ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης και δημιουργία χρονοσειρών παραγωγής Φωτοβολταϊκών Σταθμών . »

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Χολέβα Ιωάννα

Επιβλέπων

Σταύρος Παπαθανασίου, Καθηγητής ΕΜΠ, ΗΜΜΥ

Αθήνα, Οκτώβριος, 2024

Χολέβα Ιωάννα

Πτυχιούχος Φυσικός, ΕΚΠΑ

Copyright © All rights reserved Χολέβα Ιωάννα, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματική μου εργασίας, τον κύριο Σταύρο Παπαθανασίου, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα αλλά και για την συνεχή στήριξη και καθοδήγησή του.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον υπ. διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Ευάγγελο Χατζηστυλιανό για την πολύτιμη βοήθειά του και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την υποστήριξη και την κατανόησή τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

Περίληψη

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην χώρα μας, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο είναι απαραίτητη και αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς. Η Ελλάδα, γνωστή για το πλούσιο ηλιακό δυναμικό που διαθέτει έχει ήδη εγκαταστήσει και θα εγκαταστήσει στο μέλλον πολλά GW φωτοβολταϊκής παραγωγής. Η τεχνολογία που υπήρχε παλαιότερα και χρησιμοποιούταν κατά βάση ήταν πάρκα σταθερής βάσης και με πάνελ μονής όψης. Ωστόσο η τεχνολογία εξελίσσεται και διαφορετικά είδη τεχνολογιών φωτοβολταϊκής παραγωγής κερδίζουν μεγάλο μέρος της αγοράς και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πάρκων. Όμως, οι διαχειριστές που του ηλεκτρικού συστήματος που υπολογίζουν την προβλεπόμενη παραγωγή από φωτοβολταϊκά πάρκα, βασίζονται σε δεδομένα που αντιστοιχούν σε παραγωγή από πάρκα σταθερής βάσης και μονής όψης πάνελ. Δεδομένου ότι πλέον πολλά πάρκα είναι διαφορετικής τεχνολογίας και άρα παράγουν αρκετά διαφορετικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, εμφανίστηκε η ανάγκη για εκσυγχρονισμό των υπαρχουσών χρονοσειρών παραγωγής και εύρεση των χρονοσειρών που αντιστοιχούν σε αυτές τις διαφορετικές τεχνολογίες. Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε με σκοπό την εύρεση μαθηματικών σχέσεων που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως, σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, ώστε να μπορεί να υπολογίζεται με αρκετά καλή προσέγγιση και ακρίβεια η χρονοσειρά παραγωγής, στη διάρκεια του έτους, πάρκου τεχνολογίας με πάνελ διπλής όψης και με tracker μονού άξονα, γνωρίζοντας την αντίστοιχη χρονοσειρά παραγωγής από πάρκο με πάνελ μονής όψης. Και τα τρία πάρκα που προαναφέρθηκαν έχουν προσανατολισμό στον νότο, δηλαδή αζιμουθιακή γωνία ίση με 0^{o}. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, είναι η εύρεση μαθηματικών σχέσεων για κάθε ώρα του 24ώρου, διαφορετικές για κάθε μήνα, δηλαδή 24*12= 288 μαθηματικές σχέσεις. Υπολογίστηκαν και εξετάστηκαν για την αποτελεσματικότητά τους, 288 μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό παραγωγής από πάρκο με διπλής όψης πάνελ και άλλες 288 μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό παραγωγής από πάρκο με μονής όψης πάνελ και με tracker μονού άξονα.

Λέξεις Κλειδιά

ΑΠΕ, φωτοβολταϊκά πάρκα, χρονοσειρές παραγωγής, μονής όψης πάνελ, διπλής όψης, σταθερή κλίση, σύστημα περιστροφής, monofacial, bifacial.

Abstract

The development of Renewable Energy Sources in our country, as well as globally, is essential and advancing rapidly. Greece, known for its abundant solar potential, has already installed and will continue to install many gigawatts (GW) of photovoltaic capacity in the future. In the past, the technology primarily used consisted of fixed-tilt parks with single-sided panels. However, technology is evolving, and different types of photovoltaic technologies are gaining a significant share of the market and are being used for the construction of solar parks. Yet, the operators of the electrical system, who calculate the forecasted production from photovoltaic parks, rely on data that corresponds to production from fixed-tilt parks with single-sided panels. Given that many parks now employ different technologies, which produce significantly different amounts of electricity, the need arose to modernize existing production time series and to find the corresponding time series for these different technologies.

The present thesis was developed with the aim of identifying mathematical relationships that can be widely used in various regions of Greece, to accurately and closely approximate the annual production time series of parks using bifacial panels and single-axis trackers, based on the corresponding production time series from parks with single-sided panels. All three types of parks mentioned are oriented to the south, with an azimuthal angle of 0°. The results of this study include the derivation of mathematical relationships for every hour of the day, different for each month, amounting to 24*12 = 288 mathematical relationships. A total of 288 mathematical relationships were calculated and evaluated for their effectiveness in estimating the production from parks with bifacial panels, and another 288 mathematical relationships were derived for estimating the production from parks with single-sided panels and single-axis trackers.

Key Words

Renewable Energy Sources, Photovoltaic technology, Solar potential, Fixed-tilt parks, Single-sided panels, Bifacial panels, Single-axis tracker, Production time series, Mathematical relationships, Electricity production

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες 2
Περίληψη 3
Abstract 4
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή 7
1.1 : Αντικείμενο Διπλωματικής 7
1.2 : Γενικά για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας 7
1.2.1: Πλεονεκτήματα από την χρήση ΑΠΕ 8
Κεφάλαιο 2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 11
2.1: Ηλιακή Ενέργεια 11
2.2: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο 12
2.3: Λειτουργία και Παραγωγή Ενέργειας 13
2.4: Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα 14
2.4.1: Δυναμικό Παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας στην Ελλάδα 14
2.4.2: Εξέλιξη των Φωτοβολταϊκών Εγκαταστάσεων στην Ελλάδα 14
2.4.3: Τρέχουσες και Μελλοντικές Εξελίξεις 15
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Πάρκων 16
3.1: Πάνελ μονής Όψης (Monofacial) 16
3.1.1: Πλεονεκτήματα των Monofacial Panels 17
3.1.2: Μειονεκτήματα των Monofacial Panels 18
3.2: Πάνελ διπλής Όψης (Bifacial) 18
3.2.1: Δομή και Λειτουργία των Bifacial Panels 18
3.2.2: Πλεονεκτήματα των Bifacial Panels 19
3.2.3: Μειονεκτήματα των Bifacial Panels 20
3.3: Συστήματα Παρακολούθησης της Κίνησης του Ήλιου (Trackers) 21
3.3.1: Συστήματα Παρακολούθησης Μονού Άξονα (Single-Axis Trackers) 21
3.3.2: Συστήματα Παρακολούθησης Διπλού Άξονα (Dual-Axis Trackers) 22
Κεφάλαιο 4: Παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή ΦΒ πάρκου 25
Κεφάλαιο 5: PVGIS και PVsyst, δύο βασικά εργαλεία 28
5.1: PVGIS 28
5.2: PVsyst 30
5.2.1: Κύριες Δυνατότητες και Λειτουργίες του PVsyst 30
5.2.2: Προσομοίωση πάρκων στο PVsyst 31
Κεφάλαιο 6: Μεθοδολογία 35

6.1: Πρώτες προσομοιώσεις ΦΒ σταθμών στο PVsyst 35
6.1.1: Monofacial πάρκα 35
6.1.2: Bifacial πάρκα 35
6.2: Προσομοίωση διαφορετικής τεχνολογίας ΦΒ σταθμών 38
6.2.1: Monofacial πάνελ, νότιος προσανατολισμός 38
6.2.2: Monofacial πάνελ, μισά πάνελ με δυτικό προσανατολισμό και τα υπόλοιπα με ανατολικό προσανατολισμό 41
6.2.3: Bifacial πάνελ, νότιος προσανατολισμός 44
6.2.4: Bifacial πάνελ, δυτικός προσανατολισμός 46
6.2.5: Bifacial πάνελ ανατολικός προσανατολισμός 49
6.2.6: Monofacial πάνελ με tracker μονού άξονα 52
6.2.7: Monofacial πάνελ με tracker διπλού άξονα 55
6.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα 59
Κεφάλαιο 7: Προσομοιώσεις στο PVsyst και εξαγωγή χρονοσειρών 63
7.1: Δεδομένα που εισάγονται στο PVsyst για την προσομοίωση 64
7.1.1: Global Solar Atlas 65
7.2: Επεξεργασία Χρονοσειρών 68
7.2.1: Συσχέτιση Monofacial → Bifacial 69
7.2.2: Συσχέτιση Monofacial → Tracker Μονού Άξονα 73
Κεφάλαιο 8: Εφαρμογή των συσχετίσεων και Αποτελέσματα 79
8.1: Εφαρμογή σχέσεων από Monofacial σε Bifacial πάρκο 79
8.2: Εφαρμογή σχέσεων από Monofacial σε πάρκο με Tracker μονού άξονα 83
8.3: Εφαρμογή σχέσεων σε διαφορετική περιοχή και για διαφορετικό έτος εξέτασης 85
8.4: Στατιστικοί Δείκτες 89
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα & Μελλοντικές επεκτάσεις 93
9.1: Συμπεράσματα 93
9.2: Μελλοντικές Επεκτάσεις 94
Βιβλιογραφία 95

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 : Αντικείμενο Διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ΦΒ σταθμών και η δημιουργία χρονοσειρών παραγωγής ΦΒ σταθμών διαφόρων τεχνολογιών (bifacial, tracker μονού άξονα, απλά panel) και η συσχέτιση αυτών των χρονοσειρών.

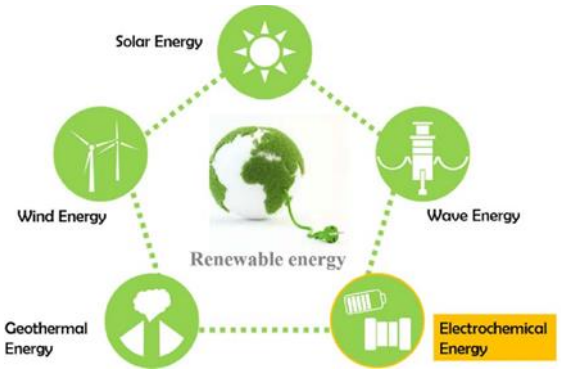
1.2 : Γενικά για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ενέργεια, ως αγαθό, είναι απαραίτητο στοιχείο για την λειτουργία των σύγχρονων κοινωνιών, σε παγκόσμιο επίπεδο, με τη μορφή που τις γνωρίζουμε. Το σύγχρονο μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης , προϋποθέτει την χρήση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας για την κάλυψη πλήθους αναγκών, που αφορούν μετακινήσεις ανθρώπων ή προϊόντων, φωτισμό και θέρμανση, τη λειτουργία βιομηχανικών μονάδων και πολλούς άλλους τομείς. Η κάλυψη των απαιτήσεων σε ενέργεια εξασφαλίζεται από Συμβατικές Πηγές Ενέργειας και Ανανεώσιμές Πηγές Ενέργειας. [1] Οι βασικές μορφές ΑΠΕ αφορούν τις μεταβλητές, δηλαδή την ηλιακή και την αιολική ενέργεια και τις μη μεταβλητές, υδροηλεκτρική, βιομάζα και γεωθερμική. Οι ΣΠΕ αφορούν ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, τα οποία έχουν σχηματιστεί σε παλαιότερες γεωλογικές περιόδους και βρίσκονται αποθηκευμένα στο υπέδαφος, σε μικρότερα ή μεγαλύτερα βάθη σε πεπερασμένες, μη ανανεώσιμες ποσότητες. Όμως, η βιομηχανική ανάπτυξη και η εντατική χρήση ορυκτών καυσίμων, δημιούργησαν σοβαρά περιβαλλοντολογικά προβλήματα στον πλανήτη.

Ως εκ τούτου, γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη για γρήγορη μετάβαση σε ένα ενεργειακό μοντέλο που κατά βάση θα χρησιμοποιεί τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, γιατί η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) παγκοσμίως δημιουργεί προοπτικές για καθαρότερο, πιο βιώσιμο και πιο μη ανθρακούχο μέλλον . Ωστόσο, εκτός από τα προφανή περιβαλλοντικά οφέλη, η μεγάλης κλίμακας διείσδυση ΑΠΕ στο δίκτυο ηλεκτρισμού πρέπει να αντιμετωπιστεί προσεκτικά και μεθοδικά , δεδομένου ότι φέρνει νέες προκλήσεις στον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό και λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας . Στο σημερινό ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), αυξάνεται επίσης η αβεβαιότητα [2] στη διαθέσιμη παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το μερίδιο των ΑΠΕ στο δίκτυο, τόσο περισσότερο εξαρτάται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις καιρικές συνθήκες και άρα γίνεται πιο δύσκολη η πρόβλεψή της. Αυτή η αβεβαιότητα επηρεάζει επίσης την πλευρά της ζήτησης καθώς η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται επίσης από τις καιρικές συνθήκες (π.χ. ημέρες με συννεφιά χρειάζεται περισσότερη ανάγκη για θέρμανση αλλά λόγω συννεφιάς η παραγωγή από τα ΦΒ είναι περιορισμένη). Σε αυτό το πλαίσιο, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα στην παραγωγή

και στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η πρόβλεψη της παραγωγής των ΑΠΕ έχει καταστεί απαραίτητη για την ευστάθεια, την αξιοπιστία και την ασφάλεια της λειτουργίας του ΣΗΕ, για τον προγραμματισμό της παραγωγής ενέργειας, τον προγραμματισμό των αναγκαίων εφεδρειών και τελικά την βέλτιστη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών μονάδων (ΦΒ) αυξάνει συνεχώς σε παγκόσμιο επίπεδο, γιατί είναι εύκολα στην τοποθέτησή τους, σε διαφορετική κλίμακα και σε διάφορες τοποθεσίες. Ωστόσο, αν και η παραγωγή φωτοβολταϊκών ακολουθεί ένα σχετικά αναμενόμενο καθημερινό μοτίβο παραγωγής (η κλασική καμπάνα), παραμένει στοχαστική λόγω της εγγενούς δυσκολίας στην ακριβή πρόβλεψη των μετεωρολογικών συνθηκών, όπως η ηλιοφάνεια, ανά περιοχή που βρίσκεται το εκάστοτε ΦΒ πάρκο. Η σημασία της πρόβλεψης της παραγωγής των φωτοβολταϊκών έγκειται στα οικονομικά οφέλη που προσφέρει στον διαχειριστή του δικτύου, καθώς και στην καλύτερη λειτουργία του ΣΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα της παραγωγής των φωτοβολταϊκών αυξάνουν τα κόστη λειτουργίας των συμβατικών μονάδων ακόμα και σε περιπτώσεις που μειώνουν την απαιτούμενη παραγωγή από πλευράς τους, επειδή σε συνθήκες ανάγκης οι συμβατικές μονάδες παραγωγής καλούνται να καλύψουν το έλλειμμα ενέργειας και προστίθενται κόστη έναρξης και παύσης λειτουργίας τους. Η βελτίωση των προβλέψεων οδηγεί σε μείωση της παραγωγής από τις συμβατικές μμονάδες άμεσης έναρξης, σε μείωση του κόστους παραγωγής και άρα μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας. Ταυτόχρονα οδηγεί σε καλύτερο προγραμματισμό των διαδικασιών συντήρησης των πάρκων[3].



Εικόνα 1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.2.1: Πλεονεκτήματα από την χρήση ΑΠΕ

Η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, τόσο για το περιβάλλον όσο και για την οικονομία και την κοινωνία. Στη σύγχρονη ενεργειακή πολιτική, οι ΑΠΕ αποτελούν τη βασική λύση για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο και καθαρό ενεργειακό σύστημα[4]. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

Αρχικά, Μείωση των Εκπομπών Διοξειδίου του Άνθρακα (CO_2): Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης των ΑΠΕ και ίσως ο κυριότερος λόγος που οδήγησε στην ανάπτυξή τους, είναι η συμβολή τους στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο,

οι ΑΠΕ δεν παράγουν επικίνδυνες εκπομπές κατά την παραγωγή ενέργειας. Αυτό τις καθιστά σημαντικό εργαλείο στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Δεύτερον, οι ΑΠΕ προάγουν την Αειφορία και αποτελούν Μη Εξαντλήσιμες Πηγές: Οι ΑΠΕ βασίζονται σε φυσικές διεργασίες που είναι αειφόρες και πρακτικά ανεξάντλητες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η κίνηση των ανέμων, η γεωθερμική ενέργεια και οι υδάτινοι πόροι. Οι παραπάνω είναι πηγές ενέργειας που προϋπάρχουν και θα συνεχίσουν να υπάρχουν στον πλανήτη και αυτό τις καθιστά πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιούνται επ' αόριστον, χωρίς να εξαντλούνται όπως οι παραδοσιακοί ενεργειακοί πόροι[5].

Τρίτον, η Ενεργειακή Ασφάλεια και Μείωση της Εξάρτησης από Εισαγωγές: Η ανάπτυξη των ΑΠΕ μπορεί να μειώσει την εξάρτηση των χωρών από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια και σταθερότητα. Ειδικότερα στην Ελλάδα, τόσο το αιολικό όσο και το ηλιακό δυναμικό είναι πολύ μεγάλο, οπότε η ανάπτυξη των ΑΠΕ στην χώρα μπορούν να υποκαταστήσουν τις εισαγωγές καυσίμων, περιορίζοντας τις οικονομικές επιπτώσεις από τις διακυμάνσεις των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου και να θέσουν πολύ γερά θεμέλια για την ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας και εν καιρώ να αναπτυχθεί σε ισχυρό εξαγωγέα πράσινης ενέργειας.

Τέταρτον, η Δημιουργία Νέων Θέσεων Εργασίας και Οικονομική Ανάπτυξη: Η στροφή προς τις ΑΠΕ δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας σε τομείς όπως η κατασκευή, η εγκατάσταση και η συντήρηση των τεχνολογιών ΑΠΕ. Είναι ένας κλάδος που οι ανάγκες των καιρών απαιτούν την ταχεία ανάπτυξή του, οπότε η ζήτηση για εργασία είναι αρκετά αυξημένη. Επιπλέον, προάγει την οικονομική ανάπτυξη μέσα από την καινοτομία και την επένδυση σε τεχνολογίες καθαρής ενέργειας. Η ανάπτυξη έργων ΑΠΕ μπορεί να ενισχύσει τις τοπικές οικονομίες και να συμβάλλει στην αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας. Είναι σημαντικό να δίνονται ευκαιρίες και δυνατότητες εργασίας σε περιοχές της επαρχίας.

Πέμπτον, η Μείωση της Ρύπανσης και Βελτίωση της Δημόσιας Υγείας: τα τελευταία χρόνια η κλιματική αλλαγή έχει κάνει παραπάνω από αισθητή την παρουσία της σε όλο τον πλανήτη. Τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως προαναφέρθηκε, επιτείνουν το πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη και είναι επιτακτική η ανάγκη η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη να μην βασίζεται σε συμβατικές μορφές ενέργειας, αλλά σε ανανεώσιμες που είναι πράσινες μορφές ενέργειας. Οι ΑΠΕ, επιπλέον, δεν παράγουν τοξικά απόβλητα ή αέρια που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα, όπως συμβαίνει με τα συμβατικά καύσιμα. Η μείωση της ρύπανσης από την καύση ορυκτών καυσίμων έχει σημαντικά οφέλη για τη δημόσια υγεία, καθώς συμβάλλει στη μείωση των ασθενειών του αναπνευστικού συστήματος και άλλων προβλημάτων υγείας που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Έκτον, η Αποκέντρωση της Παραγωγής Ενέργειας και Ενεργειακή Αυτονομία: μέχρι πρόσφατα, υπερίσχυε και κεντρικό μοντέλο παραγωγής, όπου οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονταν σε συγκεκριμένα σημεία, π.χ. Κοζάνη που υπάρχει λιγνίτης, και η κατανάλωση κατά κύριο λόγο βρισκόταν στα αστικά κέντρα. Πλέον, η ανάπτυξη των ΑΠΕ επιτρέπει την αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας, δίνοντας τη δυνατότητα σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές να αποκτήσουν ενεργειακή αυτονομία, όπως για

παράδειγμα μικρά νησιά στα οποία έχουν εγκατασταθεί αιολικά πάρκα. Σε πιο ειδικές περιπτώσεις, οι μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις, όπως τα οικιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, μπορούν να παρέχουν αξιόπιστη και σταθερή ενέργεια σε περιοχές χωρίς πρόσβαση σε δίκτυα ηλεκτροδότησης.

Έβδομο, η Ευελιξία και Πολυμορφία στις Ενεργειακές Λύσεις: Οι ΑΠΕ αποτελούν μεγάλο πλήθος και άρα ευρεία ποικιλία τεχνολογιών ΑΠΕ, όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η βιοενέργεια, προσφέροντας έτσι πολυμορφία στις ενεργειακές λύσεις και επιτρέποντας συγχρόνως την προσαρμογή τους σε διαφορετικά κλιματικά και γεωγραφικά πλαίσια. Για παράδειγμα, βραχονησίδες που δεν κατοικούνται και έχουν πλαγιές, μπορούν να αξιοποιηθούν για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων και αντίστοιχα περιοχές με υψομετρικές διαφορές που σχηματίζονται λεκάνες απορροής, θα μπορούν να υποστηρίξουν την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου. Αυτή η πολυμορφία επιτρέπει την ανάπτυξη μικτών ενεργειακών συστημάτων, αυξάνοντας την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα των δικτύων, καθώς δεν εξαρτάσαι αποκλειστικά από μια μορφή ενέργειας που επιφέρει περιορισμούς στην παραγωγή όποια ώρα της ημέρας χρειαστεί.

Τέλος, η Μείωση του Κόστους της Ενέργειας Μακροπρόθεσμα: Αν και οι αρχικές επενδύσεις στις ΑΠΕ είναι αρκετά υψηλές, τα μακροπρόθεσμα κόστη τους είναι σχετικά χαμηλά. Οι φυσικές πηγές ενέργειας είναι δωρεάν και η τεχνολογική πρόοδος χρόνο με τον χρόνο μειώνει σημαντικά το κόστος των εγκαταστάσεων, ιδιαίτερα των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων. Έτσι, οι ΑΠΕ μπορούν να προσφέρουν οικονομικά αποδοτικές λύσεις για την παραγωγή ενέργειας σε βάθος χρόνου.

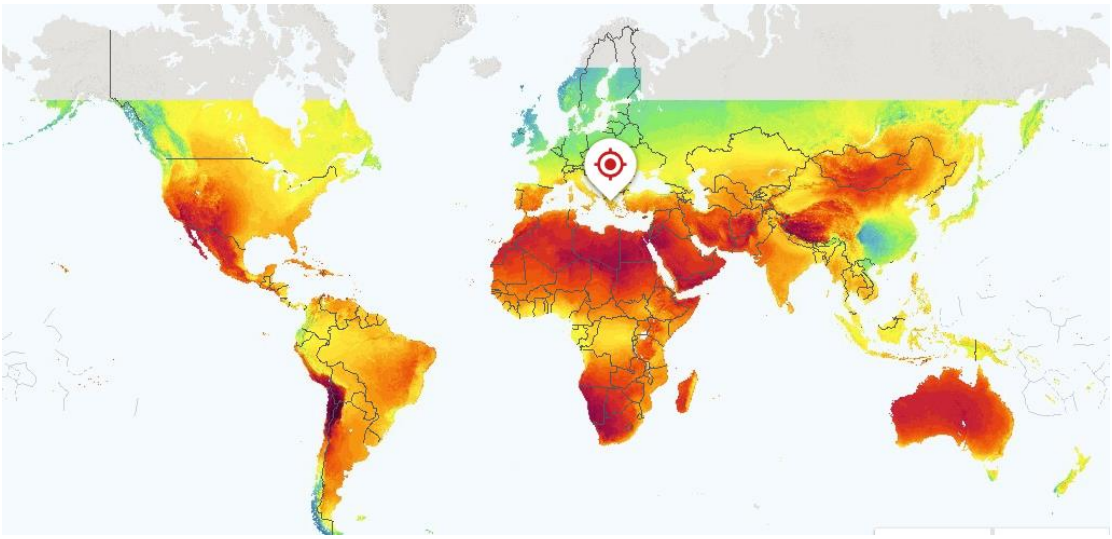
Κεφάλαιο 2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά

2.1: Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί ίσως, την πιο διαδεδομένη και καθαρή μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, η οποία χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω της ανόδου των τιμών των ορυκτών καυσίμων, της πίεσης για μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και της τεχνολογικής προόδου.
Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία μέσω διαφόρων τεχνολογιών που μπορούν και την μετατρέπουν είτε σε θερμική είτε σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι δύο κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι:

- **Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Photovoltaic - PV)**: Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Οι ηλιακές κυψέλες, που κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς, όπως το πυρίτιο, απορροφούν τα φωτόνια του ηλιακού φωτός και παράγουν ρεύμα.
- **Ηλιακή Θερμική Ενέργεια (Concentrated Solar Power - CSP)**: Η ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιεί καθρέφτες ή φακούς για να συγκεντρώσει ηλιακή ακτινοβολία σε ένα συγκεκριμένο σημείο, δημιουργώντας υψηλές θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμότητας ή ατμού, ο οποίος στη συνέχεια εκτονώνεται στις τουρμπίνες με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη Γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές της. Οι περιοχές κοντά στον Ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από τις υπόλοιπες, γιατί εκεί είναι πιο κάθετη η πρόσπτωση των ακτινών του ήλιου. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα και με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (τα σύννεφα σκεδάζουν σε σημαντικό βαθμό τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν αποφασιστικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται και προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία (kW/m^2) αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια (συνήθως σε kWh/m^2). Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία. Η Ελλάδα συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών που λαμβάνουν υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας.

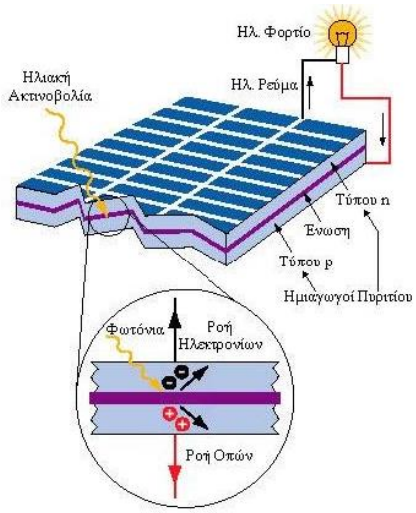


Εικόνα 2. Ετήσια παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία.

Η Εικόνα 2 αντιπροσωπεύει πως όσο πιο σκούρο είναι το χρώμα, τόσο περισσότερη ακτινοβολία λαμβάνει η συγκεκριμένη περιοχή.

2.2: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

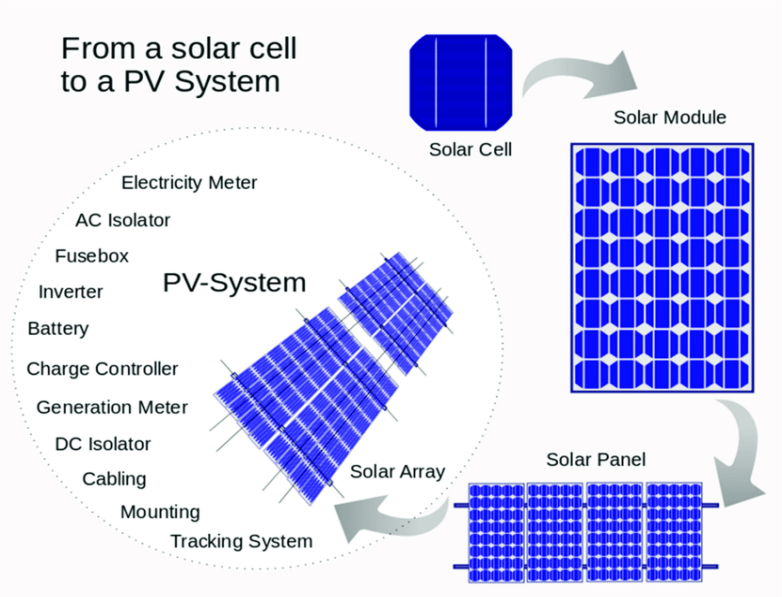
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια από τις σημαντικότερες μεθόδους αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Με την αύξηση της ζήτησης για καθαρές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αναδειχθεί ως μία από τις σημαντικότερες λύσεις. Η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο επιτρέπει την άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Heinrich Hertz το 1887 και ερμηνεύθηκε πλήρως από τον Albert Einstein το 1905. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από φωτοβολταϊκές κυψέλες, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ημιαγώγιμα υλικά, όπως το πυρίτιο. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στις κυψέλες, τα φωτόνια διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού, προκαλώντας την αποδέσμευσή τους και τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 3. Λειτουργία φωτοβολταϊκής κυψέλης.

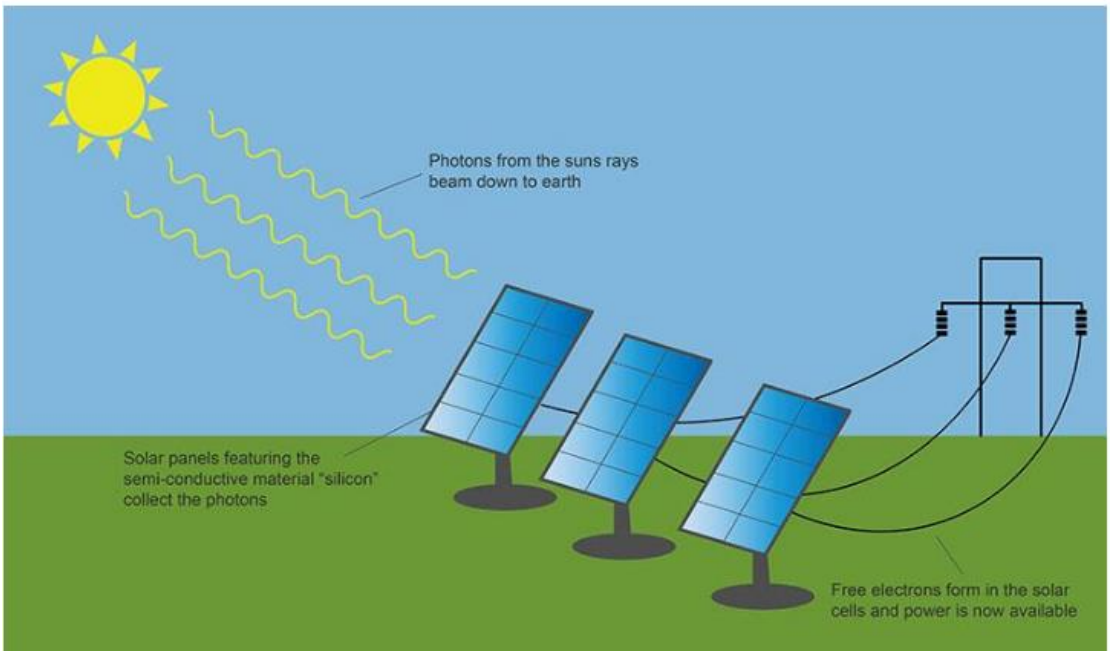
2.3: Λειτουργία και Παραγωγή Ενέργειας

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η ένταση και η διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία και η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ, άρα και η γωνία πρόσπτωσης των ακτινών του ήλιου στο πάνελ. Επιπλέον, διαφορετικοί τύποι κυψελών προσφέρουν διαφορετικές αποδόσεις, με τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες να περιλαμβάνουν τις μονοκρυσταλλικές, πολυκρυσταλλικές και λεπτού υμενίου κυψέλες. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συνδέονται σε συστοιχίες, οι οποίες ενισχύουν τη συνολική παραγόμενη ενέργεια και την καθιστούν διαθέσιμη προς κατανάλωση μέσω συστημάτων μετατροπής συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο[6].



Εικόνα 4. Από ΦΒ κυψέλη σε ΦΒ σύστημα.

Οι συστοιχίες όταν συνδεθούν κατάλληλα μεταξύ τους, τότε φτιάχνεται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 5. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ πάρκο.

2.4: Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα

2.4.1: Δυναμικό Παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, λόγω της γεωγραφικής της θέσης και των ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών, όπως έχει προαναφερθεί, διαθέτει ένα από τα υψηλότερα δυναμικά παραγωγής ηλιακής ενέργειας στην Ευρώπη. Η χώρα απολαμβάνει υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με τη μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία να κυμαίνεται από 1.500 έως 1.900 kWh/m^2. Οι περιοχές με το μεγαλύτερο δυναμικό ηλιακής ενέργειας βρίσκονται κυρίως στη νότια Ελλάδα, τα νησιά του Αιγαίου, την Κρήτη και την Πελοπόννησο. Ως αποτέλεσμα, η χώρα διαθέτει μεγάλες δυνατότητες για την ανάπτυξη ηλιακών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που ενισχύεται από την αυξανόμενη ζήτηση για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας[7].

2.4.2: Εξέλιξη των Φωτοβολταϊκών Εγκαταστάσεων στην Ελλάδα

Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η χώρα εισήλθε δυναμικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά με την εφαρμογή εθνικών και ευρωπαϊκών πολιτικών για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

(ΑΠΕ). Ο Νόμος 3468/2006, ο οποίος καθόρισε το θεσμικό πλαίσιο για την προώθηση των ΑΠΕ, αποτέλεσε σημείο καμπής για τη ραγδαία ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας στην χώρα.
Από το 2010 και μετά, η αγορά φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα γνώρισε εκρηκτική ανάπτυξη, κυρίως λόγω των ευνοϊκών ρυθμίσεων για τις εγγυημένες τιμές πώλησης (Feed-in-Tariffs) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2013, η Ελλάδα έγινε η πρώτη χώρα παγκοσμίως στην κατά κεφαλή εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, με περισσότερα από 2.5 GW εγκατεστημένης ισχύος. Παρόλο που οι εγγυημένες τιμές πώλησης μειώθηκαν σημαντικά μετά το 2014, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις συνέχισαν να αυξάνονται με σταθερό ρυθμό.
Το 2020, η Ελλάδα σημείωσε σημαντική πρόοδο με την υιοθέτηση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)[8], το οποίο στοχεύει στην αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα της χώρας. Ο στόχος είναι η συμμετοχή των ΑΠΕ να φτάσει το 35% στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2030. Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην επίτευξη αυτού του στόχου, με το συνολικό δυναμικό να αναμένεται να φτάσει τα 7,7 GW εγκατεστημένης ισχύος μέχρι το 2030.

2.4.3: Τρέχουσες και Μελλοντικές Εξελίξεις

Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στην Ελλάδα συνεχίζουν να αναπτύσσονται, υποστηριζόμενες από τεχνολογικές καινοτομίες και νέες επενδύσεις. Ένας σημαντικός παράγοντας ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην χώρα, είναι η μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών πάνελ, η οποία έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα των έργων. Επίσης, η υιοθέτηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και έξυπνων δικτύων ενισχύει τη βιωσιμότητα και την ευελιξία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά[9].
Πολλές περιοχές της χώρας παρουσιάζουν πλέον ολοκληρωμένα φωτοβολταϊκά πάρκα μεγάλης κλίμακας, ενώ παράλληλα προωθείται η χρήση φωτοβολταϊκών στις στέγες κτιρίων για οικιακή κατανάλωση μέσω του net metering. Ορισμένες νέες επενδύσεις περιλαμβάνουν συνδυαστικά έργα, τα υβριδικά έργα, που ενσωματώνουν και άλλες ΑΠΕ, όπως η αιολική ενέργεια και η γεωθερμία, ώστε η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από τα συγκεκριμένα συστήματα, να είναι δυνατή στη διάρκεια όλου του εικοσιτετράωρου.
Η Ελλάδα συνεχίζει να εστιάζει στη μεγιστοποίηση του δυναμικού της ηλιακής ενέργειας, με τη συμμετοχή της στις διεθνείς προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και την επίτευξη κλιματικών στόχων. Η βελτίωση της νομοθεσίας και η προώθηση των επενδύσεων αναμένεται να διασφαλίσουν ότι η χώρα θα παραμείνει στην πρώτη γραμμή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη[10].

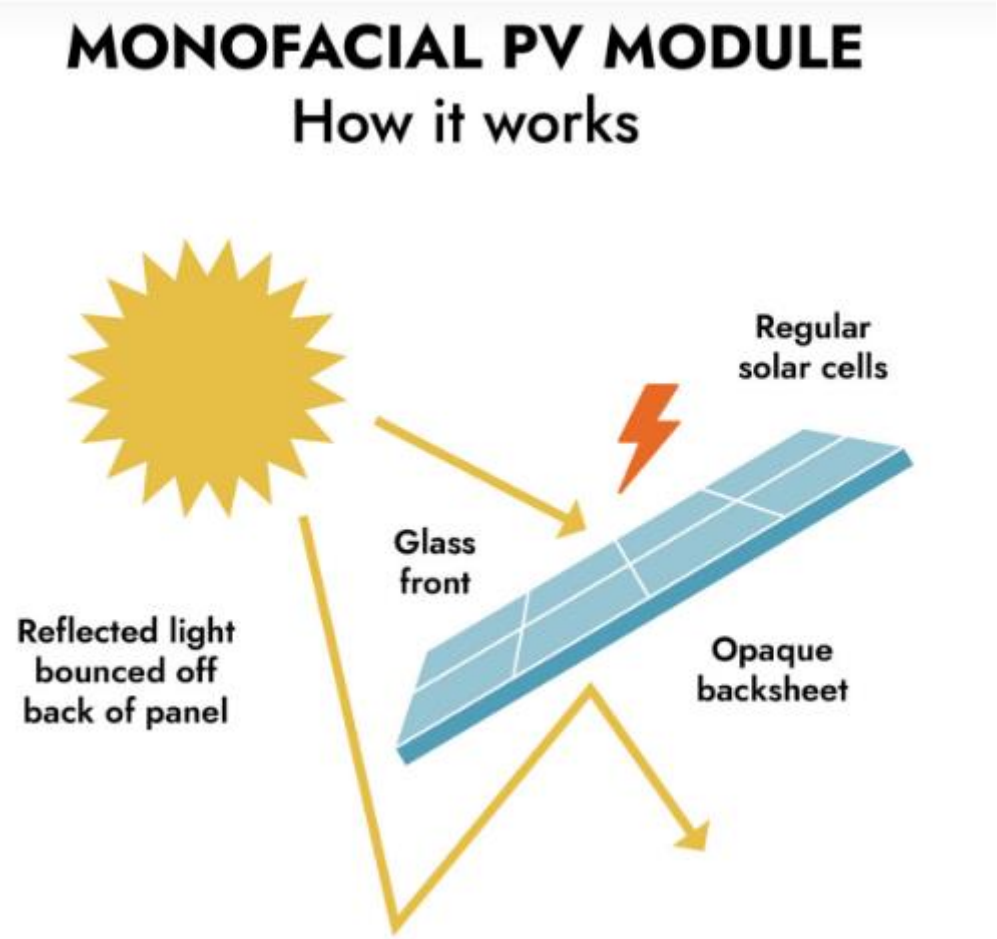
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Πάρκων

Η χρήση των φωτοβολταϊκών πάρκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο έχει γνωρίσει αλματώδη ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή της έχουν εξελιχθεί σημαντικά. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν τρεις βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα φωτοβολταϊκά πάρκα: τα πάνελ μονής όψης (Monofacial), τα πάνελ διπλής όψης (Bifacial) και τα συστήματα παρακολούθησης του ήλιου (Trackers μονού και διπλού άξονα). Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες προσφέρει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ανάλογα με την εφαρμογή και τις συνθήκες εγκατάστασης.

3.1: Πάνελ μονής Όψης (Monofacial)

Τα πάνελ μονής όψης είναι η παραδοσιακή και πιο διαδεδομένη μορφή φωτοβολταϊκών. Σε αυτή την κατηγορία, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα τοποθετούνται στην εμπρόσθια πλευρά του πάνελ, όπου και απορροφούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η τεχνολογία είναι απλή και αξιόπιστη, ενώ προσφέρει υψηλή απόδοση σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια.
Η κύρια δομή αυτών των πάνελ βασίζεται σε μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου. Τα μονοκρυσταλλικά πάνελ έχουν υψηλότερη απόδοση, που μπορεί να φτάσει έως και το 24%, ενώ τα πολυκρυσταλλικά είναι πιο οικονομικά αλλά με χαμηλότερη απόδοση, περίπου στο 15-18%[11].
Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι κυττάρων που χρησιμοποιούνται στα monofacial πάνελ:

1. **Μονοκρυσταλλικά Κύτταρα (Monocrystalline Cells):** Αυτά τα κύτταρα κατασκευάζονται από έναν ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου. Τα μονοκρυσταλλικά πάνελ είναι πιο αποδοτικά, με αποδόσεις που μπορούν να φτάσουν το 20-24%. Τα κύτταρα έχουν σκούρο χρώμα και χαρακτηριστική εξαγωνική ή κυκλική εμφάνιση. Η παραγωγή τους είναι πιο ακριβή, αλλά προσφέρουν υψηλή απόδοση ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο.
2. **Πολυκρυσταλλικά Κύτταρα (Polycrystalline Cells):** Αυτά τα κύτταρα κατασκευάζονται από πολλαπλούς κρυστάλλους πυριτίου, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο αποδοτικά, με αποδόσεις γύρω στο 15-18%. Είναι πιο οικονομικά στην παραγωγή από τα μονοκρυσταλλικά πάνελ, αλλά χρειάζονται μεγαλύτερη επιφάνεια για να παράγουν την ίδια ποσότητα ενέργειας.



Εικόνα 6. Λειτουργία του monofacial panel.

3.1.1: Πλεονεκτήματα των Monofacial Panels

Ακολουθούν τα πλεονεκτήματα της χρήσης πάνελ μονής όψης:

1. **Απλή Κατασκευή και Εγκατάσταση:** Τα πάνελ μονής όψης είναι η πιο παραδοσιακή τεχνολογία φωτοβολταϊκών και είναι γνωστά για την απλή κατασκευή τους. Η εγκατάσταση τους είναι αρκετά ευκολότερη και λιγότερο δαπανηρή σε σύγκριση με άλλες πιο σύνθετες τεχνολογίες, όπως τα bifacial (διπλής όψης) πάνελ ή τα συστήματα με trackers.
2. **Χαμηλό Κόστος:** Λόγω της απλής κατασκευής τους και της εκτενούς χρήσης τους, τα monofacial πάνελ έχουν χαμηλότερο κόστος παραγωγής και εγκατάστασης, συγκριτικά με τα άλλα είδη. Αυτή η οικονομική αποδοτικότητα τα καθιστά ελκυστική επιλογή για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα αλλά και για οικιακές εγκαταστάσεις.
3. **Αξιοπιστία και Μακροχρόνια Απόδοση:** Τα monofacial πάνελ έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, που μπορεί να υπερβαίνει τα 25 χρόνια. Η αξιοπιστία τους είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα, καθώς τα περισσότερα πάνελ συνοδεύονται από εγγύηση μακροχρόνιας απόδοσης, συνήθως 80% της αρχικής απόδοσης μετά από 20-25 χρόνια λειτουργίας[12].

3.1.2: Μειονεκτήματα των Monofacial Panels

Ωστόσο, όπως είναι φυσικό, τα πάνελ μονής όψης έχουν και τα αντίστοιχα μειονεκτήματά τους, τα οποία και ακολουθούν:

1. **Περιορισμένη Απόδοση σε Περιοχές με Αντανάκλαση:** Τα monofacial πάνελ απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία μόνο από την εμπρόσθια επιφάνεια τους. Αυτό σημαίνει ότι η ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος ή άλλες επιφάνειες δεν μπορεί να αξιοποιηθεί. Σε περιοχές με υψηλό ανακλαστικότητα (ή albedo: αντανάκλαση από το έδαφος), αυτή η ανακλώμενη ακτινοβολία μένει αναξιοποίητη.
2. **Μείωση Απόδοσης με την Πάροδο του Χρόνου:** Όπως όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ, έτσι και τα monofacial πάνελ εμφανίζουν σταδιακή μείωση της απόδοσής τους με την πάροδο του χρόνου λόγω της υποβάθμισης των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Η μείωση αυτή, αν και προβλέψιμη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της εγκατάστασης.

3.2: Πάνελ διπλής Όψης (Bifacial)

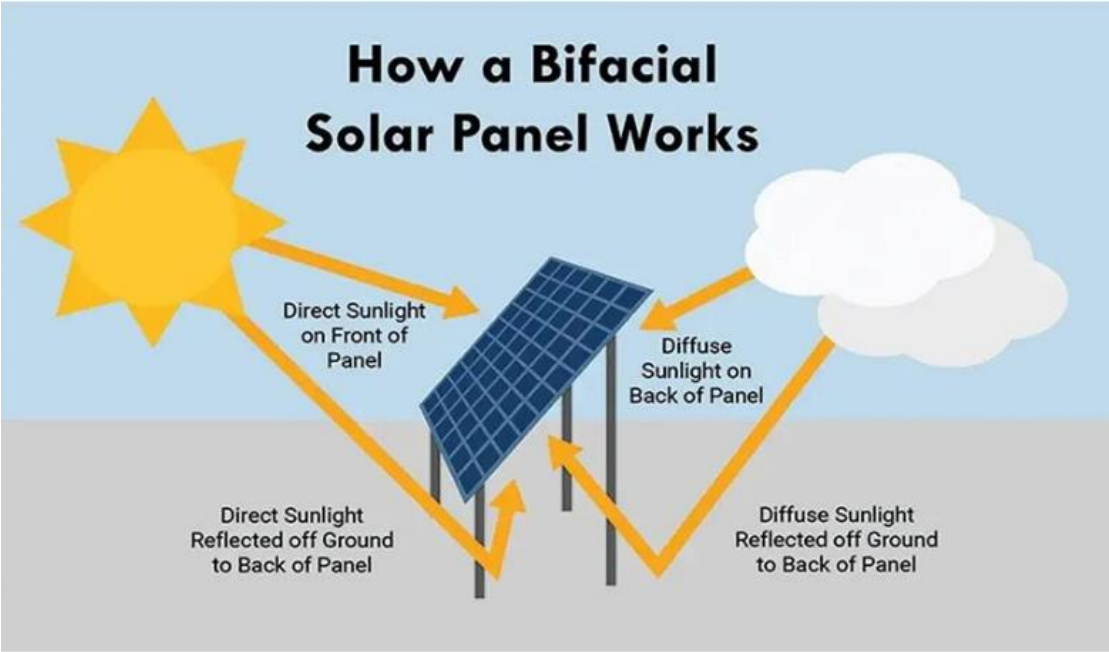
Τα πάνελ διπλής όψης (Bifacial Panels) αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία που επιτρέπει την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και από τις δύο πλευρές του πάνελ. Αυτή η προσέγγιση αυξάνει σημαντικά την απόδοση της εγκατάστασης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου το έδαφος ή άλλες επιφάνειες ανακλούν το φως προς την πίσω πλευρά των πάνελ.
Τα bifacial πάνελ είναι ιδανικά για εγκαταστάσεις σε περιοχές με υψηλό albedo (ανακλαστικότητα), όπως επιφάνειες με άμμο, χιόνι ή λευκό χαλίκι, όπου η αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας προς την πίσω πλευρά του πάνελ μπορεί να αυξήσει την απόδοση κατά 10-30%. Αυτή η τεχνολογία απαιτεί περισσότερη προσοχή στον σχεδιασμό της εγκατάστασης, καθώς η απόδοση εξαρτάται από τον σωστό προσανατολισμό και την τοποθέτηση των πάνελ.

3.2.1: Δομή και Λειτουργία των Bifacial Panels

Σε αντίθεση με τα monofacial πάνελ, τα bifacial πάνελ διαθέτουν ενεργά φωτοβολταϊκά κύτταρα και στις δύο πλευρές τους. Η εμπρόσθια πλευρά απορροφά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η πίσω πλευρά απορροφά την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από το έδαφος ή τις επιφάνειες γύρω από την εγκατάσταση.
Η δομή των bifacial πάνελ συνήθως περιλαμβάνει:

- **Διαφανή υλικά στο πίσω μέρος** αντί για το αδιαφανές υποστήριγμα που εμφανίζεται στα παραδοσιακά monofacial πάνελ.
- **Διπλής όψης ηλιακά κύτταρα**, συνήθως κατασκευασμένα από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, που επιτρέπουν την απορρόφηση ηλιακής ενέργειας και από τις δύο πλευρές.

Ορισμένα bifacial πάνελ διαθέτουν πλαίσια, ενώ άλλα είναι frameless (χωρίς πλαίσιο), κάτι που διευκολύνει τη χρήση τους σε διάφορες δομές στήριξης.

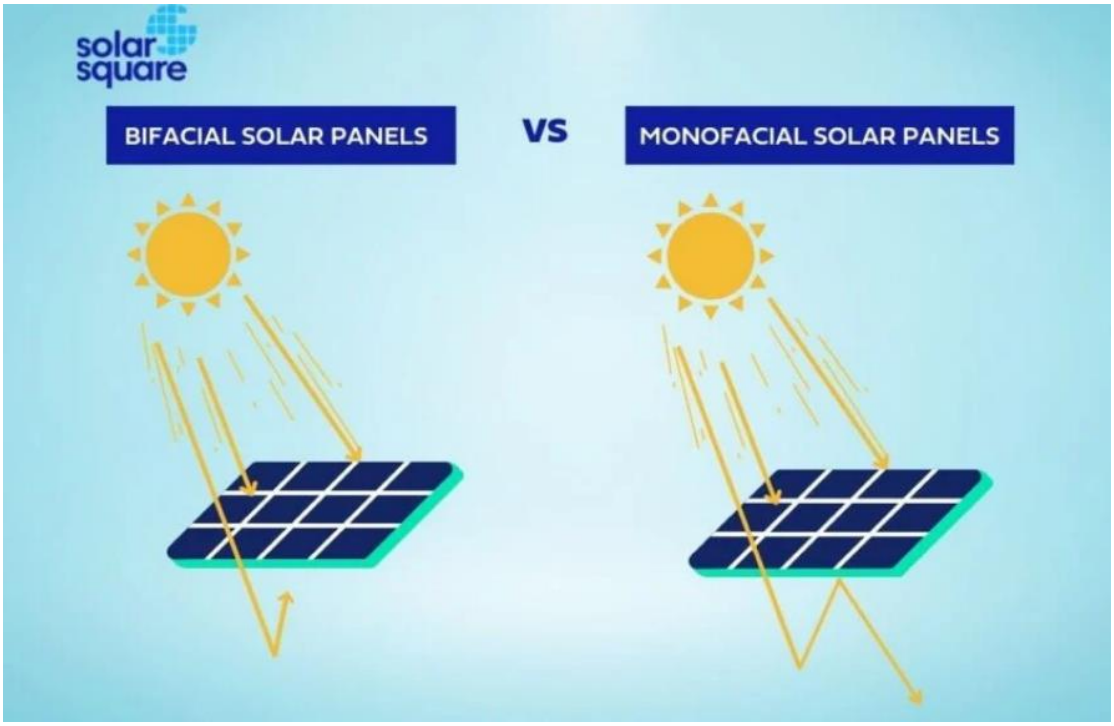


Εικόνα 7. Λειτουργία του bifacial panel.

3.2.2: Πλεονεκτήματα των Bifacial Panels

Ακολουθούν τα πλεονεκτήματα της χρήσης πάνελ διπλής όψης:

1. **Αυξημένη Απόδοση**: Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των bifacial πάνελ είναι η αυξημένη απόδοση, καθώς μπορούν να απορροφούν περισσότερη ηλιακή ενέργεια, αφού απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία και από την πίσω πλευρά. Ανάλογα με τις συνθήκες εγκατάστασης, η επιπλέον απόδοση μπορεί να φτάσει το 10-30%, με την πιθανότητα να αυξηθεί ακόμα περισσότερο σε περιοχές με υψηλό albedo, όπως το χιόνι ή η άμμος[13].
2. **Υψηλή Αντοχή**: Τα bifacial πάνελ κατασκευάζονται συχνά με υλικά υψηλής ποιότητας και ανθεκτικότητας, καθώς και με ενισχυμένο γυαλί και στις δύο πλευρές. Αυτό τα καθιστά πιο ανθεκτικά σε φυσικές φθορές, όπως χαλάζι ή ισχυρούς ανέμους, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πάνελ με πλαστικό υπόστρωμα.
3. **Δυνατότητα εγκατάστασης σε διάφορες δομές**: Τα bifacial πάνελ είναι κατάλληλα για εγκαταστάσεις σε σταθερά συστήματα στήριξης ή συστήματα παρακολούθησης (trackers). Ειδικά με συστήματα διπλού άξονα, η απόδοσή τους μπορεί να μεγιστοποιηθεί καθώς οι γωνίες πρόσκρουσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι βέλτιστες[14].
4. **Εκμετάλλευση ανακλώμενου φωτός**: Σε περιβάλλοντα με ανακλαστικά υλικά, όπως επιφάνειες με λευκό χαλίκι, νερό, χιόνι ή ακόμα και επιφάνειες με ανοιχτό χρώμα, τα bifacial πάνελ μπορούν να αποδώσουν εξαιρετικά καλά λόγω της εκμετάλλευσης της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 8. Διαφορά στον τρόπο απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας από monofacial και bifacial panels

3.2.3: Μειονεκτήματα των Bifacial Panels

Ωστόσο, όπως είναι φυσικό, τα πάνελ μονής όψης έχουν και τα αντίστοιχα μειονεκτήματά τους, τα οποία και ακολουθούν:

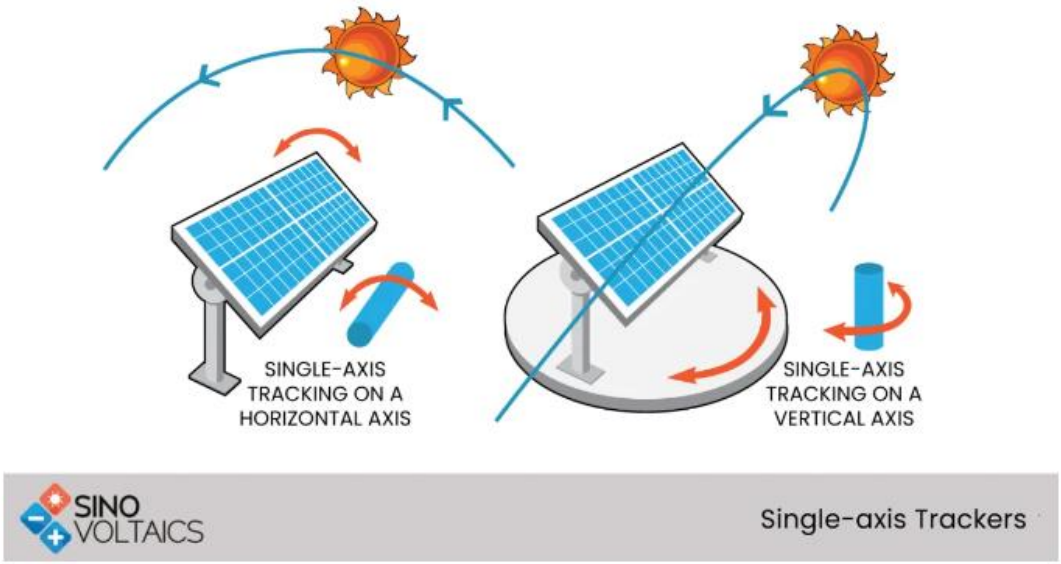
1. **Υψηλότερο Κόστος**: Τα bifacial πάνελ είναι ακριβότερα στην παραγωγή και την εγκατάσταση σε σχέση με τα monofacial πάνελ. Η κατασκευή τους απαιτεί ειδικά υλικά και τεχνολογία, που αυξάνουν το κόστος.
2. **Απαιτήσεις Σχεδιασμού**: Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, η εγκατάσταση των bifacial πάνελ πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά. Η γωνία κλίσης, το ύψος από το έδαφος, και η επιλογή των υλικών κάτω από τα πάνελ παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση. Επίσης, η χρήση σε περιοχές με χαμηλό albedo μπορεί να περιορίσει τα οφέλη από την πίσω πλευρά.
3. **Περιορισμένη Απόδοση σε Ορισμένα Περιβάλλοντα**: Σε περιοχές όπου το έδαφος δεν έχει καλή ανακλαστικότητα ή σε εγκαταστάσεις με χαμηλή απόσταση από το έδαφος, τα bifacial πάνελ μπορεί να μην προσφέρουν σημαντικά υψηλότερη απόδοση από τα παραδοσιακά πάνελ.

3.3: Συστήματα Παρακολούθησης της Κίνησης του Ήλιου (Trackers)

Τα συστήματα παρακολούθησης του ήλιου (solar trackers) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει στα φωτοβολταϊκά πάνελ να κινούνται και να ακολουθούν την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό αυξάνει την απόδοση των πάνελ, καθώς διασφαλίζεται ότι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πάντα ιδανική.
Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι trackers: οι trackers μονού άξονα και οι trackers διπλού άξονα. Οι trackers μονού άξονα επιτρέπουν στα πάνελ να κινούνται από ανατολή προς δύση, ενώ οι trackers διπλού άξονα προσθέτουν και κίνηση στον κατακόρυφο άξονα, επιτρέποντας την καλύτερη παρακολούθηση του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και του έτους[15].
Οι trackers μονού άξονα είναι οικονομικότεροι και ευκολότεροι στη συντήρηση, ενώ προσφέρουν αύξηση απόδοσης περίπου 15-25% σε σύγκριση με σταθερά πάνελ. Οι trackers διπλού άξονα, αν και ακριβότεροι, μπορούν να αυξήσουν την απόδοση των πάνελ έως και 30-40%. Ωστόσο, απαιτούν μεγαλύτερη συντήρηση και είναι πιο ευαίσθητοι σε καιρικές συνθήκες, όπως οι ισχυροί άνεμοι.

3.3.1: Συστήματα Παρακολούθησης Μονού Άξονα (Single-Axis Trackers)

Τα συστήματα παρακολούθησης μονού άξονα επιτρέπουν στα φωτοβολταϊκά πάνελ να περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα, ο οποίος είναι συνήθως τοποθετημένος οριζόντια (συνήθως σε βόρεια-νότια κατεύθυνση). Τα πάνελ ακολουθούν την πορεία του ήλιου από την ανατολή στη δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά η κλίση τους παραμένει σταθερή[16].



Εικόνα 9. Τα είδη συστημάτων παρακολούθησης μονού άξονα. Συνηθίζεται η επιλογή του οριζόντιου άξονα.

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των trackers μονού άξονα και τα πλεονεκτήματα που αυτοί εμφανίζουν:

- **Οριζόντιος Άξονας:** Ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος στο έδαφος, επιτρέποντας στα πάνελ να κινούνται από την ανατολή προς τη δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- **Αύξηση της Απόδοσης:** Σε σύγκριση με τα σταθερά συστήματα, οι μονοαξονικοί trackers μπορούν να αυξήσουν την απόδοση των πάνελ κατά περίπου 15-25%, εξασφαλίζοντας ότι τα πάνελ βρίσκονται σε καλύτερη γωνία πρόπτωσης του φωτός καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.
- **Κόστος:** Τα συστήματα παρακολούθησης μονού άξονα είναι πιο οικονομικά σε σχέση με τα διπλού άξονα. Επίσης, έχουν χαμηλότερα κόστη συντήρησης, καθώς είναι λιγότερο σύνθετα.
- **Εφαρμογές:** Τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια, όπου η ανάγκη για βελτιστοποίηση της απόδοσης καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας είναι σημαντική.

Ωστόσο παρατηρούνται και τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- **Περιορισμένη Παρακολούθηση:** Επειδή οι trackers παρακολουθούν τον ήλιο μόνο στον οριζόντιο άξονα, δεν προσαρμόζονται στις εποχικές αλλαγές του ύψους του ήλιου, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν ο ήλιος είναι χαμηλότερα στον ορίζοντα.
- **Ευαισθησία στον Άνεμο:** Τα συστήματα μονού άξονα, λόγω της ευρείας επιφάνειας των πάνελ, μπορεί να είναι ευαίσθητα στους ισχυρούς ανέμους, γεγονός που απαιτεί πρόσθετα μέτρα προστασίας ή δομές αντοχής.

3.3.2: Συστήματα Παρακολούθησης Διπλού Άξονα (Dual-Axis Trackers)

Τα συστήματα παρακολούθησης διπλού άξονα επιτρέπουν στα πάνελ να κινούνται τόσο κατά την ανατολή και τη δύση του ήλιου, όσο και να προσαρμόζουν την κλίση τους με βάση το ύψος του ήλιου στον ουρανό, ανάλογα με την εποχή.

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των trackers διπλού άξονα και τα πλεονεκτήματα που αυτοί εμφανίζουν:

- **Δύο Άξονες Περιστροφής:** Τα πάνελ μπορούν να περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο και έναν κατακόρυφο άξονα, επιτρέποντάς τους να προσαρμόζονται στην πορεία του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Αυτό διασφαλίζει ότι τα πάνελ παραμένουν σχεδόν κάθετα στις ακτίνες του ήλιου οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας ή εποχής.

- **Μέγιστη Απόδοση:** Τα συστήματα παρακολούθησης διπλού άξονα μπορούν να αυξήσουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ κατά 30-40%, σε σύγκριση με τα σταθερά συστήματα. Είναι ιδανικά για περιοχές με μεταβλητότητα στην ένταση του ήλιου κατά τη διάρκεια του χρόνου.
- **Κατάλληλα για Ειδικές Εφαρμογές:** Τα συστήματα διπλού άξονα είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για εγκαταστάσεις όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ασταθής ή μειώνεται αισθητά κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η δυνατότητα προσαρμογής των πάνελ σε κάθε πιθανή γωνία μεγιστοποιεί την απόδοση.

Ωστόσο παρατηρούνται και τα ακόλουθα μειονεκτήματα για τους trackers διπλού άξονα:

- **Υψηλό Κόστος:** Τα συστήματα παρακολούθησης διπλού άξονα είναι σημαντικά ακριβότερα από τα συστήματα μονού άξονα. Η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και της εγκατάστασης αυξάνει το αρχικό κόστος επένδυσης.
- **Συντήρηση:** Η προσθήκη του δεύτερου άξονα περιστροφής σημαίνει περισσότερα κινούμενα μέρη, κάτι που αυξάνει την ανάγκη για συντήρηση. Τα κινούμενα μέρη είναι πιο επιρρεπή σε φθορά, ιδιαίτερα σε περιοχές με ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως άνεμοι ή χιόνι.
- **Ευαισθησία στον Άνεμο και στις Καιρικές Συνθήκες:** Τα συστήματα διπλού άξονα είναι πιο ευαίσθητα σε καιρικά φαινόμενα, καθώς τα πάνελ τους μπορεί να χρειαστούν προστασία κατά τη διάρκεια καταιγίδων ή ισχυρών ανέμων για να αποφευχθούν φθορές.
- **Κάλυψη περισσότερης έκτασης:** Τα συστήματα διπλού άξονα λόγω της περιστροφής τους ως προς δύο άξονες, για να μην προκαλούν σκιάσεις σε διπλανές συστοιχίες, απαιτείται να έχουν μεταξύ τους μεγαλύτερες αποστάσεις. Αν και η παρακολούθηση του ήλιου αυξάνει την παραγωγή, πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαθεσιμότητα γης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση του ΦΒ πάρκου.

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος παρακολούθησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν την εγκατάσταση. Ακολουθούν οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του συστήματος παρακολούθησης:

1. **Κόστος Εγκατάστασης και Συντήρησης:**
    - Τα συστήματα μονού άξονα έχουν χαμηλότερο αρχικό κόστος και απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τα συστήματα διπλού άξονα. Εάν το έργο είναι περιορισμένο σε προϋπολογισμό ή οι συνθήκες είναι κατάλληλες για μονοαξονικούς trackers, αυτή η επιλογή μπορεί να είναι πιο οικονομική.
2. **Κλιματολογικές και Περιβαλλοντικές Συνθήκες:**
    - Σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια και λιγότερες εποχικές μεταβολές, οι μονοαξονικοί trackers προσφέρουν καλή απόδοση με χαμηλότερο κόστος. Σε περιοχές με έντονες εποχικές αλλαγές ή με

λιγότερη ηλιοφάνεια το χειμώνα, οι διπλοαξονικοί trackers μπορούν να προσφέρουν σημαντική βελτίωση της απόδοσης.

3. **Τοπογραφία του Εδάφους και Συνθήκες Εγκατάστασης:**
    - Οι εγκαταστάσεις σε επίπεδες επιφάνειες ή σε περιοχές με υψηλό albedo, όπως κοντά σε επιφάνειες νερού ή με λευκό χαλίκι, μπορούν να επωφεληθούν περισσότερο από διπλοαξονικούς trackers, λόγω της μεγαλύτερης ικανότητας προσαρμογής τους.
4. **Επιθυμητή Απόδοση και Απόσβεση:**
    - Για έργα που επιδιώκουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση και έχουν μεγαλύτερο προϋπολογισμό, τα συστήματα διπλού άξονα μπορεί να δικαιολογηθούν λόγω της δυνατότητάς τους να παράγουν περισσότερο ηλεκτρισμό, οδηγώντας σε ταχύτερη απόσβεση της επένδυσης. Για έργα με μεγαλύτερη έμφαση στο χαμηλό κόστος, οι μονοαξονικοί trackers είναι μια ελκυστική επιλογή.
5. **Μέγεθος της Εγκατάστασης:**
    - Σε μικρότερες εγκαταστάσεις, όπου το κόστος ανά kW είναι κρίσιμος παράγοντας, τα συστήματα μονού άξονα είναι συνήθως προτιμότερα λόγω του χαμηλότερου αρχικού κόστους και της χαμηλότερης συντήρησης. Αντίθετα, τα μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα, όπου η αύξηση της απόδοσης μπορεί να αντισταθμίσει το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, μπορεί να επωφεληθούν από τη χρήση συστημάτων παρακολούθησης διπλού άξονα.

Στο ακόλουθο πινακάκι παρατίθεται συνοπτικά η Σύγκριση των Συστημάτων Παρακολούθησης μονού και διπλού άξονα:

Παράμετρος	**Μονού Άξονα**	**Διπλού Άξονα**
Κόστος Εγκατάστασης	Χαμηλότερο	Υψηλότερο
Απόδοση	+15% με 25%	+ 30% με 40%
Συντήρηση	Χαμηλότερη	Υψηλότερη
Κατάλληλη Περιοχή	Περιοχές με σταθερή ηλιοφάνεια	Περιοχές με μεγάλες εποχιακές αλλαγές
Ανθεκτικότητα σε Άνεμο	Ευαίσθητα σε ισχυρούς ανέμους	Ευαίσθητα σε καιρικές συνθήκες

Κεφάλαιο 4: Παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή ΦΒ πάρκου

Η κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πάρκου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και ανάλυση πολλών παραγόντων. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την αποδοτικότητα, την ασφάλεια, το κόστος, και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του έργου[11]. Παρακάτω παρατίθενται οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή ενός ΦΒ πάρκου[17]:

- **Τοποθεσία και Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά**:
  Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας είναι καθοριστικής σημασίας για την απόδοση του ΦΒ πάρκου. Περιοχές ορεινές με συχνή ύπαρξη νεφοκάλυψης και αυξημένη υγρασία, δεν είναι ιδανικές.
  Δηλαδή, πρέπει να ληφθεί υπόψη, το ηλιακό δυναμικό της περιοχής, καθώς ο βασικότερος παράγοντας για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου είναι η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται η περιοχή. Πρέπει να γίνει λεπτομερής μελέτη της έντασης και της διάρκειας της ηλιοφάνειας στην περιοχή. Ακόμα, η τοπογραφία έχει σημαντικό ρόλο, γιατί οι επίπεδες ή ελαφρώς επικλινείς εκτάσεις είναι συνήθως οι πιο κατάλληλες για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου. Αντίθετα, περιοχές με απότομες κλίσεις ή ανωμαλίες στο έδαφος μπορεί να αυξήσουν το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Ακόμα, περιοχές με πολλούς ορεινούς όγκους που ο ήλιος «κρύβεται» πίσω τους πολύ νωρίτερα από ό,τι φτάνει στον ορίζοντα, επίσης δεν ενδείκνυνται για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού σταθμού. Τέλος, η τοποθεσία σε μεγάλο υψόμετρο μπορεί να επηρεάσει την απόδοση, καθώς η ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία και οι συνθήκες ανέμου μπορεί να είναι διαφορετικές.

- **Δεύτερον, οι Κλιματικές Συνθήκες:**
  Οι κλιματικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την απόδοση και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του φωτοβολταϊκού πάρκου. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία στην περιοχή είναι βασική επειδή η απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ επηρεάζεται αρνητικά από τις υψηλές θερμοκρασίες. Οι καυτές περιοχές μπορεί να χρειαστούν ειδικά πάνελ με χαμηλότερο συντελεστή θερμοκρασίας ή συστήματα ψύξης.
  - *Άνεμοι*: Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ισχυροί άνεμοι μπορούν να επηρεάσουν την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα των trackers και των πάνελ. Θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την προστασία της εγκατάστασης από τους ανέμους, όπως η τοποθέτηση ανεμοφρακτών ή η χρήση ισχυρών βάσεων.
  - *Υγρασία και Βροχοπτώσεις*: Η υγρασία μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής των πάνελ, ενώ οι συχνές βροχοπτώσεις μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην πρόσβαση για τη συντήρηση. Αντίθετα, σε ορισμένες περιπτώσεις, η βροχή μπορεί να βοηθήσει στον καθαρισμό των πάνελ.

- **Πρόσβαση σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας**.
  Η απόσταση του ΦΒ πάρκου από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει άμεσα το κόστος και την αποδοτικότητα της εγκατάστασης, γιατί η κατασκευή νέου ηλεκτρικού δικτύου είναι χρονοβόρα και κοστοβόρα και τις περισσότερες φορές επιβαρύνει τον ίδιο τον παραγωγό, η γραμμή που συνδέει την εγκατάσταση μέχρι το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο. Η εγκατάσταση πρέπει να είναι κοντά σε γραμμές ηλεκτρικής διασύνδεσης που έχουν την ικανότητα να διαχειριστούν την παραγόμενη ισχύ. Η απόσταση από το δίκτυο καθορίζει το κόστος της υποδομής που απαιτείται για τη σύνδεση. Ακόμα, η ποιότητα και σταθερότητα του δικτύου μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική απόδοση του ΦΒ πάρκου. Το ασταθές δίκτυο ή οι συχνές διακοπές ρεύματος μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στην απορρόφηση της παραγόμενης ενέργειας.

- **Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Πάνελ** που θα επιλεχθεί επηρεάζει την απόδοση, το κόστος και τη διάρκεια ζωής του ΦΒ πάρκου.
  Πιο συγκεκριμένα:
  - *Monofacial (μονής όψης πάνελ) vs Bifacial Panels (διπλής όψης πάνελ)*[18]: Τα monofacial πάνελ είναι οικονομικά και αποδοτικά σε περιοχές με σταθερή ηλιοφάνεια. Τα bifacial πάνελ είναι ιδανικά για περιοχές με υψηλό ανακλαστικότητα ή για εφαρμογές που επιδιώκουν μεγαλύτερη απόδοση από την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία.
  - *Τύπος Κυψελών*: Τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα έχουν υψηλότερη απόδοση αλλά μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα.
  - *Απόδοση και Εγγύηση*: Πρέπει να ληφθεί υπόψη η εγγύηση απόδοσης και η μακροχρόνια σταθερότητα των πάνελ. Τα πάνελ με μεγαλύτερη εγγύηση απόδοσης (π.χ. πάνω από 25 χρόνια) μπορεί να είναι πιο κατάλληλα για μακροχρόνιες επενδύσεις.
  -

- **Συστήματα Στήριξης και Παρακολούθησης:**
  Η επιλογή του σωστού συστήματος στήριξης και παρακολούθησης μπορεί να μεγιστοποιήσει την απόδοση του ΦΒ πάρκου. Συγκεκριμένα, τα σταθερά συστήματα είναι πιο οικονομικά και εύκολα στην εγκατάσταση, αλλά προσφέρουν χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα συστήματα παρακολούθησης ενώ από την άλλη οι trackers επιτρέπουν στα πάνελ να ακολουθούν την πορεία του ήλιου, αυξάνοντας την απόδοση της εγκατάστασης κατά 15-40%, ανάλογα με το αν είναι μονού ή διπλού άξονα. Ωστόσο, είναι ακριβότεροι και απαιτούν περισσότερη συντήρηση.
- **Κόστος Εγκατάστασης και Συντήρησης:**
  Το κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνει την αγορά του εξοπλισμού, τη σύνδεση στο δίκτυο, τις δομές στήριξης και τους trackers (αν χρησιμοποιούνται), καθώς και τα εργατικά έξοδα. Το αρχικό κόστος της κατασκευής εξαρτάται από την τεχνολογία των πάνελ, τις βάσεις στήριξης και τους trackers. Πρέπει να γίνει σωστή εκτίμηση για το συνολικό κόστος της επένδυσης. Στην συνέχεια, προστίθεται και το κόστος συντήρησης που περιλαμβάνει τον καθαρισμό των πάνελ, την αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων και την τακτική συντήρηση των trackers (εάν υπάρχουν). Οι περιοχές με σκόνη, άμμο ή βιομάζα μπορεί να απαιτούν συχνότερη συντήρηση, γιατί επιβαρύνεται με

περισσότερη σκόνη το φωτοβολταϊκό πάρκο και είναι πιο συχνή η απαίτηση για καθαρισμό του.

- **Νομικά και Ρυθμιστικά Ζητήματα:**
  Η κατασκευή ενός ΦΒ πάρκου υπόκειται σε νομικούς και ρυθμιστικούς κανόνες που πρέπει να τηρηθούν. Αντίστοιχα, η απόκτηση των απαιτούμενων αδειών από τοπικές αρχές και ρυθμιστικούς φορείς είναι απαραίτητη. Οι άδειες αυτές μπορεί να αφορούν την περιβαλλοντική εκτίμηση, την οικοδόμηση, τη σύνδεση με το δίκτυο κ.λπ.

Κεφάλαιο 5: PVGIS και PVsyst, δύο βασικά εργαλεία

5.1: PVGIS

Αρχικά, για να γίνει η προσομοίωση των φωτοβολταϊκών πάρκων στο πρόγραμμα του PVsyst βασική προϋπόθεση αποτελεί η εισαγωγή των κατάλληλων μετεωρολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα, στη διάρκεια του έτους που γίνεται η προσομοίωση. Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο που διαθέτει πολλά διαφορετικά μετεωρολογικά δεδομένα για όλη την Γη είναι το PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Το PVGIS είναι ένα εξειδικευμένο διαδικτυακό εργαλείο που έχει αναπτυχθεί από το Ευρωπαϊκό Κοινό Κέντρο Ερευνών (European Commission's Joint Research Centre) για την ανάλυση της ηλιακής ενέργειας και τη συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων. Το PVGIS παρέχει πολύτιμες πληροφορίες και δεδομένα για την απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, καθιστώντας το ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία για την πρόβλεψη και τον σχεδιασμό ηλιακών εγκαταστάσεων[19].

Λειτουργία και Δυνατότητες του PVGIS

Το PVGIS χρησιμοποιείται κυρίως για τον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα, αλλά προσφέρει και άλλες κρίσιμες πληροφορίες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι καιρικές συνθήκες και τα δεδομένα θερμοκρασίας για συγκεκριμένες τοποθεσίες. Οι βασικές λειτουργίες του εργαλείου περιλαμβάνουν:

1. **Πρόβλεψη Παραγωγής Ενέργειας:** Το PVGIS επιτρέπει στον χρήστη να υπολογίσει την προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Αυτό γίνεται βάσει ιστορικών δεδομένων ακτινοβολίας και μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και οι ηλιακές ώρες. Οι χρήστες εισάγουν παραμέτρους όπως η ισχύς του συστήματος (kWp), ο προσανατολισμός και η κλίση των πάνελ, και το PVGIS παρέχει εκτιμήσεις της μηνιαίας και ετήσιας παραγωγής ενέργειας.
2. **Συλλογή Μετεωρολογικών Δεδομένων:** Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του PVGIS είναι η δυνατότητά του να αντλεί μετεωρολογικά δεδομένα από διαφορετικές πηγές, όπως τα δορυφορικά δεδομένα, οι επίγειες μετρήσεις και οι κλιματικοί χάρτες. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία αέρα και τα ποσοστά νεφοκάλυψης.
3. **Δημιουργία Χαρτών Ηλιακής Ακτινοβολίας:** Το PVGIS προσφέρει χαρτογραφικές απεικονίσεις της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε γεωγραφική περιοχή. Αυτοί οι χάρτες χρησιμοποιούνται για να παρέχουν οπτική αναπαράσταση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να εκμεταλλευτεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Οι χάρτες αυτοί είναι

χρήσιμοι για τη σύγκριση διαφορετικών περιοχών όσον αφορά τις ενεργειακές δυνατότητες.

4. **Αξιολόγηση Διαφορετικών Τεχνολογιών Φωτοβολταϊκών:** Το PVGIS επιτρέπει επίσης την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών φωτοβολταϊκών πάνελ (π.χ., μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, thin-film). Μέσω του PVGIS, οι χρήστες μπορούν να υπολογίσουν την παραγωγή ενέργειας με βάση τα χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας και τις ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης.
5. **Ανάλυση Μετεωρολογικών Κινδύνων και Ευκαιριών:** Το PVGIS προσφέρει στους χρήστες τη δυνατότητα να αναλύσουν τους μετεωρολογικούς κινδύνους που μπορεί να επηρεάσουν την παραγωγή ενέργειας, όπως οι περίοδοι έντονης νεφοκάλυψης ή οι ακραίες θερμοκρασίες. Παράλληλα, επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών με υψηλό ηλιακό δυναμικό που θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν για βελτιστοποιημένες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σταθμών.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιεί το PVGIS προέρχονται από αξιόπιστες βάσεις δεδομένων, όπως το **CM SAF (Climate Monitoring Satellite Application Facility)** και το **SARA (Solar Atlas for Africa)**. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν:

- **Ηλιακή Ακτινοβολία:** Οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχονται από δορυφορικές εικόνες και επίγειες μετρήσεις παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις της συνολικής και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες τοποθεσίες, ανά τον κόσμο.
- **Θερμοκρασία Αέρα:** Τα δεδομένα θερμοκρασίας αέρα είναι κρίσιμα για την ακριβή εκτίμηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς η απόδοση των ηλιακών κυψελών επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Το PVGIS παρέχει ιστορικά δεδομένα θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της απόδοσης.
- **Νεφοκάλυψη:** Τα δεδομένα νεφοκάλυψης επηρεάζουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για την εκτίμηση της πραγματικής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

Εφαρμογές του PVGIS στη Βιομηχανία και την Έρευνα

Το PVGIS χρησιμοποιείται ευρέως τόσο από επαγγελματίες της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών όσο και από ερευνητές για την ανάλυση και τον σχεδιασμό έργων ηλιακής ενέργειας. Στη βιομηχανία, οι πληροφορίες του PVGIS βοηθούν τους σχεδιαστές και τους επενδυτές να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την τοποθεσία και τις τεχνικές προδιαγραφές των φωτοβολταϊκών πάρκων. Στην ερευνητική κοινότητα, το εργαλείο χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ενεργειακής απόδοσης σε διαφορετικά κλίματα και γεωγραφικά πλάτη.

5.2: PVsyst

PVsyst: Ένα Ολοκληρωμένο Λογισμικό Σχεδιασμού και Προσομοίωσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Το **PVsyst** είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων για τον σχεδιασμό, την προσομοίωση και την αξιολόγηση της απόδοσης φωτοβολταϊκών έργων. Το λογισμικό παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για τη μοντελοποίηση ΦΒ εγκαταστάσεων, επιτρέποντας στους μηχανικούς και τους ερευνητές να εκτελούν λεπτομερείς αναλύσεις της ενεργειακής παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι κλιματικές συνθήκες, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και η γεωμετρία της εγκατάστασης.
Αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Γενεύης και χρησιμοποιείται τόσο για μικρής κλίμακας έργα (οικιακά ή βιομηχανικά) όσο και για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα. Το PVsyst έχει καθιερωθεί ως βασικό εργαλείο στην ακριβή πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας, συμβάλλοντας στον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και την οικονομική αξιολόγηση των ΦΒ συστημάτων.

5.2.1: Κύριες Δυνατότητες και Λειτουργίες του PVsyst

Το PVsyst προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων, επιτρέποντας την ανάλυση και τη διαχείριση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι βασικές λειτουργίες του λογισμικού περιλαμβάνουν:

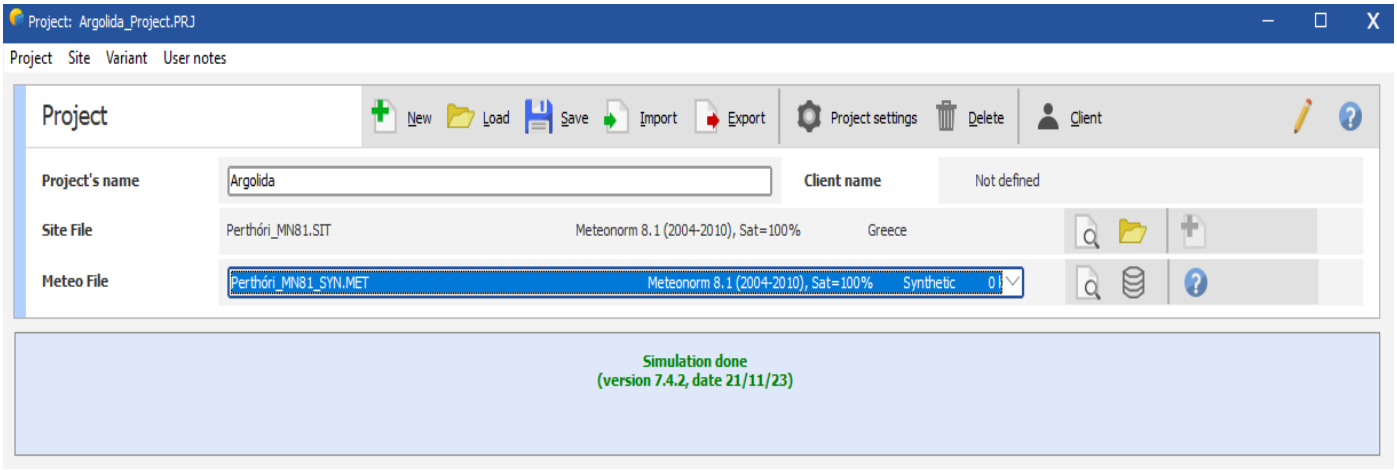
1. **Προσομοίωση και Ανάλυση Παραγωγής Ενέργειας:** Το PVsyst παρέχει λεπτομερή προσομοίωση της ενεργειακής παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε διάφορες συνθήκες. Μέσω της προσομοίωσης, οι χρήστες μπορούν να υπολογίσουν την ετήσια, μηνιαία ή ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η κλίση των πάνελ, ο προσανατολισμός τους και τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας.
2. **Διαχείριση Μετεωρολογικών Δεδομένων:** Το PVsyst ενσωματώνει μετεωρολογικά δεδομένα από παγκόσμιες βάσεις δεδομένων, όπως το **Meteonorm** και το **NASA-SSE**, επιτρέποντας στους χρήστες να αναλύουν τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και τις κλιματικές συνθήκες για οποιαδήποτε τοποθεσία παγκοσμίως. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τη συνολική και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία αέρα, την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία.
3. **Σχεδιασμός Συστήματος και Επιλογή Εξοπλισμού:** Το λογισμικό παρέχει εργαλεία για την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού (φωτοβολταϊκά πάνελ, inverters, καλώδια, συστήματα στήριξης κ.λπ.) και τη διάταξή τους στο πεδίο. Ο χρήστης μπορεί να προσομοιώσει την απόδοση διαφορετικών τύπων πάνελ και inverters και να εκτιμήσει την ενεργειακή παραγωγή για διάφορες διατάξεις και τεχνολογίες. Επίσης, το PVsyst παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού φωτοβολταϊκών πάρκων με σταθερά πάνελ ή συστήματα παρακολούθησης της κίνησης του ήλιου (trackers).

4. **Ανάλυση Σκιών και Απωλειών:** Η ανάλυση σκιών είναι ένα από τα ισχυρότερα χαρακτηριστικά του PVsyst, επιτρέποντας στους χρήστες να μοντελοποιήσουν τις επιπτώσεις των σκιών από κτίρια, δέντρα ή άλλες εγκαταστάσεις στη συνολική παραγωγή ενέργειας. Το λογισμικό λαμβάνει υπόψη τις απώλειες από μερικές σκιές (partial shading) και άλλες απώλειες από τον εξοπλισμό, την καλωδίωση και τη θερμοκρασία, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του συστήματος.
5. **Οικονομική Ανάλυση και Αξιολόγηση Βιωσιμότητας:** Εκτός από την τεχνική ανάλυση, το PVsyst προσφέρει εργαλεία για την εκτίμηση του κόστους του έργου, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού κόστους εγκατάστασης, των λειτουργικών εξόδων και της συντήρησης. Η οικονομική ανάλυση βοηθά τους επενδυτές και τους σχεδιαστές να αξιολογήσουν τη βιωσιμότητα ενός έργου και τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας.
6. **Αξιολόγηση Ενεργειακών Απωλειών:** Το PVsyst επιτρέπει την προσομοίωση και την ανάλυση διαφόρων ειδών ενεργειακών απωλειών, όπως οι απώλειες μετασχηματισμού, οι απώλειες λόγω σκιάσεων, οι θερμοκρασιακές απώλειες, καθώς και οι απώλειες από τη διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τη βοήθεια αυτής της ανάλυσης, οι μηχανικοί μπορούν να εντοπίσουν τα σημεία στα οποία υπάρχει ανάγκη για βελτιώσεις και να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες ενέργειας.
7. **Επικύρωση και Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού:** Το PVsyst παρέχει εργαλεία για την επικύρωση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των ΦΒ συστημάτων. Μέσα από προσομοιώσεις, οι χρήστες μπορούν να δοκιμάσουν διαφορετικές διατάξεις και τεχνολογίες, προσαρμόζοντας παραμέτρους όπως η κλίση των πάνελ, η επιλογή του inverter ή οι συνδέσεις των συστοιχιών. Το λογισμικό προσφέρει γραφήματα και αναφορές που βοηθούν στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του έργου.

5.2.2: Προσομοίωση πάρκων στο PVsyst

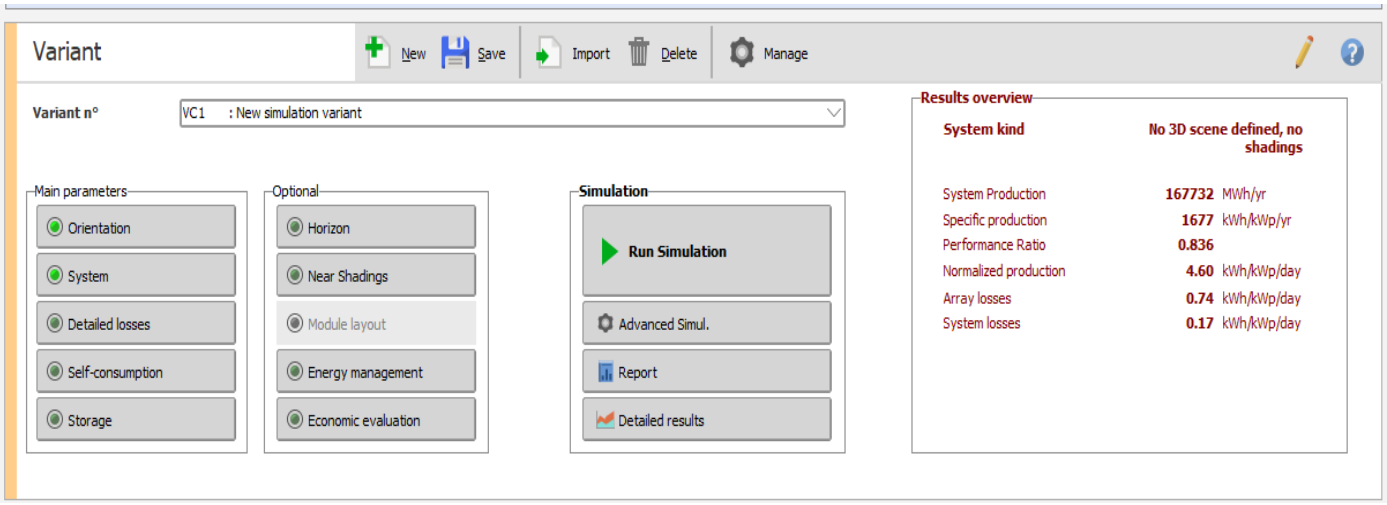
Το PVsyst αποτελεί εμπορικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση φωτοβολταϊκών πάρκων.

Στο PVsyst αρχικά, εισάγονται τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής που θα γίνει η εγκατάσταση του ΦΒ πάρκου και έτσι δημιουργείται ένα “Project”, το οποίο αποθηκεύεται.



Εικόνα 10. Δημιουργία Project στο PVsyst.

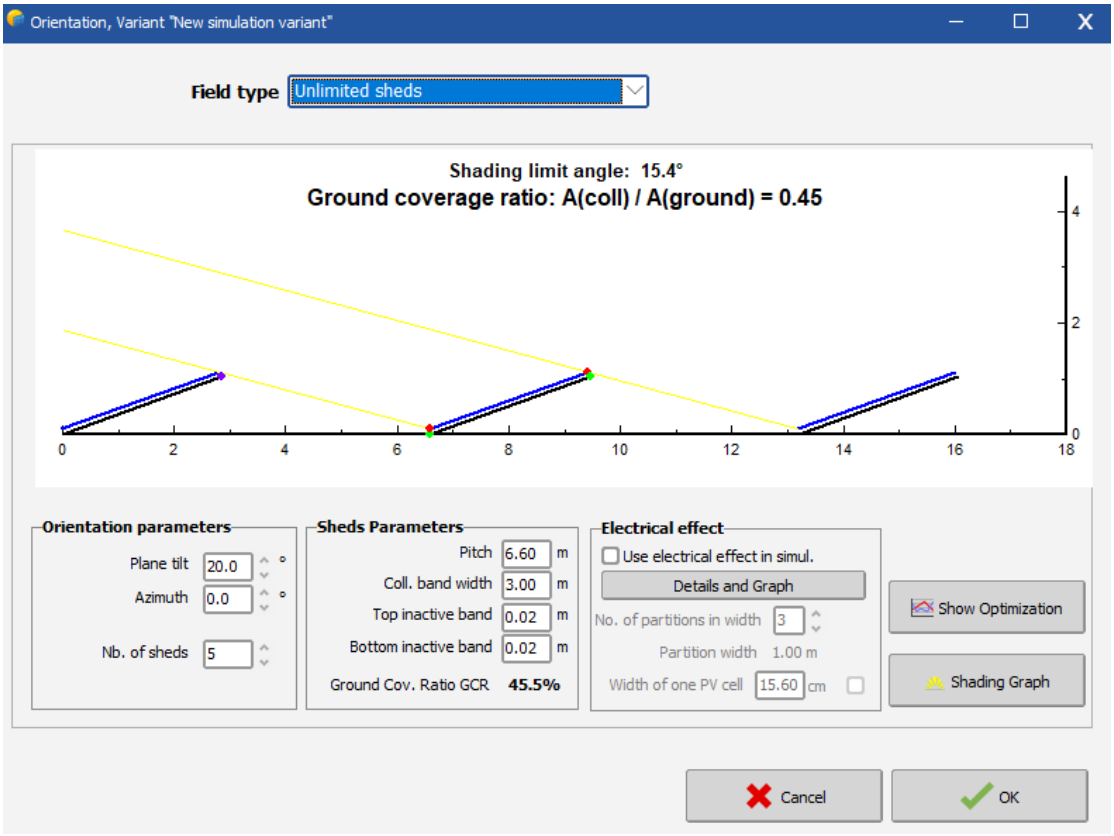
Έχοντας αποθηκευτεί το Project με τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής εγκατάστασης, τα επόμενα απαραίτητα βήματα για να μπορεί να γίνει η προσομοίωση του πάρκου, είναι η συμπλήρωση της πληροφορίας της κλίσεως των πάνελ και τι είδος είναι και το επόμενο βήμα είναι η συμπλήρωση της ονομαστικής ισχύος του πάρκου και ποια πάνελ και inverters θα χρησιμοποιηθούν. Το PVsyst δίνει την επιλογή να γίνουν διάφορες παραλλαγές στο Project, δηλαδή έχοντας ως βάση την περιοχή και τα αντίστοιχα μετεωρολογικά δεδομένα, κάθε παραλλαγή να έχει διαφορετικά πάνελ, διαφορετική κλίση, διαφορετικούς inverters και ό,τι άλλο θέλει κάθε φορά ο χρήστης. Η Εικόνα 11 έχει δύο στήλες, τις βασικές παραμέτρους και τις προαιρετικές παραμέτρους που χρειάζεται να συμπληρωθούν.



Εικόνα 11. Παράμετροι που συμπληρώνονται κατά την προσομοίωση του ΦΒ πάρκου.

Πιο συγκεκριμένα, οι δύο βασικές στήλες, απ' τις βασικές παραμέτρους, που πρέπει να συμπληρωθούν, είναι η κλίση που θα έχουν τα πάνελ και το σύστημα του πάρκου, δηλαδή τα είδη των πάνελ (τεχνολογία, ισχύς, κτλ.) και οι inverters που θα χρησιμοποιηθούν.

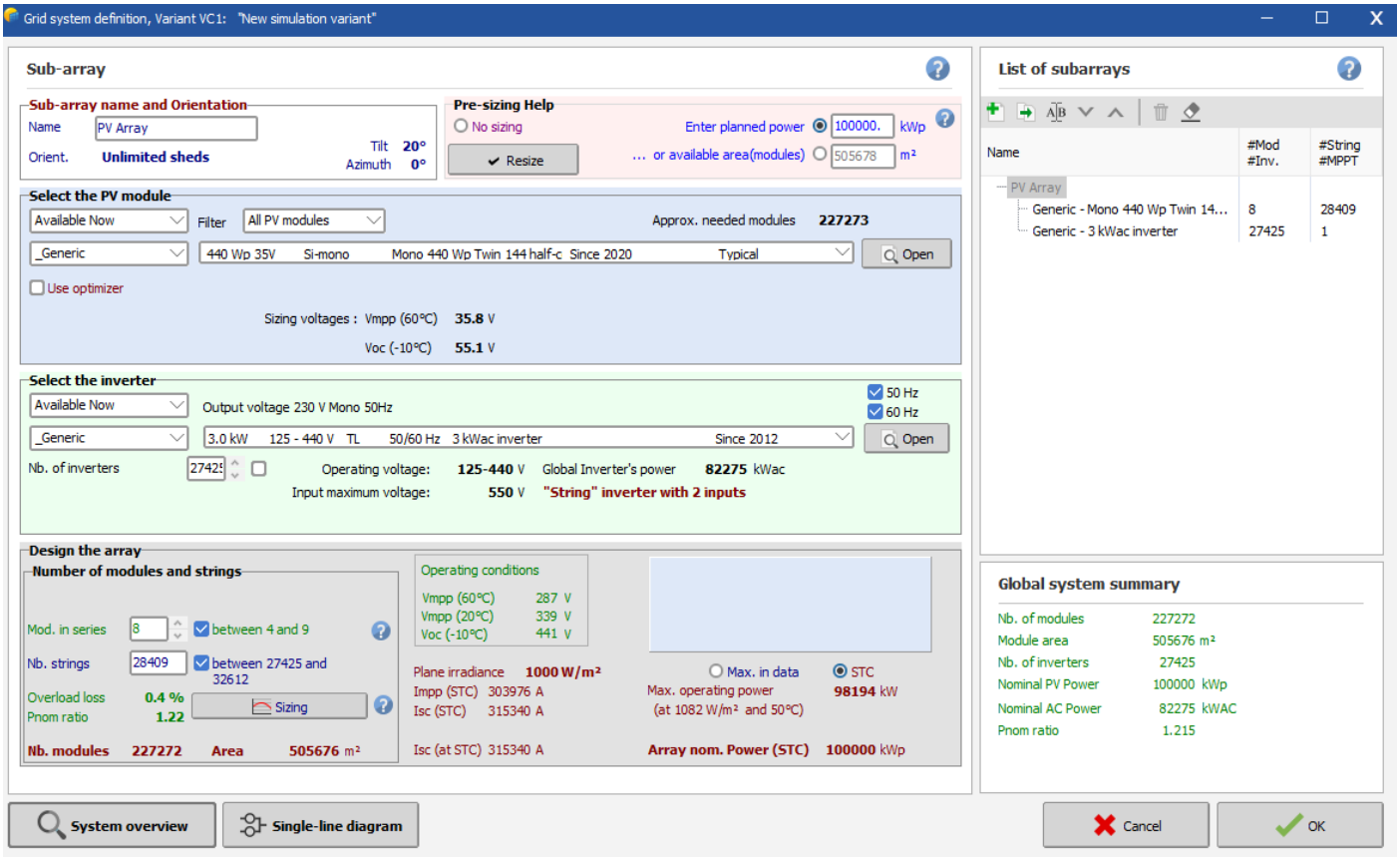
Όταν αυτές οι βασικές παράμετροι συμπληρωθούν τότε είναι εφικτή η προσομοίωση του πάρκου.



Εικόνα 12. Παράμετρος, κλίση των πάνελ.

Το PVsyst έχει προεπιλεγμένες κάποιες μεταβλητές που αφορούν χαρακτηριστικά της τοποθέτησης των πάνελ, όπως απόσταση από το έδαφος, απόσταση μεταξύ τους κ.ά. Τα δεδομένα που εισάγονται, στην παρούσα διπλωματική, αφορούν την κλίση των πάνελ και τον προσανατολισμό τους, δηλαδή την αζιμουθιακή γωνία. Τα υπόλοιπα αφήνονται ως έχουν.

Στην συνέχεια, η δεύτερη παράμετρος που πρέπει να συμπληρωθεί, έχει τίτλο «Σύστημα» και όπως φαίνεται και απ' την Εικόνα 13**,** απαιτείται να συμπληρωθεί η ονομαστική ισχύς του πάρκου. Τότε, το PVsyst προτείνει ενδεικτικά τι είδους πάνελ και τι είδους inverters μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πόσες σειρές και πόσες συστοιχίες θα αποτελούν το πάρκο. Στην παρούσα εργασία, επειδή δεν είναι το αντικείμενο μελέτης η τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί αλλά η χρονοσειρά παραγωγής που δίνει το υπό προσομοίωση πάρκο, κρατούνται οι τιμές που προτείνει το PVsyst με τον έλεγχο ότι οι inverters έχουν την απαιτούμενη ισχύ για να «δέχονται» μέχρι και την μέγιστη παραγωγή του πάρκου, να μην είναι ούτε υπό- ούτε υπερ-διαστασιολογημένοι.



Εικόνα 13. Παράμετρος, σύστημα του πάρκου.

Έχοντας συμπληρώσει σωστά τις ανωτέρω βασικές παραμέτρους, πλέον μπορεί να τρέξει η προσομοίωση και να δώσει το PVsyst πλήθος αποτελεσμάτων/ πληροφοριών για το πάρκο.

Με αυτόν τον τρόπο εξάγεται και η ζητούμενη χρονοσειρά παραγωγής η οποία θα χρησιμοποιηθεί και θα επεξεργαστεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την συσχέτιση διαφορετικών ειδών πάρκων μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 6: Μεθοδολογία

6.1: Πρώτες προσομοιώσεις ΦΒ σταθμών στο PVsyst

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το PVsyst έχει πάρα πολλές δυνατότητες και επιλογές για την προσομοίωση ΦΒ σταθμών καθώς μπορούν να εισαχθούν μετεωρολογικά δεδομένα από τις βιβλιοθήκες που διαθέτει, από άλλες ιστοσελίδες (π.χ. PVGIS) αλλά και χειροκίνητα. Ακόμα, υπάρχει πληθώρα επιλογών στα πάνελ και τους inverters που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση, στον τρόπο που θα τοποθετηθούν κ.ά..

Η προσομοίωση, σε πρώτο στάδιο, αφορούσε ΦΒ σταθμούς με πάνελ μονής όψης (monofacial) και με πάνελ διπλής όψης (bifacial) και ονομαστικής ισχύος 100MW.

6.1.1: Monofacial πάρκα

Αρχικά, προσομοιώθηκαν Φωτοβολταϊκά Πάρκα, τα οποία είχαν πάνελ μονής όψης (monofacial). Η βάση των πάνελ είναι ακίνητη. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση, αντλήθηκαν από το PVGIS για την μετεωρολογική χρονιά 2016 και για τα δύο πάρκα. Το πρώτο πάρκο είχε κλίση στα πάνελ 30° και το δεύτερο πάρκο 20°. Η ονομαστική ισχύς του κάθε πάρκου είναι 100MW. Η παραγωγή στην διάρκεια του έτους που προκύπτει ύστερα από την προσομοίωση ακολουθεί στον επόμενο πίνακα.

Specific Production	1451 kWh/kWp/year	1460 kWh/kWp/year
Performance Ratio (PR)	84.6%	83.7%
Μετεωρολογικά Δεδομένα	PVGIS	PVGIS
Κλίση Πάνελ	20°	30°

Τα πρώτα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις δύο παραπάνω προσομοιώσεις είναι, ότι η κλίση των πάνελ όταν είναι 20° είναι λιγότερο αποδοτική από εκείνη των 30° και αποδεικνύεται από τις τιμές του Specific Production.

6.1.2: Bifacial πάρκα

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκαν Φωτοβολταϊκά Πάρκα, τα οποία είχαν πάνελ διπλής όψης (Bifacial). Η βάση των πάνελ είναι ακίνητη. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση των πάρκων, αντλήθηκαν από το PVGIS και αφορούσαν την μετεωρολογική χρονιά 2016. Η κλίση των πάνελ ήταν 20° με bifaciality factor=0.8 και 30° με bifaciality factor=0.8

για το 1ο και το 2ο πάρκο αντίστοιχα. Η εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς κάθε πάρκου είναι 100MW.

Specific Production	1578 kWh/kWp/year	1599 kWh/kWp/year
Performance Ratio (PR)	92%	91.6%
Μετεωρολογικά Δεδομένα	PVGIS	PVGIS
Κλίση Πάνελ	20ο	30ο
Bifaciality Factor	0.8	0.8

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ανωτέρω πίνακα, είναι εμφανές ότι τα bifacial πάνελ αποδίδουν περισσότερη παραγωγή από τα monofacial πάνελ, στις αντίστοιχες μοίρες κλίσης. Επιπλέον, και εδώ φαίνεται ότι η κλίση των πάνελ, όταν είναι 30ο είναι πιο αποδοτική στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ό,τι η κλίση των 20ο .

Ωστόσο, στα bifacial πάνελ λαμβάνεται υπόψη και άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα συγκεκριμένα πάνελ και είναι ο ακόλουθος, ο bifaciality factor.

Ο **bifaciality factor** είναι ένας σημαντικός δείκτης για τη μέτρηση της αποδοτικότητας των **διπλής όψης (bifacial)** φωτοβολταϊκών (ΦΒ) πάνελ, τα οποία είναι σε θέση να συλλέγουν ηλιακή ακτινοβολία τόσο από την εμπρόσθια όσο και από την οπίσθια πλευρά τους. Ο δείκτης αυτός προσδιορίζει τον λόγο της απόδοσης της οπίσθιας πλευράς σε σχέση με την εμπρόσθια πλευρά του πάνελ και εκφράζεται ως ποσοστό[20].

Ο ορισμός του bifaciality factor δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$BifacialityFactor(\%) = \frac{\mathrm{Re}\,ar_Side_Efficiency}{Front_Side_Efficiency} \times 100$$

Όπου:

- **Rear Side Efficiency** είναι η αποδοτικότητα της οπίσθιας πλευράς,
- **Front Side Efficiency** είναι η αποδοτικότητα της εμπρόσθιας πλευράς.

Η τιμή του bifaciality factor επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις δύο πλευρές του ΦΒ πάνελ και η τεχνολογία κατασκευής του. Τα πάνελ που κατασκευάζονται με υψηλής ποιότητας υλικά και συμμετρική δομή μπορούν να επιτύχουν υψηλότερο bifaciality factor[21].

Ενδεικτικές Τιμές Bifaciality Factor

Οι τιμές του bifaciality factor εξαρτώνται από την τεχνολογία των ΦΒ κυττάρων. Συνήθως, οι ενδεικτικές τιμές για τα εμπορικά διαθέσιμα bifacial πάνελ είναι οι εξής:

- **Μονοκρυσταλλικά πυριτικά κύτταρα (monocrystalline silicon cells)**: Ο bifaciality factor κυμαίνεται από **70% έως 90%**, με τα πιο αποδοτικά πάνελ να πλησιάζουν την ανώτερη τιμή.

- **Πολυκρυσταλλικά πυριτικά κύτταρα (polycrystalline silicon cells)**: Ο δείκτης για αυτά τα πάνελ είναι συνήθως χαμηλότερος, και κυμαίνεται από **60% έως 80%**.
- **Λιγότερο αποδοτικά υλικά** μπορεί να έχουν ακόμη μικρότερες τιμές, κάτω από το **60%**.

Η σημασία του bifaciality factor έγκειται στο γεγονός ότι υψηλότερη τιμή αυτού του δείκτη συνεπάγεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της οπίσθιας ακτινοβολίας, οδηγώντας σε αυξημένη ενεργειακή απόδοση του ΦΒ συστήματος συνολικά, ειδικά σε περιοχές με κατάλληλες συνθήκες ανάκλασης (π.χ. εγκαταστάσεις σε λευκές επιφάνειες ή περιοχές με χιόνι)[22].

Με βάση τα ανωτέρω, έγινε μια ακόμα προσομοίωση πάρκου με πάνελ διπλής όψης και κλίση των πάνελ στις 30°, όπως και προηγουμένως, με την διαφορά ότι ο bifaciality factor τώρα ισούται με 0.7. τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

Specific Production	1599 kWh/kWp/year	1584 kWh/kWp/year
Performance Ratio (PR)	91.6%	90.8%
Μετεωρολογικά Δεδομένα	PVGIS	PVGIS
Κλίση Πάνελ	30°	30°
Bifaciality Factor	0.8	0.7

Όταν ο bifaciality factor μειωθεί σε 0.7 από 0.8 τότε η παραγωγή του πάρκου μειώνεται λίγο, το οποίο φαίνεται λογικό, αφού αυτό σημαίνει ότι μειώνεται η αποδοτικότητα της οπίσθιας πλευράς, έστω και κατά 0.1.

6.2: Προσομοίωση διαφορετικής τεχνολογίας ΦΒ σταθμών

Οι παραπάνω προσομοιώσεις είναι η πρώτη επαφή με το πρόγραμμα του PVsyst και πως αυτό χρησιμοποιείται για την υλοποίηση φωτοβολταϊκών πάρκων σύμφωνα με τις ανάγκες και απαιτήσεις που έχει ο χρήστης. Σκοπός είναι η προσομοίωση διαφόρων ειδών πάρκων, δηλαδή, τόσο με διαφορετική τεχνολογία των πάνελ (monofacial ή bifacial) όσο και με διαφορετικό τρόπο στήριξης αυτών (σταθερή βάση, κίνηση με tracker μονού ή διπλού άξονα). Σ' αυτή την ενότητα, αναπτύσσεται και εξηγείται η διαδικασία κατά την οποία προσομοιώθηκαν στο PVsyst ΦΒ σταθμοί ισχύος 100 MW έκαστος, χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα από το PVGIS και είναι τοποθετημένοι στην περιοχή της Τρίπολης. Οι Φωτοβολταϊκοί σταθμοί που προσομοιώθηκαν είναι των εξής διαφορετικών τεχνολογιών:

- Monofacial πάνελ, νότιος προσανατολισμός.
- Monofacial πάνελ, μισά πάνελ με δυτικό προσανατολισμό και τα υπόλοιπα με ανατολικό προσανατολισμό.
- Bifacial πάνελ, νότιος προσανατολισμός.
- Bifacial πάνελ, δυτικός προσανατολισμός.
- Bifacial πάνελ, ανατολικός προσανατολισμός.
- Monofacial πάνελ με tracker μονού άξονα.
- Monofacial πάνελ με tracker διπλού άξονα.

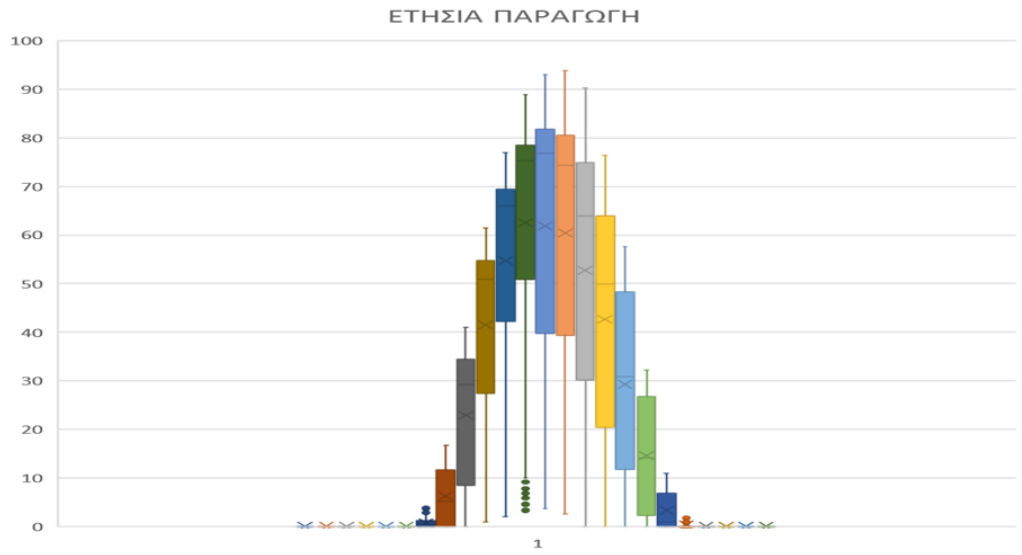
6.2.1: Monofacial πάνελ, νότιος προσανατολισμός

Πρώτος ΦΒ σταθμός που προσομοιώθηκε είναι η πιο απλή και συνηθισμένη περίπτωση. Τα πάνελ είναι μονής όψης και η κλίση τους σταθερή και ίση με 30°. ο προσανατολισμός των πάνελ είναι νότιος, δηλαδή αζιμούθιο=0. Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν από το PVGIS για την ιστορική χρονιά 2019. Η προσομοίωση έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα και την αντίστοιχη χρονοσειρά ωριαίας παραγωγής στην διάρκεια ενός έτους.

Specific Production	1656 kWh/kWp/year
Normalized Production	4.54 kWh/kWp/day
Perfomance Ratio	84.4 %

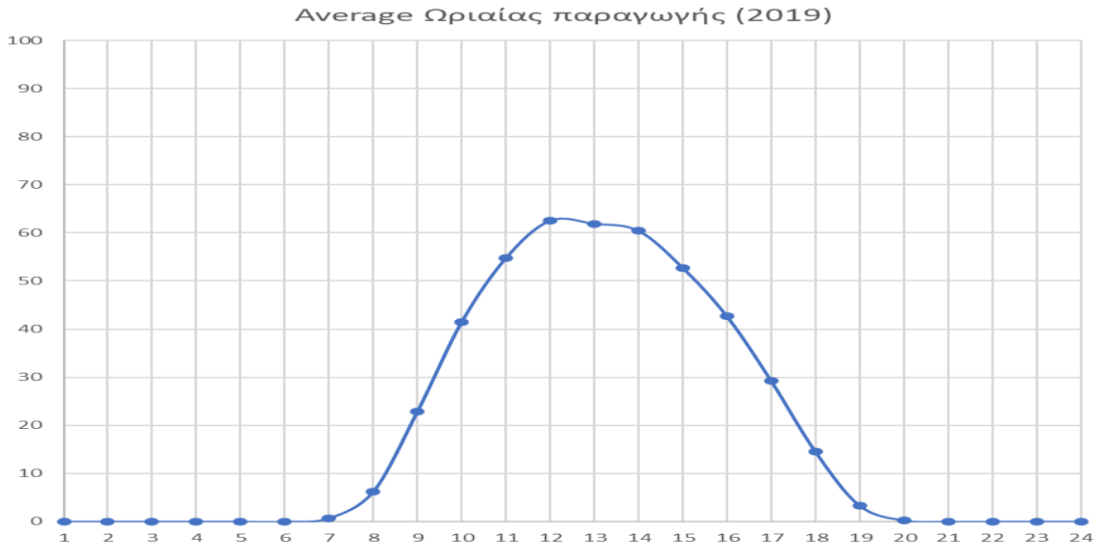
Η χρονοσειρά παραγωγής που εξάγει το PVsyst είναι πολύ σημαντική, καθώς είναι το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και με την κατάλληλη επεξεργασία εξάγονται συμπεράσματα για την αποδοτικότητα του ΦΒ σταθμού που προσομοιώθηκε.

Η χρονοσειρά που λαμβάνεται από το PVsyst, δίνει την παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα στην διάρκεια ενός έτους. Δηλαδή, για κάθε μια από τις 8760 ώρες του έτους δίνεται η αντίστοιχη πληροφορία παραγωγής του πάρκου.



Σχήμα 1. Ημερήσια παραγωγή με εύρος στη διάρκεια του έτους.

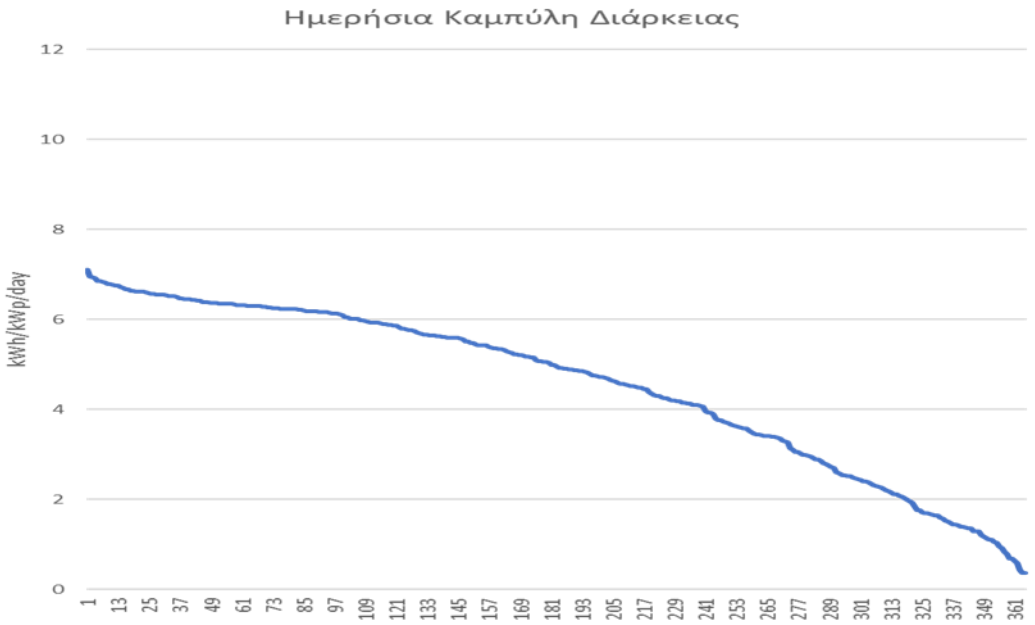
Παρατηρείται, στο Σχήμα 1 ότι η ημερήσια παραγωγή για κάθε ώρα της ημέρας, στην διάρκεια του έτους, παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Ειδικότερα, τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες, το εύρος παραγωγής του πάρκου είναι μεγάλο. Αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, με κυριότερους την ηλιοφάνεια/συννεφιά κατά τη διάρκεια της χρονιάς, η διάρκεια της ημέρας που αλλάζει όπως αντίστοιχα και το ύψος του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Δεδομένου ότι η κλίση των πάνελ είναι μη μεταβλητή, είναι λογικό να υπάρχει μεγάλο εύρος στην ετήσια παραγωγή. Το ακόλουθο σχήμα, δείχνει τον μέσο όρο ωριαίας παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου, στην διάρκεια του έτους.



Σχήμα 2. Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2, κατά μέσο όρο, η μέγιστη παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι περίπου 65 MW στις 12 μεσημέρι. Η παραγωγή του ξεκινά, αρκετά χαμηλή στις 8 το πρωί, και αυξάνει σημαντικά από ώρα σε ώρα. Το πάρκο παράγει

ουσιαστικά μέχρι περίπου τις 6 το απόγευμα μια μικρή ποσότητα ισχύος. Όπως έχει αναφερθεί, το πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 100MW.



Σχήμα 3. Ημερήσια Καμπύλη Διάρκειας.

Η κανονικοποιημένη παραγωγή (normalized production), είναι 4.54 kWh/kWp/day, δηλαδή για κάθε εγκατεστημένο kWp του πάρκου, παράγονται κατά μέσο όρο στη διάρκεια μιας ημέρας, 4.54 kWh. Στο Σχήμα 3 έχει υπολογιστεί η κανονικοποιημένη παραγωγή για κάθε μία μέρα του έτους. Η μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή ισούται με 7 kWh/kWp/day.

Σχήμα 4. Ωριαία καμπύλη διάρκειας.

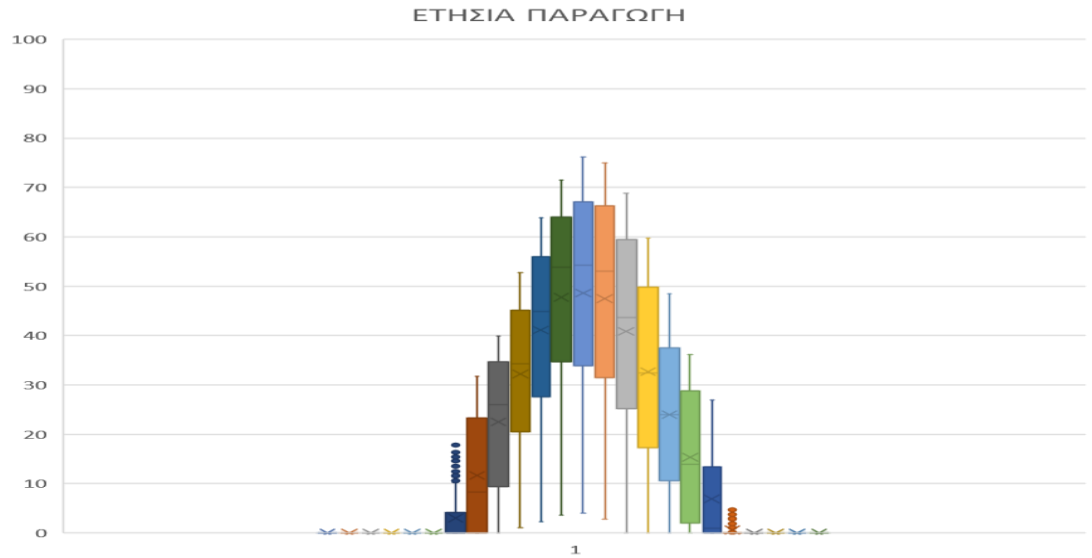
Αντίστοιχα με την ημερήσια καμπύλη διάρκειας, υπολογίζεται η ωριαία καμπύλη διάρκειας. Το Σχήμα 4 αποτυπώνει πόση ήταν η παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα του έτους, με ταξινομημένη την παραγωγή σε φθίνουσα σειρά.

6.2.2: Monofacial πάνελ, μισά πάνελ με δυτικό προσανατολισμό και τα υπόλοιπα με ανατολικό προσανατολισμό

Δεύτερος ΦΒ σταθμός που προσομοιώθηκε, είναι με τα πάνελ να είναι μονής όψης και η κλίση τους σταθερή και ίση με 30°. Ο προσανατολισμός τους είναι τέτοιος ώστε τα μισά να «κοιτούν» την ανατολή (αζιμούθιο=-90°) και τα υπόλοιπα μισά την δύση (αζιμούθιο=+90°). Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν από το PVGIS για την ιστορική χρονιά 2019. Η προσομοίωση έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα και την αντίστοιχη χρονοσειρά ωριαίας παραγωγής στην διάρκεια ενός έτους.

Specific Production	**1366 kWh/kWp/year**
Normalized Production	**3.74 kWh/kWp/day**
Perfomance Ratio	**83.8 %**

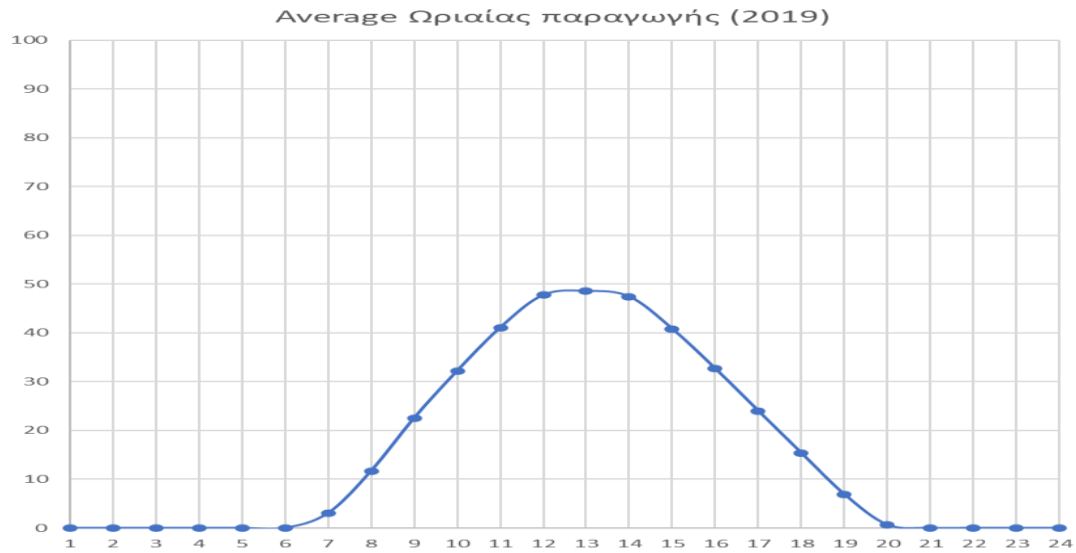
Η χρονοσειρά που λαμβάνεται από το PVsyst, δίνει την παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα στην διάρκεια ενός έτους. Δηλαδή, για κάθε μια από τις 8760 ώρες του έτους δίνεται η αντίστοιχη πληροφορία παραγωγής του πάρκου.



Σχήμα 5. Ημερήσια παραγωγή με εύρος στη διάρκεια του έτους.

Παρατηρείται, στο Σχήμα 5 ότι η ημερήσια παραγωγή για κάθε ώρα της ημέρας, στην διάρκεια του έτους, παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση για όλες τις ώρες της ημέρας. Δεδομένου ότι τα πάνελ είναι προσανατολισμένα κατά το ήμισυ σε ανατολή και δύση, επιτυγχάνεται παρόμοια παραγωγή τόσο τις πρωινές όσο και τις μεσημεριανές ώρες. Ωστόσο, ακριβώς επειδή δεν είναι προσανατολισμένα στον νότο και άρα το μεσημέρι που ο ήλιος μεσουρανεί, δεν προσπίπτουν πάνω

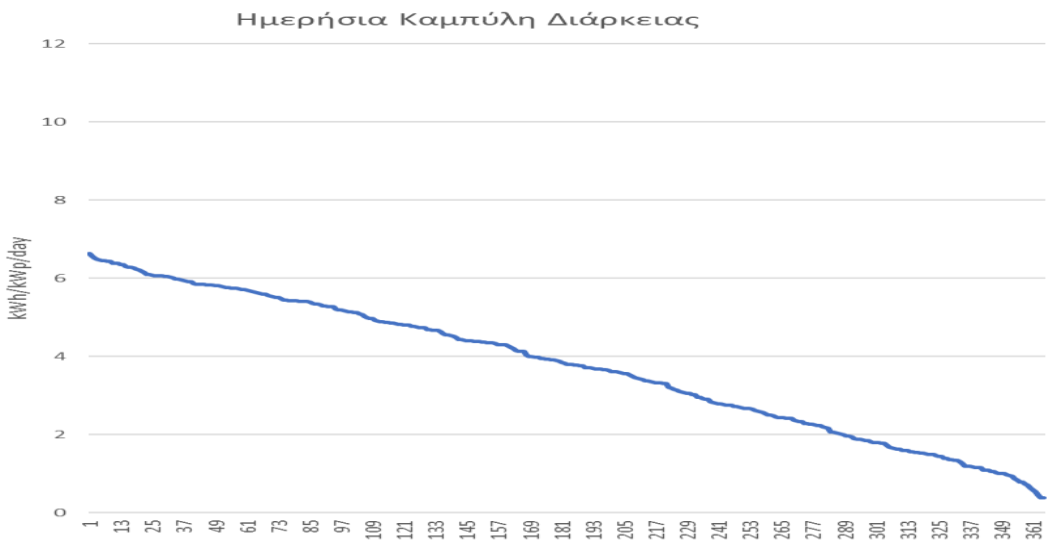
στα πάνελ κάθετες οι ακτίνες, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η παραγωγή τις μεσημεριανές ώρες να είναι χαμηλή. Επιπλέον, η διάρκεια της ημέρας και οι αλλαγές στην κίνηση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα, κατά την διάρκεια του έτους, επηρεάζουν πιο πολύ την παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου για την περίπτωση που είναι προσανατολισμένα ανατολή και δύση τα πάνελ. Ακόμα, δεδομένου ότι η κλίση των πάνελ είναι μη μεταβλητή, είναι λογικό να υπάρχει μεγάλο εύρος στην ετήσια παραγωγή.
Το ακόλουθο σχήμα, δείχνει τον μέσο όρο ωριαίας παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου, στην διάρκεια του έτους.



Σχήμα 6. Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6, κατά μέσο όρο, η μέγιστη παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι περίπου 50 MW στις 12 μεσημέρι. Η παραγωγή του ξεκινά, αρκετά χαμηλή στις 8 το πρωί, και αυξάνει σταδιακά και σταθερά μέχρι και το μεσημέρι στις 12 όπου ύστερα, με τον ίδιο ρυθμό, αρχίζει να μειώνεται, μέχρι και τις 7 το απόγευμα περίπου. Όπως έχει αναφερθεί, το πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 100MW. Φαίνεται, ότι ο προσανατολισμός των πάνελ, δίνει σταθερή παραγωγή πρωινές και απογευματινές ώρες, αλλά δεν ευνοεί την επίτευξη υψηλής παραγωγής τα μεσημέρια.

Η τιμή του specific production, της κανονικοποιημένης παραγωγής του πάρκου στην διάρκεια του έτους, είναι μόλις 1366 kWh/kWp.



Σχήμα 7. Ημερήσια Καμπύλη Διάρκειας.

Η κανονικοποιημένη παραγωγή (normalized production), είναι 3.74 kWh/kWp/day, δηλαδή για κάθε εγκατεστημένο kWp του πάρκου, παράγονται κατά μέσο όρο στη διάρκεια μιας ημέρας, 3.74 kWh. Στο Σχήμα 7 έχει υπολογιστεί η κανονικοποιημένη παραγωγή για κάθε μία μέρα του έτους. Η μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή ισούται με 6.5 kWh/kWp/day. Παρατηρώντας το διάγραμμα, φαίνεται η ημερήσια παραγωγή να μειώνεται αρκετά γρήγορα και σχεδόν γραμμικά.

Σχήμα 8. Ωριαία Καμπύλη Διάρκειας

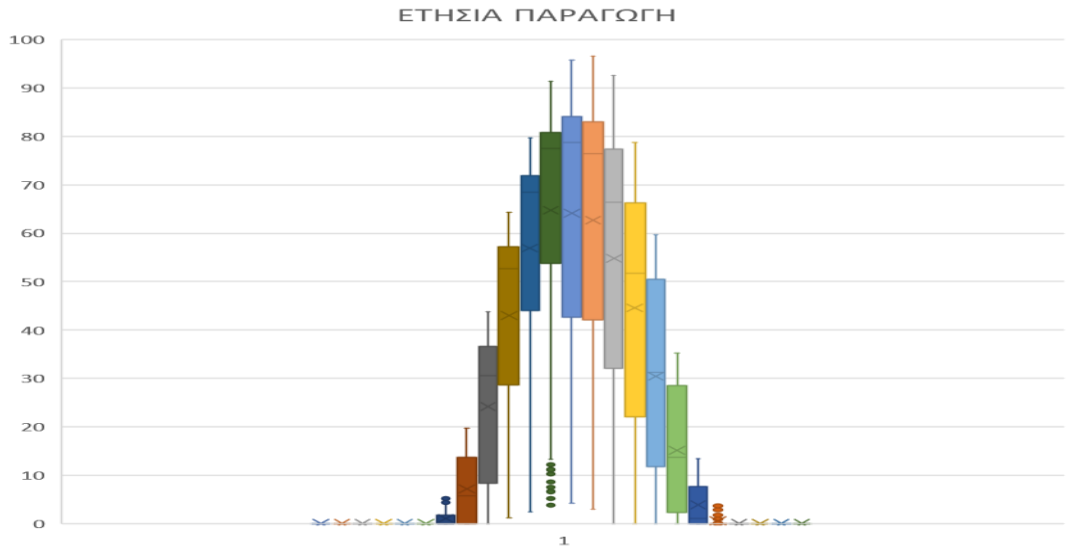
Αντίστοιχα με την ημερήσια καμπύλη διάρκειας, υπολογίζεται η ωριαία καμπύλη διάρκειας. Το Σχήμα 8 αποτυπώνει πόση ήταν η παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα του έτους, με ταξινομημένη την παραγωγή σε φθίνουσα σειρά. Επίσης η πτώση φαίνεται να γίνεται γρήγορα και με γραμμικό τρόπο.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των δύο ανωτέρω πάρκων, πιο αποδοτικό είναι εκείνο με τα monofacial πάνελ και τον νότιο προσανατολισμό.

6.2.3: Bifacial πάνελ, νότιος προσανατολισμός

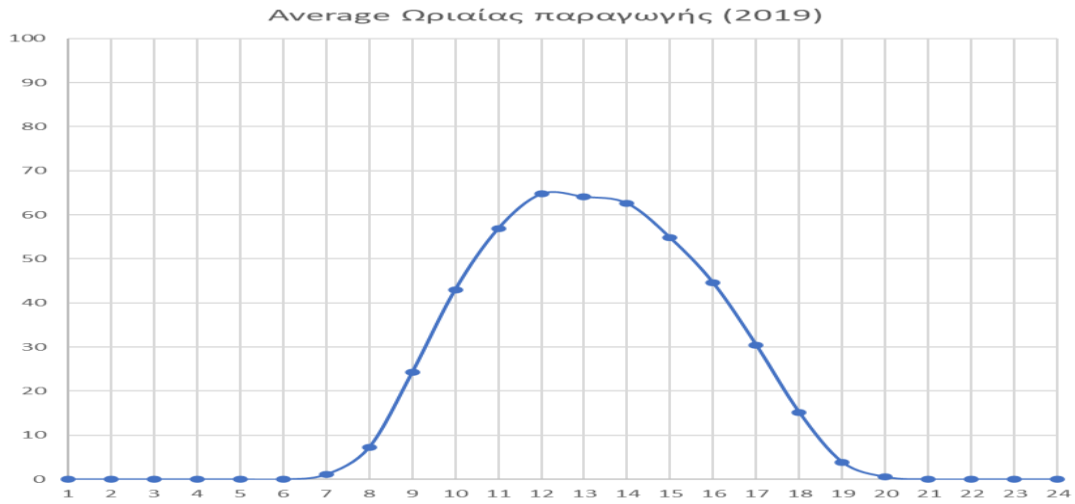
Ο τρίτος ΦΒ σταθμός που προσομοιώθηκε έχει πάνελ διπλής όψης (bifacial), η κλίση τους είναι σταθερή και ίση με 30° και ο προσανατολισμός τους είναι νότιος, δηλαδή αζιμούθιο=0. Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν από το PVGIS για την ιστορική χρονιά 2019. Η προσομοίωση έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα και την αντίστοιχη χρονοσειρά ωριαίας παραγωγής στην διάρκεια ενός έτους.

Specific Production	**1728 kWh/kWp/year**
Normalized Production	**4.74 kWh/kWp/day**
Perfomance Ratio	**88 %**
Bifaciality factor	**0.7**



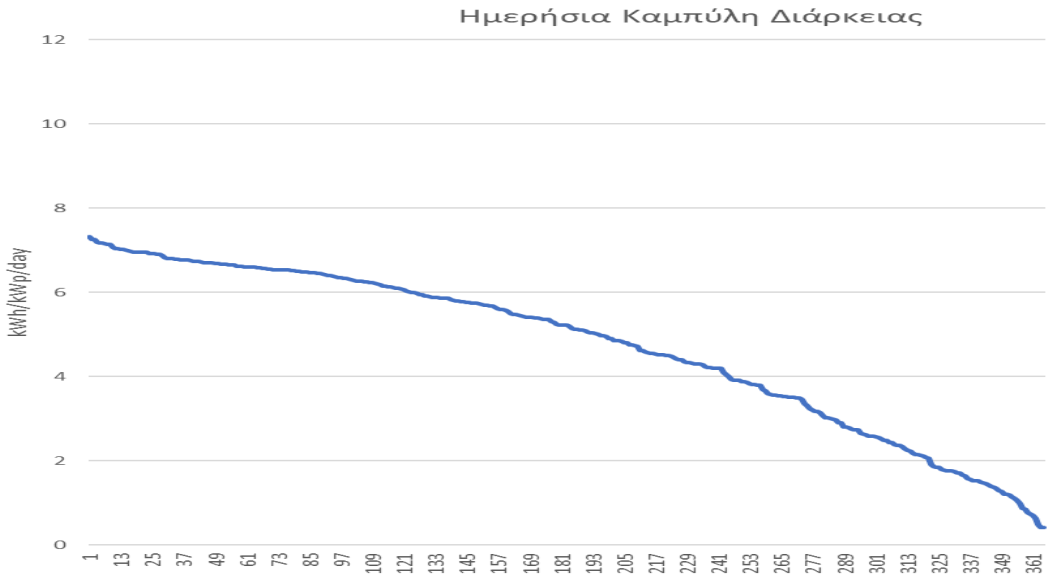
Σχήμα 9. Ημερήσια παραγωγή με εύρος στη διάρκεια του έτους.

Παρατηρείται, στο Σχήμα 9 ότι η ημερήσια παραγωγή για κάθε ώρα της ημέρας, στην διάρκεια του έτους, συγκριτικά με το αντίστοιχο πάρκο με μονής όψης πάνελ, έχει μεγαλύτερη παραγωγή και ιδιαίτερα τις ώρες που ηλιακή ακτινοβολία είναι λιγότερο έντονη, δηλαδή πρωινές και απογευματινές ώρες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα διπλής όψης πάνελ , έχουν την ικανότητα να απορροφούν το διάχυτο φως και το φως που ανακλάται από την επιφάνεια, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή τους. Δεδομένου ότι η κλίση των πάνελ είναι μη μεταβλητή, είναι λογικό να υπάρχει μεγάλο εύρος στην ετήσια παραγωγή. Το ακόλουθο σχήμα, δείχνει τον μέσο όρο ωριαίας παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου, στην διάρκεια του έτους.



Σχήμα 10. Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής.

Σύμφωνα με το Σχήμα 10, κατά μέσο όρο, η μέγιστη παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι περίπου 65 MW στις 12 μεσημέρι. Η παραγωγή του ξεκινά, αρκετά χαμηλή στις 8 το πρωί, και αυξάνει σημαντικά από ώρα σε ώρα. Το πάρκο παράγει ουσιαστικά μέχρι περίπου τις 6 το απόγευμα μια μικρή ποσότητα ισχύος. Όπως έχει αναφερθεί, το πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 100MW.



Σχήμα 11. Ημερήσια Καμπύλη Διάρκειας.

Η κανονικοποιημένη παραγωγή (normalized production), είναι 4.73 kWh/kWp/day, δηλαδή για κάθε εγκατεστημένο kWp του πάρκου, παράγονται κατά μέσο όρο στη διάρκεια μιας ημέρας, 4.73 kWh. Στο Σχήμα 11 έχει υπολογιστεί η κανονικοποιημένη παραγωγή για κάθε μία μέρα του έτους. Η μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή ισούται με περίπου 7.8 kWh/kWp/day και για 240

ημέρες τον χρόνο η παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι μεγαλύτερη από 4 kWh/kWp/day, τιμή που αναδεικνύει την αποδοτικότητα παραγωγής αυτού του είδους πάρκου.

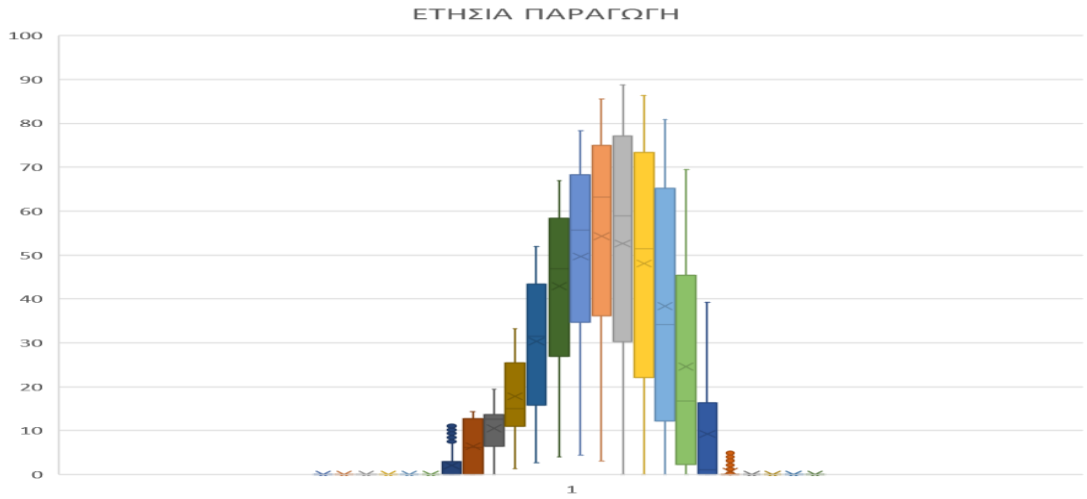
Σχήμα 12. Ωριαία Καμπύλη Διάρκειας.

Αντίστοιχα με την ημερήσια καμπύλη διάρκειας, υπολογίζεται η ωριαία καμπύλη διάρκειας. Το Σχήμα 12 αποτυπώνει πόση ήταν η παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα του έτους, με ταξινομημένη την παραγωγή σε φθίνουσα σειρά. Η κλίση της καμπύλης, είναι αρκετά απότομη, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο ότι η κλίση των πάνελ είναι σταθερή και άρα η παραγωγή λαμβάνει διάφορες τιμές έχοντας μεγάλη διακύμανση.

6.2.4: Bifacial πάνελ, δυτικός προσανατολισμός

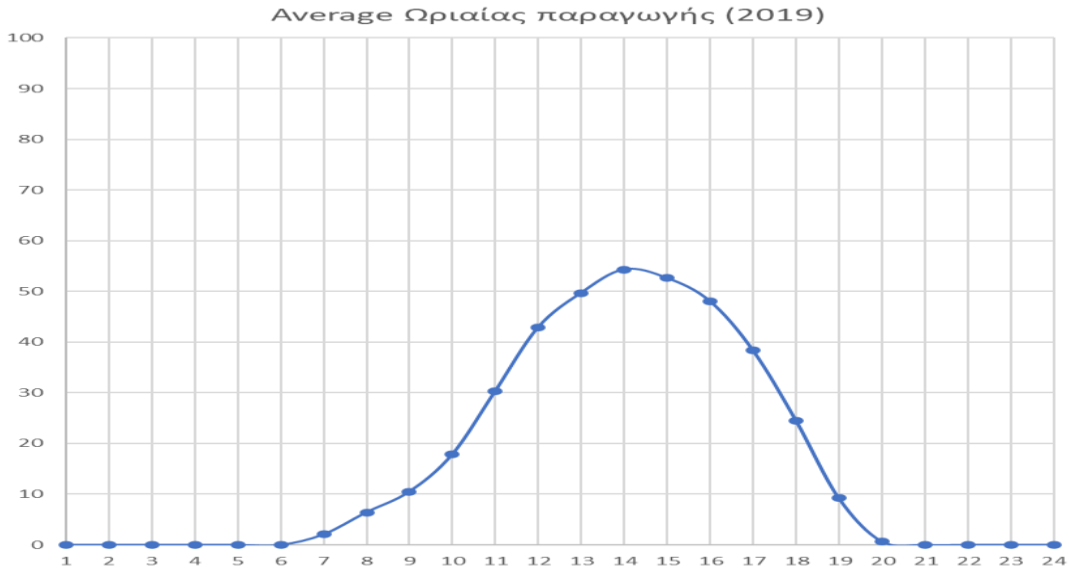
Ο τέταρτος ΦΒ σταθμός που προσομοιώθηκε έχει πάνελ διπλής όψης (bifacial), η κλίση τους είναι σταθερή και ίση με 30° και ο προσανατολισμός τους είναι δυτικός, δηλαδή αζιμούθιο=+90° . Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν από το PVGIS για την ιστορική χρονιά 2019. Η προσομοίωση έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα και την αντίστοιχη χρονοσειρά ωριαίας παραγωγής στην διάρκεια ενός έτους.

Specific Production	**1414 kWh/kWp/year**
Normalized Production	**3.87 kWh/kWp/day**
Perfomance Ratio	**90.3 %**
Bifaciality factor	**0.7**



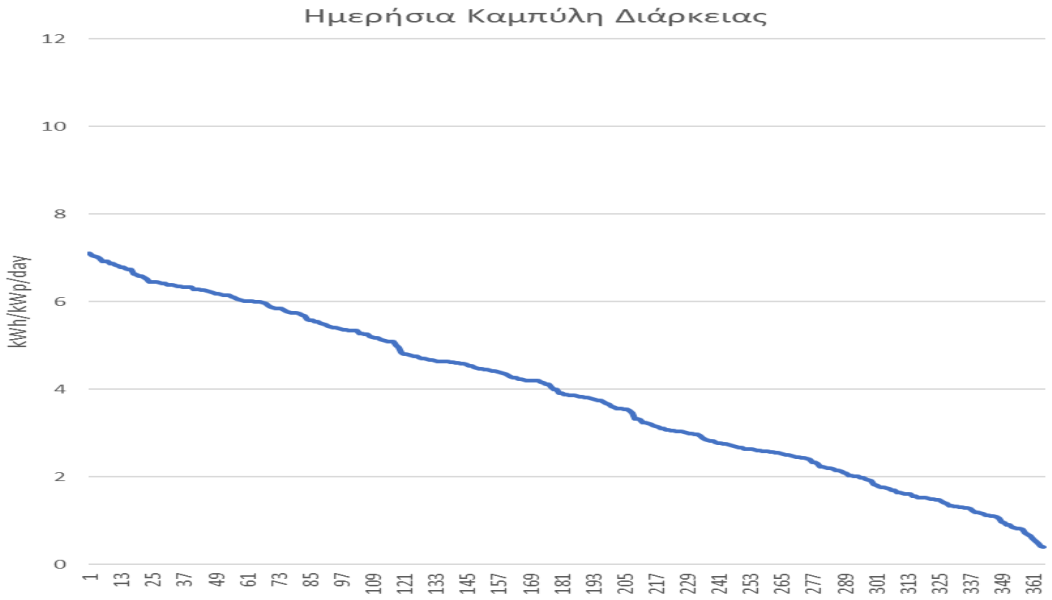
Σχήμα 13. Ημερήσια παραγωγή με εύρος στη διάρκεια του έτους.

Ο προσανατολισμός των πάνελ στο συγκεκριμένο πάρκο, όπως ήδη έχει αναφερθεί, είναι δυτικός. Είναι αναμενόμενο και παρατηρείται στο Σχήμα 13, η παραγωγή να είναι αρκετά χαμηλή τις πρωινές ώρες, δηλαδή τις ώρες που ανατείλει ο ήλιος, και αντίστοιχα να είναι αρκετά υψηλή η παραγωγή από το μεσημέρι μέχρι και την δύση του ήλιου. Η ύπαρξη των διπλής όψης πάνελ ευνοεί την αύξηση της παραγωγής και ιδίως τις πρωινές ώρες, που ο ήλιος είναι αντιδιαμετρικά του προσανατολισμού των πάνελ και η ανακλώμενη ακτινοβολία είναι βασική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ΦΒ πάρκο. Δεδομένου ότι η κλίση των πάνελ είναι μη μεταβλητή, είναι λογικό να υπάρχει μεγάλο εύρος στην ετήσια παραγωγή. Το ακόλουθο σχήμα, δείχνει τον μέσο όρο ωριαίας παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου, στην διάρκεια του έτους.



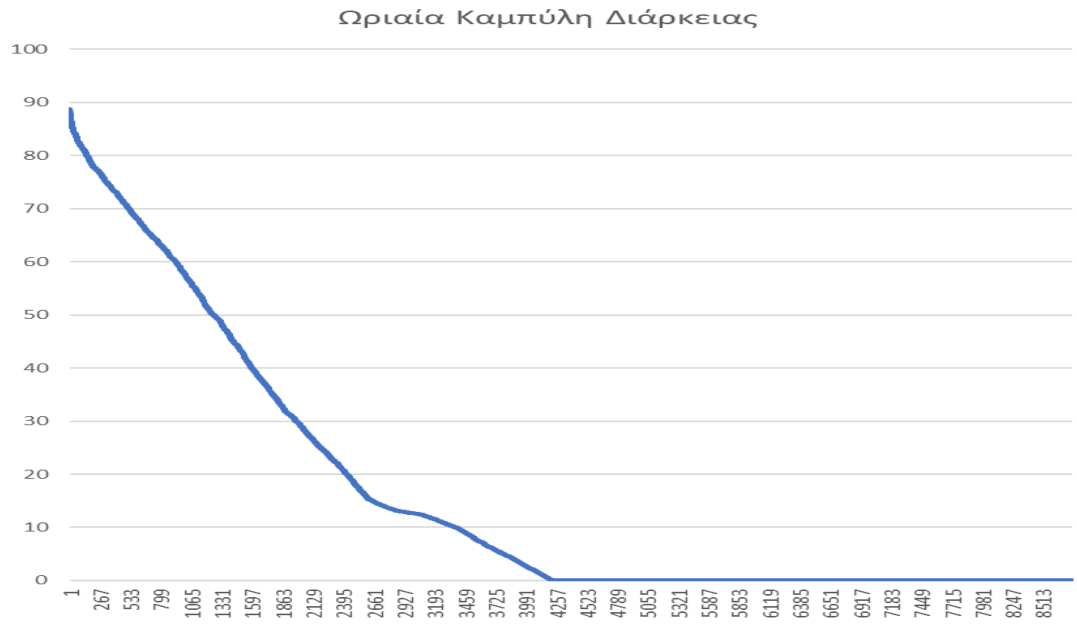
Σχήμα 14. Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής.

Παρατηρώντας το Σχήμα 14, είναι εμφανής η υψηλή παραγωγή τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες, συγκριτικά με τις πρωινές που είναι αρκετά χαμηλότερη. Κατά μέσο όρο, η μέγιστη παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι περίπου 55 MW στις 2 το μεσημέρι. Συγκριτικά με το ΦΒ πάρκο με τον νότιο προσανατολισμό, ο μέγιστος μέσος όρος της ωριαίας του παραγωγής είναι πιο χαμηλός και είναι φυσικό να συμβαίνει, αφού η ηλιακή ακτινοβολία το πρωί απορροφάται σε πολύ μικρό ποσοστό από τα δυτικά προσανατολισμένα πάνελ. Η παραγωγή του ξεκινά, αρκετά χαμηλή στις 8 το πρωί, και παραμένει χαμηλή μέχρι και τις 12 το μεσημέρι. Η παραγωγή αυξάνει σημαντικά στις 2 το μεσημέρι που ο ήλιος έχει αρχίσει να πλησιάζει την δύση και παράγει υψηλές ποσότητες μέχρι και τις 4 το μεσημέρι και ύστερα η παραγωγή μειώνεται αρκετά, ώσπου σχεδόν μηδενίζει στις 19.30. Όπως έχει αναφερθεί, το πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 100MW.



Σχήμα 15. Ημερήσια Καμπύλη Διάρκειας.

Η κανονικοποιημένη παραγωγή (normalized production), είναι 3.87 kWh/kWp/day, δηλαδή για κάθε εγκατεστημένο kWp του πάρκου, παράγονται κατά μέσο όρο στη διάρκεια μιας ημέρας, 3.87 kWh. Στο Σχήμα 15 έχει υπολογιστεί η κανονικοποιημένη παραγωγή για κάθε μία μέρα του έτους. Η μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή ισούται με περίπου 7.4 kWh/kWp/day και για 170 ημέρες τον χρόνο η παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι μεγαλύτερη από 4 kWh/kWp/day, που υποδηλώνει ότι η αποδοτικότητα του πάρκου είναι αρκετά μικρότερη με το αντίστοιχο πάρκο με νότιο προσανατολισμό.



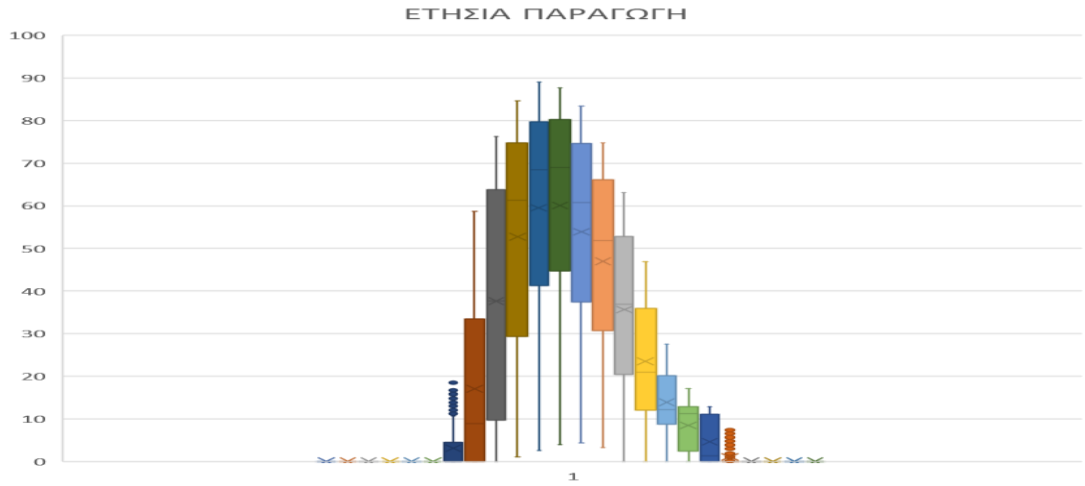
Σχήμα 16. Ωριαία Καμπύλη Διάρκειας.

Αντίστοιχα με την ημερήσια καμπύλη διάρκειας, υπολογίζεται η ωριαία καμπύλη διάρκειας. Το Σχήμα 16 αποτυπώνει πόση ήταν η παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα του έτους, με ταξινομημένη την παραγωγή σε φθίνουσα σειρά. Η μέγιστη τιμή παραγωγής φτάνει για ελάχιστες ώρες μέσα στον χρόνο μόλις τα 90 MW και στην συνέχεια η κλίση του διαγράμματος είναι αρκετά απότομη αποδεικνύοντας την χαμηλή σχετικά παραγωγή, λόγω μη εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, τις πρωινές ώρες.

6.2.5: Bifacial πάνελ ανατολικός προσανατολισμός

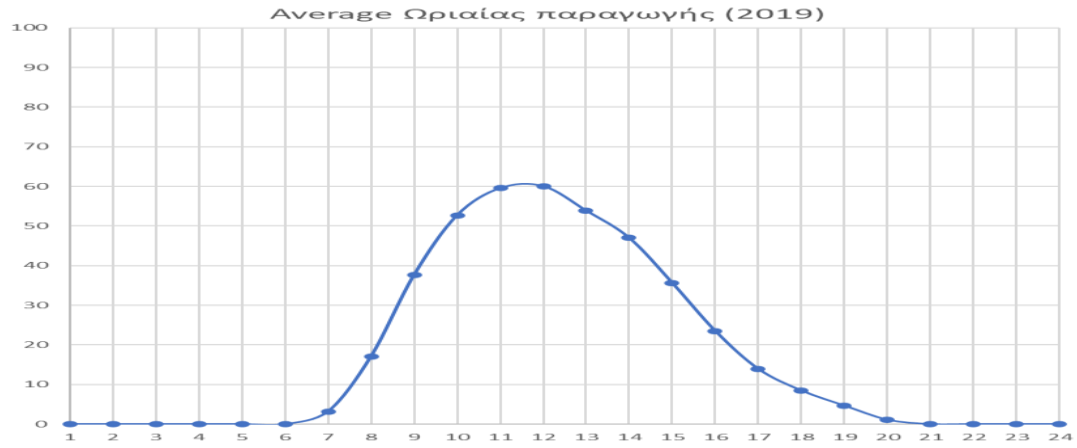
Ο πέμπτος ΦΒ σταθμός που προσομοιώθηκε έχει πάνελ διπλής όψης (bifacial), η κλίση τους είναι σταθερή και ίση με 30^{o} και ο προσανατολισμός τους είναι ανατολικός, δηλαδή αζιμούθιο=-90^{o} . Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν από το PVGIS για την ιστορική χρονιά 2019. Η προσομοίωση έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα και την αντίστοιχη χρονοσειρά ωριαίας παραγωγής στην διάρκεια ενός έτους.

Specific Production	**1526 kWh/kWp/year**
Normalized Production	**4.18 kWh/kWp/day**
Perfomance Ratio	**90.1 %**
Bifaciality factor	**0.7**



Σχήμα 17. Ημερήσια παραγωγή με εύρος στη διάρκεια του έτους.

Ο προσανατολισμός των πάνελ στο συγκεκριμένο πάρκο, όπως ήδη έχει αναφερθεί, είναι ανατολικός. Είναι αναμενόμενο και παρατηρείται στο Σχήμα 17, η παραγωγή να είναι αρκετά υψηλή τις πρωινές ώρες, δηλαδή τις ώρες που ανατείλει ο ήλιος, και αντίστοιχα να είναι αρκετά χαμηλή η παραγωγή από το μεσημέρι μέχρι και την δύση του ήλιου. Η ύπαρξη των διπλής όψης πάνελ ευνοεί την αύξηση της παραγωγής και ιδίως τις απογευματινές ώρες, που ο ήλιος είναι αντιδιαμετρικά του προσανατολισμού των πάνελ και η ανακλώμενη ακτινοβολία είναι βασική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ΦΒ πάρκο. Δεδομένου ότι η κλίση των πάνελ είναι μη μεταβλητή, είναι λογικό να υπάρχει μεγάλο εύρος στην ετήσια παραγωγή. Το ακόλουθο σχήμα, δείχνει τον μέσο όρο ωριαίας παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου, στην διάρκεια του έτους.



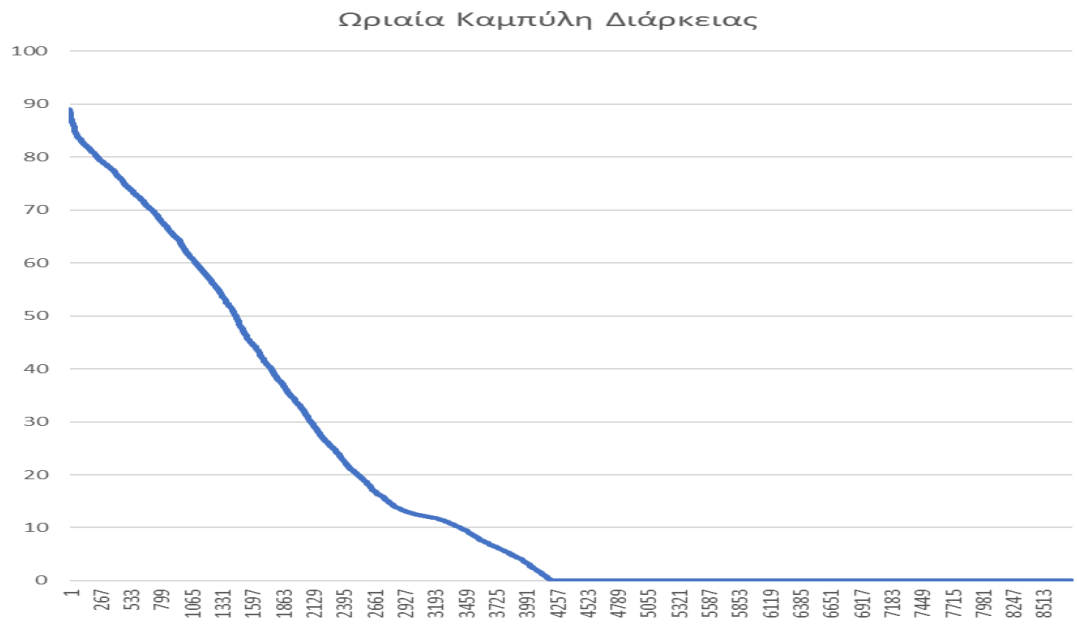
Σχήμα 18.Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής.

Παρατηρώντας το Σχήμα 18, είναι εμφανής η υψηλή παραγωγή τις πρωινές ώρες, συγκριτικά με τις μεσημεριανές και κυρίως τις απογευματινές ώρες που είναι αρκετά χαμηλότερη. Κατά μέσο όρο, η μέγιστη παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι περίπου 60 MW στις 11 με 12 το πρωί. Συγκριτικά με το ΦΒ πάρκο με

τον νότιο προσανατολισμό, ο μέγιστος μέσος όρος της ωριαίας του παραγωγής είναι πιο χαμηλός και είναι φυσικό να συμβαίνει, αφού η ηλιακή ακτινοβολία το απόγευμα απορροφάται σε πολύ μικρό ποσοστό από τα ανατολικώς προσανατολισμένα πάνελ. Η παραγωγή του ξεκινά, αρκετά χαμηλή στις 7 το πρωί, και αυξάνει σημαντικά μέχρι και τις 12 το πρωί και ύστερα αρχίζει γρήγορα να μειώνεται, φτάνοντας ως και την δύση του ήλιου. Όπως έχει αναφερθεί, το πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 100MW.

Σχήμα 19. Ημερήσια Καμπύλη Διάρκειας.

Η κανονικοποιημένη παραγωγή (normalized production), είναι 4.18 kWh/kWp/day, δηλαδή για κάθε εγκατεστημένο kWp του πάρκου, παράγονται κατά μέσο όρο στη διάρκεια μιας ημέρας, 4.18 kWh. Στο Σχήμα 19 έχει υπολογιστεί η κανονικοποιημένη παραγωγή για κάθε μία μέρα του έτους. Η μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή ισούται με περίπου 7.5 kWh/kWp/day και για περίπου 200 ημέρες τον χρόνο η παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι μεγαλύτερη από 4 kWh/kWp/day, που υποδηλώνει ότι η αποδοτικότητα του πάρκου είναι αρκετά μικρότερη με το αντίστοιχο πάρκο με νότιο προσανατολισμό, αλλά καλύτερη από εκείνο με τον δυτικό προσανατολισμό.



Σχήμα 20. Ωριαία Καμπύλη Διάρκειας.

Αντίστοιχα με την ημερήσια καμπύλη διάρκειας, υπολογίζεται η ωριαία καμπύλη διάρκειας. Το Σχήμα 20 αποτυπώνει πόση ήταν η παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα του έτους, με ταξινομημένη την παραγωγή σε φθίνουσα σειρά. Η μέγιστη τιμή παραγωγής φτάνει για ελάχιστες ώρες μέσα στον χρόνο μόλις τα 90 MW και στην συνέχεια η κλίση του διαγράμματος είναι αρκετά απότομη αποδεικνύοντας την χαμηλή σχετικά παραγωγή, λόγω μη εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, τις πρωινές ώρες. Είναι αντίστοιχη εικόνα με αυτή του ΦΒ πάρκου με ανατολικό προσανατολισμό των πάνελ.

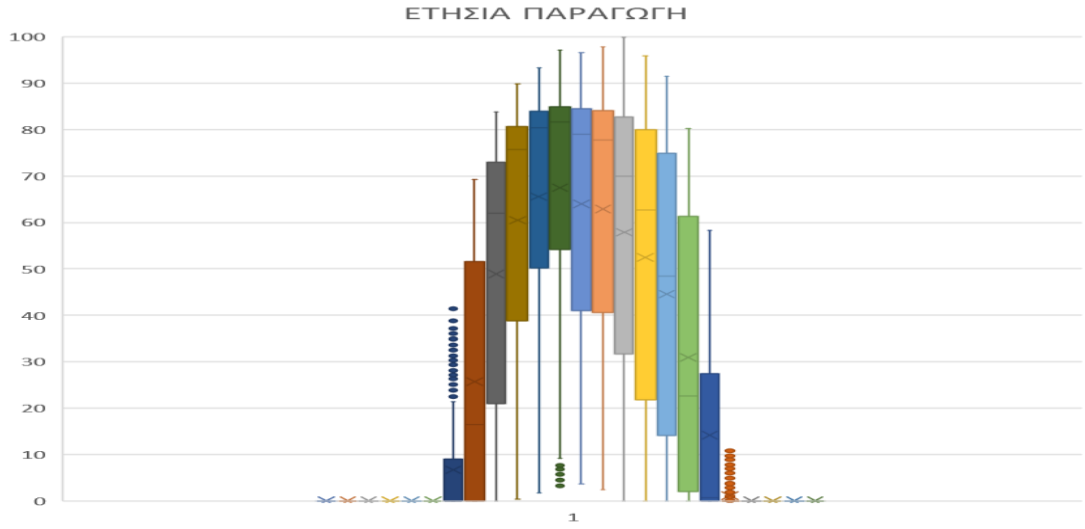
Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των τριών φωτοβολταϊκών σταθμών με πάνελ διπλής όψης, προκύπτει ότι το πιο αποδοτικό πάρκο είναι εκείνο με τον νότιο προσανατολισμό των πάνελ.

6.2.6: Monofacial πάνελ με tracker μονού άξονα

Έκτος ΦΒ σταθμός που προσομοιώθηκε, είναι με τα πάνελ να είναι μονής όψης και η κλίση τους σταθερή και ίση με 30°. Ο προσανατολισμός τους πλέον, δεν είναι σταθερός αλλά μεταβλητός. Το πάρκο διαθέτει tracker μονού άξονα ο οποίος κινείται σε γωνίες αζιμούθιου από -60° έως 60° , ακολουθώντας την πορεία του ήλιου, από ανατολή προς δύση. Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν από το PVGIS για την ιστορική χρονιά 2019. Η προσομοίωση έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα και την αντίστοιχη χρονοσειρά ωριαίας παραγωγής στην διάρκεια ενός έτους.

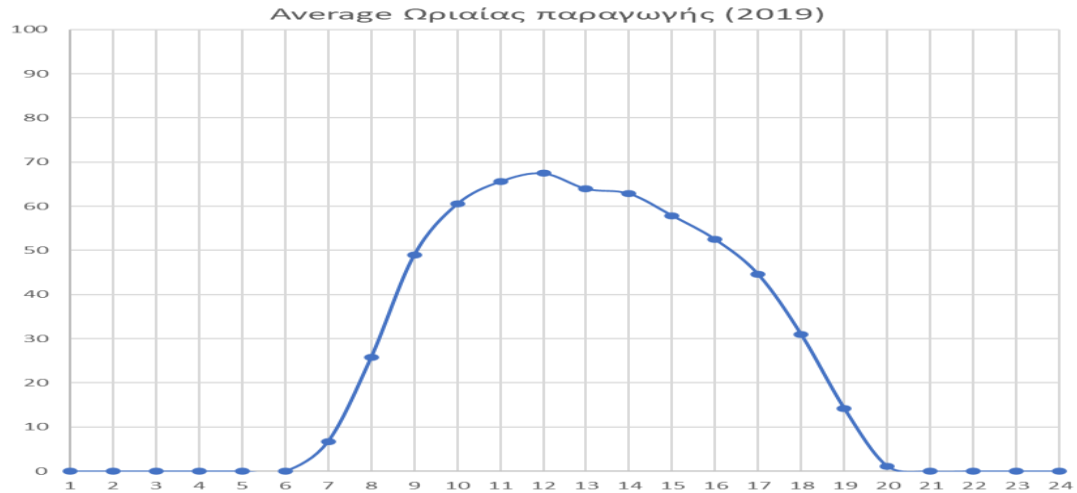
Specific Production	**2200 kWh/kWp/year**
Normalized Production	**6.03 kWh/kWp/day**
Perfomance Ratio	**86 %**

Το συγκεκριμένο πάρκο, λόγω του tracker που έχει εγκατεστημένο καταφέρνει να ακολουθούν τα πάνελ την πορεία του ήλιου μέσα στην διάρκεια της ημέρας, από ανατολή προς δύση. Είναι αναμενόμενο, ο tracker να καταφέρνει να αυξάνει την παραγωγή του πάρκου, τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες, επιτυγχάνοντας περισσότερη καθετότητα στην πρόσπτωση των ακτινών του ήλιου στα φωτοβολταϊκά πάνελ.



Σχήμα 21. Ημερήσια παραγωγή με εύρος στη διάρκεια του έτους.

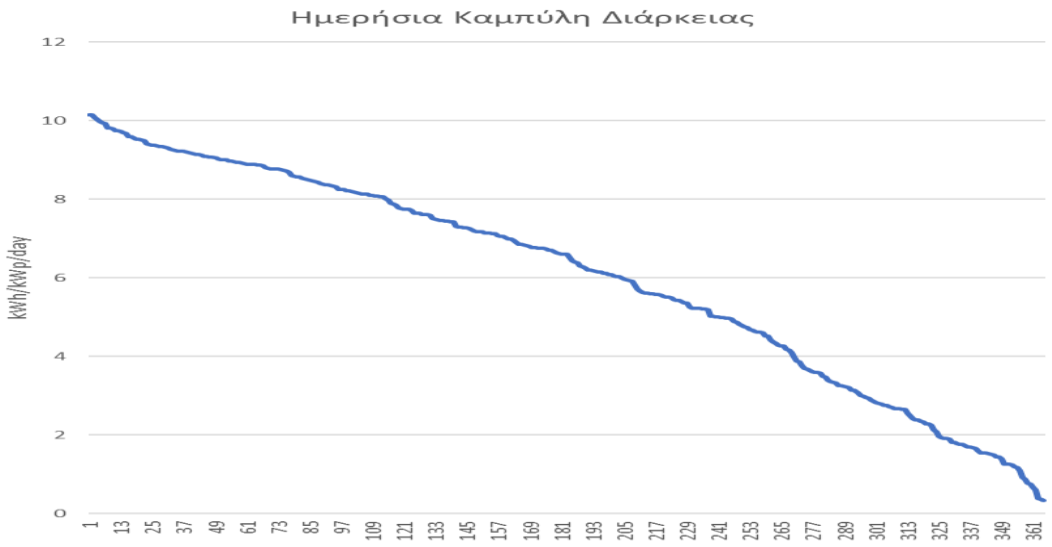
Παρατηρώντας το διάγραμμα στο Σχήμα 21, παρατηρείται μεγάλο εύρος στις τιμές παραγωγής κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Το γεγονός ότι ο tracker παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου, αυξάνει την παραγωγή αλλά οι αλλαγές στο ύψος του ήλιου στον ουρανό κατά την διάρκεια της χρονιάς, δικαιολογούν το μεγάλο εύρος στην παραγωγή κάθε ώρας. Φυσικά καθοριστικό ρόλο έχει και η μεταβλητότητα του καιρού στη διάρκεια του έτους, δηλαδή συννεφιά, ηλιοφάνεια κτλ.



Σχήμα 22. Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής.

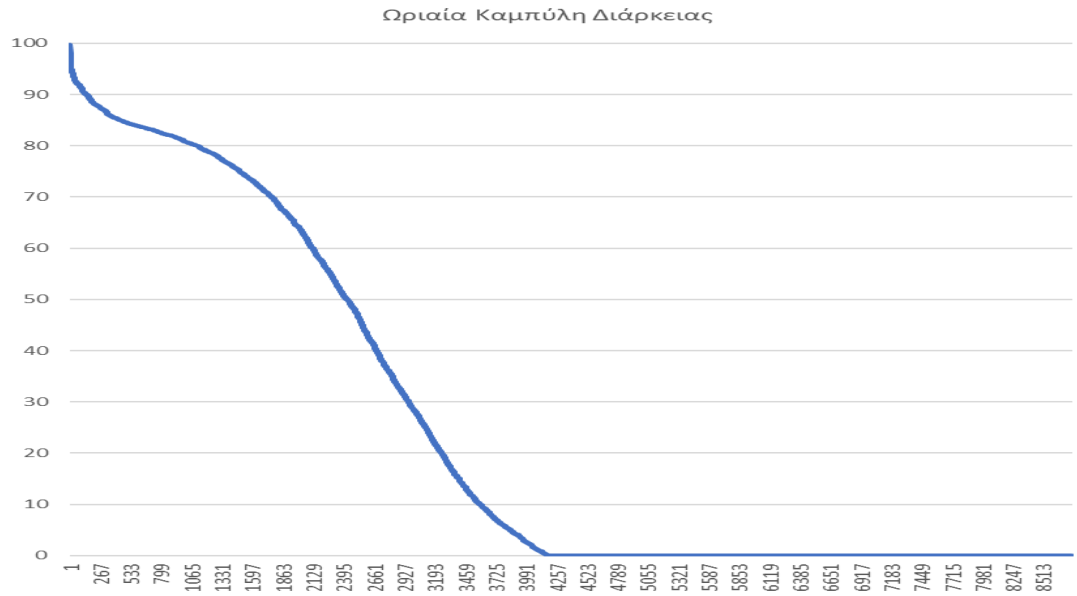
Σύμφωνα με το Σχήμα 22, κατά μέσο όρο, η μέγιστη παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι περίπου 70 MW στις 12 μεσημέρι. Η παραγωγή του ξεκινά, αρκετά χαμηλή στις 7 το πρωί και αυξάνει γρήγορα μέχρι και το μεσημέρι στις 12 όπου ύστερα, πιο σταδιακά, αρχίζει να μειώνεται, μέχρι και τις 8 το απόγευμα περίπου. Όπως έχει αναφερθεί, το πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 100MW. Φαίνεται, ότι ο tracker που έχει εγκατασταθεί στο πάρκο, αυξάνει σημαντικά την παραγωγή κάθε ώρας μες στην διάρκεια της ημέρας. Η καμπύλη του ανωτέρω σχήματος, είναι αρκετά «πεπλατυσμένη», αποτυπώνοντας μ' αυτό τον τρόπο την υψηλή παραγωγή από το πάρκο.

Η τιμή του specific production, της κανονικοποιημένης παραγωγής του πάρκου στην διάρκεια του έτους είναι 2200 kWh/kWp, αρκετά υψηλή ετήσια παραγωγή.



Σχήμα 23. Ημερήσια Καμπύλη Διάρκειας.

Η κανονικοποιημένη παραγωγή (normalized production), είναι 3.74 kWh/kWp/day, δηλαδή για κάθε εγκατεστημένο kWp του πάρκου, παράγονται κατά μέσο όρο στη διάρκεια μιας ημέρας, 3.74 kWh. Στο Σχήμα 23 έχει υπολογιστεί η κανονικοποιημένη παραγωγή για κάθε μία μέρα του έτους. Η μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή ισούται με 10 kWh/kWp/day. Παρατηρώντας το διάγραμμα, φαίνεται η ημερήσια παραγωγή να μειώνεται σταδιακά, αλλά τις περισσότερες μέρες η παραγωγή είναι ικανοποιητικά υψηλή.



Σχήμα 24. Ωριαία Καμπύλη Διάρκειας.

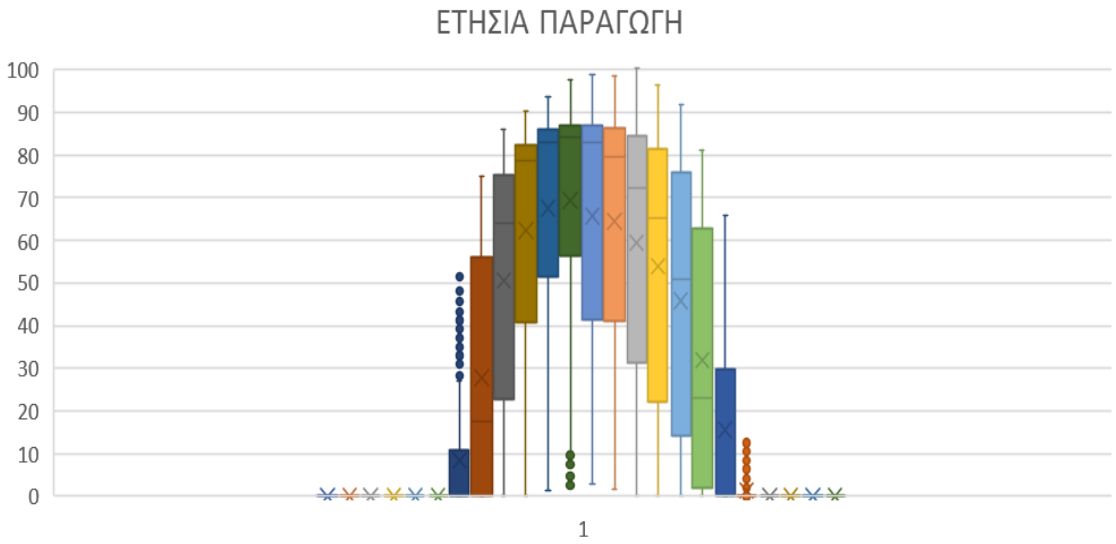
Αντίστοιχα με την ημερήσια καμπύλη διάρκειας, υπολογίζεται η ωριαία καμπύλη διάρκειας. Το Σχήμα 24 αποτυπώνει πόση ήταν η παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα του έτους, με ταξινομημένη την παραγωγή σε φθίνουσα σειρά. Η μείωση της παραγωγής αρχικά είναι αργή και ύστερα αρκετά απότομη.

6.2.7: Monofacial πάνελ με tracker διπλού άξονα

Έβδομος και τελευταίος ΦΒ σταθμός που προσομοιώθηκε είναι με τα πάνελ να είναι μονής όψης και ο προσανατολισμός τους δεν είναι σταθερός αλλά μεταβλητός. Το πάρκο διαθέτει tracker διπλού άξονα ο οποίος κινείται σε γωνίες αζιμούθιου από -180° έως 180° και η κλίση των πάνελ μεταβάλλεται από -90° έως + 90° . Ο tracker διπλού άξονα ακολουθεί την πορεία του ήλιου τόσο από ανατολή προς δύση αλλά και τις μεταβολές του ύψους του στην ουράνια σφαίρα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν από το PVGIS για την ιστορική χρονιά 2019. Η προσομοίωση έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα και την αντίστοιχη χρονοσειρά ωριαίας παραγωγής στην διάρκεια ενός έτους.

Specific Production	**2277 kWh/kWp/year**
Normalized Production	**6.24 kWh/kWp/day**
Perfomance Ratio	**85.8 %**

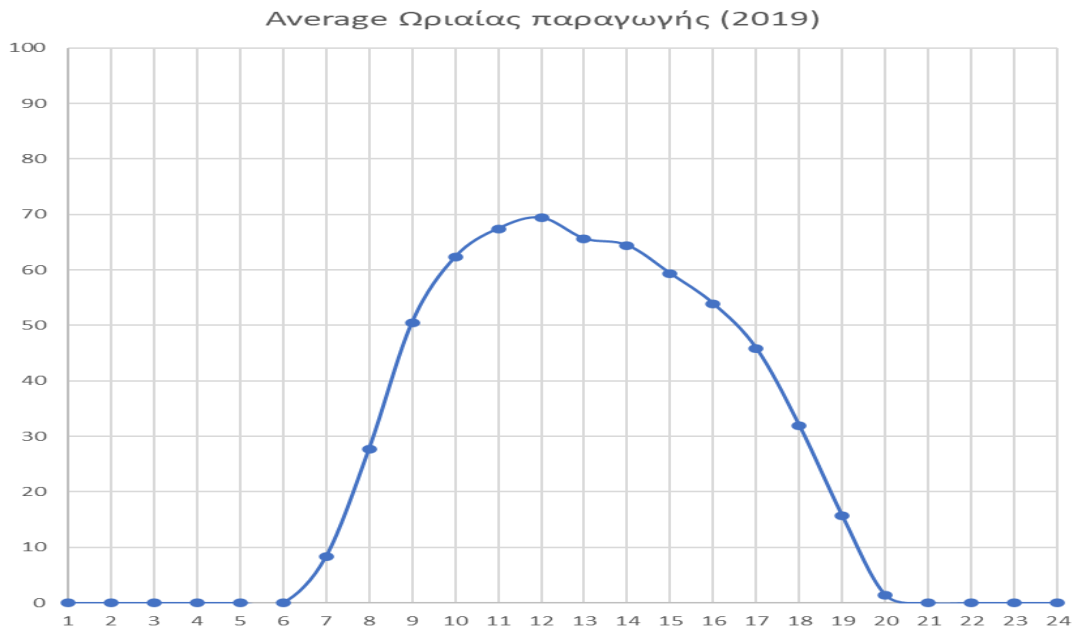
Η εγκατάσταση tracker διπλού άξονα είναι αρκετά αποδοτική, γιατί καταφέρνει να ακολουθεί στο μέγιστο τις κινήσεις του ήλιου, αλλά είναι μια εγκατάσταση αρκετά πιο σύνθετη με υψηλό κόστος τόσο για την υλοποίησή της όσο και στην συντήρησή της. Η περαιτέρω ανάλυση δεν είναι στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά είναι κάτι το οποίο πρέπει να καταγραφεί.



Σχήμα 25. Ημερήσια παραγωγή με εύρος στη διάρκεια του έτους.

Το συγκεκριμένο πάρκο, λόγω του tracker που έχει εγκατεστημένο καταφέρνει να ακολουθούν τα πάνελ την πορεία του ήλιου μέσα στην διάρκεια της ημέρας, στον βέλτιστο βαθμό. Είναι αναμενόμενο, ο tracker να καταφέρνει να αυξάνει την παραγωγή του πάρκου, τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες, επιτυγχάνοντας περισσότερη καθετότητα στην πρόσπτωση των ακτινών του ήλιου στα φωτοβολταϊκά πάνελ.

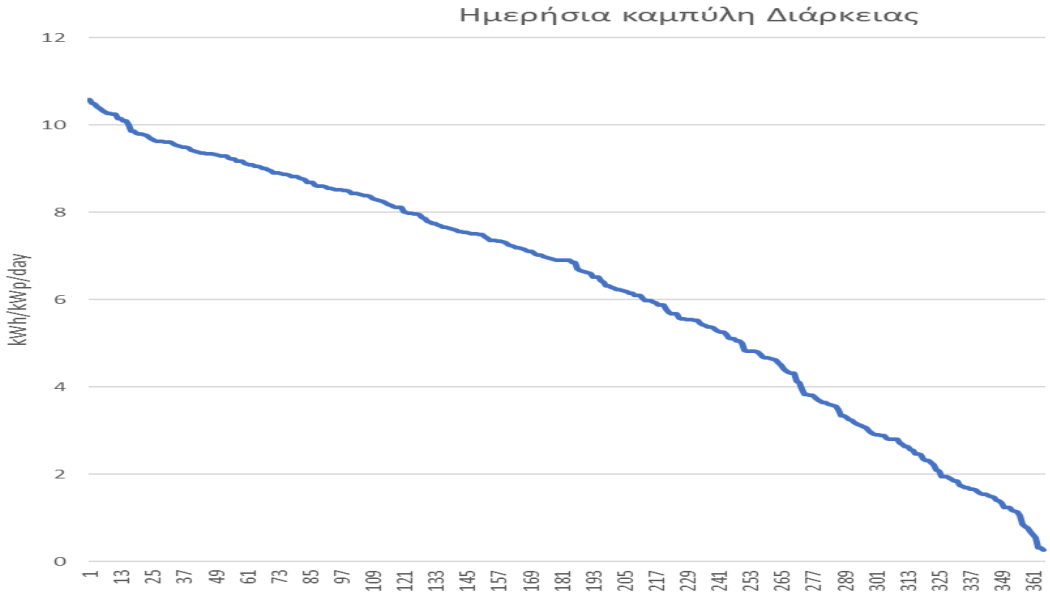
Παρατηρώντας το διάγραμμα στο Σχήμα 25, παρατηρείται μεγάλο εύρος στις τιμές παραγωγής κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Το γεγονός ότι ο tracker παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου, αυξάνει την παραγωγή στο μέγιστο αλλά έχει καθοριστικό ρόλο και η μεταβλητότητα του καιρού στη διάρκεια του έτους, δηλαδή συννεφιά, ηλιοφάνεια κτλ.



Σχήμα 26. Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής.

Σύμφωνα με το Σχήμα 26, κατά μέσο όρο, η μέγιστη παραγωγή του συγκεκριμένου πάρκου είναι περίπου 70 MW στις 12 μεσημέρι. Η παραγωγή του ξεκινά, αρκετά χαμηλή στις 7 το πρωί και αυξάνει γρήγορα μέχρι και το μεσημέρι στις 12 όπου ύστερα, πιο σταδιακά, αρχίζει να μειώνεται, μέχρι και τις 8 το απόγευμα περίπου. Όπως έχει αναφερθεί, το πάρκο έχει ονομαστική ισχύ 100MW. Φαίνεται, ότι ο tracker που έχει εγκατασταθεί στο πάρκο, αυξάνει σημαντικά την παραγωγή κάθε ώρας μες στην διάρκεια της ημέρας. Η καμπύλη του ανωτέρω σχήματος, είναι αρκετά «πεπλατυσμένη», αποτυπώνοντας μ' αυτό τον τρόπο την υψηλή παραγωγή από το πάρκο. Η παραγωγή είναι σταθερή και υψηλή σε όλη την διάρκεια της ημέρας.

Η τιμή του specific production, της κανονικοποιημένης παραγωγής του πάρκου στην διάρκεια του έτους είναι 2277 kWh/kWp, αρκετά υψηλή ετήσια παραγωγή. Έχοντας ως μέτρο σύγκρισης τα αποτελέσματα από το ΦΒ με τον tracker μονού άξονα, δεν αυξάνεται πάρα πολύ η παραγωγή στην προκειμένη περίπτωση.



Σχήμα 27. Ημερήσια Καμπύλη Διάρκειας.

Η κανονικοποιημένη παραγωγή (normalized production), είναι 6.24 kWh/kWp/day, δηλαδή για κάθε εγκατεστημένο kWp του πάρκου, παράγονται κατά μέσο όρο στη διάρκεια μιας ημέρας, 6.24 kWh. Στο Σχήμα 27 έχει υπολογιστεί η κανονικοποιημένη παραγωγή για κάθε μία μέρα του έτους. Η μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή ισούται με 10.5 kWh/kWp/day. Παρατηρώντας το διάγραμμα, φαίνεται η ημερήσια παραγωγή να μειώνεται σταδιακά. Οι τιμές της κανονικοποιημένης παραγωγής, του ΦΒ πάρκου με tracker μονού άξονα και με tracker διπλού άξονα , είναι σχεδόν ίσες.

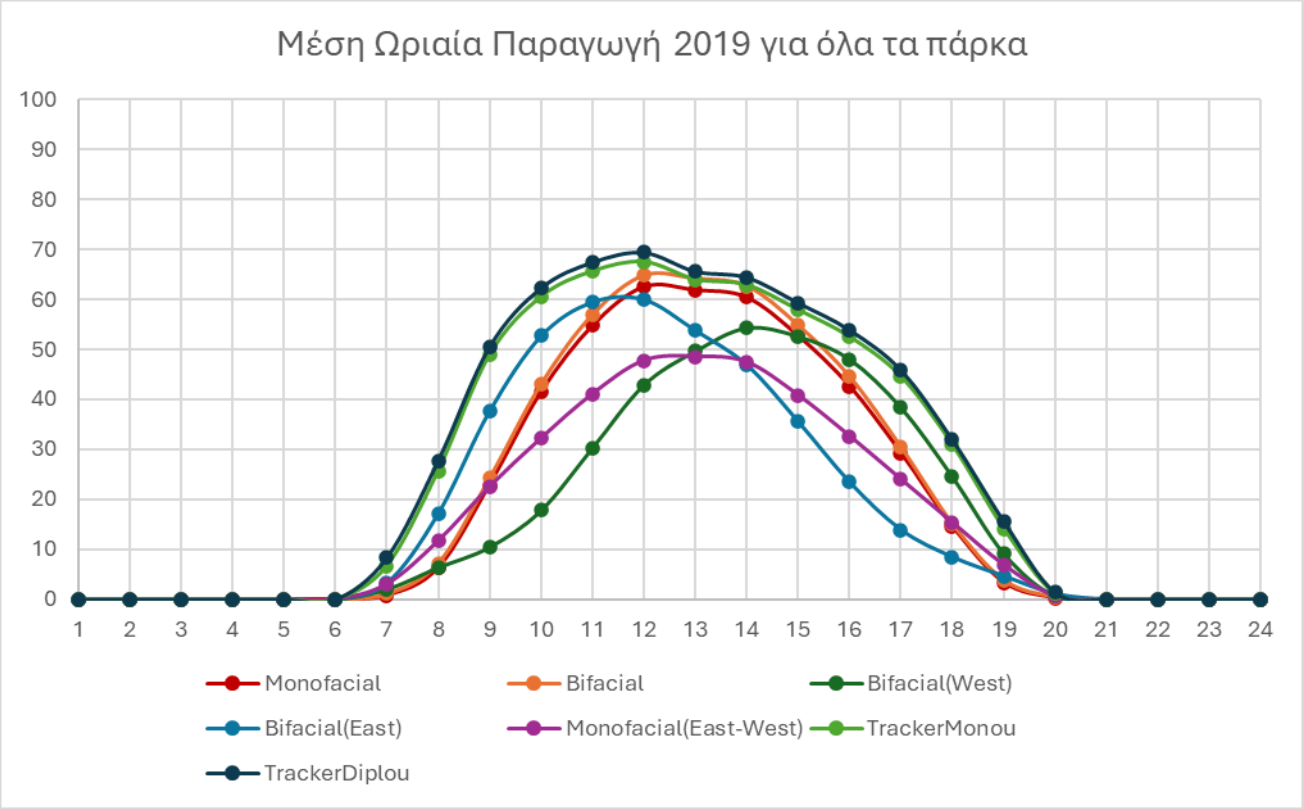
Σχήμα 28. Ωριαία Καμπύλη Διάρκειας.

Αντίστοιχα με την ημερήσια καμπύλη διάρκειας, υπολογίζεται η ωριαία καμπύλη διάρκειας. Το Σχήμα 28 αποτυπώνει πόση ήταν η παραγωγή του πάρκου κάθε ώρα του έτους, με ταξινομημένη την παραγωγή σε φθίνουσα σειρά. Επίσης η πτώση φαίνεται να γίνεται αργά για λίγες ώρες και ύστερα η μείωση είναι πιο απότομη.

6.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Στην ακόλουθη ενότητα παρουσιάζονται συνολικά διαγράμματα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των παραπάνω εφτά φωτοβολταϊκών πάρκων.

Τα εφτά φωτοβολταϊκά πάρκα που συγκρίνονται παρακάτω, είναι όλα εγκατεστημένα στην περιοχή της Τρίπολης και η ονομαστική ισχύς του κάθε πάρκου είναι 100 MW.

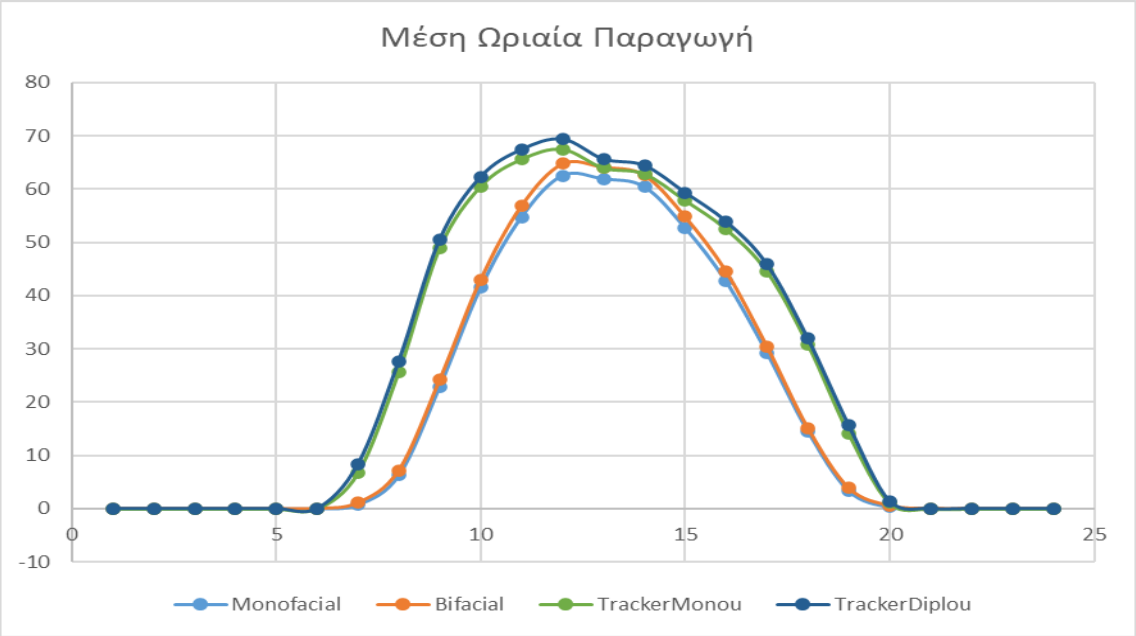


Σχήμα 29. Μέση Ωριαία Παραγωγή όλων των πάρκων.

Στο Σχήμα 29 αποτυπώνονται στο ίδιο διάγραμμα οι καμπύλες που αντιστοιχούν στον μέσο όρο ωριαίας παραγωγής για το κάθε πάρκο που προσομοιώθηκε. Είναι εμφανές, ότι τα πάρκα με τεχνολογία tracker μονού και διπλού άξονα έχουν την μεγαλύτερη παραγωγή μέσα στην διάρκεια της ημέρας. Έχουν υψηλή τιμή παραγωγής καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Η μικρή πτώση παραγωγής προς τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες, κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται σε εμπόδιο που μπορεί να υπάρχει στον δυτικό ορίζοντα και η παραγωγή μοιάζει να μειώνεται πιο απότομα και η ημερήσια καμπύλη να μην είναι συμμετρική.
Στη συνέχεια, τα δύο πάρκα με νότιο προσανατολισμό που έχουν μονής όψης και διπλής όψης πάνελ αντίστοιχα, έχουν την αμέσως υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την διάρκεια της ημέρας. Επίσης, φαίνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά και στην μεταξύ τους παραγωγή.

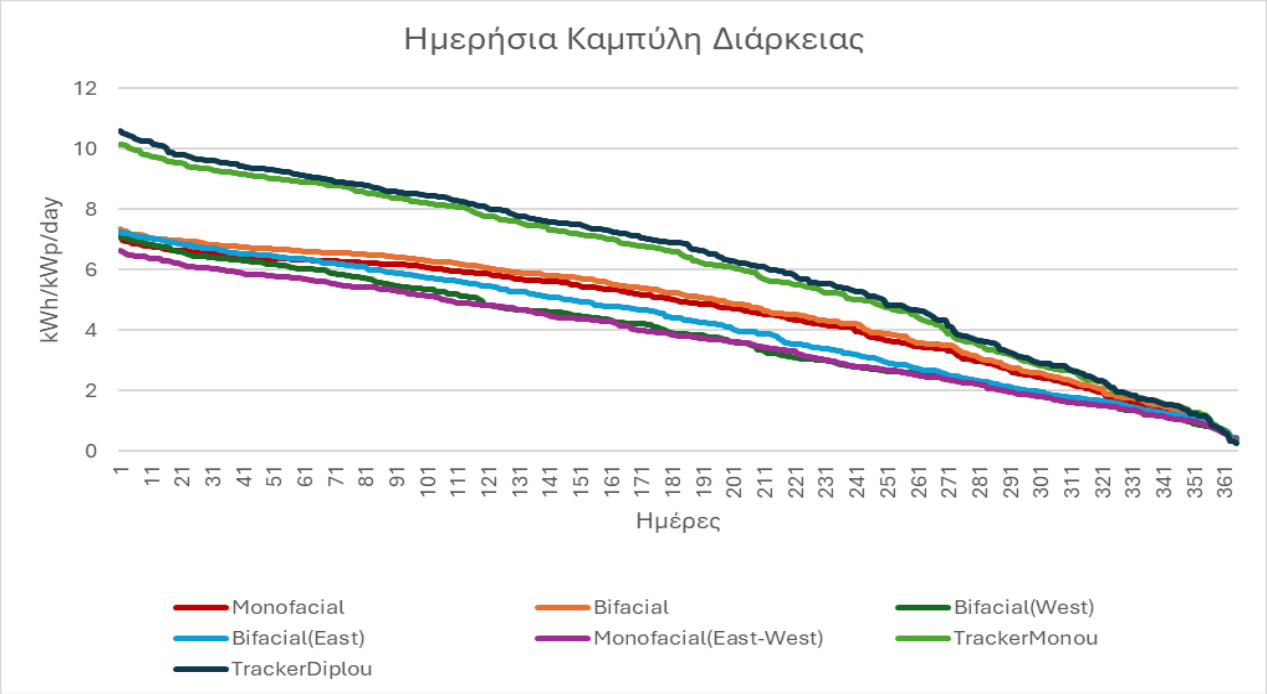
Ύστερα, ακολουθούν σε παραγωγή τα δύο πάρκα με διπλής όψης πάνελ και προσανατολισμό σε δύση και ανατολή. Είναι εμφανής η συμμετρία που υπάρχει στην παραγωγή μεταξύ των δύο πάρκων, όπου το πάρκο με ανατολικό προσανατολισμό έχει περισσότερη παραγωγή τις πρωινές ώρες και αντίστοιχα το πάρκο με δυτικό προσανατολισμό έχει περισσότερη παραγωγή τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες.
Τέλος, την χαμηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ των εφτά πάρκων που προσομοιώθηκαν, έχει το πάρκο με μονής όψης πάνελ και προσανατολισμό τα μισά προς δύση και τα υπόλοιπα μισά προς ανατολή.

Στο ακόλουθο σχήμα αποτυπώνεται ξεχωριστά η μέση παραγωγή για το πάρκο με πάνελ μονής όψης και νότιο προσανατολισμό, για το πάρκο με πάνελ διπλής όψης και νότιο προσανατολισμό και για τα πάρκα με τους trackers, τα οποία με βάση τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι τα πιο αποδοτικά.

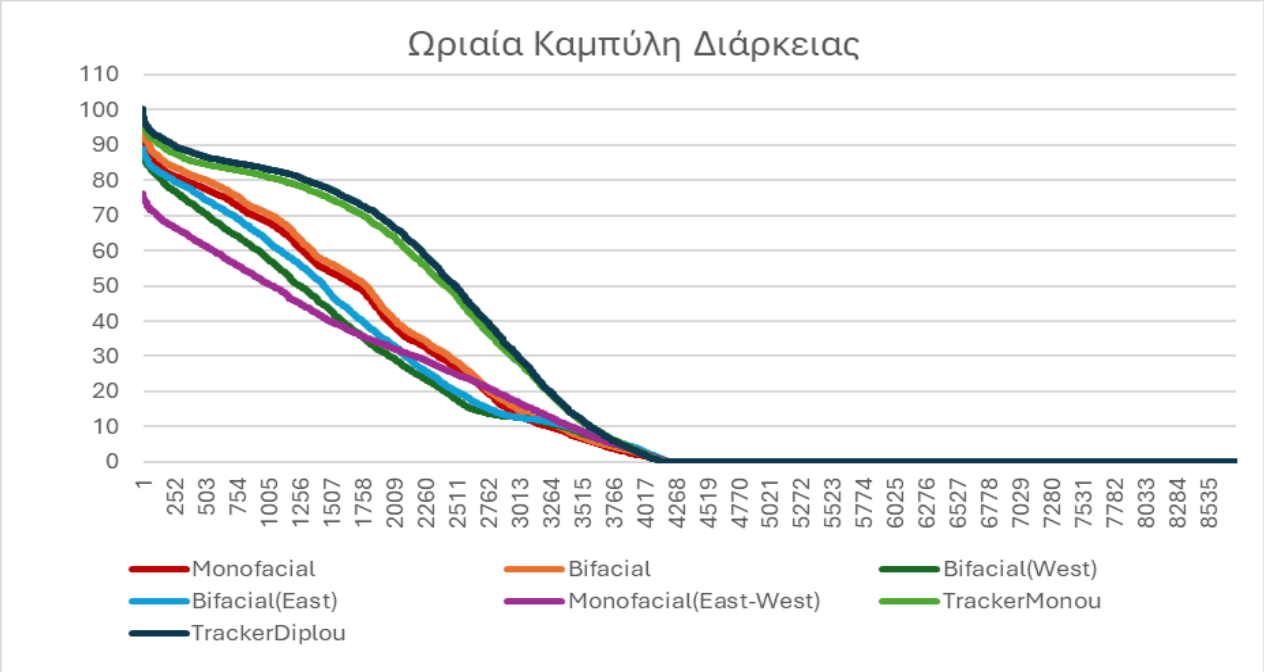


Σχήμα 30. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Μέσης Ωριαίας Παραγωγής για τα 4 πάρκα

Στο Σχήμα 31 αποτυπώνονται στο ίδιο διάγραμμα οι ημερήσιες καμπύλες διάρκειας και στο Σχήμα 32οι ωριαίες καμπύλες διάρκειας, για τα εφτά είδη πάρκων που προσομοιώθηκαν.



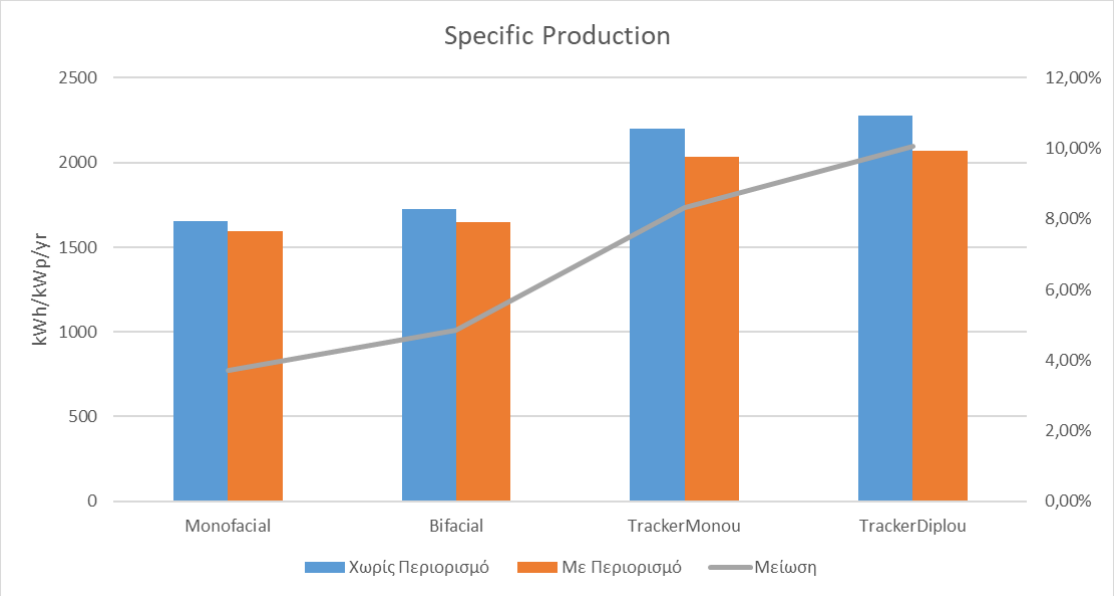
Σχήμα 31. Ημερήσια καμπύλη διάρκειας όλων των πάρκων.



Σχήμα 32. Ωριαία καμπύλη διάρκειας όλων των πάρκων.

Παρατηρούνται, όσον αφορά την ποσότητα παραγωγής, όσα σχολιάστηκαν στο Σχήμα 29**.** Γίνεται σαφής η μεγάλη απόδοση που έχουν τα πάρκα με τους trackers, αφού η παραγωγή τους είναι εμφανώς μεγαλύτερη των υπολοίπων πέντε πάρκων. Επίσης, φαίνεται ότι η παραγωγή του πάρκου με Tracker μονού άξονα είναι σχεδόν ίση με την αντίστοιχη παραγωγή από το πάρκο με tracker διπλού άξονα.

Ακόμα, όσον αφορά τα πάρκα με νότιο προσανατολισμό με μονής και διπλής όψης πάνελ έχουν και αυτά πολύ παρόμοια παραγωγή και ακολουθούν την παραγωγή από τα πάρκα με τους trackers.
Αμέσως μετά, χαμηλότερη παραγωγή έχει το πάρκο με διπλής όψης πάνελ και προσανατολισμό στην ανατολή. Τέλος τα δύο πάρκα, το πρώτο με διπλής όψης πάνελ και προσανατολισμό προς στην δύση το δεύτερο με μονής όψης πάνελ και προσανατολισμό μισά ανατολή μισά δύση το άλλο, είναι τα πάρκα με σχεδόν ίση παραγωγή μεταξύ τους αλλά την μικρότερη από όλα τα πάρκα που έχουν προσομοιωθεί.



Σχήμα 33. Κανονικοποιημένη παραγωγή και εφαρμογή περιορισμού παραγωγής 72%.

Η Ελλάδα, όπως έχει προαναφερθεί, έχει πλούσιο ηλιακό δυναμικό. Αυτό έχει οδηγήσει και στην κατασκευή πολλών φωτοβολταϊκών πάρκων ανά την επικράτεια. Ωστόσο, αρκετές φορές τις μεσημεριανές ώρες που η παραγωγή είναι υψηλή από τα φωτοβολταϊκά πάρκα, η ζήτηση είναι μικρότερη με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εγχυθεί όλη η παραγόμενη ενέργεια στο σύστημα, για λόγους ευστάθειάς του και άρα να πρέπει να εφαρμοστούν περιορισμοί έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας στο Σύστημα/Δίκτυο. Το Σχήμα 33 αποτυπώνει την μείωση στην παραγωγή των εφτά διαφορετικών πάρκων που έχουν χρησιμοποιηθεί, εφαρμόζοντας ενδεικτικά περιορισμό έγχυσης όταν η παραγωγή ξεπερνά το 72% της εγκατεστημένης ισχύος. Ο δεξής άξονας του διαγράμματος του σχήματος 33 αποτυπώνει σε απόλυτη τιμή το ποσοστό μείωσης της παραγόμενης ενέργειας, λόγω του περιορισμού. Όπως φαίνεται, την μεγαλύτερη μείωση, περίπου 10% και 8% υφίστανται το πάρκο με διπλού άξονα tracker και μονού άξονα tracker, αντίστοιχα. Τα άλλα δύο πάρκα υφίστανται μείωση της παραγωγής τους 5% και 4%.

Κεφάλαιο 7: Προσομοιώσεις στο PVsyst και εξαγωγή χρονοσειρών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εφτά διαφορετικών ειδών πάρκων, ονομαστικής ισχύος 100MW έκαστο, τα οποία είναι εγκατεστημένα στην περιοχή της Τρίπολης, μέσω του προγράμματος PVsyst και χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα που εισήχθησαν από το PVGIS για την χρονιά 2019.
Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις ανωτέρω προσομοιώσεις, η μελέτη επεκτείνεται ως ακολούθως:
Επιλέχθηκαν συνολικά 5 διαφορετικές περιοχές στην Ελλάδα, συγκεκριμένα:

- Αλεξανδρούπολη
- Αλιβέρι
- Πτολεμαΐδα
- Πλατανιάς Χανίων
- Τρίπολη

Η κατανομή των πάρκων ανά την επικράτεια είναι επιτηδευμένη για να είναι πιο πλήρης η ανάλυση και πιο σωστή η προσέγγιση του αντικειμένου της διπλωματικής. Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία επίσης εισήχθησαν από το PVGIS, από τις χρονιές:

- ✓ 2013
- ✓ 2015
- ✓ 2017
- ✓ 2019

Τα είδη των πάρκων που επιλέχθηκαν να προσομοιωθούν είναι τα εξής τρία:

- Πάρκο με πάνελ μονής όψης και νότιο προσανατολισμό
- Πάρκο με πάνελ διπλής όψης και νότιο προσανατολισμό
- Πάρκο με πάνελ μονής όψης, νότιο προσανατολισμό και με tracker μονού άξονα.

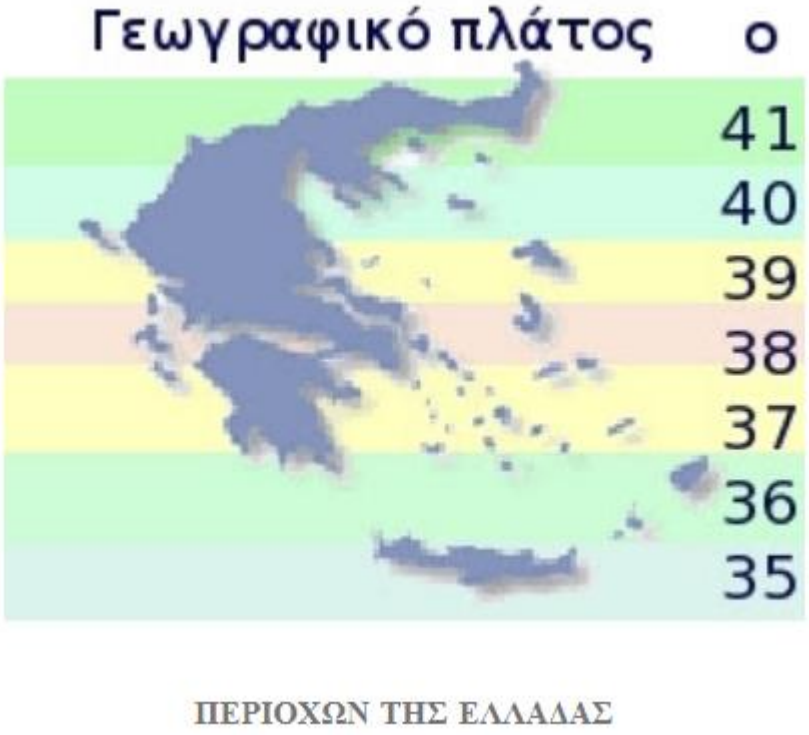
Όλα τα πάρκα έχουν προσομοιωθεί με πάνελ και inverters που πρότεινε το λογισμικό του PVsyst. Οι παράμετροι που άλλαζαν κάθε φορά, αφορούσαν την κλίση των πάνελ, την αζιμουθιακή γωνία τους - δηλαδή τον προσανατολισμό τους - και τα πάνελ να είναι μονής ή διπλής όψης, αναλόγως το πάρκο που προσομοιωνόταν κάθε φορά.

Το κάθε είδος πάρκου, απ' τα ανωτέρω τρία που αναφέρονται, προσομοιώθηκε στις 5 περιοχές με μετεωρολογικά δεδομένα τεσσάρων διαφορετικών χρόνων. Άρα, για το κάθε είδος πάρκου έχουν εξαχθεί 20 διαφορετικές χρονοσειρές.

7.1: Δεδομένα που εισάγονται στο PVsyst για την προσομοίωση

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, είναι διάφοροι οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή ενός ΦΒ πάρκου. Είναι πολλές οι παράμετροι που μπορούν να εισαχθούν στο PVsyst για να προσομοιώσει ένα πάρκο. Επειδή αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, κατά βάση, η εξαγωγή των χρονοσειρών και η επεξεργασία τους και όχι άλλα κατασκευαστικά ζητήματα, κατά την προσομοίωση των πάρκων στο PVsyst συμπληρώθηκαν οι απαιτούμενες παράμετροι για να είναι δυνατή η υλοποίηση της προσομοίωσης.
Πιο συγκεκριμένα, όλα τα πάρκα έχουν προσομοιωθεί με πάνελ και inverters που πρότεινε το λογισμικό του PVsyst (επωνυμία, μοντέλο κτλ.). Οι παράμετροι που άλλαζαν κάθε φορά, αφορούσαν την κλίση των πάνελ, την αζιμουθιακή γωνία τους - δηλαδή τον προσανατολισμό τους - και τα πάνελ να είναι μονής ή διπλής όψης, αναλόγως το πάρκο που προσομοιωνόταν κάθε φορά.

Ένας απ' τους βασικούς παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά την κατασκευή του ΦΒ πάρκου, είναι η περιοχή εγκατάστασης, δηλαδή το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Οι περιοχές που έχουν αναφερθεί παραπάνω και επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του ΦΒ πάρκου, έχουν σημαντικές διαφορές στο γεωγραφικό τους πλάτος, παραδείγματος χάρη το γεωγραφικό πλάτος της Αλεξανδρούπολης είναι 41° και του Πλατανιά Χανίων 35° .



Εικόνα 14. Τιμές γεωγραφικού πλάτους περιοχών στην Ελλάδα.

Για να είναι συγκρίσιμες οι χρονοσειρές μεταξύ τους και να υπεισέρχονται όσο το δυνατόν, λιγότερα στατιστικά σφάλματα στην υπάρχουσα μελέτη, η κλίση των

πάνελ που επιλέχθηκε σε κάθε περιοχή είναι εκείνη η οποία συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους, δίνει την μέγιστη παραγωγή του ΦΒ πάρκου. Δηλαδή, επειδή το γεωγραφικό πλάτος της κάθε περιοχής είναι διαφορετικό και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών πάνω σε αυτά, και το γεωγραφικό πλάτος επηρεάζει την γωνία θέασης του ήλιου στον ουρανό, κάθε φορά η γωνία κλίσης των πάνελ επιλέχθηκε να είναι η βέλτιστη για την εκάστοτε περιοχή.

7.1.1: Global Solar Atlas

Για την εύρεση των βέλτιστων γωνιών για την κάθε περιοχή, χρησιμοποιήθηκε το site Global Solar Atlas, το οποίο μεταξύ πολλών δυνατοτήτων που έχει, δίνει και την πληροφορία της βέλτιστης γωνίας που πρέπει να έχουν τα πάνελ αναλόγως την περιοχή εγκατάστασης του ΦΒ πάρκου.

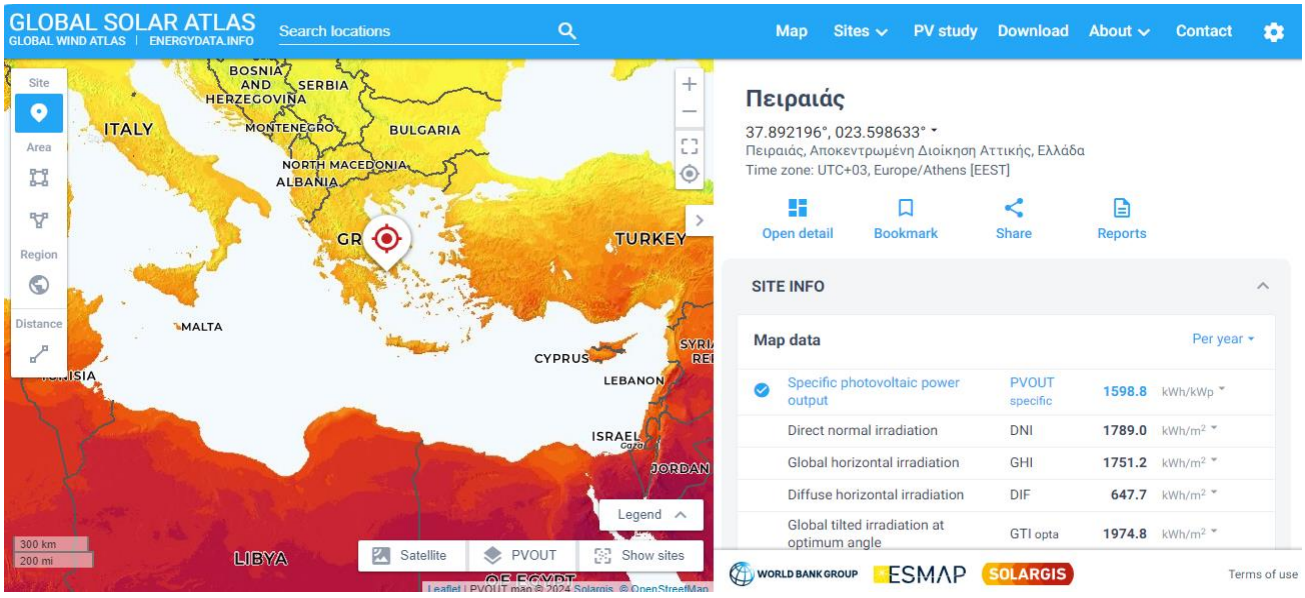
Πιο αναλυτικά, το **Global Solar Atlas** αποτελεί έναν σύγχρονο ψηφιακό χάρτη ηλιακής ακτινοβολίας. Ο στόχος της πλατφόρμας αυτής είναι η παροχή ακριβών και λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με τη γεωγραφική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι πληροφορίες αυτές είναι απαραίτητες για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση φωτοβολταϊκών έργων, καθώς και για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας επενδύσεων στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
Η πλατφόρμα του *Global Solar Atlas* παρέχει δεδομένα που έχουν ανάλυση έως και 1 χλμ., γεγονός που επιτρέπει τη λεπτομερή χαρτογράφηση της ηλιακής ακτινοβολίας ανά τοποθεσία. Τα δεδομένα αυτά βασίζονται σε σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης δορυφορικών παρατηρήσεων, εξασφαλίζοντας ακρίβεια και αξιοπιστία για διάφορες εφαρμογές. Η πλατφόρμα επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε διάφορους δείκτες, όπως η **ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiation - GHI)**, η **άμεση κανονική ακτινοβολία (Direct Normal Irradiance - DNI)** και η **διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία**. Αυτοί οι δείκτες είναι απαραίτητοι για τον καθορισμό της ενεργειακής αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών συστημάτων.
Η χρήση του *Global Solar Atlas* έχει ευρεία εφαρμογή σε διάφορα στάδια ανάπτυξης φωτοβολταϊκών έργων, όπως η **αρχική μελέτη σκοπιμότητας**, η **εκτίμηση ενεργειακής παραγωγής** και η **οικονομική αξιολόγηση επενδύσεων**. Οι ενδιαφερόμενοι, όπως μηχανικοί, σχεδιαστές έργων και επενδυτές, μπορούν να χρησιμοποιήσουν την πλατφόρμα αυτή για να αποκτήσουν γρήγορη πρόσβαση σε δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς την ανάγκη δαπανηρών τοπικών μετρήσεων. Επιπλέον, το εργαλείο παρέχει δυνατότητες προσαρμογής, όπως η επιλογή γεωγραφικών συντεταγμένων και η εξαγωγή δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση.

Το *Global Solar Atlas* είναι προσβάσιμο μέσω ενός διαδραστικού διαδικτυακού περιβάλλοντος, στο οποίο οι χρήστες μπορούν να εξερευνήσουν διάφορους χάρτες και να αποκτήσουν πρόσβαση σε δεδομένα. Οι χρήστες μπορούν να

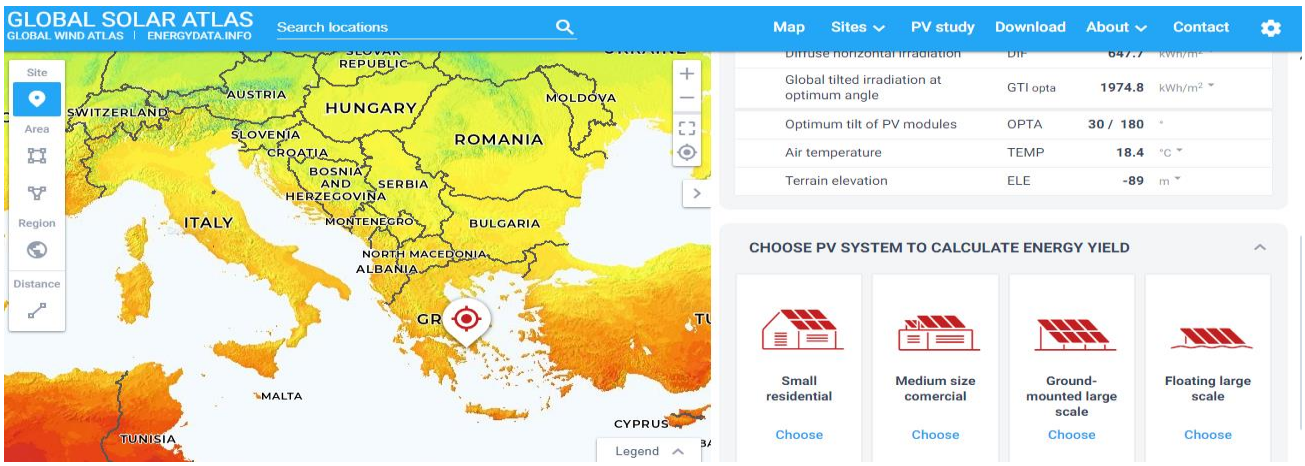
επιλέξουν μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος και να αντλήσουν πληροφορίες για τις ετήσιες, μηνιαίες ή ημερήσιες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να ληφθούν είτε ως χάρτες είτε ως αναλυτικές εκθέσεις, διευκολύνοντας έτσι την ενσωμάτωσή τους σε μελέτες και τεχνικές αναλύσεις.

Η πλατφόρμα παρέχει επίσης δεδομένα για μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα ανέμου, που είναι κρίσιμες για την ακριβή εκτίμηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ. Επιπλέον, το *Global Solar Atlas* συνδυάζει και παρουσιάζει αποτελέσματα που προέρχονται από διάφορες μεθοδολογίες προσομοίωσης, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα είναι ακριβή και αντιπροσωπευτικά της πραγματικής ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται κάθε περιοχή.

Συνοψίζοντας, το *Global Solar Atlas* αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την προώθηση της ανάπτυξης έργων ηλιακής ενέργειας, παρέχοντας ανοιχτά και δωρεάν δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας σε διεθνές επίπεδο. Η διαθεσιμότητα αυτών των δεδομένων ενισχύει τη διαφάνεια και μειώνει τους κινδύνους κατά την αξιολόγηση έργων ηλιακής ενέργειας, συμβάλλοντας στην ταχύτερη ανάπτυξη του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.



Εικόνα 15. Ενδεικτικό παράδειγμα χρήσης του Global Solar Atlas.



Εικόνα 16. Συνέχεια της εικόνας 19.

Στην Εικόνα 15 και στην Εικόνα 16 φαίνεται ότι έχει επιλεχθεί η περιοχή του Πειραιά. Το Global Solar Atlas δίνει διάφορες πληροφορίες που σχετίζονται με την ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος και τα είδη της (διάχυτη, άμεση, ετήσια) αλλά και την βέλτιστη γωνία που θα πρέπει να έχουν τα πάνελ, στην προκειμένη περίπτωση για τον Πειραιά είναι 30°.

Χρησιμοποιώντας το Global Solar Atlas για τις ακόλουθες περιοχές που χρησιμοποιούνται στην μελέτη:

- Αλεξανδρούπολη
- Αλιβέρι
- Πτολεμαΐδα
- Πλατανιάς Χανίων
- Τρίπολη

οι βέλτιστες γωνίες κλίσης των πάνελ που προκύπτουν είναι:

Περιοχή	Βέλτιστη κλίση πάνελ
Αλεξανδρούπολη	34°
Αλιβέρι	32°
Πτολεμαΐδα	34°
Πλατανιάς Χανίων	28°
Τρίπολη	30°

Οι βέλτιστες γωνίες περιστροφής των trackers **μονού άξονα** συνήθως κυμαίνονται από **-60° έως +60°** ως προς τον άξονα ανατολής-δύσης, με σταθερή κλίση.

Συγκεντρωτικά, έχοντας εισάγει στο PVsyst τα μετεωρολογικά δεδομένα της κάθε περιοχής και για την κάθε χρονιά, την κλίση των πάνελ και το είδος τους (μονής ή διπλής όψης) και τις γωνίες του tracker μονού άξονα, γίνεται εφικτή η προσομοίωση του κάθε πάρκου. Προσομοιώνονται τρία διαφορετικά πάρκα και για το καθένα παράγονται 20 διαφορετικές χρονοσειρές.

7.2: Επεξεργασία Χρονοσειρών

Η σύγκριση των πάρκων γίνεται με σκοπό την εύρεση μαθηματικών σχέσεων που θα συσχετίζουν την παραγωγή των πάρκων ως εξής:

- Πάρκο με πάνελ μονής όψης και νότιο προσανατολισμό→ Πάρκο με πάνελ διπλής όψης και νότιο προσανατολισμό
- Πάρκο με πάνελ μονής όψης και νότιο προσανατολισμό →Πάρκο με πάνελ μονής όψης, νότιο προσανατολισμό και με tracker μονού άξονα

Για συντομία, εφεξής, το Πάρκο με πάνελ μονής όψης και νότιο προσανατολισμό θα αναφέρεται ως Monofacial, το Πάρκο με πάνελ διπλής όψης και νότιο προσανατολισμό ως Bifacial και το Πάρκο με πάνελ μονής όψης, νότιο προσανατολισμό και με tracker μονού άξονα ως Tracker Μονού Άξονα, άρα οι συσχετίσεις θα γίνουν μεταξύ των ακόλουθων πάρκων:

Monofacial → Bifacial
Monofacial → Tracker Μονού Άξονα

Όπως έχει προαναφέρει, προέκυψαν 20 χρονοσειρές που δίνουν ωριαία παραγωγή από το πάρκο στην διάρκεια του έτους. Επιλέχθηκε, να μελετηθούν για την εύρεση συσχετίσεων οι 15 χρονοσειρές από τις 20 και οι υπόλοιπες 5 να χρησιμοποιηθούν για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

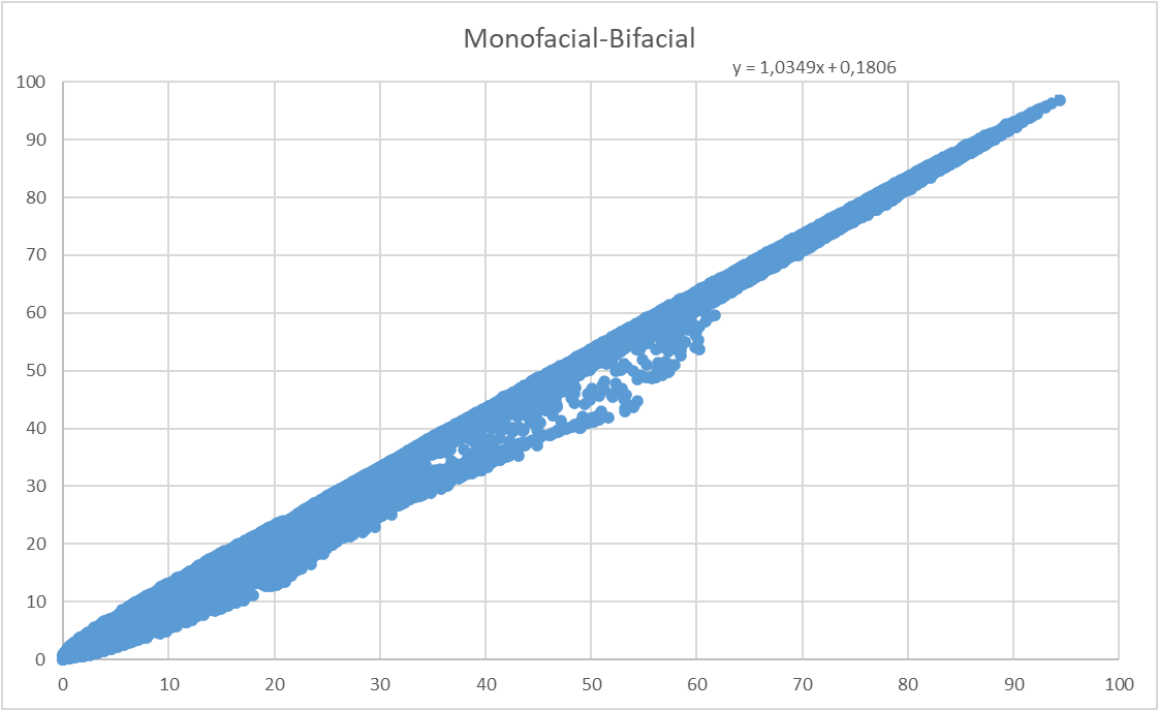
Οι 5 χρονοσειρές που εξαιρέθηκαν από την μελέτη ως προς την εύρεση των μαθηματικών σχέσεων συσχέτισης της παραγωγής μεταξύ των πάρκων, είναι:

Περιοχή	Μετεωρολογική Χρονιά
Αλεξανδρούπολη	2019
Αλιβέρι	2013
Πτολεμαΐδα	2015
Πλατανιάς Χανίων	2017
Τρίπολη	2019

Εξαιρέθηκε μία χρονοσειρά από κάθε περιοχή και για διαφορετική χρονιά η κάθε μία, ώστε να αποφευχθούν τυχόντα στατιστικά σφάλματα.

7.2.1: Συσχέτιση Monofacial → Bifacial

Σε ένα αρχείο Excel ενώνονται οι 15 χρονοσειρές του Monofacial πάρκου και οι αντίστοιχες 15 του Bifacial πάρκου και απεικονίζονται όλα τα δεδομένα σε ένα διάγραμμα. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



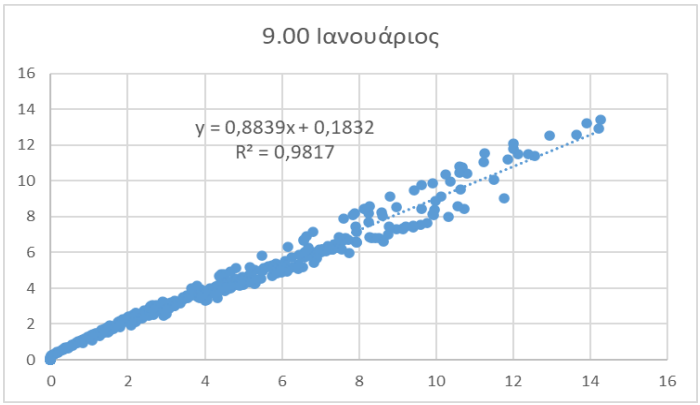
Σχήμα 34. Συσχέτιση Monofacial και Bifacial πάρκου.

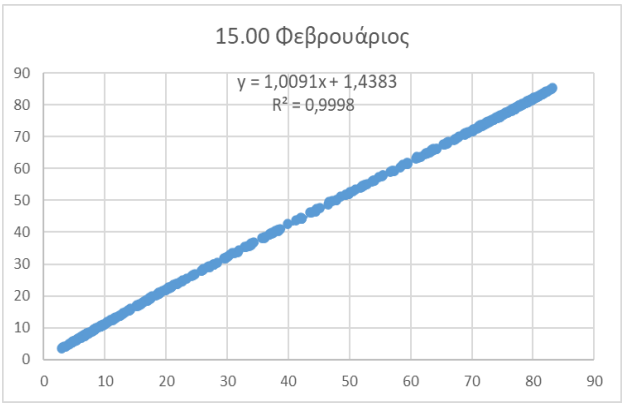
Βλέποντας το διάγραμμα Σχήμα 34 φαίνεται ότι μεταξύ των δύο πάρκων υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση.

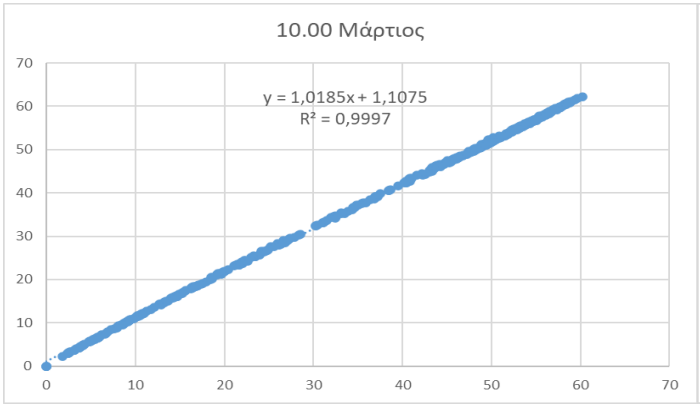
Για να βρεθούν πιο ακριβείς σχέσεις συσχετίσεων, οι χρονοσειρές διαχωρίζονται στους δώδεκα μήνες του χρόνου και κάθε ώρα της ημέρας. Συνεπώς, η ανάλυση θα δώσει μαθηματικές σχέσεις διαφορετικές για κάθε μήνα και για κάθε ώρα της ημέρας, δηλαδή 24ώρες * 12 μήνες= 288 σχέσεις. Προφανώς, τις νυχτερινές ώρες που δεν παράγουν τα φωτοβολταϊκά πάρκα, οι τιμή είναι ίση με μηδέν.

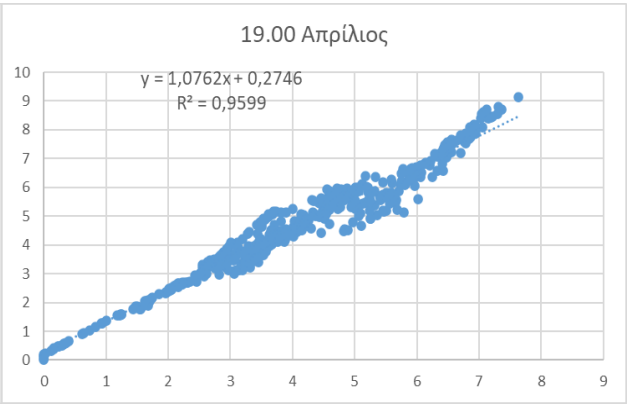
Όλες οι μαθηματικές σχέσεις που προκύπτουν από την συσχέτιση της παραγωγής των δύο πάρκων, είναι της μορφής **y=A*x+B**, για κάθε ώρα και για κάθε μήνα. Τις μεσημεριανές ώρες, η συσχέτιση έχει σχεδόν R=1 (correlation). Η συσχέτιση με R<1 ισχύει για τα διαγράμματα σε πρωινές και απογευματινές ώρες, όπου η παραγωγή από το monofacial πάρκο είναι χαμηλή γιατί ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στην τροχιά του, αλλά τις αντίστοιχες ώρες το bifacial πάρκο μπορεί να απορροφήσει την διάχυτη ακτινοβολία με την πίσω πλευρά των πάνελ.

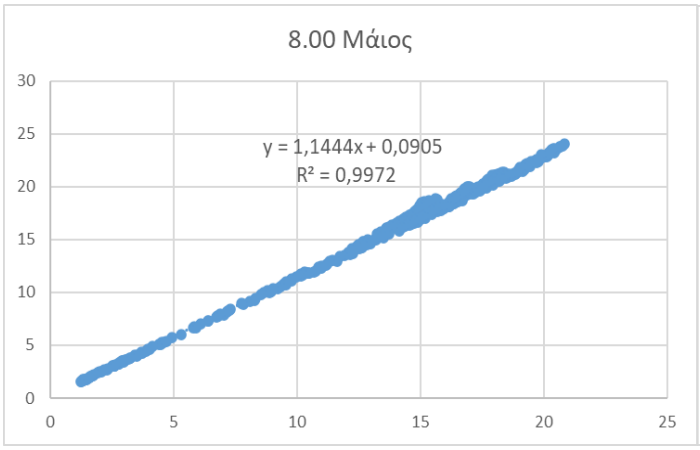
Ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα από όλους τους μήνες και σε τυχαίες ώρες μέσα στην διάρκεια της ημέρας.

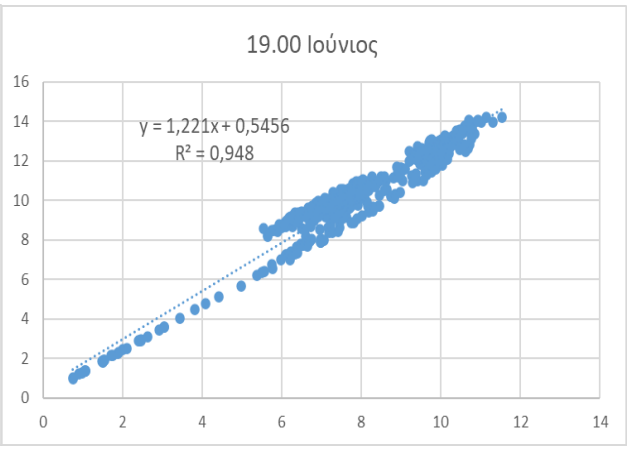

9.00 Ιανουάριος
y = 0,8839x + 0,1832
R² = 0,9817

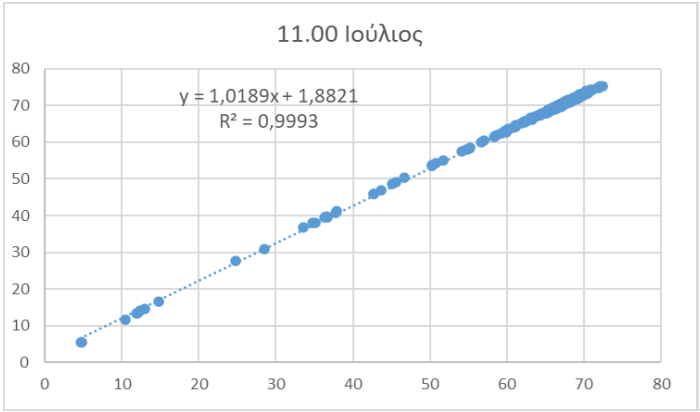

15.00 Φεβρουάριος
y = 1,0091x + 1,4383
R² = 0,9998

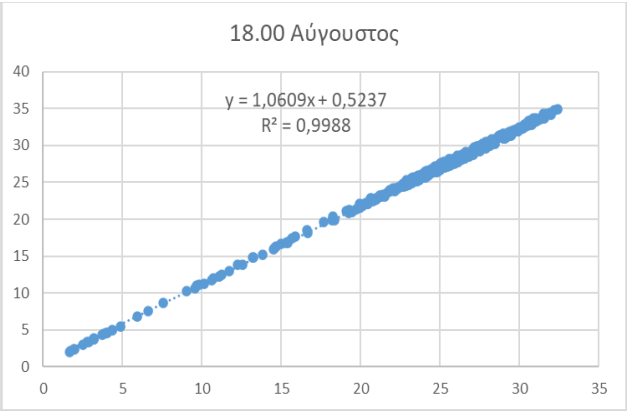

10.00 Μάρτιος
y = 1,0185x + 1,1075
R² = 0,9997

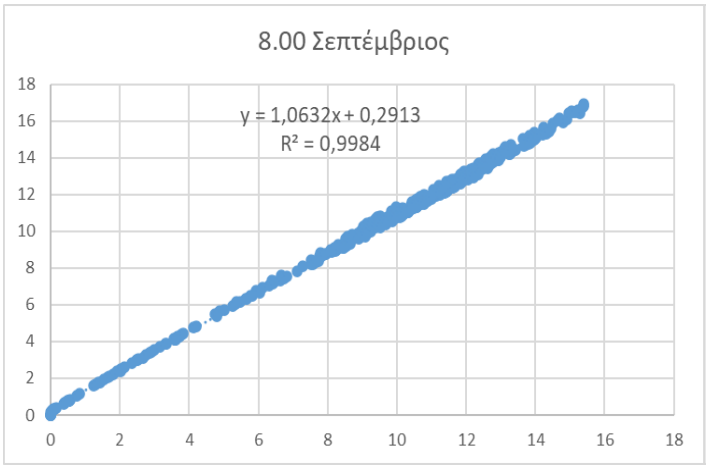

19.00 Απρίλιος
y = 1,0762x + 0,2746
R² = 0,9599

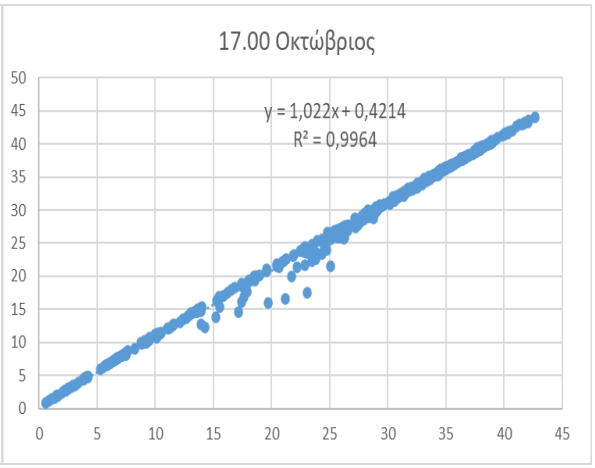

8.00 Μάιος
y = 1,1444x + 0,0905
R² = 0,9972

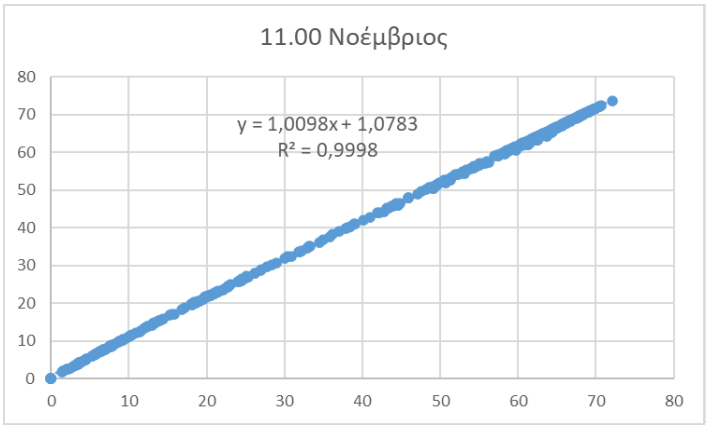

19.00 Ιούνιος
y = 1,221x + 0,5456
R² = 0,948

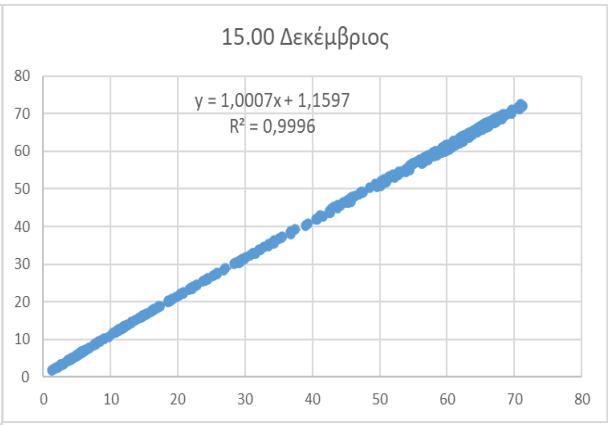

11.00 Ιούλιος
y = 1,0189x + 1,8821
R² = 0,9993


18.00 Αύγουστος
y = 1,0609x + 0,5237
R² = 0,9988









Τα ανωτέρω διαγράμματα επιβεβαιώνουν την πολύ καλή γραμμική συσχέτιση που έχουν οι χρονοσειρές του monofacial και του bifacial πάρκου. Στην εξίσωση της μορφής **y=A*x+B**, στην μεταβλητή y αντιστοιχεί η παραγωγή από το bifacial πάρκο, ενώ στον άξονα x η παραγωγή από το monofacial πάρκο. Επομένως, γνωρίζοντας την παραγωγή από το monofacial πάρκο μπορεί να υπολογιστεί η παραγωγή από ένα bifacial πάρκο εφαρμόζοντας τις εξισώσεις. Στην επόμενη σελίδα είναι όλες οι εξισώσεις συγκεντρωτικά:

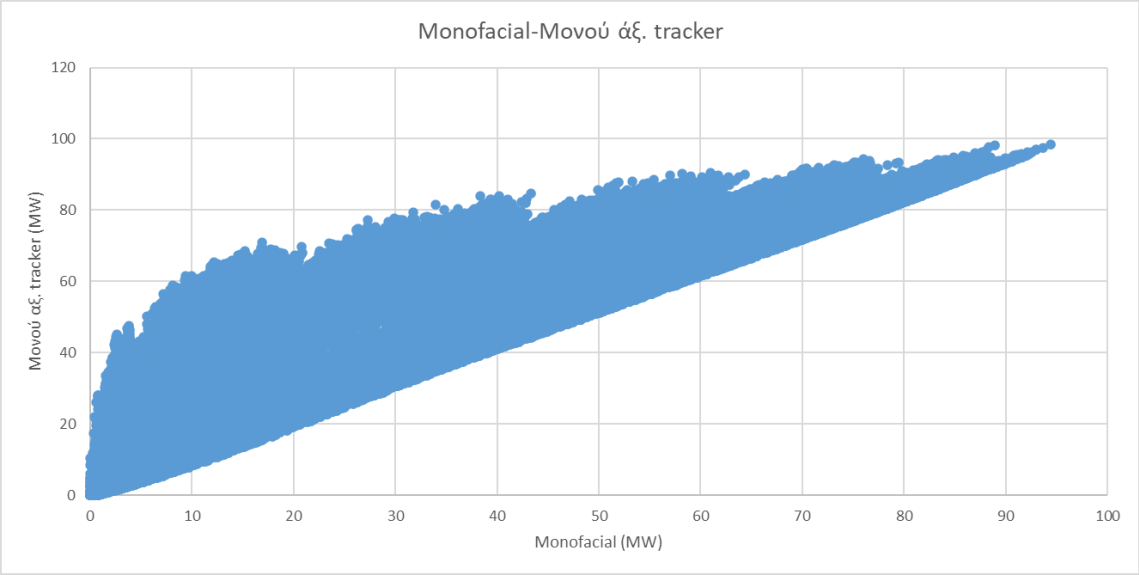
Συγκεντρωτικά οι εξισώσεις που συσχετίζουν την παραγωγή από ένα monofacial και ένα bifacial πάρκο.

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	y = 1,4537x + 0,04	y = 1,3344x + 0,1732	0	y = 1,3035x + 0,5005	y = 1,3881x + 0,1541	0	0	0	0
8	0	0	y = 1,0924x + 0,1188	y = 1,1087x + 0,2048	y = 1,1444x + 0,0905	y = 1,1734x + 0,095	y = 1,1627x + 0,3511	y = 1,1093x + 0,4458	y = 1,0632x + 0,2913	y = 1,0406x + 0,0287	0	0
9	y = 0,8839x + 0,1832	y = 1,0006x + 0,2524	y = 1,0314x + 0,6002	y = 1,0416x + 0,8213	y = 1,0574x + 0,7536	y = 1,068x + 0,7168	y = 1,0639x + 0,7335	y = 1,0278x + 1,3615	y = 1,0229x + 0,8938	y = 1,0176x + 0,6898	y = 0,9494x + 0,3504	y = 0,8879x + 0,212
10	y = 0,92x + 1,1695	y = 1,015x + 0,8459	y = 1,0185x + 1,1075	y = 1,0217x + 1,436	y = 1,0373x + 1,0529	y = 1,0425x + 1,0605	y = 1,0391x + 1,0566	y = 1,0127x + 1,8892	y = 1,0193x + 1,0144	y = 1,011x + 1,1488	y = 1,0056x + 0,5771	y = 0,8983x + 1,2612
11	y = 0,9993x + 1,1783	y = 1,0103x + 1,302	y = 1,0116x + 1,5554	y = 1,016x + 1,6809	y = 1,0204x + 1,7925	y = 1,0237x + 1,7729	y = 1,0189x + 1,8821	y = 1,0175x + 1,4587	y = 1,0068x + 1,7205	y = 1,0066x + 1,4659	y = 1,0098x + 1,0783	y = 0,9775x + 1,3338
12	y = 1,007x + 1,3329	y = 1,0074x + 1,5696	y = 1,0092x + 1,7501	y = 1,0095x + 2,1258	y = 1,0144x + 2,1044	y = 1,0255x + 1,4335	y = 1,0266x + 1,1321	y = 1,0149x + 1,5424	y = 1,0023x + 2,0946	y = 1,004x + 1,7015	y = 1,0072x + 1,3512	y = 1,0017x + 1,3826
13	y = 1,0075x + 1,4075	y = 1,0073x + 1,6366	y = 1,0095x + 1,7443	y = 1,0094x + 2,1358	y = 1,0175x + 1,7962	y = 1,0195x + 1,7977	y = 1,0191x + 1,6151	y = 1,0102x + 1,8757	y = 1,0058x + 1,8285	y = 1,0047x + 1,6583	y = 1,0059x + 1,4647	y = 1,0039x + 1,3637
14	y = 1,0082x + 1,3549	y = 1,0066x + 1,6753	y = 1,009x + 1,7859	y = 1,0095x + 2,1392	y = 1,0157x + 1,9499	y = 1,02x + 1,797	y = 1,0189x + 1,6447	y = 1,012x + 1,749	y = 1,0075x + 1,7055	y = 1,0052x + 1,6121	y = 1,0064x + 1,379	y = 1,0028x + 1,3683
15	y = 1,0083x + 1,2227	y = 1,0091x + 1,4383	y = 1,0157x + 1,2901	y = 1,0166x + 1,6009	y = 1,0215x + 1,6392	y = 1,0247x + 1,6061	y = 1,0174x + 1,8653	y = 1,008x + 2,0895	y = 1,0108x + 1,4829	y = 1,0087x + 1,3116	y = 1,0074x + 1,2043	y = 1,0007x + 1,1597
16	y = 0,9894x + 0,9967	y = 1,0122x + 1,167	y = 1,0166x + 1,1874	y = 1,0225x + 1,3091	y = 1,0306x + 1,2768	y = 1,0327x + 1,3591	y = 1,028x + 1,3843	y = 1,0177x + 1,5032	y = 1,0116x + 1,4071	y = 1,0101x + 1,1473	y = 1,0024x + 0,7224	y = 0,9145x + 1,3872
17	y = 0,9099x + 0,6327	y = 1,015x + 0,7778	y = 1,0197x + 0,9918	y = 1,0308x + 1,0422	y = 1,048x + 0,8165	y = 1,0536x + 0,8004	y = 1,0442x + 0,9702	y = 1,0344x + 0,8543	y = 1,0225x + 0,8745	y = 1,022x + 0,4214	y = 0,9003x - 0,2337	y = 0,7685x + 0,4667
18	y = 0,634x + 0,0677	y = 0,785x + 0,3841	y = 1,0143x + 0,5107	y = 1,0557x + 0,5796	y = 1,089x + 0,392	y = 1,0958x + 0,4296	y = 1,0828x + 0,4868	y = 1,0609x + 0,5237	y = 1,0651x - 0,3666	y = 0,7915x - 0,3299	0	
19	0	0	0	y = 1,0762x + 0,2746	y = 1,2358x + 0,1505	y = 1,221x + 0,5456	y = 1,1906x + 0,6173	y = 1,1789x - 0,0508	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	y = 1,2955x + 0,7958	y = 1,2959x + 0,8523	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.2.2: Συσχέτιση Monofacial → Tracker Μονού Άξονα

Αντίστοιχα με την ενότητα 7.2.1, στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η ανάλυση που έγινε για την εύρεση των σχέσεων που αντιστοιχούν στην συσχέτιση της παραγωγής monofacial πάρκου και με tracker μονού άξονα πάρκο.

Επομένως, σε ένα αρχείο Excel ενώνονται οι 15 χρονοσειρές του Monofacial πάρκου και οι αντίστοιχες 15 του πάρκου με tracker μονού άξονα και απεικονίζονται όλα τα δεδομένα σε ένα διάγραμμα. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:

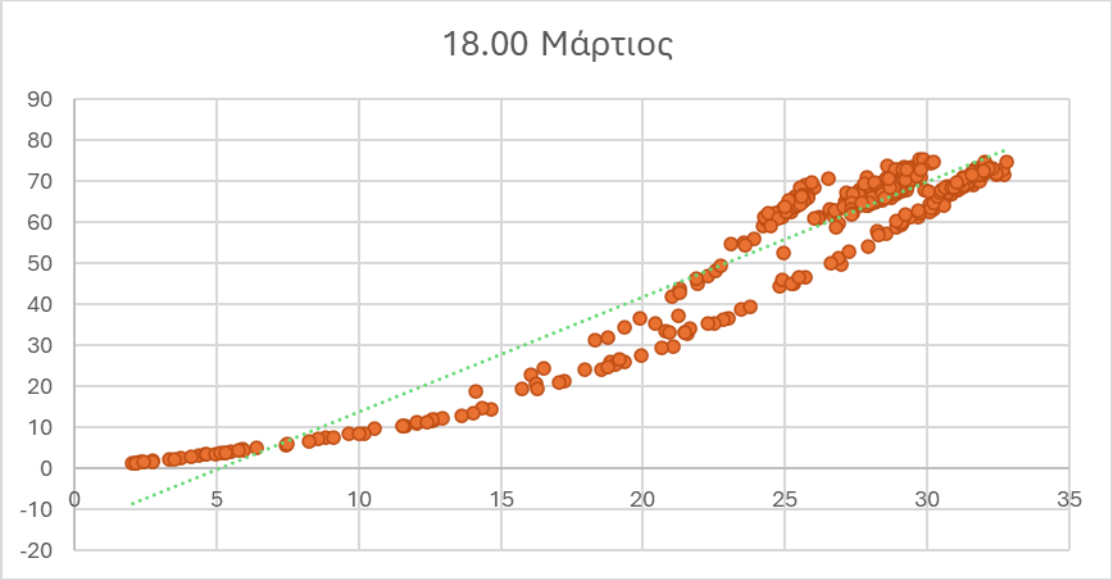


Σχήμα 35. Συσχέτιση Monofacial και μονού άξονα tracker πάρκο.

Σε αντίθεση με την συσχέτιση που είχαν τα πάρκα monofacial και bifacial , εδώ η συσχέτιση είναι πιο σύνθετη. Είναι αναμενόμενο να υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην παραγωγή από ένα monofacial πάρκο συγκριτικά με ένα πάρκο με tracker μονού άξονα, για λόγους που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια.

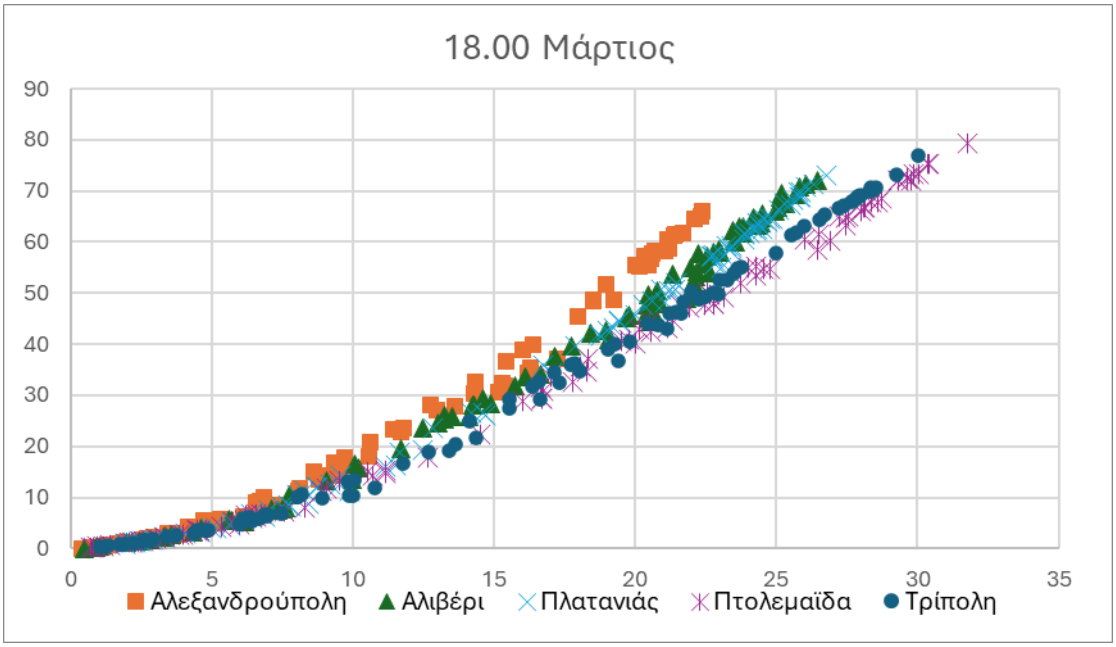
Για να βρεθούν πιο ακριβείς σχέσεις συσχετίσεων, οι χρονοσειρές διαχωρίζονται στους δώδεκα μήνες του χρόνου και κάθε ώρα της ημέρας. Συνεπώς, η ανάλυση θα δώσει μαθηματικές σχέσεις διαφορετικές για κάθε μήνα και για κάθε ώρα της ημέρας, δηλαδή 24ώρες * 12 μήνες= 288 σχέσεις. Προφανώς, τις νυχτερινές ώρες που δεν παράγουν τα φωτοβολταϊκά πάρκα, οι τιμή είναι ίση με μηδέν.

Παρατηρήθηκε, κυρίως σε πρωινές ή απογευματινές ώρες να εμφανίζονται τρεις διαφορετικές κορυφές στα διαγράμματα, όπως για παράδειγμα σ’ αυτό του ακόλουθου σχήματος.



Σχήμα 36. Συσχέτιση 18.00 τον Μάρτιο.

Στο Σχήμα 36 απεικονίζονται στο διάγραμμα οι 15 χρονοσειρές μαζί και στο Σχήμα 37 έχει γίνει διαφοροποίηση των σημείων με βάση την περιοχή. Φαίνεται, ότι οι τιμές της Αλεξανδρούπολης έχουν διαφορετική κλίση, αντίστοιχα το Αλιβέρι και ο Πλατανιάς έχουν πολύ κοντινή συσχέτιση μεταξύ τους αλλά διαφορετική από της Αλεξανδρούπολης και από την Πτολεμαΐδα και την Τρίπολη μαζί, που επίσης οι δύο τελευταίες έχουν πολύ κοντινή παραγωγή μαζί.



Σχήμα 37.Συσχέτιση 18.00 τον Μάρτιο με διαχωρισμένες τις περιοχές.

Την παραπάνω απεικόνιση, την δικαιολογεί η διαφορά του γεωγραφικού μήκους μεταξύ των περιοχών. Συγκεκριμένα, τα γεωγραφικά μήκη των πέντε περιοχών είναι:

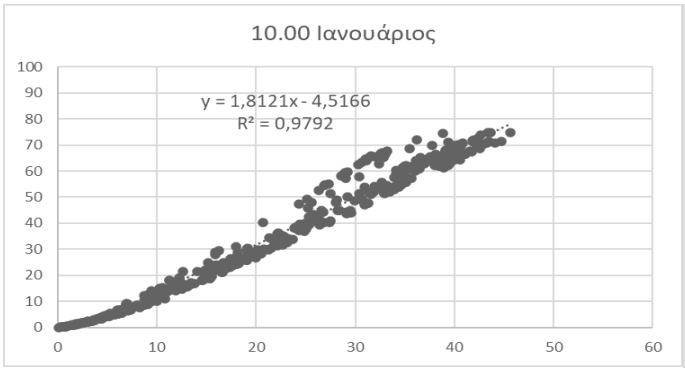
Περιοχή	Γεωγραφικό Μήκος
Αλεξανδρούπολη	25.87°
Αλιβέρι	24.05°
Πτολεμαΐδα	21.68°
Πλατανιάς Χανίων	23.84°
Τρίπολη	22.38°

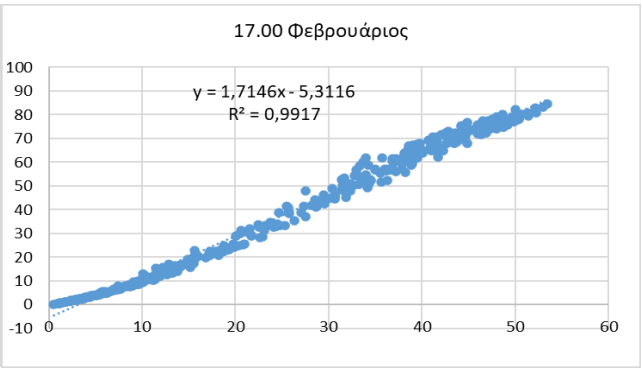
Ο ανωτέρω πίνακας επιβεβαιώνει ότι Αλιβέρι και Πλατανιάς Χανίων έχουν σχεδόν ίσο γεωγραφικό μήκος, αντίστοιχα και η Πτολεμαΐδα με την Τρίπολη και τέλος η Αλεξανδρούπολη έχει άλλη τιμή γεωγραφικού μήκους.

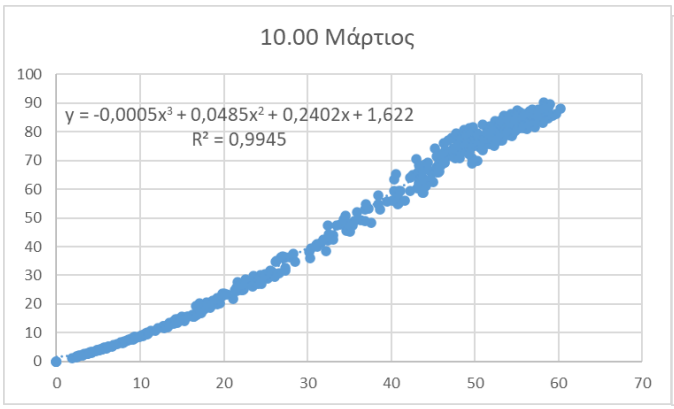
Η Πτολεμαΐδα και η Τρίπολη ανήκουν στον κύριο ηπειρωτικό κορμό της χώρας, όπου είναι εφικτή η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων, σε αντίθεση με την Αλεξανδρούπολη και τον Πλατανιά με το Αλιβέρι, που το γεωγραφικό τους μήκος αντιστοιχεί σε μεγάλο βαθμό σε θαλάσσια περιοχή της Ελλάδος. Οπότε, για τις ώρες των μηνών που εμφανίζονται οι τρεις αυτές διαφορετικές κορυφές, επιλέχθηκε για την εξαγωγή της σχέσης συσχέτισης να συνυπολογίζονται μόνο οι τιμές παραγωγής από τα πάρκα που είναι στην περιοχή της Τρίπολης και της Πτολεμαΐδας.

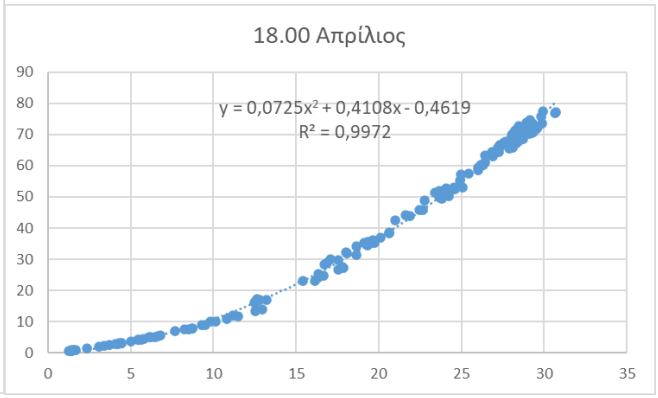
Η παραγωγή από monofacial πάρκο τις πρωινές και απογευματινές ώρες είναι αρκετά χαμηλή και η αντίστοιχη παραγωγή από το πάρκο με tracker μονού άξονα είναι αρκετά παραπάνω, δεδομένου ότι ακολουθεί την πορεία του ήλιου από Ανατολή προς Δύση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, πρωινές και απογευματινές ώρες, η σχέση της παραγωγής μεταξύ των δύο αυτών πάρκων να μην είναι γραμμική, δηλαδή της μορφής **y=A*x+B** αλλά να φτάνει μέχρι και τετάρτου βαθμού, **$y=A*x^4+B*x^3+Γ*x^2+Δ*x+E$**.

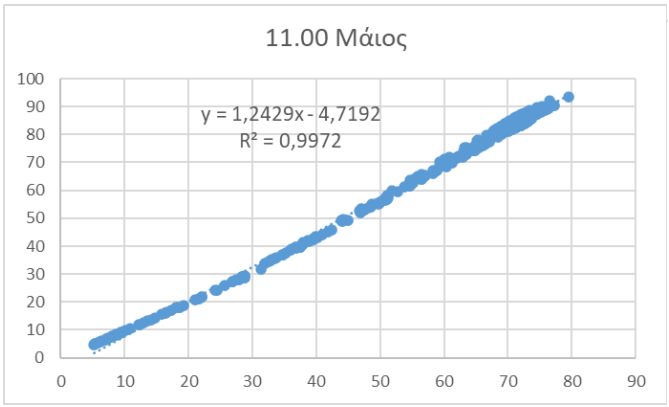
Ενδεικτικά διαγράμματα από διαφορετικές ώρες και μήνες ακολουθούν στην επόμενη σελίδα.

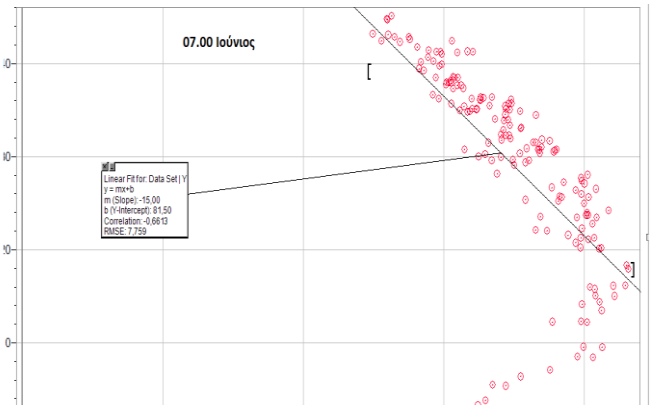

10.00 Ιανουάριος
y = 1,8121x - 4,5166
R² = 0,9792

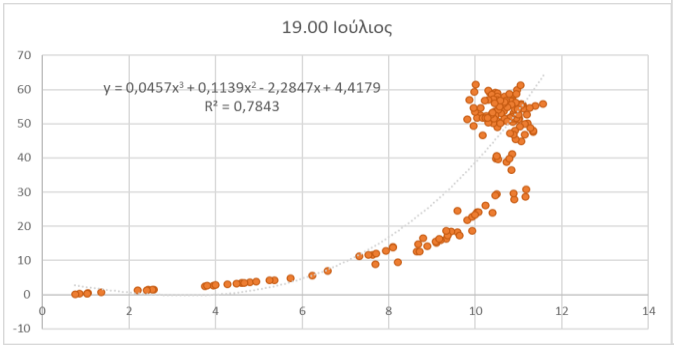

17.00 Φεβρουάριος
y = 1,7146x - 5,3116
R² = 0,9917

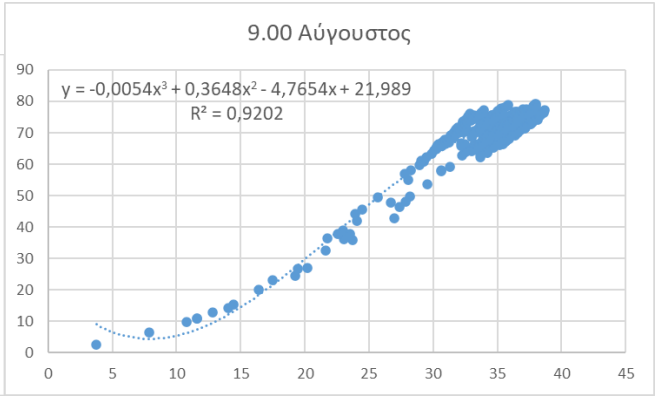

10.00 Μάρτιος
y = -0,0005x³ + 0,0485x² + 0,2402x + 1,622
R² = 0,9945

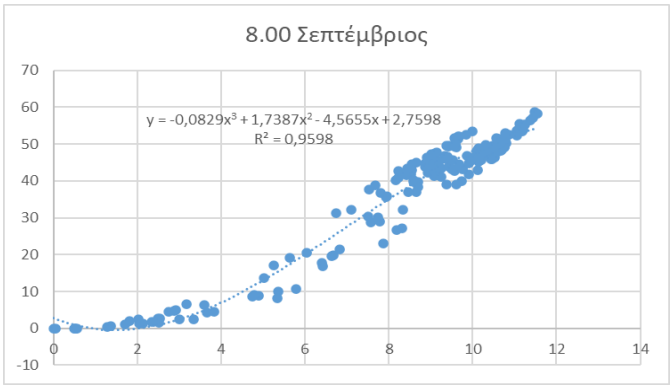

18.00 Απρίλιος
y = 0,0725x² + 0,4108x - 0,4619
R² = 0,9972

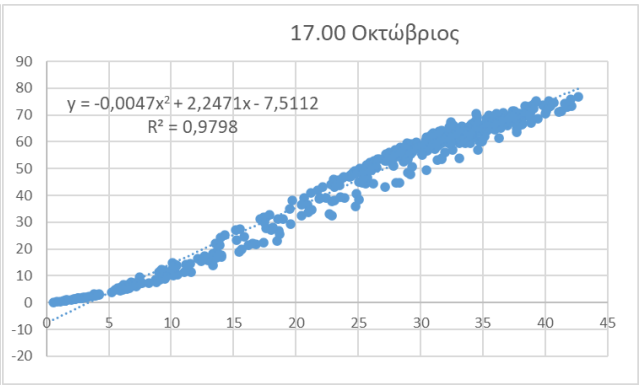

11.00 Μάιος
y = 1,2429x - 4,7192
R² = 0,9972

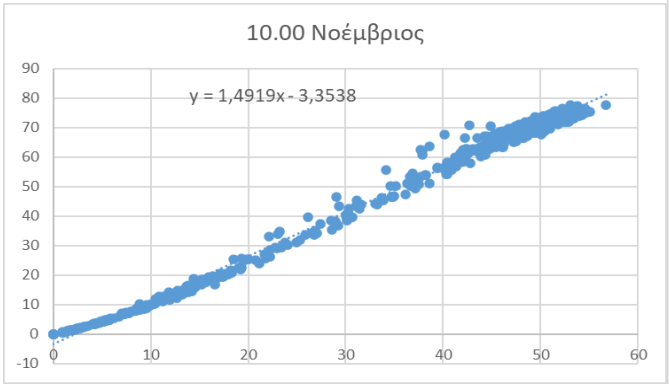

07.00 Ιούνιος

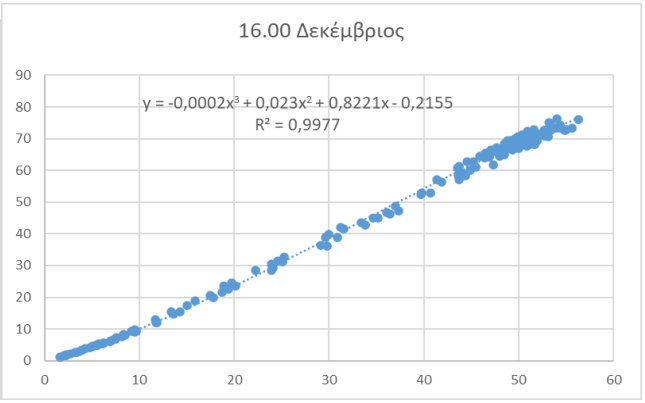

19.00 Ιούλιος
y = 0,0457x³ + 0,1139x² - 2,2847x + 4,4179
R² = 0,7843


9.00 Αύγουστος
y = -0,0054x³ + 0,3648x² - 4,7654x + 21,989
R² = 0,9202









Στις εξισώσεις η μεταβλητή y αντιστοιχεί στην παραγωγή από πάρκο με tracker μονού άξονα και η μεταβλητή x στην παραγωγή από Monofacial πάρκο. Επομένως, γνωρίζοντας την παραγωγή από το monofacial πάρκο μπορεί να υπολογιστεί η παραγωγή από ένα πάρκο με tracker μονού άξονα, εφαρμόζοντας τις εξισώσεις. Στην επόμενη σελίδα είναι όλες οι εξισώσεις συγκεντρωτικά:

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	y = 9,9913x + 0,0877	y = 6,1478x + 2,1675	y=-15x+81,5 για x[2.5 , 4] αλλιώς y=x
8	0	0	y = 5,1988x - 1,1773	y = -0,0421x3 + 0,9651x2 - 1,0284x - 0,8511	y =0.3011χ2-0.9484χ+0.4874	y = 0,3163x2 - 0,6748x - 3,0576
9	y = 3,9571x - 0,6884	y = 2,8099x - 2,3362	y = -0.0035χ3+0.1948χ2-0.4355χ+1.265	y = -0.0001χ4+0.0089χ3-0.1601χ2+2.125χ-3.4604	y = 0,0364x2 + 0,651x - 1,5299	y = -0.0002χ4+0.0163χ3-0.3742χ2+4.1263χ-8.5282
10	y = 1,8121x - 4,5166	y = 1,7444x - 6,1483	y = -0.0005χ3+0.0485χ2+0.2402χ+1.622	y = -0.0003χ3+0.041χ2+0.124χ+3.3549	y = 1,5199x - 7,3551	y = -0.0004χ3+0.445χ2+0.0407χ+2.8017
11	y = 1,3092x - 3,2748	y = 1,3234x - 4,252	y = 1,2877x - 4,5584	y = 1,2501x - 4,396	y = 1,2429x - 4,7192	y = 1,2612x - 5,0803
12	y = 1,1128x - 1,3247	y = 1,1225x - 1,7339	y = 1,1102x - 1,6648	y = 1,0976x - 1,6215	y = 1,0919x - 1,5535	y = 1,0903x - 1,0873
13	y = 1,0331x - 0,1127	y = 1,0395x - 0,219	y = 1,039x - 0,1697	y = 1,0371x - 0,114	y = 1,0358x - 0,0774	y = 1,0357x - 0,031
14	y = 1,0394x - 0,2077	y = 1,0389x - 0,2023	y = 1,0449x - 0,2942	y = 1,0539x - 0,5267	y = 1,057x - 0,593	y = 1,0518x - 0,3929
15	y = 1,131x - 1,4265	y = 1,1177x - 1,5011	y = 1,1225x - 1,5221	y = 1,146x - 2,316	y = 1,1568x - 2,7002	y = 1,146x - 2,3737
16	y = 1,3524x - 3,1644	y = 1,3107x - 3,6669	y = 1,3132x - 4,021	y =-0.0002χ3+0.0216χ2+0.5131χ+1.5384	y = 1,3711x - 5,8606	y = 1,3606x - 6,0206
17	y = 1,8638x - 3,4743	y = 1,7146x - 5,3116	y =-0.0003χ3+0.0363χ2+0.4808χ+0.5653	y = 0,0139x2 + 0,8998x - 1,4427	y = 0,0172x2 + 0,7472x - 0,6044	y = 0,0168x2 + 0,72x - 0,4069
18	y = 1,3092x - 3,2748	y = 2,1616x - 2,5136	y = 0,0454x2 + 1,2567x - 2,9087	y = 0,0725x2 + 0,4108x - 0,4619	y = 0,09x2 - 0,2243x + 1,7976	y = 0,0862x2 - 0,4048x + 3,0265
19	0	0	y = 0,7242x2 + 0,8422x - 0,1274	y = 0,9768x2 - 1,3041x - 0,6367	y = 5,4543x - 4,447	y=-2,158x+23,5 για x[8.5 , 11] αλλιώς y=x
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0

1	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	y=3,745x+12,253	y = 7,9313x + 2,0255	0	0	0	0
9	y=3,065x+17,02 για x>10 αλλιώς y=2x	y = 0,3124x2 + 1,8723	y = -0,0829x3 + 1,7387x2 - 4,5655x + 2,759	y = 4,9831x - 0,716	y = 4,8055x - 0,0222	0
10	y = -0.0002χ4+0.0144χ3-0.2471χ2+2.4555χ-3.741	y = -0.0054χ3+0.3648	y = -0,0022x3 + 0,1545x2 - 0,6877x + 3,374	y = -0.0018χ3+0.1125χ2+0.1475χ+0.6678	y = 2,1606x + 0,2772	y = -0,1074x2 + 4,7382x - 1,676
11	y = 1,5835x - 7,3679	y = -0.0008χ3+0.0823	y = -0.0003χ3+0.0347χ2+0.4236χ+0.6927	y = -0.0002χ3+0.0267χ2+0.6422χ+0.3071	y = -0.0004χ3+0.0336χ2+0.7175χ	y = -0.0014χ3+0.0879χ2+0.4491χ+0.2764
12	y = 1,2795x - 5,2502	y = 1,2536x - 3,5474	y = 1,2377x - 3,7863	y = 1,2085x - 2,9897	y = 1,2061x - 2,1595	y = 1,2609x - 2,6709
13	y = 1,0954x - 0,9469	y = 1,0985x - 1,223	y = 1,0912x - 1,4007	y = 1,0733x - 0,8984	y = 1,0701x - 0,723	y = 1,0903x - 1,0279
14	y = 1,0387x - 0,1377	y = 1,0383x - 0,1245	y = 1,0354x - 0,1088	y = 1,0313x - 0,0564	y = 1,0278x - 0,0407	y = 1,0281x - 0,0787
15	y = 1,0476x - 0,2699	y = 1,0491x - 0,2951	y = 1,0569x - 0,499	y = 1,0666x - 0,7032	y = 1,065x - 0,6036	y = 1,0528x - 0,4264
16	y = 1,137x - 2,2278	y = 1,1433x - 2,4102	y = 1,1562x - 2,131	y = 1,187x - 2,2894	y = 1,1989x - 2,2568	y = 1,1678x - 1,6761
17	y = 1,3387x - 5,5503	y = 0.0015χ2+1.2279	y = -0.0003χ3+0.0327χ2+0.3287χ+2.413	y = -0.0004χ3+0.0369χ2+0.4034χ+1.4867	y = -0.0004χ3+0.0324χ2+0.7084χ	y = -0.0002χ3+0.023χ2+0.8221χ-0.2155
18	y = 0.0147χ2+0.7958χ-1.0017	y = -0.0011χ3+0.0982	y = -0,0013x3 + 0,1016x2 - 0,3507x + 2,592	y = -0.0016χ3+0.1009χ2+0.3346χ-0.0886	y = -0.0007χ3+0.0376χ2+1.5343χ	y = -0.0034χ2+2.0972χ-2.3252
19	y = 0,0731x2 - 0,1316x + 1,9949	y = -0,0076x3 + 0,396	y = -0,0074x3 + 0,2927x2 - 0,0381x - 0,760	y = 0,0679x2 + 1,3236x + 0,3145	y = -0.0854χ3+0.6206χ2+1.0133χ	0
20	y = 0.0457χ3+0.1139χ2-2.2847χ+4.4179	y = 5,0176x + 1,3187	y = 5,1744x - 0,1897	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0

Κεφάλαιο 8: Εφαρμογή των συσχετίσεων και Αποτελέσματα

Στις παραπάνω ενότητες του Κεφαλαίου 7, παρατίθενται οι μαθηματικές σχέσεις μέσω των οποίων γίνεται ο υπολογισμός της παραγωγής ενός bifacial πάρκου και ενός πάρκου με tracker μονού άξονα, γνωρίζοντας την αντίστοιχη παραγωγή από ένα monofacial πάρκο. Για την εξαγωγή των παραπάνω σχέσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι 15 από τις 20 χρονοσειρές παραγωγής. Στις 5 χρονοσειρές που δεν χρησιμοποιήθηκαν θα εφαρμοστούν οι ευρεθείσες σχέσεις και θα συγκριθούν οι πραγματικές τιμές που εξήχθησαν από το PVsyst με αυτές που προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων.
Από την προσομοίωση των πάρκων, όπως αυτές περιεγραφήκαν στο Κεφάλαιο 7, οι 5 χρονοσειρές στις οποίες θα εφαρμοστούν οι σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση, είναι:

Περιοχή	Μετεωρολογική Χρονιά
Αλεξανδρούπολη	2019
Αλιβέρι	2013
Πτολεμαΐδα	2015
Πλατανιάς Χανίων	2017
Τρίπολη	2019

Για κάθε μία από τις παραπάνω πέντε περιοχές με τα μετεωρολογικά δεδομένα της αντίστοιχης χρονιάς που αναγράφεται στην δεύτερη στήλη του ανωτέρω πίνακα, έχουν υπολογιστεί από το PVsyst χρονοσειρές για Monofacial, Bifacial και με Tracker μονού άξονα πάρκο.

8.1: Εφαρμογή σχέσεων από Monofacial σε Bifacial πάρκο

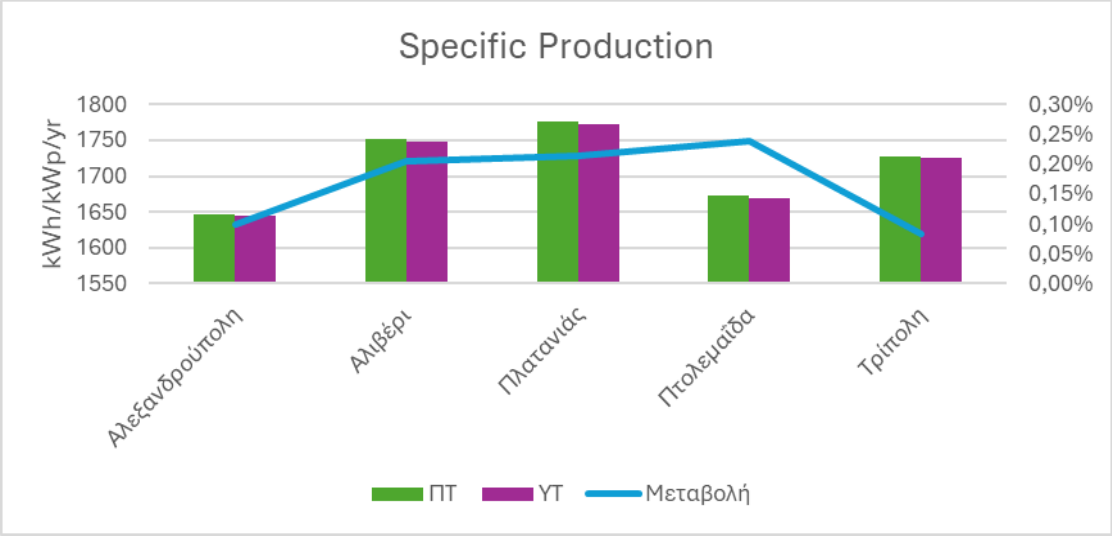
Σύμφωνα με την ανάλυση που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 7.2.1, γνωρίζοντας την παραγωγή από ένα Monofacial πάρκο μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή των σχέσεων η αντίστοιχη παραγωγή από Bifacial πάρκο. Εφαρμόζονται οι σχέσεις στην χρονοσειρά παραγωγής για Monofacial πάρκο που έχει προκύψει από το PVsyst και η Υπολογιζόμενη παραγωγή που εξάγεται ως αποτέλεσμα συγκρίνεται με την παραγωγή που έχει υπολογιστεί από την προσομοίωση του Bifacial πάρκου στο PVsyst.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα συσχέτισης Monofacial-Bifacial πάρκου.

[kWh/kWp/yr]	**Monofacial**	**Πραγμ. Τιμή (PVsyst) Bifacial**	**Υπολογ. Τιμή (συσχέτιση) Bifacial**	***Ποσοστιαία Μεταβολή***
Αλεξανδρούπολη	1571,6	1646,4	1644,8	0,10%

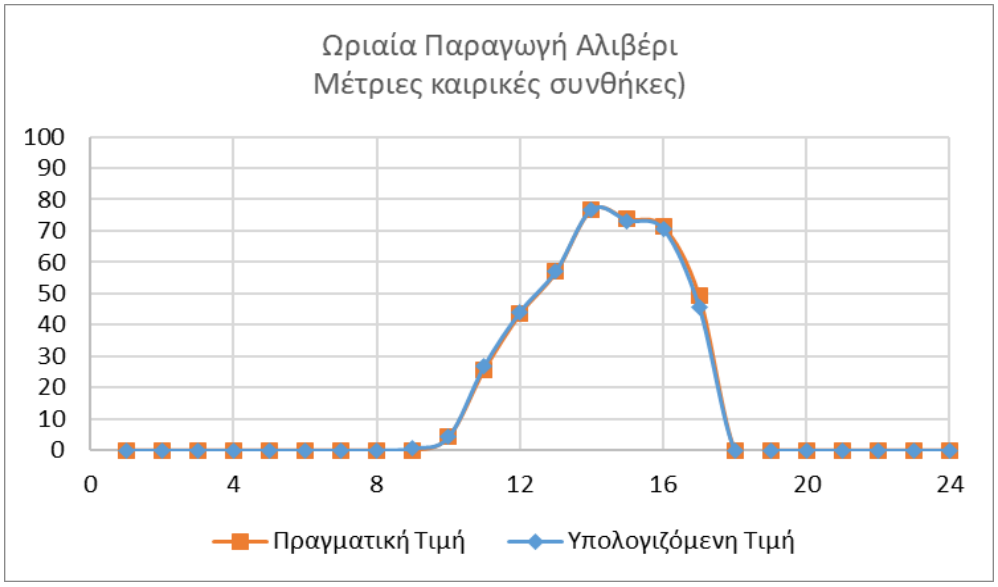
Αλιβέρι	1675,3	1752,0	1748,5	0,20%
Πλατανιάς	1700,7	1776,8	1773,0	0,21%
Πτολεμαΐδα	1599,4	1673,5	1669,5	0,24%
Τρίπολη	1656,0	1727,8	1726,3	0,08%

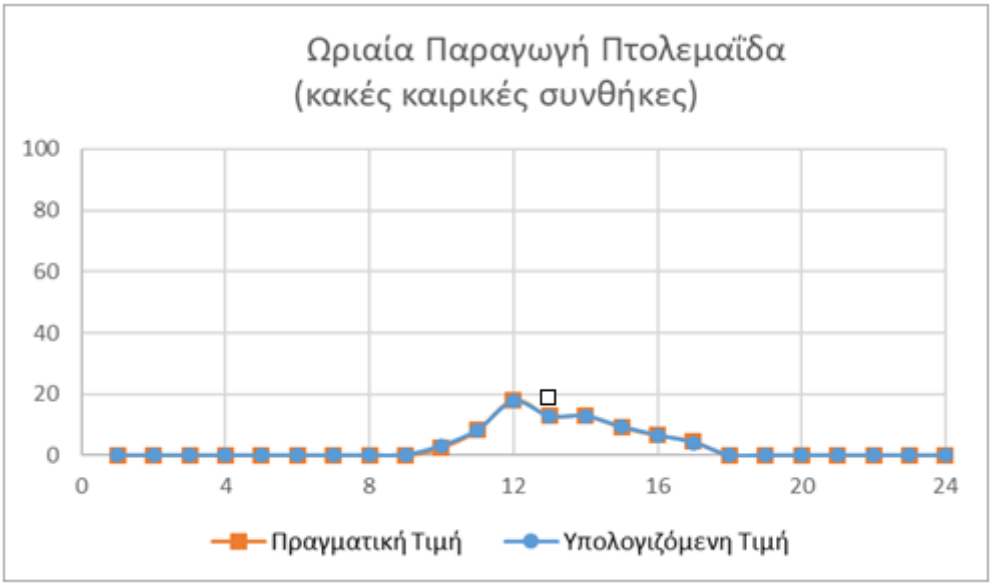
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακας 1 η μεταβολή της παραγωγής που υπολογίστηκε για το Bifacial πάρκο είναι πάντα μικρότερη του 1%, η οποία είναι σχεδόν αμελητέα. Στο ακόλουθο γράφημα τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της κανονικοποιημένης παραγωγής του bifacial πάρκου με βάση την πραγματική χρονοσειρά και την υπολογιζόμενη χρονοσειρά και στον δεξί άξονα με την μπλε γραμμή η μεταβολή της παραγωγής αυτών των δύο χρονοσειρών.

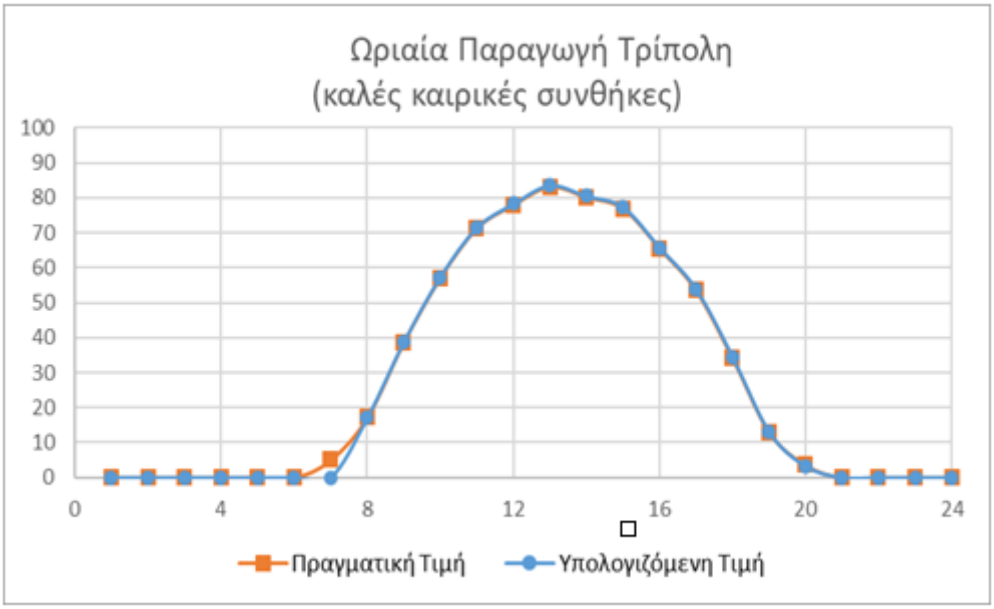


Σχήμα 38. Σύγκριση κανονικοποιημένης παραγωγής από τις ΠΤ και τις ΥΤ.

Στα ακόλουθα διαγράμματα αποτυπώνεται η ημερήσια παραγωγή όπως υπολογίστηκε από την προσομοίωση του PVsyst και όπως υπολογίστηκε με την χρήση των σχέσεων συσχέτισης. Οι μέρες αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, δηλαδή με ηλιοφάνεια, με συννεφιά και με ενδιάμεσο καιρό. Σκοπός είναι να αποδειχτεί ότι οι σχέσεις που υπολογίστηκαν αντιπροσωπεύουν εξίσου καλά τόσο μέρες με καλές καιρικές συνθήκες όσο και με κακές ή μέτριες καιρικές συνθήκες.


Ωριαία Παραγωγή Αλιβέρι
Μέτριες καιρικές συνθήκες)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
4
8
12
16
20
24
Πραγματική Τιμή
Υπολογιζόμενη Τιμή


Ωριαία Παραγωγή Πτολεμαΐδα
(κακές καιρικές συνθήκες)
100
80
60
40
20
0
0
4
8
12
16
20
24
Πραγματική Τιμή
Υπολογιζόμενη Τιμή



Τα ανωτέρω τρία διαγράμματα επιβεβαιώνουν ότι οι σχέσεις που υπολογίστηκαν και εφαρμόστηκαν συσχετίζουν σχεδόν άριστα την παραγωγή που έχει υπολογιστεί μέσω του PVsyst με την υπολογιζόμενη από τις σχέσεις που είναι αποτέλεσμα της ανάλυσης.

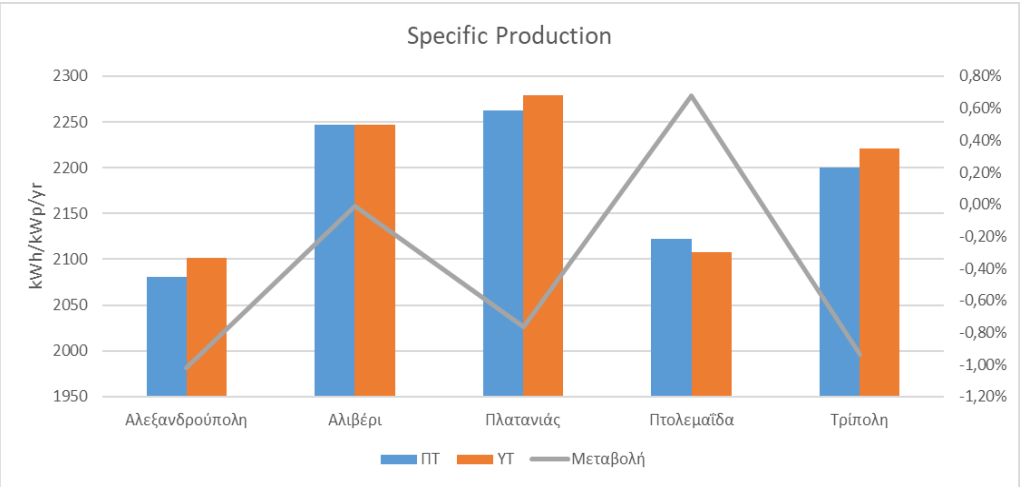
8.2: Εφαρμογή σχέσεων από Monofacial σε πάρκο με Tracker μονού άξονα

Σύμφωνα με την ανάλυση που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 7.2.1, γνωρίζοντας την παραγωγή από ένα Monofacial πάρκο μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή των σχέσεων η αντίστοιχη παραγωγή από πάρκο με tracker μονού άξονα. Εφαρμόζονται οι σχέσεις στην χρονοσειρά παραγωγής για Monofacial πάρκο που έχει προκύψει από το PVsyst και η Υπολογιζόμενη παραγωγή που εξάγεται ως αποτέλεσμα συγκρίνεται με την παραγωγή που έχει υπολογιστεί από την προσομοίωση του πάρκου με tracker μονού άξονα στο PVsyst.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα συσχέτισης Monofacial-Tracker μονού άξονα πάρκου.

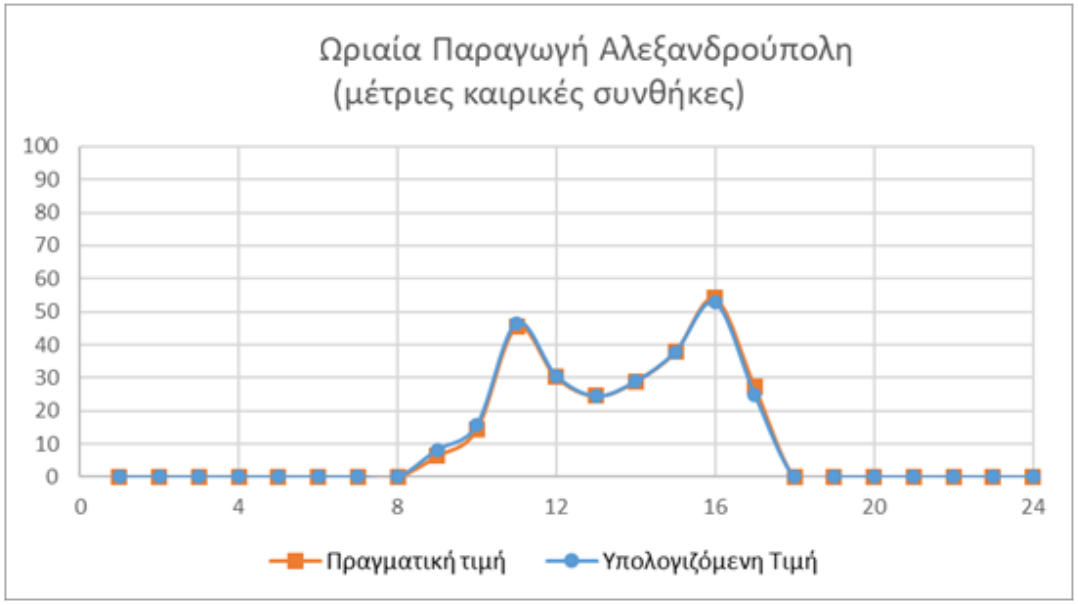
[kWh/kWp/yr]	Monofacial	Πραγμ. Τιμή (PVsyst) Tracker	Υπολογ. Τιμή (συσχέτιση) Tracker	Ποσοστιαία Μεταβολή
Αλεξανδρούπολη	1571,6	2080,62	2101,82	-1,02%
Αλιβέρι	1675,3	2246,93	2247,14	-0,01%
Πλατανιάς	1700,7	2262,41	2279,64	-0,76%
Πτολεμαΐδα	1599,4	2122,24	2107,90	0,68%
Τρίπολη	1656,0	2200,10	2220,76	-0,94%

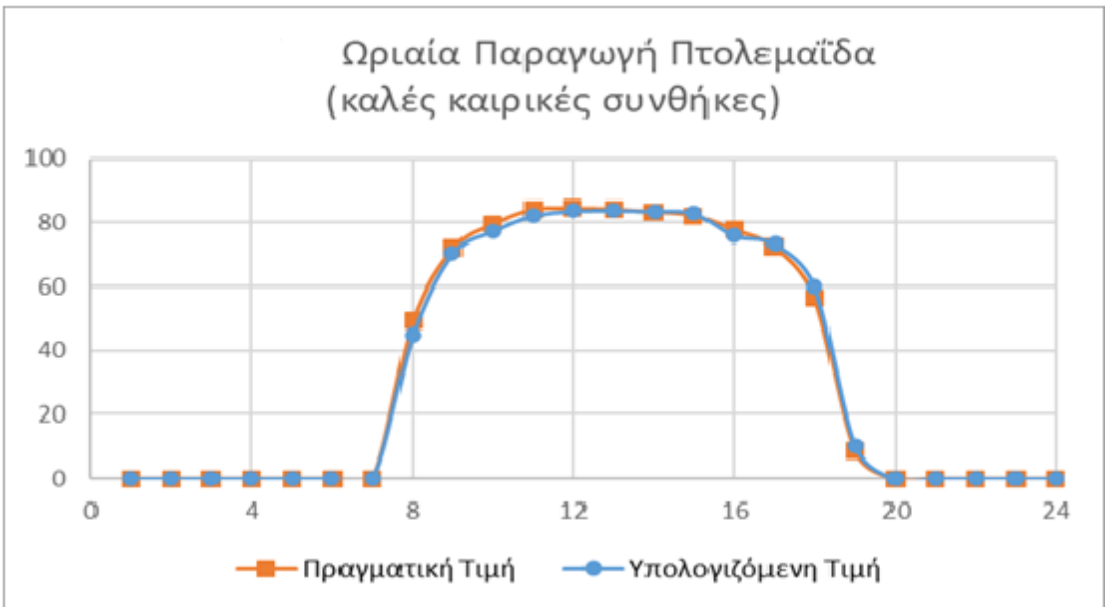
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακας *2* η μεταβολή της παραγωγής που υπολογίστηκε για το Bifacial πάρκο είναι πάντα μικρότερη του 1,02%, η οποία είναι σχεδόν αμελητέα. Στο ακόλουθο γράφημα τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της κανονικοποιημένης παραγωγής του bifacial πάρκου με βάση την πραγματική χρονοσειρά και την υπολογιζόμενη χρονοσειρά και στον δεξί άξονα με την μπλε γραμμή η μεταβολή της παραγωγής αυτών των δύο χρονοσειρών.



Σχήμα 39. Σύγκριση κανονικοποιημένης παραγωγής από τις ΠΤ και τις ΥΤ.

Στα ακόλουθα διαγράμματα αποτυπώνεται η ημερήσια παραγωγή όπως υπολογίστηκε από την προσομοίωση του PVsyst και όπως υπολογίστηκε με την χρήση των σχέσεων συσχέτισης. Οι μέρες αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, δηλαδή με ηλιοφάνεια, με συννεφιά και με ενδιάμεσο καιρό. Σκοπός είναι να αποδειχτεί ότι οι σχέσεις που υπολογίστηκαν αντιπροσωπεύουν εξίσου καλά τόσο μέρες με καλές καιρικές συνθήκες όσο και με κακές ή μέτριες καιρικές συνθήκες.





Τα ανωτέρω τρία διαγράμματα επιβεβαιώνουν ότι οι σχέσεις που υπολογίστηκαν και εφαρμόστηκαν συσχετίζουν σχεδόν άριστα την παραγωγή που έχει υπολογιστεί μέσω του PVsyst με την υπολογιζόμενη από τις σχέσεις που είναι αποτέλεσμα της ανάλυσης.

8.3: Εφαρμογή σχέσεων σε διαφορετική περιοχή και για διαφορετικό έτος εξέτασης

Οι χρονοσειρές που παρήχθησαν από το PVsyst και χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων και για την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας των σχέσεων, ήταν από συγκεκριμένες πέντε περιοχές και τα μετεωρολογικά δεδομένα από συγκεκριμένες χρονιές.

Για λόγους πληρότητας, προσομοιώθηκαν στο PVsyst πάρκα Monofacial, Bifacial και με Tracker μονού άξονα στην περιοχή του Ορχομενού Βοιωτίας με την χρήση μετεωρολογικών δεδομένων του έτους 2011. Τα αποτελέσματα ακολουθούν.

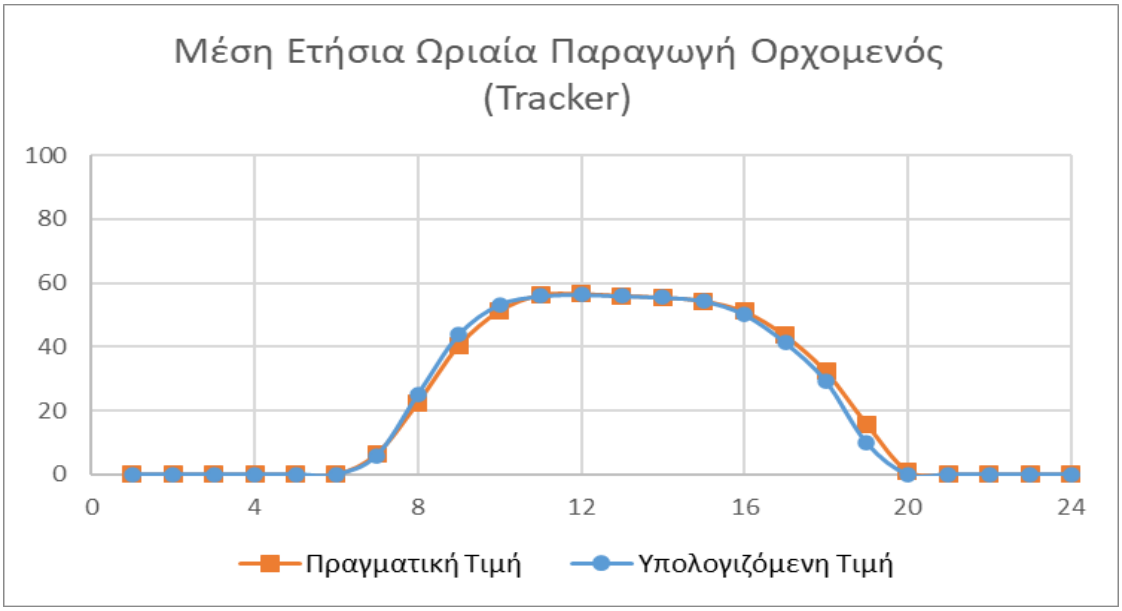
Πίνακας 3. Αποτελέσματα στην περιοχή του Ορχομενού.

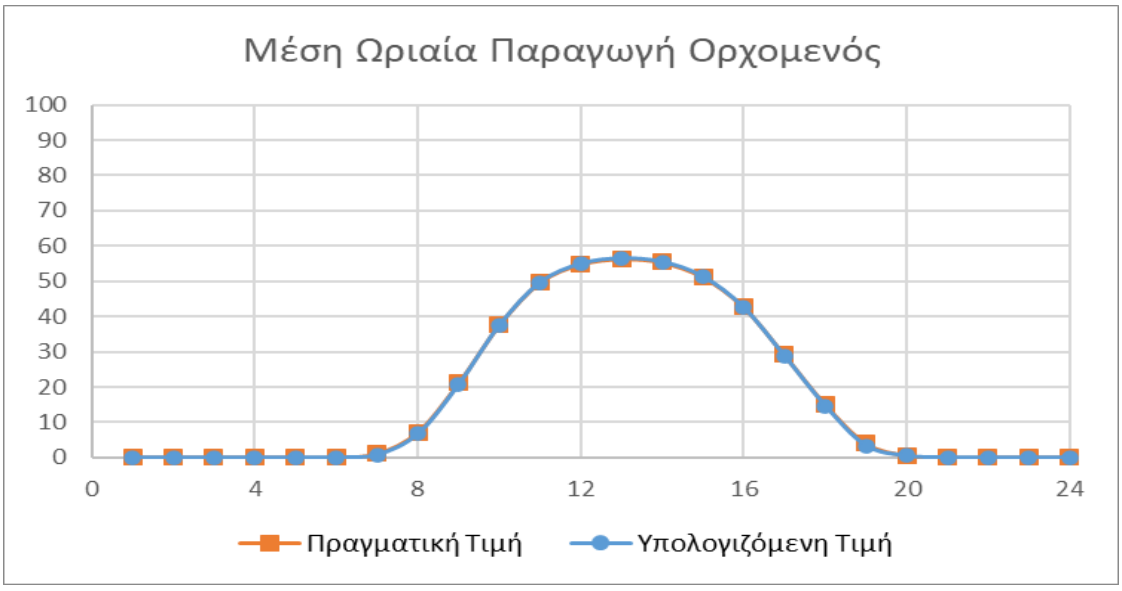
[kWh/kWp/yr]	**Monofacial**	**Πραγμ. Τιμή (PVsyst) Bifacial**	**Υπολογ. Τιμή (συσχέτιση) Bifacial**	***Ποσοστιαία Μεταβολή***
Ορχομενός	1475,12	1555,62	1544,53	0,71%
[kWh/kWp/yr]	**Monofacial**	**Πραγμ. Τιμή (PVsyst) Tracker**	**Υπολογ. Τιμή (συσχέτιση) Tracker**	**Ποσοστιαία Μεταβολή**

Ορχομενός	1475,12	1981,26	1956,59	1,2%

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακας 3, είναι εμφανές ότι οι σχέσεις που έχουν υπολογιστεί εφαρμόζονται άριστα και σε περιοχή διαφορετική από εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους και με διαφορετικής χρονιάς μετεωρολογικά δεδομένα. Η μεταβολή της πραγματικής και της υπολογιζόμενης τιμής είναι πάλι σχεδόν 1%.

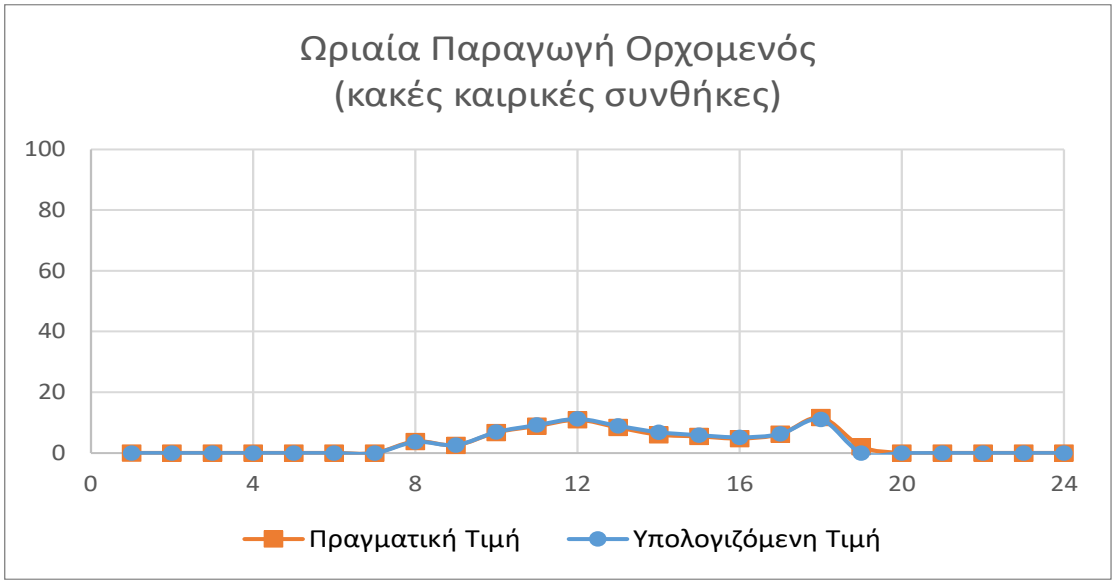
Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται η μέση ωριαία παραγωγή στην διάρκεια του έτους για το πάρκο με tracker μονού άξονα και για το πάρκο με πάνελ διπλής όψης και κάθε φορά στις πραγματικές τιμές αντιστοιχεί η παραγωγή από το πάρκο με πάνελ μονής όψης. Με βάση την χρονοσειρά από την προσομοίωση στο PVsyst και όπως υπολογίστηκε με την χρήση των σχέσεων συσχέτισης. Όπως παρατηρείται, οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται.

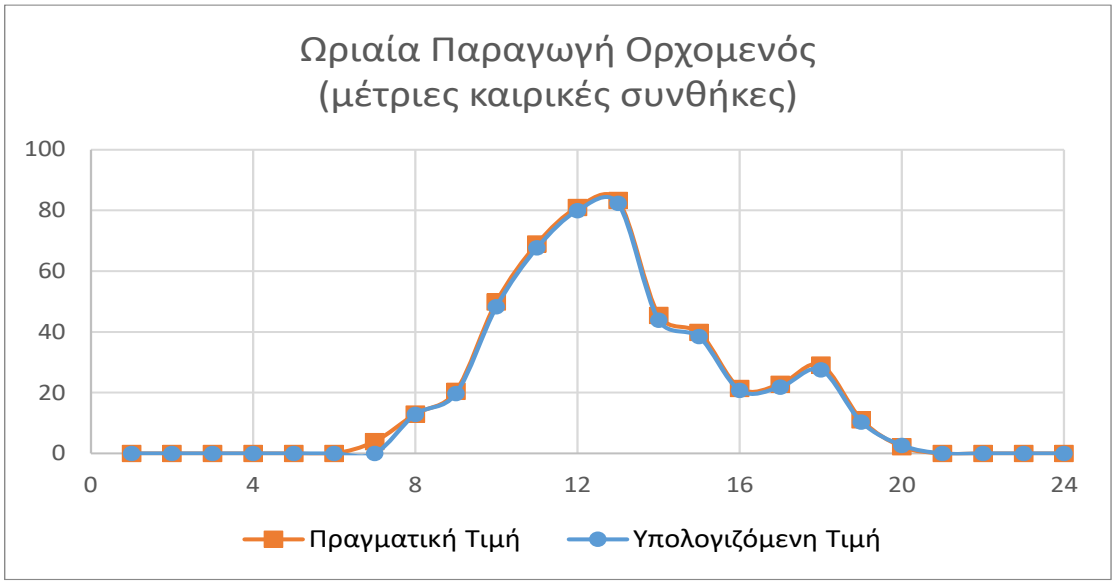


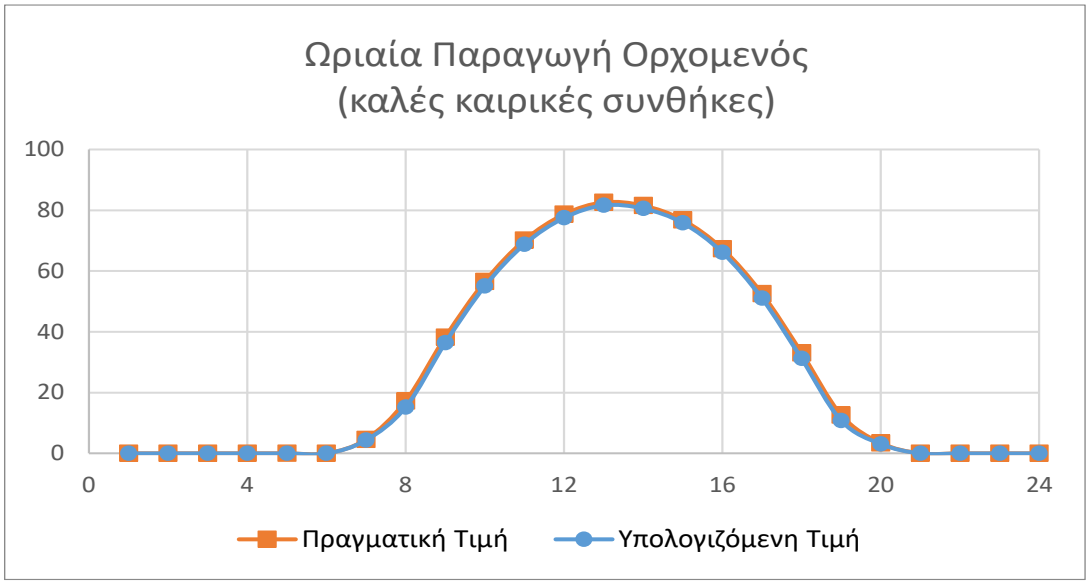


Ακολουθούν διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η ημερήσια παραγωγή όπως υπολογίστηκε από την προσομοίωση του PVsyst και όπως υπολογίστηκε με την χρήση των σχέσεων συσχέτισης. Οι μέρες αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, δηλαδή με ηλιοφάνεια, με συννεφιά και με ενδιάμεσο καιρό. Σκοπός είναι να αποδειχτεί ότι οι σχέσεις που υπολογίστηκαν αντιπροσωπεύουν εξίσου καλά τόσο μέρες με καλές καιρικές συνθήκες όσο και με κακές ή μέτριες καιρικές συνθήκες.

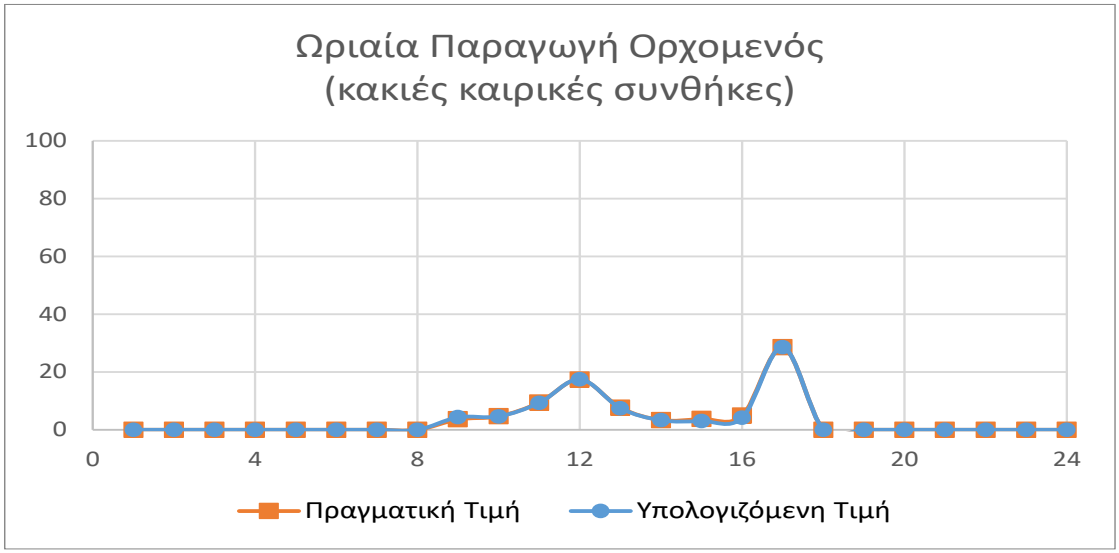
Bifacial πάρκο Ορχομενός

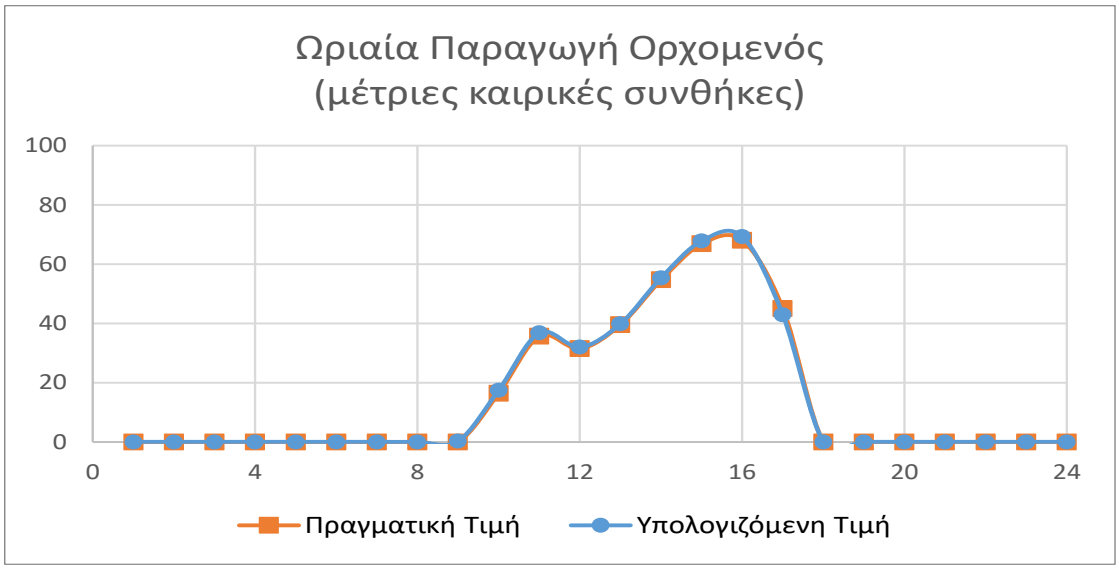


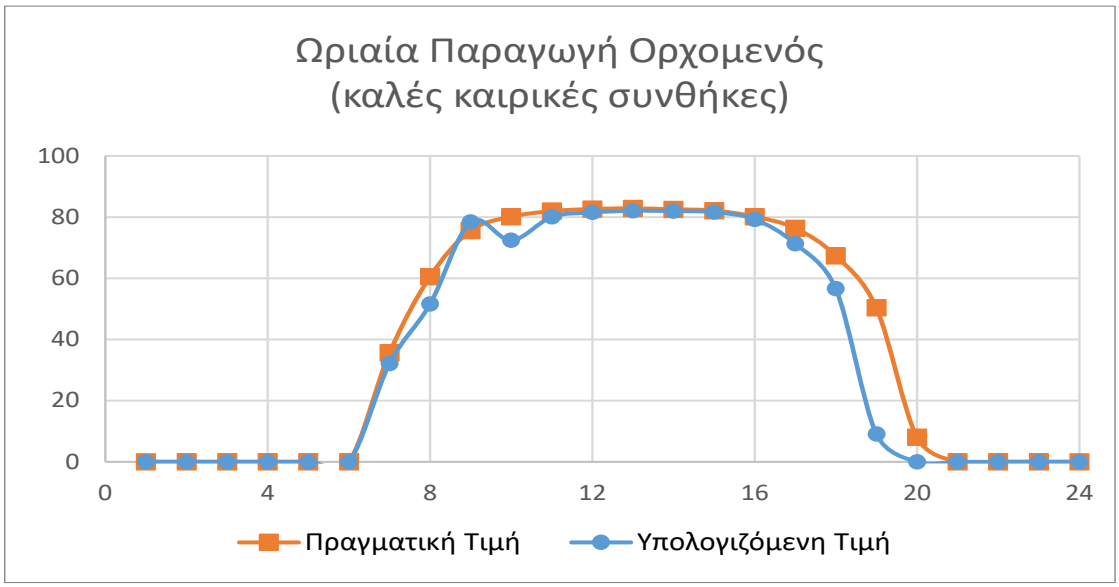




Πάρκο με tracker μονού άξονα







8.4: Στατιστικοί Δείκτες

Υπάρχουν διάφοροι στατιστικοί δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ακρίβειας προβλέψεων ή μοντέλων. Στην προκειμένη περίπτωση, χρονοσειρές επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν και προέκυψε ένα μοντέλο μαθηματικών σχέσεων που συσχετίζει την παραγωγή δύο διαφορετικών ειδών πάρκων.

Οι στατιστικοί δείκτες που υπολογίστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι οι ακόλουθοι τρεις:

- **Mean Absolute Error (MAE) Μέσο Απόλυτο Σφάλμα**

Ο MAE μετράει την μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ των πραγματικών τιμών και των υπολογιζόμενων τιμών. Αποτελεί μια ένδειξη του πόσο μακριά, κατά μέσο όρο, είναι οι προβλέψεις από τις πραγματικές τιμές.
Ο τύπος που το υπολογίζει είναι:

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|y_i - \hat{y}_i\right|.$$

Όπου, y_i = πραγματική τιμή

$\hat{y}_i$ = υπολογιζόμενη τιμή και

n= πλήθος των μετρήσεων

Ο MAE είναι εύκολος στην ερμηνεία γιατί δείχνει τη μέση απόκλιση σε μονάδες της κλίμακας των δεδομένων.

- Mean Absolute Percentage Error (MAPE) Μέσο Απόλυτο Σχετικό Σφάλμα

Ο MAPE είναι ένα ποσοστό που εκφράζει το μέσο απόλυτο σφάλμα ως ποσοστό των πραγματικών τιμών. Ο MAPE είναι χρήσιμος για την κατανόηση του σφάλματος ανεξαρτήτως της κλίμακας των δεδομένων, αφού εκφράζεται ως ποσοστό.
Ο τύπος που το υπολογίζει είναι:

$$\mathrm{MAPE} = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| ,$$

με τις μεταβλητές να είναι αντίστοιχες με αυτές του MAE.

Σημαντική παρατήρηση: ο MAPE δεν λειτουργεί καλά όταν οι πραγματικές τιμές είναι πολύ μικρές ή μηδενικές, γιατί τότε το ποσοστό μπορεί να είναι πολύ μεγάλο ή άπειρο.

- Mean Squared Error (MSE) Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα

Ο MSE είναι ο μέσος όρος των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ των πραγματικών και υπολογιζόμενων τιμών. Το MSE δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα σε μεγαλύτερα σφάλματα λόγω του τετραγωνισμού, γεγονός που το κάνει ευαίσθητο σε ακραίες τιμές.
Ο τύπος που το υπολογίζει είναι:

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2 ,$$

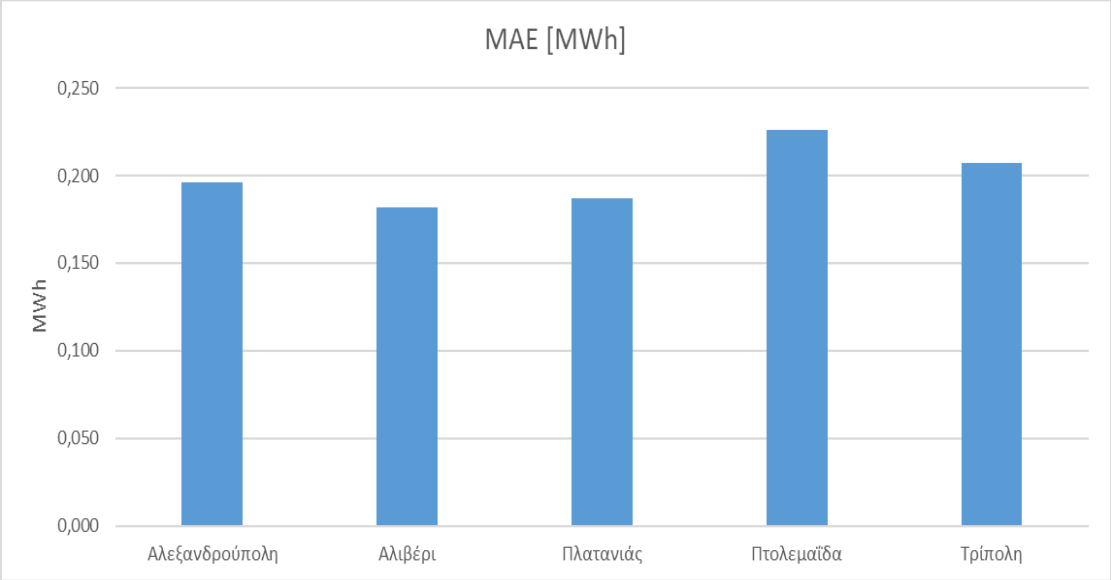
με τις μεταβλητές να είναι αντίστοιχες με αυτές του MAE.

Συγκεντρωτικά,

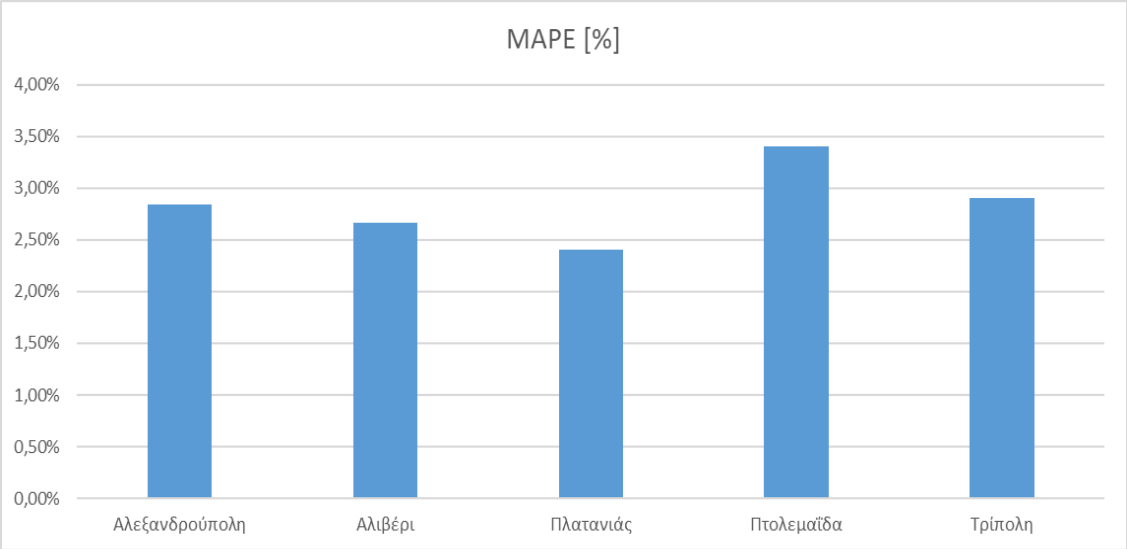
- **MAE**: Μετράει το μέσο απόλυτο σφάλμα χωρίς να δίνει έμφαση στα μεγάλα σφάλματα.
- **MAPE**: Παρέχει μια σχετική ένδειξη του σφάλματος, σε ποσοστιαία μορφή.
- **MSE**: Δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα σε μεγαλύτερα σφάλματα, λόγω του τετραγωνισμού.

Υπολογισμός ανωτέρων στατιστικών δεικτών για Bifacial πραγματικές και υπολογιζόμενες τιμές.

Σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα, το MAE φτάνει μέχρι και 0,2 MWh (ή 20 kWh) για τα 5 υπό μελέτη πάρκα.

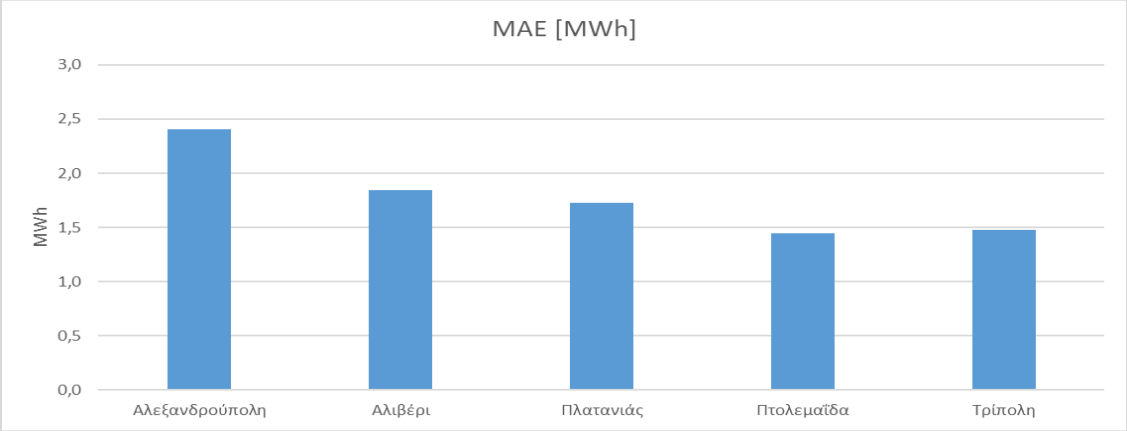


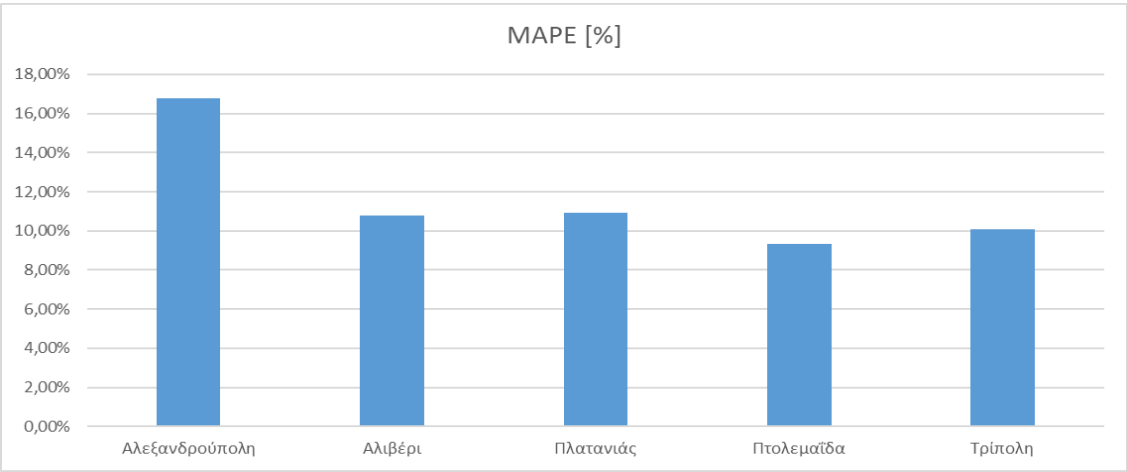
Σε συνέχεια, το MAPE επίσης κυμαίνεται σε ποσοστά χαμηλότερα του 3,5 %, που αποτελεί πολύ καλή ένδειξη για την αξιοπιστία των υπολογιζόμενων τιμών.



Τέλος, το MSE επίσης, όπως φαίνεται, κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές τιμές.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις πραγματικές και για τις υπολογιζόμενες τιμές των πάρκων με Tracker Μονού Άξονα, ακολουθούν.


MAE [MWh]
MWh
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
Αλεξανδρούπολη
Αλιβέρι
Πλατανιάς
Πτολεμαΐδα
Τρίπολη


MAPE [%]
18,00%
16,00%
14,00%
12,00%
10,00%
8,00%
6,00%
4,00%
2,00%
0,00%
Αλεξανδρούπολη
Αλιβέρι
Πλατανιάς
Πτολεμαΐδα
Τρίπολη

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα & Μελλοντικές επεκτάσεις

9.1: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκαν διάφορα ήδη πάρκων με σκοπό την εύρεση συσχετίσεων των μεταξύ τους χρονοσειρών παραγωγής.
Αρχικά, προσομοιάστηκαν διαφορετικά είδη τεχνολογιών φωτοβολταϊκών πάρκων. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν περιπτώσεις με πάνελ μονής και διπλής όψης αλλά και με σταθερή ή κινητή βάση.
Τα ΦΒ πάρκα με πάνελ διπλής όψης παράγουν περισσότερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από τα αντίστοιχα πάρκα με πάνελ μονής όψης, καθώς η οπίσθια όψη των πάνελ λειτουργεί όπως η μπροστινή, έχοντας τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η κλίση των πάνελ είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την μεγιστοποίηση της παραγωγής από το κάθε πάρκο. Αναλόγως με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που θα γίνει η εγκατάσταση του ΦΒ πάρκου, είναι βέλτιστο να επιλέγεται συναρτήσει και η κατάλληλη κλίση των πάνελ.
Ακόμα, η χρήση μηχανισμών παρακολούθησης του ήλιου αποδείχθηκε ότι αυξάνει σημαντικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το κάθε πάρκο, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της εγκατάστασης των πάνελ πάνω σε κινητές βάσεις.
Προσομοιάστηκαν στο λογισμικό του PVsyst διάφοροι συνδυασμοί κλίσης πάνελ, μονής ή διπλής όψης, με συστήματα παρακολούθησης του ήλιου και επιλέχθηκε να συγκριθούν μεταξύ τους και να εξαχθούν σχέσεις που συσχετίζουν την παραγωγή πάρκου με πάνελ μονής όψης με πάρκο με πάνελ διπλής όψης και με πάρκο με πάνελ μονής όψης και tracker μονού άξονα.
Η συσχέτιση μεταξύ των πάρκων με πάνελ μονής και διπλής όψης (δηλ. Monofacial → Bifacial) έδειξε ότι η εξάρτηση της παραγωγής είναι γραμμική. Οι σχέσεις που προκύπτουν είναι όλες της μορφής y=A*x+B, και η εφαρμογή των σχέσεων στις χρονοσειρές τεστ αλλά και σε χρονοσειρά διαφορετικής περιοχής, έχουν ως αποτέλεσμα η ποσοστιαία μεταβολή της πραγματικής και της υπολογιζόμενης τιμής να είναι έως 1%.
Στη συνέχεια, η συσχέτιση μεταξύ των πάρκων με πάνελ μονής όψης και με πάνελ μονής όψης και tracker μονού άξονα (δηλ. Monofacial → tracker μονού άξονα) οδήγησε σε σχέσεις που δεν είναι γραμμικές αλλά έφταναν μέχρι και τέταρτου βαθμού. Σημαντική παράμετρος στην εύρεση των σχέσεων φαίνεται πως έχει τόσο η ώρα όσο και η εποχή που εξετάζεται. Επίσης φάνηκε ότι έχει σημαντικό ρόλο και το γεωγραφικό μήκος της κάθε περιοχής, συγκεκριμένα στις πρωινές και απογευματινές ώρες, εξαιτίας της διαφορετικής ώρας ανατολής και δύσης του ηλίου.
Λαμβάνοντας αυτές τις παραμέτρους υπόψη, οι σχέσεις που προέκυψαν και η εφαρμογή τους στις αντίστοιχες τεστ χρονοσειρές και την χρονοσειρά από διαφορετική περιοχή, οδήγησε σε ποσοστιαίες αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενης και πραγματικής τιμής, μόλις 1.2%.
Για τις χρονοσειρές που υπολογίστηκαν μέσω των σχέσεων συσχέτισης, υπολογίστηκαν και κάποια ενδεικτικά σφάλματα, όπως είναι το MAE δηλαδή το μέσο απόλυτο σφάλμα, το οποίο αποτελεί μια ένδειξη του πόσο μακριά, κατά μέσο

όρο και κατά απόλυτη τιμή, είναι οι υπολογιζόμενες από τις πραγματικές τιμές. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το MAE κυμαίνεται μεταξύ 0,18 και 0,2 MWh, για πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ 100 MW.
Η ανάλυση του Κεφαλαίου 8 επιβεβαιώνει την επιτυχία των σχέσεων συσχέτισης που έχουν υπολογιστεί, όπως αποδεικνύουν όλα τα ανωτέρω διαγράμματα και πίνακες, όπου η μεταβολή της πραγματικής τιμής και της υπολογιζόμενης τιμής είναι μόλις της τάξεως του 1%.
Επιπλέον, και τα σφάλματα που υπολογίστηκαν αποδεικνύουν ότι οι σχέσεις που έχουν υπολογιστεί αντιστοιχούν στην πραγματικότητα.

9.2: Μελλοντικές Επεκτάσεις

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι έχοντας γνωστή την παραγωγή από ένα πάρκο με σταθερή στήριξη και σταθερή κλίση των μονής όψης πάνελ, να υπολογίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα πάρκο που έχει πάνελ διπλής όψης και πάνελ μονής όψης αλλά με tracker μονού άξονα για την παρακολούθηση της κίνησης του ηλίου.
Κατά την κατασκευή του ΦΒ πάρκου πρέπει να ληφθούν πολλοί παράγοντες υπόψη. Όσες πιο πολλές παράμετροι συμπεριληφθούν στην μελέτη, γίνεται πιο περίπλοκη στην διεξαγωγή της αλλά με συγκεκριμένα αποτελέσματα.
Όσον αφορά τα πάνελ διπλής όψης, η τιμή του παράγοντα bifaciality factor είναι σίγουρα μια παράμετρος που μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω πως επηρεάζει την παραγωγή του πάρκου και πως μπορεί αντίστοιχα να συσχετιστεί με το πάρκο με πάνελ μονής όψης.
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναφέρθηκε ότι το γεωγραφικό μήκος της κάθε περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένο το πάρκο έχει κομβικό ρόλο στην εξαγωγή των σχέσεων συσχέτισης της παραγωγής. Στην παρούσα εργασία, για τις ώρες εκείνες των μηνών που ήταν εμφανές ότι το γεωγραφικό μήκος επηρεάζει την παραγωγή του πάρκου με tracker μονού άξονα συγκριτικά με του πάρκου με πάνελ μονής όψης και σταθερής κλίσης, επιλέχθηκαν οι περιοχές της Πτολεμαΐδας και της Τρίπολης, για την εξαγωγή των σχέσεων συσχέτισης, επειδή ανήκουν στον ηπειρωτικό κορμό της χώρας. Σε μελλοντική επέκταση της εργασίας, προτείνεται η εύρεση σχέσεων συσχέτισης και για διαφορετικά γεωγραφικά μήκη αλλά και γενικότερα η εύρεση και εξήγηση πως ακριβώς επηρεάζει το γεωγραφικό μήκος της κάθε περιοχής την παραγωγή.

Βιβλιογραφία

(1) *ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ / ΓΕΛΕΓΕΝΗΣ Ι. Ι. , ΑΞΑΟΠΟΥΛΟΣ Π.* https://www.politeianet.gr/books/9789608165984-gelegenis-i-i-sugchroni-ekdotiki-piges-energeias-sumbatikes-kai-ananeosimes-89068 (accessed 2024-09-28).

(2) *Forecasting in the electrical grid*. https://www.incite-itn.eu/blog/forecasting-in-the-electrical-grid/ (accessed 2024-09-28).

(3) *Solar PV – Renewables 2020 – Analysis - IEA*. https://www.iea.org/reports/renewables-2020/solar-pv (accessed 2024-09-29).

(4) *Renewables Global Status Report - REN21*. https://www.ren21.net/reports/global-status-report/ (accessed 2024-09-29).

(5) Jacobson, M. Z.; Delucchi, M. A. Providing All Global Energy with Wind, Water, and Solar Power, Part I: Technologies, Energy Resources, Quantities and Areas of Infrastructure, and Materials. *Energy Policy* **2011**, *39* (3), 1154–1169. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.040.

(6) *Recent Facts about Photovoltaics in Germany - Fraunhofer ISE*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html (accessed 2024-09-29).

(7) *Global Solar Atlas*. https://globalsolaratlas.info/map?c=-9.449062,-18.984375,2&s=39.098095,22.288513&m=site (accessed 2024-09-29).

(8) El_final_necp_main_en_0.Pdf. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/el_final_necp_main_en_0.pdf (accessed 2024-09-29).

(9) *Αρχική - HELAPCO - Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών*. https://helapco.gr/ (accessed 2024-09-29).

(10) *Greece - Countries & Regions - IEA*. https://www.iea.org/countries/greece (accessed 2024-09-29).

(11) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering | Wiley Online Books*. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470974704 (accessed 2024-09-29).

(12) *Solar - IEA*. https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv (accessed 2024-09-29).

(13) *Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html (accessed 2024-09-29).

(14) Piliougine, M.; Canete, C.; Moreno, R.; Carretero, J.; Hirose, J.; Ogawa, S.; Sidrach-de-Cardona, M. Comparative Analysis of Energy Produced by Photovoltaic Modules with Anti-Soiling Coated Surface in Arid Climates. *Applied energy* **2013**, *112*, 626–634.

(15) Lorenzo, E. *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*; PROGENSA, 1994.

(16) Anderson, K.; Aneja, S. Single-Axis Tracker Control Optimization Potential for the Contiguous United States. In *2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC)*; IEEE: Philadelphia, PA, USA, 2022; pp 1–6. https://doi.org/10.1109/PVSC48317.2022.9938629.
(17) Heeter, J. S.; Speer, B. K.; Glick, M. B. *International Best Practices for Implementing and Designing Renewable Portfolio Standard (RPS) Policies*; NREL/TP--6A20-72798, 1507986; 2019; p NREL/TP--6A20-72798, 1507986. https://doi.org/10.2172/1507986.
(18) *A review of solar photovoltaic technologies - ScienceDirect*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110004016 (accessed 2024-10-01).
(19) Triollet, R.; Alvarez, M. A. F. *JRC Annual Report 2020*. JRC Publications Repository. https://doi.org/10.2760/110413.
(20) *Analysis of the Annual Performance of Bifacial Modules and Optimization Methods | Semantic Scholar*. https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-the-Annual-Performance-of-Bifacial-and-Yusufoglu-Pletzer/07c11d335d4a9269066c9c65fc0a169f7de0cc86 (accessed 2024-10-23).
(21) Deline, C.; Ayala, S.; Marion, B.; Sekulic, B.; Woodhouse, M.; Stein, J. Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction.
(22) *(PDF) Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction*. https://www.researchgate.net/publication/334495223_Bifacial_PV_System_Performance_Separating_Fact_from_Fiction (accessed 2024-10-23).