



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οικονομοτεχνική αξιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος μηδενικής
έγχυσης στο δίκτυο σε βιομηχανία

Tecno-economic evaluation of zero-feed in photovoltaic installation in an
industrial facility

Παπουτσής Ιωάννης

A.M: 2920114

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση
του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Επιβλέπων:

Βαγρόπουλος Στυλιανός, Επίκ. καθηγητής

Λάρισα, 2024

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής : Βαγρόπουλος Στυλιανός , επίκουρος καθηγητής

Δεύτερος Εξεταστής : Βασιλειάδου Αγάπη , επίκουρη καθηγήτρια

Τρίτος Εξεταστής : Λεκίδης Αλέξιος , επίκουρος καθηγητής

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία υπήρξε ίσως η μεγαλύτερη πρόκληση της φοιτητικής μου ζωής και σίγουρα ένα σημαντικότερο έργο που αποτελεί και τον τελευταίο σταθμό πριν την απόκτηση του διπλώματος του μηχανικού. Για το λόγο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κ. Βαγρόπουλο Στυλιανό για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, ώστε να μου αναθέσει την εργασία. Χωρίς τις συμβουλές του, αλλά και την αμέριστη στήριξη του, είναι προφανές πως η παρούσα πτυχιακή εργασία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου για τη συμπαράσταση τους προς το πρόσωπο μου σε όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου και τους φίλους μου που με στήριξαν αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη με θέμα την οικονομοτεχνική αξιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος μηδενικής έγχυσης στο δίκτυο για βιομηχανική χρήση παρουσιάζει τη διαδικασία και τα οφέλη εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος. Σκοπός της μελέτης είναι η εκτίμηση των οικονομικών και τεχνικών παραμέτρων που αφορούν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε μια βιομηχανία, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της τεχνολογίας μηδενικής έγχυσης, όπου όλη η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται επιτόπου χωρίς να επιστρέφεται στο δίκτυο.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στη μείωση του κόστους ενέργειας, την απόσβεση της επένδυσης, καθώς και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα μέσω της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας της βιομηχανίας σε συνδυασμό με την παραγωγική ικανότητα των φωτοβολταϊκών επιτρέπουν την εξαγωγή οικονομικών συμπερασμάτων για την απόδοση της επένδυσης.

Η μελέτη συγκρίνει επίσης διαφορετικά είδη βάσεων για τα φωτοβολταϊκά πάνελ (σταθερές και κινητές βάσεις), καταδεικνύοντας πως οι κινητές βάσεις, παρόλο που έχουν υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, εξασφαλίζουν μεγαλύτερη απόδοση λόγω της παρακολούθησης του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η προσέγγιση μηδενικής έγχυσης μειώνει την εξάρτηση της βιομηχανίας από το δίκτυο, και είναι σύμφωνη με τις διεθνείς και εθνικές πολιτικές για τη στροφή προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν πως η υιοθέτηση ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί μια οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση για τις βιομηχανίες, προσφέροντας υψηλή αποδοτικότητα, γρήγορη απόσβεση και σημαντική μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Abstract

This thesis on the economic evaluation of a zero feed-in photovoltaic system for industrial use presents the process and benefits of installing such a system. The aim of the study is to evaluate the economic and technical parameters related to the installation of photovoltaic systems in an industry, taking into account the specificities of the zero feed-in technology, where all the energy produced is consumed on site without being returned to the grid. The analysis focuses on energy cost reduction, return on investment, and environmental sustainability through the reduction of carbon dioxide emissions. The industry's energy consumption data combined with the photovoltaic production capacity allows economic conclusions to be drawn on the return on investment. The study also compares different types of mounts for PV panels (fixed and mobile mounts), demonstrating that mobile mounts, although having higher installation costs, ensure higher efficiency due to the highest irradiation capture during the day. The feed-in approach offers reduced industry dependence on the grid, and is in line with international and national policies to shift towards renewable energy sources. The results of the study indicate that the adoption of such a system is an economically and environmentally viable solution for industries, offering high efficiency, fast payback and a significant reduction of the environmental footprint.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	9
1. Το φωτοβολταϊκό σύστημα	10
1.1 Ιστορική αναδρομή και μελλοντικές δυνατότητες	10
1.2 Η ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα-η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών	11
1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	17
1.4 Υλικό κατασκευής Φ/Β συστημάτων.....	19
1.5 Είδη Φ/Β συστημάτων	22
2. Προσανατολισμός και θέση του Φ/Β πλαισίου	25
2.1 Σημεία λειτουργίας.....	25
2.2 Τρόποι στήριξης του Φ/Β πλαισίου.....	29
3. Net Metering και Zero Feed-In	33
3.1 Net Metering	33
3.2 Zero Feed-In	34
3.3 Σύγκριση των δύο συστημάτων	35
3.4 Νομικό Πλαίσιο.....	36
4. Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος	37
4.1. Μετρήσεις Φωτοβολταϊκών Πάρκων	37
4.2 Καμπύλη Φορτίου Κατανάλωσης	40
4.2.1 Συλλογή Δεδομένων Χρέωσης Προμήθειας Ενέργειας.....	40
4.2.2 Ανάλυση των δύο καμπυλών κατανάλωσης (MT/XT) με μέγιστο στα 20kW.....	42
4.2.3 Αναλυτικός υπολογισμός κόστους προμήθειας για κάθε περίοδο	45
4.2.4 Υπολογισμός κόστους προμήθειας ενέργειας για τη Μέση και Χαμηλή Τάση (Χωρίς Φωτοβολταϊκά)	46
4.3 Οικονομική Ανάλυση της Περίσσειας Ενέργειας.....	48
4.3.1 Φωτοβολταϊκό Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) (μέση τάση (MV) και χαμηλή τάση (LV))	49
4.3.2 Φωτοβολταϊκό Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (ΜΒ) (μέση τάση (MV) και χαμηλή τάση (LV)).....	53
4.4 Κόστος αγοράς και εγκατάστασης Φ/Β συστήματος.....	59
4.4.1 Οικονομική ανάλυση και απόσβεση.....	65
Συμπεράσματα	72
Βιβλιογραφία.....	74

Κατάλογος εικόνων

<i>Εικόνα 1: Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών 2006-2012</i>	13
<i>Εικόνα 2: Καμπύλες κατανάλωσης (MT/XT) με μέγιστο στα 20Kw</i>	42
<i>Εικόνα 3: Πάνελ JA Solar 450W</i>	60
<i>Εικόνα 4: Υβριδικός τριφασικός μετατροπέας Sungrow SG10RT.....</i>	61
<i>Εικόνα 5: Καλώδιο φωτοβολταϊκών 1 x 4mm² - solar panel cable</i>	63
<i>Εικόνα 6: BYD Battery-Box Premium HVM 11.0</i>	64

Κατάλογος πινάκων

<i>Πίνακας 1: Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας (kWh) ανά Σενάριο για Πάρκο MB.....</i>	38
<i>Πίνακας 2: Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας (kWh) ανά Σενάριο για Πάρκο ΣΒ.....</i>	38
<i>Πίνακας 3: Χρεώσεις προμήθειας</i>	40
<i>Πίνακας 4: Κόστος προμήθειας ενέργειας για κάθε μήνα του έτους 2023 στη Μέση Τάση (MT).....</i>	46
<i>Πίνακας 5: Κόστος προμήθειας ενέργειας για κάθε μήνα του έτους 2023 στη Χαμηλή Τάση (XT).....</i>	47
<i>Πίνακας 6: Περίσσεια για το Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) σε Μέση Τάση (MV).....</i>	50
<i>Πίνακας 7: Περίσσεια για το Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) σε Χαμηλή Τάση (LV)</i>	52
<i>Πίνακας 8: Περίσσεια για το Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (MB) σε Μέση Τάση (MV) ..</i>	54
<i>Πίνακας 9: Περίσσεια για το Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (MB) σε Χαμηλή Τάση (LV)</i>	55
<i>Πίνακας 10: Κόστος Εξοπλισμού και Εγκατάστασης (Χωρίς ΦΠΑ)</i>	66
<i>Πίνακας 11: Ετήσια Παραγωγή και Κατανάλωση Ενέργειας.....</i>	67
<i>Πίνακας 12: Ετήσια Εξοικονόμηση Ενέργειας</i>	67
<i>Πίνακας 13: Απόσβεση Επένδυσης</i>	68
<i>Πίνακας 14: Απόσβεση σε έτη ανά σενάριο Φ/Β με σταθερές βάσεις</i>	68
<i>Πίνακας 15: Απόσβεση σε έτη ανά σενάριο Φ/Β με κινούμενες βάσεις</i>	69

Εισαγωγή

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τα τελευταία χρόνια, καθώς η ανάγκη για βιώσιμες λύσεις στον τομέα της ενέργειας γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια, μια ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο, προσφέροντας πλέον αξιόπιστες λύσεις για διάφορους τύπους εγκαταστάσεων, από μικρές οικιακές εφαρμογές έως μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Μία από τις νέες καινοτομίες στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η τεχνολογία μηδενικής έγχυσης στο δίκτυο (Zero Feed-In), όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται άμεσα από την εγκατάσταση χωρίς να επιστρέφεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτή η τεχνολογία αναδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντική για βιομηχανικές εγκαταστάσεις, καθώς επιτρέπει τη μείωση του κόστους ενέργειας και την αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας, ενώ παράλληλα συμμορφώνεται με τις αυστηρότερες απαιτήσεις περί εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Στη συγκεκριμένη εργασία, εστιάζουμε στην οικονομοτεχνική αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος σε μια βιομηχανική μονάδα. Η αξιολόγηση αυτή περιλαμβάνει ανάλυση των οικονομικών και τεχνικών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, καθώς και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή του. Η τεχνολογία μηδενικής έγχυσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγάλη και συνεχής, και οι ανάγκες για ενεργειακή αυτονομία γίνονται επιτακτικές.

Ένα βασικό σημείο της μελέτης είναι η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ειδών φωτοβολταϊκών συστημάτων και βάσεων, με έμφαση στα συστήματα σταθερής βάσης και στα συστήματα με κινητές βάσεις, τα οποία ακολουθούν την κίνηση του ήλιου. Η ανάλυση αυτή παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την αποδοτικότητα κάθε τύπου συστήματος, καθώς και τον αντίκτυπο που έχει η επιλογή του συστήματος στη συνολική απόδοση και την απόσβεση της επένδυσης.

1. Το φωτοβολταϊκό σύστημα

1.1 Ιστορική αναδρομή και μελλοντικές δυνατότητες

Η ιστορική ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων ξεκίνησε τον 19ο αιώνα με την ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου από τον Γάλλο φυσικό Alexandre Edmond Becquerel το 1839 (Zeman, 2003). Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών γνώρισαν σημαντική πρόοδο, ιδίως με την ανάπτυξη των ηλιακών κυψελών από πυρίτιο στη δεκαετία του 1950, που επέτρεψε τη χρήση τους για διαστημικές εφαρμογές (Chopra et al., 2004). Σταδιακά, η τεχνολογία αυτή εισήλθε και στις επίγειες εφαρμογές, ενισχυμένη από την αυξανόμενη ζήτηση για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Green, 2009).

Η αρχική έρευνα επικεντρώθηκε στη βελτίωση της απόδοσης και της ανθεκτικότητας των ηλιακών κυψελών, με αποτέλεσμα την κατασκευή πιο αποδοτικών και προσιτών συστημάτων (Gray, 2011). Κατά τη δεκαετία του 2000, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να παίζουν σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά ενέργειας, λόγω των κυβερνητικών επιδοτήσεων και των διεθνών συμφωνιών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (European Commission, 2018).

Το 1980, η εταιρεία ARCO Solar κατασκεύασε την πρώτη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ισχύος 1 MW στην Καλιφόρνια, χρησιμοποιώντας ιχνηλάτες διπλού άξονα (Chopra et al., 2004). Η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών ανήλθε στα 22 MW το 1983 (Razykov et al., 2011). Το 1999, η Spectrolab, σε συνεργασία με το NREL, ανέπτυξε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32,3% (Spectrolab, 1999), το οποίο ήταν κατάλληλο για κεντρικά συστήματα CPV (Conibeer, 2007).

Η μαζική παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων έγινε πιο προσιτή το 2004, όταν μεγαλύτερες εταιρείες εισήλθαν στην αγορά, μειώνοντας την τιμή στα 6,5 ευρώ ανά Wp (Fathima & Palanisamy, 2015). Γερμανία και Ιαπωνία κυριάρχησαν στην κατασκευή των πάνελ, με τις φωτοβολταϊκές τεχνολογίες να καθιερώνονται σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες (Cole et al., 2017). Το 2004, η παραγωγή φωτοβολταϊκών έφτασε τα 1.200 MW με ετήσιο τζίρο 6,5 δισεκατομμύρια δολάρια (Esrām & Chapman, 2007).

Το 2013, εγκαταστάθηκαν περισσότερα από 10 GW νέας ισχύος, αν και το μερίδιο αγοράς της Ευρώπης έπεσε στο 28%, σύμφωνα με την έκθεση του 2014 από την EPIA

(European Photovoltaic Industry Association, 2014). Οι ασιατικές αγορές, ιδίως η Κίνα και η Ιαπωνία, έγιναν κεντρικοί παίκτες στην παγκόσμια αγορά ηλιακής ενέργειας (IEA, 2020). Η περιοχή Ασίας-Ειρηνικού αντιπροσωπεύει περίπου το 57% του παγκόσμιου μεριδίου αγοράς, με την Κίνα να αναμένεται να εδραιώσει περαιτέρω τη θέση της ως κυρίαρχου παίκτη (Razykov et al., 2011).

Οι οικονομίες κλίμακας έχουν οδηγήσει σε σημαντικές αποδόσεις για κρυσταλλικά υλικά (Duffie & Beckman, 2013). Η Γερμανία και η Ιαπωνία, ως πρωτοπόροι, επενδύουν σημαντικά για την περαιτέρω διεύρυνση της χρήσης φωτοβολταϊκής τεχνολογίας (Smets et al., 2016).

Στο μέλλον, οι δυνατότητες των φωτοβολταϊκών συστημάτων προβλέπεται να είναι τεράστιες, με τεχνολογικές εξελίξεις που επικεντρώνονται στη βελτίωση της απόδοσης, τη μείωση του κόστους παραγωγής και την ανάπτυξη νέων υλικών, όπως οι οργανικές φωτοβολταϊκές κυψέλες και οι ηλιακές κυψέλες με βάση τους περοβσκίτες (Lal et al., 2017). Επιπλέον, αναμένεται η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κτίρια και υποδομές, καθώς και η επέκταση της χρήσης τους σε αναπτυσσόμενες αγορές, προσφέροντας βιώσιμη ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές.

1.2 Η ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα-η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών

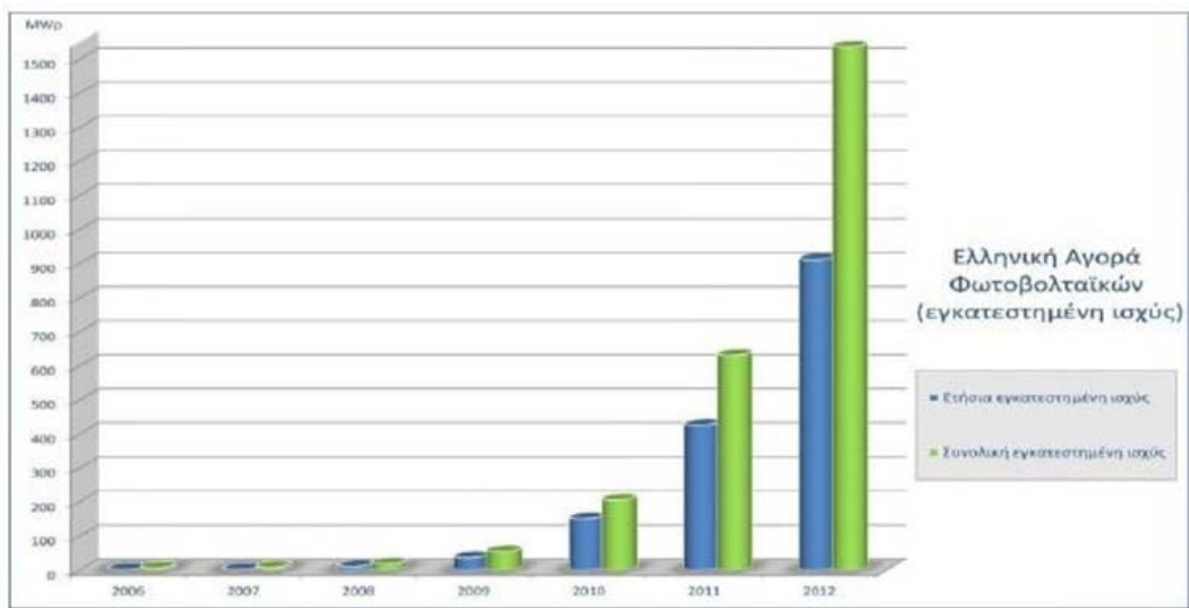
Η Ελλάδα είναι μια χώρα με έντονη ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, καθιστώντας την ιδανική για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Οι πρώτες προσπάθειες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας στη χώρα έγιναν κατά τη δεκαετία του 1980 με την τοποθέτηση ηλιακών συλλεκτών για θερμό νερό, ενώ η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων πήρε ώθηση μετά το 2006, όταν η ελληνική κυβέρνηση θέσπισε πολιτικές υποστήριξης και επιδοτήσεων.

Στην ελληνική αγορά, η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) είχε περιορισμένη πρόοδο μέχρι το 2006, με την ισχύ να ανέρχεται μόλις στα 2,2 MWp το 2003. Οι περιορισμοί των εγκαταστάσεων της ΔΕΗ σε νησιωτικές περιοχές όπως η Κύθηρος και τα Αντικύθηρα, καθώς και σε ιδιωτικά σπίτια σε απομονωμένες τοποθεσίες, ήταν ένας από τους λόγους για την αργή ανάπτυξη, παρά τις σημαντικές ηλιακές δυνατότητες της χώρας. Η γραφειοκρατία, οι περιορισμένοι πόροι για μικρούς επενδυτές, η έλλειψη επαρκών κινήτρων και ο μονοπωλιακός χαρακτήρας του ενεργειακού τομέα πριν από

το 2001 ήταν κάποιοι από τους παράγοντες που συνέβαλαν στην άτονη επέκταση των Φ/Β.

Το 2006, με την εισαγωγή του νόμου 3468/2006, δημιουργήθηκε ένα πιο σαφές νομοθετικό πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και τις Φ/Β, παρέχοντας ευνοϊκότερες τιμολογιακές ρυθμίσεις και επιχορηγήσεις για μικρομεσαίους επενδυτές. Ένα νέο πρόγραμμα ανάπτυξης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που ξεκίνησε την ίδια χρονιά προσέλκυσε πολλούς επενδυτές, αυξάνοντας τις αιτήσεις για άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ξεπέρασαν τον αρχικό στόχο των 2489 MWp, κάτι που ώθησε το Υπουργείο Ανάπτυξης να σταματήσει την έκδοση νέων αδειών στο τέλος του 2007 (Helarco, 2014).

Μέχρι το τέλος του 2007, η εγκατεστημένη ισχύς έφτασε στα 8,2 MW, και η αύξηση συνεχίστηκε με ρυθμούς 1-1,5 MW ετησίως. Ο Ν. 3851/2010, που ψηφίστηκε το 2009, αύξησε το όριο της ισχύος των φωτοβολταϊκών πάρκων που μπορούσαν να εξαιρεθούν από τις διαδικασίες λήψης αδειών παραγωγής και περιβαλλοντικής έγκρισης. Η αύξηση του ενδιαφέροντος οδήγησε σε μια θεαματική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, με τις αιτήσεις να φτάνουν τα 9437 MW στα τέλη του 2010. Το 2011, η εγκατεστημένη ισχύς ανέβηκε στα 1536,3 MW, καταγράφοντας μια εντυπωσιακή αύξηση 150% σε ετήσια βάση. Από το 2008 και μετά, η Ελλάδα συνέχισε να καταλαμβάνει μία από τις υψηλότερες θέσεις στην παγκόσμια αγορά όσον αφορά την εγκατάσταση νέας ισχύος, διατηρώντας τη θέση της στο top-10 για τρίτη συνεχή χρονιά το 2013, και εντυπωσιακά, βρισκόμενη στην 4η θέση παγκοσμίως στα κατά κεφαλήν εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά (Helarco, 2014).



Εικόνα 1: Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών 2006-2012

(Πηγή: Helapco, 2014)

Το 2013, η Ελλάδα κατέγραψε σημαντική αύξηση στην ισχύ των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, φθάνοντας τα 1042,5 MWp. Συνολικά, η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς έφτασε τα 2578,8 MWp μέχρι το τέλος του έτους. Περίπου 2,7 εκατομμύρια τόνοι διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) αποτράπηκαν από την εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα το 2013, χάρη στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. Ωστόσο, το 2014 η αγορά φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα αντιμετώπισε μεγάλες δυσκολίες, με την ταχύτητα εγκατάστασης συστημάτων να παρουσιάζει πτώση έως και 98,5% σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, ενώ χιλιάδες θέσεις εργασίας χάθηκαν στον κλάδο. Αυτή η πτώση ήταν αποτέλεσμα προσπαθειών για διόρθωση παλαιότερων θεσμικών αποτυχιών. Παρ' όλα αυτά, τα φωτοβολταϊκά συνέβαλαν κατά 7% στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, υπερβαίνοντας άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας (Helapco, 2020).

Η συνεχής αποτυχία των πολιτικών οδήγησε την αγορά σε σταθερή πτώση έως το 2015, με την αγορά να συρρικνώνεται σε μόλις 1% του μεγέθους της σε σύγκριση με το 2013. Η έλλειψη κατάλληλων θεσμικών ρυθμίσεων και τα capital controls εμπόδισαν την ανάπτυξη τόσο των μικρών αυτοπαραγωγικών συστημάτων όσο και των μεγαλύτερων έργων. Παρά τις δυσκολίες, τα φωτοβολταϊκά κάλυψαν το 7,1% των ενεργειακών

αναγκών της χώρας το 2015, διατηρώντας τη σημαντική συμβολή τους στην ενεργειακή αγορά (Helapco, 2020).

Το 2016, η πτώση στην αγορά φωτοβολταϊκών ήταν απογοητευτική, φθάνοντας σε επίπεδα πριν από την αναπτυξιακή έκρηξη του 2007. Οι αργές θεσμικές αλλαγές και τα capital controls συνέχισαν να αποτελούν εμπόδιο για την ανάπτυξη του κλάδου. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά κάλυψαν το 7,05% των ενεργειακών αναγκών της χώρας, ενισχύοντας τη θέση της Ελλάδας ως ένας από τους κύριους παραγωγούς φωτοβολταϊκής ενέργειας παγκοσμίως.

Το 2017, η αγορά φωτοβολταϊκών παρέμεινε κάτω από τις προσδοκίες παρά την αύξηση της ζήτησης κατά 14%. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί από τον πιλοτικό διαγωνισμό του 2016 ενεργοποιήθηκαν, παράγοντας σημαντική ποσότητα ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά κάλυψαν περίπου το 7% των ενεργειακών αναγκών της χώρας, επιβεβαιώνοντας τη συνεχιζόμενη σημαντική συμβολή τους στην ενεργειακή αγορά. Το 2018, ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση των περισσότερων φωτοβολταϊκών σταθμών που είχαν προκριθεί στον διαγωνισμό του Δεκεμβρίου 2016, εκτός από μία εξαίρεση (Helapco, 2020).

Η υιοθέτηση της ηλιακής ενέργειας ενισχύθηκε περαιτέρω με την ένταξη της χώρας στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τη συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές οδηγίες για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, η Ελλάδα έχει καταγράψει σημαντική αύξηση στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων, με αποτέλεσμα να αναδειχθεί σε έναν από τους κορυφαίους παραγωγούς ηλιακής ενέργειας στην Ευρώπη.

Το 2020, η ελληνική αγορά συστημάτων αυτοπαραγωγής φωτοβολταϊκών κατέγραψε αύξηση κατά 11,8% σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, αν και έμεινε αρκετά πίσω από το δυναμικό της χώρας. Παρόλο που οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες αντιπροσώπευαν περίπου το 7% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, η χώρα κατέλαβε την τέταρτη θέση παγκοσμίως, μετά την Ονδούρα, την Ιταλία και τη Γερμανία, όσον αφορά τη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2019, η αγορά έδειξε ένδειξη σημαντικής ανάκαμψης, καθώς προσδοκάτε η αύξηση των συστημάτων αυτοπαραγωγής για τα

επόμενα έτη, παρά τις συνεχιζόμενες προκλήσεις υποδομών και την πανδημία (Helarco, 2021).

Ενώ η αγορά το 2020 γνώρισε μία μοναδική χρονιά λόγω της πανδημίας, οι εξελίξεις στη δομή των τιμών και στην αλυσίδα εφοδιασμού επηρέασαν την παρουσίαση και την καταγραφή των στατιστικών. Αυτό οδήγησε σε μία αναθεώρηση του τρόπου κατάρτισης των στατιστικών, με τα δεδομένα να διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: ετήσια και συνολική χωρητικότητα εγκατάστασης και ετήσιες και συνολικές χωρητικότητες για συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Helarco, 2021).

Το 2021, η φωτοβολταϊκή αγορά στην Ελλάδα κατέγραψε την εγκατάσταση ενός υψηλού όγκου μεγαβάτ (MWp), ξεπερνώντας άλλες τεχνολογίες σε παραγωγική ικανότητα λόγω της έντονης επενδυτικής δραστηριότητας. Στα πλαίσια των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, καταγράφηκε εγκατάσταση νέας ισχύος 838 MWp κατά τη διάρκεια του έτους, με 454 MWp να είχαν αναγγελθεί έτοιμα από το 2020 αλλά να ηλεκτρίζονται τελικά το 2021. Επιπρόσθετα, περίπου 370 MWp, τα οποία δηλώθηκαν έτοιμα το 2021, αναμένεται να ηλεκτριστούν το επόμενο έτος. Κατά την ίδια χρονιά, η κατηγορία των συστημάτων αυτοπαραγωγής διπλασίασε την παραγωγή της σε σχέση με το προηγούμενο έτος, εγκαθιστώντας 38 MWp νέας ισχύος για ενεργειακό συμψηφισμό, αυξάνοντας τη συνολική ισχύ στα 89 MWp. Το 2021, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα έφτασε τα 5,26 TWh, ισοδυναμώντας με το 9,2% της συνολικής ζήτησης στη χώρα, προσφέροντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 3,7 εκατομμύρια τόνους, αντικαθιστώντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων (Helarco, 2022).

Το 2022, η φωτοβολταϊκή βιομηχανία στην Ελλάδα ξεχώρισε, εγκαθιστώντας περισσότερη ισχύ σε μεγαβάτ (MWp) από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία ανανεώσιμης ενέργειας, χάρη στη συνεχιζόμενη έντονη επενδυτική δραστηριότητα. Το ενδιαφέρον αυτό οδήγησε στο να αποτελέσουν τα φωτοβολταϊκά το 85% της νέας εγκατεστημένης ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για εκείνο το έτος. Συγκεκριμένα, η νέα ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών ανήλθε σε 1.392,5 MWp, ανεβάζοντας τη συνολική διασυνδεδεμένη ισχύ στα 5.526 MWp. Επιπλέον, η αγορά των συστημάτων αυτοκατανάλωσης διπλασιάστηκε σε σχέση με το προηγούμενο έτος, με τη νέα εγκατεστημένη ισχύ να ανέρχεται σε 250 MW. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αναδειχθεί σε έναν ζωτικό πυλώνα για την ηλεκτροπαραγωγή της χώρας, καθώς το

2022 κατέγραψαν το 39% της ηλεκτρικής κατανάλωσης των ελληνικών νοικοκυριών. Η τεχνολογία αυτή έχει αποδειχθεί ότι είναι η πιο οικονομική επιλογή για ηλεκτροπαραγωγή, με το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων να έχει μειωθεί κατά 90% από το 2009 μέχρι σήμερα. Το περιβαλλοντικό όφελος από τη χρήση των φωτοβολταϊκών το 2022 ισοδυναμεί με την αποφυγή εκπομπής 4,6 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα, που ισούται με τις εκπομπές από 3,7 εκατομμύρια νέα αυτοκίνητα, που αναλογούν σε μέσο ετήσιο ταξίδι 10.000 χιλιόμετρα το καθένα (Helapco, 2023).

Το 2023, η αγορά φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα προηγήθηκε στην εγκατάσταση ισχύος σε μεγαβάτ (MWp), υπερτερώντας κάθε άλλη τεχνολογία ανανεώσιμης ενέργειας, χάρη στο συνεχιζόμενο έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον. Τα φωτοβολταϊκά αντιπροσώπευαν το 74% της νέας εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ για την εν λόγω χρονιά. Οι διασυνδεδεμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις πρόσθεσαν 1.574,7 MWp νέας ισχύος το 2023, φτάνοντας συνολικά τα 7.087,5 MWp. Η συγκεκριμένη αύξηση αντανάκλα τη δυναμική ανάπτυξη της αγοράς, ενώ η αγορά των συστημάτων αυτοκατανάλωσης διπλασιάστηκε σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Μέσα στο 2023, εντάχθηκαν επίσης 1.795 μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες, συνολικής ισχύος 12,66 MWh, στο πλαίσιο του προγράμματος "Φωτοβολταϊκά στη Στέγη". Η Ελλάδα το 2023 κατέκτησε την πρώτη θέση στην Ευρώπη ως προς το ποσοστό της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής που προέρχεται από φωτοβολταϊκά, με ποσοστό διπλάσιο του μέσου ευρωπαϊκού και τριπλάσιο του παγκόσμιου μέσου όρου. Το φωτοβολταϊκό αποτέλεσμα για το 2023 απέτρεψε την εκπομπή 5,7 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα, παρέχοντας ένα περιβαλλοντικό όφελος ισοδύναμο με τη φύτευση 147,6 εκατομμυρίων κωνοφόρων ή 90,1 εκατομμυρίων φυλλοβόλων δέντρων για μια δεκαετία. Επιπλέον, το 2023 επενδύθηκε στη χώρα 1,11 δισεκατομμύρια ευρώ σε νέα φωτοβολταϊκά έργα, δημιουργώντας 15.730 νέες θέσεις πλήρους απασχόλησης (Helapco, 2023).

Οι προοπτικές για το μέλλον είναι θετικές, καθώς η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συνεχίζει να εξελίσσεται και η Ελλάδα συνεχίζει να επενδύει σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπλέον, η χώρα έχει δεσμευτεί να αυξήσει το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, συμβάλλοντας έτσι στη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο.

1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ανακάλυψη του φαινομένου αυτού αποτέλεσε θεμέλιο για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών κυψελών, που αποτελούν το κεντρικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το φαινόμενο αυτό έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών που σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή καθαρής ενέργειας.

Ιστορική Εξέλιξη και Θεωρητική Βάση

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1839 από τον Alexandre Edmond Becquerel, ο οποίος ανακάλυψε ότι συγκεκριμένα υλικά παράγουν μικρές ποσότητες ηλεκτρικού ρεύματος όταν εκτίθενται στο φως (Gray, 2011). Ωστόσο, η κατανόηση του φαινομένου αυτού έλαβε σημαντική ώθηση με τη θεωρητική ανάλυση του Albert Einstein το 1905, όταν εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιώντας τη θεωρία των κβάντων, για την οποία έλαβε το Νόμπελ Φυσικής το 1921.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συμβαίνει όταν τα φωτόνια του ηλιακού φωτός προσπίπτουν σε ένα υλικό και μεταφέρουν την ενέργειά τους στα ηλεκτρόνια του υλικού αυτού. Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετή για να υπερβεί τη ζώνη ενέργειας (band gap) του υλικού, τότε τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται και δημιουργείται ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτός ο μηχανισμός είναι ο θεμέλιος λίθος για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών που βρίσκουν εφαρμογή στην ηλιακή ενέργεια (Smets et al., 2016).

Υλικά Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι κυρίως ημιαγωγοί. Το πυρίτιο είναι το πιο διαδεδομένο υλικό λόγω της διαθεσιμότητάς του και της υψηλής απόδοσης μετατροπής του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες πυριτίου χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους: τις μονοκρυσταλλικές και τις πολυκρυσταλλικές. Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες είναι πιο αποδοτικές αλλά και πιο ακριβές, ενώ οι πολυκρυσταλλικές είναι πιο οικονομικές αλλά με ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση (Green, 2000; Muhammad et al., 2019).

Εκτός από το πυρίτιο, άλλα υλικά όπως τα λεπτά φιλμ (thin films) και τα υλικά περοβσκίτη (perovskite) έχουν επίσης αναπτυχθεί για χρήση σε φωτοβολταϊκές κυψέλες. Τα υλικά αυτά προσφέρουν το πλεονέκτημα του χαμηλότερου κόστους παραγωγής και της δυνατότητας για ευέλικτες και ελαφριές εφαρμογές, αν και η απόδοσή τους παραμένει χαμηλότερη σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά πυριτίου (Snaith, 2013).

Λειτουργία των Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Η λειτουργία μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης βασίζεται στην αρχή της δημιουργίας ηλεκτρικής τάσης και ρεύματος όταν τα φωτόνια του ηλιακού φωτός προκαλούν την απελευθέρωση ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται κινούνται προς το εξωτερικό κύκλωμα μέσω των επαφών της κυψέλης, ενώ τα κενά (holes) που αφήνουν πίσω τους κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση (Shockley & Queisser, 2018).

Η αποδοτικότητα μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης, δηλαδή η ικανότητά της να μετατρέπει το εισερχόμενο ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποιότητα του υλικού, η καθαρότητα της κατασκευής, και η θερμοκρασία λειτουργίας. Το όριο Shockley-Queisser θέτει ένα θεωρητικό όριο στην αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου στο 33,7% υπό ιδανικές συνθήκες (Shockley & Queisser, 2018).

Εφαρμογές και Τεχνολογική Εξέλιξη

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους τομείς, από μικρές κλίμακες, όπως οι φορητές συσκευές, έως μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Η ευρεία διάδοση της τεχνολογίας αυτής οφείλεται κυρίως στην πτώση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων. Η ηλιακή ενέργεια είναι πλέον μια από τις πιο ανταγωνιστικές μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Kusch-Brandt, 2019).

Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών περιλαμβάνει την ανάπτυξη νέων υλικών και την βελτιστοποίηση των υπάρχουσών διαδικασιών παραγωγής. Οι κυψέλες περοβσκίτη και τα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι παραδείγματα τεχνολογιών που

υπόσχονται αυξημένη αποδοτικότητα και ευελιξία σε μελλοντικές εφαρμογές (Yang et al., 2015).

Προκλήσεις και Μελλοντικές Προοπτικές

Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί, υπάρχουν ακόμα σημαντικές προκλήσεις στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, η σταθερότητα των νέων υλικών και η ανάγκη για αποτελεσματική ανακύκλωση των παλαιών κυψελών αποτελούν μερικά από τα βασικά ζητήματα που χρήζουν επίλυσης (Green et al., 2015).

Επιπλέον, η ενεργειακή μετάβαση προς μια οικονομία μηδενικών εκπομπών απαιτεί την περαιτέρω ανάπτυξη και ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Η συνεχής έρευνα και η καινοτομία στον τομέα αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης και της κλιματικής ουδετερότητας (IEA, 2020).

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί την επιστημονική βάση για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία έχουν καθοριστικό ρόλο στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση. Η κατανόηση των θεωρητικών αρχών, η εξέλιξη των υλικών και η αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκύπτουν θα καθορίσουν το μέλλον αυτής της τεχνολογίας.

1.4 Υλικό κατασκευής Φ/Β συστημάτων

Η ανάπτυξη και η παραγωγή φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων βασίζεται σε μια ποικιλία υλικών και τεχνολογιών, που επηρεάζουν την απόδοση, το κόστος και τη βιωσιμότητα των τελικών προϊόντων. Το πυρίτιο, ένα ημιαγωγικό υλικό με κρυσταλλική δομή, παραμένει το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων, χάρη στην αποδεδειγμένη αξιοπιστία του και την εκτεταμένη χρήση του σε ηλεκτρονικές εφαρμογές. Παράλληλα, οι τεχνολογίες λεπτών φιλμ, οι υβριδικές δομές και άλλα καινοτόμα υλικά, όπως οι περοβσκίτες, προωθούνται για να αυξήσουν την αποδοτικότητα και να μειώσουν το κόστος παραγωγής των Φ/Β κυψελών.

Πυρίτιο: Το Βασικό Υλικό των Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών λόγω της σταθερότητας και της απόδοσής του. Παρά το γεγονός ότι το πυρίτιο δεν είναι ιδανικό για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω του έμμεσου ενεργειακού κενού του (1,1 eV), η μακροχρόνια χρήση του σε ηλεκτρονικές εφαρμογές έχει καθιερώσει τη θέση του στην αγορά (Cole et al., 2017). Το πυρίτιο μπορεί να υποστεί επεξεργασία ώστε να επιτύχει το επιθυμητό επίπεδο καθαρότητας για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών, καθιστώντας το διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες με καλά μελετημένες ιδιότητες (Zhang & Zhu, 2018).

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες πυριτίου διακρίνονται σε μονοκρυσταλλικές και πολυκρυσταλλικές, με τις μονοκρυσταλλικές να προσφέρουν υψηλότερη απόδοση λόγω της ομοιόμορφης σύνθεσής τους σε μοριακό επίπεδο. Η αποδοτικότητα των μονοκρυσταλλικών κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 14% και 18%, γεγονός που τις καθιστά πιο αποδοτικές σε σύγκριση με τις πολυκρυσταλλικές, οι οποίες έχουν αποδοτικότητα που κυμαίνεται από 11% έως 14% (Yan et al., 2019).

Παρά τα πλεονεκτήματα του πυριτίου, η έλλειψη ιδανικών ιδιοτήτων για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας έχει οδηγήσει σε έρευνες για εναλλακτικά υλικά και τεχνολογίες. Η τεχνολογία λεπτών φιλμ είναι μια από αυτές τις εναλλακτικές, που επιδιώκει να μειώσει το κόστος παραγωγής χρησιμοποιώντας λεπτότερα στρώματα υλικών, όπως το άμορφο πυρίτιο (a-Si), το χαλκοϊνδιουμουλικό γαλλίου (CIGS), το τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe) και το γάλλιο αρσενικού (GaAs) (Cole et al., 2017).

Λεπτές Μεμβράνες: Η Τεχνολογία του Μέλλοντος

Η τεχνολογία λεπτών φιλμ χρησιμοποιεί εξαιρετικά λεπτά στρώματα ημιαγωγικών υλικών, μερικές φορές μόνο μερικά μικρόμετρα (μm) πάχους, για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών. Αυτή η προσέγγιση μειώνει το κόστος των πρώτων υλών και επιτρέπει την κατασκευή ευέλικτων και ελαφριών φωτοβολταϊκών πλαϊσίων (Chopra et al., 2004). Το άμορφο πυρίτιο (a-Si) είναι το πιο διαδεδομένο υλικό στην τεχνολογία λεπτών φιλμ, αν και η απόδοσή του (6-8%) είναι χαμηλότερη από αυτή των κρυσταλλικών κυψελών πυριτίου.

Εκτός από το άμορφο πυρίτιο, το χαλκοϊνδιουμουλικό γαλλίου (CIGS) και το τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe) αποτελούν υλικά με υψηλότερη αποδοτικότητα,

προσφέροντας μια ανταγωνιστική εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές κυψέλες πυριτίου. Η τεχνολογία αυτή έχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας εφαρμογής σε διάφορες επιφάνειες, όπως γυαλί, πλαστικά και μέταλλα, παρέχοντας ευελιξία στις εφαρμογές της (Razykov et al., 2011).

Υβριδικές Δομές και Καινοτομίες

Για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει υβριδικές δομές που συνδυάζουν διαφορετικά υλικά με ποικίλες ιδιότητες απορρόφησης φωτός. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη βέλτιστη εκμετάλλευση του ηλιακού φάσματος, επιτυγχάνοντας υψηλότερες αποδόσεις και βελτιωμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (Cole et al., 2017).

Οι πολυστρωματικές φωτοβολταϊκές κυψέλες, για παράδειγμα, χρησιμοποιούν συνδυασμούς υλικών όπως το πυρίτιο και οι περοβσκίτες, για να αυξήσουν την απόδοση μετατροπής ενέργειας. Τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά επιτρέπουν την απορρόφηση ενός ευρύτερου φάσματος μηκών κύματος, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη φασματική κάλυψη και αυξημένες τάσεις ανοιχτού κυκλώματος (Lal et al., 2017).

Οι υβριδικές δομές μπορούν επίσης να επιβραδύνουν τον ρυθμό υποβάθμισης των κυψελών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται άμορφο πυρίτιο. Η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών συμβάλλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής και της σταθερότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Hamelmann et al., 2016).

Μελλοντικές Προοπτικές και Εξελίξεις

Η συνεχιζόμενη έρευνα στον τομέα των φωτοβολταϊκών υλικών και τεχνολογιών επικεντρώνεται στη βελτίωση της απόδοσης και της βιωσιμότητας, καθώς και στη μείωση του κόστους παραγωγής. Η ανάπτυξη νέων υλικών, όπως οι περοβσκίτες, και η ενσωμάτωση πολυστρωματικών και υβριδικών δομών υπόσχονται να προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στον τομέα αυτό (Yang et al., 2015).

Παράλληλα, η τεχνολογία λεπτών φιλμ συνεχίζει να εξελίσσεται, προσφέροντας λύσεις για την παραγωγή φθηνών και ευέλικτων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση υλικών αποτελούν επίσης κρίσιμες περιοχές έρευνας, με

στόχο τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Hamelmann et al., 2016).

Συνολικά, η εξέλιξη των υλικών και των τεχνολογιών φωτοβολταϊκών συστημάτων θα συνεχίσει να διαμορφώνει το μέλλον της ηλιακής ενέργειας, καθιστώντας την μια ολοένα και πιο βιώσιμη και αποδοτική πηγή ενέργειας.

1.5 Είδη Φ/B συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/B) συστήματα αποτελούν μια βασική τεχνολογία για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, και η ταξινόμησή τους μπορεί να γίνει με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η εφαρμογή, ο σχεδιασμός, και οι ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης. Η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα των Φ/B συστημάτων τα καθιστά ιδανικά για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από οικιακή χρήση έως βιομηχανική παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Τα κύρια είδη των Φ/B συστημάτων που κυκλοφορούν στην αγορά είναι τα διασυνδεδεμένα, τα αυτόνομα και τα υβριδικά συστήματα, το καθένα από τα οποία εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες και προϋποθέσεις.

Διασυνδεδεμένα Συστήματα

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα (Grid-Tied Systems) είναι τα πιο διαδεδομένα, ιδιαίτερα σε περιοχές με ανεπτυγμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτά τα συστήματα είναι συνδεδεμένα απευθείας με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας την παράλληλη λειτουργία της παραγωγής από το Φ/B σύστημα και την κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των διασυνδεδεμένων συστημάτων είναι η δυνατότητα πώλησης της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο όταν η παραγωγή υπερβαίνει την κατανάλωση (net metering), εξασφαλίζοντας έτσι οικονομικά οφέλη για τους ιδιοκτήτες τους (Marques Lameirinhas et al., 2022). Αντίθετα, όταν η παραγωγή ενέργειας από το Φ/B σύστημα είναι χαμηλότερη από την κατανάλωση, το δίκτυο παρέχει την απαραίτητη επιπλέον ενέργεια.

Η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων γίνεται συχνά σε κτίρια κατοικιών ή βιομηχανικών εγκαταστάσεων, όπου η κατανάλωση ενέργειας είναι σταθερή και

προβλέψιμη. Ωστόσο, η απόδοση ενός διασυνδεδεμένου συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σταθερότητα και την ποιότητα του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου, καθώς και από τις πολιτικές που ακολουθούνται για την ενθάρρυνση της ηλιακής ενέργειας (Komp, 2002).

Αυτόνομα Συστήματα

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα (Off-Grid Systems) λειτουργούν ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό δίκτυο και χρησιμοποιούνται κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο δεν είναι δυνατή ή οικονομικά βιώσιμη. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομονωμένες κοινότητες, σε αγροτικές περιοχές και σε εφαρμογές όπως οι μετεωρολογικοί σταθμοί και οι τηλεπικοινωνιακοί πύργοι (Bolrahman & Abdullah, 2022).

Ένα βασικό στοιχείο των αυτόνομων συστημάτων είναι η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας, συνήθως μέσω μπαταριών. Οι μπαταρίες επιτρέπουν την αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας για χρήση κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε περιόδους μειωμένης ηλιοφάνειας (Fathima & Palanisamy, 2015). Η επιλογή του τύπου και του μεγέθους των μπαταριών είναι κρίσιμη για την απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς επηρεάζει τη διάρκεια ζωής και το κόστος συντήρησης.

Τα αυτόνομα συστήματα απαιτούν επίσης τη χρήση ρυθμιστών φόρτισης και μετατροπέων για τη διαχείριση της ροής της ενέργειας και τη μετατροπή της από συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), το οποίο χρησιμοποιείται από τις περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές. Η συνδυασμένη λειτουργία αυτών των εξαρτημάτων εξασφαλίζει την αξιόπιστη παροχή ενέργειας ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες (Feron, 2016).

Υβριδικά Συστήματα

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα (Hybrid Systems) συνδυάζουν τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία με άλλες πηγές ενέργειας, όπως γεννήτριες πετρελαίου ή ανεμογεννήτριες, για να προσφέρουν πιο σταθερή και αξιόπιστη παροχή ενέργειας.

Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε περιοχές με ασταθή ηλιοφάνεια ή σε εφαρμογές όπου η συνεχής παροχή ενέργειας είναι κρίσιμη, όπως σε νοσοκομεία ή στρατιωτικές εγκαταστάσεις (Fathima & Palanisamy, 2015).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων είναι η ευελιξία που προσφέρουν, καθώς μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες και περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, σε περιοχές όπου η ηλιοφάνεια δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εξισορροπήσουν τη μειωμένη παραγωγή ηλιακής ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες (Engin, 2013).

Τα υβριδικά συστήματα μπορούν επίσης να συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς επιτρέπουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με τις παραδοσιακές πηγές. Αυτή η συνδυασμένη χρήση μειώνει την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων, ενώ αυξάνει την ενεργειακή ασφάλεια και την αξιοπιστία της παροχής ενέργειας (Lal & Raturi, 2012).

Συστήματα Σταθερά και Ιχνηλάτησης Ηλίου

Εκτός από τη βασική διάκριση σε διασυνδεδεμένα, αυτόνομα και υβριδικά συστήματα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον σχεδιασμό τους σε σταθερά και συστήματα με ιχνηλάτηση του ήλιου (solar tracking systems). Τα σταθερά συστήματα είναι εγκατεστημένα σε μία σταθερή θέση και παραμένουν ακίνητα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, τα συστήματα με ιχνηλάτηση του ήλιου προσαρμόζουν τη θέση των πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας για να ακολουθούν την κίνηση του ήλιου, μεγιστοποιώντας έτσι την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας (Solar Energy Industries Association, 2019).

Τα συστήματα με ιχνηλάτηση αυξάνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ κατά 10% έως 25% σε σύγκριση με τα σταθερά συστήματα, ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια (Awasthi et al., 2020). Ωστόσο, η εγκατάσταση και συντήρηση αυτών των συστημάτων είναι πιο περίπλοκη και δαπανηρή, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε εφαρμογές όπου η υψηλή απόδοση είναι απαραίτητη.

Μελλοντικές Τάσεις και Εξελίξεις

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξελίσσεται συνεχώς, με νέες τεχνολογίες και υλικά να εισάγονται στην αγορά για να αυξήσουν την απόδοση και να μειώσουν το κόστος. Η ανάπτυξη πιο αποδοτικών πάνελ, η ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας, και η αύξηση της χρήσης υβριδικών και αυτόνομων συστημάτων αποτελούν μερικές από τις βασικές τάσεις στον τομέα αυτό (Green, 2009).

Παράλληλα, η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε δομικά υλικά (building-integrated photovoltaics, BIPV) κερδίζει έδαφος, επιτρέποντας τη χρήση της ηλιακής ενέργειας απευθείας από την αρχιτεκτονική των κτιρίων. Αυτή η τάση ανοίγει νέες δυνατότητες για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας σε αστικά περιβάλλοντα, όπου οι διαθέσιμες επιφάνειες είναι περιορισμένες (Sun et al., 2022).

Η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών θα συνεχίσει να ενισχύει την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία και την προσιτότητα των Φ/Β συστημάτων, καθιστώντας τα μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης.

2. Προσανατολισμός και θέση του Φ/Β πλαισίου

2.1 Σημεία λειτουργίας

Τα σημεία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συστήματος είναι οι συνθήκες υπό τις οποίες το σύστημα αποδίδει την καλύτερη δυνατή απόδοση. Η κατανόηση και η διαχείριση αυτών των σημείων είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία και τη βέλτιστη παραγωγή ενέργειας από τα Φ/Β πάνελ. Το πιο σημαντικό από αυτά τα σημεία είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος (Maximum Power Point, MPP), το οποίο αντιπροσωπεύει την κατάσταση όπου το Φ/Β σύστημα αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύ. Η διατήρηση της λειτουργίας του συστήματος κοντά στο MPP απαιτεί τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως οι Maximum Power Point Trackers (MPPTs), και η διαχείριση των παραγόντων που επηρεάζουν το MPP, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, και το φορτίο.

Το Μέγιστο Σημείο Ισχύος (MPP)

Το MPP είναι ένα κρίσιμο σημείο λειτουργίας για κάθε Φ/Β σύστημα, καθώς αντιπροσωπεύει την κατάσταση όπου η ισχύς που παράγεται από το Φ/Β πάνελ είναι η

μέγιστη δυνατή. Το MPP εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, με κυριότερους την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία της κυψέλης. Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει άμεσα το ρεύμα που παράγεται από το πάνελ, ενώ η θερμοκρασία επηρεάζει την τάση εξόδου. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την τάση και, συνεπώς, την ισχύ εξόδου του πάνελ, ενώ η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει το ρεύμα και, συνεπώς, την ισχύ εξόδου (Conibeer, 2007).

Η καμπύλη ισχύος ενός Φ/Β πάνελ έχει συνήθως ένα μοναδικό σημείο στο οποίο η τάση και το ρεύμα συνδυάζονται για να αποδώσουν τη μέγιστη ισχύ. Αυτό το σημείο, το MPP, είναι κρίσιμο για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, το MPP δεν είναι σταθερό και μπορεί να αλλάζει ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες, όπως η αλλαγή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ή η μεταβολή της θερμοκρασίας (Villalva et al., 2009).

Τεχνολογίες για την Εξασφάλιση Λειτουργίας στο MPP

Για να εξασφαλιστεί ότι ένα Φ/Β σύστημα λειτουργεί πάντα στο MPP, χρησιμοποιούνται τεχνολογίες Maximum Power Point Tracking (MPPT). Τα MPPTs είναι ηλεκτρονικά συστήματα που παρακολουθούν συνεχώς το σημείο λειτουργίας της κυψέλης και προσαρμόζουν το φορτίο έτσι ώστε να διατηρείται πάντα στο MPP. Η χρήση των MPPTs είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων, καθώς χωρίς αυτά το σύστημα θα μπορούσε να λειτουργεί σε μη βέλτιστα σημεία λειτουργίας, μειώνοντας την αποδοτικότητα και την παραγόμενη ισχύ (Esram & Chapman, 2007).

Τα MPPTs λειτουργούν με βάση αλγορίθμους που αναλύουν την καμπύλη ισχύος του πάνελ και εντοπίζουν το MPP σε πραγματικό χρόνο. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές MPPT, με πιο διαδεδομένες τις μεθόδους Perturb and Observe (P&O) και Incremental Conductance (IncCond). Η μέθοδος P&O λειτουργεί με μικρές μεταβολές της τάσης και της ροής του ρεύματος για να ανιχνεύσει την κατεύθυνση προς το MPP, ενώ η μέθοδος IncCond χρησιμοποιεί την τιμή της παραγόμενης ισχύος και την παράγωγό της για να εντοπίσει το MPP (Liu et al., 2018).

Η χρήση των MPPTs έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική στη βελτίωση της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες φωτισμού αλλάζουν συχνά, όπως κατά τη διάρκεια μιας ημέρας με νεφώσεις ή όταν η σκίαση επηρεάζει την απόδοση του πάνελ (Safari & Mekhilef, 2010).

Παράγοντες που Επηρεάζουν το MPP

Η απόδοση ενός Φ/Β συστήματος και το MPP επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι οι εξής:

Ηλιακή ακτινοβολία: Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση ενός Φ/Β συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που παράγεται από το πάνελ, και συνεπώς αυξάνεται η ισχύς που μπορεί να παραχθεί (Dunlop et al., 2018).

Θερμοκρασία: Η θερμοκρασία του πάνελ επηρεάζει την τάση εξόδου, με υψηλότερες θερμοκρασίες να μειώνουν την τάση και κατά συνέπεια την παραγόμενη ισχύ. Η θερμοκρασία του πάνελ μπορεί να αυξηθεί λόγω της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση του συστήματος (Skoplaki & Palyvos, 2009).

Φορτίο: Το είδος του φορτίου που είναι συνδεδεμένο με το Φ/Β πάνελ μπορεί επίσης να επηρεάσει το σημείο λειτουργίας του συστήματος. Τα μη σταθερά φορτία, όπως οι μεταβλητοί κινητήρες, μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στο σημείο λειτουργίας και να μειώσουν την αποδοτικότητα του συστήματος (Vergura, 2016).

Σκίαση: Η μερική σκίαση ενός Φ/Β πάνελ μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της απόδοσης, καθώς το MPP μπορεί να μεταβληθεί ή να εξαφανιστεί εντελώς. Η σκίαση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως δέντρα, κτίρια ή άλλες κατασκευές, και μπορεί να επηρεάσει δυσανάλογα την παραγόμενη ισχύ του συστήματος (Patel & Agarwal, 2008).

Σχεδιασμός για Αποδοτική Λειτουργία

Για να εξασφαλιστεί ότι ένα Φ/Β σύστημα λειτουργεί αποδοτικά, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη ορισμένες σχεδιαστικές προδιαγραφές και πρακτικές. Πρώτον, το σύστημα πρέπει να τοποθετηθεί σε σημείο όπου η σκίαση είναι ελάχιστη και η έκθεση στον ήλιο είναι μέγιστη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η σωστή κλίση και ο προσανατολισμός των πάνελ μπορούν επίσης να επηρεάσουν θετικά την αποδοτικότητα, μεγιστοποιώντας την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας (Sharma & Chandel, 2013).

Επιπλέον, είναι σημαντικό να επιλέγονται ποιοτικά υλικά και εξαρτήματα για την κατασκευή του Φ/Β συστήματος. Η χρήση αξιόπιστων MPPTs και η σωστή διαστασιολόγηση των μπαταριών και των μετατροπέων εξασφαλίζουν τη βέλτιστη λειτουργία και την μακροχρόνια σταθερότητα του συστήματος (Ahmed et al., 2009).

Τα συστήματα ψύξης και οι τεχνικές διαχείρισης θερμότητας μπορούν επίσης να βοηθήσουν στη διατήρηση της θερμοκρασίας των πάνελ σε χαμηλά επίπεδα, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος. Τέτοιες τεχνικές περιλαμβάνουν τη χρήση υλικών με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, καθώς και την εγκατάσταση συστημάτων ενεργητικής ψύξης όταν αυτό είναι απαραίτητο (Radziemska, 2003).

Σημαντικότητα της Διαχείρισης Σημείων Λειτουργίας

Η σωστή διαχείριση των σημείων λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος είναι κρίσιμη για τη μακροχρόνια απόδοσή του. Η διατήρηση της λειτουργίας κοντά στο MPP όχι μόνο μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ, αλλά επίσης συμβάλλει στη μείωση των φαινομένων υπερφόρτωσης και υπερθέρμανσης, που μπορεί να μειώσουν τη διάρκεια ζωής του συστήματος (Chen et al., 2007).

Επιπλέον, η συνεχής παρακολούθηση και συντήρηση του Φ/Β συστήματος εξασφαλίζει ότι τυχόν προβλήματα εντοπίζονται και διορθώνονται εγκαίρως. Η χρήση έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης και η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) μπορούν να προσφέρουν ακριβείς και σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος, επιτρέποντας την άμεση επέμβαση όταν χρειάζεται (Balal et al., 2021).

Η διαχείριση των σημείων λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την αποδοτικότητα και τη μακροχρόνια σταθερότητα του συστήματος. Το MPP είναι το πιο κρίσιμο σημείο λειτουργίας και η εξασφάλιση ότι το σύστημα λειτουργεί κοντά σε αυτό είναι απαραίτητη για τη μέγιστη απόδοση. Η χρήση τεχνολογιών MPPT, η κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος, και η συνεχής παρακολούθηση είναι τα κλειδιά για τη βέλτιστη λειτουργία των Φ/Β συστημάτων. Οι μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας των Φ/Β αναμένεται να βελτιώσουν ακόμα περισσότερο τη διαχείριση των σημείων λειτουργίας, καθιστώντας τα Φ/Β συστήματα ακόμα πιο αποδοτικά και αξιόπιστα.

2.2 Τρόποι στήριξης του Φ/Β πλαισίου

Η σωστή τοποθέτηση και στήριξη ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) πλαισίου είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσής του. Η ανάγκη αλλαγής της θέσης του πλαισίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και την κίνηση του ήλιου στον ουρανό. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι εποχές, η υγρασία, το υψόμετρο και η ποιότητα του αέρα. Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν την ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στα Φ/Β πλαίσια, επηρεάζοντας άμεσα την αποδοτικότητα και την παραγωγή ενέργειας του συστήματος (Duffie & Beckman, 2013).

Η Κίνηση του Ήλιου και τα Χαρακτηριστικά της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η κίνηση του ήλιου στον ουρανό είναι ένα από τα βασικά φαινόμενα που καθορίζουν την απόδοση των Φ/Β συστημάτων. Καθώς η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της και κινείται κατά μήκος της τροχιάς της γύρω από τον ήλιο, η γωνία με την οποία οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν στην επιφάνεια της Γης αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Αυτή η αλλαγή στη γωνία επηρεάζει την ένταση και τη διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα Φ/Β πλαίσια (Kalogirou, 2023).

Εκτός από τη γεωγραφική θέση και την εποχή του έτους, παράγοντες όπως η υγρασία, το υψόμετρο και η ποιότητα του αέρα παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε περιοχές με υψηλή υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία διασπείρεται και απορροφάται από τα μόρια του νερού στην ατμόσφαιρα, μειώνοντας έτσι την ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στα Φ/Β πλαίσια. Το υψόμετρο, από την

άλλη πλευρά, επηρεάζει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μειώνεται σε μεγαλύτερα ύψη, επιτρέποντας σε περισσότερη ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια (Zeman, 2003).

Η ποιότητα του αέρα, που επηρεάζεται από φαινόμενα όπως η ρύπανση και η παρουσία σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, μπορεί επίσης να μειώσει την απόδοση των Φ/Β συστημάτων. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο ενισχύεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, επηρεάζει επίσης τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία, μεταβάλλοντας τις κλιματικές συνθήκες και, κατ' επέκταση, την απόδοση των Φ/Β πλαισίων (IPCC, 2014).

Συστήματα Στήριξης Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η στήριξη των Φ/Β πλαισίων είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση της σταθερότητας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητάς τους. Τα συστήματα στήριξης ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή, το μέγεθος και τη θέση της εγκατάστασης. Οι κύριοι τύποι στήριξης περιλαμβάνουν τις σταθερές βάσεις, τις βάσεις με ιχνηλάτηση του ήλιου και τις βάσεις ενσωματωμένες σε κτίρια.

Σταθερές Βάσεις

Οι σταθερές βάσεις είναι η πιο κοινή και οικονομική επιλογή για την τοποθέτηση Φ/Β πλαισίων. Αυτές οι βάσεις τοποθετούν τα Φ/Β πλαίσια σε μια σταθερή γωνία, η οποία έχει επιλεγεί για να μεγιστοποιεί την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας για το μεγαλύτερο μέρος του έτους (Billy et al., 2019). Η σταθερή γωνία εγκατάστασης προσαρμόζεται συχνά με βάση τη γεωγραφική θέση της εγκατάστασης, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη αποδοτικότητα κατά τη διάρκεια του έτους.

Αν και οι σταθερές βάσεις είναι απλές και αξιόπιστες, δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις ημερήσιες μεταβολές της γωνίας του ήλιου, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την αποδοτικότητα του συστήματος κατά τις ώρες της ημέρας όπου ο ήλιος βρίσκεται σε χαμηλή γωνία. Αυτού του είδους οι βάσεις είναι ιδανικές για περιοχές με σταθερή ηλιοφάνεια και χωρίς μεγάλες κλιματικές μεταβολές (Marques Lameirinhas et al., 2022).

Βάσεις με Ιχνηλάτηση του Ήλιου

Οι βάσεις με ιχνηλάτηση του ήλιου χρησιμοποιούν μηχανισμούς που επιτρέπουν στα Φ/Β πλαίσια να κινούνται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ακολουθώντας την πορεία του ήλιου. Αυτό το είδος στήριξης είναι σχεδιασμένο για να αυξάνει την αποδοτικότητα των Φ/Β συστημάτων, καθώς τα πλαίσια διατηρούνται πάντα σε γωνία που μεγιστοποιεί την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (Duffie & Beckman, 2013).

Τα συστήματα ιχνηλάτησης διακρίνονται σε μονοαξονικά και διαξονικά. Τα μονοαξονικά συστήματα περιστρέφουν τα πλαίσια γύρω από έναν οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα, ενώ τα διαξονικά συστήματα επιτρέπουν την περιστροφή γύρω από δύο άξονες, επιτυγχάνοντας έτσι ακριβέστερη παρακολούθηση της πορείας του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και του έτους (Billy et al., 2019).

Η χρήση βάσεων με ιχνηλάτηση μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα του συστήματος κατά 10% έως 30% σε σύγκριση με τις σταθερές βάσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά προσθέτουν επιπλέον κόστος και πολυπλοκότητα στην εγκατάσταση και συντήρηση, καθιστώντας τα λιγότερο ελκυστικά για μικρότερες εγκαταστάσεις ή περιοχές με χαμηλή ηλιοφάνεια (Awasthi et al., 2020).

Βάσεις Ενσωματωμένες σε Κτίρια

Σε αστικές περιοχές, όπου η διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων είναι περιορισμένη, οι βάσεις ενσωματωμένες σε κτίρια αποτελούν μια ιδανική λύση. Αυτές οι βάσεις μπορούν να ενσωματωθούν στις στέγες ή τις προσόψεις των κτιρίων, καθιστώντας τα Φ/Β πλαίσια μέρος του αρχιτεκτονικού σχεδίου και συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση χώρου και υλικών (Kalogirou, 2023).

Η ενσωμάτωση Φ/Β πλαισίων στα κτίρια (Building-Integrated Photovoltaics, BIPV) προσφέρει πολλαπλά οφέλη, όπως η μείωση του ενεργειακού κόστους και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Παράλληλα, η αισθητική ενσωμάτωση των πλαισίων στο κτίριο μπορεί να προσδώσει αρχιτεκτονική αξία, ενώ η χρήση των πλαισίων ως δομικό στοιχείο μπορεί να μειώσει το κόστος των υλικών κατασκευής (Saretta et al., 2019).

Ωστόσο, η εγκατάσταση βάσεων BIPV απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και συντονισμό με τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία του κτιρίου, καθώς και εξειδικευμένες γνώσεις για τη σωστή εγκατάσταση και συντήρηση των πλαισίων. Η απόδοση των συστημάτων αυτών εξαρτάται επίσης από την τοποθεσία του κτιρίου, τη γωνία κλίσης της στέγης και την έκθεση στον ήλιο (Green, 2009).

Επιλογή του Κατάλληλου Συστήματος Στήριξης

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος στήριξης για ένα Φ/Β πλαίσιο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωγραφική θέση, οι κλιματικές συνθήκες, και οι συγκεκριμένες απαιτήσεις του έργου. Οι σταθερές βάσεις είναι κατάλληλες για περιοχές με σταθερή και έντονη ηλιοφάνεια, όπου οι κλιματολογικές συνθήκες δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές (Billy et al., 2019). Αντίθετα, τα συστήματα με ιχνηλάτηση του ήλιου προσφέρουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε περιοχές με μεταβλητές κλιματικές συνθήκες, αλλά απαιτούν μεγαλύτερη επένδυση σε εξοπλισμό και συντήρηση.

Οι βάσεις ενσωματωμένες σε κτίρια είναι ιδανικές για αστικές περιοχές, όπου η διαθέσιμη επιφάνεια είναι περιορισμένη και η ενσωμάτωση των Φ/Β πλαισίων στο κτίριο μπορεί να προσφέρει επιπλέον οφέλη σε όρους αισθητικής και ενεργειακής απόδοσης (Saretta et al., 2019). Η σωστή εγκατάσταση και συντήρηση των συστημάτων στήριξης είναι απαραίτητες για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας απόδοσης και της ασφάλειας του Φ/Β συστήματος.

Η σωστή τοποθέτηση και στήριξη των Φ/Β πλαισίων είναι κρίσιμη για τη βέλτιστη απόδοση και τη μακροχρόνια αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ανάγκη αλλαγής της θέσης του πλαισίου, καθώς και η επιλογή του κατάλληλου συστήματος στήριξης, εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση, τις κλιματικές συνθήκες, και τις ειδικές απαιτήσεις κάθε έργου. Οι σταθερές βάσεις, οι βάσεις με ιχνηλάτηση του ήλιου και οι βάσεις ενσωματωμένες σε κτίρια προσφέρουν διαφορετικές λύσεις για τη μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών αναμένεται να βελτιώσει ακόμη περισσότερο την απόδοση και την εφαρμογή των Φ/Β συστημάτων στο μέλλον.

3. Net Metering και Zero Feed-In

Τα συστήματα Net Metering και Zero Feed-In είναι δύο δημοφιλείς μέθοδοι διαχείρισης της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά συστήματα. Και οι δύο προσεγγίσεις επιτρέπουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά διαφέρουν στη διαχείριση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται. Το Net Metering προσφέρει τη δυνατότητα στους καταναλωτές να συμψηφίζουν την ενέργεια που παράγουν με την ενέργεια που καταναλώνουν, ενώ το Zero Feed-In αποσκοπεί στην αποτροπή της επιστροφής της περίσσειας ενέργειας στο δίκτυο, εστιάζοντας στην αυτοκατανάλωση και στην ενεργειακή ανεξαρτησία.

3.1 Net Metering

Το **Net Metering** (συμψηφισμός ενέργειας) είναι ένας μηχανισμός που επιτρέπει στους καταναλωτές που διαθέτουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνήθως φωτοβολταϊκά συστήματα, να συμψηφίζουν την ενέργεια που παράγουν με την ενέργεια που καταναλώνουν από το δίκτυο. Η παραγόμενη ενέργεια που δεν χρησιμοποιείται άμεσα από τον καταναλωτή διοχετεύεται στο δίκτυο και αποθηκεύεται ουσιαστικά για μελλοντική χρήση. Σε περιόδους που η παραγωγή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση, η περίσσεια ενέργεια "δανείζεται" στο δίκτυο. Σε περιόδους με μειωμένη παραγωγή, όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συννεφιασμένες μέρες, ο καταναλωτής μπορεί να "ανακτήσει" την ενέργεια που διοχέτευσε προηγουμένως στο δίκτυο.

3.1.1 Οφέλη του Net Metering

- **Μείωση κόστους:** Το Net Metering μειώνει σημαντικά τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς οι καταναλωτές πληρώνουν μόνο για την καθαρή ενέργεια που καταναλώνουν (κατανάλωση μείον παραγωγή).
- **Στήριξη του δικτύου:** Η ενέργεια που εγχέεται στο δίκτυο μπορεί να συμβάλει στη σταθεροποίηση του δικτύου, ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένη ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- **Προώθηση της χρήσης ΑΠΕ:** Ο μηχανισμός Net Metering είναι μια πολιτική που προωθεί την ευρύτερη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κάνοντας τα φωτοβολταϊκά πιο προσιτά και οικονομικά ελκυστικά για τους καταναλωτές.

3.1.2 Προκλήσεις του Net Metering

Παρά τα πλεονεκτήματα του, το Net Metering μπορεί να δημιουργήσει επιπρόσθετα προβλήματα στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως αναφέρεται στο άρθρο των Paspatis et al. (2024), η έγχυση ενέργειας στο δίκτυο μπορεί να επιβαρύνει τους μετασχηματιστές και τα συστήματα προστασίας των υποσταθμών. Επιπλέον, η μαζική εισαγωγή ΑΠΕ μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διαχείρισης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που το δίκτυο δεν είναι προετοιμασμένο για τέτοιες αυξημένες ροές ενέργειας.

3.2 Zero Feed-In

Το **Zero Feed-In** αποτελεί μια πιο αυστηρή προσέγγιση για τη διαχείριση της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά συστήματα. Στο σύστημα αυτό, η περίσσεια ενέργεια δεν επιστρέφεται στο δίκτυο, αλλά είτε καταναλώνεται επιτόπου σε πρόσθετα φορτία, είτε απορρίπτεται, είτε αποθηκεύεται σε μπαταρίες. Η στρατηγική αυτή έχει ως στόχο να αποτρέψει την έγχυση ενέργειας στο δημόσιο δίκτυο και να αυξήσει την ενεργειακή αυτονομία των καταναλωτών.

3.2.1 Οφέλη του Zero Feed-In

- **Μείωση της συμφόρησης του δικτύου:** Αποφεύγεται η συμφόρηση του δικτύου, καθώς δεν επιστρέφεται ενέργεια από την πλευρά του καταναλωτή.
- **Μείωση κόστους:** Σε περιπτώσεις όπου το δίκτυο δεν μπορεί να δεχτεί επιπλέον ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω κορεσμού, το Zero Feed-In σύστημα αποτελεί βιώσιμη λύση, καθώς επιτρέπει, έστω και υπό τον περιορισμό του zero feed-in, τη αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής ενέργειας για τη μείωση του κόστους προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας. Χωρίς τη δυνατότητα του zero feed-in η ηλεκτρική εγκατάσταση θα είχε μηδενική δυνατότητα εγκατάστασης συνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος.
- **Προώθηση της χρήσης ΑΠΕ:** Ο μηχανισμός Zero Feed-In είναι μια πολιτική που προωθεί την ευρύτερη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε εγκαταστάσεις που χωρίς το zero feed-in θα ήταν μη εφικτό.

3.2.2 Προκλήσεις του Zero Feed-In

Ένα από τα βασικά προβλήματα του Zero Feed-In είναι το πρόσθετο κόστος που απαιτεί ο ελεγκτής ελέγχου μηδενικής έγχυσης. Για να μπορέσει το αξιοποιηθεί η περίσσεια ενέργειας και να μην απορριφθεί απαιτείται η εγκατάσταση συσσωρευτών, κάτι που αυξάνει το αρχικό κόστος της επένδυσης. Επίσης, η αποδοτικότητα του συστήματος εξαρτάται από την ικανότητα του χρήστη να καταναλώνει την παραγόμενη ενέργεια τις ώρες παραγωγής.

Σύμφωνα με το άρθρο των Sánchez-Jiménez et al. (2023), η αποθήκευση ενέργειας σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως τα ελαιοτριβεία, επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης και τη μείωση των λειτουργικών εξόδων, ενώ συμβάλλει στην αποφυγή της έγχυσης πλεονάζουσας ενέργειας στο δίκτυο. Αυτό είναι ιδανικό για εφαρμογές Zero Feed-In, όπου η ενέργεια πρέπει να καταναλώνεται ή να αποθηκεύεται τοπικά .

3.3 Σύγκριση των δύο συστημάτων

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι η διαχείριση της πλεονάζουσας ενέργειας. Στο Net Metering, η ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο και ο καταναλωτής αποζημιώνεται μέσω συμψηφισμού για την πλεονάζουσα παραγωγή. Στο Zero Feed-In, η ενέργεια καταναλώνεται ή αποθηκεύεται επιτόπου, χωρίς να υπάρχει επιστροφή ενέργειας στο δίκτυο.

3.3.1 Κριτήρια σύγκρισης

1. **Οικονομικά οφέλη:** Το Net Metering προσφέρει άμεσο οικονομικό όφελος μέσω του συμψηφισμού, ενώ το Zero Feed-In προσφέρει οικονομικό όφελος για την ενέργεια που ιδιοκαταναλώνεται ή αποθηκεύεται τοπικά. Συνεπώς, για την ίδια εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκού συστήματος, το net metering αναμένεται να αποδώσει περισσότερο.
2. **Διαχείριση φορτίων:** Το Net Metering είναι ευκολότερο στην εφαρμογή, καθώς δεν απαιτείται άμεση κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας. Στο Zero Feed-In, όμως, ο χρήστης πρέπει να προσαρμόζει την κατανάλωσή του στις ώρες παραγωγής ή να διαθέτει αποθήκευση ενέργειας για να μειώσει την απορριπτόμενη ενέργεια.

3.4 Νομικό Πλαίσιο

Η εφαρμογή των δύο συστημάτων ποικίλει ανά χώρα, ανάλογα με το κανονιστικό πλαίσιο, καθώς και με τυχόν περιορισμούς του δικτύου. Σε ορισμένες χώρες, το Net Metering είναι ευρέως διαθέσιμο, καθώς επιτρέπει τη διοχέτευση πλεονάζουσας ενέργειας στο δίκτυο. Ωστόσο, η εφαρμογή του περιορίζεται όταν το δίκτυο δεν μπορεί να διαχειριστεί μεγάλες ποσότητες εισερχόμενης ενέργειας, δημιουργώντας προβλήματα συμφόρησης σε υποσταθμούς και συστήματα διανομής. Από την άλλη πλευρά, σε περιοχές με κορεσμένο δίκτυο, το Zero Feed-In προωθείται για να αποτραπεί η περαιτέρω συμφόρηση του συστήματος και να ενισχυθεί η ενεργειακή ανεξαρτησία του καταναλωτή (IEA, 2024).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η οδηγία για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενθαρρύνει τις χώρες να υποστηρίζουν συστήματα όπως το Net Metering, επισημαίνοντας τη σημασία της ενεργειακής απόδοσης και της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στα δίκτυα (European Commission, 2018). Ωστόσο, η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης επηρεάζεται από περιορισμούς του δικτύου, ιδιαίτερα σε χώρες με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το Zero Feed-In κερδίζει έδαφος, καθώς απαιτεί την ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης και εστιάζει στην άμεση κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας εντός της εγκατάστασης, μειώνοντας έτσι την πίεση στο δίκτυο (IEA, 2024).

Το Net Metering και το Zero Feed-In είναι δύο σημαντικές προσεγγίσεις για τη διαχείριση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η επιλογή μεταξύ των δύο εξαρτάται όχι μόνο από τις ανάγκες του καταναλωτή, αλλά και από τους περιορισμούς του δικτύου, το κόστος, και το νομικό πλαίσιο που προωθεί την αειφορία και την αποδοτική χρήση της ενέργειας (Hoppmann et al., 2014).

4. Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος

4.1. Μετρήσεις Φωτοβολταϊκών Πάρκων

Στην παρούσα μελέτη, συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν δεδομένα που αφορούν την παραγωγή ενέργειας από δύο διαφορετικά φωτοβολταϊκά πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ 500 kWp το καθένα. Η ανάλυση καλύπτει ετήσια περίοδο από 1/1/2023 έως 31/12/2023 και περιλαμβάνει δύο τύπους πάρκων: ένα πάρκο με σταθερές βάσεις (Πάρκο ΣΒ) και ένα πάρκο με μεταβλητές βάσεις (Πάρκο ΜΒ). Η ωριαία παραγωγή ενέργειας καταγράφηκε σε MWh.

Τα δεδομένα καταδεικνύουν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ σταθερών βάσεων επιτυγχάνουν υψηλότερες μέγιστες τιμές παραγωγής ενέργειας, ιδίως κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, λόγω της βέλτιστης γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Από την άλλη πλευρά, τα πάνελ με μεταβλητές βάσεις έχουν τη δυνατότητα να ακολουθούν την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουν μεγαλύτερο εμβαδόν καμπύλης ισχύος και, κατ' επέκταση, υψηλότερη συνολική παραγωγή ενέργειας.

Για να γίνει η ανάλυση πιο προσαρμοσμένη στις ανάγκες της βιομηχανικής μονάδας, πραγματοποιήθηκε αναγωγή της παραγωγής ενέργειας για σενάρια με εγκατεστημένη ισχύ 5, 10, 15 και 20 kWp. Αυτή η προσέγγιση δημιούργησε συνολικά οκτώ σενάρια, τα οποία αντιστοιχούν στους δύο τύπους βάσεων (σταθερές και μεταβλητές) για κάθε ένα από τα τέσσερα επίπεδα εγκατεστημένης ισχύος. Τα σενάρια αυτά μας επιτρέπουν να συγκρίνουμε τη συνολική απόδοση των διαφορετικών τύπων βάσεων και να εξετάσουμε την επίδραση της επιλογής διαφορετικών επιπέδων ισχύος στην παραγωγή ενέργειας.

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τη μηνιαία παραγωγή ενέργειας (σε kWp) ανά σενάριο και για τα δύο πάρκα, για τα έτη 2022, 2023, και τον Ιανουάριο του 2024:

Πίνακας 1: Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας (kWh) ανά Σενάριο για Πάρκο ΜΒ

έτος/μήνας	5kWp	10kWp	15kWp	20kWp
2023	Γενικό Αθροισμα 8712,44	Γενικό Αθροισμα 17424,89	Γενικό Αθροισμα 26137,33	Γενικό Αθροισμα 34849,78
1	370,21	740,43	1110,64	1480,85
2	534,15	1068,29	1602,44	2136,59
3	752,79	1505,58	2258,37	3011,15
4	872,37	1744,75	2617,12	3489,50
5	807,41	1614,82	2422,24	3229,65
6	999,45	1998,89	2998,34	3997,78
7	1243,67	2487,34	3731,01	4974,68
8	1114,44	2228,89	3343,33	4457,78
9	574,81	1149,62	1724,43	2299,24
10	630,69	1261,39	1892,08	2522,78
11	430,07	860,15	1290,22	1720,29
12	382,37	764,74	1147,11	1529,48

Πίνακας 2: Μηνιαία Παραγωγή Ενέργειας (kWh) ανά Σενάριο για Πάρκο ΣΒ

Ημερομηνία/έτος/μήνα ς	Αθροισμα από 5kWp	Αθροισμα από 10kWp	Αθροισμα από 15kWp	Αθροισμα από 20kWp
2023	Γενικό Αθροισμα 7509,50	Γενικό Αθροισμα 15019,00	Γενικό Αθροισμα 22528,51	Γενικό Αθροισμα 30038,01
1	409,99	819,98	1229,98	1639,97
2	553,21	1106,42	1659,64	2212,85
3	673,41	1346,82	2020,23	2693,64
4	718,36	1436,71	2155,07	2873,42
5	654,14	1308,28	1962,43	2616,57
6	772,41	1544,82	2317,22	3089,63
7	892,61	1785,22	2677,83	3570,44
8	799,05	1598,11	2397,16	3196,22

9	532,18	1064,36	1596,53	2128,71
10	601,91	1203,82	1805,74	2407,65
11	463,64	927,28	1390,93	1854,57
12	438,59	877,17	1315,76	1754,34

Η ανάλυση της παραγωγής ενέργειας από τα δύο φωτοβολταϊκά πάρκα με βάση τα σενάρια εγκατεστημένης ισχύος (5, 10, 15, και 20 kWp) για την περίοδο Δεκεμβρίου 2022 έως Ιανουαρίου 2024 παρουσιάζει τα εξής βασικά συμπεράσματα:

1. Αύξηση της Παραγωγής με Αύξηση της Εγκατεστημένης Ισχύος:

- ο Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της εγκατεστημένης ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας. Όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς από 5 kWp σε 20 kWp, τόσο αυξάνεται και η συνολική παραγόμενη ενέργεια.
- ο Οι αυξήσεις αυτές είναι προφανείς τόσο για το Πάρκο με Μεταβλητές Βάσεις (MB) όσο και για το Πάρκο με Σταθερές Βάσεις (SB).

2. Εποχικές Διακυμάνσεις στην Παραγωγή:

- ο Τα δεδομένα καταδεικνύουν ότι η παραγωγή ενέργειας ποικίλλει ανά μήνα, επηρεαζόμενη κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία και τις καιρικές συνθήκες κάθε εποχής.

3. Συγκριτική Απόδοση μεταξύ των Πάρκων SB και MB:

- ο Το Πάρκο MB εμφανίζει υψηλότερη συνολική απόδοση, καθώς τα πάνελ με μεταβλητές βάσεις μπορούν να ακολουθούν την πορεία του ήλιου, αξιοποιώντας καλύτερα τις ώρες ηλιακής ακτινοβολίας.
- ο Το Πάρκο SB, ωστόσο, παρουσιάζει υψηλότερη παραγωγή κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, λόγω της σταθερής γωνίας πρόσπτωσης των ακτίνων.

4. Συνολική Παραγωγή κατά τη Διάρκεια της Περιόδου:

- ο Κατά την ανάλυση της περιόδου, το Πάρκο MB υπερτερεί σε συνολική παραγόμενη ενέργεια, κυρίως λόγω της δυνατότητας των πάνελ να προσαρμόζονται τη θέση τους ανάλογα με την πορεία του ήλιου.
- ο Παρόλα αυτά, το Πάρκο SB καταφέρνει να παράγει περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια των μηνών με χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία.

4.2 Καμπύλη Φορτίου Κατανάλωσης

Η μελέτη για την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συστήματος ξεκινά με την ανάλυση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της βιομηχανικής μονάδας κατά τη διάρκεια του έτους. Η διαδικασία αυτή είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των ενεργειακών απαιτήσεων της μονάδας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του Φ/Β συστήματος.

4.2.1 Συλλογή Δεδομένων Χρέωσης Προμήθειας Ενέργειας

Για την εξαγωγή της καμπύλης φορτίου, συλλέχθηκαν δεδομένα χρέωσης προμήθειας από τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας για διάφορες περιόδους μέσα στο έτος. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν την κατανάλωση σε κιλοβατώρες (kWh), τη χρέωση ανά kWh και το συνολικό κόστος για κάθε περίοδο.

Πίνακας 3: Χρεώσεις προμήθειας

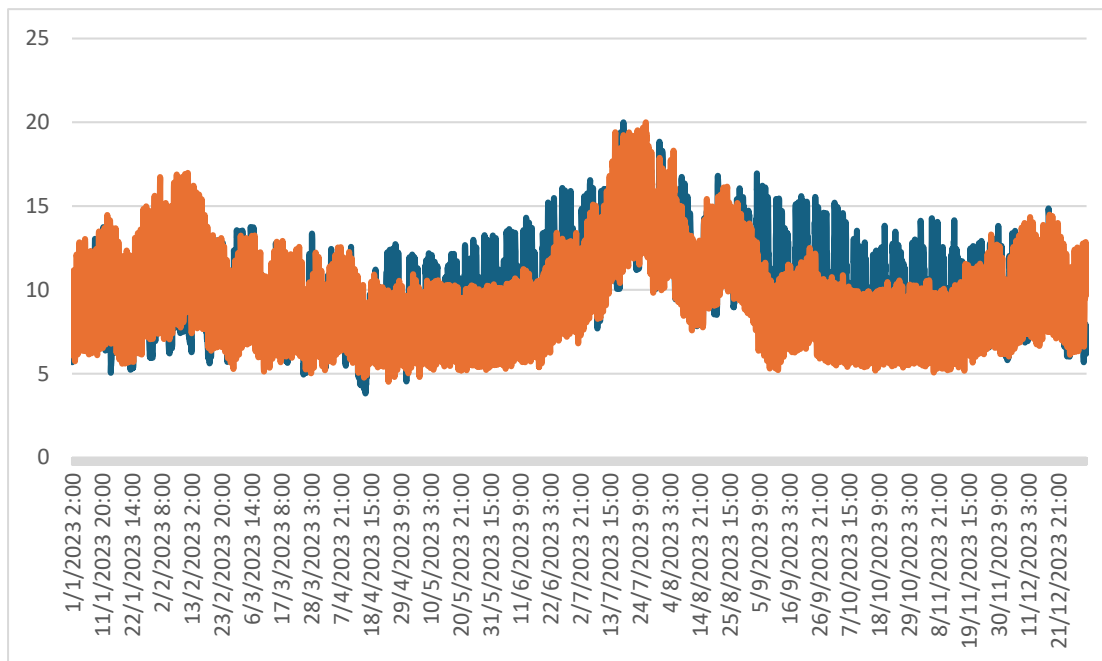
ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ	ΧΡΕΩΣΕΙΣ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑΣ €	ΧΡΕΩΣΗ ΑΝΑ KWh	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑΣ	ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΕΣ ΧΡΕΩΣΕΙΣ ΑΝΑ KWh	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΩΝ ΧΡΕΩΣΕΩΝ
01/01/2023-31/01/2023	328,24	0,4324 20668	141,937760 2	0,072905024	23,930345
01/02/2023-02/03/2023	219,8	0,186	40,8828	0,194472453	42,74504526
03/03/2023-07/06/2023	626,59	0,1665 38779	104,351533 6	0,169571704	106,2519339
08/06/2023-02/09/2023	588,22	0,152	89,40944	0,115097725	67,70278407
03/09/2023-5/09/2023	114,73	0,152	17,43896	0,037279678	4,277097422
26/09/2023-	123,66	0,1629 76311	20,1536506 6	0,036028204	4,455247765

27/10/2023					
28/10/2023-25/11/2023	145,76	0,198652174	28,95554087	0,040316581	5,876544869

Οι χρεώσεις προμήθειας και οι ρυθμιζόμενες χρεώσεις αναλύονται στον πίνακα, με βάση τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας για διαφορετικές περιόδους μέσα στο έτος. Η ανάλυση γίνεται με τις παρακάτω παραμέτρους:

1. **Χρεώσεις Προμήθειας:** Αυτή η στήλη περιέχει τις συνολικές χρεώσεις που επιβλήθηκαν από τον πάροχο ενέργειας για κάθε περίοδο, εκφρασμένες σε ευρώ (€).
2. **Χρέωση προμήθειας ανά kWh:** Η χρέωση αυτή αφορά την τιμή που ο προμηθευτής ενέργειας χρεώνει για κάθε κιλοβατώρα που καταναλώθηκε. Είναι η βασική χρέωση που επιβάλλεται για την καθαρή κατανάλωση ενέργειας, χωρίς να περιλαμβάνει επιπλέον χρεώσεις ή φόρους.
3. **Υπολογισμός συνολικού κόστους προμήθειας:** Υπολογίστηκε το συνολικό κόστος προμήθειας ενέργειας για την κάθε περίοδο. Ο υπολογισμός γίνεται με τον πολλαπλασιασμό της κατανάλωσης με τη χρέωση προμήθειας ανά kWh. Αυτό το κόστος αντιπροσωπεύει την βασική χρέωση για την ενέργεια που καταναλώθηκε.
4. **Συνολικό κόστος ρυθμιζόμενων χρεώσεων:** Ο υπολογισμός γίνεται με τον πολλαπλασιασμό της κατανάλωσης ενέργειας με τις ρυθμιζόμενες χρεώσεις ανά kWh. Αυτό το κόστος αντιπροσωπεύει τις επιβαρύνσεις πέρα από τη βασική χρέωση προμήθειας. Αυτές οι χρεώσεις δεν σχετίζονται με την προμήθεια της καθαρής ενέργειας, αλλά με ρυθμιστικές ή κρατικές χρεώσεις, όπως το κόστος χρήσης δικτύου, φόροι, τέλη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ETMEAP) και άλλες επιβαρύνσεις που συνήθως επιβάλλονται από την πολιτεία ή τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές.
5. **Συνολικό κόστος για κάθε περίοδο:** Υπολογίστηκε το συνολικό κόστος των ρυθμιζόμενων χρεώσεων για κάθε περίοδο.

4.2.2 Ανάλυση των δύο καμπυλών κατανάλωσης (MT/XT) με μέγιστο στα 20kW



Εικόνα 2: Καμπύλες κατανάλωσης (MT/XT) με μέγιστο στα 20Kw

Η παραπάνω γραφική παράσταση δείχνει τις καμπύλες κατανάλωσης για τη μέση τάση (MT) και τη χαμηλή τάση (XT) κατά τη διάρκεια του έτους. Το φορτίο που αναλύεται στις καμπύλες κατανάλωσης προέρχεται από την αναγωγή δεδομένων των καμπυλών κατανάλωσης του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για τη Μέση Τάση (MT) και τη Χαμηλή Τάση (XT). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με μέγιστο φορτίο 20 kW, επιτρέποντας την καταγραφή της ζήτησης ενέργειας για τα διαφορετικά επίπεδα τάσης, τόσο για μικρές όσο και για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις. Η επιλογή αυτού του μέγιστου φορτίου παρέχει τη δυνατότητα να κατανοήσουμε καλύτερα τις διακυμάνσεις στη ζήτηση κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, και να διαχειριστούμε αποτελεσματικότερα την κατανομή της ενέργειας

- **Μπλε γραμμή:** Αντιπροσωπεύει την ωριαία κατανάλωση σε χαμηλή τάση (XT) κατά τη διάρκεια της χρονιάς. Παρατηρείται διακύμανση στην κατανάλωση, με αυξήσεις κυρίως κατά τους θερμότερους μήνες.

- **Πορτοκαλί γραμμή:** Αντιπροσωπεύει την ωριαία κατανάλωση σε μέση τάση (MT). Όπως φαίνεται από την καμπύλη, η κατανάλωση στην MT αυξάνεται κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, πιθανότατα λόγω αυξημένης ζήτησης ενέργειας για ψύξη.

Η καμπύλη καταδεικνύει τις διακυμάνσεις της κατανάλωσης ενέργειας για τις δύο τάσεις, δίνοντας σημαντικές πληροφορίες για την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας σε περιόδους αυξημένης ζήτησης.

Η σύγκριση αυτών των δύο καμπυλών παρέχει πολύτιμα δεδομένα σχετικά με τη συμπεριφορά της κατανάλωσης, ιδιαίτερα σε σχέση με τις ώρες αιχμής και τη συνολική ζήτηση κατά τη διάρκεια του χρόνου.

- Γενικό μοτίβο και διακυμάνσεις

Καταρχάς, παρατηρείται ότι τόσο η καμπύλη της Μέσης Τάσης όσο και της Χαμηλής Τάσης παρουσιάζουν παρόμοιες τάσεις, με περιοδικές αυξομειώσεις. Αυτή η κυκλική συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική της εποχικότητας ή της μεταβολής στη ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας ή και των εβδομάδων.

- Κατανάλωση σε ώρες αιχμής

Οι ώρες αιχμής αποτελούν σημαντικό σημείο ανάλυσης του διαγράμματος. Είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων η ζήτηση ενέργειας αυξάνεται αισθητά και για τις δύο κατηγορίες τάσης.

- Μέση Τάση (MT): Στη Μέση Τάση, η κατανάλωση φαίνεται να πλησιάζει ή να ξεπερνά τα 15-20 kW κατά τις ώρες αιχμής, με μεγάλες αυξομειώσεις σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, όπως φαίνεται στην κορυφή της καμπύλης. Αυτό υποδηλώνει ότι οι καταναλωτές της κατηγορίας MT, όπως μεγάλες επιχειρήσεις και βιομηχανικές μονάδες, έχουν έντονες ενεργειακές απαιτήσεις κατά τις ώρες αυτές, κυρίως λόγω της λειτουργίας μηχανημάτων και άλλων ενεργοβόρων συστημάτων.
- Χαμηλή Τάση (XT): Αν και η καμπύλη της Χαμηλής Τάσης παρουσιάζει πιο ομαλή συμπεριφορά, παρατηρούμε επίσης αύξηση της κατανάλωσης κατά τις ώρες αιχμής, ιδιαίτερα κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες.

- Συγκεκριμένες ώρες αιχμής

Οι ώρες κατά τις οποίες παρατηρείται αυξημένη κατανάλωση ενέργειας εντοπίζονται κυρίως στις πρωινές ώρες, περίπου από τις 8:00 μέχρι τις 12:00, και στις απογευματινές ώρες, περίπου από τις 16:00 μέχρι τις 20:00.

Στη Μέση Τάση, αυτές οι ώρες αιχμής πιθανότατα αντιστοιχούν στη διάρκεια της εργάσιμης ημέρας, όταν οι επιχειρήσεις λειτουργούν στο πλήρες δυναμικό τους, καταναλώνοντας μεγάλες ποσότητες ενέργειας.

Στη Χαμηλή Τάση, οι αυξήσεις αυτές συμπίπτουν με την έναρξη και το τέλος της εργάσιμης ημέρας.

- Διαφορές στη συμπεριφορά κατανάλωσης μεταξύ MT και XT

Παρά το γεγονός ότι και οι δύο καμπύλες ακολουθούν παρόμοιες τάσεις, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά κατανάλωσης μεταξύ των δύο κατηγοριών:

Η κατανάλωση στη Μέση Τάση παρουσιάζει πιο απότομες αυξήσεις και έντονες διακυμάνσεις. Αυτό δείχνει ότι οι βιομηχανικοί καταναλωτές έχουν περισσότερες ενεργειακές ανάγκες σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερες αυξομειώσεις στη ζήτηση.

Αντίθετα, η κατανάλωση στη Χαμηλή Τάση είναι πιο σταθερή, με μικρότερες αυξομειώσεις. Η σταθερότητα αυτή οφείλεται στις λιγότερο έντονες ενεργειακές απαιτήσεις.

- Συμπεριφορά σε περιόδους χαμηλής ζήτησης

Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, όπως αργά το βράδυ ή νωρίς το πρωί, οι καταναλωτές της Χαμηλής Τάσης παρουσιάζουν μια σταθερή, αν και μειωμένη, κατανάλωση. Η κατανάλωση αυτή φαίνεται να είναι υψηλότερη σε σχέση με τη Μέση Τάση, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι βασικές ανάγκες κατανάλωσης παραμένουν σταθερές ανεξάρτητα από την ώρα της ημέρας.

Αντίθετα, στη Μέση Τάση, οι διακυμάνσεις είναι πιο έντονες και η κατανάλωση μειώνεται σημαντικά κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης, καθώς οι βιομηχανικές μονάδες και οι μεγάλες επιχειρήσεις μειώνουν ή διακόπτουν τη λειτουργία τους.

- Βέλτιστη διαχείριση ενέργειας

Η ανάλυση των δεδομένων που παρουσιάζονται στο διάγραμμα μπορεί να δώσει ενδείξεις για το πώς να επιτευχθεί μια πιο βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας τόσο για τους καταναλωτές της Μέσης Τάσης όσο και για τους καταναλωτές της Χαμηλής Τάσης:

- Μέση Τάση (MT): Δεδομένων των μεγάλων διακυμάνσεων στη ζήτηση ενέργειας, οι βιομηχανικοί καταναλωτές μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση ενέργειας αναδιανέμοντας τη ζήτηση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με τον προγραμματισμό των ενεργοβόρων διαδικασιών σε ώρες μη αιχμής, συμβάλλοντας στη μείωση των αιχμών κατανάλωσης και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα της ενέργειας.
- Χαμηλή Τάση (XT): Αν και η κατανάλωση είναι πιο σταθερή σε σχέση με τη Μέση Τάση, τα νοικοκυριά και οι μικρές επιχειρήσεις θα μπορούσαν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας κατά τις απογευματινές ώρες αιχμής. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση της συνολικής ζήτησης ενέργειας, βελτιώνοντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Το διάγραμμα καταδεικνύει ότι οι ώρες αιχμής παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και για τις δύο κατηγορίες τάσης. Οι καταναλωτές της Μέσης Τάσης παρουσιάζουν μεγαλύτερες αυξομειώσεις, με απότομες κορυφές κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, ενώ η κατανάλωση στη Χαμηλή Τάση είναι πιο σταθερή και ομαλή. Αυτή η συμπεριφορά καταδεικνύει την αναγκαιότητα για πιο στρατηγική διαχείριση της ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής, ειδικά για τους βιομηχανικούς καταναλωτές της Μέσης Τάσης.

Συνολικά, η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται έντονα από την ώρα της ημέρας και τις απαιτήσεις των διαφορετικών κατηγοριών καταναλωτών, με τους οικιακούς καταναλωτές να έχουν μικρότερες αυξομειώσεις και τους βιομηχανικούς καταναλωτές να παρουσιάζουν πιο έντονες αυξήσεις κατά τη διάρκεια των εργάσιμων ωρών.

4.2.3 Αναλυτικός υπολογισμός κόστους προμήθειας για κάθε περίοδο

Για να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος προμήθειας ενέργειας για κάθε μήνα, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τα δεδομένα κατανάλωσης και τις χρεώσεις προμήθειας που

αναφέρονται στους πίνακες για τη Μέση και Χαμηλή Τάση. Έτσι, θα υπολογιστεί το συνολικό κόστος ανά περίοδο καταναλωτικής δραστηριότητας.

Μέση Τάση (MT)

Για κάθε μήνα του 2023, το συνολικό κόστος προμήθειας ενέργειας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την κατανάλωση ενέργειας σε κιλοβατώρες (kWh) με την αντίστοιχη χρέωση ανά kWh για τη συγκεκριμένη περίοδο.

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τους πίνακες, για τη Μέση Τάση (MT), ο υπολογισμός του συνολικού κόστους θα έχει ως εξής:

Συνολικό κόστος=Κατανάλωση (kWh)×Χρέωση ανά kWh

Χαμηλή Τάση (XT)

Παρόμοια με τη Μέση Τάση, και για τη Χαμηλή Τάση το συνολικό κόστος προμήθειας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την κατανάλωση σε κιλοβατώρες (kWh) με τη χρέωση ανά kWh που ισχύει για τη συγκεκριμένη περίοδο.

Συνολικό κόστος=Κατανάλωση (kWh)×Χρέωση ανά kWh

4.2.4 Υπολογισμός κόστους προμήθειας ενέργειας για τη Μέση και Χαμηλή Τάση (Χωρίς Φωτοβολταϊκά)

Για να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος προμήθειας ενέργειας για κάθε μήνα του έτους 2023, χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα κατανάλωσης και τις αντίστοιχες χρεώσεις ανά κιλοβατώρα (kWh). Ακολουθούν οι αναλυτικοί υπολογισμοί για τη Μέση Τάση (MT) και τη Χαμηλή Τάση (XT).

Μέση Τάση (MT) - 2023

Για κάθε μήνα, το κόστος προμήθειας υπολογίζεται ως:

Συνολικό κόστος=Κατανάλωση (kWh)×Χρέωση ανά kWh

Πίνακας 4: Κόστος προμήθειας ενέργειας για κάθε μήνα του έτους 2023 στη Μέση Τάση (MT)

Μήνες	Κατανάλωση (kWh)	Χρέωση ανά kWh (€)	Συνολικό Κόστος (€)
Ιανουάριος	6415,723	0,432421	2774,291
Φεβρουάριος	6073,853	0,186	1129,737
Μάρτιος	6584,434	0,166539	1096,564
Απρίλιος	5666,745	0,166539	943,7328
Μάιος	6787,482	0,166539	1130,379
Ιούνιος	7496,567	0,152	1139,478
Ιούλιος	9908,861	0,152	1506,147
Αύγουστος	9102,577	0,152	1383,592
Σεπτέμβριος	8039,869	0,152	1222,06
Οκτώβριος	7461,502	0,162976	1216,048
Νοέμβριος	7269,506	0,198652	1444,103
Δεκέμβριος	7043,771	0,198652	1399,26

Χαμηλή Τάση (XT) - 2023

Παρόμοια με τη Μέση Τάση, για τη Χαμηλή Τάση (XT) υπολογίζουμε το κόστος προμήθειας για κάθε μήνα ως:

Συνολικό κόστος=Κατανάλωση (kWh)×Χρέωση ανά kWh

Πίνακας 5: Κόστος προμήθειας ενέργειας για κάθε μήνα του έτους 2023 στη Χαμηλή Τάση (XT)

Μήνες	Κατανάλωση (kWh)	Χρέωση ανά kWh (€)	Συνολικό Κόστος (€)
Ιανουάριος	7321,931	0,432421	3166,16
Φεβρουάριος	7194,626	0,186	1338,20
Μάρτιος	6546,467	0,166539	1090,24
Απρίλιος	5636,154	0,166539	938,64

Μάιος	5840,38	0,166539	972,65
Ιούνιος	6409,25	0,152	974,21
Ιούλιος	10343,97	0,152	1572,28
Αύγουστος	9312,855	0,152	1415,55
Σεπτέμβριος	6488,125	0,152	986,19
Οκτώβριος	5831,862	0,162976	950,45
Νοέμβριος	6074,417	0,198652	1206,70
Δεκέμβριος	7389,212	0,198652	1467,88

4.3 Οικονομική Ανάλυση της Περίσσειας Ενέργειας

Η ανάλυση της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β) πραγματοποιήθηκε σε ωριαίο επίπεδο για να εξασφαλιστεί η ακριβής εκτίμηση της περίσσειας ενέργειας κατά την κάθε ώρα. Ωστόσο, για λόγους ευκολίας παρουσίασης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων, οι ωριαίες μετρήσεις συνδυάστηκαν και εκφράστηκαν συνολικά ανά μήνα. Αυτό επιτρέπει την ανάλυση των δεδομένων με τρόπο που διατηρεί την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει την κατανόηση και τη διαχείριση των μεγάλων όγκων δεδομένων. Η περίσσεια ορίζεται ως η διαφορά της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β με την καταναλισκόμενη ενέργεια, όταν η παραγόμενη ενέργεια υπερβαίνει την κατανάλωση.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

1. **Καθορισμός Παραγωγής Ανά Ώρα:** Χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα παραγωγής ενέργειας από τα Φ/Β πάρκα ΣΒ και ΜΒ, για διαφορετικά σενάρια εγκατεστημένης ισχύος (5, 10, 15, και 20 kWp). Η παραγωγή αναλύθηκε ανά ώρα για κάθε ημέρα και στη συνέχεια συνοψίστηκε ανά μήνα, ώστε να διευκολυνθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων.
2. **Καθορισμός Κατανάλωσης Ανά Ώρα:** Τα δεδομένα κατανάλωσης καταγράφηκαν ανά ώρα για όλο το έτος. Η συνολική κατανάλωση για κάθε μήνα προέκυψε από το άθροισμα των ωριαίων τιμών κατανάλωσης, αλλά η

ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση ωριαία δεδομένα για να διασφαλιστεί η ακρίβεια.

3. **Υπολογισμός Περίσσειας Ανά Ώρα:** Για κάθε ώρα του 2023, η περίσσεια ενέργειας υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ της ωριαίας παραγωγής από τα Φ/Β και της ωριαίας κατανάλωσης. Σε περιπτώσεις όπου η παραγωγή υπερέβαινε την κατανάλωση, η περίσσεια καταγράφηκε.
4. **Συνδυασμός Δεδομένων για Υπολογισμό Περίσσειας:** Τα ωριαία δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης συνδυάστηκαν για κάθε μήνα του 2023. Με αυτόν τον τρόπο, η περίσσεια ενέργειας υπολογίστηκε ωριαία και στη συνέχεια συνοψίστηκε για τον κάθε μήνα. Η ανάλυση αυτή επέτρεψε να εξαχθούν ακριβή μηνιαία sums, αφού όμως πρώτα υπολογίστηκαν οι ωριαίες διαφορές.

4.3.1 Φωτοβολταϊκό Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) (μέση τάση (MV) και χαμηλή τάση (LV))

Το φωτοβολταϊκό πάρκο σταθερών βάσεων (ΣΒ), το οποίο αναλύεται εδώ, αφορά εγκαταστάσεις που λειτουργούν τόσο σε μέση τάση (MV) όσο και σε χαμηλή τάση (LV). Οι σταθερές βάσεις προσφέρουν πλεονεκτήματα, όπως η απλότητα της κατασκευής και το μικρότερο κόστος συντήρησης. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορούν να προσαρμοστούν στην κίνηση του ήλιου, περιορίζοντας έτσι την απόδοσή τους σε σύγκριση με τα συστήματα με μεταβλητές βάσεις.

1. Ανάλυση για το Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) σε Μέση Τάση (MV)

Για το φωτοβολταϊκό πάρκο που λειτουργεί σε μέση τάση, η ανάλυση έγινε με χρήση **ωριαίων δεδομένων παραγωγής και κατανάλωσης** για κάθε μήνα του 2023. Η περίσσεια ενέργειας υπολογίστηκε σε ωριαία βάση και στη συνέχεια συνοψίστηκε για κάθε μήνα. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν διαφορές στην περίσσεια ενέργειας ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ:

- **Σενάριο 5 kWp:** Σε κανέναν μήνα του 2023 δεν καταγράφηκε περίσσεια ενέργειας. Αυτό δείχνει ότι το σύστημα των 5 kWp κάλυψε ακριβώς τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης σε ωριαία βάση, χωρίς να παράγει επιπλέον ενέργεια.

- **Σενάριο 10 kWp:** Η συνολική περίσσεια ενέργειας για το έτος ήταν **131,724 kWh**. Η μεγαλύτερη περίσσεια καταγράφηκε τον Απρίλιο με **68,119 kWh**, ενώ η παραγωγή μειώθηκε σε μήνες με λιγότερη ηλιοφάνεια. Τα δεδομένα δείχνουν μια **ωριαία** παραγωγή που υπερέβαινε την κατανάλωση κατά τη διάρκεια των μεσημβρινών ωρών σε μήνες με υψηλότερη ηλιοφάνεια.
- **Σενάριο 15 kWp:** Η συνολική περίσσεια ενέργειας έφτασε τις **1.000,264 kWh**. Ο Απρίλιος παρήγαγε τη μεγαλύτερη ποσότητα περίσσειας ενέργειας με **359,501 kWh**. Οι ωριαίες αναλύσεις δείχνουν ότι κατά τους μήνες της άνοιξης και του καλοκαιριού, το σύστημα παρήγαγε αρκετή επιπλέον ενέργεια κατά τις ώρες αιχμής της ηλιοφάνειας.
- **Σενάριο 20 kWp:** Η μεγαλύτερη περίσσεια ενέργειας καταγράφηκε στο σενάριο των 20 kWp, με συνολική παραγωγή **3.475,354 kWh** για το έτος. Τον Απρίλιο, η περίσσεια ενέργειας έφτασε τις **850,851 kWh**. Η ωριαία ανάλυση δείχνει ότι κατά τις ώρες υψηλής ηλιοφάνειας, το σύστημα παρήγαγε πολύ περισσότερη ενέργεια από ό,τι καταναλωνόταν, ειδικά στους μήνες με αυξημένη ηλιοφάνεια.

Πίνακας 6: Περίσσεια για το Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) σε Μέση Τάση (MV)

MV_2023 _ΠΑΡΚΟ _ΣΒ	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣ ΕΙΑ 5kWp_ΣΒ	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣ ΕΙΑ 10kWp_ΣΒ	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣ ΕΙΑ 15kWp_ΣΒ	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣ ΕΙΑ 20kWp_ΣΒ
2023	0	131,724278	1000,264276	3475,354336
1	0	4,243551329	61,85920241	222,7580494
2	0	13,20488003	147,5485882	474,2443772
3	0	34,91880035	201,228188	567,3025637
4	0	68,11859462	359,5013574	850,8505052
5	0	11,23845168	87,3653788	356,2004578
6	0	0	19,74432573	203,0726248
7	0	0	10,99371945	116,1802242
8	0	0	10,05166364	110,3443231

9	0	0	6,462777524	78,55106331
10	0	0	40,65514166	239,4999278
11	0	0	7,812237972	81,01594353
12	0	0	47,0416948	175,3342763
Γενικό Άθροισμα	0	131,724278	1000,264276	3475,354336

2. Ανάλυση για το Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) σε Χαμηλή Τάση (LV)

Στη χαμηλή τάση (LV), η παραγωγή περίσσειας ενέργειας είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη μέση τάση. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας **ωριαία δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης** για κάθε μήνα του 2023. Η περίσσεια ενέργειας υπολογίστηκε σε ωριαία βάση και τα δεδομένα συνοψίστηκαν ανά μήνα για να απεικονιστούν οι ετήσιες διακυμάνσεις. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

- **Σενάριο 5 kWp:** Δεν καταγράφηκε καμία περίσσεια ενέργειας σε καμία ώρα του 2023. Αυτό δείχνει ότι το σύστημα των 5 kWp παρήγαγε μόνο την ενέργεια που ήταν απαραίτητη για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης, χωρίς να υπάρχει επιπλέον παραγωγή ενέργειας.
- **Σενάριο 10 kWp:** Η συνολική περίσσεια ενέργειας για το έτος ανήλθε σε **23,990 kWh**. Η μεγαλύτερη περίσσεια καταγράφηκε τον Απρίλιο με **20,189 kWh**, κυρίως κατά τις μεσημβρινές ώρες με υψηλή ηλιοφάνεια. Λόγω της χαμηλότερης τάσης, η περίσσεια ενέργειας περιορίζεται περισσότερο σε μήνες με μικρότερη ηλιοφάνεια.
- **Σενάριο 15 kWp:** Η συνολική περίσσεια ενέργειας ανήλθε σε **935,013 kWh** για το έτος. Ο Απρίλιος ήταν ο μήνας με τη μεγαλύτερη παραγωγή περίσσειας ενέργειας, φτάνοντας τις **326,944 kWh**. Η ωριαία ανάλυση έδειξε ότι, όπως και στη μέση τάση, η περίσσεια ενέργειας ήταν πιο έντονη κατά τους μήνες με αυξημένη ηλιοφάνεια.
- **Σενάριο 20 kWp:** Η συνολική περίσσεια ενέργειας ανήλθε σε **3.873,780 kWh** για το έτος. Η μεγαλύτερη περίσσεια ενέργειας καταγράφηκε τον Απρίλιο με **829,896 kWh**, αλλά γενικά η παραγωγή περίσσειας ενέργειας στη χαμηλή τάση ήταν μικρότερη από αυτή της μέσης τάσης. Αυτό οφείλεται στους τεχνικούς

περιορισμούς που συνοδεύουν τη χαμηλή τάση, καθώς και στη μικρότερη αποδοτικότητα σε σχέση με τα συστήματα μέσης τάσης.

Πίνακας 7: Περίσσεια για το Πάρκο Σταθερών Βάσεων (ΣΒ) σε Χαμηλή Τάση (LV)

Ημερο μηνία	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕ ΙΑ 5kWp_ΣΒ	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕΙ Α 10kWp_ΣΒ	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕΙ Α 15kWp_ΣΒ	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕΙ Α 20kWp_ΣΒ
2023	0	23,99032832	935,0132838	3873,780112
1	0	0	3,564544107	119,1153429
2	0	0	67,00465185	345,7972563
3	0	2,288397134	188,5234838	578,1713436
4	0	20,18955521	326,9435095	829,895954
5	0	1,51237598	139,8252979	515,2269104
6	0	0	65,39275602	415,2803225
7	0	0	0,183240906	53,26986514
8	0	0	1,493318144	41,78111367
9	0	0	14,26073763	163,2330279
10	0	0	99,25872011	458,861964
11	0	0	28,56302389	238,8902487
12	0	0	0	114,256763
Γενικό Άθροισ μα	0	23,99032832	935,0132838	3873,780112

Η ανάλυση των ωριαίων δεδομένων παραγωγής και κατανάλωσης δείχνει ότι τα συστήματα με μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ (15 και 20 kWp) σε μέση τάση (MV) είναι τα πιο αποδοτικά, καθώς παράγουν τη μεγαλύτερη ποσότητα περίσσειας ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής ηλιοφάνειας. Η μέση τάση προσφέρει σαφώς μεγαλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τη χαμηλή τάση (LV), ιδιαίτερα για συστήματα μεγαλύτερης ισχύος. Οι ωριαίες αναλύσεις επιβεβαιώνουν ότι τα συστήματα 15 και 20 kWp σε MV παρουσιάζουν σημαντική περίσσεια ενέργειας σε ώρες υψηλής

ηλιοφάνειας, καθιστώντας τα κατάλληλα για επιχειρήσεις που επιθυμούν να παράγουν επιπλέον ενέργεια είτε για πώληση είτε για μελλοντικές ανάγκες.

Αντίθετα, τα μικρότερα συστήματα των 5 kWp, τόσο σε MV όσο και σε LV, δεν καταγράφουν περίσσεια ενέργειας σε καμία ώρα του 2023, καλύπτοντας απλώς τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης χωρίς να παράγουν επιπλέον ενέργεια.

4.3.2 Φωτοβολταϊκό Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (MB) (μέση τάση (MV) και χαμηλή τάση (LV))

Τα φωτοβολταϊκά πάρκα με μεταβλητές βάσεις (MB) έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου, αυξάνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα της παραγωγής ενέργειας. Αν και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τα πάρκα σταθερών βάσεων (ΣΒ), η δυνατότητα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου καθιστά τα συστήματα αυτά πιο αποδοτικά, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια.

Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται σε **ωριαία δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης** για το έτος 2023, ωστόσο, **για λόγους ευκολίας παρουσίασης**, τα αποτελέσματα συνοψίζονται ανά μήνα. Η ανάλυση εξετάζει τα αποτελέσματα για διαφορετικά σενάρια εγκατεστημένης ισχύος (5, 10, 15, 20 kWp) σε μέση τάση (MV) και χαμηλή τάση (LV).

1. Ανάλυση για το Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (MB) σε Μέση Τάση (MV)

Η ανάλυση των ωριαίων δεδομένων δείχνει ότι τα φωτοβολταϊκά πάρκα με μεταβλητές βάσεις σε μέση τάση έχουν σημαντική παραγωγή περίσσειας ενέργειας, ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ:

- **Σενάριο 5 kWp:** Δεν καταγράφηκε καμία περίσσεια ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους. Η παραγωγή καλύπτει μόνο τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης, χωρίς να υπάρχει επιπλέον ενέργεια.
- **Σενάριο 10 kWp:** Η συνολική περίσσεια ενέργειας για το έτος ανήλθε σε **166,501 kWh**. Τον Απρίλιο καταγράφηκε η μεγαλύτερη περίσσεια ενέργειας,

φτάνοντας τις **105,227 kWh**. Η ωριαία ανάλυση δείχνει ότι η παραγωγή περίσσειας ενέργειας ξεκινά να εμφανίζεται τους μήνες με αυξημένη ηλιοφάνεια, όπως την άνοιξη.

- **Σενάριο 15 kWp:** Η συνολική περίσσεια ενέργειας για το έτος έφτασε τις **1.128,278 kWh**. Η μεγαλύτερη παραγωγή περίσσειας ενέργειας καταγράφηκε τον Απρίλιο με **536,301 kWh**, όπου οι ώρες υψηλής ηλιοφάνειας συνεισέφεραν στη σημαντική αύξηση της παραγωγής.
- **Σενάριο 20 kWp:** Το σενάριο αυτό κατέγραψε τη μεγαλύτερη περίσσεια ενέργειας, με συνολική παραγωγή **4.219,338 kWh** για το έτος. Τον Απρίλιο, η περίσσεια ενέργειας έφτασε τις **1.213,954 kWh**. Η ωριαία ανάλυση δείχνει ότι η παραγωγή περίσσειας ενέργειας ήταν σταθερά υψηλή κατά τους μήνες με αυξημένη ηλιοφάνεια, ειδικά την άνοιξη.

Πίνακας 8: Περίσσεια για το Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (MB) σε Μέση Τάση (MV)

MV_2023 ΠΑΡΚΟ _MB	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣ ΕΙΑ 5kWp_MB	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣΕ ΙΑ 10kWp_MB	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣΕ ΙΑ 15kWp_MB	Άθροισμα από MV_ΠΕΡΙΣΣΕ ΙΑ 20kWp_MB
2023	0	166,50063	1128,278241	4219,33786
1	0	0	16,71694104	87,00209163
2	0	2,92369538	73,22983775	299,7032745
3	0	39,11235714	211,3373331	641,9101771
4	0	105,2268734	536,3011686	1213,95388
5	0	19,23770403	160,320769	623,185302
6	0	0	51,61524239	461,526239
7	0	0	24,4105751	249,4084964
8	0	0	27,63128705	275,8561026
9	0	0	11,69386403	134,5909601
10	0	0	12,31707198	167,6444773
11	0	0	0	6,212837971
12	0	0	2,704150432	58,34402101

Γενικό Αθροισμ α	0	166,50063	1128,278241	4219,33786
---------------------------------	----------	------------------	--------------------	-------------------

2. Ανάλυση για το Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (MB) σε Χαμηλή Τάση (LV)

Για το φωτοβολταϊκό πάρκο σε χαμηλή τάση, η παραγωγή περίσσειας ενέργειας ήταν περιορισμένη σε σύγκριση με τη μέση τάση. Η ανάλυση βασίστηκε σε ωριαία δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης για το έτος 2023, αλλά για λόγους ευκολίας παρουσίασης, τα αποτελέσματα συνοψίζονται ανά μήνα. Τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Σενάριο 5 kWp: Δεν καταγράφηκε καμία περίσσεια ενέργειας, παρόμοια με το σενάριο σε μέση τάση, καθώς η παραγωγή κάλυπτε μόνο τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης.
- Σενάριο 10 kWp: Η συνολική περίσσεια ενέργειας για το έτος ανήλθε σε 28,613 kWh. Ο Απρίλιος ήταν ο πιο παραγωγικός μήνας, με 25,998 kWh, γεγονός που δείχνει ότι η περίσσεια ενέργειας αρχίζει να εμφανίζεται κυρίως την άνοιξη με αυξημένη ηλιοφάνεια.
- Σενάριο 15 kWp: Η συνολική περίσσεια ενέργειας για το έτος ήταν 1.181,891 kWh, με τη μεγαλύτερη παραγωγή να καταγράφεται τον Απρίλιο με 491,134 kWh. Σε αυτό το σενάριο, η ωριαία ανάλυση δείχνει ότι τα συστήματα μεγαλύτερης ισχύος σε χαμηλή τάση αρχίζουν να παράγουν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες περίσσειας ενέργειας.
- Σενάριο 20 kWp: Η συνολική περίσσεια ενέργειας για το έτος έφτασε τις 4.768,703 kWh, με τον Απρίλιο να καταγράφει την μεγαλύτερη παραγωγή με 1.185,042 kWh. Ακόμα και σε χαμηλή τάση, τα συστήματα με ισχύ 20 kWp παράγουν σημαντική περίσσεια ενέργειας, ειδικά κατά τους μήνες με αυξημένη ηλιοφάνεια.

Πίνακας 9: Περίσσεια για το Πάρκο Μεταβλητών Βάσεων (MB) σε Χαμηλή Τάση (LV)

LV_202 3 ΠΑΡΚΟ _MB	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕ ΙΑ 5kWp_MB	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕΙ Α 10kWp_MB	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕΙ Α 15kWp_MB	Άθροισμα από LV_ΠΕΡΙΣΣΕΙ Α 20kWp_MB
2023	0	28,61255879	1181,891357	4768,702678
1	0	0	0	3,970819863
2	0	0	7,508520303	184,8993688
3	0	0,785195572	197,2111471	681,9954001
4	0	25,99750204	491,1341081	1185,042049
5	0	1,801920462	265,8200345	838,133302
6	0	0,027940719	155,3086632	795,243761
7	0	0	0,648409642	126,8622511
8	0	0	1,546667497	151,2815232
9	0	0	21,28074271	266,132367
10	0	0	40,61190438	423,6044933
11	0	0	0,821159518	106,4283516
12	0	0	0	5,108991298
Γενικό Άθροισ μα	0	28,61255879	1181,891357	4768,702678

Η ανάλυση των δεδομένων, τα οποία εξήχθησαν με βάση ωριαίους υπολογισμούς παραγωγής και κατανάλωσης για το έτος 2023, δείχνει ότι τα συστήματα με μεγαλύτερη ισχύ (15 και 20 kWp) σε μέση τάση (MV) είναι τα πιο αποδοτικά, παράγοντας τη μεγαλύτερη περίσσεια ενέργειας. Η ανάλυση έγινε **ώρα-ώρα**, και τα δεδομένα συνοψίστηκαν ανά μήνα για λόγους ευκολίας.

Το φωτοβολταϊκό πάρκο με μεταβλητές βάσεις (MB) αποδεικνύεται πιο αποδοτικό σε σύγκριση με το πάρκο με σταθερές βάσεις (ΣΒ), ειδικά για εγκαταστάσεις υψηλότερης ισχύος. Αυτό οφείλεται στην ικανότητά τους να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου και να βελτιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, στη χαμηλή τάση (LV), η παραγωγή περίσσειας ενέργειας ήταν σημαντικά χαμηλότερη

σε σχέση με τη μέση τάση (MV), κάτι που περιορίζει την αποδοτικότητα των συστημάτων αυτών σε περιβάλλοντα χαμηλής τάσης.

Οι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις ισχύος σε μέση τάση (MV) αποτελούν την καλύτερη επιλογή για επιχειρήσεις που επιδιώκουν να παράγουν σημαντική ποσότητα επιπλέον ενέργειας για χρήση ή πώληση. Τα αποτελέσματα αυτά βασίζονται σε υπολογισμούς που έγιναν αναλυτικά ανά ώρα, προκειμένου να εξαχθεί μια ακριβής εικόνα της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων.

Κριτήρια Επιλογής

- **Ενεργειακή Απόδοση:** Η ενεργειακή απόδοση αποτελεί βασικό παράγοντα για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος. Τα φωτοβολταϊκά πάρκα με μεταβλητές βάσεις (MB) εμφανίζουν σημαντική υπεροχή στην παραγωγή περίσσειας ενέργειας, ιδιαίτερα στα μεγαλύτερα σενάρια εγκατάστασης (15 και 20 kWp). Αυτή η υπεροχή προκύπτει από την ικανότητα των συστημάτων να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου, αυξάνοντας τη συνολική απόδοση της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, σε μέση τάση (MV), το πάρκο MB με εγκατεστημένη ισχύ 20 kWp παράγαγε συνολικά 4.219,338 kWh περίσσειας ενέργειας για το έτος 2023, σύμφωνα με ωριαία ανάλυση της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή η απόδοση υπερβαίνει σημαντικά το αντίστοιχο πάρκο σταθερών βάσεων, το οποίο παράγαγε 3.475,354 kWh κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.
- **Επένδυση και Συντήρηση:** Τα πάρκα σταθερών βάσεων (ΣΒ) παρουσιάζουν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης σε σύγκριση με τα πάρκα MB. Η απλότητα του σχεδιασμού και η σταθερή γωνία των πάνελ μειώνουν τις απαιτήσεις συντήρησης. Αν και τα πάρκα MB προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης είναι αυξημένο λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων που επιτρέπουν την κίνηση των πάνελ. Για επιχειρήσεις με περιορισμένο προϋπολογισμό, τα πάρκα ΣΒ αποτελούν μια βιώσιμη επιλογή, ειδικά για σενάρια μικρότερης ισχύος, όπως τα 5 και 10 kWp. Αυτά τα στοιχεία προκύπτουν από αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ωριαία βάση για την παραγωγή και τη συντήρηση του συστήματος.
- **Απαιτήσεις Παραγωγής Ενέργειας:** Σε περιπτώσεις όπου η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών είναι κρίσιμη και η παραγωγή περίσσειας ενέργειας

επιθυμητή, τα σενάρια των 15 και 20 kWp σε μέση τάση (MV) με μεταβλητές βάσεις αποτελούν τις πιο αποδοτικές επιλογές. Τα ωριαία δεδομένα δείχνουν ότι το πάρκο MB με ισχύ 20 kWp σε MV επιτυγχάνει τη μέγιστη απόδοση, παράγοντας 4.219,338 kWh περίσσειας ενέργειας για το έτος 2023, ενώ το πάρκο με ισχύ 15 kWp παράγει 1.128,278 kWh. Αυτή η περίσσεια ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά τους μήνες με αυξημένη ηλιοφάνεια, γεγονός που καθιστά αυτά τα συστήματα ιδανικά για επιχειρήσεις με αυξημένες ενεργειακές ανάγκες. Η ανάλυση έγινε ωριαία για όλο το έτος, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη ακρίβεια στους υπολογισμούς.

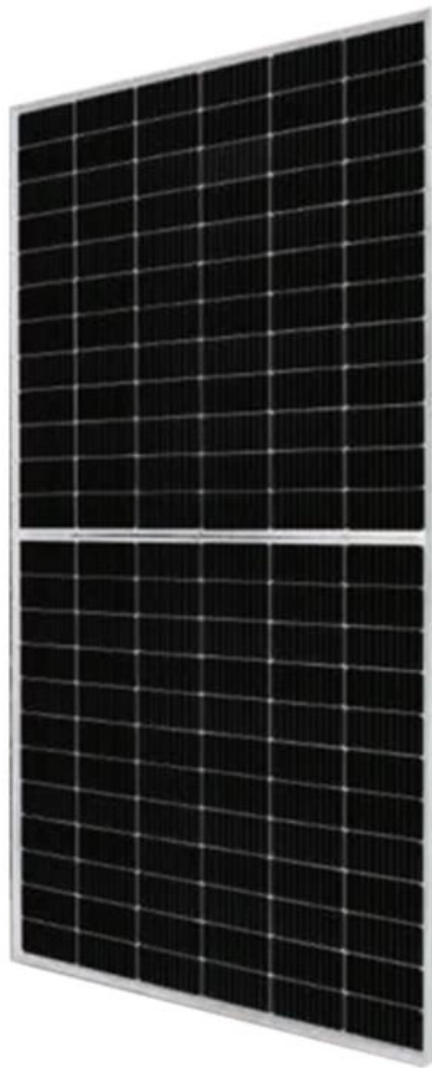
- Βάσει των παραπάνω κριτηρίων, το καταλληλότερο σενάριο εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες της εγκατάστασης. Για τη μέγιστη απόδοση, το σενάριο των 20 kWp σε μέση τάση (MV) με μεταβλητές βάσεις προσφέρει τη μεγαλύτερη παραγωγή περίσσειας ενέργειας και είναι ιδανικό για επιχειρήσεις με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Εάν απαιτείται ένας συμβιβασμός μεταξύ απόδοσης και κόστους, το σενάριο των 15 kWp σε MV με μεταβλητές βάσεις προσφέρει ικανοποιητική περίσσεια ενέργειας με χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Τέλος, για περιορισμένο προϋπολογισμό, το σενάριο των 10 kWp σε MV με σταθερές βάσεις είναι οικονομικά αποδοτικό, προσφέροντας ικανοποιητική απόδοση χωρίς υψηλά κόστη συντήρησης.

Συνολικά, η επιλογή του κατάλληλου σεναρίου εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες και δυνατότητες της εγκατάστασης, με τα συστήματα μεταβλητών βάσεων σε μέση τάση να προσφέρουν τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση, σύμφωνα με τους ωριαίους υπολογισμούς της παραγωγής και κατανάλωσης για το έτος 2023.

4.4 Κόστος αγοράς και εγκατάστασης Φ/Β συστήματος

Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος προσδιορίστηκε με βάση έρευνα αγοράς για τα διαθέσιμα προϊόντα, τις τιμές τους, και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση. Οι τιμές λήφθηκαν από αξιόπιστους προμηθευτές και αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα κατάσταση της αγοράς στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων το 2023. Στην έρευνα αυτή, λήφθηκαν υπόψη παράγοντες όπως η ενεργειακή απόδοση, η διάρκεια ζωής των προϊόντων, και η εγγύηση που προσφέρεται από τον κατασκευαστή. Οι υπολογισμοί κόστους βασίζονται σε αυτά τα στοιχεία για να διασφαλιστεί ότι η ανάλυση είναι ακριβής και αντικατοπτρίζει τις τρέχουσες συνθήκες αγοράς.

Για την εγκατάσταση του Φ/Β συστήματος επιλέχθηκαν τα JA Solar 450W Mono μονοκρυσταλλικά πάνελ της εταιρείας JA Solar, μιας από τις πιο αξιόπιστες και καταξιωμένες εταιρείες στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η JA Solar διακρίνεται για την αξιοπιστία της και την υψηλή απόδοση των προϊόντων της, με την παραγωγική της ικανότητα να υπερβαίνει τα 50 GW ετησίως. Τα πάνελ JA Solar 450W επιλέχθηκαν λόγω της υψηλής απόδοσης και της διάρκειας ζωής τους. Η απόδοση των πάνελ μειώνεται με ρυθμό μόλις 0.45% ανά έτος, εξασφαλίζοντας ότι η συνολική πτώση απόδοσης δεν θα υπερβεί το 15% κατά τη διάρκεια των 25 ετών λειτουργίας. Επίσης, τα πάνελ διαθέτουν εγγύηση 12 ετών για την κατασκευή και 25 ετών για την απόδοση, καθιστώντας τα μια ασφαλή επένδυση για τη μονάδα. Το κόστος τους ανέρχεται στα 108,87 € ανά πάνελ.



Εικόνα 3: Πάνελ JA Solar 450W

(Πηγή: <https://heliosystems.gr/product/fotovoltaiko-panel-ja-solar-450w-jam54d40-450-lb-n-type-bifacial-mono-black-frame-double-glass-diastrateis1762x1134x30mm/>)

Ανάλυση μετατροπέα (Inverter)

Για τη βέλτιστη απόδοση του Φ/Β συστήματος, επιλέχθηκε ο υβριδικός τριφασικός μετατροπέας Sungrow SG10RT, ο οποίος είναι κατάλληλος για εγκαταστάσεις που απαιτούν υψηλή απόδοση και ανθεκτικότητα. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας υποστηρίζει πολλαπλές εισόδους MPPT (Maximum Power Point Tracking), κάτι που επιτρέπει τη βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από τα πάνελ, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η ηλιοφάνεια δεν είναι ομοιόμορφη σε όλα τα πάνελ.

Ο Sungrow SG10RT προσφέρει μέγιστη απόδοση 98%, που είναι από τις υψηλότερες στην αγορά, εξασφαλίζοντας έτσι την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών κατά τη μετατροπή του ρεύματος από συνεχές (DC) σε εναλλασσόμενο (AC). Το κόστος του μετατροπέα ανέρχεται στα 1.116,51€.



Εικόνα 4: Υβριδικός τριφασικός μετατροπέας Sungrow SG10RT

(Πηγή:<https://heliosystems.gr/product/sungrow-sg10-0rt/>)

Συστήματα στήριξης και βάσεις

Η στήριξη των φωτοβολταϊκών πάνελ θα γίνει σε σταθερές βάσεις αλουμινίου, προσανατολισμένες προς τον νότο με κλίση 30 μοιρών, που είναι η βέλτιστη γωνία για την περιοχή της εγκατάστασης. Οι βάσεις αλουμινίου διαθέτουν αντοχή σε καιρικές συνθήκες, όπως υγρασία, υψηλές θερμοκρασίες και ισχυρούς ανέμους, εξασφαλίζοντας μακροχρόνια ανθεκτικότητα και χαμηλό κόστος συντήρησης.

Μια εναλλακτική επιλογή για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας είναι οι κινούμενες βάσεις SolarTrack EZ, οι οποίες μπορούν να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, αυξάνοντας την απόδοση έως και 20%. Οι κινούμενες βάσεις, αν και πιο ακριβές στην εγκατάσταση, παρέχουν σημαντική αύξηση της παραγωγής ενέργειας, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. Το κόστος εγκατάστασης των σταθερών βάσεων είναι χαμηλότερο σε σχέση με τις κινούμενες, ωστόσο η απόδοση του συστήματος μπορεί να επηρεαστεί ανάλογα με την ηλιοφάνεια και την εποχή.

Καλωδίωση και σύστημα τηλεμετρίας

Η καλωδίωση που θα χρησιμοποιηθεί είναι τύπου PV1-F 4mm², η οποία είναι ειδικά σχεδιασμένη για εξωτερική χρήση σε Φ/Β εγκαταστάσεις. Τα καλώδια αυτά διαθέτουν διπλή μόνωση και είναι ανθεκτικά σε υπεριώδη ακτινοβολία και υψηλές θερμοκρασίες, εξασφαλίζοντας έτσι τη σταθερότητα και την ασφάλεια της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 5: Καλώδιο φωτοβολταϊκών 1 x 4mm² - solar panel cable

(Πηγή: <https://www.e-anagnostou.gr/trofodosia-ac-dc-ilektrologika/fotovoltaika-panel-kai-elegktes-fortisis/kalodia-sundesis-fotovoltaikon-solar-panel-cables/h1z2z2-k-4-kalodio-fotovoltaikon-1-x-4mm-solar-panel-cable.html>)

Το σύστημα τηλεμετρίας που θα εγκατασταθεί επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση της απόδοσης του Φ/Β συστήματος μέσω της πλατφόρμας SolarView. Μέσω αυτής της πλατφόρμας, ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης θα έχει πρόσβαση στα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και θα μπορεί να παρακολουθεί την παραγωγή ενέργειας, τις καταναλώσεις και τυχόν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν.

Σύστημα αποθήκευσης (συσσωρευτές)



Εικόνα 6: BYD Battery-Box Premium HVM 11.0

(Πηγή: <https://www.smart-cover.gr/product/bataria-yvridikou-fotovoltaikou-byd-battery-box-premium-hvm-11-0-11kw/>)

Για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας επιλέχθηκε το σύστημα μπαταριών **BYD Battery-Box Premium HVM 11.0**, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία ιόντων λιθίου. Η συνολική χωρητικότητα του συστήματος ανέρχεται στα **11.0 kWh**, ενώ η μπαταρία έχει δυνατότητα αποφόρτισης έως και **90%**, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί το 90% της αποθηκευμένης ενέργειας πριν χρειαστεί επαναφόρτιση.

Ρόλος της μπαταρίας στο σύστημα

Η επιλογή μπαταρίας στο συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό σύστημα γίνεται με σκοπό την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και δεν καταναλώνεται άμεσα από την εγκατάσταση. Αυτό επιτρέπει τη χρήση αυτής της ενέργειας όταν η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι χαμηλή ή μηδενική,

όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε ημέρες με χαμηλή ηλιοφάνεια. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται οι εξαρτήσεις από το δίκτυο ηλεκτρισμού, καθώς η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί να αντληθεί από το δίκτυο.

Η χρήση της μπαταρίας επηρεάζει το κόστος προμήθειας ενέργειας, καθώς η περίσσεια ενέργειας που κανονικά θα κατέληγε στο δίκτυο ή θα χανόταν, πλέον αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται αργότερα. Έτσι, η εγκατάσταση καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από το δίκτυο, μειώνοντας τις χρεώσεις για προμήθεια ενέργειας.

Επίδραση στο κόστος προμήθειας

Η αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας μέσω της μπαταρίας BYD Battery-Box επιτρέπει την **εξισορρόπηση της κατανάλωσης** ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό σημαίνει ότι περιορίζεται η ανάγκη αγοράς ενέργειας από το δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής ή όταν η παραγωγή από τα Φ/Β πάνελ δεν είναι επαρκής. Επιπλέον, η μείωση της εξάρτησης από το δίκτυο συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους προμήθειας ενέργειας για την εγκατάσταση, καθώς οι τιμές του δικτύου μπορεί να είναι υψηλότερες κατά τις ώρες αιχμής.

Το κόστος του συστήματος αποθήκευσης ανέρχεται στα **6.008 €**, και η προσθήκη του στο σύστημα παρέχει επιπλέον ευελιξία στην εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος προμήθειας από το δίκτυο και αυξάνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος.

4.4.1 Οικονομική ανάλυση και απόσβεση

Η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συστήματος αποτελεί μια μακροπρόθεσμη επένδυση για τη μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα ανάλυση, εξετάζονται δύο σενάρια: το πρώτο αφορά ένα σύστημα χωρίς μπαταρία, όπου η παραγόμενη περίσσεια ενέργεια απορρίπτεται, και το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει μπαταρία αποθήκευσης ενέργειας, η οποία αξιοποιεί την περίσσεια ενέργεια για μελλοντική χρήση. Οι παράμετροι που εξετάζονται περιλαμβάνουν το συνολικό κόστος εγκατάστασης, την ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και την απόσβεση της επένδυσης.

4.4.1.1 Κόστος και Εξοπλισμός

Για την εγκατάσταση του συστήματος, επιλέχθηκαν τα JA Solar 450W Mono πάνελ, τα οποία κοστίζουν 108,87 € ανά πάνελ (χωρίς ΦΠΑ). Για ένα σύστημα ισχύος 10 kWp, απαιτούνται 22 πάνελ, με συνολικό κόστος 2.395,14 €.

Ο μετατροπέας Sungrow SG10.0RT επιλέγεται λόγω της απόδοσής του και κοστίζει 1.116,51 € (χωρίς ΦΠΑ). Η καλωδίωση που θα χρησιμοποιηθεί είναι τύπου PV1-F 4mm², και η τιμή της χωρίς ΦΠΑ είναι 1,13 €/m. Για την εκτίμηση του κόστους καλωδίων, υπολογίζεται ότι θα χρειαστούν περίπου 100 μέτρα, με συνολικό κόστος 113 €. Το κόστος για τα συστήματα στήριξης εκτιμάται στα 1.500 € (χωρίς ΦΠΑ).

Συνεπώς, το συνολικό κόστος εγκατάστασης του συστήματος χωρίς μπαταρία ανέρχεται σε 5.124,65 €.

Στο σενάριο με μπαταρία, χρησιμοποιείται το σύστημα αποθήκευσης BYD Battery-Box Premium HVM 11.0, το οποίο κοστίζει 6.008 € (χωρίς ΦΠΑ). Η μπαταρία έχει χωρητικότητα 11.0 kWh και δυνατότητα αποφόρτισης 90%, που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί 9.9 kWh ανά κύκλο φόρτισης/εκφόρτισης. Το συνολικό κόστος εγκατάστασης στο σενάριο με μπαταρία ανέρχεται στα 11.132,65 €.

Οι τιμές και τα κόστη παρουσιάζονται συνοπτικά στον **Πίνακα 10**.

Πίνακας 10: Κόστος Εξοπλισμού και Εγκατάστασης (Χωρίς ΦΠΑ)

Εξοπλισμός	Ποσότητα	Τιμή (€)	Σύνολο (€)
Πάνελ JA Solar 450W	22	108,87	2.395,14
Sungrow SG10.0RT Inverter	1	1.116,51	1.116,51
Καλωδίωση PV1-F 4mm ²	100 m	1,13	113
Συστήματα στήριξης και λοιπά	-	-	1.500
BYD Battery-Box Premium HVM 11.0	1	6.008	6.008
Συνολικό κόστος (Χωρίς Μπαταρία)			5.124,65
Συνολικό κόστος (Με Μπαταρία)			11.132,65

4.4.1.2 Παραγωγή και Κατανάλωση Ενέργειας

Για την εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας, λαμβάνουμε ως βάση την ετήσια παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα, η οποία υπολογίζεται σε 1.200 kWh/kWp/έτος. Συνεπώς, για ένα σύστημα ισχύος 10 kWp, η ετήσια παραγωγή ενέργειας ανέρχεται σε 12.000 kWh.

Στο πρώτο σενάριο, όπου δεν χρησιμοποιείται μπαταρία, η συνολική παραγωγή που μπορεί να καταναλωθεί άμεσα είναι 12.000 kWh. Η ενέργεια που παράγεται κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης δεν αποθηκεύεται και απορρίπτεται.

Στο δεύτερο σενάριο, με την προσθήκη της μπαταρίας, η περίσσεια ενέργεια αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται όταν η παραγωγή από τα πάνελ είναι χαμηλή. Υποθέτουμε ότι 50% της παραγωγής (6.000 kWh) αποθηκεύεται στη μπαταρία, από την οποία λόγω της απόδοσης φόρτισης/εκφόρτισης (90%) αξιοποιούνται 5.400 kWh.

Πίνακας 11: Ετήσια Παραγωγή και Κατανάλωση Ενέργειας

Παράμετρος	Χωρίς Μπαταρία (kWh)	Με Μπαταρία (kWh)
Ετήσια Παραγωγή	12.000	12.000
Άμεση Κατανάλωση	12.000	6.000
Κατανάλωση από Μπαταρία	-	5.400
Συνολική Κατανάλωση	12.000	11.400

4.4.1.3 Ετήσια Εξοικονόμηση

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται στα 0,15 €/kWh. Με βάση αυτή την τιμή, η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας στο πρώτο σενάριο είναι 1.800 €/έτος, ενώ στο δεύτερο σενάριο, με τη χρήση της μπαταρίας, η εξοικονόμηση μειώνεται ελαφρώς λόγω των απωλειών της μπαταρίας και ανέρχεται σε 1.710 €/έτος.

Πίνακας 12: Ετήσια Εξοικονόμηση Ενέργειας

Σενάριο	Κατανάλωση (kWh)	Τιμή ανά kWh (€)	Ετήσια Εξοικονόμηση (€)
Χωρίς Μπαταρία	12.000	0,15	1.800

Με Μπαταρία	11.400	0,15	1.710
-------------	--------	------	-------

4.4.1.4 Υπολογισμός Απόσβεσης

Η απόσβεση της επένδυσης υπολογίζεται ως ο λόγος του συνολικού κόστους εγκατάστασης προς την ετήσια εξοικονόμηση. Στο πρώτο σενάριο, η απόσβεση επιτυγχάνεται σε περίπου 2,85 χρόνια, ενώ στο δεύτερο σενάριο, με την προσθήκη της μπαταρίας, η απόσβεση διαρκεί 6,51 χρόνια λόγω του αυξημένου κόστους της μπαταρίας.

Πίνακας 13: Απόσβεση Επένδυσης

Σενάριο	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Ετήσια Εξοικονόμηση (€)	Απόσβεση (έτη)
Χωρίς Μπαταρία	5.124,65	1.800	2,85
Με Μπαταρία	11.132,65	1.710	6,51

4.4.1.5 Απόσβεση σε έτη ανά σενάριο Φ/Β με σταθερές βάσεις

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα με σταθερές βάσεις είναι πιο οικονομικά όσον αφορά το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Παρακάτω παρουσιάζεται η απόσβεση της επένδυσης για τα διάφορα σενάρια ισχύος σε συστήματα με σταθερές βάσεις, τόσο χωρίς όσο και με τη χρήση μπαταρίας.

Πίνακας 14: Απόσβεση σε έτη ανά σενάριο Φ/Β με σταθερές βάσεις

Ισχύς (kWp)	Τεμάχια πάνελ	Κόστος (χωρίς μπαταρία) (€)	Ετήσια εξοικονόμηση (€)	Απόσβεση (χωρίς μπαταρία, έτη)	Κόστος (με μπαταρία) (€)	Ετήσια εξοικονόμηση (€)	Απόσβεση (με μπαταρία, έτη)
5	11	2.940,58	900	3,27	8.048,58	855	9,41
10	22	5.124,65	1.800	2,85	11.132,65	1.710	6,51

15	33	7.308,7 2	2.700	2,71	14.216, 72	2.565	5,54
20	44	9.492,7 9	3.600	2,64	17.300, 79	3.420	5,06

Σύμφωνα με τα δεδομένα, το σύστημα χωρίς μπαταρία επιτυγχάνει απόσβεση σε λιγότερα έτη, ειδικά για μικρότερες ισχύς, ενώ το σύστημα με μπαταρία απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο απόσβεσης.

4.4.1.6 Απόσβεση σε έτη ανά σενάριο Φ/Β με κινούμενες βάσεις

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα με κινούμενες βάσεις προσφέρουν αυξημένη απόδοση καθώς παρακολουθούν την πορεία του ήλιου, αλλά έχουν υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Παρακάτω παρουσιάζεται η απόσβεση της επένδυσης για διάφορες ισχύς σε συστήματα με κινούμενες βάσεις.

Πίνακας 15: Απόσβεση σε έτη ανά σενάριο Φ/Β με κινούμενες βάσεις

Ισχύς (kWp)	Τεμάχια πάνελ	Κόστος (χωρίς μπαταρία) (€)	Ετήσια εξοικονόμηση (€)	Απόσβεση (χωρίς μπαταρία, έτη)	Κόστος (με μπαταρία) (€)	Ετήσια εξοικονόμηση (€)	Απόσβεση (με μπαταρία, έτη)
5	11	4.700	1.050	4,48	9.808	998	9,83
10	22	7.850	2.100	3,74	12.858	1.995	6,45
15	33	10.900	3.150	3,46	15.908	2.993	5,32
20	44	13.950	4.200	3,32	18.958	3.990	4,75

Όπως φαίνεται από τον πίνακα, τα συστήματα με κινούμενες βάσεις αποσβένονται σε περισσότερα χρόνια σε σύγκριση με τα συστήματα με σταθερές βάσεις, αλλά η επιπλέον απόδοση τα καθιστά αποδοτικά μακροπρόθεσμα.

4.4.1.7 Συντήρηση και Διάρκεια Ζωής του Συστήματος

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν γενικά χαμηλό κόστος συντήρησης, ιδίως τα συστήματα με σταθερές βάσεις, τα οποία δεν απαιτούν συχνή επιτήρηση ή ρύθμιση. Η συντήρηση των πάνελ περιλαμβάνει κυρίως τον καθαρισμό από σκόνη ή φύλλα και

έναν περιοδικό έλεγχο του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Συνήθως, τα συστήματα αυτά έχουν εγγύηση λειτουργίας για περίπου 25 χρόνια, με την απόδοση των πάνελ να μειώνεται σταδιακά κατά περίπου 0,5% ετησίως.

Στην περίπτωση των συστημάτων με κινούμενες βάσεις, το κόστος συντήρησης είναι υψηλότερο, καθώς απαιτείται παρακολούθηση των μηχανισμών κίνησης και συχνότερη συντήρηση των εξαρτημάτων λόγω φθοράς. Εντούτοις, η αυξημένη απόδοση που προσφέρουν μπορεί να αντισταθμίσει το επιπλέον κόστος συντήρησης.

Η μπαταρία BYD Battery-Box Premium HVM 11.0 έχει διάρκεια ζωής περίπου 6.000 κύκλους φόρτισης, που αντιστοιχεί σε περίπου 15 χρόνια λειτουργίας, ανάλογα με τη χρήση. Η συντήρηση των μπαταριών περιορίζεται σε περιοδικό έλεγχο για τη διατήρηση της απόδοσής τους.

4.4.1.8 Οφέλη από τη Χρήση του Φ/Β Συστήματος

Η εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος προσφέρει πολλαπλά οφέλη, τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά. Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά οφέλη:

1. **Μείωση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας:** Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να μειώσει δραστικά τις δαπάνες μιας επιχείρησης ή κατοικίας για ηλεκτρική ενέργεια, καθώς παράγει δωρεάν ενέργεια από τον ήλιο.
2. **Αυξημένη ενεργειακή αυτάρκεια:** Με την προσθήκη ενός συστήματος αποθήκευσης (μπαταρία), η εγκατάσταση μπορεί να εκμεταλλευτεί την περίσσεια ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και να τη χρησιμοποιήσει όταν η παραγωγή είναι χαμηλή, μειώνοντας την εξάρτηση από το δίκτυο.
3. **Περιβαλλοντικά οφέλη:** Η χρήση ηλιακής ενέργειας μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της εγκατάστασης.
4. **Μακροπρόθεσμη επένδυση:** Με διάρκεια ζωής άνω των 25 ετών, τα Φ/Β συστήματα αποτελούν μια μακροχρόνια επένδυση που αποδίδει μετά την απόσβεση του αρχικού κόστους.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, η επιλογή του κατάλληλου σεναρίου εγκατάστασης εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες και τον προϋπολογισμό της εγκατάστασης.

Τα συστήματα χωρίς μπαταρία προσφέρουν γρηγορότερη απόσβεση, ενώ τα συστήματα με μπαταρία προσφέρουν αυξημένη ενεργειακή αυτάρκεια και ανεξαρτησία από το δίκτυο, αλλά με μεγαλύτερο χρόνο απόσβεσης.

Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη εστίασε στην οικονομική και περιβαλλοντική αποδοτικότητα της εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) συστήματος μηδενικής έγχυσης στο δίκτυο, το οποίο εφαρμόζεται σε μικρή βιομηχανική μονάδα. Τα κύρια σημεία που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν την παραγωγή ενέργειας, το οικονομικό κόστος και όφελος, την περιβαλλοντική συμβολή και τις προκλήσεις που προκύπτουν από την υλοποίηση της εγκατάστασης.

Η ανάλυση κόστους-οφέλους καταδεικνύει ότι η εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος, αν και αρχικά απαιτεί σημαντική επένδυση, προσφέρει ουσιαστικά οικονομικά οφέλη με την πάροδο του χρόνου. Το συνολικό κόστος εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος εκτιμήθηκε στα 24.610 ευρώ, ενώ η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας αναμένεται να φτάσει τα 4.200 ευρώ. Αυτό οδηγεί σε έναν χρόνο απόσβεσης της επένδυσης περίπου 5,86 έτη, μετά τον οποίο η βιομηχανία θα αρχίσει να απολαμβάνει καθαρά κέρδη από την αυτοπαραγωγή ενέργειας. Μετά την απόσβεση, η επιχείρηση όχι μόνο θα μειώσει την εξάρτησή της από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά θα αποκομίσει και οικονομικά κέρδη από τη χρήση της παραγόμενης ενέργειας.

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα Φ/Β συστήματα, συμβάλλει άμεσα στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της μονάδας. Η παραγωγή καθαρής ενέργειας από τον ήλιο μειώνει την ανάγκη για ενέργεια από συμβατικές πηγές που επιβαρύνουν το περιβάλλον με εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Αυτό συνεισφέρει θετικά στους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης και στην προστασία του περιβάλλοντος. Ειδικά για τη βιομηχανία, αυτή η συμβολή στην περιβαλλοντική προστασία ενισχύει το προφίλ της ως φιλικής προς το περιβάλλον επιχείρησης, προσφέροντας πλεονεκτήματα τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό της περιβάλλον εργασίας.

Το σύστημα παρουσιάζει σημαντική δυνατότητα επέκτασης, κάτι που σημαίνει ότι στο μέλλον μπορεί να προστεθεί επιπλέον εξοπλισμός, όπως επιπλέον φωτοβολταϊκά πάνελ ή συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Με την τεχνολογική πρόοδο και τη μείωση του κόστους εξοπλισμού, τέτοιες επεκτάσεις μπορούν να αυξήσουν την ενεργειακή ανεξαρτησία της επιχείρησης και να καλύψουν ακόμα μεγαλύτερες ανάγκες.

Αν και η εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος προσφέρει σημαντικά οφέλη, υπάρχουν και προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η

αρχική επένδυση, η οποία μπορεί να είναι υψηλή για μικρότερες επιχειρήσεις ή βιομηχανίες. Επιπλέον, οι καιρικές συνθήκες και η θέση της εγκατάστασης μπορούν να επηρεάσουν την αποδοτικότητα του συστήματος. Για παράδειγμα, οι εποχιακές διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσουν μειώσεις στην παραγόμενη ενέργεια κατά τους χειμερινούς μήνες.

Η σύγκριση μεταξύ σταθερών και μεταβλητών βάσεων για τα Φ/Β πάνελ δείχνει ότι τα συστήματα με μεταβλητές βάσεις έχουν μεγαλύτερη απόδοση, καθώς ακολουθούν την κίνηση του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η αυξημένη αυτή αποδοτικότητα μπορεί να συμβάλει στην ταχύτερη απόσβεση της αρχικής επένδυσης, παρά το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης που συνήθως απαιτείται για τα συστήματα αυτά.

Σε συνολική βάση, η υιοθέτηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μηδενικής έγχυσης στο δίκτυο μπορεί να προσφέρει στην επιχείρηση μια εξαιρετική ευκαιρία για εξοικονόμηση κόστους και μείωση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος. Τα οικονομικά οφέλη είναι εμφανή, ιδιαίτερα σε περιόδους αυξημένης ζήτησης και κόστους ενέργειας. Παράλληλα, το περιβαλλοντικό κέρδος από την μείωση των εκπομπών CO₂ ενισχύει τη βιώσιμη ανάπτυξη της επιχείρησης και την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στην παραγωγική διαδικασία.

Οι προοπτικές για το μέλλον των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα ευοίωνες, με δεδομένη την υψηλή ηλιοφάνεια και τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας. Με τη σωστή αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και τη στρατηγική ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, οι βιομηχανικές μονάδες θα μπορούν να επιτύχουν υψηλή ενεργειακή ανεξαρτησία και μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

Τέλος, είναι σημαντικό να συνεχιστούν οι έρευνες στον τομέα αυτό για να βελτιστοποιηθούν οι τεχνολογικές λύσεις και να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς και του περιβάλλοντος. Το φωτοβολταϊκό σύστημα μηδενικής έγχυσης αποτελεί μια καινοτόμο λύση, που με την κατάλληλη διαχείριση μπορεί να αποτελέσει πρότυπο για την ενεργειακή αναβάθμιση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Βιβλιογραφία

- Ahmed, J., & Salam, Z. (2015). An improved method to predict the position of maximum power point during partial shading for PV arrays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(6), 1378-1387.
- Awasthi, A., Shukla, A. K., SR, M. M., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports*, 6, 392-405.
- Balal, A. T., Abedi, M., & Shahabi, F. (2021). Optimized generated power of a solar PV system using an intelligent tracking technique.
- Billy, J, Mr. Paulmarpushparaj., Sezhian, Mr. M. V., Arulvel, Mr. S., & Omshakthivel, Mr. U. (2019). Structural And Mechanical Design Of Solar Tracking System. In *International Journal of Engineering and Advanced Technology* (Vol. 8, Issue 6s3, pp. 1425–1431). Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Engineering and Sciences Publication - BEIESP.
- Bolrahman, L. J., & Abdullah, M. N. (2022). Off-Grid Connected Photovoltaic System for Rural Residential Electrification in Malaysia. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 3(1), 570-578.
- Chen, Y. M., Liu, Y. C., Hung, S. C., & Cheng, C. S. (2007). Multi-input inverter for grid-connected hybrid PV/wind power system. *IEEE transactions on power electronics*, 22(3), 1070-1077.
- Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: an overview. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 12(2-3), 69-92.
- Cole, W. J., Frew, B. A., Gagnon, P. J., Richards, J., Sun, Y., Margolis, R. M., & Woodhouse, M. A. (2017). SunShot 2030 for photovoltaics (PV): Envisioning a low-cost PV future (No. NREL/TP-6A20-68105). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Conibeer, G. (2007). Third-generation photovoltaics. *Materials today*, 10(11), 42-50.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.

Dunlop, E. D., Gracia Amillo, A., Salis, E., Sample, T., & Taylor, N. (2018). Standards for the assessment of the environmental performance of photovoltaic modules, power conditioning components and photovoltaic systems. *European Union, Luxembourg*.

Engin, M. (2013). Sizing and simulation of PV-wind hybrid power system. *International journal of photoenergy*, 2013(1), 217526.

Esrar, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on energy conversion*, 22(2), 439-449.

European Photovoltaic Industry Association. (2014). *Global market outlook for photovoltaics 2014-2018*. HELAPCO. https://helapco.gr/wp-content/uploads/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_Medium_Res.pdf

Fathima, A. H., & Palanisamy, K. (2015). Optimization in microgrids with hybrid energy systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 431-446.

Feron, S. (2016). Sustainability of off-grid photovoltaic systems for rural electrification in developing countries: A review. *Sustainability*, 8(12), 1326.

Gray, J. L. (2011). The physics of the solar cell. *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2, 82-128.

Green, M. A. (2000). Photovoltaics: technology overview. *Energy policy*, 28(14), 989-998.

Green, M. A. (2009). The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 17(3), 183-189.

Hamelmann, F. U., Weicht, J. A., & Behrens, G. (2016). Light-induced degradation of thin film silicon solar cells. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 682, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.

Helapco. (2014). Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2013. Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών

Helapco. (2020). Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2019. Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών

Helarco. (2021). Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2020. Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών

Helarco. (2022). Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2021. Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών

Helarco. (2023). Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2022. Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών

Helarco. (2024). Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2023. Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών

Hoppmann, J., Volland, J., Schmidt, T. S., & Hoffmann, V. H. (2014). The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1101-1118.

IEA (International Energy Agency). (2020). *World Energy Outlook 2020*.

International Energy Agency (IEA). (2024). *Solar - IEA*. IEA. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report.

Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier.

Kusch-Brandt, S. (2019). Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21's "Renewables 2019 Global Status Report".

Lal, N. N., Dkhissi, Y., Li, W., Hou, Q., Cheng, Y. B., & Bach, U. (2017). Perovskite tandem solar cells. *Advanced Energy Materials*, 7(18), 1602761.

Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B., & Kang, Y. (2008). A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(7), 2622-2628.

Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N., & de Melo Cunha, J. P. (2022). A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications. *Energies*, 15(5), 1823.

meteocontrol. (2024). *Zero Feed-In*. Meteocontrol.com. <https://www.meteocontrol.com/en/scada-plant-control/solutions/zero-feed-in>

- Muhammad, J. Y. U., Waziri, A. B., Shitu, A. M., Ahmad, U. M., Muhammad, M. H., Alhaji, Y., ... & Bala, A. A. (2019). Recent progressive status of materials for solar photovoltaic cell: A comprehensive review. *Sci. J. Energy Eng*, 7(4), 77-89.
- Paspatis, A., Adebisi, B., Orfanoudakis, G., Siderakis, K., Karapidakis, E., & Hatziaergyriou, N. (2024, June). A DC Link-Based Approach to Realize Zero Feed-in Under Both Static and Dynamic Power System Events. In *2024 IEEE 18th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)* (pp. 1-6). IEEE.
- Patel, H., & Agarwal, V. (2008). Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions. *IEEE transactions on industrial electronics*, 55(4), 1689-1698.
- Radziemska, E. (2003). The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable energy*, 28(1), 1-12.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar energy*, 85(8), 1580-1608.
- Safari, A., & Mekhilef, S. (2010). Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter. *IEEE transactions on industrial electronics*, 58(4), 1154-1161.
- Sánchez-Jiménez, J. L., Muñoz-Rodríguez, F. J., Jiménez-Castillo, G., Martínez-Calahorra, A. J., & Rus-Casas, C. (2023). Analysis of Different Scenarios to Include PV Rooftop Systems with Battery Energy Storage Systems in Olive Mills. *Energies*, 17(1), 144.
- Saretta, E., Caputo, P., & Frontini, F. (2019). A review study about energy renovation of building facades with BIPV in urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 44, 343-355.
- Sharma, V., & Chandel, S. S. (2013). Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy*, 55, 476-485.
- Shockley, W., & Queisser, H. (2018). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. In *Renewable energy* (pp. Vol2_35-Vol2_54). Routledge.

- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5), 614-624.
- Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Van Swaaij, R., & Zeman, M. (2016). *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. Bloomsbury Publishing.
- Snaith, H. J. (2013). Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells. *The journal of physical chemistry letters*, 4(21), 3623-3630.
- Solar Market Insight Report 2019 Year in Review | SEIA*. (2019). SEIA. <https://www.seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-2019-year-review>
- Sun, L., Fukuda, K., & Someya, T. (2022). Recent progress in solution-processed flexible organic photovoltaics. *npj Flexible Electronics*, 6(1), 89.
- Vergura, S. (2016). A complete and simplified datasheet-based model of pv cells in variable environmental conditions for circuit simulation. *Energies*, 9(5), 326.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Ruppert Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, 24(5), 1198-1208.
- Yang, W. S., Noh, J. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J., & Seok, S. I. (2015). High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 348(6240), 1234-1237.
- Zeman, M. (2003). Introduction to photovoltaic solar energy. *Delft University of Technology*, 2(6), 7-9.
- Zhang, Z., & Zhu, X. (2018). Bis-silicon-bridged stilbene: A core for small-molecule electron acceptor for high-performance organic solar cells. *Chemistry of Materials*, 30(3), pp. 587-591.
- European Commission. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Official Journal of the European Union.

<https://www.smart-cover.gr/product/bataria-yvridikou-fotovoltaikou-byd-battery-box-premium-hvm-11-0-11kw/>

<https://heliosystems.gr/product/sungrow-sg10-0rt/>

<https://heliosystems.gr/product/fotovoltaiko-panel-ja-solar-450w-jam54d40-450-lb-n-type-bifacial-mono-black-frame-double-glass-diastaseis1762x1134x30mm/>

<https://www.e-anagnostou.gr/trofodosia-ac-dc-ilektrologika/fotovoltaika-panel-kai-elegktes-fortisis/kalodia-sundesisis-fotovoltaikon-solar-panel-cables/h1z2z2-k-4-kalodio-fotovoltaikon-1-x-4mm-solar-panel-cable.html>