



Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

**Μοντελοποίηση και Πρόβλεψη Απόδοσης
Φωτοβολταϊκού Συστήματος με χρήση
Τεχνολογίας Ψηφιακών Διδύμων**

Χρήστος Παυλόπουλος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Σταυρουλάκης Γεώργιος

Αναπλ. Καθηγητής Γυφτάκης Κωνσταντίνος

Χανιά, Φεβρουάριος 2025

Περίληψη

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αναδεικνύεται ως η πιο διαδεδομένη από τις μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και τα φωτοβολταϊκά συστήματα αναμένεται να γίνουν η κυριότερη μορφή παραγωγής σε χώρες με υψηλό ηλιακό δυναμικό, όπως η Ελλάδα. Η απλότητα αυτών των συστημάτων οφείλεται κυρίως στην εύκολη πρόβλεψη των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη διάρκεια του έτους, στην υψηλή αξιοπιστία και στις ελάχιστες ανάγκες συντήρησης του εξοπλισμού. Αυτή η απλότητα αποτελεί και την πηγή έμπνευσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χρησιμοποιώντας την αναδυόμενη τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, δηλαδή τη δημιουργία ενός ψηφιακού κλώνου για την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός πραγματικού συστήματος, σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός απλού, εύκολα προσαρμόσιμου μοντέλου, το οποίο θα μπορεί να γίνει πηγή έμπνευσης για άλλα μοντέλα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η ανάλυση των δεδομένων παραγωγής και καιρικών συνθηκών από ένα λειτουργικό φωτοβολταϊκό πάρκο, η διαδικασία εκπαίδευσης του Αυτοπαλινδρομικού Μοντέλου Κινούμενου Μέσου Όρου με Εξωγενείς Μεταβλητές (ARMAX) σε πραγματικά δεδομένα του πάρκου, χρησιμοποιώντας μεθόδους μηχανικής μάθησης, όπως τα δέντρα αποφάσεων (decision trees), και η προσομοίωσή του στο περιβάλλον MATLAB. Ακολουθεί μια λεπτομερής σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου για δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η ανάλυση περιλαμβάνει τόσο δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του μοντέλου όσο και δεδομένα που δεν έχουν εισαχθεί σε αυτό. Οι προβλέψεις συγκρίνονται με πραγματικές μετρήσεις, με στόχο την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας του μοντέλου. Τέλος, παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον που αναπτύχθηκε για την παρουσίαση του μοντέλου και αναφέρονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις και χρήσεις του μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά:

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ηλιακή Ενέργεια, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Ψηφιακά Δίδυμα, ARMAX Μοντέλο, Μοντελοποίηση, Πρόβλεψη Παραγωγής

Abstract

Solar energy is emerging as the simplest of the forms of Renewable Energy Sources (RES) and photovoltaic (PV) systems are expected to become the main form of production in countries with abundant solar irradiation potential, such as Greece. The simplicity of these systems is due to the easy prediction of environmental conditions during the year, high reliability, and minimal maintenance needs of the equipment. This simplicity is the source of inspiration for this thesis. Using the emerging technology of digital twins, i.e., the creation of a digital clone to monitor and control a real system, the focus of the thesis is to create a simple, easily adaptable model that can serve as base for other models. This paper shows the analysis of electricity generation and weather data from an operating photovoltaic park, the process of training the Autoregressive Moving Average Model with Exogenous Variables (ARMAX) using machine learning methods such as decision trees, and its simulation in the MATLAB environment. A detailed comparison of the model predictions is presented for data from different time periods. The analysis includes both data used for training the model and data not previously introduced to it. The predictions are compared with actual measurements to evaluate the model accuracy and effectiveness. Finally, the graphical interface developed to present the model is presented and future extensions and usage of the model are discussed.

Keywords:

Renewable Energy Sources, Solar Energy, Photovoltaic Systems, Digital Twins, ARMAX Model, Modelling, Production Estimation

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το επιστέγασμα μιας εκτενούς μελέτης και συστηματικής προσπάθειας κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Η ενασχόλησή μου με τις ΑΠΕ πηγάζει από την αναγκαία και επιτακτική στροφή προς καθαρές, πράσινες μορφές ενέργειας, μια πρόκληση που απασχολεί τον σύγχρονο κόσμο και αφορά τις μελλοντικές γενιές. Η βιώσιμη ανάπτυξη αποτελεί έναν καθοριστικό στόχο για το μέλλον της ανθρωπότητας.

Επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Ευτύχιο Κουτρούλη για την υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και για τη συνεχιζόμενη επικοινωνία. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη από τη Σχολή ΜΠΔ για την έμπνευση του θέματος και τη συνολική συνεισφορά του στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Γυφτάκη για την πολύτιμη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αδιάλειπτη και αμέριστη στήριξή τους. Μέσα στις πολλές δυσκολίες που όλοι αντιμετωπίζουμε, με βοήθησαν και μου εξασφάλισαν την δυνατότητα να επικεντρωθώ στις σπουδές μου. Τέλος, να ευχαριστήσω και τους φίλους μου για την ενθάρρυνση, τη συμπαράσταση και την κατανόηση που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| Κατάλογος Εικόνων | 7 |
| Κατάλογος Πινάκων | 7 |
| Κατάλογος Σχημάτων..... | 7 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 9 |
| 1.1 Γενικά | 9 |
| 1.2 Σύνοψη Κεφαλαίων | 10 |
| 1.3 Κατηγορίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας..... | 11 |
| 1.3.1 Αιολική Ενέργεια | 11 |
| 1.3.2 Ηλιακή Ενέργεια | 11 |
| 1.3.3 Υδροηλεκτρική Ενέργεια | 12 |
| 1.3.4 Γεωθερμική Ενέργεια..... | 13 |
| 1.3.5 Βιομάζα / Βιοενέργεια | 13 |
| 1.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα..... | 14 |
| 1.4.1 Πλεονεκτήματα | 14 |
| 1.4.2 Μειονεκτήματα | 14 |
| 1.5 Βιώσιμη ανάπτυξη στην Ευρώπη και στην Ελλάδα | 15 |
| 1.5.1 Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ στην Ευρώπη | 15 |
| 1.5.2 Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα | 17 |
| 2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 19 |
| 2.1 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο | 19 |
| 2.2 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο | 20 |
| 2.3 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο..... | 21 |
| 2.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Συστημάτων | 22 |
| 2.4.1 Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V, P-V..... | 22 |
| 2.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα και ρεύμα εξόδου | 23 |
| 2.4.3 Απόδοση και ισχύς αιχμής πλαισίου | 25 |
| 2.5 Απώλειες Φωτοβολταϊκών συστημάτων | 26 |
| 2.6 Μελλοντικές Τάσεις στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα | 28 |
| 3. ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ..... | 32 |
| 3.1 Εισαγωγή στην Τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων | 32 |
| 3.2 Τύποι Ψηφιακών Διδύμων..... | 32 |
| 3.3 Εφαρμογές και Περιορισμοί | 34 |
| 3.3.1 Στον τομέα των κατασκευών και του αστικού σχεδιασμού | 34 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.2 | Στον υγειονομικό τομέα | 35 |
| 3.3.3 | Στον βιομηχανικό τομέα | 35 |
| 3.3.4 | Στον τομέα μεταφορών | 36 |
| 3.4 | Εφαρμογές σε Ενεργειακά Συστήματα | 36 |
| 3.4.1 | Στην αιολική ενέργεια | 37 |
| 3.4.2 | Στην ηλιακή ενέργεια | 37 |
| 3.4.3 | Στη συμβατική παραγωγή ενέργειας | 38 |
| 4. | Ανάλυση και Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου..... | 39 |
| 4.1 | Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Πάρκου | 39 |
| 4.1.1 | Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά | 39 |
| 4.1.2 | Τεχνικά Χαρακτηριστικά | 40 |
| 4.2 | Επεξεργασία Δεδομένων και Θεωρητική Ανάλυση | 41 |
| 4.3 | ARMAX Μοντέλο..... | 45 |
| 4.3.1 | Θεωρητική περιγραφή..... | 45 |
| 4.3.2 | Εφαρμογή και Ρύθμιση | 47 |
| 4.4 | Αντιμετώπιση Αποκλίσεων και Βελτίωση Ακρίβειας | 50 |
| 5. | Προσομοίωση και Αποτελέσματα..... | 52 |
| 5.1 | Εκπαίδευση του Μοντέλου με Ιστορικά Δεδομένα | 52 |
| 5.2 | Προσομοίωση με Γνωστά Δεδομένα..... | 55 |
| 5.3 | Προσομοίωση με Άγνωστα Δεδομένα | 65 |
| 5.3.1 | Έτος 2020..... | 65 |
| 5.3.2 | Έτος 2021 | 75 |
| 5.4 | Ανάλυση Αποτελεσμάτων | 83 |
| 6. | Συζήτηση και Συμπεράσματα..... | 96 |
| 6.1 | Συμπεράσματα | 96 |
| 6.2 | Προοπτικές | 96 |
| 6.3 | Επεκτάσεις | 97 |
| 7. | Βιβλιογραφία | 98 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 1: ΜΕΙΓΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ Ε.Ε. (1990-2023) [2]. | 16 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2: ΜΕΙΓΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ (2014-2023) [3]. | 18 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ. | 19 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ. | 20 |
| ΕΙΚΟΝΑ 5: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ. | 21 |
| ΕΙΚΟΝΑ 6: ΑΓΡΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΜΕ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ ΓΙΑ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ. | 29 |
| ΕΙΚΟΝΑ 7: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΘΕΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ. | 30 |
| ΕΙΚΟΝΑ 8: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΛΩΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ. | 31 |
| ΕΙΚΟΝΑ 9: ΟΙ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΚΥΡΙΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ. | 34 |
| ΕΙΚΟΝΑ 10: ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ LACS MEDOCAINS ΣΤΗ ΓΑΛΛΙΑ. | 39 |
| ΕΙΚΟΝΑ 11: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΑΡΚΟ BOURG D'HOURTIN. | 40 |
| ΕΙΚΟΝΑ 12: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ. | 41 |
| ΕΙΚΟΝΑ 13: ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 49 |
| ΕΙΚΟΝΑ 14: ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΤΟΥΣ 2023. | 58 |
| ΕΙΚΟΝΑ 15: ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΤΟΥΣ 2020. | 68 |
| ΕΙΚΟΝΑ 16: ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΤΟΥΣ 2021. | 77 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ. | 40 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ 2023. | 64 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ 2020. | 74 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ 2021. | 82 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΑ ΕΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ. | 94 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| ΣΧΗΜΑ 2.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ – ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ. | 22 |
| ΣΧΗΜΑ 2.2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ – ΙΣΧΥΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ. | 23 |
| ΣΧΗΜΑ 2.3. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ. | 23 |
| ΣΧΗΜΑ 4.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – 2022. | 44 |
| ΣΧΗΜΑ 4.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – 2023. | 44 |
| ΣΧΗΜΑ 5.1. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ARMAX. | 54 |
| ΣΧΗΜΑ 5.2. ΔΕΠΤΟΜΕΡΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 54 |
| ΣΧΗΜΑ 5.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – 2023. | 56 |
| ΣΧΗΜΑ 5.4. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – 2023. | 57 |
| ΣΧΗΜΑ 5.5. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 1 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2023. | 59 |
| ΣΧΗΜΑ 5.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 2 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2023. | 60 |
| ΣΧΗΜΑ 5.7. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 3 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2023. | 61 |
| ΣΧΗΜΑ 5.8. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 4 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2023. | 63 |
| ΣΧΗΜΑ 5.9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – 2020. | 66 |
| ΣΧΗΜΑ 5.10. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – 2020. | 67 |
| ΣΧΗΜΑ 5.11. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 1 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2020. | 69 |
| ΣΧΗΜΑ 5.12. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 2 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2020. | 70 |
| ΣΧΗΜΑ 5.13. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 3 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2020. | 71 |
| ΣΧΗΜΑ 5.14. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 4 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2020. | 73 |
| ΣΧΗΜΑ 5.15. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – 2021. | 76 |
| ΣΧΗΜΑ 5.16. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – 2021. | 76 |
| ΣΧΗΜΑ 5.17. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 1 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2021. | 78 |
| ΣΧΗΜΑ 5.18. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 2 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2021. | 79 |
| ΣΧΗΜΑ 5.19. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 3 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2021. | 80 |

| | |
|---|----|
| ΣΧΗΜΑ 5.20. ΠΡΟΒΛΕΨΗ 4 ^{ΟΥ} ΤΡΙΜΗΝΟΥ 2021..... | 81 |
| ΣΧΗΜΑ 5.21. ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2020..... | 84 |
| ΣΧΗΜΑ 5.22. ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021..... | 84 |
| ΣΧΗΜΑ 5.23. ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2023..... | 84 |
| ΣΧΗΜΑ 5.24. ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2020..... | 84 |
| ΣΧΗΜΑ 5.25. ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2021..... | 85 |
| ΣΧΗΜΑ 5.26. ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2023..... | 85 |
| ΣΧΗΜΑ 5.27. ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2020..... | 86 |
| ΣΧΗΜΑ 5.28. ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – ΙΟΥΛΙΟΣ 2021..... | 86 |
| ΣΧΗΜΑ 5.29. ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2021..... | 86 |
| ΣΧΗΜΑ 5.30. ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – ΙΟΥΛΙΟΣ 2023..... | 86 |
| ΣΧΗΜΑ 5.31. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΙΟΥΝΙΟΣ 2020..... | 87 |
| ΣΧΗΜΑ 5.32. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ – ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020..... | 87 |
| ΣΧΗΜΑ 5.33. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΜΑΡΤΙΟΣ 2021..... | 87 |
| ΣΧΗΜΑ 5.34. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ – ΜΑΡΤΙΟΣ 2023..... | 87 |
| ΣΧΗΜΑ 5.35. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2023..... | 87 |
| ΣΧΗΜΑ 5.36. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ – ΜΑΙΟΣ 2021..... | 88 |
| ΣΧΗΜΑ 5.37. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2021..... | 88 |
| ΣΧΗΜΑ 5.38. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ – ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2023..... | 88 |
| ΣΧΗΜΑ 5.39. ΚΑΛΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΉΠΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023..... | 88 |
| ΣΧΗΜΑ 5.40. ΚΑΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΙΟΥΝΙΟΣ 2021..... | 89 |
| ΣΧΗΜΑ 5.41. ΚΑΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΜΑΙΟΣ 2023..... | 89 |
| ΣΧΗΜΑ 5.42. ΚΑΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2023..... | 89 |
| ΣΧΗΜΑ 5.43. ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ - ΜΑΙΟΣ 2020..... | 90 |
| ΣΧΗΜΑ 5.44. ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ - ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2021..... | 90 |
| ΣΧΗΜΑ 5.45. ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ - ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023..... | 90 |
| ΣΧΗΜΑ 5.46. ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΜΕΤΡΙΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ – ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020..... | 90 |
| ΣΧΗΜΑ 5.47. ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - ΜΕΤΡΙΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ - ΙΟΥΝΙΟΣ 2023..... | 91 |
| ΣΧΗΜΑ 5.48. ΚΥΜΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΜΕΤΡΙΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ – ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023..... | 91 |
| ΣΧΗΜΑ 5.49. ΚΥΜΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - ΑΡΚΕΤΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ - ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020..... | 91 |
| ΣΧΗΜΑ 5.50. ΚΥΜΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ - ΑΡΚΕΤΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ - ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021..... | 91 |
| ΣΧΗΜΑ 5.51. ΣΥΝΤΗΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΜΑΡΤΙΟΣ 2020..... | 92 |
| ΣΧΗΜΑ 5.52. ΣΥΝΤΗΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ - ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021..... | 92 |
| ΣΧΗΜΑ 5.53. ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020..... | 92 |
| ΣΧΗΜΑ 5.54. ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2023..... | 93 |
| ΣΧΗΜΑ 5.55. ΟΛΟ ΤΟ ΠΑΡΚΟ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021..... | 93 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Οι ΑΠΕ αποτελούν τον πυρήνα της σύγχρονης παγκόσμιας προσπάθειας για τον περιορισμό και τη διαχείριση της κλιματικής αλλαγής και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Από την αρχαιότητα, ο άνθρωπος αξιοποιούσε την ενέργεια από φυσικές πηγές, όπως τον ήλιο, για την κάλυψη των καθημερινών του αναγκών. Ωστόσο, η βιομηχανική επανάσταση και η εκτεταμένη χρήση ορυκτών καυσίμων έθεσαν τη βιωσιμότητα του πλανήτη σε κίνδυνο, οδηγώντας σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και σε ανάγκη επαναπροσδιορισμού της ενεργειακής στρατηγικής.

Η κλιματική κρίση, με την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, την απώλεια βιοποικιλότητας και την εντατικοποίηση ακραίων καιρικών φαινομένων, υπογραμμίζει την αναγκαιότητα για άμεση δράση. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ δεν περιορίζεται μόνο στην προστασία του περιβάλλοντος. Αποτελεί, επίσης, μοχλό ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας, μέσω της μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα, καθώς και της οικονομικής ανάπτυξης, μέσω της δημιουργίας θέσεων εργασίας.

Η ηλιακή ενέργεια, σε χώρες όπως η Ελλάδα, μπορεί να πρωταγωνιστήσει στην ενεργειακή μετάβαση. Το μεγάλο ηλιακό δυναμικό της χώρας, σε συνδυασμό με το συνεχώς μειωμένο κόστος του εξοπλισμού καθιστά την ηλιακή ενέργεια μία αρκετά διαδεδομένη λύση. Ωστόσο, η περιοδικά μεταβαλλόμενη παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα, με τις σημαντικές αλλά αναμενόμενες διακυμάνσεις μέσα στη διάρκεια της ημέρας και του έτους δημιουργούν προκλήσεις. Συστήματα αποθήκευσης και προνόμια στη βιομηχανία και τους καταναλωτές για μεγαλύτερη κατανάλωση κατά τις περιόδους περίσσειας παραγωγής είναι κάποιοι από τους τρόπους αντιμετώπισης αυτών των προκλήσεων.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται ένα μεγάλο φωτοβολταϊκό σύστημα και δημιουργείται ένας εύκολος στην χρήση κλώνος του μέσω της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων. Μέσω της μελέτης του φωτοβολταϊκού πάρκου κατά τις διάφορες καιρικές συνθήκες, δημιουργούνται συμπεράσματα για την συμπεριφορά και την αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Με την διαφαινόμενη καλή απόδοση του μοντέλου, τα ψηφιακά δίδυμα δείχνουν πως μπορούν να αξιοποιηθούν ως ένα χρήσιμο εργαλείο στην ενίσχυση των ηλεκτρικών δικτύων, με σωστή και μακροχρόνια πρόβλεψη της παραγωγής, ευκολία στη χρήση και μεγάλες δυνατότητες εξέλιξης και εξατομίκευσης σε κάθε δοσμένο πρόβλημα.

1.2 Σύνοψη Κεφαλαίων

Η δομή αυτής της εργασίας είναι η ακόλουθη:

- Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές κατηγορίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Περιλαμβάνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή για κάθε μορφή, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας τους, καθώς και η συνεισφορά τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, εξετάζεται η ενεργειακή κατάσταση της Ελλάδας και της Ευρώπης, μαζί με τα σχέδια μετάβασης σε βιώσιμα μοντέλα παραγωγής.
- Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται τα κύρια στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, ενώ εξετάζονται οι μηχανισμοί απωλειών ενέργειας. Τέλος, γίνεται αναφορά στις μελλοντικές τάσεις στον σχεδιασμό και τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Στο 3^ο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια των ψηφιακών διδύμων. Παρουσιάζεται ο διαχωρισμός τους με βάση τις λειτουργίες τους και οι εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση τους στα ενεργειακά συστήματα.
- Στο 4^ο κεφάλαιο εξετάζεται το φωτοβολταϊκό πάρκο που αποτέλεσε τη βάση του μοντέλου. Παρουσιάζονται τα τεχνικά του χαρακτηριστικά και η μοντελοποίησή τους στο περιβάλλον MATLAB. Επιπλέον, αναλύεται ο τρόπος ερμηνείας του φωτοβολταϊκού φαινομένου και οι προσεγγίσεις για τη διαχείριση των απωλειών.
- Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Γίνεται συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου υπό διαφορετικά σενάρια, τόσο για γνωστά όσο και για άγνωστα δεδομένα. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα, με εστίαση σε ετήσια, μηνιαία, και επιμέρους μοτίβα ή τάσεις.
- Στο 6^ο κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα που απορρέουν από την παρούσα εργασία. Αξιολογούνται τα αποτελέσματα και προτείνονται ιδέες για μελλοντική αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων σε διαφορετικές εφαρμογές βασισμένες στη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας.

1.3 Κατηγορίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

1.3.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια του ανέμου μέσω ανεμογεννητριών, που εγκαθίστανται τόσο σε χερσαίες όσο και σε υπεράκτιες περιοχές. Η αξιοποίηση του ανέμου, αν και ξεκίνησε από την αρχαιότητα με ανεμόμυλους για άλεση και άντληση νερού, έχει εξελιχθεί σημαντικά με την ανάπτυξη των σύγχρονων αιολικών πάρκων, τα οποία συμβάλλουν στη μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις, όπως οι ψηλότεροι πύργοι, τα μεγαλύτερα πτερύγια και η αυξημένη ισχύς των ανεμογεννητριών, έχουν βελτιώσει αισθητά την αποδοτικότητα και την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων αυτών. Επιπλέον, οι καινοτομίες στη σχεδίαση και την κατασκευή των ανεμογεννητριών επιτρέπουν την εκμετάλλευση ακόμα και χαμηλότερων ταχυτήτων ανέμου, διευρύνοντας τη γεωγραφική εμβέλεια της τεχνολογίας αυτής.

Παρά τις φυσικές διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου από περιοχή σε περιοχή, το συνολικό αιολικό δυναμικό του πλανήτη παραμένει εξαιρετικά υψηλό. Εκτιμάται ότι η αιολική ενέργεια δύναται να καλύψει σημαντικό ποσοστό των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών, ενισχύοντας παράλληλα την ενεργειακή ανεξαρτησία και μειώνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

1.3.2 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια συνιστά την πιο άφθονη και προσβάσιμη πηγή ενέργειας στη Γη, καθιστώντας την έναν από τους βασικότερους πυλώνες της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πλαισίων, τα οποία μετατρέπουν την ακτινοβολία από τον ήλιο απευθείας σε ηλεκτρικό ρεύμα, και μέσω συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, που αξιοποιούν καθρέφτες ή φακούς για τη συσσώρευση της ηλιακής ενέργειας και τη μετατροπή της σε θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Πέρα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται και για εφαρμογές όπως η θέρμανση νερού, η ψύξη χώρων και ο φυσικός φωτισμός, ενώ οι ηλιακοί συλλέκτες θερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ευρέως σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Σε περιοχές με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, όπως αυτές κοντά στον ισημερινό ή σε

ερημικές ζώνες, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να καλύψει το μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών των τοπικών κοινοτήτων.

Η συνεχής τεχνολογική πρόοδος έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθιστώντας την ηλιακή ενέργεια μια από τις πιο οικονομικές λύσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, ο ταχύτερος ρυθμός αύξησης των εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων, που ξεπερνά αυτόν κάθε άλλης μορφής ανανεώσιμης ενέργειας, αναδεικνύει την ηλιακή ενέργεια ως πρωτοπόρο στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον [1].

1.3.3 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αξιοποιεί την κινητική και δυναμική ενέργεια του νερού που ρέει από υψηλότερα σε χαμηλότερα υψόμετρα, αποτελώντας μία από τις παλαιότερες και πιο αποδοτικές μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. Διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα συστήματα με ταμιευτήρες (reservoirs) και τα ποτάμια.

Στα συστήματα με ταμιευτήρες, το νερό αποθηκεύεται σε έναν φυσικό ή τεχνητό ταμιευτήρα, όπως μια λίμνη, και απελευθερώνεται ελεγχόμενα προς ένα χαμηλότερο επίπεδο μέσω αγωγών και τουρμπινών, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η αντλησιοταμίευση αποτελεί μια εξελιγμένη εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, όπου, σε περιόδους περίσσειας παραγωγής ενέργειας, το νερό αντλείται ξανά στον άνω ταμιευτήρα. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα λειτουργεί ως συσσωρευτής ηλεκτρισμού, εξισορροπώντας τη ζήτηση και την προσφορά στο δίκτυο.

Στα συστήματα που αξιοποιούν την άμεση ροή των ποταμών, η ενέργεια παράγεται από τη φυσική κίνηση του νερού, χωρίς την ανάγκη αποθήκευσης. Αυτή η μορφή υδροηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά εξαρτάται από την εποχική διακύμανση της ροής του νερού.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια κατέχει ηγετική θέση στην παγκόσμια παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, χάρη στην υψηλή της αποδοτικότητα και την ικανότητά της να παρέχει σταθερή ισχύ. Ωστόσο, η ανάπτυξή της απαιτεί ενδελεχή περιβαλλοντική μελέτη, καθώς η εγκατάσταση ταμιευτήρων μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στα οικοσυστήματα, να επηρεάσει αρνητικά τη βιοποικιλότητα, καθώς και να οδηγήσει σε κοινωνικές επιπτώσεις, όπως μετεγκαταστάσεις πληθυσμών.

1.3.4 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιεί τη θερμότητα που βρίσκεται στο υπέδαφος της Γης, η οποία προέρχεται από την αποσύνθεση ραδιενεργών υλικών και τη θερμική ενέργεια που μεταφέρεται από τον μανδύα προς την επιφάνεια. Μέσω γεωτρήσεων, αντλείται ατμός από γεωθερμικούς ταμιευτήρες, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή για θέρμανση.

Η ηλεκτροπαραγωγή πραγματοποιείται με τη χρήση του ατμού σε τουρμπίνες, ενώ η θερμότητα αξιοποιείται απευθείας για τη θέρμανση κτιρίων, θερμοκηπίων ή υδάτων σε ιχθυοκαλλιέργειες. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της γεωθερμικής ενέργειας είναι η σταθερότητα στην παραγωγή, ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες, γεγονός που την καθιστά αξιόπιστη σε σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες πηγές.

Επιπλέον, συνεισφέρει στη μείωση της χρήσης συμβατικών καυσίμων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αν και απαιτεί ενδελεχή γεωλογική μελέτη για την αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως η έκλυση αερίων ή μικροσεισμοί, η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών.

1.3.5 Βιομάζα / Βιοενέργεια

Η βιοενέργεια παράγεται από οργανικά υλικά, όπως ξύλο, γεωργικά απόβλητα, βιομάζα και άλλα οργανικά υπολείμματα. Αυτή η πηγή ενέργειας προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας ή ακόμα και βιοκαυσίμων. Η χρήση οργανικών αποβλήτων σε προηγμένα συστήματα ενέργειας, όπως τα βιολογικά καύσιμα ή η βιομάζα, παρέχει μια οικολογική λύση στη διαχείριση αποβλήτων και μειώνει την ανάγκη για χώρους υγειονομικής ταφής.

Αν και η καύση της βιομάζας προκαλεί εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αυτές παραμένουν σε σημαντικά χαμηλότερο επίπεδο σε σχέση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, η δυνατότητα ανακύκλωσης των οργανικών υλικών καθιστά τη βιοενέργεια μια πιο βιώσιμη επιλογή σε σύγκριση με τα μη ανανεώσιμα καύσιμα.

Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη ή υπερβολική χρήση της βιομάζας μπορεί να έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η αποψίλωση δασών, η μείωση της βιοποικιλότητας ή η υποβάθμιση του εδάφους. Για αυτό, είναι αναγκαία η ρύθμιση και η εφαρμογή ελεγχόμενων προτύπων για την παραγωγή και χρήση βιοενέργειας, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιωσιμότητά της και να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

1.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

1.4.1 Πλεονεκτήματα

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι η δυνατότητα που προσφέρουν στις χώρες να παράγουν σε σημαντικό ποσοστό ή και εξ ολοκλήρου την ενέργεια που χρειάζεται για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Με αυτόν τον τρόπο, ενισχύεται η ενεργειακή αυτονομία των κρατών, προσφέροντας τη δυνατότητα να διαμορφώσουν τις δικές τους ενεργειακές στρατηγικές, μειώνοντας την εξάρτησή τους από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα και εξωτερικούς ενεργειακούς παράγοντες. Η δυνατότητα αυτή περιορίζει την ευαισθησία τους σε γεωπολιτικές κρίσεις ή διαταραχές στις παγκόσμιες ενεργειακές αγορές, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν την ενεργειακή ασφάλεια και να προκαλέσουν αρνητικές συνέπειες στις οικονομίες των χωρών.

Επιπλέον, οι ΑΠΕ έχουν καταστεί η πιο οικονομική μορφή παραγωγής ενέργειας, με το κόστος παραγωγής να μειώνεται σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Αυτή η μείωση καθιστά τις ΑΠΕ πιο ανταγωνιστικές συγκριτικά με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στην ευρεία υιοθέτησή τους ως βιώσιμες ενεργειακές λύσεις. Η οικονομική τους αποδοτικότητα, σε συνδυασμό με την ανάγκη για συνεχώς βελτιούμενες τεχνολογίες, καθιστά τις ΑΠΕ καθοριστικό παράγοντα για τη μελλοντική ανάπτυξη του ενεργειακού τομέα.

Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη και εφαρμογή των ΑΠΕ δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας, καλύπτοντας ανάγκες στις τοπικές αγορές και συμβάλλοντας στη μείωση της ανεργίας, ιδίως σε μακροχρόνια βάση. Η κατασκευή και εγκατάσταση εξοπλισμού, η έρευνα και η καινοτομία για τη βελτίωση των τεχνολογιών, καθώς και η συνεχής εξέλιξη του τομέα της ηλεκτροκίνησης, δημιουργούν ένα δυναμικό περιβάλλον ανάπτυξης που έχει θετική επίδραση στην οικονομία.

1.4.2 Μειονεκτήματα

Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των ΑΠΕ είναι η διακοπτόμενη παραγωγή ενέργειας και η περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Ειδικότερα, πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική εξαρτώνται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες του τόπου εγκατάστασης τους, γεγονός που καθιστά την παραγωγή τους μη συνεχή. Η αβέβαιη παραγωγή ενέργειας επηρεάζει τη σταθερότητα του ενεργειακού δικτύου, καθώς οι διακυμάνσεις στην παραγωγή μπορεί να προκαλέσουν συμφόρηση και υπερφόρτωση του ηλεκτρικού δικτύου, με αποτέλεσμα την επιτακτική ανάγκη για αυξημένες περικοπές ενέργειας ή την απώλεια της περίσσειας ενέργειας, που παράγεται κατά τις ώρες υψηλής παραγωγής και χαμηλής ζήτησης.

Η λύση στο πρόβλημα αυτό απαιτεί την ανάπτυξη και εφαρμογή αποδοτικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία όμως παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ανεπαρκή, κυρίως λόγω της περιορισμένης τεχνολογικής προόδου και του σχετικά υψηλού κόστους.

Ένα επιπλέον σοβαρό μειονέκτημα των ΑΠΕ είναι οι επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον και στις τοπικές κοινωνίες. Ειδικότερα, ορισμένες μορφές ΑΠΕ ενδέχεται να προκαλέσουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, είτε κατά τη διάρκεια της κατασκευής και εγκατάστασης των υποδομών είτε κατά τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση αιολικών πάρκων ή μεγάλων υδροηλεκτρικών μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στο τοπικό οικοσύστημα, την απώλεια φυσικών χώρων ή ακόμα και τη ρύπανση του εδάφους και του νερού. Επιπλέον, πολλές φορές οι τοπικές κοινωνίες εναντιώνονται στις εγκαταστάσεις ΑΠΕ λόγω των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων ή της μεταβολής του τοπίου, δημιουργώντας έτσι προκλήσεις για την επιτυχή εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών. Η αντίσταση αυτή μπορεί να μειωθεί μόνο με τη συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και την παροχή αναγκαίων αντισταθμιστικών οφελών, όπως η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, η βελτίωση της τοπικής υποδομής ή άλλες κοινωνικές ή οικονομικές ενισχύσεις.

1.5 Βιώσιμη ανάπτυξη στην Ευρώπη και στην Ελλάδα

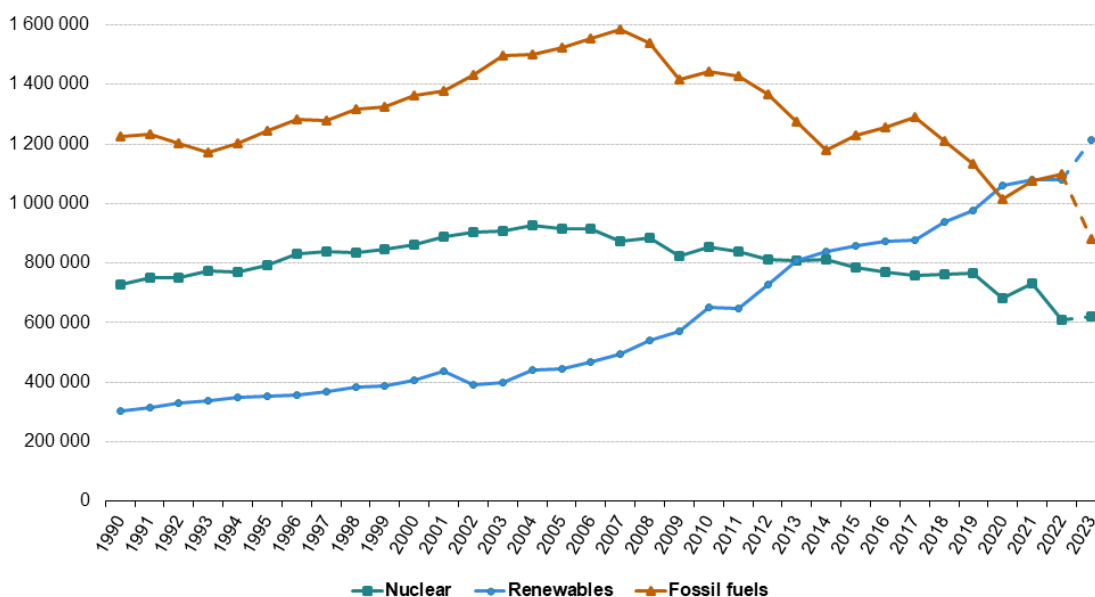
1.5.1 Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ στην Ευρώπη

Η Ευρώπη, τα τελευταία χρόνια, καταβάλλει συστηματικές και συντονισμένες προσπάθειες για να επιταχύνει την ενεργειακή της μετάβαση, επιδιώκοντας την επίτευξη ενός βιώσιμου και καθαρού ενεργειακού μέλλοντος. Μέσω ενός συνδυασμού νομοθετικών και πολιτικών πρωτοβουλιών, η Ευρωπαϊκή Ένωση στοχεύει στην ενίσχυση των ΑΠΕ οι οποίες το 2023 κατέγραψαν το υψηλότερο ποσοστό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, φτάνοντας το 44,7% της παραγωγής ηλεκτρισμού στην Ε.Ε. Η εντυπωσιακή αυτή επίδοση καταδεικνύει την αυξανόμενη κυριαρχία των ΑΠΕ, σε αντίθεση με την μείωση κατά 19,7% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, η οποία πλέον καλύπτει το 32,5% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρισμού. Το γεγονός αυτό αντανακλά τη συνεχιζόμενη πορεία της Ευρώπης προς τη μείωση της δέσμευσης από τα συμβατικά καύσιμα και την ενίσχυση της συμμετοχής των καθαρών πηγών ενέργειας στο ενεργειακό της μείγμα. Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται, από το 1990 μέχρι και το 2023, η συνεχής αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και η μείωση των ορυκτών καυσίμων τα τελευταία χρόνια [2].

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί πλέον μία από τις κεντρικές προτεραιότητες της Ε.Ε., η οποία επικεντρώνεται στην αποδοτική αξιοποίηση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ, καθώς και στην αξιοποίηση των παλαιών και αποσυρόμενων συμβατικών μονάδων παραγωγής, είτε για την παραγωγή ενέργειας με βιοκαύσιμα, είτε για την αποθήκευσή της. Η ανάγκη για αποτελεσματικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας καθίσταται επιτακτική, καθώς η ασταθής παραγωγή από τις ΑΠΕ απαιτεί λύσεις που να διασφαλίζουν τη σταθερότητα και την αξιόπιστη τροφοδοσία του ενεργειακού δικτύου. Είναι σαφές ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση θεωρεί τις ΑΠΕ ως τη βασική πηγή για την ηλεκτροδότηση του δικτύου της, καθορίζοντας στρατηγικούς στόχους που στοχεύουν στη διαρκή ανάπτυξη και ενίσχυση του τομέα τους.

Οι στόχοι της Ε.Ε. για το μέλλον περιλαμβάνουν την επίτευξη του 42,5% της συνολικής παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ μέχρι το 2030, καθώς και την πλήρη ενεργειακή μετάβαση με μηδενικούς ρύπους έως το 2050. Αυτοί οι φιλόδοξοι στόχοι αναμένεται να οδηγήσουν σε περαιτέρω ανάπτυξη των ΑΠΕ, ενίσχυση της επιρροής τους στον ενεργειακό τομέα και διαμόρφωση ενός νέου, βιώσιμου ενεργειακού τοπίου. Η επίτευξη αυτών των στόχων θα απαιτήσει τη συνεργασία όλων των κρατών-μελών της Ε.Ε., καθώς και την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών και στρατηγικών, που θα συμβάλουν στη δημιουργία ενός ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος καθαρής ενέργειας, ικανό να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες ανάγκες της κοινωνίας και της οικονομίας.

Electricity production in the EU
(Gigawatt hours (GWh))



Source: Eurostat (online data codes: nrg_ind_pehcf, nrg_ind_pehnf)

eurostat

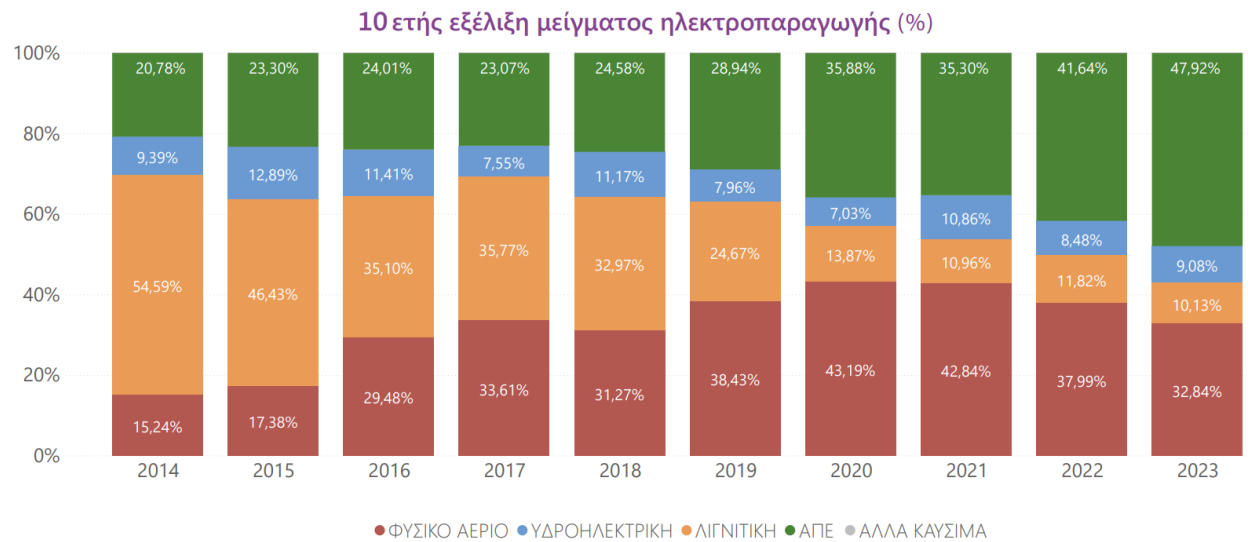
Εικόνα 1: Μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε. (1990-2023) [2].

1.5.2 Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα

Η εδραίωση των ΑΠΕ στην Ελλάδα τα τελευταία έτη καταγράφει εντυπωσιακή πρόοδο και εξελίσσεται με ταχύτατο ρυθμό. Ειδικότερα, το 2023, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ανήλθε στο 57% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρισμού, αποδεικνύοντας την ισχυρή στροφή της χώρας προς τη χρήση καθαρών και βιώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, σημειώθηκε σημαντική μείωση της παραγωγής από λιγνιτικές μονάδες, η οποία υποχώρησε από το 54,59% το 2014 στο 10,13% το 2023. Τα προαναφερθέντα ποσοστά εμφανίζονται αναλυτικά στην Εικόνα 2 όπου απεικονίζεται η εξέλιξη του μείγματος στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα από το 2014 μέχρι το 2023. Παρά την εντυπωσιακή αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση που καλύπτεται από αυτές παραμένει περιορισμένη, υπερβαίνοντας ελαφρώς το 20%, λόγω της διαρκούς εξάρτησης των βιομηχανικών και μεταφορικών τομέων από πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας.

Το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) για το 2025 καθορίζει φιλόδοξους στόχους για την επιτυχή ολοκλήρωση της ενεργειακής μετάβασης, ευθυγραμμίζοντας τη χώρα με τις στρατηγικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ειδικότερα, προβλέπεται ότι έως το 2030, το 45,4% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης θα καλύπτεται από ΑΠΕ, υπερβαίνοντας τον στόχο του 42,5% που έχει θέσει η Ε.Ε. Παράλληλα, σύμφωνα με τον Κλιματικό Νόμο (άρθρο 11, Ν.4936/2022), όλες οι λιγνιτικές μονάδες της χώρας αναμένεται να τεθούν πλήρως εκτός λειτουργίας έως το 2028, επισημοποιώντας την πλήρη απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

Η στρατηγική της Ελλάδας επικεντρώνεται στην ενίσχυση της αποθήκευσης ενέργειας μέσω τεχνολογιών όπως οι μπαταρίες και η αντλησιοταμίευση, προκειμένου να εξισορροπηθεί η διακύμανση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και να διασφαλιστεί η σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος. Επιπλέον, η ανάπτυξη των πρώτων υπεράκτιων αιολικών πάρκων αναμένεται να ενισχύσει τη συνεισφορά της αιολικής ενέργειας, ενώ οι τοπικές και διεθνείς ενεργειακές διασυνδέσεις αναδεικνύονται ως κρίσιμες για την ορθολογική διαχείριση της ενέργειας και τη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας της χώρας [3], [4].



Εικόνα 2: Μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (2014-2023) [3].

2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα, αποτελούν την βασική μονάδα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς σε πειραματικό και σε θεωρητικό επίπεδο. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγών οι οποίες όταν εκτίθενται σε ηλιακή ακτινοβολία αναπτύσσουν διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο πλευρές τους. Το υλικό κατασκευής τους καθορίζεται από την τιμή του ενεργειακού διακένου, καθώς αυτή επηρεάζει την απόδοσή τους. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Συνηθέστερο υλικό για την κατασκευή των φωτοστοιχείων είναι το πυρίτιο (Si), λόγω της τετρασθενούς και τετραεδρικής κρυσταλλικής δομής του. Στη θεμελιώδη ενεργειακή του κατάσταση, το πυρίτιο δεν διαθέτει ελεύθερους φορείς φορτίου, καθιστώντας το μονωτικό. Η ιδιότητα αυτή μεταβάλλεται όταν το υλικό απορροφήσει ενέργεια υπό μορφή φωτός, η οποία επιτρέπει την παραγωγή φορτίου και, συνεπώς, την ανάπτυξη ηλεκτρισμού [5]. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία βασισμένα στο πυρίτιο κυριαρχούν στην παγκόσμια αγορά (με ποσοστό πάνω από 90%). Επίσης, το πυρίτιο έχει ενεργειακό χάσμα εντός του βέλτιστου εύρους, για την αποτελεσματική μετατροπή από ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα και είναι το δεύτερο υλικό στον πλανήτη με την μεγαλύτερη διαθεσιμότητα. Η μέγιστη απόδοση αυτή τη στιγμή στα στοιχεία βασισμένα στο πυρίτιο κυμαίνεται στο 27% ενώ συνεχίζονται οι έρευνες για την αύξηση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους τους [6].



Εικόνα 3: Παράδειγμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

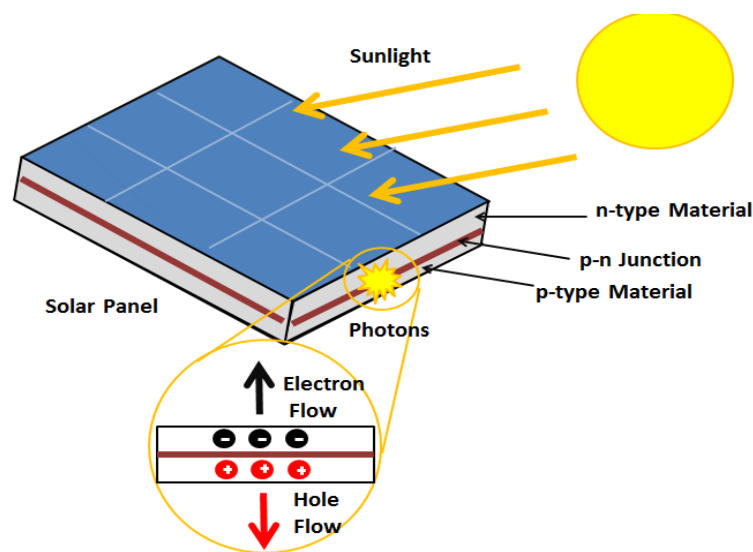
2.2 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι μια διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν προσπίπτει σε αυτό ηλιακή ακτινοβολία. Ανακαλύφθηκε από τον Edmond Becquerel το 1839, όταν παρατήρησε ότι η τάση της κυψέλης ενισχυόταν όταν οι πλάκες εκτίθεντο σε ηλιακό φως κατά τα πειράματά του με ηλεκτρολυτικά στοιχεία [7].

Τα ημιαγωγικά υλικά, κατασκευασμένα κυρίως από πυρίτιο με προσμίξεις, διαχωρίζονται σε τύπου p (με έλλειμμα ηλεκτρονίων σθένους) και τύπου n (με πλεόνασμα ηλεκτρονίων σθένους). Στη διεπιφάνεια τους σχηματίζεται μια ζώνη εκκένωσης και ένα ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο διαχωρίζει τα ηλεκτρόνια και τις οπές που παράγονται από την απορρόφηση φωτονίων.

Τα φωτόνια, εφόσον έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου, δημιουργούν διέγερση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω οπές. Τα ηλεκτρόνια μετακινούνται προς την πλευρά n και οι οπές προς την πλευρά p, με το ενσωματωμένο πεδίο να διασφαλίζει τον διαχωρισμό των φορτίων, οδηγώντας σε ηλεκτρικό ρεύμα όταν τα δύο άκρα της ένωσης συνδεθούν με εξωτερικό κύκλωμα [8].

Η καλή λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων βασίζεται στην αποδοτική εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το απαραίτητο για τη λειτουργία του στοιχείου ηλεκτροστατικό πεδίο, εκτός από προσμίξεις p και n τμημάτων, μπορεί να προκύψει και από άλλες διατάξεις, όπως από διόδους τύπου Schottky, οι οποίες σχηματίζονται όταν ένας ημιαγωγός έρθει σε επαφή με ένα μέταλλο. Αυτές οι δομές συμβάλλουν στην καλή απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική [9].



Εικόνα 4: Σχηματική περιγραφή φωτοβολταϊκού φαινομένου.

2.3 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγει στην έξοδό του μια τάση χαμηλού μεγέθους και για αυτόν τον λόγο δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες ενός φορτίου από μόνο του. Για αυτόν τον λόγο, εφαρμόζεται μία συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων (φωτοβολταϊκά πλαίσια) σε σειρά δημιουργώντας μία ενιαία μονάδα μεγαλύτερης τάσης.

Με την σειρά τους τα πλαίσια (panels) συνδέονται μεταξύ τους για την δημιουργία μίας συστοιχίας (array). Έτσι, κατασκευάζεται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ικανό να αντλήσει αρκετή ηλιακή ακτινοβολία ώστε να τροφοδοτήσει μεγάλα φορτία. Η συνδεσμολογία των πλαισίων μπορεί να γίνει σε σειρά ή παράλληλα. Όταν τα πλαίσια συνδέονται σε σειρά αυξάνεται η παραγόμενη τάση. Αντιθέτως, με την παράλληλη συνδεσμολογία αυξάνεται η ένταση του ρεύματος που παράγει η συστοιχία.

Η σωστή τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι εξίσου σημαντική με το είδος και την τεχνολογία τους. Η μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται όταν οι ακτίνες του ηλίου προσκρούουν στην επιφάνεια του πλαισίου κάθετα. Διασφαλίζοντας ότι τα πλαίσια είναι στραμμένα στην σωστή κατεύθυνση μεγιστοποιείται η παραγόμενη ενέργεια. Έτσι, στο βόρειο ημισφαίριο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν την επιφάνειά τους στραμμένη στον νότο, ενώ αντίθετα στο νότιο ημισφαίριο είναι στραμμένα στον βορρά.

Η βελτιστοποίηση της παραγωγής είναι άμεσα συνδεδεμένη με το γεωγραφικό πλάτος. Όσο πιο κοντά βρίσκονται στον ισημερινό τόσο πιο μικρή κλίση θα έχουν ενώ όσο πιο μακριά τόσο πιο κάθετα τα τοποθετούνται. Τέλος, υπάρχουν και μηχανικά συστήματα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου (trackers), τα οποία όταν συνδέονται στα πλαίσια αυξάνουν την απόδοσή τους και άρα την συνολική ενέργεια που παράγεται. Ωστόσο, το αυξημένο κόστος και η ανάγκη για συχνότερη συντήρηση τα καθιστούν λιγότερο διαδεδομένα.



Εικόνα 5: Συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων.

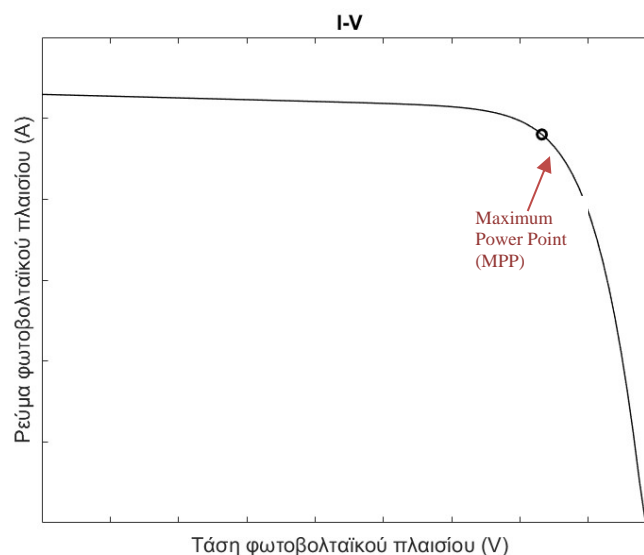
2.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

2.4.1 Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V, P-V

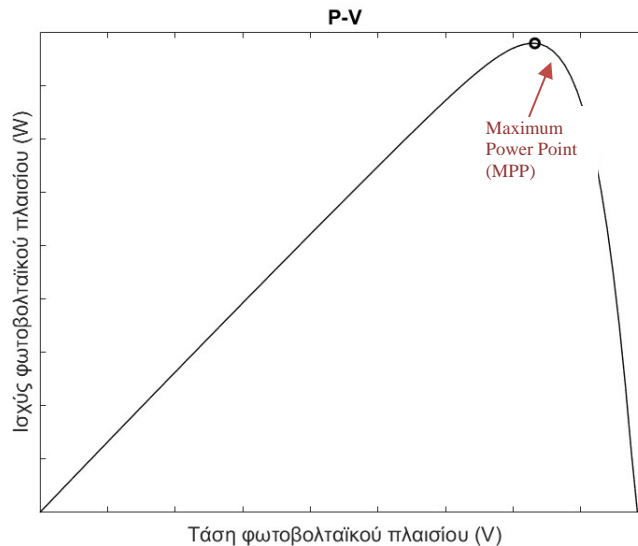
Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνοδεύεται από έναν πίνακα τεχνικών χαρακτηριστικών που παρέχεται από τον κατασκευαστή, ο οποίος περιλαμβάνει κρίσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία του. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν την τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και την μέγιστη δυνατή αποδιδόμενη ισχύ (P_{MPP}), οι οποίες αποτελούν βασικά μεγέθη για την απόδοση του πλαισίου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Επιπλέον, ο κατασκευαστής παρέχει πληροφορίες για τη τάση (V_{MP}) και το ρεύμα (I_{MP}) στο σημείο μέγιστης ισχύος, δηλαδή τις τιμές της τάσης και του ρεύματος όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει την μέγιστη δυνατή ισχύ. Αυτά τα χαρακτηριστικά παρέχονται για τις Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμών (Standard Test Conditions, STC), οι οποίες καθορίζονται σε θερμοκρασία 25°C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m^2 . Οι τιμές αυτές παρέχουν τα δεδομένα αναφοράς για την αξιολόγηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων κάτω από τυποποιημένες συνθήκες.

Στα ακόλουθα Σχήματα 2.1 και 2.2 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 2.1. Διάγραμμα τάσης – ρεύματος φωτοβολταϊκού πλαισίου.



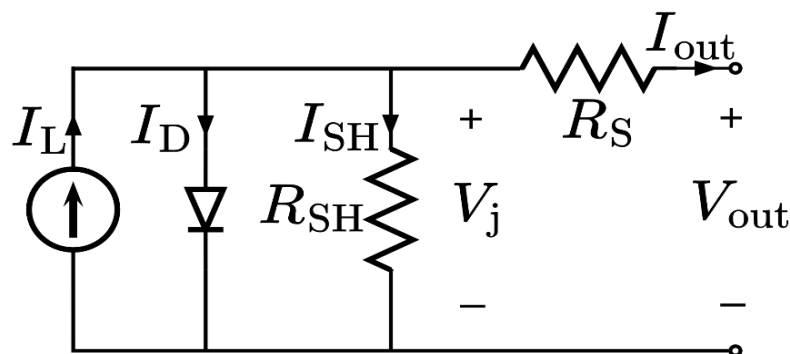
Σχήμα 2.2. Διάγραμμα τάσης – ισχύος φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, η τάση V_{OC} επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα είναι μηδενικό, ενώ η τιμή του ρεύματος I_{SC} παρατηρείται όταν η τάση είναι μηδενική. Η μέγιστη τιμή ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου καταγράφεται στο «γόνατο» της χαρακτηριστικής καμπύλης, το οποίο αντιστοιχεί στις τιμές τάσης V_{MP} και ρεύματος I_{MP} , όπου το σύστημα παράγει την μέγιστη ισχύ.

Στο Σχήμα 2.2, παρατηρείται σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της ισχύος και της τάσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου μέχρι το σημείο μέγιστης ισχύος. Μετά την επίτευξη του σημείου αυτού, και καθώς η τάση συνεχίζει να αυξάνεται, παρατηρείται απότομη πτώση στην ισχύ, η οποία μειώνεται δραστικά μέχρι τον μηδενισμό της κατά τις συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, όπου η τάση είναι στο μέγιστο και το ρεύμα είναι μηδενικό.

2.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα και ρεύμα εξόδου

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι το παρακάτω:



Σχήμα 2.3. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η εξίσωση που περιγράφει την μαθηματική σχέση του ρεύματος εξόδου ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η ακόλουθη [10], [11]:

$$I_{out} = I_L - I_o \cdot \left[e^{\frac{(V_{out} + I_{out} \cdot R_s)}{n \cdot V_T}} - 1 \right] - \frac{V_{out} + I_{out} \cdot R_s}{R_{SH}} \quad (2.1)$$

όπου:

- I_L : Το ρεύμα που προκύπτει εξαιτίας του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός (φωτορεύμα),
- I_o : Το ρεύμα κορεσμού διόδου,
- V_{out} : Η τάση στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου,
- R_s : Η αντίσταση αυτή περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία αντίστασης του ημιαγωγού,
- n : Συντελεστής μη-ιδανικότητας,
- V_T : Θερμική τάση από την σχέση $V_T = \frac{k \cdot T}{q}$, όπου k η σταθερά Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/Kelvin), T η θερμοκρασία του στοιχείου σε Kelvin και q το φορτίο ηλεκτρονίου ($1.6022 \cdot 10^{-19}$ Coulomb),
- R_{SH} : Η αντίσταση αυτή περιλαμβάνει διαρροές φορέων στην επαφή P-N.

Παρακάτω αναλύεται η εξίσωση που περιγράφει την μαθηματική σχέση του ρεύματος εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου που αποτελείται από N_s στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και N_p σειρές παράλληλων φωτοβολταϊκών στοιχείων.

$$N_p \cdot I_{out} = N_p \cdot I_L - N_p \cdot I_o \cdot \left[e^{\frac{(N_s \cdot V_{out} + N_p \cdot I_{out} \cdot (\frac{N_s}{N_p}) \cdot R_s)}{N_s \cdot n \cdot V_T}} - 1 \right] - \frac{N_s \cdot V_{out} + N_p \cdot I_{out} \cdot (\frac{N_s}{N_p}) \cdot R_s}{(\frac{N_s}{N_p}) \cdot R_{SH}} \quad (2.2)$$

όπου:

- $N_p \cdot I_{out}$: Συνολικό ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου,
- $N_s \cdot V_{out}$: Συνολική τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου,
- $N_p \cdot I_L$: Συνολικό ρεύμα από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (φωτορεύμα),
- $N_p \cdot I_o$: Συνολικό ρεύμα κορεσμού διόδου,
- $(\frac{N_s}{N_p}) \cdot R_s$: Ισοδύναμη σε σειρά αντίσταση του πλαισίου,
- $(\frac{N_s}{N_p}) \cdot R_{SH}$: Ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση του πλαισίου.

2.4.3 Απόδοση και ισχύς αιχμής πλαισίου

Ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου εκφράζει τον λόγο της μέγιστης δυνατής ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να παράγει το πλαίσιο προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του:

$$n_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{H \cdot S} \quad (2.3)$$

όπου:

- P_{π} : Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πλαισίου (W),
- H : Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο πλαίσιο ($\frac{W}{m^2}$),
- S : Η επιφάνεια του πλαισίου (m^2).

Όπως είναι κατανοητό, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Ένας από τους λόγους για την μείωση της απόδοσης, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.5 αναλυτικά, είναι η συσσώρευση σκόνης, ακαθαρσιών, καθώς και στοιχείων λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών όπως χιόνι ή χαλάζι. Σε πολλές μελέτες και αναλύσεις χρησιμοποιείται ο συντελεστής καθαρότητας για την εκτίμηση της μείωσης απόδοσης, ωστόσο για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού του συστήματος, συνιστάται ο τακτικός καθαρισμός και η συντήρηση του εξοπλισμού.

Σε πολλές περιπτώσεις, τα λεπτομερή χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, όπως οι διαστάσεις, ο συντελεστής κάλυψης κ.λπ., δεν είναι διαθέσιμα και το μόνο δεδομένο που παρέχεται είναι η ισχύς αιχμής (peak power). Η ισχύς αιχμής αναφέρεται στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δέχεται ιδανική ηλιακή ακτινοβολία (1000 W/m^2). Για να αποφεύγεται η σύγχυση με την πραγματική ισχύ του συστήματος, η ισχύς αιχμής εκφράζεται συχνά σε μονάδες Watt αιχμής (W_p), η οποία είναι η μέτρηση της μέγιστης ικανότητας παραγωγής ισχύος του πλαισίου υπό ιδανικές συνθήκες:

$$P_a (W_p) = 1000 \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot S (m^2) \cdot n_{\pi} \quad (2.4)$$

2.5 Απώλειες Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως κάθε ενεργειακό σύστημα, αντιμετωπίζουν διάφορες απώλειες οι οποίες πρέπει να διαχειριστούν αποτελεσματικά για να μειωθεί η απώλεια παραγωγής ενέργειας. Αυτές οι απώλειες έχουν σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο, ενώ παράλληλα επηρεάζουν τη γενική απόδοση του συστήματος. Γι' αυτό και συνεχώς προκύπτει ανάγκη για συντήρηση των υφιστάμενων συστημάτων, καθώς και για έρευνα που στοχεύει στη μείωση αυτών των απωλειών όσο το δυνατόν περισσότερο.

Οι απώλειες παραγωγής ενέργειας δεν επηρεάζουν μόνο το οικονομικό αποτέλεσμα του συστήματος, αλλά και την αποδοτικότητά του, καθώς μικρότερες απώλειες οδηγούν σε μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα επηρεάζονται επίσης από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και την περιοχή στην οποία είναι εγκατεστημένα, με παράγοντες όπως η τοποθεσία, ο καιρός, η θερμοκρασία και η καθαριότητα των πλαισίων να έχουν άμεσο αντίκτυπο στις απώλειες.

Παρακάτω αναφέρονται οι κύριες μορφές απωλειών των φωτοβολταϊκών συστημάτων [12], [13].

- *Απώλειες από σκίαση (5-7%):*

Η σκίαση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες στην απόδοση του συστήματος. Εφόσον τα στοιχεία συνδέονται σε ομάδες, η σκίαση ενός μόνο στοιχείου μπορεί να διαταράξει τη ροή ισχύος σε ολόκληρο το πλαίσιο, μειώνοντας την παραγωγή ενέργειας. Η σκίαση ενδέχεται επίσης να προκαλέσει την εμφάνιση θερμών σημείων, τα οποία δημιουργούνται λόγω των διαταραχών στη λειτουργία του στοιχείου και μπορεί να οδηγήσουν σε μόνιμες βλάβες ή μειωμένη απόδοση. Η σκίαση επηρεάζεται από τον σχεδιασμό και την τοποθεσία εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος, με παράγοντες όπως τα κτήρια, τα δέντρα ή άλλες κατασκευές να παίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση απωλειών. Για να περιοριστούν οι επιπτώσεις της σκίασης, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως η σωστή απόσταση των σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων και η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας. Παρά την πρόοδο της τεχνολογίας και την ενσωμάτωση διόδων παράκαμψης για την αποφυγή επιπτώσεων από σκίαση, αυτές οι δίοδοι παραμένουν επιρρεπείς σε βλάβες που μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

- *Απώλειες από το έδαφος (2-6%):*

Οι απώλειες από τη σκόνη και το έδαφος είναι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ηλιακή παραγωγή. Ιδιαίτερα σε περιοχές κοντά σε βιομηχανικά κέντρα ή σε περιοχές με υψηλή συγκέντρωση σκόνης και περιορισμένες βροχοπτώσεις, οι απώλειες από σκόνη μπορούν να ξεπεράσουν το 7-8%. Η γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού συστήματος συχνά λαμβάνει υπόψη αυτές τις απώλειες, προκειμένου να περιοριστεί η συσσώρευση σκόνης και ακαθαρσιών στις επιφάνειες των πλαισίων. Αν και ο συχνός καθαρισμός των πλαισίων ενδέχεται να μην είναι οικονομικά βιώσιμος σε ορισμένες περιοχές, θεωρείται αναγκαίος για την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων και τη μακροπρόθεσμη διαχείρισή τους. Ο τακτικός καθαρισμός μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και να ελαττώσει τις απώλειες ενέργειας, διασφαλίζοντας την υψηλότερη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- *Απώλειες από αντανάκλαση (1-2%):*

Οι απώλειες από την ανάκλαση του ηλιακού φωτός στα φωτοβολταϊκά στοιχεία συμβαίνουν όταν το φως αντανάκλαται από την επιφάνεια των πλαισίων και δεν απορροφάται. Αυτού του είδους οι απώλειες μειώνονται με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη χρήση νεότερων τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία διαθέτουν βελτιωμένες επιφάνειες που αυξάνουν την απορρόφηση του ηλιακού φωτός.

- *Θερμικές απώλειες:*

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τη θερμοκρασία αναφοράς των 25°C, η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μειώνεται. Για κάθε βαθμό Κελσίου πάνω από την θερμοκρασία αναφοράς, η απόδοση μειώνεται περίπου κατά περίπου 0,5%. Αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες, όπου οι συχνές αυξήσεις της θερμοκρασίας ενδέχεται να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της παραγόμενης ενέργειας.

- *Απώλειες από ασυμβατότητες (2-4%):*

Οι μικρές απώλειες λόγω διαφορών στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι συνηθισμένες σε μεγάλα συστήματα. Αυτές οι απώλειες προκαλούνται κυρίως από τη μη ομοιόμορφη γήρανση των πλαισίων, καθώς σε ένα εκτεταμένο φωτοβολταϊκό σύστημα με χιλιάδες πλαίσια, οι συνθήκες λειτουργίας μπορεί να μην είναι οι ίδιες για όλα τα πλαίσια.

Παράγοντες όπως η τοποθέτηση, η σκίαση, η θερμοκρασία και η έκθεση σε διάφορες καιρικές συνθήκες οδηγούν σε διαφορετική καταπόνηση, με αποτέλεσμα οι αποδόσεις των πλαισίων να μειώνονται σε διαφορετικό βαθμό σε όλο το σύστημα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μικρές αλλά συνεχείς απώλειες στην απόδοση του συστήματος.

- *Απώλειες από την καλωδίωση (<1%):*

Οι απώλειες από το ρεύμα, όπως συμβαίνει σε κάθε ηλεκτρικό σύστημα, είναι αναπόφευκτες, αλλά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν. Καθώς το ρεύμα διαρρέει τα καλώδια, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις προκαλούν πτώσεις τάσης, οι οποίες οδηγούν σε απώλεια ισχύος. Η θερμότητα που παράγεται από την αντίσταση των καλωδίων είναι ένας άλλος παράγοντας που συνεισφέρει σε αυτή την απώλεια.

- *Απώλειες από τον αντιστροφέα:*

Οι απώλειες κατά την μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα από συνεχές είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ποιότητα και την κατάλληλη επιλογή του μετατροπέα DC/AC (αντιστροφέα). Οι σύγχρονοι αντιστροφείς συνήθως παρουσιάζουν απόδοση στην περιοχή του 95-98% κατά την μετατροπή της παραγόμενης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η σωστή επιλογή της ισχύος του αντιστροφέα, καθώς και ο αριθμός των αντιστροφέων που απαιτούνται για το σύστημα, είναι κρίσιμες παράμετροι για την αποδοτικότητα. Οι αντιστροφείς θα πρέπει να είναι ικανοί να διαχειριστούν τον φόρτο του συστήματος, διασφαλίζοντας την αποδοτικότητα και την μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος χωρίς υπερφόρτωση ή απώλειες ισχύος.

2.6 Μελλοντικές Τάσεις στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τον τελευταίο καιρό, το κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει μειωθεί σε επίπεδα που τα καθιστούν, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 1, την οικονομικότερη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, η συνεχής καινοτομία και έρευνα στον τομέα της ηλιακής ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών.

Μια από τις πιο καινοτόμες λύσεις είναι τα αγροβολταϊκά (AgriPV), τα οποία συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την ταυτόχρονη χρήση της γης για γεωργικές ή κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Σε αυτό το σύστημα, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε ανυψωμένα επίπεδα, επιτρέποντας την πρόσβαση των γεωργικών μηχανημάτων και χωρίς να επηρεάζονται οι

συνθήκες βόσκησης των ζώων. Η σκίαση που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια βελτιώνει τα μικροκλίματα, ενισχύει τη βιοποικιλότητα και μειώνει τη διάβρωση του εδάφους.

Επιπλέον, έρευνες έχουν δείξει ότι η καθημερινότητα των ζώων δεν επηρεάζεται αρνητικά από την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων. Αντιθέτως, η σκίαση που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, καθώς και η προστασία από τον παγετό, βελτιώνουν τις συνθήκες διαβίωσης των ζώων, μειώνοντας τη θερμική καταπόνηση και προσφέροντας βελτιωμένες συνθήκες βόσκησης. Έτσι, τα αγροβολταϊκά συστήματα αποδεικνύονται επωφελή για την παραγωγή ενέργειας καθώς και για τη γεωργία και την κτηνοτροφία [14].



Εικόνα 6: Αγροβολταϊκά με ταυτόχρονη χρήση της γης για κτηνοτροφία.

Μία αναπτυσσόμενη τεχνολογία, υποκατηγορία των αγροβολταϊκών, είναι τα κάθετα φωτοβολταϊκά (Vertical PV). Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η κάθετη εγκατάσταση των πλαισίων, η οποία δεν απαιτεί περίπλοκους μηχανισμούς στήριξης, και η ιδιαίτερη καμπύλη παραγωγής ενέργειας που προσφέρει. Λόγω της κάθετης διάταξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η πλειονότητα της ενέργειας παράγεται το πρωί και το απόγευμα, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία μεγιστοποιούν την παραγωγή τους το μεσημέρι.

Επιπλέον, οι ανάγκες καθαρισμού και συντήρησης είναι μειωμένες, καθώς λιγότερες ακαθαρσίες και σκόνη συσσωρεύονται στις μικρότερες επιφάνειες αυτών των συστημάτων. Ωστόσο, τα κάθετα φωτοβολταϊκά απαιτούν μεγαλύτερη έκταση από τα παραδοσιακά συστήματα για να παράγουν την ίδια ισχύ και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Προς το παρόν, ενδείκνυνται για συγκεκριμένες εφαρμογές, κυρίως σε γεωργικές εφαρμογές όπου χρειάζεται ο χώρος ενδιάμεσα

των συστοιχιών για την μετακίνηση των γεωργικών μηχανημάτων. Παρά τις περιορισμένες εφαρμογές τους, τα κάθετα φωτοβολταϊκά παρέχουν μια ευέλικτη καμπύλη παραγωγής ενέργειας και η προβλεπόμενη μείωση του κόστους τους ενδέχεται να τα καταστήσει πιο διαδεδομένα στο μέλλον [15].



Εικόνα 7: Εγκατάσταση κάθετων φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά (Floating PV) είναι συστήματα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πλατφόρμες πάνω από επιφάνειες γλυκού νερού, όπως λίμνες, ποτάμια και δεξαμενές, ενώ αποφεύγεται η εγκατάσταση σε αλμυρά νερά λόγω της πιθανής διαβρωτικής επίδρασης του αλατιού. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα δημοφιλή σε περιοχές με περιορισμένη διαθέσιμη γη, αλλά με εκτεταμένες περιοχές νερού και υψηλή πυκνότητα πληθυσμού. Συνήθως, τα πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα εγκαθίστανται στη στεριά και μετακινούνται στο σώμα του νερού όταν η κατασκευή ολοκληρωθεί.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των πλωτών φωτοβολταϊκών είναι τα ψυκτικά οφέλη που προσφέρει το νερό, το οποίο βοηθά στη διατήρηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε βέλτιστες θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των συστημάτων κατά 5%-15% [16]. Επιπλέον, έρευνες έχουν δείξει ότι τα πλωτά φωτοβολταϊκά θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή σε περιοχές που αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού, προσφέροντας ταυτόχρονα προστασία στις υδάτινες πηγές και περιορίζοντας την εξάτμιση του νερού.

Ένα παράδειγμα έρευνας για τη λίμνη Nasser στην Αίγυπτο έδειξε ότι η κάλυψη του ήμισυ της λίμνης με πλωτά φωτοβολταϊκά θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση των αποθεμάτων νερού κατά πάνω από 60%, λόγω της μείωσης της εξάτμισης. Ωστόσο, όπως και στα υδροηλεκτρικά

έργα, απαιτείται αναλυτική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων για να εξασφαλιστεί η προστασία του οικοσυστήματος και να αποφευχθεί η διατάραξη του υγροτόπου [17].



Εικόνα 8: Εγκατάσταση πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος.

3. ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ

3.1 Εισαγωγή στην Τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων

Τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins) αποτελούν ψηφιακά μοντέλα που αντιπροσωπεύουν είτε προβλεπόμενα είτε πραγματικά φυσικά προϊόντα, συστήματα ή διαδικασίες. Η βασική τους χρησιμότητα έγκειται στην προσομοίωση, μοντελοποίηση, ενσωμάτωση, δοκιμή, παρακολούθηση και συντήρηση των φυσικών αντικειμένων ή συστημάτων. Ένα ψηφιακό δίδυμο συνίσταται σε ένα σύνολο προσαρμοστικών μοντέλων που αναπαριστούν τη συμπεριφορά ενός φυσικού συστήματος σε ένα εικονικό περιβάλλον, ενώ χρησιμοποιούν πραγματικά δεδομένα για να εξελίσσονται και να ενημερώνονται συνεχώς [18].

Είναι σημαντικό να υπάρξει διάκριση μεταξύ των ψηφιακών διδύμων και της έννοιας της προσομοίωσης, καθώς οι δύο όροι συχνά συγχέονται. Και οι δύο χρησιμοποιούν ψηφιακά μοντέλα για την αναπαράσταση διεργασιών ενός συστήματος, όμως η κύρια διαφορά έγκειται στο ότι το ψηφιακό δίδυμο συνιστά ένα ολοκληρωμένο εικονικό περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει την εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων για τη μελέτη διαφόρων διεργασιών. Αντίθετα, οι προσομοιώσεις δεν επωφελούνται από τη ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα ψηφιακά δίδυμα, από την άλλη, είναι σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν με αμφίδρομη ροή πληροφοριών, όπου τα δεδομένα από το φυσικό σύστημα εισάγονται στο εικονικό μοντέλο, το οποίο επεξεργάζεται τις πληροφορίες και τις επιστρέφει ως έξοδο, επηρεάζοντας το αρχικό σύστημα.

Η δυνατότητα αυτή καθιστά τα ψηφιακά δίδυμα ικανά να μελετούν πιο σύνθετα ζητήματα και να παρέχουν μεγαλύτερες δυνατότητες βελτίωσης σε σύγκριση με τις τυπικές προσομοιώσεις, προσφέροντας έτσι ένα ισχυρό εργαλείο για την αποτελεσματική διαχείριση και βελτιστοποίηση συστημάτων.

3.2 Τύποι Ψηφιακών Διδύμων

Οι χρήσεις των ψηφιακών διδύμων εκτείνονται σε πολλές φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας, από τον σχεδιασμό και τη λειτουργία μέχρι τη συντήρηση και την ανάλυση. Για να κατανοηθούν καλύτερα οι διάφοροι τρόποι εφαρμογής τους, τα ψηφιακά δίδυμα συχνά χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση την κλίμακα κάλυψης που παρέχουν. Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν:

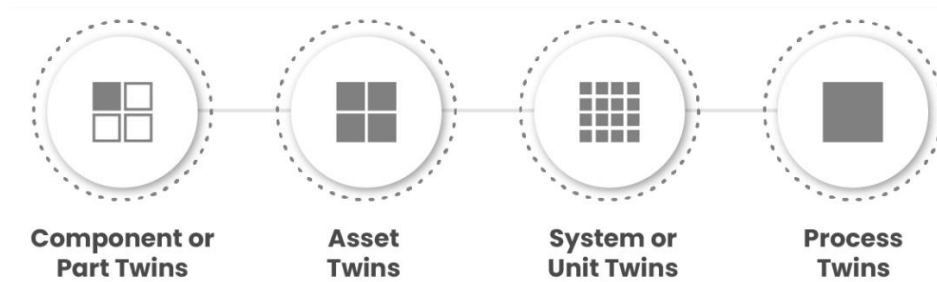
Το δίδυμο εξάρτημα (component twin) θεωρείται το χαμηλότερο επίπεδο της τεχνολογίας αυτής. Αντιστοιχεί στο μικρότερο στοιχείο ενός συστήματος, σε ένα συγκεκριμένο μέρος του εξοπλισμού, π.χ. ένας αισθητήρας, μία βαλβίδα, ένας διακόπτης κ.λπ. Με την εικονική αναπαράσταση αυτών των έξυπνων εξαρτημάτων δίνεται η δυνατότητα να παρακολουθείται η απόδοσή τους και η προσομοίωσή τους σε πραγματικές συνθήκες χρόνου για δεδομένα όπως η σταθερότητα, η αντοχή και η αποδοτικότητά τους. Έτσι, παρόλο που αυτός ο τύπος διδύμου ελέγχει ένα μικρό εξάρτημα, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ασφάλεια και σταθερότητα στην παραγωγική διαδικασία.

Το δίδυμο προϊόν (asset twin) είναι το επόμενο στάδιο στην ιεραρχία της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων. Συνήθως αποτελείται από ένα σύνολο διδύμων εξαρτημάτων ή χρησιμοποιούν τις πληροφορίες που αντλούν από αυτά για την μοντελοποίηση ενός πιο σύνθετου στοιχείου. Τέτοια στοιχεία μπορεί να είναι ένας κινητήρας, μία γεννήτρια, ένα κτίριο. Ένα δίδυμο προϊόν αναλύει και δείχνει πόσο αποτελεσματικά τα ξεχωριστά μέρη αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Παρέχεται έτσι στους μηχανικούς η γνώση σχετικά με την απόδοση του εξοπλισμού και την πιθανότητα βελτίωσής του. Επίσης, τροφοδοτείται η αύξηση της παραγωγικότητας καθώς προβλέπονται οι βλάβες και οι επισκευές, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση πόρων και κάνοντας το σύστημα πιο αποδοτικό.

Το δίδυμο σύστημα (system twin) απεικονίζει τα δίδυμα προϊόντα σε επίπεδο ολοκληρωμένου λειτουργικού συστήματος/μονάδας. Παρέχουν μία επισκόπηση του εργοστασίου, εγκατάστασης, ή μέσου μεταφοράς σε μεγάλη κλίμακα, βελτιστοποιώντας την αποτελεσματικότητα ή ακόμα και την εύρεση νέων επιχειρηματικών ευκαιριών για την εισροή επιπρόσθετου κέρδους. Η κάλυψη αυτού του διδύμου περιλαμβάνει ένα σύνολο διδύμων προϊόντων που μπορεί να εμπλέκονται σε διαδικασίες όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία μορφή ενέργειας ή ενός αντικειμένου από ένα εργοστάσιο. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και η προσομοίωση σε αυτό το επίπεδο υπερβαίνουν την ανίχνευση δυσλειτουργιών και αστοχιών. Παρέχεται η πλήρης απόκτηση δεδομένων και η καλύτερη δυνατή προετοιμασία για χάραξη στρατηγικών αλλαγών.

Το δίδυμο διαδικασίας (process twin) είναι το υψηλότερο επίπεδο ψηφιακών διδύμων και συνδέει τα δίδυμα συστημάτων σε μία οντότητα. Με αυτή την λύση δίνεται η μέγιστη δυνατή εικόνα των διαδικασιών και των ροών εργασίας εντός της εγκατάστασης ή του εργοστασίου επιτρέποντας μία βαθύτερη και ευέλικτη ανάλυση. Με την χρησιμοποίηση αυτών των διδύμων μπορεί να βοηθηθεί η ρύθμιση τροφοδοσίας πρώτων υλών, η θερμοκρασία παραγωγής κ.λπ. χωρίς να επηρεάζεται και να διαταράσσεται η πραγματική διαδικασία και η ποιότητα της παραγωγής. Έτσι, οι χρήστες

μπορούν να δοκιμάζουν χωρίς κίνδυνο διάφορες επιχειρηματικές υποθέσεις, να παρακολουθούν μετρήσεις και να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένοι σε δεδομένα και όχι εικασίες.



Εικόνα 9: Οι τέσσερις κύριοι τύποι των ψηφιακών διδύμων.

3.3 Εφαρμογές και Περιορισμοί

3.3.1 Στον τομέα των κατασκευών και του αστικού σχεδιασμού

Τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία που μεταμορφώνει τις κατασκευές, τον αστικό σχεδιασμό και τις έξυπνες πόλεις, δημιουργώντας δυναμικά ψηφιακά δίδυμα φυσικών στοιχείων. Στον τομέα των κατασκευών, τα ψηφιακά δίδυμα υποστηρίζουν την παρακολούθηση της στατικότητας των δομών, την αξιολόγηση κινδύνων και την προληπτική συντήρηση, εφαρμόζοντας λύσεις για γέφυρες και ιστορικά κτίρια. Επιπλέον, βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και μειώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Βασισμένα σε προσαρμοσμένους σχεδιασμούς, τα ψηφιακά δίδυμα ενσωματώνουν μοντέλα με δυνατότητες πρόβλεψης, αν και οι προκλήσεις στην ενσωμάτωση και την κλιμάκωση παραμένουν.

Με την ενσωμάτωση αισθητήρων στις βασικές υπηρεσίες μιας πόλης, επιτυγχάνεται η παρακολούθηση κρίσιμων δεδομένων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την ενεργειακή εξοικονόμηση, τη διαχείριση υπηρεσιών κοινής ωφέλειας και την προστασία υποδομών. Η ανάπτυξη εικονικών περιβαλλόντων μέσα σε ψηφιακά δίδυμα επιτρέπει τη δοκιμή σεναρίων και τη μάθηση από το περιβάλλον, διευκολύνοντας τον σχεδιασμό και την πρόβλεψη αλλαγών. Η εφαρμογή αυτών των δεδομένων ανοίγει τον δρόμο για προηγμένους αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και ανάλυση δεδομένων, υποστηρίζοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων και την αύξηση της συνδεσιμότητας των κοινοτήτων [19].

3.3.2 Στον υγειονομικό τομέα

Μία από τις ρεαλιστικές εφαρμογές σήμερα περιλαμβάνει την προσομοίωση των επιδράσεων φαρμάκων, καθώς και τη σχεδίαση και εκτέλεση χειρουργικών επεμβάσεων, τη διαχείριση νοσοκομείων και τη συντήρηση ιατρικού εξοπλισμού. Οι δυνατότητες είναι τεράστιες, καθώς τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να κάνουν τη διαφορά μεταξύ ζωής και θανάτου, υποστηρίζοντας τη φροντίδα ασθενών σε πραγματικό χρόνο, τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης υγειονομικών πόρων και την πρόληψη μέσω προγνωστικής συντήρησης [19].

Μία δύσκολη αλλά προηγμένη εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στην υγεία είναι η δημιουργία εξατομικευμένων μοντέλων για τους ασθενείς, τα οποία μπορούν να προσαρμόζονται συνεχώς με βάση την παρακολούθηση της υγείας και του τρόπου ζωής τους. Αυτή η δυνατότητα οδηγεί στη δημιουργία ενός διδύμου «εικονικού ασθενούς», το οποίο περιγράφει με λεπτομέρεια την υγιή κατάσταση ενός ατόμου, ξεπερνώντας την παραδοσιακή προσέγγιση που βασίζεται αποκλειστικά σε ιστορικά δεδομένα. Έτσι, καθίσταται δυνατή η σύγκριση των αρχείων ενός ασθενούς με δεδομένα από τον γενικό πληθυσμό. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να αλλάξει τη θεώρηση της υγείας, καθώς ο ορισμός του υγιούς ανθρώπου μπορεί πλέον να βασίζεται σε ποσοτικά δεδομένα και όχι μόνο στην απουσία ενδείξεων ασθένειας. Παράλληλα, τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν, με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης, δυνατότητες πρόβλεψης και λήψης αποφάσεων [20].

Παρά τα πλεονεκτήματα, η εφαρμογή της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων ενδέχεται να οδηγήσει σε κοινωνικές ανισότητες, καθώς η πρόσβαση στις απαραίτητες τεχνολογίες μπορεί να μην είναι εφικτή για όλους. Επιπλέον, η ανάλυση προτύπων σε πληθυσμούς ενέχει τον κίνδυνο διακρίσεων.

3.3.3 Στον βιομηχανικό τομέα

Το κομμάτι της παρακολούθησης του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του είναι αρκετά χρονοβόρο καθώς και έχει μεγάλο οικονομικό κόστος. Η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στον βιομηχανικό τομέα είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει στους κατασκευαστές να παρακολουθούν και να ελέγχουν τα προϊόντα τους, εξοικονομώντας χρόνο και χρήματα. Προσφέρει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την απόδοση μηχανημάτων και της γραμμής παραγωγής, επιτρέποντας την πρόβλεψη προβλημάτων πριν αυτά συμβούν. Αυτό βελτιώνει τη συνδεσιμότητα και την απόδοση του συνολικού συστήματος. Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης σε συνδυασμό με τα ψηφιακά δίδυμα επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη και ανάλυση της απόδοσης. Το ψηφιακό δίδυμο, επίσης, δημιουργεί ένα

περιβάλλον δοκιμών για τα προϊόντα, καθώς και ένα σύστημα που ενεργεί βάσει δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, κάτι που μπορεί να βοηθήσει πολύ τον βιομηχανικό τομέα.

Η Siemens έχει αναπτύξει την πλατφόρμα «MindSphere», η οποία μέσω ενός συστήματος που βασίζεται στο νέφος (cloud), συνδέει μηχανές και φυσική υποδομή με ένα ψηφιακό δίδυμο. Η πλατφόρμα αυτή χρησιμοποιεί τις συνδεδεμένες συσκευές και δισεκατομμύρια ροές δεδομένων, με στόχο την επανάσταση στον τομέα της βιομηχανίας [19].

3.3.4 Στον τομέα μεταφορών

Η βιομηχανία αυτοκινήτων έχει βελτιωθεί χάρη στην τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων. Στον τομέα αυτό, τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούν τα υπάρχοντα δεδομένα για να διευκολύνουν τις διαδικασίες και να μειώσουν τα περιθώρια κόστους. Σήμερα, οι σχεδιαστές αυτοκινήτων επεκτείνουν την υπάρχουσα φυσική κατασκευή, ενσωματώνοντας ψηφιακές δυνατότητες. Ένα συγκεκριμένο παράδειγμα χρήσης της τεχνολογίας στη βιομηχανία αυτοκινήτων είναι η χρήση της σε συνδυασμό με εργαλεία ανάλυσης, προκειμένου να αναλυθεί ο τρόπος οδήγησης ενός συγκεκριμένου οχήματος. Με αυτόν τον τρόπο, οι μηχανικοί μπορούν να προτείνουν την ενσωμάτωση νέων χαρακτηριστικών στο αυτοκίνητο, τα οποία μπορούν να μειώσουν τα ατυχήματα και την οδηγική συμπεριφορά.

Επίσης, τα ψηφιακά δίδυμα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και στη σύνδεση ολόκληρου του τομέα μεταφοράς. Πεζοί, οχήματα, μέσα ελέγχου κυκλοφορίας (φανάκια) καθώς και μέσα μαζικής μεταφοράς μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης και μέσω της υλοποίησης ενός ψηφιακού διδύμου να βελτιστοποιηθεί η εμπειρία των διάφορων χρηστών. Επίσης, μέσω διάφορων σεναρίων και προσομοιώσεων μπορούν να αποφευχθούν φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης, καθυστερήσεις δρομολογίων εξαιτίας ανάγκης συντήρησης του εξοπλισμού ακόμα και δυστυχημάτων.

3.4 Εφαρμογές σε Ενεργειακά Συστήματα

Τα ενεργειακά συστήματα μπορούν να επωφεληθούν σημαντικά από την ενσωμάτωση των ψηφιακών διδύμων στις λειτουργίες τους. Οι δυνατότητες πρόβλεψης, οι προσομοιώσεις διαφορετικών σεναρίων και η δυνατότητα διασύνδεσης με άλλα συστήματα μπορούν να

βελτιώσουν την απόδοση, να μειώσουν τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης, καθώς και να περιορίσουν τις εκπομπές ρύπων [21].

Επιπλέον, τα ψηφιακά δίδυμα προσφέρουν μια πλατφόρμα για εκπαίδευση και προσομοίωση. Οι διάφοροι φορείς του ενεργειακού τομέα μπορούν να χρησιμοποιούν τα ψηφιακά δίδυμα για να εκπαιδεύουν το προσωπικό τους σε διαδικασίες συντήρησης και σε σενάρια αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης σε ένα ασφαλές και ελεγχόμενο εικονικό περιβάλλον. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας ενισχύει την επάρκεια του εργατικού δυναμικού, βελτιώνει την ασφάλεια και μειώνει τον κίνδυνο ανθρώπινων σφαλμάτων κατά τη διάρκεια των πραγματικών λειτουργιών.

3.4.1 Στην αιολική ενέργεια

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες εμπεριέχουν ένα σύνολο από συστήματα και αισθητήρες για την προστασία του εξοπλισμού από δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Έτσι, η κλίση των πτερυγίων και η ταχύτητα περιστροφής μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να μην προκαλείται φθορά στον εξοπλισμό. Ωστόσο, τέτοιοι μηχανισμοί δεν είναι πάντα τόσο ακριβείς όσο χρειάζεται και μπορεί να μην αντιδράσουν γρήγορα σε μία απότομη αλλαγή του καιρού. Τα ψηφιακά δίδυμα βρίσκουν εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες με την δυνατότητα να προσομοιώνουν την συμπεριφορά και την φθορά τους σε διάφορες συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο οι κατασκευαστές και χειριστές μπορούν να αναπτύξουν μία στρατηγική αντιμετώπισης τέτοιων φαινομένων ώστε να μειώνεται το πλήγμα και να εξασφαλίζεται η σταθερή παραγωγή ενέργειας. Επίσης, μειώνεται η ανάγκη για επίσκεψη των τεχνικών στις ανεμογεννήτριες καθώς μπορούν να τις παρακολουθούν και να αντιμετωπίζουν προβλήματα εξ αποστάσεως. Τέλος, αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια καθώς μέσω της προσομοίωσης υπό διάφορες καιρικές συνθήκες οι παραγωγοί μπορούν να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή ενέργειας, την ενσωμάτωση στο δίκτυο και την πώλησή της.

3.4.2 Στην ηλιακή ενέργεια

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ειδικά μεγάλης κλίμακας, είναι περίπλοκα συστήματα που αποτελούνται από χιλιάδες πλαίσια, δεκάδες μετατροπείς και εξοπλισμό υψηλής τάσης. Για την σωστή παρακολούθηση και συντήρησή τους χρειάζεται διαρκής και εκτενής έλεγχος με εξοπλισμό όπως κάμερες θερμικής απεικόνισης. Πέραν της χρονοβόρου διαδικασίας αυξάνεται και η επικινδυνότητα καθώς τα φωτοβολταϊκά πάρκα είναι μέρη όπου η θερμοκρασία, η σκόνη και η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά υψηλή. Συνεπώς, όπως είναι λογικό τα ψηφιακά δίδυμα βρίσκουν και εδώ εφαρμογή στην δυνατότητα λήψης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση ή βλάβη κάθε μονάδας. Επίσης, μπορούν να γίνουν προβλέψεις για τον εξοπλισμό και το πώς θα αποδίδει μελλοντικά καθώς και με την προσομοίωση καιρικών συνθηκών και την

απόδοση του εξοπλισμού σε αυτές. Με αυτούς τους τρόπους αυξάνεται η αξιοπιστία του εξοπλισμού και η ασφάλεια του προσωπικού.

3.4.3 Στη συμβατική παραγωγή ενέργειας

Με την αυξανόμενη αλλά και απρόβλεπτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, η λειτουργία των συμβατικών θερμικών μονάδων παραγωγής πολλές φορές λειτουργεί ως εφεδρεία ή σε διακοπτικές συνθήκες. Ως απόρροια αυτού μειώνεται η απόδοση, αυξάνεται το κόστος και τα ζητήματα ασφαλείας. Μέσω μοντελοποίησης των αεριοστρόβιλων από ψηφιακά δίδυμα μπορεί να συνδυαστούν μηχανισμοί με λειτουργικά δεδομένα για την ακριβή προσομοίωση κρίσιμων παραμέτρων όπως της πίεσης και της θερμοκρασίας. Εξασφαλίζεται υψηλή ακρίβεια, με χαμηλό μέσο σχετικό σφάλμα, με αποτελεσματική παρακολούθηση βασικών εξαρτημάτων όπως θάλαμοι καύσης και συμπιεστές σε απότομες αλλαγές φορτίου που είναι ζωτικής σημασίας για την μεταβλητότητα των μονάδων. Επιτυγχάνεται βελτιωμένη λειτουργική σταθερότητα, μειωμένος χρόνος διακοπής της συντήρησης και μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα [22].

4. Ανάλυση και Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου

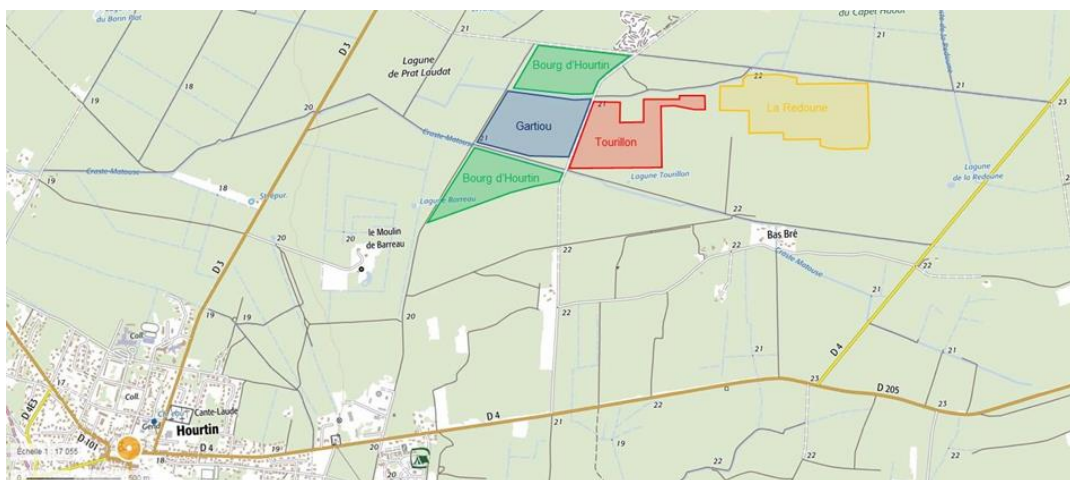
4.1 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Πάρκου

4.1.1 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά

Το φωτοβολταϊκό πάρκο Bourg d'Hourtin αποτελεί έναν από τους βασικούς σταθμούς του ευρύτερου συγκροτήματος φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων Lacs Medocains, το οποίο περιλαμβάνει συνολικά τέσσερις μονάδες που κατασκευάστηκαν από την εταιρεία BayWa r.e. Solar Projects GmbH. Η εγκατάσταση βρίσκεται στην περιοχή της νοτιοδυτικής Γαλλίας, πλησίον της πόλης Hourtin, και οι ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες της είναι $45^{\circ}11'33.8''\text{N}$ και $1^{\circ}02'19.3''\text{W}$. Η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνει το πάρκο Bourg d'Hourtin ανέρχεται σε 240 στρέμματα (240.000 τ.μ.), ενώ το υψόμετρο της περιοχής κυμαίνεται στα 25 μέτρα.

Η κατασκευή του πάρκου ολοκληρώθηκε το 2017, και από τότε λειτουργεί ως μια σημαντική μονάδα παραγωγής ηλιακής ενέργειας στην περιοχή. Η συντήρηση του πάρκου πραγματοποιείται σε συνεργασία με τοπικό κτηνοτρόφο, ο οποίος χρησιμοποιεί πρόβατα για τη βόσκηση στην περιοχή, με αποτέλεσμα να διατηρείται το τοπίο καθαρό και χωρίς την ανάγκη για χημική επεξεργασία του εδάφους, ενώ παράλληλα υποστηρίζεται η τοπική βιοποικιλότητα.

Η γεωγραφική τοποθεσία του πάρκου θεωρείται εξαιρετικά ευνοϊκή για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας, λόγω των υψηλών επιπέδων (για τα δεδομένα της χώρας) ηλιακής ακτινοβολίας που καταγράφονται στην περιοχή. Η προβλεπόμενη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια υπολογίζεται ότι φτάνει περίπου τα 1400 kWh/m^2 ετησίως.



Εικόνα 10: Τοποθεσία του φωτοβολταϊκού πάρκου Lacs Medocains στη Γαλλία.

4.1.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Το φωτοβολταϊκό πάρκο διαθέτει ονομαστική ισχύ συνεχούς τάσης (rated DC capacity) 11.094,24 kWp, η οποία προκύπτει από την εγκατάσταση 38.256 φωτοβολταϊκών πλαισίων με ισχύ 290 Wp το καθένα. Τα πλαίσια είναι τοποθετημένα με κλίση 20° και είναι διασυνδεδεμένα σε τριάδες, με τρία πλαίσια να είναι συνδεδεμένα κάθετα σε κάθε σειρά. Για τη μετατροπή της παραγόμενης συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, χρησιμοποιούνται 255 αντιστροφείς με ισχύ εξόδου 30 kW και 36 kW. Η παραγόμενη εναλλασσόμενη τάση μεταφέρεται στη συνέχεια μέσω 6 μετασχηματιστών με ισχύ 1600 kVA και 1800 kVA, εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία και την προσαρμογή της ενέργειας στα δίκτυα μεταφοράς.

Λεπτομερή χαρακτηριστικά του πάρκου παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάρκου.

| | |
|----------------------|---|
| DC ονομαστική ισχύς | 11.094,24 kWp |
| AC ισχύς | 9,90 MW |
| Φωτοβολταϊκό πλαίσιο | 38.256 x REC 290 TP2 |
| Απόδοση πλαισίου | 17,7% |
| Αντιστροφέας | 240 x Huawei 36KTL 15 x Huawei 33KTL-A |
| Μετασχηματιστής | 5 x 1.800 kVA 1 x 1.600 kVA |
| Σύστημα σύνδεσης | ZM2V – 20° - 3 modules portrait |
| Σύνδεση στο δίκτυο | 20 kV |



Εικόνα 11: Φωτογραφία από το φωτοβολταϊκό πάρκο Bourg d'Hourtin.

4.2 Επεξεργασία Δεδομένων και Θεωρητική Ανάλυση

Τα δεδομένα τεσσάρων ετών (2020-2023), όπως δόθηκαν από την εταιρεία BayWa r.e., συλλέχθηκαν σε διαστήματα 15 λεπτών και περιλάμβαναν τη θερμοκρασία, την παραγόμενη ισχύ, και την επικλινόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Η ακτινοβολία καταγραφόταν από δύο πυρανόμετρα τοποθετημένα σε διαφορετικές περιοχές του πάρκου, με γωνία κλίσης ίδια με αυτή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ώστε να αποτυπώνεται με ακρίβεια η ακτινοβολία που λαμβάνουν τα πλαίσια.

Κατά τη διάρκεια της συλλογής, παρατηρήθηκαν διαφορές στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των δύο πυρανόμετρων. Το δεύτερο πυρανόμετρο χρησιμοποιήθηκε ως κύρια πηγή δεδομένων σε περιπτώσεις όπου το πρώτο πυρανόμετρο βρισκόταν εκτός λειτουργίας ή παρουσίαζε μηδενικές μετρήσεις για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα. Επίσης, καταγράφηκαν περίοδοι κατά τις οποίες το πάρκο ήταν εκτός λειτουργίας λόγω προγραμματισμένης συντήρησης ή ακραίων καιρικών φαινομένων.

Για την ανάλυση, τα δεδομένα μετατράπηκαν σε ωριαία μέσω του υπολογισμού μέσων τιμών, κάτι που διευκόλυνε τη διαδικασία επεξεργασίας. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν μέθοδοι επεξεργασίας, όπως η γραμμική παρεμβολή, για την αντιμετώπιση ελλειπών ή μη έγκυρων τιμών σε περιπτώσεις που συναντήθηκε αστοχία του λογισμικού καταγραφής, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία του συνόλου δεδομένων.

Η εκπαίδευση του ψηφιακού διδύμου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των επεξεργασμένων ωριαίων δεδομένων των ετών 2022 και 2023, προσφέροντας ένα αξιόπιστο σύνολο εισόδου για την ανάπτυξη του μοντέλου.

| | | | | |
|---|-------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| Datum;"FR-PVG-BDH Bourg dHourtin | | | | |
| Plant Device | | | | |
| DC Leistung: Wechselrichter [kW]";"FR-PVG-BDH Bourg dHourtin | | | | |
| T03-P-t-t | | | | |
| Einstrahlungsleistung 01 [W/m ²];"FR-PVG-BDH Bourg dHourtin | | | | |
| T03-Ta | | | | |
| Temperatur 01 [°C]";"FR-PVG-BDH Bourg dHourtin | | | | |
| T06-P-t-t | | | | |
| Einstrahlungsleistung 01 [W/m ²]" | DC power: Inverter (kW) | Irradiation sensor 1 (W/m2) | Temperature (°C) | Irradiation sensor 2 (W/m2) |
| 01.01.2020 00:00 | 0 | 1.44 | 8.95 | 0.71 |
| 01.01.2020 00:15 | 0 | 1.33 | 9.15 | 0.78 |
| 01.01.2020 00:30 | 0 | 1.4 | 9.25 | 0.78 |
| 01.01.2020 00:45 | 0 | 1.33 | 9.22 | 0.64 |
| 01.01.2020 01:00 | 0 | 1.37 | 9.11 | 0.68 |

Εικόνα 12: Ενδεικτική ανάκτηση των δεδομένων του συστήματος.

Για τη συνέχιση της διαδικασίας, κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη μιας μεθόδου υπολογισμού της θεωρητικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και στις αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία (σε W/m^2) και τη θερμοκρασία (σε $^{\circ}C$), καθώς αυτοί οι δύο παράγοντες είναι οι κύριοι που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Ο υπολογισμός επικεντρώνεται στη μέτρηση της ισχύος που εισέρχεται στο άκρο συνεχούς ρεύματος (DC) του αντιστροφέα, πριν από τη μετατροπή της σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Αυτή η επιλογή θεωρήθηκε η πλέον ενδεδειγμένη, καθώς η ισχύς στο DC άκρο του αντιστροφέα είναι ήδη διαθέσιμη στα πραγματικά δεδομένα του φωτοβολταϊκού πάρκου. Έτσι, επιτρέπεται η άμεση σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών υπολογισμών και των πραγματικών μετρήσεων, ενισχύοντας τη βασιμότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Ο τρόπος υπολογισμού της παραγωγής ισχύος μέσω αυτής της μεθόδου περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Υπολογίζεται η διαφορά θερμοκρασίας (DT) καθώς τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εξαρτώνται από την θερμοκρασία λειτουργίας τους (T). Όπως έχει αναφερθεί, θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία αναφοράς ($25^{\circ}C$) οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, έτσι ορίζεται:

$$DT = T - 25 (^{\circ}C) \quad (4.1)$$

Ο συντελεστής θερμοκρασίας (TAF) είναι ένας παράγοντας για τον υπολογισμό της ισχύος κάθε πλαισίου. Προσαρμόζει την ονομαστική ισχύ κάθε πλαισίου στη συγκεκριμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Χρησιμοποιείται ο θερμοκρασιακός συντελεστής P_{mpp} (στον συγκεκριμένο τύπο πλαισίου $-0.36\%/^{\circ}C$) βοηθώντας έτσι στην ευκολότερη αποτίμηση της επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας στα πλαίσια του μοντέλου:

$$TAF = 1 + (P_{mpp} \cdot DT) \quad (4.2)$$

Ύστερα υπολογίζεται η απόδοση ανά πλαίσιο, πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή θερμοκρασίας (TAF) με την ονομαστική ισχύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου (290 Wp):

$$Power \text{ per panel} = 290 \cdot TAF \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συνολική παραγόμενη ισχύς συνεχούς ρεύματος (DC) μέσω του πολλαπλασιασμού της προσαρμοσμένης ισχύος ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο (Power per panel) με

τον συνολικό αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων στο πάρκο (Number of panels) και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα πλαίσια (Irradiance):

$$Total\ DC\ Output = Power\ per\ panel \cdot Number\ of\ panels \cdot Irradiance \quad (4.4)$$

Τέλος, η ισχύς προσαρμόζεται για τις απώλειες που προκύπτουν πριν από τη μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) στον αντιστροφέα. Ένα συνολικό ποσοστό κύριων απωλειών της τάξης του 16% καθορίστηκε βάσει της διαθέσιμης πληροφορίας από την εταιρεία που διαχειρίζεται το φωτοβολταϊκό πάρκο, καθώς και σύμφωνα με βιομηχανικά πρότυπα.

Συγκεκριμένα, οι απώλειες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Απώλειες από σκίαση: 6%
- Απώλειες από το έδαφος (σκόννη, ακαθαρσίες, χιονόπτωση, κ.λπ.): 4%
- Απώλειες από αντανάκλαση: 2%
- Απώλειες από ασυμβατότητες: 2%
- Απώλειες από καλωδίωση: 1%
- Λοιπές απώλειες: 1%

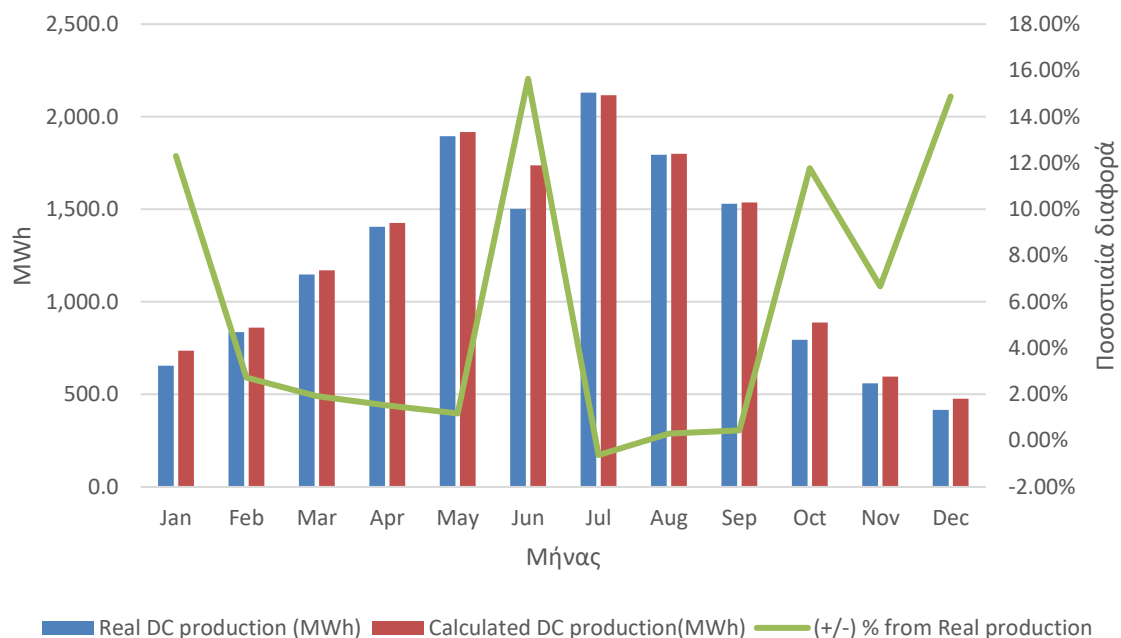
Αυτές οι τιμές αντιπροσωπεύουν τυπικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται ευρέως στη μελέτη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, διασφαλίζοντας την ακρίβεια των προσομοιώσεων και των υπολογισμών που βασίζονται στο μοντέλο:

$$After\ losses = Total\ DC\ Output \cdot (1 - 0.16) \quad (4.6)$$

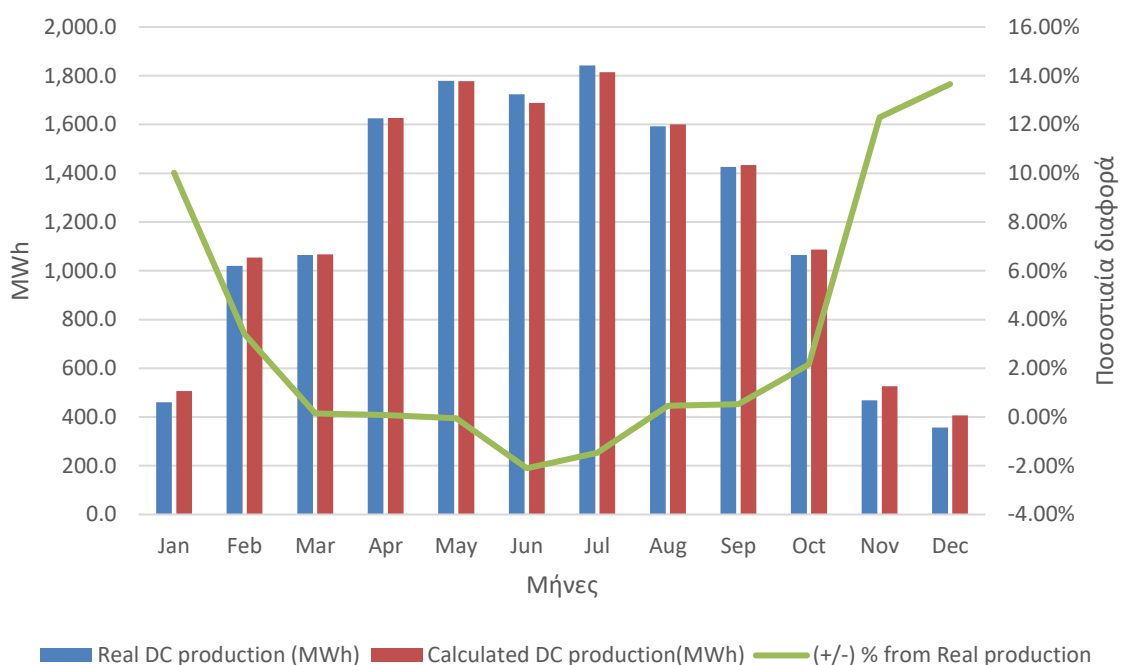
Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με τα πραγματικά δεδομένα παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου για τα έτη 2022 και 2023. Τα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, αποτυπώνουν μικρές διαφορές στους αριθμούς συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στη μέση απόκλιση μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και των υπολογισμών που προέκυψαν από τη μέθοδο αυτή.

Συγκεκριμένα, για το έτος 2022, η πραγματική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου ανήλθε σε 14,664.6 MWh, ενώ η υπολογισμένη παραγωγή, βάσει του προτεινόμενου αλγορίθμου που στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και στις δοσμένες παραδοχές για απώλειες, ήταν 15,260.2 MWh, οδηγώντας σε συνολική απόκλιση 4.06%. Παράλληλα, η μέση μηνιαία απόκλιση κατά τη διάρκεια του έτους υπολογίστηκε στο 5,6%.

Για το έτος 2023, η πραγματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του πάρκου ήταν 14,426.1 MWh, ενώ η υπολογισμένη παραγωγή ανήλθε σε 14,589.6 MWh, με αποτέλεσμα μία συνολική απόκλιση 1,13%. Επιπλέον, η μέση μηνιαία απόκλιση κατά τη διάρκεια του έτους ήταν μόλις 3,1%.



Σχήμα 4.1. Σύγκριση πραγματικής και υπολογισμένης παραγωγής ενέργειας – 2022.



Σχήμα 4.2. Σύγκριση πραγματικής και υπολογισμένης παραγωγής ενέργειας – 2023.

4.3 ARMAX Μοντέλο

4.3.1 Θεωρητική περιγραφή

Στη στατιστική ανάλυση χρονοσειρών, το αυτοπαλινδρομικό μοντέλο κινητού μέσου όρου (Autoregressive-Moving-Average, ARMA model) χρησιμοποιείται για την περιγραφή μιας (ασθενώς) στάσιμης στοχαστικής διαδικασίας, καθώς και για την πρόβλεψη δυναμικών μεταβλητών. Το ARMA βασίζεται σε δύο βασικές συνιστώσες: τους αυτοπαλινδρομικούς όρους (AR) που περιγράφουν τη σχέση μιας μεταβλητής με τις προγενέστερες τιμές της, και τους όρους κινητού μέσου όρου (MA) που αντιπροσωπεύουν την εξάρτηση από τις προηγούμενες τιμές θορύβου.

Το μοντέλο ARMAX επεκτείνει το ARMA, ενσωματώνοντας εξωγενείς μεταβλητές (X) στη δομή του μοντέλου. Αυτή η επέκταση επιτρέπει στο ARMAX να μοντελοποιεί όχι μόνο τη δυναμική συμπεριφορά της κύριας μεταβλητής ενδιαφέροντος, αλλά και τη σχέση της με άλλες επεξηγηματικές μεταβλητές, παρέχοντας έτσι ένα ευέλικτο εργαλείο για την ανάλυση και την πρόβλεψη συστημάτων με πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις.

Το ARMAX είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν οι μελλοντικές τιμές της μεταβλητής ενδιαφέροντος εξαρτώνται τόσο από τις προηγούμενες τιμές της ίδιας της μεταβλητής, όσο και από τις παλιές τιμές άλλων σχετικών παραγόντων. Στην πράξη, το μοντέλο προσαρμόζεται στα δεδομένα μέσω της εκτίμησης των παραμέτρων AR, MA, και X.

Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνει τη βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα, καθιστώντας το ικανό να χρησιμοποιηθεί τόσο για την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών, όσο και για την ανάλυση της σχέσης μεταξύ της μεταβλητής ενδιαφέροντος και των εξωγενών παραμέτρων. Επιπλέον, το ARMAX μοντέλο έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως στην ενέργεια, τα οικονομικά, και την πρόβλεψη καιρού, όπου οι χρονοσειρές επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες.

Το αυτοπαλινδρομικό μοντέλο (AR) περιγράφεται και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4.6)$$

όπου, $\varphi_1, \dots, \varphi_p$ είναι οι παράμετροι του μοντέλου και η τυχαία μεταβλητή ε_t είναι ο λευκός θόρυβος.

Το μοντέλο κινούμενου μέσου όρου (MA) ορίζεται ως εξής:

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (4.7)$$

όπου, $\theta_1, \dots, \theta_q$ είναι οι παράμετροι του μοντέλου και $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_t$ μεταβλητές του λευκού θορύβου συνήθως εκφρασμένες με τυχαίες μεταβλητές.

Συνολικά το ARMA μοντέλο εκφράζεται ως:

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4.8)$$

Με τον τύπο ARMA (p, q) αναφέρεται ένα μοντέλο με p αυτοπαλινδρομικούς όρους και q όρους κινούμενου μέσου.

Όπως αναφέρθηκε το ARMAX μοντέλο είναι μία υποκατηγορία του ARMA μοντέλου. Οι εξωγενείς παράγοντες εισόδου, δηλαδή οι ανεξάρτητες μεταβλητές, διαμορφώνουν το τελικό μοντέλο ARMAX (p, q, b), όπου p αντιπροσωπεύει τους αυτοπαλινδρομικούς όρους, q τους όρους κινητού μέσου, και b τους όρους εξωγενών παραγόντων εισόδου.

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} + \sum_{i=1}^b n_i d_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4.9)$$

όπου, n_1, \dots, n_b είναι οι παράμετροι της εξωγενούς εισόδου d_t .

Το μοντέλο ARMAX περιγράφεται επίσης με τον ακόλουθο τύπο [23]:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t) \quad (4.10)$$

όπου,

- $y(t)$, η έξοδος του συστήματος,
- $u(t)$, η είσοδος του συστήματος,
- $e(t)$, ο θόρυβος του συστήματος.

Επίσης, οι παράμετροι $A(z)$, $B(z)$ και $C(z)$ είναι πολυωνυμικοί και ορίζονται ως εξής:

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (4.11)$$

$$B(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \quad (4.12)$$

$$C(z) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c} \quad (4.13)$$

Η εφαρμογή των ARMAX μοντέλων παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για την αναπαράσταση και επίλυση προβλημάτων σε διάφορα πεδία. Παρά την ευελιξία και την ακρίβεια που προσφέρουν, η μαθηματική διαχείριση αυτών των μοντέλων είναι συχνά σύνθετη λόγω των απαιτήσεων στη διαχείριση χρονικών σειρών, την παλινδρόμηση και την εκτίμηση παραμέτρων.

Για την αποτελεσματική επίλυση και υλοποίηση ARMAX μοντέλων, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα προγραμματιστικά περιβάλλοντα, όπως το MATLAB και η Python. Το MATLAB, με τις ενσωματωμένες βιβλιοθήκες του, όπως το System Identification Toolbox, προσφέρει ολοκληρωμένα εργαλεία για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση συστημάτων. Από την άλλη, η Python, μέσω δικών της βιβλιοθηκών παρέχει μια ευέλικτη και οικονομικά προσιτή εναλλακτική, με μεγάλη κοινότητα υποστήριξης και δυνατότητες προσαρμογής.

Η χρήση αυτών των περιβαλλόντων επιτρέπει την αποτελεσματική υλοποίηση των πολύπλοκων μαθηματικών διαδικασιών που απαιτούνται, καθιστώντας δυνατή την επίλυση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας και τη βελτίωση της ακρίβειας στις προβλέψεις.

4.3.2 Εφαρμογή και Ρύθμιση

Για την εφαρμογή του μοντέλου εκπαίδευσης στο περιβάλλον της MATLAB, ακολουθήθηκε αρχικά η μεθοδολογία που έχει περιγραφεί παραπάνω, αξιοποιώντας τις συναρτήσεις της βιβλιοθήκης του MATLAB, όπως τις `iddata` και `armax`. Κεντρικό στοιχείο του προγράμματος εκπαίδευσης ήταν η χρήση αυτών των συναρτήσεων για την ορθολογική προετοιμασία και ανάλυση των δεδομένων, απαραίτητων για την δημιουργία του ARMAX μοντέλου. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση `iddata` χρησιμεύει στην κατασκευή ενός αντικειμένου δεδομένων που περιλαμβάνει τόσο τις εισόδους όσο και τις εξόδους του συστήματος, εξασφαλίζοντας την ενοποίηση αυτών των δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία του μοντέλου. Η χρήση της `iddata` κρίνεται απαραίτητη για τη σωστή ενοποίηση των δεδομένων εισόδου και εξόδου, που είναι θεμελιώδη για την επίτευξη του επιθυμητού μοντέλου πρόβλεψης.

Μετά τη δημιουργία του αντικειμένου δεδομένων, τα δεδομένα διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα δεδομένα εκπαίδευσης (`training data`) και τα δεδομένα επαλήθευσης (`validation data`), τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς του

εκπαιδευμένου μοντέλου. Ο διαχωρισμός των δεδομένων πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς το ποσοστό κατανομής αυτών των δεδομένων έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του μοντέλου. Ένα ποσοστό διαχωρισμού κοντά στο 50% μπορεί να σημαίνει ότι το μοντέλο δεν εκπαιδεύεται σωστά, ενώ ένα ποσοστό κοντά στο 100% μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική εκπαίδευση και να μειώσει την ικανότητα του μοντέλου να γενικεύει σε άγνωστες συνθήκες.

Η βασική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του ARMAX μοντέλου είναι η `armax`, η οποία επιτρέπει την ανάπτυξη ενός μοντέλου που ενσωματώνει προηγούμενες τιμές εξόδου, εισόδου και θορύβου ή σφαλμάτων που επηρεάζουν τις εξόδους του συστήματος. Για την πλήρη λειτουργικότητα αυτής της συνάρτησης, είναι απαραίτητο να οριστούν οι παράμετροι n_a , n_b , n_c και n_k . Κάθε παράμετρος έχει συγκεκριμένη σημασία και επιρροή στη συμπεριφορά του μοντέλου, καθώς εξειδικεύει τον αριθμό των προηγούμενων τιμών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την έξοδο, την είσοδο, τον θόρυβο και το χρόνο καθυστέρησης αντίστοιχα. Συνοπτικά:

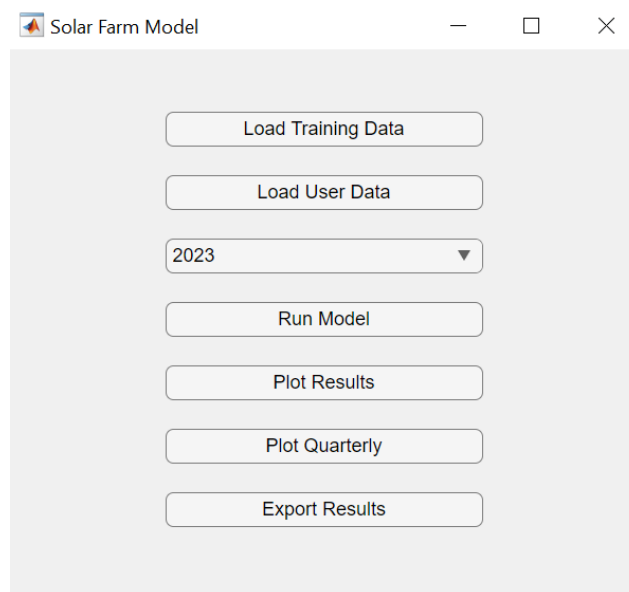
- n_a : Ο αριθμός των προηγούμενων τιμών εξόδου που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της τρέχουσας εξόδου.
- n_b : Ο αριθμός των προηγούμενων τιμών εισόδου που λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση της τρέχουσας εξόδου.
- n_c : Ο αριθμός των παραμέτρων θορύβου που ενσωματώνονται στο μοντέλο.
- n_k : Ο χρόνος καθυστέρησης κάθε εισόδου πριν αυτή επηρεάσει την έξοδο.

Η επιλογή των τιμών για αυτές τις παραμέτρους πρέπει να γίνει με προσεκτική ανάλυση και δοκιμές, καθώς επηρεάζουν την απόδοση και την ακρίβεια του μοντέλου. Για παράδειγμα, ένας υψηλός αριθμός παραμέτρων (π.χ. 12, σε ωριαία δεδομένα σημαίνει ότι το μοντέλο δέχεται τις τελευταίες 12 ώρες παραγωγής) μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου σε συστήματα με περιορισμένα δεδομένα, ενώ σε συστήματα με μεγάλο όγκο δεδομένων, αυτό μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις στη διάγνωση των γρήγορων μεταβολών των εισόδων. Από την άλλη πλευρά, μικρός αριθμός παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε μη λειτουργική «εκμάθηση» των συμπεριφορών του μοντέλου ειδικά όταν υπάρχει μικρός αριθμός δεδομένων. Ωστόσο, ένας μικρός αριθμός παραμέτρων μπορεί να εφαρμοστεί σε περίπλοκα συστήματα με συχνή και μεγάλη αλλαγή στις τιμές εισόδου.

Ακολούθως, δημιουργήθηκε το δεύτερο σημαντικό στάδιο του κώδικα, δηλαδή η πρόβλεψη των δεδομένων εξόδου με βάση τη συμπεριφορά του εκπαιδευμένου μοντέλου και τα νέα δεδομένα εισόδου. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός νέου αντικειμένου `iddata`, στο οποίο τα δεδομένα εξόδου παραμένουν κενά, προκειμένου να προσομοιωθεί η λειτουργία του μοντέλου

σε συνθήκες άγνωστης εξόδου. Μέσω της συνάρτησης predict του MATLAB, το εκπαιδευμένο μοντέλο προσομοιώθηκε σε συνθήκες για τις οποίες τα δεδομένα εξόδου δεν είναι διαθέσιμα, επιτρέποντας έτσι την αξιολόγηση της ικανότητας του μοντέλου να προβλέπει νέα δεδομένα.

Τέλος, δημιουργήθηκε ένα απλό γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Κύριος σκοπός ήταν η ευκολότερη μεταμόρφωση των δεδομένων εκπαίδευσης και κυρίως των δεδομένων για τα οποία το μοντέλο έκανε την προσομοίωση. Επειδή τα ωριαία δεδομένα είναι σε μορφή .xlsx είναι απαραίτητη είτε η εισαγωγή τους χειροκίνητα σε μορφή πίνακα, κάτι το οποίο θα έχει ως συνέπεια την δημιουργία μεγάλων καθυστερήσεων στον αλγόριθμο, ή την εισαγωγή τους απευθείας σαν αρχείο .xlsx στον κώδικα. Επιλέχθηκε το δεύτερο και η δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει αρχείο εκπαίδευσης, αρχείο συνθηκών προσομοίωσης και την επιλογή έτους (για τον έλεγχο δίσεκτου ή μη έτους). Ύστερα, μπορεί ο χρήστης να επιλέξει να εκκινήσει τον αλγόριθμο και να εκτυπώσει αποτελέσματα σχετικά με το ARMAX μοντέλο πριν τις διορθώσεις, την προσομοίωση του έτους που έχει επιλέξει με τις διορθώσεις που έγιναν καθώς και τρεις τριμηνιαίες συγκρίσεις μεταξύ πραγματικής και προβλεπόμενης παραγωγής ενέργειας. Έχουν επίσης προστεθεί σημεία στα οποία ελέγχεται αν ο χρήστης έχει προσθέσει σωστή μορφή δεδομένων.



Εικόνα 13: Γραφικό περιβάλλον μοντέλου.

4.4 Αντιμετώπιση Αποκλίσεων και Βελτίωση Ακρίβειας

Οι πρώτες προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν κατά την ανάπτυξη του μοντέλου αφορούσαν την ποιότητα και την πληρότητα των δεδομένων εισόδου. Σε ωριαία δεδομένα που καλύπτουν χρονική περίοδο αρκετών ετών, είναι αναμενόμενο να εμφανίζονται κενά ή σφάλματα για διάφορους λόγους, όπως ελαττωματικός εξοπλισμός, συντήρηση αισθητήρων ή εσφαλμένη καταχώριση στη βάση δεδομένων. Μετά από ενδελεχή ανάλυση και αξιολόγηση της φύσης αυτών των σφαλμάτων, αποφασίστηκε η χρήση γραμμικής παρεμβολής για την αντικατάσταση των κενών δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπήρχαν σαφείς ενδείξεις μη λειτουργίας του πάρκου (π.χ., όταν μικρά κενά εμφανίζονταν μόνο στον αισθητήρα θερμοκρασίας ή άλλους βοηθητικούς αισθητήρες). Για περιορισμένο αριθμό συνεχόμενων κενών γραμμών, η γραμμική παρεμβολή κρίθηκε αποτελεσματική. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου τα κενά δεδομένα ήταν εκτεταμένα, η μέθοδος αυτή δεν θεωρήθηκε κατάλληλη, καθώς θα μπορούσε να εισάγει σημαντικά σφάλματα.

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα για τη βελτίωση της ακρίβειας ήταν η αντιμετώπιση των καταλοίπων (residuals), δηλαδή των διαφορών μεταξύ της πραγματικής παραγωγής που προβλέπει το φωτοβολταϊκό μοντέλο και των αποτελεσμάτων του υβριδικού μοντέλου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένα εργαλείο μηχανικής μάθησης (machine learning) από τη βιβλιοθήκη του MATLAB: ένα αναδρομικό δέντρο παλινδρόμησης (regression tree). Το regression tree αποτελεί έναν τύπο δέντρου αποφάσεων που διαιρεί επαναληπτικά τα δεδομένα σε μικρότερα υποσύνολα με βάση συγκεκριμένους κανόνες, μέχρι να φτάσει σε μια τελική πρόβλεψη. Το βασικό πλεονέκτημά του είναι η ικανότητά του να εντοπίζει πολύπλοκες και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών εισόδου και της εξόδου.

Συνδυάζοντας την είσοδο από το ARMAX μοντέλο με την τεχνική του regression tree, κατέστη εφικτό να μειωθούν σημαντικά οι αποκλίσεις στις προβλέψεις, γεγονός που οδήγησε σε αισθητή βελτίωση της συνολικής ακρίβειας του υβριδικού μοντέλου. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία επέτρεψε την ενσωμάτωση επιπλέον μη γραμμικών χαρακτηριστικών, εξασφαλίζοντας μια πιο ρεαλιστική προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάρκου. Κατά συνέπεια, το υβριδικό μοντέλο παρέχει πιο αξιόπιστες προβλέψεις, ενισχύοντας την αξιοπιστία του συστήματος για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Για την πληρέστερη αξιολόγηση της ακρίβειας και της απόδοσης του συστήματος, εισήχθησαν εξειδικευμένες μετρικές αξιολόγησης σφαλμάτων (error metrics), όπως το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και ο συντελεστής προσδιορισμού

(R^2). Αυτές οι μετρικές παρέχουν ποσοτικά δεδομένα που επιτρέπουν τη συγκριτική ανάλυση των διαφόρων μεθόδων, διευκολύνοντας τη διαδικασία βελτιστοποίησης του μοντέλου. Πιο αναλυτικά:

- I. Ο R^2 (R-squared) είναι δείκτης που μετρά την αναλογία της συνολικής διακύμανσης των πραγματικών δεδομένων που εξηγείται από το μοντέλο. Με απλά λόγια μετράει πόσο καλά προβλέπει το μοντέλο τις πραγματικές τιμές του συστήματος. Παίρνει τιμές από 0 έως το 1, με το 0 να σημαίνει κακή πρόβλεψη και το 1 να σημαίνει απόλυτη ταύτιση. Ορίζεται ως εξής:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (4.14)$$

όπου:

- $SS_{res} = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)$, με y_i τις πραγματικές τιμές ανά στιγμή i και \hat{y}_i τις προβλεπόμενες από το μοντέλο ανά στιγμή i ,
- $SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})$, με y_i τις πραγματικές τιμές ανά στιγμή i και \bar{y} την μέση τιμή των πραγματικών τιμών.

- II. Ο δείκτης RMSE (Root Mean Squared Error – Μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε ρίζα) μετράει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των πραγματικών τιμών y_i και των προβλεπόμενων τιμών. Δίνει έμφαση στα μεγαλύτερα σφάλματα λόγω του τετραγωνισμού των διαφορών και επομένως βοηθάει στην εύρεση της αντιμετώπισης μεγάλων αποκλίσεων. Ορίζεται ως εξής:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.15)$$

- III. Ο δείκτης MAE (Mean Absolute Error – Μέσο απόλυτο σφάλμα) μετράει το μέσο όρο των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων μεταξύ των πραγματικών (y_i) και των προβλεπόμενων (\hat{y}_i) τιμών. Μετράται έτσι η απόκλιση μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών τιμών του μοντέλου. Δεν επηρεάζεται τόσο στις μεγάλες αποκλίσεις. Ορίζεται ως εξής:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_i |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.16)$$

5. Προσομοίωση και Αποτελέσματα

5.1 Εκπαίδευση του Μοντέλου με Ιστορικά Δεδομένα

Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε όπως με ωριαία δεδομένα δύο ετών. Ως δεδομένα εισόδου του συστήματος χρησιμοποιούνται οι ωριαίες τιμές δύο ετών για τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, την υπολογισμένη παραγωγή (όπως αναλύθηκε προηγουμένως) και μία μεταβλητή που υποδεικνύει τον μήνα στον οποίο ανήκει η αντίστοιχη ώρα για την καλύτερη εκπαίδευση της συμπεριφοράς του μοντέλου. Ως έξοδος χρησιμοποιείται η πραγματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πάρκου. Αφού τα δεδομένα ρυθμιστούν μέσω γραμμικής παρεμβολής, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, χωρίζονται σε ένα ποσοστό εκπαίδευσης και ένα ποσοστό επαλήθευσης.

Μετά από σειρά προσομοιώσεων, το μοντέλο ρυθμίστηκε έτσι ώστε να χρησιμοποιεί το 68% των δεδομένων για την εκπαίδευση και το υπόλοιπο 32% για την επαλήθευση και τον έλεγχο του. Αυτό το ποσοστό παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό ακρίβειας κατά την επαλήθευση του μοντέλου. Να σημειωθεί ότι το ποσοστό ακρίβειας 90,19% είναι το ποσοστό πριν από οποιαδήποτε βελτίωση μέσω διόρθωσης των σφαλμάτων και πως είναι το μέγιστο δυνατό ποσοστό ακρίβειας που συναντήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης του μοντέλου στη MATLAB, απαιτήθηκε η προσεκτική παραμετροποίηση της συνάρτησης ARMAX και, κατ' επέκταση, του συνολικού μοντέλου, ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη ακρίβεια και απόδοση. Οι βασικές παράμετροι του μοντέλου, δηλαδή οι n_a (αριθμός προηγούμενων τιμών εξόδου), n_b (αριθμός προηγούμενων τιμών εισόδου), n_c (παράμετρος θορύβου) και n_k (καθυστέρηση εισόδου), τροποποιήθηκαν επανειλημμένα μέσα από μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος. Στόχος ήταν η εύρεση των ιδανικών τιμών που θα οδηγούσαν στη βέλτιστη προσαρμογή μεταξύ των πραγματικών και προβλεπόμενων δεδομένων.

Μετά από εκτεταμένες δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι για τον δείκτη n_a , η καλύτερη τιμή ήταν η μία ώρα, κάτι που σημαίνει πως το σύστημα επηρεάζεται κυρίως από την πιο πρόσφατη τιμή εξόδου. Παρομοίως, οι βέλτιστες τιμές για τον δείκτη n_b , που αναφέρεται στις προηγούμενες εισόδους (όπως η θερμοκρασία, η μεταβλητή που δείχνει τον μήνα της μέτρησης, η ηλιακή ακτινοβολία και η υπολογισμένη παραγωγή ενέργειας), καθώς και για τον δείκτη n_c , που σχετίζεται με τον θόρυβο του συστήματος, βρέθηκε ότι αντιστοιχούν επίσης σε μία προηγούμενη ωριαία τιμή.

Όσον αφορά τις καθυστερήσεις εισόδου (δείκτης n_k), κρίθηκε αποδοτικότερο να μην υπάρχει καθυστέρηση στις παραμέτρους της θερμοκρασίας, της μηνιαίας μεταβλητής και της υπολογισμένης παραγωγής ενέργειας, γεγονός που υποδεικνύει ότι το σύστημα επηρεάζεται άμεσα από τις τρέχουσες τιμές αυτών των μεταβλητών. Ωστόσο, για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, βρέθηκε ότι μια καθυστέρηση μίας ώρας οδηγεί σε πιο ακριβείς προβλέψεις, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη χρονικής αδράνειας στην επίδρασή της στο σύστημα.

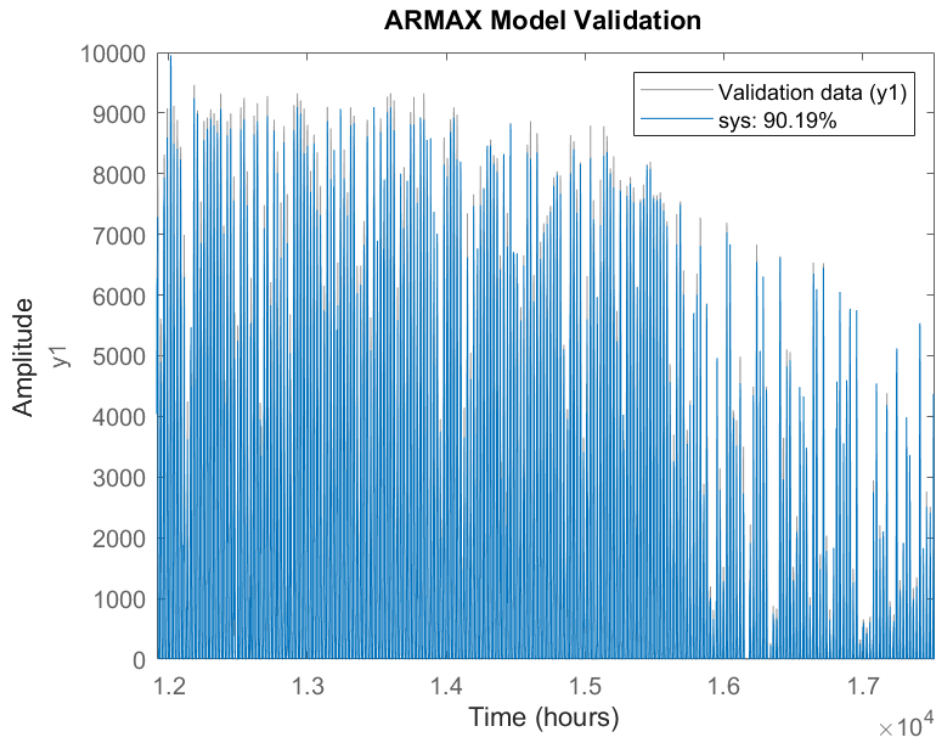
Έτσι, οι παράμετροι του μοντέλου διαμορφώνονται ως εξής:

- $n_a = 1$
- $n_b = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$
- $n_c = 1$
- $n_k = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$

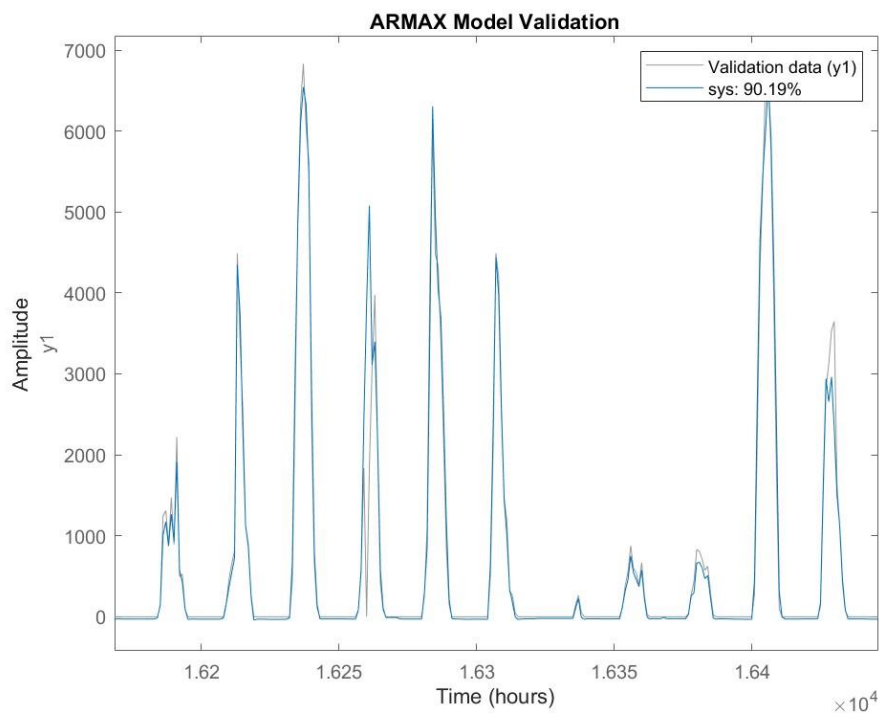
Ειδικότερα, οι δείκτες n_b και n_k περιγράφουν τον πίνακα εισόδου του συστήματος, ο οποίος αποτελείται από τις εξής παραμέτρους: θερμοκρασία, προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, υπολογισμένη παραγωγή ενέργειας και μηνιαία μεταβλητή.

Η παραπάνω διαδικασία παραμετροποίησης αποτέλεσε κρίσιμο στάδιο για την ανάπτυξη ενός μοντέλου με υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης και βέλτιστη λειτουργικότητα, διασφαλίζοντας τη δυνατότητα του συστήματος να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις απαιτήσεις του προβλεπτικού περιβάλλοντος.

Στο Σχήμα 5.1 με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι πραγματικές τιμές της παραγωγής ενέργειας, ενώ με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι προβλέψεις της παραγωγής από το μοντέλο. Είναι εμφανές, τόσο από το ποσοστό ακρίβειας του μοντέλου (90,19%) όσο και από την οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων, ότι το μοντέλο αποδίδει ικανοποιητικά. Στον κάθετο άξονα βρίσκεται η ισχύς σε kW και στον οριζόντιο οι ώρες του χρόνου. Το συγκεκριμένο σχήμα προκύπτει από τα δεδομένα επαλήθευσης όπως εξηγήθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.1. Επαλήθευση του μοντέλου ARMAX.



Σχήμα 5.2. Λεπτομερή αποτελέσματα από την επαλήθευση του μοντέλου.

Στην πιο λεπτομερή απεικόνιση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2 διακρίνεται ξεκάθαρα η σωστή συμπεριφορά του μοντέλου, καθώς οι προβλέψεις του ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τις πραγματικές τιμές της παραγωγής. Σε γενικές γραμμές, το μοντέλο καταφέρνει να αναπαραγάγει την πραγματική παραγωγή με παρόμοιο τρόπο, γεγονός που αποδεικνύει την αξιοπιστία του για τις περισσότερες περιπτώσεις.

Ωστόσο, παρατηρούνται μερικά εμφανή σημεία όπου η προβλεπόμενη παραγωγή αποκλίνει από την πραγματική. Αυτές οι αποκλίσεις, αν και λίγες, αναγνωρίστηκαν και αντιμετωπίστηκαν μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας βελτιστοποίησης, η οποία στοχεύει στη μείωση των διαφορών μεταξύ των πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών, ενισχύοντας την ακρίβεια του μοντέλου.

Η συνολική αξιολόγηση υποδεικνύει ότι το αρχικό μοντέλο όχι μόνο είναι λειτουργικό, αλλά και αποτελεί μια αξιόπιστη βάση εργαλείου για την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας.

5.2 Προσομοίωση με Γνωστά Δεδομένα

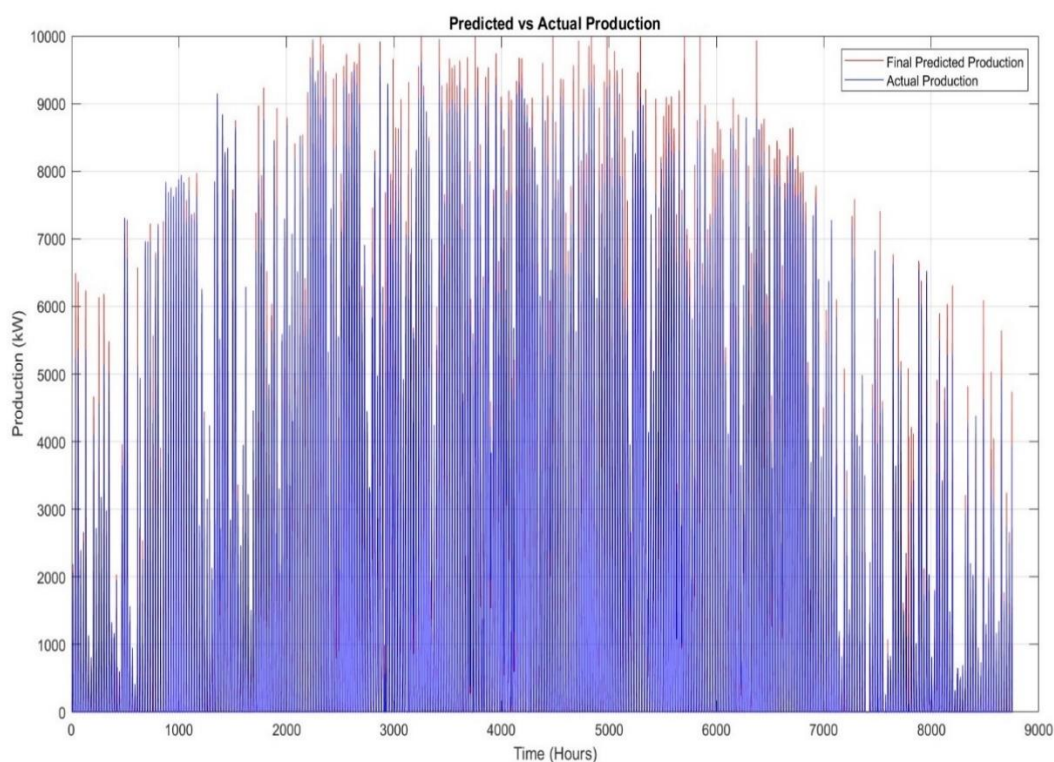
Σε αυτό το κεφάλαιο προσομοιώνεται το ARMAX μοντέλο χρησιμοποιώντας δεδομένα που ήδη γνωρίζει, εφαρμόζοντας παράλληλα τις βελτιστοποιήσεις για τη μείωση των αποκλίσεων που έχουν προηγουμένως αναφερθεί. Ειδικότερα, τα «άγνωστα» δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μοντέλου αφορούν το έτος 2023. Αν και το μοντέλο έχει ήδη εκπαιδευτεί σε δεδομένα από τα έτη 2022 και 2023, η επιλογή αυτών των δεδομένων παρέχει ένα πλαίσιο δοκιμής που συνδυάζει την πρόβλεψη και την επιβεβαίωση της απόδοσης.

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση, όπως και στις επόμενες, εφαρμόζονται οι προηγμένες μέθοδοι βελτιστοποίησης και αντιμετώπισης αποκλίσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν τεχνικές μηχανικής μάθησης. Συγκεκριμένα, η χρήση του αναδρομικού δέντρου αποφάσεων επιτρέπει την εντοπισμό και διόρθωση των αποκλίσεων στις τιμές εξόδου, συμβάλλοντας στην πιο αξιόπιστη πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό πάρκο.

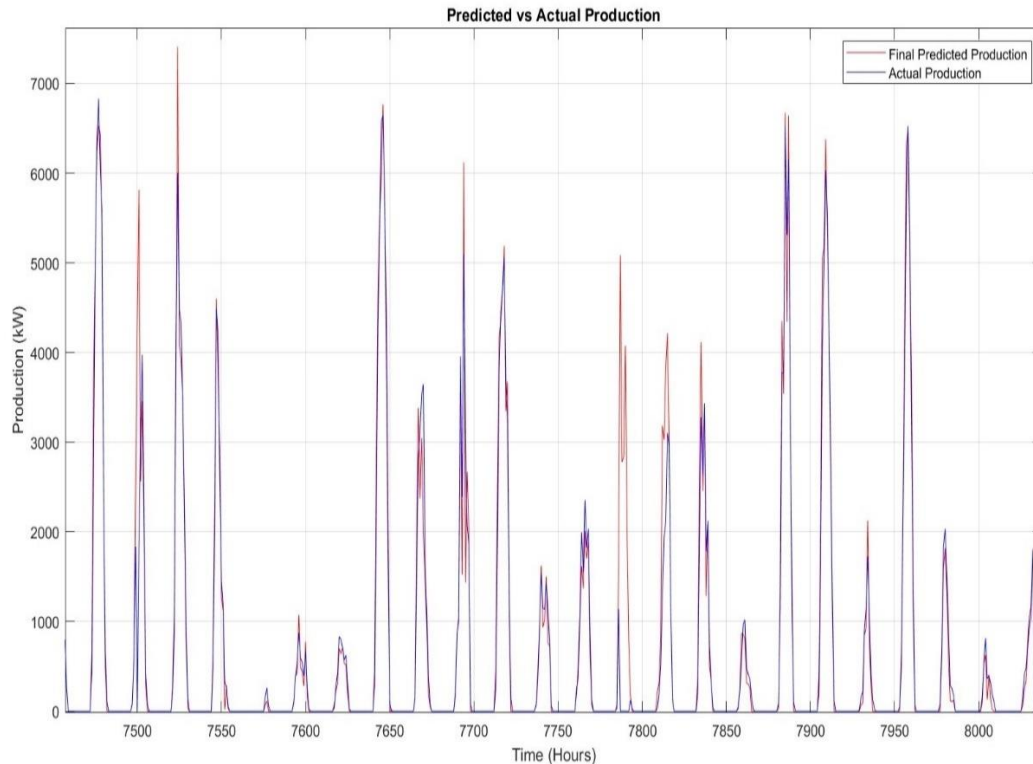
Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η σύγκριση της προβλεπόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το ARMAX μοντέλο με την πραγματική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου. Όπως φαίνεται στο γράφημα, το μοντέλο επιτυγχάνει καλή απεικόνιση της πραγματικής παραγωγής, με το κόκκινο χρώμα (προβλέψεις) να ακολουθεί στενά τις πραγματικές τιμές (μπλε χρώμα). Οι διαφορές που εντοπίζονται είναι κυρίως σε μεμονωμένες αιχμές (spikes) όπου το μοντέλο

υπερβάλλει ή υποεκτιμά την παραγωγή, καθώς και σε κάποιες φθινοπωρινές τιμές (Σχήμα 5.4), κατά τις οποίες το πάρκο παρήγαγε λιγότερη ενέργεια από ό,τι υπολόγιζε το μοντέλο.

Οι διαφοροποιήσεις αυτές αναμένεται να αναλυθούν με περισσότερες λεπτομέρειες στα επόμενα γραφήματα, ώστε να εντοπιστούν τα αίτια και οι επιδράσεις τους στη συνολική απόδοση του μοντέλου. Η κατανόηση αυτών των διαφορών αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του μοντέλου πρόβλεψης.



Σχήμα 5.3. Σύγκριση πραγματικής παραγωγής και παραγωγής μοντέλου – 2023.



Σχήμα 5.4. Διαφορές μεταξύ πρόβλεψης και πραγματικής παραγωγής – 2023.

Τα αποτελέσματα των μετρητικών για τα λάθη και την ακρίβεια του μοντέλου αποδεικνύονται ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται οι κύριοι δείκτες αξιολόγησης των σφαλμάτων, επιβεβαιώνοντας την ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει με ακρίβεια. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 , που εκφράζει το ποσοστό αντιστοιχίας μεταξύ των πραγματικών τιμών και των προβλέψεων του μοντέλου, επιτυγχάνει την εντυπωσιακή τιμή του 98,44%, αποδεικνύοντας ότι η πλειονοπία των δεδομένων αναπαρίσταται επαρκώς από το μοντέλο.

Παράλληλα, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) ανέρχεται σε 317,11 kW, που αντιστοιχεί μόλις στο 2,86% της ονομαστικής ισχύος του πάρκου. Το μέσο απόλυτο λάθος (MAE) είναι ακόμη χαμηλότερο, στις 144,52 kW, αποτελώντας μόλις το 1,3% της συνολικής ισχύος. Αυτές οι τιμές

δείχνουν πως το μοντέλο παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια, ειδικά σε δεδομένα που έχει ήδη συναντήσει κατά τη φάση της εκπαίδευσης.

R^2 : 0.9844

Hybrid Model Root Mean Squared Error (RMSE): 317.1126

Hybrid Model Mean Absolute Error (MAE): 144.5211

Εικόνα 14: Μετρητικές προσομοίωσης έτους 2023.

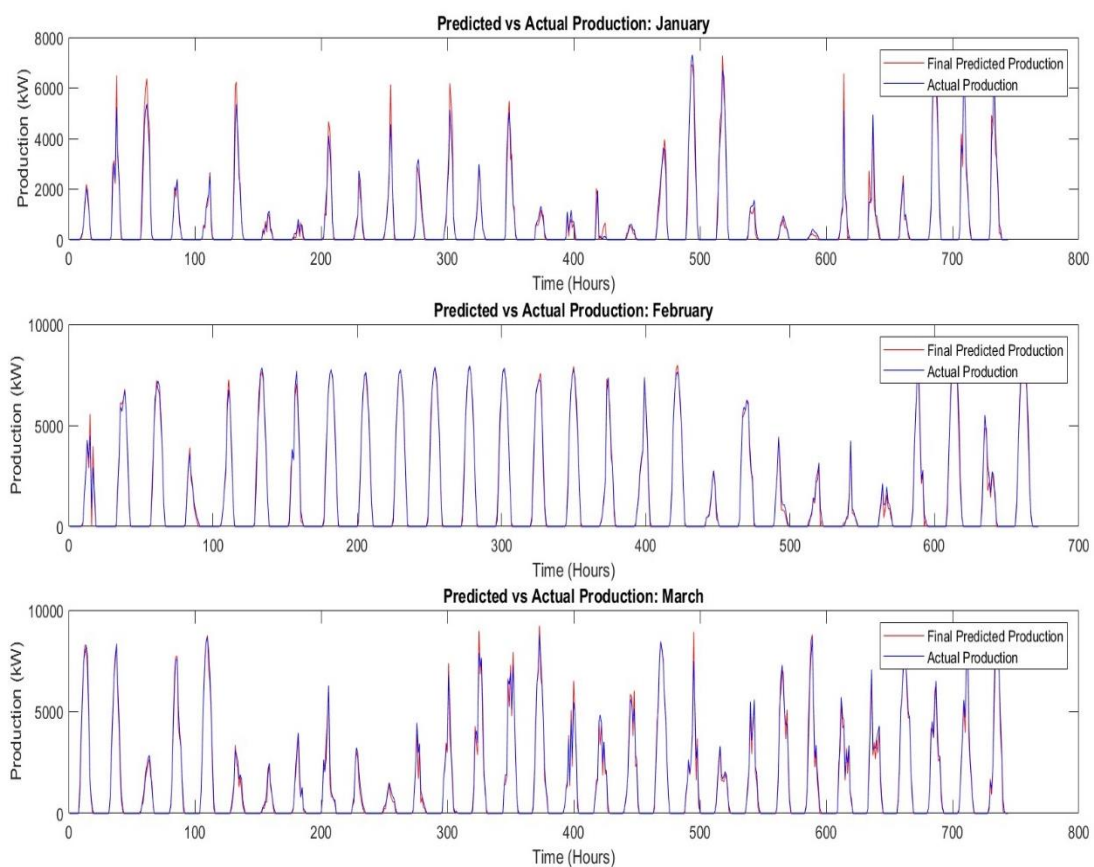
Στα Σχήματα 5.5 – 5.8 παρουσιάζονται λεπτομερώς οι ενεργειακές παραγωγές του φωτοβολταϊκού πάρκου, ανά τρίμηνο, συγκριτικά με τις προβλέψεις του μοντέλου. Η ανάλυση αυτή προσφέρει μια πιο ενδελεχή κατανόηση της απόδοσης του μοντέλου σε διάφορες εποχές του έτους, λαμβάνοντας υπόψη τις εποχιακές διακυμάνσεις και τις καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν την παραγωγή. Σε γενικές γραμμές, το μοντέλο καταφέρνει να ακολουθήσει ικανοποιητικά την πραγματική παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους, καταγράφοντας μικρές αποκλίσεις μόνο σε συγκεκριμένες περιόδους. Αυτές οι αποκλίσεις ενδέχεται να οφείλονται σε μη αναμενόμενες συνθήκες, όπως απρόβλεπτη συντήρηση, ξαφνικές αλλαγές στον καιρό ή αποκλίσεις στα μετρητικά δεδομένα. Κάθε μήνας θα σχολιαστεί ξεχωριστά, εστιάζοντας στα μοτίβα που εντοπίζονται, ώστε να αναδειχθούν πιθανές αδυναμίες του μοντέλου αλλά και περιοχές όπου αποδίδει ιδιαίτερα καλά. Η ανάλυση αυτή είναι απαραίτητη για την αναγνώριση των σημείων που απαιτούν βελτίωση, ενώ παράλληλα παρέχει πολύτιμα δεδομένα για την περαιτέρω βελτιστοποίηση και προσαρμογή του μοντέλου στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του πάρκου.

Κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου, το μοντέλο εμφανίζεται ελαφρώς πιο αισιόδοξο στις προβλέψεις του, με τις αιχμές παραγωγής να ξεπερνούν σε λίγες περιπτώσεις τις πραγματικές τιμές. Πιθανή αιτία για αυτό να είναι η μειωμένη (συγκριτικά με την προβλεπόμενη) πραγματική απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου σε δυσμενείς συνθήκες. Παρόλα αυτά, η συνολική του απόδοση κρίνεται αρκετά καλή, καθώς ακολουθεί στενά τις διακυμάνσεις της πραγματικής παραγωγής.

Τον Φεβρουάριο, η συσχέτιση μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής εμφανίζεται ακόμα πιο σταθερή. Το μοντέλο φαίνεται να υιοθετεί μια πιο συγκρατημένη προσέγγιση, με τις προβλέψεις του να παραμένουν κοντά στις πραγματικές τιμές, μειώνοντας έτσι

τις αποκλίσεις. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει η, όχι και τόσο συνηθισμένη για Φεβρουάριο, σταθερή παραγωγή που είναι απόρροια αρκετά σταθερών καιρικών συνθηκών.

Τον Μάρτιο, η μεταβατική φύση του μήνα προκαλεί προκλήσεις στο μοντέλο, καθώς η παραγωγή ενέργειας επηρεάζεται από συχνές αυξομειώσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε ημέρες με έντονες διακυμάνσεις, καταγράφονται αισθητές διαφορές μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης παραγωγής, αν και το μοντέλο εξακολουθεί να διατηρεί μια γενικά εξαιρετική συσχέτιση. Σημαντικό να αναφερθεί είναι πως οι πολλές διαφοροποιήσεις μέσα στην διάρκεια μιας μέρας δυσκολεύουν την πρόβλεψη αλλά κάτι τέτοιο δεν φαίνεται να ισχύει για μικρές διακυμάνσεις.



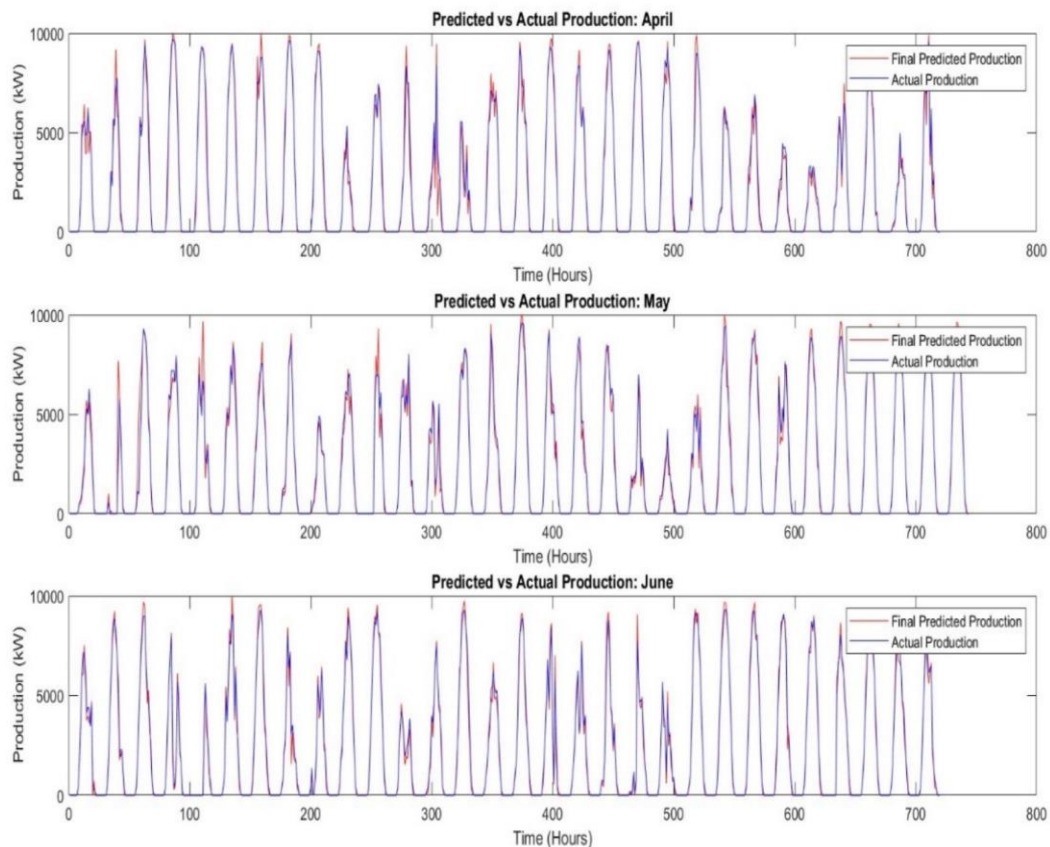
Σχήμα 5.5. Πρόβλεψη 1^{ov} τριμήνου 2023.

Κατά τη διάρκεια του Απριλίου, το μοντέλο συνεχίζει να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις προκλήσεις ενός μεταβατικού μήνα. Παρουσιάζει μια συνολικά καλή πρόβλεψη της πραγματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τις αποκλίσεις να επικεντρώνονται κυρίως σε ημέρες έντονων αυξομειώσεων στην παραγωγή. Αυτές οι διακυμάνσεις, που πιθανώς οφείλονται σε

συχνές και απότομες αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας, επηρεάζουν άμεσα την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Τον Μάιο, αν και παρατηρούνται μεταβολές στην παραγωγή ενέργειας, όπως και στους προηγούμενους μήνες, η πιο σταθερή φύση της ηλιακής ακτινοβολίας διευκολύνει το έργο του μοντέλου. Ως αποτέλεσμα, το μοντέλο καταφέρνει να παρακολουθήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις έντονες διακυμάνσεις της πραγματικής παραγωγής, αποδεικνύοντας τη βελτιωμένη προσαρμοστικότητά του στις μεταβολές.

Τον Ιούνιο, με την ηλιακή ακτινοβολία και την παραγωγή ενέργειας να φτάνουν σε υψηλά και πιο σταθερά επίπεδα, το μοντέλο επιδεικνύει μια σαφώς σταθερή συσχέτιση μεταξύ των προβλέψεων και της πραγματικής παραγωγής. Ωστόσο, παρατηρείται για άλλη μια φορά ότι το μοντέλο είναι ελαφρώς πιο αισιόδοξο, ιδιαίτερα στις αιχμές παραγωγής.

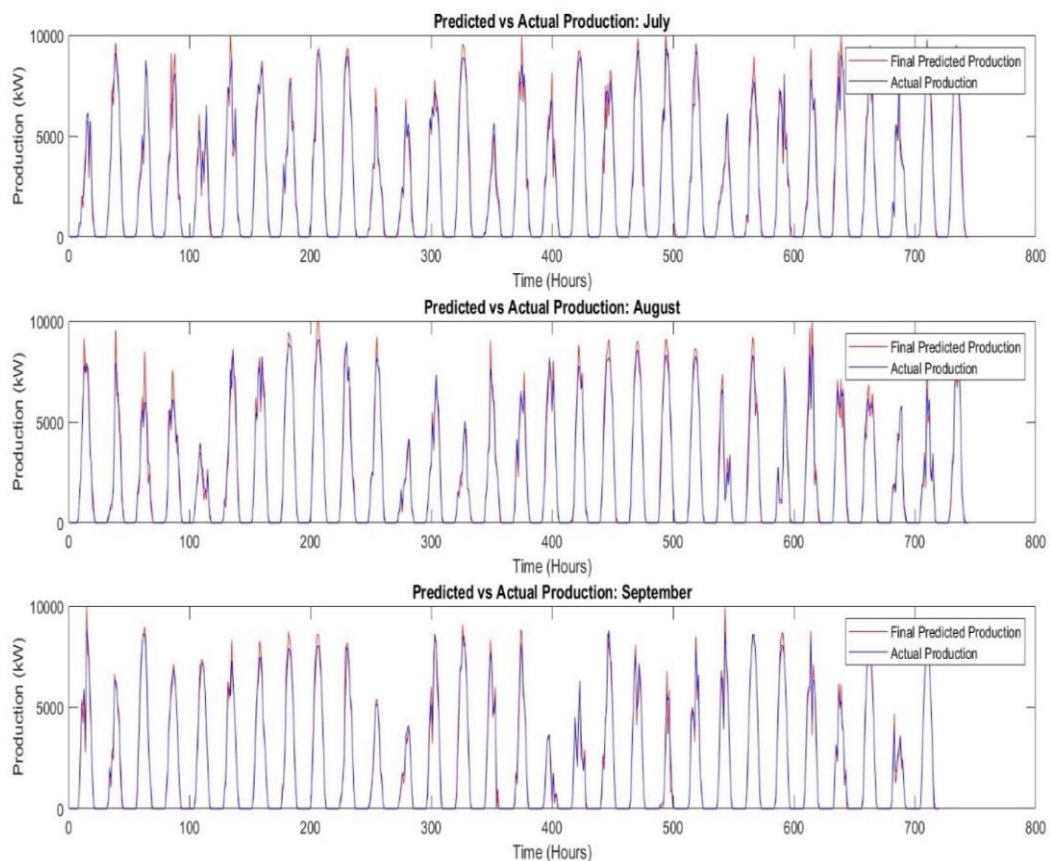


Σχήμα 5.6. Πρόβλεψη 2^{ου} τριμήνου 2023.

Κατά τη διάρκεια των μηνών Ιουλίου και Αυγούστου, η προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με την πραγματική παραγωγή του πάρκου. Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται είναι περιορισμένες και δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική απόδοση του

μοντέλου. Η σταθερότητα αυτή, σε συνδυασμό με την ακρίβεια του μοντέλου σε περιόδους υψηλής παραγωγής, υποδεικνύει ότι η ετήσια εκτίμηση παραγωγής αναμένεται να εμφανίσει περιορισμένες αποκλίσεις, όπως θα εξεταστεί στη συνέχεια. Οι λιγότερες αλλά πιο έντονες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται σε ημέρες με αυξημένη μεταβλητότητα στην πραγματική παραγωγή.

Στις αρχές Σεπτεμβρίου, η θετική συσχέτιση που παρατηρήθηκε τους καλοκαιρινούς μήνες διατηρείται, με το μοντέλο να προσεγγίζει την πραγματική παραγωγή με υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, από τα μέσα του μήνα και έπειτα, η αυξημένη συχνότητα διαφοροποιήσεων στην ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει σε μικρό βαθμό την απόδοση του μοντέλου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εμφανίζονται μικρές αποκλίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής, οι οποίες θα μπορούσαν να αποδοθούν σε πιο δυναμικές συνθήκες ακτινοβολίας που δεν αποτυπώνονται πλήρως στο μοντέλο.



Σχήμα 5.7. Πρόβλεψη 3^{ου} τριμήνου 2023.

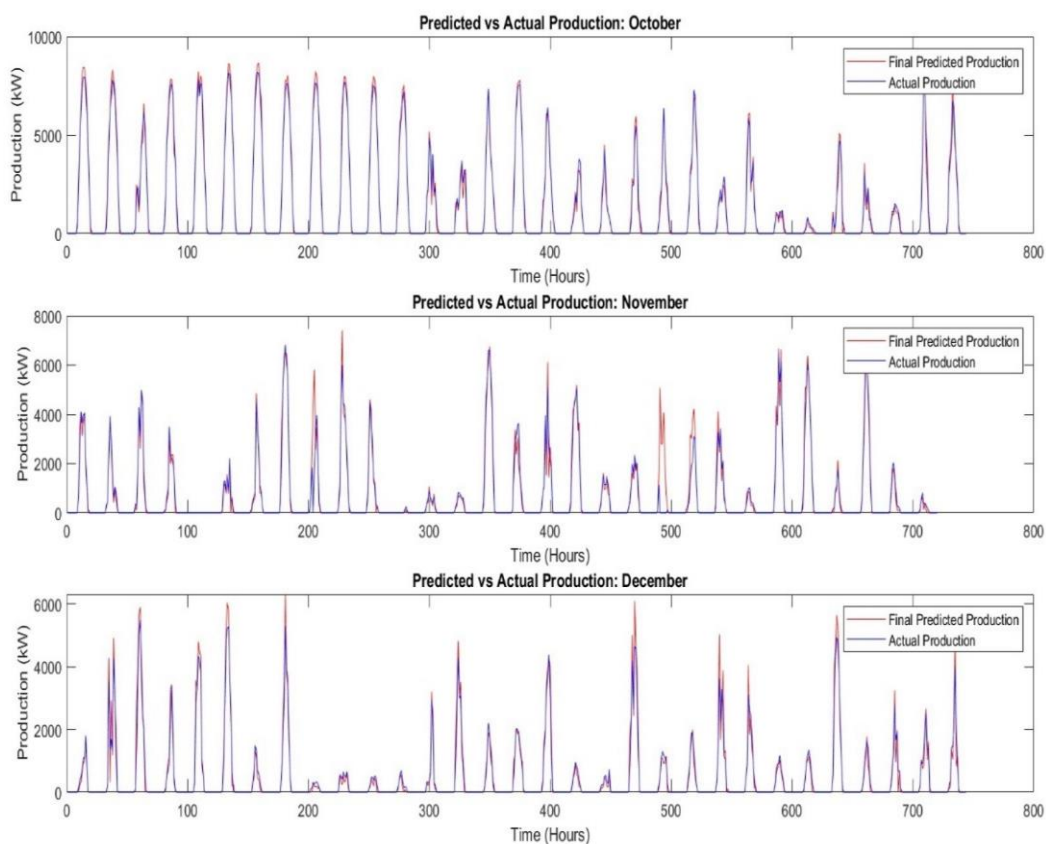
Κατά τη διάρκεια του Οκτωβρίου, η συσχέτιση μεταξύ της πραγματικής παραγωγής ενέργειας και της προβλεπόμενης από το μοντέλο παραμένει υψηλή. Αυτή η θετική απόδοση μπορεί να

αποδοθεί κυρίως στις σταθερές καιρικές συνθήκες που επικρατούν στις αρχές του μήνα, καθώς και στις ήπιες μεταβολές παραγωγής κατά τις λιγότερο σταθερές ημέρες. Η συνέπεια αυτή ενισχύει την αξιοπιστία του μοντέλου σε περιόδους με περιορισμένη δυναμική των εξωτερικών παραμέτρων.

Ο Νοέμβριος, αντιθέτως, αποδεικνύεται ο πιο απαιτητικός μήνας, καθώς χαρακτηρίζεται από έντονες και συχνές διακυμάνσεις στις καιρικές συνθήκες. Το μοντέλο καλείται να αντιμετωπίσει αυξημένες εναλλαγές μεταξύ περιόδων «καλής» και «κακής» παραγωγής, γεγονός που αυξάνει τη δυσκολία ακριβούς πρόβλεψης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις στην απόδοση του μοντέλου, οι οποίες συνδέονται πιθανώς με την προσωρινή αποσύνδεση του πάρκου από την παραγωγή και με το γεγονός ότι οι αισθητήρες συνέχιζαν να καταγράφουν δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Παρά τις προκλήσεις, η γενικότερη εικόνα του μήνα παραμένει ικανοποιητική.

Τον Δεκέμβριο παρατηρείται ένα μοτίβο παρόμοιο με αυτό του Ιανουαρίου, όπου η προβλεπόμενη παραγωγή από το μοντέλο εμφανίζεται συστηματικά υψηλότερη από την πραγματική. Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στις καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν δυσμενώς την απόδοση του πάρκου, ενώ το μοντέλο διατηρεί υψηλότερες προβλέψεις λόγω της υπόθεσης για σταθερότερες συνθήκες λειτουργίας. Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, το μοντέλο ακολουθεί τη

συνολική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πάρκου, προσφέροντας μια ικανοποιητική προσέγγιση για την εποχική απόδοση.



Σχήμα 5.8. Πρόβλεψη 4^{ου} τριμήνου 2023.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 5.1) παρουσιάζει αναλυτικά τις διαφορές στη συνολική μηνιαία και ετήσια παραγωγή ενέργειας μεταξύ της πραγματικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου και της προβλεπόμενης από το μοντέλο ARMAX. Τα μηνιαία δεδομένα, τα οποία αναλύθηκαν προηγουμένως, αποτυπώνονται με μεγάλη ακρίβεια στα στοιχεία του πίνακα, παρέχοντας μια ποσοτική εικόνα της απόδοσης του μοντέλου και της σύγκρισης με τα πραγματικά δεδομένα παραγωγής.

Πίνακας 5.1. Σύγκριση πρόβλεψης 2023.

| Μήνας | Πραγματική παραγωγή (kWh) | Προβλεπόμενη παραγωγή (kWh) | Διαφορά επί της πραγματικής (%) |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| <i>Ιανουάριος</i> | 460912.50 | 463441.83 | 0.549% |
| <i>Φεβρουάριος</i> | 1019513.09 | 999292.34 | -1.983% |
| <i>Μάρτιος</i> | 1065105.64 | 1026121.61 | -3.660% |
| <i>Απρίλιος</i> | 1625826.28 | 1586232.14 | -2.435% |
| <i>Μάιος</i> | 1778631.77 | 1764658.32 | -0.786% |
| <i>Ιούνιος</i> | 1724658.05 | 1707569.10 | -0.991% |
| <i>Ιούλιος</i> | 1842022.78 | 1829330.26 | -0.689% |
| <i>Αύγουστος</i> | 1593084.63 | 1617802.67 | 1.552% |
| <i>Σεπτέμβριος</i> | 1426500.43 | 1451714.61 | 1.768% |
| <i>Οκτώβριος</i> | 1064222.94 | 1072733.29 | 0.800% |
| <i>Νοέμβριος</i> | 468291.19 | 491899.20 | 5.041% |
| <i>Δεκέμβριος</i> | 357295.18 | 363959.59 | 1.865% |
| Ετήσια | 14,426,064.47 | 14,374,754.96 | -0.356% |

Κατά τους χειμερινούς μήνες, όπως ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβριος, παρατηρείται ελαφρώς αυξημένη προβλεπόμενη παραγωγή συγκριτικά με την πραγματική. Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στις συνθήκες χαμηλότερης ηλιακής ακτινοβολίας και τις αντίστοιχες επιπτώσεις στη λειτουργία του πάρκου.

Οι μεταβατικοί μήνες της άνοιξης και του φθινοπώρου εμφανίζουν μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής. Αυτό απορρέει από τις πιο ασταθείς καιρικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν τόσο την πραγματική παραγωγή όσο και την ακρίβεια του μοντέλου.

Αντίθετα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου επικρατούν πιο σταθερές συνθήκες ηλιοφάνειας, οι προβλέψεις του μοντέλου ευθυγραμμίζονται σε μεγάλο βαθμό με την πραγματική παραγωγή του πάρκου. Αυτή η σταθερότητα επιβεβαιώνει τη δυνατότητα του μοντέλου να προσαρμόζεται σε περιόδους με μειωμένη μεταβλητότητα.

Συνολικά, η μέση μηνιαία διαφορά μεταξύ των δύο πηγών είναι μόλις **0,086%**, ενώ η απόκλιση στη συνολική ετήσια παραγωγή περιορίζεται στο **0,356%**. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν την εξαιρετική απόδοση του μοντέλου, ιδιαίτερα σε δεδομένα που έχει συναντήσει κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης. Το μοντέλο εμφανίζεται αξιόπιστο στην πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας γνωστών δεδομένων, διατηρώντας τη διαφορά σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

5.3 Προσομοίωση με Άγνωστα Δεδομένα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε για άγνωστα δεδομένα, χρησιμοποιώντας το ARMAX μοντέλο και εφαρμόζοντας όλες τις βελτιστοποιήσεις που έχουν ήδη αναφερθεί. Το μοντέλο, εκπαιδευμένο με δεδομένα παραγωγής ενέργειας και καιρικών συνθηκών από τα έτη 2022-2023, δοκιμάστηκε για την πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τα έτη 2020 και 2021.

Τα δύο αυτά έτη παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες θα αναλυθούν λεπτομερώς στη συνέχεια. Συνοπτικά, το έτος 2020 χαρακτηρίζεται από σταθερές και αναμενόμενες συνθήκες, επιτρέποντας την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου σε ένα τυπικό σενάριο πρόβλεψης. Αντίθετα, το έτος 2021 περιλαμβάνει συνθήκες διακοπών και συντήρησης, γεγονός που το καθιστά πιο απαιτητικό και δύσκολο για πρόβλεψη. Όπως θα αποδειχθεί, το μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά και στις δύο περιπτώσεις, παρουσιάζοντας υψηλό επίπεδο ακρίβειας στην προσομοίωση.

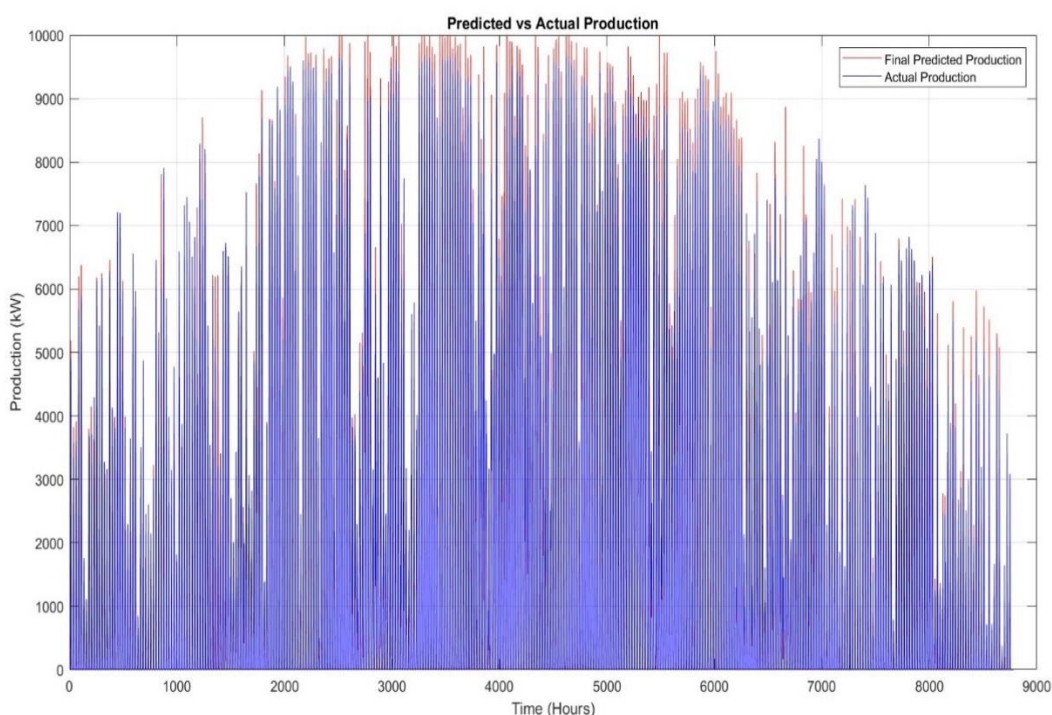
5.3.1 Έτος 2020

Το έτος 2020, όντας δίσεκτο, απαιτούσε μια προσαρμογή στη διαχείριση των ωριαίων δεδομένων ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη διάσπασή τους ανά μήνα. Πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις στον κώδικα που διευκολύνουν τη διαδικασία, εξαλείφοντας την ανάγκη για περαιτέρω μορφοποίηση από τον χρήστη. Με την επιλογή του έτους μέσω του γραφικού περιβάλλοντος, ενεργοποιείται

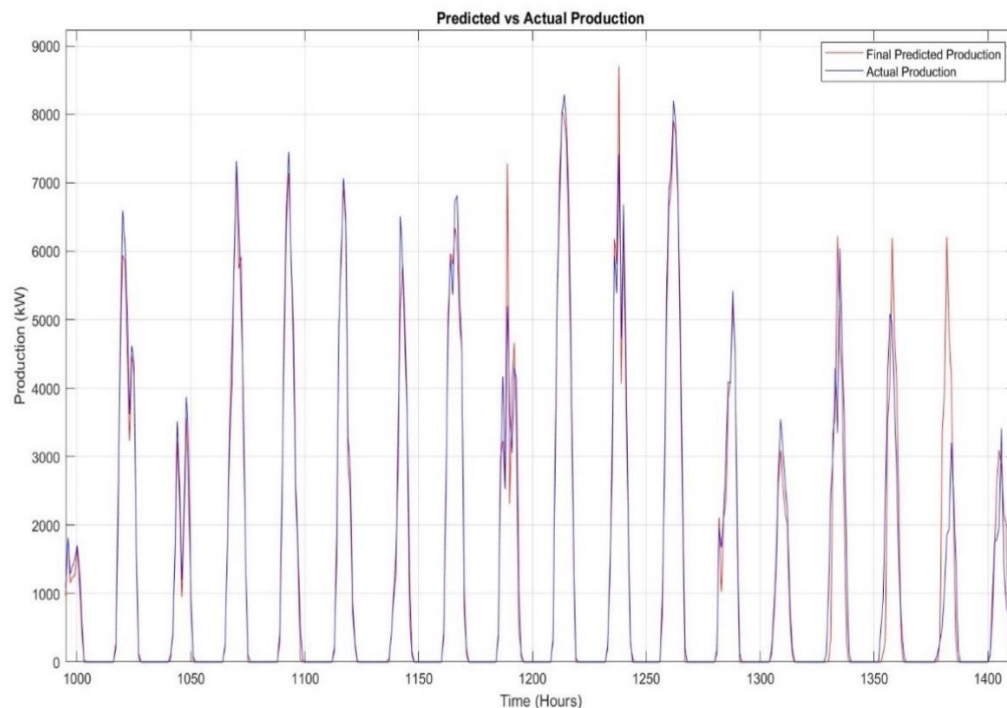
αυτόματα το κατάλληλο τμήμα του κώδικα που χειρίζεται δέκα έτη, διασφαλίζοντας την ορθή κατανομή των δεδομένων στους αντίστοιχους μήνες.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ της προβλεπόμενης παραγωγής από το μοντέλο και της πραγματικής παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου για το έτος 2020. Όπως φαίνεται, το μοντέλο καταφέρνει να προβλέψει με εξαιρετική ακρίβεια την παραγόμενη ισχύ, καθώς η πραγματική παραγωγή (μπλε γραμμή) βρίσκεται πολύ κοντά στην προβλεπόμενη (κόκκινη γραμμή).

Στο Σχήμα 5.10 ωστόσο, παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις στις προβλέψεις του μοντέλου. Υπάρχουν ημέρες όπου η πρόβλεψη είναι ιδιαίτερα ακριβής, ευθυγραμμισμένη με την πραγματική παραγωγή του πάρκου, αλλά και ημέρες με εμφανείς διαφορές μεταξύ των δύο καμπυλών. Αυτές οι αποκλίσεις θα αναλυθούν λεπτομερώς στις μηνιαίες συγκρίσεις που ακολουθούν.



Σχήμα 5.9. Σύγκριση πραγματικής παραγωγής και παραγωγής μοντέλου – 2020.



Σχήμα 5.10. Διαφορές μεταξύ πρόβλεψης και πραγματικής παραγωγής – 2020.

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται οι μετρικές αξιολόγησης της ακρίβειας του μοντέλου και η έκταση του σφάλματος, παρέχοντας μια σαφή εικόνα της απόδοσής του. Ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) αγγίζει το εντυπωσιακό 98,58%. Αυτή η τιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται εξαιρετικά καλά ακόμα και σε άγνωστες συνθήκες, ξεπερνώντας την ακρίβεια που πέτυχε σε δεδομένα στα οποία είχε εκπαιδευτεί. Συγκεκριμένα, το έτος 2023, όπου είχε πραγματοποιηθεί η εκπαίδευση, ο συντελεστής συσχέτισης ήταν ελαφρώς χαμηλότερος, στο 98,44%, γεγονός που θα αναλυθεί στο κεφάλαιο της σύγκρισης.

Περαιτέρω, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) ανέρχεται στα 313,43 kW, αντιστοιχώντας μόλις στο 2,82% της συνολικής ονομαστικής ισχύος του πάρκου. Το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) είναι ακόμα μικρότερο, φτάνοντας τα 143,03 kW, ήτοι το 1,29% της ισχύος.

Αυτές οι τιμές καταδεικνύουν τη διατήρηση της υψηλής ακρίβειας του μοντέλου, ακόμα και όταν λειτουργεί με δεδομένα που δεν είχε αντιμετωπίσει κατά την εκπαίδευση.

Με τη δυνατότητα να επιτυγχάνει εξαιρετικά χαμηλά ποσοστά σφάλματος ανεξαρτήτως συνθηκών, αναδεικνύεται ως ένα ισχυρό εργαλείο για εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας φωτοβολταϊκών πάρκων.

R^2 : 0.98586

Hybrid Model Root Mean Squared Error (RMSE): 313.4274

Hybrid Model Mean Absolute Error (MAE): 143.0325

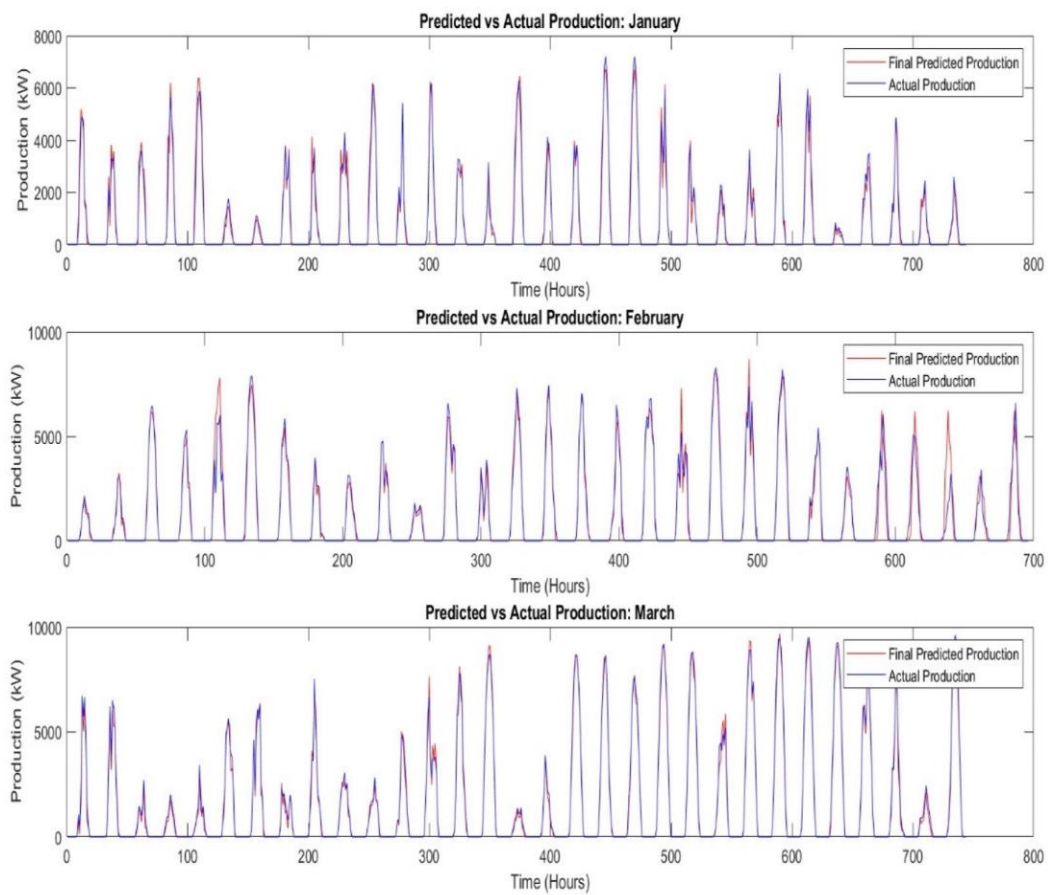
Εικόνα 15: Μετρητικές προσομοίωσης έτους 2020.

Στα Σχήματα 5.11 - 5.14 παρουσιάζεται μια λεπτομερής τριμηνιαία σύγκριση της πραγματικής παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου με την προβλεπόμενη παραγωγή από το μοντέλο ARMAX. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το μοντέλο ακολουθεί ικανοποιητικά τη δυναμική της πραγματικής παραγωγής, γεγονός που οφείλεται στη διατήρηση υψηλής ποιότητας δεδομένων, την ελαχιστοποίηση των ελλείψεων, και τη συνεχή λειτουργία του πάρκου.

Κατά τον πρώτο μήνα του έτους, το μοντέλο εμφανίζει εξαιρετική απόδοση, προσαρμοζόμενο άψογα στις πραγματικές τιμές του φωτοβολταϊκού πάρκου. Παρά την παρουσία ελαφρώς πιο αισιόδοξων αιχμών ισχύος στις προβλέψεις κατά τις πρώτες ημέρες του μήνα, αυτές παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων, χωρίς να επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική αξιοπιστία. Επιπλέον, η συνολική διακύμανση της προβλεπόμενης απόδοσης είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές, με το μοντέλο να ανταποκρίνεται άριστα ακόμα και στις ήπιες ημερήσιες διακυμάνσεις της παραγωγής.

Τον Φεβρουάριο, η συσχέτιση μεταξύ των δύο πηγών παρουσιάζει μικρές αστάθειες. Το μοντέλο υιοθετεί μια πιο συντηρητική προσέγγιση, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στον αυξημένο αριθμό ημερήσιων διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας. Εντοπίζεται επίσης μια περίπτωση εσφαλμένης πρόβλεψης, πιθανόν λόγω αποσύνδεσης τμήματος του πάρκου, η οποία επηρεάζει μεμονωμένα τις τιμές, χωρίς όμως να μειώνει τη γενική αξιοπιστία του μοντέλου.

Κατά τον Μάρτιο, η ελαφρά αστάθεια που παρατηρήθηκε τον Φεβρουάριο συνεχίζεται. Οι διαφορές μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης παραγωγής είναι μικρές αλλά σταθερές, με το μοντέλο να εμφανίζει μια πιο συντηρητική συμπεριφορά καθ' όλη τη διάρκεια του μήνα. Χαρακτηριστική είναι η δυσκολία του να ακολουθήσει επακριβώς τις μέρες με συχνές και απότομες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας.



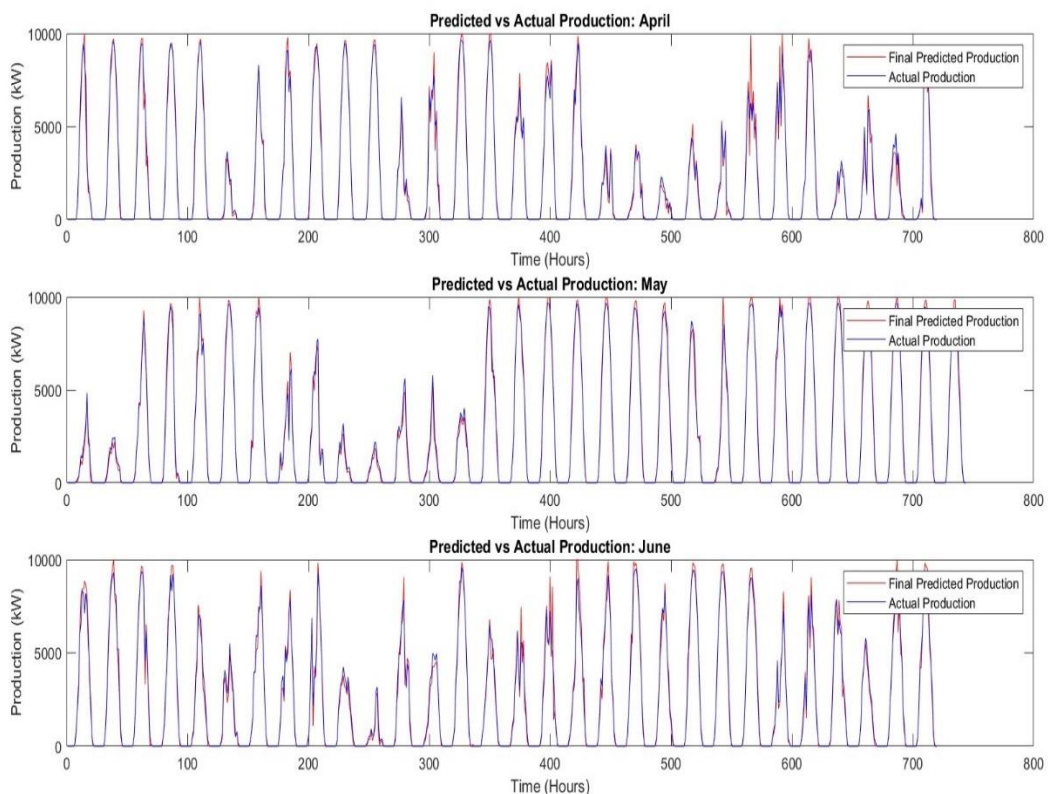
Σχήμα 5.11. Πρόβλεψη 1^ο τριμήνου 2020.

Το μοντέλο ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις προκλήσεις του Απριλίου. Στο πρώτο μισό του Απριλίου, όπου επικρατούν σχετικά σταθερές συνθήκες, οι προβλέψεις είναι εξαιρετικά ακριβείς. Στο δεύτερο μισό του μήνα, ωστόσο, παρατηρούνται ελαφρώς αυξημένες αποκλίσεις, κυρίως λόγω των έντονων αυξομειώσεων στην παραγωγή, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές αυτής της περιόδου. Παρ' όλα αυτά, η συνολική απόδοση του μοντέλου παραμένει καλή, επιδεικνύοντας τη δυνατότητα προσαρμογής σε μεταβατικές συνθήκες.

Ο Μάιος χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη σταθερότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, ιδιαίτερα μετά το πρώτο τρίτο του μήνα, γεγονός που διευκολύνει την πρόβλεψη του μοντέλου. Οι διακυμάνσεις της πραγματικής παραγωγής αποτυπώνονται με υψηλή ακρίβεια, υποδεικνύοντας την εξαιρετική απόδοση του μοντέλου στις προβλέψεις. Οι προβλέψεις για τον μήνα αυτό θεωρούνται από τις

καλύτερες, αναδεικνύοντας την ικανότητα του μοντέλου να λειτουργεί άριστα σε συνθήκες σταθερότητας.

Ο Ιούνιος φαίνεται να έχει μικρές, συνεχείς διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία, γεγονός που φαίνεται να προκαλεί δυσκολία στο μοντέλο κατά την πρόβλεψη. Όπως και σε προηγούμενους μήνες, το μοντέλο εμφανίζεται ελαφρώς πιο αισιόδοξο, κυρίως στις αιχμές παραγωγής, με αποτέλεσμα οι προβλέψεις να είναι συστηματικά υψηλότερες από τις πραγματικές τιμές. Παρά τις προκλήσεις αυτές, η συνολική απόδοση του μοντέλου κρίνεται πολύ καλή, με τις αποκλίσεις να παραμένουν σε αποδεκτά επίπεδα.

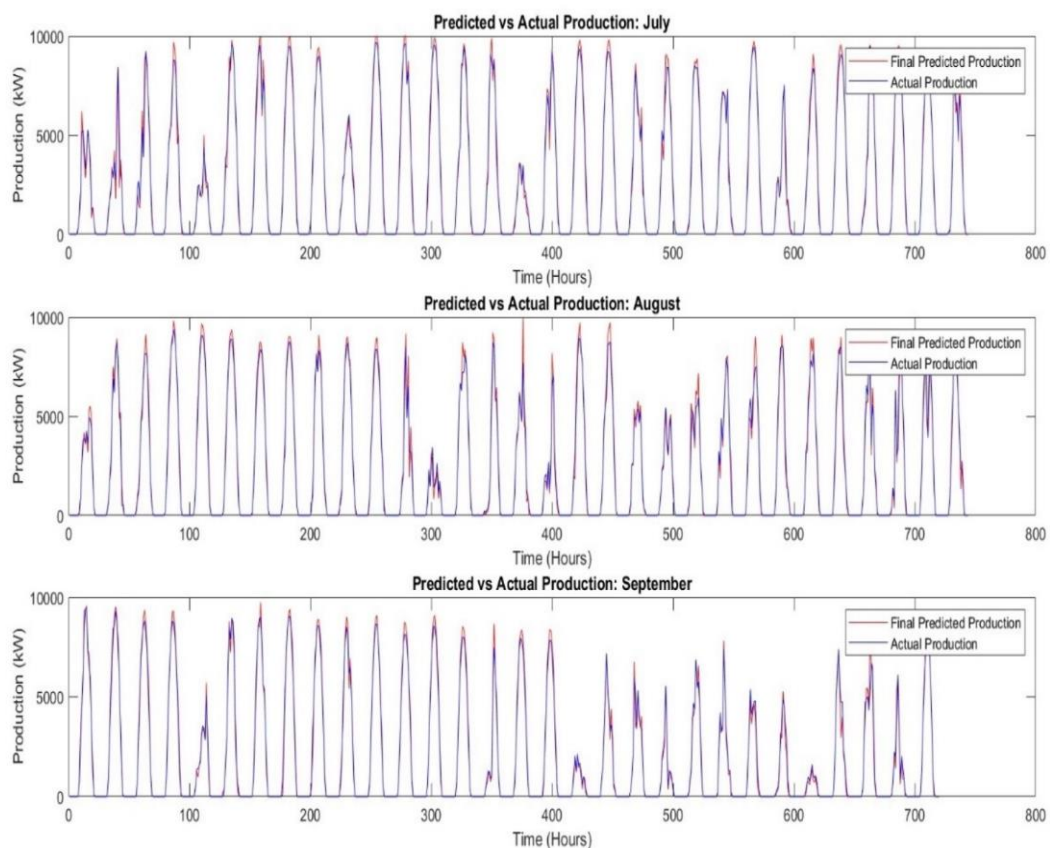


Σχήμα 5.12. Πρόβλεψη 2^ο τριμήνου 2020.

Ο Ιούλιος χαρακτηρίζεται από σταθερές ημέρες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και αντίστοιχα υψηλή παραγωγή ενέργειας. Το μοντέλο προβλέπει τη συνολική απόδοση του πάρκου με υψηλή συσχέτιση, αναδεικνύοντας την ικανότητά του να παρακολουθεί τις πραγματικές συνθήκες. Ωστόσο, παρατηρούνται ελαφρώς πιο αισιόδοξες προβλέψεις σε ορισμένες αιχμές παραγωγής, γεγονός που αντικατοπτρίζει μια συστηματική τάση του μοντέλου να υπερεκτιμά σε περιόδους υψηλής απόδοσης.

Η παραγωγή παραμένει υψηλή τον Αύγουστο, με σταθερές ημέρες έντονης ηλιοφάνειας, τις οποίες το μοντέλο αποτυπώνει σε πολύ καλό βαθμό. Παρ' όλα αυτά, οι αισιόδοξες προβλέψεις του μοντέλου γίνονται πιο συχνές και εμφανείς, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στις δυσκολίες ακριβούς μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πάρκου σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν αποκλίσεις στην πραγματική απόδοση, όπως μείωση της απόδοσης λόγω θερμικών επιπτώσεων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, κάτι που δεν αποτυπώνεται πλήρως στο μοντέλο.

Στις αρχές του Σεπτεμβρίου, το μοντέλο συνεχίζει να προβλέπει με υψηλή ακρίβεια την παραγωγή του πάρκου, διατηρώντας την καλή απόδοση που παρουσίασε κατά τους προηγούμενους καλοκαιρινούς μήνες. Καθώς ο μήνας προχωρά, η παραγωγή γίνεται πιο ήπια, γεγονός που διευκολύνει την πιο ακριβή πρόβλεψη του μοντέλου. Κατά το τέλος του μήνα, όπου οι καιρικές συνθήκες γίνονται πιο μεταβατικές, το μοντέλο εξακολουθεί να αποδίδει αξιόπιστα, διατηρώντας την ακρίβεια στις προβλέψεις του.

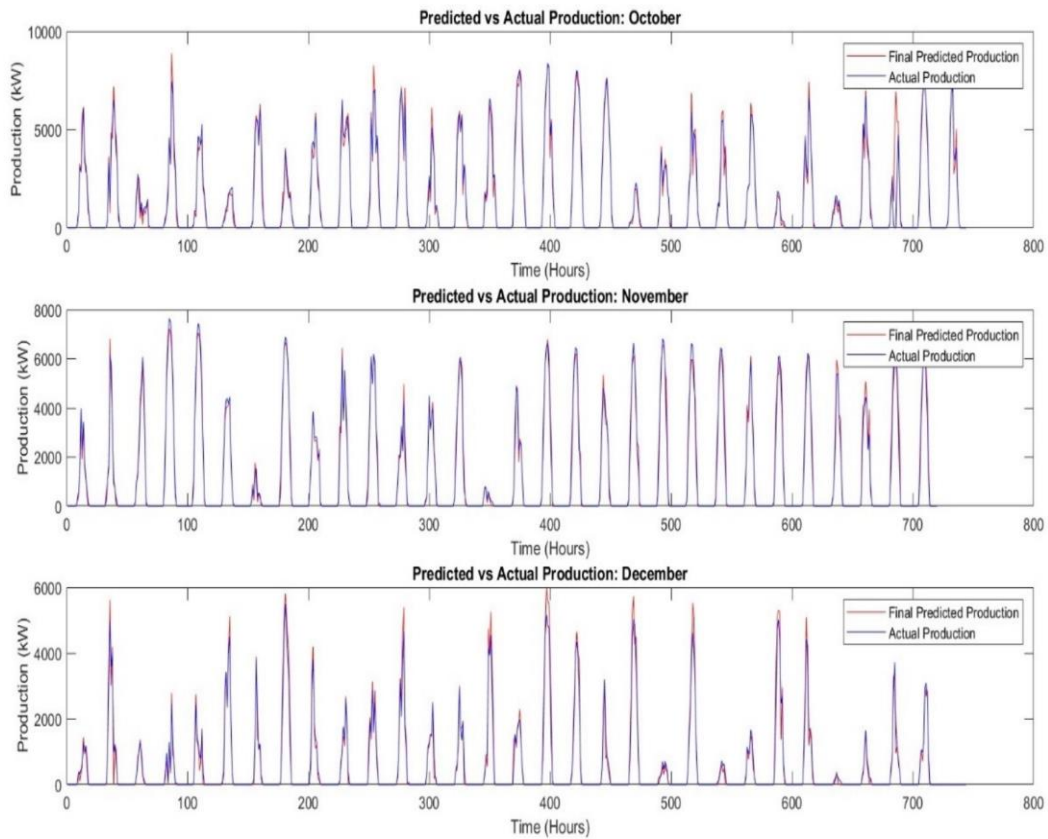


Σχήμα 5.13. Πρόβλεψη 3^{ov} τριμήνου 2020.

Ο Οκτώβριος χαρακτηρίζεται από σημαντικές διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς αποτελεί έναν μεταβατικό μήνα. Το μοντέλο αποδίδει ικανοποιητικά, διατηρώντας υψηλή συσχέτιση με την πραγματική παραγωγή ενέργειας. Παρόλο που οι συχνές μεταβολές και τα μη σταθερά μοτίβα παρουσιάζουν προκλήσεις, το μοντέλο παραμένει αξιόπιστο, υιοθετώντας μια συντηρητική προσέγγιση στις προβλέψεις του. Οι αποκλίσεις είναι περιορισμένες, αντανακλώντας τη δυνατότητα του μοντέλου να προσαρμόζεται σε πιο δυναμικές συνθήκες.

Σε αντίθεση με τα έτη 2021 και 2023, ο Νοέμβριος εμφανίζεται πολύ πιο σταθερός. Οι καιρικές συνθήκες διατηρούν μια σταθερή διακύμανση, με μέτρια έως υψηλή παραγωγή ενέργειας και περιορισμένες ημερήσιες διακυμάνσεις. Αυτή η σταθερότητα ευνοεί τη λειτουργία του μοντέλου, το οποίο επιτυγχάνει εξαιρετική ακρίβεια, αν και με μερικές περιπτώσεις υπερεκτίμησης, στην πρόβλεψη της παραγωγής. Η ικανότητά του να αποδίδει βέλτιστα σε συνθήκες με σταθερή ακτινοβολία και μέτρια θερμοκρασία επιβεβαιώνει τη συνολική αξιοπιστία του.

Ο Δεκέμβριος χαρακτηρίζεται από έντονες διακυμάνσεις, με συχνές εναλλαγές από ημέρες υψηλής παραγωγής σε ημέρες μηδενικής ή χαμηλής παραγωγής. Αυτή η έντονη μεταβατικότητα θέτει το μοντέλο αντιμέτωπο με ιδιαίτερες προκλήσεις. Παρά τις δυσκολίες, το μοντέλο καταφέρνει να διατηρήσει ένα ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας, αν και παρουσιάζει πιο αισιόδοξες προβλέψεις σε ορισμένες περιπτώσεις. Αυτές οι αποκλίσεις είναι αναμενόμενες, δεδομένων των συχνών και απότομων αλλαγών στις συνθήκες ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.14. Πρόβλεψη 4^{ov} τριμήνου 2020.

Ο πίνακας που ακολουθεί (Πίνακας 5.2) συνοψίζει την απόδοση του μοντέλου ARMAX σε σχέση με την πραγματική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου, παρέχοντας μια ποσοτική ανάλυση σε μηνιαία και ετήσια βάση. Με την παρουσίαση των συνολικών παραγόμενων τιμών ανά μήνα και έτος, προσφέρονται πολύτιμα δεδομένα που ενισχύουν την αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου.

Πίνακας 5.2. Σύγκριση πρόβλεψης 2020.

| Μήνας | Πραγματική παραγωγή (kWh) | Προβλεπόμενη παραγωγή (kWh) | Διαφορά επί της πραγματικής (%) |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| <i>Ιανουάριος</i> | 603175.84 | 603033.64 | -0.024% |
| <i>Φεβρουάριος</i> | 848347.10 | 835249.92 | -1.544% |
| <i>Μάρτιος</i> | 1223216.94 | 1185038.27 | -3.121% |
| <i>Απρίλιος</i> | 1520343.55 | 1497998.83 | -1.470% |
| <i>Μάιος</i> | 1870887.55 | 1861027.36 | -0.527% |
| <i>Ιούνιος</i> | 1758807.46 | 1764841.42 | 0.343% |
| <i>Ιούλιος</i> | 1985903.93 | 2004190.92 | 0.921% |
| <i>Αύγουστος</i> | 1713957.01 | 1744898.73 | 1.805% |
| <i>Σεπτέμβριος</i> | 1425708.07 | 1440840.22 | 1.061% |
| <i>Οκτώβριος</i> | 939648.29 | 926744.81 | -1.373% |
| <i>Νοέμβριος</i> | 851774.14 | 871591.56 | 2.327% |
| <i>Δεκέμβριος</i> | 396648.07 | 410162.52 | 3.407% |
| Ετήσια | 15,138,417.93 | 15,145,618.19 | 0.048% |

Κατά τους χειμερινούς μήνες, όπως ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβριος, παρατηρείται συνήθως μια ελαφρώς αυξημένη προβλεπόμενη παραγωγή συγκριτικά με την πραγματική. Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στις συνθήκες χαμηλότερης ηλιακής ακτινοβολίας και στις αντίστοιχες επιπτώσεις στη λειτουργία του πάρκου. Παρ' όλα αυτά, κατά τον Ιανουάριο του συγκεκριμένου έτους, το πάρκο παρήγαγε σημαντικά περισσότερη ενέργεια συγκριτικά με τον αντίστοιχο μήνα άλλων ετών, λόγω καλύτερων καιρικών συνθηκών.

Οι μεταβατικοί μήνες, όπως ο Φεβρουάριος, ο Μάρτιος, ο Απρίλιος, ο Οκτώβριος και ο Νοέμβριος, εμφανίζουν μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής. Αυτή η απόκλιση οφείλεται κυρίως στις ασταθείς καιρικές συνθήκες, όπως οι συχνές

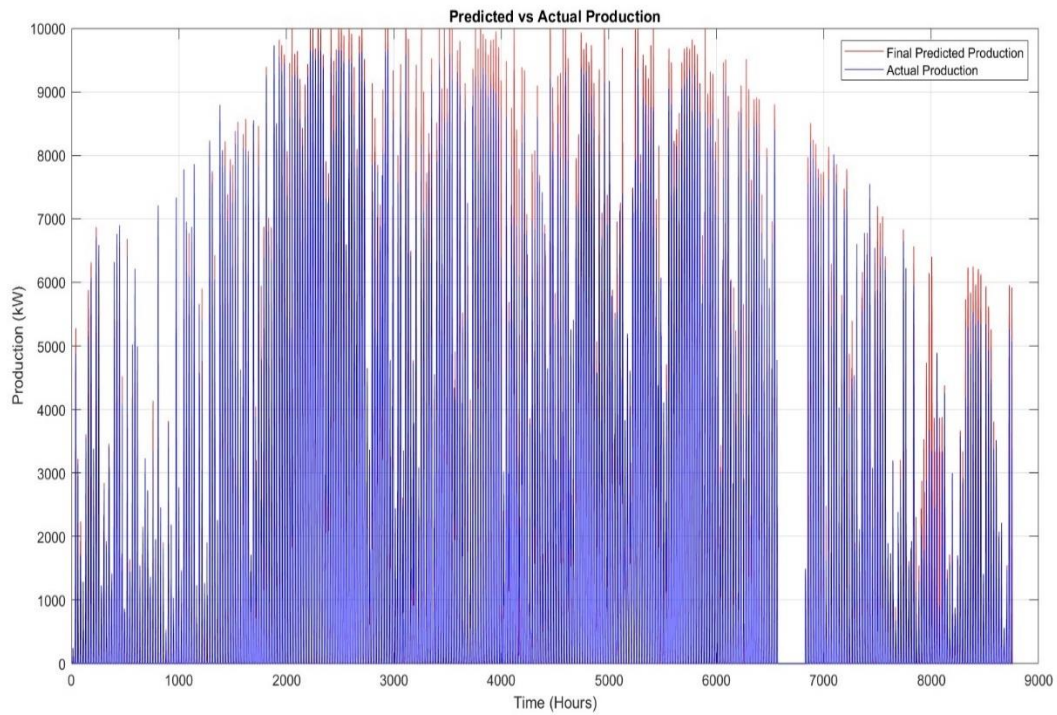
αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και οι βροχοπτώσεις, που επηρεάζουν τόσο την πραγματική παραγωγή όσο και την ακρίβεια του μοντέλου.

Αντίθετα, κατά τους ήπιους καλοκαιρινούς μήνες, όπου επικρατούν πιο σταθερές συνθήκες ηλιοφάνειας, οι προβλέψεις του μοντέλου ευθυγραμμίζονται σε μεγάλο βαθμό με την πραγματική παραγωγή του πάρκου. Αυτή η σταθερότητα επιβεβαιώνει τη δυνατότητα του μοντέλου να αποδίδει αξιόπιστα σε περιόδους με μειωμένη μεταβλητότητα. Ωστόσο, οι αυξημένες προβλέψεις κατά τη διάρκεια του Αυγούστου, λόγω υψηλών θερμοκρασιών και ακτινοβολίας, αναδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω μελέτης. Είναι εμφανές ότι το πάρκο δεν επιτυγχάνει την προβλεπόμενη υψηλή απόδοση υπό συνθήκες θερμοκρασιών πολύ πάνω από τους 25°C.

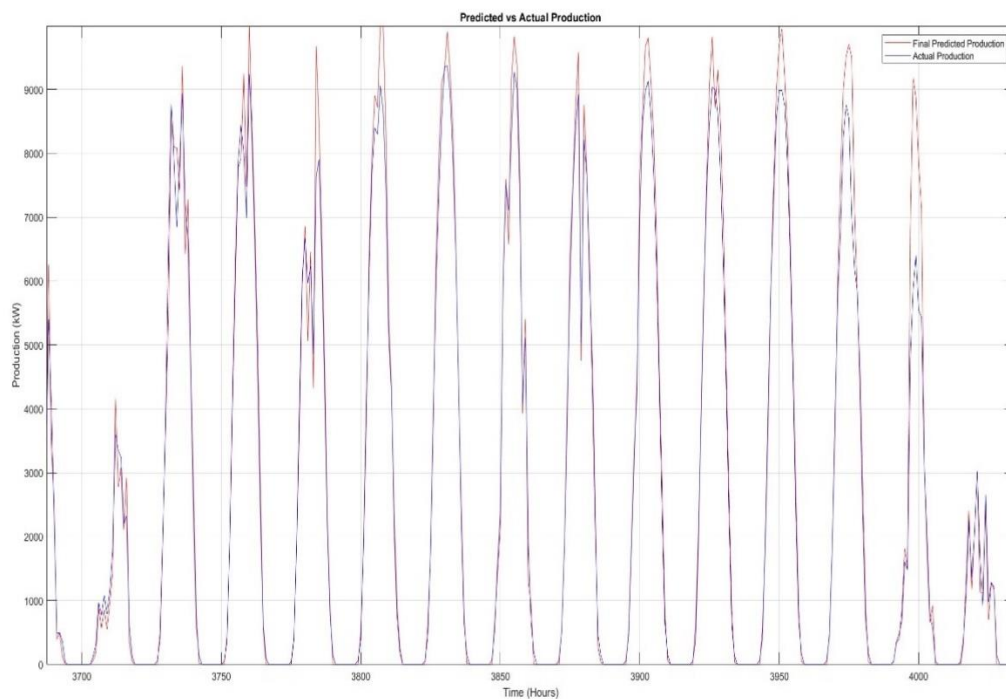
Συνολικά, η μέση μηνιαία διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής ανέρχεται μόλις στο **0,150%**, ενώ η απόκλιση στη συνολική ετήσια παραγωγή περιορίζεται στο **0,048%**. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν την εξαιρετική απόδοση του μοντέλου, ακόμη και σε δεδομένα που δεν είχε συναντήσει κατά τη φάση της εκπαίδευσης. Το μοντέλο εμφανίζεται αξιόπιστο στην πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας υπό άγνωστες συνθήκες, διατηρώντας τις αποκλίσεις σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, οι παρατηρήσεις για τις μηνιαίες και εποχικές συμπεριφορές απαιτούν περαιτέρω ανάλυση, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη βελτίωση του μοντέλου.

5.3.2 Έτος 2021

Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται η προβλεπόμενη παραγωγή του μοντέλου και η πραγματική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου. Όπως είναι εμφανές, το μοντέλο επιδεικνύει γενικά καλή απόδοση, αν και τα ήδη αναφερθέντα προβλήματα φαίνεται να ενισχύονται ελαφρώς. Ειδικότερα, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 5.16, παρατηρούνται αρκετά σημεία αιχμών ισχύος, όπου η πραγματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (μπλε γραμμή) είναι αισθητά χαμηλότερη από την παραγωγή που προβλέπει το μοντέλο (κόκκινη γραμμή).



Σχήμα 5.15. Σύγκριση πραγματικής παραγωγής και παραγωγής μοντέλου – 2021.



Σχήμα 5.16. Διαφορές μεταξύ πρόβλεψης και πραγματικής παραγωγής – 2021.

Όπως και στα προηγούμενα έτη, οι διαφορές θα αναλυθούν λεπτομερέστερα στις τριμηνιαίες συγκρίσεις, με στόχο την ανίχνευση μοτίβων στη λειτουργία του μοντέλου.

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται οι μετρικές αξιολόγησης της ακρίβειας του μοντέλου και η έκταση του σφάλματος. Ο συντελεστής R^2 καταγράφει την ιδιαίτερα ικανοποιητική τιμή του 97,83%. Αυτό υποδηλώνει ότι, ακόμη και σε έτη όπου τα δεδομένα δεν ήταν πλήρως αντιπροσωπευτικά και υπό συνθήκες δύσκολες για μοντελοποίηση, το μοντέλο επιτυγχάνει υψηλή απόδοση.

Επιπλέον, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) ανέρχεται σε 379,18 kW, που αντιστοιχεί στο 3,42% της συνολικής ονομαστικής ισχύος του πάρκου. Το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) είναι εξίσου χαμηλό, μόλις 164,94 kW, δηλαδή το 1,48% της ισχύος. Αυτά τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το μοντέλο διατηρεί υψηλή ακρίβεια ακόμα και όταν καλείται να προβλέψει δεδομένα που δεν είχαν συμπεριληφθεί στη φάση της εκπαίδευσης και παρουσιάζουν σημαντικές ιδιαιτερότητες.

$R^2: 0.97827$

Hybrid Model Root Mean Squared Error (RMSE): 379.185

Hybrid Model Mean Absolute Error (MAE): 164.9398

Εικόνα 16: Μετρητικές προσομοίωσης έτους 2021.

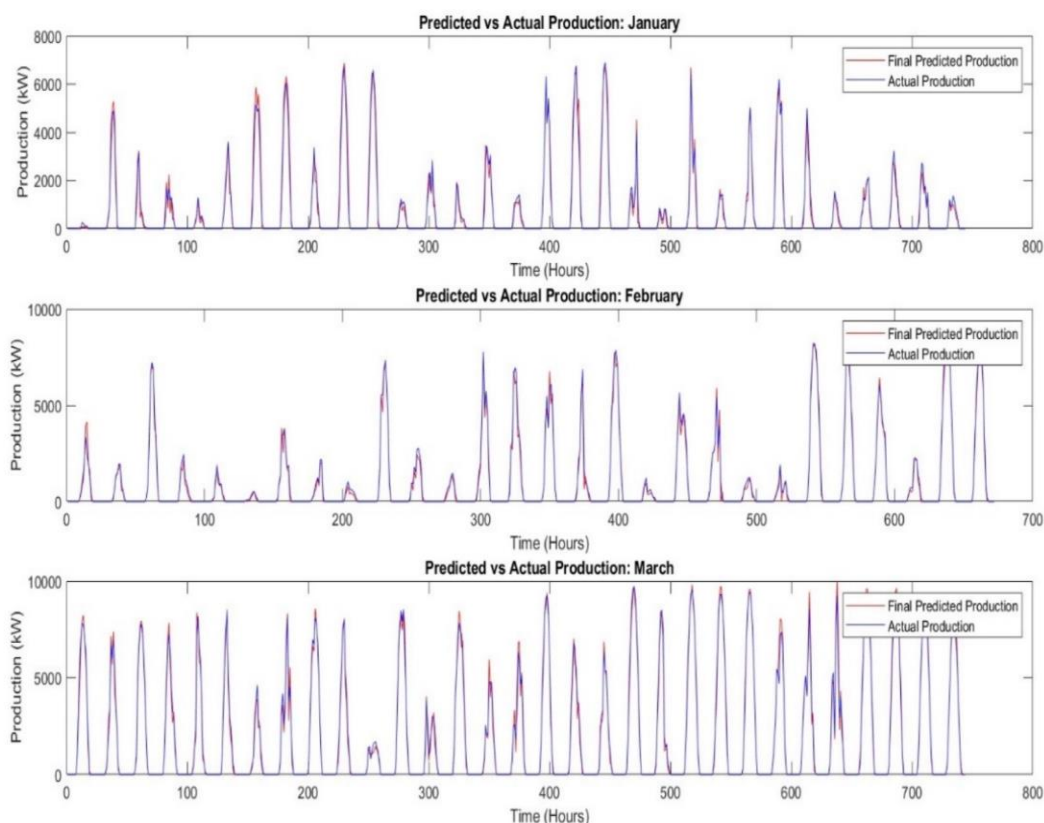
Στα Σχήματα 5.17 – 5.20 παρουσιάζεται λεπτομερώς η τριμηνιαία σύγκριση της πραγματικής παραγωγής του πάρκου με την παραγωγή που προβλέπει το μοντέλο. Συνολικά, παρατηρείται ότι το μοντέλο ακολουθεί ικανοποιητικά την πραγματική παραγωγή, με τη βασική διαφοροποίηση να αφορά την ελαφρώς αισιόδοξη πρόβλεψή του, ένα ζήτημα που έχει ήδη επισημανθεί επανειλημμένα.

Κατά τον Ιανουάριο, το μοντέλο αποδίδει ικανοποιητικά, ακολουθώντας τις πραγματικές τιμές του φωτοβολταϊκού πάρκου. Αν και παρατηρούνται οι χαρακτηριστικές πιο αισιόδοξες αιχμές ισχύος στις προβλέψεις, αυτές παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων. Επιπλέον, η συνολική διακύμανση της απόδοσης του μοντέλου είναι εξαιρετική, με καλή προσαρμογή ακόμα και στις ήπιες ημερήσιες διακυμάνσεις της παραγωγής.

Τον Φεβρουάριο, η συσχέτιση μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής εμφανίζεται πιο ασταθής. Το μοντέλο φαίνεται να υιοθετεί μια πιο συντηρητική προσέγγιση, κυρίως λόγω του μεγάλου αριθμού ημερήσιων διακυμάνσεων στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τα

πρώτα δύο τρίτα του μήνα. Αυτή η αστάθεια επηρεάζει ελαφρώς την ακρίβεια της πρόβλεψης, χωρίς όμως να μειώνει τη συνολική απόδοση του μοντέλου.

Ο Μάρτιος παρουσιάζεται πιο σταθερός σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περιόδους των ετών 2023 και 2020, καθώς χαρακτηρίζεται από μικρότερες μεγάλες διακυμάνσεις και περισσότερες ημέρες σταθερής παραγωγής. Αυτή η σταθερότητα δίνει τη δυνατότητα στο μοντέλο να παραγάγει πιο ακριβή αποτελέσματα, ακολουθώντας με συνέπεια τις πραγματικές τιμές παραγωγής.



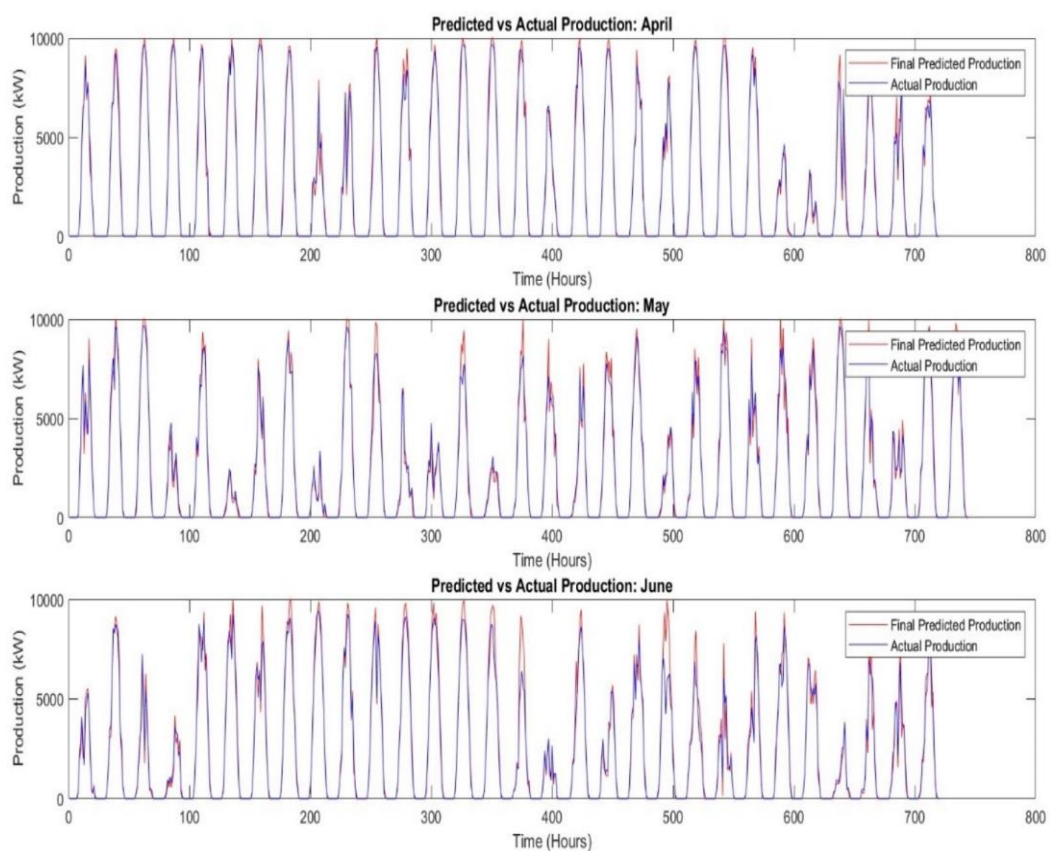
Σχήμα 5.17. Πρόβλεψη 1^ο τριμήνου 2021.

Κατά τον απαιτητικό και μεταβατικό μήνα του Απριλίου, το μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά. Οι μικρές αυξομειώσεις στην παραγωγή, σε συνδυασμό με μια γενικά σταθερά υψηλή παραγωγή, ευνοούν την ακρίβεια του μοντέλου, το οποίο φαίνεται να προβλέπει στις συνθήκες με εξαιρετική επιτυχία. Η απόδοσή του παραμένει σε πολύ καλό επίπεδο, ακόμα και σε αυτή τη μεταβατική περίοδο.

Τον Μάιο παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις στην παραγωγή και σχετικά απότομες. Το μοντέλο καταφέρνει να ανταποκριθεί θετικά, ακόμη και σε ημέρες με αυξομειώσεις λόγω μεταβολών στην ηλιακή ακτινοβολία. Διατηρεί μια σχετικά καλή εικόνα ωστόσο είναι εμφανείς

οι διαφορές στην προβλεπόμενη από το μοντέλο και την πραγματική παραγωγή ενέργειας. Φαίνεται ότι δυσκολεύεται στις γρήγορες μεταβολές σε συνθήκες υψηλής παραγωγής.

Τον Ιούνιο, οι συνθήκες είναι πιο ευνοϊκές κατά το πρώτο μισό του μήνα, με λίγες μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία και σχετικά σταθερά υψηλή παραγωγή. Το μοντέλο ακολουθεί τις πραγματικές τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια σε αυτό το διάστημα. Ωστόσο, στο δεύτερο μισό του μήνα, η εμφάνιση πολλών και συχνών μεταβολών στη ακτινοβολία φαίνεται να δυσκολεύει ξανά το μοντέλο, το οποίο παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις και διατηρεί μια πιο αισιόδοξη τάση στις προβλέψεις του.

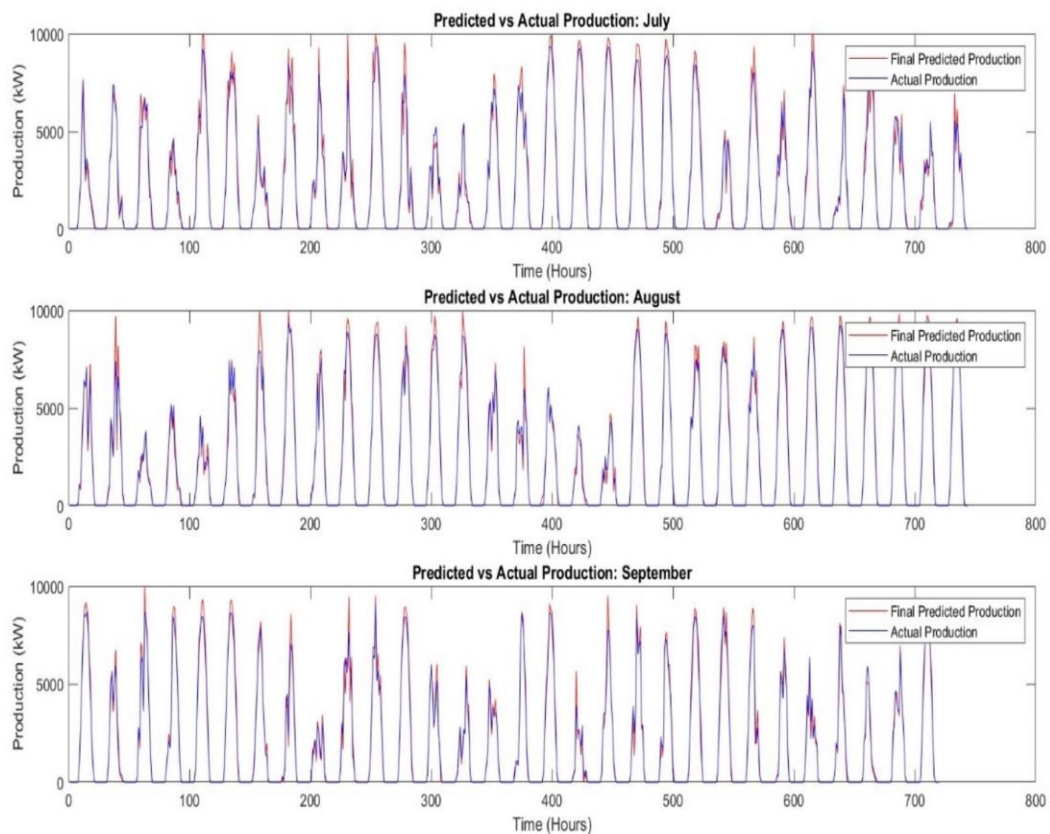


Σχήμα 5.18. Πρόβλεψη 2^{ου} τριμήνου 2021.

Κατά τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο παρατηρούνται φαινόμενα παρόμοια με εκείνα του Ιουνίου. Η περίοδος χαρακτηρίζεται από μια μεικτή κατάσταση, όπου ασταθείς ημέρες (πρώτο δεκαήμερο Ιουλίου, αρχές και μέσα Αυγούστου, καθώς και μέσα Σεπτεμβρίου) με μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία για καλοκαιρινούς μήνες, συχνές βροχοπτώσεις και αυξομειώσεις

στην παραγόμενη ενέργεια δυσχεραίνουν την ακρίβεια των προβλέψεων του μοντέλου. Παρά τις δυσκολίες, τα αποτελέσματα παραμένουν σε αποδεκτά επίπεδα.

Από την άλλη, εμφανίζονται και πιο ευνοϊκές περιόδους, όπως τα μέσα Ιουλίου και τα τέλη Αυγούστου, όπου το μοντέλο επιτυγχάνει σχεδόν άριστη απόδοση. Στις περιόδους αυτές, η προβλεπόμενη παραγωγή προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τα πραγματικά δεδομένα. Ακόμα και σε ημέρες με έντονες μεταβολές στην παραγωγή, η απόκλιση μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών τιμών παραμένει περιορισμένη. Η συνολική απόδοση του μοντέλου σε αυτούς τους μήνες αποδεικνύει την ικανότητά του να διαχειρίζεται τόσο σταθερές όσο και ασταθείς συνθήκες παραγωγής, διατηρώντας ικανοποιητική ακρίβεια.



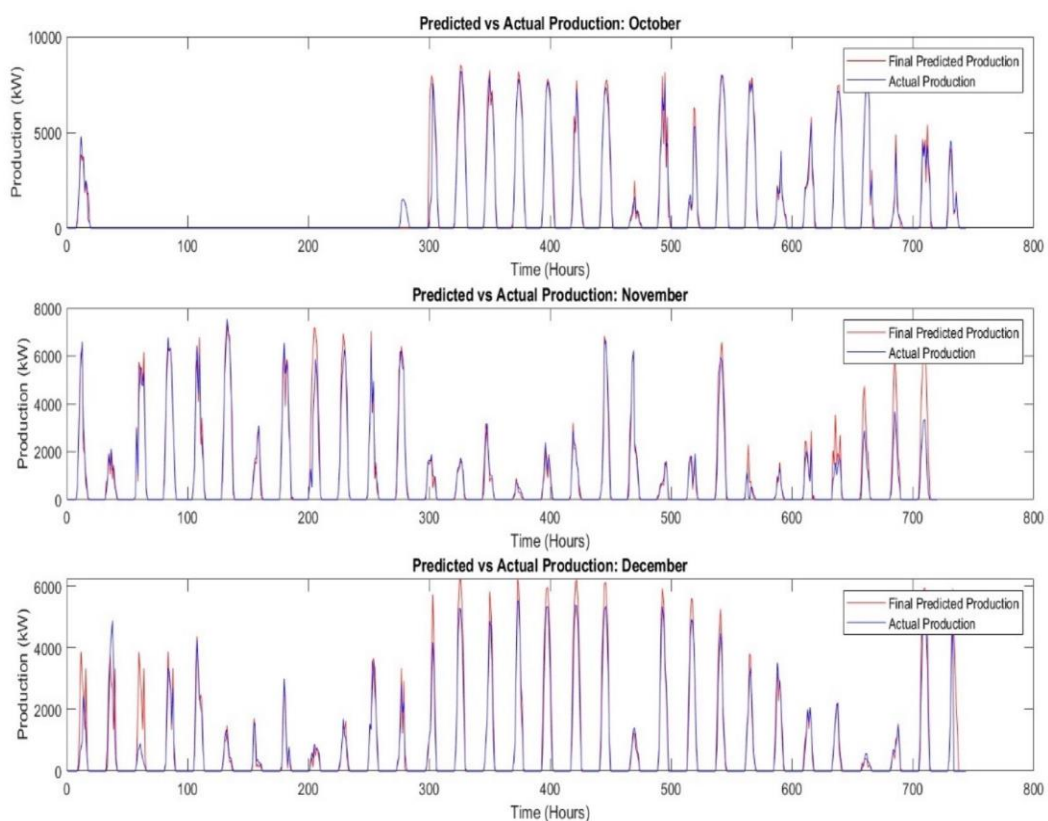
Σχήμα 5.19. Πρόβλεψη 3^{ου} τριμήνου 2021.

Κατά τη διάρκεια του Οκτωβρίου, το φωτοβολταϊκό πάρκο παραμένει πλήρως αποσυνδεδεμένο για το πρώτο δεκαήμερο, γεγονός που εξηγεί τη μηδενική παραγωγή. Στο υπόλοιπο του μήνα, η συσχέτιση μεταξύ της προβλεπόμενης παραγωγής από το μοντέλο και της πραγματικής παραμένει

υψηλή. Οι ευνοϊκές και σταθερές συνθήκες που επικρατούν κατά το δεύτερο μισό του μήνα διευκολύνουν την ακρίβεια της πρόβλεψης, οδηγώντας σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τον Νοέμβριο, το πρώτο μέρος του μήνα παρουσιάζει μεγαλύτερες προκλήσεις, με εναλλαγές μεταξύ ημερών υψηλής και χαμηλής απόδοσης. Το μοντέλο καταφέρνει να προσαρμόσει την πρόβλεψή του, επιτυγχάνοντας καλή συσχέτιση με την πραγματική παραγωγή. Ωστόσο, στα τέλη Νοεμβρίου και στις αρχές Δεκεμβρίου εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις. Πιθανολογείται ότι μέρος του πάρκου έχει τεθεί εκτός λειτουργίας, ενώ οι αισθητήρες συνεχίζουν να καταγράφουν τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, γεγονός που οδηγεί το μοντέλο σε αισιόδοξες προβλέψεις. Παρά τις διαφορές στις απόλυτες τιμές, η καμπύλη της προβλεπόμενης παραγωγής ακολουθεί το γενικό μοτίβο της πραγματικής, επιβεβαιώνοντας την πιθανή μερική αποσύνδεση του πάρκου.

Τον Δεκέμβριο, μετά το πρώτο δεκαήμερο, παρατηρείται ένα γνώριμο μοτίβο όπου η προβλεπόμενη παραγωγή είναι συστηματικά υψηλότερη από την πραγματική. Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες ή σε ενδεχόμενη αποσύνδεση μέρους του πάρκου λόγω συντήρησης. Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο ακολουθεί τη συνολική συμπεριφορά του πάρκου, παρέχοντας μια επαρκή προσέγγιση της εποχικής απόδοσης.



Σχήμα 5.20. Πρόβλεψη 4^{ov} τριμήνου 2021.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 5.3) παρουσιάζει αναλυτικά τις αποκλίσεις στη συνολική μηνιαία και ετήσια παραγωγή ενέργειας μεταξύ της πραγματικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου και των προβλέψεων του μοντέλου ARMAX. Τα μηνιαία δεδομένα που αναλύθηκαν προηγουμένως αποτυπώνονται ποσοτικά στα στοιχεία του πίνακα, παρέχοντας μια σαφή εικόνα της ακρίβειας του μοντέλου σε επίπεδο παραγωγής για κάθε μήνα καθώς και συνολικά για το έτος.

Πίνακας 5.3. Σύγκριση πρόβλεψης 2021.

| Μήνας | Πραγματική παραγωγή (kWh) | Προβλεπόμενη παραγωγή (kWh) | Διαφορά επί τις πραγματικής (%) |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| <i>Ιανουάριος</i> | 520367.60 | 524215.63 | 0.739% |
| <i>Φεβρουάριος</i> | 670197.83 | 644387.31 | -3.851% |
| <i>Μάρτιος</i> | 1474258.17 | 1466693.00 | -0.513% |
| <i>Απρίλιος</i> | 1838330.98 | 1840849.30 | 0.137% |
| <i>Μάιος</i> | 1687526.82 | 1691806.77 | 0.254% |
| <i>Ιούνιος</i> | 1678233.26 | 1755961.21 | 4.632% |
| <i>Ιούλιος</i> | 1634295.83 | 1661370.48 | 1.657% |
| <i>Αύγουστος</i> | 1720513.84 | 1756354.63 | 2.083% |
| <i>Σεπτέμβριος</i> | 1378891.85 | 1412462.76 | 2.435% |
| <i>Οκτώβριος</i> | 705400.12 | 730523.16 | 3.562% |
| <i>Νοέμβριος</i> | 586203.49 | 656455.92 | 11.984% |
| <i>Δεκέμβριος</i> | 469597.86 | 543491.31 | 15.735% |
| Ετήσια | 14,363,817.63 | 14,684,571.50 | 2.233% |

Κατά τις χειμερινούς μήνες, τις ο Ιανουάριος και ειδικά ο Δεκέμβριος (ανεξαρτήτως των προβλημάτων που σχετίζονται με τη συντήρηση που αναφέρθηκε), παρατηρείται μια ελαφρώς αυξημένη προβλεπόμενη παραγωγή σε σύγκριση με την πραγματική. Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί τις συνθήκες χαμηλότερης ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Οι μεταβατικοί μήνες του Φεβρουαρίου και του φθινοπώρου εμφανίζουν μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής παραγωγής. Αυτό οφείλεται στις πιο ασταθείς καιρικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν τόσο την πραγματική παραγωγή όσο και την ακρίβεια του μοντέλου. Από την άλλη, ο Απρίλιος και ο Μάιος, με σχετικά σταθερές καιρικές συνθήκες, θεωρούνται οι καλύτερα προσομοιωμένοι μήνες για το 2021, καθώς η διαφορά μεταξύ της παραγόμενης από το μοντέλο και της πραγματικής ενέργειας είναι αρκετά μικρή.

Κατά το καλοκαίρι του έτους, δεν παρατηρήθηκαν οι συνήθεις σταθερές συνθήκες ηλιοφάνειας και παραγωγής που επικρατούσαν τα έτη 2023 και 2020. Έτσι, η συμπεριφορά του μοντέλου και του πάρκου γενικότερα θυμίζει τις συνθήκες των μεταβατικών μηνών, με τις συχνές αλλαγές στον καιρό να είναι οι κύριοι παράγοντες της απόκλισης.

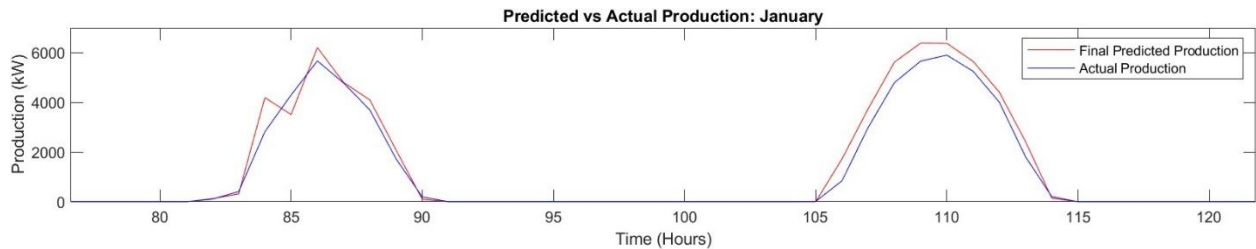
Συνολικά, η μέση μηνιαία διαφορά μεταξύ των δύο πηγών παραγωγής ανέρχεται στο 3,238%, ενώ η απόκλιση στη συνολική ετήσια παραγωγή περιορίζεται στο 2,233%. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν μια πολύ καλή απόδοση, ακόμα και σε ένα έτος για το οποίο το μοντέλο δεν είχε εκπαιδευτεί και το οποίο παρουσίασε όχι μόνο ασταθείς καιρικές συνθήκες, αλλά και καταστάσεις που δεν ήταν εύκολα ελέγξιμες ή προβλέψιμες.

5.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

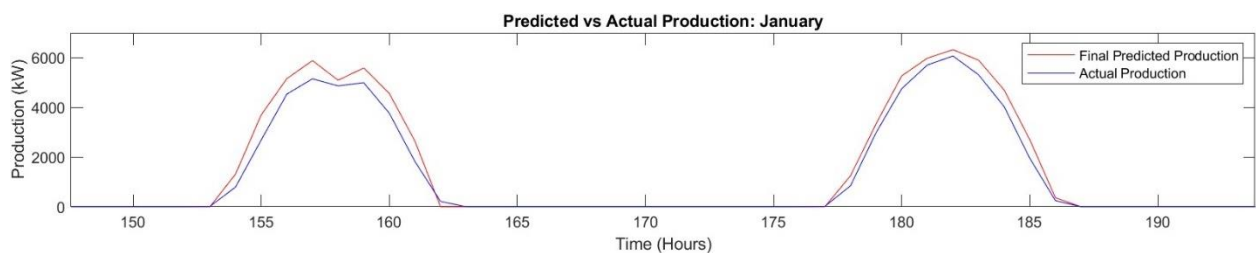
Παρακολουθώντας και αναλύοντας τη συμπεριφορά του μοντέλου σε σύγκριση με την πραγματική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου, προέκυψαν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα. Οι καιρικές συνθήκες, λόγω της σχετικά περιοδικής της φύσης, δημιούργησαν μοτίβα που επηρέασαν τη λειτουργία του μοντέλου. Υπήρχαν συγκεκριμένες περιπτώσεις τις οποίες το μοντέλο απέδωσε εξαιρετικά, παρουσιάζοντας υψηλό δείκτη ακρίβειας και αξιοπιστίας. Ωστόσο, υπήρξαν και στιγμές, ευτυχώς περιορισμένες, κατά τις οποίες, βασιζόμενο στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το μοντέλο δεν μπόρεσε να προσαρμοστεί τις επικρατούσες συνθήκες του πάρκου, με αποτέλεσμα να μην είναι απολύτως αξιόπιστο σε αυτές τις περιπτώσεις. Για τον λόγο αυτό, είναι κρίσιμο να εντοπιστούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μοντέλου, καθώς και εκείνες για τις οποίες αποδίδει τα μέγιστα, προκειμένου να βελτιωθεί και να προσαρμοστεί μελλοντικά στις ανάγκες οποιουδήποτε συστήματος.

Ένα από τα κύρια ζητήματα που επηρεάζονται στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η απόδοσή υπό μη ιδανικές συνθήκες λειτουργίας. Τέτοιες συνθήκες περιλαμβάνουν χαμηλές θερμοκρασίες, παγετό, μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία και τις επιπτώσεις της θερμοκρασίας στην απόδοση των

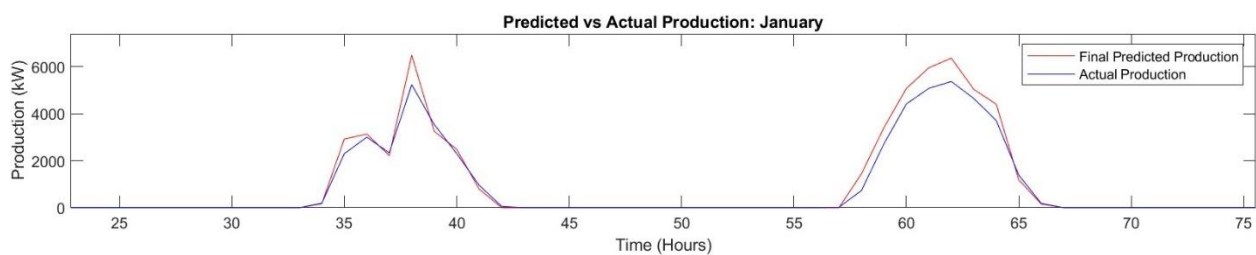
συστημάτων. Όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα, το μοντέλο συχνά υπερεκτιμά ελαφρώς την παραγωγή, καθώς δεν μπορεί να αποτυπώσει πλήρως τις συνθήκες στο φωτοβολταϊκό πάρκο και τη συμπεριφορά του εξοπλισμού υπό δυσμενείς συνθήκες.



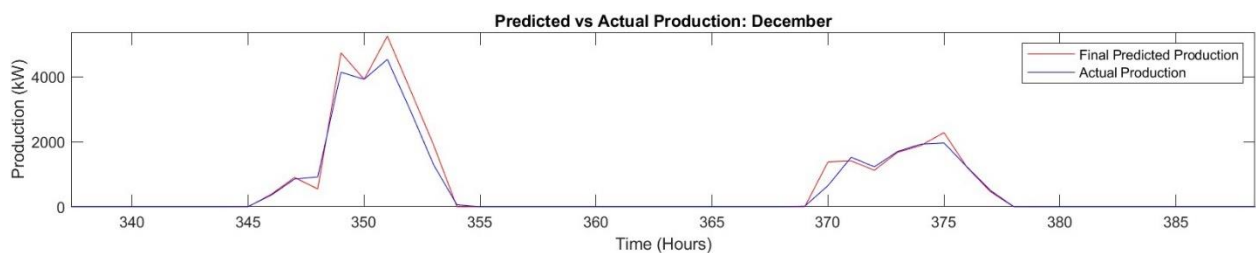
Σχήμα 5.21. Χαμηλή θερμοκρασία – Υπερεκτίμηση παραγωγής – Ιανουάριος 2020.



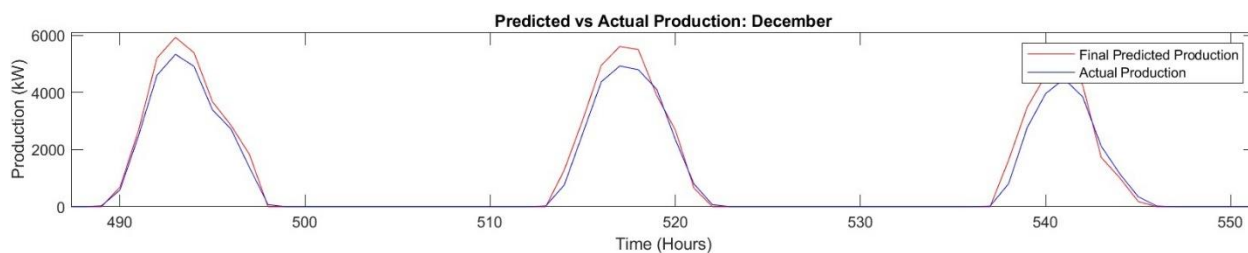
Σχήμα 5.22. Χαμηλή θερμοκρασία - Υπερεκτίμηση παραγωγής - Ιανουάριος 2021.



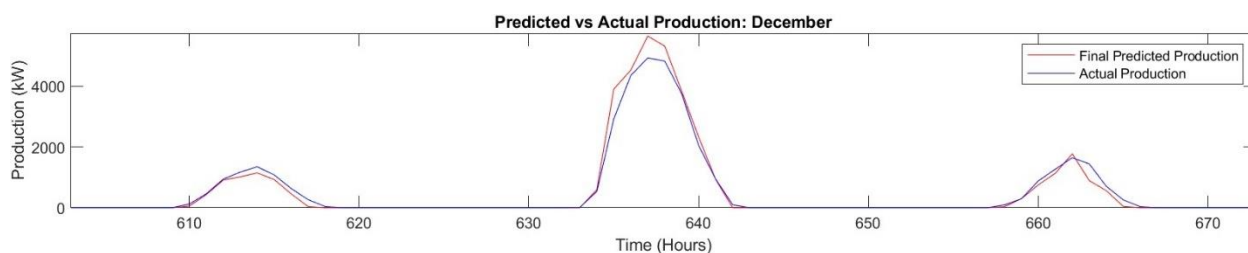
Σχήμα 5.23. Χαμηλή θερμοκρασία – Υπερεκτίμηση παραγωγής – Ιανουάριος 2023.



Σχήμα 5.24. Χαμηλή θερμοκρασία - Υπερεκτίμηση παραγωγής - Δεκέμβριος 2020.



Σχήμα 5.25. Χαμηλή θερμοκρασία - Υπερεκτίμηση παραγωγής - Δεκέμβριος 2021.

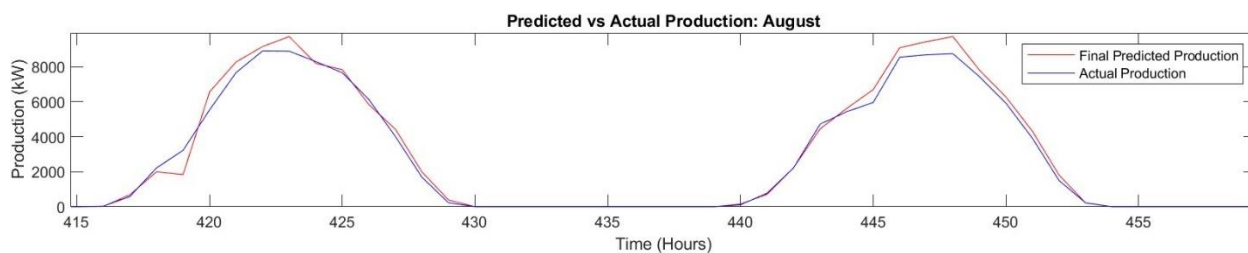


Σχήμα 5.26. Χαμηλή θερμοκρασία - Υπερεκτίμηση παραγωγής - Δεκέμβριος 2023.

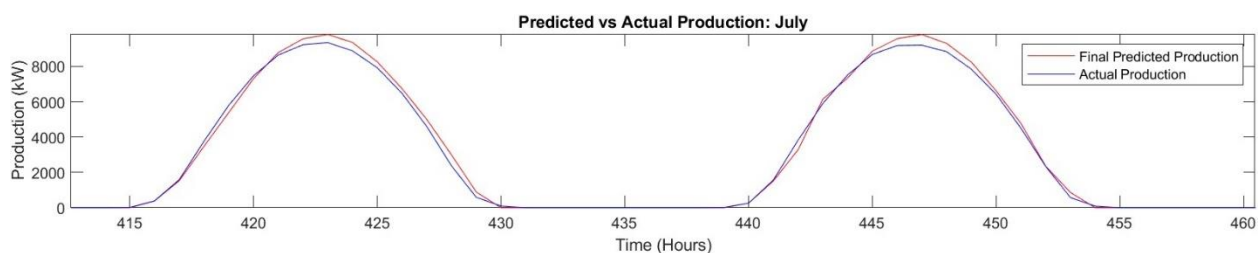
Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές κατά τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του εξοπλισμού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν αποδίδουν βέλτιστα όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αποκλίνει από τις ιδανικές συνθήκες. Ως αποτέλεσμα, το ίδιο πρόβλημα παρατηρείται και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν επικρατούν συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μοντέλο προβλέπει συχνά μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από την πραγματική. Συγκεκριμένα, είναι εμφανές ότι η αιχμή ισχύος (peak power) που το μοντέλο προβλέπει για το πάρκο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι υψηλότερη από την πραγματικά παραγόμενη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, το φωτοβολταϊκό σύστημα υπερθερμαίνεται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εσωτερικές απώλειες, οι οποίες περιορίζουν την ικανότητα του συστήματος να μετατρέψει όλη την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ισχύ και ενέργεια.

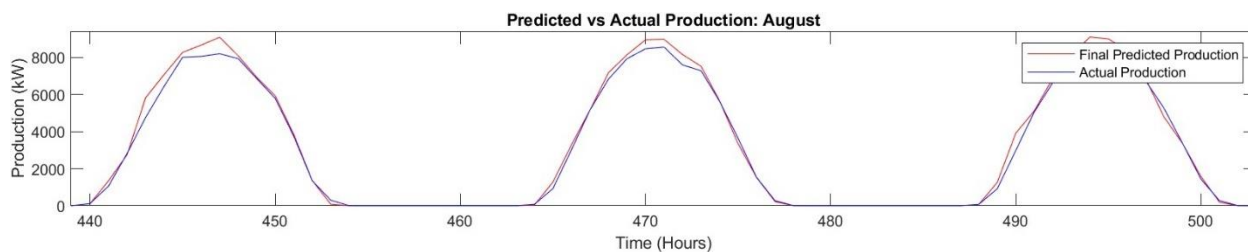
Στις παρακάτω απεικονίσεις παρουσιάζεται η επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας στο μοντέλο και τα αποτελέσματά της σε σύγκριση με την πραγματική ισχύ. Όπως φαίνεται, η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου είναι αισθητή ανεξαρτήτως συνθηκών, καθώς παρατηρείται τόσο σε ημέρες σταθερής παραγωγής (Σχήματα 5.27 – 5.29) όσο και σε ημέρες με διακυμάνσεις στην παραγωγή (Σχήμα 5.30).



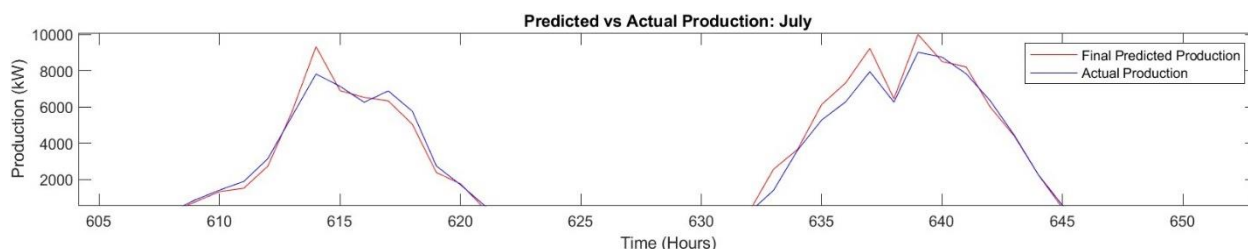
Σχήμα 5.27. Υψηλή θερμοκρασία - Υπερεκτίμηση παραγωγής - Αύγουστος 2020.



Σχήμα 5.28. Υψηλή θερμοκρασία – Υπερεκτίμηση παραγωγής – Ιούλιος 2021.



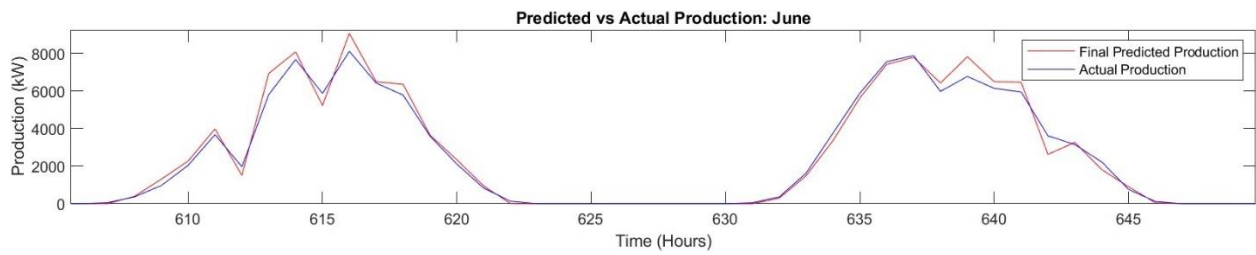
Σχήμα 5.29. Υψηλή θερμοκρασία - Υπερεκτίμηση παραγωγής - Αύγουστος 2021.



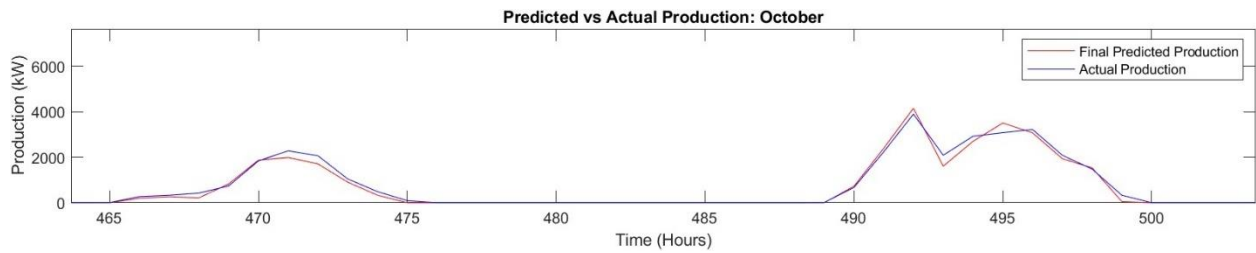
Σχήμα 5.30. Υψηλή θερμοκρασία – Υπερεκτίμηση παραγωγής – Ιούλιος 2023.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του μοντέλου που αξίζει να αναλυθεί είναι ο τρόπος με τον οποίο ανταποκρίθηκε στις ημέρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία παρουσίαζαν έντονες διακυμάνσεις.

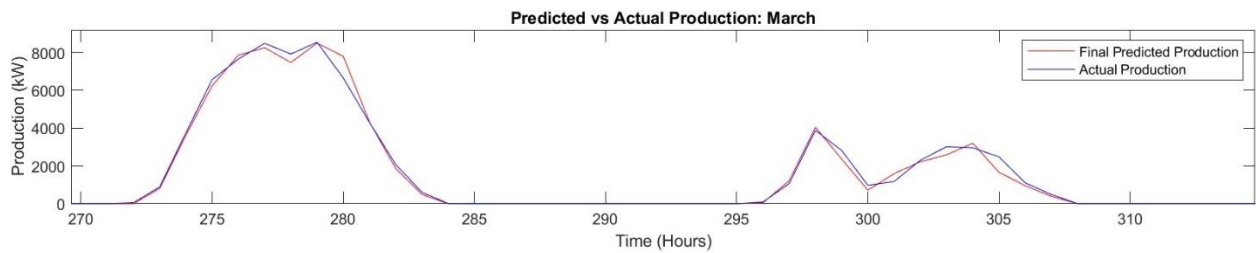
Μία κατηγορία περιλαμβάνει τις περιπτώσεις όπου το μοντέλο κατάφερε να παραμείνει κοντά στις πραγματικές τιμές, παρέχοντας ακριβείς προβλέψεις της παραγωγής του πάρκου (Σχήματα 5.31 – 5.35). Μία άλλη κατηγορία αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου υπήρξαν αποκλίσεις στις προβλέψεις του μοντέλου, χωρίς όμως αυτές να διαφέρουν σημαντικά από τα πραγματικά δεδομένα (Σχήματα 5.36 – 5.39).



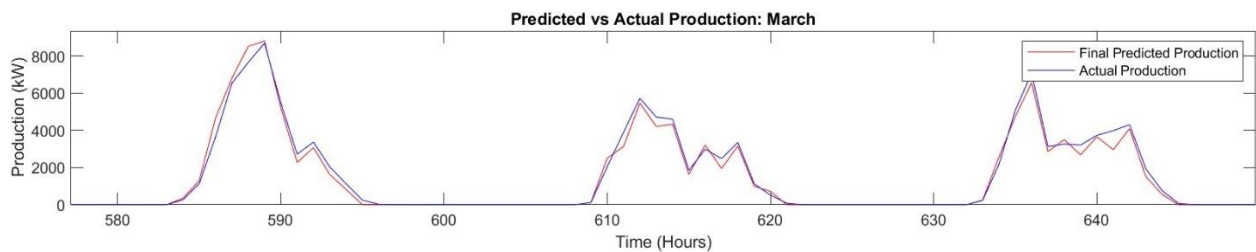
Σχήμα 5.31. Καλή πρόβλεψη - Ήπιες συνθήκες - Ιούνιος 2020.



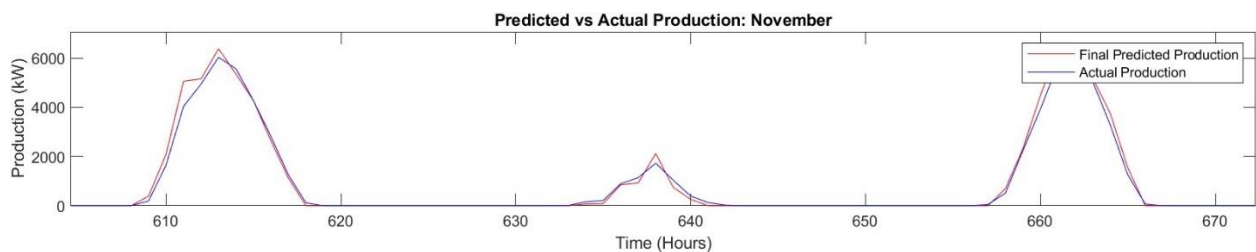
Σχήμα 5.32. Καλή πρόβλεψη – Ήπιες συνθήκες – Οκτώβριος 2020.



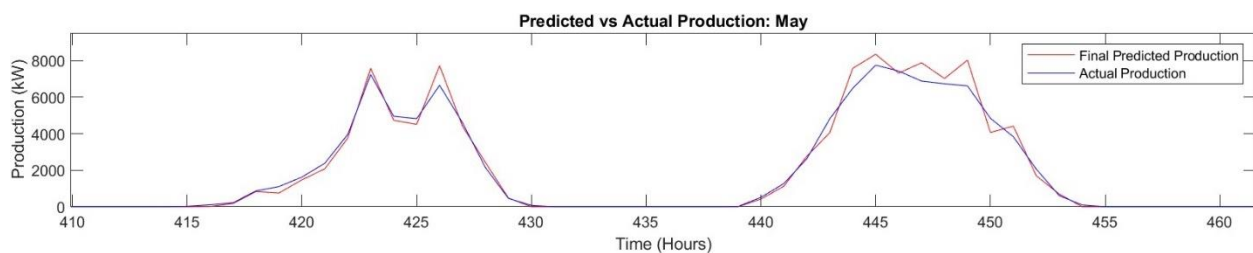
Σχήμα 5.33. Καλή πρόβλεψη - Ήπιες συνθήκες - Μάρτιος 2021.



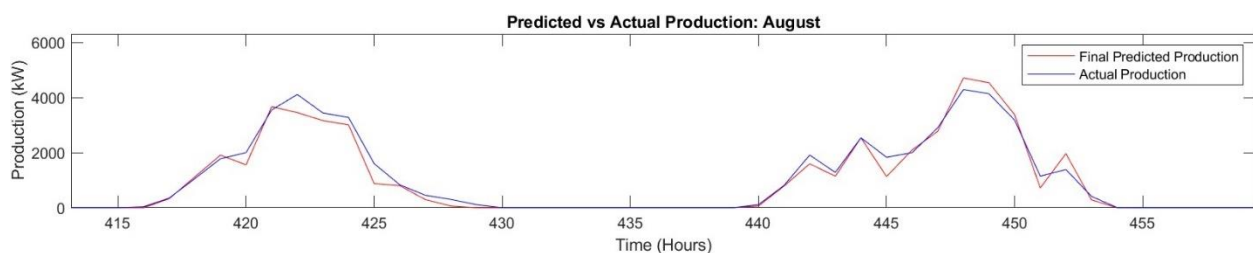
Σχήμα 5.34. Καλή πρόβλεψη – Ήπιες συνθήκες – Μάρτιος 2023.



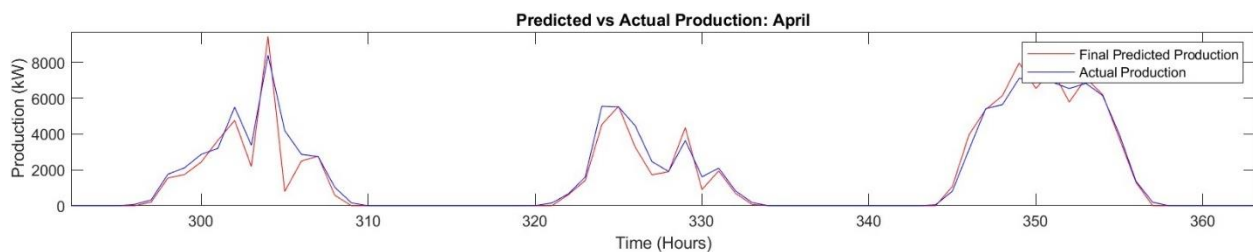
Σχήμα 5.35. Καλή πρόβλεψη - Ήπιες συνθήκες - Νοέμβριος 2023.



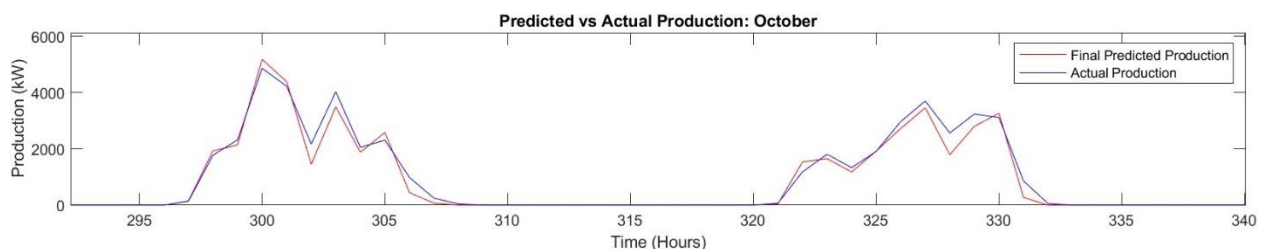
Σχήμα 5.36. Καλή πρόβλεψη – Ήπιες συνθήκες – Μάιος 2021.



Σχήμα 5.37. Καλή πρόβλεψη - Ήπιες συνθήκες - Αύγουστος 2021.



Σχήμα 5.38. Καλή πρόβλεψη – Ήπιες συνθήκες – Απρίλιος 2023.

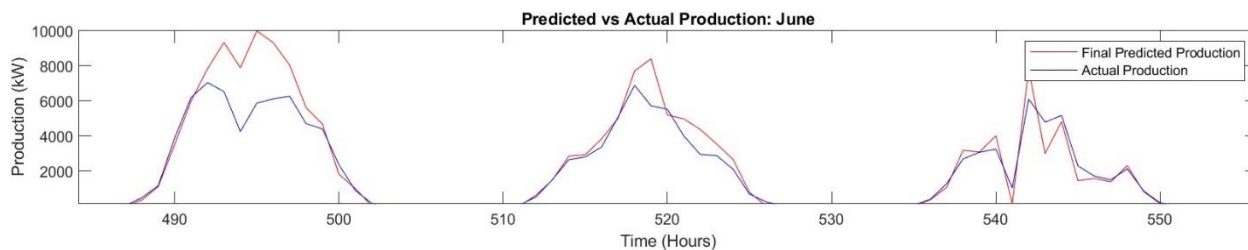


Σχήμα 5.39. Καλή πρόβλεψη - Ήπιες συνθήκες - Οκτώβριος 2023.

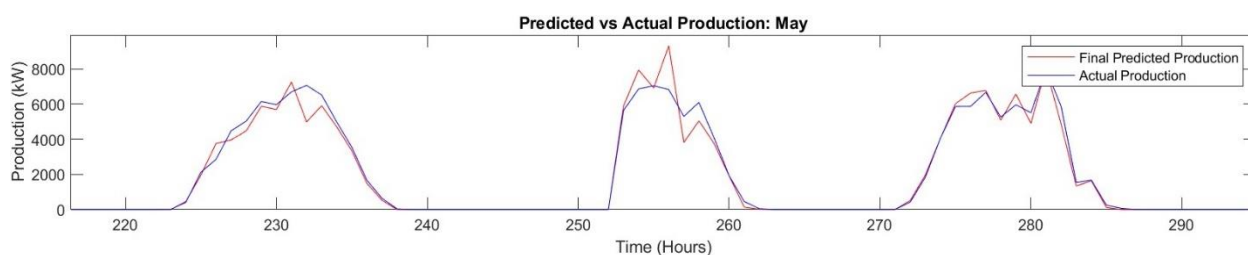
Στα παραπάνω σχήματα παρατηρούνται μικρές διαφορές μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής ισχύος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όλοι οι προαναφερθέντες μήνες είναι μεταβατικοί, γνωστοί για τις συνεχώς μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, οι βροχοπτώσεις κ.λπ. διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των καμπυλών εξόδου και στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, μια ακόμη κατηγορία αφορά τις περιπτώσεις όπου το μοντέλο απέτυχε σημαντικά να προβλέψει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάρκου υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες (Σχήματα 5.40 – 5.42). Αυτό παρατηρείται ξανά κατά τη διάρκεια μεταβατικών μηνών, ωστόσο

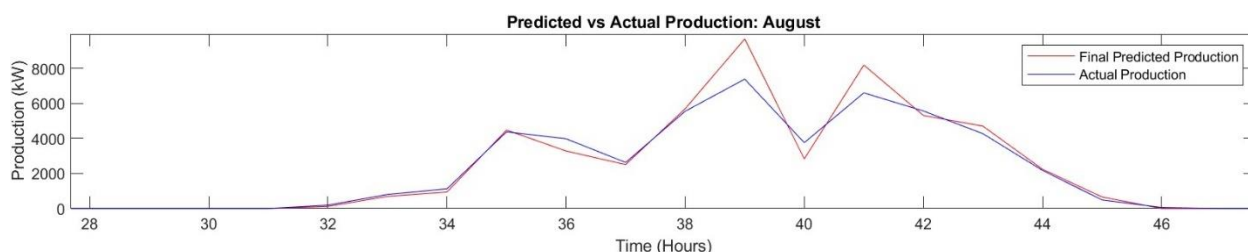
είναι πιο συχνό σε περιόδους υψηλής παραγωγής. Ειδικότερα, τέτοιες αποτυχίες εμφανίζονται σε περιόδους ασταθών καιρικών συνθηκών, οι οποίες είναι ταυτόχρονα σχετικά ευνοϊκές για υψηλή παραγωγή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παρουσία ασθενών και μικρής διάρκειας βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.



Σχήμα 5.40. Κακή πρόβλεψη - Ασταθείς συνθήκες - Ιούνιος 2021.



Σχήμα 5.41. Κακή πρόβλεψη - Ασταθείς συνθήκες - Μάιος 2023.

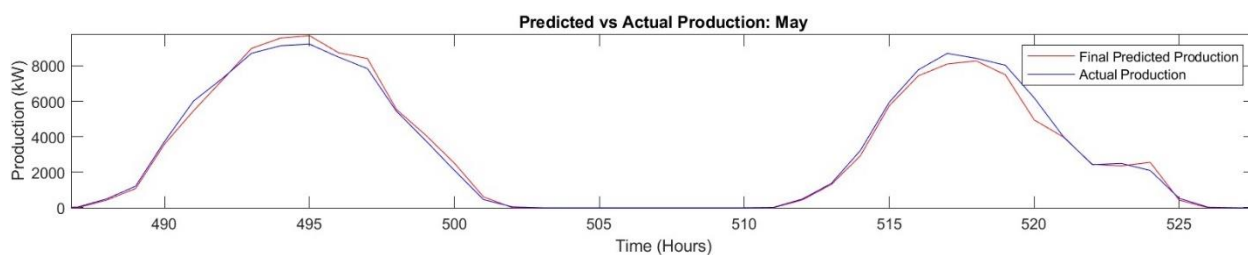


Σχήμα 5.42. Κακή πρόβλεψη - Ασταθείς συνθήκες - Αύγουστος 2023.

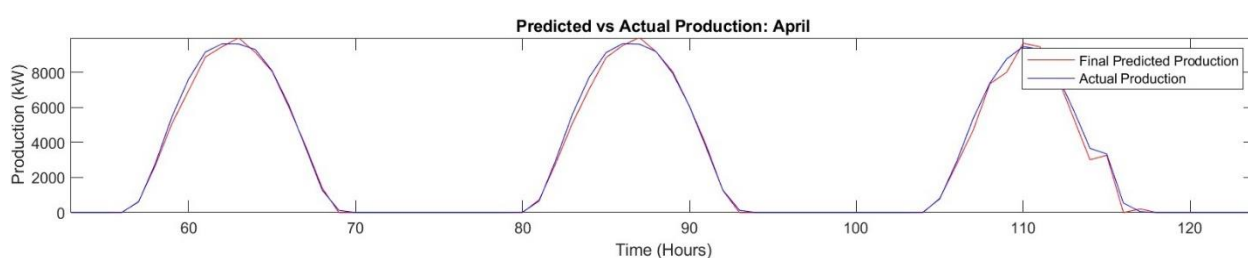
Το μοντέλο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποδίδει εξαιρετικά υπό συνθήκες που πλησιάζουν τις ιδανικές θερμοκρασίες, δηλαδή περίπου στους 25°C. Αυτή η απόδοση παρατηρείται κυρίως κατά τις περιόδους μεταβατικών μηνών, όπως η άνοιξη και το φθινόπωρο, σε ημέρες με ήπιες θερμοκρασίες κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Νοέμβριο, καθώς και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όταν δεν παρατηρούνται φαινόμενα καύσωνα. Σε αυτές τις περιόδους, το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί σχεδόν υπό ιδανικές συνθήκες, γεγονός που επιτρέπει στο μοντέλο, το οποίο βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και έχει βάση τις ίδιες ιδανικές παραμέτρους, να αποδίδει στο μέγιστο βαθμό.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μοντέλο να προβλέπει με εξαιρετική ακρίβεια την παραγωγή ενέργειας σε αυτές τις ευνοϊκές συνθήκες. Όπως θα φανεί και παρακάτω, το μοντέλο επιτυγχάνει

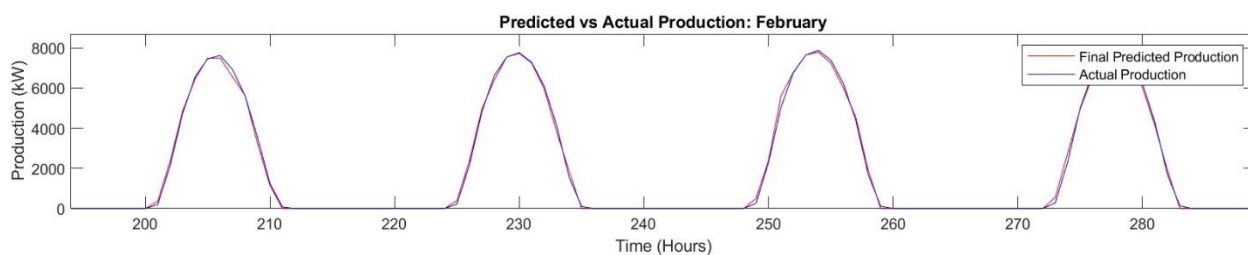
σχεδόν απόλυτη ακρίβεια στις προβλέψεις του για τη σταθερή παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου, ακόμα και σε ημέρες όπου η παραγωγή δεν είναι απόλυτα σταθερή και παρατηρούνται μικρές διακυμάνσεις.



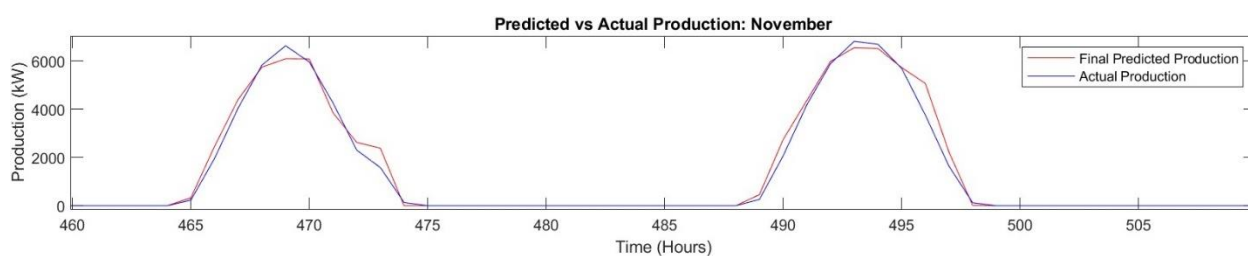
Σχήμα 5.43. Σταθερή παραγωγή - Ελάχιστες διακυμάνσεις - Μάιος 2020.



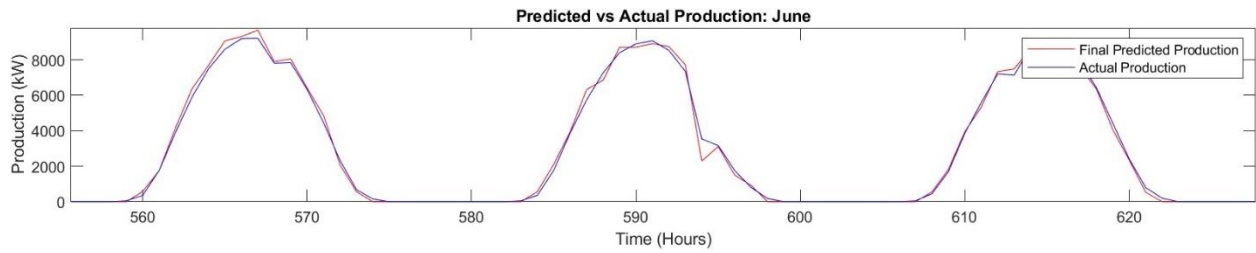
Σχήμα 5.44. Σταθερή παραγωγή - Ελάχιστες διακυμάνσεις - Απρίλιος 2021.



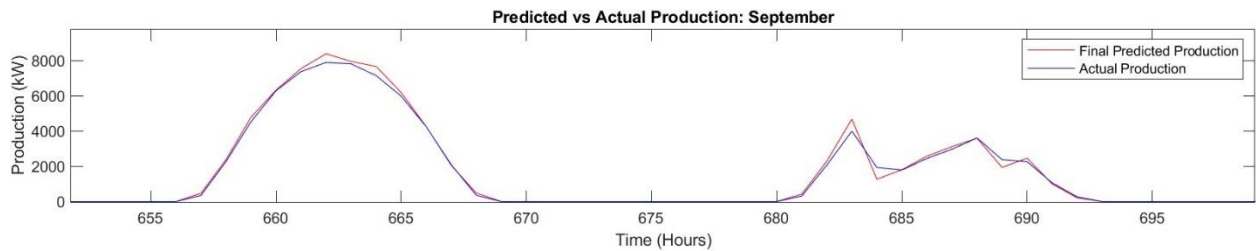
Σχήμα 5.45. Σταθερή παραγωγή - Ελάχιστες διακυμάνσεις - Φεβρουάριος 2023.



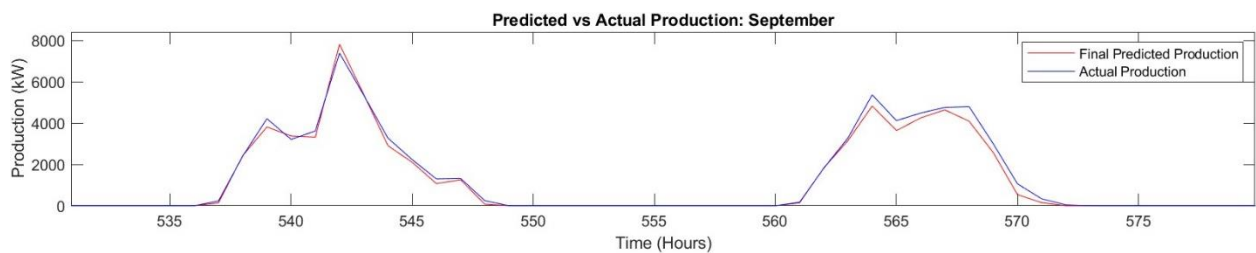
Σχήμα 5.46. Σταθερή παραγωγή – Μέτριες διακυμάνσεις – Νοέμβριος 2020.



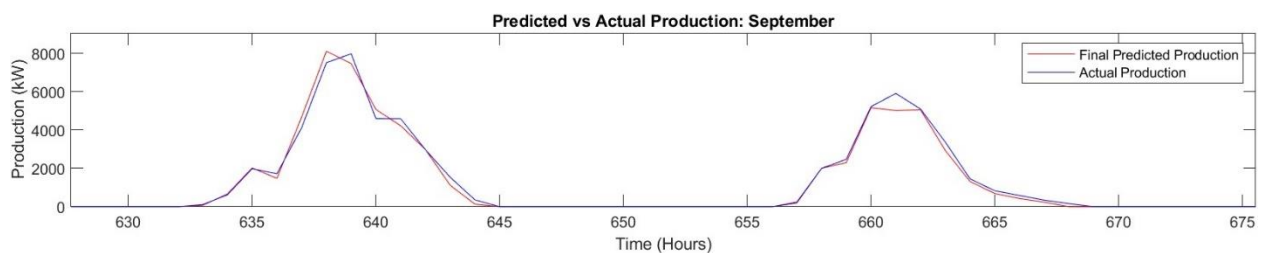
Σχήμα 5.47. Σταθερή παραγωγή - Μέτριες διακυμάνσεις - Ιούνιος 2023.



Σχήμα 5.48. Κυμαινόμενη παραγωγή – Μέτριες διακυμάνσεις – Σεπτέμβριος 2023.



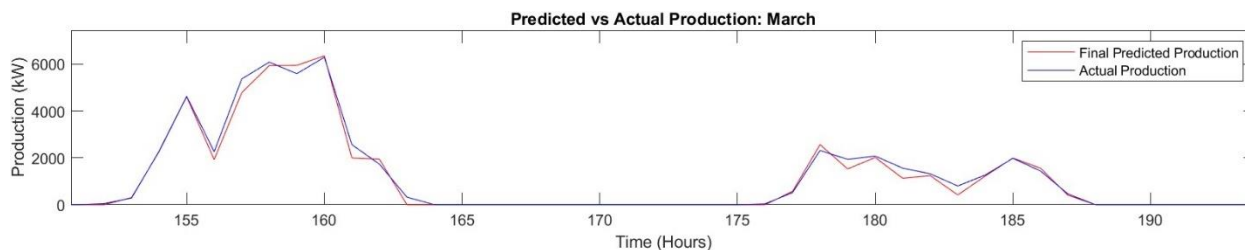
Σχήμα 5.49. Κυμαινόμενη παραγωγή - Αρκετές διακυμάνσεις - Σεπτέμβριος 2020.



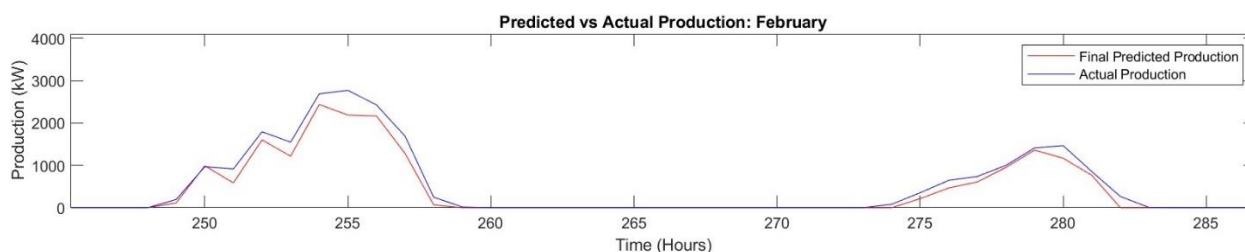
Σχήμα 5.50. Κυμαινόμενη παραγωγή - Αρκετές διακυμάνσεις - Σεπτέμβριος 2021.

Μία ιδιαίτερη τάση που αξίζει να αναλυθεί αφορά την απόδοση του μοντέλου υπό συνθήκες μέτριας ενεργειακής παραγωγής. Αυτές οι συνθήκες αντιστοιχούν σε ώρες όπου η θερμοκρασία ή/και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι ιδανικές, αλλά ούτε φτάνουν στα εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Παρόλα αυτά, πιθανώς λόγω της επίδρασης μικροκλιματικών παραγόντων ή της εσωτερικής λειτουργίας του εξοπλισμού, δημιουργούνται καταστάσεις όπου το πραγματικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποδίδει ελαφρώς καλύτερα από ό,τι προβλέπει το μοντέλο. Αν και οι διαφορές αυτές, όπως θα φανεί και στα παρακάτω σχήματα, είναι

μικρές αλλά παραμένουν αξιοσημείωτες καθώς αποτελούν σταθερό μοτίβο στη συμπεριφορά του μοντέλου κατά τη διάρκεια όλων των προσομοιώσεων. Τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται συχνότερα σε μήνες χαμηλής και μέτριας παραγωγής, όπως ο Φεβρουάριος, ο Μάρτιος, ο Οκτώβριος και ο Νοέμβριος.

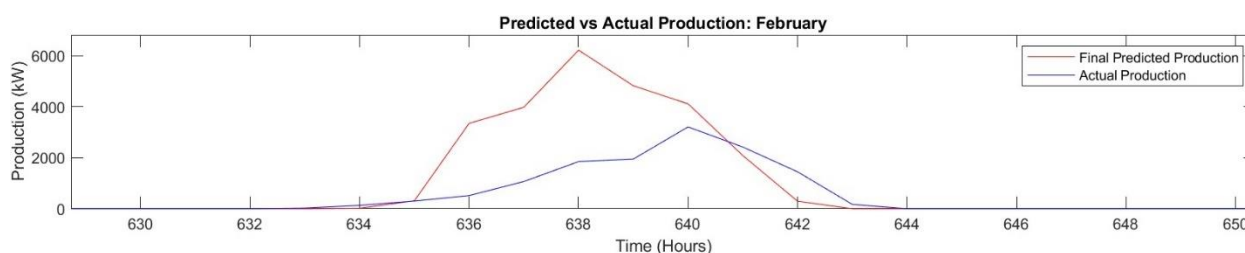


Σχήμα 5.51. Συντηρητική πρόβλεψη - Μάρτιος 2020.

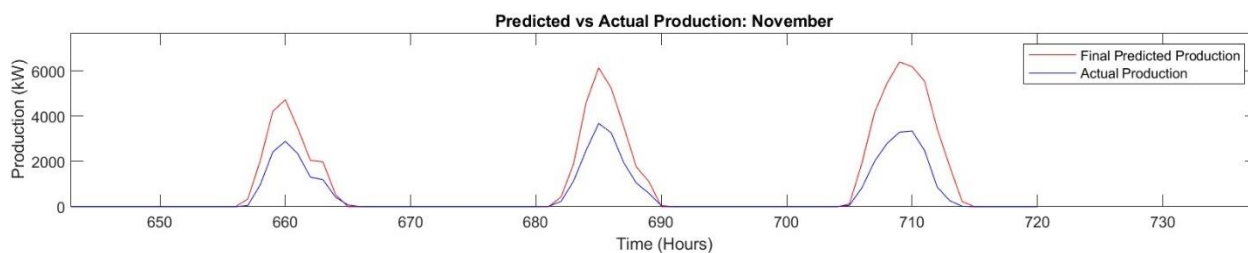


Σχήμα 5.52. Συντηρητική πρόβλεψη - Φεβρουάριος 2021.

Τελευταία αλλά σημαντική συμπεριφορά ως προς ανάλυση είναι η λειτουργία του μοντέλου στις στιγμές που το πάρκο δεν παράγει ισχύ. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για δύο λόγους: μέρος του πάρκου να έχει τεθεί εκτός για λόγους συντήρησης ή ολόκληρο το πάρκο να έχει τεθεί εκτός λειτουργίας για λόγους συντήρησης, προστασίας από καιρικές συνθήκες, κινδύνου φυσικής καταστροφής, κ.λπ. Αυτομάτως δημιουργούνται δύο σενάρια στα οποία το μοντέλο πρέπει να μελετηθεί. Το πρώτο σενάριο, της μερικής αποσύνδεσης του πάρκου, είναι και το πιο δύσκολο να μοντελοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει διότι οι αισθητήρες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που βρίσκονται στο πάρκο δεν αποσυνδέονται, με αποτέλεσμα το μοντέλο να μην αντιλαμβάνεται την διαφορά στις συνθήκες λειτουργίας που επικρατεί. Ως απόρροια αυτού, δημιουργείται ένα φαινόμενο σαν αυτό στα σχήματα 5.53 και 5.54 όπου το μοντέλο παράγει μία καμπύλη ενέργειας με παρόμοια (Σχήμα 5.53) ή ίδια (Σχήμα 5.54) μορφή με την πραγματική παραγωγή ενέργειας.

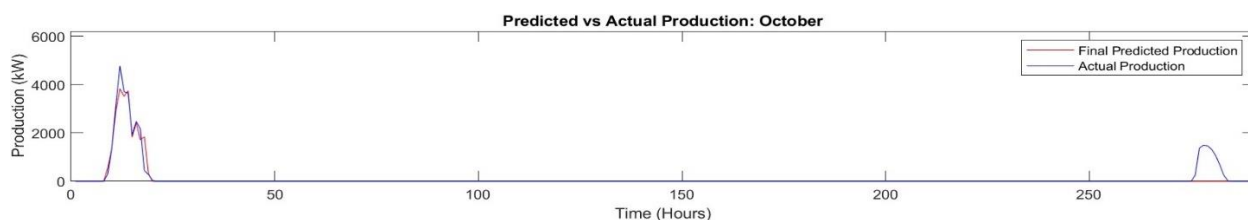


Σχήμα 5.53. Μέρος του πάρκου εκτός λειτουργίας - Φεβρουάριος 2020.



Σχήμα 5.54. Μέρος του πάρκου εκτός λειτουργίας - Νοέμβριος 2023.

Στην περίπτωση του Σχήματος 5.55, είναι φανερό πως το μοντέλο μπορεί να αντιληφθεί στιγμές όπου το πάρκο είναι εντελώς εκτός λειτουργίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι μετρήσεις από τους αισθητήρες θερμοκρασίας ή/και ακτινοβολίας μηδενίζονται, το μοντέλο αντιλαμβάνεται πως το πάρκο είναι εκτός και η παραγωγή του μηδενίζεται, ταυτιζόμενη με την παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου. Έτσι εγείρεται το συμπέρασμα πως το μοντέλο λειτουργεί αποδοτικά σε συνθήκες κατά τις οποίες το πάρκο και οι αισθητήρες του είναι εντελώς εκτός λειτουργίας αλλά αδυνατεί να αντιληφθεί τις συνθήκες και να μοντελοποιήσει την παραγωγή ενέργειας υπό μερική μη-λειτουργία του πάρκου.



Σχήμα 5.55. Όλο το πάρκο εκτός λειτουργίας - Οκτώβριος 2021.

Όπως αναφέρθηκε και στις αναλύσεις ανά έτος, το μοντέλο παρουσιάζει σταθερά καλή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Παρά ταύτα, οι συμπεριφορές του μεταβάλλονται ανά μήνα, δημιουργώντας τάσεις που παρακολουθήθηκαν και αναλύθηκαν. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας (Πίνακας 5.4) που συγκεντρώνει όλες τις διαφορές παραγωγής ενέργειας του μοντέλου σε σχέση με την πραγματική παραγωγή, κατανεμημένες ανά μήνα και ανά έτος προσομοίωσης.

Πίνακας 5.4. Διαφορές επί της πραγματικής παραγωγής ανά έτος προσομοίωσης.

| Μήνας | Διαφορά επί της πραγματικής (%) 2020 | Διαφορά επί της πραγματικής (%) 2021 | Διαφορά επί της πραγματικής (%) 2023 |
|-------------|--|--|--|
| Ιανουάριος | -0.024% | 0.739% | 0.549% |
| Φεβρουάριος | -1.544% | -3.851% | -1.983% |
| Μάρτιος | -3.121% | -0.513% | -3.660% |
| Απρίλιος | -1.470% | 0.137% | -2.435% |
| Μάιος | -0.527% | 0.254% | -0.786% |
| Ιούνιος | 0.343% | 4.632% | -0.991% |
| Ιούλιος | 0.921% | 1.657% | -0.689% |
| Αύγουστος | 1.805% | 2.083% | 1.552% |
| Σεπτέμβριος | 1.061% | 2.435% | 1.768% |
| Οκτώβριος | -1.373% | 3.562% | 0.800% |
| Νοέμβριος | 2.327% | 11.984% | 5.041% |
| Δεκέμβριος | 3.407% | 15.735% | 1.865% |

Ο σκοπός αυτού του πίνακα είναι η συνολική αποτίμηση των τάσεων που αναλύθηκαν ανά έτος, η επικύρωση των ανωτέρω σχημάτων του κεφαλαίου και η αναγνώριση των μηνών κατά τους οποίους το μοντέλο μπορεί να βελτιωθεί. Με αυτόν τον τρόπο, εντοπίζονται οι μήνες στους οποίους το μοντέλο παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα, αυτοί στους οποίους απαιτεί βελτίωση και οι μήνες που χρήζουν περαιτέρω μελέτης.

Ξεκινώντας από τον Ιανουάριο, παρατηρείται αυξημένη παραγωγή κυρίως κατά τις περιόδους των αιχμών ισχύος, γεγονός που είναι εμφανές σε όλα τα έτη, ακόμα και το 2020, όπου η τάση αυτή φαίνεται να μην ισχύει. Στους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, οι μεταβατικές καιρικές συνθήκες δυσκολεύουν το μοντέλο, όπως έχει προαναφερθεί. Οι συνθήκες αυτές δημιουργούν καταστάσεις στις οποίες το μοντέλο δεν καταφέρνει να βρει σταθερότητα, με αποτέλεσμα να κάνει ελαφρώς

λανθασμένες ή συντηρητικές προβλέψεις για την παραγωγή του πάρκου. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της συνολικής προβλεπόμενης παραγωγής ενέργειας.

Τον Απρίλιο και, κυρίως, τον Μάιο παρατηρείται βελτίωση του μοντέλου, καθώς όσο πλησιάζουν οι μήνες του καλοκαιριού, οι ήπιες καιρικές συνθήκες εξασφαλίζουν πιο σταθερές τάσεις στην ακτινοβολία και τη θερμοκρασία, οι οποίες είναι ευκολότερο να παρακολουθηθούν από το μοντέλο. Οι συνθήκες παραγωγής γίνονται ακόμα πιο ευνοϊκές τον Ιούνιο, με εξαίρεση το 2021, καθιστώντας τους τρεις προαναφερθέντες μήνες αρκετά συμβατούς για την ομαλή λειτουργία του μοντέλου.

Οι πιο ζεστοί μήνες του Αυγούστου, κυρίως, και του Σεπτεμβρίου, σε συνδυασμό με τις μεταβατικές συνθήκες του τελευταίου, ειδικά μετά το πρώτο δεκαπενθήμερο, επιβεβαιώνουν τις μικρές δυσκολίες που συνάντησε το μοντέλο. Η αυξημένη παραγωγή λόγω μικροκλιμάτων και της γενικότερα δύσκολης συμπεριφοράς του εξοπλισμού σε αυτές τις καιρικές συνθήκες αποδεικνύεται στις μικρές αποκλίσεις που καταγράφηκαν.

Τέλος, οι μήνες του Οκτωβρίου, Νοεμβρίου και, ειδικά, Δεκεμβρίου χρήζουν αναλυτικής μελέτης με άλλους τύπους δεδομένων. Συχνές διαταραχές στη λειτουργία του πάρκου, είτε λόγω καιρικών συνθηκών είτε λόγω αναγκαιότητας επισκευών και συντήρησης, επηρέασαν την πρόβλεψη παραγωγής του μοντέλου στους μεταβατικούς μήνες αυτούς. Επιπλέον, ο Δεκέμβριος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εμπίπτει στην κατηγορία «υπερεκτίμησης» της παραγωγής, μαζί με τον Ιανουάριο.

6. Συζήτηση και Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει το μοντέλο και αναλύσει τη συμπεριφορά του ανά μήνα, ανά εποχή και υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες, είναι σημαντικό να παρουσιαστούν τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν. Το μοντέλο αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό, επιτυγχάνοντας αξιοπιστία της τάξης του 98%. Αυτό είναι εντυπωσιακό για ένα σύστημα που βασίζεται σε καιρικές συνθήκες για τους υπολογισμούς του, δεδομένου ότι δεν μπορεί να προσαρμοστεί πλήρως σε καταστάσεις της πραγματικής ζωής, όπως φυσικές καταστροφές, γήρανση του εξοπλισμού και άλλους εξωγενείς παράγοντες, που δεν είναι πάντα εύκολο να παρακολουθηθούν. Παρά τις προκλήσεις αυτές, τα αποτελέσματα θεωρούνται εξαιρετικά.

Ωστόσο, αναδείχθηκαν ορισμένα προβλήματα και τάσεις. Ειδικότερα, συνθήκες όπως ο παγετός ή ο καύσωνας προκάλεσαν δυσκολίες στο μοντέλο. Αν και αυτές οι συνθήκες εγείρουν ερωτήματα, ακόμα και πιο εξελιγμένα μοντέλα δυσκολεύονται να τις προβλέψουν επαρκώς. Επιπλέον, η συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια ημερών με ασταθείς καιρικές συνθήκες, οι οποίες οδηγούν σε μεγάλη αστάθεια της παραγωγής ενέργειας, απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθεί με απόλυτη ακρίβεια η παραγωγή ενός συστήματος που εξαρτάται από παράγοντες που μεταβάλλονται διαρκώς σε πραγματικό χρόνο.

Μία πιθανή βελτίωση θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της βαθύτερης μελέτης της συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων υπό δυσμενείς συνθήκες. Επιπλέον, η εισαγωγή νέων παραμέτρων για τις καιρικές συνθήκες, η κατηγοριοποίηση των δεδομένων και η δυναμική προσαρμογή των χαρακτηριστικών του μοντέλου θα μπορούσαν να αυξήσουν την ακρίβεια των προβλέψεων. Ωστόσο, τέτοιες βελτιώσεις αυξάνουν την πολυπλοκότητα του μοντέλου, γεγονός που θα μπορούσε να το απομακρύνει από τον αρχικό στόχο της ευκολίας υλοποίησης.

6.2 Προοπτικές

Τα αναλυτικά δεδομένα και συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα χρήσης μοντέλων βασισμένων σε ψηφιακά δίδυμα (digital twins) για φωτοβολταϊκά συστήματα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προοπτική μελέτης ενός συστήματος «έξυπνου σπιτιού», το οποίο να περιλαμβάνει συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (από φωτοβολταϊκά στη στέγη), φορτιστή ηλεκτρικού οχήματος, κ.λπ.

Ένα τέτοιο σύστημα, αν και φαινομενικά περίπλοκο, θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί με την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων. Με την κατάλληλη σύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα που προβλέπει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενημερώνει τον χρήστη για την παραγωγή αυτή και προτείνει βέλτιστους τρόπους αξιοποίησης της ενέργειας, όπως η φόρτιση του αυτοκινήτου συγκεκριμένες ώρες ή η βέλτιστη χρήση ζεστού νερού. Έτσι το ψηφιακό δίδυμο αυτό θα μπορούσε να μειώσει την εξάρτηση του σπιτιού από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, να ελαχιστοποιήσει το ενεργειακό του αποτύπωμα και να ενισχύσει την αίσθηση αυτονομίας και ασφάλειας για τον χρήστη.

Παράλληλα, η χρήση απλοποιημένων ψηφιακών διδύμων μπορεί να επεκταθεί στη διαχείριση ευρύτερων δικτύων. Για παράδειγμα, η δημιουργία ψηφιακών διδύμων για φωτοβολταϊκά πάρκα μίας περιοχής ή περιφέρειας θα μπορούσε να συμβάλλει στην ακριβέστερη πρόβλεψη της ενεργειακής παραγωγής, την εκτίμηση των αναγκών για εισαγωγή ή εξαγωγή ενέργειας, καθώς και τη βέλτιστη συντήρηση των εγκαταστάσεων. Η δυνατότητα παρακολούθησης, σε πραγματικό χρόνο, της παραγωγής ενέργειας θα μπορούσε να μειώσει το κόστος λειτουργίας, αυξάνοντας ταυτόχρονα την απόδοση του συστήματος.

6.3 Επεκτάσεις

Το παρόν μοντέλο ανέδειξε μία μόνο από τις πολλές εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων. Πέραν της απλής προσομοίωσης, τα δεδομένα έδειξαν ότι ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει σενάρια για διαφορετικές συνθήκες (π.χ. χαμηλές θερμοκρασίες, μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία) ώστε να αποκτήσει πληρέστερη εικόνα του συστήματός του. Επιπλέον, με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης (machine learning), το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιεί τα λάθη του για να βελτιώσει την απόδοσή του. Προηγμένες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) και η εικονική πραγματικότητα (virtual reality), μπορούν να προσφέρουν επιπλέον δυνατότητες, όπως η τρισδιάστατη απεικόνιση των σεναρίων, η προσομοίωση φυσικής φθοράς ή ρύπανσης των φωτοβολταϊκών και η υποστήριξη για ακόμα πιο σύνθετα συστήματα και εφαρμογές.

Παρά τις δυνατότητες αυτές, η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη δημιουργία ενός μοντέλου προσιτού, οικονομικού και εύχρηστου. Με την περαιτέρω ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών, οι εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων μπορούν να επεκταθούν και να συμβάλουν καθοριστικά στην ενεργειακή βιωσιμότητα και αποδοτικότητα.

7. Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency (IEA). (2024). *Renewables 2023*.
- [2] Eurostat. (2024, Ιούνιος). *Energy production and imports*.
- [3] Independent Power Transmission Operator (IPTO). (2024, Ιανουάριος). *2023: A record year for renewable energy sources - The evolution of the energy mix in the decade*.
- [4] Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος. (2024, Αύγουστος). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*.
- [5] Παπαποστόλου, Τ. (2014). *Προσομοίωση ενός αυτόνομου συστήματος ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυψελών υδρογόνου*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [6] Andreani, L. C., Bozzola, A., Kowalczewski, P., Liscidini, M., & Redorici, L. (2019). Silicon solar cells: Toward the efficiency limits. *Advances in Physics: X*, 4(1), 1548305.
- [7] Donev, J. M. K. C., et al. (2024). *Energy education*. Διαθέσιμο στο: <https://energyeducation.ca>.
- [8] Μαντέλος, Β. (2024). *Βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας κτηρίου με φωτοβολταϊκά συστήματα και κυψέλες καυσίμου*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [9] Βαΐα, Δ. (2016). *Σχεδιασμός και προσομοίωση λειτουργίας αυτόνομου υβριδικού*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [10] Luque, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons Ltd.
- [11] Nelson, J. (2003). *The physics of solar cells*. Imperial College Press.

- [12] IEA-PVPS Task 13. (2022). *Soiling losses – Impact on the performance of photovoltaic power plants*.
- [13] Sharma, A., Singh, N., & Gawre, S. (2021). Operational losses of a solar power plant: A case study. *Energy Reports*, 7, 1042–1049.
- [14] Deiss, V. (2023). *Rapport d'étude sur le bien-être animal – Centrale solaire de CVE à Bissey-sous-Cruchaud*. Statkraft, INRAE, CVE. Διαθέσιμο στο: <https://www.statkraft.com/what-we-do/solar-power/agri-PV/>
- [15] Next2Sun. (n.d.). *Agri-Photovoltaics (Agri-PV)*. Διαθέσιμο στο <https://next2sun.com/en/agripv/>
- [16] Mayville, P., Patil, N. V., & Pearce, J. M. (2020). Distributed manufacturing of aftermarket flexible floating photovoltaic modules. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100683.
- [17] Abdelgaied, M., Kabeel, A. E., Zelenáková, M., & Abd-Elhamid, H. F. (2023). Floating photovoltaic plants as an effective option to reduce water evaporation in water-stressed regions and produce electricity: A case study of Lake Nasser, Egypt. *Renewable Energy*, 200, 100–111.
- [18] Haag, S., & Anderl, R. (2018). Digital twin – Proof of concept. *Manufacturing Letters*, 15 (Part B), 64–66.
- [19] Fuller, A., Fan, Z., & Day, C. (2020). Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971.
- [20] Bruynseels, K., Santoni de Sio, F., & van den Hoven, J. (2018). Digital twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Frontiers in Genetics*, 9, 31.

- [21] You, M., Wang, Q., Sun, H., Castro, I., & Jiang, J. (2022). Digital twins-based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties. *Applied Energy*, 305, 117702.

- [22] Yu, J., Liu, P., & Li, Z. (2020). Hybrid modelling and digital twin development of a steam turbine control stage for online performance monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110077.

- [23] Silva, V. L. G. d., Oliveira Filho, D., Carlo, J. C., & Vaz, P. N. (2022). An approach to solar radiation prediction using ARX and ARMAX models. *Frontiers in Energy Research*, 10, 828323.