγμα σε ταράτσες.

Ένα πάνελ μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο), που βρίσκονται σε κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/Β συστήματος, οι συνδέσεις των Φ/Β στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και στα πάνελ ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πάνελ, δεν είναι μόνο σε σειρά αλλά και παράλληλες. Κάθε Φ/Β πλαίσιο πρέπει να έχει ανοικτό ορίζοντα και σε μία τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος π° , η προϋπόθεση του ανοικτού ορίζοντα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η γωνία του ύψους (β_ϵ) των γειτονικών συστοιχιών, δέντρων, κτιρίων ή άλλων εμποδίων ικανοποιεί μέσα σε μια αζιμουθια γωνία από -60° μέχρι $+60^\circ$ προς το Νότο τη σχέση:

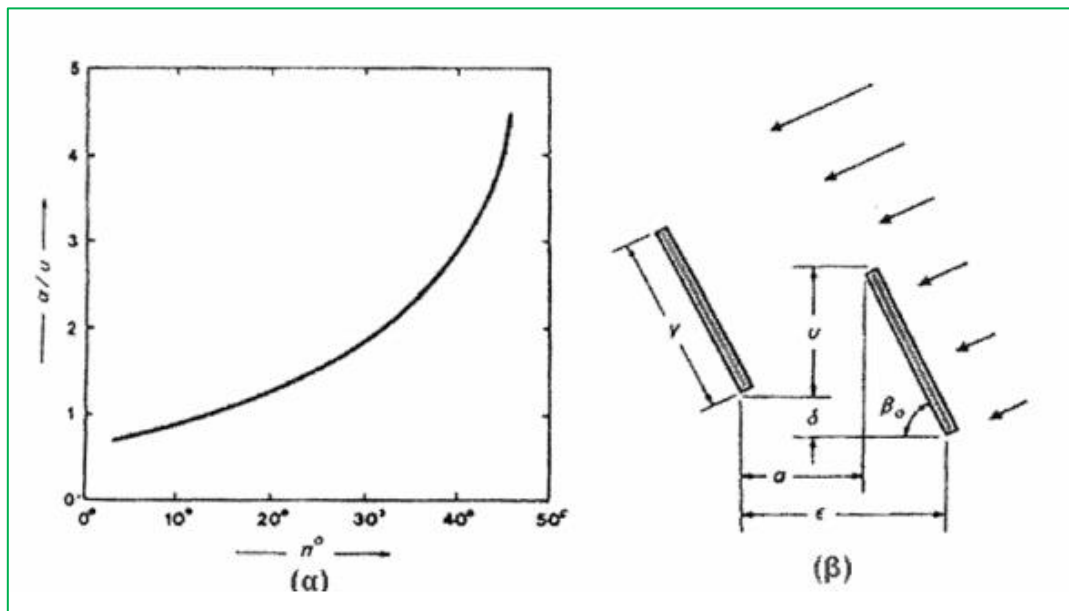


Εικόνα 94. Υπολογισμός κλίσης Φ/Β [83]

$$\beta_\epsilon \leq 48^\circ - \pi^\circ \quad (5.1)$$

Για παράδειγμα, στην Αθήνα που βρίσκεται σε 38° γεωγραφικό πλάτος, η γωνία του ύψους των διαφόρων εμποδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τις 10°. Με τη βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος προσδιορίζουμε την απόσταση μεταξύ των παράλληλων σειρών των ηλιακών συλλεκτών στις Φ/Β συστοιχίες, ώστε η μια σειρά να μη σκιάζει την επόμενη. Συγκεκριμένα, το διάγραμμα δίνει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης ανάμεσα στις δυο σειρές (α) προς την επικάλυψη του ύψους της κατασκευής στήριξης του συλλέκτη (u). Αν γ είναι το πλάτος του στηρίγματος (που συμπίπτει με το πλάτος του συλλέκτη, δηλαδή του Φ/Β πλαισίου ή του πάνελ), β_ο είναι η κλίση του και δ είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα των δύο σειρών, τότε το u δίνεται από τη σχέση:

$$u = \gamma * \sin(\beta_o) - \delta \quad (5.2)$$



Εικόνα 95. Υπολογισμός της απαιτούμενης απόστασης σειρών Φ/Β [84]

Με τη βοήθεια του διαγράμματος την βρίσκω την τιμή του α και από τη σχέση:

$$\varepsilon = \alpha + \gamma * \cos(\beta_o) \quad (5.3)$$

υπολογίζουμε το ε, δηλαδή την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση των σειρών.

Επιπλέον, το εμβαδό της οριζόντιας έκτασης S_E της εγκατάστασης των Φ/Β πλαισίων που θα εγκαταστήσουμε βρίσκεται από τη σχέση [8]:

$$S_E = S_o * \frac{\varepsilon}{\gamma * \cos \beta_o} \quad (5.4)$$

Με:

- S_o : το εμβαδό οριζόντιας προβολής όλων των φωτοβολταϊκών πλαισίων με
- $S_E = S_o * N * \cos\beta$ σε m^2
- N : ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- S_{π} : εμβαδό φωτοβολταϊκού πλαισίου σε m^2
- β° : η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- γ : το μήκος των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε m
- ϵ : η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των δύο γειτονικών σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων σε m

Σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο, εκτός των στοιχείων που αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου, αναγράφεται η θερμοκρασία, την οποία αποκτά το πλαίσιο όταν βρίσκεται σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Χαρακτηρίζεται ως ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου (NOCT). Οι συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου κάτω από τις οποίες η θερμοκρασία του ισούται με την ονομαστική τιμή της είναι:

- Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο βρίσκεται σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος
- Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 800 W/m^2
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα είναι 20°C
- Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 1 m/s

Χαμηλή ονομαστική θερμοκρασία συνεπάγεται και μικρότερη μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος ενός πλαισίου σε σχέση με άλλο πλαίσιο, ίδιας ισχύος αιχμής αλλά μεγαλύτερης ονομαστικής θερμοκρασίας.

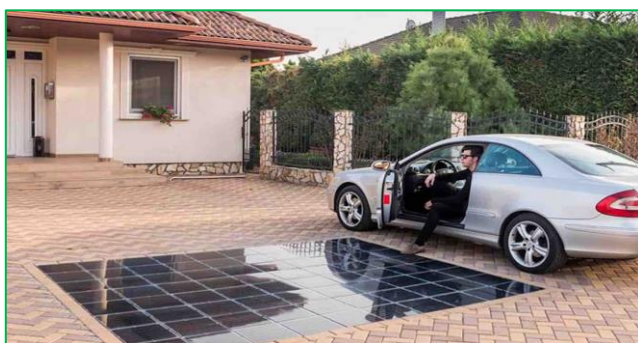
Τα είδη των πάνελ πλέον δεν περιορίζονται από αυστηρούς κατασκευαστικούς κανόνες αλλά παράλληλα διαθέτουν πλέον ένα επιθυμητό αισθητικό αποτέλεσμα και μια ελκυστική εμφάνιση ενώ στην αγορά συναντά κανείς πάνελ με τη μορφή ηλιακού κεραμιδιού, ηλιακά παράθυρα όπως προαναφέραμε, ηλιακές θέσεις πάρκινγκ, ηλιακές πέργκολες, ηλιακά δέντρα και ηλιακά πεζοδρόμια υψηλής αντοχής ώστε να εκμεταλλευθούμε κάθε δυνατή διαθέσιμη επιφάνεια. Παρακάτω είναι κάποια παραδείγματα:



Εικόνα 96. Ηλιακά Κεραμίδια



Εικόνα 97. Ηλιακά Δέντρα



Εικόνα 98. Ηλιακά Πεζοδρόμια και Δρόμοι



Εικόνα 99. Ηλιακές Θέσεις πάρκινγκ



Εικόνα 100. Ηλιακά παράθυρα⁶⁶ και κιγκλιδώματα



Εικόνα 101. Ηλιακή Πέργκολα

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός Φ/Β πλαισίου που συνήθως δίνει ένας πιστοποιημένος κατασκευαστής είναι τα παρακάτω:

- Ισχύς αιχμής (P_a) σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
- Ανοιχτοκυκλωμένη τάση (V_{oc} ⁶⁷) σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
- Βραχυκυκλωμένη ένταση ρεύματος (I_{sc} ⁶⁸) σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
- Τάση (V_{max}) στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία

⁶⁶ Σε πειραματικό στάδιο, κατασκευάζονται από την εταιρεία Physee για ειδικές παραγγελίες και κατασκευές

⁶⁷ Voltage open circuit

⁶⁸ Impedance short circuit

- Ένταση ρεύματος (I_{max}) στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία

- Συντελεστής πλήρωσης (FF), που ορίζεται ως ο λόγος του

$$\frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (5.5)$$

- Συντελεστής απόδοσης (η_p) σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης (σ_θ)

- Συντελεστής κάλυψης (σ_k)

- Διηλεκτρική αντοχή, δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του Φ/Β πλαισίου

5.2 Συστήματα Στήριξης πάνελ

Για να συλλεχθεί η μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία, τα πάνελ πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλα. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατασκευή και τοποθέτηση συστημάτων στήριξης τα οποία είναι απλές διατάξεις που βοηθούν στην εγκατάσταση των ηλιακών συλλεκτών. Τα συστήματα στήριξης απαιτείται να είναι υψηλής αντοχής και καλής ποιότητας. Συνήθως κατασκευάζονται από πλαίσια αλουμινίου, σίδηρο και ανοξείδωτο χάλυβα [19].

Το αλουμίνιο είναι στιβαρό και ανθεκτικό. Είναι πολύ εύκολο στην επεξεργασία του και συμβατό με το υλικό που κατασκευάζονται οι συλλέκτες ενώ ως μειονέκτημά του θεωρείται η περίπλοκη συγκόλλησή του. Αντίθετα, ο σίδηρος, μπορεί να επεξεργαστεί και να συγκολληθεί χωρίς επιπλοκές, αλλά διαβρώνεται πιο εύκολα, ιδίως λόγω της αυξημένης υγρασίας και το βάψιμό του απαιτεί ειδικές συνθήκες. Ο ανοξείδωτος χάλυβας τέλος, έχει υψηλότερο κόστος και απαιτεί ιδιαίτερη επεξεργασία, αλλά έχει μακράν τη μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιο υγρά περιβάλλοντα. Απαιτείται λοιπόν η επιλογή ενός συστήματος στήριξης το οποίο να είναι σταθερό και να αντέχει σε όλα τα καιρικά φαινόμενα.

Επιπρόσθετα, ο ρόλος του εγκαταστάτη είναι εξίσου σημαντικός, ο οποίος πρέπει να βεβαιωθεί ότι το σύστημα είναι σταθερό και οι κινήσεις των πλαισίων να είναι περιορισμένες στο ελάχιστο. Ανεξάρτητα από το αν τα συστήματα στήριξης θα είναι σε σταθερή θέση ή αν πρέπει να ακολουθούν την πορεία του ήλιου, επιβάλλεται να στερεώνονται σε ένα σταθερό επίπεδο με μια μικρή κλίση της πρόσοψης προς τον ισημερινό, έτσι ώστε να έχουμε χαμηλότερο κόστος και πιο στιβαρή κατασκευή. Σε περίπτωση τοποθέτησης κινούμενου και αυτοματοποιημένου συστήματος είναι δυνατή η κατά το 25% μεγαλύτερη λήψη και εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους, αυξάνοντας όμως το βαθμό δυσκολίας εγκατάστασης και συντήρησης του συστήματος και ταυτόχρονα αυξάνοντας το κόστος προμήθειάς του.

Διακρίνουμε λοιπόν τρεις περιπτώσεις συστημάτων στήριξης, ανάλογα με το σημείο εγκατάστασης και όχι με τον τρόπο (σταθερό ή αυτοματοποιημένο):

- Συστήματα οροφής/ταράτσας/στέγης/σκεπής (μεταλλικά πλαίσια/βάσεις)
- Συστήματα στήριξης εδάφους
 - Πυλώνες με διάτρηση εδάφους
 - Τσιμεντένιες βάσεις
 - Μεταλλικές (συνήθως ατσάλι) βάσεις χωρίς διάτρηση εδάφους
- Συστήματα σκίασης
- Συστήματα ενσωματωμένα σε κτίρια (παράθυρα, εξωτερικές προσόψεις, BAPV⁶⁹)



Εικόνα 102. Ο πύργος CIS στο Μάντσεστερ, καλυμμένος από Φ/Β πάνελ κόστους 6.12 εκ. €. Η τροφοδοσία του παρόχου με ενέργεια ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2005



Εικόνα 103. Σταθερά συστήματα στήριξης Φ/Β σε στέγη



Εικόνα 104. Σταθερά συστήματα στήριξης Φ/Β στην οροφή εγκατάστασης διαχείρισης αποβλήτων (Pacifica, ΗΠΑ)



Εικόνα 105. Φ/Β πάνελ σαν μέθοδος εξωτερικής σκίασης σε κτίριο "μηδενικής ενέργειας", Σιγκαπούρη

⁶⁹ Building Adapted PVs

5.3 Αντιστροφείς τάσης (Μετατροπέας AC – DC)

Το ρεύμα που παράγεται από τα Φ/Β πλαίσια είναι σε DC μορφή (συνεχές ρεύμα). Προκειμένου το ρεύμα αυτό να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις ανάγκες μας στις ηλεκτρικές συσκευές μιας μονοκατοικίας θα πρέπει να μετατραπεί σε AC. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω κατάλληλων διατάξεων που ονομάζονται αντιστροφείς τάσης (inverters). Ο αντιστροφέας τάσης είναι μια διάταξη ισχύος που χρησιμοποιούμε στα φωτοβολταϊκά συστήματα για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να τροφοδοτήσουμε από το συσσωρευτή του φωτοβολταϊκού συστήματος, τις ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού. Ο αντιστροφέας συνδέεται με ένα ζεύγος καλωδίων (θετικό – αρνητικό), πάνω στους πόλους της μπαταρίας και διαθέτει υποδοχές όπως οι κοινές ηλεκτρικές πρίζες πάνω στις οποίες συνδέουμε τις συσκευές της κατοικίας.



Εικόνα 106. Αντιστροφέας τάσης Φ/Β [85]

Σε έναν αντιστροφέα τάσης μπορούμε να συνδέσουμε όσες συσκευές θέλουμε την ίδια ώρα, αρκεί η ισχύς όλων των συσκευών μαζί να μην ξεπερνά την ισχύ που μπορεί να δεχτεί ο αντιστροφέας. Όταν ο αντιστροφέας είναι καλής ποιότητας διαθέτει ειδικό σύστημα αυτοπροστασίας ώστε όταν η ανάγκη σε ενέργεια/φορτίο είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να προσφέρει, απενεργοποιείται αυτόματα για την προστασία των συσκευών. Ανάλογα με τις καταναλωτικές μας απαιτήσεις και την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει, είναι δυνατή η εγκατάσταση αντιστροφέα με ισχύ 150W έως 1200W. Σε μια σύγχρονη κατοικία η εξυπηρέτηση των καθημερινών μας αναγκών απαιτεί συνήθως αντιστροφέα από 4000W και πάνω. Φυσικά, το κόστος ενός αντιστροφέα εξαρτάται κυρίως από την ισχύ του, αλλά σημασία έχει τόσο η ποιότητα κατασκευής του, η εγγύηση του εγκαταστάτη και προέλευσή του και η πιστοποίησή του από αρμόδιο φορέα.

Κάποιες από τις κύριες κατασκευαστικές προδιαγραφές ενός αντιστροφέα είναι να αποτελείται από εύκολα συναρμολογούμενα μέρη για να γίνονται εύκολα οι απαραίτητες μετατροπές και οι αναβαθμίσεις και να είναι διαμορφωμένος έτσι ώστε να μη σταματάει η λειτουργία του σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες. Επίσης πρέπει να υπάρχει πλήρης αγωγή απομόνωση (γαλβανισμός) του κυκλώματος από τα κυκλώματα ελέγχου και προστασίας και να μπορεί ο αντιστροφέας να συνδέεται με άλλα ψηφιακά συστήματα.

Οι βασικές λειτουργικές προδιαγραφές ενός αντιστροφέα τάσης είναι να μπορεί να μετατρέπεται εύκολα η λειτουργία του από μονοφασική σε τριφασική, να είναι εύκολο στον επαναπρογραμματισμό χωρίς να είναι απαραίτητη η

αποσυναρμολόγησή του, ώστε να είναι εξασφαλισμένη η ανάπτυξη και ο έλεγχος λειτουργίας, να έχει τη δυνατότητα, σε περίπτωση προβλήματος όπως κάποιο βραχυκύκλωμα, ή υπέρταση, να διακόπτεται η λειτουργία του κυκλώματος και να υπάρχει μια ένδειξη για το ανάλογο πρόβλημα. Αν συμβεί αυτό ο επεξεργαστής ελέγχου ενημερώνεται για το είδος του προβλήματος, το απεικονίζει στην οθόνη ενδείξεων και ανάλογα με τη βαρύτητα του προβλήματος, το κύκλωμα επανεκκινείται. Απαιτείται δε, το κύκλωμα ισχύος στη φυσιολογική του λειτουργία να μπορεί να υπερφορτίζεται, χωρίς να παθαίνει ζημιά.

Ο αντιστροφέας τάσης είναι η καρδιά του Φ/Β συστήματος και σε αυτόν αναφέρονται οι κώδικες και τα πρότυπα για τις προδιαγραφές κατασκευής, απόδοσης, ασφάλειας και σύνδεσης με το δίκτυο. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο με ένα ηλιακό αντιστροφέα γίνεται με τη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Οι ηλιακοί αντιστροφείς έχουν ειδικές λειτουργίες προσαρμοσμένες για χρήση με φωτοβολταϊκές συστοιχίες, συμπεριλαμβανομένων της παρακολούθησης των τιμών μέγιστης ισχύος και της προστασίας από τη νησιδοποίηση⁷⁰.

5.3.1 Κατηγορίες αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς Φ/Β συστημάτων διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Αντιστροφείς αυτόνομων συστημάτων (standalone PV inverter), που χρησιμοποιούνται σε απομονωμένα συστήματα, όπου ο αντιστροφέας αντλεί ενέργεια από μπαταρίες οι οποίες φορτίζονται από φωτοβολταϊκά. Πολλοί μετατροπείς αυτόνομων συστημάτων ενσωματώνουν επίσης φορτιστές μπαταριών για να τροφοδοτήσουν την μπαταρία από μία AC πηγή, όταν είναι διαθέσιμη. Κανονικά, δεν συνδέονται με το δίκτυο, και ως εκ τούτου, δεν απαιτείται να έχουν προστασία αντι – νησιδοποίησης.



Εικόνα 107. Inverter αυτόνομου Φ/Β συστήματος [86]

- Αντιστροφείς για σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο (grid – tie inverters), οι οποίοι ταιριάζουν τη συχνότητα εξόδου τους με αυτή του δικτύου. Οι μετατροπείς αυτοί έχουν σχεδιαστεί ώστε να κλείσουν αυτόματα με την απώλεια της παροχής δικτύου, για λόγους ασφαλείας. Δεν παρέχει εφεδρική ισχύ σε περίπτωση διακοπής.



Εικόνα 108. Inverter Φ/Β συστήματος on grid/grid tie [87]

⁷⁰ Το φαινόμενο κατά το οποίο δε διακόπτεται η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο διασυνδεδεμένο δίκτυο από το καταναμημένο παραγωγό όταν αυτός έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο

- Αντιστροφείς για μπαταρίες backup (battery inverters), είναι ειδικοί μετατροπείς, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν την ενέργεια από μια μπαταρία, να διαχειρίζονται τη φόρτιση της μπαταρίας μέσω ενός ενσωματωμένου φορτιστή, και να εγχέουν την πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο. Αυτοί οι μετατροπείς είναι σε θέση να προμηθεύουν ενέργεια AC σε επιλεγμένα φορτία κατά τη διάρκεια μιας διακοπής της παροχής από το δίκτυο, και απαιτείται να έχουν προστασία αντι – νησιδοποίησης.



Εικόνα 109. Inverter για συσσωρευτές backup [88]

- «Έξυπνοι» Υβριδικοί Αντιστροφείς (Intelligent Hybrid Inverters) που διαχειρίζονται τη Φ/Β συστοιχία, την αποθήκευση φορτίου και τη συνολική διασύνδεση με το δίκτυο του παρόχου. Είναι σχετικά νέα τεχνολογία, εξαιρετικά ευέλικτη και μπορεί να εκτελέσει τη λειτουργία των τριών παραπάνω αντιστροφέων αλλά η κύρια λειτουργία τους αφορά την ιδιοκατανάλωση με τη χρήση αποθηκευτικού μέσου.



Εικόνα 110. Intelligent hybrid inverter [89]

Οι κύριες κατηγορίες αντιστροφέων ανάλογα με την πηγή εισόδου τους είναι οι εξής:

- Αντιστροφείς πηγής τάσεως (στην DC πλευρά του αντιστροφέα υπάρχει πηγή DC τάσης)
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος (στην DC πλευρά του αντιστροφέα υπάρχει πηγή DC ρεύματος)

Οι αντιστροφείς VSI⁷¹ είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος αντιστροφέα και βρίσκει εφαρμογή στις περισσότερες βιομηχανικές διατάξεις. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε μηχανές πολύ υψηλής ισχύος.

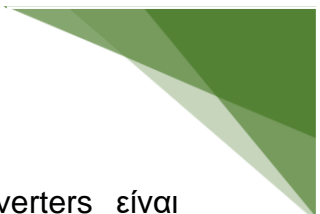
Σχετικά με την τοπολογία των αντιστροφέων πηγής τάσεως, υπάρχουν διάφοροι τύποι ανάλογα με τον αριθμό και τη συνδεσμολογία των διακοπτικών στοιχείων που περιλαμβάνει η διάταξη του αντιστροφέα, μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας, μονοφασικοί αντιστροφείς γέφυρας και τριφασικοί αντιστροφείς.

5.3.2 Χαρακτηριστικά και λειτουργία Φ/Β αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί, και συνδέουν τμήματα του Φ/Β συστήματος στο δίκτυο. Διαθέτουν προστασία IP65⁷² για εξωτερική τοποθέτηση

⁷¹ Voltage Source Inverter: Αντιστροφείς πηγής τάσεως

⁷² Κλάση στεγανότητας από σκόνη και υγρασία (Ingression Protection – European standard EN 60529)



(υπαίθρια εγκατάσταση). Σε περίπτωση που η προστασία των inverters είναι υποδεέστερη της IP65, τότε θα πρέπει να τοποθετηθούν μέσα σε κλιματιζόμενο οικίσκο/ερμάριο.

Θα πρέπει να διαθέτουν όλες τις απαραίτητες ασφάλειες για την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και να είναι πλήρως συμβατοί με τους σχετικούς κανονισμούς. Έχουν ενσωματωμένες όλες τις διατάξεις ηλεκτρονόμων ορίου τάσης, ορίου συχνότητας, ασυμμετρίας τάσης και υπερέντασης ενώ υποχρεωτικά διαθέτουν προστασία έναντι του φαινομένου της νησιδοποίησης κάτι που σημαίνει ότι θα διακόπτουν αυτόματα τη λειτουργία τους σε περίπτωση διακοπής του δικτύου.

Επιπλέον οι αντιστροφείς έχουν τις εξής παραμέτρους δικτύου:

- Εύρος τάσεως εναλλασσόμενου ρεύματος: +15% έως -20% επί της ονομαστικής τάσης (230V)
- Περιοχή συχνοτήτων εναλλασσόμενου ρεύματος: $\pm 0,5\%$ Hz της ονομαστικής (50Hz)
- Συντελεστής παραμόρφωσης ρεύματος: $< 4\%$
- DC Injection: $< 0,5\%$ του ονομαστικού ρεύματος

Πολλοί κατασκευαστές αντιστροφέων διαθέτουν δωρεάν στην ιστοσελίδα τους λογισμικά για τη διαστασιολόγηση του Φ/Β συστήματος. Ο σχεδιαστής μπορεί έτσι να συνδυάσει με τον βέλτιστο τρόπο τα Φ/Β πλαίσια με τους κατάλληλους αντιστροφείς και να υπολογίσει την αναμενόμενη παραγωγή, ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης της συστοιχίας. Τα λογισμικά αυτά είναι εύχρηστα και απλά, ενώ συνήθως περιλαμβάνουν αρκετές παραμέτρους που επηρεάζουν την Φ/Β παραγωγή.

Οι ηλιακοί αντιστροφείς χρησιμοποιούν τη διαδικασία εντοπισμού του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPPT⁷³) για να πάρουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα Φ/Β πάνελ. Τα Φ/Β στοιχεία παρουσιάζουν μια σύνθετη σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της συνολική αντίστασης, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα μία μη γραμμική καμπύλη απόδοσης εξόδου. Ο σκοπός του συστήματος MPPT είναι να δοκιμάζει την έξοδο των στοιχείων και να καθορίσει τη σχέση τάσης και ρεύματος που επιτυγχάνει τη μέγιστη ισχύ για κάθε δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor – FF), είναι μια παράμετρος η οποία, σε συνδυασμό με την τάση ανοικτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πάνελ, καθορίζει τη μέγιστη ισχύ από ένα Φ/Β στοιχείο. Ο παράγοντας πλήρωσης

⁷³ Maximum Power Point Tracking

ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος στο συγκεκριμένο σημείο.

Σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος από το δίκτυο, απαιτείται η απενεργοποίηση σε σύντομο χρονικό διάστημα των Φ/Β αντιστροφών. Αυτό αποτρέπει τους μετατροπείς από το να συνεχίσουν να τροφοδοτούν με τάση μικρά τμήματα του δικτύου, που καλούνται νησίδες, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι τροφοδοτούμενες νησίδες παρουσιάζουν κίνδυνο για τους εργαζόμενους οι οποίοι μπορούν να αναμένουν ότι η περιοχή δεν τροφοδοτείται με ρεύμα, αλλά εξίσου σημαντικό είναι το ζήτημα ότι χωρίς την σταθερή τάση του δικτύου με την οποία συγχρονίζεται ο αντιστροφέας, η ισχύς εξόδου του μπορεί να λάβει τιμές πέρα από τα επιτρεπόμενα όρια.

Οι τρεις βασικές λειτουργίες που εκτελεί ένας Φ/Β αντιστροφέας είναι οι εξής:

- Μετατροπή του ρεύματος σε εναλλασσόμενο
- Μετασχηματισμός του ρεύματος σε ημιτονοειδή κυματομορφή με συγκεκριμένη συχνότητα
- Ενίσχυση της τάσης της Φ/Β πηγής με μετατροπέα AC/DC

Με βάση τις ανωτέρω λειτουργίες, καθορίζονται τα επιμέρους στοιχεία του αντιστροφέα και προσδιορίζεται η απόδοση και οι απώλειες. Είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε μετασχηματιστή αντί του μετατροπέα με αποτέλεσμα όμως την αύξηση των απωλειών. Δεν πρέπει να παραληφθεί η προσθήκη του φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα ώστε να αποκοπούν οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες που προκύπτουν από τη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων, ώστε να λάβουμε στην έξοδο όσο το δυνατόν πιο καθαρό ημίτονο.

Οι υψηλότερες μέγιστες αποδόσεις επιτυγχάνονται στους αντιστροφείς που δεν περιλαμβάνουν στην διάταξή τους μετασχηματιστή, με μέση μέγιστη απόδοση εμπορικών αντιστροφών της τάξεως του 96,5%.

5.3.3 Εφαρμογές Φ/Β αντιστροφών

Σήμερα υπάρχουν διάφορες εφαρμογές των διατάξεων αντιστροφών DC/AC. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα εξής:

- Έλεγχος ταχύτητας ηλεκτρικών μηχανών AC
- Αντιστάθμιση άεργου ισχύος σε δίκτυα (SVC⁷⁴) ή ως ενεργά φίλτρα σε συστήματα μεταφοράς ισχύος (FACTS⁷⁵)
- Έλεγχος τάσης εξόδου σε αιολικά συστήματα

⁷⁴ Static Var Compensator

⁷⁵ Flexible AC Transmission Systems

- Έλεγχος θερμοκρασίας με επαγωγή
- Γενικά σε συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Διατάξεις Αδιάκοπης Παροχής Ισχύος (UPS)

5.4 Μετρητής Ενέργειας (αυτόνομο Φ/Β χωρίς net metering)

Οι ηλεκτρικοί μετρητές ενέργειας είναι συσκευές που μετράνε την ηλεκτρική ενέργεια [20] που παράγεται από το Φ/Β σύστημα ή καταναλώνεται σε μία κατοικία/κτίριο από τις συσκευές που τροφοδοτούνται από την παραγόμενη ενέργεια του Φ/Β συστήματος. Είναι απαραίτητοι ώστε να γνωρίζουμε το φορτίο που καταναλώνεται από τον καταναλωτή βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα, κατά τη διάρκεια ημέρας και νύχτας ή σε περίοδο περιορισμένης ηλιοφάνειας ή κακοκαιρίας όπου η απόδοση του Φ/Β συστήματος είναι χαμηλότερη ώστε να προβλέπουμε, να σχεδιάζουμε και να αναπροσαρμόζουμε ανάλογα το οικιακό καταναλωτικό πλάνο από πλευράς ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιούνται επίσης για τη διάγνωση σφαλμάτων στο σύστημα διαβάζοντας τα δεδομένα που μας παρέχονται και προβαίνοντας στις απαραίτητες ενέργειες για την αποκατάστασή τους όταν οι αποκλίσεις παραγωγής και κατανάλωσης είναι μεγάλες και ξεφεύγουν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος [21].

Διακρίνονται σε αναλογικούς και ψηφιακούς. Οι αναλογικοί χρησιμοποιούν πηνία και γρανάζια και η λειτουργία είναι αρκετά απλή. Το ρεύμα διαρρέει το πηνίο παράγοντας μαγνητικά πεδία τα οποία ενεργοποιούν ένα μεταλλικό δίσκο αναγκάζοντάς τον να περιστρέφεται. Με τη βοήθεια ενός μαγνήτη, ο δίσκος περιστρέφεται ανάλογα με την ηλεκτρική ένταση που διαρρέει το πηνίο. Η κίνηση αυτή περιστρέφει τα γρανάζια που δείχνουν το αποτέλεσμα σε συγκεκριμένη μονάδα μέτρησης (KWh).



Εικόνα 111. Αναλογικός μετρητής ενέργειας [90]

Οι ψηφιακοί μετρητές ενέργειας έχουν αισθητήρες που ανιχνεύουν την ένταση και την τάση που διαπερνούν το κύκλωμα. Είναι πιο εξελιγμένοι από τους αναλογικούς, ανιχνεύοντας ακόμα μικρότερες τιμές έντασης και τάσης με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ απεικονίζουν τις μετρήσεις σε μια ψηφιακή οθόνη. Οι πιο σύγχρονης γενιάς έχουν τη δυνατότητα τηλεμέτρησης δηλαδή την εξ' αποστάσεως μέτρηση των καταναλώσεων ακόμα και από φορητές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα μέσω κατάλληλων εφαρμογών ενώ τα λαμβανόμενα στοιχεία



Εικόνα 112. Ψηφιακός μετρητής ενέργειας [91]

μπορούν να αποθηκευτούν, να υποστούν επεξεργασία και να βελτιώσουν τον έλεγχο του συστήματος.

5.5 Ελεγκτές φόρτισης συσσωρευτών

Η φόρτιση των συσσωρευτών μέσω της φωτοβολταϊκής συστοιχίας απαιτεί συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι αποφεύγεται η υπέρταση του συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος του συσσωρευτή όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική κατάσταση υπερεκφόρτισης.

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης – εκφόρτισης, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει προς τα πάνω και αντίστοιχα προς τα κάτω ορισμένα όρια τάσης, όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες.

Μια μονάδα ελέγχου φόρτισης- εκφόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές, που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρομηχανικούς (relays), είτε ηλεκτρονικούς ισχύος. Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια δίοδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση, μέσω της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος. Διακρίνονται σε παράλληλους ρυθμιστές φόρτισης (shunt controllers) και σε ρυθμιστές φόρτισης σε σειρά (series controllers) και ανάλογα με την ενσωματωμένη τεχνολογία υπάρχουν οι MPPT και οι PWM⁷⁶.

Οι ρυθμιστές φόρτισης MPPT που εγκαθίστανται στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα καθορίζουν τα κατάλληλα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών δημιουργώντας ιδανικές προϋποθέσεις λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων παρέχοντας περιορισμένες έως ελάχιστες απώλειες στις πραγματικές τους αποδόσεις.




Εικόνα 114. Ρυθμιστής φόρτισης PWM [93]



Εικόνα 113. Ρυθμιστής φόρτισης MPPT [92]

⁷⁶ Pulse Width Modulation voltage regulator



Σε αντίθεση με τους ρυθμιστές MPPT, ένας συμβατικός ρυθμιστής φόρτισης τύπου PWM διανέμει την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου προς τις μπαταρίες περίπου κατά το 80% ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια της τάξεως του 20% περίπου χάνεται επειδή οι απλοί ρυθμιστές φόρτισης PWM δεν κάνουν ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

5.6 Ηλεκτρολογική εγκατάσταση

Όσο καλής ποιότητας και απόδοσης να είναι το φωτοβολταϊκό σύστημα των που έχει επιλεγεί από τον επενδυτή, εάν η μελέτη και η εκτέλεση της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης είναι λανθασμένη ή μερικώς εκτελεσμένη η απόδοσή του θα αποκλίνει από τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτεί τη χρήση καλωδίων DC και AC για τη μεταφορά της παραγόμενης ισχύος. Επιπλέον απαιτεί καλώδια και υλικά γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας καθώς και καλώδια για τη μεταφορά των σημάτων για τα συστήματα ασφαλείας.

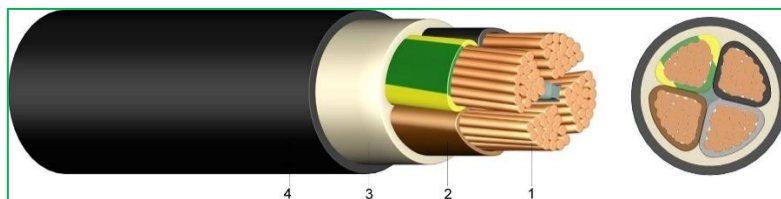
Τα DC καλώδια χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των πάνελ μεταξύ τους και για τη σύνδεση των στοιχειοσειρών (PV string) με τις εισόδους του μετατροπέα τάσης (inverter). Τα βασικά χαρακτηριστικά των καλωδίων (αγωγών) είναι τα παρακάτω:

- Διατομής 6mm²
- Το αγωγίμο υλικό του καλωδίου είναι χαλκός
- Το καλώδιο είναι εύκαμπτο, άφλεκτο και έχει προδιαγραφές προστασίας από την υπεριώδη ακτινοβολία και τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, οι ακραίες συνθήκες λειτουργίας για το καλώδιο σύνδεσης των Φ/Β πλαισίων είναι από -400° C έως +1000° C.
- Η πολικότητα των καλωδίων πρέπει να είναι αναγνωρίσιμη όπως και τα σημεία σύνδεσής τους στις ηλεκτρικές συσκευές του Φ/Β συστήματος.
- Είναι πολύκλινα για να μπορούν να μεταφέρουν την ένταση του ρεύματος που παράγεται με ασφάλεια, χωρίς απώλειες και χωρίς να αναπτύσσουν μεγάλες θερμοκρασίες

Τα AC καλώδια ισχύος τύπου NYY (J1VV-R) είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με το standard DIN VDE-0271 χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των inverter με το δίκτυο του παρόχου. Οι διατομές των καλωδίων και αγωγών θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε η πτώση τάσης, σε συνθήκες NOCT⁷⁷ και σε τάση MPP⁷⁸, από την έξοδο των Φ/Β Πλαισίων μέχρι και τους αναστροφείς να είναι μικρότερη του 1%.

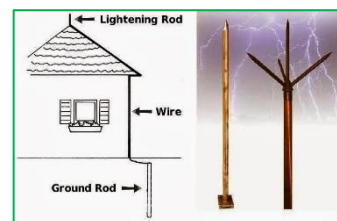
⁷⁷ Nominal Operating Cell Temperatures

⁷⁸ Maximum Power Point voltage



Εικόνα 115. Καλώδια τύπου NYT (πολύκλιωνα) [94]

Για την αντικεραυνική προστασία του κτιρίου χρησιμοποιούνται συλλεκτήριες ακίδες τύπου Franklin οι οποίες γειώνονται είτε μέσω των βάσεων στήριξης είτε απευθείας με την περιμετρική γείωση ανάλογα με τον τύπο της εγκατεστημένης βάσης., ενώ οι κατηγορίες αντικεραυνικών και μικροαυτόματων διακοπών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 116. Ακίδες αντικεραυνικής προστασίας κατοικίας [95]

Τύπος 1	Εγκατάσταση στον γενικό πίνακα κτιρίων. Έχει την ικανότητα εκφόρτισης πολύ ισχυρών ρευμάτων που προέρχονται από κεραυνούς.	Πρέπει να χρησιμοποιείται ως μέρος του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, όταν για παράδειγμα, υπάρχουν εγκατεστημένα αλεξικέραυνα ακίδος ή κλωβού
Τύπος 2	Εγκατάσταση στον γενικό πίνακα κτιρίων. Έχει την ικανότητα εκφόρτισης ρεύματος που προέρχεται από έμμεσα κεραυνικά πλήγματα, από υπερτάσεις του δικτύου και από όπλιση/αφόπλιση των συσκευών απόζευξης μιας εγκατάστασης	Πρέπει να χρησιμοποιείται πάντα
Τύπος 3	Αποκλειστικά για την προστασία συγκεκριμένων φορτίων. Πολύ χαμηλό ρεύμα εκφόρτισης	<p>Συμπληρωματικές συσκευές αντικεραυνικής προστασίας:</p> <p>→ χρησιμοποιείται σε συνδυασμούς Τύπου 1+2+3 σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου υπάρχει εγκατεστημένο αλεξικέραυνο.</p> <p>→ χρησιμοποιείται σε συνδυασμούς Τύπου 2+3 σε εγκαταστάσεις όπου δεν υπάρχει αλεξικέραυνο</p>

Εικόνα 117. Κατηγορίες αντικεραυνικών και μικροαυτόματων διακοπών [96]

Η μεταφορά των σημάτων, από τους μετατροπείς τάσης και από τους αισθητήρες παρακολούθησης θερμοκρασιών, ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας και τους μετρητές στιγμιαίας παραγωγής και παρακολούθησης του πάρκου, πραγματοποιείται με καλώδια UTP⁷⁹. Η αντικεραυνική προστασία αφορά κυρίως την ασφάλεια του κτιρίου και δεν αποτελεί μέρος της Φ/Β εγκατάστασης γι' αυτό και δε θα εξεταστεί, αφού η ύπαρξή της από πριν, αν τηρούνται οι απαραίτητες οδηγίες⁸⁰ είναι αρκετή.

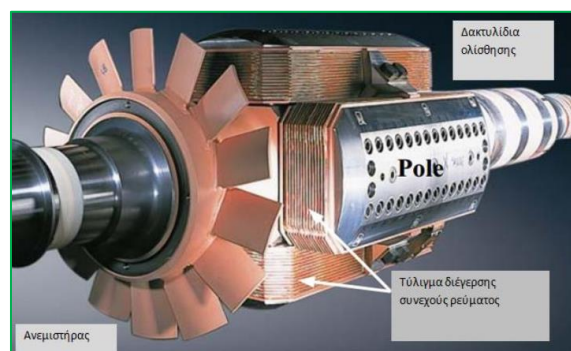
⁷⁹ Unshielded Twisted Pair (τουλάχιστον Cat5)

⁸⁰ Πρότυπα ΕΛΟΤ 1197 και ΕΝ 61024-1

5.7 Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (σε περίπτωση αυτόνομου Φ/Β συστήματος) υγρού καυσίμου (Diesel – βενζίνης)

Το Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (Η/Ζ) ή κοινώς γεννήτρια είναι μηχανή που βασίζεται πάνω στους νόμους της ηλεκτροφυσικής και ιδιαίτερα του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, και που αφορά την ενέργεια και τη μετατροπή της από τη μια μορφή σε μια άλλη. Συγκεκριμένα η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, σύμφωνα με φαινόμενο της φυσικής κατά το οποίο αν ένα πηνίο περιστραφεί μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στις άκρες του πηνίου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη: το ακίνητο μέρος της που λέγεται στάτορας ή επαγωγέας, στο οποίο υπάρχουν μαγνήτες (μόνιμοι μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες) και το κινητό μέρος της που λέγεται επαγωγίμο, ή ρότορας, στο οποίο υπάρχουν πηνία. Ο στάτορας είναι κατασκευασμένος από φύλλα ελασμάτων χάλυβα έχοντας εγκοπές στην εσωτερική του περιφέρεια Ένα πηνίο τριών φάσεων τοποθετείται σε αυτές τις υποδοχές και χρησιμεύει ως το τύλιγμα σπλισμού της γεννήτριας. Το τύλιγμα σπλισμού είναι πάντα συνδεδεμένο σε αστέρα και ο ουδέτερος συνδέεται με τη γείωση. Ο ρότορας φέρει το τύλιγμα του μαγνητικού πεδίου το οποίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα μέσω δύο δακτυλίων ολίσθησης από ξεχωριστή πηγή συνεχούς ρεύματος. Αυτή η DC πηγή (που ονομάζεται διεγέρτρια) είναι συνήθως μια μικρή DC γεννήτρια που τοποθετείται επί του άξονα του εναλλακτήρα.



Εικόνα 118. Μία βασική γεννήτρια [97]

Γυρίζοντας το ρότορα μέσα στο στάτορα παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η περιστροφή του ρότορα γίνεται με ατμομηχανή, με υδροστρόβιλο ή άλλον παρεμφερή τρόπο. Η πιο γνωστή και απλούστερη ηλεκτρογεννήτρια είναι το γνωστό «δυναμό» των ποδηλάτων.

Οι γεννήτριες στην έξοδό τους παράγουν είτε εναλλασσόμενο ρεύμα είτε συνεχές ρεύμα («δυναμό»). Οι περισσότερες γεννήτριες συνεχούς ρεύματος μοιάζουν με τις γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Η διαφορά τους έγκειται στην ύπαρξη ενός συγκεκριμένου μηχανισμού στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, που ονομάζεται συλλέκτης. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε γεννήτριες ανεξάρτητης διέγερσης, γεννήτριες παράλληλης διέγερσης, γεννήτριες διέγερσης σειράς, γεννήτριες με αθροιστική σύνθετη διέγερση και γεννήτριες με διαφορική σύνθετη διέγερση. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά σπάνιες στα σύγχρονα συστήματα ισχύος, λόγω της αντικατάστασής τους από την συνδυασμένη χρήση γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος και ανορθωτή προκειμένου να παραχθεί το συνεχές ρεύμα.

Μία εφεδρική ηλεκτρογεννήτρια πετρελαίου ή βενζίνης, θα μειώσει το κόστος απόκτησης του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και ταυτόχρονα θα διατηρεί τις μπαταρίες σε καλή κατάσταση, ειδικά τον χειμώνα ή όταν οι καταναλώσεις ενέργειας είναι μεγάλες. Οι εφεδρικές γεννήτριες ντίζελ ή βενζίνης, τυπικά παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα AC, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει, μέσω του inverter, τις ηλεκτρικές συσκευές για άμεση χρήση ή μπορεί να φορτίσει τις μπαταρίες μέσω ενός φορτιστή. Χωρίς εφεδρική γεννήτρια το φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να παράγει την απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας ανά πάσα στιγμή του έτους. Αυτό είναι συχνά δύσκολο να επιτευχθεί κατά τους χειμερινούς μήνες, που η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρή και οι ημέρες με συνεφιά στατιστικά σπανιότερες. Γι' αυτό το λόγο, κατά τη μελέτη σχεδίασης ενός Φ/Β συστήματος που προορίζεται για καθημερινή χρήση καθ' όλη την διάρκεια του έτους είναι επιβεβλημένη η ύπαρξη εφεδρικής ηλεκτρογεννήτρια πετρελαίου ή βενζίνης.

Η χρήση εφεδρικής γεννήτριας σε αυτόνομο Φ/Β προτείνεται επίσης όταν το αυτόνομο σύστημα είναι υποδιαστασιοποιημένο, δηλαδή όταν τα πάνελ και ο μετατροπέας τάσης έχουν μικρότερη ισχύ από τα φορτία που καταναλώνουν κατά τη λειτουργίας τους οι ηλεκτρικές συσκευές της κατοικίας. Τότε η γεννήτρια μπορεί να τροφοδοτήσει απ' ευθείας φορτία αιχμής (εστίες κουζίνας, πλυντήριο ρούχων) ή όταν θέλουμε να μεγαλώσουμε την ενεργειακή αυτονομία των μπαταριών του αυτόνομου φωτοβολταϊκού. Είναι σημαντικό τέλος, η γεννήτρια που θα επιλεγεί για την εγκατάσταση να διαθέτει σταθεροποιητή τάσης (AVR⁸¹), ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες δυσλειτουργίες του inverter, του φορτιστή και των ηλεκτρικών συσκευών.



Εικόνα 119. Κλειστού τύπου μονοφασική γεννήτρια αθόρυβη (72dB(A)/7m), AC 230V/DC 12V

5.8 Ανεμογεννήτρια (σε περίπτωση αυτόνομου Φ/Β συστήματος)

Δεδομένου ότι μιλάμε για υβριδικό Φ/Β σύστημα και αφού προσανατολιζόμαστε σε ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τη σχεδίασή του μπορούμε να συμπεριλάβουμε ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους με την προϋπόθεση ότι η κατοικία στην οποία θα εγκατασταθεί το σύστημα βρίσκεται σε περιοχή σε περιοχή όπου δρουν αέριες μάζες.

⁸¹ Automatic Voltage Regulator



Εικόνα 120. Σύγχρονη ενεργειακή κατοικία με ανεμογεννήτρια [98]

Γι' αυτό το λόγο είναι πλέον διαθέσιμες στην αγορά ανεμογεννήτριες οικιακής χρήσεως οι οποίες μπορούν να παράγουν από 400W μέχρι και 20KW. Ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης, μία τυπική γεννήτρια 1.5KW μπορεί να συνεισφέρει αξιοπρεπώς στις απαιτήσεις μιας οικιακής κατοικίας ακόμα και 300KWh το μήνα με ταχύτητες ανέμου 22Km/h.



Εικόνα 121. BuoQua Vertical Spiral Wind Power Turbine Generator 400W 12V Helix Magnetic Levitation Axis [99]

Η εγκατάσταση μιας οικιακής ανεμογεννήτριας πρέπει να γίνει κατόπιν λεπτομερούς μελέτης, τόσο του περιβάλλοντος χώρου (κτίρια, δέντρα, ψηλές κατασκευές) όσο και της δραστηριότητας και κατεύθυνσης του ανέμου το περισσότερο χρονικό διάστημα ανά έτος και τα γεωλογικά και κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρέπει να τοποθετηθεί σε ισχυρή βάση, με κατακόρυφη κλίση, συγκεκριμένο προσανατολισμό. Πρέπει επίσης η ανεμογεννήτρια να βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο από οποιαδήποτε κατασκευή ή εμπόδιο σε ακτίνα 100 μέτρων, κατά τουλάχιστον 10 μέτρα.



Εικόνα 122. Windmax HY400 500 Watt Max 12-Volt 5-Blade Residential Wind Generator Kit [100]

Απαιτείται να είναι δυνατή η χειροκίνητη μεταβολή του ύψους της με κεκλιμένο ή κατακόρυφο μηχανισμό ώστε να είναι δυνατή η συντήρησή της ενώ, είτε το σύστημα είναι αυτόνομο είτε συνδέεται στο δίκτυο πρέπει η αγωγοί παροχής συνεχούς ρεύματος να μην είναι εναέριοι και η απόσταση των καλωδίων να μην είναι μεγάλη από τα υπόλοιπα στοιχεία του Φ/Β συστήματος (συσσωρευτής, inverter) ώστε να περιοριστούν οι ενεργειακές απώλειες λόγω εσωτερικών αντιστάσεων. Η εμπειριστατωμένη μελέτη του συστήματος θα καταδείξει τις τελικές ενεργειακές απαιτήσεις μιας σύγχρονης κατοικίας και κατ' επέκταση τις προτεινόμενες ανεμογεννήτριες. Οι κατασκευαστές συνήθως δίνουν μία εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας από μία ανεμογεννήτρια μέσω της σχέσης:

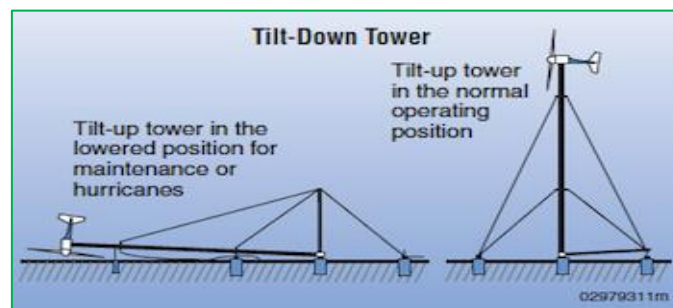


Εικόνα 123. Nature Power 70701 Wind Turbine – 2KW [101]

$$\text{Ετήσια παραγόμενη Ενέργεια} \left(\frac{\text{KWh}}{\text{έτος}} \right) = 0,01328 * D^2 * V^3 \quad (5.6)$$

D= διάμετρος έλικα ανεμογεννήτριας (feet)

V= Ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή (mil/h)



Εικόνα 124. Σύστημα ανόψωσης ανεμογεννήτριας [102]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΙΔΙΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΓΙΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΞΥΠΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

6.1 Το τέλος του εξηλεκτρισμού – Γενικά


Η ενεργειακή κρίση στις αρχές της δεκαετίας του 1970, το άνοιγμα στον ανταγωνισμό των ΑΠΕ, η δυνατότητα κατασκευής μικρών, ευέλικτων και πλήρως αυτοματοποιημένων υποσταθμών και η διάθεση επενδύσεων για κατασκευή μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών, αιολικών και ηλιακών πάρκων και πυρηνικών εργοστασίων ενέργειας στις προηγμένες χώρες μας κάνουν να αντιλαμβανόμαστε ότι το τέλος των μηδενικών εκπομπών είναι αναμενόμενο και επιβεβλημένο.

Η ανάγκη απομάκρυνσης απ' τα παρωχημένα και σχεδόν εξαντλημένα ορυκτά καύσιμα και η μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής είναι πλέον πραγματικό σενάριο και προϋποθέτει τη στροφή σε εναλλακτικής μορφής πηγές ενέργειας. Η φιλοδοξία της Ευρωπαϊκής Στρατηγικής για το 2030 είναι 40% χαμηλότεροι ρύποι του φαινομένου του θερμοκηπίου, 27% αύξηση στην παραγωγή ενέργειας καθαρής μορφής, 27% αύξηση στην απόδοση της ενέργειας και τουλάχιστον 15% διασυνδεσιμότητα των ενεργειακών δικτύων [22].

Η πλήρης απελευθέρωση της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, η διαδικτυακή τιμολόγηση της κατανάλωσης, η απομακρυσμένη διαχείριση αυτόνομων υβριδικών οικιακών εγκαταστάσεων, η δυνατότητα επιλογής παρόχου ενέργειας είναι αδιαμφισβήτητο πλέον ότι αποτελούν μονόδρομο στη δημιουργία επιμέρους συνδεδεμένων συστημάτων και στην υλοποίηση ενεργειακών τοπικών μικροδικτύων. Ο συνδυασμός αυτόνομων περιφερειακών Φ/Β συστημάτων με σύγχρονες και αυτοματοποιημένες διατάξεις οδήγησε στην ανάπτυξη της τοπολογίας «έξυπνων» δικτύων (smart grid).

6.2 Ενσωμάτωση υβριδικών Φ/Β συστημάτων σε οικουμενικό δίκτυο και προβλήματα

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα Φ/Β περιλαμβάνουν το σύνολο των οικιακών εγκαταστάσεων και των επίγειων εγκαταστάσεων (σταθμοί Φ/Β) ενώ με κατάλληλες διατάξεις συνδέονται και τα συστήματα παραγωγής αιολικής ενέργειας [23]. Όσον αφορά το ενιαίο διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο, η ενέργεια που παράγεται απαιτείται να καταναλωθεί σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (της τάξεως των ms). Η περίσσεια ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να αποδοθεί σε περιόδους υψηλής ενεργειακής ζήτησης και εξαιτίας της αργής απόκρισης των συστημάτων αποθήκευσης



σε σχέση με τις μεταβολές φορτίων, χρησιμοποιούνται διατάξεις σταθεροποίησης της ενεργειακής ροής κατά την είσοδο και έξοδο από το δίκτυο.

Τα δίκτυα αυτά δεν είναι υποχρεωτικό να εμπεριέχουν διατάξεις αποθήκευσης αλλά τα απαραίτητα στοιχεία τους όσον αφορά τα συνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα είναι η Φ/Β συστοιχία, ο αντιστροφέας και ο πίνακας διανομής ενώ στα εκτός δικτύου είναι η Φ/Β συστοιχία, οι μετατροπείς DC/DC και DC/AC και ο πίνακας ελέγχου εντός του συστήματος. Η ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας σε ένα υφιστάμενο δίκτυο έχει αρκετές τεχνικές δυσκολίες όπως η ρύθμιση τάσης, οι απότομες μεταβολές στην τάση, η εμφάνιση αρμονικών και αστάθεια του συστήματος, χαρακτηριστικά που εμφανίζονται τόσο στην παραγωγή όσο στη μετάδοση και διανομή της ενέργειας, όπως φαίνονται παρακάτω:


Ρύθμιση τάσης→ Η κυματοειδής τάση είναι η υπολειπόμενη περιοδική μεταβολή μιας συνεχούς τάσης εντός της πηγής ενέργειας που προκαλείται εξαιτίας μιας εναλλασσόμενης πηγής εξαιτίας ατελούς φιλτραρίσματος της μεταβαλλόμενης κυματομορφής κατά την ανόρθωση της τάσης από AC σε DC. Αυτό εμφανίζεται κυρίως σε γεννήτριες DFIG⁸² και επεκτείνεται και στις γεννήτριες WECS⁸³ και διορθώνεται με τη χρήση ελεγκτών ασαφούς λογικής fuzzy logic προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης. Η μέθοδος αυτή (droop characteristics) [24] προέρχεται από την αρχή της ισορροπίας ισχύος σε σύγχρονες γεννήτριες και εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει ισορροπία μεταξύ της μηχανικής ισχύος εισαγωγής και της ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο του συστήματος με αποτέλεσμα μία μεταβολή στην ταχύτητα στροφών της γεννήτριας και κατ' επέκταση στη συχνότητα και σε απόκλιση του πλάτους τάσης της ισχύος εξόδου.

Μεταβολές τάσης→ Η εξυπηρέτηση ευαίσθητων φορτίων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο εξαρτάται από τις αυξομειώσεις της τάσης οι οποίες προκαλούνται συνήθως από βραχυκυκλώματα, μεταβολές στην πηγή έντασης, βεβλαμμένο ρυθμιστή τάσης, χαλαρές συνδέσεις, ταυτόχρονη και απότομη απαίτηση εξυπηρέτηση υψηλών ή μηδενικών αντίστροφα φορτίων. Το πρόβλημα επιλύεται με ένα ηλεκτρονικό μετατροπέα από ισορροπιστές (compensators) σε σειρά, ο οποίος απαιτεί πολύ λιγότερη ισχύ και είναι σε θέση να επαναφέρει την τάση στην πλευρά του φορτίου στα επιθυμητά επίπεδα.

Αρμονικές→ Η ενσωμάτωση ανεμογεννητριών σε ενεργειακά δίκτυα οδήγησε στην παραγωγή μιας κακής ποιότητας ισχύος με χαρακτηριστικά που δεν είναι επιθυμητά και προκαλούν αστάθεια σ' αυτό. Ειδικά, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας εισάγουν αρμονικές συνιστώσες ρεύματος που είναι παραμόρφωση της κανονικής κυματομορφής του ρεύματος και παράγονται από μη γραμμικά φορτία. Η

⁸² Double Fed Induction Generator

⁸³ Wind Energy Conversion System



απόσβεσή τους γίνεται συνήθως με διατάξεις εξειδικευμένου ελέγχου ισχύος και ρυθμιστών τάσης και με φίλτρα καταπίεσης αρμονικών (EMI⁸⁴ φίλτρα).

Διάφορα άλλα θέματα που τίθενται κατά τη λειτουργία ενός ενεργειακού δικτύου είναι η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος ισχύος που διακρίνεται σε ευστάθεια γωνίας ρότορα και που αφορά τη διατήρηση ισορροπίας μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής κάθε γεννήτριας συνδεδεμένης στο σύστημα, στη διατήρηση ευστάθειας τάσης κατά την οποία απαιτείται να διατηρείται σταθερή η τάση στους κόμβους του συστήματος και στη διατήρηση σταθερής συχνότητας.


6.3 Έξυπνα δίκτυα

Οι περιβαλλοντικές προδιαγραφές και οι απαιτήσεις που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή ένωση για την επόμενη δεκαετία στις χώρες μέλη της με σκοπό την ενθάρρυνση της αποκεντρωμένης παραγωγής της ενέργειας, της συγκεντρωτικής συνεισφοράς και της εκμετάλλευσης κάθε είδους ανανεώσιμης πηγής ενέργειας με στόχο τη μείωση των εκπομπών ρύπων και τη βελτίωση της απόδοσης διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας αποτελούν το βασικό πυλώνα μετάβασης σε ένα εκσυγχρονισμένο και υγιές αποτύπωμα στο ενεργειακό τοπίο. Η στρατηγική επένδυση στη διασύνδεση των διαφορετικών πηγών καθαρής ενέργειας σε ένα ενιαίο ενεργειακό δίκτυο απαλλαγμένο από τα ορυκτά καύσιμα οδήγησε στη δημιουργία της τοπολογίας των έξυπνων δικτύων.

Το σύνολο των ψηφιακών τεχνολογιών που επιτρέπουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του ενεργειακού δικτύου και των καταναλωτών καλείται γενικά ένα έξυπνο δίκτυο. Αυτή η επικοινωνία εμπεριέχει πλήθος υπηρεσιών οι οποίες είναι διαρκώς διαθέσιμες σε όλα τα στάδια της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας όπως σύγχρονες διατάξεις έξυπνου ελέγχου, αυτοδιάγνωσης και αυτοεπιδιόρθωσης, με σκοπό την ταχεία απόκριση του ηλεκτρικού δικτύου στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις.

Το έξυπνο δίκτυο αναπαριστά τη μετάβαση της ενεργειακής βιομηχανίας και υποδομής σε μία νέα εποχή αξιοπιστίας, ευελιξίας, διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας που θα ενισχύσει την οικονομική και περιβαλλοντική υγεία. Ορίζουμε λοιπόν το έξυπνο δίκτυο ως το δίκτυο που είναι σε θέση να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις όλων των χρηστών που συνδέονται σ' αυτό (παραγωγούς και καταναλωτές) με ασφαλή και οικονομικό τρόπο με απώτερο σκοπό τη μεγιστοποίηση της αποδοτικής χρήσης και της ποιότητας της ενέργειας που παράγεται, μεταδίδεται και διανέμεται σε όλα τα σημεία του με τη χρήση έξυπνων μετρητών, έξυπνων ηλεκτρικών συσκευών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μειώνοντας όσο το δυνατό περισσότερο τις απώλειες της παραγόμενης ισχύος.

⁸⁴ Electromagnetic Interference – ΗΜ παρέμβαση



Σύμφωνα με την επιτροπή ενέργειας της ΕΕ, ένα έξυπνο δίκτυο περιλαμβάνει καινοτόμα προϊόντα και υπηρεσίες που προάγουν την ποιότητα ζωής των πολιτών και σέβονται το περιβάλλον ώστε:

- Να διεκπεραιώσουν αποδοτικά τη σύνδεση και τη λειτουργία των γεννητριών παραγωγής όλων των μεγεθών και τεχνολογιών
- Να επιτρέψουν στους καταναλωτές να συμμετάσχουν ενεργά στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος
- Να παράσχουν στους καταναλωτές πλήρη πληροφόρηση και δυνατότητα επιλογών για βελτιστοποιημένη χρησιμοποίηση των ενεργειακών τους φορτίων
- Να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συνολικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Να διατηρήσουν και να βελτιώσουν τα υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας, ποιότητας και ασφάλειας της παραγόμενης ενέργειας και γενικά όλων των εμπλεκόμενων υπηρεσιών

Το αμερικανικό Υπουργείο ενέργειας έχει προβεί σε ένα παρόμοιο ορισμό από το 2007 συμπεριλαμβάνοντας επιπλέον, στοιχεία και υπηρεσίες όπως:

- Δυναμική βελτιστοποίηση λειτουργιών και υπηρεσιών με τη χρήση υπηρεσιών κυβερνοασφάλειας
- «Έξυπνες» τεχνολογίες όπως αυτοματοποιημένο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο (automated real time monitoring) και συνεργασία όλων των στοιχείων του δικτύου για αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας (από την παραγωγή μέχρι το κάθε ένα οικιακό φορτίο)
- Ενσωμάτωση έξυπνων και καταναλωτικών συσκευών
- Ενσωμάτωση σύγχρονων μέσων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τεχνολογίες οριζοντιοποίησης και αποτροπής των κορυφώσεων (peak shaving technology) και ελεγχόμενης απόδοσης της ενέργειας όπως σε σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων
- Ανάπτυξη και δυναμική ενημέρωση κανόνων επικοινωνίας και διαλειτουργίας όλων των συσκευών, υπηρεσιών και φορτίων του δικτύου συμπεριλαμβανομένης και της υποδομής του δικτύου

Ένα κοινό στοιχείο μεταξύ των αποδιδόμενων ορισμών είναι η εφαρμογή ψηφιακής επεξεργασίας και επικοινωνίας στο ενεργειακό δίκτυο με σκοπό τη συγκέντρωση της ροής δεδομένων και της διαχείρισης της πληροφορίας στο έξυπνο δίκτυο. Η ενσωμάτωση αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική γιατί συμβάλλει στη βελτίωση της υποδομής (strong grid), στην ψηφιακή επιπεδοποίηση (layering – smart grid)) και στη διεκπεραίωση της εμπορικής διαδικασίας (κεφαλαιοποίηση απαραίτητων επενδύσεων στην «έξυπνη» τεχνολογία).

6.4 Χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων και προκλήσεις

Το έξυπνο δίκτυο αποτελεί το συνονθύλευμα των προτεινόμενων βελτιώσεων του υφιστάμενου ηλεκτρικού δικτύου. Ακόμη δεν έχει οριστεί μια κοινή παγκόσμια γραμμή και συμφωνία για την ορθολογιστική υλοποίησή του, αφού αυτό εξαρτάται από πλήθος ποικίλλων παραγόντων που εξαρτώνται από τις διαφορετικές οικονομίες, το φορολογικό σύστημα και την οικονομική και επενδυτική ικανότητα κάθε χώρας, τη γεωγραφική κατανομή μέχρι και την πληθυσμιακή ανομοιογένεια. Αυτό δεν παύει όμως να αναιρεί την κοινή ομολογία για τα πλήθος των πλεονεκτημάτων των έξυπνων δικτύων, που αναφέρονται παρακάτω.


Η αξιοπιστία είναι ο βασικότερος παράγοντας που καθορίζει την υλοποίηση και εφαρμογή ενός έξυπνου δικτύου. Η υπάρχουσα υποδομή χαρακτηρίζεται από προβλήματα αστάθειας και μετάδοσής της αλληλουχίας αυτής της αστάθειας, γεγονός που αποσυντονίζει το δίκτυο και κατ' επέκταση τις κυβερνητικές και τραπεζικές υποδομές, τις υποδομές υγείας και όχι μόνο (domino effect). Το υφιστάμενο δίκτυο χαρακτηρίζεται από πολλές διαδρομές ροής της ενέργειας προκειμένου να περιοριστούν τα σφάλματα οι οποίες είναι σχεδιασμένες ακτινικά και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σφάλματα σε ένα κόμβο να μεταφέρονται και σε άλλους κόμβους του δικτύου αυξάνοντας την πιθανότητα πολλαπλών και διαδοχικών πτώσεων τάσης στα στοιχεία του συστήματος. Η βελτίωση της ανίχνευσης σφαλμάτων και της αυτόεπιδιόρθωσής τους χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα με τεχνικές rolling blackout⁸⁵ θα έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος και την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος.

Τα υφιστάμενα ηλεκτρικά δίκτυα επιτρέπουν τη μονόδρομη ροή ενέργειας και αν ένα υποδίκτυο παράγει περισσότερη ενέργεια απ' όση καταναλώνεται, η αντίστροφη ροή υποβιβάζει την αποδοτικότητα και δημιουργεί κινδύνους για το προσωπικό, τους καταναλωτές και τις εγκαταστάσεις. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των έξυπνων δικτύων είναι η ευελιξία στην τοπολογία τους. Η εξελιγμένη υποδομή της μετάδοσης και διανομής θα επιτρέπει με τη χρήση ειδικών διατάξεων την αμφίδρομη ροή ενέργειας επιτρέποντας την κατανεμημένη παραγωγή και την ενσωμάτωση της παραγόμενης από ΑΠΕ, σταθμούς φωτοβολταϊκών (επίγειους και οικιακούς), υδροηλεκτρικούς σταθμούς και ανεμογεννήτριες για τη φόρτιση σταθερών συστημάτων αποθήκευσης και ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

Η διαχείριση του ενεργειακού φορτίου από την πλευρά του καταναλωτή είναι μία σημαντική υπηρεσία που εξυπηρετείται από τα έξυπνα δίκτυα. Η αυτοματοποιημένη απενεργοποίηση συσκευών ελέγχου περιβάλλοντος όπως κλιματιστικά και αντλίες θερμότητας που γίνεται με τη συνεργασία του δικτύου και των «έξυπνων» σπιτιών σε περιόδους αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων ή αυξημένων τιμών της κιλοβατώρας μειώνοντας την τάση στις γραμμές όποτε απαιτείται μέσω διατάξεων βελτιστοποίησης τάσης (VVO)⁸⁶ καθιστά την απαίτηση διαμόρφωσης και τον έλεγχο των μετρητών ενέργειας του συστήματος από τον ανθρώπινο παράγοντα παρωχημένη, αφού αυτό θα επιτυγχάνεται πλέον από εξελιγμένα συστήματα προηγμένης καταμέτρησης μετά από επεξεργασία πληροφοριών από συστήματα διαχείρισης. Ο καταναλωτής θα εξαρτάται λιγότερο από τις γραμμές μετάδοσης και

⁸⁵ Αυτόματα διακοπή και αποκοπή ενός προβληματικού κόμβου ή στοιχείου και αναδρομολόγηση σε υγιή διαδρομή

⁸⁶ Voltage and VAR (Volt – Ampere Reactive) Optimization




διανομής ενώ θα παράγεται τόση ενέργεια όση πραγματικά χρειάζεται, ρίχνοντας τις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος και περιορίζοντας το ενεργειακό αποτύπωμα.

Η αυξημένη ευελιξία του έξυπνου δικτύου επιτρέπει μεγαλύτερη και πιο εκλεπτυσμένη απορρόφηση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χωρίς να είναι προαπαιτούμενο ένα σύστημα αποθήκευσής της. Η παρούσα υποδομή του ηλεκτρικού δικτύου είναι δομημένη ώστε να δέχεται ενέργεια από μικρό αριθμό σημείο τροφοδοσίας και αμιγώς από συγκεκριμένες τεχνολογίες (λιγνίτης). Ακόμα και όταν η τροφοδοσία της ενέργειας στο δίκτυο επιτρέπεται σε κάποιους κόμβους να γίνει τόσο από συμβατικές αλλά και ανανεώσιμες πηγές, η υποδομή στο επίπεδο της μετάδοσης δε μπορεί να δεχτεί την πανσπερμία ποιότητας ενέργειας λόγω έλλειψης της απαραίτητης υποδομής διαχωρισμού και διανομής της λαμβανόμενης ενέργειας. Οι ταχείες διακυμάνσεις στην κατανεμημένη παραγωγή (ιδίως από τις ΑΠΕ, οι οποίες εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες) αποτελούν ιδιαίτερες προκλήσεις κατά τη διατήρηση σταθερών επιπέδων ισχύος και αυτό γίνεται από σύγχρονες γεννήτριες με ενσωματωμένες αυξημένες δυνατότητες ελέγχου και διαμόρφωσης που συναντώνται στα έξυπνα δίκτυα.

Μέσω του έξυπνου δικτύου είναι δυνατή επίσης η συστηματική επικοινωνία μεταξύ των παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας και των καταναλωτών ή των επιχειρήσεων, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα και στις δύο πλευρές να είναι πιο αποτελεσματικές στη στρατηγική διανομή και κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι τιμές θα εξαρτώνται από τα κριτικά και τα απαιτούμενα φορτία διαβίωσης ενώ κάθε φορτίο θα αξιολογείται και θα τιμολογείται διαφορετικά με τον καταναλωτή να γίνεται πιο ενεργός, συνεπής και περιβαλλοντικά δραστήριος ενώ ο πάροχος θα μπορεί να μεταβάλει τη στρατηγική διανομής της ενέργειας ώστε να μεγιστοποιήσει το κέρδος του και να μοιραστεί το μερίδιο της αγοράς χωρίς αυθαιρεσίες και παρατυπίες. Σε οικιακό επίπεδο και με διατάξεις έξυπνων σπιτιών ο καταναλωτής θα έχει τον έλεγχο διαμόρφωσης των απαιτούμενων φορτίων μειώνοντας τον ενεργειακό του λογαριασμό του και αναζητώντας νέες μεθόδους περιορίζοντας τα περιττά φορτία. Με αυτό τον τρόπο απελευθερώνεται η αγορά, δίνεται η δυνατότητα επιλογής παρόχου και υπηρεσιών ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες και ανοίγουν νέες θέσεις εργασίας.

Τα οφέλη των έξυπνων δικτύων είναι πολλά και παρόλο που στις επόμενες δεκαετίες θα απλουστευθούν οι απαραίτητες διαδικασίες εφαρμογής τους και οι απλοί καταναλωτές θα απολαμβάνουν τα προνόμια των υπηρεσιών αυτών των δικτύων, υπάρχουν ακόμα αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, εξού και ο μεγάλος εκτιμώμενος χρόνος ευρείας εφαρμογής τους.

Εξαιτίας του ανταγωνισμού των παρόχων υπηρεσιών τηλεπικοινωνίας και διαδικτύου σχεδιάζεται λογισμικό, υλισμικό και πρωτόκολλα επικοινωνίας που σκόπιμα δε συνεργάζονται μεταξύ τους ώστε να δεσμεύσουν τον καταναλωτή σε ένα συγκεκριμένο κατασκευαστή. Επιπλέον, η ενσωμάτωση ψηφιακών επικοινωνιών και υπολογιστικής υποδομής παρουσιάζει τρωτότητες, εξαιτίας της πιθανής απαίτησης μεγαλύτερης υπολογιστικής ισχύος από την πλευρά των καταναλωτών ώστε να υποστηριχθεί η επεξεργασία περισσότερου όγκου πληροφοριών για συγκεκριμένες λειτουργίες ελέγχου και λειτουργίας με μεγαλύτερη ικανότητα διαμόρφωσης των λεπτομερειών του οικιακού συστήματος, κάτι που θα αυξήσει το αρχικό απαιτούμενο κόστος.



Ένα ακόμη θέμα που εγείρεται είναι η πρόσβαση στην ιδιωτικότητα των καταναλωτών από την επεξεργασία των πληροφοριών που λαμβάνουν οι πάροχοι για τον έλεγχο του οικιακού δικτύου δημιουργώντας ένα προσωπικό προφίλ για κάθε πελάτη (τι συσκευές διαθέτει ένα σπίτι, για πόσες ώρες λειτουργούν, πόση ισχύ καταναλώνουν) και η πώλησή τους σε εταιρείες για σκοπούς μάρκετινγκ.


Ορισμένες απαραίτητες διατάξεις του συστήματος των έξυπνων δικτύων, όπως οι σταθεροποιητές ισχύος του συστήματος (PSS⁸⁷) που εγκαθίστανται στις γεννήτριες, είναι εξαιρετικά ακριβές, απαιτούν περίπλοκη διαδικασία ενσωμάτωσης, απαιτούνται μόνο σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών και είναι αποτελεσματικές μόνο όταν όλοι οι προμηθευτές (διαφορετικών τεχνολογιών και μεγεθών πηγών ενέργειας) τις έχουν εγκατεστημένες. Λόγω του υψηλού αυτού κόστους, από πλευράς των εταιρειών που κατασκευάζουν μέρη της υποδομής του δικτύου, δε μπορεί να δικαιολογηθεί η εγκατάσταση αυτών των διατάξεων. Γι' αυτό, το υψηλό αρχικό κόστος της υποδομής δε θα μοιραστεί μόνο ανάμεσα στους προμηθευτές και κατασκευαστές της υποδομής του έξυπνου δικτύου αλλά και στους υποψήφιους καταναλωτές, σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, κάνοντάς τους πιο επιφυλακτικούς για το συνολικό έργο.

6.5 Τεχνολογία έξυπνων δικτύων

Η τεχνολογία που θα ενσωματωθεί σε ένα έξυπνο δίκτυο είναι διαθέσιμη στην αγορά και σε πολλές ανεξάρτητες εμπορικές εφαρμογές. Αυτή περιλαμβάνει:

- Ολοκληρωμένες επικοινωνίες→ Οι τομείς που επιδέχονται αναβάθμιση είναι ο αυτοματισμός υποσταθμών, η ανταπόκριση στη ζήτηση, ο αυτοματισμός διανομής, εποπτικός έλεγχος και λήψη δεδομένων, συστήματα διαχείρισης ενέργειας, τοπολογία ασύρματων δικτύων, επικοινωνίες παρόχου μέσω γραμμών διανομής και χρήση οπτικών ινών για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, αυξημένη εγρήγορση, ασφάλεια και απόκριση δικτύου σε ανεπιθύμητες μεταβολές, βελτιστοποίηση ευστάθειας συστήματος και βελτιστοποιημένη χρήση κάθε διαθέσιμου πόρου.
- Απομακρυσμένοι αισθητήρες→ Οι λαμβανόμενες μετρήσεις θα αξιολογούν και θα αποτρέπουν τη συμφόρηση του συστήματος, θα ελέγχουν την κατάσταση υγείας του υλικού, θα προλαμβάνουν την κλοπή ενέργειας και θα αναβαθμίζουν διαρκώς τη στρατηγική ελέγχου. Οι μετρήσεις αυτές θα πραγματοποιούνται από ψηφιακούς μετρητές μικροεπεξεργαστών, συστήματα μέτρησης ευρείας περιοχής, ανάγνωση και ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού αποτυπώματος ,προηγμένα εργαλεία κοστολόγησης πραγματικού χρόνου, ρελέ ψηφιακής προστασίας και μετάδοση δεδομένων στο ραδιοφωνικό φάσμα χωρίς την απαίτηση συσσωρευτών ή σύνδεση στο δίκτυο.
- Μονάδες μέτρησης phasor→ Είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του πλάτους και της γωνίας φάσης μιας ηλεκτρικής ποσότητας όπως η τάση και η ένταση σε ένα έξυπνο δίκτυο με τη βοήθεια μιας χρονικής πηγής για συγχρονισμό. Η πηγή αυτή μπορεί να προέρχεται από το σύστημα GPS.

⁸⁷ Power System Stabilisers



- Διατάξεις ελέγχου κατανεμημένης ροής ισχύος→ Οι διατάξεις αυτές αγκιστρώνονται πάνω στις υφιστάμενες γραμμές μετάδοσης και ελέγχουν την ισχύ που μεταδίδεται. Δίνουν τη δυνατότητα υποστήριξης ελέγχου της ροής ακόμα και της ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές παρέχοντας έλεγχο πραγματικού χρόνου, κατανέμοντας την ενέργεια κατάλληλα στο δίκτυο και αποθηκεύοντάς την όταν απαιτείται για μετέπειτα χρήση.


- Παραγωγή «έξυπνης» ενέργειας→ Παρέχεται η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από όμοιες, «έξυπνες» γεννήτριες οι οποίες ξεκινούν, σταματούν και λειτουργούν αποδοτικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου. Είναι κατάλληλες για παραγωγή ενέργειας για φορτία ελάχιστης και μέγιστης ζήτησης και διευκολύνουν το έργο των διατάξεων ισορρόπησης φορτίου (load balancing) στο δίκτυο, ιδίως τώρα με την ύπαρξη και άλλων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα Φ/Β.

- Αυτοματισμός ισχύος συστήματος→ Με αυτές τις υπηρεσίες παρέχεται η δυνατότητα ταχείας διάγνωσης σφαλμάτων και εύρεσης στοχευμένων λύσεων αποκλειστικά για κάθε πρόβλημα που εμφανίζεται με τη μικρότερη δυνατή επίδραση στο συνολικό δίκτυο. Τα αναλυτικά εργαλεία (αλγόριθμοι και υψηλή επεξεργαστική ισχύς), τα κατανεμημένα συστήματα ελέγχου, οι διαλειτουργικές εφαρμογές και η τεχνητή νοημοσύνη είναι τέτοιες υπηρεσίες.

- Μικροδίκτυα→ Είναι ένα αποκεντρωμένο σύνολο ηλεκτρικών πηγών και φορτίων που συνδέεται στο ενεργειακό δίκτυο αλλά δύναται να λειτουργήσει και αυτόνομα ανάλογα με τις γεωγραφικές και οικονομικές συνθήκες. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η αποδοτική ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και η εναλλαγή του σε αυτόνομο και αποκοπή του από το κύριο ενεργειακό δίκτυο ενώ μπορεί να ικανοποιήσει πολλαπλές ενεργειακές ανάγκες τελικών χρηστών.

- Ενεργά δίκτυα→ Στα δίκτυα αυτά γίνεται η εκτέλεση υπολογισμών των δεδομένων των μετόχων του συνολικού δικτύου από τους δρομολογητές ενώ οι μέτοχοι έχουν το δικαίωμα επέμβουν στη διαμόρφωση του δικτύου παρέχοντας το δικό τους πηγαίο κώδικα για να εκτελεστούν αυτοί οι υπολογισμοί. Η αρχιτεκτονική των ενεργών δικτύων περιλαμβάνει το επίπεδο που θα διαχειριστεί τους πόρους του συστήματος, το επίπεδο που θα αναλάβει τη μετάφραση των πληροφοριών και το επίπεδο που θα προγραμματίσει το περιβάλλον εκτέλεσης προκειμένου να γίνει η παροχή των υπηρεσιών. Πρόκειται δηλαδή για δίκτυα όπου δίνουν μεγάλη δικαιοδοσία στους τελικούς χρήστες και στους μετόχους μέσα σε καθορισμένα πλαίσια ασφάλειας προκειμένου να περιοριστούν οι υφιστάμενοι περιορισμοί των κλασικών ενεργειακών δικτύων.

Παραδείγματα μικροδικτύων αποτελούν το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Κύθνου (ΚΑΠΕ) [25] που αξιοποιεί την ηλιακή και αιολική ενέργεια από το 2001, τροφοδοτώντας 12 κατοικίες με Φ/Β συστοιχίες και συσσωρευτές μέσω αμφίδρομων μετατροπών ισχύος καλύπτοντας τις βασικές ενεργειακές ανάγκες των κατοικιών και το Υβριδικό Πάρκο Ικαρίας κάνοντας χρήση αιολικής και υδραυλικής ενέργειας παράγοντας ετησίως 9.8GWh μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων CO₂ κατά 13800 τόνους το χρόνο και που ολοκληρώθηκε το 2019.



Πέρα από το βαθύ πυρήνα του έξυπνου δικτύου που αποτελούν οι παραπάνω κρίσιμες και απαραίτητες τεχνολογίες, λόγω της υψηλής δυναμικότητας και ευελιξίας ενός τέτοιου δικτύου, δύναται να ενσωματωθούν σ' αυτό πλήθος εφαρμογών και υπηρεσιών όπως διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, υπηρεσίες διαχείρισης ενέργειας, έξυπνες προσωποποιημένες ενεργειακές υπηρεσίες, ευρυζωνικά συστήματα επικοινωνιών, συστήματα αλληλεπίδρασης παρόχου και καταναλωτή, ενεργά δίκτυα και μικροδίκτυα.

6.6 Αρχιτεκτονική έξυπνων δικτύων και στόχοι

Οι τεχνικές οδηγίες, η κανονικοποίηση συμφωνιών και πρωτοκόλλων εφαρμογής από τους χρήστες και οι μικρές επενδύσεις είναι ικανοποιητικές να στηρίζουν τα μικρά οικιακά δίκτυα που παράγουν ενέργεια από ΑΠΕ αλλά δεν επαρκούν από μόνα τους να στηρίζουν ένα έξυπνο δίκτυο ευρείας έκτασης. Ένα ευφυές έξυπνο δίκτυο, ως ένα εξαιρετικά περίπλοκο σύστημα με πλήθος υποσυστημάτων εξυπηρετεί τις ποικίλες ανάγκες πολλών μετόχων που συνδέονται σ' αυτό, όπως βιομηχανικοί και οικιακοί καταναλωτές, διαφορετικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ανόμοιας τεχνολογίας, συσκευές και διατάξεις συσκευών που σχεδιάζονται από διαφορετικούς κατασκευαστές και που στοχεύουν σε διαφορετικό πελατειακό κοινό, στοιχεία που επιβάλλεται να συνεργαστούν μεταξύ τους σε μεγάλη κλίμακα. Η αρχιτεκτονική του δικτύου παρέχει την απαραίτητη βάση και θεωρητική υποδομή να διασυνδέσει όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής, μετάδοσης και διανομής ενέργειας, να διαχειριστεί όλα τα υποσυστήματα του δικτύου, να αναπτύξει τις εφαρμογές, να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ασφάλεια ορθής λειτουργίας για τις εγκαταστάσεις και το προσωπικό και να αναγνωρίσει τις ανάγκες των επενδυτών.

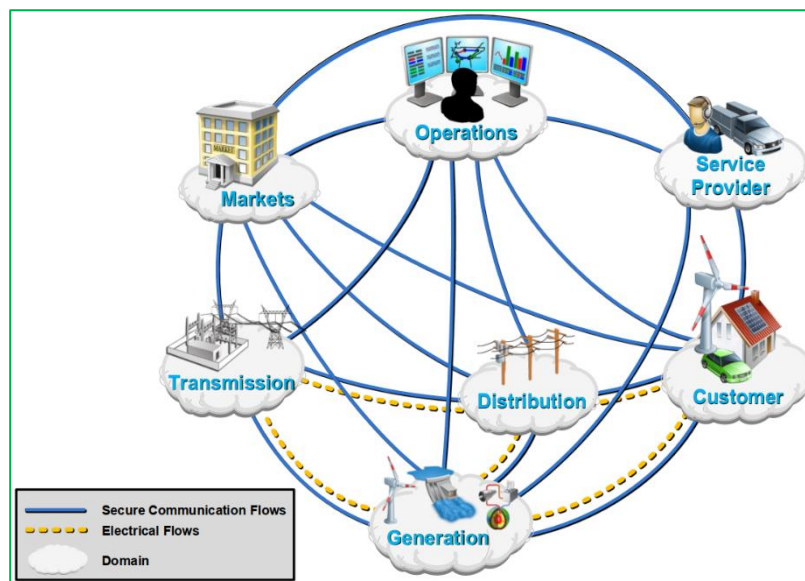
Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Κανονικοποίησης και Τεχνολογίας (NIST⁸⁸) λαμβάνοντας υπόψη τα πολυποίκιλα και διαρκώς εξελισσόμενα διασυνδεδεμένα δίκτυα ενέργειας, τον υφιστάμενο σχεδιασμό, τις απαιτήσεις μελλοντικής ανάπτυξης και την τεχνολογία που θα συστήσει ένα έξυπνο δίκτυο κατέληξε σε επτά τομείς (domains) [26] από τους οποίους υποχρεωτικά θα απαρτίζεται ένα έξυπνο δίκτυο.

Αυτοί είναι:

- Ο πελάτης
- Η αγορά
- Οι πάροχοι
- Η λειτουργία
- Η παραγωγή
- Η μετάδοση
- Η διανομή

⁸⁸ National Institute of Standards and Technology

Για να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα του έξυπνου δικτύου, οι ρόλοι αυτών τομέων πρέπει να συνεργαστούν μεταξύ τους. Δε γίνεται για παράδειγμα οι πάροχοι να στοχεύσουν επενδυτικά σε ένα υποψήφιο κοινό χωρίς να λάβουν υπόψη τις τάσεις της αγοράς ή να λειτουργήσει αποδοτικά αυτό το δίκτυο χωρίς οι διευθυντές της λειτουργίας των υποσυστημάτων να μην έχουν βαθιά γνώση της αρχιτεκτονικής της



Εικόνα 125. Τομείς έξυπνων δικτύων (NIST) [103]

παραγωγής, μετάδοσης και διανομής της ενέργειας. Η μετάβαση σε ένα τέτοιο δίκτυο απαιτεί επιπλέον σχεδίαση νέας νομοθεσίας ή τροποποίηση της υπάρχουσας τόσο σε τοπικό όσο και σε κρατικό επίπεδο για να οριστούν νομικά σύνορα και να ικανοποιηθούν οι επενδυτικές απαιτήσεις των μετόχων και οι ενεργειακές ανάγκες τόσο της βιομηχανίας όσο και των οικιακών καταναλωτών.

Δεν πρέπει να αμελούνται οι θεμελιώδεις στόχοι ενός έξυπνου δικτύου:

- **Επιλογές**→ Οι αρχιτεκτονικές που επιλέγονται και ακολουθούνται πρέπει να υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών (υφιστάμενων και νέων) και απαιτείται να είναι αρκετά ευέλικτες ώστε να ενσωματώσουν τόσο αυτές όσο και τις αναπτυσσόμενες στο δίκτυο με μία ομαλή διαδικασία χωρίς υπερβολική παραμετροποίηση και υψηλή οικονομική επιβάρυνση.
- **Διαλειτουργικότητα**→ Οι αρχιτεκτονικές πρέπει να υποστηρίζουν τυποποιημένες διεπαφές και χειροκίνητες διαδικασίες με διάφορα συστήματα (υφιστάμενα και μελλοντικά). Προφανώς αυτό συμπεριλαμβάνει την άψογη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών και τεχνολογιών διαφορετικών κατασκευαστών και την υποδομή διαχείρισης και κυβερνοασφάλειας.
- **Συντηρησιμότητα**→ Οι αρχιτεκτονικές πρέπει επιπλέον να υποστηρίζουν τη δυνατότητα οι επιμέρους υποδομές να συντηρούνται ικανοποιητικά και με ασφάλεια καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.
- **Αναβαθμισιμότητα**→ Απαιτείται επιπρόσθετα να υποστηρίζεται η δυνατότητα των συστημάτων να αναβαθμίζονται χωρίς δυσκολίες και το δίκτυο να παραμένει σε πλήρη λειτουργία κατά τη διάρκεια των αναβαθμίσεων.
- **Επεκτασιμότητα**→ Επιβάλλεται η ύπαρξη στοιχείων εντός της υποδομής που υποστηρίζουν την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας και απρόσκοπτης διαχείρισης αποδοτικών συστημάτων σε ευρύ χρονικό ορίζοντα (από 5 μέχρι 30 χρόνια).
- **Πεπαλαιωμένη υποδομή**→ Οι αρχιτεκτονικές πρέπει επίσης να λαμβάνουν υπόψη την υφιστάμενη υποδομή και αν είναι αποδοτική να την ενσωματώνουν ή έχουν τη δυνατότητα να τη μεταφέρουν με ασφάλεια και χαμηλό κόστος σ' ένα έξυπνο δίκτυο.

- Ασφάλεια→ Η ικανότητα της αντίστασης σε μη εξουσιοδοτημένες προσβάσεις, παρεμβάσεις και παραμετροποιήσεις (είτε αυτές είναι φυσικές είτε στον κυβερνοχώρο) πρέπει να είναι πρώτο μέλημα κατά τη σχεδίαση ενός αρχιτεκτονικού μοντέλου ευφυών δικτύων και να ενσωματώνεται σε κάθε υποσύστημα.

- Ευελιξία→ Η αρχιτεκτονική που θα επιλεγεί θα πρέπει να επιτρέπει τη σειρά και τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται οι διαδικασίες με μεθόδους που δε παρεκκλίνουν από την αρχική σχεδίαση και δε θα επιβαρύνουν ή θα καθιστούν ασταθές το σύστημα ή τα υποσυστήματά του.

- Διακυβέρνηση→ Απαιτείται να προωθείται ένα καλά οργανωμένο και διαχειρίσιμο σύστημα συστημάτων (system of systems) που θα λειτουργεί βασισμένο σε καλά ορισμένες πολιτικές μέσα σε νόμιμα πλαίσια και ένα εγκεκριμένο νομοθετικό πλαίσιο τόσο κατά τον κύκλο σχεδιασμού του όσο και κατά τον κύκλο ζωής του.

- Προσιτή τιμή→ Οι αρχιτεκτονικές που θα εφαρμοστούν, τέλος, πρέπει να λάβουν υπόψη τους τις δυνατότητες των κρατικών κεφαλαίων να διαχειριστούν και να συντηρήσουν ένα τόσο ευρύ δίκτυο σε όλη τη διάρκεια ζωής τους χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα ζωής των πολιτών και γι' αυτό πρέπει να επιτραπεί το άνοιγμα των αγορών σε μεγάλο αριθμό προμηθευτών και επενδυτών ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα του συστήματος αλλά και του κρατικού μηχανισμού.

6.6.1 Ο πελάτης

Η οντότητα του πελάτη κατηγοριοποιείται στον οικιακό, τον εμπορικό και το βιομηχανικό ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις [27]. Στα έξυπνα δίκτυα ο πελάτης παίζει ίσως το βασικότερο ρόλο γιατί αυτός είναι που μακροπρόθεσμα θα συντηρεί οικονομικά τη συνολική υποδομή και από αυτόν εξαρτάται η τιμολογιακή πολιτική, η εφαρμογή και τροποποίηση της νομοθεσίας για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του και η βελτίωση του δικτύου ανάλογα με τη χρήση του, το ενεργειακό του φορτίο και τις παρατηρήσεις του. Η αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος διανομής εξαρτάται από τον ενεργό ρόλο στο έξυπνο δίκτυο και από τη διαρκή και συστηματική παραμετροποίηση των καταναλώσεών του.

Ο αυτοματισμός των κτιρίων μιας βιομηχανίας ή σε οικιακό επίπεδο, ιδίως όταν μιλάμε για ιδιοπαραγωγή με συστοιχίες Φ/Β ή ανεμογεννήτριες, θα επιτρέπει την ομαλή και άμεση παρακολούθηση και έλεγχο της κατανάλωσης των πελατών ενώ θα απαιτείται κατάλληλη επικοινωνιακή υποδομή ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των χειριστών του δικτύου, των συστημάτων διανομής και της αγοράς.

6.6.2 Η αγορά

Κατά το άνοιγμα της ενεργειακής αγοράς πρέπει να έχουμε πάντα υπόψη μας τους θεμελιώδεις στόχους ενός έξυπνου δικτύου. Η επικοινωνιακή υποδομή πρέπει να συνδέει αρμονικά τους τομείς παραγωγής, μετάδοσης και διανομής ενέργειας με τους υπόλοιπους τομείς του έξυπνου δικτύου και κατάλληλες νομοθετικές πολιτικές πρέπει να ρυθμιστούν και να εφαρμοστούν για να διασυνδέσουν ομαλά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και τη συσσωμάτωση κατανεμημένων πηγών ενέργειας (DER⁸⁹ aggregation) στην αγορά των έξυπνων δικτύων.

⁸⁹ Distributed Energy Resource aggregations

6.6.3 Οι πάροχοι

Όσο ωριμάζουν τα εμπορικά μοντέλα των έξυπνων δικτύων θα αναδύονται και περισσότεροι πάροχοι υπηρεσιών ενέργειας. Αυτοί, δεδομένου των ανοιχτών αγορών, θα χρησιμοποιούν διαφορετικές υλοποιήσεις των προϊόντων τους, διαφορετικές συσκευές και διαφορετικό λογισμικό. Κατά συνέπεια απαιτείται να υπάρξουν κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας για τη συνύπαρξη όλων αυτών των στοιχείων και τη διαλειτουργικότητα και διασύνδεσή τους με τους χειριστές του συστήματος, τους πελάτες και την αγορά. Οι υπηρεσίες των παρόχων ποικίλουν από την κτιριακή και οικιακή διαχείριση των επιμέρους συστημάτων παραγωγής ενέργειας μέχρι τη διαχείριση προσωπικών λογαριασμών, την τιμολογιακή πολιτική που θα εφαρμοστεί, την εγκατάσταση των υπηρεσιών και την πρόβλεψη για εγκατάσταση νέων υβριδικών πηγών ενέργειας.

6.6.4 Η λειτουργία

Η λειτουργίες σε ένα έξυπνο δίκτυο απαιτούν διεπαφές επικοινωνίας με τους σταθμούς παραγωγής και μετάδοσης ενέργειας, με τον αυτοματισμό υποσταθμών και διανομής της ενέργειας, τους πελάτες, την αγορά και το σύστημα διαχείρισης διανομής (DMS⁹⁰). Η καταμέτρηση, η καταγραφή και οι λειτουργίες ελέγχου υπόκεινται στις βασικές λειτουργίες του έξυπνου δικτύου. Η ανταλλαγή πληροφοριών με τις αγορές σε πραγματικό χρόνο πρέπει να καθιερωθεί ώστε να εφαρμοστεί το εμπόριο ενέργειας και ο απαραίτητος προγραμματισμός του σε βάθος.

Οι χειριστές των συστημάτων του δικτύου πρέπει να αλληλεπιδρούν διαρκώς με τους παρόχους ενέργειας και τους καταναλωτές ώστε να διασφαλίσουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου για να υλοποιηθεί ένα ικανοποιητικό και χρηστικό από όλους τους μετέχοντες στο δίκτυο, σύστημα διαχείρισης ζήτησης ενέργειας.

6.6.5 Η παραγωγή

Η συνύπαρξη διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, είτε από συμβατικά καύσιμα είτε ΑΠΕ (λιγνίτης, υδροηλεκτρική, πυρηνική, ηλιακή, βιομάζα, γεωθερμική, αιολική κλπ) και η σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα είναι ο αυτοσκοπός των έξυπνων δικτύων. Ο διαχειριστής του δικτύου έχει ως κύριο ρόλο να συντονίσει τους σταθμούς παραγωγής κάθε μορφής ενέργειας και να διασφαλίσει την ευστάθεια του συστήματος.

Σύγχρονες τεχνολογίες επικοινωνίας επιτρέπουν την λειτουργία συστημάτων καταμέτρησης ευρείας κλίμακας (WAMS⁹¹) για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο των σταθμών παραγωγής, ενώ η απαραίτητη επικοινωνιακή υποδομή θα εξασφαλίζει τη διασύνδεση του διαχειριστή του δικτύου, της αγοράς και του συστήματος μετάδοσης της ενέργειας.

⁹⁰ Distribution Management System

⁹¹ Wide Area Measurement System

6.6.6 Η μετάδοση

Ένα ενεργειακά αποδοτικό δίκτυο διανομής θα μεταφέρει τον όγκο της ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα συστήματα διανομής της ενέργειας. Οι διεπαφές επικοινωνίας μεταξύ του δικτύου μετάδοσης και των σταθμών παραγωγής ενέργειας, του διαχειριστή του δικτύου και της αγοράς είναι και εδώ απαραίτητη. Το σύστημα μετάδοσης της ενέργειας πρέπει να παρακολουθείται διαρκώς σε πραγματικό χρόνο από έξυπνους μετρητές και να προστατεύεται από οποιαδήποτε ανεπιθύμητη παρεμβολή.

Η ενέργεια ροής και τάσης στις γραμμές μετάδοσης πρέπει να ελέγχονται προκειμένου να διασφαλίζεται η σταθερή και ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Ένα σημαντικό καθήκον του διαχειριστή του δικτύου είναι επιπλέον η διασφάλιση της ιδανικής χρήσης των γραμμών μεταφοράς ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες και τις αποκλίσεις της τάσης και μεγιστοποιώντας την απόδοση της μεταφοράς.

6.6.7 Η διανομή

Ο αυτοματισμός των υποσταθμών και του συστήματος διανομής παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ομαλή λειτουργία του δικτύου. Η αυξανόμενη ζήτηση καταναλωμένων πηγών ενέργειας θα είναι ένα σοβαρό ζήτημα στα μελλοντικά συστήματα διανομής. Όπως και στους προαναφερθέντες τομείς, έτσι και εδώ η ανταλλαγή πληροφοριών μέσω μιας σταθερής επικοινωνιακής υποδομής είναι απαραίτητη μεταξύ των υποσταθμών παραγωγής και ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης διανομής.

Ο διαχειριστής του συστήματος διανομής θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζεται το σύστημα εξ' αποστάσεως (απομακρυσμένος έλεγχος) και ένα σημαντικό καθήκον του είναι να διασφαλίζει τη σταθερότητα και την ποιότητα ισχύος στο σύστημα διανομής μέσω ελέγχου και συντονισμού των καταναλωμένων πηγών ενέργειας. Η επικοινωνία μεταξύ του διαχειριστή του συστήματος διανομής και των πελατών είναι ένα νέο χαρακτηριστικό των έξυπνων δικτύων διανομής ενέργειας.

6.7 Επίπεδα αρχιτεκτονικής

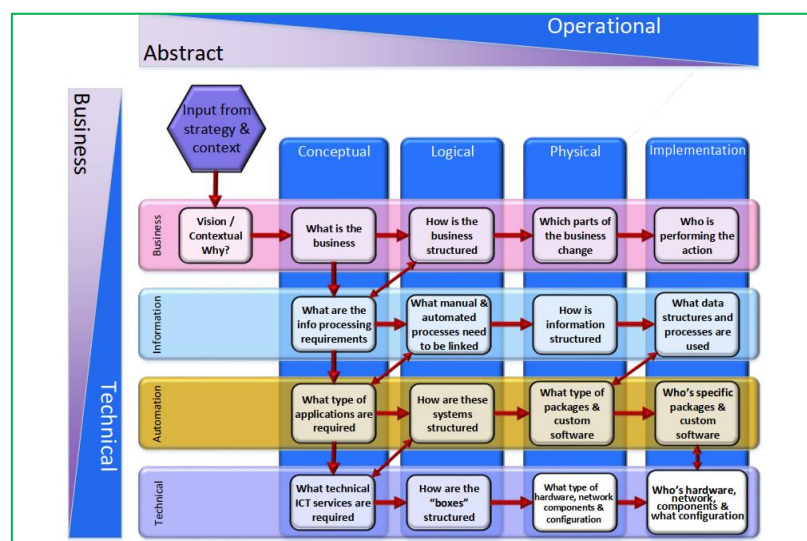
Η αρχιτεκτονική είναι μια επαναληπτική διαδικασία και καθορίζεται αποκλειστικά από το σχεδιαστή (αρχιτέκτονα) του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλά μοντέλα που συναντάμε να περιγράφουν μόνο την οπτική γωνία του δικτύου από τεχνικής πλευράς χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι εμπορικές ή οι καταναλωτικές ανάγκες. Γι' αυτό το λόγο ο SGIP⁹² θέτει τέσσερα διαφορετικά επίπεδα αρχιτεκτονικής ώστε να συμπεριλαμβάνεται όλα τα διαθέσιμα γνωστά στοιχεία που απαρτίζουν το δίκτυο:

- **Εννοιολογικό επίπεδο**→ Μοντελοποιεί την επιχείρηση όπως τη γνωρίζει ή όπως πρέπει να είναι από την πλευρά του μετόχου (ικανοποίηση αναγκών)
- **Λογικό επίπεδο**→ Μοντελοποιεί τις υπηρεσίες που χρησιμοποιεί η επιχείρηση σε λογικές αναπαραστάσεις (δομή αρχιτεκτονικής)

⁹² Smart Grid Interoperability Panel→ Αμερικανικός Οργανισμός που ορίζει τις απαιτήσεις διαλειτουργικότητας των έξυπνων δικτύων

- Φυσικό επίπεδο→ Μοντελοποιεί την ειδίκευση συστημάτων και τις απαραίτητες προδιαγραφές για τις εφαρμογές και το προσωπικό ώστε να λειτουργήσει το δίκτυο (απαραίτητες διαδικασίες και λογισμικό)
- Επίπεδο εφαρμογής→ Προσωπικό, λογισμικό και διακριτές διαδικασίες που θα επιτελέσουν το έργο

Συνδυάζοντας την πρακτική των επαναλήψεων και της αρχιτεκτονικής εστίασης, ένας αρχιτέκτονας ενεργειακών δικτύων μπορεί να αντιληφθεί την επίδραση της λήψης μιας απόφασης σε κάθε στοιχείο του δικτύου. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με τον ορισμό των απαιτήσεων των μετόχων του συστήματος και τους στόχους τους. Τα προαπαιτούμενα γι' αυτή τη διαδικασία δεν ορίζονται αποκλειστικά από τεχνολογικά στοιχεία αν και η τεχνολογία παίζει ένα ρόλο στις αποφάσεις των μετόχων.



Εικόνα 126. Επίπεδα αρχιτεκτονικής και επαναληψιμότητας έξυπνων ενεργειακών δικτύων [104]

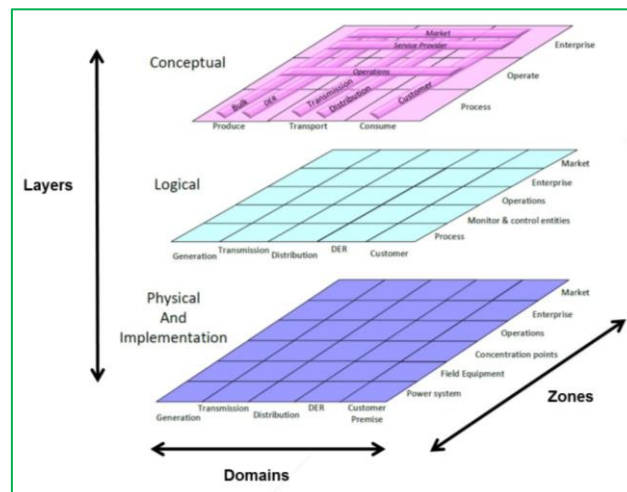
Μέσω αυτής της διαδικασίας αναγνωρίζονται οι οργανισμοί του δικτύου που επηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα και ποιες είναι αυτές οι αλλαγές που τους επηρεάζουν. Κάθε μπλοκ της αλυσίδας του αρχιτεκτονικού πλέγματος περιγράφει τους στόχους αυτού και του αμέσως επόμενου μπλοκ και προτείνει νέες αλληλεπιδράσεις και επαναλήψεις σε επόμενα επίπεδα βασισμένες στις αποφάσεις που λήφθηκαν στα προηγούμενα.

Οι τομείς ενός έξυπνου δικτύου αποτελούνται από υποσυστήματα εφαρμογών και οντοτήτων που έχουν ρόλους και συνδέονται μεταξύ τους με συσχετίσεις μέσω διεπαφών. Για να γίνουν αντιληπτές αυτές οι συσχετίσεις εντός του δικτύου κατά την αρχιτεκτονική του μοντελοποίηση απαιτείται να αποδοθούν οι εννοιολογικοί ορισμοί των οντοτήτων, των ρόλων και των εφαρμογών του μοντέλου. Ορίζουμε λοιπόν τα κάτωθι:

- Οντότητες→ Περιλαμβάνουν διατάξεις, συσκευές, συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης, μέλη ή ομάδες μελών (μέτοχοι) που έχουν ένα ή περισσότερα καθήκοντα και διαθέτουν την ικανότητα να λαμβάνουν αποφάσεις και να διαχειρίζονται πληροφορίες για την υλοποίηση των εφαρμογών

- Ρόλοι→ Είναι η λειτουργία, η ικανότητα ή η υπηρεσία που επιτελεί μια οντότητα και η οποία δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε ένα ρόλο αλλά μπορεί να είναι πολλαπλής φύσεως
- Εφαρμογές→ Αποτελούν την αυτοματοποιημένη διαδικασία που εκτελείται από τις οντότητες

Κάθε επίπεδο της αρχιτεκτονικής (αντίληψης, λογικό, φυσικό και εφαρμογής) μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα σύνολο πλάνων όπου το πρωτότυπο μοντέλο των τομέων του έξυπνου δικτύου διαιρείται σε τομείς και ζώνες. Οι ζώνες «απεικονίζουν» τις φυσικές και διαχειριστικές όψεις του δικτύου και περιγράφουν τη διαδικασία της ιεραρχίας από την πλευρά του καθολικού συστήματος ισχύος μέσω των οντοτήτων του δικτύου που συμμετέχουν στην παραγωγή, μετάδοση, διανομή και κατανάλωση ενέργειας. Οι λεπτομέρειες των τομέων και των ζωνών για το κάθε επιμέρους επίπεδο καθορίζονται από το βάθος της αρχιτεκτονικής που εφαρμόζεται.



Εικόνα 127. Συσχέτιση επιπέδων αρχιτεκτονικής, domains και ζωνών έξυπνων αρχιτεκτονικών δικτύων [105]

6.7.1 Το επίπεδο αντίληψης (εννοιολογικό)

Το εννοιολογικό επίπεδο (conceptual layer) συμβαδίζει με το μοντέλο των επτά τομέων του έξυπνου δικτύου. Σε αυτό το επίπεδο τυχαιότητα δίνεται έμφαση σε θέματα όπως οι οντότητες του οργανισμού, οι ρόλοι και οι υπηρεσίες που παρέχονται. Ενώ τα δομικά στοιχεία μέσα στο επίπεδο μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω με βάση τις συμβατικές μονάδες της βιομηχανίας, δεν προϋποτίθεται ότι οι τομείς και οι ζώνες που βρίσκονται σε εγγύτητα συσχετίζονται. Οι διαδικασίες των τομέων σε ένα έξυπνο δίκτυο στο εννοιολογικό επίπεδο κατηγοριοποιούνται όπως παρακάτω:

- Στην παραγωγή, που αναλύεται σε όγκο παραγωγής και καταναλωμένων πηγών ενέργειας
- Στη μεταφορά, που αναλύεται σε τομείς μεταφοράς και διανομείς σχετικούς με την αντίληψη
- Στην κατανάλωση, που μεταφράζεται στον πελατειακό τομέα

Το εννοιολογικό επίπεδο κατηγοριοποιείται επίσης και βάση μιας ιεραρχίας ζωνών, όπου κάθε ζώνη περιγράφει μια αυξημένη ειδίκευση ενός σκοπού. Αυτές οι ζώνες είναι:

- Ο σκοπός που είναι μια αφηρημένη έννοια του φυσικού δικτύου και περιλαμβάνει τη το φυσικοχημικό και το χωρικό μετασχηματισμό της ενέργειας, ώστε να αναπαρασταθεί ικανοποιητικά ο φυσικός τομέας της συνολικής υποδομής ισχύος
- Η λειτουργία που αντιστοιχεί στον τομέα της λειτουργίας
- Η επιχείρηση που αντιστοιχεί στους τομείς της αγοράς και των παρόχων υπηρεσιών και περιλαμβάνει τις εμπορικές και οργανωτικές υπηρεσίες και ρόλους που απαιτούνται για τη διαχείριση κάθε υπηρεσίας υποστήριξης στο ενεργειακό περιβάλλον του δικτύου

6.7.2 Το λογικό επίπεδο

Το λογικό επίπεδο προσθέτει τις λεπτομέρειες που καθορίζουν τις απαραίτητες λογικές υπηρεσίες και τους δρώντες που υποστηρίζουν την τυχαιότητα του επιπέδου αντίληψης και περιλαμβάνει τις εκτιμήσεις για τις εμπορικές διαδικασίες, την οργανωτική δομή, τους φυσικούς περιορισμούς, την παρακολούθηση και τον έλεγχο. Σ' αυτό το επίπεδο οι ρόλοι και οι υπηρεσίες μετασχηματίζονται σε δρώντες. Το λογικό επίπεδο δεν προϋποθέτει την άμεση συσχέτιση με τους τομείς ή τις ζώνες που βρίσκονται σε εγγύτητα. Οι βασικές διαδικασίες κατηγοριοποιούνται όπως παρακάτω:

- Στην παραγωγή
- Στη μετάδοση
- Στη διανομή
- Στις κατανεμημένες πηγές ενέργειας
- Στον πελάτη

Οι ζώνες λογικής διαχείρισης αναπαριστούν τις λογικές αναπαραστάσεις των απαραίτητων υπηρεσιών, των ρόλων και των δρώντων για να υποστηρίξουν το επίπεδο από την οπτική γωνία των μετόχων και κατηγοριοποιούνται όπως παρακάτω:

- Στη διαδικασία, που περιλαμβάνει το μετασχηματισμό της ενέργειας
- Στις οντότητες παρακολούθησης και ελέγχου της ηλεκτρικής διαδικασίας
- Στις λειτουργίες, που είναι λογικές αναπαραστάσεις των απαραίτητων διαδικασιών και υπηρεσιών αντίληψης για το συντονισμό της ροής ενέργειας απ' την παραγωγή στην κατανάλωση
- Στην επιχείρηση, που παρέχει εννοιολογικές υπηρεσίες υποστήριξης
- Στην αγορά ,όπου διακινούνται προϊόντα και υπηρεσίες σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια για την υποστήριξη οικονομικών και απαραίτητων λειτουργιών του δικτύου

6.7.3 Το φυσικό επίπεδο

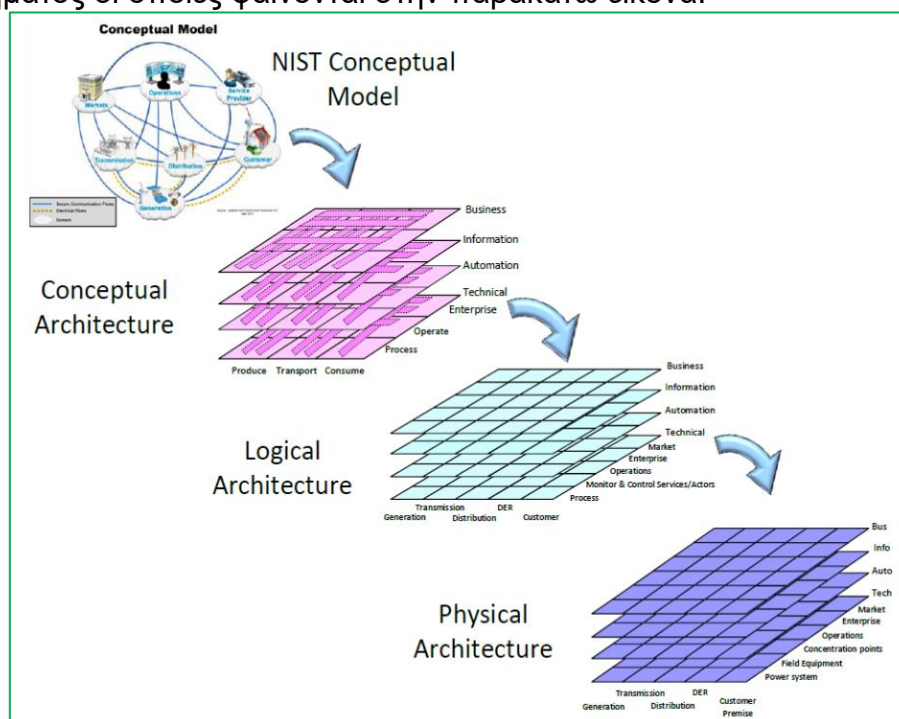
Το φυσικό πεδίο ολοκληρώνει τη μετάβαση από τις υπηρεσίες στους δρώντες. Περιγράφει συγκεκριμένες λειτουργίες ανθρώπινων και αυτοματοποιημένων χαρακτηριστικών που είναι απαραίτητες να εκτελεστούν για να πληρούνται οι προϋποθέσεις που κληρονομούνται από το λογικό επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο παρέχει επίσης ικανοποιητικές λεπτομέρειες για την επιλογή κατάλληλων προϊόντων

από τους παρόχους με την απαιτούμενη παραμετροποίηση ανάλογα με τις ανάγκες και οργανώνει τις πηγές μιας επιχείρησης.

Στο επίπεδο αυτό επαναλαμβάνονται οι περισσότερες διαδικασίες του λογικού επιπέδου, αναλύεται στην επιτήρηση και έλεγχο των δρώντων οντοτήτων και διακρίνονται οι τοπικές ζώνες της λειτουργίας, του υλικού του συστήματος και των υποσταθμών.

6.7.4 Το επίπεδο εφαρμογής

Στο επίπεδο εφαρμογής περιγράφονται οι εφαρμογές και το υλικό που συστήνουν το δίκτυο, η τοπολογία που ακολουθείται και το προσωπικό που αναλαμβάνει τα καθήκοντα διεκπεραίωσης των λειτουργιών. Ουσιαστικά είναι η φυσική εφαρμογή των θεμελιωδών στόχων της αρχιτεκτονικής που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6.6. Επειδή το επίπεδο εφαρμογής είναι μοναδικό για κάθε επιχείρηση, το μοντέλο που αναπτύσσεται δεν εμβαθύνει σε λεπτομέρειες οι οποίες περιγράφονται ξεχωριστά για κάθε επιχείρηση. Σ' αυτό το σημείο αναλύονται φάσεις του κύκλου ζωής του συστήματος οι οποίες φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 128. Μοντέλο αντίληψης NIST [106]

6.8 Υβριδικό σύστημα διαχείρισης ΑΠΕ έξυπνου σπιτιού για ευφυή δίκτυα

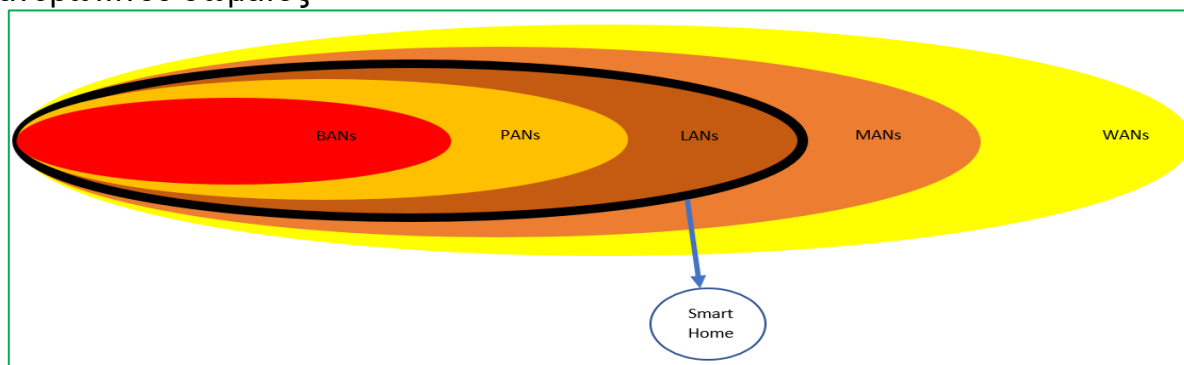
Ένα μεγάλο ρόλο στην εφαρμογή και υλοποίηση των έξυπνων δικτύων έχουν τα έξυπνα σπίτια καθώς, αθροιστικά συνεισφέρουν σε ένα αξιόλογο ποσό παραγόμενης και διακινούμενης ενέργειας εντός του δικτύου. Ο ρόλος τους όμως δεν περιορίζεται εκεί αφού, χρησιμοποιώντας συσκευές και διατάξεις «έξυπνης» τεχνολογίας ελέγχουν και διαμορφώνουν το περιβαλλοντικό σύστημα της κατοικίας με τρόπο αποδοτικό και οικονομικό, διαχειρίζονται ανεξάρτητα τις οικιακές συσκευές θέτοντάς τις στα προεπιλεγμένα επιθυμητά επίπεδα, υποστηρίζουν την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών της κατοικίας και του ενεργειακού δικτύου του παρόχου

διαμορφώνοντας ανάλογα τις καταναλώσεις τους και διαθέτουν το πλεόνασμα παραγωγής ενέργειας που παράγουν μέσω Φ/Β συστοιχιών, ανεμογεννητριών, γεωθερμίας ή άλλης μορφής ΑΠΕ στο δίκτυο.

Η τεχνολογική ανάπτυξη των έξυπνων μετρητών, των αισθητήρων και του διαδικτύου (DSL⁹³, MAN⁹⁴, WAN⁹⁵, οπτικές ίνες, δορυφορική επικοινωνία) έχει καταστήσει τα έξυπνα σπίτια μια αναδυόμενη αγορά με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας και την απλοποίηση της ζωής των ανθρώπων, την περιβαλλοντική άνεση, την ασφάλεια και την μεταξύ τους επικοινωνία. Πλέον μιλώντας για έξυπνες οικιακές συσκευές συμπεριλαμβάνουμε ότι συμβατικό γνωρίζαμε μέχρι σήμερα και ποικίλουν από την ψύξη και τη θέρμανση, την παραγωγή ήχου και εικόνας, τις ηλεκτρικές εστίες, την τηλεφωνία μέχρι τον φωτισμό και τη ρομποτική. Άλλα χαρακτηριστικά του έξυπνου σπιτιού είναι αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των καταναλωτών και του δικτύου, η διαχείριση και ανταλλαγή πληροφοριών που αφορούν την κατανάλωση, την τιμολόγηση, την εξοικονόμηση και την ορθολογιστική χρήση της ενέργειας, την εκπόνηση ενός καταναλωτικού πλάνου (βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο), η περιβαλλοντική ασφάλεια, η ασύρματη και αυτόματη πληρωμή λογαριασμών (με συμψηφισμό), η πραγματική μέτρηση της κατανάλωσης και παραγωγής της ενέργειας και η παρακολούθηση της κατανάλωσης ύδατος ή του υγραερίου με έξυπνους μετρητές που προαναφέραμε, η εργασία από το σπίτι και άλλα.

Στον επικοινωνιακό τομέα, το έξυπνο σπίτι βρίσκεται εντός μιας αλυσίδας δικτύων τα οποία συντηρεί αλλά και από τα οποία εξυπηρετείται προκειμένου να επικοινωνήσει και συνεισφέρει στο δίκτυο. Αυτά είναι τα παρακάτω:

- WAN που αποτελούνται από δορυφόρους και επίγειες κεραίες σε πύργους και εξυπηρετούν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές
- MAN που εξυπηρετούν συνήθως περιοχές πόλεων
- LAN⁹⁶ που αφορά το τοπικό οικιακό δίκτυο
- PAN⁹⁷ που εξυπηρετεί τις ανάγκες ενός χρήστη
- BAN⁹⁸ που θεωρείται η συνέχεια του PAN αλλά σε μικρότερη κλίμακα και βασίζεται στην αρχή έξυπνων αντικειμένων που βρίσκονται πάνω ή εντός του ανθρώπινου σώματος



Εικόνα 129. Αλυσίδα δικτύων έξυπνης κατοικίας

⁹³ Digital Subscriber Line

⁹⁴ Metropolitan Area Networks

⁹⁵ Wide Area Networks

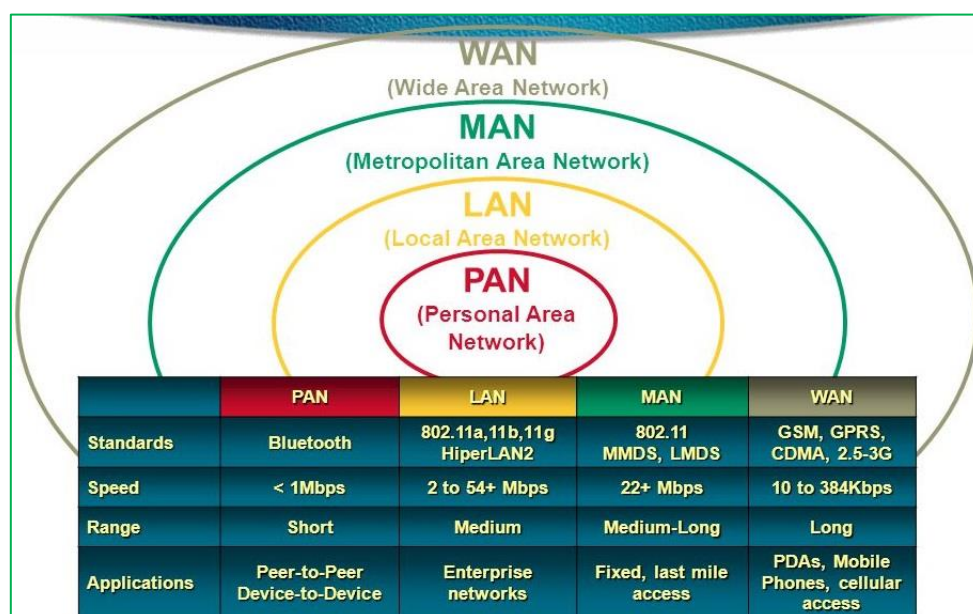
⁹⁶ Local Area Network

⁹⁷ Personal Area Network

⁹⁸ Body Area Network

Η επικοινωνία μεταξύ τους αλλά και εντός των δικτύων γίνεται με τα ίδια ή διαφορετικά πρωτόκολλα, ασύρματα ή ενσύρματα και συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνολογίες όπως:

- Bluetooth
- RFID
- Μικροκυματικές σπانيότερα
- Υπέρυθρες
- Δορυφορικές επικοινωνίες
- GSM
- GPRS
- 3G,4G (5G οσονούπω)
- VDSL
- Wi-Fi
- Ethernet και άλλες



Εικόνα 130. Επίπεδα δικτύων και πρωτόκολλα [107]

Με τη χρήση λοιπόν έξυπνων διατάξεων (smart sockets), των παραπάνω ασύρματων και ενσύρματων πρωτοκόλλων και «φιλικών» στο δίκτυο ηλεκτρικών συσκευών (GFAs⁹⁹), που συνδέονται σε ένα έξυπνο οικιακό διαδραστικό τερματικό υλοποιείται η διασύνδεση της κατοικίας στο έξυπνο ενεργειακό δίκτυο. Τα smart sockets είναι υπεύθυνα για τη συλλογή πραγματικών και πραγματικού χρόνου πληροφοριών με ακρίβεια που αφορούν την κατανάλωση, για την επικοινωνία με το δίκτυο και τη διαχείριση της λειτουργίας των συσκευών ανάλογα με το καταναλωτικό πλάνο που συνήθως αποτελεί αποτέλεσμα διατάξεων πρακτόρων υπολογιστικής νοημοσύνης.

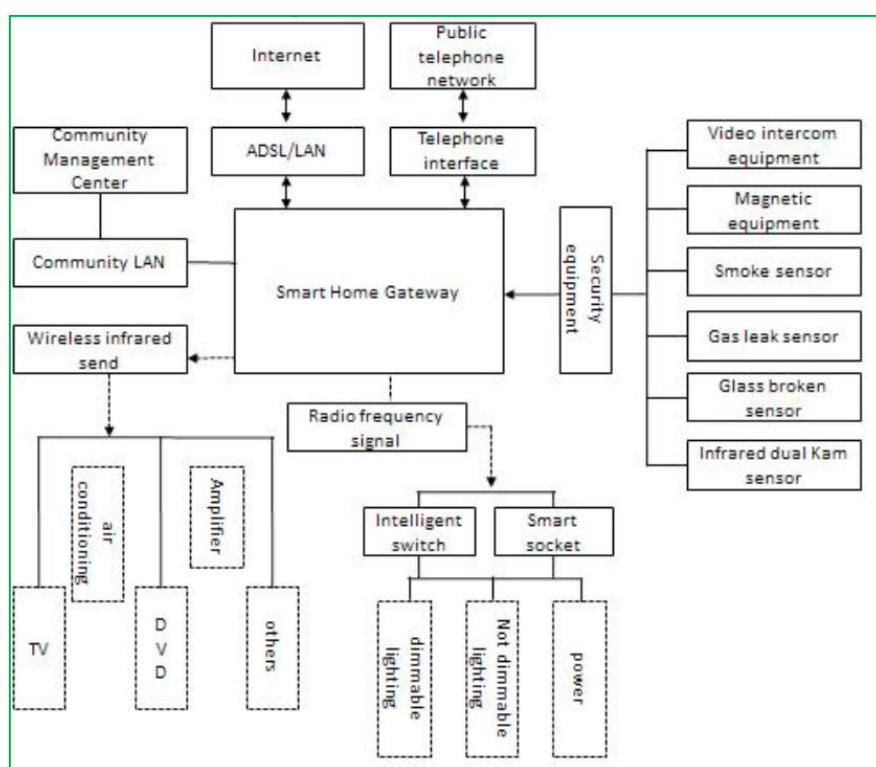
Το δίκτυο επικοινωνίας διακρίνεται στο εξωτερικό (extranet – επικοινωνία με το δίκτυο) και στο εσωτερικό εντός της κατοικίας χωροταξικά και γεωγραφικά (intranet)

⁹⁹ Grid Friendly Appliances

[28]. Το εσωτερικό δίκτυο του έξυπνου σπιτιού διακρίνεται με τη σειρά του σε τρεις υποκατηγορίες δικτύων ανάλογα με τις λειτουργίες τους και το σκοπό τους:

- Το δίκτυο ελέγχου για τον έλεγχο των λειτουργιών
- Το δίκτυο πληροφοριών για την ανταλλαγή πληροφοριών
- Το δίκτυο πολυμέσων για τη μετάδοση εικόνας και ήχου

Στο intranet του έξυπνου σπιτιού μία υπολογιστική διάταξη παίζει το ρόλο του κύριου διαχειριστή που είναι υπεύθυνος για το συντονισμό και την επικοινωνία των συσκευών και αισθητήρων και αποτελεί τον επικοινωνιακό κόμβο μεταξύ σπιτιού και ενεργειακού δικτύου. Αυτή η συσκευή καλείται Smart Home Gateway και το μοντέλο ενός έξυπνου σπιτιού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 131. Smart Home gateway block diagram [108]

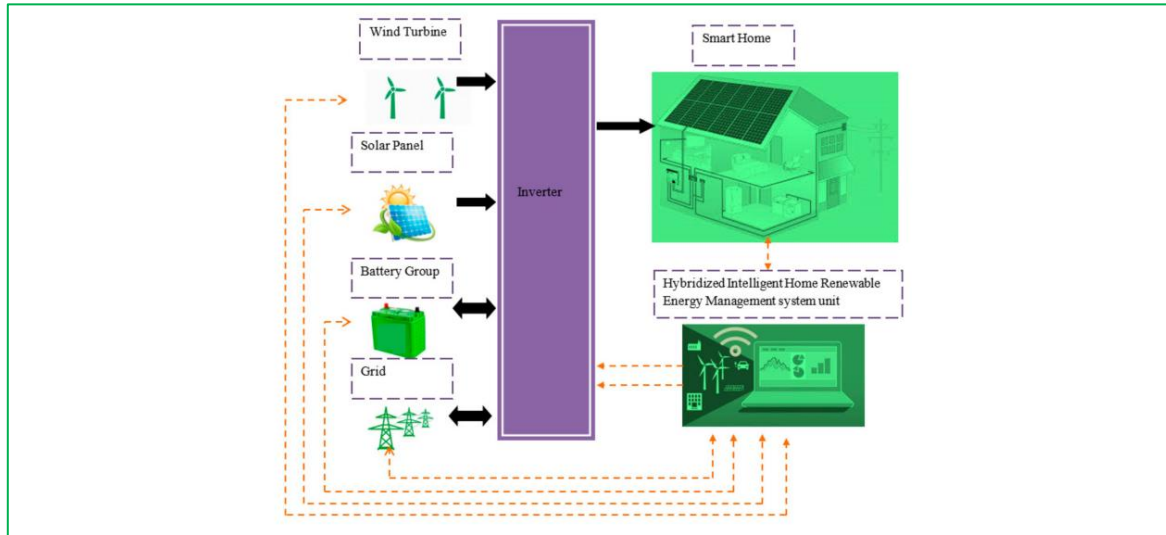
Η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ μετόχων και δικτύου επιτυγχάνεται με υποδομή συσκευών έξυπνης μέτρησης (AMI¹⁰⁰). Με αυτές τις διατάξεις παρέχεται κίνητρο στους καταναλωτές να διαχειριστούν τις απαιτήσεις του καταναλωτικού τους φόρτου ή πλεονάσματος που παράγεται από τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας της κατοικίας και του κεφαλαίου που θα δαπανήσουν για την ενέργεια που θα καταναλώσουν.

Οι έξυπνοι μετρητές αποτελούν μέρος ενός συστήματος που καλείται υβριδικό σύστημα διαχείρισης ανανεώσιμης ενέργειας έξυπνης κατοικίας (HIHREM¹⁰¹) [29]. Το κέντρο HIHREM διαθέτει έναν ελεγκτή ιεραρχικού ελέγχου που παρέχει στους ιδιοκτήτες έξυπνων σπιτιών τα απαραίτητα εργαλεία ελέγχου και τις λειτουργίες

¹⁰⁰ Advanced Metering Infrastructure

¹⁰¹ Hybrid Intelligent Home Renewable Energy Management System

παρακολουθήσης βασισμένες στο οικιακό σύστημα επικοινωνίας με το δίκτυο. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν έναν ιδανικό προγραμματισμό του εσωτερικού δικτύου της κατοικίας που συνάγεται από ένα συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα καταναλώσεων. Ο έξυπνος μετρητής λαμβάνει τις αποκρίσεις για την απαίτηση υπηρεσιών ενέργειας ως είσοδο στο HIREM και αυτές αφορούν τον αυτοματισμό οικιακών υπηρεσιών της έξυπνης κατοικίας. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου HIREM φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 132. Αρχιτεκτονική διαχείρισης υβριδικής ενέργειας έξυπνης κατοικίας [109]

Ανάλογα με τον προγραμματισμό του HIREM, τα κελιά του συστήματος αποθήκευσης έχουν την ικανότητα να απορροφούν ή να διανέμουν ηλεκτρική ενέργεια σύμφωνα με πρότυπα όρια, ακολουθώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Περιορισμός ενέργειας εξόδου: } |P_t^E| \leq P_{max}^E \quad (6.1)$$

$$\text{Εξίσωση φορτίου: } S(i+1) = S(i) - d_T P_t^E \quad (6.2)$$

$$\text{Εξίσωση εκφόρτισης: } S(i+1) = S(i) - (d_T P_t^E)/n^E \quad (6.3)$$

$$\text{Έναρξη/Λήξη ορίων: } S(0) = S_S, S(T) = S_E \quad (6.4)$$

$$\text{Εξίσωση αποθήκευσης ισχύος: } S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (6.5)$$

Με:

- P_t^E : η ισχύς εξόδου σε χρόνο t
- P_{max}^E : το μέγιστο όριο φορτίου
- n^E : η απόδοση με την οποία απομακρύνουμε την περιττή ενέργεια
- d_T : η διάρκεια κάθε κύκλου
- $S(i)$: η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα
- S_S, S_E : η αρχική και η τελική ενέργεια
- S_{max}, S_{min} : η μέγιστη και η ελάχιστη επιτρεπτή ενέργεια στο σύστημα αποθήκευσης

Το ελάχιστο κόστος κατανάλωσης ανάλογα με τη χρόνο χρήσης (ToU¹⁰²) δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Συνολικό κόστος}_{min} = \sum_{t=1}^T \text{TOU_κόστος}_t * P_{grid,t} \quad (6.6)$$

Και ο περιορισμός στην ισορροπία ενέργειας από τη σχέση:

$$\sum_{i=1}^I P_{i,t} = P_t^D, \forall t = 1, \dots, T \quad (6.7)$$

Με

- P_t^D : η συνολική ενεργειακή ζήτηση
- $P_{i,t}$: η απαιτούμενη ενεργειακή ζήτηση τη στιγμή t

Στην περίπτωση κατοικίας με Φ/Β συστοιχίες το συνολικό κόστος ενέργειας δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας} = \sum_{h=1}^{24} \{E_p(h) * P_G(h) + K(h)\} \quad (6.8)$$

Με

- E_p : η τιμή της ενέργειας για h ώρες
- K : κόστος εγκατάστασης και συντήρησης Φ/Β συστήματος
- P_G : η ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο για h ώρες

Η συνολική οικιακή κατανάλωση δίνεται από τη σχέση:

$$P_{Grid}(h) = P_{et}(h) - P_{PV\ panel}(h) \pm P_{Battery}(h) \quad (6.9)$$

Με

- P_{Grid} : η ισχύς του δικτύου
- P_{et} : η ισχύς εξόδου των ηλεκτρικών συσκευών
- $P_{Battery}$: η κατάσταση της μπαταρίας του Φ/Β συστήματος (αρνητικό πρόσημο για εκφόρτιση και θετικό πρόσημο για φόρτιση)

Η βελτιστοποίηση του HIREM απαιτεί κάποιους επιπλέον περιορισμούς:

- Τα διανυσματικά στοιχεία του συστήματος είναι δυαδικά

$$x_{Wa}^t, x_{PVa}^t, x_{Ga}^t \in (0,1)$$
- Όταν η ενεργειακή απαίτηση είναι μεγαλύτερη του μηδενός, μόνο μία πηγή μπορεί να το εξυπηρετήσει

$$x_{Wa}^t, x_{PVa}^t, x_{Ga}^t \leq 1 \quad (6.10)$$

- Η αιολική ενέργεια που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει το οικιακό φορτίο δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που παράγεται για κάθε στιγμή

$$0 \leq \sum_{a \in A} \gamma_a * x_{Wa}^t \leq E_W^t \quad (6.11)$$

¹⁰² Time of Use

- Κατ' ανάλογο τρόπο, η ηλιακή ενέργεια που καταναλώνεται δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που παράγεται, για κάθε στιγμή

$$0 \leq \sum_{a \in A} \gamma_a * \chi_{PVa}^t \leq E_{PV}^t \quad (6.12)$$

- Η ενέργεια που θα παράγεται από το δίκτυο θα χρησιμοποιείται μόνο για το περίσσιο φορτίο που δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από το εγκατεστημένο υβριδικό σύστημα

$$0 \leq \sum_{a \in A} \gamma_a * \chi_{Ga}^t \quad (6.13)$$

- Ο καταναλωτής θα έχει τον τελικό λόγο για το συνολικό χρόνο λειτουργίας «Λ» των ηλεκτρικών συσκευών της κατοικίας, ανεξαρτήτως από τον σχεδιασμένο προγραμματισμό που έγινε από έξυπνες διατάξεις

$$\sum_{t=a_a}^{\beta_a} (x_{Wa} + x_{PVa} + x_{Ga}) = 1, \forall a \in \mathbb{R} \quad (6.14)$$

6.9 Πρόβλεψη διαχείρισης ηλιακής ενέργειας σε έξυπνα δίκτυα και μοντέλα πρόβλεψης

Η διείσδυση της ενέργειας που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες τα τελευταία χρόνια γίνεται πιο εμφανής, εξαιτίας ιδίως της ευελιξίας της αρχιτεκτονικής ενός έξυπνου δικτύου [30]. Οι προκλήσεις που προκύπτουν από την ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο απαιτούν τη σύσταση ενός συστήματος πρόβλεψης των συνεπειών στο δίκτυο για την αποφυγή του περιττού κόστους διατήρησης σταθερότητας και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος που διακινείται. Δεδομένου ότι η πηγή που αξιοποιούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η ηλιακή επιβάλλεται επίσης η μελλοντική πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας που θα απορροφηθεί σε βάθος χρόνου ώστε να βελτιστοποιηθούν οι λειτουργίες του δικτύου, ο προγραμματισμός διαχείρισης ισχύος και οι υποχρεώσεις των συστημάτων παραγωγής, μετάδοσης και διανομής.

Παρόλο που αυτό ενδεχομένως να φαίνεται απλό, λαμβάνοντας υπόψη και κάνοντας χρήση τα δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών προηγούμενων ετών, η χαοτική φύση των καιρικών συστημάτων σε διαφορετική γεωγραφική περιοχή και διαφορετική χρονική στιγμή του έτους, η διαδοχική αλληλεπίδραση ενός συστήματος πάνω σε ένα άλλο και οι αστάθμητοι ατμοσφαιρικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η νέφωση, η σκόνη, η υγρασία και οι υψηλές απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ, καθιστούν την πρόβλεψη της απορροφούμενης ακτινοβολίας εξαιρετικά περίπλοκη.

Πέρα από αυτές τις δυσκολίες, αρκετά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για μεγάλους σταθμούς Φ/Β και κατηγοριοποιούνται στις τέσσερις παρακάτω προσεγγίσεις:

- Στατιστική προσέγγιση που βασίζεται στη χρήση ιστορικών δεδομένων
- Προσέγγιση τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την κατασκευή προβλέψεων
- Φυσική προσέγγιση που εκμεταλλεύεται δορυφορικές εικόνες για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας και την παραγωγή ενέργειας από Φ/Β

- Υβριδική προσέγγιση που είναι συνδυασμός των παραπάνω
Πρακτικά χρησιμοποιείται διαφορετική προσέγγιση ανάλογα με το βάθος ορίζοντα πρόβλεψης για να εξυπηρετήσει τη διαδικασία αποφάσεων και τις απαιτήσεις δημιουργίας μοντέλων πρόβλεψης.

Η παραγόμενη ισχύς από Φ/Β συστοιχίες επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η ακτινοβολία, η ανακλαστικότητα, η εκτίμηση της θερμοκρασίας των Φ/Β κελιών και η απόδοση του μετατροπέα του συστήματος (inverter). Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P_R = n * S * I * [1 - 0,05(t_o - 25)] \quad (6.15)$$

Με

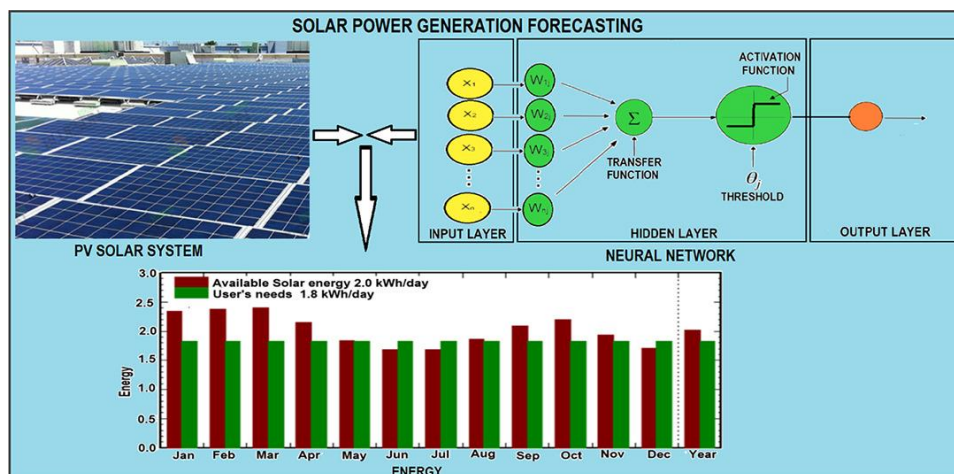
n: η απόδοση μετατροπής

S: το εμβαδό της Φ/Β συστοιχίας σε m²

I: η ηλιακή ακτινοβολία σε KW/m²

t_o: η εξωτερική θερμοκρασία σε °C

Έχοντας αυτά τα στοιχεία από μεγάλο αριθμό μετρήσεων για κάθε είδος φωτοβολταϊκού παίρνουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη της εικόνας 53.



Εικόνα 133. Μοντέλο πρόβλεψης παραγωγής ενέργειας από Φ/Β στοιχεία [110]

Η επιλογή των μεταβλητών εισόδου και του ορίζοντα πρόβλεψης επηρεάζει την ακρίβεια του μοντέλου που θα παραχθεί. Γενικά χρησιμοποιούνται μεταβλητές ιστορικών στοιχείων παραγωγής ενέργειας από Φ/Β, συνολική ηλιακή ακτινοβολία (GHI), θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου, νέφωση και αριθμητική πρόβλεψη του καιρού (NWP¹⁰³). Ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα που μας ενδιαφέρει και τις ανάγκες που θέλουμε να εξυπηρετηθούν οι διαδικασίες λήψεως αποφάσεως διακρίνονται σε:

- Πολύ βραχυπρόθεσμες (δευτερόλεπτα ως μερικά λεπτά) για εφαρμογές λειτουργίας και αποθήκευσης ενέργειας σε Φ/Β

¹⁰³ Numerical Weather Predictions, που χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα της ατμόσφαιρας και των ωκεανών για την πρόβλεψη του καιρού ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες

- Βραχυπρόθεσμες (μέχρι 48 – 72 ώρες) που είναι κρίσιμες τη διαδικασία λήψεως αποφάσεως στην ενεργειακή αγορά και στην καθολική λειτουργία του έξυπνου δικτύου

- Μέσης χρονικής διάρκειας (μέχρι 7 ημέρες) που είναι απαραίτητες για τον προγραμματισμό συντήρησης Φ/Β σταθμών, μετασχηματιστών και γραμμών μετάδοσης ενέργειας

- Μακροπρόθεσμες (μέχρι μήνες ή χρόνια) που απαιτούνται για τη μακροπρόθεσμη εκτίμηση παραγωγής ενέργειας και το σχεδιασμό Φ/Β σταθμών

6.9.1 Στατιστικά Μοντέλα

Για την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων χρησιμοποιείται η μέθοδος της επιμονής κατά την οποία θεωρούμε ότι η μελλοντική ηλιακή ισχύς και ακτινοβολία τη χρονική στιγμή X_{t+1} θα προκύπτει από την τελευταία μέτρηση ως εξής:

$$X_{t+1} = X_t \quad (6.16)$$

Παρά την εξαιρετική απλότητα αυτής της μεθόδου, για βραχυπρόθεσμη χρονική διάρκεια μερικών ωρών θεωρείται η πιο δημοφιλής και δύσκολα μπορεί να ξεπεραστεί από άλλες μεθόδους. Η γενική μέθοδος της επιμονής ορίζεται από τη μέση τιμή της χρονικής διάρκειας T , ως εξής:

$$X_{t+k} = \frac{1}{T} * \sum_{i=1}^{T-1} X_{t-i} \quad (6.17)$$

Όσο αυξάνεται ο χρονικός ορίζοντας όμως η ακρίβεια του μοντέλου μειώνεται χαρακτηριστικά, γι' αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι η ARMA¹⁰⁴, η ARIMA¹⁰⁵ και η ARMAX¹⁰⁶.

Η προσέγγιση ARMA βασίζεται στις μεθόδους κινητής μέσης τιμής και αυτόματης οπισθοδρομικής τιμής και εκφράζεται από τη σχέση:

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i * X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i * \varepsilon_{t-1} \quad (6.18)$$

Με

- X_t : η προβλεπόμενη ηλιακή ισχύς ή ενέργεια το χρόνο t
- p : η τάξη του μοντέλου AR (autoregressive)
- φ_i : ο i -οστός συντελεστής AR
- θ_i : η τάξη σφάλματος του όρου MA (moving average)
- ε : ο λευκός θόρυβος

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται συνήθως στην αυτοσυσχέτιση δεδομένων χρονοσειρών και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο για την εύρεση τιμών και την ικανότητα προβλέψεων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Η δημοτικότητά του οφείλεται στην ικανότητά του να αντιληφθεί καλύτερα τον περιοδικό κύκλο των καιρικών φαινομένων και συστημάτων.

¹⁰⁴ Auto Regressive Moving Average

¹⁰⁵ Auto Regressive Integrated Moving Average

¹⁰⁶ Auto Regressive Moving Average with exogenous inputs

Η προσέγγιση ARIMA χρησιμοποιείται για χρονικά ασταθείς και τυχαίες διαδικασίες και ορίζεται από τη σχέση:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i * L^i)(1 - L)^d * X_t = (1 + \sum_{i=1}^q \theta_i * L^i) * \varepsilon_t \quad (6.19)$$

Με L : η σταθερά καθυστέρησης ορισμένη από : $L * X_t = X_{t-1}$

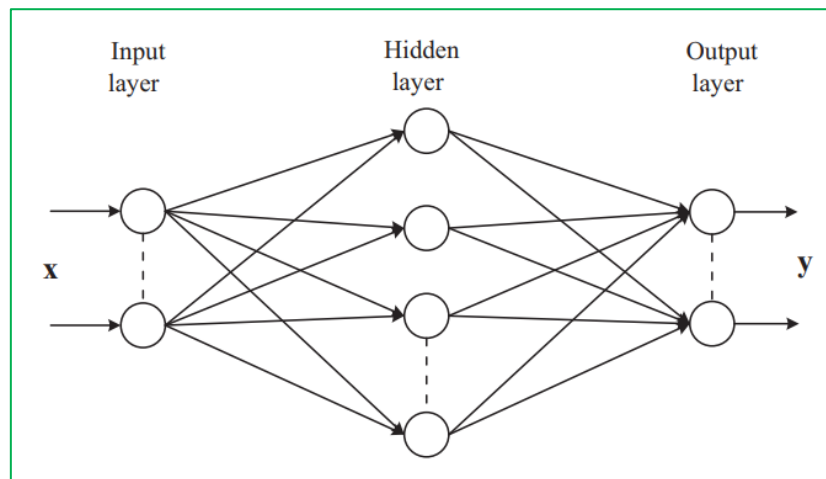
Για να ληφθούν υπόψη οι εξωγενείς εισόδους στο σύστημα (σημείο που αδυνατούν να διαχειριστούν οι μέθοδοι ARMA και ARIMA) εφαρμόζουμε τη μέθοδο ARMAX που είναι πιο ευέλικτη για πρακτική χρήση της πρόβλεψης της ηλιακής ενέργειας γιατί μπορεί να συμπεριλάβει μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου που επηρεάζουν το σύστημα άμεσα και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη παραγόμενης ισχύος από Φ/Β συστήματα. Το μοντέλο ορίζεται από τη σχέση:

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i * X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i * \varepsilon_{t-i} + \sum_{i=1}^b \eta_i * d_{t-i} \quad (6.20)$$

Με η_i η παράμετρος εξωγενών εισόδων d_i .

6.9.2 Μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης

Εξαιτίας του υψηλού επιπέδου μάθησης, τα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα έχουν δυνατότητες εκτίμησης με πολύ μεγάλη ακρίβεια μη γραμμικής χαρτογράφησης καιρικών συστημάτων. Η τυπική δομή ενός νευρωνικού δικτύου φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 134. Τυπική δομή feed-forward νευρωνικού δικτύου [111]

Έχοντας ένα σύνολο δεδομένων με N διακριτά δείγματα $\{(x_i, t_i)\}_{i=1}^N$ με εισόδους $x_i \in R^n$ και εξόδους $t_i \in R^m$, K κρυφούς κόμβους και συνάρτηση ενεργοποίησης $\psi(\cdot)$ για την εκτίμηση N δειγμάτων, ένα νευρωνικό δίκτυο ορίζεται από τη σχέση:

$$f_k(x_i) = \sum_{i=1}^K \beta_i * \psi(\alpha_i * x_j + b_i), j = 1, \dots, N \quad (6.21)$$

Με

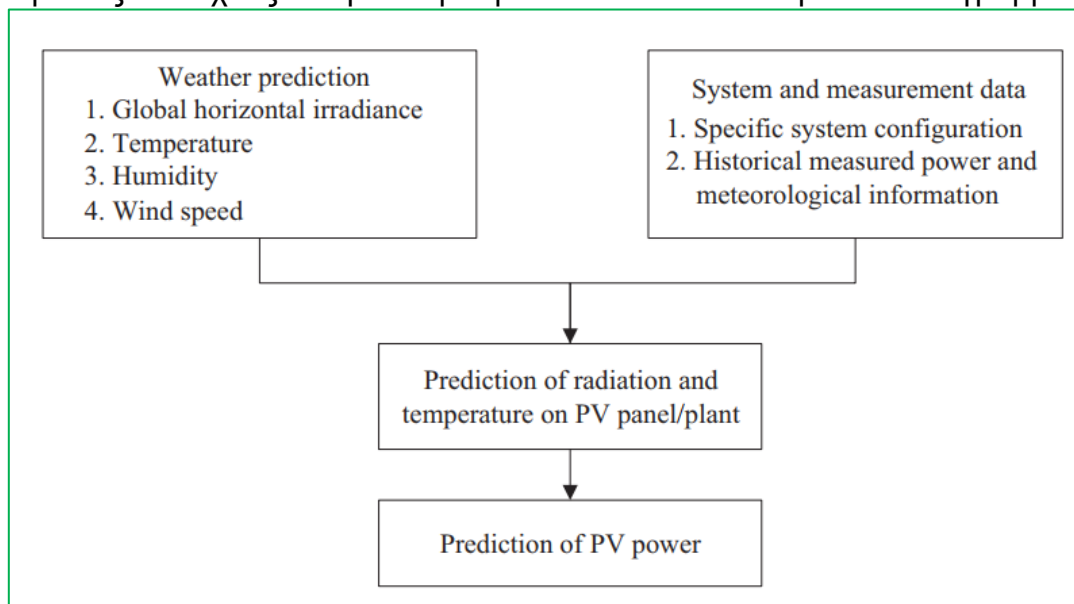
- α_i το βάρος του διανύσματος μεταξύ της i -οστού νευρώνα και των νευρώνων εισόδου

- b_i το βάρος του διανύσματος μεταξύ της i -οστού νευρώνα και των νευρώνων εξόδου
- b_i το όριο του i -οστού κόμβου
- $\psi(a_i * x_j + b_i)$ την έξοδο του i -οστού κόμβου σε σχέση με την είσοδο x_i .

Μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης βραχυπρόθεσμου ορίζοντα (24 ωρών) έχουν κατασκευαστεί και έχουν αποδώσει πολύ καλύτερα από τα συμβατικά που λαμβάνουν υπόψη ατμοσφαιρικούς παράγοντες, ενώ έχουν εφαρμοστεί σε μεγάλης κλίμακας Φ/Β σταθμό, για ορίζοντα τριών ημερών, με αξιόλογα αποτελέσματα.

6.9.3 Φυσικά μοντέλα


Σε αντίθεση με τις τεχνικές των προηγούμενων μοντέλων, τα φυσικά μοντέλα χρησιμοποιούν ηλιακά και Φ/Β μοντέλα για να παράξουν προβλέψεις ηλιακής ακτινοβολίας και ισχύος. Το γενικό μοτίβο συνίσταται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 135. Τυπικό πλαίσιο φυσικών προσεγγίσεων πρόβλεψης ισχύος Φ/Β στοιχείων [112]

Η νέφωση και το βάθος της συννεφιάς έχουν σημαντική επίδραση στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Μελετώντας τις εικόνες που λαμβάνουμε από δορυφόρους για τη δομή των σύννεφων είναι δυνατό να προβλέψουμε τοπικά την ηλιακή ακτινοβολία. Καταγράφοντας τις μεταβολές τους είμαστε σε θέση να προβλέψουμε την ηλιακή ακτινοβολία σε βάθος έξι ωρών, ενώ αναλύοντας τις δορυφορικές φωτογραφίες μπορούμε να προβλέψουμε την κίνησή τους με διανυσματικά πεδία. Η πρόβλεψη αυτή μπορεί να επεκταθεί και άλλο με τη χρήση πιο εξελιγμένων αισθητήριων οργάνων και διατάξεων στα συστήματα λήψης και απεικόνισης φωτογραφιών της ατμόσφαιρας. Τέτοιες λήψεις δε λαμβάνονται μόνο από δορυφόρους αλλά και από σταθμούς εδάφους, αφού μελετώντας τη σκιά της νεφοσκέπωσης, μπορούμε να κάνουμε εκτιμήσεις κατά το σχεδιασμό Φ/Β σταθμών.

Το μοντέλο NWP που προαναφέραμε θεωρείται το πιο ακριβές και προσιτό εργαλείο εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας επιτρέποντάς μας να έχουμε προβλέψεις που φτάνουν το διάστημα δεκαπέντε ημερών και που εφαρμόζεται για τη δημιουργία



μοντέλων χαρτών στην εφαρμογή του κεφαλαίου 2.6 και που χρησιμοποιούμε κατά την εγκατάσταση Φ/Β σταθμών και οικιακών συστοιχιών.

6.9.4 Υβριδικά μοντέλα

Είναι ουσιαστικά ο συνδυασμός των προηγούμενων μοντέλων προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία μοντελοποίησης ανάλογα με τις ανάγκες, να αυξηθεί το βάθος πρόβλεψης και να εξυπηρετηθούν συγκεκριμένες ανάγκες (γεωγραφικές, οικονομικές, ταχύτητας). Στην πράξη έχουν εφαρμοστεί αρκετές μεθοδολογίες συνδυασμού αυτών των μοντέλων, όπως ο συνδυασμός της μεθόδου ARMA και ενός μη γραμμικού νευρωνικού δικτύου που φτάνει το βάθος πρόβλεψης μέχρι και τις 915 ώρες χρησιμοποιώντας βάσεις δεδομένων υψηλής ανάλυσης του ενός δευτερολέπτου. Είναι αναμενόμενο ότι εφαρμογές σαν αυτή απαιτούν τεράστια ποσά επεξεργαστικής ισχύος και δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένες για εμπορική χρήση.

6.10 Εφαρμογές έξυπνων δικτύων, αντιδράσεις και ανησυχίες

Πέρα από τα ενεργειακά δίκτυα, την παραγωγή, μετάδοση και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, το διαγνωστικό έλεγχο και την αυτόματη επιδιόρθωση, τους έξυπνους μετρητές και τα ευφυή σπίτια, οι εφαρμογές των έξυπνων δικτύων έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών με ανοδικές τάσεις ανάπτυξης. Τα συστήματα επικοινωνιών, οι γεωχωρικές τεχνολογίες, η ιδιοκτησιακή διαχείριση και η διαχείριση της ενεργειακής ζήτησης των καταναλωτών, η κυβερνοασφάλεια, η διαχείριση και ο διαμοιρασμός υψηλής επεξεργαστικής ισχύος κατ' απαίτηση (on demand), το cloud και grid computing και η αυτοκίνηση είναι πλέον τομείς της ζωής μας όπου θα συνυφαστούν άρρηκτα με τα έξυπνα δίκτυα προκειμένου να διανεμηθεί ικανοποιητικά και αποδοτικά η παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες και συμβατικές τεχνολογίες με απώτερο σκοπό την ασφάλειά μας και τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων και του ενεργειακού αποτυπώματός μας.

Ανεξάρτητα από τα οφέλη, υπάρχουν και οι φωνές της αντιλογίας που στοχεύουν κυρίως στις διατάξεις των έξυπνων μετρητών και της συλλογής πληροφοριών. Μερικοί λόγοι για τους οποίους θεωρείται ότι τα έξυπνα δίκτυα είναι μια τεχνολογία που πρέπει να περιοριστεί είναι οι παρακάτω:

- Η περιπλοκότητα των συστημάτων θα αφαιρέσει την υπευθυνότητα του παρόχου με αποτέλεσμα την εκμετάλλευση του καταναλωτή
- Η ανεξέλεγκτη συλλογή και διανομή πληροφοριών των καταναλωτών σε τρίτους θα επιφέρουν θέματα παραβίασης της ιδιωτικότητας
- Κοινωνική ανησυχία για ανισοκατανομή διαθεσιμότητας της ενέργειας
- Ανησυχίες για πιθανές εκπομπές επικίνδυνης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους έξυπνους μετρητές
- Ενδεχόμενο κάλυψης κυβερνητικών μηχανισμών διαχείρισης ενέργειας κατά το δοκούν, με πέπλο νομιμοφάνειας
- Έλεγχοι οικιακών μετρητών εξ' αποστάσεως χωρίς τη συγκατάθεση των καταναλωτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

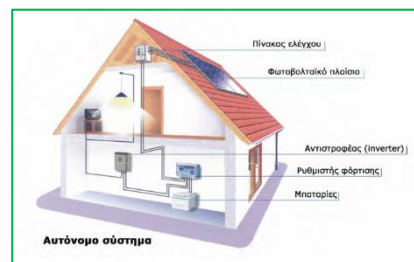
7.1 Πρόβλημα υπό Εξέταση

Στα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από τον συνδυασμό φωτοβολταϊκής συστοιχίας με άλλες πηγές ενέργειας, δηλαδή, ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες) ή πηγές συμβατικών καύσιμων (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγους, H/Z). Ο προσδιορισμός των συνιστωσών ΑΠΕ προκύπτει με ολοκληρωμένη οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος, με κριτήριο το βαθμό συμμετοχής του H/Z στη διασφάλιση της καλύψεως των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων στο σύστημα προβλέπεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (αυτονομία αποθηκευμένης ενέργειας).

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού των συνιστωσών ενός ΦΒ υβριδικού συστήματος, οι διαφορές των οποίων εντοπίζονται σε εξειδικευμένα οικονομοτεχνικά και λειτουργικά κριτήρια βελτιστοποίησης της αποδιδόμενης από το σύστημα, ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεθοδολογίες αυτές οδήγησαν στη δημιουργία λογισμικών (Hybrid system sizing calculators and Sizing tools, Sunny Design, Kaco Calc Pro, PV Design tool, Pv Syst), για τον προσδιορισμό των συνιστωσών των υβριδικών συστημάτων. Γενικά οι ενεργειακοί υπολογισμοί σε ένα Φ/Β υβριδικό σύστημα αποσκοπούν στον προσδιορισμό των υποσυστημάτων του, με βάση την απαίτηση για ολική ή μερική κάλυψη των μέσων ημερήσιων, μηνιαίων ή ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων των καταναλώσεων της εφαρμογής. Λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες κατά τις ενεργειακές μετατροπές και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το χώρο παραγωγής στο χώρο εκμετάλλευσης. Αναλυτικότερα, ενδιαφερόμαστε για τον προσδιορισμό:

- Του μεγέθους των συντιθέμενων ανανεώσιμων πηγών (Φ/Β συστοιχίας και ανεμογεννήτριας)
- Της χωρητικότητας του συσσωρευτή, αν απαιτείται
- Των χαρακτηριστικών των ηλεκτρονικών διατάξεων προσαρμογής και μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας (converter, inverter και ελεγκτή φόρτισης) όσων η παρουσία κρίνεται επιβεβλημένη
- Των τεχνικών χαρακτηριστικών της συμβατικής πηγής (H/Z), σύμφωνα με το βαθμό συμμετοχής της στην κάλυψη των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής.

Παρακάτω θα ακολουθήσει μελέτη εγκατάστασης αυτόνομου υβριδικού Φ/Β συστήματος σε σύγχρονη υπερυψωμένη μονοκατοικία μόνιμης διαμονής, ενός επιπέδου, συνολικού εσωτερικού εμβαδού $105\mu^2$, κάνοντας χρήση της υπάρχουσας Φ/Β τεχνολογίας το οποίο θα υποστηρίζεται επικουρικά από δύο ανεμογεννήτριες οικιακού τύπου και ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Η γεννήτρια τύπου Diesel θα χρησιμοποιείται σε έκτακτες ανάγκες (περιορισμένη ηλιοφάνεια, χειμερινή περίοδος) ή για την κάλυψη των φορτίων αιχμής όταν τα Φ/Β και οι συσσωρευτές δεν επαρκούν. Η θέρμανση του νερού θα γίνεται αποκλειστικά από ηλιακό θερμοσίφωνα επιφάνειας $2\mu^2$. Η κατοικία διαθέτει ενεργειακό τζάκι αποδόσεως $\sim 71\%$ και ονομαστικής ισχύος 5-21KW με 5 περσίδες και βεντιλατέρ για κάλυψη των αναγκών θέρμανσης ενώ περιμετρικά έχει καλυφθεί με θερμοπρόσοψη πάχους 12cm για περιορισμό των θερμικών απωλειών.



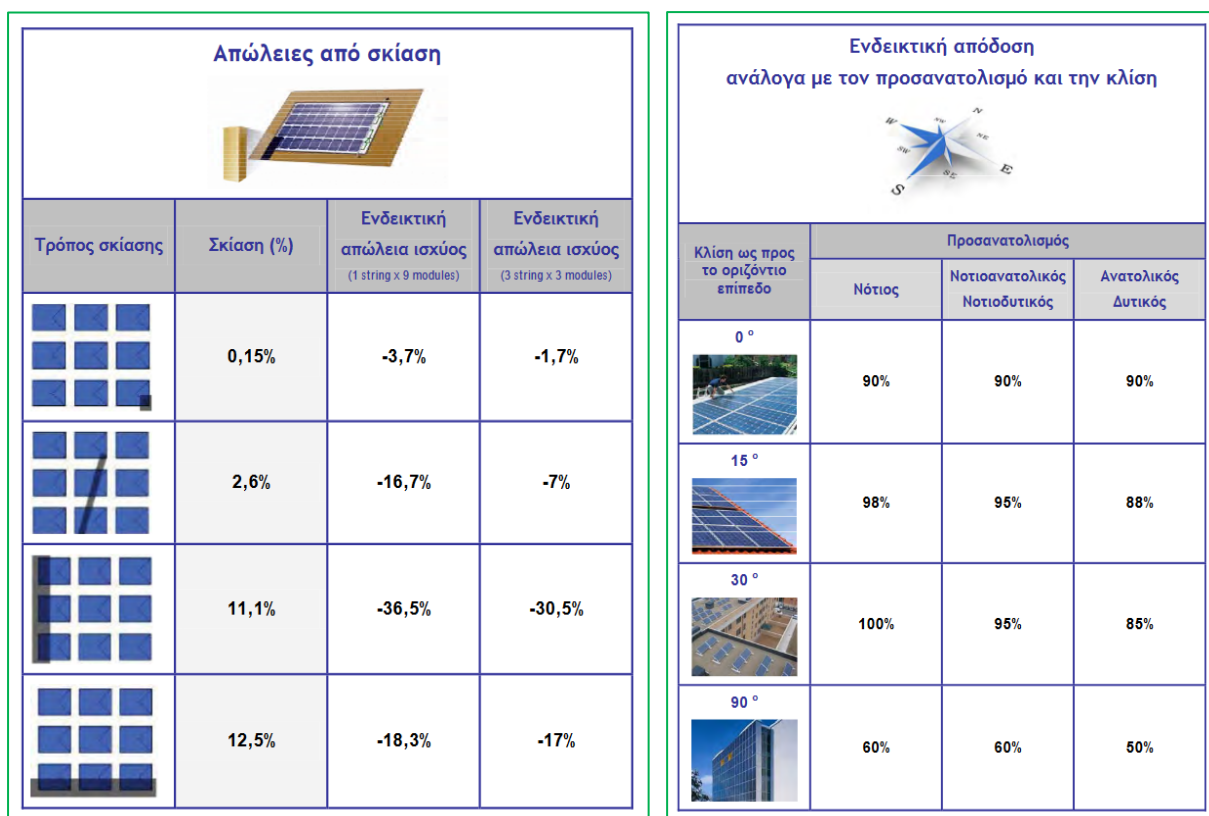
Εικόνα 136. Αυτόνομο υβριδικό Φ/Β σύστημα σε κατοικία [113]

Το κτίριο βρίσκεται στην περιοχή Εγλυκάδας του Ν. Αχαΐας νοτιοανατολικά του Παμπελοποννησιακού Σταδίου και η σκεπή του είναι πλήρως μονοκλινής χωρίς κεραμίδια, με προσανατολισμό στο νότο, πράγμα που θεωρείται ιδανικό για τα ελληνικά δεδομένα, αφού τα φωτοβολταϊκά δε θα απαιτήσουν υπερυψωμένο σύστημα στήριξης αλλά θα τοποθετηθούν απευθείας σε πλαίσια πάνω στην ταράτσα, δεδομένου ότι οι βέλτιστη κλίση κυμαίνεται στις $\sim 45,5^\circ$ (εικόνα 66) και θα χρησιμοποιηθούν πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου αντί άμορφου, λόγω της περιορισμένης επιφάνειας που διαθέτουμε. Μελλοντικά ακίνητα σε εγγύτητα της κατοικίας δε θα ληφθούν υπόψη παρά μόνο η παρούσα κατάσταση. Οι διαθέσιμες επιφάνειες φαίνονται παρακάτω:

Στέγη(μ^2)
5,7x4,6
5x4,6
1,5x2,2
4,3x5,2
6,1x4,5
(2x3)/2
Σύνολο: 105,33
Συνολική διαθέσιμη επιφάνεια με ανοχές: <u>100μ^2</u>

Εικόνα 137. Συνολική διαθέσιμη επιφάνεια

Στην περιοχή δεν βρίσκονται εμπόδια αξιόλογου ύψους που θα περιορίσουν την απόδοση του συστήματος, οι επιφάνειες είναι ασκίαστες και θα ληφθούν τα απαραίτητα περιθώρια σφάλματος από διάφορους παράγοντες (καμινάδες, ηλιακοί θερμοσίφωνες, κεραία τηλεόρασης, σημεία της ταράτσας που δεν είναι δυνατό να τοποθετηθούν όπως περιστρεφόμενη σκάλα πρόσβασης κλπ). Δεδομένου ότι η κατοικία είναι μόνιμη δεν απαιτείται σύστημα τηλεμέτρησης.



Εικόνα 139. Ενδεικτική απόδοση πάνελ και απώλειες λόγω σκίασης [114]

7.2 Διαστασιολόγηση Προβλήματος

Κάθε συσκευή, βάσει νομοθεσίας πλέον, έχει πάνω της μια ετικέτα που αναγράφει την ηλεκτρική κατανάλωση της συσκευής σε Watt. Αν για παράδειγμα, μια τηλεόραση γράφει 50 Watt, αυτό σημαίνει ότι η παραπάνω ηλεκτρική συσκευή θα καταναλώνει σε πλήρη λειτουργία 50 Watt για κάθε ώρα που θα λειτουργεί. Αν θέλουμε λοιπόν να λειτουργούμε αυτή τη συσκευή για 6 ώρες καθημερινά, τότε θα καταναλώνει 0,3 KWh την ημέρα.

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε την ημερήσια κατανάλωση σε KW/h για κάθε συσκευή που σκοπεύουμε να λειτουργούμε και στο τέλος αθροίζουμε όλες αυτές τις ημερήσιες καταναλώσεις των επιμέρους συσκευών, για να βρούμε τη συνολική κατανάλωση σε KW/h ανά 24ωρο όλων των συσκευών μαζί. Αυτή τη συνολική κατανάλωση σε KWh έχουμε σα σκοπό να καλύψουμε με το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Οι συνηθισμένες ηλεκτρικές συσκευές που συναντάμε σε μια σύγχρονη κατοικία με την ονομαστική ισχύ και την ετήσια κατανάλωσή τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [31].

Συσκευή	Ονομαστική Ισχύς (W)	Μέση ημερήσια χρήση (h)	Μέση ημερήσια κατανάλωση (KWh)	Μηνιαία κατανάλωση (30Ημ. – KWh)	Ετήσια κατανάλωση (365Ημ. – KWh)	Ετήσιο Κόστος (€)
Ξυπνητήρι - ραδιόφωνο	1	24	0,024	0,72	8,76	
Φορτιστής κινητού - τάμπλετ (4x5W)	20	3	0,06	1,8	21,9	
Modem/Router	7	24	0,168	5,04	61,32	
Λάμπα LED (8x7W)	56	5	0,28	8,4	102,2	
Τηλέφωνο DECT	5	24	0,12	3,6	43,8	
Πολυμηχάνημα	60	4	0,24	7,2	87,6	
Laptop	55	4	0,22	6,6	80,3	
Desktop	550	4	2,2	66	803	
Τηλεόραση 32"	40	4	0,16	4,8	58,4	
Τηλεόραση 50"	85	4	0,34	10,2	124,1	
Ψυγείοκαταψύκτης	150	9	1,35	40,5	492,75	
Εστίες κουζίνας	2000	2	4	120	1460	
Φούρνος	2700	1	2,7	81	985,5	
Φούρνος μικροκυμάτων	400	0,2	0,08	2,4	29,2	
Τοστιέρα	850	0,2	0,17	5,1	62,05	
Κλιματιστικό 9000BTU (x1)	900	0,3	0,27	8,1	98,55	
Κλιματιστικό 12000BTU	3000	0,3	0,9	27	328,5	
Καφετιέρα	100	0,2	0,02	0,6	7,3	
Τοστιέρα	850	0,1	0,085	2,55	31,025	
Μίξερ	300	0,05	0,015	0,45	5,475	
Μπλέντερ	500	0,05	0,025	0,75	9,125	
Κονσόλα παιχνιδιών	150	3	0,45	13,5	164,25	
Σεσουάρ μαλλιών	1500	0,05	0,075	2,25	27,375	
Ατμοσύστημα	1200	0,2	0,24	7,2	87,6	
Ηλεκτρική σκούπα	800	0,2	0,16	4,8	58,4	
Πλυντήριο ρούχων	500	1	0,5	15	182,5	
Πλυντήριο πιάτων	1200	1	1,2	36	438	
Απορροφητήρας	100	2	0,2	6	73	
Φριτέζα	1000	0,1	0,1	3	36,5	
Διάδρομος Γυμναστικής	400	0,3	0,12	3,6	43,8	
Ηλεκτρικά εργαλεία	400	0,1	0,04	1,2	14,6	
Διάφορες μικροσυσκευές/ standby	50	24	1,2	36	438	
Ηλιακός Θερμοσίφωνας	4000	-	-	26,7	320	
ΣΥΝΟΛΟ			17,712	531,36	6464,88	

Εικόνα 140. Καταναλώσεις ηλεκτρικών συσκευών σύγχρονης μονοκατοικίας

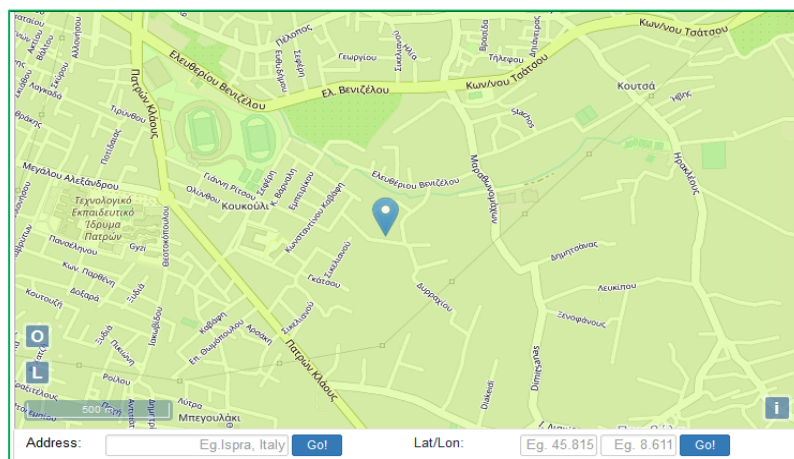
Προφανώς τα ανωτέρω δε θεωρούνται, πρακτικά, ταυτόχρονα φορτία, ενώ επίσης έχουν ληφθεί υπόψη, άτυπα, και οι ώρες αναμονής σε ορισμένες συσκευές,

κατά τις οποίες η κατανάλωση είναι σημαντικά χαμηλότερη. Η ανωτέρω καταγραφή έγινε με την προϋπόθεση της χειρότερης περίπτωσης από πλευράς ηλιοφάνειας και κυρίως για χειμερινή περίοδο. Επιπλέον οι τιμές υψηλών φορτίων διαμοιράστηκαν σε δωδεκάμηνη βάση χωρίς αυτό πραγματικά να ισχύει αφού ο θερμοσίφωνας λειτουργεί λιγότερο το καλοκαίρι ενώ τα κλιματιστικά λειτουργούν λιγότερο το χειμώνα εξαιτίας της χρήσης του ενεργειακού τζακιού. Θεωρούμε ως δεδομένο επιπλέον ότι οι ηλεκτρικές συσκευές της κατοικίας είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης (τουλάχιστον A+). Επιπλέον, η κατοικία είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο του παρόχου κυρίως για την ταχεία φόρτιση των συσσωρευτών όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί γι' αυτό το σκοπό και για εξυπηρέτηση των ελάχιστων περιπτώσεων υψηλών φορτίων (θερμοσίφωνας με χρήση αντίστασης) αλλά το Φ/Β σύστημα δεν είναι συνδεδεμένο στο υφιστάμενο δίκτυο. Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι οι ημερήσιες καταναλώσεις είναι λιγότερες από 17.712KWh, αλλά συνεχίζουμε μ' αυτή την παραδοχή ώστε να ικανοποιήσουμε μεγαλύτερο αριθμό Φ/Β πάνελ λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας που διαθέτουμε.

Θεωρώντας τέλος, δεδομένο ότι ένας ηλιακός θερμοσίφωνας ονομαστικής ισχύος 4KW, λειτουργεί για τέσσερις ημέρες την εβδομάδα μόνο τους τέσσερις μήνες του χειμώνα για μία ώρα την ημέρα, τότε λειτουργεί για 20 ώρες το μήνα περίπου, δηλαδή καταναλώνει $20 \times 4 = 80 \text{KWh}$ το μήνα ή $80 \times 4 = 320 \text{KWh}$ το τρίμηνο και συνεπώς $\sim 320 \text{KWh}/\text{έτος}$ αφού τις υπόλοιπες μέρες στατιστικά δεν κάνει χρήση της εσωτερικής του αντίστασης αλλά των πάνελ του, εξαιτίας της μεγαλύτερης ηλιοφάνειας στην πόλη της Πάτρας.

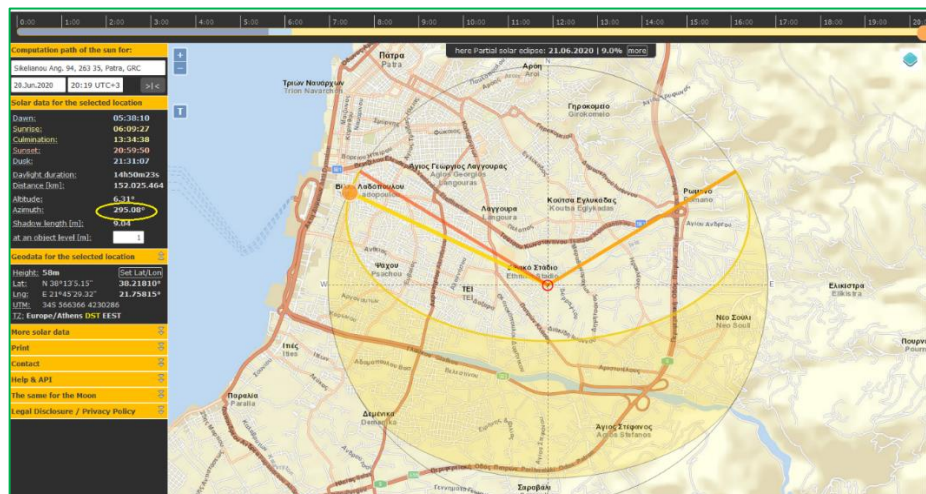
7.3 Επιλογή Φ/Β Συστήματος

Επειδή η κατοικία εγκατάστασης του συστήματός είναι μόνιμη, θα γίνει μελέτη της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας για την περιοχή της κατοικίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ενώ θα ληφθεί υπόψη η δυσμενέστερη περίπτωση του μήνα με τη λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή, αφού τότε είναι που το Φ/Β θα έχει τη χαμηλότερη απόδοση.



Εικόνα 141. Περιοχή μονοκατοικίας προς εξέταση [115]

Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή www.suncalc.org βρίσκω το αζιμούθιο στην περιοχή της κατοικίας το οποίο είναι 295,08°.



Εικόνα 142. Εύρεση αζιμούθιο στην περιοχή που εξετάζουμε [116]

Εισάγοντας επίσης τα παρακάτω στοιχεία:

Μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (Wp)	11000 ¹⁰⁷
Επιτρεπόμενο ποσοστό εκφόρτισης (%)	40% (default)
Ημερήσια κατανάλωση (Wh)	17712
Οριζόντια κλίση (°)	45,5°
Αζιμούθιο (°)	-64.92° (360 – 295.08°)

Εικόνα 143. Εισαγωγή στοιχείων για υπολογισμό παραμέτρων

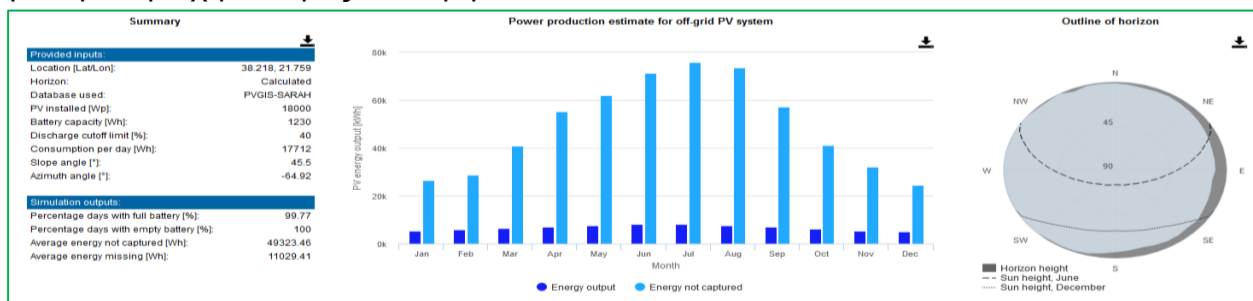
Από την εφαρμογή <https://keisan.casio.com/exec/system/1224682331> μπορούμε επίσης να βρούμε ένα μέσο όρο απαιτούμενης κλίσης των πάνελ καθ' όλη τη διάρκεια του έτους η οποία είναι ~45,5° :

Α' τρίμηνο			Β' τρίμηνο			Γ' τρίμηνο			Δ' τρίμηνο		
Date	Elevation angle	Azimuth angle	Date	Elevation angle	Azimuth angle	Date	Elevation angle	Azimuth angle	Date	Elevation angle	Azimuth angle
Jan-01	25.72	201.40	Apr-05	52.85	216.35	Jul-04	66.58	234.80	Oct-02	42.23	213.91
Jan-06	26.36	201.01	Apr-10	54.32	218.37	Jul-09	66.31	233.53	Oct-07	40.33	213.25
Jan-11	27.15	200.72	Apr-15	55.72	220.43	Jul-14	65.89	232.10	Oct-12	38.49	212.58
Jan-16	28.1	200.55	Apr-20	57.05	222.52	Jul-19	65.31	230.56	Oct-17	36.7	211.90
Jan-21	29.19	200.49	Apr-25	58.31	224.59	Jul-24	64.57	228.97	Oct-22	34.99	211.21
Jan-26	30.4	200.55	Apr-30	59.48	226.62	Jul-29	63.67	227.38	Oct-27	33.37	210.51
Jan-31	31.73	200.76	May-05	60.58	228.58	Aug-03	62.61	225.84	Nov-01	31.85	209.79
Feb-01	33.16	201.10	May-10	61.59	230.44	Aug-08	61.41	224.37	Nov-06	30.45	209.06
Feb-05	34.67	201.59	May-15	62.52	232.14	Aug-13	60.07	222.99	Nov-11	29.19	208.30
Feb-10	36.26	202.23	May-20	63.37	233.65	Aug-18	58.61	221.71	Nov-16	28.07	207.54
Feb-15	37.9	203.01	May-25	64.13	234.95	Aug-23	57.03	220.53	Nov-21	27.1	206.76
Feb-20	39.58	203.95	May-30	64.8	235.99	Aug-28	55.36	219.47	Nov-26	26.3	205.99
Mar-01	41.28	205.03	Jun-04	65.39	236.75	Sep-02	53.61	218.49	Dec-01	25.67	205.23
Mar-06	43	206.27	Jun-09	65.87	237.21	Sep-07	51.78	217.60	Dec-06	25.21	204.48
Mar-11	44.71	207.64	Jun-14	66.25	237.34	Sep-12	49.91	216.78	Dec-11	24.95	203.77
Mar-16	46.41	209.15	Jun-19	66.53	237.15	Sep-17	48	216.01	Dec-16	24.86	203.09
Mar-21	48.08	210.79	Jun-24	66.68	236.65	Sep-22	46.08	215.28	Dec-21	24.96	202.46
Mar-26	49.72	212.55	Jun-29	66.7	235.85	Sep-27	44.14	214.59	Dec-26	25.24	201.90
Mar-31	51.31	214.40							Dec-31	25.69	201.42

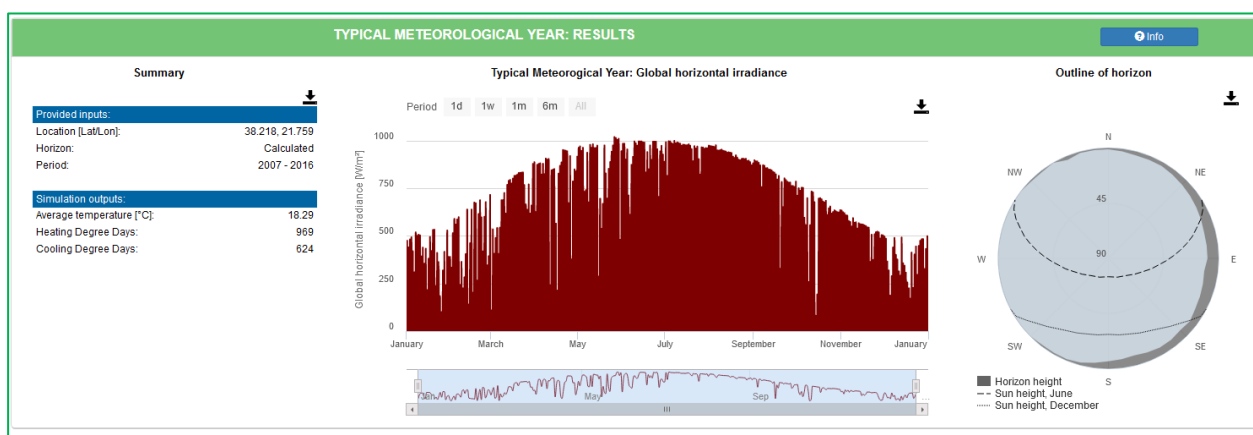
Εικόνα 144. Απαιτούμενη κλίση πάνελ για την περιοχή που εξετάζουμε καθ' όλο το έτος

¹⁰⁷ P_{pv}=10,133KWp της §7.3.2

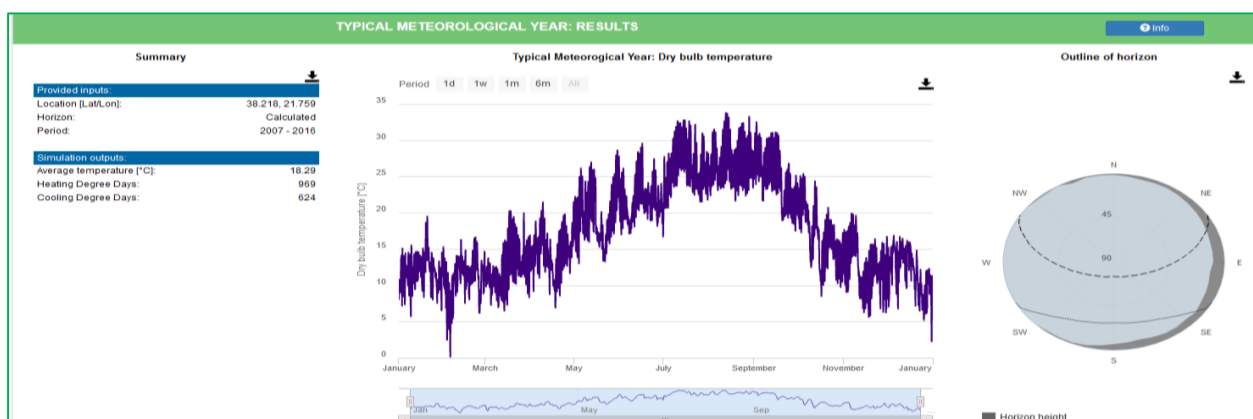
Από το εργαλείο της εφαρμογής www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/ βρίσκουμε επίσης για το προς εγκατάσταση σύστημα των 18KWp, την οριζόντια κλίση που θα πρέπει να έχουν τα Φ/Β πάνελ στο σημείο που θα τοποθετηθούν ($45,5^\circ$) τη μέγιστη παραγόμενη ετήσια ισχύ σε KWh, τις συνολικές απώλειες και τις μηνιαίες θερμοκρασίες για την περιοχή που μας ενδιαφέρει:



Εικόνα 145. Εκτίμηση παραγωγής ενέργειας [117]



Εικόνα 146. Συνολική οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία (GHI) καθ' όλο το έτος στην περιοχή που εξετάζουμε [118]



Εικόνα 147. Μέση θερμοκρασία στην περιοχή που εξετάζουμε καθ' όλο το έτος [119]

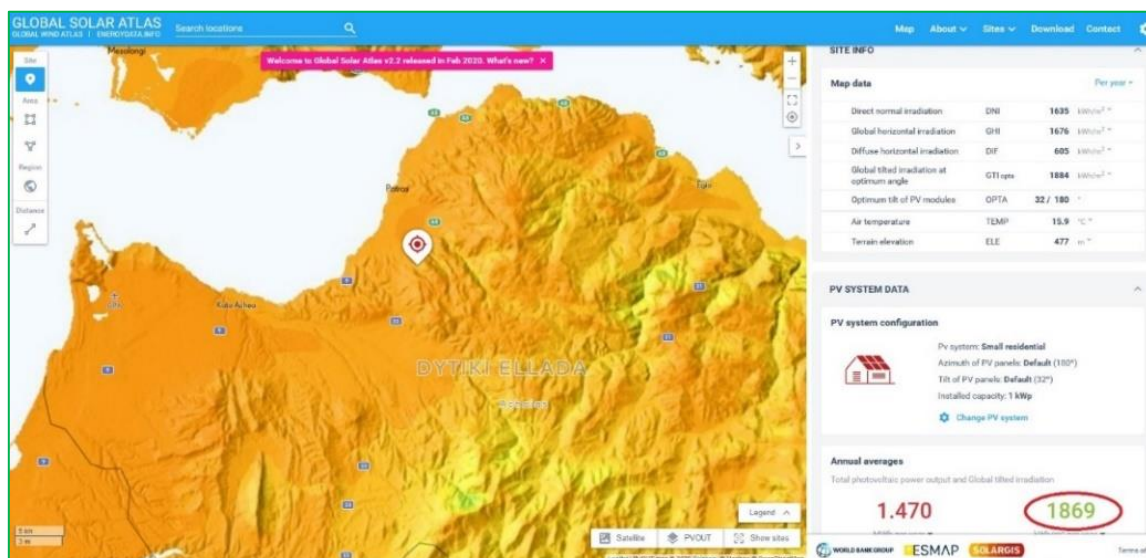
Από τις μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για τα έτη 2005 – 2016 βρίσκω τις μέσες μηνιαίες τιμές ανά μήνα:

Μήνας	Μέση Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία (KWh/m ²)	Μέση Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (KWh/m ²) ¹⁰⁸	Μέση Θερμοκρασία (°C)
Ιανουάριος	91,6125	2,955242	8,5
Φεβρουάριος	75,795 (min)	2,706964	9
Μάρτιος	112,0833	3,61559	12,6
Απρίλιος	142,2642	4,74214	16
Μάιος	175,6433	5,665913	20
Ιούνιος	220,26	7,342	26,5
Ιούλιος	258,1067 (max)	8,603557	29
Αύγουστος	243,8725	7,866855	28
Σεπτέμβριος	167,9058	5,59686	23
Οκτώβριος	126,1242	4,068523	19
Νοέμβριος	105,4183	3,513943	14
Δεκέμβριος	88,76833	2,863495	10,5
Ετήσια συνολική	1807,854		

Εικόνα 148. Μέσες μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή που εξετάζουμε ανά μήνα

Σημειώνεται ότι η προσομοίωση χρησιμοποιεί πραγματικά ημερήσια στοιχεία από το 2005 ως το 2016 ώστε να εξαγεί εύχρηστα αποτελέσματα.

Οφείλουμε να προσθέσουμε ότι η ετήσια συνολική ηλιακή ακτινοβολία επαληθεύεται με μερική απόκλιση και από την εφαρμογή του www.globalsolaratlas.info:

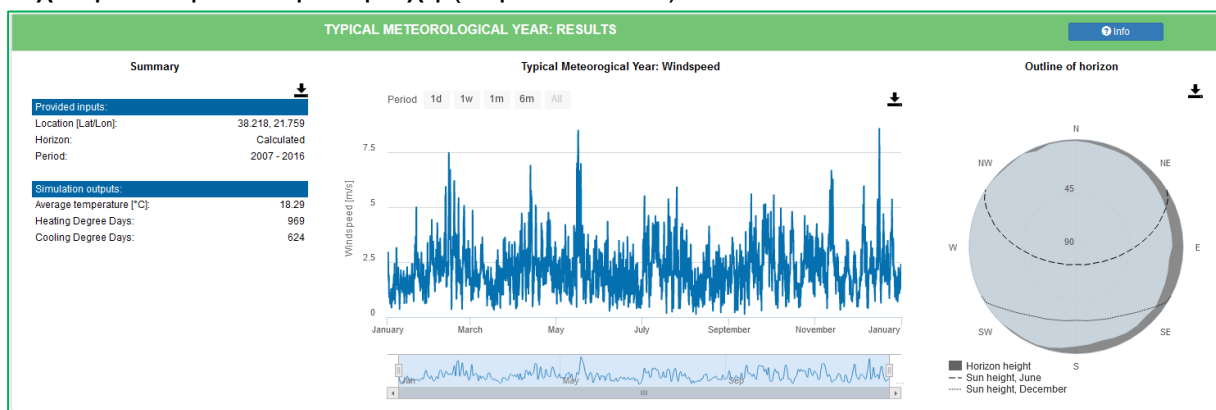


Εικόνα 149. Ετήσια συνολική ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή που εξετάζουμε [120]

¹⁰⁸ Μηνιαία/αριθμό ημερών κάθε μήνα

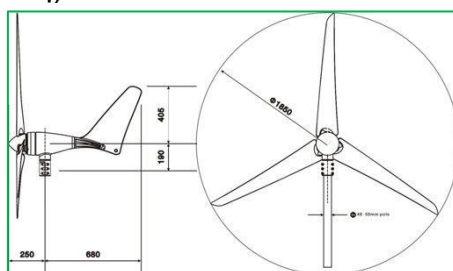
7.3.1 Επιλογή Ανεμογεννήτριας

Από την εφαρμογή PVGIS βρίσκω επίσης τα στατιστικά στοιχεία για την ταχύτητα ανέμου στην περιοχή (έτη 2007-2015):



Εικόνα 150. Μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή που εξετάζουμε καθ' όλο το έτος [121]

Η οποία είναι $2.176911 \sim 2.18 \text{ m/s} = 4.855 \text{ mph}$. Οι ανεμογεννήτριες Sunnily X-600, ονομαστικής ισχύος 600Watt που πρόκειται να εγκαταστήσουμε έχουν διάμετρο 3,7μ (φυλλάδιο κατασκευαστή).



Εικόνα 151. Διαστάσεις ανεμογεννήτριας Sunnily X-600 [122]

Από την εξίσωση της παραγράφου 5.8 βρίσκω ότι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια για μία ανεμογεννήτρια είναι $\sim 223,94 \text{ KWh}$, επομένως οι δύο ανεμογεννήτριες παράγουν ετησίως: $447,9 \text{ KWh}$. Από τον πίνακα κόστους κιλοβατώρας της ΔΕΗ (Αυγустος 2020) Δεδομένου ότι είμαστε στο πρώτο κλιμάκιο κόστους κιλοβατώρας

Κλιμάκιο	kWh	€/kWh
Πρώτο	έως 1600 kWh	0,17588€
Δεύτερο	1601-2000 kWh	0,18518€
Τρίτο	άνω των 2.000 kWh	0,21985€

Εικόνα 152. Κόστος KWh ΔΕΗ, στοιχεία Ιούλιος 2020 [123]

Θεωρώντας ένα μέσο κόστος κιλοβατώρας 0,18518€, τότε οι ανεμογεννήτριες δίνουν ένα ετήσιο κέρδος $0,18518 \times 447,9 = 82,94€$ [32]. Αν θεωρήσω ότι το κόστος αγοράς τους είναι $2200 + \Phi\text{ΠΑ} = 2728€$ (3000€ με έξοδα εγκατάστασης, καλωδίωση, βάση) και ότι για κάθε κιλοβατώρα παραγωγής απαιτείται περίπου 0,01€ συντήρησης

(ετήσιο κόστος συντήρησης $82,94 \cdot 0,01 \sim 0,83\text{€}$), τότε το ετήσιο κέρδος είναι $82,94 - 0,83 \sim 82,11\text{€}$. Παρατηρούμε τελικά ότι η απόσβεση είναι μακροπρόθεσμη και η εγκατάσταση στην κατοικία ασύμφορη (ειδικά αν λάβουμε υπόψη ότι οι ρότορες πρέπει να αντικαθίστανται μετά από 10 χρόνια και το σύστημα έχει μέσο χρόνο ζωής 20 χρόνια). Στους παραπάνω υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη ότι η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας είναι περίπου 30% της ονομαστικής της τιμής, η ατμοσφαιρική πίεση είναι $1013,25\text{hPa}$ (μέση τιμή) σε θερμοκρασία $T=15^\circ\text{C}$ και πυκνότητα αέρα $\rho=1,225\text{Kg/m}^3$ σύμφωνα με στοιχεία της ISA¹⁰⁹.

7.3.2 Επιλογή συλλεκτών

Από τη σχέση της παραγράφου 3.11:

$$P_{p\Sigma} = \frac{E_k * P_{STC} * N}{E_{HA} * \sigma_{AS} * \sigma_{\mu} * (N - n)}$$

και για μέση ημερήσια κατανάλωση $17,712\text{KWh}$ υπολογίζω την ισχύ αιχμής του φωτοβολταϊκού για τη δυσμενέστερη περίπτωση απόδοσης των Φ/Β που είναι ο Φεβρουάριος (συναθροίζοντας και τα πάνελ στα κιγκλιδώματα) από τα δεδομένα:

- $P_{STC}=1\text{KW/m}^2$, ισχύς προσπίπτουσας ακτινοβολίας STC
- $E_k=17,712\text{KWh}$, η ημερήσια κατανάλωση για το Φεβρουάριο
- $E_{HA}=75,795/28 \sim 2,707\text{KWh/m}^2/\text{Ημέρα}$ (η μέση ημερήσια κατανάλωση)
- $\sigma_{\theta} = 1 - (T_c + 30 - T_{STC}) \cdot 0,005 = 1 - (9 + 30 - 25) \cdot 0,005 = 0,93$ (συντελεστής $^{\circ}\text{T}$)
- $\sigma_{AS}=0,8 \cdot \sigma_{\theta} = 0,8 \cdot 0,93 = 0,744$, συντελεστής απωλειών σκονισμένων πλαισίων
- $t_a=9^\circ\text{C}$, μέση $^{\circ}\text{T}$ Φεβρουαρίου
- $\sigma_{\mu}=0,9$, συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας
- $N=28$ (περίοδος αναφοράς, Φεβρουάριος)
- $n=2$ (αριθμός ημερών αυτονομίας προς μελέτη)

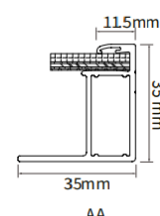
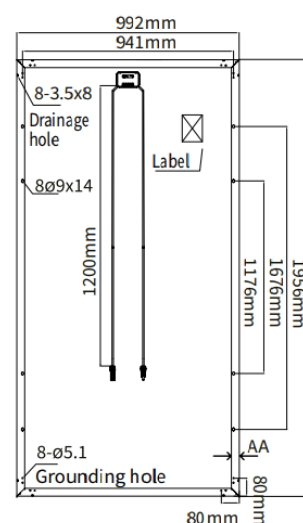
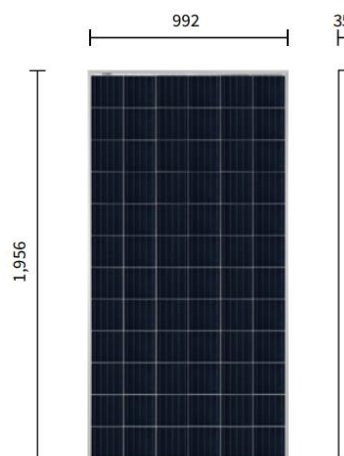
οπότε προκύπτει το αποτέλεσμα:

$$\mathbf{P_{p\Sigma}=10,133KWp}$$

Για την εγκατάστασή μας επιλέγουμε τα σύγχρονα πολυκρυσταλλικά πάνελ SHARP ND – AH330H με μέγιστη ονομαστική ισχύ 330Wp (σε STC) και τεχνικά χαρακτηριστικά:

¹⁰⁹ International Standard Atmosphere

Product Warranty	10 Years
Electrical Data at STC (air mass AM 1.5, irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C)	
Maximum Power (Pmax)	330 Wp
Voltage at Maximum Power (Vmpp)	37.8 V
Current at Maximum Power (Impp)	8.73 A
Open Circuit Voltage (Voc)	46.2 V
Short Circuit Current (Isc)	9.33 A
Panel Efficiency	17 %
Power Tolerance (Positive)	+ 3 %
Power Tolerance (Negative)	- 3 %
Electrical Data at NOCT	
Maximum Power (Pmax)	245 Wp
Voltage at Maximum Power (Vmpp)	34.9 V
Current at Maximum Power (Impp)	7.02 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.9 V
Short Circuit Current (Isc)	7.53 A
Temperature	45 °C
Thermal Ratings	
Operating Temperature Range	-40~85 °C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.39 %/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.3 %/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.05 %/°C
Maximum Ratings	
Maximum System Voltage	1500 V
Maximum Reverse Current	15 A
Material Data	
Panel Dimension (H/W/D)	1956x992x35 mm
Weight	22.2 kg
Cell Type	Polycrystalline
Cell Size	156.75×156.75 mm
Surface	2m ²
Cell Number	72
Glass Type	Tempered, Low Iron
Glass Thickness	3.2 mm
Frame Type	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box Diodes	3
Cable Crossection	4 mm ²
Cable Length	1200 mm



Εικόνα 153. Χαρακτηριστικά Φ/Β πάνελ SHARP ND-AH330H

Για τη συνδεσμολογία των Φ/Β πάνελ ορίζουμε ως μέγιστη τάση $V_{\max\Sigma}$ την τάση: $V_{\max\Sigma} > 1,2V_B$. Η ονομαστική τάση του συσσωρευτή επιλέγω να έχει τιμή 48V για να καλύπτει τα υψηλά φορτία, οπότε: $V_{\max\Sigma} > 1,2V_B = 57,6V$

Για να υπολογίσουμε τον απαιτούμενο αριθμό πάνελ (N) χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$N = \frac{P_{p\Sigma}}{P_{p\Pi}} \quad (7.1)$$

Με:

- $P_{p\sigma}$: η απαιτούμενη συνολική αιχμή ισχύος της Φ/Β εγκατάστασης = 10,133KWp
- $P_{p\pi}$: η ονομαστική ισχύς της Φ/Β εγκατάστασης σε STC που αποδίδει ένα πάνελ = 330Wp

Απ' όπου: $N=10133/330=30,7\sim 31$ πάνελ και ιδανικά 33 πάνελ για να έχω τρεις παράλληλους κλάδους συλλεκτών.

Για να ορίσω τη συνδεσμολογία των Φ/Β πλαισίων απαιτείται να οριστεί η μέγιστη τάση $V_{m\sigma}$ της συστοιχίας. Πρέπει να ισχύει δλδ:

$$V_{m\sigma} > 1,2xV_B = 1,2x48=57,6V \quad (7.2)$$

Όπου V_B , η ονομαστική τάση του συσσωρευτή. Για να καλυφθεί αυτός ο περιορισμός επιλέγω τη δημιουργία 11 παράλληλων κλάδων με τα τρία πάνελ συνδεδεμένα σε σειρά ο καθένας και συνολική μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ: $33x330=10890W_p$.

7.3.3 Επιλογή Συσσωρευτών

Εν συνεχεία υπολογίζουμε τη χωρητικότητα C του συσσωρευτή που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε από τη σχέση:

$$C = \frac{n * E_k}{\sigma_{\gamma} * \sigma_{\mu} * \beta_{εκ} * V_{\beta}} \quad (7.3)$$

Με:

E_k : ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση κατοικίας (=17,712KWh)

n : μέρες αυτονομίας (=1)

σ_{γ} : συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή (=0,8)

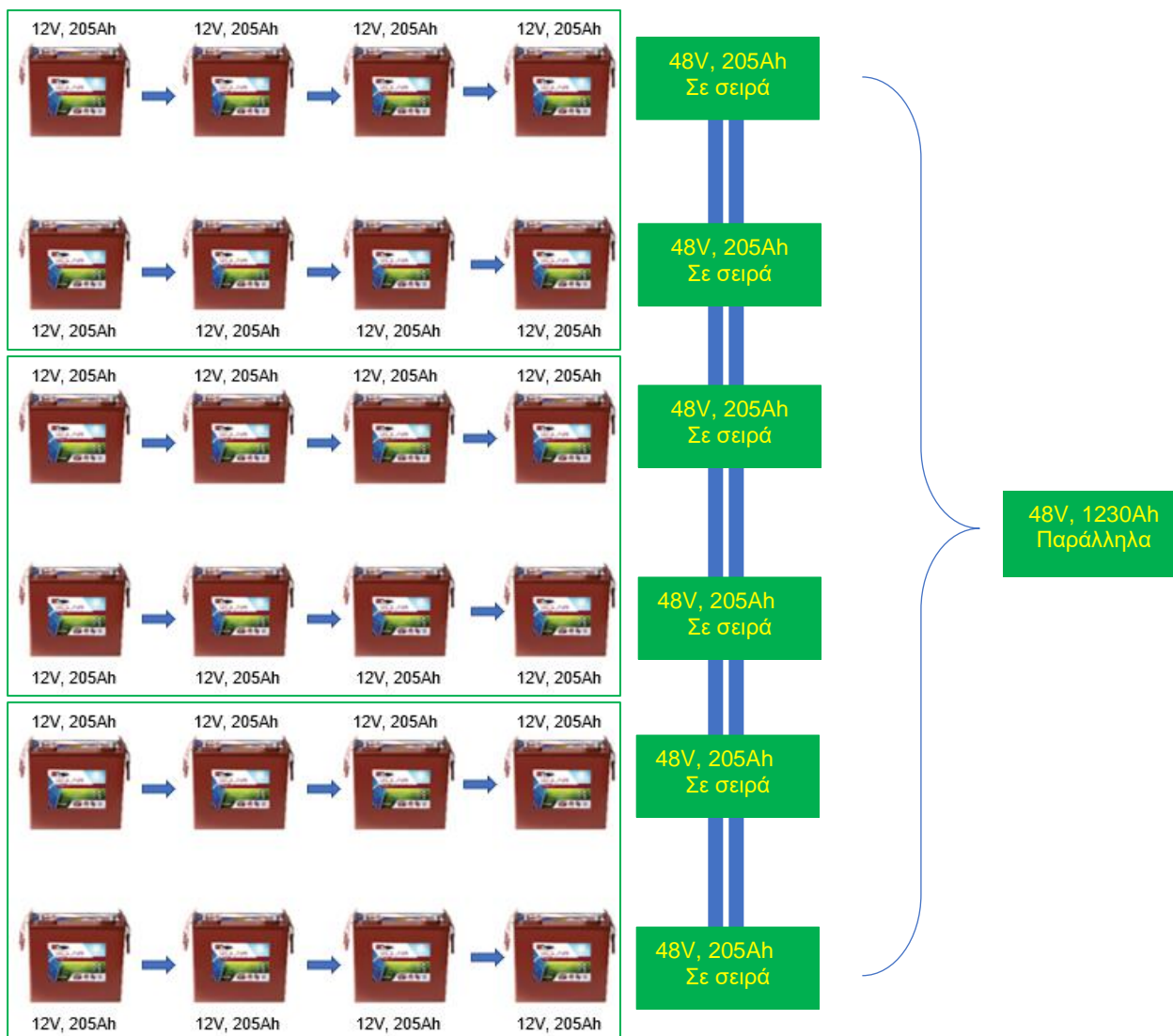
σ_{μ} : συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης (=0,91)

$\beta_{εκ}$: βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών για 1-3 μέρες αυτονομίας (~0,42)

V_{β} : η ονομαστική τάση των συσσωρευτών (=48V)

Απ' όπου βρίσκουμε $C=(1x17712)/(0,8x0,91x0,4x48)=1206,82Ah$, όπου ανάλογα με το συσσωρευτή που θα επιλέξουμε, αυτή η τιμή θα αποκλίνει ελάχιστα αν εφαρμόσουμε και την επίδραση του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης.

Επιλέγουμε λοιπόν 24 μπαταρίες τύπου VRLA AGM, SAGM 12 205 της TROJAN, ειδικά για Φ/Β συστήματα βαθύως κύκλου 12V και χωρητικότητας 205Ah, τοποθετημένες σε έξι κλάδους παράλληλα και ανά τέσσερις σε κάθε κλάδο σε σειρά:



Εικόνα 154. Συνδεσμολογία συσσωρευτών Φ/Β εγκατάστασης

Ωστε η συστοιχία μας έχει να συνολική τάση 48V και συνολική χωρητικότητα 1230Ah.

7.3.4 Επιλογή Ρυθμιστή Φόρτισης


Ο ρυθμιστής φόρτισης απαιτείται να έχει τάση ίση με την ονομαστική τάση του συστήματος συσσωρευτών, δηλαδή 48V. Ο ρυθμιστής που θα επιλέξουμε θα πρέπει να έχει ρεύμα εισόδου $1,5I_{m\Sigma}$ με $I_{m\Sigma}$ τη μέγιστη ένταση ρεύματος της Φ/Β συστοιχίας, δηλαδή:

$$\text{Max}(I_{m\Sigma}) = 1,5I_{m\Sigma} = 1,5 \times I_{m\Pi} \times N_{\Pi} = 1,5 \times 8,73 \times 11 = 144,045\text{A} \quad (7.4)$$

Με

- $I_{m\Pi} = 8,73\text{A}$ η μέγιστη ένταση ρεύματος του πλαισίου (τιμή κατασκευαστή)
- N_{Π} : οι παράλληλοι κλάδοι της Φ/Β εγκατάστασης

Αν θεωρήσω ότι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς για τα ταυτόχρονα φορτία της κατοικίας είναι $P_k = 7\text{KW}$ περίπου και η τάση κατανάλωσης $V_k \sim 230\text{V}$, τότε το ρεύμα εξόδου θα είναι $\text{Max}(I_{\text{ex}}) = P_k / V_k = 7000/230 = 30,43\text{A}$. Επομένως αναζητώ ρυθμιστή φόρτισης με ελάχιστα χαρακτηριστικά λειτουργίας $V_B / \text{Max}(I_{m\sigma}) / \text{Max}(I_{\text{ex}}) : 48\text{V} / 145\text{A} / 31\text{A}$ και επιλέγω για κάθε κλάδο πάνελ έναν Victron Smart Solar MPPT 100A/150.

Smart Charge Controller	100/20-48V	
Load output	100	
Battery voltage	48	
Optional display	MPPT control	
Com. port	VE.Direct	
Programmable relay	No	
Wire Box	S 100-20	


Εικόνα 155. Χαρακτηριστικά ρυθμιστή φόρτισης Victron Smart Solar MPPT 100A/150

7.3.5 Επιλογή Μετατροπέα

Ως γενικός κανόνας για την επιλογή μετατροπέα θεωρείται η εξάρτηση από τη συνολική παραγόμενη τάση από τη συστοιχία Φ/Β και στην προκειμένη περίπτωση στη συστοιχία 33 πάνελ με 245Wp έχουμε αθροιστικά $33 \times 245 = 8085\text{Wp}$. Εξαιτίας των πολλών φορτίων της κατοικίας, επιλέγω τη χρήση του τριφασικού μετατροπέα με ισχύ εξόδου $\sim 12\text{KW}$ και ισχύ αιχμής $\sim 18\text{KW}$ και θα καλύπτει τις εξής απαιτήσεις:

- Ονομαστική τάση εισόδου: 48V
- Ισχύ αιχμής τουλάχιστον ίση με τη μέση συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ P_k (7KW)
- Τάση εξόδου ίση με την τάση των φορτίων κατανάλωσης (230V)

Μια ιδανική επιλογή είναι ο μετατροπέας SUNNY TRIPOWER 12000TL-US της εταιρίας SMA με κύρια χαρακτηριστικά:

Input (DC)		
Max. array power	18000 Wp STC	
Max. DC voltage	1000 V	
Rated MPPT voltage range	300 V...800 V	
MPPT operating voltage range	150 V...1000 V	
Min. DC voltage / start voltage	150 V / 188 V	
Number of MPP tracker inputs	2	
Max. operating input current / per MPP tracker	66 A / 33 A	
Max. short circuit current per MPPT / string input	53 A / 53 A	
Output (AC)		
AC nominal power	12000 W	
Max. AC apparent power	12000 VA	
Output phases / line connections	3 / 3-N-PE	
Nominal AC voltage	480 / 277 V WYE	
AC voltage range	244 V...305	
Rated AC grid frequency	60 Hz	

AC grid frequency / range	50 Hz, 60 Hz / -6 ..+5 Hz	
Max. output current	14,4 A	
Power factor at rated power / adjustable displacement	1 / 0.0 leading...0.0 lagging	
Harmonics	< 3%	

Εικόνα 156. Χαρακτηριστικά μετατροπέα SUNNY TRIPOWER 12000TL-US

7.3.6 Επιλογή Γεννήτριας

Δεδομένου ότι το σύστημα που πρόκειται να εγκαταστήσουμε θα είναι υβριδικό, επιβάλλεται να προβλέψουμε αριθμό ημερών αυτονομίας ώστε τα φορτία των συσκευών της κατοικίας να καλύπτονται απ' το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος που θα χρησιμοποιείται όταν η ενέργεια που προέρχεται απ' τα Φ/Β πάνελ δε θα επαρκεί. Το Η/Ζ πρέπει να προϋποθέτει επιπλέον την επαναφορά του συστήματος συσσωρευτών σε κατάσταση πλήρους φόρτισης σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια χαμηλής αποδοτικότητας των πάνελ.

Για να επιλέξουμε μια κατάλληλη γεννήτρια για τις ανάγκες της κατοικίας μας απαιτείται πρώτα να βρούμε τη συνολική απαιτούμενη ισχύ του Η/Ζ από τη σχέση:

$$P_{HZ} \geq P_{Καταν.} + P_{Φόρτ.} \quad (7.5)$$

Με $P_K=17712W$ και $P_\phi = I_\phi \times V_{HZ}$, όπου $I_\phi \sim C/10$ ή μικρότερο (για σταθερές μπαταρίες κατασκευαστικά) και $V_{HZ} = 1,25 \times V_B$


Επομένως $I_\phi = 1206.8/20 = 60.34A$, εδώ λαμβάνω $I_\phi = C/20$, για σταθερές μπαταρίες συνήθως

$$V_{HZ} = 1,25 \times 48 = 60$$

$$\text{Άρα: } P_\phi = 60.34 \times 60 \sim 3620W$$

$$P_{HZ} \geq 17712 + 3620 = 21332W$$

Δηλαδή χρειαζόμαστε μια γεννήτρια τουλάχιστον 21KW και μία κατάλληλη επιλογή είναι η τριφασική αθόρυβη γεννήτρια πετρελαίου GF3-20 της PRAMAC με τεχνικά χαρακτηριστικά:

Κινητήρας: 490D - άμεσου ψεκασμού	
Κύλινδροι: 4	
Ισχύς: 31 hp	
Κυβικά: 1532 cc	
Εκκίνηση: Μίζα	
Στροφές/λεπτό (rpm): 1500 rpm	
Συχνότητα (Hz): 50 Hz	
Καύσιμο Πετρέλαιο (diesel)	
Δοχείο πετρελαίου: 100 λίτρα	
Ισχύς (KVA): 20-25 KVA	
Επίπεδο θορύβου 75 db(A) στα 7 μέτρα	
Τάση AC 230/380 volt	
Τύπος γεννήτριας: Γεννήτρια χωρίς ψήκτρες	
Αυτονομία: 20 h 00" στο 75% της ισχύος	

Εικόνα 157. Χαρακτηριστικά γεννήτριας GF3-20 της PRAMAC

Ο χρόνος φόρτισης του συσσωρευτή που θα εγκαταστήσουμε βρίσκεται από τη σχέση:

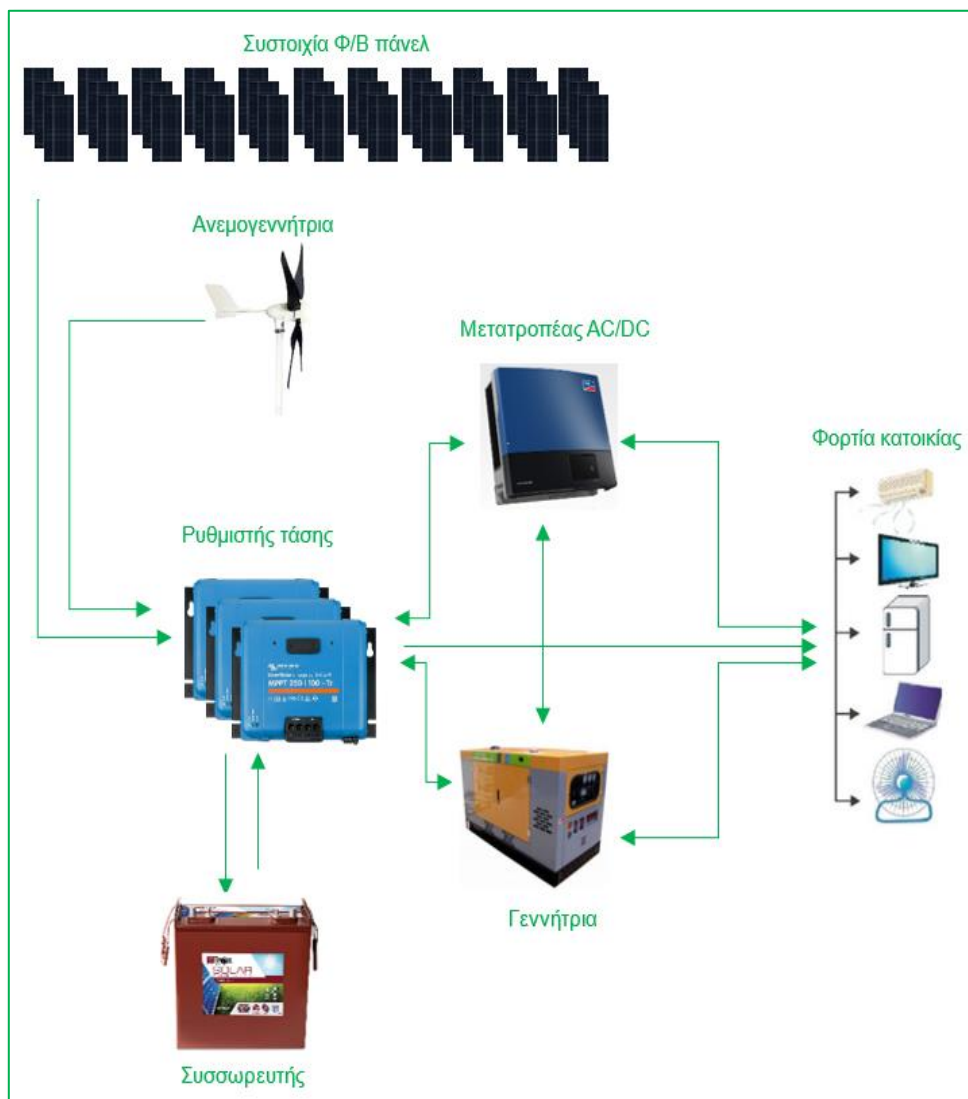
$$t_{\varphi} = \frac{\beta_{εκ} * C}{n_q * I_{\varphi}} \text{ (σε ώρες)} \quad (7.6)$$

Με

- $\beta_{εκ}=0,4$ το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή για 1-2 ημέρες
- t_{φ} : ο χρόνος φόρτισης
- $C=1230\text{Ah}$ η χωρητικότητα του συσσωρευτή
- n_q : ο βαθμός απόδοσης του φορτίου ($\frac{\text{φορτίο κατά την εκφόρτιση}}{\text{φορτίο κατά τη φόρτιση}}$, συνήθως 0,9)
- I_{φ} : ($=41\text{A}$) ρεύμα εκφόρτισης, όπως υπολογίσαμε παραπάνω

Απ' όπου παίρνω: $t_{\varphi}=(0,4 \times 1230)/(0,9 \times 41)=13,33$ ώρες ο χρόνος πλήρους φόρτισης του συστήματος συσσωρευτών από το Η/Ζ.

Ένα γραφικό διάγραμμα του υβριδικού συστήματός μας φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 158. Διάγραμμα αυτόνομου υβριδικού Φ/Β συστήματος

7.3.7 Συντήρηση Εγκατάστασης

Μπορεί μεν μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση να αντέχει δοκιμασμένα, τα ακραία καιρικά φαινόμενα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, αλλά η ορθή και απρόσκοπτη λειτουργία της εξαρτάται από τη συστηματική και περιοδική συντήρησή της. Είναι λογικό ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός τους λοιπόν να καταπονείται όντας εκτεθειμένος στις καιρικές συνθήκες αλλά ο προγραμματισμένος και τακτικός έλεγχος του συστήματος εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία του, την επιβράδυνση γήρανσης του συστήματος των συλλεκτών και κατά συνέπεια τη μακροχρόνια απόδοσή τους. Συνήθως μία οργανωμένη εταιρεία εγκατάστασης Φ/Β παρέχει πακέτα εγγυήσεως ανάλογα με τις ανάγκες του καταναλωτή.

Η προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει κυρίως τους παρακάτω ελέγχους:

- Εξαμηνιαίο έλεγχο όλων των συσφίξεων (μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού)
 - Έλεγχος συνδέσεων και καλωδιώσεων.
 - Έλεγχος πινάκων και υποπινάκων χαμηλής τάσης AC/DC.
 - Έλεγχος καλής λειτουργίας μετατροπών
 - Έλεγχος λειτουργίας φωτισμού, συναγερμού, καμερών και τηλεμετρίας.
 - Μέτρηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών όλων των στοιχειοσειρών (DC είσοδος μετατροπών)
 - Μέτρηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών στην έξοδο AC (έξοδος μετατροπών).
 - Μέτρηση με ειδικό εξοπλισμό της αντίστασης γείωσης, της μόνωσης και της συνέχειας των υπόγειων αγωγών
 - Θερμική αποτύπωση όλου του εξοπλισμού με ειδική κάμερα για εξεύρεση τυχόν αστοχίας
 - Εξαμηνιαία λίπανση τυχόν κινούμενων μερών
 - Εξαμηνιαίος καθαρισμός όλου του εξοπλισμού
 - Εξαμηνιαία αντισκωριακή προστασία
 - Αλλαγή, όποτε εντοπισθούν, τυχόν φθαρμένων υλικών
 - Ετήσιες μετρήσεις αντίστασης καλωδίων
 - Ετήσιες μετρήσεις αντικεραυνικής προστασίας και μετρήσεις γειώσεων.
 - Καθαρισμό Φ/Β πλαισίων με ειδικό εξοπλισμό

Η τακτική συντήρηση της εγκατάστασης και η ύπαρξη αντίστοιχου συμβολαίου συντήρησης από πιστοποιημένη εταιρεία εξειδικευμένου χαρακτήρα, επιβάλλεται από τις ασφαλιστικές εταιρείες προκειμένου αυτές να αποζημιώνουν τους ιδιοκτήτες φωτοβολταϊκών συστημάτων σε ενδεχόμενες βλάβες.

7.3.8 Κόστος Εγκατάστασης

Ένα τυπικό κόστος της παραπάνω Φ/Β εγκατάστασης με τα σημερινά δεδομένα (Αύγουστος 2020) φαίνεται παρακάτω:

Υλικό	Κατασκευαστής	Κόστος τμχ	Χαρακτηριστικά	Κόστος
Φ/Β πλαίσια	33 x Sharp 330Wp	136€	Εγγύηση 10 ετών, 245Wp σε NOCT Διαστάσεων 1956x992x35mm και μάζας 22.2kg	24023,23€ +ΦΠΑ
Αντιστροφέας & Φορτιστής	1 x SUNNY TRIPOWER 12000TL-US της εταιρίας SMA	2375€	Εγγύηση 5 ετών, Φόρτιση από Γεννήτρια/ ΔΕΗ) με δυνατότητες παραλληλισμού (cascade) και επέκτασης	
Ρυθμιστής Φόρτισης	1 x Victron Smart Solar MPPT 100A/150	548€	Εγγύηση 5 ετών, επεκτάσιμος με δυνατότητες παραλληλισμού (cascade), με δυνατότητα προγραμματισμού equalization (εξισορρόπηση) για μπαταρίες ανοιχτού τύπου και δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης μέσω bluetooth ή Internet	
Μπαταρίες	24 x SAGM 12 205A της TROJAN	555€	Εγγύηση 2 ετών, με βάση στήριξης, >2400 κύκλοι σε 50% εκφόρτιση)	
Βάσεις στήριξης	Προφίλ αλουμινίου	1500€	Με άγκιστρα INOX (για κεραμοσκεπή) και Προστασία από ηλεκτροχημική διάβρωση	
Ηλεκτρολογικό υλικό	Ασφάλειες DC φωτοβολταϊκών – Ασφάλειες μπαταριών – AC πίνακας με ρελέ – διακόπτη – ασφάλεια και μεταγωγικό τριών θέσεων		Μάρκας ABB – HAGER - NOARK	
Σωληνώσεις	Κουvidis Βαρέως τύπου		Condur – Conflex (Ελλάδα)	
Εγκατάσταση, εγγύηση, ρυθμίσεις, έλεγχος, After Sales, επίβλεψη	Με εγκατάσταση από ιδιόκτητο συνεργείο της εταιρείας		Εγγύηση καλής λειτουργίας 2 ετών (πέραν των επιμέρους εγγυήσεων), προγραμματισμός inverter – ρυθμιστή με υπολογιστή και on – site έλεγχο κάθε συνθήκης λειτουργίας και κάθε πιθανής βλάβης	
Γεννήτρια	GF3-20 της PRAMAC 25kVA	6193,8€	Αθόρυβη τριφασική γεννήτρια πετρελαίου, ανοιχτού τύπου με μίζα και σταθεροποιητή τάσης	
Ανεμογεννήτρια	2 x Ανεμογεννήτριες Sunnily X-600	1364€	Ονομαστικής ισχύος 600Watts με εξωτερικό ρυθμιστή φόρτισης με οθόνη	
			Σύνολο (Τιμές Ιουλίου 2020):	29788,8€

Εικόνα 159. Κατ' εκτίμηση κόστος Φ/Β εγκατάστασης

Το παραπάνω σύστημα είναι ικανό να τροφοδοτήσει αυτόνομα τη σύγχρονη κατοικία για την οποία έγινε η μελέτη αναλογιζόμενοι όμως τα παρακάτω:

- Απαιτείται να ληφθεί υπόψη το κόστος πετρελαίου για τη λειτουργία της γεννήτριας για τις ημέρες όπου τα Φ/Β δε θα αποδίδουν λόγω έλλειψης ηλιοφάνειας, δηλαδή για 3 μήνες (90 ημέρες) επί 4,44 ώρες την ημέρα, ήτοι 399,6 ώρες. Αν στο 75% της ισχύος της γεννήτριας αυτή καταναλώνει περίπου 3,5 λίτρα την ώρα τότε απαιτούνται ετησίως ~1400 λίτρα πετρέλαιο και με σημερινή τιμή πετρελαίου (~1,1€/λίτ) απαιτούνται ετησίως 1538€ ετησίως και περίπου 40€ για την ετήσια συντήρησή της, δηλαδή συνολικά ~1578€.

- Επιπλέον για τη θέρμανση της κατοικίας μέσω του ενεργειακού τζακιού θεωρητικά απαιτούνται για τους 3 μήνες χαμηλών θερμοκρασιών στην περιοχή (λαμβάνοντας υπόψη ότι η κατοικία προστατεύεται από ειδική θερμοπρόσοψη) περίπου ~3 τόνοι ξυλείας ήτοι ~300€ ετησίως.

- Για την ετήσια συντήρηση της Φ/Β εγκατάστασης απαιτούνται ~50€, συνήθως μετά τη διετία αφού τότε η εγκατάσταση βρίσκεται σε καθεστώς εγγύησης του κατασκευαστή/εγκαταστάτη (τα πάνελ έχουν εγγύηση 25 χρόνια).

Συνολικά δηλαδή $1578+300+50=1928\text{€}$ ετησίως με αυτόνομη υβριδική Φ/Β εγκατάσταση.

Αν δεν προβαίναμε σε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος, από την εφαρμογή της ΔΕΗ για τον υπολογισμό του ρεύματος στην ίδια κατοικία με εγκατάσταση τριφασικής παροχής και για οικιακό τιμολόγιο Γ1, για $17,712 \times 30(\text{ημέρες}) \times 4(\text{μήνες}) = 2125,44\text{KWh}$ διαπιστώνουμε ότι για 120 ημέρες ο λογαριασμός του ηλεκτρικού ρεύματος θα ήταν:

- Χρεώσεις Προμήθειας: 259,96€
- Χρεώσεις Ρυθμιζόμενες: 137,70€
- Αξία Ρεύματος: 427,25€

Σύνολο: 824,91€ το τετράμηνο και ετησίως: 2474,73€

Υπολογισμός ΔΕΗ

Ημερομηνία τελευταίας ενημέρωσης: 26/05/2020

Νυχτερινό ☐ Ημέρες: 120 Τριφασικό ☐ Ισχύς παροχής (kW): 15

kWh: 2125 Όριο kWh/μήνα για KOT: 1400 Έκπτωση 5% ☐

Οι τιμές των πινάκων αντιστοιχούν ΑΥΤΟΜΑΤΑ κάθε φορά που αλλάζει κάποια τιμή από τις ρυθμίσεις. Η επεξεργασία των ποσών ανήκει στο "Οικιακό - Γ1". Στην "Αξία Ρεύματος" ΔΕΗ περιλαμβάνονται χρεώσεις για ΕΡΤ και Δραματικό Τέλος

Τιμολόγιο	Χρεώσεις Προμήθειας	Χρεώσεις Ρυθμιζόμενες	Αξία Ρεύματος	€/kWh
Οικιακό - Γ1	259,96€	137,70€	427,25€	0,20106€
Επαγγελματικό - Γ21	263,12€	135,41€	435,56€	0,20497€
Κοινωνικό Οικιακό - KOT A'	153,96€	36,27€	207,40€	0,09760€
Κοινωνικό Οικιακό - KOT B'	195,96€	96,04€	315,78€	0,14860€
Προσωπικού ΔΕΗ - ΓΠ	181,27€	137,70€	344,51€	0,16212€

Για σύγκριση όλων των παρόντων ενδείξεων, επισκεφτείτε την παύλ κατά σειρά: www.energinet.gr

Κόστος χρήσης οικιακών συσκευών

(kWh: 2125)

Οικιακό - Γ1

Εικόνα 160. Κόστος χρήσης οικιακών συσκευών με ρεύμα παρόχου [124]

Υπολογίζοντας και το πετρέλαιο θέρμανσης αν η κατοικία διαθέτε καυστήρα πετρελαίου θα απαιτούνταν περίπου 1600λίτρα πετρελαίου, με σημερινή τιμή 0,95€/λίτρο θα απαιτούνταν ετησίως: 1520€. Αθροίζοντας και 50€ ετησίως περίπου για τη συντήρηση του καυστήρα θα απαιτούνταν για τα έξοδα καυστήρα: 1570€. Συνολικά δηλαδή 2474,73+1570~**4045€**.

Αφαιρώντας 4045-1928=**2217€ ετήσια διαφορά** και αν η εγκατάστασή μας στοιχίζει 29788,8€ θα κάναμε απόσβεση σε 13,44 χρόνια. Αν αφαιρούσαμε τις δύο ανεμογεννήτριες, αφού πρακτικά δεν προσφέρουν αξιόλογη ενέργεια λόγω των χαμηλών ταχυτήτων των αέριων μαζών στην περιοχή, τότε το σύστημά μας θα στοίχιζε 28424,8€ και θα κάναμε απόσβεση σε 12,82 χρόνια.

Μπορεί το κεφάλαιο που θα δαπανήσουμε για την αρχική εγκατάσταση του Φ/Β μας συστήματος να φαίνεται υψηλό και σίγουρα να υπάρχουν διαφορές με τις παρούσες «προσφορές» εταιρειών που υπάρχουν στο διαδίκτυο και οι οποίες να είναι καλύτερες λόγω κρυφών χρεώσεων ή υπερεκτίμησης των προσφερόμενων συστημάτων αλλά πλέον μιλάμε για μία πλήρη οικονομική απεξάρτηση μιας σύγχρονης κατοικίας από το δίκτυο της ΔΕΗ, **εφόρου ζωής**, εφόσον πληρούνται οι οδηγίες του κατασκευαστή, του εγκαταστάτη και πραγματοποιούνται οι προβλεπόμενες συντηρήσεις.


7.4 Συμπερασματικά

Αυτό που πρέπει να γνωρίζει ο ιδιοκτήτης μιας μονοκατοικίας προτού εγκαταστήσει ένα αυτόνομο Φ/Β σύστημα είναι ότι ο δημόσιος φορέας που επιβάλλεται να ενημερωθεί προτού λάβουν χώρα εργασίες σε μια στέγη είναι η Πολεοδομία κατόπιν του Νόμου 4495/2017 (ΦΕΚ 167/Α/3-11-2017) ο οποίος όμως δεν ξεκαθάριζε τις εργασίες για τοποθέτηση βάσεων στήριξης και φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Γι' αυτό το λόγο ψηφίστηκε ο Νόμος 4685/13-5-2020 σύμφωνα με τον οποίο η εκτέλεση εργασιών μικρής κλίμακας επιτρέπεται:

- σε κτίρια νομίμως υφιστάμενα, σε κτίρια ή τμήματα κτιρίων τα οποία έχουν εξαιρεθεί της κατεδάφισης ή έχουν υπαχθεί σε οποιονδήποτε νόμο εξαίρεσης από την κατεδάφιση
- σε τακτοποιημένα αυθαίρετα, καθώς και σε οικόπεδα ή γήπεδα εφόσον:

- ο δεν παραβιάζονται οι πολεοδομικές διατάξεις
- ο σε οικόπεδα, γήπεδα ή κτίσματα, που δεν βρίσκονται σε δάσος, ρέμα, αιγιαλό ή παραλία, σε καθορισμένο αρχαιολογικό χώρο όπου απαγορεύεται η δόμηση, σε περιοχή απολύτου προστασίας, σε εγκεκριμένο κοινόχρηστο χώρο της πόλης ή του οικισμού, σε κτίρια που είναι στατικά επικίνδυνα, πριν αρθεί η επικινδυνότητα, σε τμήμα κτιρίου που έχει κατασκευαστεί μετά τη θεσμοθέτηση παρόδιας στοάς και



εμπίπτει σε αυτήν, παρά το όριο διεθνών, εθνικών, επαρχιακών, δημοτικών ή κοινοτικών οδών εντός ζώνης πλάτους πενήντα τοις εκατό (50%) των οριζόμενων από τη νομοθεσία για την ασφάλεια της υπεραστικής συγκοινωνίας

- σε ρυμοτομούμενα κτίρια επιτρέπεται μόνο για τις εκ του νόμου επιτρεπόμενες εργασίες σε αυτά


Διακρίνονται δε, ξεκάθαρα οι εργασίες που μπορούν να εκτελεστούν με άδεια μικρής κλίμακας, μεταξύ άλλων:

- εργασίες εξωτερικών χρωματισμών ή αντικατάσταση κιγκλιδωμάτων ή επισκευή επιχρισμάτων ή επισκευή όψεων, με χρήση ικριωμάτων
- εσωτερικές διαρρυθμίσεις, καθώς και εργασίες αλλαγής χρήσης για τις οποίες, δεν απαιτείται η έκδοση οικοδομικής αδείας, με την προϋπόθεση ότι δεν θίγονται τα στοιχεία του φέροντος οργανισμού του κτιρίου και δεν μεταβάλλονται προς το δυσμενέστερο τα φορτία και η κατηγορία σεισμικής σπουδαιότητας σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό
- τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης ή παθητικών ηλιακών συστημάτων στις εξωτερικές όψεις
- ανακατασκευή στέγης
- εγκατάσταση αυτόνομου συστήματος θέρμανσης
- στέγαστρα και προστεγάσματα, υπό προϋποθέσεις
- εργασίες εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων
- εργασίες εγκατάστασης ανεμογεννητριών

Εφόσον λοιπόν από την εγκατάσταση του Φ/Β συστήματος σε μονοκατοικία δεν προσβάλλεται κατασκευαστικά το κτίριο και εφόσον δε λειτουργεί ταυτόχρονα με το υφιστάμενο δίκτυο του παρόχου και έχει ληφθεί η απαραίτητη άδεια από την Πολεοδομία, ο ιδιοκτήτης μπορεί να προβεί στην έναρξη των εργασιών.


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- [1] Vivint.Solar, (2018) «History of solar energy: Who invented solar panels?», <https://www.vivintsolar.com/learning-center/history-of-solar-energy>
- [2] Matthew S., Institute for Energy Research – IER (18 Φεβ 2016), «History of solar power», <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/solar/history-of-solar-power/>
- [3] <http://ecododonea.blogspot.com/2014/06/blog-post.html>
- [4] <https://energypress.gr/news/kindyneoyon-den-stirihthoyn-ta-ellinika-ergostasia-fotovoltaiikon>
- [5] Helapco, Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, (2 Απρ 2020), «Στατιστικά στοιχεία αγοράς Φ/Β για το 2019», https://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2019_2Apr2020.pdf
- [6] Τσαβδάρης Γ. (27 Ιαν 20), «Στατιστικά Ηλιοφάνειας για την Ελλάδα», <https://www.meteology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>
- [7] Μαρκάτου Μ. (2011) «Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος», , Πανεπιστήμιο Πατρών
- [8] Δέρβος Θ. Κωνσταντίνος, (2013), Φωτοβολταϊκά συστήματα: Από τη θεωρία στην πράξη, Κωνσταντίνος Θ., Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ
- [9] HelioSystems, (2019) Φωτοβολταϊκά στοιχεία – Αποδόσεις Φ/Β στοιχείων, https://selasenergy.gr/fv_systems.php
- [10] Helapco, Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών (Αυγ 2013), Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός, https://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf
- [11] Manimekalai P., Harikumar R., Raghavan S., An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems, *International Journal of Computer Applications* (0975 –8887) Vol. 82 –No 12, November 2013
- [12] David Spiers, Chapter IIB-2 - Batteries in PV Systems, Editor(s): Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castañer, *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*, Academic Press, 2012, Pages 721-776
- [13] Linden D., Reddy T., (2001), “Handbook of Batteries”, Mc Graw – Hill, 3rd edition
- [14] Markvart T., Castaner L., (2003) “Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications”, Elsevier Ltd
- [15] Luque A., Hegedus S., (2003) “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, John Wiley & Sons Ltd
- [16] US DOE (09/1995), “Primer on Lead Acid Storage Batteries Handbook”, Department of Energy, United States of America (DOE-HDBK-1084-95, September 1995)
- [17] Kiehne H., (2003), “Battery Technology Handbook”, Marcel Dekker Inc, 2nd edition
- [18] Klochko K., USGS/NMIC, (2016), Lead Statistics and Information, Natural Minerals Information Center/ United States Geological Survey, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/lead-statistics-and-information>
- [19] Φωτοβολταϊκά συστήματα, (2015), «Συστήματα στήριξης», <https://www.fotovoltaiкасystems.gr/systems-stirixis.html>
- [20] Thiele T., The Spruce (26 Ιουν 2019), «How an electric meter reads power usage», <https://www.thespruce.com/how-electric-meters-read-power-1152754>
- [21] Energy Education, University of Calgary, (28 Απρ 2020), «Electric meter», https://energyeducation.ca/encyclopedia/Electric_meter
- [22] Παπαδόπουλος Θ. (2019), «Έξυπνα Ενεργειακά Δίκτυα», Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
- [23] Gautami, Sarika & Tiwari, Rajeev & Scholar, M & Vishwavidyalaya, Barkatullah. (2017). A Survey on Smart Grid-Connected Photovoltaic Power Systems and Its Issues. *IJOSTHE*. 4. 6. 10.24113/ojsports.v4i3.87
- [24] M. Yazdani and A. Mehrizi-Sani, "Distributed Control Techniques in Microgrids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2901-2909, Nov. 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2337838
- [25] Konstantinos Demertzis, (2018), «Smart Energy Grids», Democritus University of Thrace
- [26] Christopher Greer, David A. Wollman, Dean E. Prochaska, Paul A. Boynton, Jeffrey A. Mazer, Cuong T. Nguyen, Gerald J. FitzPatrick, Thomas L. Nelson, Galen H. Koepke, Allen R. Hefner Jr., Victoria Y. Pillitteri, Tanya L. Brewer, Nada T. Golmie, David H. Su,

- 
- Allan C. Eustis, David G. Holmberg, Steven T. Bushby (01 Oct 2014), «NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards», Release 3.0, National Institute of Standards and Technology Publications, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1108r3>
- [27] Dr. Saikat Chakrabarti, (2018), «Smart Grid Concept & Deployment», Department of Electrical Engineering IIT, Kanpur
- [28] Min Lia, Wenbin Gub, Wei Chenc, Yeshen Hed, Yannian Wud, Yiying Zhange, (2018), «Smart Home: Architecture, Technologies and Systems», 8th International Congress of Information and Communication Technology (ICICT), Procedia Computer Science 131 (2018) 393–400
- [29] Ma, Yonghong; Li, Baixuan. 2020. "Hybridized Intelligent Home Renewable Energy Management System for Smart Grids" Sustainability 12, no. 5: 2117. <https://doi.org/10.3390/su12052117>
- [30] C. Wan, J. Zhao, Y. Song, Z. Xu, J. Lin and Z. Hu, "Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 1, no. 4, pp. 38-46, Dec. 2015, doi: 10.17775/CSEEJPES.2015.00046
- [31] US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, (2019) <https://www.energy.gov/energysaver/installing-and-maintaining-small-wind-electric-system>
- [32] James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. Rogers, (2010), «Wind Energy Explained – Theory, Design and Application», 2nd Edition – Wiley Publications

ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- [1] [Πηγή: <https://www.bannerpowersolutions.com/wp-content/uploads/pv-cell-close-up.png>]
- [2] [Πηγή: http://hellas-economy.blogspot.com/2014/08/blog-post_31.html]
- [3] [Πηγή: https://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2019_2Apr2020.pdf]
- [4] [Πηγή: https://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2019_2Apr2020.pdf]
- [5] [Πηγή: https://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2019_2Apr2020.pdf]
- [6] [Πηγή: https://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2019_2Apr2020.pdf]
- [7] [Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power]
- [8] [Πηγή: https://www.wikiwand.com/en/Thermal_mass]
- [9] [Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Incoming-solar-radiation-with-reflection-and-absorption-in-the-Earth-13_fig3_327113204]
- [10] [Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Annual-average-solar-irradiance-distribution-over-the-surface-of-the-Earth-11_fig2_320264172]
- [11] [Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Annual-average-solar-energy-potential-of-Turkey-by-region_tbl1_286191391]
- [12] [Πηγή: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/15642/1/DT2010-0052.pdf>]
- [13] [Πηγή: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php>]
- [14] [Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_energy_budget]
- [15] [Πηγή: <https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/683>]
- [16] [Πηγή: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Total_primary_energy_supply]
- [17] [Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Sunshine_duration]
- [18] [Πηγή: <https://scijinks.gov/climate-zones/>]
- [19] [Πηγή: <https://www.statista.com/chart/12915/chasing-the-sun/>]
- [20] [Πηγή: <https://www.meteorology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>]
- [21] [Πηγή: <https://www.meteorology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>]
- [22] [Πηγή: <https://www.meteorology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>]
- [23] [Πηγή: <https://www.meteorology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>]
- [24] [Πηγή: <https://www.meteorology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>]
- [25] [Πηγή: <https://www.meteorology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>]
- [26] [Πηγή: <https://www.meteorology.gr/statistika-iliofaneias-gia-tin-ellada/>]
- [27] [Πηγή: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/greece>]
- [28] [Πηγή: <https://astrolabesailing.com/2016/10/05/celestial-navigation-the-celestial-sphere/>]
- [29] [Πηγή: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/greece>]
- [30] [Πηγή: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe>]
- [31] [Πηγή: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/greece>]
- [32] [Πηγή: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>]
- [33] [Πηγή: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>]
- [34] [Πηγή: <http://www.tmth.gr/home/59-applications/560-photovoltaika>]
- [35] [Πηγή: <https://www.britannica.com/science/ferrous-chloride>]
- [36] [Πηγή: <https://byjus.com/physics/extrinsic-semiconductors/>]
- [37] [Πηγή: <https://byjus.com/physics/extrinsic-semiconductors/>]
- [38] [Πηγή: <https://byjus.com/physics/extrinsic-semiconductors/>]
- [39] [Πηγή: <https://www.solarschools.net/knowledge-bank/renewable-energy/solar/how-a-pv-cell-works>]
- [40] [Πηγή: <https://www.climacheap.gr/aftonomo-fwtovoltaiko-systhma.php>]
- [41] [Πηγή: <https://www.energy.gov/energysaver/buying-and-making-electricity/hybrid-wind-and-solar-electric-systems>]
- [42] [Πηγή: <https://www.oleng.eu/net-metering/>]
- [43] [Πηγή: https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc_ape11.pdf]
- [44] [Πηγή: https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc_ape11.pdf]
- [45] [Πηγή: https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/resources/gr07/-Chapter_7_GR.pdf]
- [46] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
- [47] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
- [48] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
- [49] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]

- 
- [50] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
 - [51] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
 - [52] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
 - [53] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
 - [54] [Πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php]
 - [55] [Πηγή: http://ikee.lib.auth.gr/record/291766/files/_____.pdf]
 - [56] [Πηγή: <https://slideplayer.gr/slide/2596087/>]
 - [57] [Πηγή: <http://www.solarselections.co.uk/blog/solar-panel-installation-how-tilt-shading-and-orientation-affect-performance>]
 - [58] [Πηγή: [https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/2924/3/Nimertis_Prodromidis-\(phy\).pdf](https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/2924/3/Nimertis_Prodromidis-(phy).pdf)]
 - [59] [Πηγή: <https://www.pinterest.com/pin/54746951706390217/>]
 - [60] [Πηγή: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>]
 - [61] [Πηγή: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/hot-spot-heating>]
 - [62] [Πηγή: <https://www.floatingsolarmounting.com/news/hot-spot-heating-and-pid-effect-on-pv-modules.html>]
 - [63] [Πηγή: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/hot-spot-heating>]
 - [64] [Πηγή: <https://www.pveurope.eu/installation/solar-installations-grow-additional-142-gw-2020>]
 - [65] [Πηγή: <https://z-group.gr/energy/fotovoltaiika-susthmata-me-apothikeusi-kai-energeiako-simpsifismo/>]
 - [66] [Πηγή: https://www.researchgate.net/profile/Manimekalai_Ponnusamy/publication/-260632293_An_Overview_of_Batteries_for_Photovoltaic_PV_Systems/links/5690987008aee91f69a172d6/An-Overview-of-Batteries-for-Photovoltaic-PV-Systems.pdf]
 - [67] [Πηγή: https://www.researchgate.net/profile/Manimekalai_Ponnusamy/publication/-260632293_An_Overview_of_Batteries_for_Photovoltaic_PV_Systems/links/5690987008aee91f69a172d6/An-Overview-of-Batteries-for-Photovoltaic-PV-Systems.pdf]
 - [68] [Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Separator_\(electricity\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Separator_(electricity))]
 - [69] [Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Lead-acid-battery-chemistry-a-during-discharging-b-during-charging-and-c-LA_fig4_311305861]
 - [70] [Πηγή: <https://industrialbatterypros.com/genesis-np7-12-battery-12-volt-7-0ah-enersys-yuasa-187-terminals/>]
 - [71] [Πηγή: <https://energymag.net/dod-depth-of-discharge/>]
 - [72] [Πηγή: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/>]
 - [73] [Πηγή: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/valve-regulated-lead-acid-vrla-batteries/>]
 - [74] [Πηγή: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-characteristics/summary-and-comparison-of-battery-characteristics>]
 - [75] [Πηγή: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/>]
 - [76] [Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319310043>]
 - [77] [Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319310043>]
 - [78] [Πηγή: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-new-tesla-powerwall-is-actually-two-different-products>]
 - [79] [Πηγή: https://www.tesla.com/en_eu/powerwall]
 - [80] [Πηγή: <https://electrek.co/guides/tesla-powerpack/>]
 - [81] [Πηγή: <https://www.tesla.com/support/energy/powerwall/learn/system-design>]
 - [82] [Πηγή: https://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf]
 - [83] [Πηγή: <https://www.e-education.psu.edu/eme810/node/534>]
 - [84] [Πηγή: Φ/Β Συστήματα: Από τη θεωρία στην πράξη, Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, Καθηγητής ΕΜΠ, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ]
 - [85] [Πηγή: <https://www.fotovoltaiika-systems.gr>]
 - [86] [Πηγή: <https://www.fotovoltaiika-systems.gr>]
 - [87] [Πηγή: <https://www.fotovoltaiika-systems.gr>]
 - [88] [Πηγή: <https://www.fotovoltaiika-systems.gr>]
 - [89] [Πηγή: <https://www.fotovoltaiika-systems.gr>]
 - [90] [Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_meter]
 - [91] [Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_meter]
 - [92] [Πηγή: <https://www.fotovoltaiika-systems.gr>]

- [93] [Πηγή: <https://www.fotovoltaiika-systems.gr>]
- [94] [Πηγή: <http://www.allkabel.eu/power-cables-061-kv-nyy/>]
- [95] [Πηγή: <https://www.readworks.org/article/The-Lightning-Rod/87bc6fd3-a468-4668-b89c-9b4d72becdbb#!articleTab:content/>]
- [96] [Πηγή: <https://www.topcable.com/blog-electric-cable/en/electrical-cable-types/>]
- [97] [Πηγή: [https://maredu.gunet.gr/modules/document/file.php/MAK200/Synchronous Generators v%o.pdf](https://maredu.gunet.gr/modules/document/file.php/MAK200/Synchronous%20Generators%20v%20.pdf)]
- [98] [Πηγή: <https://www.energy.gov/energysaver/installing-and-maintaining-small-wind-electric-system>]
- [99] [Πηγή: <https://www.amazon.co.uk/BuoQua-Vertical-Generator-Magnetic-Levitation/dp/B07Z63CHC8>]
- [100] [Πηγή: <https://www.amazon.com/Windmax-HY400-12-Volt-Residential-Generator/dp/B001CZIH0>]
- [101] [Πηγή: <https://www.amazon.com/Nature-Power-70701-Turbine-2-Marine/dp/B00F4YANYU>]
- [102] [Πηγή: https://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_small_wind_electric_system_tower.html]
- [103] [Πηγή: <https://www.nist.gov/el/smart-grid/about-smart-grid/smart-grid-beginners-guide>]
- [104] [Πηγή: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1108r2.pdf>]
- [105] [Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-Smart-Grid-Architecture-Model-SGAM-based-on-14_fig1_315117587]
- [106] [Πηγή: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1108r2.pdf>]
- [107] [Πηγή: <https://www.learnbse.in/computer-networking-class-12-notes/>]
- [108] [Πηγή: <https://www.cnx-software.com/2011/02/26/freescale-home-energy-gateway-reference-platform/>]
- [109] [Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Overall-architecture-of-hybridized-intelligent-home-renewable-energy-management-HIHREM_fig2_339836031]
- [110] [Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720303582>]
- [111] [Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Sample-of-a-feed-forward-neural-network_fig1_234055177]
- [112] [Πηγή: <https://www.semanticscholar.org/paper/Photovoltaic-and-solar-power-forecasting-for-smart-Wan-Zhao/ee6728ba0cedd2f4759dfcf6c1d459798fafcc5d>]
- [113] [Πηγή: <https://www.energeiakes-lyseis.gr/αυτόνομα-φωτοβολταϊκά-συστήματα/>]
- [114] [Πηγή: https://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf]
- [115] [Πηγή: www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/]
- [116] [Πηγή: www.suncalc.org]
- [117] [Πηγή: www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/]
- [118] [Πηγή: www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/]
- [119] [Πηγή: www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/]
- [120] [Πηγή: www.globalsolaratlas.info]
- [121] [Πηγή: www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/]
- [122] [Πηγή: [x600_wind_turbine_schematic.jpg \(513x300\) \(ecopowershop.com\)](#)]
- [123] [Πηγή: <https://www.dei.gr/el/oikiakoi-pelates/timologia-mar262020>]
- [124] [Πηγή: <https://kantoliana.gr/dei>]

