



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

*Σχηματισμός συνάρτησης ελάχιστου ετήσιου ισοδύναμου κόστους
κατασκευής-λειτουργίας φωτοβολταϊκού σταθμού σε περίπτωση αυτόνομου
συστήματος με χρήση μπαταριών*



Φοιτητής: Μπάντος Κωνσταντίνος

ΑΜ: 47401

Επιβλέπων Καθηγητής

Βόκας Γεώργιος

Καθηγητής, Μέλος Δ.Ε.Π

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Σεπτέμβρης 2021



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS
ENGINEERING

Diploma Thesis

Formation of a function of minimum annual equivalent construction operation costs for an autonomous photovoltaic system using batteries



Student: Bantos Konstantinos

Registration Number: 47401

Supervisor

Vokas Georgios

Professor, Faculty Member

ATHENS-EGALEO, September 2021

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

ΒΟΚΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Καθηγητής)	ΚΑΛΚΑΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (Επίκουρος Καθηγητής)	ΚΟΝΤΑΞΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ (Λέκτορας Εφαρμογών)
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Μπάντος Κωνσταντίνος και Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σεπτέμβριος, 2021

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της. Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής. Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα. Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία: 21 / 9 / 2022


Μπάντος Κωνσταντίνος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον σπουδαστή Μπάντο Κωνσταντίνο του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022, υπό την επίβλεψη του καθηγητή και μέλους Δ.Ε.Π. κ. Βόκα Γεώργιο.

Αφιερώνω τη παρούσα εργασία στην οικογένειά μου και τη σύντροφό μου, που με στήριξαν οικονομικά και ψυχολογικά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, που πίστεψαν σε μένα και επένδυσαν για τις γνώσεις μου.

Ευχαριστώ τον κ. Βόκα για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου πρόσφερε όταν χρειάστηκε, αλλά και για την βοήθεια του να ξεπεραστεί κάθε εμπόδιο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη, την έρευνα και την ανάλυση της μεθοδολογίας με σκοπό τον σχηματισμό μιας συνάρτησης υπολογισμού του ελάχιστου ισοδύναμου κόστους, τόσο για την κατασκευή, όσο και για τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού σταθμού στην περίπτωση που απαιτείται αυτόνομο σύστημα ενέργειας με χρήση μπαταριών.

Με τη βοήθεια της βιβλιογραφίας, έγινε έρευνα με σκοπό την όσο τον δυνατόν συντομότερη, αλλά πληρέστατη, περιγραφή τόσο των βασικών, όσο και πιο λεπτομερών παραμέτρων που απαρτίζουν σήμερα ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. Γίνεται εμβάθυνση στα κύρια μέρη που αποτελείται ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό πάρκο και τονίζονται τα σημεία που πρέπει να γίνουν ακριβείς υπολογισμοί. Σε μεμονωμένο κεφάλαιο υπολογίζονται οι ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ενός μέσου νοικοκυριού της χρονιάς 2022, και επεκτείνονται στις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ενός οικισμού, με όλες τις παράπλευρες απαιτήσεις αυτού (κοινοτικός φωτισμός, δημόσια κτήρια, κ.λπ.). Ακολουθεί μεθοδολογία για τον σωστό υπολογισμό και τη σωστή διαστασιολόγηση ενός τέτοιου έργου, με βάση την θεωρία που παρουσιάστηκε, καθώς και έλεγχος αυτής με εκτεταμένο παράδειγμα και σύγκριση των αποτελεσμάτων με προσομοίωση που γίνεται στο λογισμικό PVSyst. Τέλος γίνεται οικονομική ανάλυση ενός επενδυτικού πλάνου για αυτόνομο φωτοβολταϊκό πάρκο με χρήση μπαταριών, και παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του ελάχιστου ετήσιου ισοδύναμου κόστους.

Η παρούσα διπλωματική, παρουσιάζει ένα πλήρη οδηγό με την χρήση του οποίου, ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός δύναται να σχηματίσει μία μελέτη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με το ελάχιστο ετήσιο ισοδύναμο κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

Λέξεις – κλειδιά

Αυτόνομο φωτοβολταϊκό πάρκο, μπαταρίες μόλυβδου, μεθοδολογία, ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες οικίας - οικισμού, PVSyst, φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ετήσιο ισοδύναμο κόστος.

ABSTRACT

The object of this dissertation is the study, research and analysis of the methodology in order to form a function of calculation of the minimum equivalent cost, both for the construction and for the operation of a photovoltaic station in case of an autonomous energy system, with use of batteries, is needed.

With the help of the bibliography, research was conducted in order to describe as quickly as possible, but very complete, both the basic and more detailed parameters that make up a photovoltaic park today. The main parts that make up an autonomous photovoltaic park are deepened and the points that need to be made accurate calculations are emphasized. An individual chapter calculates the electricity needs of an average household in 2022, and extends to the electricity needs of a settlement, with all its ancillary requirements (community lighting, public buildings, etc.). The following paragraphs consists of a methodology for the correct calculation and dimensioning of such a project, based on the theory presented, as well as checking it with an extensive example and comparing the results with a simulation done in PVSyst software. Finally, a financial analysis of an investment plan for an autonomous photovoltaic park using batteries is made, and the way of calculating the minimum annual equivalent cost is presented.

This dissertation presents a complete guide with the use of which, an electrical engineer can form a study of an autonomous photovoltaic park with the minimum annual equivalent cost of construction and operation.

Keywords

Autonomous photovoltaic park, lead batteries, methodology, electrical energy needs of the house - settlement, PVSyst, photovoltaic panel, annual equivalent cost.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
Λέξεις – κλειδιά	6
ABSTRACT	7
Keywords	7
Κατάλογος Πινάκων.....	12
Κατάλογος Εικόνων	13
Κατάλογος Σχημάτων	15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	18
Σκοπός και στόχοι	18
Μεθοδολογία.....	18
Καινοτομία.....	19
1 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	21
1.1 Ηλιακή σταθερά.....	21
1.2 Ηλιακή ακτινοβολία	21
1.2.1 Άμεση ηλιακή ακτινοβολία	21
1.2.2 Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία	21
1.2.3 Ολική ακτινοβολία.....	22
1.2.4 Ωριαία γωνία.....	22
1.2.5 Αζιμούθια γωνία επιφάνειας.....	22
1.3 Ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας	23
1.4 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης.....	23
1.5 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, στην επιφάνεια της γης.....	24
1.6 Σταθερή ετήσια κλίση φωτοβολταϊκού πλαισίου	25
2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	27
2.1 Φωτοβολταϊκό κελί	27
2.2 Αρχή Λειτουργίας	28
2.2.1 Ηλεκτρονική δομή των ημιαγωγών	28
2.2.2 Μαθηματικό μοντέλο.....	30

2.3	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο & συστοιχία	30
2.3.1	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	31
2.3.2	Φωτοβολταϊκή συστοιχία	33
2.3.3	Επίδραση θερμοκρασίας.....	34
3	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	36
3.1	Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα	36
3.2	Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.....	36
3.3	Αντιστροφέας (Inverter)	37
3.4	Ρυθμιστής φόρτισης	39
3.5	Συσσωρευτές – Αποθήκευση ενέργειας	40
3.6	Βοηθητικός εξοπλισμός	40
3.6.1	Βάσεις στήριξης.....	40
3.6.2	Ηλεκτρολογικοί πίνακες – Καλωδιώσεις	40
3.7	Κατανάλωση – Φορτία.....	41
3.8	Αυτοδυναμία συστήματος	41
4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ	
	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ.....	43
4.1	Απαιτήσεις οικίας σε ηλεκτρική ενέργεια	43
4.2	Απαιτήσεις οικισμού σε ηλεκτρική ενέργεια	46
4.2.1	Οικιακοί καταναλωτές	46
4.2.2	Λοιπές καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας σε οικισμό	47
4.2.3	Συνολικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας σε οικισμό.....	50
5	ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	53
5.1	Συσσωρευτής μολύβδου	53
5.2	Τρόποι σύνδεσης συσσωρευτών	55
5.2.1	Σύνδεση σε σειρά.....	56
5.2.2	Παράλληλη σύνδεση	56
5.2.3	Μικτή σύνδεση	57
6	ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Φ/Β	
	ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	60
6.1	Αντιστροφέας	60
6.1.1	Επιλογή αντιστροφέα/έων	61
6.1.2	Είσοδος/Εξοδος αντιστροφέα.....	63
6.2	Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.....	64

6.3	Διαστασιολόγηση πάρκου	67
6.3.1	Πλαίσια	68
6.4	Διατομή καλωδίων.....	70
6.4.1	Διαδρομή κλάδου – αντιστροφή	70
6.4.2	Διαδρομή αντιστροφή – πεδίου ζεύξης.....	71
6.4.3	Διαδρομή πεδίου ζεύξης – δίκτυο ηλεκτροδότησης.....	72
6.5	Χώρος εγκατάστασης	72
6.5.1	Γνώση του χώρου εγκατάστασης	72
6.5.2	Μεθοδολογία υπολογισμού ελάχιστου χώρου εγκατάστασης.....	73
6.6	Γείωση	75
7	ΈΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PVSYSYΤ.....	78
7.1	Υπολογισμός απαιτήσεων οικισμού σε ηλεκτρική ενέργεια	78
7.2	Διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση των εξισώσεων.....	79
7.3	Διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση του προγράμματος PVSyst	95
8	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	99
8.1	Αξία του χρήματος.....	99
8.2	Κριτήρια αξιολόγησης επενδυτικών δανείων	100
8.2.1	Καθαρή παρούσα αξία – ΚΠΑ (Net present value - NPV)	100
8.2.2	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης – ΕΒΑ (Internal rate of return - IRR).....	101
8.2.3	Λόγος οφέλους/κόστους (Benefit/Cost Ratio - BCR)	101
8.2.4	Έντοκη περίοδος αποπληρωμής – ΕΠΑ (Discounted pay back period - DPB)	102
8.2.5	Παρούσα αξία συνολικού κόστους και ισοδύναμου ετήσιου κόστους.....	102
8.3	Δυνατότητες χρηματοδότησης.....	103
8.3.1	Συνηθισμένες μορφές χρηματοδότησης	103
8.3.2	Σύγχρονοι χρηματοδοτικοί μηχανισμοί.....	103
8.4	Μέθοδοι εξόφλησης δανείων	105
8.4.1	Εφάπαξ εξόφληση δανείου με απλό τόκο.....	105
8.4.2	Εφάπαξ εξόφληση δανείου με ανατοκισμό	106
8.4.3	Βαθμιαία εξόφληση με ισόποσα χρεολύσια	106
8.4.4	Βαθμιαία εξόφληση με ισόποσα τοκοχρεολύσια	106
8.5	Σχηματισμός συναρτήσεων υπολογισμού οικονομικών δεδομένων για αυτόνομο φωτοβολταϊκό πάρκο με χρήση συσσωρευτών	106
8.5.1	Ετήσιο ισοδύναμο κόστος αντιστροφέων (inverter).....	107
8.5.2	Ετήσιο ισοδύναμο κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων	108

8.5.3	Ετήσιο ισοδύναμο κόστος καλωδίων	109
8.5.4	Ετήσιο ισοδύναμο κόστος έκτασης γης.....	109
8.5.5	Ετήσιο ισοδύναμο κόστος κατασκευής και λοιπών υλικών – εργασιών.....	109
8.5.6	Ετήσιο ισοδύναμο κόστος συσσωρευτών.....	110
8.5.7	Συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήσης μπαταριών	110
9	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 7.....	112
9.1	Κόστος αντιστροφών (inverter).....	112
9.2	Κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων	113
9.3	Κόστος έκτασης γης.....	113
9.4	Κόστος συσσωρευτών.....	114
9.5	Κόστος καλωδίων	114
9.6	Κόστος λοιπών υλικών – κόστη κατασκευής.....	115
9.7	Συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος	115
10	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	118
10.1	Τελικά συμπεράσματα.....	118
10.2	Τομείς για περαιτέρω και πιο ενδελεχή έρευνα	119
11	Βιβλιογραφία.....	121

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε ένα έτος σε πόλεις της Ελλάδας [2]	23
Πίνακας 2.1: Τιμές του ενεργειακού χάσματος για επιλεγμένους ημιαγωγούς [3]	29
Πίνακας 4.1: Ονομαστικές ισχύς συνηθισμένων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών και καταναλώσεις αυτών σε ηλεκτρική ενέργεια ανά μήνα [14] [13].....	44
Πίνακας 4.2: Ονομαστικές ισχύς συνηθισμένων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών και καταναλώσεις αυτών σε ηλεκτρική ενέργεια ανά μήνα (για δημόσιο κτίριο) [14] [13].....	49
Πίνακας 5.1: Ανάλυση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του συσσωρευτή μολυβδου {Ιστοσελίδα - infoservice.com.gr [16]}	53
Πίνακας 6.1: Βοηθητικός πίνακας υπολογισμού απαραίτητου αριθμού πλαισίων. [12]	69

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Τύποι φωτοβολταϊκών κελιών [4]	28
Εικόνα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πάνελ. [5].....	31
Εικόνα 2.3: Παράδειγμα χαρακτηριστικής καμπύλης από Datasheet φωτοβολταϊκού πλαισίου του εμπορίου. [5].....	32
Εικόνα 2.4: Παράδειγμα τεχνικών χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού πλαισίου από Datasheet [5]	33
Εικόνα 3.1: Αντιστροφέας (inverter) του εμπορίου [8]	39
Εικόνα 3.2: Ρυθμιστής φόρτισης του εμπορίου [10]	39
Εικόνα 5.1: Επεξηγηματικό σχήμα τομής συσσωρευτή μόλυβδου [16].....	54
Εικόνα 5.2: Συνδεδεμένοι συσσωρευτές για αυτόνομο σύστημα.....	58
Εικόνα 6.1: Κόστος αντιστροφέων σε σχέση με την μέγιστη ισχύ εξόδου. Οι τιμές αφορούν αντιστροφείς της εταιρίας SMA (σειρές Sunny Boy και Sunny Mini Central) και προέκυψαν από μια στοιχειώδη έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο. Σκοπός είναι να φανεί ότι το κόστος ανά Watt μειώνεται με την αύξηση της ισχύος του αντιστροφέα. [7]	61
Εικόνα 6.2: Τεχνικό φυλλάδιο αντιστροφέα 100kW του εμπορίου [17].....	62
Εικόνα 6.3: Σύνδεση συστοιχιών φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά, στον αντιστροφέα.....	63
Εικόνα 7.1: Χαρακτηριστικά του συσσωρευτή, όπως αναγράφονται στο datasheet του.	80
Εικόνα 7.2: Απόκομμα από το τεχνικό φυλλάδιο του ρυθμιστή φόρτισης Victron Energy SmartSolar MPPT RS 450/200-Tr.....	81
Εικόνα 7.3: Απόσπασμα από το τεχνικό φυλλάδιο του πολυκρυσταλλικού πλαισίου Victron SPP042702000.....	83
Εικόνα 7.4: Απόσπασμα από το τεχνικό φυλλάδιο του αντιστροφέα Victron Phoenix Inverters Smart 48/2000 και 48/3000.....	86
Εικόνα 7.5 Σχήμα αναπαράστασης διαστασιολόγησης τραπεζιού.	88
Εικόνα 7.6: Επιλογή κάποιων βασικών παραμέτρων στο λογισμικό PVSyst.	96
Εικόνα 7.7: Εισαγωγή τιμής απαιτούμενης ισχύος στο λογισμικό PVSyst.	96
Εικόνα 7.8: Αποτελέσματα υπολογισμών του λογισμικού PVSyst.	97

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας αντίστοιχα	22
Σχήμα 3.1: Διάταξη διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος [6].....	36
Σχήμα 3.2: Διάταξη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.....	37
Σχήμα 4.1: Ενδεικτικό διάγραμμα καταμερισμού ηλεκτρικής ενέργειας σε οικία.....	43
Σχήμα 4.2: Ενδεικτικό διάγραμμα καταμερισμού ηλεκτρικής ενέργειας σε οικισμό.....	46
Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση συσσωρευτή μόλυβδου και των πόλων του (ηλεκτρόδια: κόκκινο - θετικό, μαύρο – αρνητικό).....	56
Σχήμα 5.2: Συσσωρευτές συνδεδεμένοι σε σειρά.....	56
Σχήμα 5.3: Συσσωρευτές συνδεδεμένοι παράλληλα	57
Σχήμα 5.4: Μικτή σύνδεση συσσωρευτών.	57
Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση συνδεσμολογίας συσσωρευτών.....	65
Σχήμα 6.2: Προφίλ ζήτησης διαφόρων μεθόδων της Διαχείρισης Ζήτησης [18].....	66
Σχήμα 6.3: Συνδεσμολογία frog για σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων	70
Σχήμα 6.4: Σχεδιάγραμμα φωτοβολταϊκού πάρκου για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαραίτητου εμβαδού της εγκατάστασης.	73
Σχήμα 6.5: Υπολογισμός απόστασης μεταξύ των σειρών	74
Σχήμα 6.6: Σχήμα αναπαράστασης τραπεζιού φωτοβολταϊκών πλαισίων για τον υπολογισμό του εμβαδού που καταλαμβάνει στο πάρκο.	75
Σχήμα 6.7: Διαχωρισμός φωτοβολταϊκού πάρκου σε επιμέρους τμήματα, με την προϋπόθεση ότι $πλ_2 > 20m$, $πλ_1 > 20m$, $πλ_3 < 20m$, $πλ_n < 20m$	75
Σχήμα 7.1: Αναπαράσταση του συστήματος αποθήκευσης ηλ. ενέργειας συμπεριλαμβανομένου του ρυθμιστή φόρτισης	82
Σχήμα 7.2: Αναπαράσταση συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκών συστοιχιών ανά ρυθμιστή φόρτισης	84
Σχήμα 7.3: Αναπαράσταση τραπεζιού	87

Σχήμα 7.4 Σχηματική αναπαράσταση του χωραφιού και της διάταξης των τραπεζιών, όπου τα μπλε τετράγωνα αναπαριστούν τα τραπέζια και το μαύρο τον οικίσκο στέγασης των μπαταριών, αντιστροφών και ρυθμιστών φόρτισης.	89
Σχήμα 7.5 Σχηματική αναπαράσταση καλωδίωσης του φωτοβολταϊκού πάρκου.....	90
Σχήμα 7.6 Σχηματική αναπαράσταση συνδεσμολογίας των δυτικών σειρών.	91
Σχήμα 7.7 Σχηματική αναπαράσταση πάρκου με πραγματικές διαστάσεις.	91
Σχήμα 7.8 Πρόχειρη σχηματική αναπαράσταση οικίσκου και των καλωδιώσεων εντός του. (πορτοκαλί=αντιστροφήας, γαλάζιο=ομάδα 16 μπαταριών(όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1),γκρι=ρυθμιστής φόρτισης).	94

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση της μελέτης, της έρευνας και της μεθοδολογίας που απαιτείται για να σχηματιστεί μία συνάρτηση υπολογισμού του ελάχιστου ετήσιου ισοδύναμου κόστους, τόσο για την κατασκευή, όσο και για τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού σταθμού στην περίπτωση που απαιτείται αυτόνομο σύστημα ενέργειας με χρήση μπαταριών.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εμβάθυνση στην μεθοδολογία της διαστασιολόγησης ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση μπαταριών και η κατανόηση της οικονομικής ανάλυσης ενός τέτοιου επενδυτικού έργου. Οι μαθηματικές σχέσεις που θα σχηματιστούν στην πορεία της εργασίας θα βασίζονται στην έρευνα που θα γίνει στις παραπάνω έννοιες.

Στόχος είναι η χρήση αυτών των μαθηματικών σχέσεων να μπορούν να διευκολύνουν την οποιαδήποτε ηλεκτρολογική μελέτη, για αυτόνομο φωτοβολταϊκό πάρκο, που έχει ως ζητούμενο την εύρεση του ελάχιστου ετήσιου ισοδύναμου κόστους, όταν αυτή χαρακτηρίζεται ως επενδυτικό έργο και επρόκειτο να χρηματοδοτηθεί.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η εξής:

1. Έρευνα για προαπαιτούμενες γνώσεις που θα χρειαστούν για την κατανόηση των διάφορων εννοιών της διπλωματικής.
2. Συγγραφή και παρουσίαση των προαπαιτούμενων εννοιών με βάση την βιβλιογραφία.
3. Ανάλυση και κατανόηση του τρόπου λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πάρκου.
4. Ανάλυση και κατανόηση των ενεργειακών αναγκών του μέσου νοικοκυριού και κατ' επέκταση ενός οικισμού.
5. Ανάλυση και κατανόηση της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με βάση την βιβλιογραφία.
6. Έλεγχος ορθότητας της μεθοδολογίας με σύγκριση με τα δεδομένα λογισμικού υπολογισμών.
7. Ανάλυση και κατανόηση της μεθοδολογίας υπολογισμού των οικονομικών δεδομένων με βάση την βιβλιογραφία.

Καινοτομία

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται μελέτη και έρευνα στα βασικά στάδια που δομούν μία διαστασιολόγηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση μπαταριών. Επίσης, το βασικό θέμα εξετάζεται και αντιμετωπίζεται ως επενδυτικό έργο, και αναλύεται η μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί έτσι ώστε να υπολογιστεί σωστά το ελάχιστο ετήσιο ισοδύναμο κόστος μίας τέτοιας επένδυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ανάπτυξη των ηλιακών συστημάτων βασίζεται εξ ολοκλήρου στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Αυτό προϋποθέτει πλήρη γνώση περί της ηλιακής ακτινοβολίας και των μετεωρολογικών στοιχείων, έτσι ώστε το ένα ηλιακό σύστημα να είναι όσο το δυνατότερο πιο αποδοτικό. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα στοιχεία εκείνα που είναι απαραίτητα για τη μελέτη των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

1.1 Ηλιακή σταθερά

Στην επιφάνεια της γης, η ηλιακή ακτινοβολία που καταφθάνει, αποτελεί μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτής που υπάρχει στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή σταθερά είναι ισοδύναμη με την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου (1 m^2), εκτός των ορίων της ατμόσφαιρας, προσανατολισμένη κάθετα στις ακτίνες του ηλίου, σε χρόνο ενός δευτερολέπτου (1 sec). Η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι [1]:

$$J_{sc} = 1,353 \text{ kW/m}^2 \quad (1.1)$$

Λόγω των διάφορων αποστάσεων μεταξύ γης και ηλίου, η τιμή της ηλιακής σταθεράς κυμαίνεται μεταξύ των περιοχών $\pm 3,5\%$. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και λόγω άλλων ηλιακών διαταραχών, όπως ηλιακές κηλίδες, με διακυμάνσεις της τάξεως του $\pm 1,5\%$. Προφανώς και τη μέγιστη τιμή την λαμβάνει τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ τη μικρότερη τους χειμερινούς [1].

1.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Μπορούμε να διακρίνουμε την ηλιακή ακτινοβολία σε δύο κατηγορίες [1]:

- την άμεση
- τη διάχυτη

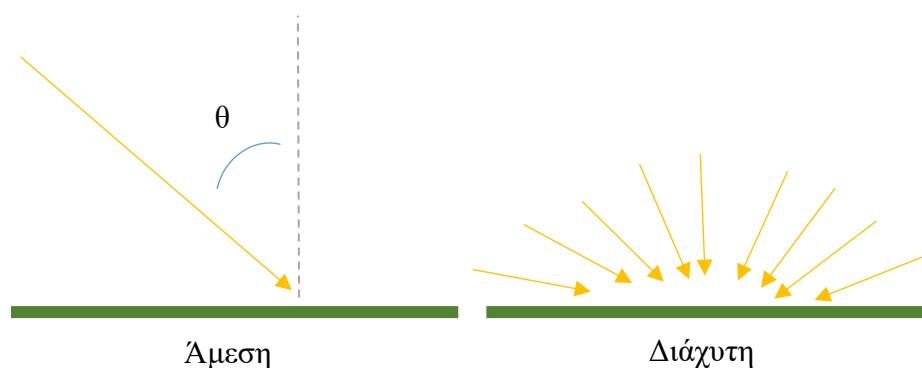
1.2.1 Άμεση ηλιακή ακτινοβολία

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια που βρίσκεται εντός της ατμόσφαιρας και προέρχεται κατ' ευθείαν από τον ήλιο. Είναι ξεκάθαρο ότι αυτή η ακτινοβολία έχει κάποια διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στις επιφάνειες, οπότε για να δεχθεί αυτή η επιφάνεια το μεγαλύτερο μέρος της θα πρέπει να προσανατολιστεί κατάλληλα [1].

1.2.2 Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάποια επιφάνεια εντός της ατμόσφαιρας σε δεύτερο χρόνο, δηλαδή έχοντας ήδη προσπέσει σε άλλη επιφάνεια και υποστεί αλλαγές από ανάκλαση και

διασπορά. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία δεν έχει εξ ορισμού κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται και παραστατικά η διαφορά μεταξύ των δύο ειδών ακτινοβολιών [1].



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας αντίστοιχα

1.2.3 Ολική ακτινοβολία

Με τον όρο ολική ακτινοβολία εννοείται το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Τις ηλιόλουστες μέρες η άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της διάχυτης, η οποία παρόλα αυτά είναι υπολογίσιμη και λαμβάνεται υπόψη σε ένα ηλιακό ενεργειακό σύστημα [1].

1.2.4 Ωριαία γωνία

Ωριαία γωνία ονομάζεται η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου από τα ανατολικά προς τα δυτικά του μεσημβρινού, οφειλόμενη στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της με ταχύτητα 15° ανά ώρα. Το μεσημέρι η τιμή της ωριαίας γωνία παίρνει την μηδενική τιμή, ενώ προ της μεσημβρινής έχει θετικές τιμές και αντίστοιχα της απογευματινής έχει αρνητικές [1].

1.2.5 Αζιμούθια γωνία επιφάνειας

Αζιμούθια γωνία ονομάζεται η απόκλιση που παρουσιάζει η προβολή της καθέτου που άγεται από τον τοπικό μεσημβρινό σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Η γωνία γ είναι 0° για κατεύθυνση του επιπέδου προς το νότο, θετική προς τα ανατολικά και αντίστοιχα αρνητική προς τα δυτικά. Στα ηλιακά ενεργειακά συστήματα, η ενεργός επιφάνεια τους είναι στραμμένη προς νότο, άρα έχουμε αζιμούθιο γωνία γ μηδενική [1].

1.3 Ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει ανά μονάδα επιφάνειας, σε ένα οριζόντιο επίπεδο στα όρια της ατμόσφαιρας, μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά από την ακόλουθη σχέση [1]:

$$H_o = (24/\pi) \times J_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \cos(360 \times \nu/365)\right) \times \left[\cos\varphi \times \cos\delta \times \sin\omega_s + \left(\left(\pi \times \omega_s/180\right) - \sin\varphi\right) \times \sin\delta\right] \quad (1.2)$$

1.4 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης

Η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης είναι εξαιρετικά δύσκολο μέχρι και αδύνατο να μετρηθεί με ακρίβεια. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ποικιλία των μετεωρολογικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, και για αυτό όλοι οι υπολογισμοί για ηλιακά συστήματα γίνονται με βάση πίνακες μακροχρόνιων μετρήσεων από μετεωρολογικούς σταθμούς. Παρακάτω στον πίνακα (1.1) καταγράφονται διάφορες τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία σε 4 πόλεις της Ελλάδας κατά τη διάρκεια ενός έτους. [1]

Πίνακας 1.1: Μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε ένα έτος σε πόλεις της Ελλάδας [2]

Μήνας	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ακτινοβολία Αθήνα (kWh/m ²)	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ακτινοβολία Θεσ/νίκη (kWh/m ²)	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ακτινοβολία Κρήτη (kWh/m ²)	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ακτινοβολία Ρόδος (kWh/m ²)
Ιανουάριος	91,99	85,16	92,59	91,53
Φεβρουάριος	103,74	94,492	107,72	105,99
Μάρτιος	138,94	128,34	146,85	144,58
Απρίλιος	156,97	144,38	171,17	168,03
Μάιος	179,01	166,69	197,67	194,27
Ιούνιος	176,60	166,03	195,51	192,45
Ιούλιος	184,75	176,44	200,81	198,52
Αύγουστος	184,19	176,86	195,57	193,84
Σεπτέμβριος	166,22	157,38	173,61	171,81
Οκτώβριος	139,006	131,02	141,68	140,32
Νοέμβριος	107,64	95,92	111,38	109,30
Δεκέμβριος	88,51	80,42	89,71	88,40
Μέση ετήσια	143,13	133,59	152,02	149,92

1.5 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, στην επιφάνεια της γης

Οι πίνακες που αναφέρουν τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο είναι πολύ χρήσιμοι, αλλά σε καμία περίπτωση αρκετοί. Είναι απαραίτητο να σχηματιστούν πίνακες και για την ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο. Αυτό γίνεται ακολουθώντας κάποια μέθοδο υπολογισμών, με μία από αυτές να είναι η μέθοδος Liu και Jordan η οποία βασίζεται στα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Η μέθοδος περιγράφεται παρακάτω: [1]

$$H_{\tau} = R \times H \quad (1.3)$$

$$R = \left(1 - \left(\frac{H_d}{H}\right) \times R_b + \left(\left(\frac{H_d}{H}\right) \times \frac{1 + \cos\varphi}{2} + \frac{\rho \times (1 - \cos\varphi)}{2}\right)\right) \quad (1.4)$$

$$\left(\frac{H_d}{H}\right) = 1,3903 - 4,0273 \times K_{\tau} + 5,5215 \times K_{\tau}^2 - 3,108 \times K_{\tau}^3 \quad (1.5)$$

$$K_{\tau} = \frac{H}{H_{om}} \quad (1.6)$$

$$R_b = \frac{C_T}{C_Z} \quad (1.7)$$

όπου

- H_{τ} η μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο κλίσης (φ) στην επιφάνεια της γης ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{μήνα}$).
- H η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{μήνα}$).
- H_d η διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για κάθε μήνα ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{μήνα}$).
- H_{om} η μηνιαία ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{μήνα}$).
- ρ ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους, προς το κεκλιμένο επίπεδο. Παίρνει τη τιμή 0,2 για κανονικό έδαφος, ενώ για χιόνι 0,7.
- K_{τ} ένας δείκτης αιθριότητας
- R_b ένας συντελεστής εξαρτώμενος από τις διάφορες γωνίες κλίσης και τα γεωγραφικά πλάτη.

1.6 Σταθερή ετήσια κλίση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι σε σταθερή βάση στήριξης, η βέλτιστη κλίση αυτών ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι πολύ βασικό να επιτευχθεί καθώς παίζει σημαντικότατο ρόλο στην συνολική απόδοση του πάρκου. Η αζιμούθια γωνία γ επιλέγεται πάντα μηδενική, δηλαδή επιλέγεται απόλυτος προσανατολισμός προς τον νότο. Στην Ελλάδα οι τιμές της βέλτιστης γωνίας κυμαίνονται συνήθως από 26° έως και 30° ανάλογα βέβαια και με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής [1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

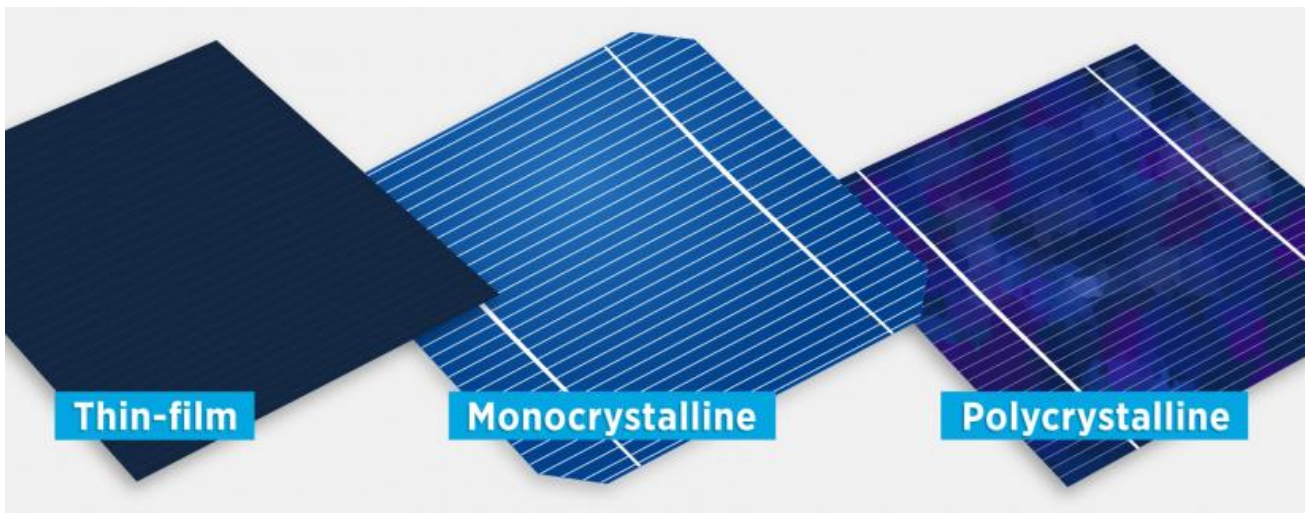
2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Για πρώτη φορά η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική παρατηρήθηκε το 1839 από τον Becquerel, όταν η τάση στα άκρα μιας μπαταρίας υγρού τύπου αυξήθηκε, τη στιγμή που τα ηλεκτρόδια της εκτέθηκαν στο φως του ηλίου. Παρόμοιο φαινόμενο διαπιστώθηκε και το 1876 στο σελήνιο, γεγονός που βασίζεται στη κβαντική θεωρία. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών στα τέλη της δεκαετίας του 1940, το πρώτο φωτοβολταϊκό κελί με σημαντικό βαθμό απόδοσης, δημιουργήθηκε από πυρίτιο. Ο δορυφόρος Vanguard 1 το 1958, αποτελεί μία από τις πρώτες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών, όπου χρησιμοποιήθηκαν για τη τροφοδοσία συσκευών. Πλέον, η τεχνολογία έχει σημειώσει τόσο μεγάλη πρόοδο, που μαζί με τη πετρελαϊκή κρίση των τελευταίων ετών τείνουν στην όλο και πιο συχνή χρήση τους στην ηλεκτροπαραγωγή. Ειδικά σε περιοχές όπου δεν υπάρχει δυνατότητα διασύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, αποτελούν τη μοναδική λύση [3].

2.1 Φωτοβολταϊκό κελί

Το βασικό δομικό στοιχείο παραγωγής ενέργειας είναι το φωτοβολταϊκό (ή ηλιακό) κελί. Τα φωτοβολταϊκά κελιά διαφοροποιούνται με βάση το υλικό και τον τρόπο παραγωγής με αντίστοιχες διαφορές στο κόστος και την απόδοση. Οι τύποι των φωτοβολταϊκών σε πρακτικές εφαρμογές είναι [3]:

- *Μονοκρυσταλλικού πυριτίου* – (mono-Si) Σήμερα επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης 20% -21%, αλλά η διαδικασία παραγωγής τους είναι ακριβότερη και δυσκολότερη καθώς το πυρίτιο κρυσταλλώνεται στο ίδιο πλέγμα. Λόγω της διαδικασίας παραγωγής τους παράγουν σημαντική ποσότητα αποβλήτων. Έχουν ομοιόμορφο μπλε σκούρο/μαύρο χρώμα και σχήμα τετραγωνικής κυψέλης.
- *Πολυκρυσταλλικού πυριτίου* – (poly-Si) Είναι τα συνηθέστερα φωτοβολταϊκά στην αγορά αλλά έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από τα μονοκρυσταλλικού πυριτίου φθάνοντας έως 18%. Η διαδικασία παραγωγής τους είναι απλή και δεν παράγονται τόσα πολλά απόβλητα. Έχουν μπλε χρώμα το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια του κελιού ενώ το σχήμα τους είναι τετραγωνικό.
- *Λεπού υμενίου* Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών λεπτού υμενίου έχει ως χαρακτηριστικό το χαμηλό βαθμό απόδοσης αλλά και το χαμηλό κόστος. /οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως άμορφου – πυριτίου (a-Si) με βαθμό απόδοσης έως 9%, καδμίου – τελούριου (CdTe) και χαλκού – ινδίου – γαλλίου (CIS). Το χρώμα τους ανάλογα με τον τύπο είναι μαύρο, μπλε ή σκούρο μωβ ενώ έχουν τετράγωνο σχήμα.



Εικόνα 2.1: Τύποι φωτοβολταϊκών κελιών [4]

Ο βαθμός απόδοσης αν και αποτελεί το σημαντικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό ενός φωτοβολταϊκού κελιού, δεν αποτελεί και το μοναδικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου κελιού σε κάθε εφαρμογή φωτοβολταϊκών. Το ειδικό κόστος (κόστος προς εγκατεστημένη ισχύ), η απαιτούμενη έκταση, καθώς και η συμπεριφορά του πλαισίου σε συνθήκες υψηλής ή και χαμηλής θερμοκρασίας, ή διάχυτης ακτινοβολίας αποτελούν επίσης κριτήρια επιλογής [3].

2.2 Αρχή Λειτουργίας

Τα φωτοβολταϊκά κελιά στηρίζονται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλιακή ενέργεια. Η προσπίτουσα ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα στον ημιαγωγό παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα [3].

2.2.1 Ηλεκτρονική δομή των ημιαγωγών

Προς κατανόηση των αρχών της φυσικής των ημιαγωγών θα ερευνηθεί η συμπεριφορά του πυριτίου. Η δομή του πυριτίου ακολουθεί την αδαμαντοειδή κρυστάλλωση όπου κάθε άτομο έχει τους κοντινότερους «γείτονες» στις τέσσερις γωνίες ενός τετράεδρου. Αυτή η δομή είναι αποτέλεσμα των δεσμών που δημιουργούνται από τα τέσσερα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας. Κάθε δεσμός μεταξύ δύο ατόμων πυριτίου έχει δύο ηλεκτρόνια (ένα από κάθε άτομο) και όλοι οι ημιαγωγοί σχηματίζουν παρόμοιες κρυσταλλικές δομές [3].

Αυτή η κρυσταλλική δομή έχει σημαντικές επιπτώσεις στις ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητες του ημιαγωγού. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου σε έναν κρύσταλλο πρέπει να βρίσκεται εντός καθορισμένου εύρους. Η ενέργεια των στοιβάδων σθένους που σχηματίζουν τους δεσμούς ανάμεσα στα άτομα ονομάζεται ζώνη σθένους και συμβολίζεται με E_v . Η αμέσως μεγαλύτερη στάθμη ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας, συμβολίζεται με E_c και διαφέρει κατά μια

ποσότητα από τη στάθμη σθένους που ονομάζεται ενεργειακό χάσμα, $E_g (= E_c - E_v)$. Το ενεργειακό χάσμα συνηθισμένων ημιαγωγών παρουσιάζεται στον πίνακα (2.1) [3].

Πίνακας 2.1: Τιμές του ενεργειακού χάσματος για επιλεγμένους ημιαγωγούς [3]

Υλικό	Ενεργειακό χάσμα (eV)
Κρυσταλλικό πυρίτιο	0.05
Άμορφο πυρίτιο	0.07
Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe ₂)	0.08
Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)	0.15
Αρσενικούχο Γάλλιο (GsAs)	0.20
Φωσφίδιο του ινδίου	0.24

Ένας καθαρός ημιαγωγός περιέχει αριθμό ηλεκτρονίων έτσι ώστε η ζώνη σθένους να είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας να είναι κενή. Επομένως, τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να ανέλθουν στη ζώνη αγωγιμότητας και οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται ως μονωτές. Οι ημιαγωγοί άγουν τον ηλεκτρισμό μόνο εάν φορείς ηλεκτρισμού εισαχθούν στη ζώνη αγωγιμότητας ή αφαιρεθούν από τη ζώνη σθένους. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η δημιουργία προσμίξεων ημιαγωγών με άλλα στοιχεία. Εάν γίνει πρόσμιξη με άτομα τα οποία έχουν πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα (π.χ. φώσφορος) τότε τα τέσσερα από αυτά σχηματίζουν κανονικούς δεσμούς στο κρυσταλλικό πλέγμα με τα άτομα του ημιαγωγού και το πέμπτο μεταπηδά στη ζώνη αγωγιμότητας. Στην περίπτωση αυτή στη ζώνη αγωγιμότητας υπάρχει περίσσια ηλεκτρονίων, τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα και αυτού του είδους οι προσμίξεις ονομάζονται αρνητικές (n – type). Όμοιοι, εάν γίνει πρόσμιξη με ένα άτομο με τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (π.χ. βόριο) τότε δημιουργείται έλλειμμα ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους και σχηματίζονται οι οπές ως φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίες είναι φορτισμένες θετικά και προσμίξεις αυτού του είδους ονομάζονται θετικές (p – type) [3].

Τα φωτοβολταϊκά κελιά βασίζονται πάνω στο σχηματισμό επαφών ανάμεσα στους ημιαγωγούς. Η επαφή p – n είναι ο συνηθέστερος τύπος, όπου ημιαγωγός τύπου p έρχεται σε επαφή με ημιαγωγό τύπου n. Το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται είναι το βασικότερο χαρακτηριστικό των επαφών, καθώς ηλεκτρόνια διαχέονται από τον ημιαγωγό n προς τον ημιαγωγό p δημιουργώντας μια μικρή περιοχή αρνητικά φορτισμένη με τη δημιουργία οπών. Το αποτέλεσμα της επαφής είναι πως η μικρή αυτή περιοχή κοντά στην διεπιφάνεια δεν περιέχει καθόλου φορείς μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή οπές ή ηλεκτρόνια, και λειτουργεί ως φράγμα δυναμικού αποτρέποντας τη ροή ηλεκτρικού φορτίου [3].

2.2.2 Μαθηματικό μοντέλο

Το στοιχειώδες κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού κελιού μοντελοποιείται από μία δίοδο, μία πηγή ρεύματος και μια αντίσταση παράλληλα σε αυτή και τέλος μια αντίσταση σε σειρά. Η ένταση της πηγής ρεύματος ονομάζεται φωτόρευμα και σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία. Η χαρακτηριστική εξίσωση έντασης ρεύματος – τάσης (I – U) της διόδου δίνεται από τη σχέση του Shockley [3]:

$$I_d = I_o \times \left(e^{q_e \frac{U_d}{kT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Όπου I_o το ρεύμα κόρου, q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου, k η σταθερά του Boltzman, U_d η τάση στα άκρα της διόδου και T η θερμοκρασία της διόδου. Το ρεύμα στα άκρα του κυκλώματος είναι [3]:

$$I = I_l - I_d - I_{sh} \quad (2.2)$$

Όπου I_l είναι το φωτόρευμα και I_{sh} είναι το ρεύμα που διαρρέει την παράλληλη αντίσταση. Με αντικατάσταση για το ρεύμα της διόδου από την εξίσωση (1.1), η (1.2) γίνεται [3]:

$$I = I_l - I_o \times \left(e^{q_e \frac{U_d}{kT}} - 1 \right) - I_{sh} \quad (2.3)$$

Με αντικατάσταση από τον νόμο του Ohm για την παράλληλη αντίσταση R_{sh} προκύπτει [3]:

$$I = I_l - I_o \times \left(e^{q_e \frac{U_d}{kT}} - 1 \right) - \frac{U_d}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Η τάση U_d σχετίζεται με την τάση στους ακροδέκτες, με βάση την εξίσωση $U_d = U + IR_s$. Έτσι η εξίσωση (1.4) γίνεται [3]:

$$I = I_l - I_o \times \left(e^{q_e \frac{U + IR_s}{kT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Η εξίσωση (1.5) αποτελεί τη χαρακτηριστική εξίσωση έντασης ρεύματος-τάσης (I-U) ενός φωτοβολταϊκού κελιού.

2.3 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο & συστοιχία

Το φωτοβολταϊκό κελί, αν και αποτελεί ένα στοιχείο από μόνο του ικανό για την παραγωγή ενέργειας, δεν χρησιμοποιείται μεμονωμένα. Στις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία είναι φωτοβολταϊκά κελιά κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους (σε σειρά ή παράλληλα). Με τη σειρά τους τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατάλληλα συνδεδεμένα, σχηματίζουν μία φωτοβολταϊκή συστοιχία [3].

2.3.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Εάν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από N_s φωτοβολταϊκά κελιά συνδεδεμένα μεταξύ τους εν σειρά και N_p σειρές συνδεδεμένες παράλληλα, τότε η τάση και η ένταση του ρεύματος στα άκρα του πλαισίου θα είναι τα αντίστοιχα [3]:

$$U_{panel} = N_s \times U \quad (2.6)$$

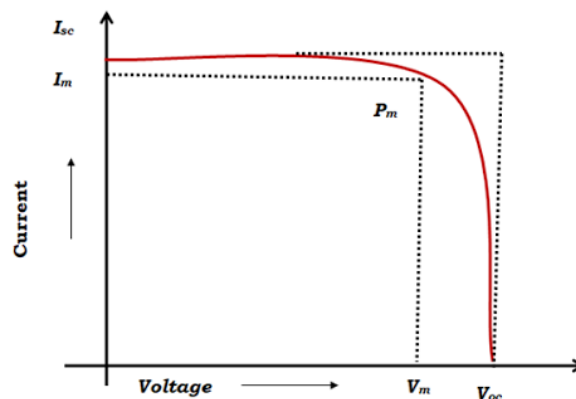
$$I_{panel} = N_p \times I \quad (2.7)$$

Για να βρεθεί η χαρακτηριστική εξίσωση του πλαισίου, θα γίνει αντικατάσταση στην εξίσωση (1.7) από την χαρακτηριστική του κελιού (εξίσωση (1.5)) [3].

$$I_{panel} = N_p \times I = N_p \times \left[I_l - I_o \times \left(e^{q_e \frac{U + IR_s}{kT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \right] \quad (2.8)$$

και σε συνδυασμό με την εξίσωση (1.6) προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση πλαισίου [3].

$$I_{panel} = N_p \times \left[I_l - I_o \times \left(e^{q_e \frac{\frac{U_{panel} + I_{panel} R_s}{N_s + \frac{I_{panel} R_s}{N_p}}}{kT}} - 1 \right) - \frac{\frac{U_{panel}}{N_s} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{R_{sh}} \right] \quad (2.9)$$



Εικόνα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πάνελ. [5]

Ο σχεδιασμός της πεπλεγμένης εξίσωσης (1.9) δίνει την χαρακτηριστική καμπύλη $I_{panel} - U_{panel}$ του πλαισίου, η οποία και αποτελεί το σημαντικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό του, καθώς από εκεί εξάγονται όλες οι παράμετροι που χρειάζονται για το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής ενέργειας [3]:

- I_{sc} ρεύμα βραχυκύκλωσης (μέγιστο ρεύμα)
- U_{oc} τάση ανοιχτοκύκλωσης (μέγιστη τάση)
- I_{mp} ένταση ρεύματος στη μέγιστη ισχύ
- U_{mp} τάση στη μέγιστη ισχύ
- P_{mp} μέγιστη ισχύς

Τα σημεία μέγιστης ισχύος του πλαισίου I_{mp} και U_{mp} μπορούν να βρεθούν με όμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση του κελιού, δηλαδή από τη λύση του συστήματος των εξισώσεων (1.9) και (1.10) [3].

$$\frac{dP_{panel}}{dU_{panel}} = 0 \rightarrow \frac{d(I_{panel}U_{panel})}{dU} = 0 \quad (2.10)$$

Η χαρακτηριστική καμπύλη σχεδιάζεται για συγκεκριμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (Εικόνα 1.2). Οι «Τυπικές Συνθήκες Δοκιμής» (Standard Test Conditions – STC) είναι [3]:

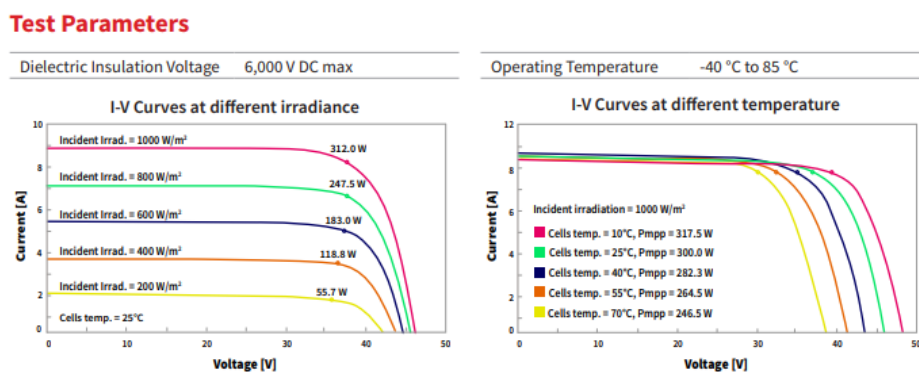
- Ένταση ακτινοβολίας $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία πλαισίου $T_{STC} = 298 \text{ K}$
- Φάσμα ακτινοβολίας σε 1,5 μάζα αέρα (AM1,5)

Η μέγιστη ισχύς $P_{mp,STC}$ στις συνθήκες STC είναι η ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από τη σχέση [3]:

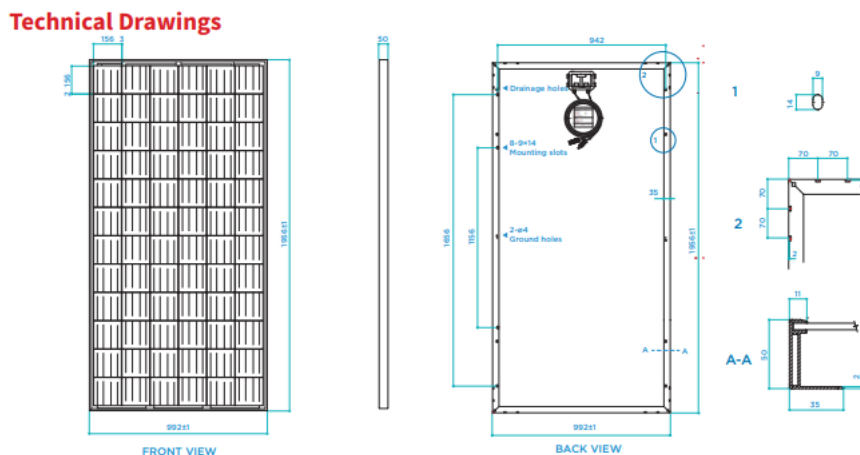
$$\eta_{STC} = \frac{P_{mp,STC}/A_{panel}}{G_{STC}} \quad (2.11)$$

όπου A_{panel} το εμβαδόν του πλαισίου.

Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων, δίνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες των πλαισίων τους στα τεχνικά φυλλάδια. Ένα απόσπασμα από τεχνικό φυλλάδιο παρουσιάζεται στην Εικόνα (1.3) και Εικόνα (1.4).



Εικόνα 2.3: Παράδειγμα χαρακτηριστικής καμπύλης από Datasheet φωτοβολταϊκού πλαισίου του εμπορίου. [5]



Electrical Characteristics

SOLAR CELLS	POLY-CRYSTALLINE 156 × 156 MM 72 PCS. (6×12) – 4 BUS BARS				
Maximum Power (Pmax)	300 Wp	305 Wp	310 Wp	315 Wp	320 Wp
Voltage at Pmax (Vmp)	37.23 V	37.24 V	37.32 V	37.46 V	37.62 V
Current at Pmax (Imp)	8.06 A	8.19 A	8.31 A	8.41 A	8.51 A
Open-Circuit Voltage (Voc)	44.71 V	44.72 V	44.76 V	44.82 V	44.84 V
Short-Circuit Current (Isc)	8.947 A	9.094 A	9.234 A	9.371 A	9.515 A
Maximum System Voltage (V DC)	1000 V (iec), 600 V (UL)				
Cell Efficiency	17.46 %	17.75 %	18.05 %	18.34 %	18.63 %
Module Efficiency	15.46 %	15.72 %	15.98 %	16.23 %	16.49 %
Number of By-pass Diodes	6				
Maximum Series Fuse	15 A				
Temperature Coefficient of Pmax	- 0.45 % / °C				
Temperature Coefficient of Voc	- 0.34 % / °C				
Temperature Coefficient of Isc	- 0.05 % / °C				
Nominal Operating Cell Temperature	47 ± 2 °C				

Εικόνα 2.4: Παράδειγμα τεχνικών χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού πλαισίου από Datasheet [5]

2.3.2 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από πλαίσια παράλληλα και σε σειρά συνδεδεμένα μεταξύ τους, έτσι ώστε στους ακροδέκτες της συστοιχίας να υπάρχουν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τα οποία θα επιτρέψουν την σύνδεση με άλλες συσκευές (όπως φωτιστικά, αντιστροφείς) προς την πραγματοποίηση κάποιας συγκεκριμένης εργασίας. [3]

Ανεξάρτητα από την εφαρμογή που θα έχει συστοιχία κατά τον σχεδιασμό πρέπει να ληφθούν υπόψη μια σειρά από περιορισμούς [3].

- Η σύνδεση ανόμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων στην ίδια συστοιχία απαγορεύεται καθώς τα διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά δημιουργούν απώλειες. Ακόμη και φωτοβολταϊκά πλαίσια του ίδιου μοντέλου έχουν μικρές διαφορές στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους. Γι' αυτό στην πράξη γίνεται ταίριασμα των χαρακτηριστικών (matching) με βάση το πιστοποιητικό μετρήσεων που συνοδεύει το κάθε πλαίσιο.
- Τα πλαίσια της κάθε συστοιχίας πρέπει να έχουν κοινό προσανατολισμό. Ο διαφορετικός προσανατολισμός αλλάζει την ένταση της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στα πλαίσια με

αποτέλεσμα, και σε αυτή την περίπτωση, τα διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και απώλειες.

- Η μερική σκίαση των πλαισίων πρέπει να αποφεύγεται διότι είναι δυνατόν για σημαντικά χρονικά διαστήματα να υπάρχει μειωμένη παραγωγή. Εάν υπάρχουν φωτοβολταϊκά σε σκίαση τότε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί ως διακόπτης με αποτέλεσμα να χάνεται η παραγωγή όχι μόνο από το συγκεκριμένο πλαίσιο που είναι σκιασμένο αλλά από ολόκληρη τη σειρά φωτοβολταϊκών πλαισίων (string). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης, μειώνοντας έτσι τις απώλειες.

2.3.3 Επίδραση θερμοκρασίας

Ο βαθμός απόδοσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός κελιού, ενός πλαισίου ή μιας συστοιχίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του πλαισίου, όπως φαίνεται και στις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι δύσκολο να μελετηθεί θεωρητικά διότι μεταβάλλονται και άλλες παράμετροι (όπως το ρεύμα κόρου) που έχουν σύνθετη συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές δίνουν, μετά από μετρήσεις, συντελεστές θερμοκρασιακής μεταβολής των βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. [3]

- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής έντασης α_I .
- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής τάσης α_V .
- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής ισχύος α_P .

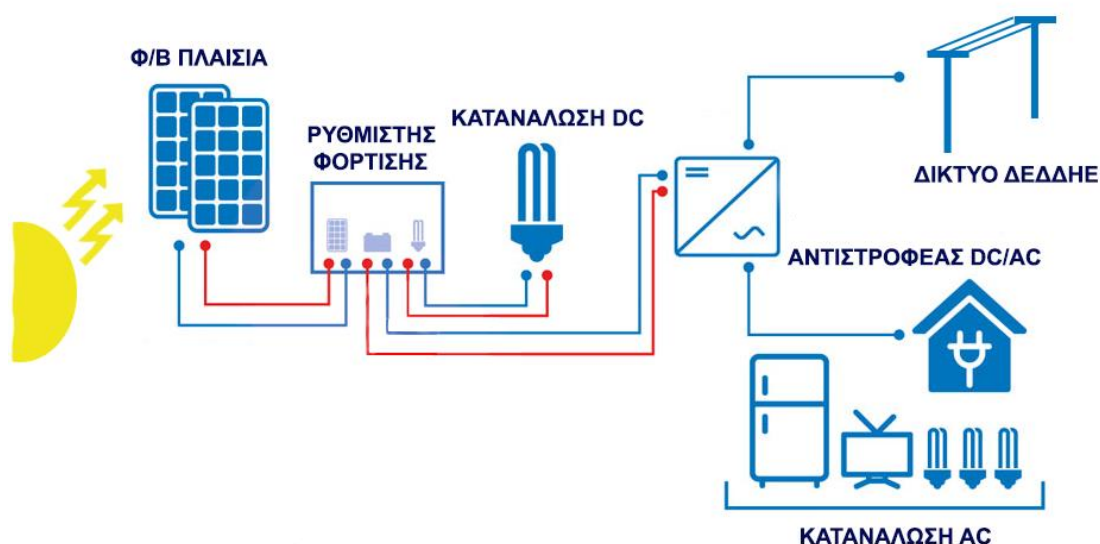
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή των δύο βασικών φωτοβολταϊκών συστημάτων, και των τεχνολογιών που τα απαρτίζουν, τόσο στο κομμάτι της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και σε αυτό της κατανάλωσης.

3.1 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα

Ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Ανάλογα το μέγεθος του πάρκου και τη παραγόμενη ισχύ, η σύνδεση γίνεται είτε στο δίκτυο χαμηλής, είτε στο δίκτυο μέσης τάσης. Από εκεί και έπειτα η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται κατ' επιθυμία της εταιρίας διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για να καταναλωθεί από διάφορα φορτία. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μία τυπική διάταξη ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου.

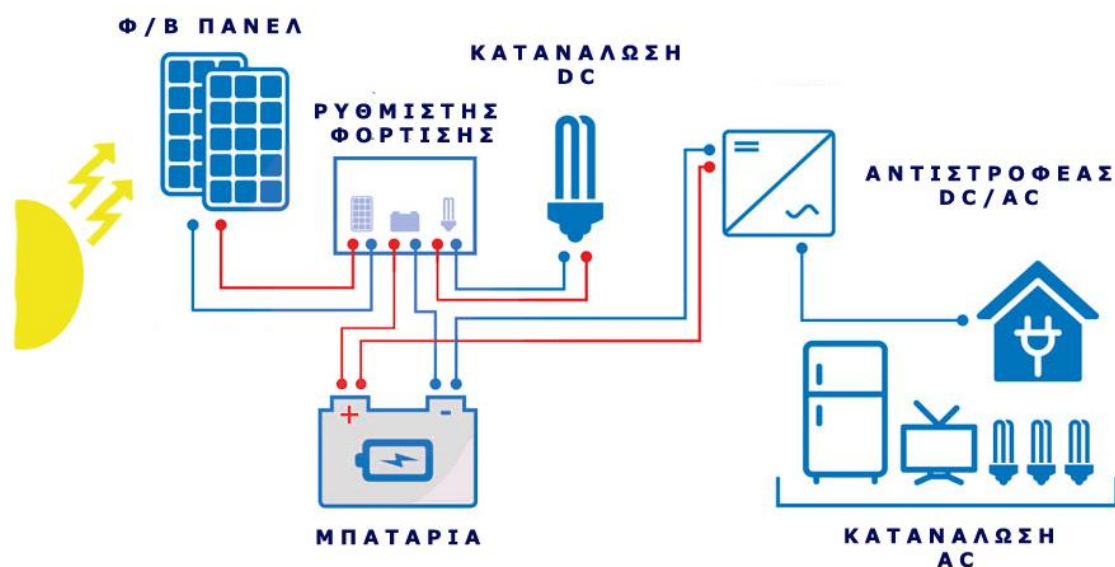


Σχήμα 3.1: Διάταξη διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος [6]

3.2 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Τα αυτόνομα συστήματα με μπαταρία χρησιμοποιούνται, είτε για την κάλυψη αναγκών σε περιοχές χωρίς πρόσβαση στο δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας, είτε, λιγότερο συχνά, για ενεργειακή αυτονομία. Επιπλέον εξαρτήματα σε αυτή τη περίπτωση είναι η μπαταρία και ο ρυθμιστής φόρτισης. Η μπαταρία αποθηκεύει την περίσσεια ενέργεια που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά και την αποδίδει όταν υπάρχει ζήτηση. Ο ρυθμιστής φόρτισης προστατεύει την μπαταρία από υπερφόρτιση και λειτουργεί και ως MPPT (Maximum Power Point Tracker). Τα βασικά στοιχεία που αφορούν στις μπαταρίες

παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο. Είναι δυνατόν να υπάρχει μόνο φορτίο συνεχούς ρεύματος ή μόνο εναλλασσόμενου ή και τα δύο. [7]



Σχήμα 3.2: Διάταξη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

3.3 Αντιστροφέας (Inverter)

Ο αντιστροφέας αποτελεί κεντρικό κομμάτι μιας φωτοβολταϊκής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αναλαμβάνει τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο ή στην περίπτωση αυτόνομων συστημάτων την διαμόρφωση των χαρακτηριστικών του ρεύματος για τη βέλτιστη κάλυψη των φορτίων. Οι αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο, ανυψώνουν ή υποβιβάζουν την εισερχόμενη τάση στην απαιτούμενη τάση και φροντίζουν για τη λειτουργία στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας (στο «γόνατο» της χαρακτηριστικής καμπύλης, Εικόνα (1.2)). Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ενός αντιστροφέα είναι: [7]

- ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($\eta_{inv,ETA}$)
- η μέγιστη τάση ($U_{max,DC}$)
- το εύρος τάσης MPPT ($U_{MPPT,HI} \sim U_{MPPT,LO}$)
- η μέγιστη ένταση ρεύματος ($I_{max,DC}$)
- ο μέγιστος αριθμός παράλληλων γραμμών από φωτοβολταϊκά (S_{max}) που δέχεται ο αντιστροφέας

Ο βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα εξαρτάται από την ισχύ που δέχεται κάθε φορά. Στα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντιστροφέων δίνεται ένας μεσοσταθμικός βαθμός σύμφωνα με το πρότυπο Eur-ETA. Μια σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων με έναν αντιστροφέα για να είναι ασφαλής και αποδοτική πρέπει να τηρούνται κάποιοι τεχνικοί περιορισμοί, αλλά και να έρχονται εις πέρας τα παρακάτω [7]:

- Προστασία από υπέρταση
- Λειτουργία του αντιστροφέα στα όρια του MPPT.
- Σωστή επιλογή ονομαστικής ισχύος αντιστροφέα με σκοπό την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του.

Ο εξοπλισμός μας για να είμαστε σίγουροι ότι είναι προστατευμένο από υπερτάσεις, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η μέγιστη τάση του συστήματος δεν θα ξεπερνάει τη μέγιστη τάση του αντιστροφέα. Αυτό μαθηματικά περιγράφεται παρακάτω [7]:

$$U_{max} < U_{max,DC} \quad (3.1)$$

Η μέγιστη τάση που μπορεί να αποδώσει το σύστημά μας εξαρτάται από την τάση ανοιχτοκύκλωσης ενός πλαισίου και τον αριθμό αυτών που απαρτίζουν μία σειρά (string), δηλαδή

$$U_{max} = N \times U_{oc} \quad (3.2)$$

όπου N, ο αριθμός των πλαισίων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά

Κάθε αντιστροφέας έχει επιπλέον την λειτουργία – αρμοδιότητα να διατηρεί το σύστημά μας στα αποδοτικά όρια του MPPT, δηλαδή να διασφαλίζεται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάρκου στο «γόνατο» της χαρακτηριστικής καμπύλης [7].

$$U_{MPPT,LO} < U_{PV\ PAK} < U_{MPPT,HI} \quad (3.3)$$

Είναι ωφέλιμο λοιπόν η τάση που επιλέγεται κατά την κατασκευή του πάρκου να εξασφαλίζει ότι η ονομαστική ισχύς θα βρίσκεται κοντά στη μέση του εύρους των ορίων MPPT. Επίσης είναι σημαντική η επιλογή αντιστροφέων που θα καλύπτουν ακριβώς την απαιτούμενη ισχύ και δεν θα «υπερ»-καλύπτουν ή υπολείπονται αυτής, με σκοπό την μείωση του κόστους κατασκευής του πάρκου.



Εικόνα 3.1: Αντιστροφέας (inverter) του εμπορίου [8]

3.4 Ρυθμιστής φόρτισης

Ο ρυθμιστής φόρτισης έχει την αρμοδιότητα να λαμβάνει την ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πάρκα και να την αποδίδει στις μπαταρίες με το να τις φορτίζει. Για να το επιτύχει αυτό χρειάζεται να μετατρέψει την τάση, συνήθως να την υποβιβάσει, έτσι ώστε να συμβαδίζει με την τάση της μπαταρίας. Επί της ουσίας ο ρυθμιστής φόρτισης είναι ένας μετατροπέας DC σε DC [9], συνδυασμένο με ένα σύστημα ελέγχου της ισχύος της μπαταρίας. Η τάση που φτάνει στον ρυθμιστή φόρτισης είναι συνήθως μεγάλη, καθώς τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται σε σειρά και παράγουν μεγάλη τάση αλλά μικρό ηλεκτρικό ρεύμα για χάριν εξοικονόμησης της διατομής καλωδίων. Ο ρυθμιστής φόρτισης αποδίδει συνεχή τάση στις μπαταρίες και τις φορτίζει, έτσι ώστε αυτές με τη σειρά τους να την αποδώσουν στον αντιστροφέα για να χρησιμοποιηθεί από φορτία.



Εικόνα 3.2: Ρυθμιστής φόρτισης του εμπορίου [10]

3.5 Συσσωρευτές – Αποθήκευση ενέργειας

Για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σταθμό, χρησιμοποιούνται συσσωρευτές οι οποίοι φορτίζονται με την περίσσεια από την παραγόμενη ενέργεια (που δεν καταναλώνεται στιγμιαία από τους χρήστες του δικτύου, και θα χανόταν ανεκμετάλλευτη) και παρέχουν τη δυνατότητα, αυτή η ενέργεια να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του καταναλωτή σε μετέπειτα χρόνο. Επίσης ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας κρίνεται απαραίτητο σε περιπτώσεις που δεν επιθυμείτε η άμεση εξάρτηση από τις μετεωρολογικές συνθήκες. [11]

Οι συσσωρευτές ανάλογα με τον τύπο των ηλεκτροδίων τους παίρνουν το όνομά τους, και υπάρχουν διάφοροι τύποι αυτών, π.χ. νικελίου-καδμίου. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται συσσωρευτές μόλυβδου, καθώς έχουν αρκετά πλεονεκτήματα και σχετικά χαμηλό κόστος. [11]

3.6 Βοηθητικός εξοπλισμός

3.6.1 Βάσεις στήριξης

Για την διεκπεραίωση της κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού πάρκου, χρειάζονται να τοποθετηθούν και βάσεις στήριξης τόσο για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια όσο και για τους αντιστροφείς. Οι βάσεις στήριξης είναι μεταλλικές και ανάλογα τον τύπο τους και τη χρήση χρησιμοποιείται ανοδιωμένο αλουμίνιο ή χάλυβας. Επίσης μπορούν να είναι είτε σταθερές είτε η κλίση τους να είναι ρυθμιζόμενη ηλεκτρονικά (tracker), κάτι που αυξάνει βέβαια το κόστος κατασκευής. Είναι σημαντικό η κατασκευή των βάσεων στήριξης να γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε δύσκολες καιρικές συνθήκες όπως χιονοπτώσεις, σεισμούς και δυνατούς ανέμους.

3.6.2 Ηλεκτρολογικοί πίνακες – Καλωδιώσεις

Σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο οι καλωδιώσεις διακρίνονται σε καλωδιώσεις συνεχούς και καλωδιώσεις εναλλασσόμενου ρεύματος. Αποτελούνται από συγκεκριμένο – τυποποιημένο είδος (solar cables) και προορίζονται για αυτή τη χρήση, λόγω της αρκετά μεγάλης διάρκειας ζωής τους, της αντοχής τους στο ηλιακό φως και τη ζέστη, όπως και άλλες περιπτώσεις κακών καιρικών συνθηκών.

Όλες οι καλωδιώσεις από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνήθως αρχικά καταλήγουν σε ηλεκτρολογικούς πίνακες, συγκεντρωτικούς, που διανέμουν συνεχές ρεύμα μέχρι τους αντιστροφείς. Από τους αντιστροφείς και μετά, καλωδιώσεις για εναλλασσόμενο ρεύμα καταλήγουν σε πίνακες με ασφάλειες για κάθε φάση, γενικούς διακόπτες και αντικεραυνικές ασφάλειες.

3.7 Κατανάλωση – Φορτία

Με τον όρο κατανάλωση – φορτία εννοείται η απαραίτητη μέγιστη και μέση ισχύς που θα πρέπει να καλύπτονται ενεργειακά από το αυτόνομο σύστημα παραγωγής ενέργειας. Είναι βασικό να καθοριστεί εξ αρχής ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος, π.χ. μόνο τους θερινούς μήνες. Ένα σύστημα που είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί μόνο τους θερινούς μήνες είναι προφανές ότι θα υπολειτουργεί τους υπόλοιπους. Επίσης, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί και ο αριθμός των ηλεκτρικών καταναλωτών που καλείται να εξυπηρετήσει το σύστημα. Αυτό είναι μια διαδικασία πρόβλεψης των ενεργειακών αναγκών που έχει, τόσο στην καθημερινότητά του σήμερα ο καταναλωτής, όσο αυτών που θα δημιουργηθούν στο μέλλον.

3.8 Αυτοδυναμία συστήματος

Με τον όρο αυτοδυναμία, εννοείται το χρονικό διάστημα, για το οποίο το σύστημά πρέπει να είναι ικανό να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε περίπτωση νέφωσης. Αυτή η παράμετρος ορίζεται ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετεί το σύστημα, τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής εγκατάστασης, τις επιπτώσεις από μια διακοπή παροχής ενέργειας καθώς επίσης και τη δυνατότητα πρόσβασης που υπάρχει σε άλλη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας αν παραστεί ανάγκη. Η επιλογή που θα γίνει, έχει επιπτώσεις στο σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (χωρητικότητα συσσωρευτών). Για παράδειγμα, έστω το σύστημα έχει αυτοδυναμία τεσσάρων ημερών ($n_p = 4$ ημέρες). Με αυτό τον τρόπο εννοείται ότι χρειάζεται να καλύψει ενεργειακά τις όποιες ανάγκες χωρίς να υπάρχει ηλιοφάνεια, με ενέργεια που προέρχεται από το σύστημα αποθήκευσης για 4 εικοσιτετράωρα. Ο συντελεστής n_p έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας και ορίζεται ως [12]:

$$n_p = \left(\frac{5}{17}\right) \times \left[\frac{(N_s \times d_{om} - N_{so})}{N_s}\right] + \left(\frac{12}{17}\right) \quad (3.4)$$

Όπου

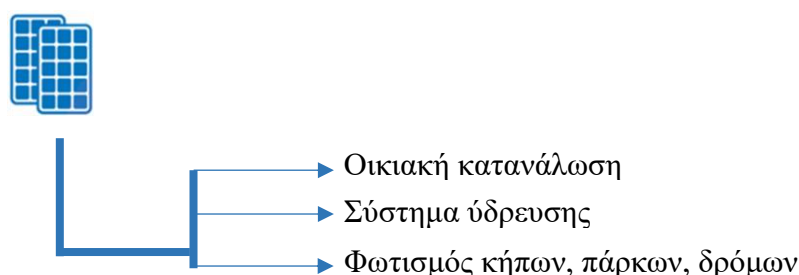
- N_s ο ημερήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας για τελείως ανέφελο ουρανό της 15^{ης} ημέρας του μήνα, και $N_s = 2\omega_s / 15$ ($\omega_s = \eta$ ωριαία γωνία δύσης του ηλίου σε οριζόντιο επίπεδο)
- N_{so} ο πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας του μήνα, (βλέπε βιβλιογραφία)
- d_{om} οι ημέρες που έχει ο αντίστοιχος μήνας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Η εκτίμηση της μέσης ημερήσιας και μηνιαίας κατανάλωσης σε ηλεκτρική ενέργεια και πως μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της περιόδου που υπολογίζεται να λειτουργεί το σύστημα είναι σημαντικότερο στοιχείο για την αποδοτική μελέτη και σχεδίαση ενός αυτόνομου ηλιακού ενεργειακού συστήματος. Η σχεδίαση του συστήματος θα βασιστεί στα στοιχεία που θα προκύψουν από αυτή τη διερεύνηση, και τυχόν εσφαλμένοι υπολογισμοί ίσως οδηγήσουν σε μεγάλα προβλήματα στη τελική του λειτουργία, όπως μη επαρκή ενεργειακή κάλυψη των καταναλωτών και αναγκαία επέκταση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με αρκετά μεγάλο κόστος.

Ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα μπορεί να αναπτυχθεί είτε για έναν μόνο χρήστη (κατοικία, βιομηχανία, κ.λπ.), είτε για περισσότερους (οικισμός, νησί, κ.λπ.). Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα (σχήμα 4.1) για τον πιθανό καταμερισμό της ενέργειας σε μία οικία.



Σχήμα 4.1: Ενδεικτικό διάγραμμα καταμερισμού ηλεκτρικής ενέργειας σε οικία

4.1 Απαιτήσεις οικίας σε ηλεκτρική ενέργεια

Σε μία κατοικία υπάρχουν πολλών ειδών φορτία με τα μεγαλύτερα αυτών να είναι συνήθως ο ηλεκτρικός φούρνος (1,5-3,5kW), το πλυντήριο ρούχων ή πιάτων(2-4kW) και ο θερμοσίφωνας (2-4kW). Για να καλύπτεται λοιπόν μια κατοικία ενεργειακά θα πρέπει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια να μπορεί να αποδώσει την απαραίτητη ισχύ όταν της ζητηθεί, άρα η ισχύς που αποδίδεται σε κάθε οικία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη απ' την ονομαστική ισχύ της συσκευής με τη μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ. Παρόλα αυτά τόσο σε ένα σπίτι όσο και σε ένα οικισμό δε υπάρχει ανάγκη για χρήση όλων των συσκευών ταυτόχρονα, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται συντελεστές ταυτοχρονισμού. Παρακάτω φαίνονται οι ονομαστικές ισχύς συνηθισμένων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών. [13]

Πίνακας 4.1: Ονομαστικές ισχύς συνηθισμένων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών και καταναλώσεις αυτών σε ηλεκτρική ενέργεια ανά μήνα [14] [13]

a/a	Συσκευή	Ισχύς (W)	Χρόνος λειτουργίας (Ωρες h για κάθε μήνα)	Καταναλισκόμενη ενέργεια (Wh)	Συντελεστής ταυτοχρονισμού	Παρατηρήσεις
1	Ψυγείο	90	720	64800	1	
2	Τηλεόραση	40	180	7200	0,5	
3	Mixer	100	4	400	0,05	
4	Τοστιέρα	800	4	3600	0,05	
5	Στεγνωτήρας μαλλιών	500	2	1000	0,05	
6	Πλυντήριο ρούχων	3000	8	24000	0,05	
7	Πλυντήριο πιάτων	3200	20	64000	0,1	
8	Φωτισμός	200	300	6000	0,7	
9	Καφετιέρα	800	2	1600	0,05	
10	Ηλεκτρικός φούρνος	3000	30	9000	0,2	
11	Φούρνος Μικροκυμάτων	800	3	2400	0,05	
12	Ηλεκτρικό σίδερο	1000	6	6000	0,05	
13	Κλιματιστικό	1000	180	180000	0,5	Καλοκαιρινούς μήνες
14	Ανεμιστήρας οροφής	150	500	75000	0,85	Καλοκαιρινούς μήνες
15	Ανεμιστήρας δαπέδου	90	500	45000	0,85	Καλοκαιρινούς μήνες
16	Θερμοσίφωνας	1200**	8	9600	0,1	
17	Ηλ. Υπολογιστής	250	150	37500	0,4	
18	Ηλ. σκούπα	1000	6	6000	0,05	
19	Αντλία θερμότητας	8000*	46*	375000*	0,5	Χειμερινούς μήνες

*Πρόκειται για μία αντλία ισχύος που προβλέπεται να χρησιμοποιεί μία κατοικία 90 τ.μ., με τιμές κατανάλωσης προερχόμενες από έρευνα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. [15]

**Σε κάθε ενεργειακά αποδοτική κατοικία είναι απαραίτητο να έχει εγκατασταθεί και ηλιακός θερμοσίφωνας, ο οποίο έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για τις ανάγκες ζεστού νερού χρήσης έως και 80%. Με στόχο την σωστή εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών, και την σιγουριά ότι δεν θα γίνει αστοχία των προβλέψεων, γίνεται η υπόθεση ότι ένας ηλιακός θερμοσίφωνας

ρίχνει την κατανάλωση ενέργειας λόγω του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα κατά 40%, τους χειμερινούς μήνες, όταν υπάρχει και περισσότερη κακοκαιρία. Με άλλα λόγια μπορεί να γίνει συμψηφισή αυτών των ενεργειών και να γίνει η παραδοχή ότι τελικά ένας ηλεκτρικός θερμοσίφοντας έχει ισχύ ίση με (ονομαστική ισχύς σύνηθες ηλεκτρικού θερμοσίφωνα = 3000W):

$$P_{\text{θερμοσίφωνα}} = 3000W \times 0,4 = 1200W \quad (4.1)$$

Άρα έχουμε σύνολο καταναλισκόμενης ενέργειας:

- 618100 Wh/μήνα για τους χειμερινούς μήνες
- 543100 Wh/μήνα για τους καλοκαιρινούς μήνες

Πάντα θεωρώντας ότι ο κάθε μήνας έχει 30 ημέρες, υπολογίζουμε την κατανάλωση και ανά ημέρα:

- 20,6 kWh/ημέρα για τους χειμερινούς μήνες
- 18,1 kWh/ημέρα για τους καλοκαιρινούς μήνες

Επίσης υπολογίζεται εύκολα και η ενέργεια που καταναλώνεται ανά έτος, η οποία είναι

$$\begin{aligned} E_{\text{οικία/έτος}} &= (618100Wh \times 5) + (543100Wh \times 3) + (243100Wh \times 4) \\ &= 5692200 Wh/\text{έτος} = 5,69 MWh/\text{έτος} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Για να βρούμε όμως τις απαιτήσεις σε ισχύ της κάθε οικίας χρησιμοποιούμε τους συντελεστές ταυτοχρονισμού οι οποίοι υπολογίζονται με βάση την ημερήσια χρήση της εκάστοτε συσκευής. Παρακάτω φαίνεται πως υπολογίζεται η μέση απαραίτητη ισχύς κάλυψης των ενεργειακών αναγκών μιας οικίας.

- Για τους χειμερινούς μήνες:

$$\begin{aligned} P_{n,\text{οικίας } \chi} &= (90W \times 1) + (40W \times 0.5) + (100W \times 0.05) + (800W \times 0.05) \\ &\quad + (500W \times 0.05) + (3000W \times 0.05) + (3200W \times 0.1) \\ &\quad + (200W \times 0.7) + (800W \times 0.05) + (3000W \times 0.2) \\ &\quad + (800W \times 0.05) + (1000W \times 0.05) + (1000W \times 0.5) \\ &\quad + (1000W \times 0.5) + (1200W \times 0.1) + (250W \times 0.4) \\ &\quad + (1000W \times 0.05) = 2790W \end{aligned} \quad (4.3)$$

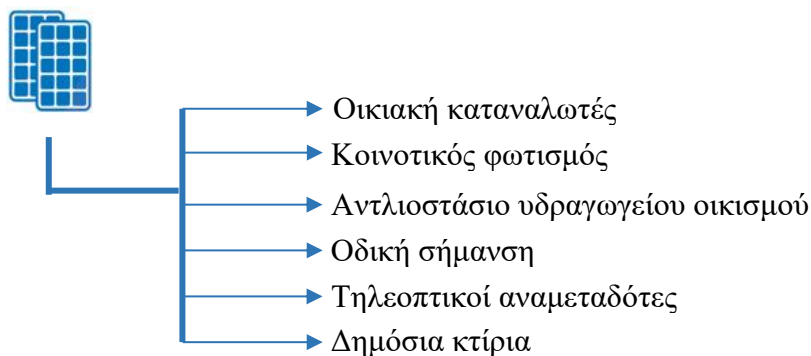
- Για τους καλοκαιρινούς μήνες:

$$\begin{aligned} P_{n,\text{οικίας } \kappa} &= (90kW \times 1) + (40kW \times 0.5) + (100kW \times 0.05) + (800kW \times 0.05) \\ &\quad + (500kW \times 0.05) + (3000kW \times 0.05) + (3200kW \times 0.1) \\ &\quad + (200kW \times 0.7) + (800kW \times 0.05) + (3000kW \times 0.2) \\ &\quad + (800kW \times 0.05) + (1000kW \times 0.05) + (1000kW \times 0.5) \\ &\quad + (150kW \times 0.85) + (90kW \times 0.85) + (1200kW \times 0.1) \\ &\quad + (250kW \times 0.4) + (1000kW \times 0.05) = 2494W \end{aligned} \quad (4.4)$$

Από τις δύο παραπάνω τιμές πρέπει να χρησιμοποιηθεί προφανώς η μεγαλύτερη για να καλύπτεται η οικία όλες τις περιόδους, άρα επιλέγεται η απαραίτητη ελάχιστη ισχύς του χειμώνα.

4.2 Απαιτήσεις οικισμού σε ηλεκτρική ενέργεια

Στην περίπτωση που χρειάζεται ένας ολόκληρος οικισμός να αυτονομηθεί ενεργειακά μπαίνουν αρκετοί ακόμα παράγοντες στην εξίσωση. Πέρα από την εξυπηρέτηση της κάθε οικίας, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τις διάφορες κοινοτικές – δημόσιες υπηρεσίες. [13]



Σχήμα 4.2: Ενδεικτικό διάγραμμα καταμερισμού ηλεκτρικής ενέργειας σε οικισμό

4.2.1 Οικιακοί καταναλωτές

Πρώτη κίνηση για την μελέτη περί των οικιακών καταναλωτών είναι να γνωρίζουμε το πλήθος τους. Έστω $n_{\text{πλ.οικ}}$ το πλήθος των οικιών σε έναν οικισμό. Εύκολα στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική απαραίτητη ισχύς όπως και η συνολική κατανάλωση ενέργειας από τον οικισμό.

$$P_{\text{οικιών}} = n_{\text{πλ.οικ}} \times \sigma_{\text{ταυτ}} \times P_{\text{η,οικίας}} = n_{\text{πλ.οικ}} \times \sigma_{\text{ταυτ}} \times 2790W \quad (4.5)$$

Όπου

- $P_{\text{οικιών}}$ η συνολική απαραίτητη ισχύς του οικισμού
- $P_{\text{η,οικίας}}$ η συνολική απαραίτητη ισχύς μίας οικίας
- $\sigma_{\text{ταυτ}}$ ο συντελεστής ταυτοχρονισμού του οικισμού

Στην τιμή των 2790W ($\approx 3\text{kW}$) συμπεριλαμβάνεται και ο συντελεστής ταυτοχρονισμού, όπως περιγράφεται και στο κεφάλαιο 4.1. Θα πρέπει βέβαια να συμπεριληφθεί ο συντελεστής ταυτοχρονισμού όσο αναφορά τον οικισμό, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.4).

$$E_{\text{οικιών/ημερα}} = n_{\text{πλ.οικ}} \times E_{\text{η,οικίας/ημέρα}} = n_{\text{πλ.οικ}} \times 20,6 \text{ kWh/ημέρα} \quad (4.6)$$

Όπου

- $E_{οικιών/ημέρα}$ η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον οικισμό σε μία ημέρα.
- $E_{π.οικίας/ημέρα}$ η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από μία οικία σε μία ημέρα.

Λόγω της αυτονομίας που θα πρέπει να ανταποκρίνεται το σύστημα, από τις υπολογισμένες καταναλώσεις ενέργειας που υπολογίσθηκαν στο κεφάλαιο 4.1, επιλέχθηκε η μεγαλύτερη (δηλαδή αυτή του χειμώνα), με σκοπό την σωστή πρόβλεψη για τη χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

4.2.2 Λοιπές καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας σε οικισμό

Σε έναν οικισμό, πέρα από τους οικιακούς καταναλωτές υπάρχουν και άλλες ενεργειακές ανάγκες που θα πρέπει να εξυπηρετηθούν. Οι περισσότερες από αυτές αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους.

4.2.2.1 Κοινοτικός φωτισμός

Έστω ότι στον οικισμό χρησιμοποιούνται $n_{πλ.λάμπες}$ οι οποίες θα πρέπει να λειτουργούν τις βραδινές ώρες μεταξύ 6:00 μ.μ. και 6:00π.μ. της επόμενης ημέρας. Συνολικά θα λειτουργούν για 12 ώρες καθημερινά. Η ισχύς που χρειάζονται οι λαμπτήρες για να λειτουργήσουν υπολογίζεται παρακάτω [13].

$$P_{κοιν.φωτ.} = n_{πλ.λάμπες} \times P_{ον.λαμπών} \quad (4.7)$$

Όπου

- $P_{κοιν.φωτ.}$ η συνολική ισχύς των λαμπών του κοινοτικού φωτισμού.
- $P_{ον.λαμπών}$ η ονομαστική ισχύς των λαμπών του κοινοτικού φωτισμού.

Στη συνέχεια υπολογίζεται και η καταναλισκόμενη ενέργεια από τις λάμπες [13].

$$E_{κοιν.φωτ./ημέρα} = P_{κοιν.φωτ.} \times 11h \quad (4.8)$$

Όπου

- $E_{κοιν.φωτ./ημέρα}$ η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον κοινοτικό φωτισμό σε μία ημέρα.

4.2.2.2 Αντλιοστάσιο υδραγωγείου οικισμού

Το αντλιοστάσιο του υδραγωγείου του οικισμού χρειάζεται να λειτουργεί διαφορετικό χρονικό διάστημα το καλοκαίρι και διαφορετικό τον χειμώνα (μεγαλύτερο το καλοκαίρι). Ως $P_{αντλ.οικ.}$ ορίζεται

η ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία του αντλιοστασίου. Η ενέργεια που καταναλώνει θα είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι και μικρότερη τον χειμώνα, όπως υπολογίζεται παρακάτω [13]:

- Για τον χειμώνα:

$$E_{\text{αντλ.οικ./ημέρα,}\chi} = P_{\text{αντλ.οικ.}} \times t_{\chi\epsilon\iota\mu} \quad (4.9)$$

Όπου

- $E_{\text{αντλ.οικ./ημέρα,}\chi}$ η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον οικισμό σε μία ημέρα.
- $t_{\chi\epsilon\iota\mu}$ το χρονικό διάστημα λειτουργίας του αντλιοστασίου σε μία ημέρα τον χειμώνα.

- για το καλοκαίρι:

$$E_{\text{αντλ.οικ./ημέρα,}\kappa} = P_{\text{αντλ.οικ.}} \times t_{\kappa\alpha\lambda} \quad (4.10)$$

Όπου

- $E_{\text{αντλ.οικ./ημέρα,}\kappa}$ η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον οικισμό σε μία ημέρα.
- $t_{\kappa\alpha\lambda}$ το χρονικό διάστημα λειτουργίας του αντλιοστασίου σε μία ημέρα το καλοκαίρι.

4.2.2.3 Οδική σήμανση

Με βάση το πλήθος $n_{\text{πλ,σημ}}$ των σηματοδοτών υπολογίζεται η συνολική ισχύς $P_{\text{οδ.σημ}}$ που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος της οδικής σήμανσης [13].

$$P_{\text{οδ.σημ.}} = n_{\text{πλ,σημ}} \times P_{\text{σημ}} \quad (4.11)$$

Όπου

- $P_{\text{σημ}}$ η ονομαστική ισχύς ενός σηματοδότη

Στη συνέχεια υπολογίζεται και η ενέργεια που καταναλώνουν οι σηματοδότες σε μία ημέρα [13]:

$$E_{\text{οδ.σημ./ημέρα}} = P_{\text{οδ.σημ.}} \times 24h \quad (4.12)$$

Όπου

- $E_{\text{οδ.σημ./ημέρα}}$ η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τους σηματοδότες σε μία ημέρα.

4.2.2.4 Τηλεοπτικοί αναμεταδότες

Παρόμοια με τη προηγούμενη παράγραφο, με βάση το πλήθος $n_{\text{πλ,αναμ}}$ των τηλεοπτικών αναμεταδοτών υπολογίζεται η συνολική ισχύς $P_{\text{τηλ.αναμ}}$ που απαιτείται για τη λειτουργία τους [13].

$$P_{\text{τηλ.αναμ.}} = n_{\text{πλ,αναμ}} \times P_{\text{αναμ}} \quad (4.13)$$

Όπου

- $P_{\text{αναμ}}$ η ονομαστική ισχύς ενός τηλεοπτικού αναμεταδότη

Στη συνέχεια υπολογίζεται και η ενέργεια που καταναλώνουν οι τηλεοπτικοί αναμεταδότες σε μία ημέρα [13]:

$$E_{\text{τηλ.αναμ./ημέρα}} = P_{\text{τηλ.αναμ.}} \times 24h \quad (4.14)$$

Όπου

- $E_{\text{οδ.σημ./ημέρα}}$ η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τους τηλεοπτικούς αναμεταδότες σε μία ημέρα.

4.2.2.5 Δημόσια κτίρια

Σε ένα δημόσιο κτίριο παρουσιάζεται ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια, τόσο για τον φωτισμό του, όσο και για διάφορες άλλες συσκευές όπως κλιματισμό, τηλεοράσεις, εκτυπωτές, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, κ.λπ. Με βάση τον πίνακα (4.1) της παραγράφου 4.1 δημιουργείται ένας υποπίνακας με τα φορτία ενός δημόσιου κτιρίου [13].

Πίνακας 4.2: Ονομαστικές ισχύς συνηθισμένων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών και καταναλώσεις αυτών σε ηλεκτρική ενέργεια ανά μήνα (για δημόσιο κτίριο) [14] [13]

α/ α	Συσκευή	Ισχύς (W)	Χρόνος λειτουργίας (Ωρες h για κάθε μήνα)	Καταναλισκόμενη ενέργεια (Wh)	Συντελεστής ταυτοχρονισμού	Παρατηρήσεις
1	Φωτισμός	1000	400	400000	1	
2	Ηλ. Υπολογιστές	5×300	400	600000	0.6	
3	Τηλεοράσεις	4×40	400	64000	1	
4	Εκτυπωτές	2×200	30	12000	0.5	
5	Κλιματισμός	3×1000	150	450000	0.5	Καλοκαιρινοί μήνες
6	Ηλ. θερμαντήρας	3×1000	150	450000	0.5	Χειμερινοί μήνες

Άρα έχουμε σύνολο καταναλισκόμενης ενέργειας:

- 1526000 Wh/μήνα για τους χειμερινούς μήνες
- 1526000 Wh/μήνα για τους καλοκαιρινούς μήνες

Πάντα θεωρώντας ότι ο κάθε μήνας έχει 30 ημέρες, υπολογίζουμε την κατανάλωση και ανά ημέρα:

- 50,87 kWh/ημέρα για τους χειμερινούς μήνες

- 50,87 kWh/ημέρα για τους καλοκαιρινούς μήνες

Επίσης υπολογίζεται εύκολα και η ενέργεια που καταναλώνεται ανά έτος, η οποία είναι

$$\begin{aligned} E_{n,δημ.κτ./\acute{\epsilon}τος} &= (1526000Wh \times 5) + (1526000Wh \times 3) + (1076000Wh \times 4) \\ &= 16512000 Wh/\acute{\epsilon}τος = 16,51 MWh/\acute{\epsilon}τος \end{aligned} \quad (4.15)$$

Για να βρούμε όμως τις απαιτήσεις σε ισχύ του κάθε δημόσιου κτιρίου χρησιμοποιούμε τους συντελεστές ταυτοχρονισμού οι οποίοι υπολογίζονται με βάση την ημερήσια χρήση της εκάστοτε συσκευής. Παρακάτω φαίνεται πως υπολογίζεται η μέση απαραίτητη ισχύς κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ενός δημόσιου κτιρίου [13].

- Για τους χειμερινούς μήνες:

$$\begin{aligned} P_{n,δημ.κτ.χ} &= (1000W \times 1) + (1500W \times 0.6) + (160W \times 1) + (400W \times 0.5) \\ &\quad + (3000W \times 0.5) = 3760W \end{aligned} \quad (4.16)$$

- Για τους καλοκαιρινούς μήνες:

$$\begin{aligned} P_{n,δημ.κτ.κ} &= (1000W \times 1) + (1500W \times 0.6) + (160W \times 1) + (400W \times 0.5) \\ &\quad + (3000W \times 0.5) = 3760W \end{aligned} \quad (4.17)$$

Εφόσον οι αναγκαίες απαιτήσεις σε ισχύ ενός δημοσίου κτιρίου δεν αλλάζουν σε γενικές γραμμές κατά τη διάρκεια του έτους, επιλέγεται οποιαδήποτε από τις παραπάνω τιμές για τους υπολογισμούς πρόβλεψης της χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Οπότε οι συνολικές απαιτήσεις σε ισχύ λόγω των δημόσιων κτιρίων ισούται με: [13]

$$P_{δημ.κτ.} = n_{πλ,δημ.κτ.} \times P_{n,δημ.κτ.κ} \quad (4.18)$$

Και οι απαιτήσεις σε ενέργεια υπολογίζονται με παρόμοιο τρόπο

$$E_{δημ.κτ./\acute{\epsilon}τος} = n_{πλ,δημ.κτ.} \times E_{n,δημ.κτ.,\acute{\epsilon}τος} \quad (4.19)$$

Οπότε και

$$E_{δημ.κτ./\eta\mu\acute{\epsilon}ρα} = \frac{E_{δημ.κτ./\acute{\epsilon}τος}}{365 \eta\mu\acute{\epsilon}ρες} = 45,23 kWh/\eta\mu\acute{\epsilon}ρα \quad (4.20)$$

4.2.3 Συνολικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας σε οικισμό

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραγράφους και τις εξισώσεις (4.4) ~ (4.19), μπορεί πλέον να υπολογισθεί τόσο η τιμή της συνολικής απαραίτητης ισχύος για έναν οικισμό, όσο και η ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από αυτόν.

$$P_{\text{οικισμού}} = P_{\text{οικιών}} + P_{\text{αντλ.οικ.}} + P_{\text{κοιν.φωτ.}} + P_{\text{οδ.σημ.}} + P_{\text{τηλ.αναμ.}} + P_{\text{δημ.κτ.}} \quad (4.21)$$

Όπου

- $P_{\text{οικισμού}}$ η συνολική απαραίτητη ισχύς για έναν οικισμό.

και η ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από έναν οικισμό είναι:

$$E_{\text{οικισμού}} = E_{\text{οικιών/ημέρα}} + E_{\text{αντλ.οικ./ημέρα}} + E_{\text{κοιν.φωτ./ημέρα}} + E_{\text{οδ.σημ./ημέρα}} + E_{\text{τηλ.αναμ./ημέρα}} + E_{\text{δημ.κτ./ημέρα}} \quad (4.22)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό ενεργειακό σύστημα, χρειάζεται και ένα σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας που παράγει με σκοπό την εκμετάλλευση αυτής οποιαδήποτε χρονική στιγμή ανεξαρτήτως καιρικών φαινομένων ή ώρας. Όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι πλέον πιο συνηθισμένοι συσσωρευτές σε τέτοια συστήματα είναι οι μολύβδου. Παρακάτω φαίνονται κάποια απ' τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους:

Πίνακας 5.1: Ανάλυση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του συσσωρευτή μολύβδου

{Ιστοσελίδα - infoservice.com.gr [16]}

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλό κόστος	Σχετικά χαμηλή διάρκεια ζωής (περίπου 500 κύκλοι βαθιάς φόρτο - εκφόρτισης)
Ανακυκλώσιμη	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας
Διατίθεται έκδοση χωρίς συντήρηση	Κίνδυνος μόνιμης βλάβης σε περίπτωση μακροχρόνιας αναμονής
Εύκολη κατασκευή	Περιέχει αρκετά βλαβερές ουσίες για την υγεία
Καλή απόδοση επαναφόρτισης	Το βραχυκύκλωμα προκαλεί μόνιμη βλάβη στη μπαταρία
Ποικίλες χωρητικότητες, μεγέθη	Μπαταρίες μικρού μεγέθους είναι δύσκολο να κατασκευαστούν
Καλή απόδοση σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (-40°C – 60°C)	

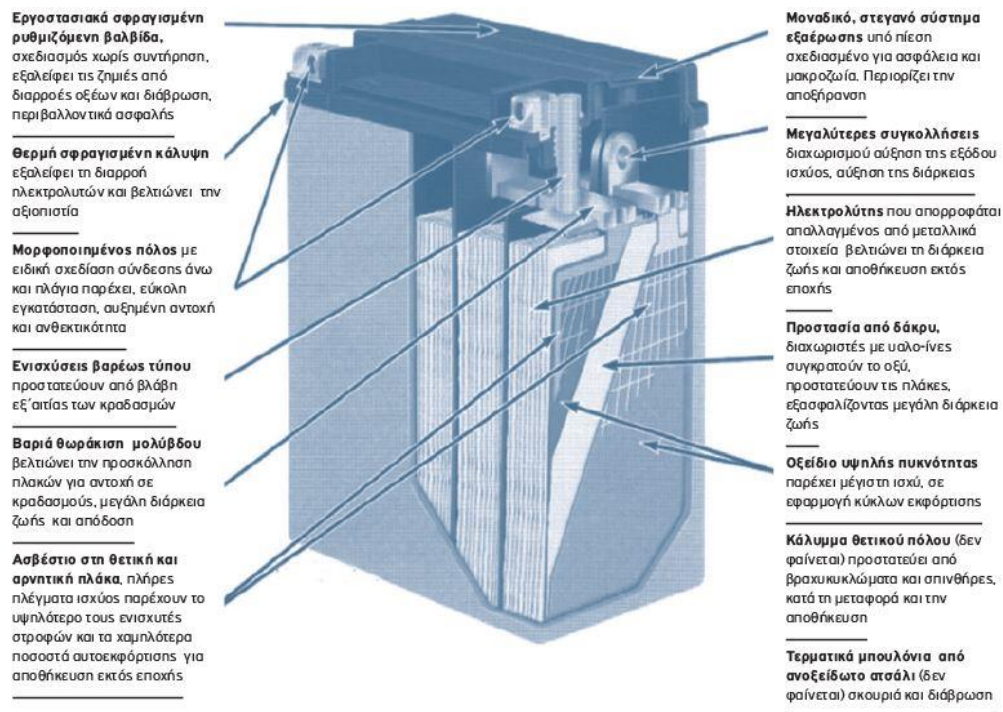
5.1 Συσσωρευτής μολύβδου

Ο συσσωρευτής τύπου μολύβδου-οξέος ήταν η πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που έχει εφευρεθεί το 1859. Στα 159 χρόνια ανάπτυξης έχει χρησιμοποιηθεί σε αμέτρητες εφαρμογές με κύρια χρήση την εκκίνηση οχημάτων, εφεδρικής ενέργειας, τηλεπικοινωνίες και έλκυση (tractions). Οι συσσωρευτές τύπου μολύβδου-οξέος αντιπροσωπεύουν το 70% των παγκόσμιων πωλήσεων στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η τομή μιας τέτοιας μπαταρίας.

Ένας συσσωρευτής μολύβδου αποτελείται από ένα πλήθος κυψελίδων συνδεδεμένα σε σειρά. Αυτές συσκευάζονται σε μια μονωτική θήκη και απαρτίζουν τον συσσωρευτή. Ανάλογα με το πλήθος αυτών των κυψελίδων η ονομαστική τάση V_{σ} ενός συσσωρευτή μπορεί να είναι 6, 12, 24, 48 V. Αυτές οι τιμές ονομαστικών τάσεων είναι οι πιο συνηθισμένες στην αγορά, παρόλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα να πάρουμε οποιαδήποτε τάση επιθυμούμε, συνδέοντας σε σειρά συσσωρευτές. Για παράδειγμα μία διάταξη δέκα συσσωρευτών ονομαστικής τάσης 24V σε σειρά, δίνει συνολική τάση 240V [11].

$$V_{\text{συστ}} = 10 \times V_{\sigma,24V} = 240V \quad (5.1)$$

Παρατηρώντας την τιμή της τάσης κατά τη διάρκεια χρήσης του συσσωρευτή, προσφέρει ενημέρωση ως προς το ποσοστό εκφόρτισης του. Σε έναν συσσωρευτή μολύβδου δε πρέπει ποτέ να ξεπερνάτε η μέγιστη τάση φόρτισής του, καθώς δημιουργούνται αέρια που θα τον καταστρέψουν. Από την άλλη μεριά δε πρέπει η τάση του συσσωρευτή να πέφτει πιο χαμηλά από την τελική τάση εκφόρτισης V_{τ} , προς αποφυγή αχρήστευσης του. Η τελική τάση εκφόρτισης του συσσωρευτή είναι πολύ σημαντική, αφού καθορίζει το ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας που δύναται να ανακτηθεί και βοηθάει στη ρύθμιση των αυτοματισμών αποκοπής των συσσωρευτών του φωτοβολταϊκού σταθμού από τα φορτία για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας τους. [11]



Εικόνα 5.1: Επεξηγηματικό σχήμα τομής συσσωρευτή μολύβδου [16]

Ο συσσωρευτής για τη μακροζωία του συνίσταται να φορτίζεται με ένα συγκεκριμένο ρεύμα φόρτισης, που συνήθως έχει τιμή περίπου το 1/10 της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας. Αντίστοιχα, το ρεύμα εκφόρτισης ορίζει και τον χρόνο που θα περάσει έως ότου η ενέργεια του συσσωρευτή θα εξαντληθεί και δε μπορεί να ξεπερνάει μια συγκεκριμένη τιμή που ορίζεται από τον κατασκευαστή. [11]

Η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν συσσωρευτή μολύβδου ορίζεται από τη χωρητικότητά του $Q_{\text{μολ}}$ και μετράτε σε Αμπερώρια (Ah). Χωρητικότητα ιδανικά υπολογίζεται από τη

μέση ένταση του ρεύματος εκφόρτισης επί το σύνολο των ωρών μέχρι ο συσσωρευτής να εκφορτιστεί. [11]

$$Q_{\mu\sigma\lambda} = I_{\mu,\epsilon\kappa} \times t \quad (5.2)$$

Επίσης η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε έναν συσσωρευτή υπολογίζεται θεωρητικά από τη παρακάτω σχέση: [11]

$$E_{\sigma} = Q_{\mu\sigma\lambda} \times V_{\sigma} \times \beta \times \eta_{\sigma} \quad (5.3)$$

όπου

- E_{σ} η αποθηκευμένη ενέργεια σε Wh
- V_{σ} η ονομαστική τάση του συσσωρευτή σε V
- β ένας αδιάστατος συντελεστής που αντιπροσωπεύει το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή, κυμαίνεται μεταξύ 0,1 έως 0,8.
- η_{σ} ο συντελεστής απόδοσης του συσσωρευτή, κυμαίνεται μεταξύ 0,8 με 0,9.

Η μέση ισχύς P_{ϕ} που αναμένεται να παράσχει ο συσσωρευτής προς κάλυψη των απαιτήσεων φορτίου n_p ημερών, συνδέεται με τη χωρητικότητα του σύμφωνα με τη σχέση: [11]

$$P_{\phi} = \frac{Q_{\mu\sigma\lambda} \times \eta_{\sigma} \times V_{\sigma}}{24 \times n_p} \quad (5.4)$$

όπου

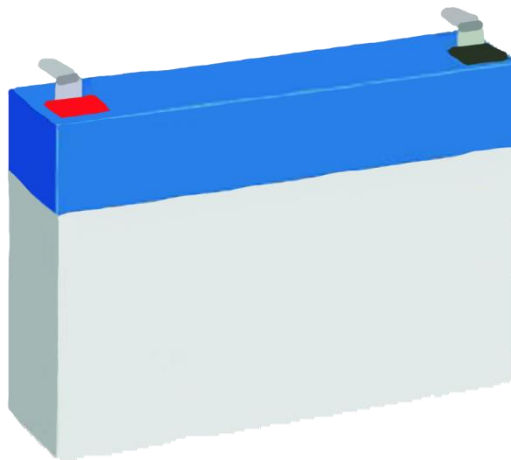
- P_{ϕ} η μέση ισχύς του φορτίου που εξυπηρετείται από το συσσωρευτή.
- n_p οι μέρες κάλυψης του φορτίου από τον συσσωρευτή (δίνεται από σχέση 3.5).

Πρέπει να αναφερθεί ότι η θερμοκρασία των συσσωρευτών παίζει μεγάλο ρόλο στην ομαλή λειτουργία τους. Μικροί χώροι με σκοπό τη στέγαση πολλαπλών συσσωρευτών θα πρέπει να αποφεύγονται ή να αερίζονται επαρκώς. Επίσης οι κύκλοι φορτίσεων – εκφορτίσεων είναι μία σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει την επιλογή του συσσωρευτή για ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Μία μέση τιμή φορτίσεων – εκφορτίσεων είναι οι 500 με 1000 κύκλοι. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο κύκλος φορτίσεων – εκφορτίσεων του συσσωρευτή τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής του, άρα υπάρχουν άμεσες οικονομικές επιπτώσεις στη συντήρηση του συστήματος. [11]

5.2 Τρόποι σύνδεσης συσσωρευτών

Στις μεγάλες εγκαταστάσεις, η συνολική χωρητικότητα των συσσωρευτών που απαιτείται δεν είναι δυνατόν να καλυφθεί με ένα και μόνο συσσωρευτή, και για αυτό το λόγο πραγματοποιούνται συνδεσμολογίες αυτών σε σειρές και παράλληλα με σκοπό να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις.

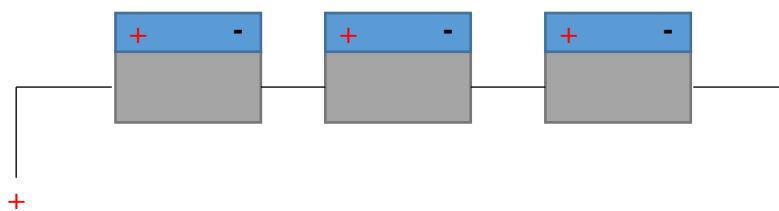
Παρατηρώντας έναν συσσωρευτή εξωτερικά εύκολα διακρίνονται τα ηλεκτρόδιά του, το θετικό και το αρνητικό [11].



Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση συσσωρευτή μολύβδου και των πόλων του (ηλεκτρόδια: κόκκινο - θετικό, μαύρο - αρνητικό)

5.2.1 Σύνδεση σε σειρά

Η διάταξη αυτή υλοποιείται, συνδέοντας τον θετικό πόλο του ενός συσσωρευτή, με τον αρνητικό του άλλου. Με αυτό το τρόπο η συνολική τάση ισούται με το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων του κάθε συσσωρευτή που συμπεριλαμβάνεται στη σειρά. Αξιοσημείωτο είναι ότι για την πραγματοποίηση αυτής της συνδεσμολογίας, αναγκαίο είναι οι χωρητικότητες του των συσσωρευτών να είναι ίδιες. [11]

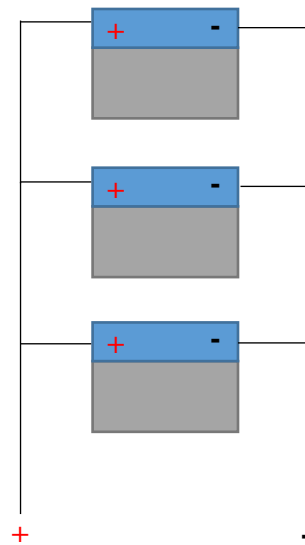


Σχήμα 5.2: Συσσωρευτές συνδεδεμένοι σε σειρά

5.2.2 Παράλληλη σύνδεση

Η διάταξη αυτή υλοποιείται, συνδέοντας όλους τους θετικούς πόλους μεταξύ τους, και αντίστοιχα όλους τους αρνητικούς πόλους των συσσωρευτών. Με αυτό τον τρόπο, η συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας αυξάνεται και ισούται με το άθροισμα των επιμέρους χωρητικότητων των συσσωρευτών

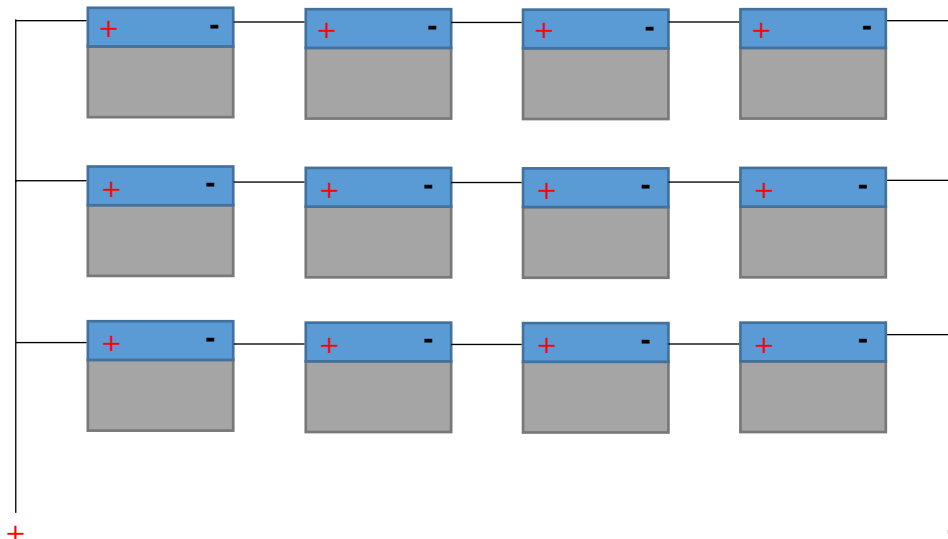
που την απαρτίζουν. Σημαντικό είναι οι ονομαστικές τάσεις των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιηθούν να είναι ίδιες [11].



Σχήμα 5.3: Συσσωρευτές συνδεδεμένοι παράλληλα

5.2.3 Μικτή σύνδεση

Αυτή η διάταξη συνδυάζει τις τεχνικές των παραπάνω διατάξεων με σκοπό την ανάπτυξη πιο περίπλοκων συστοιχιών [11].



Σχήμα 5.4: Μικτή σύνδεση συσσωρευτών.



Εικόνα 5.2: Συνδεδεμένοι συσσωρευτές για αυτόνομο σύστημα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΑΣΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6 ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η μεθοδολογία, τόσο για την μελέτη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου και τα συγκεκριμένα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν, όσο και για την εύρεση των συναρτήσεων υπολογισμού των βασικών στοιχείων που επηρεάζουν τεχνοοικονομικά το κόστος αυτού. Η έναρξη της μελέτης ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου προϋποθέτει τη γνώση των παρακάτω πληροφοριών:

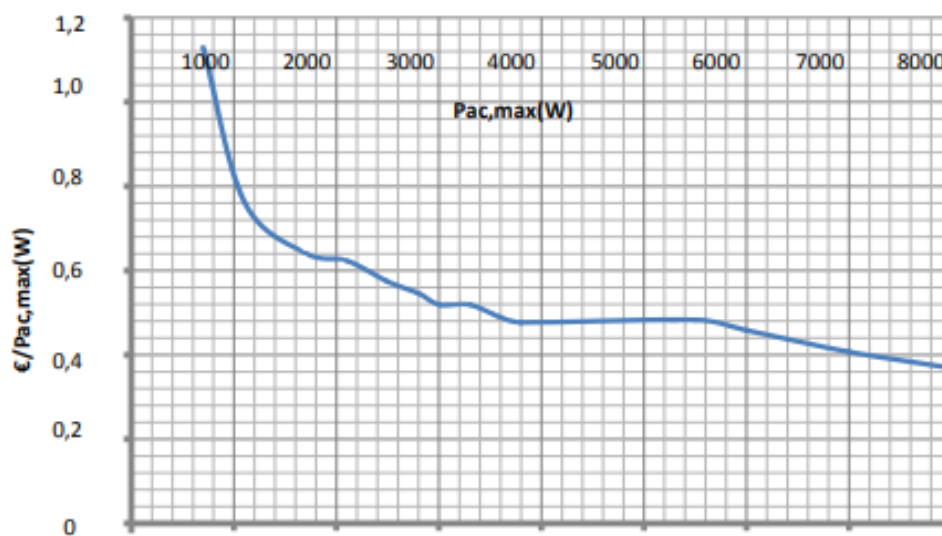
- Το μέγεθος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.
- Το απαιτούμενο φορτίο (μέγιστη ισχύς ζήτησης) που θα πρέπει να καλύπτει ενεργειακά το φωτοβολταϊκό πάρκο.
- Τον προορισμό της παραγόμενης ενέργειας (οικιακή χρήση, βιομηχανική χρήση, τροφοδοσία οικισμού ή χωριού).
- Το είδος του φορτίου (φωτισμός, κίνηση, κ.λπ.).
- Τον τόπο – χώρο εγκατάστασης του πάρκου και το κόστος αυτού.
- Τον τύπο των βάσεων στήριξης που θα χρησιμοποιηθούν (σταθερές με βέλτιστη κλίση ή περιστρεφόμενες).
- Το είδος των φωτοβολταϊκών συλλεκτών που θα χρησιμοποιηθούν.
- Το είδος των ηλεκτρονικών διατάξεων και συσκευών (τεχνικά φυλλάδια κατασκευαστή).
- Τα μετεωρολογικά στοιχεία της εκάστοτε περιοχής που θα γίνει η εγκατάσταση του πάρκου.

6.1 Αντιστροφείας

Η επιλογή των αντιστροφέων (inverter) είναι ίσως το πιο σημαντικό μέρος σε μία μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Είναι απαραίτητο να συγκριθούν οι επιλογές από κάθε πλευρά, τόσο από την οικονομική, όσο και από αυτή της αυτονομίας. Με άλλα λόγια, η επιλογή ενός αντιστροφέα μεγάλης ισχύος είναι σίγουρα πιο συμφέρουσα από οικονομικής άποψης, καθώς η διαφορά στην τελική τιμή είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με την επιλογή πολλαπλών μικρότερης ισχύος. Επίσης όσο λιγότεροι αντιστροφείς υπάρχουν σε ένα σύστημα, τόσο μειώνεται η πολυπλοκότητα αυτού. Από την άλλη μεριά, η επιλογή ενός και μόνο αντιστροφέα μεγάλης ισχύος είναι τρομερά λανθασμένη επιλογή από άποψη αυτονομίας καθώς σε περίπτωση σφάλματος υπάρχει ο κίνδυνος όλο το πάρκο να βγει εκτός λειτουργίας, προκαλώντας μεγάλη οικονομική απώλεια. [7]

Ακόμα πρέπει να αναφερθεί πως σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει να επιλέγεται αντιστροφέας ίσης ονομαστικής ισχύος εξόδου με την ονομαστική τιμή ισχύος αιχμής των φ/β πλαισίων στη είσοδο του

αντιστροφέα. Μια τέτοια επιλογή είναι λανθασμένη καθώς στην πράξη είναι πολύ σπάνιο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να παράγουν την ονομαστική τιμή αιχμής τους. Μάλιστα οι εταιρίες παραγωγής αντιστροφέων προτείνουν την επιλογή της τιμής της ισχύος εισόδου του αντιστροφέα να είναι της τάξης του 10% έως 20% μικρότερη από αυτή της μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Παρόλα αυτά πρέπει να υπάρχει προσοχή αφού εάν επιλεγεί ακόμα μικρότερη τιμή, ίσως χρειαστεί η προσθήκη ενός ακόμα αντιστροφέα στο σύστημα, κάτι το οποίο θα επιβαρύνει αρκετά τον οικονομικό προϋπολογισμό του πρότζεκτ. [7]



Εικόνα 6.1: Κόστος αντιστροφέων σε σχέση με την μέγιστη ισχύ εξόδου. Οι τιμές αφορούν αντιστροφείς της εταιρίας SMA (σειρές Sunny Boy και Sunny Mini Central) και προέκυψαν από μια στοιχειώδη έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο. Σκοπός είναι να φανεί ότι το κόστος ανά Watt μειώνεται με την αύξηση της ισχύος του αντιστροφέα. [7]

6.1.1 Επιλογή αντιστροφέα/έων

Εφόσον είναι γνωστή η απαραίτητη ισχύς $P_{mp,req}$ που το φωτοβολταϊκό πάρκο πρέπει να καλύπτει λόγω της αυτονομίας του συστήματος, τότε η ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα, ή η συνολική ονομαστική ισχύς των αντιστροφέων, που θα επιλεγθούν, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση ή και μεγαλύτερη αυτής.

$$P_{mp,req} \leq n_{αντ} \times P_{ον,αντ} \quad (6.1)$$

Όπου

- $n_{αντ}$ το πλήθος των αντιστροφέων του πάρκου
- $P_{ον,αντ}$ η ονομαστική ισχύς ενός αντιστροφέα

Μεγάλη βαρύτητα στην επιλογή ενός αντιστροφέα παίζουν φυσικά και τα λοιπά του χαρακτηριστικά όπως η ονομαστική τάση εισόδου και εξόδου και το ονομαστικό ρεύμα εισόδου και

εξόδου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το φυλλάδιο με τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός αντιστροφέα ονομαστικής ισχύος 100kW του εμπορίου.

SUN2000-100KTL-M1
Technical Specification

Technical Specification	SUN2000-100KTL-M1
Efficiency	
Max. efficiency	98.8% @480 V, 98.6% @380 V / 400 V
European efficiency	98.6% @480 V, 98.4% @380 V / 400 V
Input	
Max. Input Voltage ¹	1,100 V
Max. Current per MPPT	26 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	40 A
Start Voltage	200 V
MPPT Operating Voltage Range ²	200 V ~ 1,000 V
Nominal Input Voltage	720 V @480 Vac, 600 V @400 Vac, 570 V @380 Vac
Number of MPP trackers	10
Max. number of inputs	20
Output	
Nominal AC Active Power	100,000 W
Max. AC Apparent Power	110,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)	110,000 W
Nominal Output Voltage	480 V/ 400 V/ 380 V, 3W+(N)+PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current	120.3 A @480 V, 144.4 A @400 V, 152.0 A @380 V
Max. Output Current	133.7 A @480 V, 160.4 A @400 V, 168.8 A @380 V
Adjustable Power Factor Range	0.8 leading... 0.8 lagging
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%
Protection	
Input-side Disconnection Device	Yes
Anti-islanding Protection	Yes
AC Overcurrent Protection	Yes
DC Reverse-polarity Protection	Yes
PV-array String Fault Monitoring	Yes
DC Surge Arrester	Type II
AC Surge Arrester	Type II
DC Insulation Resistance Detection	Yes
Residual Current Monitoring Unit	Yes
Communication	
Display	LED indicators; WLAN adaptor + FusionSolar APP
RS485	Yes
USB	Yes
Monitoring BUS (MBUS)	Yes (isolation transformer required)
General Data	
Dimensions (W x H x D)	1,035 x 700 x 365 mm
Weight (with mounting plate)	90 kg
Operating Temperature Range	-25°C ~ 60°C
Cooling Method	Smart Air Cooling
Max. Operating Altitude without Derating	4,000 m
Relative Humidity	0 ~ 100%
DC Connector	Staubli MC4
AC Connector	Waterproof Connector + OT/DT Terminal
Protection Degree	IP66
Topology	Transformerless
Nighttime Power Consumption	< 3.5 W
Standard Compliance (more available upon request)	
Certificate	EN 62109-1/-2, IEC 62109-1/-2, EN 50530, IEC 62116, IEC 61727, IEC 60068, IEC 61683
Grid Connection Standards	VDE-AR-N4105, EN 50549-1, EN 50549-2, RD 661, RD 1699, C10/11, DEWA , G99, NRS 097-2-1

*1 The maximum input voltage is the upper limit of the DC voltage. Any higher input DC voltage would probably damage inverter
*2 Any DC input voltage beyond the operating voltage range may result in inverter improper operating

Εικόνα 6.2: Τεχνικό φυλλάδιο αντιστροφέα 100kW του εμπορίου [17]

Η ονομαστική μέγιστη τάση εισόδου ενός αντιστροφέα ορίζεται ως $V_{αντ,εισ}$ και το ονομαστικό ρεύμα εισόδου ως $I_{αντ,εισ}$ και με βάση αυτά θα σχεδιαστούν οι συστοιχίες των πλαισίων σε σειρές και παράλληλα. Αντίστοιχα η ονομαστική μέγιστη τάση εξόδου ενός αντιστροφέα ορίζεται ως $V_{αντ,εξ}$ και το ονομαστικό ρεύμα εξόδου ενός αντιστροφέα ως $I_{αντ,εξ}$, και με βάση αυτές τις τιμές θα σχεδιαστούν τα συστήματα των διακοπών ασφαλείας και θα επιλεγθεί ο μετασχηματιστής ισχύος.

6.1.2 Είσοδος/Εξοδος αντιστροφέα

Στις εισόδους των αντιστροφέων θα συνδεθούν τα πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρές. Η κάθε σειρά από φωτοβολταϊκά πλαίσια παράγει τάση ίση με αυτή ενός πλαισίου.

$$V_{σειρ} = n_{πλ/σειρ} \times V_{ον,πλ} = V_{αντ,εισ} \quad (6.2)$$

Όπου

- $V_{σειρ}$ η συνολική τάση μίας σειράς φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $n_{πλ/σειρ}$ τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ανά σειρά
- $V_{ον,πλ}$ η MPPT τάση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Τα ηλεκτρικά – ηλεκτρονικά κυκλώματα των αντιστροφέων αναλαμβάνουν να συνδέσουν τις σειρές των φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα και να διανέμουν την ισχύ στην έξοδό τους.

$$I_{αντ,εισ} = n_{σειρ,αντ} \times I_{ον,πλ} \quad (6.3)$$

Όπου

- $n_{σειρ}$ ο αριθμός των σειρών που συνδέονται σε έναν συγκεκριμένο αντιστροφέα
- $I_{ον,πλ}$ η MPPT ένταση του ρεύματος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου



Εικόνα 6.3: Σύνδεση συστοιχιών φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά, στον αντιστροφέα

6.2 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Σε ένα αυτόνομο ενεργειακό ηλεκτρικό σύστημα, χρειάζεται να γίνει σωστή ενεργειακή μελέτη και πρόβλεψη των φορτίων κατανάλωσης, με σκοπό την όσο το δυνατόν πιο οικονομική κατασκευή του. Σε προηγούμενη παράγραφο έγινε ανάλυση του τρόπου αυτής της μελέτης, ενώ σε αυτή θα αναλυθούν οι συναρτήσεις που θα μπορούν να υπολογίζουν τον αριθμό των συσσωρευτών που θα καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών.

Με βάση την επιθυμητή συνολική ισχύ $P_{mp,req}$, την μέση ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας $E_{μ,req}$ του φορτίου που πρέπει να αυτονομηθεί, και το ελάχιστο χρονικό διάστημα αυτονομίας n_a (σε ημέρες), θα υπολογιστεί αρχικά η χωρητικότητα του συσσωρευτή που θα επιλεγεί για το σύστημα αποθήκευσης.

Η συνολική ισχύς των συσσωρευτών θα πρέπει να καλύπτει την επιθυμητή συνολική ισχύ που πρέπει να εξυπηρετηθεί:

$$P_{\Sigma A} \geq P_{mp,req} \quad (6.4)$$

Η επιθυμητή ισχύς που μπορούν να παρέχουν οι συσσωρευτές καθορίζεται πέρα από την ισχύ του ενός συσσωρευτή, από τον τρόπο σύνδεσης των συσσωρευτών που απαρτίζουν το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Η συνολική τάση των συσσωρευτών σχηματίζεται συνδέοντας σε σειρά τους συσσωρευτές, και αποφασίζεται με βάση την τάση εξόδου του ρυθμιστή φόρτισης συνήθως 12V έως 48V.

$$V_{\Sigma A} = n_{\Sigma A,σειρ} \times V_{ον,συσ} \rightarrow n_{\Sigma A,σειρ} = \frac{V_{\Sigma A}}{V_{ον,συσ}} \quad (6.5)$$

όπου

- $n_{\Sigma A,σειρ}$ το πλήθος των συσσωρευτών συνδεδεμένα σε σειρά
- $V_{ον,συσ}$ η ονομαστική τάση ενός συσσωρευτή
- $V_{\Sigma A}$ η συνολική τάση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Με κριτήριο τη συνολική τάση των συσσωρευτών υπολογίζεται και ο αριθμός των σειρών που πρέπει να σχηματιστούν και να συνδεθούν παράλληλα με σκοπό το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας να αποδίδει την απαραίτητη ισχύ.

$$I_{\Sigma A} = \frac{P_{\Sigma A}}{V_{\Sigma A}} \quad (6.6)$$

όπου

- $I_{\Sigma A}$ η συνολική ένταση του ρεύματος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Εύκολα μπορεί να βρεθεί και η ονομαστική ένταση του ρεύματος που θα πρέπει να έχει ο επιλεγμένος συσσωρευτής.

$$I_{ον,συσ} = \frac{I_{\Sigma A}}{n_{\Sigma A,παρ}} \rightarrow n_{\Sigma A,παρ} = \frac{I_{\Sigma A}}{I_{ον,συσ}} \quad (6.7)$$

όπου

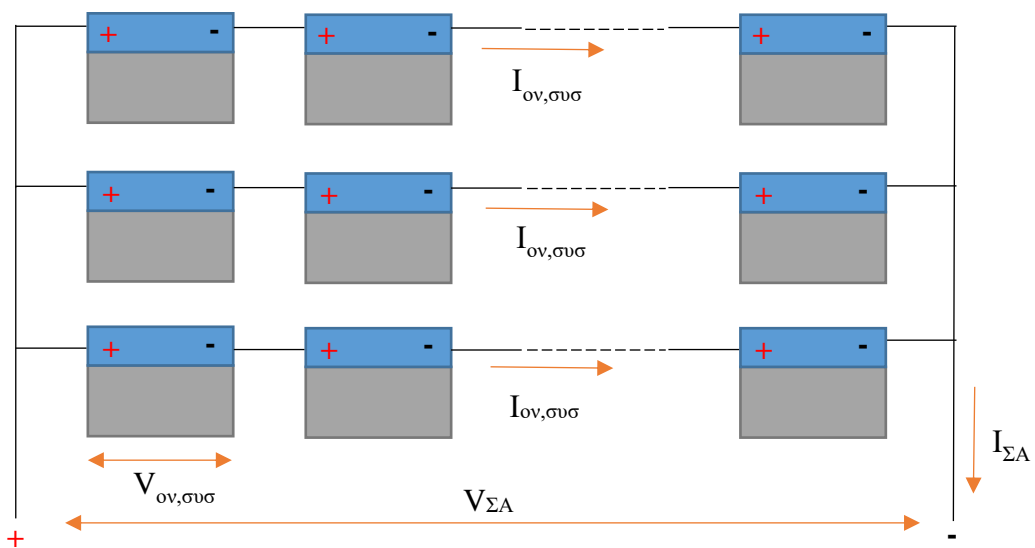
- $I_{ον,συσ}$ η ονομαστική ένταση του ρεύματος ενός συσσωρευτή
- $n_{\Sigma A,παρ}$ το πλήθος των παράλληλα συνδεδεμένων σειρών

Η χωρητικότητα του συστήματος καθορίζεται επίσης από τον αριθμό των παράλληλα συνδεδεμένων σειρών και θα πρέπει να είναι επαρκής έτσι ώστε να καλύψει ενεργειακά τον καταναλωτή σε περίπτωση ενεργειακής «ξηρασίας».

$$C_{\Sigma A} = n_{\Sigma A,σειρ} \times C_{ον,συσ} \quad (6.8)$$

όπου

- $C_{\Sigma A}$ η συνολική χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
- $C_{ον,συσ}$ η ονομαστική χωρητικότητα ενός συσσωρευτή

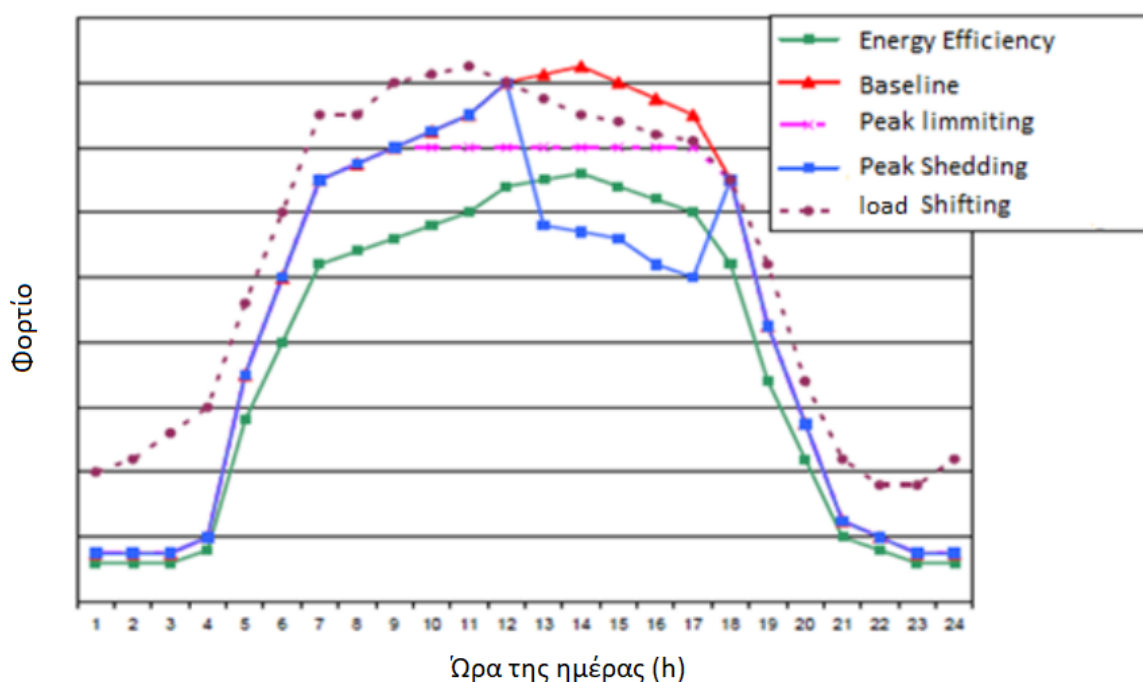


Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση συνδεσμολογίας συσσωρευτών

Οι ημέρες που θα πρέπει να αποδίδει ενέργεια το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως $n_{\eta\mu.αντ.}$ και σύμφωνα με αυτές θα βρεθεί η απαραίτητη χωρητικότητα. Η μέση ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας $E_{\mu,req}$ που έχει βρεθεί από την ενεργειακή μελέτη πολλαπλασιάζεται με τις ημέρες της απαραίτητης αυτονομίας και μας δίνουν την ενέργεια $E_{\Sigma A}$ που θα πρέπει να μπορεί να αποθηκευτεί.

$$E_{\Sigma A} = n_{\eta\mu.αυτ.} \times E_{\mu,req} \quad (6.9)$$

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η καθημερινή ανάγκη από ηλεκτρική ενέργεια τις βραδινές ώρες. Βέβαια η ζήτηση μειώνεται κατά πολύ, σε ποσοστό περίπου 10% με 15% της ημερήσιας ζήτησης, παρόλα αυτά επιβάλλεται να συμπεριληφθεί στις προβλέψεις, αφού η φωτοβολταϊκή γεννήτρια καλό είναι τουλάχιστον τις μεσημεριανές ώρες που υπάρχει μεγάλη παραγωγή, να παράγει πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας για να καταναλωθεί το βράδυ.



Σχήμα 6.2: Προφίλ ζήτησης διαφόρων μεθόδων της Διαχείρισης Ζήτησης [18]

Με κριτήριο ότι η μεγαλύτερη νύχτα του χρόνου διαρκεί περίπου 14,5 ώρες, υπολογίζεται το απαραίτητο ποσό περίσσειας ενέργειας $E_{περ}$ που πρέπει να παραχθεί με σκοπό να καταναλωθεί το βράδυ.

$$E_{περ} = 14,5h \times n_{\nu\chi.ζητ.} \times P_{mp,req} \quad (6.10)$$

όπου

- $n_{\nu\chi.ζητ.}$ το ποσοστό της μέγιστης απαραίτητης ισχύος που ζητείται τη νύχτα

με βάση τη παραπάνω περίσσεια ενέργειας καθορίζεται η πρόσθετη αναγκαία χωρητικότητα $C_{περ}$:

$$C_{περ} = \frac{E_{περ}}{V_{\Sigma A}} \quad (6.11)$$

Η συνολική χωρητικότητα λοιπόν του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι το άθροισμα των επιμέρους χωρητικοτήτων,

$$C'_{\Sigma A} = C_{\Sigma A} + C_{περ} \quad (6.12)$$

οπότε και η συνολική ενέργεια που δύναται να αποθηκευτεί στους συσσωρευτές δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E'_{\Sigma A} = E_{\Sigma A} + E_{περ} \quad (6.13)$$

Εν τέλει υπολογίζεται και το τελικό πλήθος των σειρών συσσωρευτών $n'_{\Sigma A, παρ}$ που πρέπει να συνδεθούν παράλληλα:

$$I'_{\Sigma A} = \frac{[P_{mp, req} + (n_{νυχ, ζητ.} \times P_{mp, req})]}{V_{\Sigma A}} = \frac{P'_{mp, req}}{V_{\Sigma A}} \quad (6.14)$$

όπου

- $I'_{\Sigma A}$ η τελική συνολική ένταση του ρεύματος του συστήματος αποθήκευσης, που συμπεριλαμβάνει τις έξτρα μπαταρίες για τη νύχτα.
- $P'_{mp, req}$ η τελική συνολική ισχύς που μπορεί και πρέπει να παρέχει το σύστημα αποθήκευσης.

άρα έχουμε

$$n'_{\Sigma A, παρ} = \frac{I'_{\Sigma A}}{I_{ον, συσ}} \quad (6.15)$$

Ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών $n_{\Sigma A}$ που θα απαρτίζουν το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται με το άθροισμα των εξισώσεων 6.10 και 6.20:

$$n_{\Sigma A} = n_{\Sigma A, σειρ} + n'_{\Sigma A, παρ} \quad (6.16)$$

6.3 Διαστασιολόγηση πάρκου

Όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη παράγραφο, οι συστοιχίες που θα δημιουργηθούν, θα γίνουν με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων αντιστροφών. Μία σωστή μελέτη προϋποθέτει ορθή διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού πάρκου. Η συνολική τάση της κάθε σειράς θα πρέπει να βρίσκεται εντός του εύρους λειτουργίας της κάθε εισόδου ενός αντιστροφέα. Για να έχουμε τη μέγιστη οικονομία, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όλες οι δυνατότητες ενός αντιστροφέα, με άλλα λόγια η συνολική τάση των πλαισίων σε μία σειρά κρίνεται απαραίτητο να συγκλίνει προς τη μέγιστη τιμή που μπορεί να δεχτεί ο αντιστροφέας στην είσοδό του. Εφόσον και η συνολική τιμή της έντασης του ρεύματος των παράλληλων σειρών πλησιάζει επίσης στην μέγιστη τιμή που μπορεί να δεχτεί ο αντιστροφέας στην είσοδό του, σημαίνει ότι έχει επιλεγθεί τόσο ο σωστός αντιστροφέας, όσο και το σωστό φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Η επιθυμητή συνολική ισχύς με βάση την αυτονομία που δύναται να ικανοποιεί το φωτοβολταϊκό πάρκο, κρίνει το μέγεθος αυτού και επηρεάζει την χωροταξική, την ηλεκτρολογική, και την

οικονομική μελέτη. Η χωροταξική μελέτη αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ενώ σε αυτή θα αναλυθεί η ηλεκτρολογική μελέτη.

6.3.1 Πλαίσια

Ο υπολογισμός του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτεί ο ενεργειακός σταθμός, είναι το τελευταίο βήμα μίας σειράς υπολογισμών που πρέπει να έχουν προηγηθεί. Αυτά αναφορικά φαίνονται παρακάτω:

- Καθορισμός ενεργειακών αναγκών που πρέπει να καλύψει ο ενεργειακός σταθμός.
- Χρονική περίοδος λειτουργίας.
- Ημέρες αυτονομίας του συστήματος.
- Καθορισμός γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων (σε περίπτωση σταθερών βάσεων στήριξης).
- Υπολογισμός μετεωρολογικών στοιχείων που απαιτούνται.
- Επιλογή τύπου φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η συνολική επιφάνεια που πρέπει να έχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, δίνεται από τη σχέση [12]:

$$A_{\Sigma\Phi/B} = \frac{E_{\mu\eta\nu}}{H_{\tau}\eta_{\varsigma}\sigma_{\theta}\sigma_{\rho}} \quad (6.17)$$

όπου

- $A_{\Phi/B}$ η συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων (m^2).
- $E_{\mu\eta\nu}$ οι μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις από το φωτοβολταϊκό σταθμό (kWh/μήνα).
- H_{τ} η ολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με κλίση (φ), ($kWh/m^2 \cdot \mu\eta\nu$). Δίνεται από σχέση 1.3.
- η_{ς} ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ενεργειακού συστήματος.
- σ_{θ} ο συντελεστής που δίνεται από τη σχέση $\sigma_{\theta} = 1 - [(\theta_{\alpha} + 10)/200]$.
- σ_{ρ} ένας συντελεστής εξαρτώμενος από τη ρύπανση του περιβάλλοντος που θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Για παράδειγμα ισούται με 1 εφόσον δεν υπάρχει ρύπανση, ενώ με 0,9 και 0,8 για μέτρια και υψηλή ρύπανση αντίστοιχα.
- θ_{α} η μέση θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}C$) στη διάρκεια της ημέρας.

Εφόσον η συνολική απαραίτητη επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνει γνωστή μέσω της παραπάνω σχέσης, εύκολα υπολογίζεται και ο απαιτούμενος αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων $n_{panel,req}$, έχοντας γνωστή και την επιφάνεια $A_{\Phi/B,πλ}$ του καθενός από αυτά.

$$n_{panel,req} = \frac{A_{\Sigma,\Phi/B}}{A_{\Phi/B,\pi}} \quad (6.18)$$

Στην περίπτωση που υπάρχει σταθερή κατανάλωση ενέργειας από το φορτίο, και σταθερή κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η χρήση της εξίσωσης 6.17 είναι απλή. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση οι υπολογισμοί γίνονται πιο περίπλοκοι, και γι' αυτό ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία:

Αρχικά σχηματίζεται ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 6.1: Βοηθητικός πίνακας υπολογισμού απαραίτητου αριθμού πλαισίων. [12]

α/α	A	B	Γ	Δ	E	Z	H	Θ	I	K	Λ
	Μήνας	φ ($^{\circ}$)	H_{τ}	θ_{α}	σ_{θ}	σ_{ρ}	$E_{\mu\eta\nu}$	$(\Gamma) \times (E) \times (Z) \times \eta_{\varsigma}$	(H/Θ) (m^2)	n_p	$(H) \times (K)/30$
	m_i	φ_i	$H_{\tau,i}$	$\theta_{\alpha,i}$	$\sigma_{\theta,i}$	$\sigma_{\rho,i}$	$E_{\mu\eta\nu,i}$	Θ_i	I_i	$n_{p,i}$	Λ_i
1	ΙΑΝ										
2	ΦΕΒ										
3	ΜΑΡ										
4	ΑΠΡ										
5	ΜΑΙ										
6	ΙΟΥΝ										
7	ΙΟΥΛ										
8	ΑΥΓ										
9	ΣΕΠ										
10	ΟΚΤ										
11	ΝΟΕ										
12	ΔΕΚ										

Αφού συμπληρωθεί ο πίνακας 6.1, επιλέγεται από τη στήλη I η μεγαλύτερη τιμή, η οποία είναι και η μέγιστη συνολική επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτείται για την ενεργειακή κάλυψη της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Με παρόμοιο τρόπο όπως στη σχέση 6.18, υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός πλαισίων $n'_{panel,req}$.

$$A'_{\Sigma,\Phi/B} = \max \{I_i\} \quad (6.19)$$

και

$$n'_{panel,req} = \frac{A'_{\Sigma,\Phi/B}}{A_{\Phi/B,\pi}} \quad (6.20)$$

Ομοίως από τη στήλη Λ επιλέγεται πάλι η μεγαλύτερη τιμή, και ορίζει τις ενεργειακές απαιτήσεις που πρέπει να καλύψει το σύστημα των συσσωρευτών.

$$E'_{\mu\eta\nu} = \max \{\Lambda_i\} \quad (6.21)$$

και με βάση την σχέση 5.3 υπολογίζεται και η συνολική χωρητικότητα των συσσωρευτών.

$$C'_{\Sigma A} = \frac{E'_{\mu\eta\nu}}{V_{\sigma} \times \beta \times \eta_{\sigma}} \quad (6.22)$$

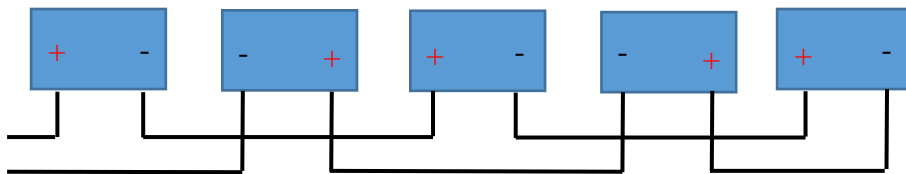
οπότε και με βάση τις εξισώσεις της προηγούμενης παραγράφου βρίσκεται ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών.

6.4 Διατομή καλωδίων

Ο υπολογισμός της διατομής του κάθε καλωδίου πρέπει να είναι ακριβείς, καθώς η πτώση τάσης λόγω αυτών δεν ενδείκνυται να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο, συνήθως 5%. Τα καλώδια ξεκινάνε από τις σειρές και καταλήγουν αρχικά στους αντιστροφείς. Από τους αντιστροφείς πάνε, μέσω ασφαλιστικών διατάξεων, στα πεδία ζεύξης με το κεντρικό δίκτυο, και από εκεί συνδέονται στην κολώνα του δικτύου. Οι υπολογισμοί για την κάθε διαδρομή φαίνονται στην συνέχεια. [19]

6.4.1 Διαδρομή κλάδου – αντιστροφή

Αφορά την σύνδεση της κάθε σειράς με τον αντιστροφή. Χρησιμοποιώντας το σύστημα σύνδεσης frog (φαίνεται στο σχήμα 6.3), εξοικονομείται καλώδιο και μεταφέρονται τα δύο άκρα (θετικός πόλος και αρνητικός) της σειράς στη μία μεριά του τραπεζιού.



Σχήμα 6.3: Συνδεσμολογία frog για σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων

Από τη κάθε σειρά ‘φεύγουν’ δύο καλώδια προς τον αντιστροφή. Η απόσταση που χρειάζεται να διανύσει το κάθε καλώδιο συμβολίζεται ως l_i , όπου i ο αριθμός της σειράς. Η διατομή του καλωδίου υπολογίζεται με βάση την επιτρεπόμενη πτώση τάσης [19].

$$V_{\pi\tau} \% < 5\% \times V_{\sigma\nu,\sigma\epsilon\iota\rho} \quad (6.23)$$

Για απόσταση l_i :

Η πτώση τάσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο. [19]

$$V_{\pi\tau} = I_{ov,σειρ} \times R_i \quad (6.24)$$

όπου

- $I_{ov,σειρ}$ το ονομαστικό ρεύμα της εκάστοτε σειράς φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- R_i η αντίσταση του καλωδίου της εκάστοτε σειράς.

Υπολογίζεται και η αντίσταση R_i του καλωδίου. [19]

$$R_i = \rho \times \frac{l_i}{s_i} \quad (6.25)$$

όπου

- ρ η ειδική αντίσταση του μετάλλου που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός.
- s_i η διατομή του αγωγού

άρα έχουμε [19]

$$V_{\pi\tau} = I_{ov,σειρ} \times \rho \times \frac{l_i}{s_i} \rightarrow s_i = I_{ov,σειρ} \times \rho \times \frac{l_i}{V_{\pi\tau}} \quad (6.26)$$

οπότε βάζοντας στην εξίσωση την μέγιστη ανεπιθύμητη πτώση τάσης, βρίσκεται η ελάχιστη διατομή του καλωδίου.

6.4.2 Διαδρομή αντιστροφέα – πεδίου ζεύξης

Ένας αντιστροφέας μπορεί να δίνει στην έξοδό του είτε μονοφασικό ρεύμα, είτε τριφασικό, οπότε θα ‘φεύγουν’ από αυτόν και ο αντίστοιχος αριθμός καλωδίων [19].

6.4.2.1 Για μονοφασικό αντιστροφέα

Η απόσταση από το πεδίο ζεύξης συμβολίζεται ως l_j , όπου j ο αριθμός του εκάστοτε αντιστροφέα. Για να υπολογιστεί η διατομή του καλωδίου ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία με την προηγούμενη παράγραφο, λαμβάνοντας υπόψιν αυτή τη φορά τα παρακάτω μεγέθη από το τεχνικό φυλλάδιο του αντιστροφέα [19].

- Μέγιστη τάση εξόδου $V_{αντ,εξ}$.
- Μέγιστη ένταση ρεύματος εξόδου $I_{αντ,εξ}$.
- Μέγιστη ισχύς εξόδου $P_{αντ,εξ}$.

$$V_{\pi\tau} = I_{\alpha\nu\tau,\varepsilon\xi} \times R_j \quad (6.27)$$

όπου

- R_j η αντίσταση του εκάστοτε αγωγού από τον αντιστροφέα στο πεδίο ζεύξης.

και

$$R_j = \rho \times \frac{l_j}{s_j} \quad (6.28)$$

Άρα έχουμε, επιλύοντας ως προς s_j .

$$s_j = \frac{I_{\alpha\nu\tau,\varepsilon\xi} \times R_j \times \rho \times l_j}{V_{\pi\tau}} \quad (6.29)$$

6.4.2.2 Για τριφασικό αντιστροφέα

Όπως και για τον μονοφασικό αντιστροφέα, η απόσταση από το πεδίο ζεύξης συμβολίζεται ως l_j , όπου j ο αριθμός του εκάστοτε αντιστροφέα. Με βάση την πτώση τάσης υπολογίζεται η διατομή του καλωδίου [19].

$$V_{\pi\tau} = \sqrt{3} \times I_{\alpha\nu\tau,\varepsilon\xi} \times R_j \quad (6.30)$$

και σύμφωνα με την εξίσωση (6.28), επιλύοντας ως προς s_j .

$$s_j = \frac{\sqrt{3} \times I_{\alpha\nu\tau,\varepsilon\xi} \times R_j \times \rho \times l_j}{V_{\pi\tau}} \quad (6.31)$$

οπότε βάζοντας στην εξίσωση την μέγιστη ανεπιθύμητη πτώση τάσης, βρίσκεται η ελάχιστη διατομή του καλωδίου για την διαδρομή από τον αντιστροφέα στο πεδίο ζεύξης.

6.4.3 Διαδρομή πεδίου ζεύξης – δίκτυο ηλεκτροδότησης

Σε αυτό το κομμάτι, το πεδίο ζεύξης συνδέεται μέσω των καλωδίων με το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Ανάλογα με την ισχύ του πάρκου, θα πρέπει να συνδεθεί στο δίκτυο χαμηλής τάσης ή στο δίκτυο μέσης τάσης. Το δίκτυο χαμηλής τάσης είναι μονοφασικό, ενώ το δίκτυο υψηλής είναι τριφασικό, οπότε θα χρησιμοποιηθούν και τα αντίστοιχα καλώδια. Οι υπολογισμοί των διατομών γίνεται με τον αντίστοιχα με τις προηγούμενες παραγράφους [19].

6.5 Χώρος εγκατάστασης

6.5.1 Γνώση του χώρου εγκατάστασης

Είναι σημαντικό να έχουμε πλήρη επίγνωση της κατάστασης του χώρου εγκατάστασης. Πληροφορίες όπως ο τρόπος πρόσβασης σε αυτόν, πόσο ασφαλής είναι η περιοχή, είτε από φυσικά

καιρικά φαινόμενα (πυρκαγιές, κατολισθήσεις, κ.λπ.) είναι απαραίτητες να τις γνωρίζουμε καθώς επηρεάζουν τόσο το κόστος εγκατάστασης όσο και το αν κρίνεται εν τέλει κατάλληλος ο χώρος. Συγκεκριμένα η εύκολη πρόσβαση στον χώρο εγκατάστασης παίζει ρόλο και στο κόστος συντήρησης του έργου [19].

6.5.2 Μεθοδολογία υπολογισμού ελάχιστου χώρου εγκατάστασης

Για να αρχίσει μια μελέτη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου, θα χρειαστεί να γνωρίζουμε την απαιτούμενη ισχύ που θα πρέπει να καλύπτεται ενεργειακά από το πάρκο μας. Εφόσον αυτή η πληροφορία γίνει γνωστή το επόμενο βήμα είναι η εκτίμηση του χώρου που θα χρειαστεί με σκοπό την εγκατάσταση του απαραίτητου αριθμού πλαισίων που θα είναι ικανά να παράγουν αυτή την ισχύ. Ο αριθμός των πλαισίων που θα χρειαστούν για την πλαισίωση του πάρκου υπολογίζεται ως εξής (όπως περιγράφηκε στη προηγούμενη παράγραφο):

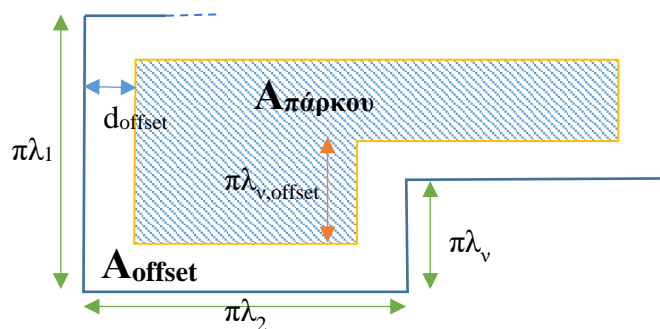
$$n_{panel,req} = \frac{P_{mp,req}}{P_{mp,panel}} \quad (6.32)$$

Όπου

- $n_{panel, req}$ ο αριθμός των απαραίτητων πλαισίων.
- $P_{mp, req}$ η μέγιστη ισχύς που θα πρέπει να καλύπτεται από το φωτοβολταϊκό πάρκο.
- $P_{mp, panel}$ η ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί.

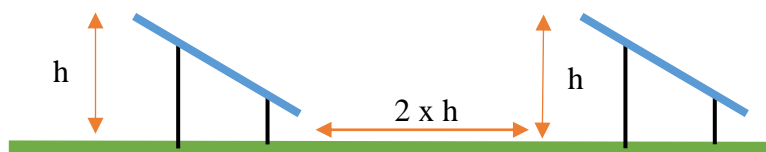
Για να υπολογίσουμε το εμβαδόν που θα καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και τα παρακάτω:

- Την απόσταση μεταξύ των σειρών των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Την κλίση των πλαισίων.
- Την ελάχιστη απόσταση d_{offset} (συνήθως 10m) από την περιφέρεια του πάρκου για την αποφυγή σκίασης.



Σχήμα 6.4: Σχεδιάγραμμα φωτοβολταϊκού πάρκου για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαραίτητου εμβαδού της εγκατάστασης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα (5.1), αφαιρείται ένα ποσοστό γης εμβαδού A_{offset} και μένει το εμβαδόν της ωφέλιμης γης $A_{\text{πάρκου}}$ όπου θα πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Θα αφαιρεθεί και το εμβαδόν που θα χρειαστεί να υπάρχει ανάμεσα στις σειρές, και έτσι θα υπολογιστεί το απαραίτητο εμβαδόν που θα πρέπει να έχει το χωράφι που θα επιλεγεί για την εγκατάσταση.



Σχήμα 6.5: Υπολογισμός απόστασης μεταξύ των σειρών

Υποθέτοντας λοιπόν ότι θα χρειαστούν n_{series} σειρές στο πάρκο, και h το μέγιστο ύψος των τραπέζιων που θα εγκατασταθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι κενοί διάδρομοι ανάμεσα σε αυτά θα είναι:

$$n_{s,gap} = n_{series} - 1 \quad (6.33)$$

Οπότε υπολογίζεται εύκολα και το $A_{\text{πάρκου}}$.

$$A_{\text{πάρκου}} = n_{series} \times A_{series} + n_{s,gap} \times A_{s,gap} \quad (6.34)$$

Όπου

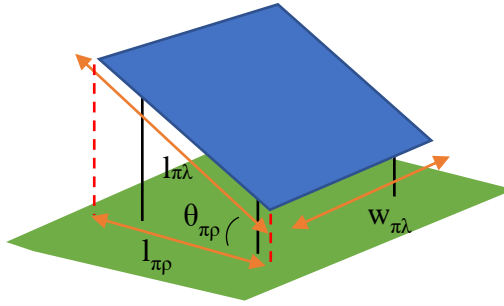
- A_{series} το εμβαδόν μίας σειράς (τραπέζιου)
- $A_{s,gap}$ το εμβαδόν που καταλαμβάνει ο κενός χώρος ανάμεσα στα τραπέζια

Και

$$A_{series} = n_{\pi\lambda,\tau\rho} \times l_{\pi\lambda} \times \cos\theta_{\pi\rho} \times w_{\pi\lambda} \quad (6.35)$$

Όπου

- $n_{\pi\lambda,\tau\rho}$ ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τραπέζι
- $l_{\pi\lambda}$ το μήκος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου
- $w_{\pi\lambda}$ το πλάτος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου
- $\theta_{\pi\rho}$ η γωνία που σχηματίζει το τραπέζι με το έδαφος



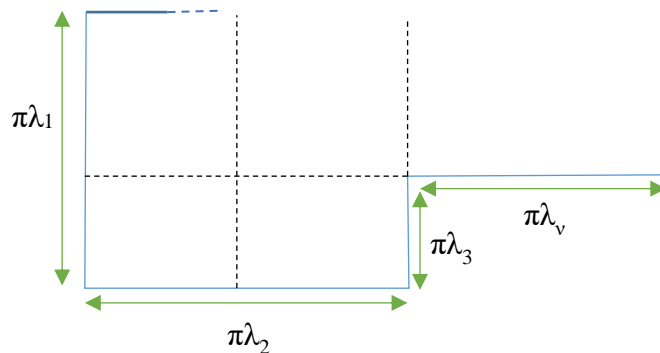
Σχήμα 6.6: Σχήμα αναπαράστασης τραπεζιού φωτοβολταϊκών πλαισίων για τον υπολογισμό του εμβαδού που καταλαμβάνει στο πάρκο.

Γνωρίζοντας πλέον το εμβαδόν που θα καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ, υπολογίζεται εν συνεχεία και το ελάχιστο εμβαδόν που θα πρέπει να έχει ο χώρος που θα επιλεγεί να γίνει η εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου, όπως φαίνεται παρακάτω.

$$A_{\text{χωράφι}} = A_{\text{πάρκου}} + A_{\text{offset}} \quad (6.36)$$

6.6 Γείωση

Σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο το σύστημα γείωσης που συνηθίζεται να χρησιμοποιείται είναι αυτό της θεμελιακής γείωσης. Παρόλα αυτά σε φωτοβολταϊκά πάρκα μεγάλων διαστάσεων (με τη μία πλευρά μεγαλύτερη των 25m) προτιμάται να χωρίζεται το πάρκο σε μικρότερες περιοχές με διαστάσεις μικρότερες των 20m. Έτσι το μήκος είτε της ταινίας γαλβανισμένου χάλυβα, είτε της βέργας γαλβανισμένου χάλυβα (ανάλογα τι έχει επιλεγεί) υπολογίζεται με βάση την περίμετρο του πάρκου και των αριθμό των επιμέρους κομματιών του πάρκου που έχουν χωριστεί. [7]



Σχήμα 6.7: Διαχωρισμός φωτοβολταϊκού πάρκου σε επιμέρους τμήματα, με την προϋπόθεση ότι $\pi\lambda_2 > 20\text{m}$, $\pi\lambda_1 > 20\text{m}$, $\pi\lambda_3 < 20\text{m}$, $\pi\lambda_v < 20\text{m}$.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα (6.7), για να υπολογιστεί το συνολικό μήκος της γείωσης, στην περίμετρο προστίθενται και τα επιμέρους τμήματα που σχεδιάστηκαν με διακεκομμένη γραμμή, οπότε έχουμε [7]:

$$l_{\gamma\epsilon\iota\omega} = l_{\epsilon\xi} + l_{\epsilon\sigma} \quad (6.37)$$

όπου

- $l_{\epsilon\xi}$ το μήκος της γείωσης εξωτερικά του φωτοβολταϊκού πάρκου (περίμετρος αυτού).
- $l_{\epsilon\sigma}$ το μήκος των εσωτερικών πλευρών των επιμέρους τμημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΕΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PVSYSY

7 ΈΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PVSYS

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ο έλεγχος της ορθότητας των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, με τη πραγματοποίηση υπολογισμών για την κατασκευή ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου για την ηλεκτροδότηση πέντε απομονωμένων κατοικιών. Το πρόγραμμα αυτόματου υπολογισμού μεγεθών φωτοβολταϊκών πάρκων θα επαληθεύσει τα αποτελέσματα των εξισώσεων που βρέθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

7.1 Υπολογισμός απαιτήσεων οικισμού σε ηλεκτρική ενέργεια

Σύμφωνα με τη σχέση (4.5) οι απαιτήσεις ενός οικισμού πέντε κατοικιών, σε ισχύ, υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{οικιών,ΠΑΡ} = 5 \times 0,8 \times 2790W = 11160W \quad (7.1)$$

Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ταυτοχρονισμού του οικισμού θέτεται 0,8 προς χάριν του παραδείγματος. Επίσης, στην παραπάνω ισχύ θα πρέπει να προστεθεί και μία υποτυπώδης ισχύς όσον αφορά τον κοινοτικό φωτισμό. Ένας σύνθετος προβολέας LED για φωτισμό δρόμου έχει ονομαστική ισχύ 100W, και μπορεί να θεωρηθεί ότι σε έναν οικισμό πέντε κατοικιών χρησιμοποιούνται 15 τέτοιοι προβολείς, οι οποίοι λειτουργούν για 12 ώρες καθημερινά. Τελικά η ισχύς που χρειάζεται ο οικισμός δίνεται από τη σχέση (4.21):

$$P_{οικισμού,ΠΑΡ} = P_{οικιών,ΠΑΡ} + P_{κοιν.φωτ.,ΠΑΡ} = 11160W + (15 \times 100W) = 12660W \quad (7.2)$$

Υπολογίζεται και η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας από τον κοινοτικό φωτισμό σύμφωνα με την σχέση (4.7):

$$E_{κοιν.φωτ.,ΠΑΡ} = (15 \times 100W) \times 12 \text{ h/ημέρα} = 18000 \text{ Wh/ημέρα} = 18 \text{ kWh/ημέρα} \quad (7.3)$$

Επίσης, η ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των οικιών υπολογίζεται με βάση την σχέση (4.6):

$$E_{οικιών,ΠΑΡ/ημέρα} = 5 \times 20,6 \text{ kWh/ημέρα} = 103 \text{ kWh/ημέρα} \quad (7.4)$$

Οπότε η ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του οικισμού υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.22):

$$E_{οικισμού,ΠΑΡ/ημέρα} = E_{οικιών,ΠΑΡ/ημέρα} + E_{κοιν.φωτ.,ΠΑΡ/ημέρα} = 103 \text{ kWh/ημέρα} + 18 \text{ kWh/ημέρα} = 121 \text{ kWh/ημέρα} \quad (7.5)$$

Προς χάριν του παραδείγματος γίνεται η υπόθεση ότι ο συγκεκριμένος οικισμός βρίσκεται στα περίχωρα του δήμου Πωγωνίου, στον νομό Ιωαννίνων, περιοχή για την οποία λαμβάνονται υπόψιν τα μετεωρολογικά δεδομένα. Σύμφωνα με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία [20] και τη σχέση (3.4), υπολογίζεται η απαραίτητη αυτοδυναμία του συστήματος. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάσει τις τιμές του Δεκεμβρίου όπου και παρατηρείται το μικρότερο ποσό ηλιοφάνειας από όλο τον χρόνο.

$$n_p = \left(\frac{5}{17}\right) \times \left[\frac{(N_s \times d_{om} - N_{so})}{N_s}\right] + \left(\frac{12}{17}\right) = \left(\frac{5}{17}\right) \times \left[\frac{(4 \times 31 - 75,2)}{4}\right] + \left(\frac{12}{17}\right) = 4,29 \quad (7.6)$$

Άρα το σύστημα αποθήκευσης χρειάζεται να είναι ικανό να αποθηκεύσει την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στον οικισμό για τουλάχιστον 4,29 ημέρες, δηλαδή περίπου τέσσερις.

Για να υπάρχει, λοιπόν, αυτονομία 4 ημερών απαιτείται ένα σύστημα αποθήκευσης που δύναται να αποθηκεύσει ενέργεια ίση με:

$$E_{\Sigma A, \Pi A P} = E_{\text{οικισμού, ΠΑΡ}} / \text{ημέρα} \times 4 \text{ημέρες} = 121 \text{ kWh} / \text{ημέρα} \times 4 \text{ημέρες} = 484 \text{ kWh} \quad (7.7)$$

7.2 Διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση των εξισώσεων

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών θα πρέπει να υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις αυτονομίας του οικισμού. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας επιλέγεται να έχει ονομαστική τάση 48V λόγω της πληθώρας επιλογών ρυθμιστή φόρτισης με αυτή τη τάση λειτουργίας. Με βάση την απαραίτητη αποθηκευμένη ενέργεια της σχέσης (7.7) υπολογίζεται η αναγκαία χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης:

$$C_{\Sigma A, \Pi A P} (\text{απαιτείται}) = \frac{E_{\Sigma A, \Pi A P}}{48V} = \frac{484 \text{ kWh}}{48V} = 10083 \text{ Ah} \quad (7.8)$$

Ο συσσωρευτής που επιλέγεται είναι ο Westar AGM Κλειστού τύπου και βαθιάς εκφόρτισης με ονομαστική τάση 12V και χωρητικότητα 240Ah. Στην Εικόνα 7.1 φαίνονται και τα λοιπά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή [21]. Για να δημιουργηθεί η απαραίτητη τάση των 48V χρειάζεται να συνδεθούν τέσσερις συσσωρευτές σε κάθε σειρά, ενώ για να αποκτηθεί η ζητούμενη χωρητικότητα πρέπει να γίνει συνδεσμολογία 42 σειρών, όπως υπολογίζεται παρακάτω με βάση τη σχέση (6.8):

$$n_{\Sigma A, \text{σειρ}, \Pi A P} = \frac{C_{\Sigma A, \Pi A P} (\text{απαιτείται})}{C_{\text{ον, συσ}}} = \frac{10083}{240} = 42,0125 \approx 42 \quad (7.9)$$

Εύκολα λοιπόν υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών:

$$n_{\Sigma A, \Pi A P} = 4 \text{ συσσωρευτές} \times 42 \text{ σειρές} = 168 \text{ συσσωρευτές} \quad (7.10)$$

Για να επιτευχθούν τα χαρακτηριστικά της αυτονομίας είναι απαραίτητο ένα φωτοβολταϊκό πάρκο να μπορεί να παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια με την ηλιοφάνεια μίας ημέρας για να φορτίσει πλήρως

το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Σε ένα ημερολογιακό έτος, ο μήνας με την λιγότερη ηλιοφάνεια είναι ο Δεκέμβρης, κατά την διάρκεια του οποίου η ο μέσος χρόνος ηλιοφάνειας ανά ημέρα είναι τέσσερις ώρες.

Battery Specification

Performance Characteristics	
Nominal Voltage	12V
Number of cell	6
Industry Type No.	4D
Terminal	AT
Container material	PP
Amp Hours(AH)@ 77°F(25°C)	
20 hour rate F.V.(1.75V/Cell)	240Ah
10 hour rate F.V.(1.75V/Cell)	230Ah
5 hour rate F.V.(1.75V/Cell)	200Ah
3 hour rate F.V.(1.75V/Cell)	190Ah
2 hour rate F.V.(1.75V/Cell)	168Ah
1 hour rate F.V.(1.75V/Cell)	135Ah
Minutes of Discharge@(80°F/27°C)	
25A F.V.(1.75V/Cell)	560min
75A F.V.(1.75V/Cell)	155min
Internal Resistance	
Fully Charged battery 77°F(25°C)	≤2.7 mOhms
Self-Discharge	
3% of capacity declined per month at 20°C(average)	
Cranking Amps	
32°F/0°C	1550
0°F/-18°C	1220
Max. Discharge Current 77°F(25°C)	1800A(5s)
Cycle service life(theory)	
100% DOD 300 cycles is equal to 70% 550 cycles	
Charge Methods: Constant Voltage Charge 77°F(25°C)	
Cycle use	2.40-2.45V/PC
Initial Charging Current	72A
Float use	2.23-2.30V/PC

Εικόνα 7.1: Χαρακτηριστικά του συσσωρευτή, όπως αναγράφονται στο datasheet του.

Ο ρυθμιστής φόρτισης που ταιριάζει στα χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης είναι ο Victron Energy SmartSolar MPPT RS 450/200-Tr [22]. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στην Εικόνα 2.1. Όπως φαίνεται, ο συγκεκριμένος φορτιστής μπορεί να φορτίσει με ένταση ρεύματος 200A. Αυτό σημαίνει ότι εάν ανατεθεί σε έναν τέτοιο ρυθμιστή φόρτισης, να φορτίσει πλήρως 4 σειρές από τους συσσωρευτές, η φόρτιση θα ολοκληρωθεί σε 4,8 ώρες, κάτι που ικανοποιεί τις απαιτήσεις. Για το σύνολο του συστήματος απαιτούνται ημ.φορ. ρυθμιστές φόρτισης όπως υπολογίζεται παρακάτω:

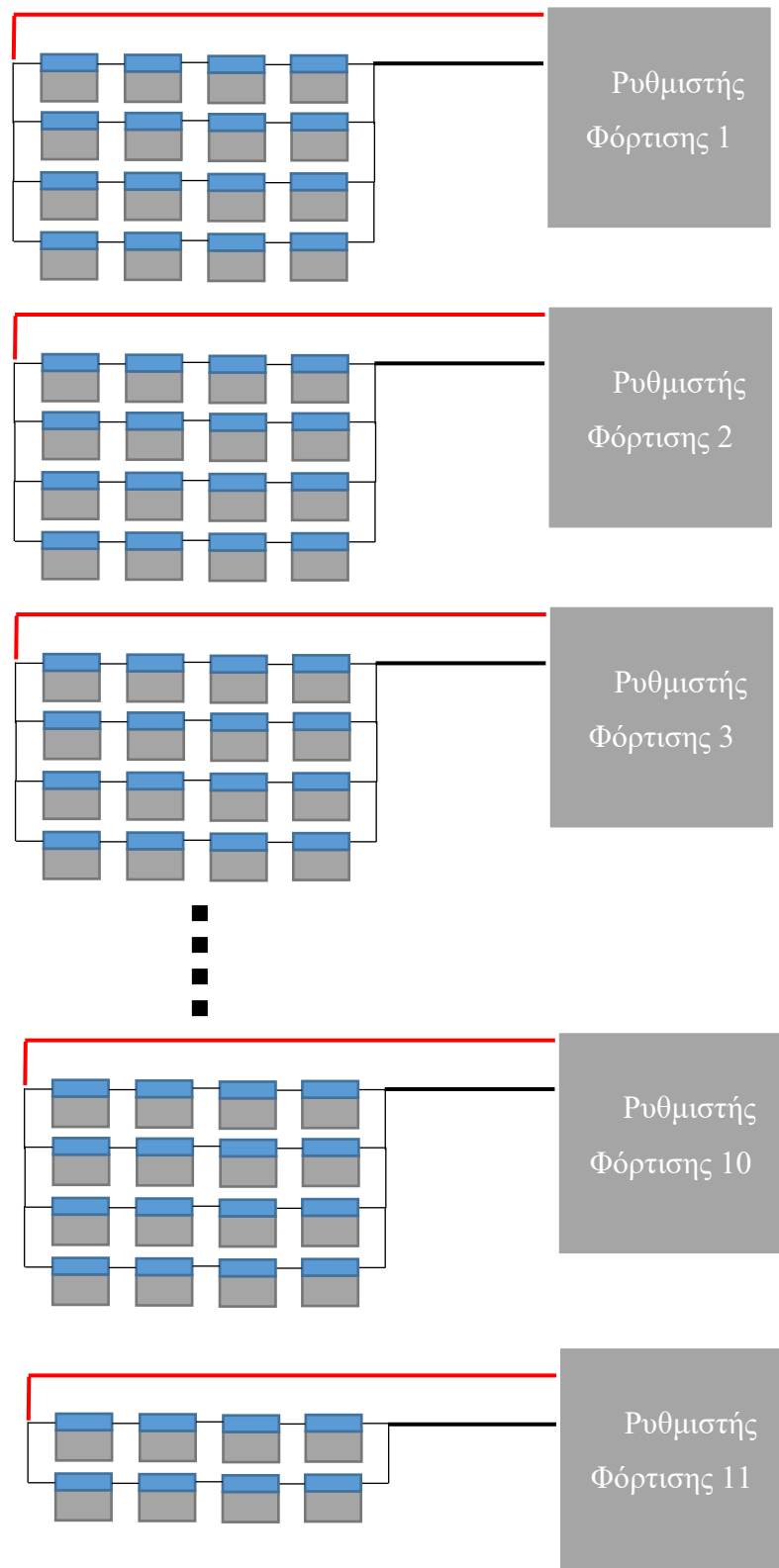
$$n_{\text{ημ.φορ.}} = \frac{42 \text{ σειρές}}{4 \text{ σειρές} / \text{ρυθμιστή φόρτισης}} = 10,5 \approx 11 \quad (7.11)$$

Επομένως το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας θα αποτελείται από 10 ομάδες τεσσάρων σειρών, με τέσσερις συσσωρευτές ανά σειρά, και 1 ομάδα με δύο σειρές, τεσσάρων συσσωρευτών ανά σειρά. Στο Σχήμα 7.1 φαίνεται μία αναπαράσταση του συστήματος αποθήκευσης, με τις ομάδες συσσωρευτών ανά ρυθμιστή φόρτισης. Ο ενδέκατος ρυθμιστής φόρτισης λόγω των

λιγότερων συσσωρευτών, δεν χρειάζεται την ίδια ισχύ όπως οι υπόλοιποι, οπότε σε αυτή τη θέση χρησιμοποιείται ο αμέσως κατώτερος, της ίδιας σειράς, Victron Energy SmartSolar MPPT RS 450/100-Tr [22].

Isolated SmartSolar MPPT RS	450 100	450 200
CHARGER		
Battery voltage	48 V	
Rated charge current	100 A	200 A
Maximum charge power	5,8 kW at 57,6 V	11,5 kW at 57,6 V
Charge voltage 'absorption'	Default setting: 57,6 V (adjustable)	
Charge voltage 'float'	Default setting: 55,2 V (adjustable)	
Programmable voltage range	Minimum: 36 V Maximum: 60 V ⁽⁷⁾	
Charge algorithm	Multi-stage adaptive (adjustable)	
Battery temperature sensor	Included	
Maximum efficiency	96 %	
Self-consumption	15 mA	
SOLAR		
Maximum DC PV voltage	450 V	
Start-up voltage	120 V	
MPPT operating voltage range	80 – 450 V ⁽¹¹⁾	
Number of trackers	2	4
Max. PV operational input current	18 A per tracker	
Max. PV short circuit current ⁽²⁾	20 A per tracker	
Max. DC output charging power	4000 W per tracker 5760 W total	4000 W per tracker 11520 W total
Maximum PV array size per tracker ⁽³⁾	7200 Wp (450 V x 20 A) ⁽³⁾	
PV Isolation fail level ⁽⁴⁾	100 kΩ	
GENERAL		
Synchronised Parallel Operation	Yes, up to 25 units with VE.Can	
Programmable relay ⁽⁵⁾	Yes	
Protection	PV reverse polarity Output short circuit Over temperature	
Data communication	VE.Direct port, VE.Can port & Bluetooth ⁽⁶⁾	
Bluetooth frequency	2402 – 2480 MHz	
Bluetooth power	4dBm	
General purpose analogue/digital in port	Yes, 2x	
Remote on-off	Yes	
Operating temperature range	-40 to +60 °C (fan assisted cooling)	
Humidity (non-condensing)	max 95 %	

Εικόνα 7.2: Απόκομμα από το τεχνικό φυλλάδιο του ρυθμιστή φόρτισης Victron Energy SmartSolar MPPT RS 450/200-Tr.



Σχήμα 7.1: Αναπαράσταση του συστήματος αποθήκευσης ηλ. ενέργειας συμπεριλαμβανομένου του ρυθμιστή φόρτισης

Με βάση τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης, γίνεται και η διαστασιολόγηση των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ο κάθε ένας ρυθμιστής φόρτισης έχει τέσσερις εισόδους φωτοβολταϊκών συστοιχιών με κάθε μία από αυτές να έχει μέγιστο επιτρεπόμενο όριο $20A_{sc}$ ένταση ρεύματος, $450V_{oc}$ τάση και $7200 W_p$. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο που φαίνεται να τηρεί τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι το πολυκρυσταλλικό Victron SPP042702000 [23] με τα χαρακτηριστικά του να φαίνονται στην Εικόνα 7.3.

Article Number	Description	Net weight	Electrical data under STC (1)				
			Nominal Power	Max-Power Voltage	Max-Power Current	Open-Circuit Voltage	Short-Circuit Current
			P_{MPP}	V_{MPP}	I_{MPP}	V_{oc}	I_{sc}
		Kg	W	V	A	V	A
SPP040201200	20W-12V Poly 440 x 350 x 25mm series 4a	1.9	20	18.4	1.09	21.96	1.18
SPP040301200	30W-12V Poly 655 x 350 x 25mm series 4a	2.8	30	18.2	1.66	21.80	1.80
SPP040451200	45W-12V Poly 425 x 668 x 25mm series 4a	3.1	45	19.1	2.36	22.90	2.55
SPP040601200	60W-12V Poly 545 x 668 x 25mm series 4a	4	60	19.3	3.12	23.10	3.37
SPP040901200	90W-12V Poly 780 x 668 x 30mm series 4a	6.1	90	19.5	4.61	23.44	4.98
SPP041151200	115W-12V Poly 1015 x 668 x 30mm series 4a	8	115	18.9	6.08	22.73	6.56
SPP041151202*	115W-12V Poly 1030 x 668 x 30mm series 4b	8	115	18.9	6.08	22.73	6.56
SPP041751200	175W-12V Poly 1485 x 668 x 30mm series 4a	12	175	18.3	9.56	21.9	10.24
SPP042702000	270W-20V Poly 1640 x 992 x 35mm series 4a	18.4	270	31.7	8.52	38.04	9.21
SPP043302400	330W-24V Poly 1956 x 992 x 40mm series 4a	22.5	330	37.3	8.86	44.72	9.57
SPP043302402*	330W-24V Poly 1980 x 1002 x 40mm series 4b	23	330	37.3	8.86	44.72	9.57

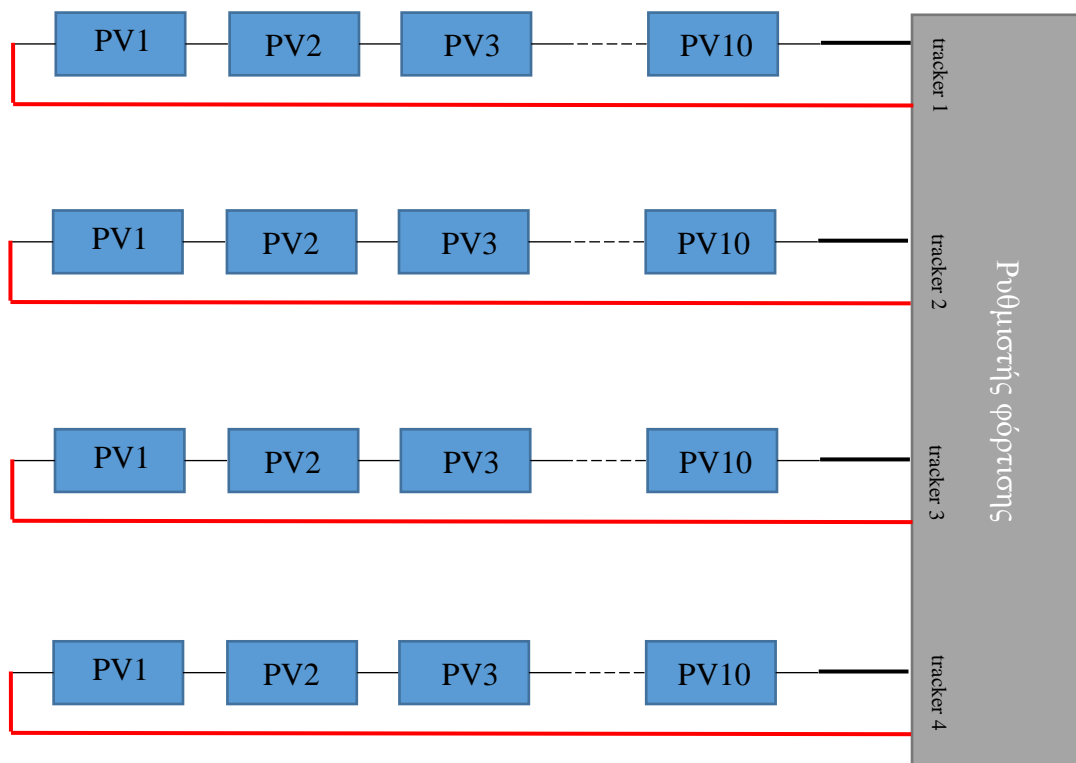
Module	SPP 040201200	SPP 040301200	SPP 040451200	SPP 040601200	SPP 040901200	SPP 041151200	SPP 041151202	SPP 041751200	SPP 042702000	SPP 043302400	SPP 043302402
Nominal Power (± 3% tolerance)	20W	30W	45W	60W	90W	115W	115W	175W	270W	330W	330W
Cell type	Polycrystalline										
Number of cells in series	36							60	72		
Maximum system voltage (V)	1000V										
Temperature coefficient of PMPP (%)	-0.45/°C	-0.45/°C	-0.45/°C	-0.45/°C	-0.45/°C	-0.45/°C	-0.45/°C	-0.45/°C	-0.47/°C	-0.45/°C	-0.45/°C
Temperature coefficient of Voc (%)	-0.35/°C	-0.35/°C	-0.35/°C	-0.35/°C	-0.35/°C	-0.35/°C	-0.35/°C	-0.35/°C	-0.34/°C	-0.35/°C	-0.35/°C
Temperature coefficient of Isc (%)	+0.04/°C	+0.04/°C	+0.04/°C	+0.04/°C	+0.04/°C	+0.04/°C	+0.04/°C	+0.04/°C	+0.045/°C	+0.04/°C	+0.04/°C
Temperature Range	-40°C to +85°C										
Surface Maximum Load Capacity	200 kg/m ²										
Allowable Hail Load	23 m/s, 7.53 g										
Junction Box Type	PV-LH0805	PV-LH0806	PV-LH0801		PV-LH0808			PV-JB002			
Length of Cable / connector	No cable					900 mm / MC4					
Output tolerance	+/-3%										
Frame	Aluminium										
Product warranty	5 years										
Warranty on electrical performance	10 years 90% + 25 years 80% of power output										
Smallest packaging unit	1 panel										
Quantity per pallet	380	240	200	140	72	72	72	48	42	37	37

*New dimensions: will replace 4a model

1) STC (Standard Test Conditions): 1000 W/m², 25°C, AM (Air Mass) 1.5

Εικόνα 7.3: Απόσπασμα από το τεχνικό φυλλάδιο του πολυκρυσταλλικού πλαισίου Victron SPP042702000

Εφόσον το κάθε πλαίσιο έχει τάση 31,7V και ένταση ρεύματος 8,52A στο σημείο μέγιστης ισχύος, πρέπει να συνδεθούν 10 πλαίσια εν σειρά, με δύο σειρές συνδεδεμένες παράλληλα, σε κάθε tracker του ρυθμιστή φόρτισης. Γίνεται αναπαράσταση της συνδεσμολογίας στο Σχήμα 7.2. Εξαιρέση αποτελεί ο ρυθμιστής φόρτισης no.11, καθώς φορτίζει ένα μικρότερο σύστημα αποθήκευσης και χρειάζεται μόνο δύο συστοιχίες πλαισίων με δέκα πλαίσια εν σειρά.



Σχήμα 7.2: Αναπαράσταση συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκών συστοιχιών ανά ρυθμιστή φόρτισης

Παρακάτω φαίνονται και οι υπολογισμοί που γίνανε και καταλήγουν στο συμπέρασμα του Σχήμα 7.2:

$$V_{mp/tracker} = n_{πλαίσιο/σειρά} \times V_{mp,πλαίσιο} = 10 \times 31,7V = 317V \quad (7.12)$$

$$I_{mp/tracker} = n_{παράλληλων\ σειρών} \times I_{mp,πλαίσιο} = 8,52A = 8,52A \quad (7.13)$$

$$P_{mp/tracker} = V_{mp/tracker} \times I_{mp/tracker} = 317V \times 8,52A = 2700,84W \approx 2701W \quad (7.14)$$

Με τα παραπάνω δεδομένα, δύναται πλέον να υπολογιστεί και το συνολικό πλήθος απαραίτητων φωτοβολταϊκών πλαισίων:

$$\begin{aligned} n_{\Sigma\text{πλαίσιο}} &= n_{\text{πλαίσιο/σειρά}} \times n_{\text{παράλληλων\ σειρών}} \\ &\quad \times (n_{\text{tracker/ρυθμιστή}(450/200)} \times n_{\text{ρυθμ.φορ.}(450/200)} \\ &\quad + n_{\text{tracker/ρυθμιστή}(450/100)} \times n_{\text{ρυθμ.φορ.}(450/100)}) \\ &= 10 \times 1 \times (4 \times 10 + 2 \times 1) = 420 \text{ πλαίσια} \end{aligned} \quad (7.15)$$

Όπου

- $n(\text{tracker/ρυθμιστή}(450/200))$ το πλήθος των tracker του ρυθμιστή φόρτισης 450/200 (τέσσερις)
- $n(\text{tracker/ρυθμιστή}(450/100))$ το πλήθος των tracker του ρυθμιστή φόρτισης 450/100 (δύο)
- $n(\text{ρυθμ.φορ.}(450/200))$ το πλήθος των ρυθμιστών φόρτισης 450/200 (δέκα)
- $n(\text{ρυθμ.φορ.}(450/100))$ το πλήθος των ρυθμιστών φόρτισης 450/100 (ένας)

Επίσης η συνολική ισχύς του φωτοβολταϊκού πάρκου θα ισούται με:

$$P_{mp, \text{πάρκου}} = \frac{420 \text{ πλαίσια}}{10 \text{ πλαίσια/σειρά}} \times 317V \times 8,52A = 113435.28W \quad (7.16)$$

Στην συνέχεια πρέπει να επιλεγθούν και οι κατάλληλοι αντιστροφείς, οι οποίοι θα συνδεθούν από ένας σε κάθε «ομάδα» του συστήματος αποθήκευσης. Εφόσον ο επιλεγμένος συσσωρευτής αποδίδει την μέγιστη χωρητικότητά του, όταν η εκφόρτισή του διαρκεί 20 ώρες, και αφού η κάθε «ομάδα» συσσωρευτών αποτελείται από τέσσερις παράλληλες σειρές, το η ένταση ρεύματος που αποδίδει η κάθε «ομάδα» είναι:

$$I_{\text{ομάδας 4 συσ.20}} = \frac{C_{\text{ον.συσ.}}}{20} \times n_{\text{παραλληλων σειρών}} = \frac{240}{20} \times 4 = 48A \quad (7.17)$$

$$I_{\text{ομάδας 2 συσ.20}} = \frac{C_{\text{ον.συσ.}}}{20} \times n_{\text{παραλληλων σειρών}} = \frac{240}{20} \times 2 = 24A \quad (7.18)$$

Με την τάση του συστήματος αποθήκευσης να είναι 48V, εύκολα υπολογίζεται και η ισχύς της κάθε «ομάδας» του συστήματος αποθήκευσης.

$$P_{\text{ομάδας 4 συσ.}} = V_{\Sigma A} \times I_{\text{ομάδας 4 συσ.20}} = 48V \times 48A = 2304W \quad (7.19)$$

$$P_{\text{ομάδας 2 συσ.}} = V_{\Sigma A} \times I_{\text{ομάδας 2 συσ.20}} = 48V \times 24A = 1152W \quad (7.20)$$

Άρα τελικά η ισχύς των αντιστροφών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 2304W για τις δέκα ομάδες, ενώ μεγαλύτερη από 1152W για την μία, μικρότερη, ομάδα, στην περίπτωση επιλογής 11 αντιστροφών. Ο αντιστροφέας που φαίνεται να είναι κατάλληλος των προ απαιτούμενων, είναι ο Victron Phoenix Inverters Smart 48/3000 [24]. Κάποια από τα βασικά του χαρακτηριστικά φαίνονται στην Εικόνα 7.4. Όπως φαίνεται και από τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα, ο κάθε ένας μπορεί να υποστηρίξει στην είσοδό του, μία «ομάδα» συσσωρευτών. Στην περίπτωση της 11ης πιο μικρής «ομάδας» συσσωρευτών, χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας μικρότερης ισχύος, ο Victron Phoenix Inverters Smart 48/2000 [24], τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται επίσης στην Εικόνα 7.4.

Εφόσον πλέον έχουν βρεθεί και οι αντιστροφείς του φωτοβολταϊκού πάρκου, θα πρέπει να γίνουν και οι απαραίτητοι υπολογισμοί του απαραίτητου εμβαδού που χρειάζεται να υπάρχει για να στεγαστεί το έργο που διαστασιολογήθηκε.

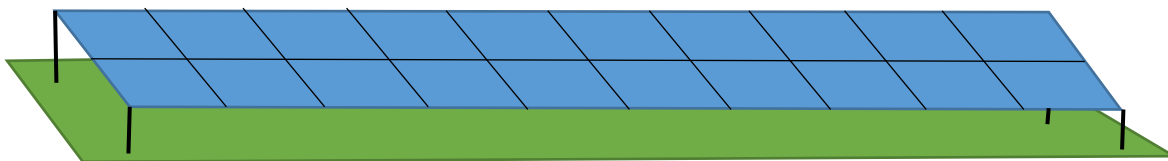
Phoenix Inverter Smart	12/1600 24/1600 48/1600	12/2000 24/2000 48/2000	12/3000 24/3000 48/3000	24/5000 48/5000
Parallel and 3-phase operation	No			
INVERTER				
Input voltage range	9.3 – 17V 18.6 – 34V 37.2 – 68V			
Output	Output voltage: 230 VAC ±2% 50 Hz or 60 Hz ± 0.1% (1)			
Cont. output power at 25°C (1)	1600 VA	2000 VA	3000 VA	5000 VA
Cont. output power at 25°C	1300 W	1600 W	2400 W	4000 W
Cont. output power at 40°C	1200 W	1450 W	2200 W	3700 W
Cont. output power at 65°C	800 W	1000 W	1700 W	2800 W
Peak power	3000 W	4000 W	6000 W	10000 W
Dynamic (load dependent) DC low shut down (fully configurable)	Dynamic cut-off, see https://www.victronenergy.com/live/ve.direct:phoenix-inverters-dynamic-cutoff			
Max. efficiency 12/ 24 /48 V	92 / 94 / 94%	92 / 94 / 94%	93 / 94 / 95%	95 / 96%
Zero load power 12 / 24 / 48 V	8 / 9 / 11 W	8 / 9 / 11 W	12 / 13 / 15 W	18 / 20 W
Zero load power in ECO mode	0.6 / 1.3 / 2.1 W	0.6 / 1.3 / 2.1 W	1.5 / 1.9 / 2.8 W	2.2 / 3.2 W
GENERAL				
Programmable relay (2)	Yes			
Stop & start power ECO-mode	adjustable			
Protection (3)	a - g			
Bluetooth wireless communication	For remote monitoring and system integration			
VE.Direct communication port	For remote monitoring and system integration			
Remote on-off	Yes			
Common Characteristics	Operating temperature range: -40 to +65°C (fan assisted cooling) Humidity (non-condensing): max 95%			
ENCLOSURE				
Common Characteristics	Material & Colour: steel (blue RAL 5012; and black RAL 9017) Protection category: IP21			
Battery-connection	M8 bolts	M8 bolts	12 V/24 V: 2+2 M8 bolts 48 V: M8 bolts	24 V: 2+2 M8 bolts 48 V: M8 bolts
230 V AC-connection	Screw terminals			
Weight	12kg	13kg	19kg	29kg / 28kg
Dimensions (h x w x d)	485 x 219 x 125mm	485 x 219 x 125mm	533 x 285 x 150mm (12 V) 485 x 285 x 150mm (24 V/48 V)	595 x 295 x 160mm (24 V) 555 x 295 x 160mm (48 V)

Εικόνα 7.4: Απόσπασμα από το τεχνικό φυλλάδιο του αντιστροφέα Victron Phoenix Inverters Smart 48/2000 και 48/3000.

Όπως υπολογίστηκε στην εξίσωση (7.15), στο φωτοβολταϊκό πάρκο θα χρειαστεί να εγκατασταθούν 420 πλαίσια. Σύμφωνα με την εξίσωση (6.35), θέτοντας $n_{πλ,τρ}=1$ και $\theta_{πρ}=26^\circ$ (κατάλληλη σταθερή κλίση για τα περίχωρα της Ελλάδος), υπολογίζεται το εμβαδόν που καταλαμβάνει υπό κλίση ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Από το τεχνικό φυλλάδιο του φωτοβολταϊκού πλαισίου παρατηρείται ότι έχει διαστάσεις $w_{πλ}=992\text{mm}$, $l_{πλ}=1640\text{mm}$.

$$A_{πλ} = 1 \times 0,992\text{m} \times 1,64\text{m} \times \cos 26^\circ = 1,6269\text{m}^2 \quad (7.21)$$

Τα πλαίσια θα τοποθετηθούν οριζόντια σε τραπέζια με δύο σειρές πλαισίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3: Αναπαράσταση τραπέζιου

Σύμφωνα με την αναπαράσταση του Σχήμα 7.3 σε κάθε τραπέζι τοποθετούνται 20 φωτοβολταϊκά πλαίσια, οπότε το εμβαδόν του κάθε τραπέζιου, πάλι με βάση τη σχέση (6.35), ισούται με:

$$A_{series} = 20 \times 1,6269m^2 = 32,54m^2 \quad (7.22)$$

Στην καλύτερη περίπτωση, τα τραπέζια τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο, οπότε το συνολικό τους εμβαδόν, εφόσον υπάρχουν 840 πλαίσια, σύμφωνα με την σχέση (6.34), θα είναι:

$$A_{πάρκου} = \frac{420}{20} \times A_{series} = 21 \times 32,54m^2 = 683,34m^2 \quad (7.23)$$

Στην χειρότερη περίπτωση, θα πρέπει τα τραπέζια να τοποθετηθούν παράλληλα το ένα στο άλλο, οπότε για να αποφευχθούν οι σκιάσεις, θα χρειαστεί ένα εμβαδόν τουλάχιστον:

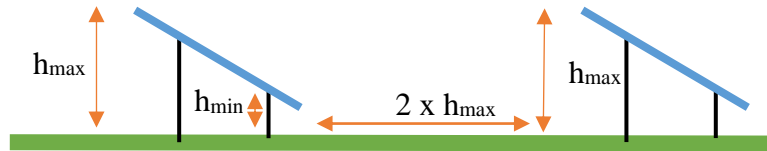
$$\begin{aligned} A_{πάρκου} &= \frac{420}{20} \times A_{series} + n_{s,gap} \times A_{s,gap} \\ &= 683,34m^2 \\ &\quad + (n_{series} - 1) \times [l_{\pi\lambda} \times 10 \times 2 \times (0,2 + w_{\pi\lambda} \times \sin 26^\circ)] \\ &= 683,34m^2 + 1099m^2 = 1783m^2 \end{aligned} \quad (7.24)$$

Βέβαια το τελικό εμβαδόν θα εξαρτηθεί από το γεωμετρικό σχήμα του χωραφιού, και είναι σημαντικό να μην αγνοηθεί και ο πρόσθετος περιμετρικός χώρος που χρειάζεται να υπάρχει σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, όπως και ο χώρος για τους οικίσκους τόσο των πεδίων ζεύξης, όσο και του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά την καλωδίωση του φωτοβολταϊκού πάρκου, γίνεται πρώτα μία εκτίμηση της έκτασης της γης, όπου θέτεται ένα ορθογώνιο χωράφι με διαστάσεις κατάλληλες για να χωρέσουν τα απαραίτητα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Εφόσον υπολογίστηκε ότι χρειάζονται 420 φωτοβολταϊκά πλαίσια για να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες των χρηστών, θεωρείται ότι θα στοιχηθούν σε 5 τραπέζια των 80 πλαισίων και ένα των 20, όπως υπολογίζεται παρακάτω στη σχέση (7.25):

$$n_{\text{τραπέζιων}} = \frac{n_{\Sigma\text{πλαισίων}}}{n_{\text{πλαίσια}/\text{τραπέζι}}} = \frac{420}{80} = 5,25 \text{ τραπέζια} \sim 6 \text{ τραπέζια} \quad (7.25)$$

Η κλίση του τραπεζιού ισοδυναμεί με την κλίση των πλαισίων, η οποία είναι 26° . Με βάση τη σχέση (6.35), υπολογίζεται η απόσταση του ψηλότερου σημείου του τραπεζιού από το έδαφος. Να σημειωθεί ότι επιλέγεται τα πλαίσια να τοποθετηθούν σε ύψος $0,25m$ (h_{min}) για την αποφυγή σκιάσεων από τη βλάστηση.



Εικόνα 7.5 Σχήμα αναπαράστασης διαστασιολόγησης τραπεζιού.

Σε κάθε τραπέζι στοιχίζονται δύο σειρές από πλαίσια, με το κάθε πλαίσιο σε κάθετο προσανατολισμό. Με άλλα λόγια, το πλάτος του τραπεζιού θα ισούται με δύο φορές το μήκος του πλαisiού, ενώ το μήκος του τραπεζιού θα ισούται με σαράντα φορές το πλάτος ενός πλαisiού.

$$w_{τρ} = 2 \times l_{\pi\lambda} = 2 \times 1640mm = 3,28m \quad (7.26)$$

$$l_{τρ} = 40 \times w_{\pi\lambda} = 40 \times 992mm = 39,68m \quad (7.27)$$

Οπότε πλέον υπολογίζεται και το ύψος του τραπεζιού:

$$h_{max} = (w_{τρ} \times \sin \theta_{τρ}) + h_{min} = (3,28m \times \sin 26^\circ) + 0,25m = 1,69m \quad (7.28)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται και η απόσταση μεταξύ των τραπεζιών, που είναι γενικώς αποδεκτό να επιλέγεται ίσο με το διπλάσιο του ύψους του τραπεζιού.

$$d_{\text{τραπεζιών}} = 2 \times h_{max} = 2 \times 1,69m = 3,38m \quad (7.29)$$

Επίσης υπολογίζεται και η προβολή του τραπεζιού στο έδαφος:

$$w_{\text{προβ.τρ.}} = (w_{τρ} \times \cos 26^\circ) = 3,28m \times 0,898 = 2,95m \quad (7.30)$$

Άρα τελικά το ελάχιστο απαραίτητο πλάτος του χωραφιού, στην περίπτωση που τα τραπέζια στοιχίζονται το ένα παράλληλα στο άλλο, θα είναι ($n_{\text{τραπεζιών}} \approx 11$):

$$\begin{aligned} w_{\text{χωραφιού,min}} &= (n_{\text{τραπεζιών}} \times w_{\text{προβ.τρ.}}) + (n_{s,gap} \times d_{\text{τραπεζιών}}) \\ &= (6 \times 2,95m) + (5 \times 3,38m) = 34,6m \end{aligned} \quad (7.31)$$

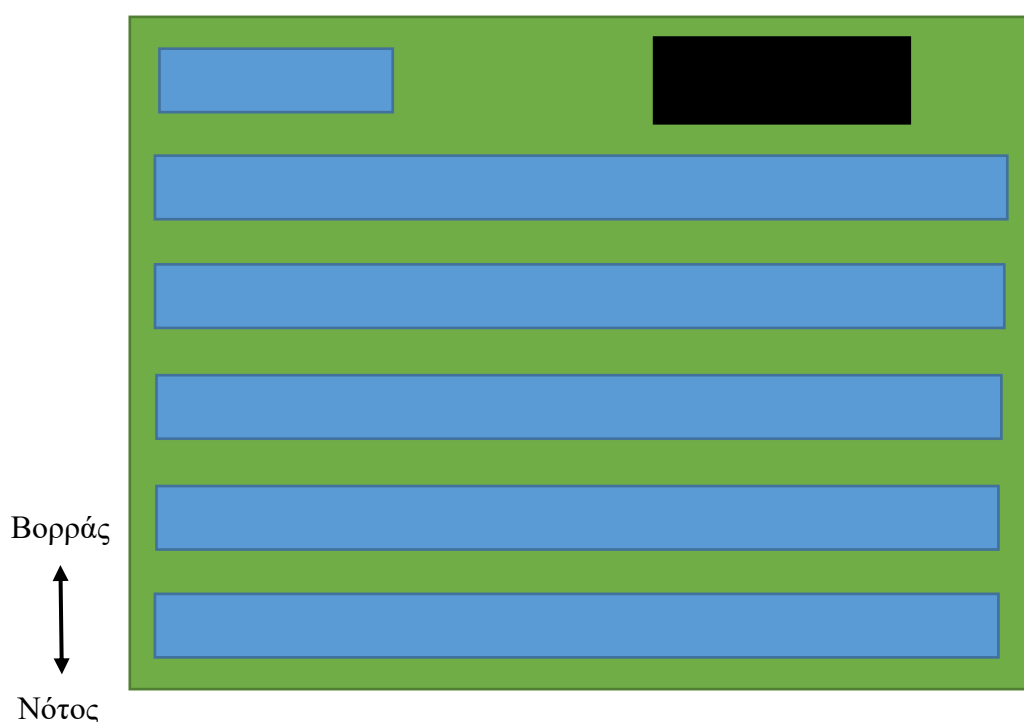
Επίσης υπολογίζεται και το ελάχιστο απαραίτητο μήκος του χωραφιού, και θα ισούται με το πλάτος των τραπεζιών.

$$l_{\text{χωραφιού,min}} = l_{τρ} = 39,68m \quad (7.32)$$

Να σημειωθεί ότι σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, είναι αναγκαίο να υπάρχουν γύρω – γύρω από τα τραπέζια περιθώρια περίπου πέντε μέτρων από την περίφραξη του χωραφιού. Με άλλα λόγια στις τιμές των εξισώσεων (7.31), (7.32) πρέπει να προστεθούν ακόμα δέκα μέτρα (δέκα μέτρα από τη κάθε πλευρά του χωραφιού).

$$w_{\text{χωραφιού}} = w_{\text{χωραφιού, min}} + 10m = 49,68m \quad (7.33)$$

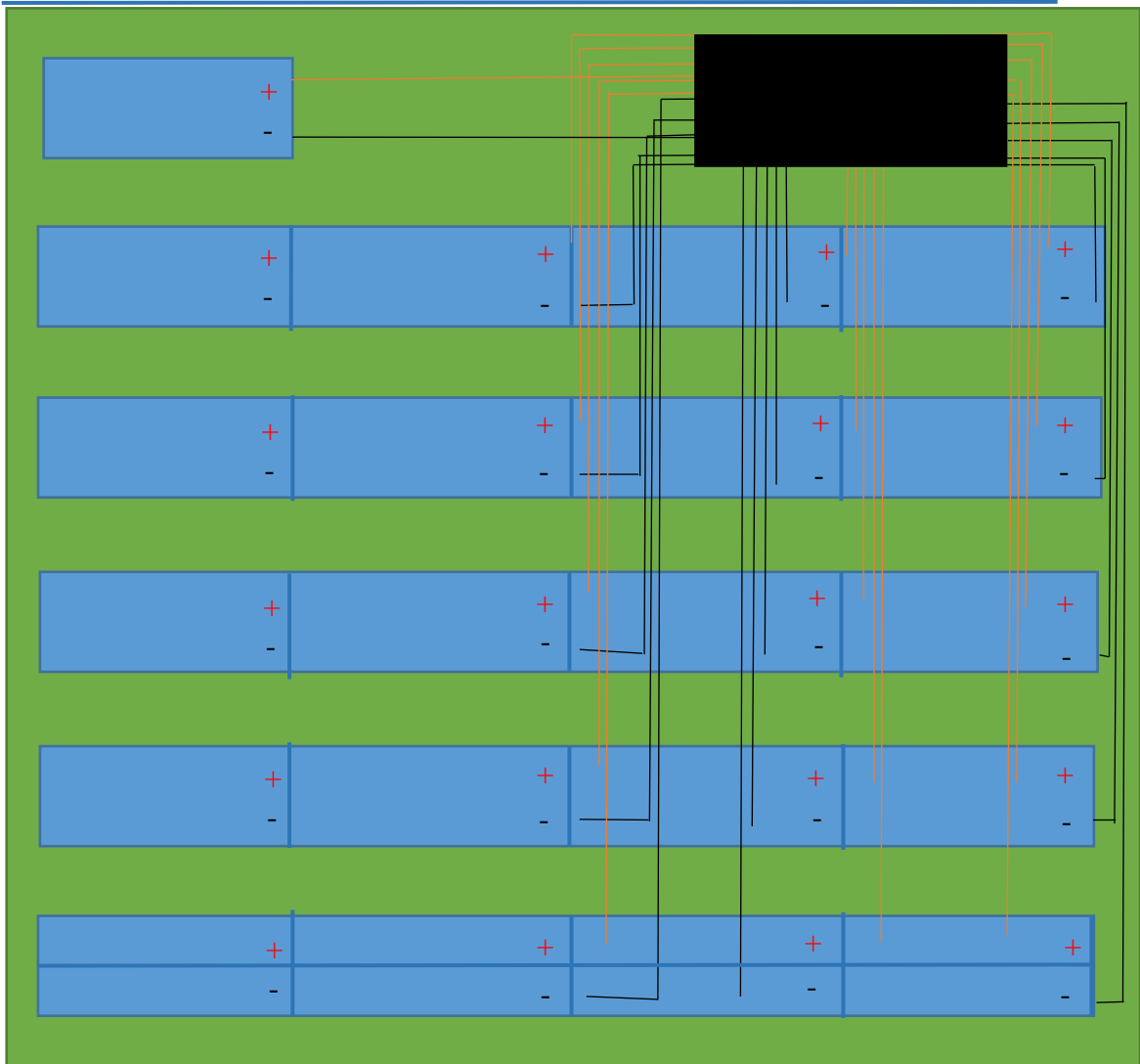
$$l_{\text{χωραφιού}} = l_{\text{χωραφιού, min}} + 10m = 44,6m \quad (7.34)$$



Σχήμα 7.4 Σχηματική αναπαράσταση του χωραφιού και της διάταξης των τραπεζιών, όπου τα μπλε τετράγωνα αναπαριστούν τα τραπέζια και το μαύρο τον οικίσκο στέγασης των μπαταριών, αντιστροφών και ρυθμιστών φόρτισης.

Στον οικίσκο θα στεγαστούν οι συσσωρευτές, οι αντιστροφείς, και οι ρυθμιστές φόρτισης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.5 Σχηματική αναπαράσταση καλωδίωσης του φωτοβολταϊκού πάρκου. Παρακάτω υπολογίζονται το ελάχιστο εμβαδόν του οικίσκου. Το εμβαδόν που καλύπτει ένας συσσωρευτής είναι $0,114 \text{ m}^2$, αυτό των αντιστροφών κρεμασμένο στον τοίχο είναι περίπου $0,04 \text{ m}^2$, και των ρυθμιστών $0,06 \text{ m}^2$ όπως φαίνεται από τα τεχνικά τους φυλλάδια. Ο συνολικός αριθμός συσσωρευτών είναι 168, αντιστροφών είναι 11, και ρυθμιστών επίσης 11, άρα:

$$A_{\text{οικίσκου, min}} = 168 \times 0,114 \text{ m}^2 + 11 \times 0,04 \text{ m}^2 + 11 \times 0,06 \text{ m}^2 = 20,25 \text{ m}^2 \quad (7.35)$$



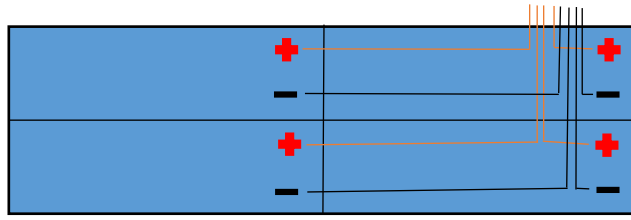
Σχήμα 7.5 Σχηματική αναπαράσταση καλωδίωσης του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Να τονιστεί πως στο παραπάνω σχήμα τα + και - αναπαριστούν τα άκρα δύο σειρών φωτοβολταϊκών. Τα δύο άκρα των σειρών των φωτοβολταϊκών πλαισίων «μεταφέρονται» στην ανατολική μεριά των σειρών, με τη συνδεσμολογία “frog” [25].

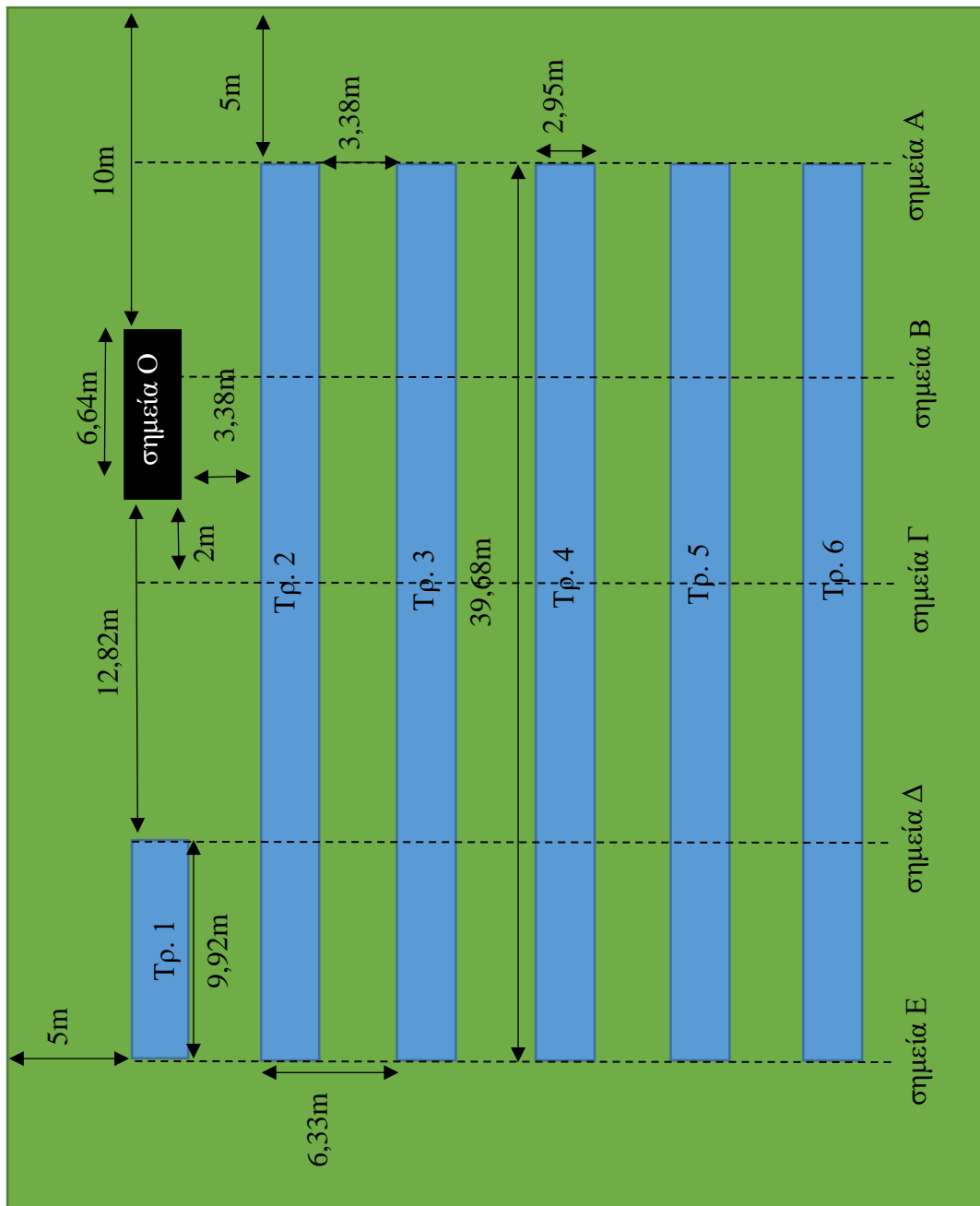
Το πλάτος του οικίσκου θέτεται ίσο με τη προβολή του πλάτους των τραπεζιών στο έδαφος, δηλαδή 2,95m. Έτσι για να έχει ο οικίσκος το απαραίτητο εμβαδόν θα πρέπει το μήκος του να ισούται με:

$$l_{\text{οικίσκου}} = \frac{A_{\text{οικίσκου, min}}}{w_{\text{οικίσκου}}} = \frac{20,25 \text{ m}^2}{2,95 \text{ m}} = 6,86 \text{ m} \quad (7.36)$$

Ο ανατολικός τοίχος του οικίσκου θα απέχει 10 m, και με αυτή την πληροφορία εν γνώση, στο Σχήμα 7.7 φαίνεται το φωτοβολταϊκό πάρκο με αναλυτικές διαστάσεις.



Σχήμα 7.6 Σχηματική αναπαράσταση συνδεσμολογίας των δυτικών σειρών.



Σχήμα 7.7 Σχηματική αναπαράσταση πάρκου με πραγματικές διαστάσεις.

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα μήκη και οι διατομές των καλωδίων για κάθε διαδρομή. Η μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης ποσοστιαία είναι 3%.

- Διαδρομή Τραπέζι 1 – οικίσκο:

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.7 η απόσταση από το τραπέζι 1 μέχρι τον οικίσκο είναι 12,82m. Επίσης η κάθε σειρά πλαισίων έχει τάση 317V, οπότε συνυπολογίζοντας και την επιτρεπτή πτώση τάσης βρίσκεται και η διατομή κάθε καλωδίου.

$$\begin{aligned}
 s_1 &= I_{ov,1} \times 0,0175 \mu\Omega m \times \frac{l_1}{0,03} \\
 &= 8,52A \times 0,0175 \times 10^{-6} \times 10^3 \Omega mm \times \frac{12,82 \times 10^3 mm}{9,51V} \\
 &= 8,52A \times 0,0175 \times \Omega mm \times \frac{12,82 mm}{9,51V} = 0,2 mm^2
 \end{aligned} \tag{7.37}$$

Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιείται η χαμηλότερη υπαρκτή διατομή DC καλωδίου η οποία είναι 4mm² (χρησιμοποιείται επίσης και για λόγους ανεκτικότητας).

Το απαραίτητο συνολικό μήκος των καλωδίων για αυτή τη διαδρομή είναι:

$$l_{καλ,τρ1} = 4 \times 12,82m = 51,28m \tag{7.38}$$

- Διαδρομή Τραπέζι 6 – οικίσκο:

Η μεγαλύτερη διαδρομή στο πάρκο είναι αυτή από τις δυτικές σειρές του τραπεζιού 6 έως τον οικίσκο. Από τα άκρα αυτών των σειρών έως τα άκρα τις επόμενης σειράς (σημείο E – σημείο Δ) η απόσταση είναι 9,92m. Από το σημείο Δ έως τον οικίσκο η απόσταση είναι 4×6,33m+3,38m+2m=30,70m. Συνολικά η απόσταση είναι ίση με 30,70m+9,92m=40,62m, οπότε συνυπολογίζοντας και την επιτρεπτή πτώση τάσης βρίσκεται και η διατομή κάθε καλωδίου.

$$\begin{aligned}
 s_1 &= I_{ov,1} \times 0,0175 \mu\Omega m \times \frac{l_1}{0,03} \\
 &= 8,52A \times 0,0175 \times 10^{-6} \times 10^3 \Omega mm \times \frac{35,24 \times 10^3 mm}{9,51V} \\
 &= 8,52A \times 0,0175 \times \Omega mm \times \frac{35,24 mm}{9,51V} = 0,63 mm^2
 \end{aligned} \tag{7.39}$$

Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιείται πάλι η χαμηλότερη υπαρκτή διατομή DC καλωδίου η οποία είναι 4mm².

Το απαραίτητο συνολικό μήκος των καλωδίων για αυτή τη διαδρομή είναι:

$$l_{καλ,τρ6(\Delta-0)} = 4 \times 35,24m = 140,96m \tag{7.40}$$

Εφόσον για τη μεγαλύτερη διαδρομή καλωδίων του πάρκου αρκεί η διατομή 4mm^2 , η οποία είναι και η ελάχιστη, τότε για όλες τις υπόλοιπες διαδρομές από τις σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων μέχρι τον οικίσκο θα χρησιμοποιηθεί επίσης καλώδιο διατομής 4mm^2 .

Στη συνέχεια υπολογίζεται απλά το συνολικό μήκος του απαραίτητου καλωδίου:

- Διαδρομή Τραπέζι 6 (σημείο Γ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ6(Γ-ο)} = 4 \times ((4 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 2\text{m}) = 122,8\text{m} \quad (7.41)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 6 (σημείο Β) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ6(Β-ο)} = 4 \times ((4 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m}) = 114,8\text{m} \quad (7.42)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 6 (σημείο Α) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ6(Α-ο)} = 4 \times ((4 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 5\text{m}) = 134,8\text{m} \quad (7.43)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 5 (σημείο Δ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ5(Δ-ο)} = 4 \times ((3 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 9,92\text{m} + 2\text{m}) = 137,16\text{m} \quad (7.44)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 5 (σημείο Γ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ5(Γ-ο)} = 4 \times ((3 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 2\text{m}) = 97,48\text{m} \quad (7.45)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 5 (σημείο Β) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ5(Β-ο)} = 4 \times ((3 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m}) = 89,48\text{m} \quad (7.46)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 5 (σημείο Α) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ5(Α-ο)} = 4 \times ((3 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 5\text{m}) = 109,48\text{m} \quad (7.47)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 4 (σημείο Δ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ4(Δ-ο)} = 4 \times ((2 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 9,92\text{m} + 2\text{m}) = 111,84\text{m} \quad (7.48)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 4 (σημείο Γ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ4(Γ-ο)} = 4 \times ((2 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 2\text{m}) = 72,16\text{m} \quad (7.49)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 4 (σημείο Β) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ4(Β-ο)} = 4 \times ((2 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m}) = 64,16\text{m} \quad (7.50)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 4 (σημείο Α) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ4(Α-ο)} = 4 \times ((2 \times 6,33\text{m}) + 3,38\text{m} + 5\text{m}) = 84,16\text{m} \quad (7.51)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 3 (σημείο Δ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ3(Δ-ο)} = 4 \times (6,33\text{m} + 3,38\text{m} + 9,92\text{m} + 2\text{m}) = 86,52\text{m} \quad (7.52)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 3 (σημείο Γ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ3(Γ-0)} = 4 \times (6,33m + 3,38m + 2m) = 46,84m \quad (7.53)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 3 (σημείο Β) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ3(Β-0)} = 4 \times (6,33m + 3,38m) = 38,84m \quad (7.54)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 3 (σημείο Α) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ3(Α-0)} = 4 \times (6,33m + 3,38m + 5m) = 58,84m \quad (7.55)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 2 (σημείο Δ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ2(Δ-0)} = 4 \times (3,38m + 9,92m + 2m) = 61,2m \quad (7.56)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 2 (σημείο Γ) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ2(Γ-0)} = 4 \times (3,38m + 2m) = 21,52m \quad (7.57)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 2 (σημείο Β) με οικίσκο:

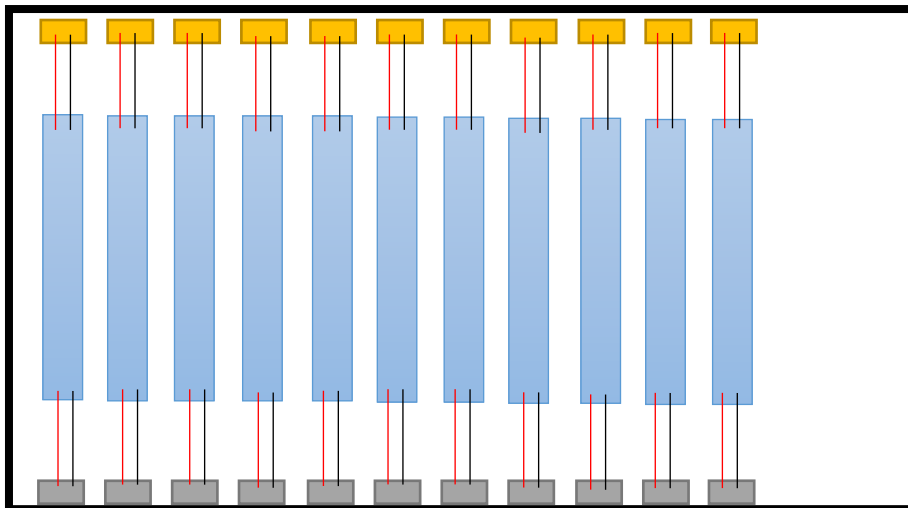
$$l_{καλ,τρ2(Β-0)} = 4 \times (3,38m) = 13,52m \quad (7.58)$$

- Διαδρομή Τραπέζι 2 (σημείο Α) με οικίσκο:

$$l_{καλ,τρ2(Α-0)} = 4 \times (3,38m + 5m) = 33,52m \quad (7.59)$$

Με βάση τους υπολογισμούς των εξισώσεων (7.41) έως (7.59) το άθροισμα των μηκών είναι 1499,12m. Από αυτά τα μισά πρέπει να είναι μαύρο καλώδιο 2,5mm² και τα άλλα μισά κόκκινο 2,5mm².

Οι υπόλοιπες διαδρομές καλωδίων γίνονται εντός του οικίσκου και το σχετικό σχήμα φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 7.8 Πρόχειρη σχηματική αναπαράσταση οικίσκου και των καλωδιώσεων εντός του. (πορτοκαλί=αντιστροφείας, γαλάζιο=ομάδα 16 μπαταριών(όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1),γκρι=ρυθμιστής φόρτισης).

- Διαδρομή ρυθμιστής φόρτισης – ομάδα συσσωρευτών:

Εφόσον ο οικίσκος έχει πλάτος 2,95m, η απόσταση των ομάδων συσσωρευτών από τους τοίχους και κατ' επέκταση τους αντιστροφείς/ρυθμιστές φόρτισης θα είναι περίπου 0,5m. Η τάση των ρυθμιστών είναι περίπου 57V και το ρεύμα 200A.

$$\begin{aligned}
 s_1 &= I_{ov,1} \times 0,0175\mu\Omega m \times \frac{l_1}{0,03} \\
 &= 200A \times 0,0175 \times 10^{-6} \times 10^3 \Omega mm \times \frac{0,5 \times 10^3 mm}{1,71V} \\
 &= 200A \times 0,0175 \times \Omega mm \times \frac{0,5mm}{1,71V} = 1,02mm^2
 \end{aligned} \tag{7.60}$$

οπότε επιλέγεται διατομή (με μεγάλη ανεκτικότητα) 4mm².

$$l_{καλ,ρυθμ.-ο.σ.} = 22 \times 0,5m = 11m \tag{7.61}$$

- Διαδρομή ομάδα συσσωρευτών - αντιστροφή:

Εφόσον ο οικίσκος έχει πλάτος 2,95m, η απόσταση των ομάδων συσσωρευτών από τους τοίχους και κατ' επέκταση τους αντιστροφείς/ρυθμιστές φόρτισης θα είναι περίπου 0,5m. Η τάση των ομάδων συσσωρευτών είναι 48V και το ρεύμα 200A.

$$\begin{aligned}
 s_1 &= I_{ov,1} \times 0,0175\mu\Omega m \times \frac{l_1}{0,03} \\
 &= 200A \times 0,0175 \times 10^{-6} \times 10^3 \Omega mm \times \frac{0,5 \times 10^3 mm}{1,44V} \\
 &= 200A \times 0,0175 \times \Omega mm \times \frac{0,5mm}{1,44V} = 1,21mm^2
 \end{aligned} \tag{7.62}$$

οπότε επιλέγεται διατομή (με μεγάλη ανεκτικότητα), επίσης, 4mm².

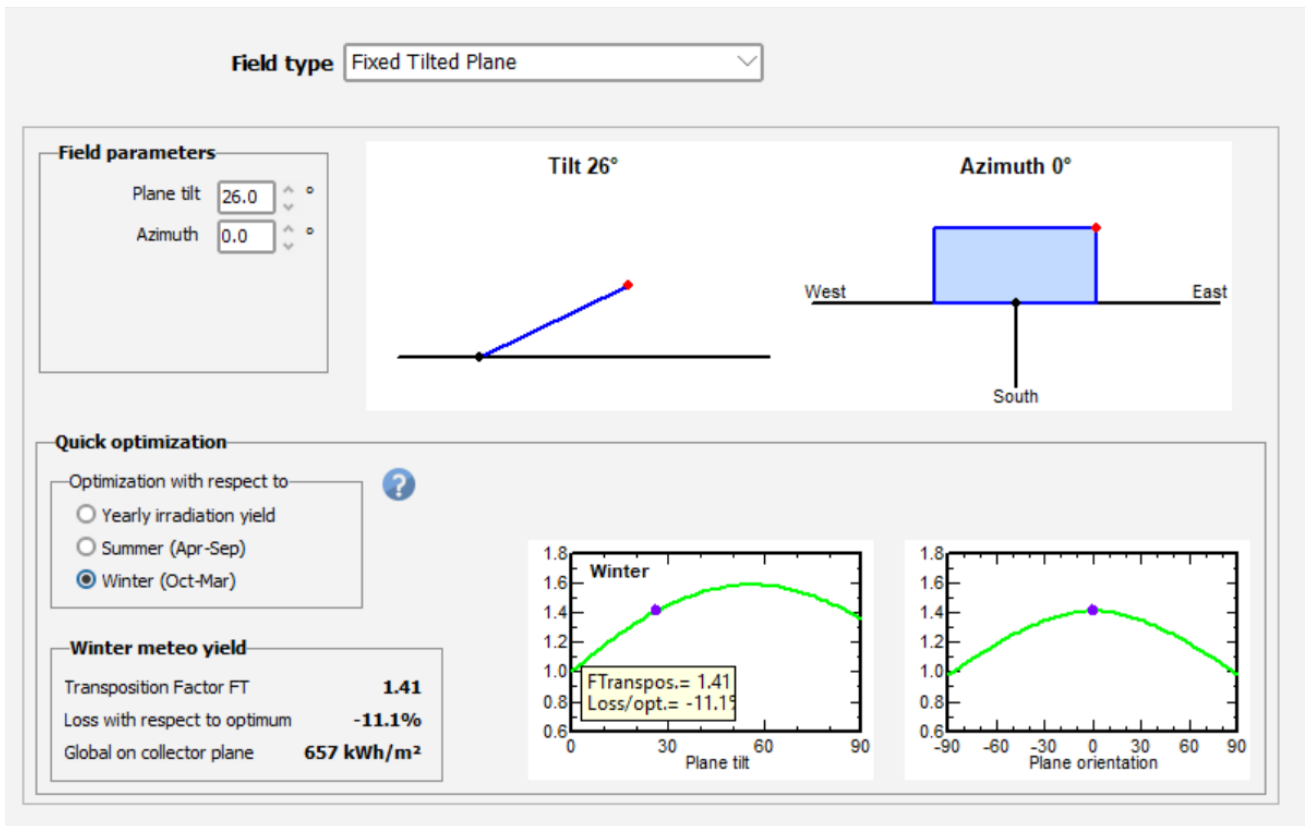
$$l_{καλ,ρυθμ.-ο.σ.} = 22 \times 0,5m = 11m \tag{7.63}$$

Συνολικά θα χρειαστούν 22m καλωδίου διατομής 4mm², απ' τα οποία 11m μαύρο και 11m κόκκινο.

7.3 Διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση του προγράμματος PVSyst

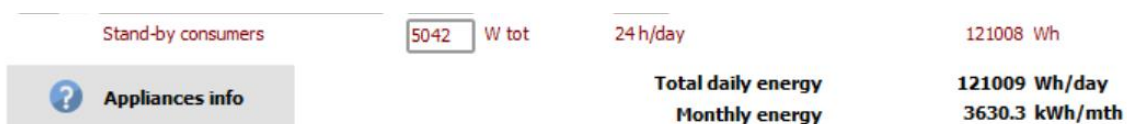
Με τη βοήθεια του λογισμικού PVSyst, μπορεί κάποιος εύκολα να υπολογίσει τις παραμέτρους ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου, καθώς επίσης και να προσομοιώσει τη λειτουργία αυτού του φωτοβολταϊκού πάρκου χάρη στις βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων της πλατφόρμας. Με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητας των υπολογισμών που έγιναν στην παράγραφο 7.2, γίνεται διαστασιολόγηση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου του παραδείγματος με χρήση του λογισμικού.

Αρχικά επιλέγονται κάποιοι βασικοί παράμετροι, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 7.6: Επιλογή κάποιων βασικών παραμέτρων στο λογισμικό PVSyst.

Έπειτα εισάγεται η απαιτούμενη ισχύς ανά ημέρα που θα χρειαστεί να καλύπτει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια.



Εικόνα 7.7: Εισαγωγή τιμής απαιτούμενης ισχύος στο λογισμικό PVSyst.

Μετά την προσθήκη και των υπόλοιπων παραμέτρων (τοποθεσία, ημέρες αυτονομίας, χαρακτηριστικά ρυθμιστή φόρτισης, χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων, χαρακτηριστικά συσσωρευτών), γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί από το λογισμικό, οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.8. Παρατηρείται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ότι η διαστασιολόγηση του πάρκου είναι παρόμοια με αυτή που υπολογίστηκε με τις εξισώσεις. Βέβαια, η ισχύς του πάρκου που δίνεται από το λογισμικό είναι μικρότερη, κάτι το οποίο δικαιολογείται από τις βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων που διαθέτει και μπορεί να κάνει πιο ακριβείς υπολογισμούς για την απόδοση της αυτονομίας. Το θετικό είναι ότι το πάρκο που σχεδιάστηκε από τις εξισώσεις, απλά υπερκαλύπτει την ζητούμενη ισχύ και δεν υπάρχει περίπτωση να υπάρξει έλλειμμα ενέργειας στον οικισμό.

PV module		Battery	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	SPP042702000	Model	Adjustable Lead-acid
(Custom parameters definition)		Technology	Lead-acid, vented, tubular
Unit Nom. Power	270 Wp	Nb. of units	44 in parallel x 4 in series
Number of PV modules	340 units	Discharging min. SOC	20.0 %
Nominal (STC)	91.8 kWp	Stored energy	400.1 kWh
Modules	34 Strings x 10 In series	Battery Pack Characteristics	
At operating cond. (50°C)		Voltage	48 V
Pmpp	82.9 kWp	Nominal Capacity	10120 Ah (C10)
U mpp	284 V	Temperature	Fixed 25 °C
I mpp	292 A	Battery Management control	
Controller		Threshold commands as	SOC calculation
Universal controller		Charging	SOC = 0.90 / 0.75
Technology	MPPT converter	approx.	53.3 / 50.1 V
Temp coeff.	-2.7 mV/°C/Elem.	Discharging	SOC = 0.20 / 0.45
Converter		approx.	47.3 / 48.9 V
Maxi and EURO efficiencies	97.0 / 95.0 %		
Total PV power			
Nominal (STC)	92 kWp		
Total	340 modules		
Module area	553 m ²		

Εικόνα 7.8: Αποτελέσματα υπολογισμών του λογισμικού PVsyst.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

8 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ένα ενεργειακό επενδυτικό πλάνο για να χαρακτηριστεί ενδιαφέρον, θα πρέπει να προϋποθέτει την οικονομική βιωσιμότητά του. Αυτό είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας, ενώ μεγάλο ρόλο παίζει ως επακόλουθο το ρίσκο της επένδυσης. Για το σχέδιο της επένδυσης ακολουθείται συνήθως συγκεκριμένη διαδικασία όπως περιγράφεται παρακάτω: [7]

- Αρχικό στάδιο είναι η ανάλυση των οποιονδήποτε διαφορετικών – εναλλακτικών πιθανών παραλλαγών του σχεδίου επένδυσης. Υπάρχει και το ενδεχόμενο ένα σχέδιο επενδύσεων να είναι τεχνικά ασυμβίβαστο, δηλαδή η υλοποίηση του ενός να απαγορεύει την υλοποίηση των άλλων.
- Στο επόμενο στάδιο, πραγματοποιείται η πρόβλεψη των ροών εσόδων – εξόδων, που ακολουθούν το έργο.
- Έπειτα γίνεται η αξιολόγηση των διάφορων παραλλαγών του σχεδίου και εν τέλει επιλέγεται το κατά κρίση καλύτερο, με σκοπό να υλοποιηθεί.
- Το τελευταίο στάδιο αποτελείται από την παρακολούθηση και την καταγραφή των διάφορων αποκλίσεων από το αρχικό πλάνο, με στόχο τις καλύτερες προβλέψεις σε μελλοντικά έργα.

8.1 Αξία του χρήματος

Ένα ποσό χρημάτων μετά από T έτη θα έχει την **παρούσα αξία** που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση: [7]

$$PV = \frac{X}{(1+i)^T} \quad (8.1)$$

όπου

- i ο πληθωρισμός.

Από την άλλη, η παρούσα αξία ποσών X_j συντελούμενων στο τέλος κάθε έτους για T έτη είναι: [7]

$$PV = \sum_{j=1}^T \frac{X_j}{(1+i)^j} \quad (8.2)$$

όπου

- $j=1,2,3,\dots$ αύξων αριθμός κάθε έτους

Στην περίπτωση που τα ποσά X_j είναι ισάξια με ένα ποσό A , τότε η σχέση (8.2) γίνεται: [7]

$$PV = A \times \frac{1 - (1+i)^{-T}}{i} \quad (8.3)$$

Η μελλοντική αξία F μετά από k έτη ίδιων ποσών A συντελούμενων στο τέλος κάθε χρόνου δίνεται από τον παρακάτω τύπο: [7]

$$F = A \times \frac{(1+i)^T - 1}{i} \quad (8.4)$$

και λύνοντας την παραπάνω σχέση (8.4) ως προς τα ίδια ποσά A δίνει: [7]

$$A = F \times \frac{i}{(1+i)^T - 1} \quad (8.5)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, η **ισοδύναμη ετήσια αξία** ποσού X για T χρόνια, υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο: [7]

$$EAV = X \times \frac{i}{1 - (1+i)^{-T}} \quad (8.6)$$

8.2 Κριτήρια αξιολόγησης επενδυτικών δανείων

Όσο αναφορά τα κριτήρια αξιολόγησης των επενδυτικών δανείων, υπάρχουν δύο κατηγορίες, που εξαρτώνται από την συμπερίληψη της χρονικής αξίας του χρήματος, δηλαδή την αναγωγή του στην παρούσα αξία. Στην περίπτωση που ληφθεί υπόψιν η χρονική αξία του χρήματος, συμπεριλαμβάνονται τα ορθολογικά κριτήρια, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, τα ατελή. Τα ορθολογικά κριτήρια είναι πιο ακριβή και για αυτό θα αναλυθούν περαιτέρω στην επόμενη παράγραφο.

8.2.1 Καθαρή παρούσα αξία – ΚΠΑ (Net present value - NPV)

Μία επένδυση τη χρονική στιγμή που ξεκινάει να λειτουργεί εμπορικά, έχει μία καθαρή παρούσα αξία. Αυτή υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση: [7]

$$NPV = -CAP + \sum_{T=1}^N \frac{F_T}{(1+d)^T} + \frac{SV_N}{(1+d)^N} \quad (8.7)$$

όπου

- CAP η αρχική επένδυση
- F_t το ετήσιο καθαρό όφελος
- N ο οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης
- d το επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία (επιθυμητή απόδοση κεφαλαίου)
- SV_N η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο τέλος του οικονομικού κύκλου ζωής

Διακρίνονται τρεις υποπεριπτώσεις:

- Εάν $NPV > 0$, τότε η επένδυση είναι βιώσιμη.
- Εάν $NPV < 0$, τότε η επένδυση δεν είναι βιώσιμη.

- Εάν $NPV = 0$, τότε η επένδυση είναι βιώσιμη με ετήσιο ρυθμό απόδοσης ίσο με d (οριακή κατάσταση).

Σκοπός είναι να επιλεγθεί το επενδυτικό σχέδιο με το μεγαλύτερο NPV, το οποίο προκύπτει από τον αμοιβαίο αποκλεισμό (κατά την αξιολόγηση) των σχεδίων, δηλαδή το ένα σχέδιο αποκλείει το άλλο. Για να εφαρμοστεί σωστά το κριτήριο, είναι σημαντικό να έχουν την ίδια διάρκεια ζωής τα επενδυτικά σχέδια. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να σχηματιστούν καινούρια επενδυτικά σχέδια με διάρκεια ζωής είτε θεωρητικά άπειρη είτε ίση με το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο της διάρκειας των επενδύσεων. Η κάθε μία από τις επενδύσεις δημιουργείται μια σειρά επαναλαμβανόμενων επενδύσεων σε τακτό χρονικό διάστημα ίσο με τη διάρκεια ζωής κάθε αρχικής επένδυσης αντίστοιχα. Εν τέλει το κριτήριο μπορεί να εφαρμοστεί στις καινούριες επενδύσεις, που πλέον έχουν ίδια διάρκεια ζωής.

8.2.2 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης – EBA (Internal rate of return - IRR)

Σε ένα επενδυτικό σχέδιο, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως το επιτόκιο αναγωγής που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία και υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση: [7]

$$NPV_{(d=IRR)} = 0 \leftrightarrow -CAP + \sum_{T=1}^N \frac{F_T}{(1 + IRR)^T} + \frac{SV_N}{(1 + IRR)^N} = 0 \quad (8.8)$$

Στην τιμή του εσωτερικού βαθμού απόδοσης θα πρέπει να τεθεί ένα ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο, κάτω τις οποίας το επενδυτικό σχέδιο θα απορρίπτεται. Το επιτόκιο αυτό αποτελεί το κόστος ευκαιρίας της επένδυσης, με άλλα λόγια το επιτόκιο αναγωγής d . Η επένδυση λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή μόνο στην περίπτωση που το IRR προκύψει μεγαλύτερο από το επιτόκιο αναγωγής, αλλιώς απορρίπτεται. Πάντα σε περίπτωση πολλαπλών επιλογών, προτιμάται η επένδυση με το μεγαλύτερο IRR.

8.2.3 Λόγος οφέλους/κόστους (Benefit/Cost Ratio - BCR)

Το πηλίκο της διαίρεσης του συνολικού οφέλους προς το συνολικό κόστος μίας επένδυσης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της με όλα τα ποσά ανηγμένα σε παρούσα αξία, ονομάζεται BCR η σχέση το υπολογίζει: [7]

$$BCR = \frac{\sum_{T=1}^N \frac{B_T}{(1 + d)^T}}{\sum_{T=0}^N \frac{K_T}{(1 + d)^T}} \quad (8.9)$$

όπου

- B_T το όφελος κατά το έτος T

- K_T το κόστος κατά το έτος T (η τιμή K_0 αντιστοιχεί στην αρχική επένδυση)

Στην περίπτωση που το κλάσμα του οφέλους προς το κόστος της επένδυσης είναι ίσο ή μεγαλύτερο της μονάδας σημαίνει ότι η επένδυση είναι και οικονομικά βιώσιμη.

8.2.4 Έντοκη περίοδος αποπληρωμής – ΕΠΑ (Discounted pay back period - DPB)

Η χρονική περίοδος που είναι αναγκαία έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης, όπως και των πιθανών τόκων που θα μπορούσαν να ληφθούν σε μία εναλλακτική τοποθέτηση του αρχικού κεφαλαίου, ονομάζεται έντοκη περίοδος αποπληρωμής και ορίζεται ως η λύση της παρακάτω εξίσωσης: [7]

$$NPV_{(N=DPB)} = 0 \quad (8.10)$$

όπου η ένδειξη $N=DPB$ σημαίνει ότι η εξίσωση λύνεται ως προς N .

Στην περίπτωση που η υπολειμματική αξία της επένδυσης είναι ίση με το μηδέν ($SV_N = 0$) και το λειτουργικό ετήσιο όφελος F_i θεωρηθεί ότι είναι σταθερό, τότε η εξίσωση (8.10) έχει σαν λύση: [7]

$$DPB = \frac{-\ln\left(1 - \frac{d \times CAP}{F}\right)}{-\ln(1 - d)} \quad (8.11)$$

Όταν η τιμή του DPB κριθεί από τον επενδυτή ικανοποιητική ως προς τον χρόνο αποπληρωμής, τότε η επένδυση θεωρείται οικονομικά βιώσιμη.

8.2.5 Παρούσα αξία συνολικού κόστους και ισοδύναμου ετήσιου κόστους

Υπάρχει περίπτωση δύο αμοιβαία κεφάλαια που θα αξιολογηθούν, να δίνουν ίδια έσοδα ανά έτος με την εφαρμογή του κριτηρίου NPV, οπότε επιλέγεται η επένδυση με τη μικρότερη παρούσα αξία συνολικού κόστους. Με την ακόλουθη σχέση ορίζεται αυτή η αξία: [7]

$$PVTC = CAP + \sum_{T=1}^N \frac{K_T}{(1 + d)^T} \quad (8.12)$$

Η παρούσα αξία του συνολικού κόστους δύναται να εκφραστεί από μία οικονομικά ισοδύναμη ετήσια, σταθερή ράντα, που προσδιορίζεται με βάση τον συντελεστή ανάκτησης του κεφαλαίου. Με αυτό τον τρόπο δε γίνεται πια σύγκριση της παρούσας αξίας συνολικού κόστους, αλλά σύγκριση ετήσιου κόστους, οικονομικά ισοδύναμου, που δίνεται από την σχέση: [7]

$$EAC = \frac{d \times (1 + d)^k}{(1 + d)^k - 1} \times \left[\sum_{T=0}^N \frac{K_T}{(1 + d)^T} \right] \quad (8.13)$$

Στην περίπτωση που το κόστος δεν διαφέρει από έτος σε έτος, το ισοδύναμο ετήσιο κόστος εκφράζεται ως εξής: [7]

$$EAC = \frac{d \times (1 + d)^T}{(1 + d)^T - 1} \times k_0 + k \quad (8.14)$$

όπου ο πρώτος όρος της εξίσωσης προσδιορίζει την επιβάρυνση από το κεφάλαιο της επένδυσης σε ετήσια βάση, και ορίζεται από την απόσβεση και την εξυπηρέτηση του κεφαλαίου. Ο δεύτερος όρος εκπροσωπεί το ετήσιο κόστος.

8.3 Δυνατότητες χρηματοδότησης

Σε μία ενεργειακή επένδυση, ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια που θα αντιμετωπίσει ένας υποψήφιος επενδυτής είναι αυτό της εύρεσης του απαιτούμενου κεφαλαίου. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να οξυνθεί στη περίπτωση που συμπεριλαμβάνονται και οι παράγοντες: [7]

- Υψηλό αρχικό κόστος.
- Εκτεταμένη περίοδος απόσβεσης της επένδυσης.
- Σημαντικό τεχνολογικό και λειτουργικό ρίσκο.
- Περιορισμένη γνώση σύγχρονων τεχνολογιών.

8.3.1 Συνηθισμένες μορφές χρηματοδότησης

Κάποιες από τις πιο κλασικές μορφές χρηματοδότησης φαίνονται παρακάτω: [7]

- Χρηματοδότηση της επένδυσης από τον ίδιο τον επενδυτή με δικό του υπάρχον κεφάλαιο (αυτοχρηματοδότηση).
- Στήριξη από την Ε.Ε. μέσω συνήθως των κοινοτικών πλαισίων με τη μορφή κρατικής ενίσχυσης.
- Δανεισμός του απαραίτητου κεφαλαίου, με ενσωμάτωση του δανείου στον ισολογισμό της επένδυσης, με μεγάλο μειονέκτημα τα εμφανώς μειωμένα κέρδη.

8.3.2 Σύγχρονοι χρηματοδοτικοί μηχανισμοί

Η Χρηματοδότηση Μέσω Τρίτων – ΧΑΤ (Third Party Financing - TPF) ενεργειακών έργων αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο χρηματοδότησης. Τα βασικά της πλεονεκτήματα περιγράφονται στη συνέχεια:

- Το κεφάλαιο είναι άμεσα διαθέσιμο από τον επενδυτή.
- Το επενδυτικό ρίσκο μπορεί να μειωθεί, αφού υπάρχει μερική ή εξ' ολοκλήρου ανάληψη του κινδύνου και η αποπληρωμή της επένδυσης γίνεται με βάση την απόδοση αυτής.

- Η σύλληψη του επενδυτικού σχεδίου, η αξιολόγησή του και η επιλογή των προμηθευτών τόσο για την κατασκευή, όσο και για τη λειτουργία και παρακολούθηση της απόδοσης του έργου καλύπτεται ολοκληρωτικά.
- Η φάση της αδειοδότησης επίσης καλύπτεται διαχειριστικά και οργανωτικά.

Όλα τα επενδυτικά έργα αυτή την εποχή που αφορούν καινοτόμες τεχνολογίες και δύναται να δημιουργήσουν ροές κεφαλαίων αποφευχθέντος κόστους, προσελκύουν χρηματοδοτήσεις μέσω τρίτων. Για να εφαρμοστεί η ΧΑΤ, απαιτείται η συμμετοχή δύο μελών. Το ένα μέλος ορίζεται ως η Εταιρία παροχής ενεργειακών υπηρεσιών (ΕΠΕΥ - ESCO), και είναι υπεύθυνη για τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη λειτουργία του έργου, άρα με λίγα λόγια την αφορούν όλοι οι τεχνικοί και οικονομικοί κίνδυνοι που ενδέχεται να παρουσιαστούν. Το άλλο μέλος είναι ο καταναλωτής ενέργειας (χρήστης ΧΑΤ), που αποτελεί τον ιδιοκτήτη των εγκαταστάσεων στις οποίες εκτελείται η επένδυση.

Παραπάνω παρουσιάστηκαν εν συντομία τα βασικά πλεονεκτήματα της ΧΑΤ, τα οποία προφανώς συνοδεύονται και από κάποια μειονεκτήματα. Οι μη επακριβείς προβλέψεις που θα αποφέρουν και διαφορετικά αποτελέσματα, η επιμήκυνση της διάρκειας απόσβεσης πέραν του αναμενόμενου και η εξάρτηση από τη λειτουργία της επιχείρησης συμπεριλαμβάνονται σε αυτά. [7]

Σε μία χρηματοδότηση μέσω τρίτων υπάρχουν διάφοροι τύποι συμβάσεων και τρεις από αυτούς εκθέτονται παρακάτω με φθίνουσα σειρά προτίμησης:

- Συμμετοχή στα Εξοικονομούμενα (Shared savings). Σε αυτή τη περίπτωση, ανάδοχος και χρήστης καταμερίζουν τις ακαθάριστες χρηματοροές που προκύπτουν. Τα 5 έως 10 χρόνια είναι μία συνηθισμένη διάρκεια της εν λόγω σύμβασης. Η ΕΠΕΥ αναλαμβάνει πλήρως τα ρίσκα.
- Εγγυημένη Εξοικονόμηση (Guaranteed Savings). Σε αυτή τη σύμβαση, ενώ υπάρχει η εγγύηση του αναδόχου ως προς τα κέρδη, οι πληρωμές στην ΕΠΕΥ είναι γνωστές εξαρχής και γίνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Εδώ η σύμβαση έχει μεγάλη χρονική διάρκεια.
- Καθολική πληρωμή (First Out). Σε τέτοιου είδους σύμβαση οι συνολικές ακαθάριστες εισροές χρημάτων εισπράττονται από την ανάδοχο, τουλάχιστον έως ότου αποπληρωθεί το επενδυμένο κεφάλαιο και τα κέρδη της ΧΑΤ ή εν τέλει λήξει η σύμβαση. Τέτοιου είδους συμβάσεις ολοκληρώνονται γρήγορα.

Ο BOT (Build Operate Transfer) είναι ένας ακόμα χρηματοδοτικός μηχανισμός, και αποτελεί μία κοινοπραξία διαφορετικών εταιριών, που αναλαμβάνουν τη διεκπεραίωση ενός έργου που τους ανέθεσε το κράτος. Έτσι πλέον ευθύνη για τη κατασκευή, τη χρηματοδότηση, τη λειτουργία και τη συντήρηση του έργου την έχει αποκλειστικά ο οργανισμός αυτός τουλάχιστον για μια καθορισμένη

περίοδο. Σε αυτή τη περίοδο ο οργανισμός εκμεταλλεύεται το έργο, ενώ μετά αυτό μεταφέρεται στο κράτος. Ένα έργο που προορίζεται να πραγματοποιηθεί με χρηματοδοτικό μηχανισμό BOT έχει τα εξής πλεονεκτήματα: [7]

- Μη καταβολή κρατικών κεφαλαίων.
- Μετατόπιση των ρίσκων.
- Εισαγωγή ξένου κεφαλαίου.
- Βέλτιστη απόδοση.
- Παροχή τεχνογνωσίας, καινοτόμου εξοπλισμού.
- Πρόσβαση σε ισχυρές αγορές.

8.4 Μέθοδοι εξόφλησης δανείων

Στην περίπτωση που ένας επενδυτής αδυνατεί να καλύψει τις οικονομικές ανάγκες της επένδυσης με δικά του χρήματα, είναι απαραίτητο να ληφθούν δάνεια. Σύμφωνα με τη διάρκεια τους, τα δάνεια ονομάζονται βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα. [7]

- Ένα βραχυπρόθεσμο ιδιωτικό δάνειο πραγματοποιείται συνήθως με γραμμάτια ή συναλλαγματικές.
- Ένα βραχυπρόθεσμο κρατικό δάνειο πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο με έντοκα γραμμάτια.
- Ένα μακροπρόθεσμο δάνειο πρόκειται για μία σύμβαση μεταξύ δανειστή και δανειζόμενου.

Ένα δάνειο ονομάζεται ενιαίο στην περίπτωση που υπάρχει ένας δανειστής και ένας οφειλέτης, ενώ όταν υπάρχουν πολλαπλοί δανειστές ονομάζεται ομολογιακό δάνειο.

Ένα πλάνο εξόφλησης δανείου προβλέπει είτε εφάπαξ πληρωμή σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, είτε βαθμιαία εξόφλησή του εντός ορισμένου χρόνου. Στην περίπτωση της βαθμιαίας εξόφλησης του δανείου, το κάθε ποσό ονομάζεται χρεολύσιο, και όταν σε αυτό συγκαταλέγονται και οι πληρωτέοι τόκοι ονομάζεται τοκοχρεολύσιο και αποτελούν την κοινώς γνωστή «δόση» ενός δανείου. [7]

8.4.1 Εφάπαξ εξόφληση δανείου με απλό τόκο

Ένα δάνειο με απλό τόκο εξοφλείται εφάπαξ, όταν στο τέλος κάθε έτους πληρώνεται ο τόκος και στη λήξη της περιόδου του δανείου εξοφλείται και το δάνειο. Επιπροσθέτως παρατίθενται και κάποιες διευκρινήσεις: [7]

- Ένας οφειλόμενος τόκος υπολογίζεται κάθε φορά από τον τόκο του ανεξόφλητου δανείου στο τέλος του προηγούμενου έτους, από το υπόλοιπο της οφειλής τόκων του προηγούμενου έτους και από τον τόκο τους.
- Ως πληρωμή τόκων ορίζεται κάθε φορά οι που τόκοι πληρώνονται στον δανειστή.
- Ως χρεολύσιο ορίζεται το ποσό που πληρώνεται στον δανειστή για την εξόφληση του δανείου.
- Το ανεξόφλητο δάνειο υπολογίζεται κάθε φορά μετά την αφαίρεση των μέχρι τότε χρεολυσίων από το συνολικό δάνειο.
- Το άθροισμα του χρεολυσίου και των πληρωτέων τόκων ονομάζεται τοκοχρεολύσιο.
- Στο τέλος της περιόδου δανεισμού, μαζί με τον ανατοκισμό προς το επιτόκιο υπολογίζεται η τελική αξία των εκάστοτε τοκοχρεολυσίων για την αντίστοιχη κάθε φορά χρονική περίοδο.
- Η παρούσα αξία των εκάστοτε τοκοχρεολυσίων στην αρχή του πρώτου έτους υπολογίζεται με επιτόκιο.

8.4.2 Εφάπαξ εξόφληση δανείου με ανατοκισμό

Σε αυτή την περίπτωση, κανένα ποσό δεν καταβάλλεται στο τέλος του χρόνου έναντι των οφειλόμενων τόκων, και με τη λήξη της περιόδου του δανείου εξοφλείται το δάνειο και οι τόκοι μαζί. [7]

8.4.3 Βαθμιαία εξόφληση με ισόποσα χρεολύσια

Με αυτό τον τρόπο εξόφλησης του δανείου, ένα ποσό (χρεολύσιο) καταβάλλεται κάθε χρόνο και ισοδυναμεί με το αντίστοιχο ποσοστό του δανείου σε κάθε χρόνο χωρίς επιτόκιο. [7]

8.4.4 Βαθμιαία εξόφληση με ισόποσα τοκοχρεολύσια

Στο τέλος κάθε χρόνου καταβάλλονται ισόποσα τοκοχρεολύσια. Ο τόκος από χρόνο σε χρόνο μειώνεται ενώ το χρεολύσιο αυξάνει. [7]

8.5 Σχηματισμός συναρτήσεων υπολογισμού οικονομικών δεδομένων για αυτόνομο φωτοβολταϊκό πάρκο με χρήση συσσωρευτών

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει μία συγχώνευση των συναρτήσεων υπολογισμού των παραμέτρων ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση συσσωρευτών, με τις οικονομικές παραμέτρους που το συνάδουν. Σκοπός είναι οι τελικές συναρτήσεις που θα σχηματιστούν να μπορούν να δώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά το χρηματοοικονομικό σκέλος της κατασκευής ενός τέτοιου έργου.

8.5.1 Ετήσιο ισοδύναμο κόστος αντιστροφών (inverter)

Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για συγκεκριμένο επιτόκιο d και τυπική διάρκεια ζωής αντιστροφέα $T_{αντ}$.

$$CRF_{αντ} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{αντ}}}{(1 + d)^{T_{αντ}} - 1} \quad (8.15)$$

Το ετήσιο ισοδύναμο κόστος των αντιστροφών σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο υπολογίζεται, με βάση την θεωρητική ανάλυση του κεφαλαίου 6.1 όπως φαίνεται παρακάτω:

$$EAC_{αντ} = CRF_{αντ} \times \left(\sum_{i=1}^{n_{αντ}} k_{αντ,i} \right) + k_{αντ,ετησιο} \quad (8.16)$$

όπου $n_{αντ}$ το απαραίτητο πλήθος των αντιστροφών με βάση τους υπολογισμούς του κεφαλαίου 6.1, με κόστος $k_{αντ}$ ο εκάστοτε αντιστροφέας, και $k_{αντ,ετησιο}$ το ετήσιο κόστος των αντιστροφών που υπολογίζεται με βάση την απόδοση των αντιστροφών (κάτι που θα οδηγήσει και στην προτίμηση των αντιστροφών με τη μεγαλύτερη απόδοση, όταν αυτοί συγκρίνονται έχοντας τα λοιπά τους χαρακτηριστικά παρόμοια).

$$k_{αντ,ετησιο} = \sum_{i=1}^{n_{αντ}} (1 - \eta_{αντ,i}) \times E_{PV/αντ,ιδαν} \times k_{αντ,ενδ} \quad (8.17)$$

όπου

- $\eta_{αντ}$ ο βαθμός απόδοσης του εκάστοτε αντιστροφέα.
- $E_{PV/αντ,ιδαν}$ η ιδανικά παραγόμενη ενέργεια σε kWh από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι συνδεδεμένα στον εκάστοτε αντιστροφέα.
- $k_{αντ,ενδ}$ ένα ενδεικτικό κόστος απώλειας ενέργειας ανά kWh

Η ιδανικά παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια υπολογίζεται με βάση μία τυπική ανοιξιάτικη ή φθινοπωρινή ημέρα χωρίς σύννεφα, σκιάσεις και σκεδάσεις, όταν και η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται ημιτονοειδώς από την ανατολή (06:00), έως και τη δύση (18:00) του ηλίου. Η απαραίτητη τάση εκκίνησης του αντιστροφέα αγνοείται, οπότε και η παραγόμενη ισχύς των σειρών που συνδέονται στον εκάστοτε αντιστροφέα έχει ως εξής:

$$P_{σειρ}(t) = \begin{cases} \eta_{αντ} \times P_{mp,panel} \times \cos\left(\frac{2 \times \pi}{24}(t - 12)\right), & 6 \leq t \leq 18 \\ 0 & 0 \leq t \leq 6 \text{ \& } 18 \leq t \leq 24 \end{cases} \quad (8.18)$$

άρα η ιδανική ημερήσια ενέργεια είναι ίση με:

$$\begin{aligned}
E_{PV/αντ,ιδαν,ημερήσια} &= \int_0^{24} P_{σειρ}(t) dt \\
&= \int_6^{18} \eta_{αντ} \times P_{mp,panel} \times \cos\left(\frac{2 \times \pi}{24}(t - 12)\right) dt \\
&= \frac{\eta_{αντ} \times P_{mp,panel}}{\frac{2 \times \pi}{24}} \times \sin\left(\frac{2 \times \pi}{24}(t - 12)\right) \Bigg|_6^{18} \\
&= \eta_{αντ} \times P_{mp,panel} \times \frac{24}{\pi}
\end{aligned} \tag{8.19}$$

Έτσι η ιδανική μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά που συνδέονται στον εκάστοτε αντιστροφέα είναι ίση με:

$$\begin{aligned}
E_{PV/αντ,ιδαν} &= 365 \times n_{αντ} \times P_{mp,panel} \times \frac{24}{\pi} = 8760 \times n_{αντ} \times P_{mp,panel} [W] \times \frac{1}{\pi} \\
&= \eta_{αντ} \times P_{mp,panel} \times \frac{87,6}{\pi} [kWh]
\end{aligned} \tag{8.20}$$

Επίσης το ενδεικτικό κόστος απώλειας ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί, αν θεωρηθεί μία ντιζελογεννήτρια ονομαστικής ισχύος ίσης με αυτή που δύναται να παράγουν ιδανικά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια των σειρών που συνδέονται στον εκάστοτε αντιστροφέα. Λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση $f_{B.Σ.Λ.ντιζ}$ αυτής της ντιζελογεννήτριας, στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας της, και την τυπική πυκνότητα του καυσίμου (0,832 kg/l), προκύπτει το ελάχιστο κόστος ενέργειας:

$$k_{αντ,ενδ} = k_{ντιζ} \left[\frac{\text{€}}{kWh} \right] = \frac{k_{καυσ} \left[\frac{\text{€}}{l} \right] \times f_{B.Σ.Λ.ντιζ} \left[\frac{kg}{h} \right]}{\rho_{καυσ} \left[\frac{kg}{l} \right] \times P_{ον.ντιζ} [kW]} \tag{8.21}$$

Άρα αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8.16) την σχέση (8.17) υπολογίζεται το ετήσιο ισοδύναμο κόστος των αντιστροφέων:

$$EAC_{αντ} = CRF_{αντ} \times \left(\sum_{i=1}^{n_{αντ}} k_{αντ,i} \right) + \sum_{i=1}^{n_{αντ}} (1 - \eta_{αντ,i}) \times E_{PV/αντ,ιδαν} \times k_{αντ,ενδ} \tag{8.22}$$

8.5.2 Ετήσιο ισοδύναμο κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην παράγραφο 8.5.1 υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για συγκεκριμένο επιτόκιο d και τυπική διάρκεια ζωής φωτοβολταϊκού πλαισίου T_{PV} .

$$CRF_{PV} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{PV}}}{(1 + d)^{T_{PV}} - 1} \tag{8.23}$$

Έτσι η εξίσωση που υπολογίζει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων με βάση το πλήθος τους $n_{panel,req}$ (όπως βρέθηκε με τη μεθοδολογία της παραγράφου 6.3.1) και την ανά τεμάχιο τιμή τους k_{PV} φαίνεται παρακάτω:

$$EAC_{PV} = CRF_{PV} \times n_{panel,req} \times k_{PV} \tag{8.24}$$

8.5.3 Ετήσιο ισοδύναμο κόστος καλωδίων

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην παράγραφο 8.5.1 υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για συγκεκριμένο επιτόκιο d και τυπική διάρκεια ζωής καλωδίων $T_{καλ}$.

$$CRF_{καλ} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{καλ}}}{(1 + d)^{T_{καλ}} - 1} \quad (8.25)$$

Έτσι η εξίσωση που υπολογίζει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος των καλωδίων με βάση το συνολικό μήκος τους l_i και τη διατομή τους s_i (όπως βρέθηκε με τη μεθοδολογία της παραγράφου 6.4) και την ανά μέτρο τιμή τους $k_{καλ}$ φαίνεται παρακάτω:

$$EAC_{καλ} = CRF_{καλ} \times \sum_{i=1}^{n_{διαδρ}} l_{s,i} \times k_{s,i} \quad (8.26)$$

Όπου

- $l_{s,i}$ το μήκος του καλωδίου για την αριθμημένη διαδρομή i με διατομή s_i
- $n_{διαδρ}$ το πλήθος των διαδρομών του καλωδίου όπως αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6.4

8.5.4 Ετήσιο ισοδύναμο κόστος έκτασης γης

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην παράγραφο 8.5.1 υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για συγκεκριμένο επιτόκιο d και τυπική διάρκεια ζωής έκτασης γης $T_{γης}$.

$$CRF_{γης} = \begin{cases} \frac{1}{T_{γης}}, & d = 0 \\ \frac{d \times (1 + d)^{T_{γης}}}{(1 + d)^{T_{γης}} - 1}, & d \neq 0 \end{cases} \quad (8.27)$$

Έτσι η εξίσωση που υπολογίζει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος της έκτασης γης, με βάση τον τύπο ιδιοκτησίας του (ιδιοκτησία, ενοικίαση, αγορά) συνολικό εμβαδόν $A_{χωράφι}$ (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 6.5), και την ανά τετραγωνικό μέτρο κόστος έκτασης γης $k_{γης}$ φαίνεται παρακάτω:

$$EAC_{γης} = CRF_{γης} \times A_{χωράφι} \times k_{γης} \quad (8.28)$$

Ανάλογα με τον τύπο ιδιοκτησίας, δηλαδή ανάλογα με το εάν πρόκειται είτε για ιδιοκτησία του επενδυτή, είτε για χωράφι προς ενοικίαση, είτε για χωράφι προς αγορά, επηρεάζεται και ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου, αφού στην περίπτωση που ο επενδυτής έχει ήδη κατάλληλο χωράφι δεν υπάρχει επιτόκιο.

8.5.5 Ετήσιο ισοδύναμο κόστος κατασκευής και λοιπών υλικών – εργασιών

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην παράγραφο 8.5.1 υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για συγκεκριμένο επιτόκιο d και τυπική διάρκεια κατασκευής ζωής έργου $T_{έργου}$.

$$CRF_{κατ} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{\epsilonργου}}}{(1 + d)^{T_{\epsilonργου}} - 1} \quad (8.29)$$

Έτσι η εξίσωση που υπολογίζει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος της κατασκευής του έργου καθώς και όλων των υπόλοιπων υλικών και εργασιών (όπως συντήρηση κόστος μετακινήσεων, μελέτης έργου, περίφραξη σύστημα ασφαλείας – κάμερες, φύλακας κ.λπ.) φαίνεται παρακάτω:

$$EAC_{κατ} = CRF_{κατ} \times k_{κατ} \quad (8.30)$$

Όπου

- $k_{κατ}$ το συνολικό κόστος κατασκευής και λοιπών εργασιών – υλικών.

8.5.6 Ετήσιο ισοδύναμο κόστος συσσωρευτών

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην παράγραφο 8.5.1 υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για συγκεκριμένο επιτόκιο d και τυπική διάρκεια κατασκευής ζωής συσσωρευτών $T_{\Sigma A}$.

$$CRF_{\Sigma A} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{\Sigma A}}}{(1 + d)^{T_{\Sigma A}} - 1} \quad (8.31)$$

Έτσι η εξίσωση που υπολογίζει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος των συσσωρευτών με βάση το πλήθος τους $n_{\Sigma A}$ (όπως βρέθηκε με τη μεθοδολογία της παραγράφου 6.2) και την ανά τεμάχιο τιμή τους $k_{\Sigma A}$ φαίνεται παρακάτω:

$$EAC_{\Sigma A} = CRF_{\Sigma A} \times n_{\Sigma A} \times k_{\Sigma A} \quad (8.32)$$

8.5.7 Συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήσης μπαταριών

Για να υπολογιστεί το συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου, πρέπει απλά να προστεθούν τα επιμέρους κόστη που υπολογίσθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους:

$$EAC_{\text{πάρκου}} = EAC_{\text{αντ}} + EAC_{PV} + EAC_{\text{καλ}} + EAC_{\gamma\eta\varsigma} + EAC_{\text{κατ}} + EAC_{\Sigma A} \quad (8.33)$$

Οπότε για να υπολογιστεί και το **ελάχιστο** ετήσιο ισοδύναμο κόστος ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου πρέπει να βρεθεί η ελάχιστη τιμή που δύναται να δώσει η εξίσωση (8.33), άρα:

$$\begin{aligned} EAC_{\text{πάρκου}, \min} &= \min\{EAC_{\text{πάρκου}}\} \\ &= \min\{EAC_{\text{αντ}} + EAC_{PV} + EAC_{\text{καλ}} + EAC_{\gamma\eta\varsigma} + EAC_{\text{κατ}} + EAC_{\Sigma A}\} \end{aligned} \quad (8.34)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 7

9 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 7

Σε αυτό του κεφάλαιο αναπτύσσετε η οικονομική ανάλυση του παραδείγματος του Έλεγχος ορθότητας των εξισώσεων με χρήση του προγράμματος PVsyst, με βάση την μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Οικονομική ανάλυση. Οι τιμές – κόστος, των προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν, να τονιστεί ότι αναφέρονται στην καλοκαιρινή περίοδο του έτους 2022.

9.1 Κόστος αντιστροφών (inverter)

Σύμφωνα με τη σχέση (8.15) το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για τους αντιστροφείς του φωτοβολταϊκού πάρκου δίνεται από την εξίσωση:

$$EAC_{αντ} = CRF_{αντ} \times \left(\sum_{i=1}^{n_{αντ}} k_{αντ,i} \right) + k_{αντ,ετησιο} \quad (9.1)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι όροι της παραπάνω εξίσωσης:

Για τον πρώτο όρο, εφόσον συζητείται ένα υποθετικό σενάριο, τα επιτόκια για τα επενδυτικά δάνεια όσο αναφορά τα φωτοβολταϊκά πάρκα κυμαίνονται μεταξύ 3 – 4% [26], ενώ η διάρκεια ζωής ενός αντιστροφέα είναι 5 χρόνια σύμφωνα με την εγγύηση του κατασκευαστή. Άρα εύκολα υπολογίζετε:

$$CRF_{αντ} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{αντ}}}{(1 + d)^{T_{αντ}} - 1} = \frac{0,035 \times (1 + 0,035)^5}{(1 + 0,035)^5 - 1} = 0,2215 \quad (9.2)$$

Ο δεύτερος όρος υπολογίζεται με γνώμονα την τιμή αγοράς του επιλεγμένου αντιστροφέα (Victron Phoenix Inverters Smart 48/2000 και 48/3000), η οποία είναι 890€ [27] για τον 48/2000 και 1070€ [28] για τον 48/3000. Επίσης το πλήθος των αντιστροφών που χρειάζονται είναι δέκα 48/3000 και ένας 48/2000.

$$\sum_{i=1}^{n_{αντ}} k_{αντ,i} = 1 \times 890 + 10 \times 1070 = 11590€ \quad (9.3)$$

Ο τελευταίος όρος αφορά το ετήσιο κόστος των αντιστροφών που υπολογίζεται με βάση την απόδοση των αντιστροφών, $k_{αντ, ετησιο}$. Στην συγκεκριμένη οικονομική ανάλυση αγνοείται αυτός ο όρος της σχέσης (9.1), καθώς επιλέχθηκε συγκεκριμένος αντιστροφέας και δεν είναι πλέον απαραίτητος αυτός ο «συγκριτικός» όρος.

Με βάση λοιπόν τις σχέσεις (9.2) και (9.3) προκύπτει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για τους αντιστροφείς του φωτοβολταϊκού πάρκου:

$$EAC_{αντ} = CRF_{αντ} \times \left(\sum_{i=1}^{n_{αντ}} k_{αντ,i} \right) = 0,2215 \times 11590€ = 2.567,19€ \quad (9.4)$$

9.2 Κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων

Σύμφωνα με τη σχέση (8.24) το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για τους αντιστροφείς του φωτοβολταϊκού πάρκου δίνεται από την εξίσωση:

$$EAC_{PV} = CRF_{PV} \times n_{panel,req} \times k_{PV} \quad (9.5)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι όροι της παραπάνω εξίσωσης:

Για τον πρώτο όρο της εξίσωσης, το επιτόκιο όπως τέθηκε ισούται με 3,5%, και η διάρκεια ζωής των πλαισίων είναι πάλι 5 έτη σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή. Άρα εύκολα υπολογίζετε:

$$CRF_{PV} = CRF_{αντ} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{PV}}}{(1 + d)^{T_{PV}} - 1} = \frac{0,035 \times (1 + 0,035)^5}{(1 + 0,035)^5 - 1} = 0,2215 \quad (9.6)$$

Ο δεύτερος όρος είναι το πλήθος των απαραίτητων φωτοβολταϊκών πλαισίων για τη στελέχωση του φωτοβολταϊκού πάρκου, ο οποίος υπολογίστηκε από τη σχέση (7.15) και ισούται με 420.

Ο τρίτος όρος υπολογίζεται με γνώμονα την τιμή αγοράς του επιλεγμένου πλαισίου (Victron SPP042702000), η οποία είναι 210£ [29], που σύμφωνα με την ισοτιμία £ με € ισούται με περίπου 250€.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα και τη σχέση (9.6) προκύπτει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του φωτοβολταϊκού πάρκου:

$$EAC_{PV} = CRF_{PV} \times n_{panel,req} \times k_{PV} = 0,2215 \times 420 \times 250€ = 23257€ \quad (9.7)$$

9.3 Κόστος έκτασης γης

Σύμφωνα με τη σχέση (8.28) το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για την έκταση γης του φωτοβολταϊκού πάρκου δίνεται από την εξίσωση:

$$EAC_{γης} = CRF_{γης} \times A_{χωράφι} \times k_{γης} \quad (9.8)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι όροι της παραπάνω εξίσωσης:

Για τον πρώτο όρο της εξίσωσης, στην περίπτωση αγοράς της έκτασης γης, το επιτόκιο όπως τέθηκε ισούται με 3,5%, και η τυπική διάρκεια ζωής της έκτασης γης είναι 20 έτη. Άρα εύκολα υπολογίζετε:

$$CRF_{γης} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{γης}}}{(1 + d)^{T_{γης}} - 1} = \frac{0,035 \times (1 + 0,035)^{20}}{(1 + 0,035)^{20} - 1} = 0,0704 \quad (9.9)$$

Ο δεύτερος όρος είναι τα τετραγωνικά μέτρα της έκτασης της γης, με το ελάχιστο και το μέγιστο αυτής να υπολογίζονται από τις σχέσεις (7.23) και (7.24). Η τελική τιμή του όρου $A_{χωράφι}$ θα ισούται με τον μέσο όρο των τιμών που δίνουν οι προηγούμενες σχέσεις, δηλαδή:

$$A_{\chi\omega\rho\acute{\alpha}\phi\iota} = \frac{683,34 + 1783}{2} \cong 1233 \text{ m}^2 \quad (9.10)$$

Ο τρίτος όρος υπολογίζεται με γνώμονα την τιμή ανά τετραγωνικό αγοράς της έκτασης γης, η οποία είναι περίπου 1,59 €/m² για την περιοχή του Πωγωνίου, σύμφωνα με μία πρόχειρη έρευνα στο διαδίκτυο [30].

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα και τη σχέση (9.8) προκύπτει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για την έκταση της γης του φωτοβολταϊκού πάρκου:

$$\begin{aligned} EAC_{\gamma\eta\varsigma} &= CRF_{\gamma\eta\varsigma} \times A_{\chi\omega\rho\acute{\alpha}\phi\iota} \times k_{\gamma\eta\varsigma} = 0,0704 \times 1233 \text{ m}^2 \times 1,59 \text{ €/m}^2 \\ &= 138,02\text{€} \end{aligned} \quad (9.11)$$

9.4 Κόστος συσσωρευτών

Σύμφωνα με τη σχέση (8.32) το ετήσιο ισοδύναμο κόστος των συσσωρευτών δίνεται από την εξίσωση:

$$EAC_{\Sigma A} = CRF_{\Sigma A} \times n_{\Sigma A} \times k_{\Sigma A} \quad (9.12)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι όροι της παραπάνω εξίσωσης:

Για τον πρώτο όρο της εξίσωσης, το επιτόκιο όπως τέθηκε ισούται με 3,5%, και η τυπική διάρκεια ζωής των συσσωρευτών είναι περίπου 5 έτη. Άρα εύκολα υπολογίζετε:

$$CRF_{\Sigma A} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{\Sigma A}}}{(1 + d)^{T_{\Sigma A}} - 1} = \frac{0,035 \times (1 + 0,035)^5}{(1 + 0,035)^5 - 1} = 0,2215 \quad (9.13)$$

Ο δεύτερος όρος είναι το πλήθος των απαραίτητων συσσωρευτών για τη κάλυψη των αναγκών του οικισμού, το οποίο υπολογίστηκε από τη σχέση (7.10) και ισούται με 168.

Ο τρίτος όρος υπολογίζεται με γνώμονα την τιμή αγοράς του επιλεγμένου συσσωρευτή (Westar WSEV240), η οποία είναι 460€ [31].

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα και τη σχέση (9.12) προκύπτει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του φωτοβολταϊκού πάρκου:

$$EAC_{\Sigma A} = CRF_{\Sigma A} \times n_{\Sigma A} \times k_{\Sigma A} = 0,2215 \times 168 \times 460 = 17117,5\text{€} \quad (9.14)$$

9.5 Κόστος καλωδίων

Σύμφωνα με τη σχέση (8.26) το ετήσιο ισοδύναμο κόστος των καλωδίων δίνεται από την εξίσωση:

$$EAC_{\kappa\alpha\lambda} = CRF_{\kappa\alpha\lambda} \times \sum_{i=0}^{n_{\text{διαδρομών}}} k_{\frac{\kappa\alpha\lambda}{\mu\epsilon\tau\rho\sigma},i} \times l_{\kappa\alpha\lambda,i} \quad (9.15)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι όροι της παραπάνω εξίσωσης:

Για τον πρώτο όρο της εξίσωσης, το επιτόκιο όπως τέθηκε ισούται με 3,5%, και η τυπική διάρκεια ζωής των καλωδίων είναι περίπου 20 έτη. Άρα εύκολα υπολογίζετε:

$$CRF_{\Sigma A} = \frac{d \times (1 + d)^{T_{\Sigma A}}}{(1 + d)^{T_{\Sigma A}} - 1} = \frac{0,035 \times (1 + 0,035)^{20}}{(1 + 0,035)^{20} - 1} = 0,0704 \quad (9.16)$$

Ο δεύτερος όρος αποτελεί το συνολικό κόστος των καλωδίων, με το καλώδιο διατομής 2,5mm² να έχει κόστος 1€/m [32] και το καλώδιο διατομής 4mm² να έχει κόστος 1,94€/m [33], υπολογίζεται παρακάτω:

$$\sum_{i=0}^{n_{\text{διαδρομών}}} k_{\frac{\text{καλ}}{\text{μετρο}^i}} \times l_{\text{καλ},i} = 1499,12m \times 1 \text{ €/m} + 22m \times 1,94 \text{ €/m} = 1541,8\text{€} \quad (9.17)$$

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα και τη σχέση (9.15) προκύπτει το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για τα καλώδια του φωτοβολταϊκού πάρκου:

$$EAC_{\text{καλ}} = CRF_{\text{καλ}} \times \sum_{i=0}^{n_{\text{διαδρομών}}} k_{\frac{\text{καλ}}{\text{μετρο}^i}} \times l_{\text{καλ},i} = 0,0704 \times 1541,8 = 108,54\text{€} \quad (9.18)$$

9.6 Κόστος λοιπών υλικών – κόστη κατασκευής

Λόγω της υποθετικής φύσης της συγκεκριμένης εφαρμογής δεν δύναται να γίνει οικονομική ανάλυση του κόστους των οποιοδήποτε εργασιών που θα λάμβαναν χώρα σε ένα πραγματικό έργο. Για αυτό και στην σχέση που αναγράφεται στην συνέχεια του συνολικού κόστους θέτονται ως $EAC_{\text{υπόλοιπων}}$, κάτι το οποίο δεν επηρεάζει και τόσο το τελικό συμπέρασμα του κεφαλαίου, αφού ουσιαστικά υπολογίζεται μία ενδεικτική τιμή του ετήσιου ισοδύναμου κόστους. Παρόλα αυτά μπορεί να προστεθεί το εργολαβικό κόστος, ως το 10% επί του συνολικού υπόλοιπου ετήσιου ισοδύναμου κόστους.

9.7 Συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος

Το συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος υπολογίζεται από το άθροισμα των αποτελεσμάτων των σχέσεων (9.4), (9.7), (9.11), (9.14) και (9.18):

$$\begin{aligned} EAC_{\text{πάρκου}} &= 1,1 \times (EAC_{\text{αντ}} + EAC_{\text{PV}} + EAC_{\text{γης}} + EAC_{\Sigma A} + EAC_{\text{καλ}} + EAC_{\text{υπόλοιπων}}) = \\ &1,1 \times (2567,19\text{€} + 23257\text{€} + 138,02\text{€} + 17117,5\text{€} + 108,54 + EAC_{\text{υπόλοιπων}}) = \\ &1,1 \times 43188,25 + 1,1 \times EAC_{\text{υπόλοιπων}} = 47507 + 1,1 \times EAC_{\text{υπόλοιπων}} \end{aligned} \quad (9.19)$$

Αυτό το ποσό μπορεί να μειωθεί κι άλλο ακολουθώντας την μεθοδολογία των προηγούμενων κεφαλαίων. Επί της ουσίας το αποτέλεσμα της σχέσης (9.19) παρουσιάζει την μέγιστη τιμή του ετήσιου ισοδύναμου κόστους της επένδυσης. Μπορεί, επίσης, να χαρακτηριστεί και ως μια ενδεικτική τιμή ενός τέτοιου έργου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εμβάθυνση στην μεθοδολογία της διαστασιολόγησης ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου με χρήση μπαταριών και κατ' επέκταση η επεξήγηση, η μελέτη, η έρευνα και η ανάλυση τόσο σε τεχνικό, όσο και σε οικονομικό υπόβαθρο.

10.1 Τελικά συμπεράσματα

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία παρουσίαση του φαινομένου της ηλιακής ενέργειας (Κεφάλαιο 1^ο). Η μελέτη και η έρευνα που πραγματοποιείται γύρω από αυτή τη μορφή ενέργειας, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των διάφορων τεχνολογιών εκμετάλλευσής της, και είναι απαραίτητο να κατανοούνται πλήρως οι τεχνολογίες αυτές, έτσι ώστε τα φωτοβολταϊκά συστήματα να εξελίσσονται και να γίνονται όλο και πιο αποδοτικά. Απ' τα βασικά στοιχεία της έρευνας λοιπόν προαπαιτεί την γνώση των συντελεστών της εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, από την αζιμούθια γωνία επιφάνειας, μέχρι και την αποδοτικότερη σταθερή γωνία κλίσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η σημαντικότητα αυτών των μεγεθών διακρίνεται άλλωστε και στο ΈΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PVSYST, όπου οι πιο ακριβείς τιμές των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας πρόσφεραν μπόρεσαν να σχηματίσουν ένα πιο αποδοτικό έργο.

Παρόλα αυτά, όσο και να μελετηθεί η ηλιακή ενέργεια, για να μετατραπεί σε ηλεκτρική και στη συνέχεια να «καταναλωθεί» σε οποιαδήποτε μορφή επιθυμεί ο χρήστης, απαιτείται η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών κελιών (ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ^ο). Μία τεχνοοικονομική μελέτη απαιτεί την πλήρη γνώση των υπαρχόντων τεχνολογιών που δύναται να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη απόδοση μίας επένδυσης κατασκευής ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα πολυκρυσταλλικό πλαίσιο αποτελεί μία πιο οικονομική επένδυση, παρόλα αυτά απαιτεί περισσότερο χώρο εγκατάστασης για παρόμοια κλίμακα ισχύος σε σχέση με ένα μονοκρυσταλλικό πλαίσιο.

Πρωταρχικό στοιχείο της διαστασιολόγησης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου αποτελεί η κατανόηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που χρειάζεται ένας μηχανικός, έτσι ώστε να φέρει εις πέρας ένα τέτοιο έργο (ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ). Βασικά προαπαιτούμενα μηχανήματα είναι φυσικά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι βάσεις στήριξης αυτών, οι αντιστροφείς, οι καλωδιώσεις, οι ηλεκτρολογικοί πίνακες, ενώ όταν το έργο απευθύνεται σε χρήστη με ανάγκες ενεργειακής αυτονομίας, στην μελέτη χρειάζεται να προστεθούν και άλλα μηχανήματα, όπως οι συσσωρευτές και οι ρυθμιστές φόρτισης αυτών.

Όσον αφορά την περίπτωση των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, προαπαιτείτε έρευνα και υπολογισμός των ενεργειακών αναγκών του φορτίου που εξετάζεται να αυτονομηθεί (Εκτίμηση μέσης ηλεκτρικής κατανάλωσης & Ενεργειακές απαιτήσεις). Μία σύγχρονη κατοικία έχει ανάγκες κλιματισμού για ευζωία, κάτι που φαίνεται να είναι το πιο «βαρύ» φορτίο, και να καταναλώνει την περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια μέσα στο ημερολογιακό έτος, ειδικά εν έτη 2022 που οι τρόποι θέρμανσης με ορυκτά καύσιμα τείνουν να ακριβαίνουν σε σημείο μη ανταποκρίσιμο με το κεφάλαιο ενός μέσου νοικοκυριού. Όταν βέβαια απαιτείται η αυτονόμηση πολλαπλών οικιών, πρέπει να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς και οι καταναλώσεις διάφορων κοινοτικών «εργαλείων».

Οι συσσωρευτές (μπαταρίες), λοιπόν, πρόκειται για ένα από τα σημαντικότερα μέρη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού σταθμού, και η κατανόηση της τεχνολογίας τους από τον μηχανικό που επρόκειτο να σχεδιάσει ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να επηρεάσει ένα έργο τόσο οικονομικά, όσο και τεχνικά. Ευρέως γνωστοί είναι οι συσσωρευτές μόλυβδου, αφού αποτελούν μία οικονομική λύση για τον σκοπό τους. Ο τρόπος σύνδεσής τους επηρεάζει το συνολικό σύστημα και πρέπει να γίνει αρκετή έρευνα και μελέτη πριν αποφασιστεί Σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας).

Η σωστή μεθοδολογία διαστασιολόγησης ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου είναι το εργαλείο του μηχανικού και κάνει την όλη διαδικασία πιο εύκολη, παρόλη που απαιτεί σωστούς και ακριβείς υπολογισμούς (Εύρεση συναρτήσεων υπολογισμού βασικών στοιχείων φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Επίσης καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας χρειάζεται ο επίδοξος μηχανικός να συγκρίνει τα αποτελέσματα των θεωρητικών μεθοδολογιών με τις απαιτήσεις – προκλήσεις που δύναται να αντιμετωπίσει σε ένα τέτοιο έργο.

Εφόσον ένα έργο αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου χαρακτηρίζεται ως επενδυτικό, δεν πρέπει να παραληφθεί και μία οικονομική ανάλυση αυτού, και να παρουσιαστεί η μεθοδολογία του τρόπου υπολογισμού του ελάχιστου ετήσιου ισοδύναμου κόστους, ειδικά εφόσον πρόκειται να ληφθεί δάνειο, όπως στα περισσότερα επενδυτικά σχέδια (Οικονομική ανάλυση). Η σωστή οικονομική ανάλυση ενός έργου και η γνώση του τρόπου ελαχιστοποίησης οποιασδήποτε δαπάνης το κάνει τόσο πιο βιώσιμο, όσο και πιο ελκυστικό στα μάτια ενός επενδυτή. Οι επιλογές των υλικών και των υπηρεσιών πρέπει να είναι πολλές και εν τέλει συγκριθούν να δώσουν την σωστότερη με σκοπό την ελαχιστοποίηση των δαπανών και για αυτό η γνώση μιας σωστής μεθοδολογίας εκτέλεσης αυτών των ελέγχων αποτελεί βασικό κομμάτι μίας οικονομικής ανάλυσης έργου.

10.2 Τομείς για περαιτέρω και πιο ενδεδειγμένη έρευνα

- Σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συσσωρευτών λιθίου.

- Σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας.
- Μελέτη και έρευνα ηλεκτρικών ενεργειακών αναγκών σύγχρονης τεχνολογικά οικίας.
- Σχηματισμός συνάρτησης υπολογισμού ελάχιστου χώρου εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής.
- Λογισμικό σύγκρισης παραμέτρων αυτόνομου φωτοβολταϊκού πάρκου (ρυθμιστές φόρτισης, αντιστροφείς, φωτοβολταϊκό πλαίσιο, χώρος εγκατάστασης) και εξαγωγής του ελάχιστου ετήσιου ισοδύναμου κόστους κατασκευής και λειτουργίας αυτού.

11 Βιβλιογραφία

- [1] Β. Μαλαμής, «Ηλιακή ακτινοβολία,» σε *Αυτόνομες εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας μικρού & μεσαίου μεγέθους*, Εκδόσεις "ΙΩΝ", 1999, pp. 25-36.
- [2] «kftexniki.gr,» ΚΦ Τεχνική -Ηλεκτρομηχανολογικά Έργα, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://kftexniki.gr/ypiresies/ananeosimes-piges-energias/fotovoltaika/>.
- [3] Δ. Ασημακόπουλος, Γ. Αραμπατζής, Α. Αγγέλης, Α. Καρταλίδης και Γ. Τσιλιγκιρίδης, «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία,» σε *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Δυναμικό & Τεχνολογίες*, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις "Σοφία", 2015, pp. 145-157.
- [4] «Εικόνα ειδών φωτοβολταϊκών κελιών,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>.
- [5] «Τεχνικό φυλλάδιο τυχαίου φωτοβολταϊκού πλαισίου,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://sunceco.com/wp-content/uploads/2017/01/SEP300-320.pdf>.
- [6] «Εικόνα διάταξης διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aenaos-systems.gr/gr/off-grid-systems>.
- [7] Γ. Β. Ασημακόπουλος και Σ. Β. Λέτσης, «Μελέτη Φωτοβολταϊκού Πάρκου 60KW,» σε *ΤΕΙ Πειραιά*, Αθήνα, 2013.
- [8] «Εικόνα αντιστροφέα του εμπορίου,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.distribution.voltalia.com/en/products/huawei-sun2000-105ktl-h1>.
- [9] «Wikipedia,» 26 Φεβρουάριος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/DC-to-DC_converter.
- [10] «Εικόνα ρυθμιστή φόρτισης του εμπορίου,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://grobotronics.com/solar-battery-charger-regulator-10a-dual-usb.html?sl=en>.
- [11] Β. Μαλαμής, «Αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας,» σε *Αυτόνομες εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας μικρού & μεσαίου μεγέθους*, Εκδόσεις "ΙΩΝ", 1999, pp. 71-75.

- [12] Β. Μαλαμής, «Απαιτούμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια,» σε *Αυτόνομες Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας μικρού & μεγάλου μεγέθους*, Εκδόσεις "ΙΩΝ", 1999, pp. 76-84.
- [13] Β. Μαλαμής, «Απαιτήσεις οικίας σε ηλεκτρική ενέργεια,» σε *Αυτόνομες Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας μικρού & μεσαίου μεγέθους*, Εκδόσεις "ΙΩΝ", 1999, p. 65.
- [14] «MP Energy,» MP Energy, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mp-energy.gr/>. [Πρόσβαση 2022].
- [15] Δ. Ε. Κακαράς, Δ. Σ. Καρέλλας, Δ. Π. Βουρλιώτης, Δ. Π. Γραμμέλης, Π. Πάλλης και Ε. Καραμπίνης, «Σύγκριση κόστους θέρμανσης από διάφορες τεχνολογίες,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [16] Γ. Κωττάς, «infoservice.com.gr,» 27 Αύγουστος 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://infoservice.com.gr/auto/mpataries-%C2%B5olivdou-oxeos-vasikes-arches-ilika-ke-efar%C2%B5oges/>.
- [17] «Εικόνα τεχνικού φυλλαδίου αντιστροφέα του εμπορίου,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solar.huawei.com/-/media/Solar/attachment/pdf/mea/datasheet/SUN2000-100KTL-M1.pdf>.
- [18] Τ. Ελένη, «Μελέτη της Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας ενός Οικιακού καταναλωτή,» σε *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*, Θεσσαλονίκη, 2013.
- [19] Β. Δ. Μπιτζιώνης και Δ. Β. Μπιτζιώνης, «Υπολογισμός διατομής καλωδίων,» σε *Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015, pp. 347-352.
- [20] «Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία,» Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>. [Πρόσβαση 2022].
- [21] «Westar Μπαταρία μολύβδου (WSEV240) Datasheet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eurobathellas.gr/image/catalog/pdf/westar/wsev240.pdf>.

- [22] «Victron SmartSolar MPPT RS 450|100 & 450|200,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-SmartSolar-MPPT-RS-EN-.pdf>.
- [23] «Victron BlueSolar Polycrystalline Panels,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-BlueSolar-Polycrystalline-Panels-EN.pdf>.
- [24] «Victron Phoenix Inverter Smart,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Phoenix-Inverter-Smart-1600VA-5000VA-EN.pdf>.
- [25] «Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων με σύστημα "frog",» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/unlocking-four-commercial-pv-design-secrets>.
- [26] «Πρασινο επενδυτικό δάνειο για αγορά & εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι 500kW,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pancretabank.gr/business/xrimatodotika-ergaleia/daneio-f-b>.
- [27] «Τιμή για Victron Energy Phoenix Smart 48/2000,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.skrouz.gr/s/17312133/Victron-Energy-Phoenix-Smart-48-2000-Inverter-%CE%9A%CE%B1%CE%B8%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%8D-%CE%97%CE%BC%CE%B9%CF%84%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85-2000W-48V.html>.
- [28] «Τιμή για Victron Energy Phoenix Smart 48/3000,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.skrouz.gr/s/20364930/Victron-Energy-Phoenix-Smart-48-3000-Inverter-%CE%9A%CE%B1%CE%B8%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%8D-%CE%97%CE%BC%CE%B9%CF%84%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85-3000W-48V-%CE%9C%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CF%86%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C.html>.

- [29] «Τιμή για Victron Solar Panel 270W (SPP042702000),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://nomadicleisure.co.uk/product/victron-solar-panel-270w-20v-poly-1640-x-992-x-35mm-series-4a-spp042702000/>.
- [30] «Τιμή τετραγωνικού μέτρου γης στην περιοχή του Πωγωνίου,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.spitogatos.gr/pwliseis-gi/anazitisi-xarti/order_pricepersqmeters_asc?latitudeLow=39.872302&latitudeHigh=40.082246&longitudeLow=20.314407&longitudeHigh=20.671463&zoom=11.
- [31] «Τιμή του συσσωρευτή Westar WSEV240,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.thebatteryshop.gr/%CE%BC%CF%80%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%81%CE%AF%CE%B1-westar-ev240-agm-240ah-1-1?skr_prm=WyIwOTg3ZDUzMS02YzQzLTQ2ZWUtOWI0ZC02MDIhNGJhNDYxZjciLDE2NjEyNm00TIxMDAseyJhcHBfdHlwZSI6IndlYiIsImNwIjoiZiIsInRhZ3MiOiIifV0.
- [32] «Κόστος καλωδίου διατομής 2,5 τετραγωνικών χιλιοστών,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.skroutz.gr/search?keyphrase=%CE%9A%CE%B1%CE%BB%CF%8E%CE%B4%CE%B9%CE%BF+Solar+1x2%2C5mm>.
- [33] «Κόστος καλωδίου διατομής 4 τετραγωνικών χιλιοστών,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.skroutz.gr/s/23066158/%CE%9A%CE%91%CE%9B%CE%A9%CE%94%CE%99%CE%9F-%CE%A4%CE%A1%CE%9F%CE%A6%CE%9F%CE%94%CE%9F%CE%A3%CE%99%CE%91%CE%A3-SOLAR-1X4mm-RED-500m-TOP.html>.
- [34] «Πωγωνιανή Ιωαννίνων,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/Πωγωνιανή_Ιωαννίνων. [Πρόσβαση 2022].
- [35] «Latsis Foundation - Πωγωνιανή,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.latsis-foundation.org/ell/news/idruma-apokatastasews-omogenwn-eks-albanias-duo-dekaeties-prosforas>.

- [36] «Victron Inverter RS 48/6000 Smart,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Inverter-RS-Smart-EN.pdf>.
- [37] «Εικόνα ρυθμιστή φόρτισης του εμπορίου,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://grobotronics.com/solar-battery-charger-regulator-10a-dual-usb.html?sl=en>.
- [38] G. J. Tsekouras, P. M. Deligianni, G. A. Vokas, A. X. Moronis, K. D. Tsirekis, A. D. Salis και C. N. Bolakis, «An Optimal Design of a Small Photovoltaic Plant with Cost,» σε *Department of Electrical & Electronics Engineering, Faculty of Engineering, University of West Attica, Greece, Athens, 2021.*
- [39] Π. Δεληγιάννη, «Υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας: Η περίπτωση του οικίσκου ελέγχου σταθμού ηλεκτροδίων γείωσης διπολικής διασύνδεσης υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος Αττικής-Κρήτης στη νησίδα Σταχορρόη Αττικής,» σε *ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Αιγάλεω, 2021.*