

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΟΨΗΣ

ΤΜΗΜΑ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΜΑΛΙΑ ΧΑΤΖΑΚΗ

Επιβλέπων Καθηγητής:
Εμμανουήλ Μαραβελάκης

Χανιά, 2026

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια της διεκπεραίωσης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέπων καθηγητή μου Εμμανουήλ Μαραβελάκη, καθώς ο ρόλος του ήταν καθοριστικός για την καθοδήγηση και την διεκπεραίωση της εργασίας.

Επιπλέον, οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και σε όλους τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ
ΠΕΡΙΛΗΨΗ
ABSTRACT
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το σύγχρονο ενεργειακό πρόβλημα
1.1 Ανάλυση ενεργειακού προβλήματος
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
1.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα - Εξέλιξη και σύγχρονες τάσεις
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Εισαγωγή στις βασικές έννοιες των φωτοβολταϊκών συστημάτων
2.1 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα και ο ρόλος τους
2.1.1 Από τι αποτελείται ένα Φ/Β σύστημα
2.2 Εισαγωγή στην δομή της φωτοβολταϊκής κυψέλης
2.2.1 Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκής κυψέλης
2.2.2 Παραγοντες που επηρεαζουν τα ηλεκτρικά μεγέθη της κυψέλης
2.3 Παρουσίαση των κατηγοριών των φωτοβολταϊκών πλαισίων
Κεφάλαιο 3 – Διπλής όψης φωτοβολταϊκά συστήματα
3.1 Ορισμός και βασικη αρχή λειτουργίας
3.1.1. Ορισμός
3.1.2 Ιστορική αναδρομή
3.1.3 Βασική αρχή λειτουργίας
3.2 Δομή και μηχανισμός λειτουργίας
3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα bifacial έναντι monofacial
3.3.1 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών πλαισίων διπλής όψης (bifacial)
3.3.2 Μειονεκτήματα bifacial έναντι monofacial
3.4 Ανάλυση των τεχνολογιών κατασκευής κυψελών που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά πλαίσια διπλής όψης
3.4.1 Bifacial PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)
3.4.2 n-type PERT
3.4.3 TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)
3.4.4 IBC
Κεφάλαιο 4 – Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση διπλής όψης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων
4.1 Εισαγωγή στις βασικές έννοιες για την αποδοση των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων
4.1.1 Ορισμός ενεργειακής απόδοσης
4.1.2 Βαθμός απόδοσης (PR)
4.1.3 Δείκτες αξιολόγησης απόδοσης Φωτοβολταϊκών συστημάτων
4.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες
4.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία
4.2.2 Θερμοκρασία και κλιματολογικές συνθήκες
4.3 Γεωμετρικοί και χωροταξικοί παράγοντες

4.3.1 Albedo : Ανακλαστικότητα εδάφους
4.3.2 Ανύψωση των πλαισίων από το έδαφος
4.3.3 Γεωγραφικό πλάτος και κλίση φωτοβολταϊκών πλαισίων
4.3.4 Αξονική απόσταση μεταξύ σειρών (Pitch)
4.3.5 Σκιάσεις και αμοιβαία σκίαση πλαισίου
Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση των εφαρμογών φωτοβολταϊκών διπλής όψης
5.1 Εφαρμογές σε Επίγειες Εγκαταστάσεις Μεγάλης Κλίμακας (Utility-scale)
5.2 Εφαρμογές στα Αγροφωτοβολταϊκά
5.3 Εφαρμογές στα Πλωτά Φωτοβολταϊκά (FPV)
5.4 Εφαρμογές και Ενσωματώσεις σε υποδομές: Ηχοπετάσματα και Στέγαστρα
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και σχολιασμοί
6.1 Παρουσίαση συμπερασμάτων
6.2 Μελλοντικές τάσεις
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
ΕΛΛΗΝΙΚΉ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η ενεργειακή κρίση αποτελεί ένα μείζον και κρίσιμο φαινόμενο το οποίο εντείνεται τόσο σε διεθνές όσο και σε τοπικό επίπεδο. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην αναζήτηση και την αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν την δυνατότητα να παράγουν διαφορετικές μορφές ενέργειας, συμβάλλοντας στην δραστική ελάττωση της εξάρτησης του ευρύτερου κοινού από τους εξαντλήσιμους πόρους και στην ενίσχυση της βιωσιμότητας του ενεργειακού συστήματος.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μία τεχνολογία που αναπτύχθηκε με απώτερο στόχο την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κατ' επέκταση την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος. Μάλιστα, τα τελευταία έτη παρατηρείται μία έντονα ανοδική τεχνολογική εξέλιξη των συγκεκριμένων συστημάτων καθώς και ενισχυμένη παρουσία στην αγορά. Η εξέλιξη αυτή οφείλεται στην κλιμάκωση της παραγωγής, στην ανάπτυξη των υλικών και των μεθόδων κατασκευής και της ικανότητας εγκατάστασης τους σε ευρύτερες εφαρμογές και περιβάλλοντα. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εισάγονται οι βασικές έννοιες και οι μηχανισμοί λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση στα συστήματα διπλής όψης (bifacial). Η κατηγορία φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης διαφοροποιείται αρκετά ως προς τον τρόπο λειτουργίας και αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, συγκριτικά με τα καθιερωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα μονής όψης (monofacial). Αρχικά, στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στις βασικές έννοιες των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψεως και παρουσιάζεται αναλυτικά ο μηχανισμός λειτουργίας τους. Παράλληλα, παρατίθενται συνοπτική αναφορά στις σημαντικότερες τεχνολογίες κατασκευής, καθώς και στα κυρίαρχα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους σε σύγκριση με τα συστήματα μονής όψης (monofacial). Στην συνέχεια, παρουσιάζονται και εξετάζονται οι παράγοντες που καθορίζουν την τελική ενεργειακή απόδοση, οι οποίοι διαχωρίζονται σε περιβαλλοντικούς (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, κλιματικές συνθήκες) και γεωμετρικούς– χωροταξικούς (ανακλαστικότητα εδάφους, albedo, ανύψωση, κλίση,

αποστάσεις σειρών, σκιάσεις). Τέλος, αναλύονται σύγχρονες εφαρμογές των bifacial, με απώτερο στόχο την διεξαγωγή ορθά τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις συνθήκες στις οποίες η τεχνολογία διπλής όψης μπορεί να προσφέρει ουσιαστικό ενεργειακό όφελος.

ABSTRACT

In recent years, the energy crisis has become a major and critical phenomenon that is Intensifying both internationally and locally. This has led to the search for and exploitation of alternative energy sources to effectively address the phenomenon. Renewable energy sources (RES) have the ability to produce different forms of energy, contributing to the drastic reduction of the general public's dependence on exhaustible resources and to the enhancement of the sustainability of the energy system. Photovoltaic systems are a technology that was developed with the ultimate goal of utilizing renewable energy sources and, by extension, solving the energy problem. In fact, in recent years, there has been a strong upward technological development of these systems as well as an enhanced presence in the market. This development is due to the scaling of production, the development of materials and manufacturing methods and the ability to install them in wider applications and environments. This thesis introduces the basic concepts and operating mechanisms of photovoltaic systems. Specifically, emphasis is placed on bifacial systems. The category of bifacial photovoltaic systems is quite different in terms of the way they operate and utilize solar energy, compared to the established monofacial photovoltaic systems. Initially, in the first part of the work, a brief introduction to the basic concepts of bifacial photovoltaic systems is made and their operating mechanism is presented in detail. At the same time, a brief reference is given to the most important construction technologies, as well as to their dominant advantages and limitations compared to single-sided (monofacial) systems. Subsequently, the factors that determine the final energy efficiency are presented and examined, which are divided into environmental (solar radiation, temperature, climatic conditions) and geometric-spatial (ground reflectivity, albedo, elevation, slope, row spacing, shading). Finally, modern applications of bifacial are analyzed, with the ultimate goal of drawing well-documented conclusions regarding the conditions in which double-sided
Technology can offer substantial energy benefits.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το σύγχρονο ενεργειακό πρόβλημα

1.1 Ανάλυση ενεργειακού προβλήματος

Η σύγχρονη κοινωνία χαρακτηρίζεται έντονα από μία συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια. Αυτό οφείλεται στην γενικότερη αύξηση του πληθυσμού, στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και την εκτενέστερη χρήση της στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Ταυτόχρονα, η ευρύτερη ανάπτυξη του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων συνέβαλε στην δημιουργία μεγαλύτερων αναγκών ενέργειας σε πολυπληθείς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η ανοδική τάση της ζήτησης της ενέργειας ανέδειξε και τις ανεπάρκειες του σύγχρονου ενεργειακού μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκε το ενεργειακό πρόβλημα της σημερινής εποχής το οποίο μάλιστα έφερε στην επιφάνεια μία σύνθετη πρόκληση. Η πρόκληση επικεντρώνεται στο πώς μπορεί η σύγχρονη κοινωνία να καλύπτει τις ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες της με ασφαλή και περιβαλλοντικά βιώσιμο τρόπο, χωρίς να εξαρτάται αποκλειστικά από εξαντλήσιμους πόρους.
Συγκεκριμένα, το πρόβλημα δεν αφορά μόνο την επάρκεια παραγωγής, αλλά συνδέεται ταυτόχρονα με (α) την ασφάλεια εφοδιασμού, (β) την οικονομική προσιτότητα και τη μεταβλητότητα των τιμών και (γ) τη βιωσιμότητα, με έμφαση στη μείωση των εκπομπών. Στην πράξη οι παράμετροι αυτές συνυπάρχουν και δρουν ταυτόχρονα ενώ η σχετική σημασία τους διαφοροποιείται ανά χρονική περίοδο. Επομένως, η κεντρική πρόκληση είναι η κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών με αξιόπιστο και περιβαλλοντικά βιώσιμο τρόπο, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από εξαντλήσιμους πόρους. Η προσιτότητα έγινε έντονα εμφανής μέσω της απότομης αύξησης της ηλεκτρικής ενέργειας και των καυσίμων. Οι συγκεκριμένες επιπτώσεις ήταν άμεσες κυρίως στα νοικοκυριά, στις επιχειρήσεις και στη βιομηχανική ανταγωνιστικότητα. Ωστόσο, παρόλο που το ενεργειακό πρόβλημα εμφανίζεται έντονα με την αύξηση των τιμών, δεν περιορίζεται μόνο σε αυτό. Η ενεργειακή κρίση ανέδειξε μία αυξημένη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενδεικτικά, σύμφωνα με το Global Energy Review 2025 του IEA, η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αυξήθηκε το 2024 κατά 2,2%, ενώ η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 4,3%. Η εξέλιξη αυτή συνδέεται με δομικούς παράγοντες όπως η αυξημένη ανάγκη για ψύξη λόγω υψηλών θερμοκρασιών, η ηλεκτροποίηση τελικών χρήσεων και η ενίσχυση φορτίων από την ψηφιοποίηση και τα κέντρα δεδομένων. Επομένως, η ενεργειακή κρίση και το πρόβλημα που οφείλει να αντιμετωπίσει η σύγχρονη κοινωνία, συνίσταται στο πως μπορούν να καλυφθούν οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες με έναν αξιόπιστο και περιβαλλοντικά ασφαλή τρόπο μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από εξαντλήσιμους πόρους.

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας συνέβαλαν καθοριστικά στην αντιμετώπιση του σύγχρονου ενεργειακού φαινομένου. Ουσιαστικά, κατάφεραν να ανταποκριθούν στις σύγχρονες ενεργειακές προκλήσεις καλύπτοντας τις ανάγκες του ενεργειακού περιβάλλοντος καθώς προσέφεραν ασφάλεια εφοδιασμού, οικονομική προσιτότητα και βιωσιμότητα. Άλλωστε, όπως προδίδει και η ίδια τους η ονομασία, αποτελούν "ανεξάντλητες πηγές" γεγονός που τις καθιστά άκρως ελκυστικές και χρήσιμες για την διαχρονική ανταπόκριση των αναγκών σε ενέργεια. Επιπρόσθετα, η αξιοποίηση τους επιδρά στην ελάττωση των εκπομπών σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής συμβάλλοντας ενεργά στην προστασία του περιβάλλοντος.

Σύμφωνα με την Βιβλιογραφία, ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι μη ορυκτές πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή (θερμική και φωτοβολταϊκή), η γεωθερμική, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή, η βιομάζα, τα αέρια βιολογικής προέλευσης (βιοαέριο, αέριο από χώρους υγειονομικής ταφής και από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων) και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Οι συγκεκριμένες πηγές υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον καθώς αποτελούν τις πρωταρχικές μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα. Ταυτόχρονα, αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την Οδηγία (ΕΕ) 2018/2001 (RED II) ορίζει ως «ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές» την ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές, και απαριθμεί: αιολική, ηλιακή (ηλιοθερμική και φωτοβολταϊκή), γεωθερμική, ενέργεια

περιβάλλοντος (ambient energy), παλιρροϊκή/κυματική/ωκεάνια, υδροηλεκτρική, βιομάζα, αέριο χώρων υγειονομικής ταφής, αέριο εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και βιοαέριο.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μέσω των φωτοβολταικων συστημάτων. Η ηλιακή ενέργεια είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σύμφωνα με τον ορισμό, ως ηλιακή ενέργεια περιγράφονται όλες οι μορφές ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο και εντάσσεται σε δύο κύριες κατευθύνσεις. Η πρώτη είναι η ηλιοθερμική όπου ουσιαστικά είναι η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή θερμότητας. Η δεύτερη είναι η φωτοβολταϊκή, όπου περιγράφει την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά συγκαταλέγονται στις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες "καθαρής" ενέργειας που βελτιώνονται και εξελίσσονται συνεχώς.

1.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα - Εξέλιξη και σύγχρονες τάσεις

Το 1839 ο Γάλλος Φυσικός Edmond Becquerel, ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο διαμορφώνοντας το επιστημονικό υπόβαθρο για την εκτενέστερη εξέλιξη των ηλιακών κυψελών. Το 1954 στα εργαστήρια Bell Laboratories, ανακαλύφθηκε η πρώτη πυριτική φωτοβολταϊκή κυψέλη, η δημιουργία της οποίας άνοιξε το μονοπάτι προς μία νέα εποχή αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων εφαρμόστηκε πρώτη φορά το 1958 σε δορυφορικά συστήματα στην διαστημική τεχνολογία από τη NASA. Το ενδιαφέρον για περαιτέρω ανάπτυξη και ευρύτερη εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών άνθισε κατά την δεκαετία του 1970, κατά την διάρκεια των πετρελαϊκών κρίσεων. Συγκεκριμένα, κρίσιμο ήταν το έτος 1973 για τον τομέα, καθώς ανακαλύφθηκε το λεγόμενο "violet cell" το οποίο ουσιαστικά αποτελεί μία πιο εξελιγμένη εκδοχή κυψέλης πυριτίου, η οποία συνέβαλε στην σχετική αύξηση 20-30% της απόδοσης συγκριτικά με τις τότε υπάρχουσες κυψέλες πυριτίου. Αργότερα, στα μέσα της δεκαετίας του 1985, τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου κατάφεραν να φτάσουν την απόδοση του 20% με αποτέλεσμα να επέλθει η γενικότερη άνθηση και ανάπτυξη της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών. Συγκεκριμένα, το 1997 παρουσιάστηκε αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης κατά 38%,

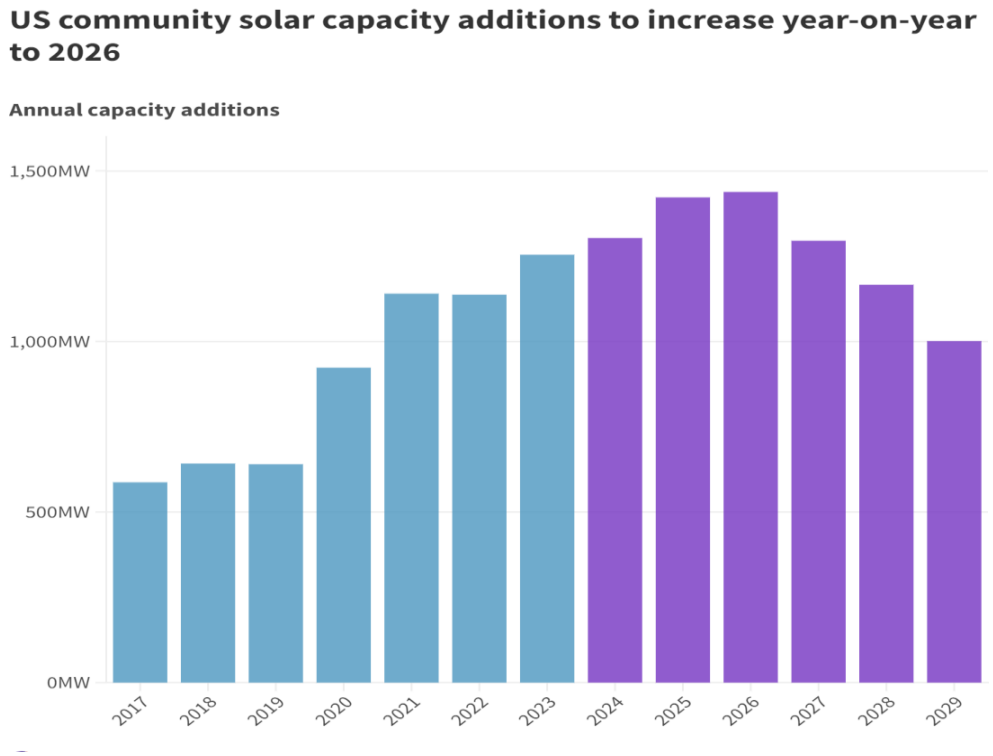
συγκριτικά με το 1996, σε επίπεδο ζήτησης της φωτοβολταϊκής βιομηχανίας, ξεπερνώντας τα 100 MWp.

Στην σημερινή εποχή τα φωτοβολταϊκά κατέχουν μία εδραιωμένη θέση στην σύγχρονη κοινωνία. Σύμφωνα με τις επίκαιρες διεθνείς αναλύσεις, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αδιάκοπη αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά. Παράλληλα, οι ΑΠΕ συνολικά ενισχύουν σταθερά το μερίδιό τους στο το παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα. Συγκεκριμένα, το 2025 οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας υπερίσχυσαν, σε παγκόσμιο επίπεδο, του άνθρακα ως βασική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, επιτεύχθηκε η κάλυψη ενός σημαντικού μέρους της παγκόσμιας ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά από την παραγωγή ηλιακής και αιολικής ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι το προηγούμενο έτος 2024 ο άνθρακας αποτελούσε την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρισμού, το 2025 οι ΑΠΕ υπερίσχυσαν αυτού. Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση του ΙΕΑ, για το έτος του 2025 εκτιμάται ότι οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δύναται να υπερισχύσουν του άνθρακα στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, τονίστηκε ότι για πρώτη φορά το μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακές και αιολικές πηγές ήταν υψηλότερο από αυτό των ορυκτών καυσίμων ..

Οι προβλέψεις για την ανάπτυξη και εδραίωση των φωτοβολταικών συστημάτων είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικές. Αναφορικά, εκτιμάται ότι έως το 2026 θα υπάρξει αύξηση και ανάπτυξη της αγοράς κατά 5%, η οποία θα συνεχίσει να αυξάνεται έως το 2029 με ετήσιο ρυθμό που θα φτάσει το 11% έως το 2029. Επιπλέον, η παγίωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εντοπίζεται από τις αναλύσεις που δημοσιεύτηκαν στην ετήσια έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας που αναρτήθηκε το 2025. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ότι το 7% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καλυπτόταν μόνο από τα φωτοβολταϊκά συστήματα το 2024.

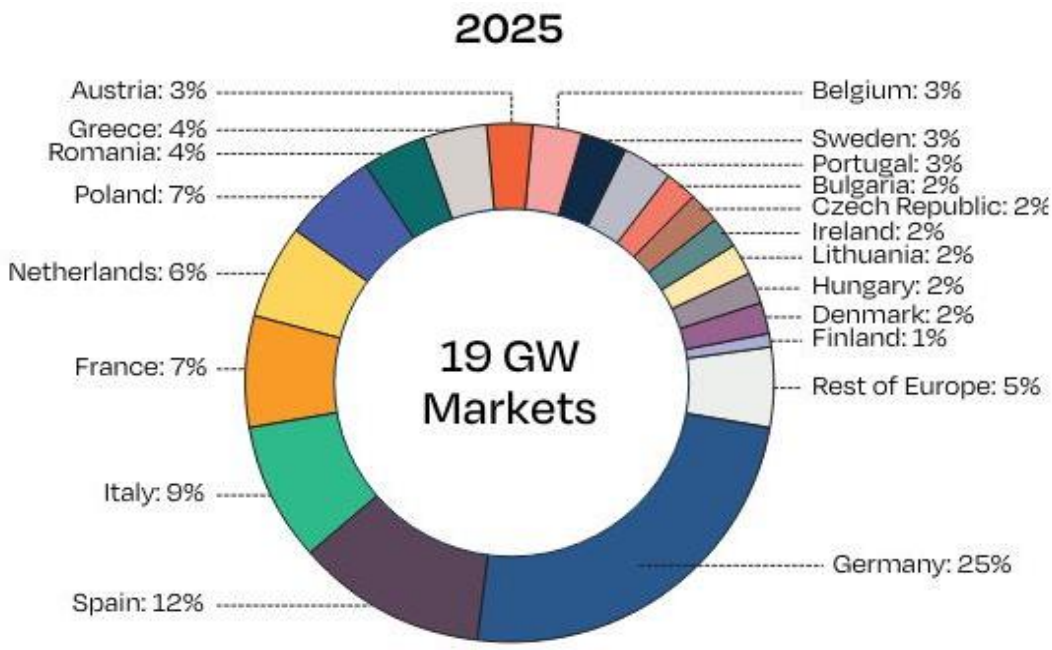
Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζονται οι ετήσιες προσθήκες εγκατεστημένης ισχύος στις ΗΠΑ με πραγματικά δεδομένα από το 2017 έως το 2023 και ετήσιες προβλέψεις έως το έτος 2029. Αναλυτικότερα, οι γαλάζιες μπάρες περιγράφουν τα πραγματικά δεδομένα ενώ οι μωβ μπάρες αντιστοιχούν στις ετήσιες προβλέψεις. Παρατηρείται λοιπόν, μια σταθερά αυξανόμενη τάση στις ετήσιες προσθήκες ισχύος μέχρι το έτος του 2026, όπου αναμένεται και η μέγιστη τάση. Έπειτα από το 2026 έως

το 2029 εμφανίζεται μία σταδιακή μείωση.



Διάγραμμα 1: Ετήσιες νέες προσθήκες εγκατεστημένης ισχύος "community solar" στις ΗΠΑ για το χρονικό διάστημα 2017-2029.

Επιπρόσθετα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το παρακάτω διάγραμμα στο οποίο είναι εμφανές ότι η αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν εξελίσσεται ισόρυθμα σε κάθε ευρωπαϊκή χώρα. Ενδεικτικά, η Γερμανία (με ποσοστό 25%), η Ισπανία (12%) και η Ιταλία (9%) αποτελούν τρεις χώρες με το μεγαλύτερο πλήθος νέων εγκαταστάσεων. Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι, η χώρα μας κατέχει ένα πολύ μικρό (μόλις 4%) αλλά υπαρκτό υπολογίσιμο μερίδιο.



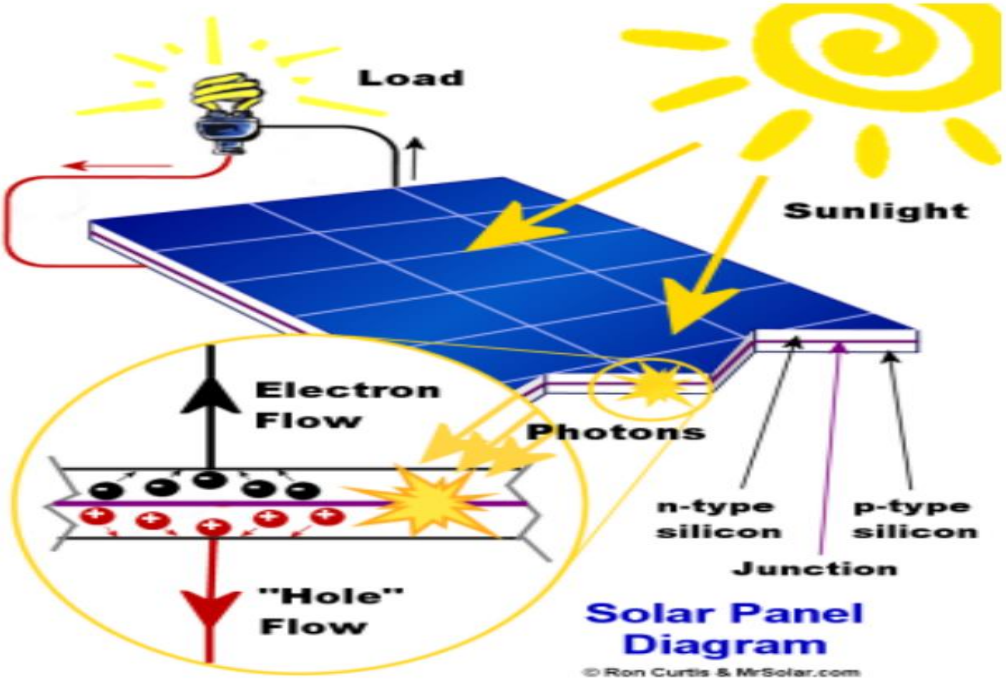
Διάγραμμα 2 : Κυκλικό διάγραμμα κατανομής ενός συνόλου 19 GW (συνολική ισχύς φωτοβολταϊκών) ανά χώρα στην Ευρώπη για το έτος του 2025.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Εισαγωγή στις βασικές έννοιες των φωτοβολταϊκών συστημάτων

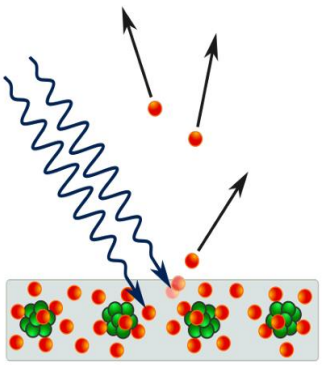
2.1 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα και ο ρόλος τους

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι τεχνολογικά συστήματα, τα οποία αξιοποιούν την ενέργεια που παράγεται από τον Ήλιο και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία μετατρέπεται η ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια ως αποτέλεσμα της διέγερσης και διαχωρισμού φορέων φορτίου στο εσωτερικό του υλικού. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται είναι σε μορφή συνεχούς ρεύματος (DC) και στις περισσότερες εφαρμογές, μετατρέπεται σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) για να είναι εύκολη η χρήση του και για να είναι κατάλληλο για κατανάλωση.
Με την έννοια των ηλιακών κυψελών εννοούμε το βασικό φωτοβολταϊκό στοιχείο που κάνει τη μετατροπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό. Η

λειτουργική αρχή των φωτοβολταϊκών στοιχείων (ηλιακών κυψελών) στηρίζεται στους ημιαγωγούς, στους οποίους, με κατάλληλη πρόσμιξη δημιουργούνται και σχηματίζονται περιοχές p-type και n-type, σχηματίζοντας τελικά μία ένωση p–n. Στην περιοχή επαφής της ένωσης, σχηματίζεται ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο το οποίο επιτρέπει τον διαχωρισμό των φωτοπαραγόμενων φορέων και καθιστά εφικτή την ηλεκτρική αξιοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Εικόνα 1: Δομή ηλιακού συστήματος



Εικόνα 2: Απεικόνιση φωτοβολταϊκού φαινομένου

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται ο τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Ειδικότερα, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ξεκινάει όταν το ηλιακό φως προσπίπτει πάνω στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Μόλις λοιπόν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο υλικό του φωτοβολταϊκού πλαισίου, απορροφάται από την ημιαγωγική διάταξη p-n (p-type και n-type πυρίτιο) και δημιουργεί στο εσωτερικό του υλικού ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής. Το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στην ζώνη επαφής διαχωρίζει τους φορείς φορτίου, ωθώντας τα ηλεκτρόνια προς την μία κατεύθυνση και τις οπές προς την αντίθετη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία διαφοράς δυναμικού.
Όταν το κύκλωμα κλείσει μέσω εξωτερικού φορτίου, τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω των αγωγών προς το φορτίο, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ η «ροή οπών» αποδίδει ισοδύναμα την κίνηση των θετικών φορέων εντός του υλικού. Η παραπάνω διαδικασία εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει συνεχές ρεύμα, το οποίο στη συνέχεια αξιοποιείται από τα υπόλοιπα υποσυστήματα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (π.χ. αντιστροφέας, καλωδιώσεις, προστασίες), ώστε να καταστεί κατάλληλο για κατανάλωση ή και έγχυση στο ηλεκτρικό δίκτυο (Utility grid).

2.1.1 Από τι αποτελείται ένα Φ/Β σύστημα

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους αλληλεξαρτώμενα τμήματα τα οποία λειτουργούν υποστηρικτικά και συνεργάζονται με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Φωτοβολταϊκά πάνελ (PV modules): Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από σύνολα ηλιακών κυψελών ενσωματωμένων σε προστατευτικό πλαίσιο. Ουσιαστικά, συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν την σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αντιστροφέας (Inverter): Ουσιαστικά είναι συσκευές μετατροπείς οι οποίοι μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC) σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Η μετατροπή αυτή είναι πολύ σημαντική

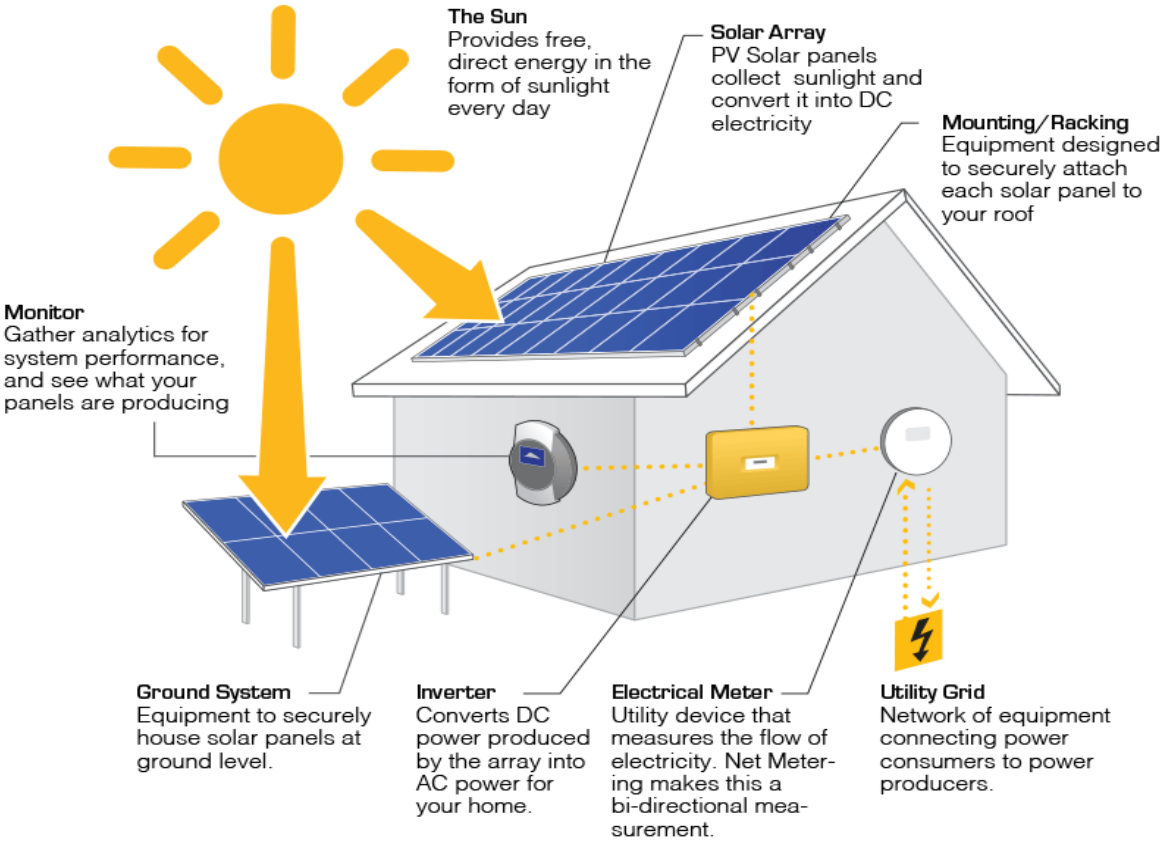
διαδικασία καθώς εφαρμόζεται σε οικιακές ή βιομηχανικές χρήσεις ή ακόμα μπορεί να υποστηρίζει την διαχείριση της φόρτισης συστοιχιών μπαταριών σε αυτόνομα ή υβριδικά συστήματα.

Σύστημα αποθήκευσης – μπαταρία: Αποθηκεύει την περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται κατά την διάρκεια της ημέρας με σκοπό την μελλοντική αξιοποίηση της σε συνθήκες χωρίς ηλιοφάνεια, όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν ο ήλιος δεν λάμπει. Ουσιαστικά, δεν προορίζεται για άμεση κατανάλωση.

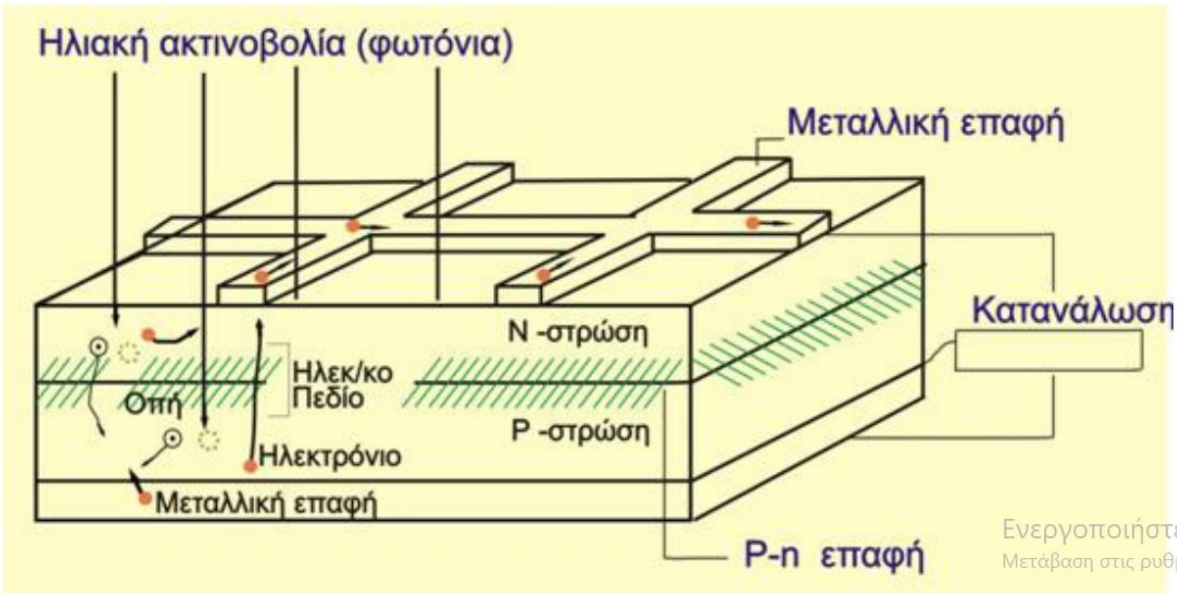
Σύστημα τοποθέτησης/ Στήριξης (Mounting structure): Περιλαμβάνει την μηχανική στήριξη που υποστηρίζουν τα πάνελ στην οροφή, το έδαφος ή άλλη επιφάνεια, όπως είναι οι βάσεις σε στέγη ή έδαφος. Ο σκοπός του συγκεκριμένου τμήματος είναι να στηρίζει τα πλαίσια έτσι ώστε να παραμένουν σταθερά, σε κατάλληλη κλίση και προσανατολισμό ώστε να είναι εφικτή η μέγιστη απορρόφηση ηλιακής ενέργειας.

Καλωδιώσεις και Συνδεσμολογία: Περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές καλωδιώσεις, τους συνδέσμους και τα κιβώτια διασύνδεσης με σκοπό να επιτευχθεί η ασφαλής μεταφορά της παραγόμενης ισχύος.

Σύστημα παρακολούθησης (Monitoring): Το σύστημα παρακολούθησης είναι ένας εξοπλισμός που συμβάλει στην μέτρηση και έλεγχο της απόδοσης και στον γρήγορο εντοπισμό τυχόν προβλημάτων ή βλαβών που μπορεί να συμβούν. Αξίζει να τονιστεί ότι εκτός από τα παραπάνω βασικά επιμέρους τμήματα, υπάρχουν κάποια επιπλέον υποσυστήματα και μηχανισμοί που βοηθούν στην ασφαλή και αποτελεσματική αποθήκευση και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συγκεκριμένα εξαρτήματα αποτελούν τους αυτόματους διακόπτες, τα καλώδια, κάποιες εξειδικευμένες συσκευές που προστατεύουν από την υπέρταση, εξοπλισμοί επεξεργασίας ισχύος και γείωσης. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι πίνακες AC/DC, αποζεύκτες, ασφάλειες και απαγωγοί υπέρτασης (SPD).



Εικόνα 3: Εικονική απεικόνιση των επιμέρους τμημάτων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος



Εικόνα 4 :Εικονική αναπαράσταση της διάταξης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

2.2 Εισαγωγή στην δομή της φωτοβολταϊκής κυψέλης

Η φωτοβολταϊκή κυψέλη είναι το πιο σημαντικό κομμάτι του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς αποτελεί ένα εξάρτημα το οποίο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Αναλυτικότερα, είναι ένα πολύ λεπτό κομμάτι υλικού (συνήθως πυριτίου) το οποίο μετατρέπει το φως σε ηλεκτρισμό. Στην συγκεκριμένη υποενότητα αναλύεται η δομή της φωτοβολταϊκής κυψέλης αλλά και ο τρόπος που εξαρτάται η λειτουργία της από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και παραμέτρους.

2.2.1 Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκής κυψέλης

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκων κυψελών στηρίζεται σε έναν ημιαγωγό όπου σχηματίζεται η ένωση p-n σε ένα πολύ λεπτό υπόστρωμα, πάχους τάξης 120-160 μm. Γύρω από αυτή την ένωση σχηματίζονται επιμέρους στρώματα και στοιχεία με σκοπό την αποτελεσματική απορρόφηση της ακτινοβολίας φωτός και συγκέντρωση του ρεύματος που παράγεται· Αναλυτικότερα, η τυπική δομή της φωτοβολταϊκής κυψέλης αποτελείται από :

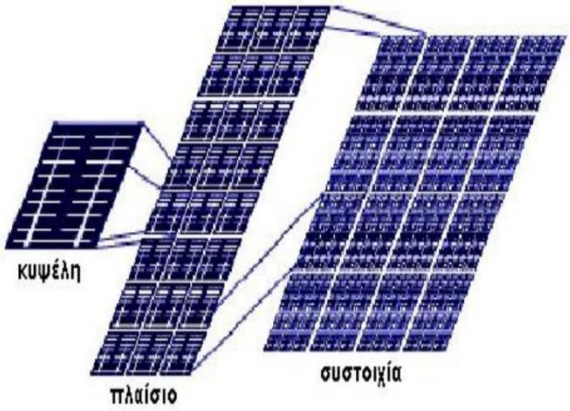
-Ένα ενεργό ημιαγωγικό υλικό το οποίο συνήθως αποτελεί το πυρίτιο που συμβάλλει στην απορρόφηση των φωτονίων και στο σχηματισμό ζευγών ηλεκτρονίου - οπής.

-Ένωση p-n: Η ένωση αυτή σχηματίζει εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που οδηγεί στην διακριτοποίηση των φορέων.

-Εμπρόσθια επαφή συλλογής ρεύματος: Αποτελεί ένα πολύ λεπτό μεταλλικό πλέγμα όπου επιτρέπει την διέλευση ηλιακής ακτινοβολίας, συγκεντρώνει τους φορείς και τους κατευθύνει στο εξωτερικό κύκλωμα.

-Οπίσθια επαφή συλλογής ρεύματος: Αποτελεί μεταλλική ή σύνθετη δομή επαφής που ολοκληρώνει το κύκλωμα και καθορίζει τις μειώσεις ανασυνδυασμού στην οπίσθια πλευρά. Μπορεί να έχει διαφορετικές δομές ανάλογα με την τεχνολογία της κυψέλης.

-Αντιανακλαστική επίστρωση (ARC): Η αντιανακλαστική επίστρωση εμφανίζεται στην εμπρόσθια επιφάνεια και συμβάλει στον περιορισμό της ανάκλασης, αυξάνοντας το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που εισχωρεί στον ημιαγωγό.
-Παθητικοποίηση επιφανειών: Είναι στρώματα τα οποία εξαιτίας του ανασυνδυασμού φορέων στις επιφάνειες της κυψέλης ελλατώνουν τις απώλειες ενισχύοντας την τάση ανοικτού κυκλώματος και κατ'επέκταση την αποδοτικότητα.



Εικόνα 5: Εικονική αναπαράσταση της φωτοβολταϊκής κυψέλης, του φωτοβολταϊκού πλαισίου και της συστοιχίας

2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τα ηλεκτρικά μεγέθη της κυψέλης

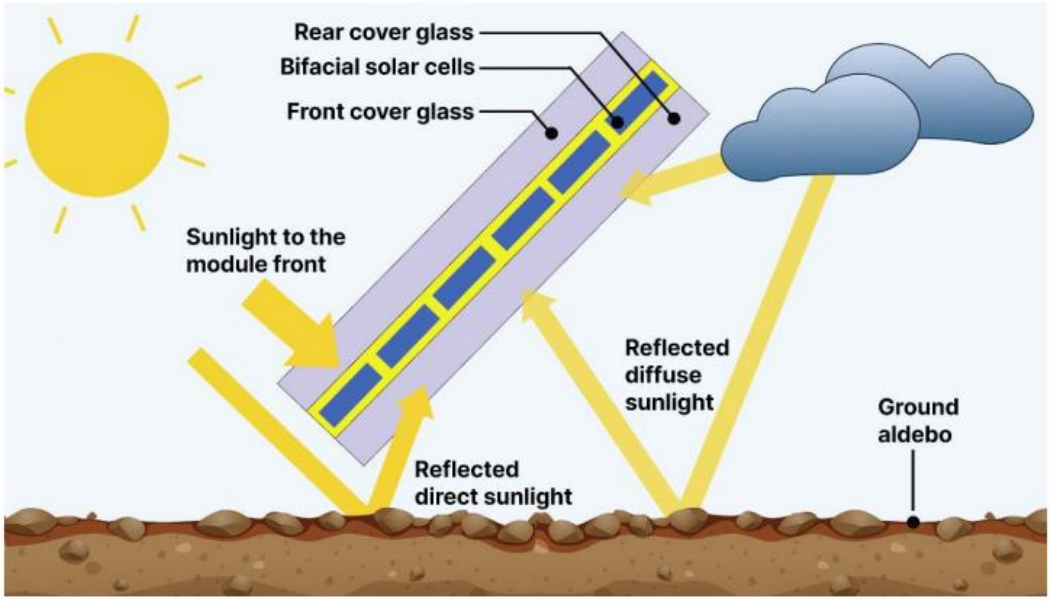
Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν κάποιες συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν τα μεγέθη μια φωτοβολταϊκής κυψέλης. Οι συγκεκριμένοι παράγοντες αφορούν τις συνθήκες ακτινοβολίας αλλά και την θερμοκρασία. Αρχικά, όταν παρατηρείται άνοδος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σημειώνεται αντίστοιχη αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος και κατά επέκταση της παραγόμενης ισχύος. Αυτό συμβαίνει καθώς σχηματίζονται και παράγονται στο εσωτερικό του ημιαγωγού, περισσότεροι φωτοπαραγόμενοι φορείς φορτίου. Από την άλλη μεριά, όταν παρατηρείται άνοδος της θερμοκρασίας σημειώνεται αντίστοιχη μείωση της τάσης. Το γεγονός αυτό έχει ως επακόλουθο την μείωση της μέγιστης ισχύος της κυψέλης. Η μεταβολή του

ρεύματος, σε σχέση με την μεταβολή της τάσης, είναι συνήθως μικρότερη. Επομένως, συμπεραίνεται ότι, η θερμική συμπεριφορά αποτελεί σημαντικό πρακτικό παράγοντα απόδοσης, ειδικά σε πραγματικές συνθήκες πεδίου.

2.3 Παρουσίαση των κατηγοριών των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στην προηγούμενη υποενότητα παρουσιάστηκε η βασική δομή και τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται οι κατηγορίες των φωτοβολταϊκών πλαισίων και συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μονής όψης και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διπλής όψης.
Η κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται με περισσότερα από ένα κριτήρια, παρόλα αυτά στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στην συγκεκριμένη διάκριση καθώς αποτελεί άμεσα το αντικείμενο της μελέτης.
Όπως προαναφέρθηκε, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τα φωτοβολταϊκά μονής όψης και τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών μονής όψης είναι πολύ απλή και βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την ακτινοβολία που προσπίπτει στην εμπρόσθια πλευρά του πλαισίου. Η οπίσθια πλευρά του πλαισίου δεν αξιοποιείται για την απορρόφηση της ακτινοβολίας καθώς αποτελεί κατασκευαστικά μία μη ενεργή πλευρά. Από την άλλη πλευρά, στα φωτοβολταϊκά πλαίσια διπλής όψης, είναι αξιοποιήσιμες και η εμπρόσθια αλλά και η οπίσθια, καθώς αποτελούν κατασκευαστικά φωτοενεργές πλευρές. Η οπίσθια όψη σχετίζεται με την ανάκλαση του περιβάλλοντος και με τη διάχυτη ακτινοβολία και κατ' επέκταση εξαρτάται έντονα από τις συνθήκες εγκατάστασης. Η συγκεκριμένη κατηγορία δημιουργήθηκε καθώς με την πάροδο των χρόνων, εμφανίστηκαν αυξημένες απαιτήσεις για υψηλότερη ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
Τα συστήματα διπλής όψης έχουν την δυνατότητα να αποδώσουν καλύτερα συγκριτικά με τα συστήματα μονής όψης σε κατάλληλες συνθήκες. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί για την δημιουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων διπλής όψης χρησιμοποιείται κυρίως διπλό γυαλί (glass-glass) είτε γυαλί και διαφανές οπίσθιο φύλλο (glass - backsheet) για να επιτρέπεται η διέλευση ηλιακής ακτινοβολίας και

από την οπίσθια πλευρά του.



Εικόνα 6 : Ο τρόπος λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης

Κεφάλαιο 3 – Διπλής όψης φωτοβολταϊκά συστήματα

3.1 Ορισμός και βασική αρχή λειτουργίας

3.1.1. Ορισμός

Ως φωτοβολταϊκό πλαίσιο διπλής όψης ορίζεται μία κατηγορία φωτοβολταϊκής μονάδας που έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να αξιοποιεί την εμπρόσθια και την οπίσθια πλευρά για τη συλλογή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκριτικά με τις φωτοβολταϊκές μονάδες μονής όψης, η διαφορά τους είναι λειτουργική, καθώς έχουν την ικανότητα να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και από τις δύο πλευρές του πλαισίου. Με αυτόν τον τρόπο, εκμεταλλεύονται το φως που φτάνει στην οπίσθια πλευρά τους, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση φωτοηλεκτρικής μετατροπής.

3.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η επινόηση και η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων διπλής όψης προέκυψαν από την ανάγκη για την μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η ιδέα αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 καθώς τότε προέκυψαν αυξημένες ανάγκες αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, στη δεκαετία του 1970 δόθηκε έμφαση σε εφαρμογές συστημάτων υψηλών απαιτήσεων, κυρίως στον διαστημικό τομέα. Ταυτόχρονα, η ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των αρχιτεκτονικών διπλής όψης αναπτύχθηκε στην Ευρώπη, με βάση την ροή των ισπανικών τεχνολογικών εξελίξεων, οι οποίες μάλιστα λειτούργησαν σαν αφετηρία για την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη του συγκεκριμένου μηχανισμού. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η εταιρεία ISOFOTON στην Ισπανία, αναφέρεται ως ο πρωτοπόρος της συγκεκριμένης ιδέας καθώς συνέβαλε στην επιπρόσθετη ανάπτυξη της τεχνολογίας και μετατρέποντας την σε ένα εμπορικό προϊόν. Από τότε μέχρι την σημερινή εποχή, υπάρχει μία εκτεταμένη εξέλιξη και ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων διπλής όψης. Ο συγκεκριμένος τομέας εξελίσσεται συνεχώς με απώτερο στόχο την διάχυτη εμπορική αναγνώριση και εφαρμογή.

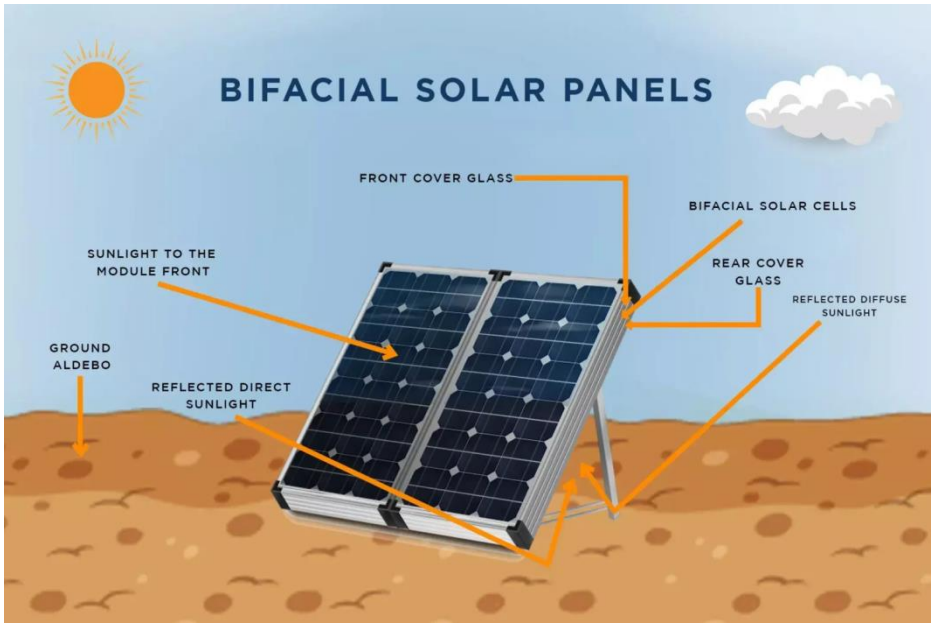
3.1.3 Βασική αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών διπλής όψης παραμένει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στον ημιαγωγό. Παρόλα αυτά, διαφοροποιείται στο γεγονός ότι η κατασκευή του πλαισίου επιτρέπει και στην οπίσθια πλευρά να είναι φωτοενεργή έτσι ώστε να συμβάλλει αποτελεσματικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά, η οπίσθια πλευρά του πλαισίου, απορροφά το πρόσθετο ηλιακό φως που ανακλάται από το έδαφος, το περιβάλλον και τα κτίρια, καθώς και την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία από τον ουρανό. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην οπίσθια πλευρά του πλαισίου και οι ακτίνες φωτός απορροφώνται από την πίσω όψη των κυψελών και μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια.

3.2 Δομή και μηχανισμός λειτουργίας

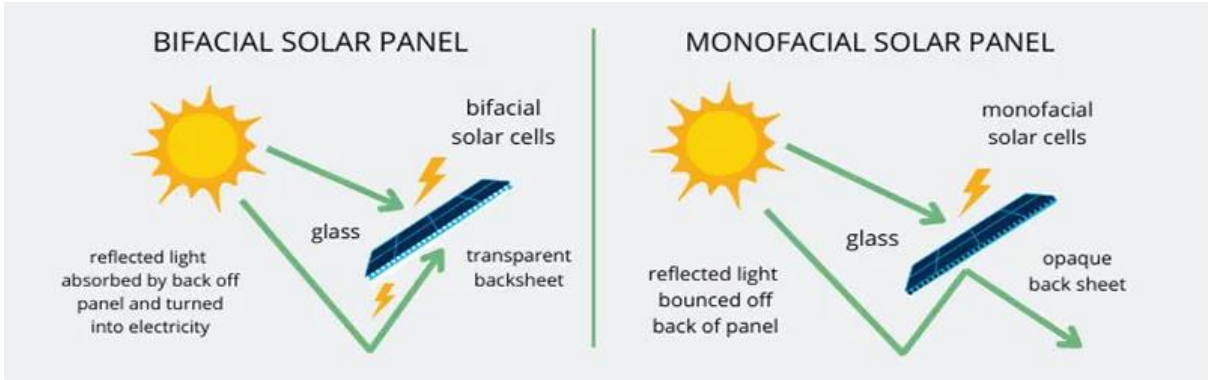
Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται λεπτομερώς η δομή και ο μηχανισμός λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων διπλής όψης. Η ιδέα βασίζεται στον κατάλληλο σχεδιασμό της κυψέλης και της κατασκευής του πλαισίου, έτσι ώστε να είναι ενεργή και η οπίσθια πλευρά του. Έτσι, επιτρέπεται η απορρόφηση και αξιοποίηση της ανακλώμενης και της διάχυτης συνιστώσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η κατασκευή στοχεύει στην αξιοποίηση της πρόσθετης ακτινοβολίας που προέρχεται από την ανάκλαση του περιβάλλοντος και την διάχυτη συνιστώσα. Ταυτόχρονα, περιορίζονται οι οπτικές απώλειες που προκύπτουν εξαιτίας της σκίασης από τα δομικά στοιχεία και τις μεταλλικές επαφές, με απώτερο στόχο την μεγιστοποίηση της συλλογής φωτός. Για την κατασκευή του, χρησιμοποιείται ένας υψηλής απόδοσης σχεδιασμός κυψέλης. Η κυψέλη αποτελείται από λεπτό στρώμα ημιαγωγού (συνήθως με βάση το πυρίτιο) στο οποίο διαμορφώνεται η φωτοενεργός περιοχή. Η επίτευξη της μέγιστης απόδοσης γίνεται με την εφαρμογή και χρήση επιφανειακών στρωμάτων παθητικοποίησης που στοχεύουν στην μείωση ενδεχόμενων ανασυνδυασμών αλλά και με την αντιανακλαστική επίστρωση (ARC) στην εμπρόσθια πλευρά. Επιπλέον, το παραγόμενο ρεύμα συλλέγεται μέσω μεταλλικών επαφών και μεταλλοποίησης. Βασική προϋπόθεση για να είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιήσιμη είναι τα πλαίσια διπλής όψης να έχουν μία διαφανή ή ημιδιαφανή οπίσθια πλευρά. Έτσι, τοποθετείται στο οπίσθιο μέρος τους μία διαφανή ή μερικώς διαφανή κατασκευή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με την χρήση και εφαρμογή διπλού γυαλιού (glass-glass) ή ακόμα με ένα διαφανές ή ημιδιαφανές οπίσθιο φύλλο το οποίο λειτουργεί ως προστατευτικό στρώμα χωρίς να παρεμποδίζεται η μετάδοση του φωτός και η απορρόφηση της ακτινοβολίας. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι, η συγκεκριμένη κατασκευή επιτρέπει στην οπίσθια πλευρά να λαμβάνει και να εκμεταλλεύεται την έμμεση ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται, μεγιστοποιώντας τα ποσοστά συνολικής παραγόμενης ισχύος. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η δομή και ο μηχανισμός λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η εμπρόσθια πλευρά που απορροφά άμεση την ηλιακή ακτινοβολία και η πίσω πλευρά που

συλλέγει την έμμεση ηλιακή ακτινοβολία (την ανακλώμενη και διάχυτη).



Εικόνα 7 : Αναπαράσταση δομής και λειτουργίας φωτοβολταϊκών διπλής όψης

Τέλος, στην παρακάτω φωτογραφία αναπαριστάται η διαφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων μονής όψης και των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης ως προς τον μηχανισμό λειτουργίας και την δομή τους. Χαρακτηριστικά, στην παρακάτω φωτογραφία στην δεξιά πλευρά, παρουσιάζεται το φωτοβολταϊκό σύστημα μονής όψης, όπου η οπίσθια πλευρά είναι αδιαφανής, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ακτινοβολία να μην μετατρέπεται σε ηλεκτρική αλλά να ανακλάται προς το περιβάλλον περιορίζοντας έτσι την παραγόμενη ισχύ. Από την άλλη πλευρά, στην αριστερή εικόνα το φωτοβολταϊκό σύστημα διπλής όψης, αξιοποιεί την ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος και το περιβάλλον εξαιτίας της τεχνολογίας που εξηγήσαμε.



Εικόνα 8 : Απεικόνιση λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου διπλής όψης (bifacial) και μονοεδρικού (monofacial).

3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα bifacial έναντι monofacial

Τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης αποτελούν μία τεχνολογική εξέλιξη του υπάρχων μηχανισμού μονόπλευρων, που αναπτύχθηκε με απώτερο στόχο την την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Παρόλα αυτά, σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά μονής όψης, η υπεροχή τους δεν είναι καθολική σε όλα τα επίπεδα και η επιλογή τους δεν είναι πάντα βέλτιστη. Το τελικό τους όφελος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι οι συνθήκες εγκατάστασης και οι οικονομικοτεχνικές απαιτήσεις του έργου. Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών διπλής όψης έναντι των μονοπλευρικών.

3.3.1 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών πλαισίων διπλής όψης (bifacial)

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διπλής όψης αποτελούν συστήματα με υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μιας όψης. Καθώς είναι ενεργή και η οπίσθια πλευρά τους, έχουν την δυνατότητα να απορροφούν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και κατ’ επέκταση να παράγουν αυξημένη ηλεκτρική ενέργεια οδηγώντας σε αυξημένη ενεργειακή απόδοση. Ουσιαστικά, το στοιχείο αυτό αποτελεί και την βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αυτών τύπων. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι το ενεργειακό όφελος επιτυγχάνεται όταν οι συνθήκες εγκατάστασης είναι ευνοϊκές. Επιπλέον, τα οφέλη επεκτείνονται στον τομέα των υποδομών και γενικότερα της εγκατάστασης και χρήσης. Οι μονάδες διπλής όψης κατέχουν μεγαλύτερη ευελιξία εγκατάστασης. Εκτός από την συνηθισμένη κεκλιμένη τοποθέτηση τους, έχουν την ικανότητα να εγκατασταθούν καθέτως με διάταξη από ανατολή προς δύση. Ο λόγος της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι για να επιτευχθεί διπλή αιχμή παραγωγής δηλαδή και σε πρωινές και σε απογευματινές ώρες. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μείωση συμφόρησης καθώς η παραγωγή κατανέμεται καλύτερα καθ’όλη την διάρκεια της ημέρας. Τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για εγκαταστάσεις σε ανοιχτούς και ανακλαστικούς χώρους, όπου η ανακλώμενη ακτινοβολία μπορεί να

αξιοποιηθεί αποτελεσματικά από την οπίσθια πλευρά. Επιπρόσθετα, τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης με διαφανή γυάλινη οπίσθια επιφάνεια (για παράδειγμα σε περίπτωση κατασκευής glass–glass), μπορούν να προσφέρουν βελτιωμένη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις σε σχέση με αντίστοιχα φωτοβολταϊκά μονής όψης. Έχει παρατηρηθεί ότι η γυάλινη οπίσθια επιφάνεια μπορεί να προσδώσει ευνοϊκότερη θερμική συμπεριφορά και βελτιωμένη προστασία έναντι της διάβρωσης. Συνεπώς, εκτιμάται ότι τα διπλής όψης φωτοβολταικά μπορούν να παρουσιάζουν αυξημένη διάρκεια ζωής, γεγονός που ενδέχεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερη συνολική παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους και αντίστοιχα, σε μείωση των λειτουργικών δαπανών.

3.3.2 Μειονεκτήματα bifacial έναντι monofacial

Παρά το σύνολο των πλεονεκτημάτων τους τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης κατέχουν και ένα σύνολο χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένους τομείς που τα καθιστούν μία λιγότερο συμφέρουσα επιλογή έναντι των μονοπλευρικών. Οι συγκεκριμένοι τομείς πλαισιώνονται στον τομέα του κόστους, της εγκατάστασης και της αβεβαιότητας της τελικής απόδοσης. Αρχικά, τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης χαρακτηρίζονται έντονα από το υψηλό κόστος τους καθώς κατέχουν μία πολύπλοκη κατασκευαστική δομή συγκριτικά με τα απλούστερης κατασκευής μονής όψης φωτοβολταϊκά. Το υψηλό κόστος τους οφείλεται κατά κύριο βαθμό στον σχεδιασμό οπίσθιας όψης το οποίο επηρεάζει και το κόστος εγκατάστασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτείται μεγαλύτερη προσοχή στην διαδικασία της εγκατάστασης, καθώς πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διατηρείται η οπίσθια πλευρά λειτουργικά ενεργή. Επιπλέον, το κόστος επηρεάζεται από το γεγονός του αυξημένου βάρους τους συγκριτικά με τα μονής όψης, καθώς απαιτούνται ισχυρότερες βάσεις στήριξης. Αντιθέτως, τα μονοπλευρικά συστήματα αποτελούν μία οικονομικότερη επιλογή για χρήστες με συμβατικές υποδομές και τυπικές εγκαταστάσεις. Επιπλέον, ένα άλλο κρίσιμο μειονέκτημα τους αποτελεί το αισθητικό κομμάτι, δηλαδή η εμφάνιση τους. Τα μονής όψης φωτοβολταϊκά συστήματα, έχουν ενεργά στοιχεία μόνο στη μία πλευρά, ενώ το πίσω μέρος καλύπτεται συνήθως με ένα αδιαφανές προστατευτικό στρώμα. Αυτός ο παραδοσιακός σχεδιασμός είναι απλούστερος και ελαφρύτερος.

Από την άλλη μεριά, τα διπλής όψης φωτοβολταϊκά συστήματα, έχοντας σχεδιαστεί για να δεσμεύουν το ηλιακό φως και από τις δύο πλευρές, παρουσιάζουν μία πιο περίπλοκη εμφάνιση. Τέλος, αξίζει να τονιστεί το μειονέκτημα τους στον τομέα της εγκατάστασης και χρήσης. Τα μονής όψης φωτοβολταϊκά συστήματα είναι εύχρηστα και ενδείκνυνται σε υποδομές και χώρους όπου η πίσω πλευρά του πλαισίου βρίσκεται μονίμως υπό σκίαση και είναι μη αξιοποιήσιμη. Αντίστοιχα, αποτελούν την πιο συμφέρουσα επιλογή όπου οι συνθήκες του πεδίου δεν είναι ευνοϊκές για την οπίσθια όψη (χαμηλό albedo, περιορισμένο ύψος τοποθέτησης, μικρές αποστάσεις και σκιάσεις). Τέτοιες εγκαταστάσεις για παράδειγμα μπορεί να είναι οι στέγες και οροφές σπιτιών καθώς δεν επιτρέπουν να αξιοποιείται ουσιαστικά η ακτινοβολία από τα οπίσθια πλαίσια. Αντιθέτως, τα διπλής όψης φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν την μέγιστη απόδοση και ενσωματώνονται σε υπαίθριες εγκαταστάσεις με επαρκές ύψος και εξωτερικούς χώρους όπου είναι δυνατή η ανάκλαση του φωτός από το οπίσθιο μέρος του πλαισίου. Εν κατακλείδι, η διαφορά τους ως προς τον χώρο εγκατάστασης τους είναι η εξής, τα μονής όψης φωτοβολταϊκά συστήματα είναι κατάλληλα για στενές ή παραδοσιακές εγκαταστάσεις, ενώ τα διπλής όψης πάνελ είναι κατάλληλα για ευρύχωρα, ανακλαστικά περιβάλλοντα όπου μπορεί να συλλεχθεί περισσότερη ενέργεια.

3.4 Ανάλυση των τεχνολογιών κατασκευής κυψελών που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά πλαίσια διπλής όψης

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης υλοποιούνται με ένα σύνολο διαφορετικών τεχνολογιών κατασκευής κυψελών, που διαφέρουν μεταξύ τους καθώς καθεμία από αυτές εμφανίζει διαφορετική λειτουργική συμπεριφορά, διαφορετική αποδοτικότητα, ανθεκτικότητα και κατασκευαστικό κόστος. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι βασικές δομικές διατάξεις φωτοβολταϊκών κυψελών και περιγράφονται τα κύρια δομικά χαρακτηριστικά τους, τα μειονεκτήματα τους καθώς και τα σημεία που υπερτερούν έναντι των υπολοίπων.

3.4.1 Bifacial PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)

Μία πολύ βασική αρχιτεκτονική σχεδίασης φωτοβολταϊκών κυψελών αποτελεί η τεχνολογία "Bifacial PERC", η οποία αναπτύχθηκε ως περαιτέρω ανάπτυξη της συμβατικής κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου με σκοπό την μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σημείο στο οποίο αυτή διαφέρει είναι η προσθήκη ενός στρώματος διηλεκτρικού υλικού στην οπίσθια πλευρά της επιφάνειας της κυψέλης. Η επικάλυψη της οπίσθιας επιφάνειας με διηλεκτρικές επιστρώσεις συμβάλλει στην μείωση των απωλειών των ηλεκτρικών φορτίων και κατ' επέκταση στην αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Ουσιαστικά, τα επιπλέον στρώματα υλικού δρουν ως μία προστατευτική επένδυση για την κυψέλη. Στα Bifacial PERC φωτοβολταϊκά δεν καλύπτεται πλήρως η οπίσθια όψη τους από μέταλλο ώστε να μπορεί να αξιοποιείται το ανακλώμενο φως. Αντιθέτως, διαμορφώνεται έτσι ώστε να έχει ανοιχτή διάταξη για να επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να μπορεί να προσπίπτει φως στην οπίσθια πλευρά και να αξιοποιείται. Η συγκεκριμένη κατηγορία αποτελεί μία αρκετά αξιόπιστη και κυρίως οικονομική επιλογή σε καταστάσεις που είναι επιθυμητό ένα ανταγωνιστικό κόστος και λειτουργία διπλής όψης. Τέλος, ενδείκνυται για μία λειτουργία διπλής όψης ιδιαίτερα όταν υπάρχουν περιβάλλοντα με μέτριο προς καλό albedo. Αντιθέτως, δεν αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή σε περιπτώσεις όπου αναζητείται και επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας από την πίσω όψη. Συγκριτικά με τις πιο σύγχρονες τεχνολογίες, δεν παρέχει μέγιστο δυνατό ενεργειακό όφελος από την οπίσθια πλευρά, ωστόσο υπερέχει σε κόστος αποτελεί μία αρκετά αξιόπιστη και δοκιμασμένη τεχνολογία.

3.4.2 n-type PERT

Μία επιπλέον βασική και ευρέως γνωστή τεχνολογία κατασκευής φωτοβολταϊκών κυψελών αποτελεί η n-type PERT (Passivated Emitter and Rear Totally Diffused Cell). Στην n-PERT διάταξη είναι ενεργές τόσο η εμπρόσθια όσο και η οπίσθια πλευρά της κυψέλης και έχει ως βάση το κρυσταλλικό πυρίτιο τύπου n (n-type wafer). Παράλληλα, ο εκπομπός είναι τύπου p και συνήθως πραγματοποιείται διάχυση βορίου. Επομένως, στην εμπρόσθια πλευρά δημιουργείται εκπομπός τύπου p+, ενώ

στην οπίσθια πλευρά σχηματίζεται περιοχή τύπου n+ μέσω διάχυσης φωσφόρου. Με αυτόν τον τρόπο, εμφανίζονται θεμελιώδη πλεονεκτήματα ως προς την απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης αλλά και ως προς τη σταθερότητα της απόδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (IEA PVPS), η συγκεκριμένη τεχνολογία δύναται να επιτύχει έως και 95% δείκτη λειτουργίας διπλής όψης (bifaciality factor). Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιοι περιοριστικοί παράγοντες για την n-type PERT τεχνολογία. Η αυξημένη πολυπλοκότητα στην κατασκευή της συγκριτικά με τις πιο απλές τεχνολογίες, αποτελεί ένα μείζον μειονέκτημα καθώς συνεπάγεται υψηλότερο κόστος παραγωγής. Επιπρόσθετα, η πολυπλοκότητα της κατασκευής της παρουσιάζει και μεγαλύτερη δυσκολία στη διαδικασία ποιοτικού ελέγχου που πρέπει να ολοκληρωθεί. Επομένως, είναι αναγκαίο να πραγματοποιείται σχολαστικός έλεγχος με υψηλή ακρίβεια στην βιομηχανική διαδικασία έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ορθή και αξιόπιστη λειτουργία της.

3.4.3 TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)

Η τεχνολογία TOPCon, αναπτύχθηκε με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρικών απωλειών της οπίσθιας όψης της κυψέλης και την αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Αποτελεί μία από τις τελευταίες τάσεις στην κατηγορία των τεχνολογιών κατασκευής φωτοβολταϊκών κυψελών. Η τεχνολογία είναι βασισμένη στην προσθήκη ενός λεπτού στρώματος οξειδίου του πυριτίου. Επιπλέον, προστίθεται πάνω σε αυτό το λεπτό στρώμα μία αγώγιμη στρώση πυριτίου ώστε τα ηλεκτρόνια να διέρχονται με ελεγχόμενο τρόπο.

Η συγκεκριμένη δομή δύναται να λειτουργήσει σαν φίλτρο το οποίο προστατεύει την κυψέλη επιτρέποντας παράλληλα την ευκολότερη διέλευση των ηλεκτρονίων, ενώ μειώνει την πιθανότητα τα ηλεκτρόνια να “συναντήσουν” οπές και να χαθεί έτσι μέρος της παραγόμενης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, συμβάλλει στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος και συντελεί στην καλύτερη απόδοση λειτουργίας της κυψέλης. Ταυτόχρονα, ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας TOPCon είναι η συμβατότητα παραγωγής. Η ενσωμάτωση και προσαρμογή της στην υφιστάμενη παραγωγική διαδικασία PERC είναι εφικτή, με την προσθήκη ορισμένων πρόσθετων σταδίων. Επομένως, χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλό κόστος αναβάθμισης,

συγκριτικά με τις λοιπές διαθέσιμες τεχνολογίες**.** Από την άλλη μεριά, η τεχνολογία TOPCon εμφανίζει κάποια βασικά μειονεκτήματα έναντι τεχνολογιών όπως η PERC. Αρχικά, το κόστος παραγωγής αποτελεί ένα από τα μείζονα προβλήματα, το οποίο οφείλεται στην πιο απαιτητική διαδικασία παραγωγής της, συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες. Σε αρκετές βιομηχανικές υλοποιήσεις απαιτείται αυξημένη κατανάλωση αργύρου για τη διαμόρφωση μεταλλικών επαφών, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται επαφές και στις δύο πλευρές της κυψέλης. Αυτό μπορεί να επιβαρύνει το κόστος παραγωγής καθώς και το κόστος των υλικών. Αξίζει να προστεθεί ότι έχει παρατηρηθεί μία σταδιακή μείωση του κόστους λόγω της ευρείας εφαρμογής της, παρόλα αυτά, το κόστος παραμένει υψηλότερο συγκριτικά με εναλλακτικές τεχνολογίες όπως η bifacial PERC.

3.4.4 IBC

Η τεχνολογία IBC (Interdigitated Back Contact) αποτελεί μία προηγμένη και καινοτόμα κατηγορία φωτοβολταϊκής κυψέλης. Στοχεύει στην αύξηση της αποδοτικότητας αλλά και στη βελτίωση της αισθητικής εμφάνισης των πλαισίων. Η διαφοροποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας εμφανίζεται στο γεγονός ότι οι μεταλλικές επαφές και των δύο πολικοτήτων (θετική και αρνητική) διαμορφώνονται στην πίσω όψη της κυψέλης. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται μία οδοντωτή διάταξη, προσφέροντας ομοιόμορφη εμπρόσθια επιφάνεια και περιορίζοντας τις οπτικές απώλειες λόγω σκίασης, με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνολογίες (bifacial PERC, PERT τύπου-n, TOPCon), οι κυψέλες IBC εμφανίζουν υψηλότερες δυνατότητες απόδοσης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η IBC παρουσιάζει κορυφαίες αποδόσεις σε εργαστηριακό επίπεδο της τάξης 25% υπερβαίνοντας τα αντίστοιχα των PERC και TOPCon. Πρακτικά, τα σημερινά στοιχεία IBC πετυχαίνουν ποσοστό απόδοσης 22–24%, δηλαδή ελαφρώς υψηλότερη από τις συμβατικές PERC (<22%). Ωστόσο, η τεχνολογία IBC παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα και περιορισμούς. Αρχικά, για τη διαμόρφωση αυτής της λειτουργικής δομής χρειάζεται μία αρκετά σύνθετη κατασκευαστική διαδικασία καθώς απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στη διαμόρφωση της οπίσθιας όψης

έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται και να αποφεύγονται πιθανές απώλειες. Απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά και το κόστος παραγωγής. Επιπροσθέτως, η IBC δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στις υπάρχουσες γραμμές παραγωγής PERC, όπως μπορεί η τεχνολογία TOPCon. Γι΄ αυτόν τον λόγο, χαρακτηρίζεται ως μία τεχνολογία που έχει μειωμένη οικονομική ανταγωνιστικότητα. Εν κατακλείδι, η τεχνολογία IBC εμφανίζει αυξημένη απόδοση και αξιοπιστία σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες που είδαμε στο παρόν κεφάλαιο. Παρόλα αυτά, το οικονομικό κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλό και η πολυπλοκότητα παραγωγής της περιορίζουν τη διάδοσή της σε ευρεία κλίμακα.

Κεφάλαιο 4 – Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση διπλής όψης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

4.1 Εισαγωγή στις βασικές έννοιες για την απόδοση των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

4.1.1 Ορισμός ενεργειακής απόδοσης

Ο όρος της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελεί μία από τις βασικότερες έννοιες για να περιγράψουν την αποτελεσματικότητα του ως προς την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ορίζεται ο λόγος της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα προς την συνολική ηλιακή προσπίπτουσα ακτινοβολία, δηλαδή την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια του, σε δεδομένο χρονικό διάστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, υπάρχει μία διαφοροποίηση μεταξύ των όρων της απόδοσης μονάδας και απόδοσης συστήματος. Με τον όρο απόδοση μονάδας νοείται η αποτελεσματικότητα του φωτοβολταϊκού πάνελ δηλαδή του πλαισίου μεμονωμένα. Εξαρτάται από τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των κυψελών, των κατασκευαστικών ιδιοτήτων αλλά και από το σύνολο των ηλεκτροπτικών παραμέτρων. Αντιθέτως, με τον όρο “απόδοσης συστήματος” εκφράζεται η συνολική λειτουργική απόδοση όλου του συστήματος , δηλαδή της εγκατάστασης, και είναι ανάλογο και των απωλειών στο

υπόλοιπο ισοζύγιο του συστήματος (για παράδειγμα σκιάσεις, θερμικές απώλειες, καλωδιώσεις). Η απόδοση του συστήματος είναι η σχέση μεταξύ της συνολικής παραγόμενης ισχύος του συστήματος και της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Επομένως, ο όρος της ενεργειακής απόδοσης συνδυάζει την επίδραση όλων των επιμέρους φαινομένων και απωλειών σε μία ενιαία τιμή, για αυτό αποτελεί έναν καθοριστικό όρο αξιολόγησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

4.1.2 Βαθμός απόδοσης (PR)

Ο Βαθμός απόδοσης αποτελεί μία εξίσου σημαντική έννοια για την εκτίμηση της ποιότητας και της αποδοτικότητας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Στη βιβλιογραφία συχνά εμφανίζεται ως "Performance Ratio" ή απλά με την συντομογραφία "PR" και εκφράζει την ενεργειακή αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον ορισμό ως βαθμός απόδοσης εκφράζεται ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα προς την ενέργεια που θεωρητικά αναμένεται να παραχθεί αν οι συνθήκες είναι βέλτιστες. Ουσιαστικά, περιγράφει την αναλογία ανάμεσα στην πραγματική και την ιδανική απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Έτσι, μπορεί να προσεγγιστεί το ποσοστό της ενέργειας που είναι ρεαλιστικά διαθέσιμο για την τροφοδοσία εφόσον έχουν αφαιρεθεί οι ενεργειακές απώλειες. και η ιδιοκαταναλωση για την λειτουργία. Επιπρόσθετα, ο συγκεκριμένος δείκτης είναι πολύ χρήσιμος για την σύγκριση μιας εγκατάστασης με την απόδοση άλλων ή ακόμα και την επίβλεψη της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Γίνεται αντιληπτό ότι, όσο υψηλότερος και πλησιέστερος στο 100% είναι ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος, τόσο πιο αποδοτικά δουλεύει. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες και παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του ποσοστού απόδοσης. Αρχικά, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες δηλαδή η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η παραγόμενη ισχύς, το επίπεδο σκίασης ή ακόμα και οι ρύποι στην επιφάνεια των πάνελ, αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που διαμορφώνουν την τελική τιμή του δείκτη. Επιπρόσθετα, υπάρχουν κάποιοι λοιποί

παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του συντελεστή απόδοσης όπως η χρονική περίοδος κατά την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση, οι απώλειες αγωγιμότητας καθώς επίσης και η σταδιακή μείωση της παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με το πέρασμα του χρόνου. Παρακάτω παρουσιάζεται και ο τύπος υπολογισμού του βαθμού απόδοσης. Ο αριθμητής εκφράζει την συνολική ενέργεια που παρέχεται στο δίκτυο και ο παρονομαστής εκφράζει την ενέργεια που θεωρητικά μπορεί να παραχθεί από το σύστημα σε τυποποιημένες συνθήκες δοκιμής (Standard Test Conditions).

$$\mathbf{PR}=\frac{Yf}{Yr}$$

Yf:τελική απόδοση (kWh/kWp)

Yr : ονομαστική απόδοση εγκατάστασης

4.1.3 Δείκτες αξιολόγησης απόδοσης Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης δεν περιορίζεται στην χρήση μόνο των παραπάνω εννοιών. Για την ορθή αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς χρησιμοποιείται ένα σύνολο δεικτών που είναι εξίσου θεμελιώδης σημασίας. Αρχικά, ένας ιδιαίτερα καθοριστικός δείκτης για την εκτίμηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ο συντελεστής χωρητικότητας γνωστός και ως “Capacity Factor” ή “CF”. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής αναπαριστά το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε σε σύγκριση με το πόση ενέργεια θα είχε παραχθεί εάν ο σταθμός βρισκόταν σε συνεχή λειτουργία στην δηλωμένη μέγιστη ισχύ του για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Είναι πολύ σημαντικό εργαλείο που παρουσιάζει πόση ενέργεια παράγει το φωτοβολταϊκό σύστημα συγκριτικά με την εγκατεστημένη ισχύ του. Επομένως, χρησιμοποιείται για την σύγκριση εγκαταστάσεων διαφορετικής χωροθέτησης ή ισχύος. Παρακάτω αναπαριστάται ο τύπος υπολογισμού αυτού του δείκτη

$$\mathbf{CF} = \frac{Eout}{Prated * T}$$

Eout: παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)
Prated: ονομαστική ισχύς του συστήματος (kW)
T: συνολικός χρόνος λειτουργίας (h)

Επιπρόσθετα, ο ειδικός ενεργειακός δείκτης, γνωστός στην ξένη βιβλιογραφία ως (Specific Yield), αποτελεί έναν εξίσου σημαντικό δείκτη αξιολόγησης. Ο ειδικός ενεργειακός δείκτης εκφράζει πόσες κιλοβατώρες παράγονται ετησίως ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος και έχει ως μονάδα μέτρησης τις kWh / kWp. Επιπλέον, είναι ανάλογος του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού της περιοχής καθώς και από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Σε περιοχές υψηλής ηλιοφάνειας η ειδική παραγωγή μπορεί να υπερβαίνει τις 2.000 kWh/kWp, ενώ σε βόρειες περιοχές ενδέχεται να είναι κάτω από 1.000 kWh/kWp ετησίως.

$$\mathbf{Yf} = \frac{Eout}{Pinstalled}$$

Eout=Ετήσια παραγόμενη ενέργεια (kWh)
Pinstalled=Εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς (kWp)

Μονάδα μέτρησης : kWh/kWp

Τέλος, στα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης χρησιμοποιούνται κάποιοι συγκεκριμένοι όροι που συμβάλλουν στην βέλτιστη αξιολόγηση της απόδοσης. Ο συντελεστής “bifaciality” ή “bifaciality factor” όπου ορίζεται ως ο λόγος της ενεργειακής απόδοσης της οπίσθιας όψης του πάνελ ως προς την ενεργειακή απόδοση της εμπρόσθιας όψης του πάνελ. Σύμφωνα με την αναλογία, ο bifaciality factor καθορίζει την ικανότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου διπλής όψης να αξιοποιεί την

ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό αφού περιγράφει την αναλογία της οπίσθιας και την εμπρόσθιας συμπεριφοράς του πλαισίου.

$$\boldsymbol{Bifacial\ Gain = \frac{Ebif - Emono}{Emono} * 100\%}$$

Ένας άλλος κρίσιμος όρος που χρησιμοποιείται ευρέως στα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης είναι το ενεργειακό κέρδος διπλής όψης (bifacial gain), που εκφράζει την ποσότητα της επιπρόσθετης ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διπλής όψης σε σύγκριση με ένα μονής όψης ίσης ονομαστικής ισχύος. Ο συγκεκριμένος δείκτης εκφράζεται σαν ποσοστό και δείχνει κατά πόσο τοις εκατό περισσότερη ενέργεια παρήγαγε το σύστημα διπλής όψης συγκριτικά με ένα αντίστοιχο μονής όψης, εξαιτίας της αξιοποίησης της πίσω πλευράς του. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος δείκτης εξαρτάται έντονα από την ανακλαστικότητα του εδάφους, το ύψος και τον διαχωρισμό σειρών αλλά και το γεωγραφικό πλάτος. Συμπερασματικά, οι παραπάνω δείκτες συμβάλλουν στον ποσοτικό προσδιορισμό του οφέλους των συστημάτων διπλής όψεως και αποτελούν κρίσιμα μεγέθη για οικονομικές αξιολογήσεις και συγκρίσεις με συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα.

4.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Στην προηγούμενη υποενότητα παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι βασικές έννοιες και οι δείκτες που σχετίζονται με την λειτουργική απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζονται οι παράγοντες που διαμορφώνουν τις τιμές αυτών των δεικτών.

Η λειτουργική απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης δεν αποτελεί μία σταθερή έννοια καθώς διαφοροποιείται αναλόγως του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί. Οι κυριότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι η ηλιακή ακτινοβολία,

θερμοκρασία αλλά και οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην τοποθεσία εγκατάστασης τους.

4.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Όταν γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία, αναφερόμαστε στην άμεση και στην διάχυτη ακτινοβολία αθροιστικά. Η άμεση ακτινοβολία αποτελεί την ακτινοβολία που προσπίπτει απευθείας στο εμπρόσθιο μέρος του πλαισίου και έχει μεγαλύτερη ένταση συγκριτικά με την διάχυτη. Μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως μόνο όταν η επιφάνεια του πάνελ είναι προσανατολισμένη σχεδόν κάθετα προς τον ήλιο, καθώς εξαρτάται από γεωμετρικούς παράγοντες. Από την άλλη πλευρά, η διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να φτάσει και στις δύο όψεις του πλαισίου. Στα φωτοβολταϊκά διπλής όψης αξιοποιείται και η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος και φτάνει στην οπίσθια πλευρά του. Μάλιστα, στις περισσότερες περιπτώσεις, η πίσω πλευρά φωτίζεται κυρίως από ανακλάσεις και διάχυτο φως. Επομένως, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και η γωνία του φωτός αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όταν το σύστημα δέχεται υψηλή ένταση φωτός, η απόδοση του βελτιστοποιείται και η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται.

4.2.2 Θερμοκρασία και κλιματολογικές συνθήκες

Ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στις ηλιακές κυψέλες η αποδοτικότητα μειώνεται όταν επικρατούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, εμφανίζεται μείωση της μέγιστης ισχύς, όταν η θερμοκρασία της κυψέλης ξεπεράσει τους 25 βαθμούς. Υπολογίζεται ότι η μέγιστη ισχύς του πλαισίου μειώνεται κατά προσέγγιση γύρω στους 0,4-0,5% για κάθε επιπλέον βαθμό κελσίου άνω των 25 βαθμών. Επομένως, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ενώ η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι μέγιστη, η ισχύς του συστήματος δεν μεγιστοποιείται αντιθέτως οδηγούν τα φωτοβολταϊκά να λειτουργούν με χαμηλότερη απόδοση. Για αυτό παρατηρείται ότι, κατά την περίοδο

του καλοκαιριού η μέγιστη απόδοση μειώνεται ενώ όταν η θερμοκρασία είναι ψυχρότερη τα πάνελ σημειώνουν βέλτιστες αποδόσεις.
Οι κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι το υψηλό ποσοστό υγρασίας, οι άνεμοι αλλά και τα νέφη, επηρεάζουν την αποδοτικότητα των κυψελών. Συγκεκριμένα, περιβάλλοντα τα οποία είναι εκτεθειμένα σε συνθήκες με υψηλή υγρασία παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες καθώς ο υδρατμός προκαλεί σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα ένα μέρος της να μειώνεται. Αυτό έχει σαν άμεσο αντίκτυπο, την μείωση της έντασης του φωτός που φτάνει τελικά στο πάνελ και κατε επέκταση την πτώση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπρόσθετα, οι άνεμοι συμβάλλουν στην θερμική αποφόρτιση των συλλεκτών και στον περιορισμό των θερμικών απωλειών. Επιπλέον, οι συνθήκες συννεφιάς μεταβάλλουν την απόδοση καθώς όταν ο καιρός είναι συννεφιασμένος υπάρχει χαμηλότερης έντασης ηλιακή ακτινοβολία. Παρόλα αυτά, στα φωτοβολταϊκά διπλής όψης, η συννεφιά αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα καθώς μπορούν να αξιοποιούν την διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία πιο αποτελεσματικά. Αυτό συμβαίνει καθώς η άμεση ακτινοβολία μειώνεται και το φως διασκορπίζεται στα σύννεφα αυξάνοντας έτσι την διάχυτη ακτινοβολία. Έτσι, σε τέτοιες συνθήκες τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών. Τέλος, η παρουσία δυνατού ανέμου επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ένας άνεμος χαμηλής έντασης συμβάλει στην άνοδο της συναγωγικής ψύξης του πάνελ και ελαττώνει την θερμοκρασία λειτουργίας τους. Επομένως, σε περιοχές με έντονους και συχνούς ανέμους, τα πάνελ λειτουργούν πιο αποδοτικά συγκριτικά με περιοχές με άπνοια.

4.3 Γεωμετρικοί και χωροταξικοί παράγοντες

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν οι γεωμετρικοί και χωροταξικοί παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργική απόδοση των φωτοβολταϊκών διπλής όψης συστημάτων καθώς και την συλλεγόμενη ακτινοβολία. Εκτός από την ηλιακή ακτινοβολία και τις κλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντος, η απόδοση εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την γεωμετρία της εγκατάστασης, την διάταξη στο χώρο και από χωροταξικούς παράγοντες. Οι συγκεκριμένοι παράγοντες είναι εξίσου σημαντικοί

καθώς επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της απόδοσης των συστημάτων. Συγκεκριμένα, η ανακλαστικότητα του εδάφους, το ύψος τοποθέτησης των πλαισίων, η κλίση και ο προσανατολισμός των συστημάτων, η αξονική απόσταση μεταξύ των σειρών αλλά και οι σκιάσεις των πλαισίων αποτελούν τους παράγοντες που θα αναλυθούν στην ενότητα αυτή.

4.3.1 Albedo : Ανακλαστικότητα εδάφους

Ο όρος Albedo περιγράφει την έννοια της ανακλαστικότητας του εδάφους και ειδικότερα το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια του εδάφους προς το περιβάλλον. Αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα καθώς η απόδοση των συστημάτων διπλής όψης εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του ποσοστού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται στο έδαφος. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αυτό, τόσο περισσότερη ακτινοβολία είναι διαθέσιμη και θα εισέλθει στην οπίσθια πλευρά του συστήματος. Επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό, η μεγιστοποίηση του συντελεστή Albedo αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό τρόπο και μέσο για την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Για αυτόν τον λόγο, πολλές επιχειρήσεις επικεντρώνονται στην ανάπτυξη τεχνολογιών τεχνητής αύξησης της ανακλαστικότητας του εδάφους. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν η επένδυση με άσπρα γεωυφάσματα του εδάφους ή με ειδικές μεμβράνες. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ανοικτού χρώματος άμμος ή χαλίκια και επιστρώσεις αντανακλαστικής βαφής. Παράλληλα, η επιλογή των εγκαταστάσεων με υψηλό albedo όπως οι αμμώδεις εκτάσεις ή οι περιοχές με εποχιακή χιονοκάλυψη συντελεί στην βελτίωση της αποδοτικότητας. Η τιμή του συντελεστή Albedo κυμαίνεται από 0 έως 1 ή ισοδύναμα από 0% έως 100%.

4.3.2 Ανύψωση των πλαισίων από το έδαφος

Η ανύψωση των πλαισίων αποτελεί εξίσου θεμελιώδη γεωμετρικό παράγοντα που επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Αρχικά, με τον όρο του ύψους τοποθέτησης ορίζεται η απόσταση της οπίσθιας πλευράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου με το έδαφος. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση αυτή, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ανύψωση των πλαισίων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο γεωμετρικός συντελεστής θέασης

μεταξύ εδάφους και οπίσθιας επιφάνειας και υπό τόσο μεγαλύτερο εύρος γωνιών μπορεί να δέχεται ανακλώμενο φως. Επομένως, σε περιπτώσεις με μικρότερη απόσταση από το έδαφος εμφανίζεται μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία στην οπίσθια όψη, γεγονός που μειώνει την απόδοση. Επιπρόσθετα, σε περιπτώσεις φωτοβολταϊκών με μεγαλύτερη ανύψωση παρατηρείται και μειωμένη ποσότητα σκιάσεων στην πίσω πλευρά, βελτιώνοντας έτσι την κατανομή της ακτινοβολίας επιτρέποντας τον ομοιόμορφο φωτισμό της πίσω πλευράς. Τέλος, η υψηλότερη ανύψωση συμβάλλει ακόμα και στην ευκολότερη και ταχύτατη ψύξη των πάνελ, με αποτέλεσμα να σημειώνεται μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους, προσφέροντας έτσι ένα πρόσθετο έμμεσο όφελος από πλευράς θερμοκρασιακών απωλειών.

Παρόλα αυτά, υπάρχει ένας περιορισμός ως προς το ύψος που μπορεί να έχει το σύστημα. Ενδεικτικά, οι βέλτιστες τιμές ύψους κυμαίνονται λίγο πάνω από το 1 m, καθώς σε αυτές τις τιμές παρατηρείται το μεγαλύτερο ενεργειακό όφελος του συστήματος. Τιμές ύψους μεγαλύτερες αυτού του εύρους εμφανίζουν λιγότερα οφέλη συνολικά καθώς αντισταθμίζονται παράγοντες όπως το κόστος κατασκευής αλλά και οι μηχανικές απαιτήσεις που προκύπτουν.

4.3.3 Γεωγραφικό πλάτος και κλίση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι το γεωγραφικό πλάτος και η γωνία κλίσης μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης διπλής όψης. Η σημασία των παραμέτρων αυτών διαφαίνεται από το γεγονός ότι αποτελούν παράγοντες που διαμορφώνουν τη γεωμετρία των πάνελ υπό την οποία δέχονται την ακτινοβολία του Ήλιου. Αρχικά, το γεωγραφικό πλάτος προσδιορίζει την τροχιά του Ήλιου στον ουρανό και κατά συνέπεια την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην εμπρόσθια αλλά και στην οπίσθια επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Επιπλέον, η γωνία κλίσης των πλαισίων, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο του πλαισίου σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, διαδραματίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Η βέλτιστη γωνία ενσωματώνει τις εποχιακές μεταβολές της θέσης του ήλιου και των γεωμετρικών παραμέτρων σκίασης από γειτονικές σειρές**.** Για αυτό, σε συστήματα με σταθερή τοποθέτηση, η επιλογή της

κλίσης οφείλει να συνεκτιμά τόσο τις εποχιακές μεταβολές της θέσης του Ήλιου όσο και τις γεωμετρικές συνθήκες σκίασης μεταξύ γειτονικών σειρών. Σε περιοχές όπου εμφανίζονται υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη και η ηλιακή τροχιά είναι χαμηλότερη, συνήθως επιλέγονται μεγαλύτερες τιμές γωνίας κλίσης. Αντιθέτως, σε περιοχές που εμφανίζονται χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη, οι μικρότερες κλίσεις μπορεί να ελαχιστοποιούν τις απώλειες λόγω σκίασης και αυξήσουν συνολικά την ετήσια παραγωγή ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης παρατηρείται ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης τείνει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με τα συστήματα μονής όψης. Αυτό συμβαίνει καθώς η αυξημένη κλίση ενισχύει τη λήψη ανακλώμενης ακτινοβολίας από την οπίσθια επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε περιβάλλοντα με υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας εδάφους και σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη, όπου η συνολική ενεργειακή απόδοση μεγιστοποιείται μέσω της συνδυαστικής αξιοποίησης της πρόσθιας και της οπίσθιας ακτινοβολίας.

4.3.4 Αξονική απόσταση μεταξύ σειρών (Pitch)

Η αξονική απόσταση (γνωστή στην ξένη βιβλιογραφία ως “Pitch”) εκφράζει την οριζόντια απόσταση μεταξύ των κεντρικών αξόνων δύο διαδοχικών σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αποτελεί μία από τις βασικότερες γεωμετρικές παραμέτρους του σχεδιασμού φωτοβολταϊκών πάρκων καθώς καθορίζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην πίσω πλευρά του πλαισίου, συμβάλλοντας στην αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, επηρεάζει άμεσα τη σκίαση μεταξύ των σειρών αλλά και την έκθεση του εδάφους που βρίσκεται μεταξύ των πλαισίων στην ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η τιμή της παραμέτρου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας. Συγκεκριμένα, μικρές αποστάσεις οδηγούν σε ισχυρές σκιάσεις περιορίζοντας έτσι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, μεγάλες αποστάσεις αυξάνουν την εκτεθειμένη επιφάνεια του εδάφους που μπορεί να ανακλάσει ακτινοβολία στην πίσω όψη των πλαισίων. Έτσι, ενισχύουν την παραγωγή ανά σύστημα αλλά απαιτούν μεγαλύτερες εκτάσεις, αυξάνοντας το κόστος γης και υποδομών. Εν κατακλείδι, η επιλογή της αξονικής

απόστασης οφείλει να βασίζεται στον συνυπολογισμό του ενεργειακού οφέλους και της πρακτικής ανάγκης για υψηλή πυκνότητα εγκατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μία αρκετά ικανοποιητική εγκατεστημένη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας.

4.3.5 Σκιάσεις και αμοιβαία σκίαση πλαισίου

Τέλος, ο παράγοντας της σκίασης και η αμοιβαία σκίαση του πλαισίου αποτελούν θεμελιώδεις συνιστώσες που επηρεάζουν την βέλτιστη απόδοση του συστήματος. Η σκίαση δύναται να προέλθει είτε από περιβαλλοντικούς παράγοντες (όπως είναι οι γειτονικές κατασκευές, τα κτίρια ή τα δέντρα) είτε από αμοιβαία σκίαση μεταξύ των σειρών είτε ακόμα από σκίαση εξαιτίας των δομικών στοιχείων του πλαισίου. Ειδικότερα**,** στα συστήματα διπλής όψης, είναι σημαντικό να μην υπάρχουν δομικά στοιχεία που δημιουργούν σκιά στην πίσω όψη (π.χ. ο αναγκαίος σωλήνας στήριξης σε trackers). Οι παραπάνω περιπτώσεις επηρεάζουν και περιορίζουν την πρόσβαση της ηλιακής ενέργειας στην οπίσθια όψη του πάνελ. Για αυτόν τον λόγο κρίνεται απαραίτητη η ελαχιστοποίησή τους. Η μείωση της σκίασης επιτυγχάνεται είτε με αύξηση του της αξονικής απόστασης είτε με λεπτομερή σχεδιασμό των βάσεων και της δομής στήριξης ώστε να ελαχιστοποιείται η παρεμβολή στην πίσω όψη. Παρόλα αυτά, για τα συστήματα διπλής όψης, ιδανική είναι μια ανοιχτή, επίπεδη τοποθεσία με υψηλή ομοιόμορφη ανακλαστικότητα και χωρίς αντικείμενα κοντά που να περιορίζουν το οπτικό πεδίο των πάνελ.

Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση των εφαρμογών φωτοβολταϊκών διπλής όψης

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης έχουν κυριαρχήσει σε πολλές κατηγορίες έργων καθώς προσφέρουν ένα αξιόπιστο και κερδοφόρο ενεργειακό όφελος. Σύμφωνα με τις πρόσφατες έρευνες διαπιστώθηκε ότι αποτελούν την πλειονότητα της παραγωγής σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι

κυριότερες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών διπλής όψης.

5.1 Εφαρμογές σε Επίγειες Εγκαταστάσεις Μεγάλης Κλίμακας (Utility-scale)

Οι επίγειες εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας συνθέτουν ένα από τα βασικότερα πεδία εφαρμογής της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης. Αποτελούν έργα που εγκαθίστανται στο έδαφος και καταλαμβάνουν εκτεταμένες εκτάσεις γης. Συνδέονται άμεσα στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και εστιάζουν στη μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πολύ χαμηλό κόστος.
Η ενίσχυση της αποδοτικότητας παραγωγής καθορίζεται από τον συντελεστή ανακλαστικότητας του εδάφους, το ύψος τοποθέτησης των πλαισίων, την απόσταση μεταξύ σειρών, τη γωνία κλίσης αλλά και την χρήση συστημάτων μηχανικής παρακολούθησης της πορείας του ήλιου. Οι παραπάνω παράγοντες επιδρούν στην ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια των πλαισίων, επηρεάζοντας έτσι τον δείκτη ενεργειακού κέρδους διπλής όψης (bifacial gain) ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 5-20% αναλόγως των γεωμετρικών παραμέτρων και των τοπικών συνθηκών που επικρατούν. Επιπρόσθετα, η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος επιτυγχάνεται με την εφαρμογή συστημάτων μονοαξονικής ιχνηλάτησης, τα οποία ενισχύουν τη γεωμετρία των δύο όψεων του φωτοβολταϊκού συστήματος, μειώνοντας παράλληλα το ισοσταθμισμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά, αποτελούν συστήματα τα οποία προσαρμόζουν τον προσανατολισμό των πλαισίων ανάλογα με την κίνηση του Ήλιου καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέγιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Εν κατακλείδι, οι επίγειες εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας προσφέρουν το κατάλληλο υπόβαθρο για τη βέλτιστη απόδοση ενέργειας μέσω της αξιοποίησης της οπίσθιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

5.2 Εφαρμογές στα Αγροφωτοβολταϊκά

Τα αγροφωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν ένα από τα επικρατέστερα πεδία εφαρμογής των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αποτελούν εγκαταστάσεις στις οποίες η Γη αξιοποιείται συνδυαστικά για καλλιέργεια ή κτηνοτροφία και για την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά, τα αγροφωτοβολταικά συστήματα στοχεύουν στην εκμετάλλευση της ίδιας έκτασης γης για την κάλυψη και των δύο στόχων, ηλεκτρική ενέργεια και γεωργική παραγωγή. Επομένως, σε αυτά επιλέγεται εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών διπλής όψης καθώς παρέχουν πολλαπλά οφέλη σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Αρχικά, προσφέρουν καλύτερη αξιοποίηση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας και της ανάκλασης, καθώς έχουν την ικανότητα να συλλέξουν την ακτινοβολία και από την πίσω πλευρά του πλαισίου. Με αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνονται συνθήκες που να περιορίζεται η σκίαση των καλλιεργειών, διατηρώντας υψηλή ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, προσφέρουν προσαρμοστικότητα στη διάταξη όπως στο ύψος των πλαισίων και στην γωνία κλίσης, ώστε να περνάει αρκετό φως στις καλλιέργειες από κάτω και να επιτρέπεται η φωτοσύνθεση.

Για την εξασφάλιση των παραπάνω προτερημάτων, υπάρχουν κάποια κριτήρια και παράμετροι κατά την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών διπλής όψης όπου πρέπει να συνεκτιμώνται. Το ύψος στήριξης και τα διάκενα αποτελούν μία κρίσιμη παράμετρο. Απαιτείται η κατάλληλη επιλογή του ύψους των πλαισίων ώστε να διασφαλιστεί λειτουργική ισορροπία μεταξύ της επάρκειας φωτισμού για τα φυτά και της οπίσθιας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην πίσω επιφάνεια. Συνήθως, επιλέγονται υψηλότερα στηρίγματα και μεγαλύτερα διάκενα για την καλύτερη αξιοποίηση του φωτός. Επιπλέον, η κλίση και ο προσανατολισμός των πάνελ είναι κρίσιμα για την μεγιστοποίηση της απόδοσης. Με τον κατάλληλο καθορισμό της γωνίας, τα πάνελ αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία και από τις δύο όψεις ενώ με τον σωστό προσανατολισμό επιτρέπουν την ελεγχόμενη διείσδυση φωτός προς τα φυτά. Τέλος, η επιλογή του είδους της καλλιέργειας αποτελεί εξίσου κρίσιμο παράγοντα, καθώς δεν είναι όλα τα καλλιεργούμενα είδη κατάλληλα για συνθήκες μερικής σκίασης. Έτσι, προτιμώνται φυτά που ευδοκιμούν ακόμα και σε συνθήκες μερικής σκίασης και μπορούν να συνυπάρχουν αρμονικά με τα πάνελ.

5.3 Εφαρμογές στα Πλωτά Φωτοβολταϊκά (FPV)

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα εφαρμογή που παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης εντοπίζεται στα Πλωτά Φωτοβολταϊκά (Floating PV). Βρίσκουν εφαρμογή σε

υδάτινες επιφάνειες όπως είναι τα κανάλια, οι δεξαμενές άρδευσης και οι λίμνες, συμβάλλοντας στην εκμετάλλευση χώρων που δεν επιβαρύνουν την αστική γη. Ένα από τα προτερήματα τους είναι ο περιορισμός της απώλειας νερού και η ευκολότερη εγκατάσταση και συντήρηση. Τα Πλωτά φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούν το υδάτινο περιβάλλον σαν υποκείμενη επιφάνεια, με αποτέλεσμα να έχουν βελτιωμένη ανακλαστικότητα εδάφους (albedo) και μειωμένη θερμοκρασία λειτουργίας καθώς το νερό συμβάλει στην ψύξη των πλαισίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας τους. Συγκεκριμένα, σε πειραματικές διατάξεις έχουν αναφερθεί αυξημένα ποσοστά οπίσθιου ενεργειακού κέρδους υπό ευνοϊκές συνθήκες ανακλαστικότητας και γεωμετρίας. Τα διπλής όψης πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μία από τις κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων με τον υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης καθώς τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν θεωρούνται ιδιαίτερα ελκυστικά. Η ενεργειακή τους απόδοση σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα που προσφέρουν τα μετατρέπει ως μία ιδανική και ελκυστική λύση για μεγάλες επιφάνειες νερού.

5.4 Εφαρμογές και Ενσωματώσεις σε υποδομές: Ηχοπετάσματα και Στέγαστρα

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών διπλής όψης σε εγκαταστάσεις όπως τα ηχοπετάσματα και τα στέγαστρα αποτελεί έναν εξίσου σημαντικό τομέα εφαρμογής, καθώς συνδυάζει την εκμετάλλευση ανεκμετάλλευτων χωρικών εκτάσεων αλλά και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηχοπετάσματα τοποθετούνται κατά μήκος αυτοκινητοδρόμων, σιδηροδρομικών γραμμών και αστικών οδών στοχεύοντας στην αποτελεσματική μείωση της ηχορύπανσης. Ενεργούν ως φραγμοί που περιορίζουν και απομονώνουν την διάδοση θορύβου προς κατοικημένους οικισμούς. Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στα ηχοπετάσματα αποτελεί μία αναπτυσσόμενη εφαρμογή που εξελίχθηκε τα τελευταία έτη, με στόχο την αποτελεσματική μείωση της ηχορύπανσης του κυκλοφοριακού θορύβου, παράγοντας ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια. Ουσιαστικά, τα ηχοπετάσματα μπορούν να τοποθετηθούν πλαίσια διπλής όψης σε κατακόρυφη ή κεκλιμένη διάταξη, αξιοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία και

από δύο πλευρές. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να μετατρέψουν γραμμικές υποδομές εκτεταμένης έκτασης, σε λειτουργικές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση εκπομπών και στη βελτίωση της ενεργειακής αυτονομίας υποδομών. Μία ακόμη ενδιαφέρουσα εφαρμογή αποτελούν τα στέγαστρα με ενσωματωμένα πάνελ διπλής όψης. Η συγκεκριμένη εφαρμογή στοχεύει στην ενίσχυση της παραγόμενης ενέργειας ενός κτιρίου ή συγκροτήματος αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια που υπό άλλες συνθήκες θα χανόταν, καλύπτοντας ταυτόχρονα λειτουργικές ανάγκες όπως σκίαση και προστασία. Είναι απαραίτητο η γεωμετρική διαμόρφωση της εγκατάστασης να διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιείται η σκίαση της πίσω όψης του πάνελ και να διασφαλίζεται ο απαιτούμενος έλεγχος της θάμβωσης ή αντανάκλασης προς οδηγούς ή χρήστες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και σχολιασμοί

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι σχολιασμοί που προέκυψαν μέσα από την ανάλυση των θεωρητικών δεδομένων που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Αρχικά, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανάλυσης και στην συνέχεια καταγράφονται οι μελλοντικές τάσεις για τα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης.

6.1 Παρουσίαση συμπερασμάτων

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση σχετικά με την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψεως. Η εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της απόδοσης και των εφαρμογών των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης, με έμφαση στους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοσή τους. Στο πρώτο κεφάλαιο αποσαφηνίστηκαν οι έννοιες των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και αναγνωρίστηκε η σημασία του ρόλου τους στο σύγχρονο ενεργειακό πρόβλημα. Έπειτα, παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, δίνοντας έμφαση στα συστήματα διπλής όψης. Συγκεκριμένα, επισημάνθηκε η διαφοροποίησή τους από τα συμβατικά φωτοβολταϊκά

συστήματα ως προς τη δυνατότητά τους να αξιοποιούν την προσπίπτουσα και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και από τις δύο όψεις του πλαισίου. Ακολούθως, αναλύθηκαν η δομή και η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης αλλά και οι κατηγορίες τεχνολογιών κατασκευής κυψελών. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε περαιτέρω συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών αυτών, από την οποία προέκυψε ότι η επιλογή της αρχιτεκτονικής της κυψέλης εξαρτάται από την επιδιωκόμενη ενεργειακή απόδοση, το κόστος κατασκευής και το κόστος εγκατάστασης. Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι πιο σύγχρονες τεχνολογίες προσφέρουν υψηλότερα επίπεδα αποδοτικότητας και αυξημένο συντελεστή διπλής όψης. Παρ' όλα αυτά, συνοδεύονται από μεγαλύτερη κατασκευαστική πολυπλοκότητα και κατ' επέκταση από αυξημένες οικονομικές απαιτήσεις. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την συνολική απόδοση ενέργειας των συστημάτων διπλής όψης. Για την καλύτερη ανάλυση και κατανόηση των παραγόντων, έγινε διαχωρισμός σε δύο επιμέρους κατηγορίες, σε γεωμετρικούς και χωροταξικούς. Οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν το ενεργειακό όφελος είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους (albedo), η κλίση και ο προσανατολισμός των πλαισίων, το ύψος τοποθέτησης, οι αποστάσεις μεταξύ των σειρών καθώς και τα φαινόμενα σκίασης. Για αυτό τον λόγο, κατά την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών διπλής όψης απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και προσαρμογή της εγκατάστασης στις τοπικές συνθήκες του χώρου εγκατάστασης.
Τέλος, παρουσιάστηκαν οι σύγχρονες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλής όψης. Συνολικά, προέκυψε ότι, η εγκατάστασή τους έχει την δυνατότητα να αυξήσει την συνολική παραγόμενη ενέργεια με την προϋπόθεση ότι η ακτινοβολία της οπίσθιας όψης μπορεί να αξιοποιείται αποτελεσματικά. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη τεχνολογία εμφανίζει σημαντικές προοπτικές σε εναλλακτικές χρήσεις γης και υποδομών, όπως σε αγροβολταϊκά συστήματα, οι εγκαταστάσεις σε χώρους στάθμευσης, τα πλωτά φωτοβολταϊκά και οι κάθετες διατάξεις ανατολής–δύσης. Οι εφαρμογές αυτές αναδεικνύουν τη δυνατότητα συνδυασμού της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άλλες δραστηριότητες, βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου χώρου και αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση.
Εν κατακλείδι, τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης αποτελούν συστήματα τα οποία

εξελίσσονται και εντάσσονται ραγδαία σε ένα ευρύ φάσμα υποδομών και δραστηριοτήτων. Αποτελούν ένα πραγματικό πλεονέκτημα για τις επιχειρήσεις και τους ιδιώτες με την προϋπόθεση όμως ότι πραγματοποιείται μελέτη για την τοποθέτηση της εγκατάστασης αλλά και προσεκτικός σχεδιασμός. Ειδικότερα, μέσω της αποδοτικότερης εκμετάλλευσης του διαθέσιμου χώρου και του συνδυασμού της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άλλες δραστηριότητες, τα συστήματα συμβάλλουν καθοριστικά στην ενίσχυση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης.

6.2 Μελλοντικές τάσεις

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης σημειώνουν μία αυξανόμενη διείσδυση στην παγκόσμια αγορά γεγονός που συνδέεται άμεσα με την διαρκή τεχνολογική τους εξέλιξη. Οι προοπτικές της τεχνολογίας διπλής όψης κρίνονται άκρως ενθαρρυντικές καθώς το τεχνολογικό ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην βελτιστοποίηση της λειτουργικής τους απόδοσης. Σύμφωνα με διεθνείς εκτιμήσεις και μελέτες, προβλέπεται μία σημαντική αύξηση του μεριδίου αγοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων στις εγκαταστάσεις τους. Ειδικότερα, προβλέπεται ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα καλύψουν έως το 2030 το 70% της παγκόσμιας αγοράς. Παράλληλα, στις μελέτες εμφανίζεται ότι τα συστήματα διπλής όψης θα κυριαρχούν στις νέες εγκαταστάσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην διαρκή αναβάθμιση των τεχνολογιών κατασκευής κυψελών, οι οποίες ενισχύουν τον δείκτη διπλής όψης και το ποσοστό αξιοποίησης της οπίσθιας ακτινοβολίας. Τέλος, παρατηρείται ένα τεχνολογικό ενδιαφέρον ως προς την δημιουργία τυποποιημένων εργαλείων προσομοίωσης και σχεδιασμού για την επίτευξη βέλτιστου συντονισμού κλίσης, αποστάσεων και εκμετάλλευσης της προσαρμοστικότητας του εδάφους (albedo).
Την ίδια στιγμή παρατηρείται η εισαγωγή στην παγκόσμια αγορά νέων συστημάτων όπως τα αγροβολταϊκά συστήματα, τα οποία αποτελούν συστήματα με κατακόρυφες διπλές όψεις που επιτρέπουν τον συνδυασμό γεωργικής καλλιέργειας και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, αναπτύσσονται έξυπνα συστήματα ανίχνευσης κίνησης (tracking) σε συνδυασμό με bifacial πάνελ, που αποδίδουν ειδικά σε κρύες ή διάχυτες συνθήκες.
Εν κατακλείδι, τα φωτοβολταϊκά συστήματα διπλής όψης αποτελούν μία πολύ

σημαντική τεχνολογία που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση. Προσφέρουν υψηλότερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα εδάφους, μειώνοντας έτσι το κόστος γης για νέα έργα και ενισχύοντας την οικονομική αποδοτικότητα των ηλιακών πάρκων. Εξαιτίας λοιπόν της ταχείας τεχνολογικής τους εξέλιξης, εκτιμάται ότι οι bifacial πίνακες θα γίνουν βασικό στοιχείο των μελλοντικών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, συνεισφέροντας αποφασιστικά στην επίτευξη των κλιματικών στόχων και στην ασφαλή μετάβαση προς ένα πιο «καθαρό» ενεργειακό μείγμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Andrew W. Blakers, Aihua Wang, Adele M. Milne, Jianhua Zhao, Martin A. Green, (1989), "*22.8% efficient silicon solar cell. Applied Physics Letters," 55* (13), 1363–1365. https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/55/13/1363/55817/22-8-efficient-silicon-solar-cell?redirectedFrom=fulltext

C. Design and A. Elboukili, (2018), " School of Scienced Engineering Innovative Designs and Performance Opimization of Bifacial Photovoltaic Silicon Solar Panels"

Cuevas, A. (2005). "The early history of bifacial solar cells", In Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference. WIP-Renewable Energies. https://openresearch-repository.anu.edu.au/items/c74741ff-e8f6-47e9-a760-eae83f62dc99

Ember, (2025) , "Global Electricity Mid-Year Insights 2025" https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-mid-year-insights-2025

Ember, (2025), "Global Electricity Review" https://ember-energy.org/app/uploads/2025/04/Report-Global-Electricity-Review-2025.pdf

European Parliament &Council of the European Union, (2018), "Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32018L2001

González-Longatt, F., et al., (2016), “Bifacial solar photovoltaics – A technology review. Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 60, 1533–1549” https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116002768?via%3Dihub

Green, M. A. ,(2015), “The passivated emitter and rear cell (PERC): From conception to mass production”. Solar Energy Materials and Solar Cells, 143, 190–197. linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024815003244

GYCX Solar, (2024), “Ultimate Guide to Bifacial Solar Panels” https://gycxsolar.com/bifacial-solar-panels/

Intergovernmental Panel on Climate Change, (2018), “IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation" https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/ipcc15.pdf

International Electrotechnical Commission (IEC), (2016), “IEC TS 61836:2016 — Solar photovoltaic energy systems: Terms, definitions and symbols. IEC” https://cdn.standards.iteh.ai/samples/23530/478543bfbcbe4ab3a2e61e2af1c4deb5/IEC-TS-61836-2016.pdf

International Energy Agency Website (2025), “Global Energy Review 2025” https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf

International Energy Agency, (2024), “World Energy Outlook 2024” ,https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf

International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). (2021), “Bifacial photovoltaic modules and systems”

https://iea-pvps.org/key-topics/bifacial-photovoltaic-modules-and-systems/

Jesus Calero and Laura Contemori, (2026), “Wind and solar beat fossil fuels in EU power mix in 2025, energy think tank says” https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/wind-solar-beat-fossil-fuels-eu-power-mix-2025-energy-think-tank-says-2026-01-21/

Kopecek, R., & Libal, J. (2021) “Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges. Energies”,14(8),2076. https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2076

Marion B. ,MacAlpine, S. , Deline, C. , Dirnberger, D. , & Clifton, A. , (2017), “A practical irradiance model for bifacial PV modules”, National Renewable Energy Laboratory https://docs.nlr.gov/docs/fy17osti/68678.pdf

Mints P., Navigant Consulting, Inc., Palo Alto, California, USA, (2021),”The photovoltaics industry : against all odds, strong growth continues” https://www.pv-tech.org/wp-content/uploads/legacy-publication-pdfs/60893ebf17-the-photovoltaics-industry-against-all-odds-strong-growth-continues.pdf

National Renewable Energy Laboratory (NREL). (n.d.). “Solar resource modeling and bifacial performance metrics” U.S. Department of Energy.

Professor Martin Green, UNSW Engineering (2015), “Solar genius celebrates 40 years at UNSW” https://www.unsw.edu.au/newsroom/news/2015/06/solar-genius-celebrates-40-years-at-unsw

PV Education Site, (n.d.), “First photovoltaic devices” https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/first-photovoltaic-

devices

PV Education, (n.d.), "Solar energy"
https://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/solar-energy

PV Education site, (n.d.), "The Greenhouse Effect"
https://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/the-greenhouse-effect

ResearchGate- The Journal of Engineering, (2024) "A systematic literature review of the bifacial photovoltaic module and its applications"
https://www.researchgate.net/publication/383043524_A_systematic_literature_review_of_the_bifacial_photovoltaic_module_and_its_applications

Rosa-Clot, M., & Tina, G. M., (2018), "Floating PV plants: Performance and design solutions". Progress in Photovoltaics: Research and Applications" 26(7), 553–562.
https://onlinelibrary.wiley.com/toc/1099159x/2026/34/3

Sahu, A. , Yadav, N., & Sudhakar, K., (2016), "Floating photovoltaic power plant: A review" , 66, 815–824.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304841

Solar Deland, (2024), "Advantages and disadvantages of monofacial vs bifacial double glass solar panels" https://www.solardeland.com/Advantages-and-Disadvantages-of-Monofacial-vs-Bifacial-Double-Glass-Solar-Panels

Stein, J. S., Reise, C., Bonilla Castro, J., Friesen, G., Maugeri, G., Urrejola, E., & Ranta, S. (2021). "Bifacial photovoltaic modules and systems: Experience and results from international research and pilot applications".
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf

Sudarshan Bhat- Solar Thoughts,(2025),“What are Bifacial Solar Panels” https://solarthoughts.com.au/what-are-bifacial-solar-panels/

Terli Solar. (2025) “Single glass vs double glass solar panels” https://www.terli.net/blog/single-glass-vs-double-glass-solar-panels.html

VDMA Photovoltaics Equipment, (2024), “International technology roadmap for photovoltaics (ITRPV): 2023 results” https://www.qualenergia.it/wp-content/uploads/2024/06/ITRPV-15th-Edition-2024-2.pdf

Wang, L., Tang, Y., Zhang, S., Wang, F., & Wang, J. (2022). Energy yield analysis of different bifacial PV (photovoltaic) technologies: TOPCon, HJT, PERC in Hainan. Solar Energy, 238, 258–263. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.038

ΕΛΛΗΝΙΚΉ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, (2006), Νόμος 3468/2006, *Κύρωση του Κώδικα νόμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, ΣΗΘΥΑ, και άλλες διατάξεις*. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2020/11/%CE%BD.-3468.2006.pdf

Energy Game, (2025), “*Φωτοβολταϊκά: Στο 4% η εγκατεστημένη ισχύς της Ελλάδας το 2025 στην Ευρώπη”* https://www.energygame.gr/ananeosimes-piges-ape/395419/fotovoltaika-sto-4-egkatestimeni-ischys-tis-elladas-to-2025-stin-evropi/

ERT News, (2025), "*Παγκόσμιο ορόσημο για το κλίμα: Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – ανακάλυψη της χρονιάς για το 2025*"
https://www.ertnews.gr/eidiseis/diethni/pagkosmio-orosimo-gia-to-klima-oi-ananeosimes-piges-energeias-anakalypsi-tis-xronias-gia-to-2025/

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), *Αρχική σελίδα,* http://www.cres.gr/cres/index.html

Κονιτσιώτης Θ., (2023) , "Μελέτη και σχεδιασμός εγκατάστασης αυτόνομου (off-grid) συστήματος", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης https://ikee.lib.auth.gr/record/349229/files/Thrasyvoulos%20Konitsiotis.pdf

Κουρκουραΐδης Θ., (2020), *"Βέλτιστη σχεδίαση Bifacial Φ/Β Εγκαταστάσεων",* Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης -Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών https://ikee.lib.auth.gr/record/320422/files/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1_%CE%9A%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%BA%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B1%CE%90%CE%B4%CE%B7%CF%82%20%CE%98%CE%B5%CF%8C%CE%B4%CF%89%CF%81%CE%BF%CF%82.pdf

Λεβέντης Ν., (2023) , *"Φωτοβολταϊκά με τεχνολογία διπλής όψης",* Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/57290/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%20-%20%CE%9B%CE%B5%CE%B2%CE%AD%CE%BD%CF%84%CE%B7%CF%82%20%CE%9D%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%AC%CF%81%CE%B9%CE%

BF%CF%82.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Μανωλάκος Δ.Ε., (2012) ,*"Οργανικές ηλιακές κυψέλες και νέες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών"* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο -Σχολή μηχανολόγων Μηχανικών https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/7008/oikonomoue_cell.pdf?sequence=3

Μίχα Α., (2014), "Τεχνολογία Φωτοβολταικών Συστημάτων", Διπλωματική εργασία, Τ.Ε.Ι. Πειραιά. http://okeanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2153/hlg_201400915.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Οικονόμου, Γ. (2012). "*Μελέτη φωτοβολταϊκής κυψέλης πυριτίου",* Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/7008/oikonomoue_cell.pdf?sequence=3

Πέτρος Καραισας, Ινστιτούτο Μικρών Επιχειρήσεων, (2014), *"Φωτοβολταϊκά συστήματα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας"* https://imegsevee.gr/wp-content/uploads/2018/01/fotovoltaika_systimata.pdf

Σεληνιωτάκη Κ.,(2013), "Μελέτη Απόδοσης Φωτοβολταικών Στοιχείων υψηλής Συγκέντρωσης", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης- Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ http://artemis.library.tuc.gr/DT2013-0222/DT2013-0222.pdf

Τρίκου Φωτεινή-Άννα, (2024), "Μελέτη επίδρασης του αλβέδο στην ενεργειακή απόδοση φωτοβολταικών πάνελ διπλής όψης (bifacial): προσομοίωση και μετρήσεις πεδίου", Μεταπτυχιακή Εργασία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης https://repo.lib.duth.gr/jspui/bitstream/123456789/19313/1/TrikouFA_2024.pdf

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2023), *"Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας: «Αξιοσημείωτη η επιτυχία της Ελλάδας σε όλους τους ενεργειακούς της στόχους»* https://ypen.gov.gr/diethnis-organismos-energeias-axiosimeioti-i-epitychia-tis-elladas-se-olous-tous-energeiakous-tis-stochous/

Φυσέας Κ., (2018), *"Φωτοβολταϊκά συστήματα και μελέτη απόδοσης τους για την πόλη της Θεσσαλονίκης"*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης-Σχολή Θετικών Επιστημών https://ikee.lib.auth.gr/record/300358/files/%CE%A0%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE.pdf