



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αποτίμηση Λειτουργίας Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού



Γκριντζιά Αικατερίνη
Επιβλέπων: **Νικόλαος Μαμάσης**, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αποτίμηση Λειτουργίας Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού

Γκριντζιά Αικατερίνη

Επιβλέπων: **Νικόλαος Μαμάσης**, Καθηγητής ΕΜΠ

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον κ. Νικόλαο Μαμάση για την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας ως επιβλέπων καθηγητής. Ο ίδιος με κατηύθυνε καθ' όλη τη διάρκεια του εξαμήνου, από την επιλογή του θέματος, έως την περάτωση της ανάλυσής μας και οι επισημάνσεις του συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στην ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος. Εκτιμώ την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ μαζί του, την προθυμία του να αφιερώσει χρόνο και προσπάθεια στην αξιολόγηση της πορείας της εργασίας μου, το ενδιαφέρον που επέδειξε για το θέμα, καθώς και την απολύτως άμεση ανταπόκρισή του στα ερωτήματα και τις απορίες μου. Η συνεργασία μας ήταν απολύτως εποικοδομητική και είμαι ευγνώμων που ο κύκλος σπουδών μου κλείνει με αυτήν την εμπειρία.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ανεκτίμητη στήριξή τους, τόσο στην παρούσα εργασία, όσο και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου. Είμαι ευγνώμων για την παρουσία, την αμέριστη συμπαράσταση και τη συνεχή ενθάρρυνσή τους, χωρίς την οποία τίποτα από όσα έχω καταφέρει μέχρι σήμερα δε θα ήταν εφικτό.

Ιδιαίτερα οφείλω να ευχαριστήσω τον μπαμπά μου, Ανδρέα, ο οποίος είναι πάντα δίπλα μου και με βοήθησε πάρα πολύ απαντώντας ανελλιπώς στις αμέτρητες ερωτήσεις μου και βοηθώντας με να κατανοήσω βασικές αρχές σχετικά με το θέμα της εργασίας μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο να αξιολογήσει τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και συγκεκριμένα να διερευνήσει την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των ηλιακών κυψελών στον συντελεστή απόδοσης και τον λόγο επίδοσης φωτοβολταϊκού συστήματος εγκατεστημένης ισχύος 150 kWp. Παρέχονται οι τεχνικές προδιαγραφές του σταθμού και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, ενώ παρουσιάζονται και σχέδια της μελέτης σχεδιασμού από το αρχείο του έργου, μαζί με φωτογραφίες της πραγματικής διάταξης του το 2023.

Μετά την περιγραφή της δομής και της λειτουργίας διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, καθώς και τον ορισμό των εννοιών που σχετίζονται με την απόδοση και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, η εργασία επικεντρώνεται στην ανάκτηση δεδομένων για την περίοδο 2018-2022 από την πλατφόρμα τηλεπίβλεψης sunny portal και στην οργάνωση αυτών σε μηνιαία βάση.

Αρχικά, γίνεται η διάκριση μεταξύ της εγκατεστημένης ισχύος των 150 kWp και της στιγμιαίας ισχύος δυνητικά ικανής να παραχθεί από τον σταθμό, ενώ αιτιολογείται η εμφάνιση υψηλότερων τιμών ισχύος τους ανοιξιάτικους και φθινοπωρινούς μήνες και ταυτοχρόνως των υψηλότερων τιμών ενεργειακής απολαβής τους καλοκαιρινούς. Έπειτα, υπολογίζονται και απεικονίζονται οι τιμές της συνολικής απόδοσης του σταθμού για κάθε μήνα, ενώ αιτιολογούνται οι παρατηρηθείσες διακυμάνσεις της, συγκεκριμένα η πτώση της για πολύ χαμηλές ή υψηλές τιμές ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας. Υπολογίζονται και απεικονίζονται επίσης ο λόγος επίδοσης **PR** και ο συντελεστής δυναμικότητας **CF**.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι η ωραία παραγωγή έχει ανάλογη σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μπορεί να προσεγγιστεί με ευθεία της οποίας η κλίση παρατηρείται μικρότερη το καλοκαίρι. Το διάγραμμα θερμοκρασίας πλαισίων - ηλιακής ακτινοβολίας αναδεικνύει τη μεταβαλλόμενη επίδραση της θερμοκρασίας στη θέρμανση των πλαισίων κατά τη διάρκεια των διαφορετικών εποχών, υποδεικνύοντας τη σημασία της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας στη θερμική απόδοση. Η μείωση της απόδοσης για καταγεγραμμένες θερμοκρασίες πλαισίου μεγαλύτερες των 25°C, η οποία φαίνεται στο σχετικό διάγραμμα, προσεγγίζεται από τον θερμοκρασιακό συντελεστή, ο οποίος δεν αποκλίνει πολύ από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Τα τρισδιάστατα διαγράμματα, που κατασκευάστηκαν με χρήση του προγράμματος Rinearn Graph 3D, μεταξύ ηλιοφάνειας, θερμοκρασίας πλαισίου και συντελεστή απόδοσης, αποτυπώνουν βέλτιστα τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Συνολικά, η λειτουργία του συστήματος αξιολογείται επαρκής, ενώ εξάγονται συμπεράσματα τα οποία μπορούν εν δυνάμει να συμβάλλουν στον εντοπισμό πεδίων δυνητικής βελτίωσης της απόδοσης, καθοδηγώντας μελλοντικές αποφάσεις σχετικά με τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συντήρηση φωτοβολταϊκών συστημάτων με όμοια χαρακτηριστικά.

ABSTRACT

The present thesis aims to evaluate the factors influencing the performance of a photovoltaic (PV) system, specifically investigating the impact of solar irradiance and cell temperature on the efficiency and performance ratio of a 150 kWp PV installation. The technical specifications of the system and the electromechanical equipment used are provided, along with design drawings from the file of the project and photographs of the actual layout in 2023.

After describing the structure and operation of a grid-connected PV installation, as well as defining the concepts related to performance and its influencing factors, the study focuses on data retrieval for the period of 2018-2022 from the sunny portal remote monitoring platform and organizes the data on a monthly basis.

Initially, a distinction is made between the installed capacity of 150 kWp and the instantaneous power potentially able of being generated by the PV system. The appearance of higher power values during the spring and autumn months is justified, as well as the higher energy yields observed during the summer. Furthermore, the total system performance values are calculated and displayed for each month, while explaining the observed fluctuations, specifically the decrease for very low or high solar irradiance values. The performance ratio (*PR*) and the capacity factor (*CF*) are also calculated and displayed.

It was also found that the energy production exhibits a proportional relationship with solar insolation, which can be approximated by a straight line, the slope of which appears to be smaller during the summer. The module temperature - insolation diagram highlights the varying influence of temperature on solar panel heating during different seasons, indicating the significance of the effect of ambient temperature on thermal performance. The decrease in performance for recorded module temperatures above 25°C, as shown in the corresponding diagram, is approximated by the temperature coefficient, which does not deviate significantly from the manufacturer's specifications.

The three-dimensional diagrams, created using the program Rinearn Graph 3D, effectively depict the interplay between irradiance, module temperature, and efficiency, providing optimal visualization of the photovoltaic system's operation.

Overall, the system's performance is evaluated as sufficient, and conclusions are drawn that have the potential to contribute to identifying areas for performance enhancement, guiding future decisions regarding the design, operation, and maintenance of similar photovoltaic systems.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Πρόλογος	1
1.2 Σκοπός εργασίας	1
1.3 Διάρθρωση εργασίας.....	3
1.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	4
1.5 Δομή διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	7
1.6 Εισαγωγή εννοιών απόδοσης.....	9
1.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση Φ/Β σταθμού	11
2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ	16
2.1 Εισαγωγή	16
2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β σταθμού	16
2.1.1 Χωροθέτηση Φ/Β Σταθμού.....	19
2.1.2 Βάσεις στήριξης.....	19
2.1.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	21
2.1.4 Αντιστροφείς.....	24
2.1.5 Καλώδια DC, AC και Μ.Τ.....	26
2.1.6 Πίνακες Χαμηλής Τάσης	27
2.1.7 Μετασχηματιστής	27
2.1.8 Γενικός Πίνακας Μέσης Τάσης	28
2.1.9 Γειώσεις και αντικεραυνικά.....	28
2.1.10 Φωτισμός – Κάμερες - Συναγερμός.....	29
2.1.11 Συστήματα εφεδρείας.....	29
2.3 Σύστημα συλλογής δεδομένων και τηλεπίβλεψης.....	30
2.3.1 Περιγραφή συστήματος τηλεπίβλεψης	30
2.3.2 Τεχνικές προδιαγραφές συστήματος τηλεπίβλεψης.....	33
2.3.3 Διαδικτυακό λογισμικό πλοήγησης	33
2.4 Πιστοποίηση - Επιθεωρήσεις.....	43

2.5 Προβλήματα που έχουν επηρεάσει την απόδοση	44
3. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	46
3.1 Εισαγωγή	46
3.2 Τρόπος συλλογής δεδομένων.....	46
3.3 Μέγιστες τιμές στιγμιαίας ισχύος αιχμής λειτουργίας και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας	47
3.4 Ετήσια και μηνιαία σύγκριση ηλεκτρικής παραγωγής	48
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	53
4.1 Τρόπος επεξεργασίας δεδομένων	53
4.2 Υπολογισμός συντελεστή απόδοσης, performance ratio και συντελεστή δυναμικότητας ανά μήνα	54
4.3 Επίδραση θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στην απόδοση του Φ/Β συστήματος	61
4.3.1 Διερεύνηση σχέσης ωριαίας παραγωγής - ηλιακής ακτινοβολίας	61
4.3.2 Διερεύνηση σχέσης θερμοκρασίας πλαισίου - ηλιακής ακτινοβολίας.....	66
4.3.3 Διερεύνηση σχέσης συντελεστή απόδοσης – ηλιακής ακτινοβολίας.....	70
4.3.4 Διερεύνηση σχέσης συντελεστή απόδοσης - θερμοκρασίας πλαισίου	73
4.4 Αναπαράσταση συντελεστή απόδοσης, θερμοκρασίας πλαισίου και ηλιακής ακτινοβολίας στον χώρο	77
5. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	82
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	84

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν βιώσιμη ενέργεια. Πράγματι, συνεχώς αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες στον τομέα, με γνώμονα την αύξηση της παραγωγικής ικανότητας συγκεκριμένων ή νέων μελλοντικών εγκαταστάσεων. Μελετητές, κατασκευαστές του τεχνικού εξοπλισμού, ιδιοκτήτες, ή και άλλοι διαχειριστές φωτοβολταϊκών συστημάτων προσπαθούν να βρουν λυσιτελείς τρόπους αύξησης του βαθμού απόδοσης των ηλιακών συστημάτων, με σκοπό την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας για την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Στο πλαίσιο αυτό, αναλύσεις με αντικείμενο την αποτίμηση λειτουργίας Φ/Β σταθμών βάσει ιστορικών δεδομένων συνεχόμενων ετών μπορούν να φανούν αρκετά χρήσιμες. Δεδομένου ότι στη χώρα μας εκτεταμένη εγκατάσταση Φ/Β σταθμών έχει γίνει τα τελευταία 10 έτη, αντίστοιχες αποτιμήσεις, όπως για παράδειγμα αυτή του Μαλτέζος, 2013, σπανίζουν στην ελληνική βιβλιογραφία. Στην εργασία του, ο Μαλτέζος, 2013 συνέκρινε τη λειτουργία δύο Φ/Β σταθμών, έναν με ηλιακό ιχνηλάτη και έναν χωρίς. Στην Γιαννούσης, 2013 χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικός αλγόριθμος για τον προσδιορισμό των αποκλίσεων θεωρητικών υπολογισμών και μετρήσεων παραγόμενης ενέργειας σε kWh. Η Αλεξοπούλου, 2010, στην εργασία της εκτίμησε την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για μελλοντικό σύστημα Φ/Β στο ΑΠΘ χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων PVGIS. Οι αναλύσεις των Παναγιώτου, 2010 και Τσόγκα, 2009 είναι κυρίως τεχνοοικονομικές, ενώ στην εργασία του ο Γκαράκης, 2018 συμπεριέλαβε εκτενή τεχνική περιγραφή και παρουσίαση κυρίως διαγραμμάτων παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου. Τέλος, ο Κόλλιας, 2017 στην εργασία του διερευνά πώς επιδρά η θερμοκρασία στη λειτουργία των πλαισίων από μηχανική και ηλεκτρική σκοπιά, αξιοποιώντας το πρόγραμμα Comsol Multiphysics. Οι παραπάνω προσεγγίσεις δεν εστιάζουν στην επίδραση εξωτερικών παραγόντων στην ηλεκτρική παραγωγή Φ/Β συστημάτων, ενώ μόνο κάποιες είναι βασισμένες σε καταγεγραμμένα δεδομένα. Η διερεύνηση της εξάρτησης της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων εγκατεστημένων σε μία περίοδο που μας επιτρέπει την ανάκτηση πραγματικών δεδομένων λειτουργίας παρατηρείται σε περιορισμένο αριθμό σχετικών μελετών, διατριβών και διπλωματικών εργασιών, κυρίως ξένης βιβλιογραφίας, παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον και τις δυνητικές εφαρμογές αυτής στον τομέα των Φ/Β συστημάτων.

1.2 Σκοπός εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η απόδοση ενός υφιστάμενου διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου ονομαστικής ισχύος 150 kWp στη Μεγαλόπολη Αρκαδίας. Η μελέτη εστιάζει στη σύγκριση της παραγόμενης μετρηθείσας ηλεκτρικής ενέργειας που διοχετεύεται

στο δίκτυο από τη συγκεκριμένη εγκατάσταση για μια περίοδο πέντε ετών (2018-2022), με την αντίστοιχη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία για το ίδιο χρονικό διάστημα. Στη μελέτη δεν εξετάζεται η επιμέρους απόδοση των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν το πάρκο, όπως των φωτοβολταϊκών πλαισίων (PV modules), των αντιστροφών συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (inverters), των καλωδίων συνεχούς (DC) και εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος, κ.ο.κ. Για λόγους πληρότητας γίνεται απλή αναφορά στα ποσοστά απόδοσης λειτουργίας που συνιστούν οι προδιαγραφές των εκάστοτε στοιχείων, τα οποία αναγράφονται στα μηχανικά - ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά από τους κατασκευαστές τους.

Στο πλαίσιο αποτίμησης της λειτουργίας του εν λόγω σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατανόησης της δομής και διάταξής του, αλλά και του τρόπου στήριξης του μηχανικού εξοπλισμού και σύνδεσης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, επιχειρείται η εξαγωγή συμπερασμάτων σε μορφή ποσοτικών σχέσεων για την απόδοση της εγκατάστασης. Η εργασία επικεντρώνεται σε συγκεκριμένες παραμέτρους όσον αφορά την επίδραση στην επίδοση λειτουργίας του συστήματος, οι οποίες και αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω, ενώ συνοδεύονται από συγκεντρωτικά διαγράμματα με σκοπό να διερευνηθεί κατά το δυνατόν ο τρόπος που επηρεάζεται η εξαγόμενη ηλεκτρική παραγωγή από εξωτερικούς παράγοντες. Η ανάλυση περιλαμβάνει τον υπολογισμό του παράγοντα απόδοσης, του λόγου επίδοσης και του συντελεστή δυναμικότητας του ηλιακού πάρκου βάσει των τιμών ηλεκτρικής παραγωγής στην περίοδο μελέτης. Ενδεικτικά, μελετώνται κυρίως κλιματολογικοί παράγοντες, όπως η προσπίπτουσα στην επιφάνεια των πλαισίων ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία των πλαισίων, δεδομένα τα οποία συλλέγονται και αποθηκεύονται μέσω ειδικών εγκατεστημένων αισθητήρων στο έργο.

Επιπλέον, συμπληρωματικός στόχος της παρούσας ανάλυσης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της γήρανσης του συστήματος, ιδιαίτερα των φωτοβολταϊκών στοιχείων, και η αξιολόγηση της λειτουργίας τους σε περίοδο πέντε συνεχόμενων ετών για τα οποία ανακτήθηκαν δεδομένα. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται εκτίμηση της απώλειας απόδοσης του συστήματος, υπολογίζοντας τις αποδόσεις των επιμέρους πέντε ετών και συγκρίνοντας τη μέγιστη πραγματικά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, μέσω καταγεγραμμένων δεδομένων, αφενός σε απόλυτη τιμή, αφετέρου τα ειδικά νούμερα παραγόμενης ισχύος ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος. Έτσι μπορεί να αξιολογηθεί και η επένδυση σε ένα τέτοιο έργο, δεδομένης της καταλυτικής επίδρασης του παράγοντα της γήρανσης στο δυνητικό κέρδος του ιδιοκτήτη στα επόμενα έτη.

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης, έχει χρησιμοποιηθεί το λογισμικό που παρέχεται για την τηλεπιτήρηση, τηλεδιάγνωση και τηλεσυντήρηση ηλιακών εγκαταστάσεων, από την εταιρεία SMA Solar Technology AG, της οποίας αντικείμενο είναι η προμήθεια εξοπλισμού ηλιακής ενέργειας. Με το λογισμικό αυτό, τα δεδομένα που συλλέγονται on site μέσω αισθητήρα καταγράφονται, αποθηκεύονται και επεξεργάζονται μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας sunny portal. Για την παρουσίαση των ευρημάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Rinearn Graph 3D.

Συνολικά, στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να παράσχει μία συνολική αξιολόγηση της απόδοσης της λειτουργίας του εξεταζόμενου Φ/Β σταθμού και των παραγόντων που την

επηρεάζουν. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης μπορούν να αποδειχθούν καίριας σημασίας για τους διαχειριστές οποιουδήποτε συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διασυνδεδεμένης εγκατάστασης Φ/Β με όμοια χαρακτηριστικά, αλλά και ευρύτερα. Στόχος ακόμη, να παράσχει πολύτιμες εισηγήσεις για τη βελτίωση της λειτουργίας του Φ/Β συστήματος και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειάς του, καθώς και για την εξερεύνηση των δυνατοτήτων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πράγματι, είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο αξιολόγησης της απόδοσης νεότερων ή και καινοτόμων τεχνολογιών που αφορούν τη λειτουργία φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, μέσω της σύγκρισης των δεδομένων παραγωγής από πάγκα με εφαρμογή των νέων αυτών τεχνολογιών, με αντίστοιχα δεδομένα από υφιστάμενα συστήματα για τα οποία έχουν συλλεχθεί δεδομένα για μία σημαντική, με την έννοια της αντιπροσωπευτικής, περίοδο μελέτης. Τέλος, μία περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων ενεργειακής απόδοσης Φ/Β συστημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο προσδιορισμού ενεργειών που δύνανται να βελτιώσουν την απόδοση αυτών και την αξιολόγηση αν τελικώς η εκάστοτε πιθανή εναλλακτική θα επιφέρει σημαντική μείωση των απωλειών στο σύστημα. Για παράδειγμα, επαρκεί άραγε η αντικατάσταση των καλωδιώσεων, ή, στην αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει οι ιδιοκτήτες να στραφούν σε άλλες βελτιώσεις των υποσυστημάτων, που ενδεχομένως, ύστερα από την αντίστοιχη ανάλυση, προβλέπεται να επιφέρουν μεγαλύτερη αύξηση της συνολικής απόδοσης του σταθμού;

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα γίνει μια σύντομη επισκόπηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στη λειτουργία των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, θα εισαχθούν και θα καθοριστούν βασικές έννοιες που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία, την παραγωγή τελικώς εναλλασσόμενου ρεύματος το οποίο μπορεί να αποδοθεί στο δίκτυο, και την απόδοση των φωτοβολταϊκών σταθμών.

Στο Κεφάλαιο 2 θα γίνει η τεχνική περιγραφή της στήριξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού σταθμού και του συστήματος τηλεπαρακολούθησής του μέσω καταγραφών σε πραγματικό χρόνο, καθώς και των λοιπών εργασιών που έλαβαν χώρα πριν να τεθεί σε λειτουργία ο σταθμός. Η τεχνική αυτή περιγραφή έχει συνταχθεί βάσει των σχεδίων «as-built» της εγκατάστασης, της έκθεσης επιθεώρησης που συντάχθηκε το 2011 αφού το έργο τέθηκε σε λειτουργία, των προδιαγραφών του ηλεκτρικού και μηχανολογικού εξοπλισμού και των επιμέρους συσκευών που χρησιμοποιούνται στη λειτουργία του σταθμού, και λοιπών δεδομένων που συλλέχθηκαν από το αρχείο του έργου.

Στο Κεφάλαιο 3 θα γίνει η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων επίδρασης συγκεκριμένων εξωτερικών παραγόντων στη λειτουργία του σταθμού σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο ανάλυσης. Ακόμη, θα παρουσιαστούν τα δεδομένα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας σε κιλοβατώρες (kWh) και σε κιλοβατώρες ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος

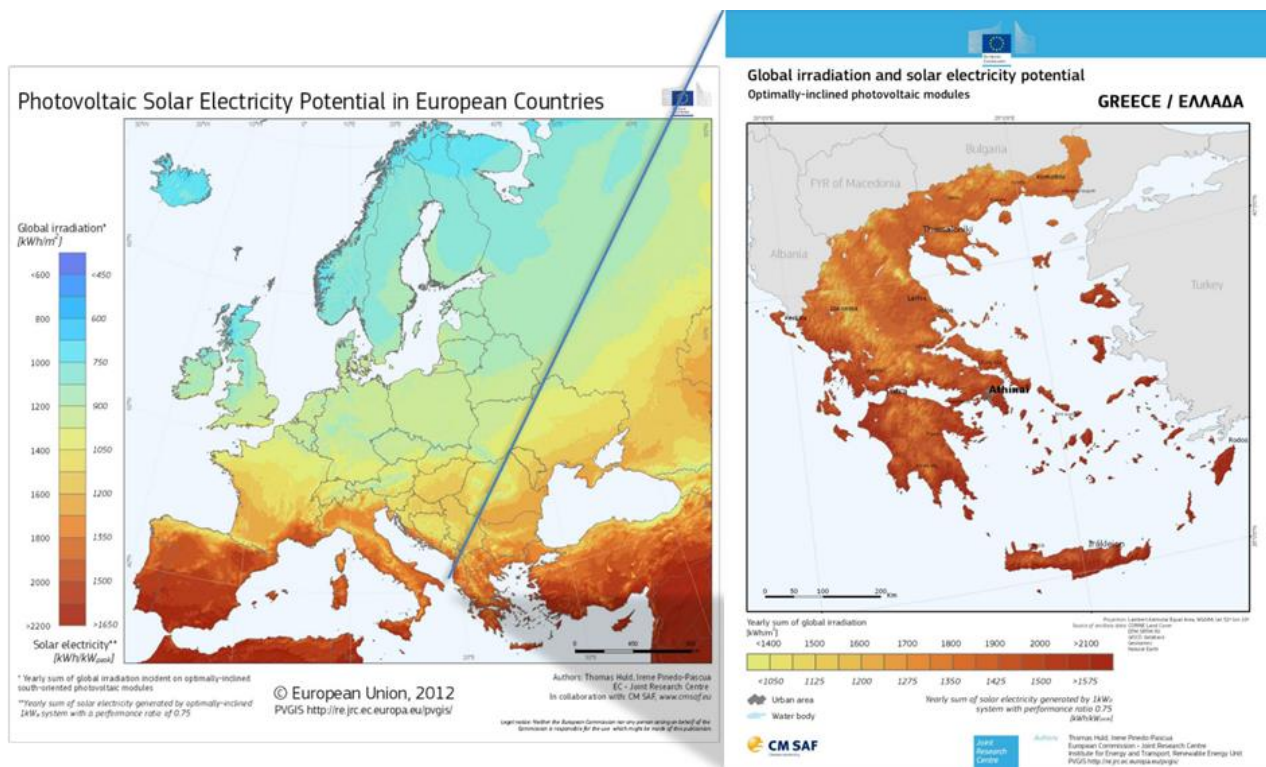
(kWh/kWp), τα αντίστοιχα κλιματολογικά δεδομένα και θα απεικονιστούν σε σχετικά διαγράμματα. Καταγεγραμμένα δεδομένα παραγωγής ενέργειας από το έτος διασύνδεσης του σταθμού στο δίκτυο (2011) είναι διαθέσιμα και συμπεριλαμβάνονται επίσης στο Κεφάλαιο 3.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, θα διεξαχθεί ανάλυση - επεξεργασία δεδομένων για να αξιολογηθεί η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου στην πορεία του χρόνου και να συσχετιστεί με τους εξεταζόμενους παράγοντες.

Τέλος, στο 5^ο Κεφάλαιο θα συνοψιστούν τα ευρήματα της μελέτης και θα εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τον βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού σταθμού. Ακολουθώντας αυτήν τη δομημένη προσέγγιση, η μελέτη θα παρέχει μια σφαιρική ανάλυση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου και θα συνεισφέρει στην κατανόηση του δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τα έτη 2018-2022, ικανή να αξιοποιηθεί και μελλοντικά σε ενδεχόμενη περαιτέρω έρευνα.

1.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί έχουν ως στόχο την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διανομή αυτής στο δίκτυο σε μορφή συμβατή με αυτή του τοπικού δικτύου του εκάστοτε Φ/Β σταθμού. Η ηλιακή ακτινοβολία που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της Γης μειώνεται σημαντικά μέσω της ανάκλασης, της απορρόφησης και της σκέδασης (Αλεξοπούλου, 2010). Μέσω αυτών των μηχανισμών, η ακτινοβολία από τον ήλιο απορροφάται από το όζον, τους υδρατμούς, το οξυγόνο, ενώ σκορπίζεται από τα μόρια αέρα, τη σκόνη και τους ρύπους. Η πυκνότητα ισχύος της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη κατά τη διάρκεια ενός έτους εκφράζεται συνήθως σε W/m^2 ή kWh/m^2 και αναφέρεται ως ετήσια ηλιακή ενέργεια. Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται ένας χάρτης της Ευρώπης που δίνει την προσπίπτουσα στο έδαφος ηλιακή ενέργεια σε kWh/m^2 , αλλά και την ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος τοποθετημένου με τη βέλτιστη κλίση για κάθε σημείο, θεωρώντας σταθερό βαθμό απωλειών ίσο με 25% σε kWh/kW_{peak} . Ομοίως, στην ίδια Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται το ίδιο για την Ελλάδα πιο λεπτομερώς, με βέλτιστο προσανατολισμό τον νότιο.



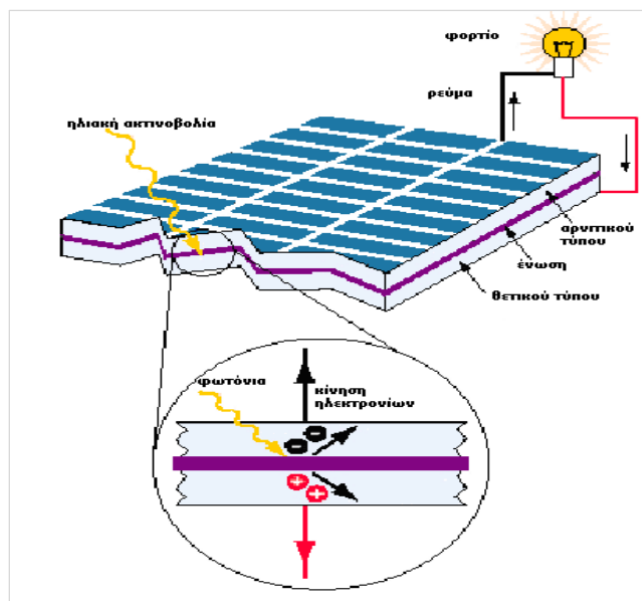
Εικόνα 1.1 Τιμές πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας διεθνώς σε kWh/m^2
Πρόελευση: Μαυροματάκης, 2014 μετά από προσαρμογή

Το ηλιακό κελί αποτελείται από δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού, τα οποία απαρτίζονται κυρίως από κρυστάλλους πυριτίου. Οι προσθήκες άλλων υλικών σε μικρές ποσότητες δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Συνήθως στο κάτω στρώμα του ηλιακού κελιού προστίθεται βόριο, το οποίο σχηματίζει δεσμούς με το πυρίτιο και δημιουργεί θετικό φορτίο (p), ενώ στο πάνω μέρος του ηλιακού κελιού προστίθεται συνήθως φωσφόρος, ο οποίος δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο και δημιουργεί αρνητικό φορτίο (n) (Μαλτζέος, 2013).

Όταν το φως του ηλίου φτάνει στην επιφάνεια του ηλιακού κελιού, κάποια φωτόνια αντανακλώνται και κάποια άλλα απορροφώνται από το υλικό. Το ποσοστό αυτών που αντανακλώνται είναι της τάξης του έως και 25%, ενώ αν τοποθετηθούν κατάλληλες επιστρώσεις ή και τράχυνση της επιφάνειας, δύναται να φτάσει στο 3%. Συγκεκριμένα, κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη *δυνατότητα* να απορροφηθεί σε έναν χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο (McManus, 2020). Από αυτά που απορροφώνται όμως, πολλών φωτονίων η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική, ενώ μόνο κάποια έχουν αρκετή ενέργεια για να δημιουργήσουν φόρτιση (Rahman κ.α., 2015).

Όσο διαρκεί η ακτινοβολία, δημιουργείται περίσσεια φορέων, δηλαδή περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, δέχονται την επίδραση ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n. Εξαιτίας αυτού, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα

τύπου n και οι οπές προς το τμήμα τύπου p , με αποτέλεσμα να δημιουργείται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, προσπαθούν να κινηθούν από το στρώμα τύπου- n στο στρώμα τύπου- p , λόγω των αντίθετων φορτίσεων των στρωμάτων. Ωστόσο, το ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή p - n εμποδίζει αυτή τη μετακίνηση. Αν λοιπόν στους ακροδέκτες αυτούς συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο με την παρουσία εν προκειμένω ενός εξωτερικού κυκλώματος (μικροσκοπικό πλέγμα καλωδίων κατά μήκος του στρώματος τύπου- n), δημιουργείται η διέλευση ηλεκτρονίων από το στρώμα τύπου- n στο στρώμα τύπου- p , δηλαδή παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο (Κόλλιας, 2017). Τα ηλεκτρόνια, εκτός των οποίων ξανακάνουν δεσμούς με διαθέσιμα θετικά φορτία, μεταφέρονται προς τον αντιστροφέα μέσω ενός πλέγματος αγωγιμότητας μεταλλικών καλωδίων που τοποθετούνται στην επιφάνεια των ηλιακών κυττάρων και μιας συνεχούς μεταλλικής επιφάνειας, στο κάτω μέρος του πλαισίου. Αυτό το φαινόμενο φαίνεται στην Εικόνα 1.2 (Αλεξοπούλου, 2010).



Εικόνα 1.2 Διάγραμμα φωτοβολταϊκού φαινομένου στο ηλιακό πλαίσιο, *Πηγή:* Αλεξοπούλου, 2010

Υπάρχουν διαφορετικά είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων ανάλογα με το υλικό και την τεχνολογία κατασκευής τους. Τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία είναι δύο διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών (Καζάς, 2020). Τα μονοκρυσταλλικά κατασκευάζονται από έναν κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου και έχουν υψηλότερο κόστος κατασκευής από τα πολυκρυσταλλικά. Τα πολυκρυσταλλικά κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου και έχουν χαμηλότερη τιμή από τα πρώτα, γι' αυτό και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα. Τα στοιχεία λεπτού υμενίου είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία που χρησιμοποιεί λεπτές στρώσεις υλικών και προσφέρει μείωση στη χρήση του πυριτίου. Η τιμή τους είναι αρκετά μειωμένη σε σχέση με τα άλλα δύο είδη στοιχείων (Κόλλιας, 2017). Τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται και υβριδικού τύπου πλαίσια, με τα οποία

μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτερες αποδόσεις με μικρότερη επιφάνεια απαιτούμενων κυψελών για εγκαταστάσεις ίδιας ικανότητας kWp, ωστόσο το μεγάλο κατασκευαστικό κόστος τους περιορίζει τη χρήση τους σε εξειδικευμένες εφαρμογές που απαιτούν συγκεκριμένες υψηλές αποδόσεις και απορρόφηση συγκεκριμένου φάσματος ακτινοβολίας.

1.5 Δομή διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Τα υποσυστήματα που μετατρέπουν μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική αποτελούνται από πολλούς ηλιακούς συλλέκτες, τοποθετημένους σε δομές υποστήριξης, συνήθως αλουμινένιες βάσεις επί του εδάφους ή επί εμπηγμένων στο έδαφος πασσάλων. Οι συλλέκτες είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους για να παράγουν ισχύ στα υποσυστήματα ηλεκτρονικής επεξεργασίας ισχύος.

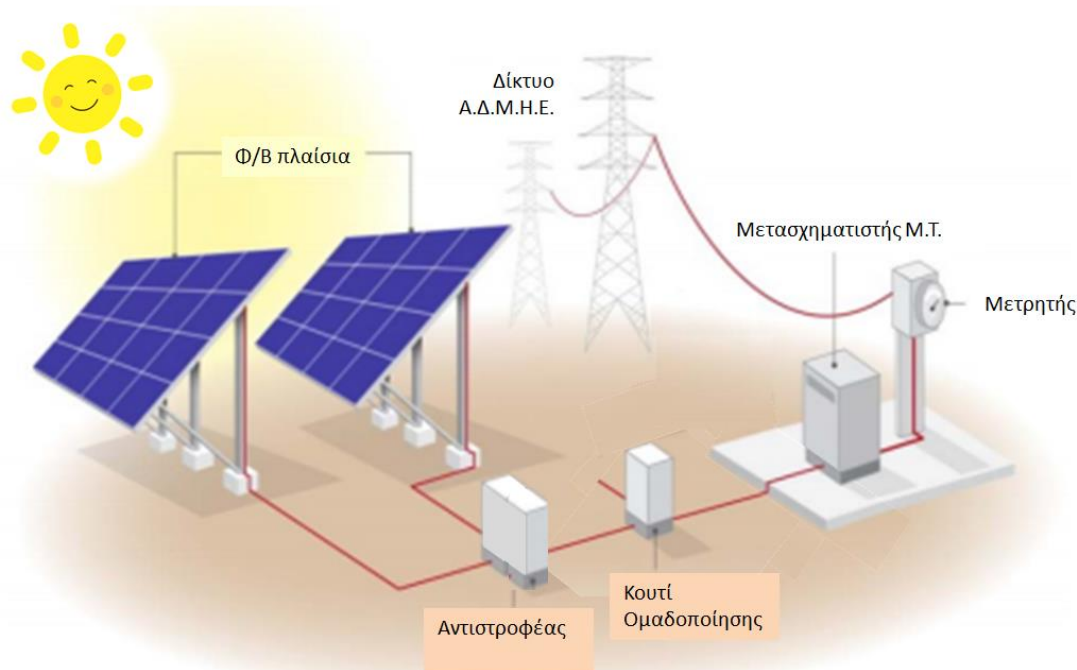
Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες είναι συνεχές (DC) και μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο (AC) μέσω μιας συσκευής που ονομάζεται αντιστροφέας. Ο αντιστροφέας μετατρέπει το DC ρεύμα σε AC, αλλάζοντας τη συχνότητα και τα επίπεδα τάσης (Παναγιώτου, 2010). Σε έναν τυπικό φωτοβολταϊκό σταθμό, χρησιμοποιείται μια συνδυασμένη, σε σειρά και εν παραλλήλω σύνδεση των στοιχείων, προκειμένου να εξισορροπηθούν οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου των πλαισίων αυτών, να μεγιστοποιηθεί η συνολική ηλεκτρική ισχύς του πάρκου, και να περιορίζεται επίσης η απώλεια της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις σκίασης ή βλάβης συγκεκριμένων σημείων των Φ/Β πλαισίων (Δαμιανίδης κ.α., 2011).

Οι αντιστροφέες μπορούν επίσης να συνδεθούν σε σειριακές και παράλληλες διασυνδέσεις (Δαμιανίδης, 2011). Αυτό γίνεται αφενός για να αυξηθεί περαιτέρω η ηλεκτρική ισχύς, καθώς διαφορετικά μέρη των συστοιχιών μπορούν να δέχονται διαφορετικά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, π.χ. όταν είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές κατευθύνσεις ή τοποθετημένα κοντά για να ελαχιστοποιήσουν την επιφάνεια του χώρου. Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοσή τους, οι ηλιακοί σταθμοί προσαρμόζουν το ηλεκτρικό φορτίο, είτε μέσα στους αντιστροφέες είτε από ξεχωριστές μονάδες. Αυτές οι συσκευές κρατούν κάθε σειρά ηλιακών συστοιχιών κοντά στο σημείο αιχμής ισχύος της, ώστε οι αντιστροφέες να λειτουργούν αποδοτικότερα (Τσόγκας, 2009). Αφετέρου, οι σειριακές και παράλληλες συνδέσεις γίνονται ώστε να παρέχεται επιπλέον αξιοπιστία σε περίπτωση βλάβης εξοπλισμού, καθώς στην περίπτωση σύνδεσης σε σειρά, από τη βλάβη ενός τμήματος πλαισίου, αχρηστεύεται όλη η συνδεδεμένη σειρά. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του μεταβάλλεται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας που λαμβάνει. Όλοι οι αντιστροφέες (inverters) συνδέονται μέσω AC καλωδίων τελικώς με έναν μετασχηματιστή μέσης τάσης, ο οποίος βρίσκεται στον υποσταθμό της εγκατάστασης.

Ο υποσταθμός είναι μια εγκατάσταση που μετατρέπει τα επίπεδα ηλεκτρικής τάσης και ρεύματος από ένα επίπεδο σε ένα άλλο για τον σκοπό της μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο του ΑΔΜΗΕ. Ο υποσταθμός είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο

της ροής ηλεκτρικής ενέργειας, τη διατήρηση της σταθερότητας του ηλεκτρικού δικτύου και την προστασία από απότομες αιχμές τάσης¹ και άλλα ηλεκτρικά σφάλματα, τα οποία δύνανται να προκαλέσουν ζημιά στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.

Ο υποσταθμός ενός πάρκου φωτοβολταϊκών συνήθως διαθέτει έναν κεντρικό πίνακα ελέγχου, ο οποίος επιτρέπει τον έλεγχο και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου. Ο κεντρικός πίνακας λειτουργεί ως κεντρικό σημείο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του ηλεκτρικού συστήματος. Ο πίνακας μπορεί να περιλαμβάνει ασφάλειες, διακόπτες και άλλες προστατευτικές συσκευές για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας του υποσταθμού και του ηλεκτρικού δικτύου για περιπτώσεις π.χ. υπέρτασης, υπερφόρτισης, έλλειψης τάσης ή βραχυκυκλώσεων (Δαμιανίδης, 2011). Επίσης, ο πίνακας μπορεί να είναι εξοπλισμένος με διατάξεις που επιτρέπουν την παρακολούθηση του ηλεκτρικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο και τη δυνατότητα προσαρμογής της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες, ώστε να διασφαλίζεται πως το ηλεκτρικό δίκτυο θα παραμένει σταθερό και αξιόπιστο. Από τον υποσταθμό της εγκατάστασης, και συγκεκριμένα από τον κεντρικό πίνακα του Υ/Σ, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα οδηγείται μέσω καλωδίωσης Μέσης Τάσης σε μετρητή και ύστερα διοχετεύεται στο δίκτυο. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3 Δομή τυπικού Φωτοβολταϊκού σταθμού, *Προέλευση: National Renewable Energy Laboratory (NREL) PV Guidebook, 2016 ύστερα από προσαρμογή*

¹ Αποτελούν βραχείας διάρκειας υπερτάσεις σε ένα κύκλωμα, συνήθως λόγω διακοπών ρεύματος.

1.6 Εισαγωγή εννοιών απόδοσης

Οι συνθήκες STC (Standard Test Conditions - Συνθήκες Τυποποιημένης Δοκιμής) ή κανονικές συνθήκες δοκιμής είναι μια διεθνής πρότυπη μέθοδος μέτρησης για την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Καθορίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες πρέπει να γίνονται οι μετρήσεις, έτσι ώστε να παρέχεται μια κοινή βάση σύγκρισης για την απόδοση διάφορων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ορίζουν θερμοκρασία κελιών 25°C, ηλιακή ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος 1000 W/m² και φάσματος (Air Mass AM 1.5) (Louwen κ.α., 2017).

Μία πιο ρεαλιστική εικόνα προσφέρουν οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας NMOT: Nominal Module Operating Temperature, που ορίζουν 800 W/m² ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας, 20°C θερμοκρασία περιβάλλοντος, φασματική πυκνότητα AM 1.5 και ταχύτητα ανέμου 1 m/sec (REC, 2023).

Ως προς την αρνητική τους επίπτωση στην ισχύ της γεννήτριας, και έτσι στην ενεργειακή απόδοση, δεν πρέπει να υποτιμώνται ενδεχόμενες σκιάσεις, ελαττώματα, σκόνη (Jathar κ.α., 2023) και σφάλματα που παρεισφύρουν στη λειτουργία του συστήματος, λόγω χάριν υποβάθμιση των πλαισίων. Γι' αυτό πρέπει και να εντοπίζονται άμεσα, μέσω της παρακολούθησης του συντελεστή απόδοσης όλης της εγκατάστασης συλλήβδην, αλλά και κάθε αντιστροφέα ξεχωριστά.

Ο **συντελεστής απόδοσης η** φωτοβολταϊκού κυττάρου εκφράζει το εξής. Ποιο μέρος της προσπίπτουσας στην εκάστοτε γεννήτρια ακτινοβολίας αξιοποιείται τελικά από αυτήν; Έτσι, η εκτίμηση του δείκτη αυτού αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ποιότητας της συνολικής εγκατάστασης, λόγος για τον οποίο είναι αναγκαίο σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να μετρώνται και να παρακολουθούνται τακτικά οι κλιματολογικές συνθήκες και η παραγόμενη ενέργεια και ισχύς των επιμέρους συσκευών (αντιστροφέων) (Santos, 2018). Η τιμή λοιπόν αυτού δίνεται από το πηλίκο της μέγιστης ισχύος **P_{max}** προς την προσπίπτουσα στην επιφάνεια του στοιχείου ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας **P_{in}** ή, ισοδύναμα, το πηλίκο της παραγόμενης ενέργειας (απόλυτος αριθμός) σε kWh προς τις kWh της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (επιφάνεια ακτινοβολίας σε m² επί Wh/m²) (Καζάς, 2020).

η = στιγμιαία παραγόμενη ηλ. ισχύς σε kW/(επιφάνεια ακτινοβολίας x ακτινοβολία σε W/m²)

Πρακτικά η απόδοση του ηλιακού κελιού και ολόκληρου του ηλιακού πλαισίου διαφέρει λόγω των αντιστάσεων που υπάρχουν στα κυκλώματα του πλαισίου. Με την απόδοση του *πλαίσου* ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία και οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν αυτή στις προδιαγραφές.

Ο παράγοντας που ονομάζεται «**performance ratio**» έχει αναπτυχθεί για να αξιολογήσει τη συνολική αξία των απωλειών λόγω αποκλίσεων από τις συνθήκες που έχουν οριστεί ως ονομαστικές, ή αλλιώς Standard Test Conditions (STC). Είναι η σχέση μεταξύ της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης (πραγματική τιμή) της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης προς τη θεωρητικά δυναμικά ικανή (κανονική τιμή - STC) να παραχθεί ενεργειακή απόδοση. Ο παράγοντας αυτός

απόδοσης δίνει το μέτρο της παραγόμενης AC ισχύος, που παραδίδεται ως ποσοστό της συνολικής DC ισχύος που τα ηλιακά πάνελ θα έπρεπε να μπορούν να παράγουν στις STC περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή υπολογίζεται ως η συνολική παραγωγή σε kWh προς το γινόμενο της ονομαστικής απόδοσης της εγκατάστασης (σε συνθήκες STC, η_{STC}) επί τη συνολική απολαβή ηλιακής ενέργειας σε kWh, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία επί τη συνολική επιφάνεια των modules (εγκατεστημένη χωρητικότητα).

$$PR = \text{παραγόμενη ηλ. ενέργεια σε kWh} / (\text{συν. ηλιακή απολαβή σε kWh} \times \text{ονομαστική απόδοση σε STC})$$

Αποτελεί μέτρο του λόγου της πραγματικής παραγωγής ενέργειας προς την αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας βάσει των προδιαγραφών σχεδιασμού του συστήματος σε STC. Εκφράζει δηλαδή το ποσοστό της ενέργειας που είναι πραγματικά διαθέσιμη για έγχυση στο δίκτυο, σε σχέση με αυτή που θα ήταν διαθέσιμη αν το σύστημα λειτουργούσε χωρίς αποκλίσεις από τις συνθήκες αναφοράς STC, με παραδοχή ιδίων συνθηκών ακτινοβολίας για τη διάρκεια μιας ημέρας και ίδιας χωρητικότητας για τις δύο περιπτώσεις και χωρίς καμία άλλη απώλεια στο σύστημα. Ισοδύναμα, ο λόγος PR μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας τους επιμέρους συντελεστές απόδοσης των στοιχείων της εγκατάστασης (Kymakis κ.α., 2009), ώστε να εξαιρεθούν όλες οι εμφανιζόμενες απώλειες.

Αξίζει να ασχοληθεί κανείς με τον λόγο επίδοσης δεδομένου ότι η μέγιστη ονομαστική απόδοση που δίνουν οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι σε συνθήκες STC, οι οποίες πρακτικά δεν είναι δυνατές για έναν σταθμό, και σπανίως εμφανίζονται στη διάρκεια πραγματικής λειτουργίας του (Vasishit κ.α., 2016). Ενδεικτικά, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που λειτουργούν σωστά χωρίς δυσλειτουργίες επιτυγχάνουν τιμές PR μεταξύ 70% και 90%, με αποκλίσεις προς τα κάτω να δηλώνουν σαφή απόκλιση από την κανονική λειτουργία της εγκατάστασης (SMA Sunny Sensorbox manual, 2011). Αν δηλαδή η τιμή είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη, μπορεί να υποδεικνύει προβλήματα στο σύστημα Φ/Β, όπως σκίαση, σκόνη ή βλάβη των στοιχείων της εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας. Γιατί όμως η απόδοση ολόκληρου του σταθμού δεν είναι ίση με την απόδοση των Φ/Β πλαισίων που τον απαρτίζουν; Η αιτία αυτού εξηγείται στην παράγραφο 1.7. Ενδεικτικά,

$$\eta_{\text{σταθμού}} = \eta_{\text{πλασίων, STC}} * PR(\%).$$

Είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ της εγκατεστημένης ισχύος ενός οποιουδήποτε Φ/Β συστήματος και της ισχύος αιχμής που στην πράξη μπορεί να παράγει στιγμιαία. Η εγκατεστημένη ισχύς του εκάστοτε σταθμού, εν προκειμένω τα 149,73 kWp, αναφέρονται σε συνεχές (DC) ρεύμα και υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την ισχύ των πλαισίων σε συνθήκες STC με την επιφάνεια των πλαισίων, εδώ 651 πλαίσια των 230 Wp το καθένα. Σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας όμως, εκτός από το ότι αυτές διαφέρουν από τις πρότυπες, εντοπίζονται και απώλειες σημαντικές ποσοστιαία, οι οποίες υπεισέρχονται στον υπολογισμό κατά τον πολλαπλασιασμό των επιμέρους συντελεστών απόδοσης, ώστε να βρεθεί ο λόγος επίδοσης της εγκατάστασης, όπως αυτός ορίστηκε παραπάνω. Αυτό σημαίνει ότι στην πράξη, ειδικά για εγκαταστάσεις με μετασηματιστή Μέσης Τάσης, ο σταθμός σε καμία στιγμή δεν

παράγει όντως 149,73 kW, και ιδιαίτερα όχι τις καλοκαιρινές ημέρες, όπου η θερμοκρασία των πλαισίων έχει πολύ μεγαλύτερη απόκλιση από την πρότυπη των 25°C. Αντίθετα, η εγκατάσταση μπορεί να πλησιάσει τη στιγμιαία ισχύ των 150 kW σε ανοιξιάτικες ή φθινοπωρινές ημέρες όπου η ακτινοβολία και η ένταση της ηλιοφάνειας είναι πολύ κοντά στις STC, ή και ακόμη καλύτερες. Για να ξεπεράσει ο σταθμός στιγμιαία την εγκατεστημένη του ισχύ, θα πρέπει να αντισταθμιστούν οι απώλειες του συστήματος (που έχουν αμεληθεί στα 150 kWp), με την αυξημένη απόδοση λόγω των ενδεχομένως καλύτερων - από τις STC - συνθηκών τη συγκεκριμένη στιγμή, ωστόσο σε διασυνδεδεμένους σταθμούς είναι σπάνιο. Ο λόγος που η παραγωγή σε kWh είναι μεγαλύτερη συνολικά τους θερινούς μήνες στην Ελλάδα είναι το μεγαλύτερο διάστημα ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια των ημερών αυτών, σε συνδυασμό με τη σπανιότερη εμφάνιση καιρικών φαινομένων όπως συννεφιάς και τη θέση του ηλίου τους μήνες αυτούς (γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων).

Η **ειδική απόδοση** της εγκατάστασης σε kWh/kWp είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μέτρα απόδοσης για συστήματα ηλιακής ενέργειας. Χρησιμοποιείται για τη σύγκριση διαφορετικών τοποθεσιών, καιρικών συνθηκών και την ανάλυση διαφορετικών μηχανολογικών σχεδιασμών / διατάξεων / εξοπλισμού. Υπολογίζεται ως ο λόγος μεταξύ της συνολικής ετήσιας παραγωγής ενέργειας και της εγκατεστημένης ισχύος.

Ειδική Απόδοση = παραγωγή εγκατάστασης (kWh) / εγκατεστημένη ισχύς (kWp) (Santos, 2018).

Η ειδική απόδοση αναφέρεται στο πόση ενέργεια (kWh) θα παραχθεί για κάθε kWp των εγκατεστημένων ηλιακών πλαισίων.

Ο **συντελεστής δυναμικότητας** (capacity factor - **CF**) ορίζεται ως «ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας προς τη θεωρητικά μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παραχθεί σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (συνήθως έτος). Στην ετήσια κλίμακα, η θεωρητικά μέγιστη παραγωγή ενέργειας (π.χ. σε kWh, MWh, GWh, κτλ.), είναι ίση με την ονομαστική ισχύ του συστήματος (σε kW, MW, GW, κτλ.) επί τις ώρες του έτους (8760 h)» (Μαμάσης, 2018-19). Υπολογίζει δηλαδή πόσες kWh ενέργειας απέδωσε κάποια ΑΠΕ, ανά έτος, ανά Watt εγκατεστημένης δυναμικότητας.

Ένας υψηλός συντελεστής δυναμικότητας υποδηλώνει ότι ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός λειτουργεί κοντά στο μέγιστο δυνατό δυναμικό του, παράγοντας μια σημαντική ποσότητα ενέργειας σε σχέση με την εγκατεστημένη του ικανότητα. Έχουμε:

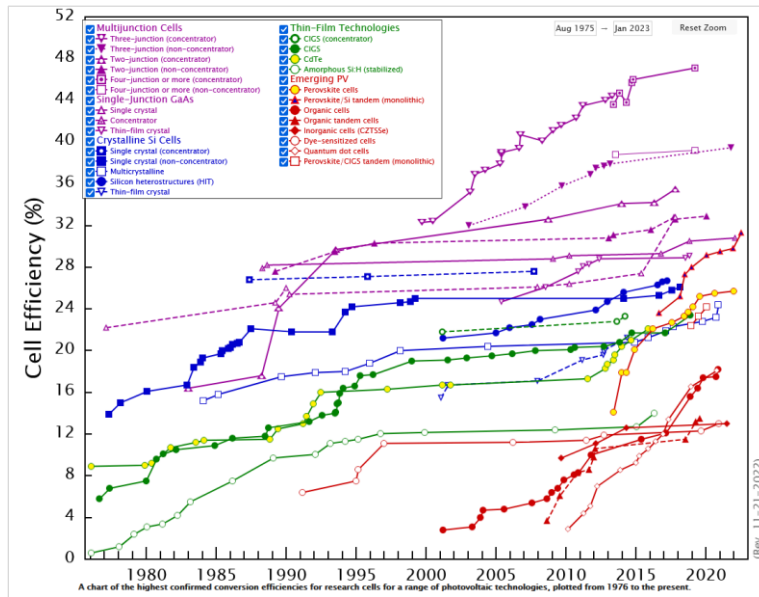
$CF = \text{ετήσια παραγωγή εγκατάστασης (kWh)} / (\text{εγκατεστημένη ισχύς (kWp)} * 8760),$

όπου 365 ημέρες / έτος * 24 ώρες / ημέρα = 8760 ώρες / έτος.

1.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση Φ/Β σταθμού

Η απόδοση των ηλιακών κελιών, εκφραζόμενη ως το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, εξαρτάται καταρχάς από την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται, κυρίως από την αντανάκλαστικότητα και την αγωγιμότητα που επιτυγχάνεται

στο τελικό προϊόν. Πράγματι, υλικά χαμηλότερης αγωγιμότητας και υψηλότερης αντανakλαστικότητας μειώνουν τον αριθμό των φωτονίων που *δύνανται* να δημιουργήσουν ηλεκτρικό ρεύμα (Huld και Amillo, 2015). Το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας των Η.Π.Α. (NREL) δημιούργησε το διάγραμμα της Εικόνας 1.4 για τους διάφορους τύπους ηλιακών κελιών και τις αντίστοιχες καταγεγραμμένες μέγιστες αποδόσεις. Σημειώνεται πως το διάγραμμα αφορά την απόδοση των κελιών που αποτελούν το ηλιακό πλαίσιο, και όχι το πλαίσιο συνολικά.



Εικόνα 1.4 Συντελεστής απόδοσης ηλιακών κελιών συναρτήσεως του χρόνου, σύμφωνα με το US National Renewable Energy Laboratory (NREL)

Άλλος παράγοντας μείωσης της ηλεκτρικής απόδοσης των πλαισίων αποτελεί η κατασκευή του πλέγματος αγωγιμότητας μεταλλικών καλωδίων της επιφάνειας των ηλιακών κυττάρων. Έρευνα που δημοσιεύτηκε στην Ολλανδία το 2015 (Gurta κ.α., 2015) προσδιόρισε μια βελτιωμένη διάταξη καλωδίωσης να έχει τη μορφή των νευρώσεων ενός φύλλου. Η βελτιωμένη διάταξη νοείται από πλευράς ισοροπίας μεταξύ μείωσης της ενεργής επιφάνειας πυριτίου για την απορρόφηση φωτονίων και μείωσης της αντίστασης των καλωδίων μέσω αύξησης της επιφάνειάς τους. Η εφαρμοζόμενη διάταξη, δηλαδή αυτή του πλέγματος, αποφεύγει το μεγάλο κατασκευαστικό κόστος, όμως οδηγεί σε λειτουργία με απώλειες της τάξης του 8% (McManus, 2020).

Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, τα υλικά κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων υφίστανται αλλοίωση, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση του πλαισίου (Daher, 2022). Ο παράγοντας αυτός ονομάζεται γήρανση των πλαισίων και κατά τη διάρκεια ζωής του έργου μπορεί να μειώσει την ικανότητα του σταθμού από την ονομαστική του, αυξάνοντας τις απώλειες. Ακόμη, το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της εγκατάστασης είναι παράγοντες που διαδραματίζουν πρωταρχικό ρόλο στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, και κατά συνέπεια λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη μελέτη του έργου. Περαιτέρω, σημειώνονται απώλειες λόγω διαφορετικού φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας (σε σχέση με τις STC συνθήκες όπου επικρατεί

AM 1,5), λόγω διαφοροποίησης της πόλωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και κυρίως της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, ειδικά για χαμηλές τιμές ($<200 \text{ W/m}^2$) (Καμπούρης, 2016). Πιθανές σκιάσεις από δέντρα, χόρτα, ή άλλα εμπόδια, σκόνη, τυχόν σωματίδια που επικαλύπτουν το πλαίσιο, επίσης μειώνουν την αποδοτικότητα των στοιχείων. Μάλιστα, τυχόν βλάβες των αντιστροφέν και παρουσία σκόνης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν πολύ μεγαλύτερη αρνητική επίδραση στα ποσοστά απωλειών από ό,τι η γήρανση (Kiefer κ.α., 2018). Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθούν απώλειες απορρόφησης του φωτός λόγω ανάκλασης στην επίστρωση γυαλιού των Φ/Β στοιχείων. Καίριας σημασίας για την αντανάκλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι, εκτός του υλικού και της επίδρασης της γεωγραφικής τοποθεσίας των στοιχείων, ο προσανατολισμός και η γωνία τοποθέτησής τους, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνειά τους. Την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζουν ακόμα οι κλιματολογικές συνθήκες, ιδιαίτερα η υγρασία, ο άνεμος και η θερμοκρασία. Σημειώνεται πως ένας από τους κύριους λόγους της χαμηλής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων είναι η ικανότητα αξιοποίησης μικρού μόνο μέρους του φάσματος μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας (Huld και Amillo, 2015).

Όσον αφορά την επίδραση της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στις τιμές της υπολογιζόμενης απόδοσης, αυτή είναι μόνο θετική αν εξαιρέσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας στη λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας. Για πολύ χαμηλές τιμές της ακτινοβολίας, η αντίστοιχη τιμή της απόδοσης είναι μειωμένη (Mavromatakis, 2017). Πράγματι, υπάρχουν λιγότερα φωτόνια διαθέσιμα για να απορροφηθούν από τα ηλιακά πλαίσια, ενώ αυξάνεται η ανασύνδεση ηλεκτρονίων και θετικών φορτίων πριν αυτά συνεισφέρουν στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, όπως και οι απώλειες λόγω εσωτερικών αντιστάσεων και συνδέσεων σε σειρά εντός του ηλιακού πλαισίου.

Η επίδραση της θερμοκρασίας των ηλιακών κυψελών εκφράζεται με την πτώση της τάσης της ηλιακής γεννήτριας που αντιστοιχεί στο μέγιστο σημείο ισχύος της χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας τους. Για τα κρυσταλλικά πλαίσια, όπως αναφέρεται παρακάτω ότι έχουμε εν προκειμένω, η βέλτιστη λειτουργία είναι συνήθως σε μια τάση λειτουργίας, η οποία είναι εμπειρικά γύρω στο 20% χαμηλότερη από την τάση ανοιχτού κυκλώματος που δίνεται από τον κατασκευαστή στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλιακών κυψελών (Τσόγκας, 2009). Για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας και θεωρώντας πυκνότητα ισχύος προσπίπτουσας ακτινοβολίας μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή, η τάση του μεγίστου σημείου ισχύος μειώνεται εξαιτίας αποκλειστικά αυτής της αύξησης και μάλιστα, σημαντικά ποσοστιαία. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο, η αιχμή της παραγόμενης στιγμιαίας ισχύος τις καλοκαιρινές ημέρες είναι μικρότερη από την αντίστοιχη αιχμή στην άνοιξη ή το φθινόπωρο. Ενδεικτικά, η θερμοκρασία των ηλιακών κελιών λαμβάνει τιμές πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος της τάξης των 25-30°C για ελεύθερη τοποθέτηση αυτών με κλίση.

Ιδιαίτερα για τη θερμοκρασία, σημασία εκτός από τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, έχει η θερμοκρασία των κυψελών των Φ/Β κατά τη λειτουργία τους και η απόκλιση αυτής από τις ιδανικές συνθήκες, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και την πυκνότητα

ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (Φυσέας, 2018). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν αποδοτικότερα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κυψέλης (Louwen, 2017), καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλεται το σημείο μέγιστης ισχύος λόγω της μείωσης της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (Κτενίδης, 2008), μετατοπίζοντας ολόκληρη την καμπύλη I-V προς τα αριστερά. Εδώ υπεισέρχεται ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος που δίνει ο κατασκευαστής των πλαισίων, καθώς αυτός, πολλαπλασιαζόμενος με τη διαφορά θερμοκρασίας του πλαισίου από τις πρότυπες συνθήκες των 25°C, και δεδομένου ότι έχει αρνητικές τιμές, δίνει τον θερμοκρασιακό συντελεστή της απόδοσης του εκάστοτε πλαισίου, αρκεί να προστεθεί στη μονάδα. Αυτός ύστερα πολλαπλασιάζεται με τους υπόλοιπους επιμέρους συντελεστές απόδοσης των υπολοίπων συστατικών του κυκλώματος ώστε να προκύψει ο τελικός λόγος επίδοσης **PR** του συστήματος (Kymakis, 2009).

Εκτός από τη μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια των πλαισίων, παρατηρείται διαφορά αφενός στην ποσότητα ρεύματος εισόδου που διοχετεύουν τα καλώδια DC στους inverters, καθώς και αφετέρου μεταξύ της ποσότητας εξερχόμενου από τους inverters συνεχούς ρεύματος των ηλιακών πλαισίων και της AC ισχύος που παραδίδεται στο δίκτυο με το οποίο είναι διασυνδεδεμένος ένας φωτοβολταϊκός σταθμός. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής απόδοσης μιας συστοιχίας Φ/Β πλαισίων είναι μικρότερος από αυτόν ενός μεμονωμένου πλαισίου και ο συνολικός συντελεστής της εγκατάστασης μικρότερος από αυτόν της συστοιχίας πλαισίων (Anzalchi και Sarwat, 2017). Αυτές οι απώλειες που παρατηρούνται κατά τη μεταφορά του παραγόμενου ρεύματος σε κάθε υποσύστημα τελικώς προς το δίκτυο του εγκατεστημένου συστήματος, μπορούν να αιτιολογηθούν από μια ευρεία ποικιλία παραγόντων.

Απώλειες εμφανίζονται αναπόφευκτα εξαιτίας της ανομοιογένειας των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των πλαισίων μίας συστοιχίας (Μαλτέζος, 2013). Η ανομοιογένεια αυτή στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μπορεί να προκύπτει από την κατασκευή ή από εξωτερικούς παράγοντες κατά τη διάρκεια ζωής τους, όπως διαφορετική ένταση ακτινοβολίας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σκιάσεων, ή διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο πλαίσια της ίδιας συστοιχίας, ή ακόμα και μεταξύ κελιών του ίδιου πλαισίου. Πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά παράγουν ρεύμα σύμφωνα με τις δυνατότητες του πλαισίου με την ελαφρώς μικρότερη ισχύ. Οι απώλειες αυτές είναι της τάξης του 1% (Καλλιμάνης, 2013).

Ακόμη, απώλειες εμφανίζονται εξαιτίας ύπαρξης οποιασδήποτε αντίστασης των στοιχείων που απαρτίζουν το κύκλωμα τόσο στην DC όσο και στην AC πλευρά. Ενδεικτικά, οι απώλειες αυτές εμφανίζονται λόγω καλωδιακής σύνδεσης DC μεταξύ πλαισίων και συστοιχίας (της τάξης του 2-3%), λόγω πτώσης τάσης καλωδίων² ή λόγω ύπαρξης στοιχείων που περιορίζουν τη κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας, δηλαδή διόδων. Συνοπτικά, χρησιμοποιούνται διόδοι παράκαμψης παράλληλα συνδεδεμένες σε ομάδες κελιών του πλαισίου ώστε να

² Η πτώση τάσης (voltage drop) συμβαίνει όταν η τάση στο τέλος ενός καλωδίου είναι χαμηλότερη από αυτή στην αρχή και προκαλείται εξαιτίας της αντίστασης που έχει οποιοδήποτε μήκος ή μέγεθος καλωδίων (Electricity Forum, 2023).

προληφθεί η αντιστροφή ρεύματος και να αντιμετωπιστεί η πτώση τάσης σε περιπτώσεις ελαττωματικής λειτουργίας ή σκίασης των κελιών (Κτενίδης, 2008). Συνήθως σε Φ/Β συστήματα με συσσωρευτές τοποθετούνται δίοδοι αντεπιστροφής σε σειρά με κάθε παράλληλη ομάδα πλαισίων, ώστε να αποτρέπεται η διέλευση αντίστροφου ρεύματος κατά τη διάρκεια περιόδων απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας ή όταν το σύστημα δε λειτουργεί, προστατεύοντας έτσι τα υπόλοιπα πλαίσια (Καζάς, 2020). Δίοδοι φραγής συνδέονται σε σειρά ανάμεσα στα πλαίσια και τις μπαταρίες για να αποτρέπουν τη διέλευση του ρεύματος από τις μπαταρίες προς τα πλαίσια σε περιόδους μη παραγωγής (Καραγιαννίδης, 2021). Η επίδραση στην απόδοση αφορά κυρίως τις σε σειρά συνδέσεις, όπου περνάει από τη δίοδο αυτή το ρεύμα κατά την κανονική λειτουργία σε κάθε συστοιχία, με αποτέλεσμα να υπάρχουν απώλειες, της τάξης του 1% για το σύνολό τους (Καλλιμάνης, 2013). Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην αποδοτικότητα των αντιστροφέων σε ένα σύστημα, η οποία κυμαίνεται γύρω στο 98% (Fraunhofer ISE, 2023), καθώς και του μετασχηματιστή μέσης τάσης, καθώς ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική.

2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Για να μπορέσει να παρουσιαστεί η ανάλυση που έγινε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι απαραίτητο να στοιχειοθετηθεί η δομή και ο τρόπος λειτουργίας της εξεταζόμενης εγκατάστασης. Ακόμη θα πρέπει να προσδιοριστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά αφενός της διάταξης και των υποσυστημάτων που αποτελούν τον σταθμό, αφετέρου όλων των επιμέρους υλικών και συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για τον τελικό σκοπό της έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο του ΑΔΜΗΕ. Στο παρόν κεφάλαιο λοιπόν γίνεται επισκόπηση και παρουσιάζονται λεπτομερώς τα τεχνικά, μηχανικά και ηλεκτρομηχανολογικά χαρακτηριστικά του σταθμού και των επιμέρους υποσυστημάτων του, παρατίθενται σκαριφήματα συνδέσεων, κυκλωμάτων και εγκατεστημένων μοντέλων πλαισίων και αντιστροφών, και επισυνάπτονται σχέδια των επιμέρους μελετών του έργου, μαζί με το σχέδιο εκσκαφών, καθώς και φωτογραφίες των συσκευών και της ηλεκτρονικής πλατφόρμας τηλεπίλωσης της εγκατάστασης. Ακόμη, αναφέρονται στο τέλος του κεφαλαίου ορισμένες διευκρινίσεις - προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο λειτουργίας, έχοντας επηρεάσει την απόδοση ή την επεξεργασία των δεδομένων στο πλαίσιο της ανάλυσης της εργασίας.

2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β σταθμού

Αποκλειστικός σκοπός του Φ/Β σταθμού είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η τροφοδοσία του δικτύου μεταφοράς του ΑΔΜΗΕ. Το αγροτεμάχιο έχει γεωγραφικό πλάτος $\varphi=37.473$, γεωγραφικό μήκος $\lambda=22.121$, κλίση 5%, εμβαδόν 4939,97 m² και δεν υπάρχουν τριγύρω εμπόδια που να σκιάζουν τον χώρο της εγκατάστασης.

Η θέση του προσδιορίζεται ως: «Μάρμαρα» - Δ.Δ. Βοϊδίνο Παλαμαρίου - Δήμος Γορτυνίας - Ν. Αρκαδίας. Στην περιοχή δεν υπάρχει οικισμός, ούτε ασφαλτοστρωμένο οδικό δίκτυο. Η εγκατάσταση του σταθμού έγινε το 2011 από την εταιρεία RSEnergy Hellas SolartechNIK EPE. Το έργο είναι διασυνδεδεμένο στο δίκτυο από τις 02/12/2011, και η θέση του φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Τοποθεσία του Φ/Β σταθμού στην Ελλάδα (Google Earth) και κάτοψη (Google Maps)

Η παρούσα τεχνική περιγραφή αναφέρεται στον ήδη λειτουργούντα σταθμό ηλεκτροπαραγωγής από φωτοβολταϊκά συστήματα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 149,73 kWp. Η στήριξη των πλαισίων έχει γίνει με σκελετό της εταιρείας ALPHA SOLAR. Αποτελείται από τα παρακάτω συστήματα:

- ✓ 651 Φ/Β πλαίσια REC ισχύος 230 Wp, τοποθετημένα σε κλίση γεννητριών 28°
- ✓ 8 αντιστροφείς STP 17000TL ισχύος AC 17 kW ο καθένας, 1 αντιστροφέας STP 10000TL ισχύος AC 10 kW
- ✓ 1 Μ/Σ ανύψωσης τάσης ABB (0,4 kV/20 kV) ονομαστικής ισχύος 250 kVA, Dyn11
- ✓ Τις καλωδιώσεις DC
- ✓ Τις καλωδιώσεις AC στη Μ.Τ. και Χ.Τ.
- ✓ Το σύστημα γείωσης και εσωτερικής αντικεραυνικής προστασίας
- ✓ 1 γενικό πίνακα AC με απαγωγείς υπερτάσεων και γενικό διακόπτη
- ✓ 3 υποπίνακες χαμηλής τάσης που στον καθένα αντιστοιχούν 3 inverter (πίνακες ομαδοποίησης)

- ✓ 1 υπαίθριο Υ/Σ (οικίσκος) που περιλαμβάνει τον Μ/Σ, τους διακόπτες, τον ΓΠΧΤ, τις επικοινωνίες του σταθμού και τους πυκνωτές αντιστάθμισης αέργου ισχύος³
- ✓ Το σύστημα επίβλεψης λειτουργίας Φ/Β συστήματος, παρακολούθησης χώρου, καθώς και τις συσκευές καταγραφής δεδομένων
- ✓ Τις βάσεις στήριξης.

Να σημειωθεί ότι εγκαταστάσεις άνω των 100 kW συνδέονται υποχρεωτικά στο δίκτυο Μέσης Τάσης (Μ.Τ.) του ΑΔΜΗΕ και η τάση σύνδεσης με τον ΑΔΜΗΕ είναι 20 kV.

Επισυνάπτεται παρακάτω η Εικόνα 2.2, η οποία είναι φωτογραφία μιας συστοιχίας της εγκατάστασης το 2023. Με κόκκινο χρώμα είναι το κουτί του αντιστροφέα που εξυπηρετεί τη συγκεκριμένη συστοιχία και με άσπρο χρώμα το κουτί ομαδοποίησης των καλωδίων εναλλασσόμενου ρεύματος με το οποίο συνδέεται ο συγκεκριμένος αντιστροφέας. Ο ρόλος αυτού θα εξηγηθεί στην παράγραφο 2.1.6.



Εικόνα 2.2 Φωτογραφία μιας συστοιχίας της εγκατάστασης (2023)

³ Οι πυκνωτές αντιστάθμισης αέργου ισχύος συνδέονται στο δίκτυο παράλληλα με το φορτίο και μειώνουν τη διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος, προσφέροντας έτσι αντιστάθμιση της μη παραγόμενης ισχύος που προκύπτει από την εφαρμογή τάσης σε αντίσταση ή αντιστροφέα.

2.1.1 Χωροθέτηση Φ/Β Σταθμού

Η χωροθέτηση έχει πραγματοποιηθεί με σκοπό την αποφυγή των σκιάσεων μεταξύ των συστοιχιών των Φ/Β, καθώς και την εύκολη πρόσβαση για τη συντήρηση του σταθμού. Παράλληλα οι πίνακες ομαδοποίησης, που θα εξηγηθούν παρακάτω, επιλέγεται να εγκαθίστανται κεντρικά ανάμεσα στις Φ/Β συστοιχίες ώστε να επιτυγχάνονται τόσο συμμετρικές, όσο και οι ελάχιστες δυνατές οδεύσεις καλωδίων ρεύματος. Επίσης αφήνονται διάδρομοι πρόσβασης από και προς τους πίνακες αυτούς.

Στόχος μιας τόσο απαιτητικής εγκατάστασης είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας. Αυτό έχει επιτευχθεί με τους εξής τρόπους:

- ✓ Εγκατάσταση αντιστροφών χαμηλών απωλειών
- ✓ Ελάχιστο δυνατό μήκος όδευσης καλωδίων συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος Χ.Τ.
- ✓ Τοποθέτηση του μετασχηματιστή σε σημείο που να εξασφαλίζονται οι βέλτιστες αποστάσεις από τους αντιστροφείς προς αποφυγή των απωλειών χαμηλής τάσης.

Ακόμη, αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση πως το γήπεδο δεν έχει εκμεταλλευτεί στο μέγιστο, καθώς η σύμβαση του ιδιοκτήτη με τη Δ.Ε.Η. τότε, απαιτούσε μικρότερη επιφάνεια πλαισίων από αυτή που θα μεγιστοποιούσε την ηλεκτρική παραγωγή της ιδιοκτησίας. Επισημαίνεται πως η μελέτη της εγκατάστασης έχει γίνει για ονομαστική ισχύ 149,73 kWp, σύμφωνα με τη σύμβαση του ιδιοκτήτη με τη Δ.Ε.Η. τότε, παρ' όλα αυτά έχει προβλεφθεί και μελλοντική εγκατάσταση επιπλέον πλαισίων και ενός (1) επιπλέον αντιστροφέα ώστε να παρέχεται η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του γηπέδου, με τις δεδομένες προδιαγραφές που αναλύονται παρακάτω.

2.1.2 Βάσεις στήριξης

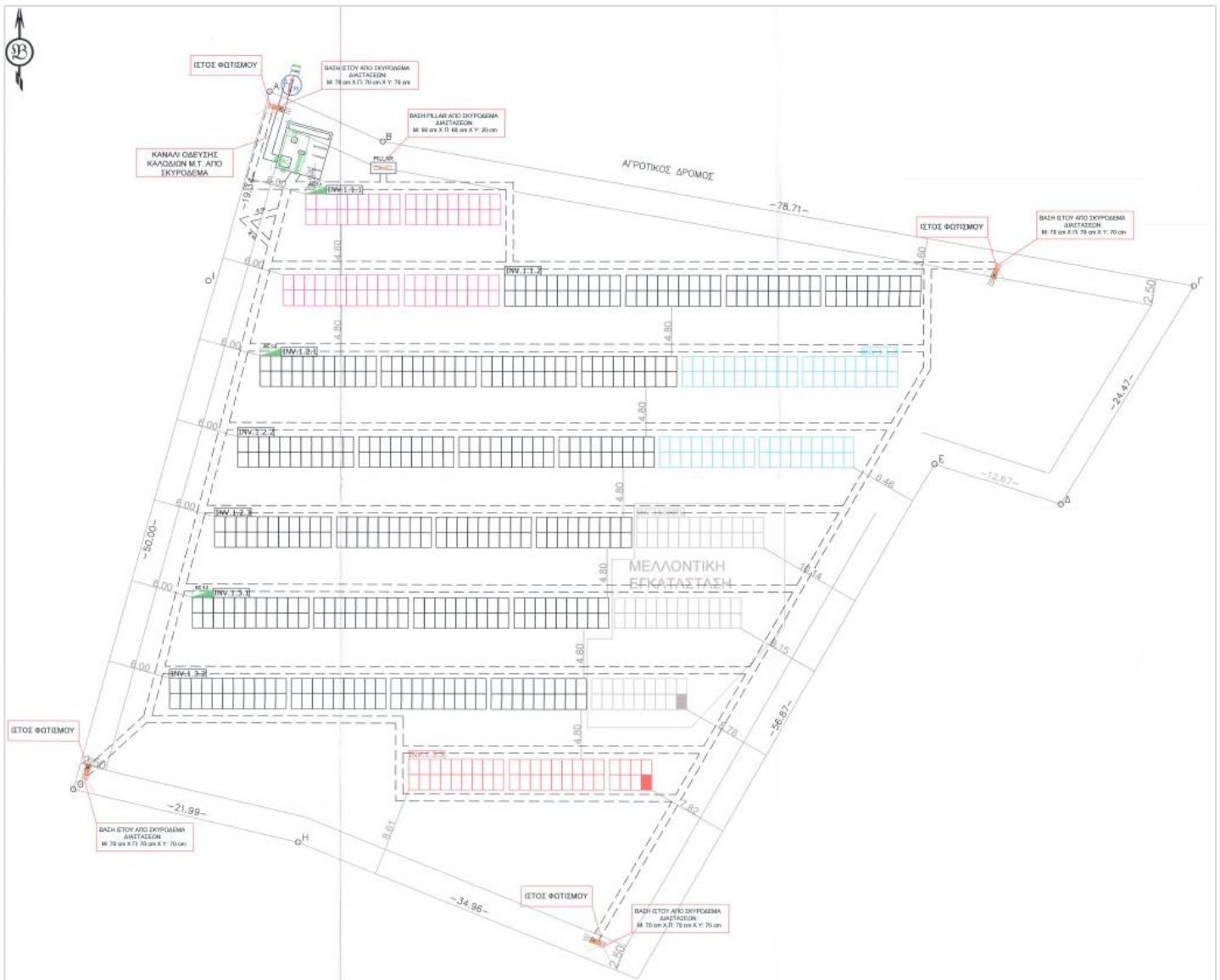
Τα πλαίσια απέχουν περίπου 0,6 m από το έδαφος από τη μπροστινή πλευρά της συστοιχίας και 2,0 m από την πίσω πλευρά. Οι βάσεις στηρίζονται επί του εδάφους με τη μέθοδο της πασσαλόμπεξης, δηλαδή πάνω σε γαλβανισμένο πάσσαλο ο οποίος έχει εμπευχθεί στο έδαφος με ειδικού τύπου μηχανήμα πασσαλόμπεξης, μάρκας GAYK.

Η βάση στήριξης των Φ/Β πλαισίων κατασκευάζεται από αλουμίνιο. Η σύνδεση των Φ/Β στοιχείων με την κατασκευή έχει γίνει με τη χρήση στηριγμάτων χωρίς να απαιτείται η διάτρηση των μεταλλικών δοκών.

Ο σχεδιασμός της κατασκευής αυτής έχει γίνει με βάση τις απαιτήσεις σχεδιασμού που ορίζονται από τον Γερμανικό κανονισμό DIN 1055 και για τις Ελληνικές ανεμολογικές συνθήκες (αντοχή σε ανεμοπίεση 140 km/h).

Συμπληρωματικά επισυνάπτεται το σχέδιο εκσκαφών (Εικόνα 2.3), στο οποίο με διακεκομμένες γραμμές αναπαρίστανται οι τάφροι καλωδίων, οι οποίες έχουν πλάτος 60 cm και βάθος 70 cm, και με συνεχή γραμμή αναπαρίσταται η εκσκαφή του καναλιού όδευσης καλωδίων Μέσης

Τάσης από σκυρόδεμα. Στο σχέδιο φαίνονται το εξωτερικό περίγραμμα του γηπέδου - κορυφές ΑΒΓΔΕΖΑ, όλες οι διαστάσεις του γηπέδου αλλά και οι αποστάσεις της διάταξης των συστοιχιών των Φ/Β πλαισίων, καταμετρώντας όλοι οι αντιστροφείς με τις αντίστοιχες συστοιχίες πανέλων με τις οποίες συνδέονται, ο υποσταθμός στα βορειοδυτικά του γηπέδου, καθώς και η θέση του στύλου του ΑΔΜΗΕ με τον οποίο γίνεται η διασύνδεση με το δίκτυο. Σημειώνεται πως στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ των συστοιχιών πλαισίων υπεισελήθε και η μικρή κλίση του εδάφους στο γήπεδο. Το σχέδιο εφαρμογής «όπως κατασκευάστηκε», ή αλλιώς «as-built» της εγκατάστασης έγινε βάσει του σχεδίου εκσκαφών. Βάσει αυτού, θα ακολουθήσει περαιτέρω επεξήγηση και λεπτομερέστερη περιγραφή των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης.



Εικόνα 2.3 Σχέδιο εκσκαφών του Φ/Β σταθμού, Πηγή: αρχείο του έργου

2.1.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Οι παράγοντες που λήφθηκαν υπ' όψιν για την επιλογή των πλαισίων περιελάμβαναν την αξιοπιστία και την τεχνογνωσία της εταιρείας κατασκευής, τη μέγιστη ισχύ παραγωγής, την απόδοσή τους και το κόστος. Τα πλαίσια που επιλέχθηκαν και τοποθετήθηκαν είναι της εταιρείας REC, ισχύος 230 Wp πολυκρυσταλλικού τύπου. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια REC 230 PE (peak power) αποτελούνται από 60 πολυκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου. Η ανοχή ισχύος είναι της τάξης του -3%/+3% και διαθέτουν καθαρά θετική ταξινόμηση των στοιχείων (-0 W / +4,99 W).

Οι ηλιακές κυψέλες είναι τοποθετημένες μέσα σε πλαστικό EVA (οξικό βινυλεστέρα), το οποίο είναι ανθεκτικό στην ηλιακή ακτινοβολία. Το πλαίσιο αποτελείται από ένα ανθεκτικό στην παραμόρφωση και τη διάβρωση κράμα αλουμινίου, χάρη στο οποίο τα στοιχεία είναι σταθερά και έχουν πολλές δυνατότητες τοποθέτησης.

Η μετωπική πλευρά των στοιχείων αποτελείται από ηλιακό γυαλί, το οποίο έχει προενταθεί με θερμική επεξεργασία (Sunarc Technology). Το γυαλί αυτό εξασφαλίζει αφενός υψηλή φωτοδιαπερατότητα και αφετέρου προστατεύει τις ηλιακές κυψέλες από την επίδραση εξωγενών περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως χαλάζι, χιόνι και πάγο. Η παρουσία μιας πολυμερούς μεμβράνης στην πίσω πλευρά εξασφαλίζει ικανοποιητική μόνωση και μεγάλη διάρκεια ζωής.

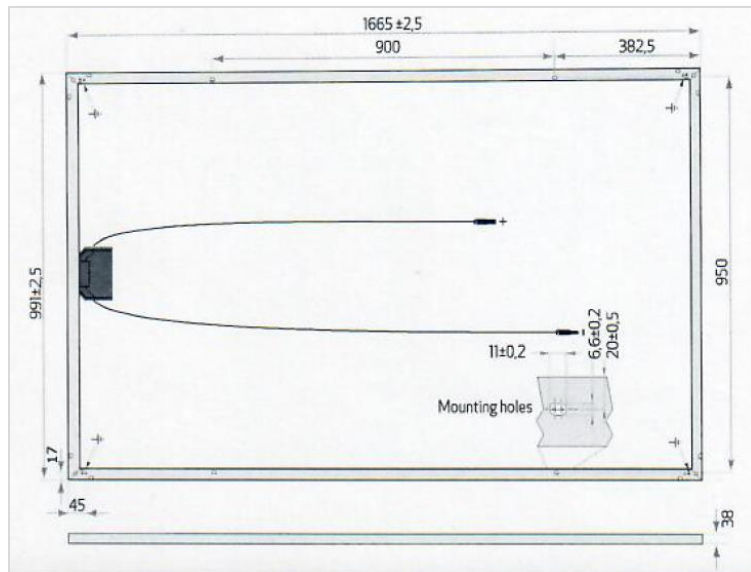
Το κουτί διασύνδεσης στην πίσω πλευρά διαθέτει διόδους παράκαμψης, οι οποίες μειώνουν τον κίνδυνο υπερθέρμανσης μεμονωμένων ηλιακών κυψελών (φαινόμενο hot-spot).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία REC έχουν πιστοποιηθεί με βάση τα τότε ισχύοντα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα IEC/EN 61215 και IEC/EN 61730 και πληρούν τις απαιτήσεις της κατηγορίας προστασίας II. Η απόδοση των *κελιών* που καταγράφεται από τον κατασκευαστή είναι 15,1% και η εγγύηση απόδοσης ανέρχεται, βάσει των όρων εγγύησης του εργοστασίου κατασκευής, για 10 χρόνια στο 90% και για 25 χρόνια στο 80% της ελάχιστης μετρημένης απόδοσης (REC, 2011).

Οι εξωτερικές διαστάσεις του πλαισίου είναι μήκος × πλάτος × ύψος 1650,5×991×38 mm (Εικόνα 2.4) και το βάρος του 18 kg, το εμβαδόν 1,65 m², η θερμοκρασία λειτουργίας είναι από -40 έως +80°C, ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ανέμου είναι 197 km/h. Το μέγιστο φορτίο προσδιορίζεται στα 551 kg/m² ή 5400 Pa, η μέγιστη τάση συστήματος 1000 V και τέλος η μέγιστη τιμή ασφαλειών τήξης σε σειρά⁴ και η μέγιστη τιμή αντίστροφου ρεύματος, όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω, 15 A. Λεπτομερέστερα, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πλαισίων φαίνονται στην Εικόνα 2.4. Παρατίθεται επίσης η Εικόνα 2.5 η οποία είναι φωτογραφία από το έργο του πίσω μέρους των πλαισίων. Τα μαύρα κουτιά στην πίσω όψη των πλαισίων είναι τα

⁴ Είναι εναλλακτική των διόδων φραγής και συνδέονται σε σειρά με κάθε παράλληλα συνδεδεμένη ομάδα πλαισίων, προστατεύοντας από το ανάστροφο ρεύμα με ασήμαντες απώλειες.

κουτιά διασύνδεσης (junction boxes) κάθε πλαισίου, τα οποία περιλαμβάνουν όλες τις ηλεκτρικές συνδέσεις των επιμέρους κελιών του, αλλά και τα καλώδια DC εξόδου. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά καταγράφονται στους Πίνακες 2.1 έως 2.3.



Εικόνα 2.4 Κάτοψη της πίσω πλευράς του πλαισίου και μηχανικά χαρακτηριστικά, *Πηγή:* REC manual, technical characteristics



Εικόνα 2.5 Φωτογραφία της πίσω πλευράς των πλαισίων από το έργο (2023)

Πίνακας 2.1 Ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου REC230PE στις STC, Πηγή: REC manual, technical characteristics

ELECTRICAL DATA @STC	REC230PE
Maximum Power - Pmax (Wp)	230
Watt Class Tolerance - Ptol (W)	0/+5
Maximum Power Voltage - Vmpp (V)	29,2
Maximum Power Current - Impp (A)	7,9
Open Circuit Voltage - Voc (V)	36,5
Short Circuit Current - Isc (A)	8,4
Module Efficiency (%)	13,9

Πίνακας 2.2 Ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίου REC230PE στις NMOT, Πηγή: REC manual, technical characteristics

ELECTRICAL DATA @NOCT	REC230PE
Maximum Power - Pmax (Wp)	170
Maximum Power Voltage - Vmpp (V)	26,8
Maximum Power Current - Impp (A)	6,3
Open Circuit Voltage - Voc (V)	33,6
Short Circuit Current - Isc (A)	6,8

Πίνακας 2.3 Θερμοκρασιακοί συντελεστές (ποσοστιαίοι), Πηγή: REC manual, technical characteristics

TEMPERATURE RATINGS	
Nominal Operating Cell Temperatures (NOCT)	47,9°C (±2°C)
Temperature Coefficient of Pmpp	-0,43%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0,33%/°C
Temperature Coefficient of Isc	-0,074%/°C

Η εγκατάσταση των πλαισίων έχει γίνει με νότιο προσανατολισμό και βάσει των τεχνικών τους χαρακτηριστικών ακολουθώντας την διαδικασία του διαχωρισμού (sorting) των πλαισίων πρώτα βάσει της ονομαστικής έντασης Impp κατά αύξοντα αριθμό, σύμφωνα με το αρχείο μετρήσεων των φ/β γεννητριών από τον κατασκευαστή. Έπειτα, και ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου, έχουν επιλεχθεί να εγκατασταθούν στοιχειοσειρές (strings) με παρόμοια τάση εξόδου. Κατά αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιείται η απόδοση των πλαισίων και των στοιχειοσειρών καθώς αποφεύγονται οι άσκοπες απώλειες λόγω της ανομοιομορφίας τους (Γκαράκης, 2018). Με άλλα λόγια, έχει προηγηθεί της σύνδεσης των αντιστροφών με τις συστοιχίες πανέλων, η ταξινόμηση των πανέλων βάσει της τάσης εξόδου τους με σκοπό την κατάλληλη ομαδοποίησή τους σε συστοιχίες. Έτσι, αφενός οι απώλειες ανομοιογένειας μειώνονται, αφετέρου κάθε συστοιχία

μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σύμφωνα με τις αυξημένες ή μη δυνατότητες των πανέλων από τα οποία απαρτίζεται, καθιστώντας έτσι δυνατή την αξιοποίηση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος συστοιχιών με λίγο μεγαλύτερη δυνατότητα ισχύος, η οποία θα χανόταν σε περίπτωση σε σειρά σύνδεσης των πλαισίων με άλλα ελαφρώς μικρότερης δυνατότητας λειτουργίας.

2.1.4 Αντιστροφείς

Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τις Φ/Β συστοιχίες σε εναλλασσόμενο ώστε να είναι δυνατή η παροχή ρεύματος στο δίκτυο, πραγματοποιείται από τους αντιστροφείς της γερμανικής εταιρείας SMA.

Οι αντιστροφείς STP 17000TL και STP 10000TL είναι μοντέλα της SMA τριφασικής εξόδου με τάση εξόδου 380-400 V και συχνότητα 50-60 Hz, ώστε να είναι συμβατοί με τις απαιτήσεις του ΔΑΠΕΕΠ. Η απόδοσή τους κατά Euro-Eta (στην οποία λαμβάνεται υπ' όψιν η απόδοση του αντιστροφέα σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας) είναι 98%/97,5% και η εγγύηση ισχύει τυπικά για 5 έτη.

Στην Εικόνα 2.6 φαίνεται ένας αντιστροφέας ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο έργο και εξυπηρετεί μία συστοιχία Φ/Β πλαισίων. Δεξιά αυτού φαίνεται ένας εκ των πινάκων ομαδοποίησης, συγκεκριμένα ο 1.1, σύμφωνα με το σχέδιο εκσκαφών.



Εικόνα 2.6 Φωτογραφία αντιστροφέα και πίνακα ομαδοποίησης εγκατεστημένου στο έργο (2023)

Τα γενικά χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων αντιστροφών είναι κοινά και παρουσιάζονται παρακάτω. Οι μηχανολογικές διαστάσεις είναι σε mm (Π/Y/B) 665/690/265 αντίστοιχα, το βάρος τους είναι περίπου 65 kg, η περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας είναι -25°C έως +60°C, η αυτοκατανάλωση τη νύχτα είναι <1 W, η τοπολογία: χωρίς μετασχηματιστή, ο τρόπος ψύξης τους είναι OptiCool και το σημείο τοποθέτησής τους είναι εσωτερικά / εξωτερικά (με ηλεκτρονικό σύστημα κλάσης προστασίας IP65).

Ο κάθε αντιστροφέας φέρει κάποιες ενδείξεις ώστε να έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της σωστής λειτουργίας του ο διαχειριστής του διασυνδεδεμένου συστήματος. Συγκεκριμένα αυτές είναι οι εξής:

- «- τάση της ηλιακής γεννήτριας
- ένταση της ηλιακής γεννήτριας
- ένταση του δικτύου
- κατάσταση μόνωσης της ηλιακής γεννήτριας
- άλλες πληροφορίες κατάστασης λειτουργίας» (Τσόγκας, 2009).

Τα συστήματα προστασίας που αναπόσπαστα χρησιμοποιούνται σε έναν αντιστροφέα καθενός από τα δύο χρησιμοποιούμενα εν προκειμένω μοντέλα αφορούν κυρίως την περίπτωση ηλεκτρολογικού σφάλματος, λόγω χάρη βραχυκυκλώματος, αλλά και τον εντοπισμό της θέσης ενδεχόμενης βλάβης.

Η διερεύνηση κατά τη μελέτη σχετικά με τη χρήση ενός κεντρικού ή συγκεκριμένων μεμονωμένων string inverters οδήγησε στα εξής συμπεράσματα (REC, Τεχνική περιγραφή, 2011). Ο σχεδιασμός με string inverters, ακόμη και εάν πρόκειται για μεγάλης ισχύος Φ/Β σταθμούς, επιλέγεται αφενός λόγω της χαμηλής επικινδυνότητας που έχει η απώλεια κάποιων από αυτούς, και αφετέρου λόγω του ότι η συντήρηση και η αντικατάστασή τους δεν είναι πολυέξοδη, αντίθετα είναι άμεση.

Στον Πίνακα 2.4 επισυνάπτονται οι προδιαγραφές λειτουργίας των αντιστροφών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέα SUNNYTRIPower 10000TL-10 και 17000TL-10 σε ονομαστικές συνθήκες, Πηγή: SMA manual, technical characteristics

	STP 10000TL-10	STP 17000TL-10
Είσοδος (DC)		
Μέγιστη ισχύς DC (με $\cos\phi=1$)	10,4 kW	17,6 kW
Μέγιστη τάση DC	1000 V	1000 V
Εύρος τάσης Φ/Β εγκατάστασης, MPPT (στην ονομαστική ισχύ)	Είσοδος A: 315 V – 800 V Είσοδος B: 150 V – 800 V	Είσοδος A: 400 V – 800 V Είσοδος B: 150 V – 800 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου (είσοδος A / είσοδος B)	22 A / 11 A	33 A / 11 A
Αριθμός ανιχνευτών MPP	2	2
Μέγιστος αριθμός στοιχειοσειρών παράλληλα (είσοδος A / είσοδος B)	4 / 1	5 / 1
Έξοδος (AC)		
Ονομαστική ισχύς AC	10 kVA	17 kVA
Μέγιστη ισχύς AC	11 kVA	17 kVA
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	16 A	24,6 A
Ονομαστική τάση AC	3 / N / PE, 230 / 400 V	3 / N / PE, 230 / 400 V
Συχνότητα δικτύου AC / περιοχή	50 Hz / 60 Hz / $\pm 4,5$ Hz	50 Hz / 60 Hz / $\pm 4,5$ Hz
Ρυθμιζόμενος συντελεστής μετατόπισης ($\cos\phi$)	0,8 υπερ... 0,8 υποδιέγερση	0,8 υπερ... 0,8 υποδιέγερση
Σύνδεση AC	Τριφασική	Τριφασική

Έχουν τοποθετηθεί εννέα string inverters (inverters συστοιχιών Φ/Β πλαισίων δηλαδή), κάθε ένας από τους οποίους συνδέεται σε σειρά και εν παράλληλω με συγκεκριμένη συστοιχία Φ/Β πλαισίων. Συγκεκριμένα, η σε σειρά σύνδεση αφορά πλαίσια μιας ομάδας της συστοιχίας με τον αντιστροφέα και η εν παράλληλω σύνδεση αφορά την κάθε ομάδα με τον αντιστροφέα. Σημειώνεται πως συμπεριλαμβάνεται και ένας μικρότερης ισχύος αντιστροφέας γιατί αυτός συνδέεται με μικρότερη συστοιχία Φ/Β πλαισίων. Αυτό συμβαίνει λόγω της χωροθέτησης του γηπέδου και σύμφωνα με τη μηχανολογική μελέτη. Τα string είναι συνδεδεμένα με καλώδια DC RADOX διατομής 6mm².

2.1.5 Καλώδια DC, AC και M.T.

Οι DC ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των πλαισίων έχει γίνει με καλώδια Radox της εταιρείας Huber & Suhner, κατάλληλης διατομής με μόνωση και μανδύα από υλικό υψηλής αντοχής. Τα καλώδια μέσης τάσης (M.T.) φέρουν ένδειξη 4/2 XSY 1x50 mm², η οποία αναφέρεται σε ένα καλώδιο με εμβαδόν 50 τετραγωνικών χιλιοστών (mm²). Αυτός ο τύπος καλωδίου χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα μεταφοράς και διανομής ισχύος.

Οι καλωδιώσεις AC, δηλαδή οι συνδέσεις των αντιστροφέων στους πίνακες ομαδοποίησης και των πινάκων ομαδοποίησης στον Γενικό Πίνακα Χαμηλής Τάσης, ο οποίος βρίσκεται στον υποσταθμό, είναι διαστασιολογημένες ανάλογα με το μήκος της γραμμής και την αναμενόμενη φόρτιση. Περισσότερα για την ανάγκη ύπαρξης και τον ρόλο των κουτιών ομαδοποίησης αναφέρονται στην παράγραφο 2.1.6.

Η μελέτη, η διαστασιολόγηση και η εγκατάσταση των καλωδίων έχουν εκτελεστεί σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς: IEC 60229, IEC 60304, IEEE Std 1242-1 999 και IEC 60287-2-2.

Η διατομή των καλωδίων προσδιορίστηκε λαμβάνοντας υπ' όψιν τα εξής:

- ✓ Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης κλάδου - συστοιχιών
- ✓ Το ρεύμα βραχυκύκλωσης
- ✓ Την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς
- ✓ Τις απώλειες του δικτύου (για το καλώδιο διασύνδεσης με τη χαμηλή τάση δικτύου)
- ✓ Τα θερμικά όρια του καλωδίου.

Τα καλώδια φέρουν στα φρεάτια επιθεώρησης και πριν από την είσοδο ή έξοδο των πινάκων ένδειξη με ταινία της ονομασίας του καλωδίου.

Όλες οι οδεύσεις έχουν τοποθετηθεί παράλληλα ή κάθετα προς την εγκατάσταση των Φ/Β πανέλων. Τα καλώδια οδεύουν υπόγεια, όλα μαζί σε κανάλια κατάλληλης διατομής ή μόνα τους στο έδαφος. Τα καλώδια Μ.Τ. είναι τοποθετημένα μέσα σε ξεχωριστό κανάλι και είναι εγκιβωτισμένα σε σκυρόδεμα για λόγους προστασίας.

2.1.6 Πίνακες Χαμηλής Τάσης

α) Πίνακες ομαδοποίησης

Οι πίνακες ομαδοποίησης κατασκευάστηκαν από αναγνωρισμένο εργοστάσιο σύμφωνα με τα ισχύοντα ευρωπαϊκά και ελληνικά πρότυπα. Οι πίνακες αυτοί αντιστοιχούν ένας σε κάθε τρεις αντιστροφείς και ουσιαστικά χρησιμοποιούνται για τη συλλογή της τριφασικής εξόδου των αντιστροφέων ώστε να αποφεύγονται τα μεγάλα μήκη της καλωδίωσης εξόδου των αντιστροφέων και κατά συνέπεια η πτώση τάσης και γενικότερα οι απώλειες (Τεχνική Έκθεση REC, 2011). Είναι εξωτερικού χώρου με βαθμό προστασίας IP65. Μπορούν να διακριθούν στο σχέδιο εκσκαφών ως κουτιά με πράσινο χρώμα, σε επαφή με τους inverters 1.1.1, 1.2.1 και 1.3.1. Οι καλωδιώσεις AC απαρτίζονται από τις AC 1.1, AC 1.2. και AC 1.3. και ξεκινούν από τα αντίστοιχα κουτιά σε επαφή με τους αντιστροφείς.

β) Γενικός Πίνακας Χαμηλής Τάσης

Είναι ενσωματωμένος στον οικίσκο του μετασχηματιστή, και εκεί συγκεντρώνονται όλες οι εξοδοί των πινάκων ομαδοποίησης.

2.1.7 Μετασχηματιστής

Ο μετασχηματιστής υπενθυμίζεται πως χρησιμοποιείται για την ανύψωση της χαμηλής τάσης από την AC έξοδο των inverter σε Μέση Τάση ώστε να μπορεί να διανεμηθεί στο δίκτυο του ΑΔΜΗΕ. Ο τύπος μετασχηματιστή, σύμφωνα με την ηλεκτρομηχανολογική μελέτη, είναι λαδιού, εταιρείας ABB, ονομαστικής ισχύος 250 kVA και δε χρειάζεται επαύξηση.

2.1.8 Γενικός Πίνακας Μέσης Τάσης

Ο εξοπλισμός μέσης τάσης είναι αναγνωρισμένης εταιρείας και ικανοποιεί τα κριτήρια όπως αυτά που αναγράφονται στην παράγραφο 3.102.2 της έκδοσης 1990-12 του προτύπου IEC 60298, σχετικά με τους πίνακες εσωτερικής εγκατάστασης, διαμερισματοποιημένους και μεταλλοεπενδεδυμένους.

Ο υποσταθμός στεγάζεται σε οικίσκο και εξυπηρετεί τη σύνδεση του πάρκου με το δίκτυο του ΑΔΜΗΕ που ήδη υπάρχει. Περιλαμβάνει τον Γενικό Πίνακα Μέσης Τάσης από το έργο, που φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7 Φωτογραφία από το έργο του Γενικού Πίνακα Μ.Τ. (2023)

2.1.9 Γειώσεις και αντικεραυνικά

Η μελέτη γείωσης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το IEC 80-2000 και IEC 61024-1, ενώ τα υλικά και τα εξαρτήματα κατά ΕΟΤ 50164-1&2.

Περιμετρικά του σταθμού τοποθετήθηκε αγωγός χαλκού κατάλληλης διατομής στον οποία καταλήγουν αγωγοί μικρότερης διατομής. Αυτοί συνδέονται στα μεταλλικά ικρίωματα, στον οικίσκο, στην περίφραξη και σε οποιαδήποτε άλλη μεταλλική κατασκευή. Πραγματοποιήθηκε μέτρηση της αντίστασης του συστήματος γείωσης και ήταν ικανοποιητική.

Παράλληλα έγινε πρόβλεψη για σύστημα εσωτερικής αντικεραυνικής προστασίας, με σκοπό την προστασία του ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού στην περίπτωση κεραυνού. Συγκεκριμένα, η προστασία επιμερίζεται ώστε να προστατεύει τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό στις εξής περιοχές:

- Στην άφιξη καλωδίων που μεταφέρουν το παραγόμενο ρεύμα DC στους αντιστροφείς
- Στο σημείο σύνδεσης με το δημόσιο δίκτυο.

2.1.10 Φωτισμός – Κάμερες - Συναγερμός

Για τον φωτισμό του γηπέδου έχουν εγκατασταθεί 4 προβολείς HQI 150W. Οι ιστοί φωτισμού είναι γαλβανιζέ 10x10 cm, 2,5-3,5 m ύψος. Η βάση της κολώνας είναι από σκυρόδεμα 70x70x70 cm. Η κολώνα στο 1 m περίπου από το έδαφος έχει πορτάκι με καπάκι διαστάσεων 7x20 cm. Στους ιστούς αυτούς έχουν τοποθετηθεί οι προβολείς, οι κάμερες και τα beams του συστήματος ασφαλείας.

Η επίβλεψη της ασφάλειας έχει αναληφθεί από την εταιρεία DIVICO Security. Η εγκατάσταση καμερών επιτρέπει την παρακολούθηση του πάρκου σε πραγματικό χρόνο και την επίλυση προβλημάτων ασφάλειας άμεσα, ενώ το σύστημα συναγερμού ειδοποιεί το προσωπικό ασφαλείας σε περίπτωση κλοπής ή ανεπιθύμητης εισόδου, προλαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο την κλοπή εξοπλισμού.

Στο αρχείο του έργου, στα παραδοτέα από την εταιρεία που ανέλαβε την εγκατάστασή τους, περιλαμβάνονται τα σκαριφήματα των καλωδίων τροφοδοσίας για τις κάμερες, του ηλεκτρικού κυκλώματος UTP των καμερών, του ηλεκτρικού κυκλώματος UTP των φωτοκυττάρων και των καλωδίων τροφοδοσίας για τον συναγερμό.

2.1.11 Συστήματα εφεδρείας

Τα συστήματα εφεδρείας περιλαμβάνουν το σύστημα εφεδρείας συναγερμού και το σύστημα εφεδρείας ηλεκτρονόμου.

Το σύστημα εφεδρείας συναγερμού φαίνεται στην Εικόνα 2.8 και περιλαμβάνει ένα κουτί εκτός του σταθμού με μία μπαταρία 12Volt - 150 Ah που κρατάει σε λειτουργία τις κάμερες και τον συναγερμό σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.



Εικόνα 2.8 Σύστημα εφεδρείας συναγερμού

Το σύστημα εφεδρείας ηλεκτρονόμου (Εικόνα 2.9) περιλαμβάνει μπαταρίες εντός του οικίσκου πάνω στον πίνακα 2 x 12 V / 33 Ah, οι οποίες κρατούν σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο ο οποίος δίνει εντολή να ανοίξει ο διακόπτης της μέσης τάσης σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, όπως απαιτεί ο ΔΑΠΕΕΠ.



Εικόνα 2.9 Σύστημα εφεδρείας ηλεκτρονόμου

2.3 Σύστημα συλλογής δεδομένων και τηλεπίβλεψης

2.3.1 Περιγραφή συστήματος τηλεπίβλεψης

Για να επιτυγχάνεται η παρακολούθηση της μονάδας παραγωγής ενέργειας και η απομακρυσμένη επίβλεψη του έργου, έχει γίνει η εγκατάσταση του συστήματος Sunny WebBox στον κεντρικό πίνακα μέσα στον υποσταθμό του έργου. Το σύστημα αυτό συνδέεται με όλους

τους αντιστροφείς του έργου μέσω τεχνολογίας Bluetooth, καθώς και με τη συσκευή συλλογής μετεωρολογικών δεδομένων Sunny Sensor Box με καλώδιο Li2YCYn, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση της κατάστασης και της απόδοσης των αντιστροφέων, καθώς και των μετεωρολογικών συνθηκών στην περιοχή.

Το Sunny WebBox είναι εργαλείο τηλεπλήρωσης, τηλεδιάγνωσης, αποθήκευσης και απεικόνισης δεδομένων για συστήματα επαγγελματικών ηλιακών εγκαταστάσεων (SMA manual, 2011). Αποτελεί κέντρο επικοινωνίας για φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς συλλέγει διαρκώς όλα τα στοιχεία από τους μετατροπείς και δίνει τη δυνατότητα ενημέρωσης σε πραγματικό χρόνο. Ως πολυλειτουργικός καταγραφέας δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση, διαθέτει πολλές επιλογές για την ένδειξη, αρχειοθέτηση ή και περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων, σε βάση δεκαπενταλέπτου (15 min), μέσω του διαδικτυακού λογισμικού πλοήγησης sunny portal, στο οποίο ο χρήστης έχει άμεση πρόσβαση. Σε περίπτωση σφαλμάτων στη λειτουργία του συστήματος, ο διαχειριστής λαμβάνει ειδοποιήσεις μέσω SMS ή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα, και ενεργοποιείται συναγερμός αν δεν αποκαθίσταται άμεσα η εκάστοτε βλάβη. Οι τεχνικοί και οι υπεύθυνοι των εγκαταστάσεων μπορούν ανά πάσα στιγμή να ενημερώνονται και να προβαίνουν σε κεντρικές προσαρμογές στις παραμέτρους των μετατροπέων.

Το Sunny SensorBox αποτελεί μετεωρολογικό σταθμό για Φ/Β εγκαταστάσεις και έχει τοποθετηθεί σε σημείο της εγκατάστασης κοντά στον υποσταθμό. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας των πλαισίων και της ταχύτητας του αέρα, καθώς διαθέτει ενσωματωμένη ηλιακή κυψέλη, θερμοκρασιακούς αισθητήρες PT100 και λοιπούς αισθητήρες. Σε συνδυασμό με το Sunny WebBox και το Sunny Portal, επιτρέπει τη συνεχή σύγκριση των θεωρητικών / πραγματικών τιμών για την απόδοση του σταθμού.

Η εγκατάσταση έτσι συλλέγει συνεχώς όλα τα δεδομένα, επιτρέποντας τον έλεγχο της τρέχουσας κατάστασης οποιαδήποτε στιγμή. Η Εικόνα 2.10 είναι φωτογραφία του μετεωρολογικού σταθμού εγκατεστημένου στο έργο σε εξωτερικό χώρο κοντά στον υποσταθμό, με το ανεμόμετρο, το πυρανόμετρο και το θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η συσκευή SensorBox ύστερα στέλνει τα δεδομένα στη συσκευή της Εικόνας 2.11, Sunny WebBox, που βρίσκεται μέσα στον οικίσκο του υποσταθμού.



Εικόνα 2.10 Φωτογραφία του εγκατεστημένου στο έργο μετεωρολογικού σταθμού με το ανεμόμετρο, το πυρανόμετρο και το θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος



Εικόνα 2.11 Φωτογραφία του εγκατεστημένου στο έργο Sunny WebBox μέσα στον οικίσκο του Υ/Σ

2.3.2 Τεχνικές προδιαγραφές συστήματος τηλεπίβλεψης

Τα γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής Sunny WebBox έχουν ως εξής. Οι διαστάσεις της είναι Π/Υ/Β σε mm 225/130/57, το βάρος της 750 gr, εγκαθίσταται σε εσωτερικό χώρο (μέσα στον οικίσκο του υποσταθμού), υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης σε ράγες, επίτοιχα ή επιτραπέζια, διαθέτει LED ενδείξεις κατάστασης και πολλές επιλογές γλώσσας λογισμικού και οδηγιών χρήσης, συμπεριλαμβανομένης της ελληνικής. Έχει εσωτερική κυκλική ενδιάμεση μνήμη 8 MB και εξωτερική κάρτα SD. Λειτουργεί σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος από -20°C έως +60°C και σε υγρασία ατμόσφαιρας από 5% έως 95%, χωρίς συμπύκνωση. Δόθηκε εγγύηση 5 ετών από την εταιρεία SMA από την οποία αγοράστηκε η συσκευή. Επιπλέον χαρακτηριστικά για την τροφοδοσία τάσης δίνονται στην παρακάτω Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5 Περί τροφοδοσίας τάσης SUNNY WEBBOX, Πηγή: SMA manual, technical characteristics

Τροφοδοσία τάσης	εξωτερικό βυσματωτό τροφοδοτικό
Τάση εισόδου	100 V - 240 V AC, 50 / 60 Hz
Κατανάλωση ισχύος	κανονική 4 W/ Μέγ. 12 W

Τα γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής Sunny SensorBox, αντίστοιχα, έχουν ως εξής. Οι διαστάσεις της είναι Π/Υ/Β σε mm 120/50/90, το βάρος της 500 gr, εγκαθίσταται σε εξωτερικό χώρο, είναι τοποθετημένη σε πλάκα τοποθέτησης και παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας σε πολλές γλώσσες. Λειτουργεί σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος από -25°C έως +70°C και προσφέρει είδος προστασίας IP65 από σκόνη και βροχή. Δόθηκε εγγύηση 5 ετών από την εταιρεία SMA από την οποία αγοράστηκε η συσκευή. Επιπλέον χαρακτηριστικά για την τροφοδοσία τάσης δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6 Περί τροφοδοσίας τάσης SUNNY SENSORBOX, Πηγή: SMA manual, technical characteristics

Τροφοδοσία τάσης	SMA Power Injector με Bluetooth
Τάση εισόδου	100 V - 240 V AC, 50 / 60 Hz
Κατανάλωση ισχύος	< 1 W

2.3.3 Διαδικτυακό λογισμικό πλοήγησης

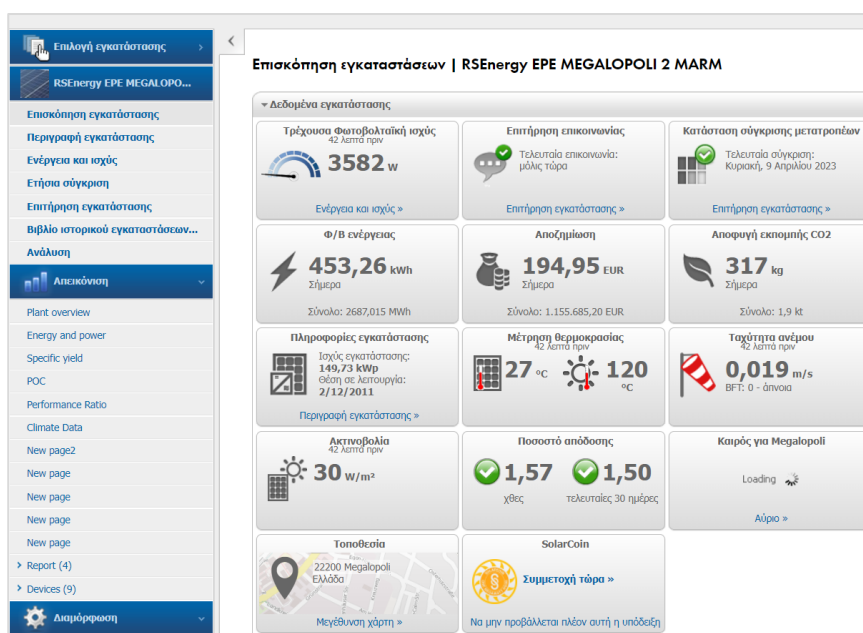
Το Sunny Portal προσφέρει στον χρήστη (διαχειριστή ή ιδιοκτήτη του σταθμού) δυνατότητες δημιουργίας ημερησίων και μηνιαίων αναφορών για την εγκατάσταση, σύγκρισης της απόδοσης των μετατροπέων και πληροφόρηση για ενδεχόμενες αποκλίσεις από προσδιορισμένα όρια. Εξασφαλίζεται η συνεχής ενημέρωση του λογισμικού του συστήματος επιτήρησης, καθώς οι ενημερώσεις αναβάθμισης είναι αυτόματες. Ο τρόπος σύνδεσης του WebBox του σταθμού, ο οποίος είναι μέσω Bluetooth, δεν επιτρέπει τη χρήση του νεότερου λογισμικού της εταιρείας SMA, sunny portal by ennexOS, το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα λήψης των δεδομένων σε

βάση δεκαπενταλέπτου, ωριαία, μηνιαία ή ετήσια, σε μορφή αρχείου CSV και δίνει περισσότερες επιλογές ρυθμίσεων για την απεικόνισή τους.

Ανεξαρτήτως αυτού, η πλατφόρμα έχει μενού επιλογών με πολλά είδη δεδομένων. Αρχικά, το κεντρικό μενού περιλαμβάνει την επισκόπηση της εγκατάστασης, η οποία αποτελεί την αρχική σελίδα του σταθμού και στην οποία παρουσιάζονται σύντομα όλα τα βασικά στοιχεία λειτουργίας του για την εκάστοτε ημέρα και ειδικότερα,

- πληροφορίες εγκατάστασης,
- η εγκατεστημένη ισχύς,
- η τοποθεσία και η ημερομηνία διασύνδεσης,
- η τρέχουσα φωτοβολταϊκή ισχύς,
- η παραχθείσα ενέργεια της ημέρας σε πραγματικό χρόνο και στο σύνολο λειτουργίας του σταθμού,
- η αποφυγή CO₂ σε kg,
- η χρηματική αποζημίωση σε ευρώ.

Ακόμη, παρουσιάζεται ο καιρός στην τοποθεσία και οι σχετικές ενδείξεις για την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία και τον άνεμο σε m/sec και BFT, η κατάσταση σύγκρισης των μετατροπέων, η διατήρηση σύνδεσης επικοινωνίας και η απόδοση του σταθμού, την οποία το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα καθημερινά. Η επισκόπηση της εγκατάστασης σε μία τυχαία ώρα και ημέρα, συγκεκριμένα για τις 10/04/2023, φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Αναφέρεται πως οι τιμές της απόδοσης (>1) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (120°C) δεν έχουν φυσική σημασία και οφείλονται σε σφάλματα του θερμοκρασιακού αισθητήρα. Στην ανάλυσή μας οι τιμές αυτές δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν.



Εικόνα 2.12 Επισκόπηση εγκατάστασης για τις 10/04/2023, Πηγή: sunny portal

Στο κεντρικό μενού υπάρχει επίσης σελίδα για την εισαγωγή σύντομης τεχνικής περιγραφής από τους εγκαταστάτες ή τους διαχειριστές του συστήματος, η οποία μπορεί να αλλαχθεί από όλους τους χρήστες που έχουν άδεια από τον ιδιοκτήτη. Στο συνοπτικό αυτό προφίλ (Εικόνα 2.13) καταγράφονται η τοποθεσία του έργου, ο διαχειριστής, η ημερομηνία που τέθηκε σε λειτουργία ο σταθμός, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς, και προσδιορίζεται ο αριθμός και το είδος των Φ/Β πλαισίων, των αντιστροφών και των επιμέρους συσκευών του συστήματος τηλεπαρακολούθησης.



PV System Profile | RSEnergy EPE MEGALOPOLI 2 MARM

Location: Megalopoli, Greece
Operator: RSEnergy Hellas Solartechnik EPE
Commissioning: 12/2/2011

PV system power: 149.730 kWp

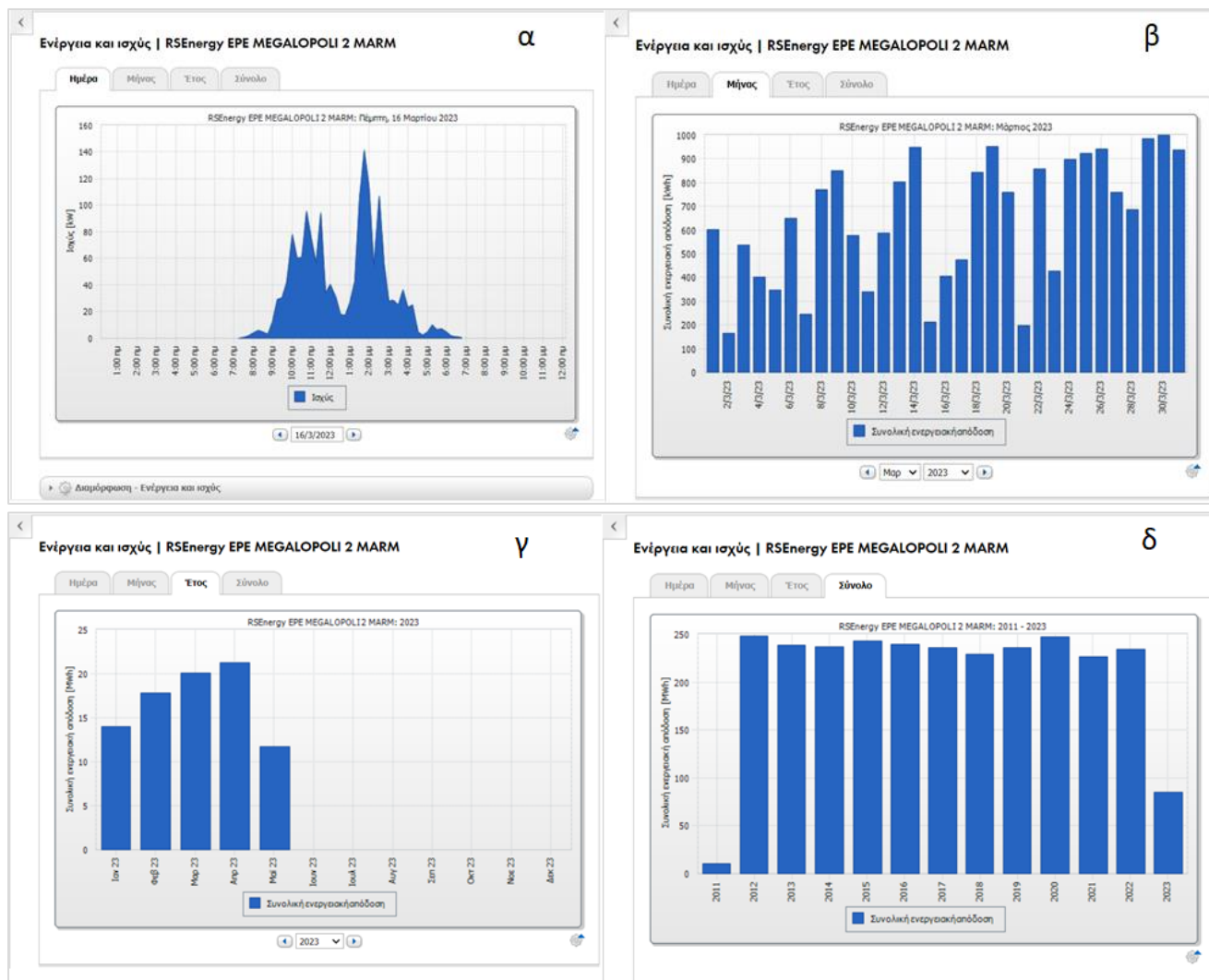
Modules: REC REC230PE (EU) (08/10)
Communication: Sunny WebBox mit Bluetooth
Inverter: Sunny Tripower 10000TL-10
8 x Sunny Tripower 17000TL-10
Sensors: Sunny Sensorbox

Description:

Configuration - PV System Profile

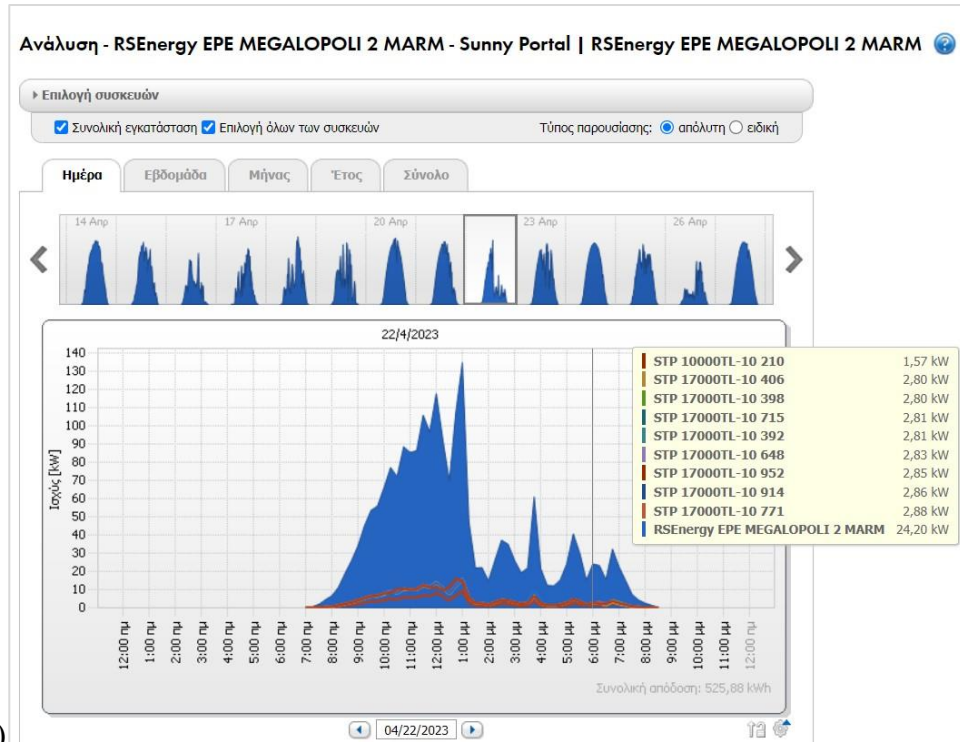
Εικόνα 2.13 Συνοπτικό προφίλ εγκατάστασης, *Πηγή:* sunny portal

Μία επιλογή του κεντρικού μενού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάκτηση των δεδομένων είναι η παραγόμενη ηλεκτρική «ενέργεια και ισχύς», η οποία δίνει στον χρήστη αυτόματα και για κάθε στιγμή που επισκέπτεται τη σελίδα, διάγραμμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και συνεπώς της παραχθείσας ενέργειας ως εμβαδόν του διαγράμματος αυτού. Η απεικόνιση γίνεται σε επίπεδο ημέρας, όπου τα δεδομένα είναι ανά 15 min. Ο χρήστης μπορεί επίσης να διαμορφώνει το ίδιο το διάγραμμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο μήνα, με ημερήσια δεδομένα, ή και ετήσια, με μηνιαία δεδομένα. Έχει επίσης την επιλογή «Σύνολο», με την οποία συγκρίνεται η ενεργειακή παραγωγή κάθε έτους από την ημέρα διασύνδεσης του σταθμού μέχρι την ημέρα πρόσβασης. Στην Εικόνα 2.14 (α) έως (δ) απεικονίζεται η παραγόμενη ισχύς σε kW ενδεικτικά για τις 16/03/2023 (α) σε ωριαία βάση, (β) η ενέργεια σε kWh για τον μήνα του Μαρτίου, (γ) για το έτος 2023, και (δ) η σύγκριση με τα προηγούμενα έτη.

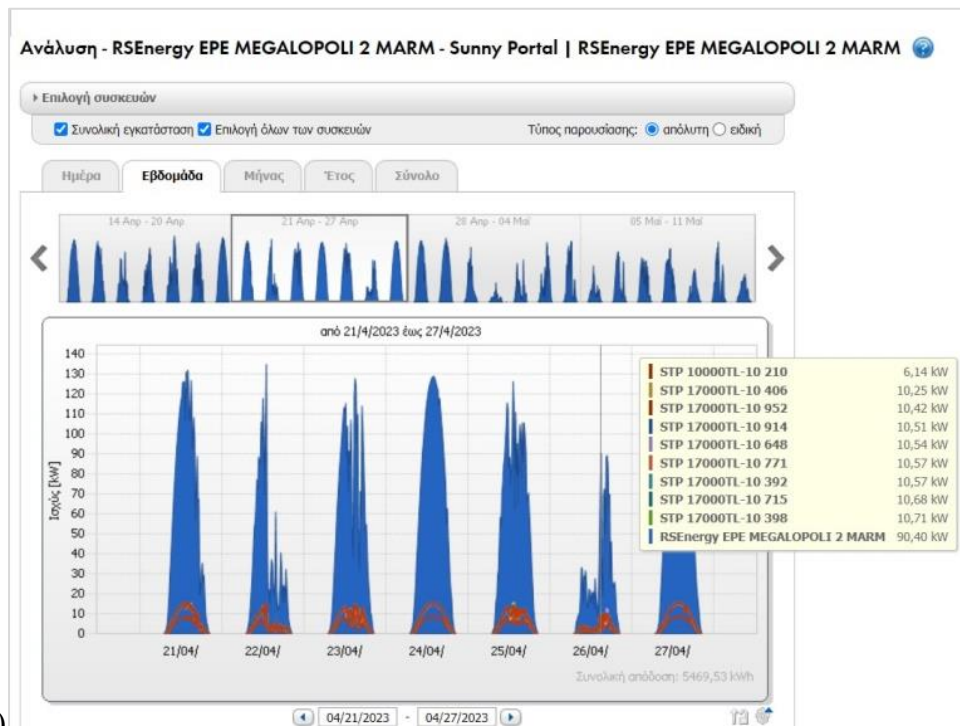


Εικόνα 2.14 (α) έως (δ) Επιλογή «Ενέργεια και Ισχύς» για τις 16/03/2023 - σε kWh και kW αντίστοιχα, *Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή*

Ομοίως, η επιλογή «Ανάλυση» δίνει τη δυνατότητα λήψης δεδομένων από διαγράμματα για το σύνολο της εγκατάστασης ή και για επιμέρους τον κάθε αντιστροφέα, σε επίπεδο ημέρας, εβδομάδας, μήνα, έτους, και συνολικά για την περίοδο λειτουργίας του σταθμού. Αυτή η επιλογή είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις βλάβης ενός ή περισσότερων αντιστροφέων, ώστε να παρακολουθείται η επιμέρους ενεργειακή παραγωγή. Στην Εικόνα 2.15 (α) έως (ε), γίνεται παρουσίαση της επιλογής «Ανάλυση» του κεντρικού μενού του λογισμικού sunny portal, με τα εικονιζόμενα δεδομένα σε kWh, ενδεικτικά (α) για την 22/04/2023, (β) την εβδομάδα 21/04/2023 -27/04/2023, (γ) τον μήνα του Απριλίου 2023, (δ) το έτος 2023 και (ε) το σύνολο των ετών αντίστοιχα, για τους επιμέρους αντιστροφείς, αλλά και την εγκατάσταση συλλήβδην.

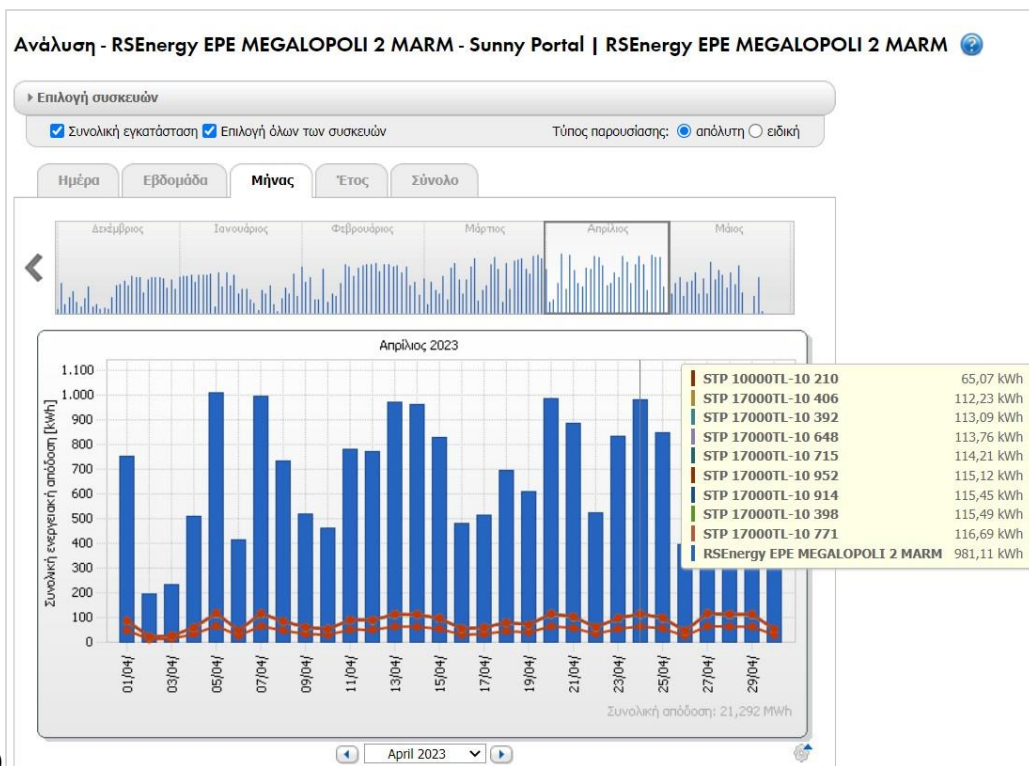


(α)

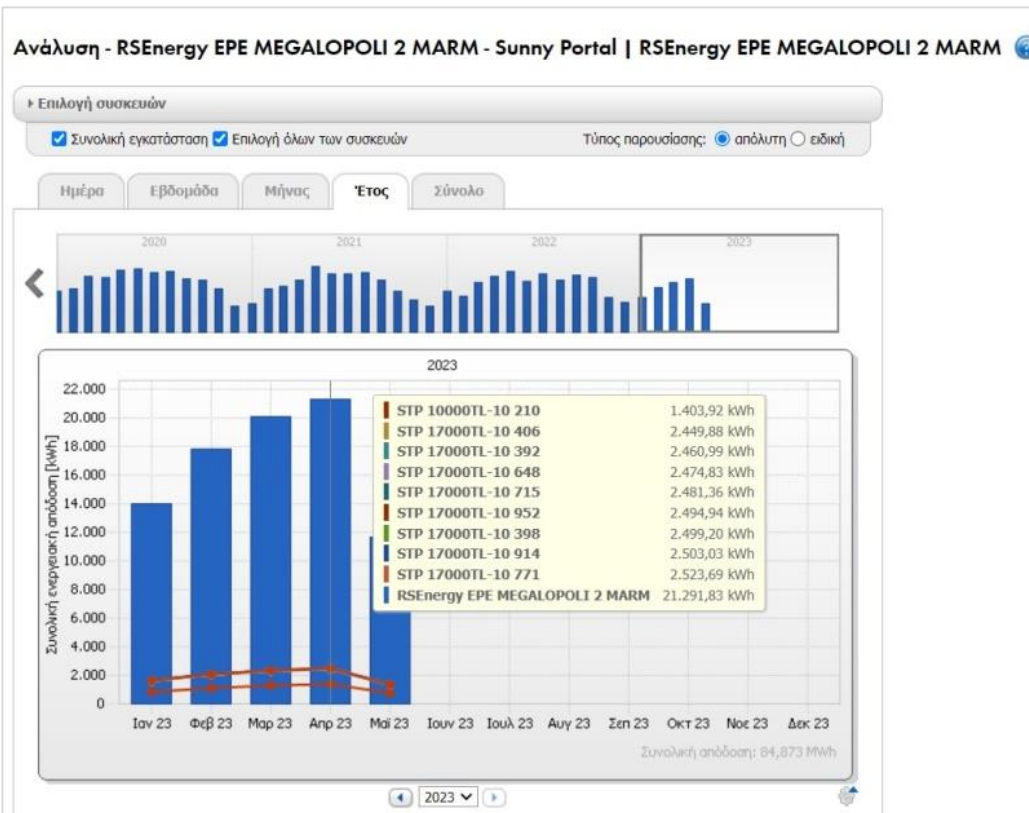


(β)

Εικόνα 2.15 (α) και (β) Επιλογή «Ανάλυση» για την 22/04/2023 και την εβδομάδα 21/04/2023 - 27/04/2023 αντίστοιχα για όλους τους αντιστροφείς και το σύνολο της εγκατάστασης, με τα δεδομένα σε kWh, Πηγή: sunny portal

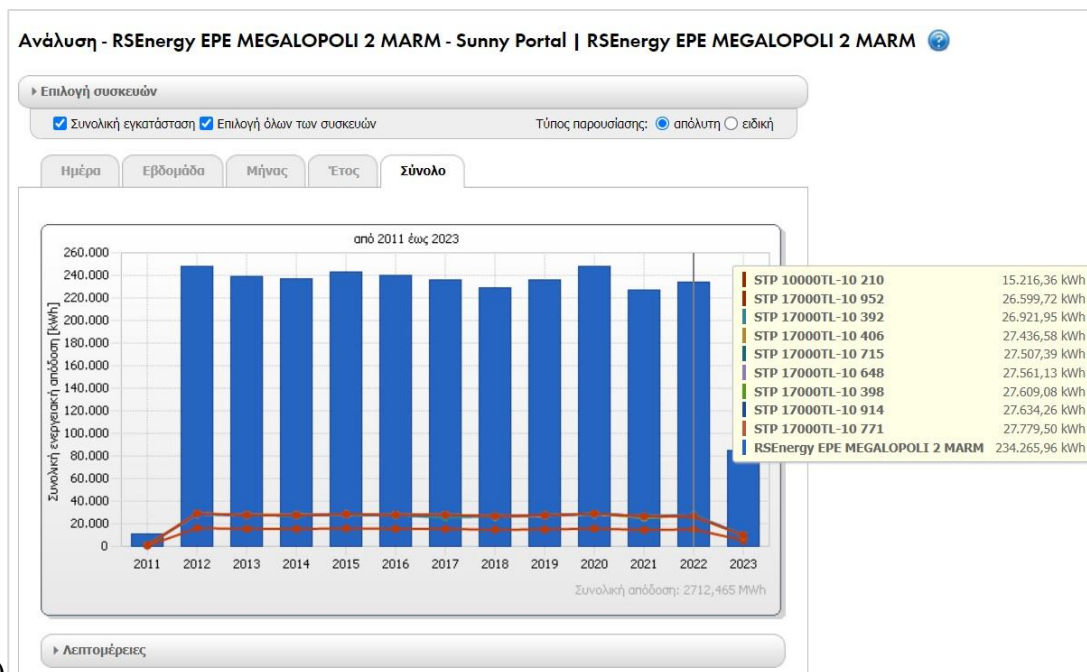


(γ)



(δ)

Εικόνα 2.15 (γ) και (δ) Επιλογή «Ανάλυση» για τον μήνα του Απριλίου 2023 και το έτος 2023 αντίστοιχα για όλους τους αντιστροφείς και το σύνολο της εγκατάστασης, με τα δεδομένα σε kWh, Πηγή: sunny portal

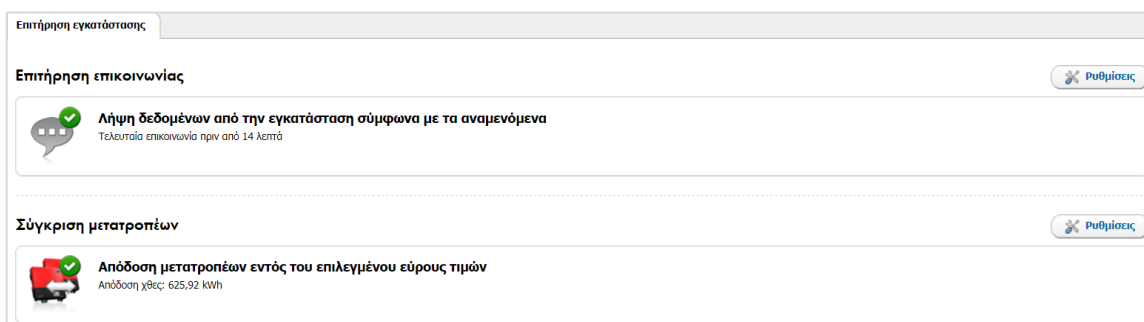


(ε)

Εικόνα 2.15 (ε) Επιλογή «Ανάλυση» για τα έτη 2011 έως 2023 για όλους τους αντιστροφείς και το σύνολο της εγκατάστασης, με τα δεδομένα σε kWh, *Πηγή: sunny portal*

Σημειώνεται πως στο λογισμικό είναι διαθέσιμες και επιπλέον σελίδες που απεικονίζουν στοιχεία λειτουργίας του καθενός αντιστροφέα σε διαγράμματα ισχύος σε kW και παραγόμενης ενέργειας σε kWh με ίδια δυνατότητα επιλογής εικονιζόμενης περιόδου.

Άλλες επιλογές του κεντρικού μενού περιλαμβάνουν την ετήσια σύγκριση συνολικής και ειδικής ενεργειακής απόδοσης για την ανάλυση ισχύος ενός ή περισσότερων μετατροπέων, η οποία θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας, καθώς και η «Επιτήρηση εγκατάστασης», η οποία ενημερώνει για τη διατήρηση ή μη της απρόσκοπτης λήψης δεδομένων σύμφωνα με τα αναμενόμενα και της απόδοσης των αντιστροφέων εντός ενός επιλεγμένου εύρους τιμών που έχει οριστεί κατά τις ρυθμίσεις στο λογισμικό από τον διαχειριστή αυτού, εν προκειμένω την εταιρεία εγκατάστασης, RSEnergy Hellas Solartech EPE. Η κατάσταση της «επιτήρησης της εγκατάστασης» ενδεικτικά για την 25/05/2023, ώρα 10:00 π.μ., φαίνεται στην Εικόνα 2.16.



Εικόνα 2.16 «Επιτήρηση εγκατάστασης» στις 25/05/2023, ώρα 10:02 π.μ., *Πηγή: sunny portal*

Στο κεντρικό μενού υπάρχει επιπροσθέτως βιβλίο ιστορικού, όπου καταγράφονται τυχόν αλλαγές, προειδοποιήσεις, βλάβες ή σφάλματα. Αν ο χρήστης δεν επιλέξει «επιβεβαίωση» αυτών, συνεχίζουν να εμφανίζονται στο βιβλίο ιστορικού. Οι βλάβες αποστέλλονται μέσω email στον ιδιοκτήτη και διαχειριστή, ώστε να προγραμματιστεί η αποκατάστασή τους. Στην Εικόνα 2.17 (α) παρουσιάζεται απόσπασμα της κατάστασης ως είχε ενδεικτικά στις 25/05/2023 όσον αφορά προειδοποιήσεις και σφάλματα. Όπως φαίνεται, λαμβάνονται ειδοποιήσεις εν προκειμένω για βλάβες επικοινωνίας και λόγω του αυξημένου συντελεστή απόδοσης πέρα από τα όρια που έχουν οριστεί (>1) όπως αυτός υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό. Όπως επισημάνθηκε παραπάνω σε αυτήν την παράγραφο, οι μη αποδεκτές τιμές της υπολογιζόμενης απόδοσης οφείλονται πιθανώς σε σφάλματα του αισθητήρα που βρίσκεται στο έργο. Στην Εικόνα 2.17 (β) παρουσιάζεται η αντίστοιχη σελίδα για βλάβες και σφάλματα, εν προκειμένω βλάβη ενός αντιστροφέα από τις 10/04/2023, η οποία είχε μεν αποκατασταθεί στις 25/05/2023, δεν είχε σβηστεί όμως η ειδοποίηση βλάβης από το ιστορικό, για αυτό και συνεχίζει να εμφανίζεται.

Βιβλίο ιστορικού εγκαταστάσεων - RSEnergy EPE MEGALOPOLI 2 MARM (α)

Μετάβαση σε: Τύπος: Πληροφορίες Προειδοποίηση Βλάβη Σφάλμα Κατάσταση: μη επιβεβαιωμένα Εγκατάσταση/συσκευές: όλα

[Επιβεβαίωση όλων](#)

Τύπος	Ώρα	Εγκατάσταση/συσκευές	Περιγραφή	Επιβεβαιώθηκε
⚠	24/5/2023 12:00:00 πμ	RSEnergy EPE MEGALOPOLI 2 MARM	Το ποσοστό απόδοσης βρίσκεται εκτός ορίων ανοχής από 0 έως 1.	✘
⚠	22/5/2023 10:35:38 μμ	WebBox-20 477	Υπενθύμιση: Η βλάβη επικοινωνίας με τη συσκευή εξακολουθεί να υφίσταται (τελευταία λήψη δεδομένων: 20/5/2023 9:17:00 μμ)	✘
⚠	21/5/2023 10:35:32 μμ	WebBox-20 477	Υπενθύμιση: Η βλάβη επικοινωνίας με τη συσκευή εξακολουθεί να υφίσταται (τελευταία λήψη δεδομένων: 20/5/2023 9:17:00 μμ)	✘
⚠	20/5/2023 10:33:36 μμ	WebBox-20 477	Βλάβη επικοινωνίας: Η επικοινωνία με τη συσκευή έχει λήξει (τελευταία λήψη δεδομένων: 20/5/2023 9:17:00 μμ)	✘
⚠	18/5/2023 12:38:20 μμ	WebBox-20 477	Βλάβη επικοινωνίας: Η επικοινωνία με τη συσκευή έχει λήξει (τελευταία λήψη δεδομένων: 18/5/2023 11:16:00 πμ)	✘
⚠	18/5/2023 12:00:00 πμ	RSEnergy EPE MEGALOPOLI 2 MARM	Το ποσοστό απόδοσης βρίσκεται εκτός ορίων ανοχής από 0 έως 1.	✘
⚠	17/5/2023 12:00:00 πμ	RSEnergy EPE MEGALOPOLI 2 MARM	Το ποσοστό απόδοσης βρίσκεται εκτός ορίων ανοχής από 0 έως 1.	✘
⚠	16/5/2023 12:00:00 πμ	RSEnergy EPE MEGALOPOLI 2 MARM	Το ποσοστό απόδοσης βρίσκεται εκτός ορίων ανοχής από 0 έως 1.	✘

Βιβλίο ιστορικού εγκαταστάσεων - RSEnergy EPE MEGALOPOLI 2 MARM (β)

Μετάβαση σε: Τύπος: Πληροφορίες Προειδοποίηση Βλάβη Σφάλμα Κατάσταση: μη επιβεβαιωμένα Εγκατάσταση/συσκευές: όλα

[Επιβεβαίωση όλων](#)

Τύπος	Ώρα	Εγκατάσταση/συσκευές	Περιγραφή	Επιβεβαιώθηκε
✘	10/4/2023 8:35:00 πμ	STP 17000TL-10 914	-> Σφάλμα / Βλάβη συσκευής / Επικοινωνήστε με κατασκευαστή / 6202	✘
✘	10/4/2023 8:30:00 πμ	STP 17000TL-10 914	-> Σφάλμα / Βλάβη συσκευής / Επικοινωνήστε με κατασκευαστή / 0	✘

Δεν υπάρχουν διαθέσιμες άλλες καταχωρήσεις.

Εικόνα 2.17 (α), (β) «Βιβλίο ιστορικού εγκαταστάσεων» στις 25/05/2023, ώρα 10:05 π.μ., Πηγή: sunny portal

Κάτω από το κεντρικό μενού υπάρχουν οι επιλογές «Απεικόνιση» και «Διαμόρφωση», οι οποίες δίνουν στον χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργεί πίνακες, διαγράμματα και άλλες σελίδες δεδομένων, για οποιοδήποτε μεταβλητές επιλέξει και σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα. Έχουν δημιουργηθεί σελίδες από τον διαχειριστή του συστήματος κατά την εισαγωγή της

εγκατάστασης στο λογισμικό, οι οποίες αφορούν την ενέργεια και ισχύ των αντιστροφών, τα κλιματολογικά δεδομένα, διαγράμματα ενεργειακής απόδοσης, και άλλα στοιχεία, ωστόσο μπορεί ο χρήστης οποιαδήποτε στιγμή να δημιουργήσει νέες σελίδες με οποιαδήποτε από τα διαθέσιμα στοιχεία επιλέξει. Δίνεται η δυνατότητα και παράλληλης απεικόνισης δύο μεταβλητών ταυτόχρονα, συναρτήσει του χρόνου, απεικόνισης δύο μεταβλητών μορφής $y=f(x)$, πίνακα δεδομένων, εικόνων, και άλλων μορφών δεδομένων. Σημειώνεται πως υπάρχει ο περιορισμός του ότι αν επιλεγεί το διάστημα του μηνός ή έτους, τα διαγράμματα βασίζονται στις μέσες τιμές των αντιστοίχων δεδομένων, συνεπώς δεν μπορούν να αποδίδουν πάντα ικανοποιητικά τις ζητούμενες συσχετίσεις. Στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας έχουν συμπεριληφθεί διαγράμματα που έχουν δημιουργηθεί κατά τη σύνταξη της παρούσας εργασίας ώστε να αναλυθούν τα δεδομένα των εξεταζόμενων ετών.

Όπως αναφέρθηκε, στην «Απεικόνιση» υπολογίζεται αυτόματα η συνολική απόδοση της εγκατάστασης και η ειδική απόδοση σε σχέση με την ονομαστική. Δεν συμπεριλαμβάνεται σχετική εικόνα, καθώς οι τιμές της στην περίπτωσή μας είναι λανθασμένες λόγω σφαλμάτων στα δεδομένα. Άλλη επιλογή της «Απεικόνισης» είναι η εμφάνιση διαγραμμάτων κλιματολογικών συνθηκών. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται για τις 16/03/2023 η ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2 , η θερμοκρασία πλαισίων και ατμόσφαιρας σε $^{\circ}C$, και η αντίστοιχη ταχύτητα ανέμου σε m/s ανά ώρα. Αναφέρεται πως η σταθερή τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($120^{\circ}C$) υποδεικνύει σφάλμα του εξωτερικού θερμοκρασιακού αισθητήρα, οπότε δε λαμβάνεται υπ' όψιν. Αυτά αφορούν την Εικόνα 2.18. Σημειώνεται επίσης πως το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα αλλαγής των μονάδων μέτρησης, π.χ. την ταχύτητα ανέμου σε BFT, αλλά και εμφάνισης των δεδομένων σε βάση 30 min για μία ημέρα ή εμφάνισης των μέσων τιμών δεδομένων για μια χρονική περίοδο.



Εικόνα 2.18 Απεικόνιση ωριαίων κλιματολογικών δεδομένων για τις 16/03/2023 *Πηγή: sunny portal*

Τέλος, στην «Απεικόνιση» διατίθεται και η επιλογή της «Επισκόπησης συσκευών», η οποία παραπέμπει σε σελίδα στην οποία παρατίθενται όλες οι συσκευές με το όνομα, τον τύπο προϊόντος και τον αντίστοιχο σειριακό αριθμό τους, δηλαδή ο αισθητήρας (Sunny Sensorbox), η συσκευή τηλετίβλεψης (Sunny WebBox mit Bluetooth) και οι αντιστροφείς. Η Εικόνα 2.19 δείχνει αυτή τη σελίδα. Υπάρχει η επιλογή «χαρακτηριστικά», η οποία περιλαμβάνει στοιχεία λειτουργίας και επιτήρησης των συσκευών, η επιλογή «Παράμετροι», που αφορά λεπτομερέστερα στοιχεία λειτουργίας της συσκευής, καθώς και η επιλογή «Ιστορικό», η οποία παραπέμπει στο «Βιβλίο ιστορικού εγκατάστασης» για την εκάστοτε επιλεγμένη συσκευή, ενημερώνοντας για τυχόν σφάλματα ή βλάβες. Ενδεικτικά στην Εικόνα 2.19 έχουν δοθεί τα χαρακτηριστικά του «WebBox-20 477» και οι αντίστοιχες παράμετροι.

Επισκόπηση συσκευών

Όνομα συσκευής: Αριθμός σειράς: Συσκευή: Αποδοχή δεδομένων:

Ενημέρωση Επαναφορά

Όνομα συσκευής	Αριθμός σειράς	Ομάδα προϊόντων	Αποδοχή δεδομένων	Επιτήρηση	Χαρακτηριστικά	Παράμετροι	Ιστορικό
WebBox-20 477	155020477	Sunny WebBox mit Bluetooth	●	●			
Sensorbox 508	20508	Sunny Sensorbox	●				
STP 10000TL-10 210	2110162210	Sunny Tripower 10000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 392	2110082392	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 398	2110082398	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 406	2110189406	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 648	2110016648	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 715	2110485715	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 771	2110189771	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 914	2110249914	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			
STP 17000TL-10 952	2110080952	Sunny Tripower 17000TL-10	●	●			

Επισκόπηση συσκευών Συσκευή: WebBox-20 477 Παράμετροι

Ιδιότητες συσκευής

Αποδοχή δεδομένων: ●

Κατηγορία συσκευής: Sunny WebBox

Ομάδα προϊόντων: Sunny WebBox mit Bluetooth

Αριθμός σειράς: 155020477

Κατασκευαστής: SMA Solar Technology AG

Όνομα συσκευής: WebBox-20 477

Περιγραφή: ---

Επιτήρηση επικοινωνίας

Επιτήρηση: ●

Προσομοίωση ύστερα από: 1 ώρα, 15 λεπτά (ανακωλύ)

Διάστημα: 15 λεπτά

Χρονική περίοδος: 00:00 - 00:00

Επιλέγεται

Παράμετροι

Παράμετροι	Τιμή
NativeSettings_DaylightSaving	Yes
Γλώσσα	EL
Όνομαλο εγκατάσταση	RSEnergy EPE -> MEGALOPOLI 2<<
Χρονική ζώνη	Tm2z+0200Athen
Διεύθυνση IP της πύλης του DHCP	192.168.0.1
Όνομα κατηγορίας δάδβρωσης στο DHCP	WebBox155020477
Ethernet DHCP	No
Πύλη Ethernet	192.168.1.1
Διεύθυνση IP Ethernet	192.168.1.168
Θύρα Ethernet NAT	80
Μάσκα υποδικτύου Ethernet	255.255.255.0
Θύρα δοκιμαστή HTTP	80
Αυτόματη ενημέρωση	Yes
Διεύθυνση E-mail	pro@rseenergy.gr
Ταυτότητα εγκατάσταση στο Portal	093d1ef-9440-0c33-820a-bc59f682f6dc
Ενημέρωση Portal ενεργοποιημένη	Yes
PortalSettings_TimeSync	Yes
Διάστημα αποστολής στο Sunny Portal	Max
PortalSettings_UploadEndTime	00:00 ο'clock
PortalSettings_UploadStartTime	00:00 ο'clock
Έκδοση firmware	01.04.51.R
Έκδοση υλικολογισμικού του κεντρικού επεξεργαστή	1.50

Εικόνα 2.19 Επισκόπηση συσκευών του σταθμού με τους αντίστοιχους σειριακούς αριθμούς και τα χαρακτηριστικά τους, Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή

2.4 Πιστοποίηση - Επιθεωρήσεις

Για την πιστοποίηση του έργου διενεργήθηκε σειρά επιθεωρήσεων από την εταιρεία TÜV Austria Hellas κατά τις οποίες έγιναν διάφορες μετρήσεις και δοκιμές δειγματοληπτικού ελέγχου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές / πρότυπα ισχύοντα το έτος κατασκευής του έργου. Οι έλεγχοι κατά την επιθεώρηση περιελάμβαναν οπτικό έλεγχο, διαστασιολογικούς ελέγχους, ηλεκτρολογικές μετρήσεις, καθώς και λειτουργικές δοκιμές.

Αφού λοιπόν ελέγχθηκαν οι διατάξεις προστασίας, οι συνδέσεις και η διαστασιολόγηση των υλικών, και βρέθηκαν σύμφωνες με τους κατασκευαστικούς οίκους και τα ισχύοντα πρότυπα, συμπεριλαμβανομένων και των απαιτούμενων από τη Δ.Ε.Η. τότε διατάξεων ασφάλειας και προστασίας, η εν λόγω Φ/Β εγκατάσταση κρίθηκε άξια πιστοποίησης, σύμφωνα με τη μελέτη

εφαρμογής του έργου. Η ημερομηνία πιστοποίησης είναι 31/01/2012. Προϋπόθεση για τη διατήρηση ισχύος της πιστοποίησης ήταν και είναι η πραγματοποίηση των ενδιάμεσων προβλεπόμενων συντηρήσεων όλων των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης, σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών αυτών.

2.5 Προβλήματα που έχουν επηρεάσει την απόδοση

Κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης δεκαετούς λειτουργίας του διασυνδεδεμένου συστήματος του Φ/Β σταθμού, έχουν υπάρξει περιπτώσεις όπου κάποιο από τα εξαρτήματα του σταθμού έχει παρουσιάσει βλάβη ή έχει λειτουργήσει ελαττωματικά, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της παραγωγής ενέργειας σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, και έχοντας έτσι ταυτοχρόνως επηρεάσει την παρατηρούμενη και υπολογιζόμενη απόδοση της συνολικής εγκατάστασης. Τέτοια συμβάντα αφορούν κυρίως τη λειτουργία των αντιστροφών και συγκεκριμένα την αποτυχία του ελέγχου του μέγιστου σημείου ισχύος, την υπερθέρμανσή τους (Δαμιανίδης, 2011), την απώλεια απόδοσης στα συστήματα μέτρησης, και την απώλεια σύνδεσης μεταξύ αντιστροφέα και φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ο χρόνος αντίδρασης ιστορικά σε επιδιορθώσεις ή αντικαταστάσεις inverters ήταν πολύ μικρός, δεδομένου πως στην εγκατάσταση υπάρχει, για λόγους ασφάλειας και αξιοπιστίας, ένας εφεδρικός αντιστροφέας, ο οποίος είναι εύκαιρος για να εγκατασταθεί σε περιπτώσεις ανάγκης.

Παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων έχουν παρθεί από το αρχείο του ιδιοκτήτη, αλλά και το ιστορικό της εγκατάστασης που αποθηκεύεται ως «επισκόπηση συσκευών Φ/Β σταθμού» από το λογισμικό στη διαδικτυακή πλατφόρμα που περιγράφηκε προηγουμένως. Συγκεκριμένα, ο inverter No 2, σύμφωνα με την αρίθμηση του σχεδίου εκσκαφών (Εικόνα 2.3), ανατινάχθηκε στις 10/07/22 και αντικαταστάθηκε σε εύλογο χρονικό διάστημα συγκεκριμένα στις 17/07/22 από συνεργείο της περιοχής, από τον εφεδρικό inverter που βρισκόταν μέσα στον υποσταθμό. Βλάβη παρουσίασε και ο αντιστροφέας No 3 στις 10/04/2023, η οποία αποκαταστάθηκε στις 25/05/2023. Ομοίως, ο αντιστροφέας No 6 ανατινάχθηκε στις 26/04/18 κι αντικαταστάθηκε στις 20/05/18, ενώ ο No 7 σταμάτησε να λειτουργεί στις 09/03/21 και επισκευάστηκε στις 17/03 του ίδιου έτους. Ο ίδιος εντοπίστηκε με εμφανές εσωτερικό κάψιμο, συνεπώς απεγκαταστάθηκε και στάλθηκε σε εξειδικευμένο εργαστήριο για περαιτέρω έλεγχο. Διαπιστώθηκε βραχυκύκλωμα στο ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος DC & AC και στην ηλεκτρονική διάταξη των μετρητικών του AC (Εικόνα 2.20). Αφού επισκευάστηκε, επανεγκαταστάθηκε στο έργο.



Εικόνα 2.20 Εσωτερικό κάψιμο αντιστροφέα Νο 7

Ωστόσο, η παρούσα εργασία βασίζεται στη θεώρηση πως τέτοιες επιδράσεις στην απόδοση του συστήματος δε λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την αξιολόγηση της εγκατάστασης κατά τη μελέτη και επεξεργασία των δεδομένων. Είναι λοιπόν σαφές πως τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί ως βάση της ανάλυσης και της εξαγωγής συμπερασμάτων, ενδεχομένως θα έπρεπε να έχουν λίγο διαφορετικές τιμές κατά τα διαστήματα παρουσίας βλαβών. Παρ' όλα αυτά, δεδομένου του σύντομου χρόνου αποκατάστασης τέτοιων βλαβών, καθώς και της πορείας εργασίας που έχει ακολουθηθεί, η οποία επικεντρώνεται σε *ποιοτικά* συμπεράσματα και συσχετίσεις παραγόντων και μεγεθών, θεωρείται πως η επίδραση των προαναφερθέντων βλαβών είναι αμελητέα.

Ακόμη, κατά καιρούς έχει παρατηρηθεί ελαττωματική λειτουργία του συστήματος συλλογής δεδομένων λειτουργίας και τηλεπαρακολούθησης του σταθμού, η οποία εκδηλώνεται με τη μορφή κενού στην καταγραφή και μετάδοση δεδομένων, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε στον αισθητήρα SensorBox, που καταγράφει τα κλιματολογικά δεδομένα στο γήπεδο σε πραγματικό χρόνο, είτε στη διανομή / αποστολή των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από τον αισθητήρα στην πλατφόρμα παρακολούθησης sunny portal. Η επεξεργασία δεδομένων έχει βασιστεί σε όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα μπορούσαν να συγκεντρωθούν για την εξεταζόμενη περίοδο, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν δεδομένα για τις δυσλειτουργικές αυτές περιόδους.

Πρόβλημα έχει αποτελέσει επίσης η αμέλεια τακτικής χλοοκοψίας και καθαρισμού των πλαισίων, καθώς η παρουσία ψηλών χόρτων και σκόνης έχει κατά καιρούς μειώσει τη λειτουργική επιφάνεια των πλαισίων (Jathar, 2023), έχοντας δημιουργήσει σημεία σκιάσεων τα οποία επηρεάζουν όλες τις σε σειρά συνδεδεμένες κυψέλες εντός του πλαισίου, μειώνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος. Ακόμη, έχει γίνει δυσκολότερη η πρόσβαση στα πλαίσια και τα εξαρτήματα του συστήματος από το συνεργείο συντήρησης.

3. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Αφού έχει γίνει επισκόπηση της λειτουργίας και των στοιχείων που αποτελούν τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, στο παρόν κεφάλαιο εισάγονται τα δεδομένα των οποίων απαιτείται η συλλογή και ανάλυση, ώστε να γίνει προσπάθεια αξιολόγησης της απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος Φ/Β. Διερευνάται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην παραγωγή ενέργειας και την ισχύ εξόδου, κυρίως οι κλιματολογικές συνθήκες και η γήρανση των πλαισίων. Αφού λοιπόν περιγραφεί εν συντομία ο τρόπος συλλογής δεδομένων, ακολουθεί διαγραμματική απεικόνιση των δεδομένων προς ανάλυση, καθώς και δεδομένα σε μορφή πινάκων, για την επίδραση των οποίων ακολουθεί και διερεύνηση αντιστοίχως στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

3.2 Τρόπος συλλογής δεδομένων

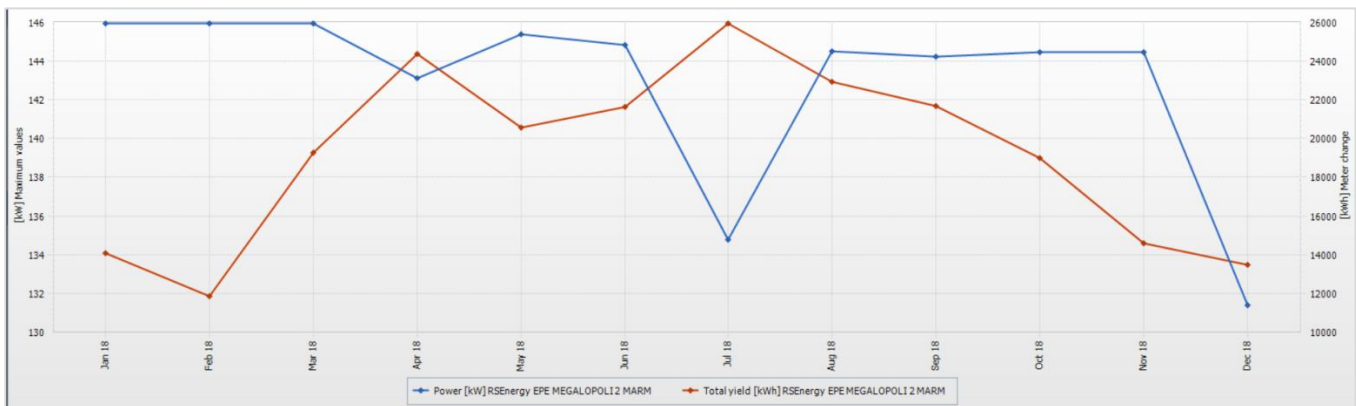
Το λογισμικό sunny portal παρέχει έτοιμους πίνακες και διαγράμματα δεδομένων, ενώ επιτρέπει στον χρήστη και τη δημιουργία απεικονίσεων για διάφορες μεταβλητές και την κατάλληλη διαμόρφωση αυτών σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες του, εργαλείο που έχει αξιοποιηθεί στο πλαίσιο της εργασίας.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την τηλεπιτήρηση της εγκατάστασης δεν προσφέρει τη δυνατότητα λήψης των δεδομένων του αισθητήρα και του WebBox συγκεντρωτικά σε ενιαίο αρχείο για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Η συλλογή των χρησιμοποιούμενων δεδομένων με σκοπό την αποτίμηση λειτουργίας του εξεταζόμενου Φ/Β σταθμού έγινε χειροκίνητα και συγκεκριμένα έγινε λήψη καθενός αρχείου excel με ωριαία δεδομένα κάθε ημέρας για τα έτη 2018-2022 και ανά δύο για τα είδη δεδομένων που συλλέχθηκαν, καθώς το λογισμικό επιτρέπει τη δημιουργία πινάκων δεδομένων μόνο ανά δύο παράγοντες τη φορά. Αφού έγινε λήψη όλων των αρχείων αυτών σε μορφή Microsoft Excel, συνενώθηκαν όλα σε ένα αρχείο με χρήση του add-in power query. Η τελική μορφή αυτού είναι ένας πίνακας με γραμμές όλες τις ώρες των ετών 2018-2022 (συνολικά 43824 γραμμές) και με στήλες (1) την ημερομηνία και ώρα των μετρήσεων, της αντίστοιχης (2) παραγόμενης ενέργειας, (3) ισχύος, (4) μετρηθείσας θερμοκρασίας επιφάνειας πλαισίων σε °C και (5) έντασης ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 . Σημειώνεται πως τα δεδομένα έχει επιλεγεί να ληφθούν σε ωριαία βάση, ενώ για την ενέργεια και ισχύ δίνεται η δυνατότητα λήψης τους σε βάση 15 min, συνεπώς για τις ώρες αυτές λαμβάνονται από το σύστημα οι μέσες τιμές των αντίστοιχων διαστημάτων. Στην ανάλυσή μας έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές της ενέργειας για μεγαλύτερη ακρίβεια, εφόσον αναλύουμε ωριαία δεδομένα, συνεπώς χάνεται η έννοια της παρατηρούμενης peak (αιχμής) στιγμιαίας ισχύος και στιγμιαίας απόδοσης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα, οι τιμές της ενέργειας αφορούν το διάστημα της μίας ώρας (π.χ. αν στις 12:00 μ.μ. έχουμε την τιμή 109 kWh, αυτές αφορούν το διάστημα 11:00 έως 12:00), ενώ οι τιμές της

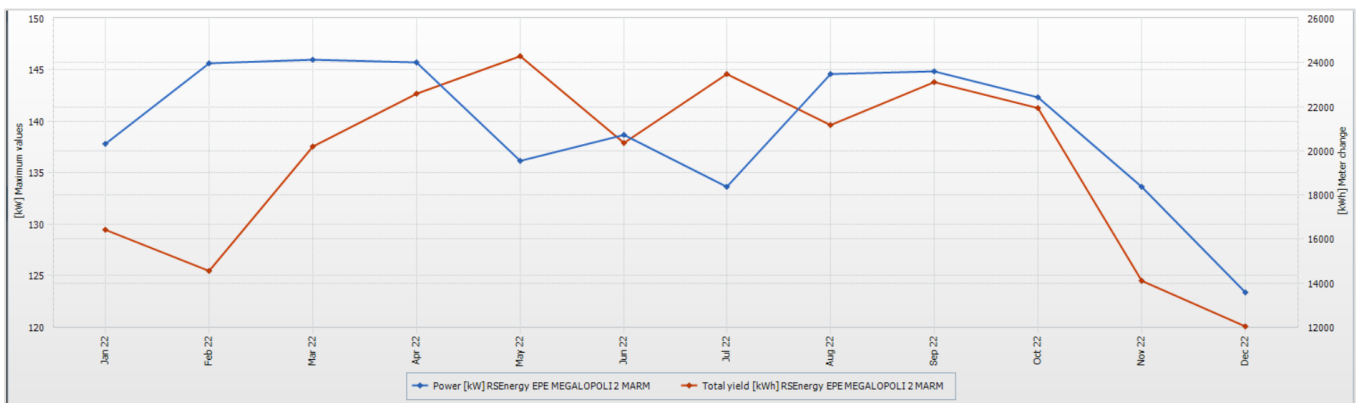
ισχύος, της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας είναι οι στιγμιαίες τιμές μετρήσεων στα διαστήματα αυτά.

3.3 Μέγιστες τιμές στιγμιαίας ισχύος αιχμής λειτουργίας και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Για τη διερεύνηση της αιχμής λειτουργίας λοιπόν, έχουν δημιουργηθεί διαγράμματα με τις μέγιστες τιμές της ισχύος για κάθε έτος της εξεταζόμενης πενταετίας και τις αντίστοιχες τιμές ανά μήνα παραγόμενης ενέργειας. Την επιλογή αυτή τη δίνει το λογισμικό sunny portal. Η εν λόγω αιχμή εντοπίζεται ως 146 kW τον Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο για το 2018 και τον Μάρτιο για το 2022. Ενδεικτικά το διάγραμμα για το 2018 είναι το Σχήμα 3.1, και το αντίστοιχο του 2022 το Σχήμα 3.2. Διαπιστώνεται πτώση της παραγόμενης ισχύος το καλοκαίρι, με ελάχιστη τιμή μέγιστης καταγεγραμμένης ισχύος τα 135 kW τον 07/2018 και τα 134 kW τον 07/2022. Παρατηρείται επίσης πως τους καλοκαιρινούς μήνες η συνολική ενεργειακή απόδοση σε kWh είναι μεγαλύτερη, ενώ η μέγιστη ισχύς σε kW, μικρότερη. Σημειώνεται πως στην τιμή των 146 kW έχει υπεισέλθει και η γήρανση του συστήματος, με την αντίστοιχη τιμή τα προηγούμενα έτη λειτουργίας του σταθμού να είναι, όπως αναμένεται, λίγο υψηλότερη.



Σχήμα 3.1 Παραγόμενη ενέργεια (κόκκινο) και μέγιστη ισχύς (μπλε) ανά μήνα του έτους 2018, Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή



Σχήμα 3.2 Παραγόμενη ενέργεια και μέγιστη ισχύς ανά μήνα του έτους 2022, Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή

3.4 Ετήσια και μηνιαία σύγκριση ηλεκτρικής παραγωγής

Η γήρανση των ηλιακών πλαισίων αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο ως παράγοντας που επιδρά στην απόδοση του Φ/Β συστήματος. Άραγε θα μπορούσε ένας τρόπος προσέγγισής της να είναι μέσω ετήσιας σύγκρισης των συνολικών αποδόσεων ενέργειας σε MWh ή ισοδύναμα της ειδικής απόδοσης σε kWh/kWp εγκατεστημένης ισχύος; Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 φαίνονται τα αντίστοιχα στοιχεία καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης (έτη 2011-2023). Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι συνολικές τιμές ενεργειακής παραγωγής για κάθε έτος (2011-2023) σε MWh και η μέση τιμή αυτών και στο Σχήμα 3.3 το αντίστοιχο διάγραμμα του πίνακα αυτού. Επισημαίνεται όμως πως η γήρανση του συστήματος δεν αφορά ανεξάρτητα την απόλυτη τιμή της ενεργειακής παραγωγής, ούτε την ειδική απόδοση ανά kWp εγκατεστημένης ισχύος, γιατί στον υπολογισμό της υπεισέρχεται, όπως έχει οριστεί στην παράγραφο 1.6, και η ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένη περίοδο. Συνεπώς η γήρανση της εγκατάστασης δεν μπορεί να υπολογισθεί βάσει των παρακάτω τιμών.

Πίνακας 3.1 Ειδική απόδοση εγκατάστασης σε kWh/kWp για τα έτη 2011-2023, Πηγή: sunny portal

Ειδική απόδοση εγκατάστασης [kWh/kWp]													
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
2011												71,09	71,09
2012	108,35	70,91	139,51	143,33	157,80	185,30	183,92	177,21	163,7	135,13	109,47	83,72	1658,35
2013	89,95	80,77	118,83	157,83	160,16	165,89	148,31	146,39	161,03	142,21	91,34	98,62	1561,33
2014	83,59	96,08	142,11	130,85	151,02	153,20	175,07	182,94	165,95	118,73	104,54	78,48	1582,56
2015	87,95	96,92	116,91	157,53	166,28	146,68	172,64	161,53	144,69	131,90	118,63	122,69	1624,34
2016	97,03	107,78	125,26	161,58	155,14	161,99	165,70	158,57	142,68	121,23	91,95	110,89	1599,78
2017	88,23	96,67	143,08	158,29	148,12	152,73	165,31	161,26	156,45	144,32	94,87	69,03	1578,35
2018	93,95	79,22	128,73	162,92	137,40	144,66	173,45	153,13	144,76	126,81	97,36	90,12	1532,50
2019	68,86	109,72	163,73	124,18	156,42	163,00	156,44	173,16	155,30	139,70	80,00	83,82	1574,34
2020	110,98	117,94	148,79	148,47	168,19	170,18	160,22	162,68	142,46	138,75	116,12	68,48	1653,26
2021	77,68	115,47	122,82	139,62	178,22	157,53	156,78	161,11	141,41	109,06	85,53	69,88	1515,11
2022	109,59	97,31	134,76	150,86	162,16	136,04	156,89	141,30	154,42	146,45	94,26	80,52	1564,55
2023	93,55	118,94	134,04	58,58									405,12
													17920,67
Μέση τιμή	92,48	98,98	134,88	148,68	158,26	157,93	164,98	161,75	152,08	132,21	98,55	86,93	1587,70
Τμήμα έτους	5,82%	6,23%	8,50%	9,36%	9,97%	9,95%	10,39%	10,19%	9,58%	8,33%	6,21%	5,48%	100,00%
Θέση σε λειτουργία: 2/12/2011													

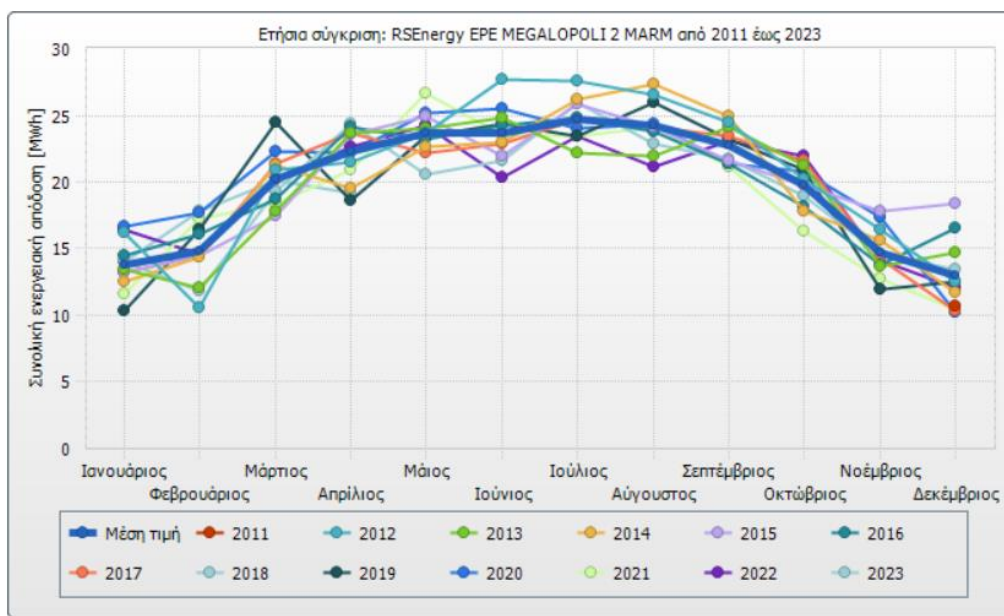
Πίνακας 3.2 Συνολική ενεργειακή απόδοση εγκατάστασης σε MWh για τα έτη 2011-2023, *Πηγή: sunny portal*

Συνολική ενεργειακή απόδοση [MWh]												
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
2011												10,64
2012	16,22	10,62	20,89	21,46	23,63	27,74	27,54	26,53	24,51	20,23	16,39	12,54
2013	13,47	12,09	17,79	23,63	23,98	24,84	22,21	21,92	24,11	21,29	13,68	14,77
2014	12,52	14,39	21,28	19,59	22,61	22,94	26,21	27,39	24,89	17,78	15,65	11,75
2015	13,17	14,51	17,51	23,59	24,90	21,96	25,85	24,19	21,66	19,75	17,76	18,37
2016	14,53	16,14	18,75	24,19	23,23	24,25	24,81	23,74	21,36	18,15	13,77	16,60
2017	13,21	14,47	21,42	23,7	22,18	22,87	24,75	24,15	23,42	21,61	14,21	10,34
2018	14,07	11,86	19,27	24,39	20,57	21,66	25,97	22,93	21,68	18,99	14,58	13,49
2019	10,31	16,43	24,52	18,59	23,42	24,41	23,42	25,93	23,25	20,92	11,98	12,55
2020	16,62	17,66	22,28	22,23	25,18	25,48	23,99	24,36	21,33	20,77	17,39	10,25
2021	11,63	17,29	18,39	20,91	26,68	23,59	23,47	24,12	21,17	16,33	12,81	10,46
2022	16,41	14,57	20,18	22,59	24,28	20,37	23,49	21,16	23,12	21,93	14,11	12,06
2023	14,01	17,81	20,07	19,21								
Μέση τιμή	13,85	14,82	20,2	22,26	23,70	23,65	24,70	24,22	22,77	19,80	14,76	13,02
Τμήμα έτους	5,82%	6,23%	8,50%	9,36%	9,97%	9,95%	10,39%	10,19%	9,58%	8,33%	6,21%	5,48%

Θέση σε λειτουργία: 2/12/2011

Πίνακας 3.3 Συνολική παραγόμενη ενέργεια σε MWh για τα έτη 2011-2023 και η μέση τιμή αυτών, *Πηγή: sunny portal*

Συνολική ενεργειακή απόδοση [MWh]	
	Σύνολο
2011	10,64
2012	248,31
2013	233,78
2014	237,00
2015	243,21
2016	239,54
2017	236,33
2018	229,46
2019	235,73
2020	247,54
2021	226,86
2022	234,26
2023	60,66
	<hr/>
	2683,31
Μέση τιμή	237,73

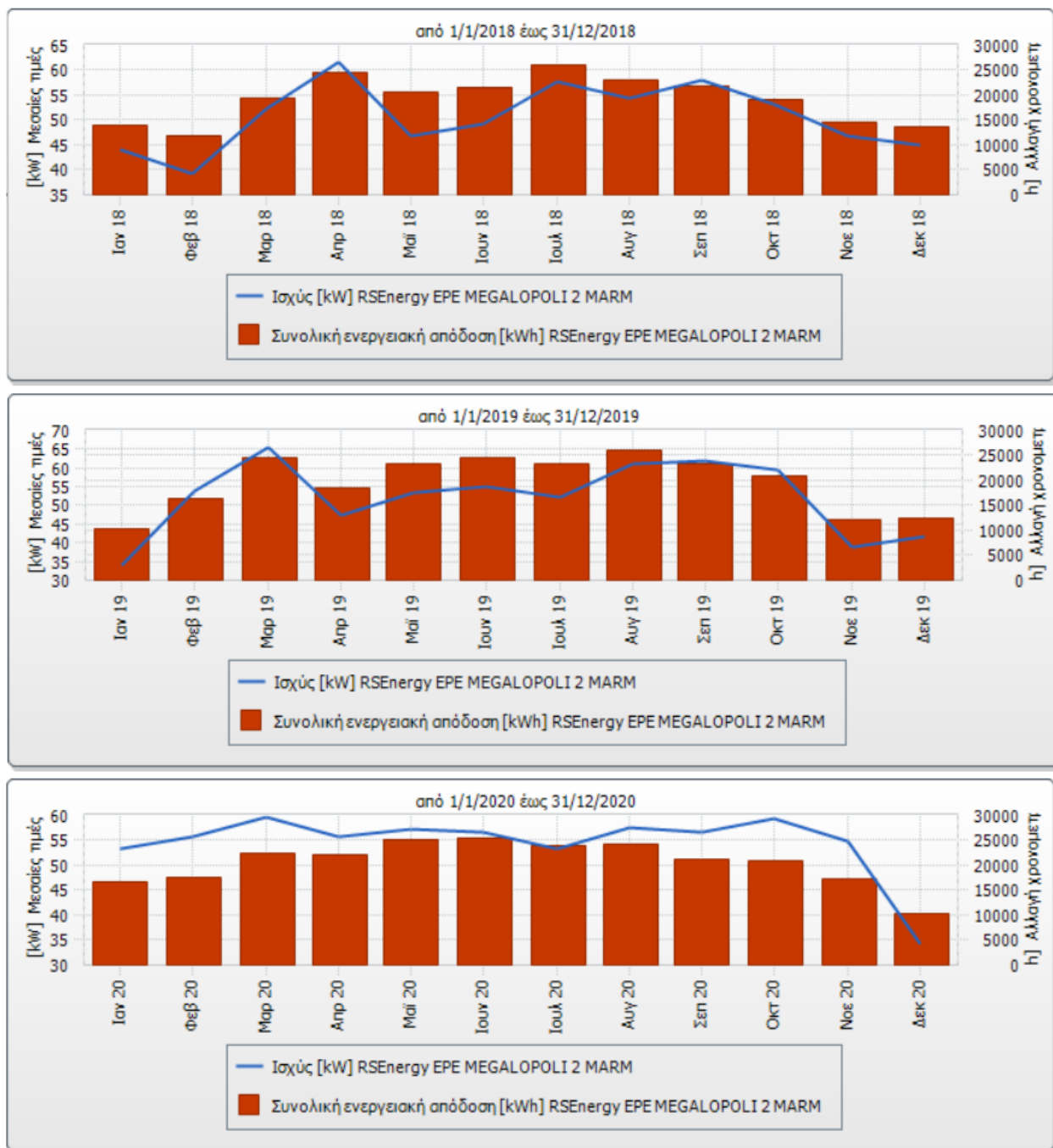


Σχήμα 3.3 Συνολική ενεργειακή απόδοση σταθμού σε MWh για τα έτη 2011-2023, *Πηγή: sunny portal*

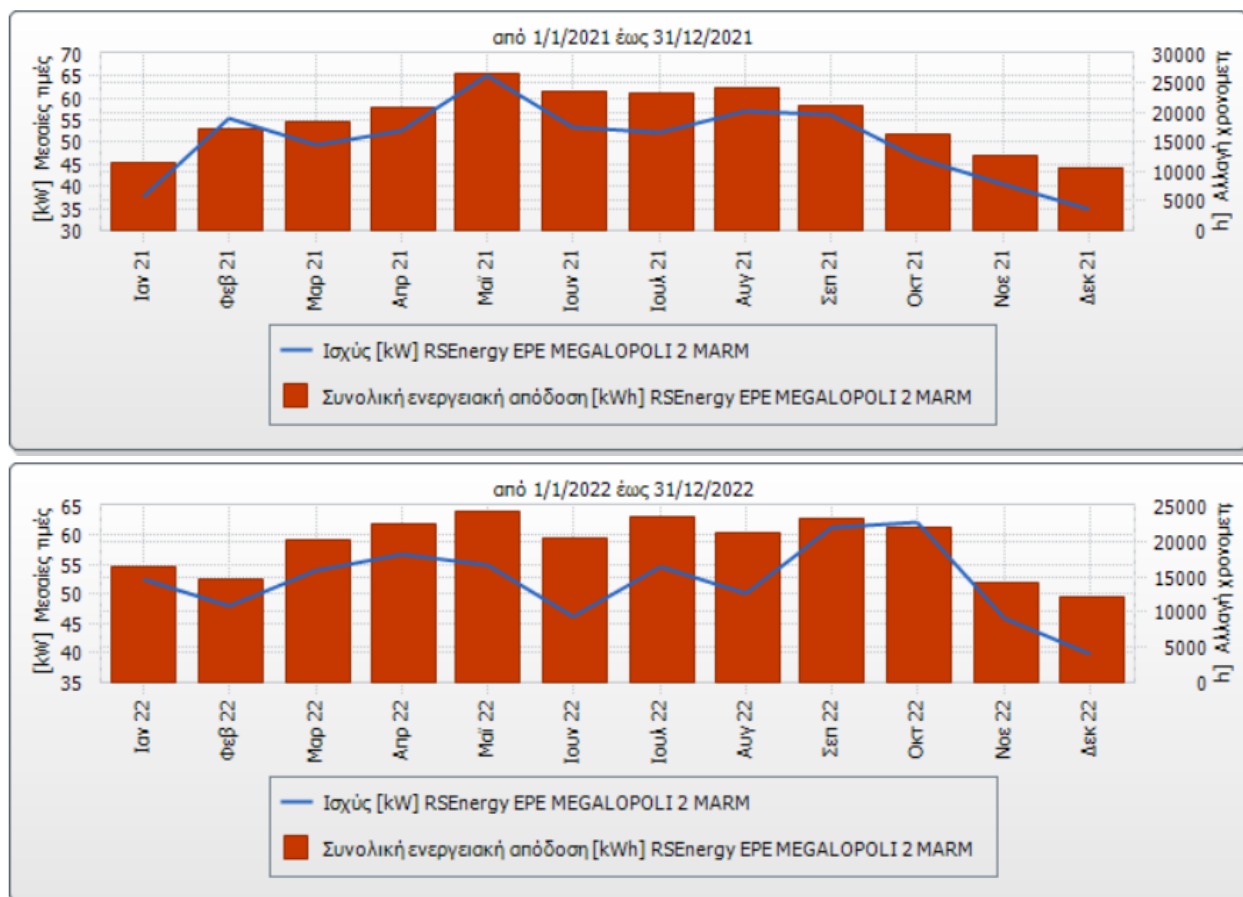
Από τους παραπάνω πίνακες λαμβάνουμε επίσης τα επιμέρους ποσοστά της συμμετοχής κάθε μήνα στη συνολική παραγωγή ενέργειας, τα οποία επιβεβαιώνουν τη θεωρία, με μεγαλύτερα ποσοστά των μηνών του Ιουλίου και του Αυγούστου, 10,39% και 10,19% αντιστοίχως.

Ακολουθούν οι μήνες του Μαΐου (9,97%), του Ιουνίου (9,95%), του Σεπτεμβρίου (9,58%) και του Απριλίου (9,36%) με πολύ κοντινά ποσοστά.

Παρακάτω, στα Σχήματα 3.4 (α) και (β) απεικονίζονται οι τιμές της ενέργειας και οι μέσες τιμές της ισχύος σε kWh και kW αντίστοιχα για κάθε έτος με δεδομένα ανά μήνα. Οι μέσες τιμές της ισχύος έχουν υπολογιστεί λαμβάνοντας υπ' όψιν τις συνολικές ώρες τις οποίες ο σταθμός παράγει ενέργεια.

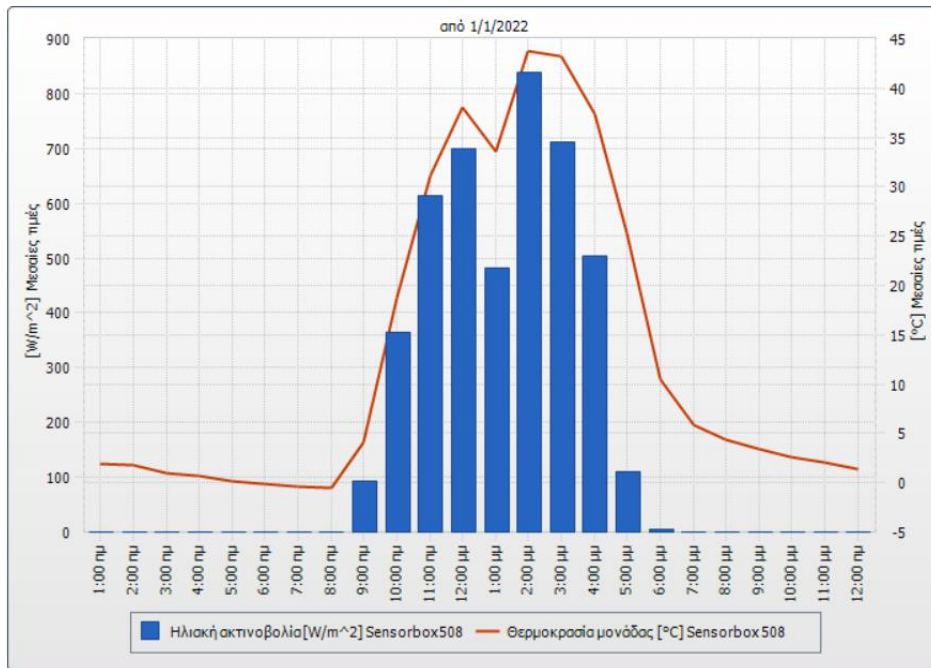


Σχήμα 3.4 (α) Μέσες τιμές ενέργειας (kWh) και ισχύος (kW) για τα έτη 2018 έως 2020 ανά μήνα, Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή

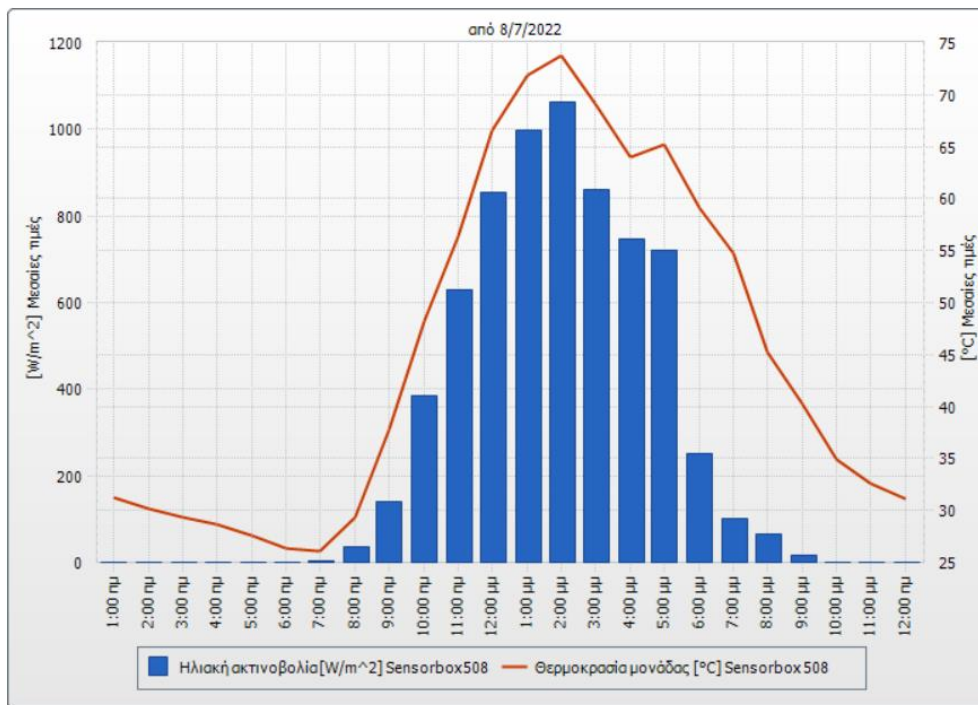


Σχήμα 3.4 (β) Μέσες τιμές ενέργειας (kWh) και ισχύος (kW) για τα έτη 2021 και 2022 ανά μήνα, Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή

Ακόμη, οι τιμές της θερμοκρασίας πλαισίου φαίνεται να έχουν ανάλογη σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία. Ενδεικτικά, στα Σχήματα 3.5 και 3.6 παρακάτω απεικονίζονται ταυτόχρονα η ηλιακή ακτινοβολία και η αντίστοιχη θερμοκρασία μονάδας σε °C για μια τυχαία χειμερινή και μια τυχαία καλοκαιρινή ημέρα, συγκεκριμένα την 01/01/2022 και την 08/07/2022, μέρες με αραιή συννεφιά κατά διαστήματα, σύμφωνα με το διάγραμμα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας από το sunny portal. Τα σχήματα έχουν δημιουργηθεί με μέσες τιμές ανά ώρα και οι μονάδες είναι W/m^2 για την ηλιακή ακτινοβολία και °C για τη θερμοκρασία πλαισίων. Από το Σχήμα παρατηρείται ανάλογη αύξηση της θερμοκρασίας πλαισίου με την αύξηση της ακτινοβολίας και αντιστοίχως μείωση. Σε διαστήματα δηλαδή συννεφιάς, π.χ. κατά τη 13:00 μ.μ. την 01/01/2022, όπου η ηλιοφάνεια μειώνεται, παρατηρείται μείωση και στη θερμοκρασία των πλαισίων. Επίσης, από τα μεμονωμένα αυτά παραδείγματα φαίνεται η σχέση να είναι ανάλογη όσο και να αυξάνεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, ωστόσο η σχέση αυτή θα διερευνηθεί περαιτέρω στο Κεφάλαιο 4. Η σύγκριση αυτή έχει ουσία για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας >0 , δηλαδή εξαιρούνται οι νυχτερινές ώρες.



Σχήμα 3.5 Θερμοκρασία πλαισίου σε °C και ηλιακή ακτινοβολία σε W/m² την 01/01/2022, Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή



Σχήμα 3.6 Θερμοκρασία πλαισίου σε °C και ηλιακή ακτινοβολία σε W/m² την 08/07/2022, Προέλευση: sunny portal μετά από προσαρμογή

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

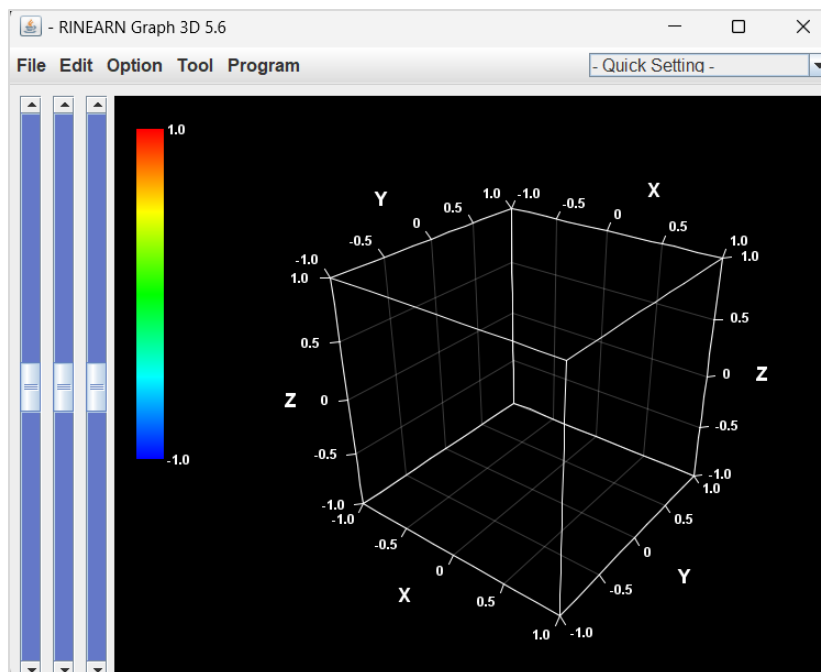
4.1 Τρόπος επεξεργασίας δεδομένων

Παρακάτω γίνεται η ανάλυση των δεδομένων των ετών 2018-2022 ανά μήνα με σκοπό τη διερεύνηση της ενεργειακής παραγωγής στη διάρκεια των ετών αυτών και της επίδρασης των παραγόντων της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα δεδομένα χωρίστηκαν σε 12 διαφορετικά φύλλα του excel βάσει των μηνών και για κάθε φύλλο δημιουργήθηκαν διαγράμματα για τη διερεύνηση συσχετίσεων μεταξύ των μεταβλητών. Έγινε προσέγγιση γραμμικών εξισώσεων και προσπάθεια ερμηνείας της κάθε σχέσης βάσει της βιβλιογραφίας, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν σε αντίστοιχους πίνακες. Από τη σειρά δεδομένων εξαιρέθηκαν ακραίες τιμές που ενδεχομένως αποτελούν σφάλματα μετρήσεων από τους αισθητήρες, ή αλλιώς, σφάλματα εκτιμήσεων. Επιπροσθέτως, στην προσπάθεια επιβεβαίωσης της θεωρίας, έχουν χρησιμοποιηθεί εργαλεία του excel για την προσέγγιση συγκεκριμένων μορφών διαγραμμάτων και τη γραμμική παρεμβολή μεταβλητών.

Συγκεκριμένα, το παρόν κεφάλαιο διερευνά την πορεία του συντελεστή απόδοσης στη διάρκεια των εξεταζόμενων ετών και αντιστοίχως του λόγου επίδοσης ($PR\%$) και του συντελεστή δυναμικότητας (CF). Ύστερα, επικεντρώνεται στη διερεύνηση των σχέσεων ωριαίας ηλεκτρικής παραγωγής - ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας πλαισίου - ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας και συντελεστή απόδοσης σταθμού - θερμοκρασίας πλαισίου και στην προσέγγιση των σχέσεων αυτών σχηματικά βάσει των πραγματικών δεδομένων που ανακτήθηκαν στο κεφάλαιο 3.

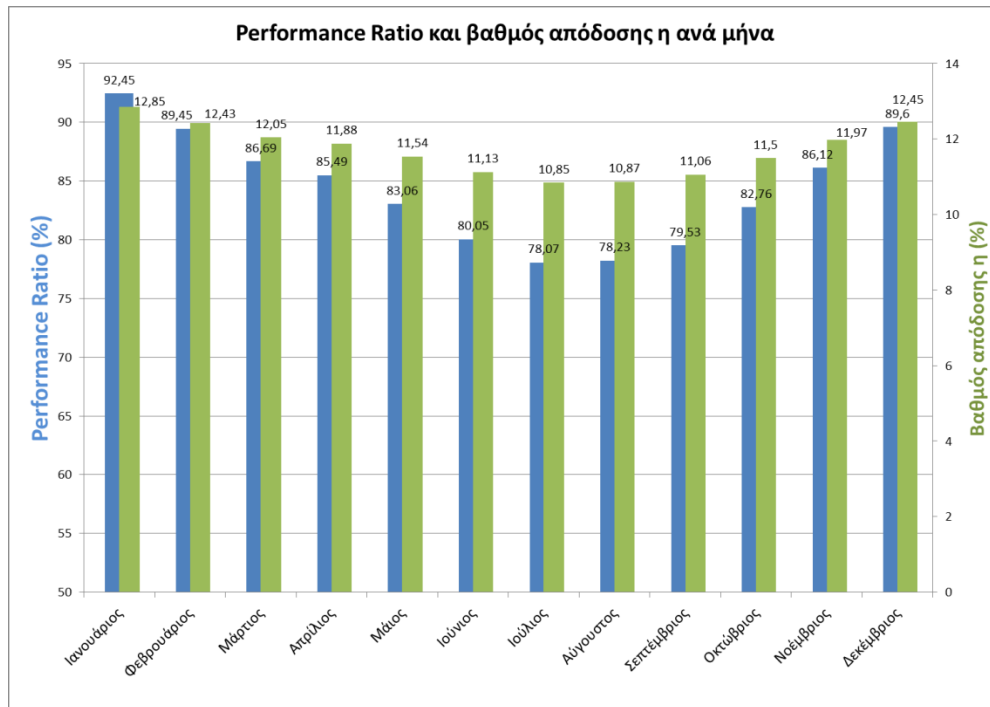
Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Rinearn Graph 3D (έκδοση 5.6.32) για την τρισδιάστατη απεικόνιση του βαθμού απόδοσης με τη θερμοκρασία πλαισίου και την ηλιακή ακτινοβολία. Τα διαγράμματα έχουν γίνει για κάθε μήνα με δεδομένα από τα έτη 2018 έως και 2022 και επισυνάπτονται σχηματικά στο παρόν κεφάλαιο. Το περιβάλλον του Rinearn Graph είναι εύχρηστο και επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει δεδομένα σε μορφή csv ή tsv. Τα απεικονίζει σε 2 ή 3 άξονες και δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας των αξόνων, των τίτλων, των χρωμάτων, και γενικά της μορφής του γραφήματος. Η Εικόνα 4.1 είναι το περιβάλλον του προγράμματος, με την επισκόπηση της κεντρικής επιφάνειας εργασίας.



Εικόνα 4.1 Το περιβάλλον του προγράμματος Rinearn Graph 3D

4.2 Υπολογισμός συντελεστή απόδοσης, performance ratio και συντελεστή δυναμικότητας ανά μήνα

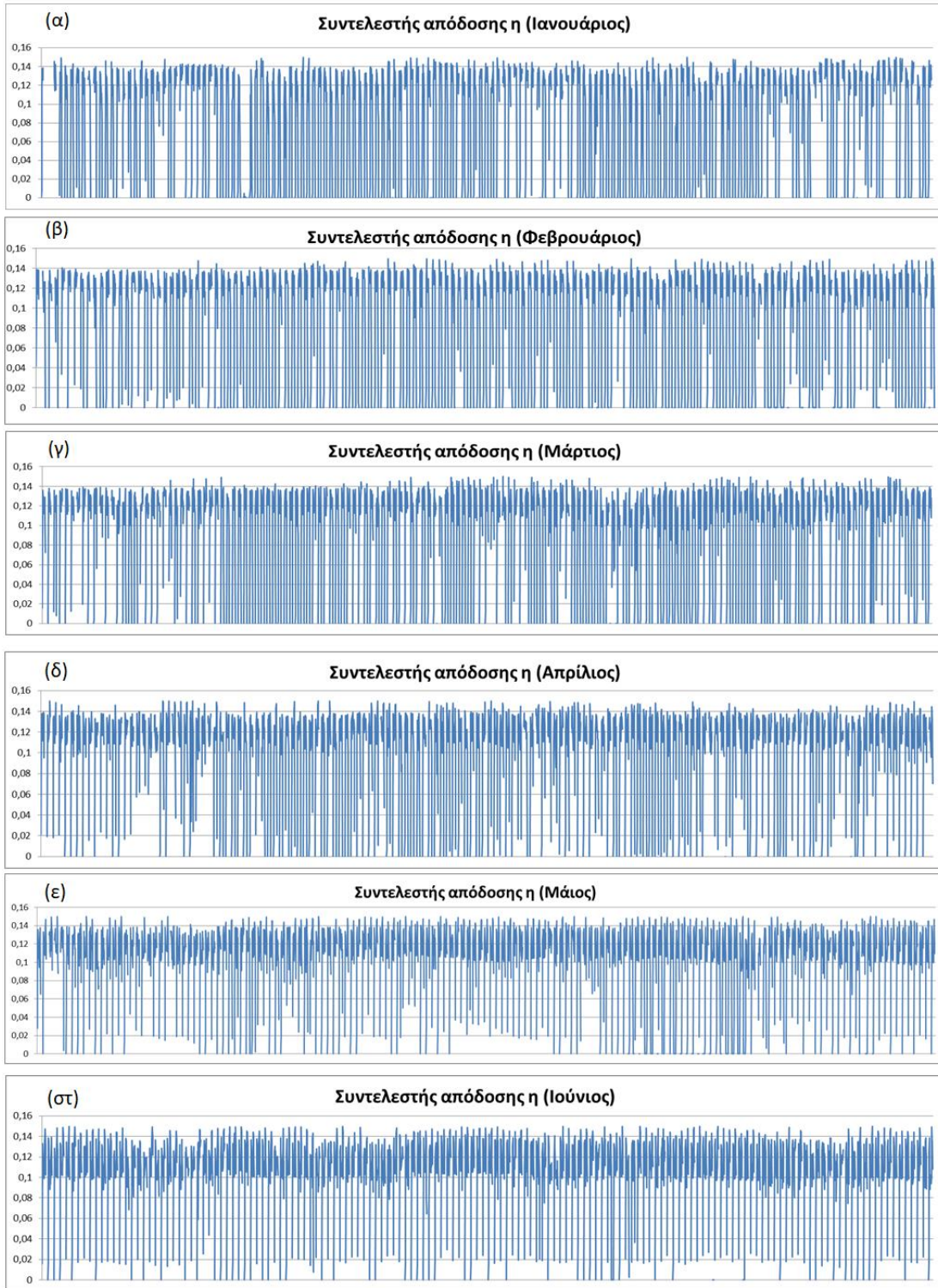
Για κάθε μήνα που χωρίστηκαν τα δεδομένα υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης και ο αντίστοιχος λόγος επίδοσης (Performance Ratio), με χρήση των σχέσεων που ορίστηκαν στην παράγραφο 1.6. Το σχετικό διάγραμμα είναι το Σχήμα 4.1, στο οποίο ο λόγος επίδοσης μετριέται σύμφωνα με την κλίμακα στα αριστερά (μπλε χρώμα) και ο συντελεστής απόδοσης στα δεξιά (πράσινο χρώμα).



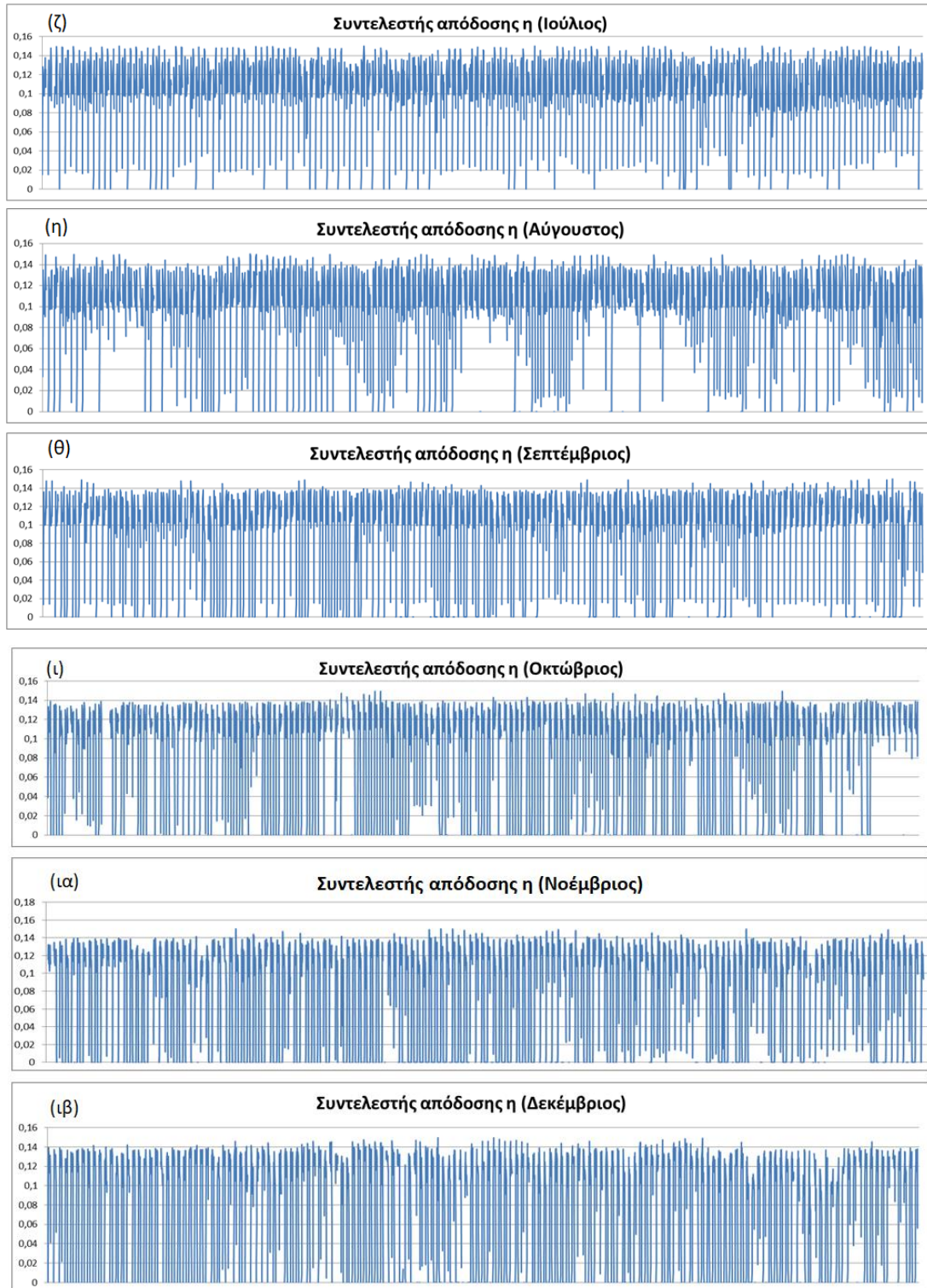
Σχήμα 4.1 Performance Ratio (μπλε) και βαθμός απόδοσης η (πράσινο) (%) ανά μήνα για τα έτη 2018-2022

Είναι φανερό πως τους χειμερινούς μήνες η απόδοση η και ο PR λαμβάνουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με τους καλοκαιρινούς, το οποίο αιτιολογείται από τη διαφορά θερμοκρασίας και θα επιχειρηθεί να διερευνηθεί παρακάτω. Συγκεκριμένα, η απόδοση η έχει υπολογιστεί ίση με 12,9% τον Ιανουάριο, 12,4% τον Φεβρουάριο, 12,1% τον Μάρτιο, 11,9% τον Απρίλιο, 11,5% τον Μάιο, 11,1% τον Ιούνιο, 10,9% τον Ιούλιο, 10,9% τον Αύγουστο, 11,1% τον Σεπτέμβριο, 11,5% τον Οκτώβριο, 12,0% τον Νοέμβριο και 12,5% τον Δεκέμβριο. Οι αντίστοιχες τιμές του λόγου επίδοσης PR (%) του σταθμού είναι για τον Ιανουάριο έως Δεκέμβριο 92,5%, 89,5%, 86,7%, 85,5%, 83,1%, 80,1%, 78,1%, 78,2%, 79,5%, 82,8%, 86,1%, 89,6% αντίστοιχα.

Ακόμη, έχουν κατασκευαστεί διαγράμματα που απεικονίζουν τις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής απόδοσης στη διάρκεια του κάθε μήνα για τα έτη 2018-2022 (Σχήμα 4.2 (α) έως (στ) και Σχήμα 4.2 (ζ) έως (ιβ)). Σημειώνεται πως αυτά έχουν δημιουργηθεί μέσω excel και με τα δεδομένα ωριαίας βάσης των 12 φύλλων στα οποία χωρίστηκαν τα δεδομένα. Σημεία στα οποία η γραμμή είναι ασυνεχής υποδεικνύουν σφάλματα μετρήσεων στα αντίστοιχα διαστήματα, όπως προσωρινή παύση μετρήσεων από τον αισθητήρα ή αδυναμία αποστολής των δεδομένων και, σε κάθε περίπτωση, σφάλματα του συστήματος. Πράγματι, είναι δυνατόν οι αισθητήρες να οδηγήσουν σε ανακρίβεια ή απουσία δεδομένων. Αυτό μπορεί να εμφανίζεται ως δεδομένα που δείχνουν μηδενική παραγωγή ή απόδοση, ακόμα και όταν υπάρχει ηλιοφάνεια και το σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια (Γιαννούσης, 2013).



Σχήμα 4.2 (α) έως (στ) Συντελεστής απόδοσης η για τα έτη 2018-2022 ανά μήνα



Σχήμα 4.2 (ζ) έως (ιβ) Συντελεστής απόδοσης η για τα έτη 2018-2022 ανά μήνα

Επισημαίνεται πως οι μέγιστες τιμές της απόδοσης που προκύπτουν από την ανάλυση είναι μεγαλύτερες από τις λογικές τιμές, μεγαλύτερες δηλαδή από την ονομαστική απόδοση μειωμένη κατά τον παράγοντα απωλειών κάθε στιγμή. Αυτό οφείλεται σε σφάλματα και απλοποιήσεις

κατά την ανάκτηση δεδομένων, καθώς και σε αποκλίσεις προς τα κάτω στη λειτουργία του αισθητήρα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω βλάβης ή ανάγκης βαθμονόμησής του. Είναι χρήσιμα λοιπόν τα αποτελέσματα κυρίως ποιοτικά. Επιπλέον, η χαμηλότερη σχετικά απόδοση παρατηρείται είτε σε χαμηλά είτε σε υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Σε εύρος χαμηλής ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, $<0,1 \text{ kW/m}^2$ σύμφωνα με την παρούσα ανάλυση, που παρατηρείται στην πράξη κυρίως νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα, οφείλεται στο ηλιακό φάσμα, τη γωνία πρόσπτωσης και τη χαμηλότερη απόδοση του αντιστροφέα όταν λειτουργεί με χαμηλή είσοδο DC ισχύος (Chimtavee κ.α., 2011). Κυρίως όμως, η μείωση της απόδοσης οφείλεται στη μείωση της παράλληλης αντίστασης για χαμηλά επίπεδα φωτός (Manromatakis κ.α., 2017). Κάποιες έρευνες καταλήγουν στο ότι παίζει ρόλο και η αντίσταση σε σειρά και η λειτουργία των διόδων (Grunow κ.α., 2004). Χαμηλή απόδοση μπορεί να παρατηρείται επίσης σε περιπτώσεις συννεφιάς με υψηλές θερμοκρασίες πλαισίων.

Ομοίως, σε εύρος υψηλής ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, ενδεικτικά $>0,6 \text{ kW/m}^2$, που παρατηρείται κυρίως το μεσημέρι σε διαστήματα έντονης ηλιοφάνειας, η χαμηλότερη σχετικά απόδοση εξηγείται από την αύξηση των απωλειών λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας πλαισίων, διαφορετική όμως τους χειμερινούς και τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό συμβαίνει καθώς η ίδια ισχύς προσπιπτόμενης ακτινοβολίας δεν ισοδυναμεί με την ίδια θερμοκρασία πλαισίων για τους διάφορους μήνες, όπως θα διαπιστωθεί στην παράγραφο 4.3.2.

Συμπληρωματικά της ανάλυσης ανά μήνα, έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τις ορισμένες σχέσεις της παραγράφου 1.6 ο συντελεστής απόδοσης η και ο λόγος επίδοσης PR ποσοστιαία, συνολικά για την περίοδο ανάλυσης και επιμέρους ανά έτος της εξεταζόμενης πενταετίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.1 Υπολογισμός συντελεστή απόδοσης, $PR(\%)$ και CF για την περίοδο 2018-2022 συνολικά

Εξεταζόμενη περίοδος	2018 - 2022
Συνολική ενεργειακή παραγωγή (MWh)	1173,850
Ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας (kW/m^2)	9440,305
Συντελεστής απόδοσης η	11,576%
Performance Ratio PR	83,281%
Συντελεστής δυναμικότητας CF	17,899%

Πίνακας 4.2 Υπολογισμός συντελεστή απόδοσης, $PR(\%)$ και CF για τα έτη 2018-2022

Εξεταζόμενη περίοδος	2018	2019	2020	2021	2022
Συνολική ενεργειακή παραγωγή (MWh)	229,460	235,730	247,540	226,860	234,260
Ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας (kW/m^2)	1851,999	1878,995	1962,576	1833,234	1916,451
Συντελεστής απόδοσης η	11,535%	11,680%	11,742%	11,521%	11,380%
Performance Ratio PR	82,983%	84,025%	84,477%	82,882%	81,869%
Συντελεστής δυναμικότητας (CF)	17,494%	17,972%	18,873%	17,296%	17,860%

Η τιμή του PR μας επιτρέπει να συγκρίνουμε τη λειτουργία ενός σταθμού στη διάρκεια του χρόνου. Οι τιμές που υπολογίστηκαν (γύρω στα 83%) είναι αποδεκτές και υποδεικνύουν επαρκή

λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (Kiefer, 2018). Παρατηρείται ωστόσο μια μικρή αύξηση της απόδοσης τα έτη 2019 και 2020 σε σχέση με την υπολογισμένη κατά το 2018, η οποία δεν δικαιολογείται επιστημονικά εκτός από την περίπτωση αύξησης της δυνατότητας του συστήματος και βελτιστοποίησης μέσω τακτικής συντήρησης ή αναβάθμισης του εξοπλισμού. Εν προκειμένω, οφείλεται κυρίως σε δυσλειτουργίες των αισθητήρων της ισχύος ακτινοβολίας, όπως την ενδεχόμενη διακοπή λειτουργίας τους για μερικές ώρες, σε βλάβες αντιστροφών, αλλά και σε σφάλματα κατά τις απλοποιήσεις της μελέτης για την ανάλυση αυτή. Ειδικότερα, οι απλοποιήσεις αυτές αφορούν τη συλλογή δεδομένων, καθώς αυτά έχουν παρθεί ωριαία, και παραδοχές που προηγήθηκαν των υπολογισμών. Παραδείγματος χάριν, το σύστημα παρακολούθησης του σταθμού δε μετράει την ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε Wh/m^2 , αλλά μόνο στιγμιαία την ισχύ. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με την παραδοχή πως τα μεγέθη αυτά ταυτίζονται την κάθε ώρα συλλογής δεδομένων. Τέλος, χαμηλότερη απόδοση κάποιο προηγούμενο έτος μπορεί να αιτιολογηθεί και από την αμέλεια τακτικού καθαρισμού των πλαισίων και γλοοκοψίας.

Το 2021 και 2022 στη χαμηλότερη απόδοση έχει συμβάλει και η γήρανση των πλαισίων, η μείωση δηλαδή της ονομαστικής απόδοσης αυτών. Κατά τη διάρκεια της γήρανσης, είναι πιθανό το φαινόμενο φθορών των ηλιακών κυψελών με συνέπεια την υποβάθμισή τους. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, γίνεται με τρεις μορφές. Πρώτον, η έκθεση στις περιβαλλοντικές συνθήκες προκαλεί αύξηση των απωλειών αντίστασης σε σειρά λόγω μείωσης της αγωγιμότητας, συνεπώς μειώνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης, με σταθερή την τάση ανοικτού κυκλώματος. Δεύτερον, όσον αφορά την αντίσταση σε παράλληλη σύνδεση, αυτή υφίσταται μείωση λόγω της δημιουργίας παράλληλων μονοπατιών υψηλής αγωγιμότητας που διασχίζουν την p-n δίοδο ή τις γωνίες της κυψέλης. Αυτό αντανακλάται σε μείωση τόσο του ρεύματος βραχυκύκλωσης, όσο και της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Τρίτον, η επιφάνεια των ηλιακών κυψελών μπορεί να υποστεί φθορά που οδηγεί σε οπτική υποβάθμιση. Η διάβρωση και η υποβάθμιση της αντανακλαστικής επίστρωσης των πλαισίων μπορούν πράγματι να επηρεάσουν την απόδοσή τους και να μειώσουν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ (Alves dos Santos κ.α., 2021). Στη μειωμένη απόδοση συμβάλλουν και οι βλάβες των αντιστροφών που σημειώθηκαν στο διάστημα αυτό.

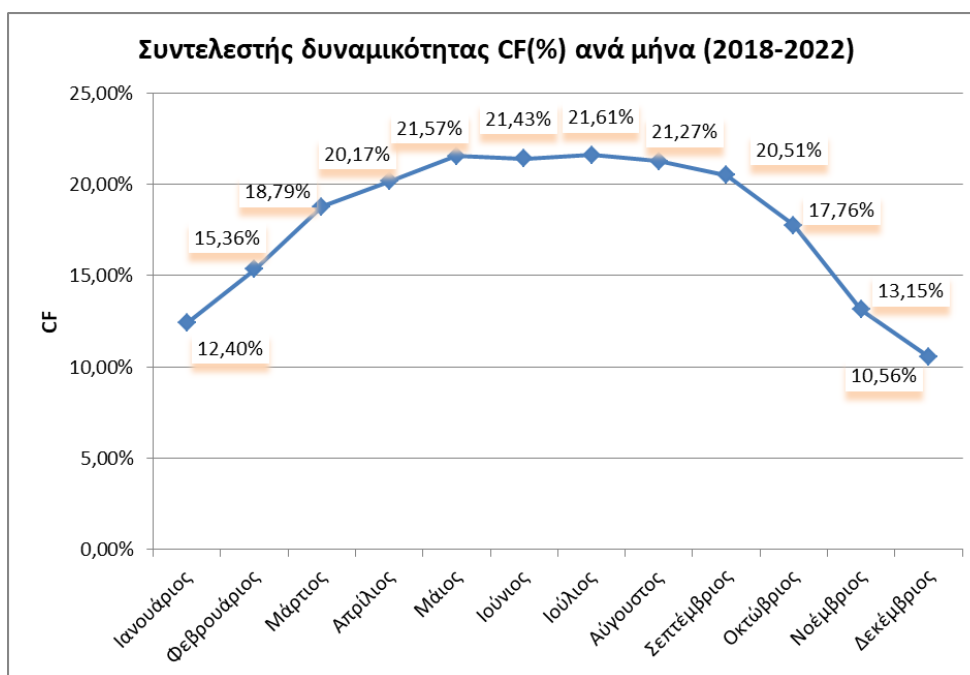
Οι τιμές του συντελεστή δυναμικότητας είναι παρόμοιες και γύρω στο 17% για όλα τα έτη, τιμή που θεωρείται επαρκής για φωτοβολταϊκό σύστημα. Στην ουσία ο δείκτης αυτός εκφράζει πως κατά τη διάρκεια του 17% του κάθε έτους ο σταθμός παράγει ηλεκτρική ενέργεια με τη μέγιστη δυναμικότητά του.

Αναλυτικότερα, υπολογίζεται ο συντελεστής δυναμικότητας της εγκατάστασης για κάθε έναν από τους 12 μήνες που χωρίστηκαν τα ανακτηθέντα δεδομένα των ετών 2018-2022. Ο υπολογισμός γίνεται με τη διαίρεση της συνολικής παραγωγής σε kWh των εκάστοτε μηνών με την εγκατεστημένη ισχύ των 149,73 kWp και με τις συνολικές ώρες αυτών των μηνών, ανεξαρτήτως αν τις ώρες αυτές υπήρξε καταγεγραμμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή όχι. Λήφθηκαν υπ' όψιν οι ημέρες καθενός μήνα του χρόνου και αγνοήθηκαν μικρά διαστήματα στα

οποία υπήρξε κενό στα δεδομένα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.3 και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.

Πίνακας 4.3 Υπολογισμός συντελεστή δυναμικότητας *CF*(%) ανά μήνα των ετών 2018-2022

Μήνας	Συνολική ενεργειακή παραγωγή (MWh)	Εγκατεστημένη ισχύς (kWp)	Συντελεστής δυναμικότητας <i>CF</i>
Ιανουάριος	69,04	149,73	12,40%
Φεβρουάριος	77,81		15,36%
Μάρτιος	104,64		18,79%
Απρίλιος	108,71		20,17%
Μάιος	120,13		21,57%
Ιούνιος	115,51		21,43%
Ιούλιος	120,34		21,61%
Αύγουστος	118,50		21,27%
Σεπτέμβριος	110,55		20,51%
Οκτώβριος	98,94		17,76%
Νοέμβριος	70,87		13,15%
Δεκέμβριος	58,81		10,56%



Σχήμα 4.3 Συντελεστής δυναμικότητας *CF*(%) ανά μήνα (2018-2022)

Παρατηρείται ότι τους καλοκαιρινούς μήνες ο συντελεστής δυναμικότητας υπερβαίνει το 21%, ενώ τους χειμερινούς μήνες πλησιάζει το 10%. Οι ανοιξιάτικοι και φθινοπωρινοί μήνες παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, αυξανόμενες προς το καλοκαίρι και μειούμενες προς τον χειμώνα. Η αιχμή, όπως προσδιορίζεται από το γράφημα, είναι τον Ιούλιο με τιμή 21,61%. Επισημαίνεται πως οι αντίστοιχοι συντελεστές απόδοσης και λόγοι επίδοσης *PR* εμφανίζουν την ανάποδη τάση, με υψηλότερες τιμές τους χειμερινούς μήνες. Συμπεραίνουμε πως ο συντελεστής *CF* δεν αποτελεί μέτρο απόδοσης του εξεταζόμενου συστήματος, αλλά αφορά κυρίως τις ώρες

αποδοτικής λειτουργίας του. Το καλοκαίρι η παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη, καθώς ο σταθμός λειτουργεί περισσότερες ώρες της ημέρας. Εξ ορισμού ο συντελεστής CF δεν μπορεί να λαμβάνει υψηλές τιμές, δεδομένης της απαίτησης ηλιοφάνειας για την παραγωγή ενέργειας από έναν σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Οι νυχτερινές ώρες δεν είναι παραγωγικές για την εγκατάσταση.

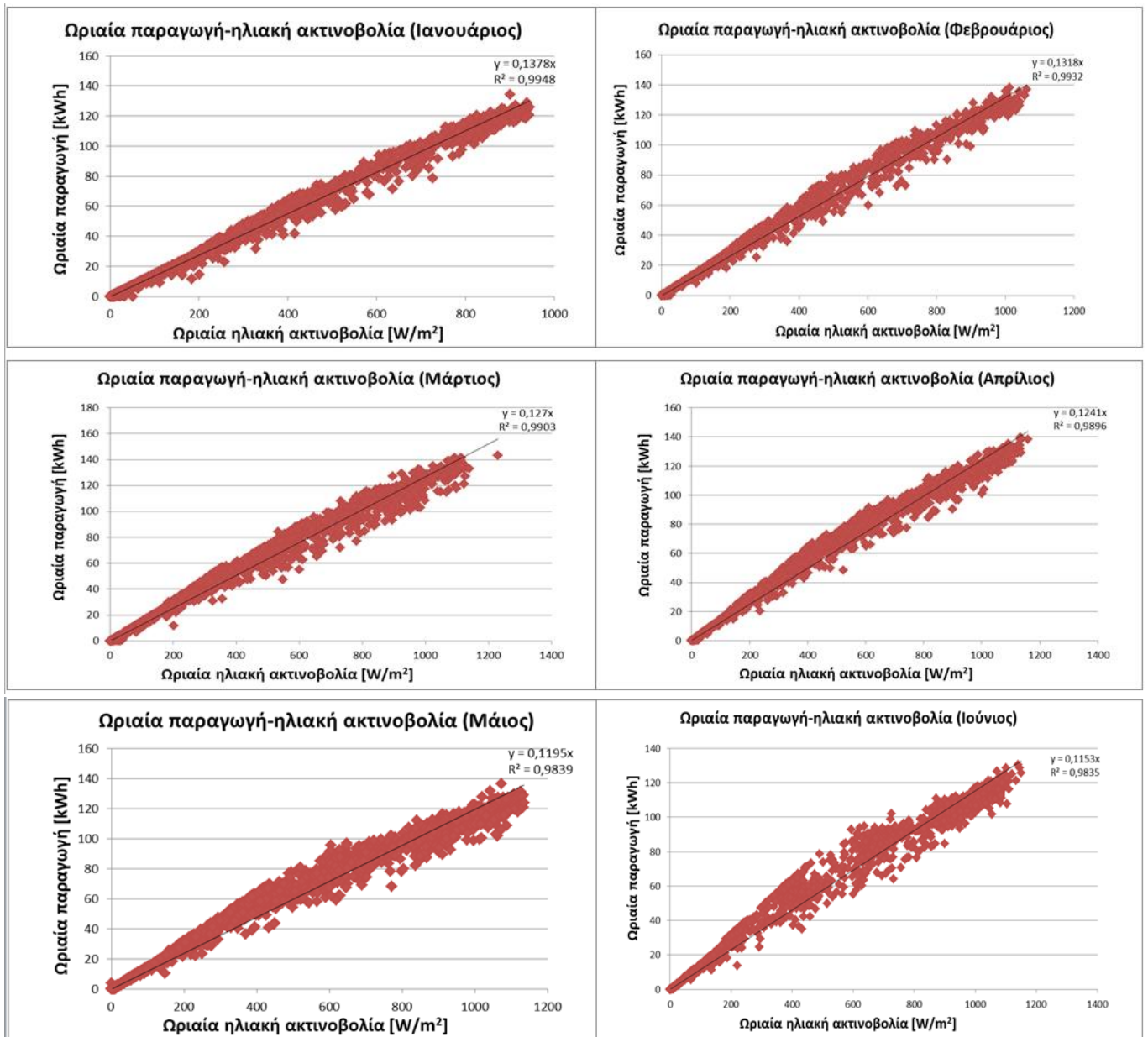
4.3 Επίδραση θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στην απόδοση του Φ/Β συστήματος

4.3.1 Διερεύνηση σχέσης ωριαίας παραγωγής - ηλιακής ακτινοβολίας

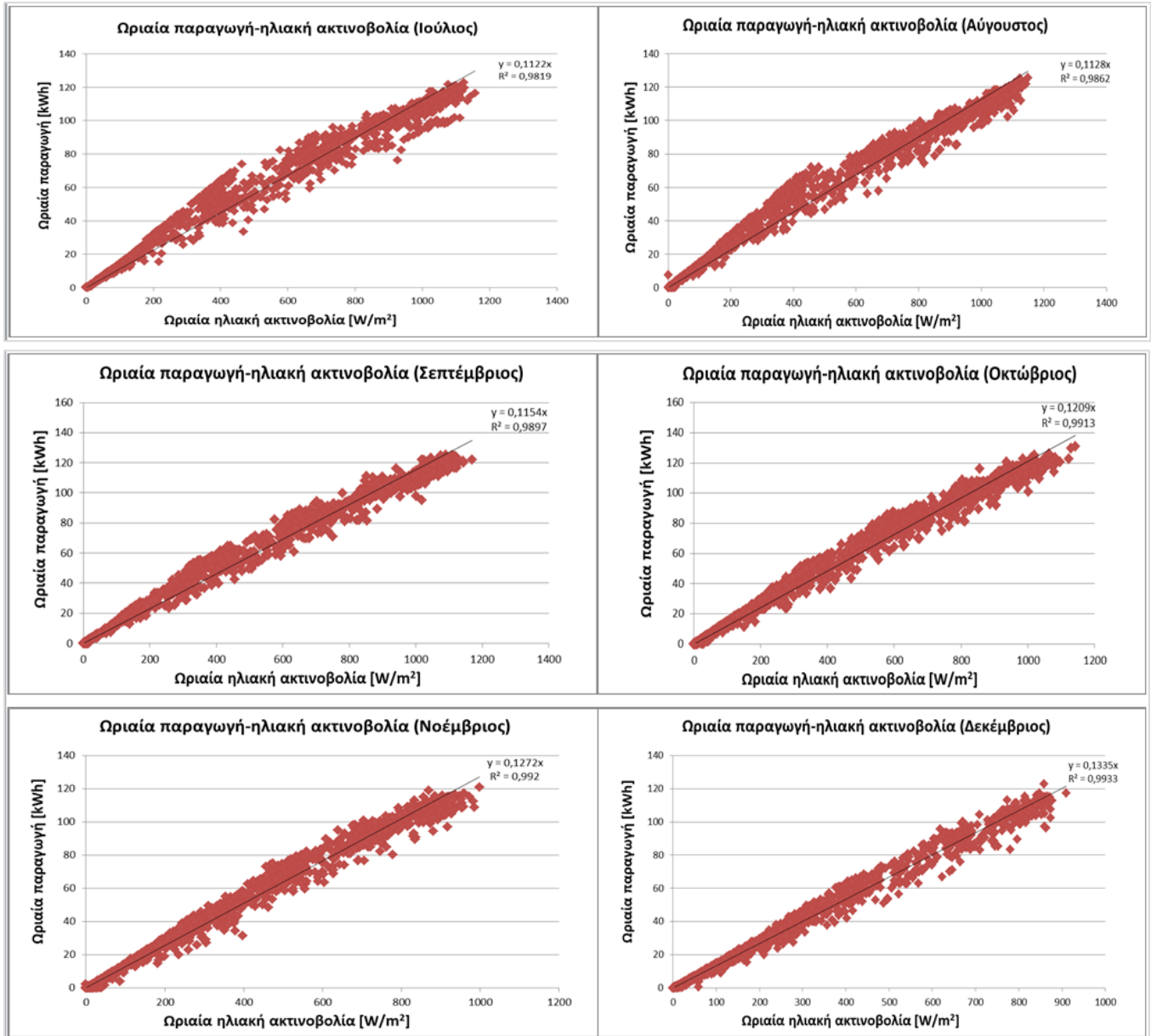
Αρχικά έγινε το διάγραμμα ωριαίας ηλεκτρικής παραγωγής σε kWh και αντίστοιχης πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 για τα δεδομένα χωρισμένα σε μήνες, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Τα εν λόγω διαγράμματα παρατίθενται παρακάτω (Σχήμα 4.4 (α) και (β)). Προσεγγιστικά δόθηκε επίσης η εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε διάγραμμα ώστε να ποσοτικοποιηθεί η σχέση αυτή, περνώντας υποχρεωτικά από το 0, ώστε να έχει φυσική σημασία η προσέγγιση. Αυτές, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής συσχέτισης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Σημειώνεται πως η μορφή των παρακάτω διαγραμμάτων επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία παρόμοιων αναλύσεων, όπου αποτιμάται η λειτουργία Φ/Β συστημάτων με όμοια χαρακτηριστικά, όπως στην περίπτωση του διασυνδεδεμένου σταθμού 120 kWp στην Ταϊλάνδη των Chintavee κ.α., 2011. Πράγματι, η ανάλυση δεδομένων από τον Νοέμβριο του 2008 έως τον Οκτώβριο του 2009 οδήγησε στο Σχήμα 4.5. Σημειώνεται πως ο σταθμός αυτός, σε αντίθεση με τον σταθμό που εξετάζεται στην ανάλυσή μας, έχει συσσωρευτές, οι οποίοι ενδεχομένως μειώνουν τη διακύμανση στη μορφή του διαγράμματος, αφετέρου αυξάνουν την απόδοση του ίδιου συστήματος, που εκφράζεται ενδεχομένως με την αύξηση της κλίσης.

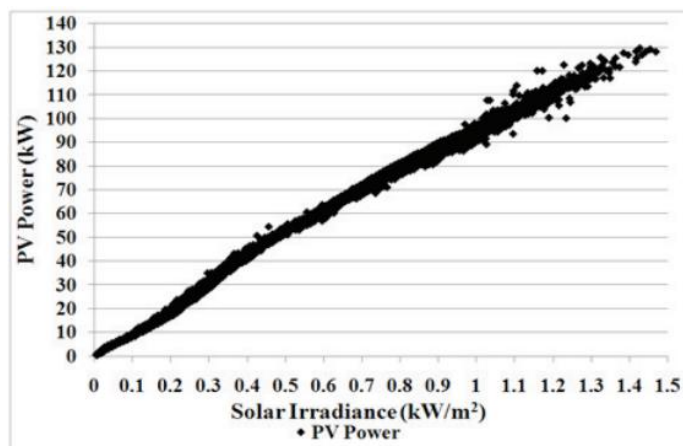
Ακόμη, η μορφή των διαγραμμάτων ωριαίας παραγωγής – ηλιακής ακτινοβολίας και η προσέγγιση αυτής μέσω γραμμικής εξίσωσης συμφωνεί με τη θεωρητική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων και με παρόμοια πειράματα αποτίμησης λειτουργίας φωτοβολταϊκών σταθμών, όπως αυτό του (Rahman κ.α., 2015), όπου με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης συστημάτων ψύξης των Φ/Β πλαισίων, διεξήγαγε πείραμα για τη σχέση της ηλιακής ακτινοβολίας με τη θερμοκρασία, με κατά το δυνατό σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες. Το αποτέλεσμα αποτυπώνεται σε γράφημα μίας γραμμής (Σχήμα 4.6), η μορφή της οποίας συμπίπτει με την προσέγγιση της ανάλυσης αυτής.



Σχήμα 4.4 (α) Ωριαία ηλεκτρική παραγωγή (σε kWh) και αντίστοιχη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (σε W/m^2) για τον Ιανουάριο έως τον Ιούνιο (2018-2022)



Σχήμα 4.4 (β) Ωριαία ηλεκτρική παραγωγή (σε kWh) και αντίστοιχη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (σε W/m²) για τον Ιούλιο έως τον Δεκέμβριο (2018-2022)



Σχήμα 4.5 Ωριαία ηλεκτρική παραγωγή (σε kW) και αντίστοιχη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (σε kW/m²) για 11/2008 - 10/2009, Πηγή: Chimtavee κ.α., 2011

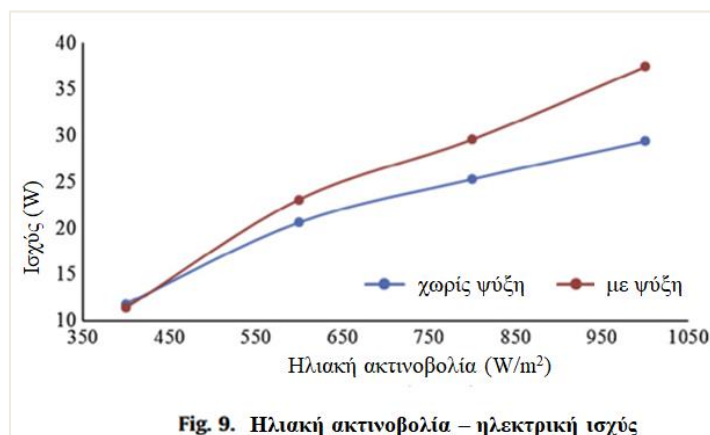


Fig. 9. Ηλιακή ακτινοβολία – ηλεκτρική ισχύς

Σχήμα 4.6 Ωριαία ηλεκτρική παραγωγή (σε kW) και αντίστοιχη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (σε W/m²) βάσει πειραματικών δεδομένων, Πηγή: Rahman κ.α., 2015

Πίνακας 4.4 Εξίσωση παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος ανά μήνα για τα έτη 2018-2022 συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω γραμμικής παλινδρόμησης

Μήνας	Εξίσωση	R ²
Ιανουάριος	$y=0,1378x$	0,9948
Φεβρουάριος	$y=0,1318x$	0,9932
Μάρτιος	$y=0,1270x$	0,9903
Απρίλιος	$y=0,1241x$	0,9896
Μάιος	$y=0,1195x$	0,9839
Ιούνιος	$y=0,1153x$	0,9835
Ιούλιος	$y=0,1122x$	0,9817
Αύγουστος	$y=0,1128x$	0,9862
Σεπτέμβριος	$y=0,1154x$	0,9897
Οκτώβριος	$y=0,1209x$	0,9913
Νοέμβριος	$y=0,1272x$	0,9920
Δεκέμβριος	$y=0,1335x$	0,9933

Παρατηρείται ότι η κλίση των διαγραμμάτων αυτών, καθώς ασχολούμαστε με ωριαία δεδομένα, δίνει διαιρούμενη με τη συνολική επιφάνεια της ακτινοβολίας, τον ωριαίο βαθμό απόδοσης η του σταθμού για τους μήνες, με εμφανή πτώση της τιμής για τους καλοκαιρινούς μήνες. Μάλιστα, η μέγιστη τιμή του εμφανίζεται τον Ιανουάριο βάσει των τιμών των ετών 2018-2022. Δηλαδή φαίνεται πως ο σταθμός δεν παράγει το ίδιο κάθε μήνα για την ίδια ακτινοβολία. Για την κατανόηση αυτού γίνεται χρήση του πίνακα εξισώσεων. Ενδεικτικά, υπολογίζεται βάσει της προσέγγισης πως για 500 W/m^2 τιμή της πυκνότητας ηλιακής ισχύος, τον Ιανουάριο παράγονται $68,90 \text{ kW}$ στιγμιαία, ή ισοδύναμα, αν μιλάμε για διάστημα 1 ώρας, 500 Wh/m^2 δίνουν $68,90 \text{ kWh}$, οι οποίες με υπόθεση $0,43 \text{ ευρώ/ kWh}$ ωριαία χρηματική αποζημίωση, αντιστοιχούν σε $29,63 \text{ ευρώ}$. Οι τιμές για τον Ιούλιο είναι αντίστοιχα $56,10 \text{ kWh}$ για 1 ώρα, δηλαδή $24,12 \text{ ευρώ}$.

Πράγματι, τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 4.5, στον οποίο παρουσιάζονται οι επιμέρους συντελεστές απόδοσης η ανά μήνα και οι αντίστοιχες τιμές του Performance Ratio (%), που έχουν υπολογιστεί με βάση τα δεδομένα των ετών 2018-2022 και ο οποίος αποτυπώνεται σχηματικά στο Σχήμα 4.1.

Πίνακας 4.5 Συντελεστής απόδοσης και **PR** ανά μήνα ετών 2018-2022

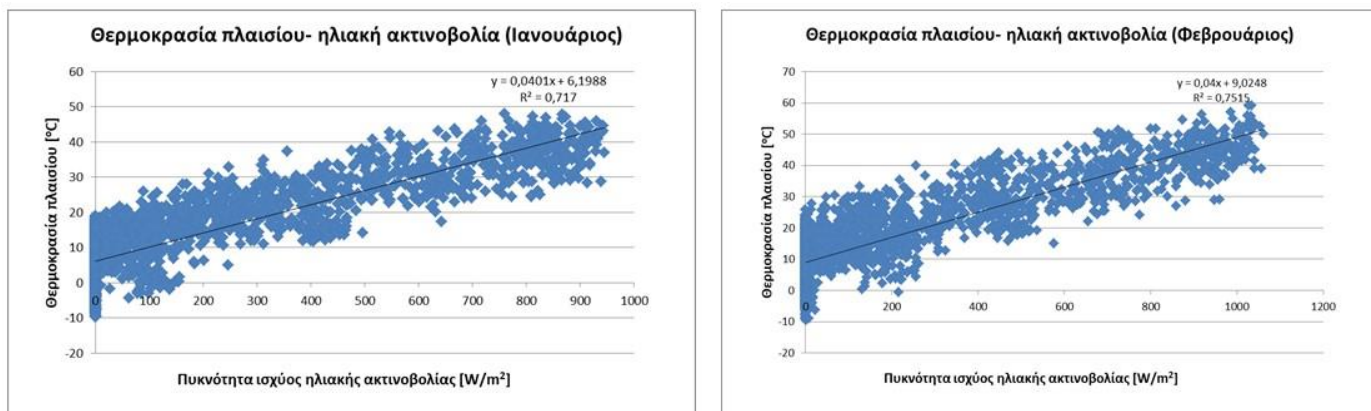
Μήνας	η (%)	Performance Ratio (%)
Ιανουάριος	12,851%	92,45%
Φεβρουάριος	12,434%	89,45%
Μάρτιος	12,049%	86,69%
Απρίλιος	11,883%	85,49%
Μάιος	11,545%	83,06%
Ιούνιος	11,127%	80,05%
Ιούλιος	10,855%	78,09%
Αύγουστος	10,874%	78,23%
Σεπτέμβριος	11,055%	79,53%
Οκτώβριος	11,504%	82,76%
Νοέμβριος	11,971%	86,12%
Δεκέμβριος	12,455%	89,60%
	11,720%	84,316%

Είναι φανερό πως οι χειμερινοί μήνες εμφανίζουν μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης και αντίστοιχα μεγαλύτερο Performance Ratio_{STC} από ό,τι οι καλοκαιρινοί, με μέγιστη παρατηρούμενη απόδοση τον Ιανουάριο (12,851%) και ελάχιστη τον Ιούλιο (10,874%). Αναφέρεται πως σφάλματα των μετρήσεων από τους αισθητήρες έχουν επηρεάσει τους υπολογισμούς, καθώς και η εξαίρεση ακραίων τιμών στα διαγράμματα, με αποτέλεσμα τη μικρή διαφοροποίηση των τιμών αυτών από την κλίση των Σχημάτων 4.5 (α) έως (γ), διαιρούμενη με την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών. Ακόμη, ο λόγος **PR** είναι σωστότερο να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση της λειτουργίας του σταθμού σε διαφορετικές χρονικές περιόδους ή με άλλους σταθμούς και όχι μεμονωμένα ως απόλυτη τιμή. Οι μειωμένες σχετικά τιμές του βαθμού **PR** τους καλοκαιρινούς μήνες αιτιολογούνται από τις αυξημένες απώλειες των μηνών αυτών λόγω

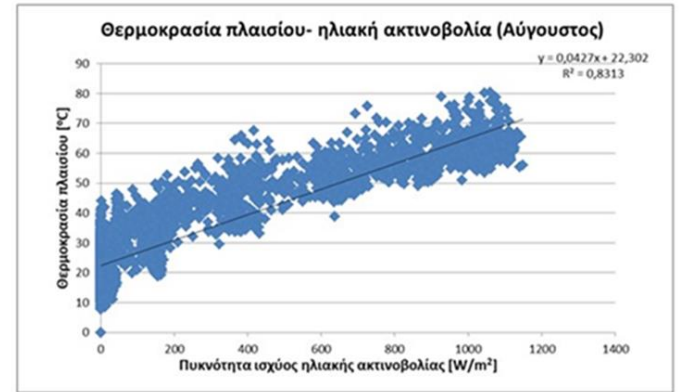
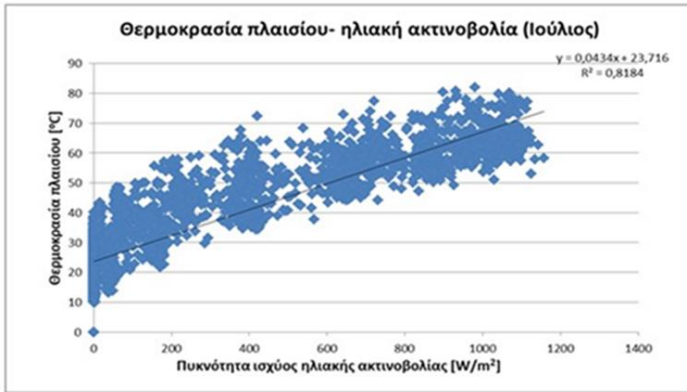
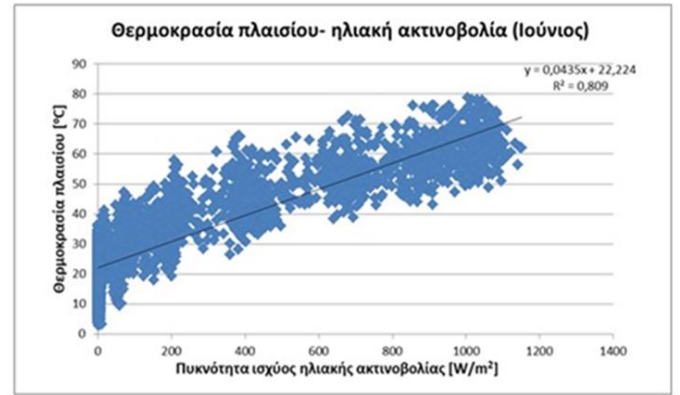
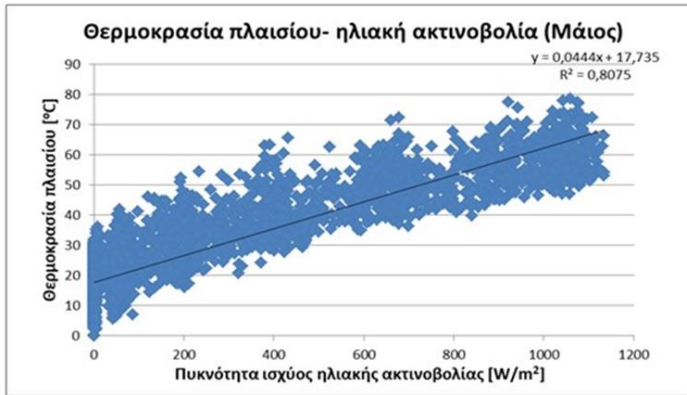
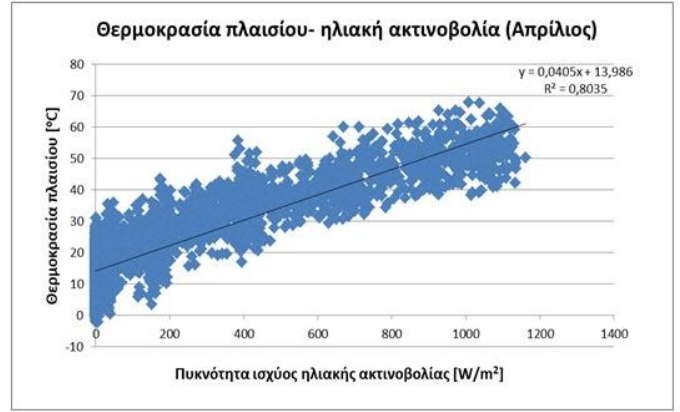
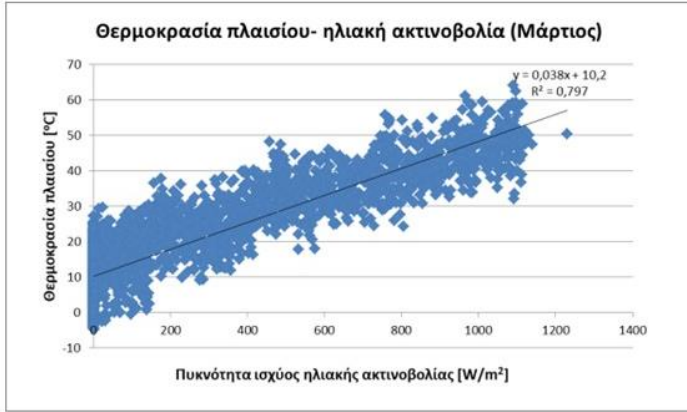
αυξημένης θερμοκρασίας πλαισίων που οφείλεται σε αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ισχύ προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται και από την έρευνα των Vasisht κ.α., 2016, στην οποία οι συγγραφείς διερευνούν την επίδραση των εποχικών διακυμάνσεων στην τιμή του **PR**, του συντελεστή απόδοσης η και του θερμοκρασιακού συντελεστή ενός Φ/Β σταθμού με παρόμοια χαρακτηριστικά σε πόλη της Ινδίας. Οι τιμές του **PR** τους χειμερινούς μήνες διευκολύνουν τη σύγκριση λειτουργίας διαφορετικών χρονικών διαστημάτων ή διαφορετικών συστημάτων, λόγω των μειωμένων θερμοκρασιακών απωλειών. Συνεπώς μπορούν να ποσοτικοποιηθούν ευκολότερα οι υπόλοιπες απώλειες του συστήματος, π.χ. λόγω αντιστάσεων καλωδίων, μετασχηματιστή, αντιστροφών, σκόνης, ή ενδεχόμενων σκιάσεων. Οι επιμέρους τιμές, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Kiefer, 2018), είναι ικανοποιητικές για διασυνδεδεμένο σταθμό με μετασχηματιστή Μέσης Τάσης, όπως και ο συνολικός **PR** της εγκατάστασης στο ποσοστό 84,316%. Σημειώνεται πως οι τιμές του Πίνακα 4.5 αποκλίνουν λίγο από τις τιμές του Πίνακα 4.1 επειδή έχει χρησιμοποιηθεί το excel των ωριαίων δεδομένων, και όχι οι συγκεντρωτικές τιμές ενέργειας.

4.3.2 Διερεύνηση σχέσης θερμοκρασίας πλαισίου - ηλιακής ακτινοβολίας

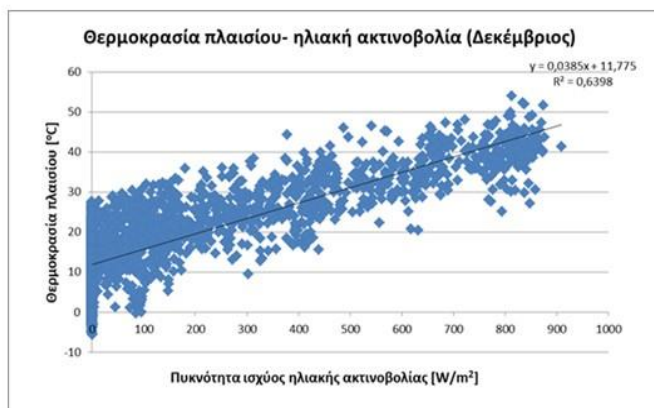
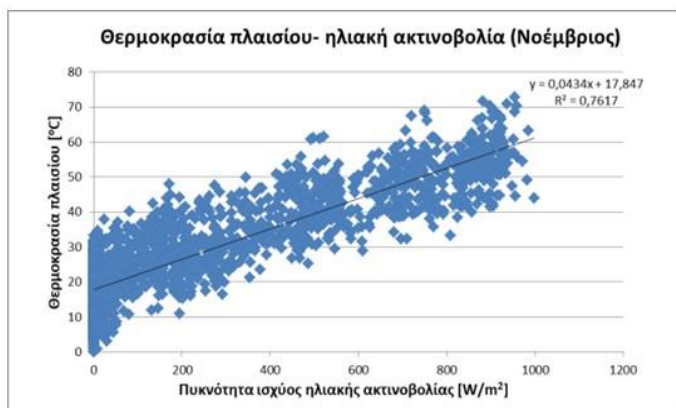
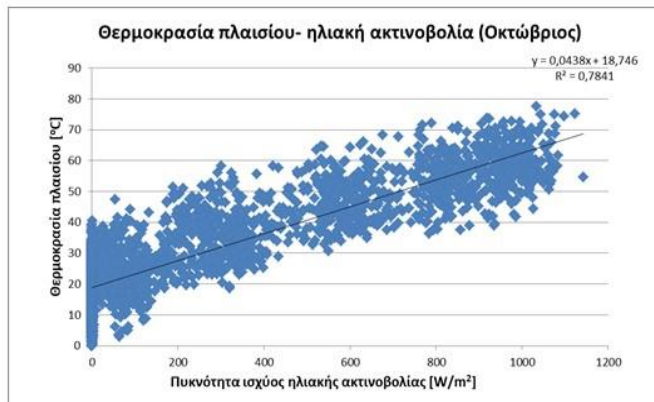
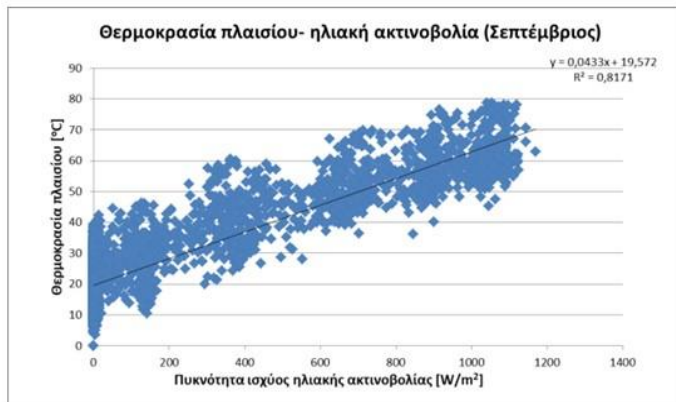
Στην προσπάθεια ερμηνείας της διαφοράς στις υπολογιζόμενες μηνιαίες αποδόσεις, έχουν μορφωθεί τα διαγράμματα θερμοκρασίας πλαισίων - πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας για όλους τους μήνες (Σχήμα 4.6 (α) έως (γ)). Έχουν χρησιμοποιηθεί τα εργαλεία του excel για τη συσχέτιση των μεταβλητών αυτών. Έχουν εξαιρεθεί ακραίες τιμές που αποτελούν σφάλματα του αισθητήρα.



Σχήμα 4.6 (α) Θερμοκρασία πλαισίου συναρτήσει ηλιακής ακτινοβολίας για τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο (2018-2022)



Σχήμα 4.6 (β) Θερμοκρασία πλαισίου συναρτήσει ηλιακής ακτινοβολίας για τον Μάρτιο έως Αύγουστο (2018-2022)



Σχήμα 4.6 (γ) Θερμοκρασία πλαισίου συναρτήσει ηλιακής ακτινοβολίας για τον Σεπτέμβριο έως Δεκέμβριο (2018-2022)

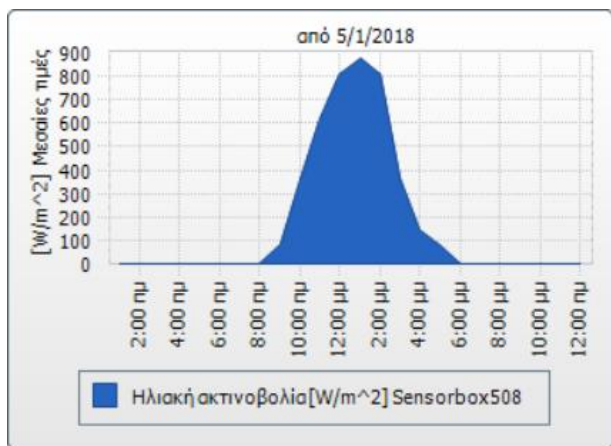
Ακολουθεί ο πίνακας εξισώσεων της γραμμικής παρεμβολής (Πίνακας 4.6), μαζί με τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης. Είναι κατανοητό πως η θερμοκρασία συσχετίζεται άμεσα με την ηλιακή ακτινοβολία, όμως όχι με τον ίδιο τρόπο σε όλη τη διάρκεια του έτους. Ενδεικτικά, έχει γίνει επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν από τα διαγράμματα αυτά μέσω γραμμικής παρεμβολής, όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή, δηλαδή η ηλιακή ακτινοβολία, παίρνει τιμές 500 W/m² και 1000 W/m². Με το παράδειγμα αυτό παρατηρείται ότι η ίδια ισχύς ακτινοβολίας προβλέπεται να θερμαίνει περισσότερο τα ηλιακά πλαίσια τους καλοκαιρινούς μήνες από ό,τι τους χειμερινούς, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Πίνακας 4.6 Εξίσωση θερμοκρασίας ανά μήνα για τα έτη 2018-2022 συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω γραμμικής παλινδρόμησης

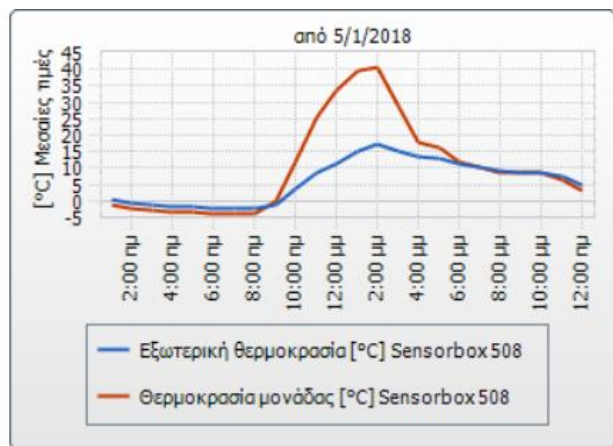
Μήνας	Εξίσωση	R ²	Θερμοκρασία πλαισίου για 500 W/m ² [oC]	Θερμοκρασία πλαισίου για 1000 W/m ² [oC]
Ιανουάριος	$y = 0,0401x + 6,1988$	0,7170	26,25	46,30
Φεβρουάριος	$y = 0,0400x + 9,0248$	0,7515	29,02	49,02
Μάρτιος	$y = 0,0380x + 10,2000$	0,7970	29,20	48,20
Απρίλιος	$y = 0,0405x + 13,9860$	0,8035	34,24	54,49
Μάιος	$y = 0,0444x + 17,7350$	0,8075	39,94	62,14
Ιούνιος	$y = 0,0435x + 22,2240$	0,8090	43,97	65,72
Ιούλιος	$y = 0,0434x + 23,7160$	0,8184	45,42	67,12
Αύγουστος	$y = 0,0427x + 22,3020$	0,8313	43,65	64,57
Σεπτέμβριος	$y = 0,0433x + 19,5720$	0,8171	41,22	62,87
Οκτώβριος	$y = 0,0438x + 18,7460$	0,7841	40,65	62,55
Νοέμβριος	$y = 0,0434x + 17,8470$	0,7617	39,55	61,25
Δεκέμβριος	$y = 0,0385x + 11,7750$	0,6398	31,03	50,28

Από τον πίνακα λαμβάνουμε ενδεικτικά, για 500 W/m² ηλιακή ακτινοβολία, τιμή 26,25°C τον Ιανουάριο, ενώ τον Ιούλιο, τιμή 45,42°C. Ομοίως, 1000 W/m² ηλιακή ισχύς τον Ιανουάριο προβλέπεται να αντιστοιχούν σε θερμοκρασία πλαισίου 46,30°C και τον Ιούλιο σε 65,72°C. Τα δεδομένα δείχνουν πως μεγαλύτερη θερμοκρασία στο πλαίσιο εμφανίζεται τον Αύγουστο. Συνεπώς, καταλήγουμε στο εξής: ίδια τιμή ισχύος ακτινοβολίας του ηλίου δεν αντιστοιχεί σε ίδια θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου και δεν παράγει ίδια ποσότητα ενέργειας για την ίδια διάρκεια ηλιοφάνειας όλους τους μήνες του έτους. Αντιθέτως, τους χειμερινούς μήνες ο βαθμός απόδοσης λειτουργίας του συστήματος είναι μεγαλύτερος και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο πλαίσιο είναι μικρότερη σε σχέση με τους καλοκαιρινούς.

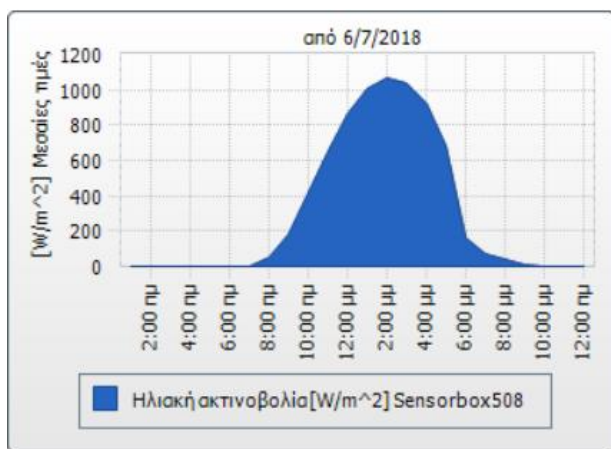
Ενδεικτικό παράδειγμα από τα δεδομένα είναι το εξής. Έχει επιλεγθεί τυχαία μία ημέρα του Ιανουαρίου του 2018 και μία ημέρα του Ιουλίου του ίδιου έτους. Για τιμή ακτινοβολίας 800 W/m² στις 12:00 μ.μ. την 05/01/2018, λαμβάνουμε θερμοκρασία ατμόσφαιρας 11,1°C και θερμοκρασία πλαισίων 33,64°C. Ομοίως, την 06/07/2018 και για την ίδια ακτινοβολία στις 11:45 π.μ. περίπου, δηλαδή 800 W/m², παίρνουμε εξωτερική θερμοκρασία 32°C και θερμοκρασία πλαισίου 54°C. Αυτά φαίνονται στα Σχήματα 4.8 έως 4.11.



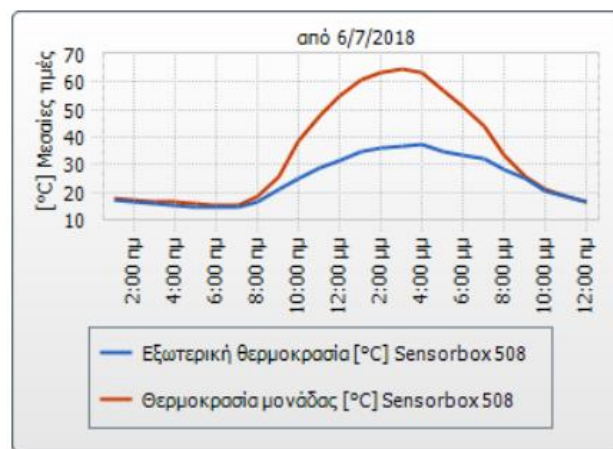
Σχήμα 4.8 Ηλιακή ακτινοβολία την 05/01/2018 σε ωριαία βάση, Πηγή: sunny portal



Σχήμα 4.9 Θερμοκρασία ατμόσφαιρας και πλαισίων την 05/01/2018 σε ωριαία βάση, Πηγή: sunny portal



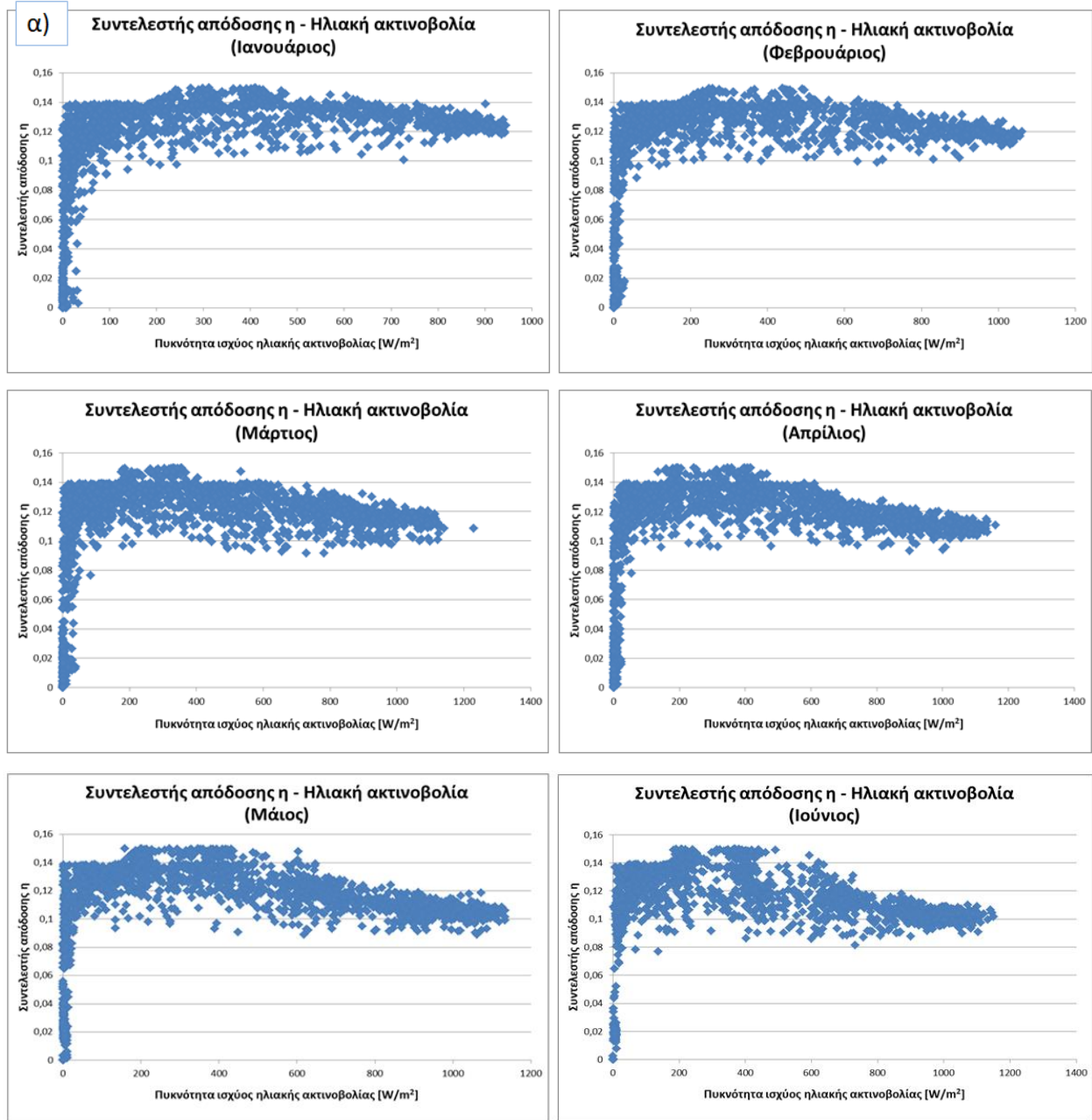
Σχήμα 4.10 Ηλιακή ακτινοβολία την 06/07/2018 σε ωριαία βάση, Πηγή: sunny portal



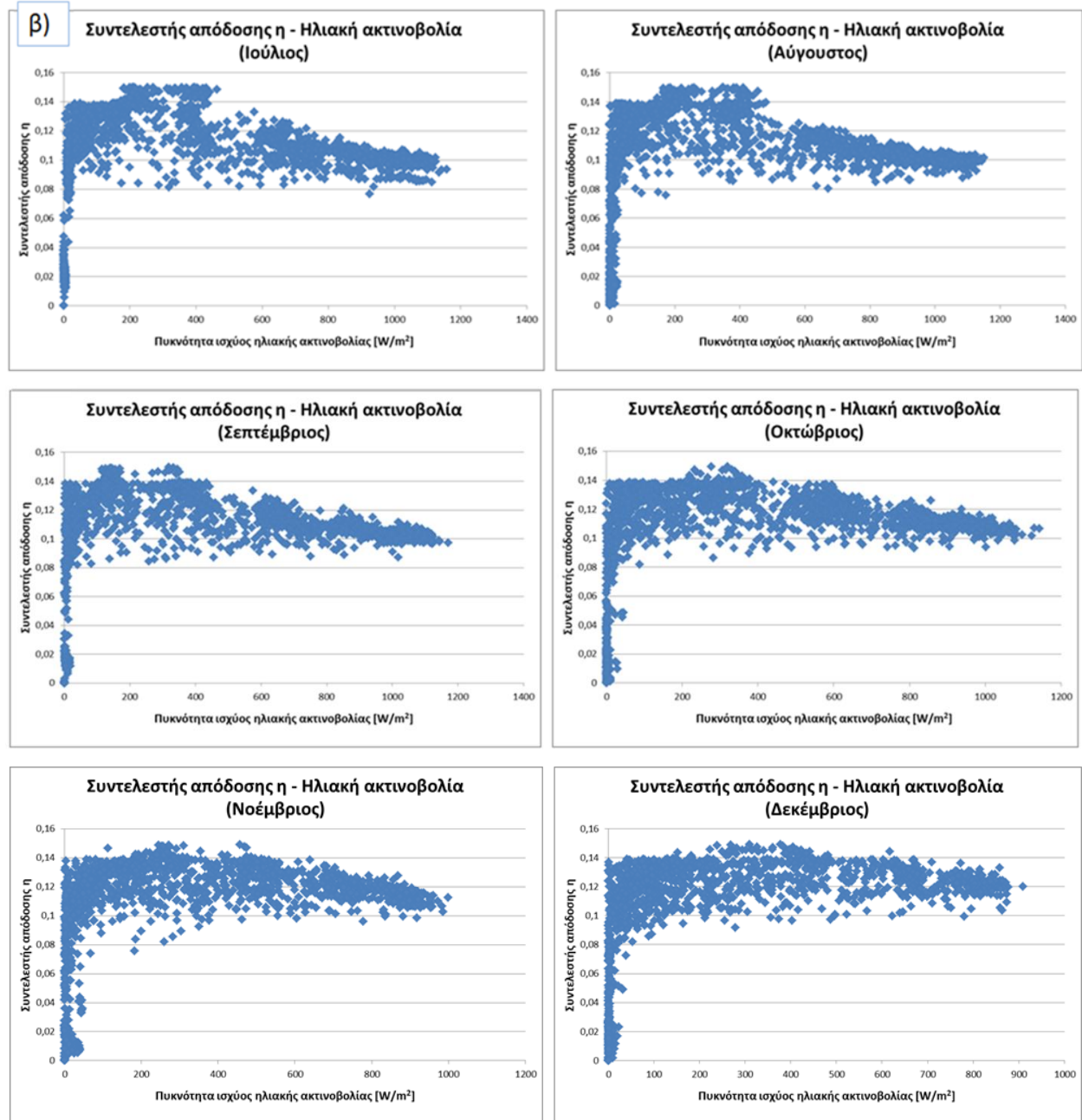
Σχήμα 4.11 Θερμοκρασία ατμόσφαιρας και πλαισίων την 06/07/2018 σε ωριαία βάση, Πηγή: sunny portal

4.3.3 Διερεύνηση σχέσης συντελεστή απόδοσης – ηλιακής ακτινοβολίας

Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από την αποτύπωση σε διαγράμματα της σχέσης του συντελεστή απόδοσης του φωτοβολταϊκού σταθμού με την πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (σε W/m²) ανά μήνες των εξεταζόμενων ετών (Σχήματα 4.12 (α) και (β)).



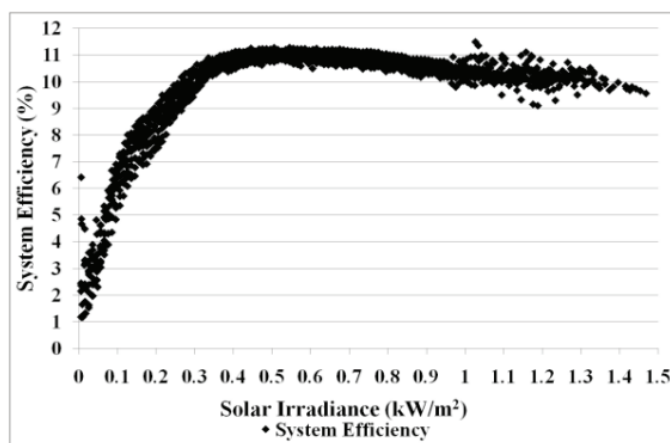
Σχήμα 4.12 (α) Συντελεστής απόδοσης η συναρτήσει πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 για τον Ιανουάριο έως Ιούνιο (2018-2022)



Σχήμα 4.12 (β) Συντελεστής απόδοσης η συναρτήσει πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 για τον Ιούλιο έως Δεκέμβριο (2018-2022)

Παρατηρείται πως τους καλοκαιρινούς μήνες υπάρχει μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης του συστήματος με την αύξηση της ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας από ό,τι τους χειμερινούς. Αυτό σημαίνει πως ίσα W/m^2 δεν αντιστοιχούν στιγμιαία σε ίση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όλους τους μήνες του χρόνου. Συγκεκριμένα, τον χειμώνα παρατηρείται μειωμένη απόδοση για τιμές ακτινοβολίας $<100 W/m^2$, αύξηση αυτής και μέγιστες τιμές στο εύρος $100-650 W/m^2$, και τάση μείωσης για υψηλότερες τιμές. Αντίθετα, το καλοκαίρι παρατηρούμε ότι αυτή η τάση μείωσης μετατοπίζεται περίπου στα $500 W/m^2$. Οι μέγιστες αποδόσεις σημειώνονται όλο το έτος

στο διάστημα 200-400 W/m². Ωστόσο, η μορφή αυτή διαγράμματος δεν αποτυπώνει την ανεξάρτητη σχέση αυτών των δύο μεταβλητών. Σύμφωνα με τη θεωρία, η απόδοση θα πρέπει συνεχώς να αυξάνεται με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας διαθέσιμη για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. Γι' αυτό παρακάτω γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην απόδοση. Σημειώνεται πως για τη δημιουργία των διαγραμμάτων αυτών δεν εξαιρέθηκαν τιμές, παρά μόνο ελάχιστες πολύ ακραίες. Παρόμοια μορφή διαγράμματος απέδωσε η έρευνα των Chintavee κ.α. (Σχήμα 4.13).

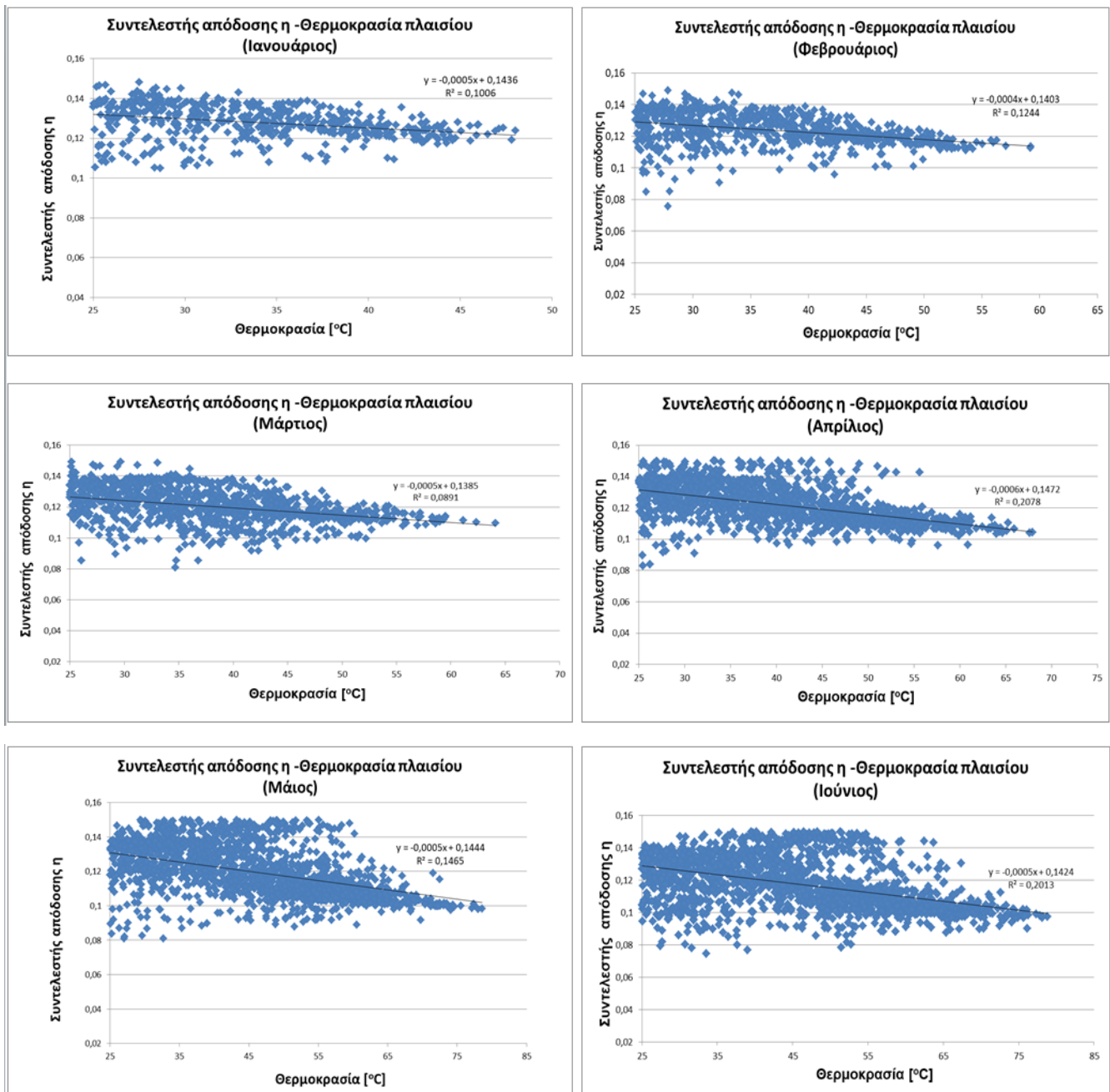


Σχήμα 4.13 Συντελεστής απόδοσης και αντίστοιχη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (σε kW/m²) για 11/2008 - 10/2009, Πηγή: Chintavee κ.α., 2011

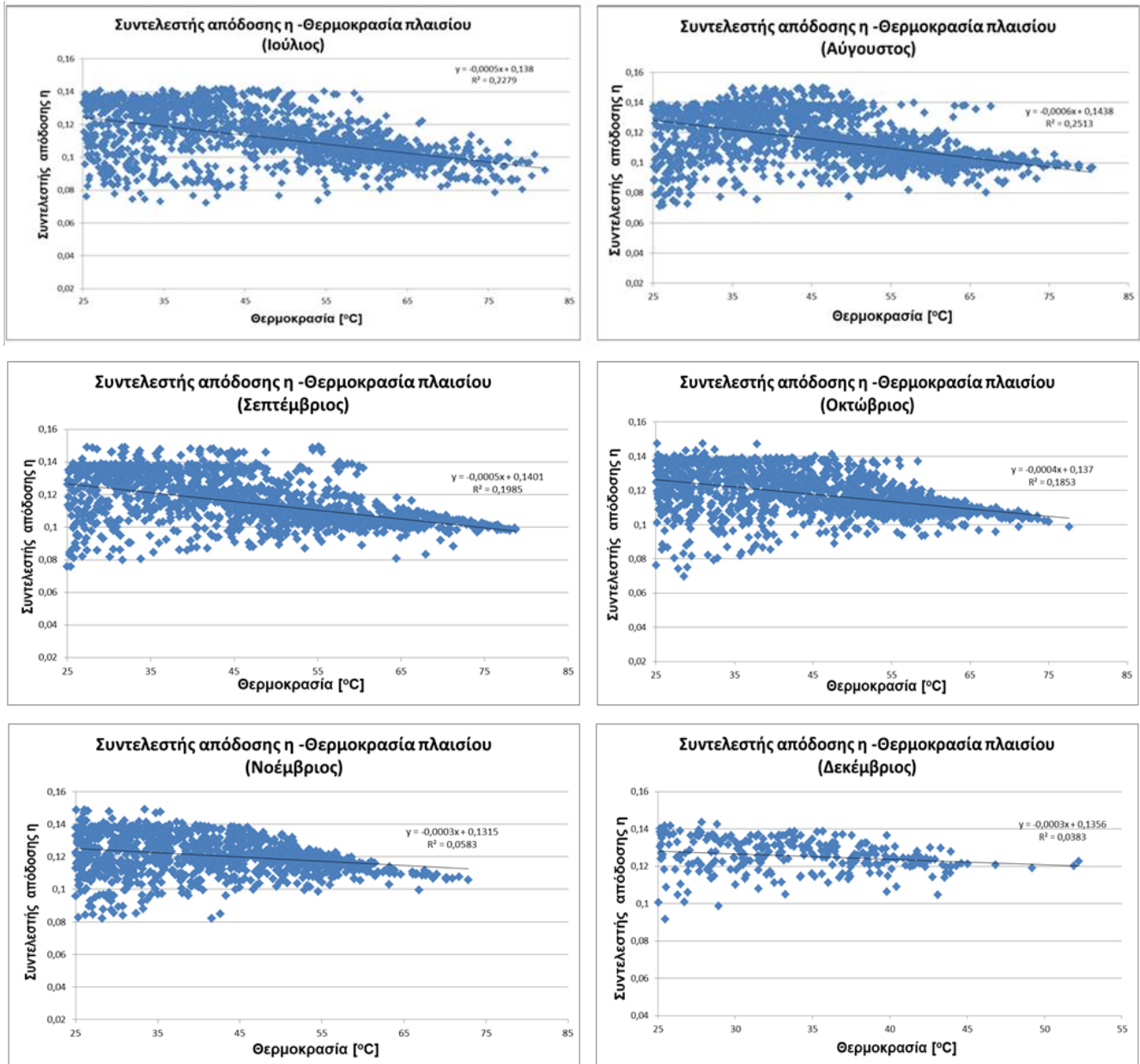
4.3.4 Διερεύνηση σχέσης συντελεστή απόδοσης - θερμοκρασίας πλαισίου

Για να αιτιολογηθεί η μορφή των διαγραμμάτων συντελεστή απόδοσης και ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας αποτυπώνονται παρακάτω τα διαγράμματα συντελεστή απόδοσης - θερμοκρασίας, πάνω από τους 25°C, που είναι η θερμοκρασία στις ιδανικές συνθήκες STC. Από τα σχήματα αυτά φαίνεται η πτώση της απόδοσης με την αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους 25°C, η οποία έχει προσεγγιστεί με μια ευθεία (Σχήμα 4.14 (α) και (β)). Η κλίση αυτής της ευθείας θεωρητικά συμπίπτει με τον θερμοκρασιακό συντελεστή της ισχύος που δίνεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, εν προκειμένω -0,43%/°C (Atsu κ.α., 2020). Οι εξισώσεις των ευθειών αυτών συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.7, μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές R². Από τα διαγράμματα έχουν αφαιρεθεί μηδενικές τιμές απόδοσης, δηλαδή αφορούν μόνο ώρες πραγματικής παραγωγής ενέργειας από τον σταθμό. Επίσης, έχουν εξαιρεθεί ακραίες τιμές. Περισσότερα σημεία απεικονίζονται στους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας από την ανατολή του ηλίου έως τη δύση, σε σχέση με τους χειμερινούς. Σημειώνεται ακόμη πως οι τιμές της απόδοσης πάνω από 12% περίπου οφείλονται σε σφάλματα κατά την εκτίμηση της ηλιοφάνειας σε Wh/m², καθώς η βάση δεδομένων διέθετε μόνο δεδομένα σε W/m², και μάλιστα επιλέχθηκε η κάθε φορά μέση τιμή που εμφανίστηκε την κάθε ώρα, και συνεπώς έχει αποκλίσεις από τη πραγματική συνολικά προσπίπτουσα ακτινοβολία σε Wh ανά m² επιφανείας, ιδιαίτερα σε ώρες με έντονες

διακυμάνσεις, π.χ. λόγω ξαφνικής ηλιοφάνειας σε περίοδο συννεφιάς. Παρατίθενται λοιπόν παρακάτω τα διαγράμματα, με έμφαση στη μορφή αυτών και όχι στις απόλυτες τιμές.



Σχήμα 4.14 (α) Συντελεστής απόδοσης η συναρτήσει θερμοκρασίας πλαισίου σε $^{\circ}\text{C}$ (για τιμές $>25^{\circ}\text{C}$) για τον Ιανουάριο έως Ιούνιο (2018-2022)



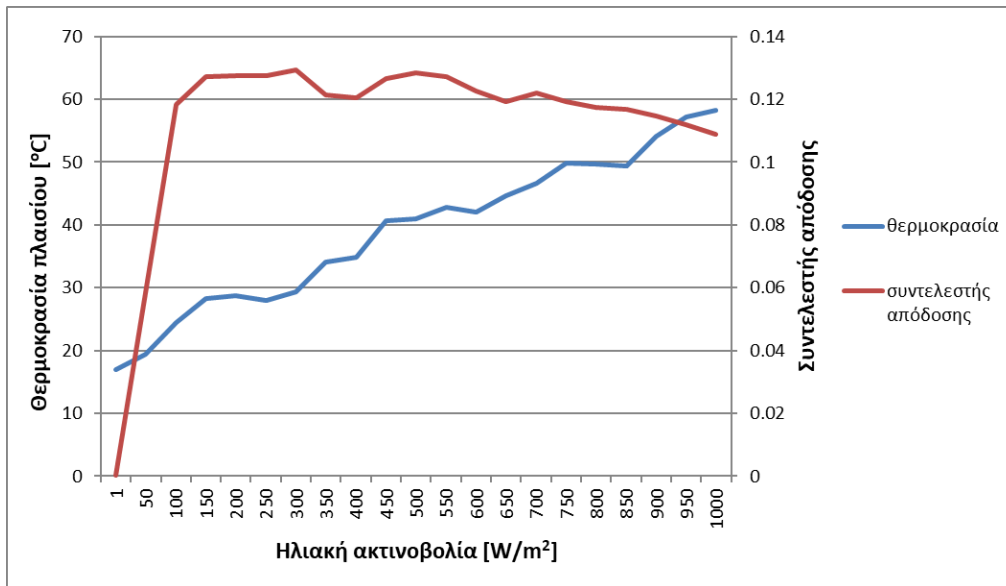
Σχήμα 4.14 (β) Συντελεστής απόδοσης η συναρτήσει θερμοκρασίας πλαισίου σε °C (για τιμές >25°C) για τον Ιούλιο έως Δεκέμβριο (2018-2022)

Πίνακας 4.7 Εξίσωση συντελεστή απόδοσης ανά μήνα για τα έτη 2018-2022 συναρτήσει της θερμοκρασίας πλαισίου σε °C μέσω γραμμικής παλινδρόμησης

Μήνας	Εξίσωση	R ²
Ιανουάριος	$y = -0,0005x + 0,1436$	0,1006
Φεβρουάριος	$y = -0,0004x + 0,1403$	0,1244
Μάρτιος	$y = -0,0005x + 0,1385$	0,0891
Απρίλιος	$y = -0,0006x + 0,1472$	0,2078
Μάιος	$y = -0,0005x + 0,1444$	0,1465
Ιούνιος	$y = -0,0005x + 0,1424$	0,2013
Ιούλιος	$y = -0,0005x + 0,138$	0,2279
Αύγουστος	$y = -0,0006x + 0,1438$	0,2513
Σεπτέμβριος	$y = -0,0005x + 0,1401$	0,1985
Οκτώβριος	$y = -0,0004x + 0,137$	0,1853
Νοέμβριος	$y = -0,0003x + 0,1315$	0,0583
Δεκέμβριος	$y = -0,0003x + 0,1356$	0,0383

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα γραφήματα συμφωνεί με τη βιβλιογραφία και άλλες παρόμοιες διερευνήσεις. Σύμφωνα με την έρευνα των Huld και Amillo, 2015, η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ο κύριος λόγος μείωσης της απόδοσης ενός Φ/Β συστήματος, καθώς η θερμοκρασία των πλαισίων είναι άμεσα εξαρτώμενη από αυτήν.

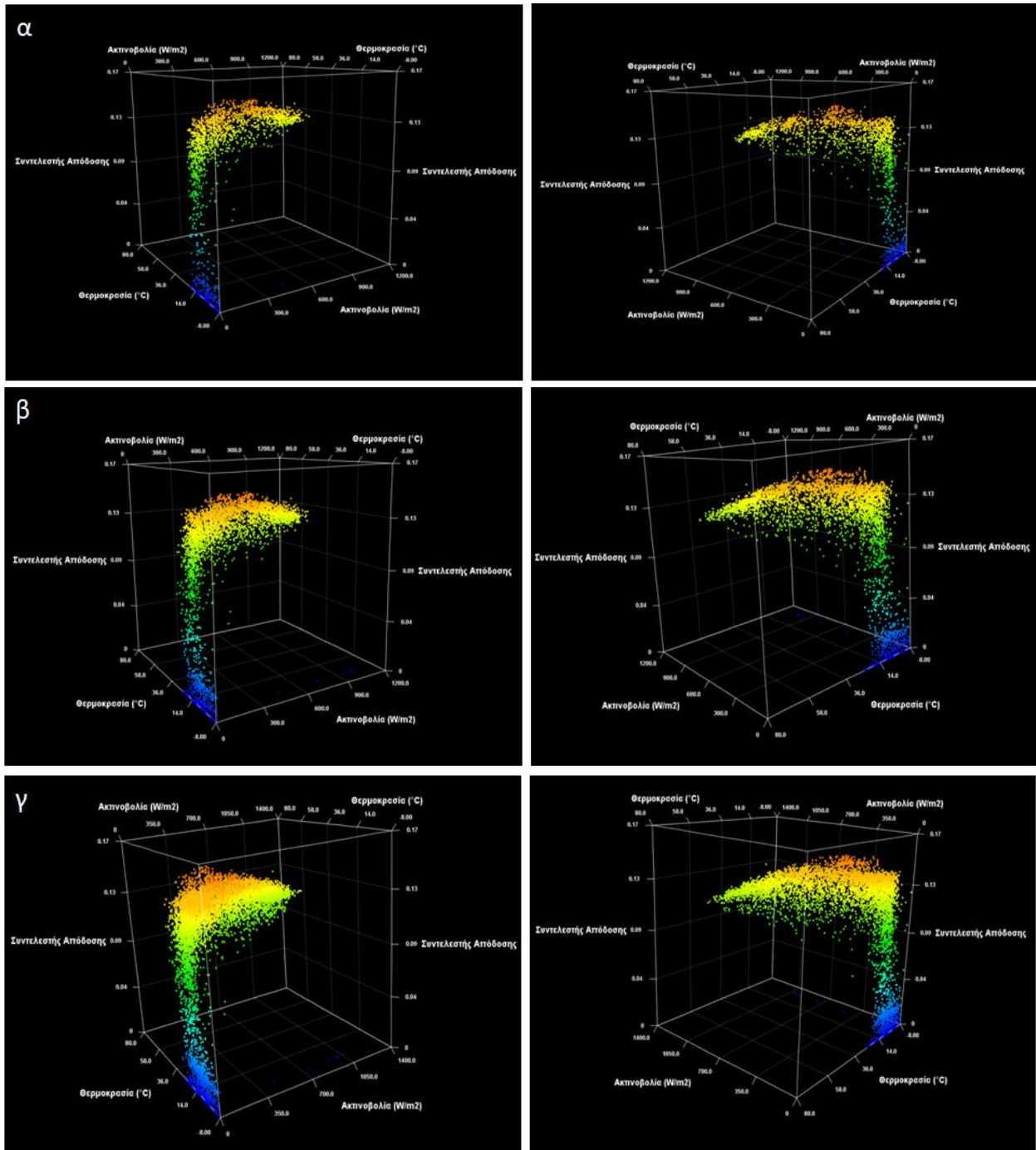
Εναλλακτικά, για την απεικόνιση των παραπάνω σχέσεων μεταξύ ακτινοβολίας και αντίστοιχης θερμοκρασίας πλαισίων και βαθμού απόδοσης έχει δημιουργηθεί διάγραμμα (Σχήμα 4.15), ενδεικτικά για τους μήνες του Νοεμβρίου των ετών 2018-2022, ως εξής. Έχει χωριστεί η ακτινοβολία σε 21 εύρη τιμών, ξεκινώντας από $<1 \text{ W/m}^2$ και καταλήγοντας στα 1100 W/m^2 , και για κάθε εύρος έχουν βρεθεί οι μέσοι όροι της θερμοκρασίας πλαισίου και του συντελεστή απόδοσης. Από το διάγραμμα παρατηρείται πως αφενός η θερμοκρασία αυξάνεται κατά κανόνα ανάλογα με την αύξηση της ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, αφετέρου ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται ανάλογα μέχρι περίπου τη θερμοκρασία των 25°C , που τον Νοέμβριο των εξεταζομένων ετών αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε $100\text{-}150 \text{ W/m}^2$ ακτινοβολίας, και ύστερα παρουσιάζει τάση μείωσης. Σημειώνεται πως στο Σχήμα 4.15 οι τιμές του οριζόντιου άξονα αναφέρονται στο αντίστοιχο διάστημα τιμών από την προηγούμενη στην επόμενη τιμή, δηλαδή όπου 100 W/m^2 , εννοείται για ακτινοβολίες $<100 \text{ W/m}^2$ και $\geq 50 \text{ W/m}^2$.



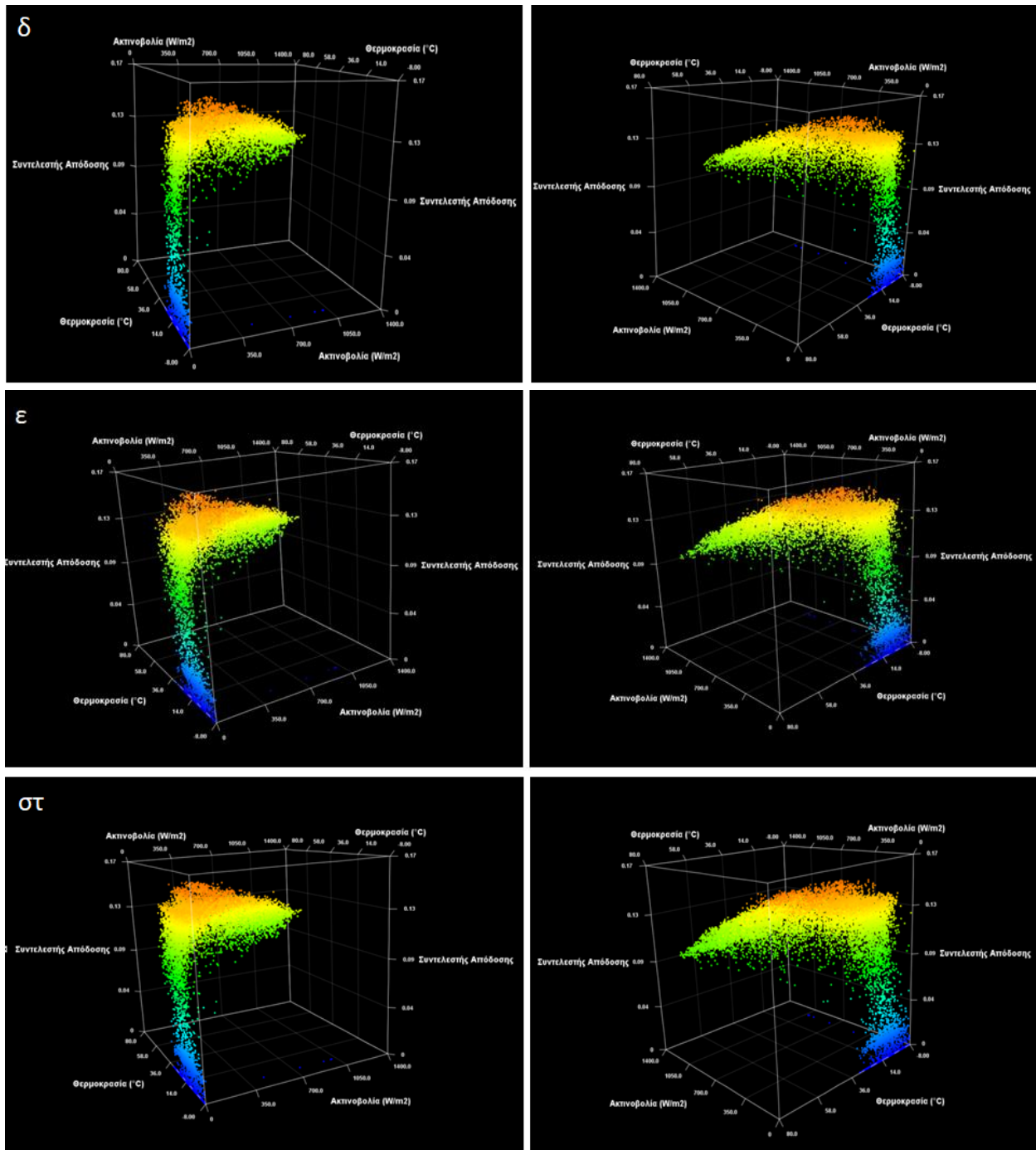
Σχήμα 4.15 Μέσες τιμές συντελεστή απόδοσης και θερμοκρασίας ανά διάστημα τιμών ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας για τους μήνες Νοεμβρίου 2018-2022

4.4 Αναπαράσταση συντελεστή απόδοσης, θερμοκρασίας πλαισίου και ηλιακής ακτινοβολίας στον χώρο

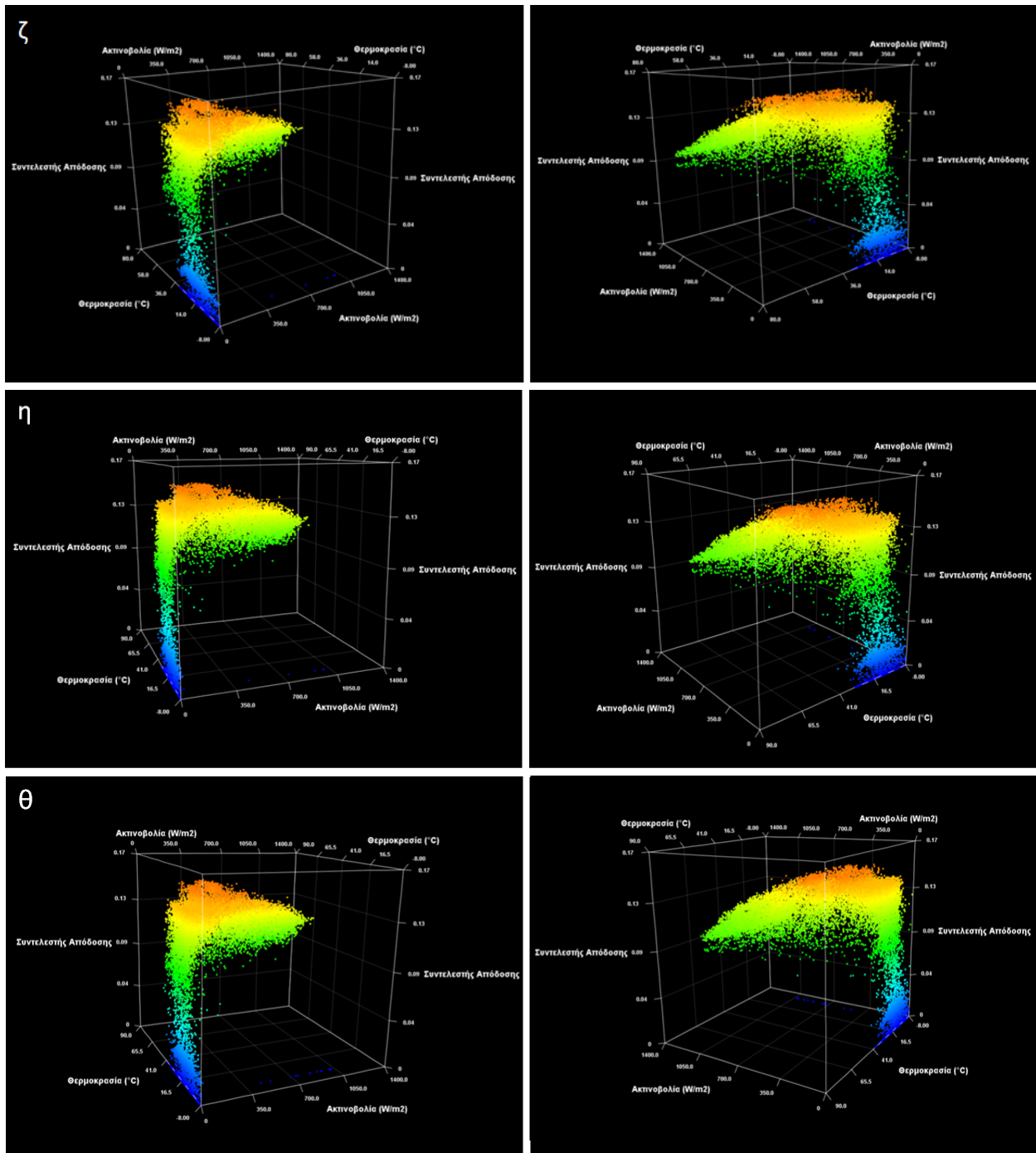
Δεδομένου ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται ταυτόχρονα από τη θερμοκρασία του πλαισίου και από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, είναι χρήσιμη η απεικόνιση και των τριών μεταβλητών σε τρισδιάστατο γράφημα, ώστε να γίνει κατανοητή η τελική τους επίδραση στην αποδοτικότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρατίθενται παρακάτω (Σχήμα 4.16 (α) έως (ιβ)). Οι τιμές της απόδοσης και εδώ υπερβαίνουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος, που αντιστοιχεί στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, λόγω σφαλμάτων κατά τις μετρήσεις, τις εκτιμήσεις από το λογισμικό και τις απλοποιήσεις της ανάλυσης σε βάση 1h, αντί 15 min που ήταν επίσης διαθέσιμη. Έχουν εξαιρεθεί δεδομένα στο γράφημα που αφορούν μηδενική ηλιακή ακτινοβολία για τον σταθμό, για πιο σαφή εικόνα των αποτελεσμάτων. Για την απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του προγράμματος Rinearn Graph 3D και οι τιμές από τα καταγεγραμμένα ανά μήνα δεδομένα που αντιστοιχούν σε μη μηδενική ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας.



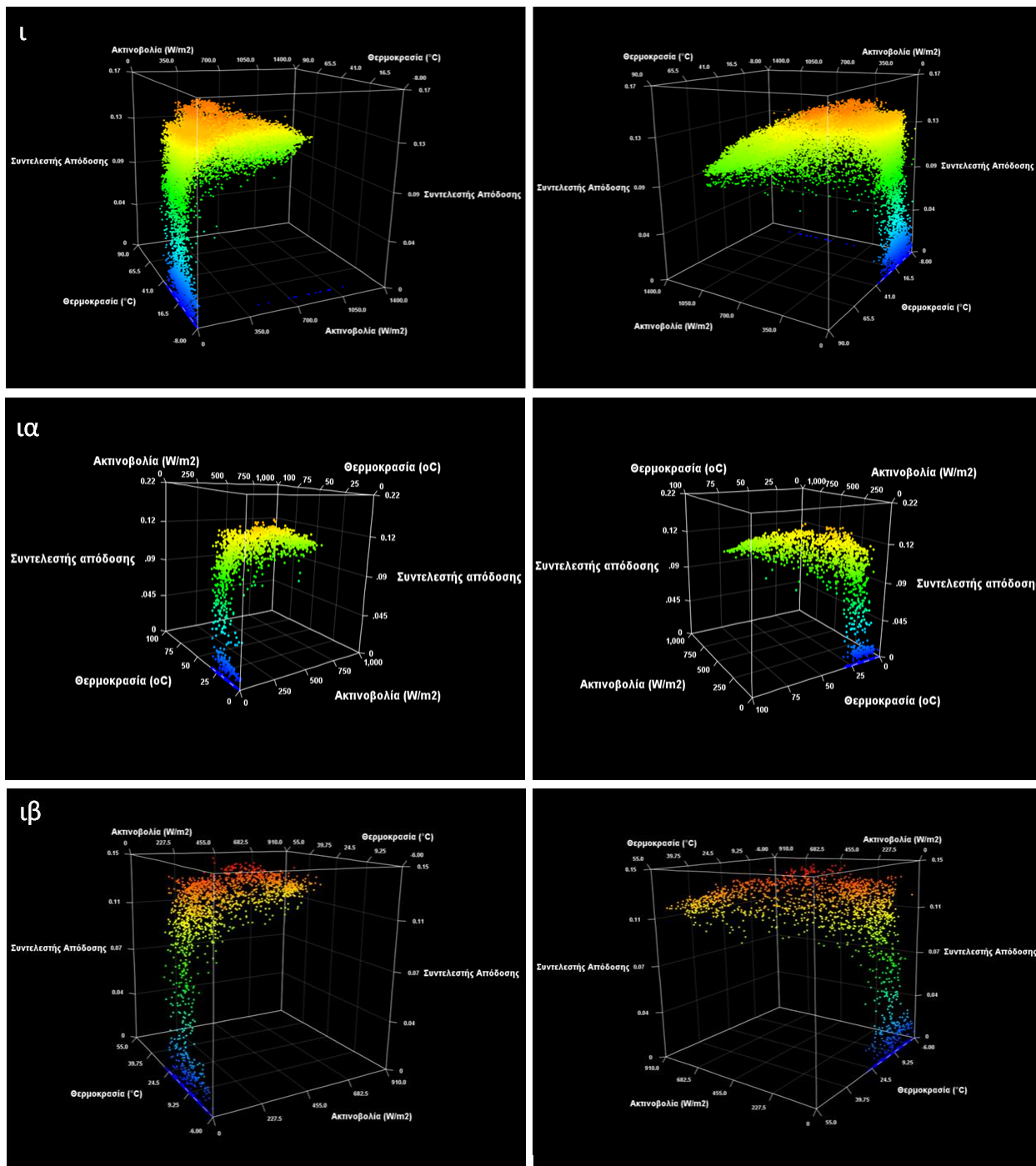
Σχήμα 4.16 (α) έως (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση ισχύος ακτινοβολίας (σε W/m^2), θερμοκρασίας πλαισίου (σε $^{\circ}C$) και συντελεστή απόδοσης από Ιανουάριο έως Μάρτιο αντίστοιχα (2018-2022) μέσω του προγράμματος RinearnGraph3D



Σχήμα 4.16 (δ) έως (στ) Τρισδιάστατη απεικόνιση ισχύος ακτινοβολίας (σε W/m^2), θερμοκρασίας πλαισίου (σε $^{\circ}C$) και συντελεστή απόδοσης από Απρίλιο έως Ιούνιο αντίστοιχα (2018-2022) μέσω του προγράμματος RinearnGraph3D



Σχήμα 4.16 (ζ) έως (θ) Τρισδιάστατη απεικόνιση ισχύος ακτινοβολίας (σε W/m^2), θερμοκρασίας πλαισίου (σε $^{\circ}C$) και συντελεστή απόδοσης από Ιούλιο έως Σεπτέμβριο αντίστοιχα (2018-2022) μέσω του προγράμματος RinearnGraph3D



Σχήμα 4.16 (ι) έως (ιβ) Τρισδιάστατη απεικόνιση ισχύος ακτινοβολίας (σε W/m^2), θερμοκρασίας πλαισίου (σε $^{\circ}C$) και συντελεστή απόδοσης από Οκτώβριο έως Δεκέμβριο αντίστοιχα (2018-2022) μέσω του προγράμματος RinearnGraph3D

5. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην εργασία έγινε η αποτίμηση της λειτουργίας διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού σταθμού 150 kWp που εγκαταστάθηκε το 2011 στη Μεγαλόπολη Αρκαδίας. Τα δεδομένα ενεργειακής παραγωγής ανακτήθηκαν για τα έτη 2011 έως 2023. Στη συνέχεια έγινε περαιτέρω ανάλυση για να διερευνηθεί η επίδραση της ηλιοφάνειας και της θερμοκρασίας πλαισίου στην απόδοση του σταθμού για τα έτη 2018-2022, η οποία στηρίχθηκε στην ανά μήνα επεξεργασία πραγματικών μετρήσεων από το έργο.

Η ανάλυση των δεδομένων επικεντρώθηκε στην αναγνώριση μοτίβων και τάσεων που μπορούν να βοηθήσουν στην πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ειδικότερα διαπιστώθηκαν τα εξής. Ο σταθμός έχει εγκατεστημένη ισχύ 149,73 kWp, ωστόσο στην πράξη δεν παράγει στιγμιαία 149,73 kW, λόγω ύπαρξης απωλειών στο σύστημα. Η μέγιστη παρατηρούμενη ισχύς στην εξεταζόμενη περίοδο ανάλυσης είναι τα 146 kW.

Η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερη τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας ηλιακού δυναμικού, το ίδιο και ο συντελεστής δυναμικότητας **CF** με τιμή αιχμής 21,61% τον Ιούλιο. Ωστόσο, ο συντελεστής απόδοσης του σταθμού είναι μειωμένος τους μήνες αυτούς, με την τιμή του να φτάνει από 12,85% τον Ιανουάριο, το 10,85% τον Ιούλιο. Ομοίως, ο λόγος **PR** (%) από 92,45% τον Ιανουάριο, να μειώνεται σε 78,07% τον Ιούλιο. Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν επαρκή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (84,32% για την περίοδο 2018 έως 2022). Ο συντελεστής απόδοσης, ο οποίος έχει μελετηθεί ανά μήνα, είναι χαμηλός για χαμηλά επίπεδα πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ($<0,1 \text{ kW/m}^2$), ενώ παρουσιάζει τάση μείωσης και για πολύ υψηλές τιμές ($>0,65 \text{ kW/m}^2$ τον χειμώνα και $>0,50 \text{ kW/m}^2$ το καλοκαίρι).

Διαπιστώθηκε επίσης ότι η ωραία παραγωγή σε κιλοβατώρες (kWh) είναι ανάλογη με την ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2 . Η σχέση προσεγγίστηκε με ευθεία που πέρνα από το (0,0), η κλίση της οποίας δίνει, διαιρούμενη με τη συνολική επιφάνεια της ακτινοβολίας, τον ωριαίο βαθμό απόδοσης η του σταθμού, σαφώς μικρότερη το καλοκαίρι.

Ακόμη, η θερμοκρασία πλαισίου είναι ανάλογη με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, όμως η ίδια ισχύς ακτινοβολίας θερμαίνει περισσότερο τα ηλιακά πλαίσια το καλοκαίρι από ό,τι τον χειμώνα λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας περιβάλλοντος τους αντίστοιχους μήνες.

Ο συντελεστής απόδοσης παρατηρείται μειωμένος για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας $<100 \text{ W/m}^2$, στη συνέχεια αυξάνεται και παίρνει τις μέγιστες τιμές του στο εύρος $100\text{-}650 \text{ W/m}^2$, ενώ παρουσιάζει τάση μείωσης τον χειμώνα για υψηλότερες τιμές. Το καλοκαίρι η αντίστοιχη τάση μείωσης είναι εντονότερη και μετατοπίζεται στα 500 W/m^2 . Μέγιστες αποδόσεις παρατηρούνται στο εύρος $200\text{-}400 \text{ W/m}^2$.

Τα διαγράμματα του συντελεστή απόδοσης, συναρτήσει της θερμοκρασίας πλαισίου υποδεικνύουν τη μείωση αυτού για θερμοκρασίες πλαισίου μεγαλύτερες των $25 \text{ }^\circ\text{C}$, με ρυθμό

κοντά στον θερμοκρασιακό συντελεστή δοσμένο από τον κατασκευαστή τους. Αυτό, δεδομένης της διασύνδεσης του σταθμού στο δίκτυο από το 2011, σημαίνει την επαρκή λειτουργία αυτού χωρίς υπέρμετρες θερμικές απώλειες και χωρίς ενδείξεις βλάβης ή έντονης γήρανσης. Η επίδραση της θερμοκρασίας πλαισίου και της ηλιοφάνειας στην απόδοση του σταθμού αποτυπώνεται καλύτερα στα τρισδιάστατα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν μέσω του προγράμματος Rinearn Graph 3D.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι τιμές του συντελεστή απόδοσης είναι υψηλότερες από τις λογικές και αναμενόμενες σύμφωνα με τη θεωρητική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτό οφείλεται σε σφάλματα των αισθητήρων στο έργο, κατά τις εκτιμήσεις της ανάλυσης και σε απλοποιήσεις – παραδοχές, καθώς και δυσλειτουργίες του συστήματος, κυρίως αντιστροφών και καταγραφής δεδομένων.

Τα ευρήματα αυτής της μελέτης παρέχουν μια βάση για περαιτέρω έρευνα σε αυτό το πεδίο. Μελλοντική μελέτη για τον σταθμό μπορεί να διευρύνει το πεδίο ανάλυσης ενσωματώνοντας περισσότερους παράγοντες όπως η ταχύτητα ανέμου, η σκίαση, η καθαριότητα και η συντήρηση των Φ/Β πλαισίων και να εξερευνήσουν την επίδρασή τους στην απόδοση του συστήματος. Ακόμη, θα μπορούσε να διευρυνθεί η περίοδος μελέτης για την πιο αντιπροσωπευτική ανάλυση της γήρανσης του συστήματος και την ποσοτικοποίηση αυτής. Επιπλέον, τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, μαζί με άλλων παρόμοιων ερευνών, μπορούν να αποτελέσουν βάση για την ανάπτυξη αλγορίθμων και μοντέλων για την πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης Φ/Β συστημάτων με ίδια χαρακτηριστικά. Συνολικά, αυτή η μελέτη συμβάλλει στον αυξανόμενο όγκο καταγεγραμμένου τρόπου λειτουργίας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και επιτρέπει τη μελλοντική επί του πρακτέου σύγκριση νέων εφαρμοσμένων τεχνολογιών με τις υφιστάμενες του 2011. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία δυνητικά μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την αξιολόγηση λειτουργίας νέου εξοπλισμού ή τον προσδιορισμό των βέλτιστων κάθε φορά καινοτόμων υλικών και τεχνολογιών. Ομοίως, να συντελέσει εν δυνάμει, κατ' επέκταση και ευρύτερα, στη βιωσιμότητα των ήδη πολλά υποσχόμενων συστημάτων ηλιακής ενέργειας, τα οποία στοχεύουν στη μείωση εκπομπών CO₂ που παράγονται από την καύση υδρογονανθράκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αλεξοπούλου, Α. “Μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας και υπολογισμός παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πλαίσια.” *ΑΠΘ*, ΙΚΕΕ, AUTH Library of Scientific Publications, 2010, <http://ikee.lib.auth.gr/record/122800/files/telika.pdf>.
- “Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Με Μπαταρίες Και Μελέτες Εφαρμογής Με Πραγματικά Προϊόντα Της Αγοράς.” *Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής*, Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυνόη, Οκτ. 2021, https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/1666/ele_46851.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Γιαννούσης, Κ. “Ενεργειακή Αποτίμηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου Ισχύος 500 kWp.” *ΑΠΘ*, ΙΚΕΕ Library, 2013, <http://ikee.lib.auth.gr/record/291588/files/Thesis.pdf>.
- Γκαράκης, Κ. “Αποτίμηση Της Επταετούς Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Σταθμού Ισχύος 19,8 kWp Στη Ροδόπη.” *Τμήμα Msc Μηχανολόγων Μηχανικών, ΠΑΔΑ*, 2023 Κατασκευές Κτιρίων, 10 Σεπτ. 2018, <https://kataskevesktirion.gr/>.
- Δαμιανίδης, Μ., Κατσαρός, Γ., Τόλης και Μ., Στεργιόπουλος, Φ. “Οδηγός Μελέτης Και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων.” *Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας*, ΤΕΕ ΤΚΜ, Απρ. 2011, https://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf.
- “Δίοδοι Και Φωτοβολταϊκά: Εισαγωγή.” *Ηλεκτρονικών ΑΣΠΑΙΤΕ*, Weebly, <https://hlektwnikwnaspaitε.weebly.com/epsiloniotasigmaalphagammaomegagamma942.html>.
- Καββαδίας, Ν. 795/12, TUV Austria Hellas, Αθήνα, 2012, *Έκθεση Επιθεώρησης Φ/Β Συστήματος*.
- Καζάς, Γ. “Συνδυασμένη Χρήση Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος Και Διατάξεων Σταθεροποιημένης Ροής Για Άντληση Νερού Σε Απομακρυσμένες Περιοχές.” *Πανεπιστήμιο Αιγαίου*, Ιδρυματικό Αποθετήριο HELLANICUS, Οκτ. 2020, <https://hellanicus.lib.aegean.gr/bitstream/handle/>.
- Καλλιμάνης, Δ. “Σύγκριση Μετρήσεων Της Ροής Της Ηλιακής Ακτινοβολίας Με Εκτιμώμενες Τιμές Από Την Παραγόμενη Ηλεκτρική Ισχύ Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας.” *IKEE Library, ΑΠΘ, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας*, 12 Δεκ. 2013, <http://ikee.lib.auth.gr/record/133534/files/>.
- Καμπούρης, Κ. “Τεχνοοικονομική Μελέτη Φωτοβολταϊκού Πάρκου 99.84 kWp.” *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, CORE Research Papers, Ιουν. 2016, <https://core.ac.uk/download/pdf/81560778.pdf>.
- Κόλλιας, Μ. “Θερμομηχανική Ανάλυση Φωτοβολταϊκών Πάνελ Και Μελέτη Του Βαθμού Απόδοσης Τους Βάσει Διαφορετικών Καιρικών Συνθηκών.” *Πολυτεχνείο Κρήτης*, <https://dias.library.tuc.gr/view/69668?locale=el>.

- Μαλτέζος, Φ. “Αποτίμηση Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Σταθμών.” *Itia Ntua, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Οκτ. 2013, https://www.itia.ntua.gr/el/getfile/1422/1/documents/Diplomatiki_Full_Maltezos.pdf.
- Μαμάσης, Ν, Ευστρατιάδης, Α. “Βασικές Αρχές Ενεργειακής Τεχνολογίας.” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα, 2018, http://users.ntua.gr/dkoutsoag/courses/ape/slides/APE2019_Intro.pdf.
- Μαυροματάκης, Φ. “Ηλιακό Και Φωτοβολταϊκό Δυναμικό.” *Ψηφιακή Βιβλιοθήκη, ΤΕΙ Κρήτης, Πανεπιστήμιο Κρήτης*, Πρόγραμμα “Εκπαίδευση Και Διά Βίου Μάθηση,” 2014, http://repository.edulll.gr/edulll/bitstream/10795/2421/2/2421_1_1_Ενότητα_Σημειώσεις.pdf.
- Παναγιώτου, Γ. “Τεχνικοοικονομική μελέτη διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Πάρκου 100 kWp”. *Πολυτεχνείο Κρήτης*, Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης, 2010. <http://artemis.library.tuc.gr/DT2010-0079/DT2010-0079.pdf>.
- Τσόγκας, Α. “Τεχνοοικονομική Μελέτη Φωτοβολταϊκού Πάρκου 100 kWp.” *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*, IKEE, AUTH Library of Scientific Publications, Μαρ. 2009, <http://ikee.lib.auth.gr/record/291387/files/diplomatikh.pdf>.
- Φυσέας, Α. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα Και Μελέτη Απόδοσής Τους Για Την Πόλη Της Θεσσαλονίκης.” *ΑΠΘ*, IKEE, AUTH Library of Scientific Publications, 2018, <http://ikee.lib.auth.gr/record/300358/>.
- “Φωτοβολταϊκά Πάνελ - Τεχνικά Χαρακτηριστικά - Datasheets.” *Smart Cover*, CactusWeb, 20 Ιαν. 2022, <https://www.smart-cover.gr/fotovoltaika-panel-technika-charaktiristika-datasheets/>.
- Alves dos Santos, S., Torres, J., Fernandes C., Lameirinhas, M. “The Impact of Aging of Solar Cells on the Performance of Photovoltaic Panels.” *Energy Conversion and Management: X, Instituto Superior Técnico, Instituto de Telecomunicações, Academia Militar Portuguesa*, vol. 10, 15 Apr. 2021.
- Anzalchi, A. and Sarwat, A. “Overview of Technical Specifications for Grid-Connected Photovoltaic Systems.” *Energy Conversion and Management, Department of Electrical and Computer Engineering, Florida International University*, vol. 152, 4 Oct. 2017, pp. 312–327.
- Atsu, D., Seres I., Aghaei M., Farkas I. “Analysis of Long-Term Performance and Reliability of PV Modules under Tropical Climatic Conditions in Sub-Saharan.” *Renewable Energy, Szent István University, Eindhoven University of Technology, Koforidua Technical University*, vol. 162, 14 Aug. 2020, pp. 285–295.
- “Best Research-Cell Efficiency Chart.” *NREL.Gov*, www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html.

- Bureau of Reclamation. “Facility-Scale Solar Photovoltaic Guidebook.” NREL, National Renewable Energy Laboratory, Sept. 2016, <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/67122.pdf>.
- Chimtavee, A., Ketjoy N., Sriprapha, K., Vaivudh, S. “Evaluation of PV Generator Performance and Energy Supplied Fraction of the 120 kWp PV Microgrid System in Thailand.” *Energy Procedia, Naresuan University, National Science and Technology Development Agency, Science Park*, vol. 9, 7 Nov. 2011, pp. 117–127.
- Daher, D., Gaillard, L., and Ménézo, C. “Experimental Assessment of Long-Term Performance Degradation for a PV Power Plant Operating in a Desert Maritime Climate.” *Renewable Energy, Laboratoire des Energies Nouvelles et Renouvelables, Université Savoie Mont Blanc, Heliocity SAS*, vol. 187, 22 Jan. 2022, pp. 44–55.
- “Electricity Fundamentals: Voltage Drop Explained.” *The Electricity Forum*, The Electricity Forum 2023, <https://www.electricityforum.com/voltage-drop>.
- Grunow, P., Lust, S., Sauter, D., Hoffman, V., Beneking, C., Litzemberger, B., and Podlowski, L., 2004. “Weak light performance and annual yields of PV modules and systems as a result of the basic parameter set of industrial solar cells.” 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7–11 June 2004, Paris, France.
- Gupta, D., Langelaar, M., Barink, M., van Keulen, F. “Optimizing Front Metallization Patterns: Efficiency with Aesthetics in Free-Form Solar Cells.” *Renewable Energy, Delft University of Technology, TNO Eindhoven*, vol. 86, 4 Nov. 2015, pp. 1332–1339.
- “How Solar Panels Work.” *Union of Concerned Scientists*, Union of Concerned Scientists, 18 Dec. 2015, <https://www.ucsusa.org/resources/how-solar-panels-work>.
- Huld, T., Amillo, G., 2015. Estimating PV module performance over large geographical regions: the role of irradiance, air temperature. *Wind Speed Sol. Spectrum. Energies* 8 (6), 5159–5181.
- Jathar K., Laxmikant D., Ganesan, S., Nikam, K., and Tirth, V. “Comprehensive Review of Environmental Factors Influencing the Performance of Photovoltaic Panels: Concern over Emissions at Various Phases throughout the Lifecycle.” *Environmental Pollution, Department of Mechanical Engineering, Army Institute of Technology Pune, University of Technology Sydney*, vol. 326, 23 Mar. 2023.
- Kiefer, K., Farnung, B., and Müller, B. “Degradation in PV Power Plants: Theory and Practice.” Fraunhofer ISE, 2018. Research Gate, https://www.researchgate.net/publication/336809878_Degradation_in_PV_Power_Plants_Theory_and_Practice.
- Kymakis, E., Kalykakis, S., Papazoglou, T. “Performance Analysis of a Grid Connected Photovoltaic Park on the Island of Crete.” *Energy Conversion and Management, Technological Educational Institute (TEI) of Crete*, vol. 50, 9 Jan. 2009, pp. 433–438.

- Louwen, A., de Waal, A., Schropp, R., Faaij, C., and van Sark, W. “Comprehensive Characterisation and Analysis of PVmodule Performance under Real Operating Conditions.” *Progress In Photovoltaics, Utrecht University, Eindhoven University of Technology, University of Groningen*, vol. 25, 2017, pp. 218–232.
- Mavromatakis, F., Vignola, F., and Marion, Bill. “Low Irradiance Losses of Photovoltaic Modules.” *Solar Energy, National Renewable Energy Lab. (NREL), Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE)*, vol. 157, 9 Jan. 2017, pp. 496–506.
- McManus, B. *The Mystery Flaw of Solar Panels. Real Engineering*, Youtube, 26 Sept. 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=yVOnHWnLSeU&t=24s>.
- Niclas. “Standard Test Conditions (STC): Definition and Problems.” *SinoVoltaics*, Sinovoltaics Group Limited, 29 Mar. 2023, <https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>.
- “Photovoltaics Report.” *Fraunhofer ISE*, 21 Feb. 2023, www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf.
- Plaschkes, K. *Solar Panels By Pass Diodes. YedaCenter*, Youtube, 9 May 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=9hRLtmHL-08>.
- Rahman, M.M., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A. “Effects of Various Parameters on PV-Module Power and Efficiency.” *Energy Conversion and Management, UMPEDAC, Renewable Energy Research Group*, vol. 103, 4 July 2015, pp. 348–358.
- REC Group, *REC PEAK ENERGY SERIES Technical Specifications*, 2011.
- Santos, B. “NREL Updates Interactive Chart of Solar Cell Efficiency.” *Pv Magazine International*, Pv Magazine 2023, 21 Nov. 2022, <https://www.pv-magazine.com/2022/11/21/nrel-updates-interactive-chart-of-solar-cell-efficiency/>.
- Santos, O. “How to Quantify PV Plant Performance.” *LinkedIn*, LinkedIn Corporation 2023, 23 Nov. 2018, <https://www.linkedin.com/pulse/how-quantify-pv-plant-performance-osvaldo-santos/>.
- SMA Hellas. SMA Hellas Solar Technology AG, 2011, p. 2, *Τεχνικά Χαρακτηριστικά Sunny Tripower 10000TL/12000TL/15000TL/17000TL*.
- “Solar Capacity Factor: Why It Is Important?” SolarSena, 31 July 2022, solarsena.com/solar-capacity-factor-states-power/.
- “Sunnyportal.” SMA, 2023 SMA Solar Technology AG, <https://www.sunnyportal.com/Templates/Start.aspx?ReturnUrl=%2f>.

Suri, M. Solargis, 2016, *Energy Yield Assessment of the Photovoltaic Power Plant*, <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west1.amazonaws.com/public/sample/48a9f2ada0/Solargis-PVrep-200-01-2013-DEMO-v0b.pdf>.

Vasisht, S., Srinivasan, J and Ramasesha, S. “Performance of Solar Photovoltaic Installations: Effect of Seasonal Variations.” *Solar Energy, Indian Institute of Science*, vol. 131, 1 Mar. 2016, pp. 39–46.