



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Διπλωματική Εργασία

Χριστίνα Τσολούδη

Επίβλεψη: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Επόπτευση: Αθανάσιος Ζήσος, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2025

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και της παρουσίασης αυτής ολοκληρώνεται και ένας κύκλος της ζωής μου που θα μείνει για πάντα χαραγμένος στην μνήμη μου. Αυτά τα πέντε χρόνια σπουδών είναι αποτέλεσμα κόπων και διαβάσματος πολλών ετών αλλά και πολλών όμορφων εμπειριών. Τα φοιτητικά μου χρόνια διαμόρφωσαν πολλές πτυχές του χαρακτήρα μου, μου όξυναν το ενδιαφέρον για το κάθε τι που συμβαίνει γύρω μου, μου καλλιέργησαν κριτική και ορθολογική σκέψη και ικανότητες διαχείρισης νέων και άγνωστων αντικειμένων ενασχόλησης. Θα τα θυμάμαι για πάντα με πολύ αγάπη και πολύ σεβασμό στο αντικείμενο σπουδών μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κύριο Ευστρατιάδη, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, όχι μόνο για την καθοδήγηση και την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και για την θετική επιρροή που μου άσκησε στα χρόνια των σπουδών μου, βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο να ανακαλύψω τα ενδιαφέροντά μου στο αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού. Είναι υπόδειγμα καθηγητή που είναι πάντα διαθέσιμος για τους φοιτητές και τις φοιτήτριές του αλλά και επιστήμονα με εξελιγμένη και πρωτοπόρα σκέψη. Χωρίς εκείνον δεν θα είχε δημιουργηθεί η παρούσα εργασία.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάλι από καρδιάς τον Ζήσο Αθανάσιο, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, που ήταν δίπλα μου σε όλες τις φάσεις έρευνας και σύνταξης της συγκεκριμένης εργασίας και πάντα πρόθυμος να μου λύσει την οποιαδήποτε απορία. Οι παρατηρήσεις του ήταν καίριες σε όλες τις πτυχές της εργασίας και οι συμβουλές του ήταν στοχευμένες και μεθοδικές. Ήταν μεγάλη μου χαρά και τιμή που συνεργαστήκαμε.

Πολύ σημαντικό ρόλο έχουν παίξει και οι φίλοι μου στην διάρκεια όλων των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων. Με κάνουν καλύτερο άνθρωπο και με στηρίζουν ανελλιπώς και απεριόριστα και τους ευχαριστώ πολύ για αυτό.

Τέλος, πρωταγωνιστικό ρόλο στα επιτεύγματά μου έχουν παίξει οι γονείς μου, Ελένη και Θοδωρής. Οι δύο αυτοί άνθρωποι με υποστηρίζουν σε κάθε φάση της ζωής μου και είναι δίπλα μου με απεριόριστη αγάπη και κατανόηση. Τους οφείλω ό,τι έχω καταφέρει μέχρι σήμερα και ελπίζω να τους κάνω όσο περήφανους με κάνουν και εκείνοι.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Διπλωματική Εργασία

Χριστίνα Τσολούδη

Επίβλεψη: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Επόπτευση: Αθανάσιος Ζήσος, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας για την Ελλάδα, λόγω της αυξημένης ηλιοφάνειας που δέχεται η χώρα. Ωστόσο, η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα συνδέεται άρρηκτα με μετεωρολογικές διεργασίες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία, δημιουργώντας αβεβαιότητα στην απόδοσή τους. Η ακριβής πρόβλεψη του συντελεστή δυναμικότητας (CF) είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της παραγωγής και την ομαλή ενσωμάτωσή της στο ενεργειακό δίκτυο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσονται και αναλύονται τέσσερα μοντέλα ανάλυσης του CF, βασισμένα σε πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα από διάφορες περιοχές της Ελλάδας, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας των δεδομένων και ως εκ τούτου και των εκτιμήσεων, καθώς και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν μέσω της πλατφόρμας του ENTSO-E για τα έτη 2015-2023 ωριαία δεδομένα παραγωγής ενέργειας λόγω φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα και από τα δελτία του ΔΑΠΕΕΠ δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών για τα παραπάνω έτη. Τα δεδομένα αναλύθηκαν και προέκυψε η χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα για τα έτη που αναφέρθηκαν σε ωριαία κλίμακα. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες στην Ελλάδα και μέσω της πλατφόρμας του PVGIS συλλέχθηκαν ωριαία δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, παράγοντας τις αντίστοιχες χρονοσειρές και τα οποία επικυρώθηκαν μέσω επίγειων σταθμών της χώρας. Τα δεδομένα αυτά συσχετίστηκαν με τον συντελεστή δυναμικότητας και αναπτύχθηκαν τέσσερα μοντέλα (forecasting και simulation, linear και power-type) προκειμένου να βρεθεί το πλέον αποδοτικό στην ανάλυση και πρόβλεψη του CF.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

**DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING**

**ANALYSIS AND FORECASTING OF PHOTOVOLTAIC ENERGY CAPACITY
FACTORS IN GREECE**

Diploma Thesis

Christina Tsoloudi

Academic supervisor: Andreas Efstratiadis, Associate Professor NTUA

Athanasios Zisos, PhD Candidate NTUA

Athens, March 2025

ABSTRACT

Solar energy is one of the most important sources of renewable energy for Greece, due to the abundance of solar radiation the country receives. However, energy production from photovoltaic (PV) systems is directly linked to meteorological processes such as solar radiation and temperature, introducing uncertainty regarding their performance. Accurate forecasting of the capacity factor (CF) is essential for optimizing energy production management and ensuring its smooth integration into the power grid. This thesis develops and analyzes four CF analysis models, based on real meteorological data from various regions of Greece, aiming to improve data accuracy and, consequently, estimation reliability, as well as to enhance the efficient utilization of PV systems.

Specifically, hourly energy production data from PV systems in Greece for the years 2015-2023 were collected via the ENTSO-E platform, while installed PV capacity data for the same years were retrieved from the DAPEEP reports. These data were analyzed to generate an hourly capacity factor time series for Greece over the specified years. Subsequently, 40 representative locations across the country were selected, and hourly solar radiation and temperature data were obtained through the PVGIS platform, forming corresponding time series that were validated using ground-based stations. These datasets were then correlated with the capacity factor, leading to the development of four models (forecasting and simulation, linear and power-type) to determine the most efficient approach for CF estimation and forecasting.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
Εισαγωγή	11
1.1 Πρόλογος	11
1.2 Διάρθρωση Εργασίας	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
Οι ΑΠΕ σε Ευρωπαϊκό και Διεθνές επίπεδο, βασικές έννοιες στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας	13
2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	13
2.2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα	15
2.3 Ηλιακή Ακτινοβολία.....	18
2.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	20
2.5 Εισαγωγή εννοιών απόδοσης	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	25
Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων Παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας και Εγκατεστημένης Ισχύος	25
3.1 Συλλογή δεδομένων παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας μέσω της πλατφόρμας του ENTSO-E	25
3.2 Συλλογή δεδομένων Εγκατεστημένος Ισχύος Φωτοβολταϊκών μέσω της πλατφόρμας του ΔΑΠΕΕΠ	29
3.3 Υπολογισμός και ανάλυση Συντελεστή Δυναμικότητας (Capacity Factor).....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	35
Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας και Θερμοκρασίας	35
4.1 Επιλογή αντιπροσωπευτικών τοποθεσιών και λήψη δεδομένων μέσω της πλατφόρμας PVGIS.....	35
4.2 Ανάλυση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας.....	38
4.3 Ανάλυση δεδομένων θερμοκρασίας.....	40
4.4 Αφαίρεση περιοδικότητας Ηλιακής Ακτινοβολίας	41
4.5 Αφαίρεση περιοδικότητας θερμοκρασίας.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	46
Μοντέλα Ανάλυσης και Πρόγνωσης Συντελεστή Δυναμικότητας	46
5.1 Μοντέλα Πρόγνωσης και Αναγκαιότητά τους	46
5.2 Γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης	49
5.3 Μοντέλο προσομοίωσης τύπου δύναμης	51
5.4 Γραμμικό Μοντέλο πρόγνωσης	53
5.5 Μοντέλο πρόγνωσης τύπου Δύναμης	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	58

Διόρθωση Συντελεστή Δυναμικότητας	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	61
Σύνοψη, Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα.....	61
7.1. Σύνοψη	61
7.2. Συμπεράσματα	61
7.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	62
Βιβλιογραφία.....	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Είναι γεγονός πως οι τρέχουσες κοινωνικές, πολιτικές και περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν όχι μόνο οδηγήσει στην εξάντληση των φυσικών πόρων αλλά και στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής. Η αυξανόμενη ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η εξάρτηση από τους περιορισμένους φυσικούς πόρους καθιστούν τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) περισσότερο αναγκαίες από ποτέ, προκειμένου να υπάρξει βιώσιμη μετάβαση σε ένα καθαρό ενεργειακό μείγμα. Η ηλιακή ενέργεια, η πλέον άφθονη και εύκολα προσβάσιμη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, παίζει καίριο ρόλο στην προσπάθεια για βιώσιμη ανάπτυξη και ενεργειακή αυτονομία.

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα έχουν επιτύχει παγκόσμια αποδοχή και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παροχή καθαρής και βιώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, η παραγωγή φωτοβολταϊκής ισχύος εξαρτάται από μετεωρολογικές διεργασίες που διέπονται από αβεβαιότητα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ατμοσφαιρική θερμοκρασία και η υγρασία, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική χωρική μεταβλητότητα. Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν την αξιοπιστία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, και, καθώς η σημερινή κοινωνία τείνει προς την αποκλειστική αξιοποίηση των ΑΠΕ για παραγωγή ενέργειας, κρίνεται απαραίτητο το να μπορεί κανείς να προβλέπει την Φ/Β ενέργεια μέσω ενός αξιόπιστου και ορθού μοντέλου πρόγνωσης της αποδοτικότητας των πάνελ.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναπτύσσονται 4 μοντέλα ανάλυσης του συντελεστή δυναμικότητας (CF) των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα, με στόχο την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των μετεωρολογικών διεργασιών στην παραγωγή ενέργειας, καθώς και τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των προβλέψεων για την παραγωγή ενέργειας. Ο συντελεστής δυναμικότητας αποτελεί έναν κρίσιμο δείκτη για την αξιολόγηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς καταγράφει την πραγματική παραγωγή ενέργειας σε σχέση με την θεωρητική μέγιστη δυναμικότητα του συστήματος (εγκατεστημένη ισχύς). Το να μπορεί κανείς να προβλέψει τον συντελεστή δυναμικότητας και ως εκ τούτου την ηλιακή παραγωγή είναι καίριας σημασίας, καθώς διευκολύνεται η βέλτιστη διαχείριση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και η εξισορρόπηση της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτής της έρευνας, μέσω της βάσης δεδομένων ENTSO-E συλλέγονται ωριαία δεδομένα παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ελλάδα για το διάστημα 2015-2023, που συνδυάζονται με εκτιμήσεις εγκατεστημένης ισχύος, δημιουργώντας μια χρονοσειρά συντελεστή δυναμικότητας σε ωριαία κλίμακα για το εν λόγω διάστημα. Στην συνέχεια, χρησιμοποιούνται ωριαία δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας σε 40 περιοχές στην Ελλάδα μέσω της πλατφόρμας PVGIS, για την ανάπτυξη τεσσάρων διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης, με χρήση εμπειρικών σχέσεων παλινδρόμησης. Η μελέτη επικεντρώνεται στη ημερήσια ανάλυση των δεδομένων, εστιάζοντας στις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και διερευνά τη δυνατότητα εφαρμογής αυτών των μοντέλων για την πρόβλεψη του CF στην Ελλάδα.

1.2 Διάρθρωση Εργασίας

Στην εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τέθηκε ο βασικός προβληματισμός γύρω από τον οποίο πραγματοποιούνται οι μετέπειτα αναλύσεις και αφορά την ανάγκη για πρόβλεψη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων προκειμένου να παγιωθεί η αξιοπιστία τους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο, θα αναλυθεί εκτενώς ο ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο με σκοπό να γίνει αντιληπτή η ευρύτερη διάθεση και χρήση απέναντι στα συγκεκριμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, θα δοθούν ορισμοί σε μερικές βασικές έννοιες, η αφομοίωση των οποίων είναι απαραίτητη για την πλήρη κατανόηση των θεμάτων αυτής της εργασίας και θα επεξηγηθούν πλήρως το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η έννοια της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο 3^ο Κεφάλαιο, θα συλλεχθούν τα δεδομένα παραγωγής ενέργειας λόγω φωτοβολταϊκών και εγκατεστημένης ισχύος σε ωριαία κλίμακα για όλη την Ελλάδα για τα έτη 2015-2023. Αφού δημιουργηθούν οι αντίστοιχες χρονοσειρές δεδομένων θα υπολογιστεί πάλι σε ωριαία κλίμακα για τα έτη ενδιαφέροντος ο συντελεστής δυναμικότητας όλης της επικράτειας.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, θα επιλεγούν 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες σε όλη την Ελλάδα, από τις οποίες θα συλλεχθούν δεδομένα θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της βάσης δεδομένων PVGIS. Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση αφαίρεσης της περιοδικότητας των μετεωρολογικών αυτών διαδικασιών προς βελτιστοποίηση των δεδομένων.

Στο 5^ο Κεφάλαιο, θα εξεταστούν εμπειρικά μοντέλα για την πρόβλεψη του συντελεστή δυναμικότητας. Τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούνται για προσομοίωση (simulation) και τα υπόλοιπα δύο για στατιστική πρόβλεψη (forecasting). Θα παρουσιαστούν για κάθε ανάλυση οι συντελεστές της εξίσωσης πρόβλεψης για κάθε μήνα καθώς και η συσχέτισή τους με τις πραγματικές τιμές του συντελεστή δυναμικότητας και το σφάλμα της πρόβλεψης.

Στο 6^ο Κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί μία πρώτη υπολογιστική ανάλυση για την διόρθωση του συντελεστή δυναμικότητας σε σχέση με την αστρονομική διάρκεια ημέρας, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψιν αποκλειστικά τις καθαρές ώρες ηλιοφάνειας μέσα στην ημέρα, χωρίς να συνυπολογίζονται οι ώρες στις οποίες δεν υπάρχει ήλιος.

Στο 7^ο Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν μια σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Οι ΑΠΕ σε Ευρωπαϊκό και Διεθνές επίπεδο, βασικές έννοιες στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας

2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Είναι γεγονός πως με την πάροδο του χρόνου οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται ραγδαία και σε συνδυασμό με τις τρέχουσες γεωπολιτικές συνθήκες (π.χ. εμπόλεμη ζώνη Ουκρανίας-Ρωσίας), η απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα κρίνεται όλο και πιο αναγκαία. Η στρατιωτική εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία έχει διαταράξει τον ενεργειακό σχεδιασμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αλλάζοντας τη θέση του φυσικού αερίου από καύσιμο μετάβασης σε μέσο γεωπολιτικής πίεσης [10]. Αυτό έχει αναδείξει την ενεργειακή ασφάλεια ως ζήτημα ύψιστης σημασίας, με την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) να αναζητά τρόπους να μειώσει την εξάρτησή της από τη ρωσική ενέργεια και να επιταχύνει την εφαρμογή φιλόδοξων στόχων για την πράσινη μετάβαση. Η κλιμάκωση της σύγκρουσης στην Ουκρανία ανάγκασε την ΕΕ να κάνει σημαντικά βήματα προς την υπέρβαση των στόχων της για καθαρή ενέργεια για το 2030. Ως απάντηση στην κρίση, η ΕΕ παρουσίασε τη δέσμη μέτρων “Fit for 55” το καλοκαίρι του 2021, η οποία περιλάμβανε στόχο 40% για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2030 [22].

Οι συμβατικοί πόροι (π.χ. άνθρακας, πετρέλαιο) που κυριαρχούσαν τις προηγούμενες δεκαετίες στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, τείνουν να εξαντληθούν και ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που ενδέχεται να συμβάλλουν στην υπερθέρμανση τον πλανήτη. Οι ΑΠΕ από την άλλη, δεν εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα κατά την αξιοποίησή τους και συμβάλλουν στον περιορισμό του αποτυπώματος άνθρακα. Οι κυβερνήσεις παγκοσμίως έχουν δεσμευτεί να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ μέσω συμφωνιών και στρατηγικών όπως η Συμφωνία του Παρισίου και η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία. Η Συμφωνία του Παρισίου πρόκειται για μία διεθνή συμφωνία που υιοθετήθηκε στις 12 Δεκεμβρίου του 2015 στο πλαίσιο της Διάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (COP21). Σκοπό έχει την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, μέσω της μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της διατήρησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε ασφαλή επίπεδα. Κάθε χώρα υποβάλλει Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές (Nationally Determined Contributions - NDCs) με στόχο τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας και την συνεργασία και οικονομική υποστήριξη των χωρών σε αυτό το εγχείρημα μέσω του Πράσινου Ταμείου. Οι δεσμεύσεις της κάθε χώρας αναθεωρούνται ανά 5 χρόνια, αναγνωρίζοντας το αν πρόκειται για ανεπτυγμένο ή αναπτυσσόμενο κράτος. Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (2019), τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης φιλοδοξούν στο να μετατραπεί η Ευρώπη σε μία κλιματικά ουδέτερη ήπειρο μέχρι το 2050 θέτοντας στόχους που αφορούν την βιωσιμότητα στην ενέργεια, στα τρόφιμα και στην γεωργία, την ενθάρρυνση της κυκλικής οικονομίας μέσω της ανακύκλωσης σε διάφορες μορφές αλλά και την διασφάλιση του δικαιώματος πρόσβασης σε καθαρή και ανανεώσιμη ενέργεια μέσω του εκσυγχρονισμού του Δικτύου σε όλες τις περιοχές [23].

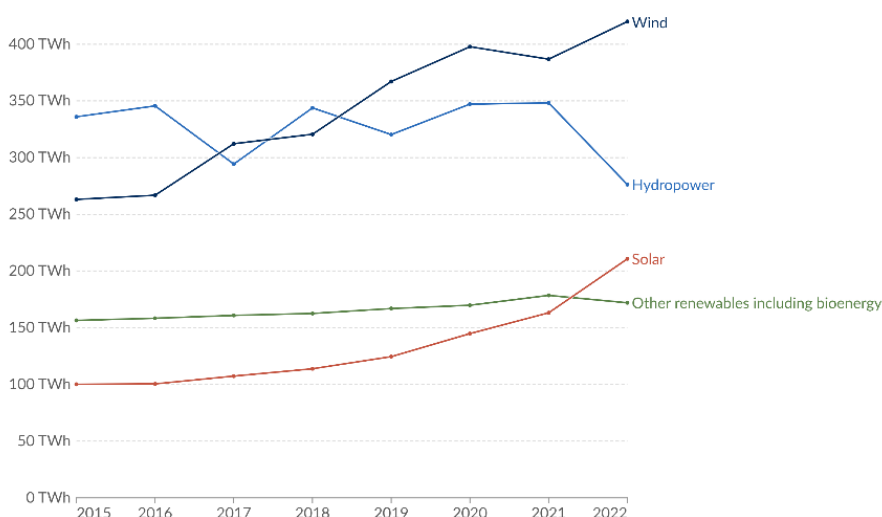
Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για το έτος 2023, το 67% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση προήλθε από «καθαρές» πηγές, σε σχέση με το

παγκόσμιο ποσοστό του 39%, ενώ, πιο συγκεκριμένα, περισσότερο από το ένα τέταρτο της ενέργειας αυτής (27%) προήλθε από αιολικά και ηλιακά συστήματα, με 10 χώρες να υπερβαίνουν αυτό το ποσοστό. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 55TWh (+13%) και η ηλιακή κατά 36TWh (+17%) σε σύγκριση με το 2022 [8]. Συνολικά, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια σημείωσαν τη μεγαλύτερη ετήσια αύξηση τους μέχρι σήμερα κάτι το οποίο είναι εμφανές και στα Σχήματα 2.1. και 2.2.

Modern renewable energy generation by source, European Union (27)

Measured in terawatt-hours¹.

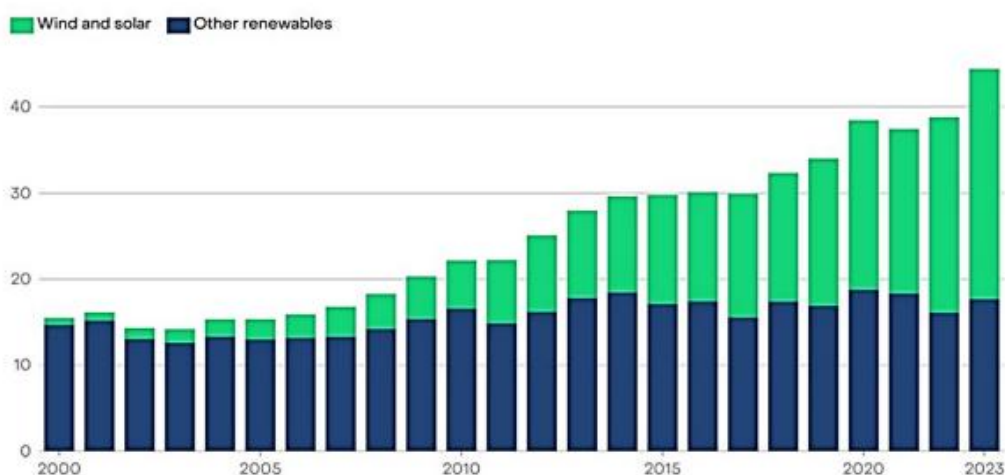
Our World
in Data



Data source: Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)
OurWorldinData.org/renewable-energy | CC BY

1. Watt-hour: A watt-hour is the energy delivered by one watt of power for one hour. Since one watt is equivalent to one joule per second, a watt-hour is equivalent to 3600 joules of energy. Metric prefixes are used for multiples of the unit, usually: - kilowatt-hours (kWh), or a thousand watt-hours. - Megawatt-hours (MWh), or a million watt-hours. - Gigawatt-hours (GWh), or a billion watt-hours. - Terawatt-hours (TWh), or a trillion watt-hours.

Σχήμα 2.1: Παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ για κάθε κατηγορία, Ευρωπαϊκή Ένωση 2015-2023 [ΠΗΓΗ: www.ourworldindata.org]



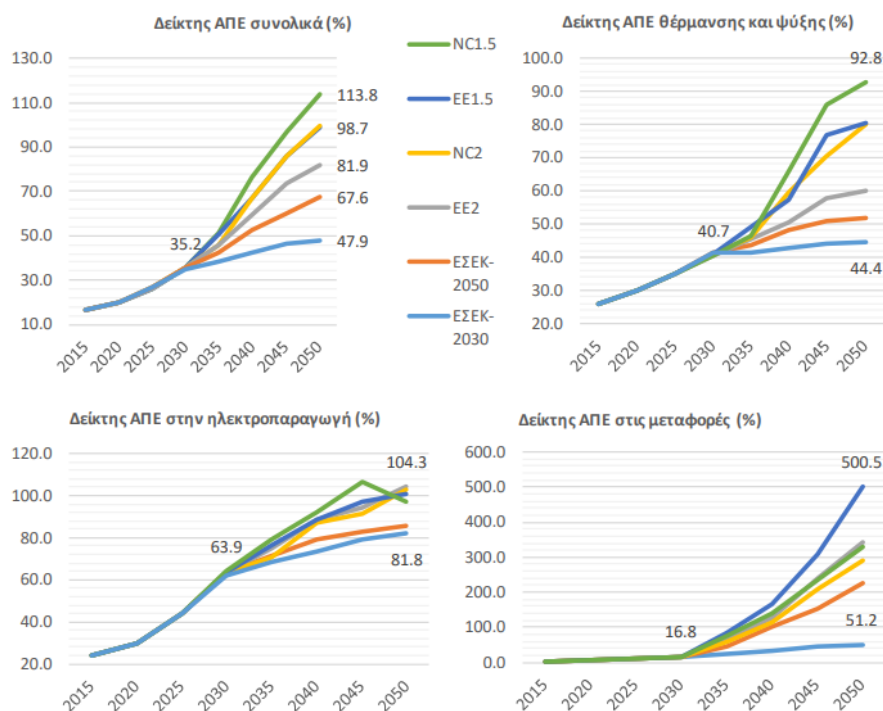
Σχήμα 2.2: Μερίδιο Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ(%) [ΠΗΓΗ: Sarah Brown and Dave Jones, «European Electricity Review 2024», EMBER, 2024]

2.2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, επενδύοντας σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, αποσκοπεί στον πανευρωπαϊκό στόχο μετάβασης σε πράσινες λύσεις (ως βασική μέθοδο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής) και την βελτίωση της ποιότητας ζωής μέσω της καθαρής ενέργειας. Όπως συμβαίνει στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, έτσι και στην Ελλάδα, λαμβάνονται μέτρα για τη μετάβαση από την παραδοσιακή χρήση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας προς την ενίσχυση βιώσιμων ενεργειακών λύσεων μέσω των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, η ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές περιλαμβάνει διάφορες μορφές, όπως η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική (ενέργεια από τον αέρα), γεωθερμική, υδροθερμική και η ενέργεια από τους ωκεανούς. Επίσης, περιλαμβάνονται η υδροηλεκτρική ενέργεια και η ενέργεια που προέρχεται από βιομάζα, τα αέρια που εκλύονται από χώρους υγειονομικής ταφής, τα αέρια από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και τα βιοαέρια. Αυτές οι πηγές ενέργειας θεωρούνται ανανεώσιμες επειδή προέρχονται από φυσικές διαδικασίες που ανανεώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα και έχουν ελάχιστη περιβαλλοντική επίπτωση, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα [22]. Ακόμα, θεωρούνται «καθαρές» μορφές ενέργειας, καθώς δεν εκπέμπουν βλαβερούς ρύπους, π.χ. μονοξείδιο του άνθρακα, και δεν παράγουν τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, συμβάλλοντας έτσι στην αντιμετώπιση των οικολογικών προκλήσεων του πλανήτη. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 41% της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθη στην Ελλάδα το 2022 προήλθε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

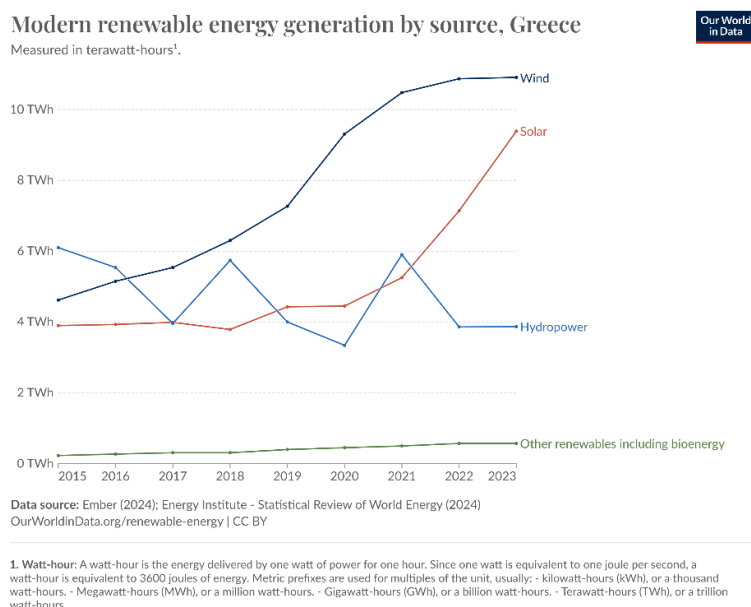
Η Ελλάδα, στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής και διεθνούς προσπάθειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, έχει δεσμευτεί να μειώσει δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, στοχεύει σε μείωση κατά 55% έως το 2030, κατά 80% έως το 2040 και σε επίτευξη καθαρών μηδενικών εκπομπών έως το 2050. Για την επίτευξη αυτών των φιλόδοξων στόχων, από το 2019 εφαρμόζεται το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), που αποτελεί τον βασικό στρατηγικό χάρτη της χώρας στον ενεργειακό τομέα. Το ΕΣΕΚ θέτει τέσσερις προτεραιότητες:

- **Απανθρακοποίηση:** Η σταδιακή εξάλειψη της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, όπως ο λιγνίτης, αποτελεί θεμέλιο της ενεργειακής πολιτικής. Η μετάβαση αυτή υποστηρίζεται από την προώθηση τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα και την ενίσχυση της χρήσης καθαρών ενεργειακών λύσεων.
- **Κυριαρχία ΑΠΕ:** Η ανάπτυξη των ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά πάρκα και στοχεύει να τις καθιερώσει ως κυρίαρχες πηγές ενέργειας στη χώρα. Στόχος είναι η αύξηση του μεριδίου τους στο ενεργειακό μείγμα, καθιστώντας την παραγωγή ενέργειας πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον.
- **Κλιματικά ουδέτερη οικονομία:** Η μετάβαση σε μια οικονομία μηδενικών εκπομπών άνθρακα έως το 2050 συνάδει με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πρόκειται για μια συνολική αλλαγή, που περιλαμβάνει τόσο τον ενεργειακό όσο και τους υπόλοιπους οικονομικούς τομείς, όπως οι μεταφορές, η γεωργία και η βιομηχανία.
- **Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων και υποδομών:** Η αναβάθμιση των δημόσιων, βιομηχανικών και οικιακών κτιρίων με βάση τα πιο σύγχρονα ενεργειακά πρότυπα είναι κρίσιμης σημασίας. Στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω επεμβάσεων όπως η μόνωση, η χρήση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων και η εγκατάσταση σύγχρονων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης.



Σχήμα 2.3: Δείκτες των ΑΠΕ σε εφαρμογές για την Μακροχρόνια Στρατηγική για το 2050

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, είναι προφανές πως η Ελλάδα έχει συμμορφωθεί και ακολουθήσει τις οδηγίες που αποσκοπούν στους στόχους προς ένα πιο βιώσιμο περιβάλλον και συμμετέχει ενεργά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών.

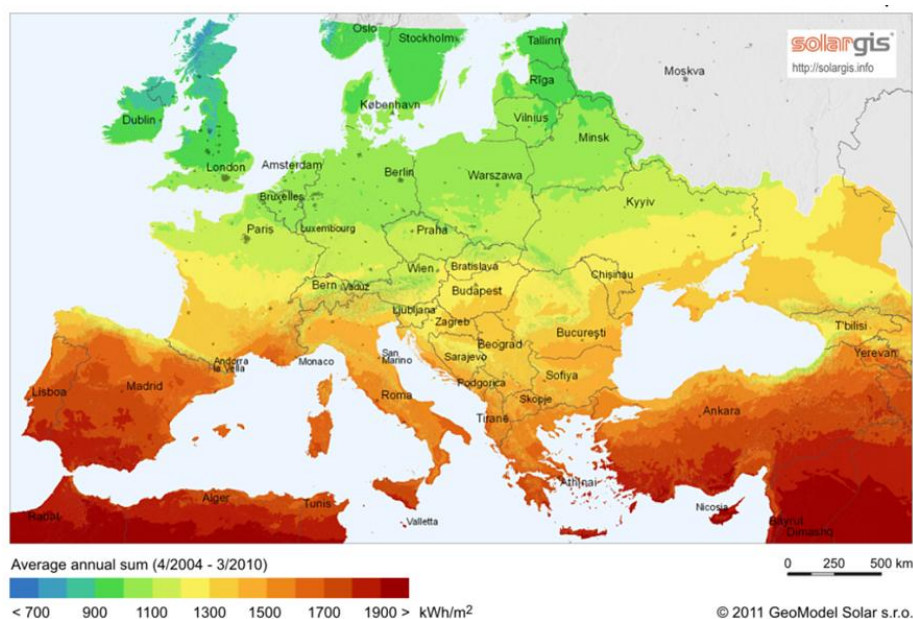


Σχήμα 2.4: Παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ για κάθε κατηγορία, Ελλάδα 2015-2023 [ΠΗΓΗ: www.ourworldindata.org]

Εστιάζοντας στην πηγή ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, η ηλιακή ενέργεια περιλαμβάνει όλες τις μορφές ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο, όπως το φως και η θερμότητα. Είναι μια «καθαρή» πηγή ενέργειας, καθώς η αξιοποίησή της δεν προκαλεί ρύπανση ούτε εκπομπές αερίων. Μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες είναι η μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα αποκεντρωμένης παραγωγής, επιτρέποντας σε σπίτια και επιχειρήσεις να παράγουν το δικό τους ρεύμα, μειώνοντας την εξάρτηση από τα κεντρικά δίκτυα και τα ορυκτά καύσιμα.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας έχει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε στέγες ή ηλιακά πάρκα μειώνει τις εκπομπές CO₂ και παρέχει ενεργειακή ανεξαρτησία σε τοπικές κοινότητες. Επιπλέον, η συνεχής πτώση του κόστους των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθιστά την ηλιακή ενέργεια πιο προσιτή στο ευρύ κοινό. Παρόλο που δεν είναι διαθέσιμη σχεδόν παντού, η απόδοσή της εξαρτάται από την ηλιοφάνεια και τις καιρικές συνθήκες, γεγονός που την καθιστά αβέβαια. Ωστόσο, η πρόοδος στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και διαχείρισης ζήτησης την καθιστά ολοένα και πιο σταθερή και αξιόπιστη πηγή ηλεκτρισμού.

Γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 2.5 πως σε σχέση με το σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Ελλάδα έχει ως βασικό πυλώνα στην παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ την ηλιακή. Μάλιστα, η Ελλάδα αποτελεί πρωτοπόρο χώρα στο κομμάτι της παραγωγής ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία. Γενικότερα, οι χώρες με αυξημένο ηλιακό δυναμικό (Ελλάδα και ευρύτερη Μεσόγειος) ενδείκνυνται για χρήση συστημάτων αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Ετήσια ανηγμένη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην Ευρώπη [ΠΗΓΗ: <http://solargis.info>]

2.3 Ηλιακή Ακτινοβολία

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και των συνιστωσών της προς καλύτερη και ποιοτικότερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και των μεθοδολογιών που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Ο ήλιος είναι η μόνη κύρια και σημαντική πηγή ενέργειας που είναι διαθέσιμη στα επιφανειακά στρώματα της γης και της ατμόσφαιράς της, σε ποσοστό που αντιπροσωπεύει μόλις τα δύο δισεκατομμυριοστά της συνολικής ενέργειας που εκπέμπει στο πλανητικό διάστημα. Πρόκειται για έναν νάνο αστέρα (G2V) που προέρχεται από την συγχώνευση υδρογόνου σε ήλιο, με μέση διάμετρο $1,39 \cdot 10^6$ km και θερμοκρασία πυρήνα στους $14 \cdot 10^6$ °C. Η μέση απόσταση του ήλιου από την γη είναι $149,6 \cdot 10^6$ km (1 αστρονομική μονάδα AU) και η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται στην επιφάνειά της με την μορφή ηλιακής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία ξεχωρίζει εύκολα από τις άλλες μορφές διάδοσης της ενέργειας, όπως είναι ο μηχανισμός της αγωγής ή της μεταφοράς, λόγω της ταχύτητας διάδοσης (ταχύτητα του φωτός) και από το γεγονός ότι δεν χρειάζεται υλικό μέσο για να διαδοθεί.

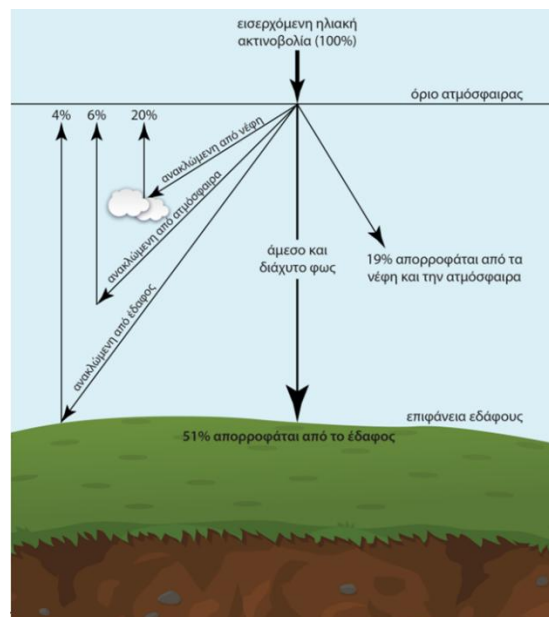
Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης ονομάζεται εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (R_a). Κατά τη διείσδυσή της στην ατμόσφαιρα, ένα μέρος αυτής της ενέργειας υφίσταται διάφορες διεργασίες, όπως διάχυση, ανάκλαση ή απορρόφηση, λόγω των αλληλεπιδράσεων με τα στοιχεία της ατμόσφαιρας. Αυτά περιλαμβάνουν υδρατμούς, αέρια, και στερεά σωματίδια όπως η σκόνη. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει σε μια οριζόντια επιφάνεια στη Γη ονομάζεται ολική ηλιακή ακτινοβολία, ηλιακή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μικρά μήκη κύματος) ή απλώς ολική ακτινοβολία και συμβολίζεται με R_s . Η ολική ακτινοβολία ισούται με το άθροισμα της άμεσης ακτινοβολίας (R_b) και της διάχυτης ακτινοβολίας (R_d). Αναλυτικότερα:

- Άμεση ακτινοβολία (R_b): Φτάνει στην επιφάνεια της Γης απευθείας από τον Ήλιο, χωρίς να έχει υποστεί σκόπιμη διάχυση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα.
- Διάχυτη ακτινοβολία (R_d): Προέρχεται από όλες τις κατευθύνσεις εξαιτίας των διαδικασιών ανάκλασης ή σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

Η ολική ακτινοβολία μετράται συνήθως σε μονάδες W/m^2 ή kWh/m^2 . Οι μετρήσεις αυτές είναι κρίσιμες για την ανάλυση και την αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς βοηθούν στην εκτίμηση της ενέργειας που δύναται να παραχθεί σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Επιπλέον, η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται από παράγοντες όπως:

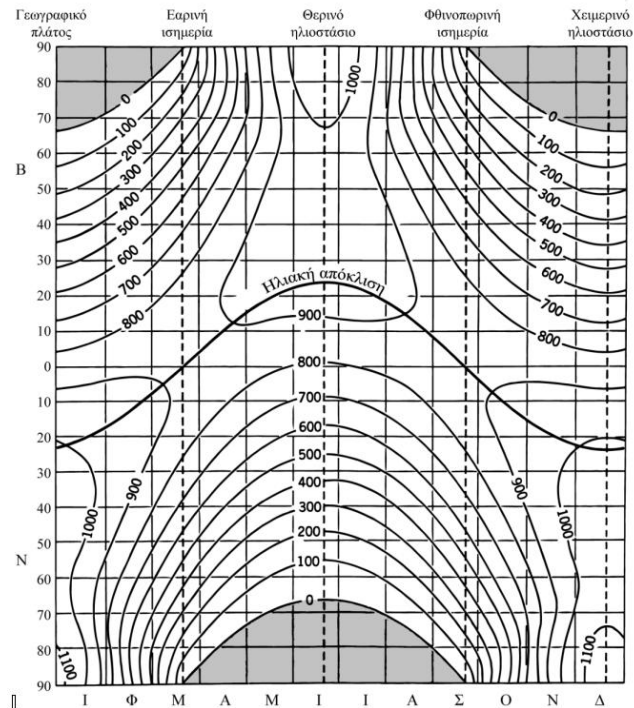
- Ηλιοφάνεια: οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως τα νέφη και τα αιωρούμενα σωματίδια μειώνουν την ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος.
- Υψόμετρο τόπου: Περιοχές σε μεγαλύτερα υψόμετρα δέχονται περισσότερη ακτινοβολία λόγω της μικρότερης ατμοσφαιρικής απορρόφησης.
- Γωνία και Υψόμετρο Ήλιου: εξαρτάται από χρονικούς (ώρα, μέρα και εποχή) και από χωρικούς (γεωγραφικό μήκος και πλάτος τόπου) παράγοντες
- Ανακλαστικότητα επιφάνειας: Εξαρτάται από την επιφάνεια που ανακλάται η ηλιακή ακτινοβολία (νερό, έδαφος ή χιόνι)

- Απόσταση Ήλιου-Γης: Η Γη βρίσκεται πλησιέστερα προς τον Ήλιο στις 3 Ιανουαρίου (περιήλιο) σε απόσταση 147.500.000 km και στη μεγαλύτερη απόσταση των 152.500.000 km στις 4 Ιουλίου (αφήλιο)



Σχήμα 1.6: Η κατανομή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας

Το συνολικό ποσό ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια ενός τετραγωνικού εκατοστού κατά τη διάρκεια μιας ημέρας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας σχέσεις της σφαιρικής γεωμετρίας. Στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνονται η ηλιακή σταθερά, το γεωγραφικό πλάτος και η ακτίνα της Γης. Στο Σχήμα 2.7. φαίνεται μια γραφική αναπαράσταση του ζητούμενου ποσού που φτάνει στα ανώτερα όρια της ατμόσφαιρας καθώς και πως κυμαίνεται η ηλιακή ακτινοβολία σε θερμίδες ανά τετραγωνικό εκατοστό επιφάνειας και ανά ημέρα, ανάλογα με την εποχή και το γεωγραφικό πλάτος. Κατά την περίοδο των θερινών ηλιοστασιών όπου υπάρχει συνεχής μέρα, οι πολικές περιοχές δέχονται το μεγαλύτερο ποσό ακτινοβολίας. Παράλληλα, γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα των 65° δεν δέχονται καθόλου ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των χειμερινών ηλιοστασιών των δύο ημισφαιρίων.

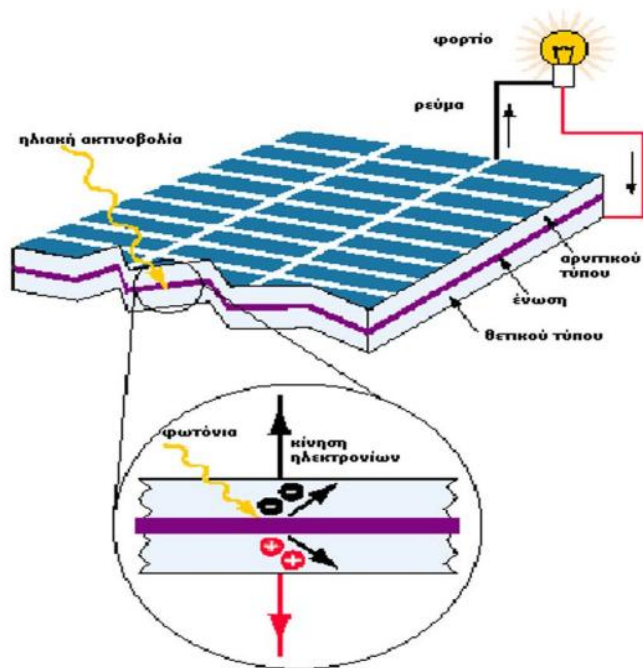


Σχήμα 2.7: Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στα ανώτερα όρια της ατμόσφαιρας (Ζαμπάκας, 1981).

2.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η πλέον διαδεδομένη και εφαρμοσμένη μέθοδος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αναφέρεται στη διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική λόγω των βασικών ιδιοτήτων των ημιαγωγών υλικών σε ατομικό επίπεδο και ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Edmond Becquerel (1820-1891) [20]. Η θεμελιώδης του αρχή είναι η απευθείας μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, το ηλιακό φως απαρτίζεται από μικρές δέσμες ενέργειας (φωτόνια), οι οποίες περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος στο ηλιακό φάσμα [2]. Οι δέσμες αυτές προσκρούουν (με ισχύ P_{inc}) στο εκάστοτε φωτοβολταϊκό στοιχείο και είτε ανακλώνται (P_{ref}) ή το διαπερνούν (P_{trans}) ή απορροφώνται από αυτό (P_{abs}). Στην τελευταία περίπτωση υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος καθώς τα φωτόνια ωθούν τα ηλεκτρόνια του Φ/B να μετατοπιστούν και επομένως να κινηθούν. Η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας επιβάλλει την ισότητα[19]:

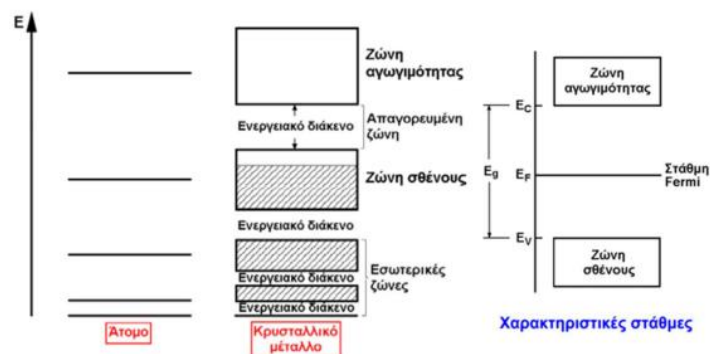
$$P_{inc} = P_{refl} + P_{abs} + P_{trans} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.8: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο ηλιακό πλαίσιο

Σύμφωνα με τη κβαντική θεωρία της ύλης, η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου βρίσκεται σε ένα από τα πολλά ενεργειακά επίπεδα ή ενεργειακές ζώνες (Σχήμα 2.9). Αναλυτικότερα, τα ηλεκτρόνια του κάθε ατόμου κατανέμονται σε στοιβάδες που περιέχουν ηλεκτρόνια με διαφορετικές στάθμες ενέργειας και αποστάσεις από τον πυρήνα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται διαφορετικές ενεργειακές στάθμες περί του πυρήνα. Στην περίπτωση που δύο άτομα έρθουν αρκετά κοντά μεταξύ τους και αλληλοεπιδράσουν, τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων δημιουργούν ένα σχίσμα από το οποίο προκύπτουν και οι παρακάτω ενεργειακές ζώνες:

- Ζώνη σθένους: περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας (κάτω από το ενεργειακό διάκενο E_g)
- Απαγορευμένη ζώνη: δεν έχει καμία ενεργειακή στάθμη (ενεργειακό διάκενο E_g , τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να βρίσκονται στην συγκεκριμένη θέση)
- Ζώνη αγωγιμότητας: εισέρχονται τα ηλεκτρόνια όταν προσλάβουν ικανή ενέργεια, ώστε να σπάσουν τους δεσμούς τους για συγκεκριμένη θερμοκρασία του υλικού (πάνω από το ενεργειακό διάκενο E_g)



Σχήμα 2.9: Διαμόρφωση ενεργειακών ζωνών και σταθμών σε κρυσταλλικό υλικό

Τα ηλεκτρόνια που συμμετέχουν στη δημιουργία ενώσεων βρίσκονται στη ζώνη σθένους, ενώ υπό κατάλληλες συνθήκες μπορούν να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια ώστε να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, μετατρέποντας το υλικό σε αγωγό του ηλεκτρισμού. Το μέγεθος της ενεργειακής διαφοράς, γνωστό ως χάσμα ζώνης, διαφέρει από υλικό σε υλικό και μετράται σε eV.

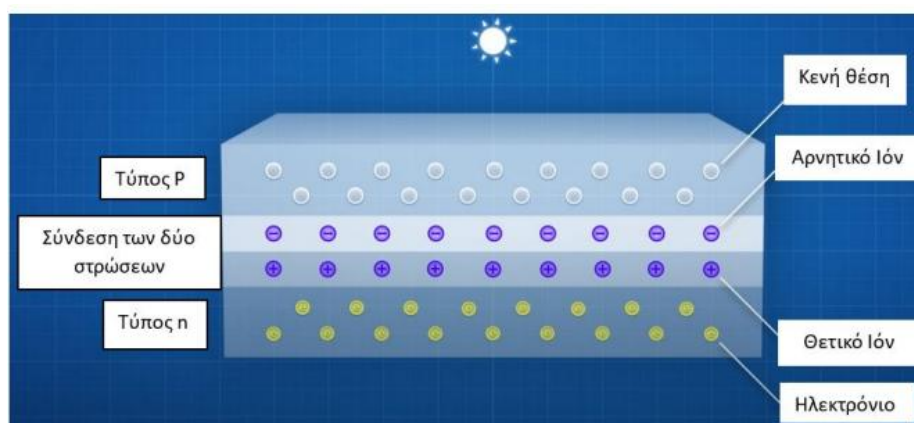
Το 1870 πραγματοποιήθηκαν εφαρμογές του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε διάφορα στοιχεία, όπως το Σελήνιο (Se). Η απόδοση ισχύος κυμάνθηκε μεταξύ 1-2%, τιμές εξαιρετικά χαμηλές και μη αποδεκτές για χρήση του υλικού σε μετατροπείς ενέργειας. Κατά το 1954, ερευνητές των RCA και Bell Laboratories ανέπτυξαν το κρυσταλλικό πυρίτιο υψηλής καθαρότητας, με αρχική απόδοση μετατροπής 4% και μεταγενέστερα 11%. Κατά βάση για την κατασκευή του φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιείται το πυρίτιο (Si), το οποίο έχει ατομικό αριθμό 14 και κρυσταλλική δομή την οποία επιτυγχάνει μοιράζοντας ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα προκειμένου να πετύχει πλήρωση της εξωτερικής του στοιβάδας, η οποία περιέχει 4 ηλεκτρόνια.

Το πυρίτιο, με τις εξαιρετικές ημιαγωγικές του ιδιότητες, μπορεί να γίνει αγωγίμο υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως κατά την πρόσπτωση φωτός. Σε αυτό το πλαίσιο, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ορίζεται ως η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων όταν αυτά εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία. Τα φωτόνια που προσπίπτουν στο κρυσταλλικό πλέγμα μεταφέρουν ενέργεια στα δεσμευμένα ηλεκτρόνια σθένους, απελευθερώνοντάς τα. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της αγωγιμότητας του ημιαγωγού, με μέρος της απορροφούμενης ενέργειας να μετατρέπεται σε ηλεκτρική, υπό την προϋπόθεση ότι η ενέργεια του φωτονίου ξεπερνά την ενέργεια του διακένου. Για να επιτευχθεί βέλτιστη και ελεγχόμενη αγωγιμότητα, οι ημιαγωγοί εμπλουτίζονται με διάφορα στοιχεία.

Στην περίπτωση του πυριτίου (Si) υπάρχουν τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα, πρόκειται δηλαδή για ένα τετρασθενές στοιχείο. Όταν προστεθεί ένα πεντασθενές στοιχείο, όπως ο φώσφορος, τα τέσσερα ηλεκτρόνια του φωσφόρου σχηματίζουν δεσμούς με τα τέσσερα ηλεκτρόνια του πυριτίου, ενώ το πέμπτο παραμένει ελεύθερο, αυξάνοντας την αγωγιμότητα του υλικού. Σε περίπτωση εισαγωγής μεγάλου αριθμού πεντασθενών ατόμων, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας, μετατρέποντας τον ημιαγωγό σε τύπου-n, λόγω του αρνητικού (negative) φορτίου που φέρουν τα ηλεκτρόνια. Αντίθετα, όταν προστεθεί ένα τρισθενές στοιχείο, όπως το βόριο, τα τρία ηλεκτρόνια του σχηματίζουν δεσμούς με τα ηλεκτρόνια του πυριτίου, αφήνοντας μία κενή θέση, γνωστή ως οπή, στην τέταρτη θέση. Αυτή η οπή, που αντιστοιχεί σε έλλειψη ηλεκτρονίου, προσδίδει θετικό φορτίο, με αποτέλεσμα ο

ημιαγωγός να χαρακτηρίζεται ως τύπου-p, λόγω του θετικού (positive) φορτίου που εμφανίζεται.

Επομένως, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία απαρτίζονται από έναν συνδυασμό δύο λεπτών στρωμάτων ημιαγωγών τύπου n και τύπου p, κατά βάση κατασκευασμένα από κρυσταλλικό πυρίτιο. Όσον αφορά τους n-type ημιαγωγούς προστίθενται μικρές ποσότητες προσμίξεων, όπως φώσφορος, ώστε να υπάρχει περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ οι p-type κατασκευάζονται με προσθήκη διαφορετικών προσμίξεων, όπως βόριο, που δημιουργούν έλλειμμα ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτή η έλλειψη, που ονομάζεται οπή, μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με την παρουσία θετικού φορτίου, και έτσι ο ημιαγωγός ονομάζεται τύπου-p[18].



Σχήμα 2.10: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Μπορεί κανείς να διακρίνει διάφορα είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και το υλικό τους. Για αρχή, υπάρχουν τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία τα οποία κατασκευάζονται από έναν ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου, που σχηματίζεται μέσω μίας πολύπλοκης διαδικασίας. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει υψηλότερη απόδοση, ειδικά σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για περιοχές με περιορισμένη ηλιοφάνεια. Ωστόσο, το κόστος παραγωγής τους είναι σημαντικά υψηλότερο συγκριτικά με άλλα είδη, καθώς η διαδικασία κατασκευής είναι πιο δαπανηρή και έχει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις. Αντίθετα, τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται από μπλοκ λιωμένου πυριτίου που ψύχεται και κρυσταλλοποιείται ξανά σε μορφή πολλαπλών κρυστάλλων. Αυτή η διαδικασία είναι πιο οικονομική, καθιστώντας τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία πιο προσιτά στην αγορά. Αν και η απόδοσή τους είναι ελαφρώς χαμηλότερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών, η χαμηλή τιμή τους τα καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή για οικιακές και εμπορικές εφαρμογές. Μια πιο πρόσφατη τεχνολογία είναι τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου, τα οποία αποτελούνται από πολύ λεπτές στρώσεις ημιαγωγών υλικών, όπως το τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe) ή ο δισελινιούχος χαλκός ινδίου γαλλίου (CIGS). Αυτή η τεχνολογία απαιτεί λιγότερο πυρίτιο, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής. Παρόλο που η αποδοτικότητα αυτών των στοιχείων είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα δύο προηγούμενα, η ευελιξία και το χαμηλό κόστος τους τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως φωτοβολταϊκά πάρκα (Κόλλιας, 2017).

Τέλος, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και υβριδικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία συνδυάζουν διαφορετικές τεχνολογίες για να επιτύχουν υψηλότερες αποδόσεις. Τα υβριδικά πλαίσια συχνά συνδυάζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία για την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας με συστήματα θερμικής ενέργειας (solar thermal) για την συλλογή θερμότητας από τον Ήλιο με σκοπό την μείωση των απωλειών ενέργειας που συμβαίνει στα κλασικά φωτοβολταϊκά. Ακόμα, αυτά τα πλαίσια απαιτούν μικρότερη επιφάνεια εγκατάστασης για την ίδια ισχύ (kWp), γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές όπου υπάρχουν χωρικοί περιορισμοί. Ωστόσο, το αυξημένο κόστος κατασκευής περιορίζει τη χρήση τους κυρίως σε εξειδικευμένες περιπτώσεις, όπως σε έργα όπου απαιτούνται υψηλές αποδόσεις ή καλύτερη απορρόφηση συγκεκριμένων μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.5 Εισαγωγή εννοιών απόδοσης

Προς την καλύτερη δυνατή κατανόηση των αναλύσεων που θα ακολουθήσουν, στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναπτυχθούν βασικές έννοιες και θα δοθούν ορισμοί των απαραίτητων εννοιών που σχετίζονται με την απόδοση των Φ/Β συστημάτων. Καταρχήν, όλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα ελέγχονται και αξιολογούνται ως προς την απόδοση βάση ενός διεθνούς προτύπου με όνομα Standard Test Conditions ή αλλιώς Συνθήκες Τυποποιημένης Δοκιμής (STC). Πρόκειται για μία κοινή βάση αναφοράς για την σύγκριση φωτοβολταϊκών μονάδων όλων των κατασκευαστών, ανεξαρτήτως παρόχου, και συνοψίζεται σε τρία κύρια σημεία που αφορούν τις συνθήκες λειτουργίας [4]:

- Η μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε μία μέρα «καθαρή», χωρίς σύννεφα είναι στα 1000 W/m^2 .
- Το ηλιακό κύτταρο έχει θερμοκρασία 25°C , χωρίς απαραίτητα να συμπίπτει με αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος.
- Η μάζα αέρα (AM) ισούται με 1,5 για 2,74 ώρες. Ο AM αναφέρεται στο πόσο φως πρέπει να διαπεράσει την ατμόσφαιρα προτού έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της Γης και επηρεάζεται κυρίως από την γωνία του τόπου ενδιαφέροντος σε σχέση με τον Ήλιο. Ο αριθμός αυτός ελαχιστοποιείται εκεί όπου ο Ήλιος βρίσκεται σε ακριβώς κατακόρυφη θέση σε σχέση με τον τόπο ενδιαφέροντος και το φως διανύει την ελάχιστη δυνατή απόσταση.

Ο συντελεστής δυναμικότητας ενός ενεργειακού έργου ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας από το έργο προς τη δυνητική ενέργεια που θα είχε παραχθεί με συνεχή λειτουργία του στην μέγιστη ισχύ του. Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο συμβολίζεται με CF και συνήθως εκφράζεται σε ετήσια κλίμακα.

$$CF = \frac{E}{P_{max} T} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_{max} T} \quad (2.2)$$

όπου E η πραγματική παραγόμενη ενέργεια μέσα σε ένα έτος, 8760 είναι οι ώρες που απαρτίζουν ένα έτος, και Pmax η ονομαστική (ή αλλιώς μέγιστη) ισχύς που μπορεί να αποδώσει το έργο. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η ανάλυση που πραγματοποιείται σε σχέση με τον Capacity Factor είναι ωριαία και στη συνέχεια ημερήσια για τα έτη 2015-2023.

Εγκατεστημένη ισχύς ενός συστήματος ΑΠΕ ή ΣΗΘΥΑ (Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού-Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης) είναι το άθροισμα της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος όλων των επιμέρους μονάδων που απαρτίζουν έναν ηλεκτρικό σταθμό. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων όλης της Ελλάδας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η ισχύς που προσφέρουν τα μεμονωμένα φωτοβολταϊκά οροφής για οικιακή χρήση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων Παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας και Εγκατεστημένης Ισχύος

3.1 Συλλογή δεδομένων παραγωγής Ηλιακής Ενέργειας μέσω της πλατφόρμας του ENTSO-E

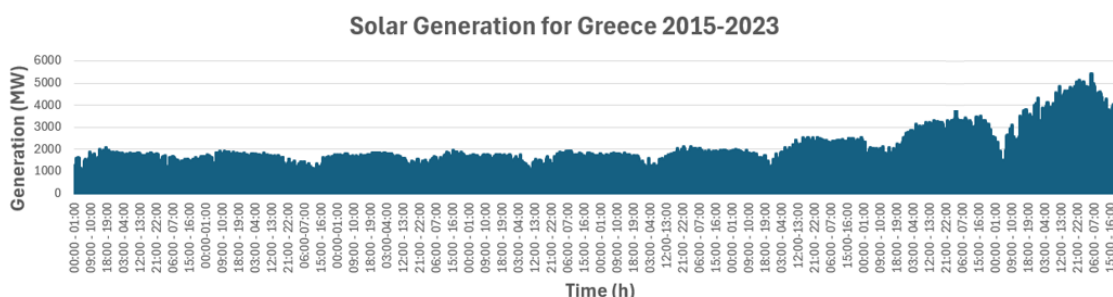
Το ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) είναι το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς για την Ηλεκτρική Ενέργεια και απαρτίζεται από 36 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αποτελεί μια ένωση των Ευρωπαϊκών διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς (TSOs) και έχει ως στόχο να διασφαλίσει την αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Ο συγκεκριμένος οργανισμός διεξάγει πληθώρα μελετών και ενεργειών που γεφυρώνουν την ενεργειακή μετάβαση στην Ευρωπαϊκή Ένωση και συμβάλλουν στην ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και την επίτευξη των κλιματικών στόχων της.

Μία από τις σημαντικότερες πρωτοβουλίες του ENTSO-E είναι η μελέτη ERAA (Economic Resource Adequacy Assessment), η οποία επικεντρώνεται κυρίως στην ανάλυση της επάρκειας πόρων σε πανευρωπαϊκό επίπεδο παρέχοντας πληροφορίες για το αν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτουν επαρκή επαρκείς πόρους για την κάλυψη της ζήτησης υπό διαφορετικά σενάρια αβεβαιότητας. Συμψηφίζοντας παράγοντες όπως η ζήτηση ενέργειας, οι διασυννοριακές ροές, οι δυνατότητες αποθήκευσης, και η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσδιορίζονται περιοχές που υπάρχει κίνδυνος για ανεπάρκεια ισχύος και παράλληλα προτείνονται μέτρα και λύσεις. Η ανάλυση της μελέτης πραγματοποιείται με δυναμικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης (π.χ. ωριαία) και εστιάζει τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο διαχείρισης πόρων. Η ERAA λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις της αυξανόμενης διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών, όπως η αστάθεια παραγωγής από αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα, ενσωματώνοντας λύσεις όπως η αποθήκευση και η ευέλικτη κατανάλωση.

Η βασική υπηρεσία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί είναι το Transparency Platform. Το Transparency Platform είναι ένας δημόσιος ιστότοπος που προσφέρει δωρεάν πρόσβαση σε δεδομένα σχετικά με την παραγωγή, τη ζήτηση, τις διασυνδέσεις, τις τιμές και άλλες πτυχές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Η συγκεκριμένη υπηρεσία είναι καίριας σημασίας καθώς διασφαλίζει ότι όλοι οι πολίτες και οι συμμετέχοντες στην αγορά έχουν πρόσβαση σε ίδιες πληροφορίες, προάγοντας την ισότιμη συμμετοχή. Ακόμα, τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση, σχεδιασμό και πρόβλεψη της ζήτησης και της παραγωγής.

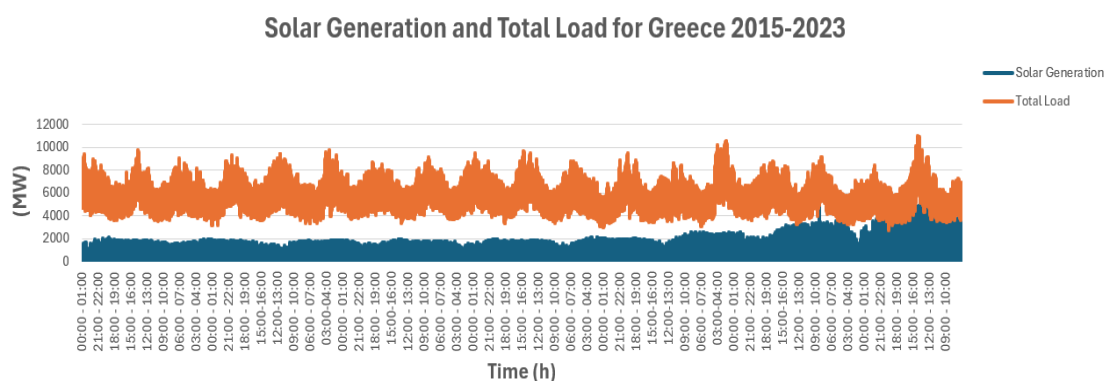
Στην παρούσα διπλωματική εργασία συλλέχθηκαν μέσω του Transparency Platform τα ωριαία δεδομένα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα για τα έτη 2015-2023. Τα ωριαία πρωτογενή δεδομένα είναι καταγεγραμμένα σε ώρα Ανατολικής Ευρώπης (EET, UTC +2:00), δηλαδή σε ώρα Ελλάδος. Οι τιμές που δίνονται για την ωριαία παραγωγή μετρούνται σε MW. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η γραφική

απεικόνιση της ωριαίας παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ελλάδα για τα έτη 2015-2023.



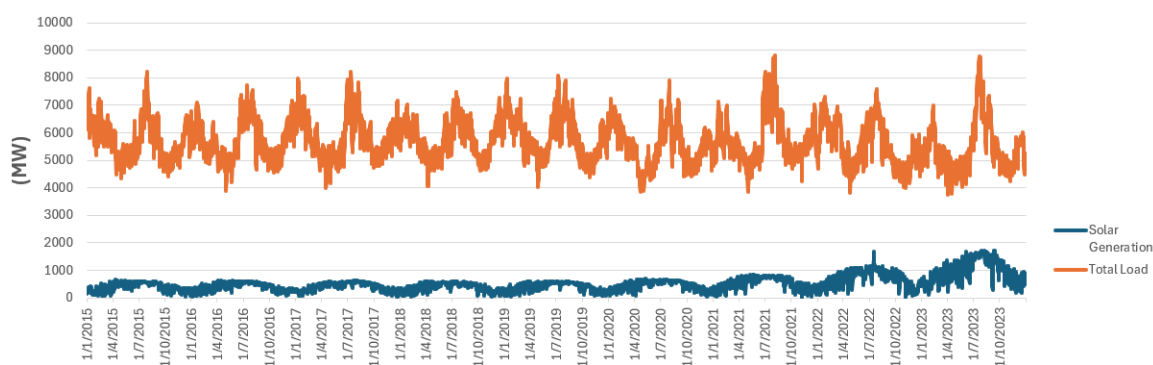
Σχήμα 3.1: Γραφική απεικόνιση παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα λόγω φωτοβολταϊκών, 2015-2023

Παράλληλα, στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η ωριαία παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα λόγω φωτοβολταϊκών (Solar Generation) σε σχέση με την ωριαία ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια (Total Load) για τα έτη 2015-2023 σε MW. Στα Σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5 απεικονίζεται πάλι η ζήτηση σε σχέση με την παραγωγή αλλά σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια κλίμακα αντίστοιχα. Η ωριαία ζήτηση ομοίως προκύπτει από το Transparency Platform του ENTSO-E, καθώς τα συγκεκριμένα δεδομένα είναι προσβάσιμα από το κοινό. Μια ενδεικτική απεικόνιση της σχέσης ζήτησης και παραγωγής σε μηνιαίο επίπεδο δίνεται στο Σχήμα 3.3 για τον μήνα Ιανουάριο του έτους 2015. Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η παραπάνω σχέση ενδεικτικά για μία χειμερινή και μία καλοκαιρινή μέρα. Φαίνεται πως μετά τις 17:00 η διακοπή λειτουργίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα συμβάλλει στο λεγόμενο φαινόμενο Duck Curve. Το φαινόμενο Duck Curve αφορά τη μεγάλη διαφορά μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω ηλιακών φωτοβολταϊκών. Το πρωί και το μεσημέρι υπάρχει υπερπαραγωγή από τον ήλιο, ενώ το απόγευμα, δηλαδή προς τη δύση του ηλίου, όταν η ζήτηση αυξάνεται και η ηλιακή παραγωγή πέφτει και γρήγορα μηδενίζεται, απαιτείται απότομη αύξηση της παραγωγής από άλλες πηγές, που διαθέτουν κατάλληλη ευελιξία [28]. Ως επί το πλείστον, οι πηγές που εισέρχονται στο σύστημα είναι τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, ενώ συχνά απαιτείται και αύξηση της παραγωγής ισχύος και από τις μονάδες φυσικού αερίου. Τα τελευταία χρόνια, αυτό έχει οδηγήσει σε τεράστιες ανισορροπίες στις ενδοημερήσιες χρηματιστηριακές τιμές ενέργειας.



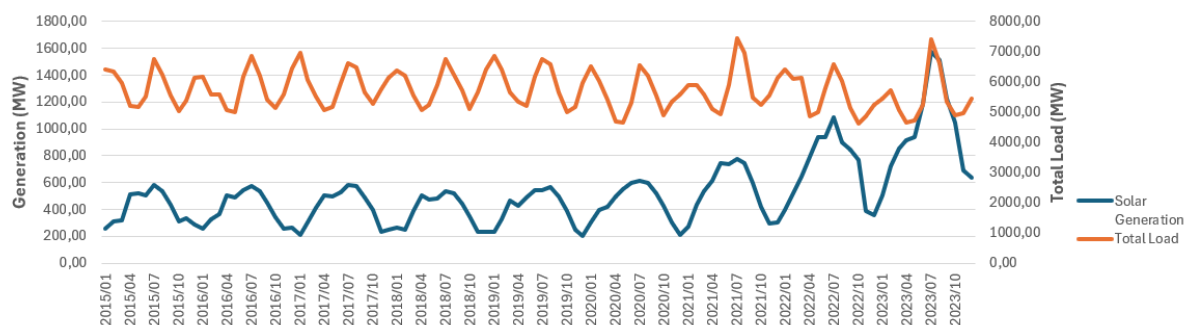
Σχήμα 3.2.: Γραφική απεικόνιση παραγωγής ενέργειας λόγω φωτοβολταϊκών και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, 2015-2023 σε ωριαία κλίμακα

Solar Generation and Total Load for Greece, 2015-2023



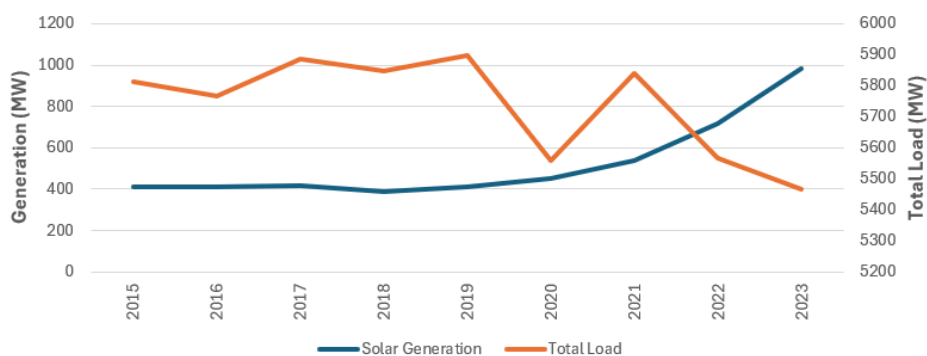
Σχήμα 3.3: Γραφική απεικόνιση παραγωγής ενέργειας λόγω φωτοβολταϊκών και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα

Solar Generation and Total Load for Greece, 2015-2023



Σχήμα 3.4: Γραφική απεικόνιση παραγωγής ενέργειας λόγω φωτοβολταϊκών και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, 2015-2023 σε μηνιαία κλίμακα

Solar Generation and Total Load for Greece, 2015-2023

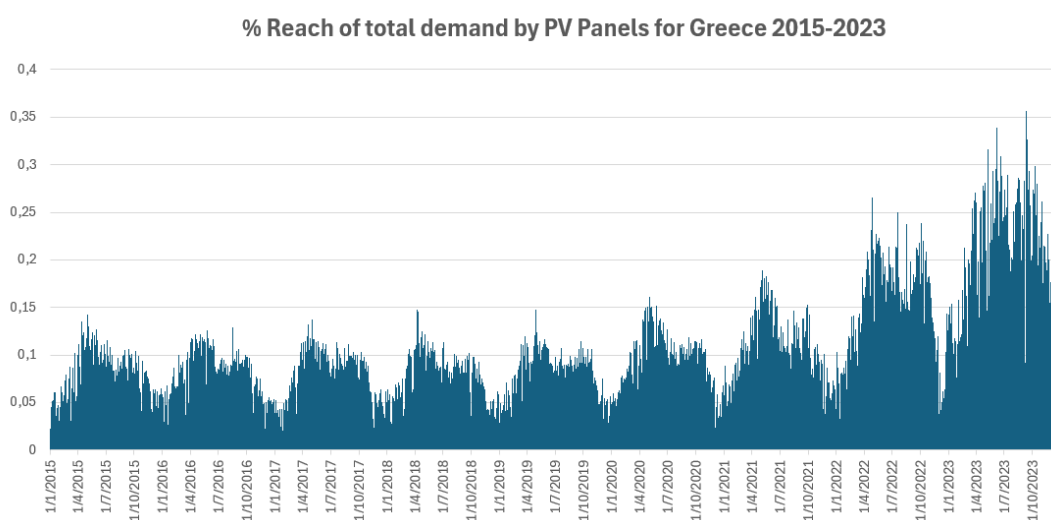


Σχήμα 3.5: Γραφική απεικόνιση παραγωγής ενέργειας λόγω φωτοβολταϊκών και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, 2015-2023 σε ετήσια κλίμακα



Σχήμα 3.6: Γραφική απεικόνιση παραγωγής – ζήτησης για 01/01/2015 και 02/07/2015

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το ποσοστό κάλυψης της συνολικής ζήτησης σε ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά συστήματα για την Ελλάδα στα έτη 2015-2023 σε μηνιαία κλίμακα. Είναι αξιοσημείωτο πως με την πάροδο των ετών το ποσοστό κάλυψης της ζήτησης αυξάνεται και συγκεκριμένα αγγίζει τιμές έως και 35% για το 2023. Είναι αρκετά αισιόδοξο για το μέλλον της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στην χώρα καθώς με την βέλτιστη αξιοποίηση των πάνελ η απαγκίστρωση από τις συμβατικές ενέργειες είναι ένα ολοένα και πιο ρεαλιστικό σενάριο για το μέλλον.



Σχήμα 3.7: Γράφημα ποσοστού κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης από τα φωτοβολταϊκά πάνελ για το διάστημα 2015-2023, σε μηνιαία κλίμακα.

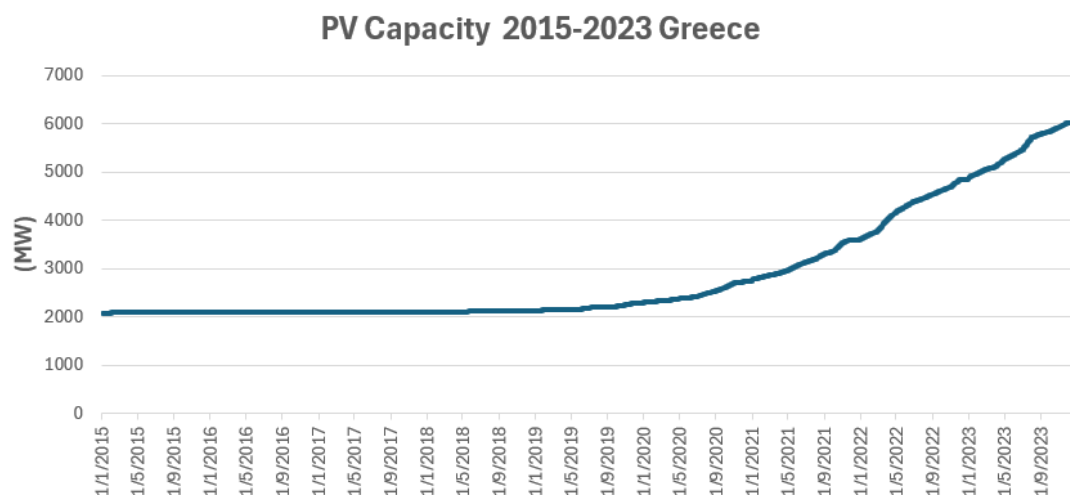
3.2 Συλλογή δεδομένων Εγκατεστημένος Ισχύος Φωτοβολταϊκών μέσω της πλατφόρμας του ΔΑΠΕΕΠ

Ο ΔΑΠΕΕΠ (Διαχειριστής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης) είναι ένας βασικός οργανισμός στον ενεργειακό τομέα της Ελλάδας. Έχει κεντρικό ρόλο στη διαχείριση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης στον ενεργειακό τομέα. Είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των χρηματοοικονομικών συναλλαγών για παραγωγούς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ), διασφαλίζοντας την έγκαιρη αποπληρωμή τους. Παράλληλα, διαχειρίζεται τις Εγγυήσεις Προέλευσης, πιστοποιώντας ότι η ενέργεια προέρχεται από ΑΠΕ. Συμβάλλει στη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα, ενισχύει τη χρηματοοικονομική διαφάνεια των σχετικών αγορών και υποστηρίζει τη λειτουργία της αγοράς ενέργειας σε συνεργασία με άλλους φορείς. Με αυτόν τον τρόπο, ο ΔΑΠΕΕΠ προωθεί τη βιώσιμη ανάπτυξη και την ενεργειακή μετάβαση προς καθαρότερες μορφές ενέργειας.

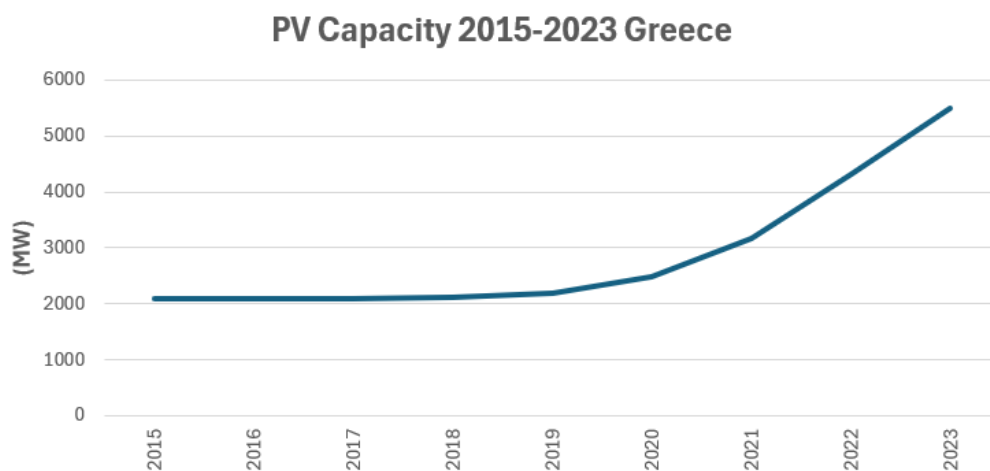
Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζει την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών έργων, μέσω της διαχείρισης των Συμβάσεων Διαφορικής Προσαύξησης (FiP), εξασφαλίζοντας τη δίκαιη αποζημίωση των παραγωγών για την παραγόμενη ενέργεια. Παράλληλα, εκδίδει και διαχειρίζεται Εγγυήσεις Προέλευσης για κάθε MWh από φωτοβολταϊκά έργα, πιστοποιώντας την "πράσινη" προέλευση της ενέργειας. Επιπλέον, προωθεί τη συμμετοχή μικρών παραγωγών και αυτοπαραγωγών στις αγορές ενέργειας, ενισχύοντας τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε οικιακό επίπεδο. Ενισχύει καινοτόμα έργα που συνδυάζουν φωτοβολταϊκά έργα με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ενώ παρέχει διαφάνεια και δεδομένα για την παραγωγή και τη ζήτηση ενέργειας, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη και τη σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος.

Για να μπορέσει να προσδιοριστεί η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος φωτοβολταϊκών έργων στην Ελλάδα έγινε χρήση των μηνιαίων αναφορών που εκδίδει ο ΔΑΠΕΕΠ. Αναλυτικότερα, ο ΔΑΠΕΕΠ εκδίδει μηνιαίες αναφορές που παρέχουν λεπτομερή ενεργειακά δεδομένα για την παραγωγή από ΑΠΕ, τις χρηματοροές και τις αποζημιώσεις των παραγωγών μέσω Συμβάσεων Διαφορικής Προσαύξησης (FiP), καθώς και την κατάσταση του Ειδικού Λογαριασμού ΑΠΕ (ΕΛΑΠΕ). Οι αναφορές περιλαμβάνουν στοιχεία για την έκδοση Εγγυήσεων Προέλευσης, το μερίδιο των ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση, τις τάσεις στην αγορά ενέργειας και τη συμβολή των ΑΠΕ στην επίτευξη εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων. Αποτελούν πολύτιμο εργαλείο διαφάνειας, παρακολούθησης των ενεργειακών εξελίξεων και υποστήριξης της λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων από παραγωγούς, ρυθμιστικές αρχές και επενδυτές.

Δεδομένου ότι η χρονική κλίμακα ενδιαφέροντος της παρούσας ανάλυσης είναι η ωριαία, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή της εγκατεστημένης ισχύος, η οποία δίνεται σε μηνιαία βάση, για να περιγραφεί η διαχρονική μεταβολή της μέσω μιας συνεχούς (ωριαίας) καμπύλης, που πλέον θα μπορεί να συσχετιστεί με τα ωριαία δεδομένα παραγωγής ενέργειας των φωτοβολταϊκών. Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε βάθος χρόνου, για το διάστημα 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα. Στο Σχήμα 3.9 η απεικόνιση είναι σε ετήσια κλίμακα. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος δίνεται σε MW και δεν λαμβάνεται υπόψιν η συνεισφορά των οικιακών φωτοβολταϊκών οροφής.



Σχήμα 3.8: Γραφική απεικόνιση μεταβολής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα



Σχήμα 3.9: Γραφική απεικόνιση μεταβολής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, 2015-2023 σε ετήσια κλίμακα

Από το 2015, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών έργων στην Ελλάδα αυξήθηκε λόγω της πτώσης του κόστους τεχνολογίας, της ευρωπαϊκής πολιτικής για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και των εθνικών κινήτρων, όπως το net metering (συμψηφισμός ενέργειας). Το γεωγραφικό πλεονέκτημα της Ελλάδας, με την υψηλή ηλιοφάνεια, σε συνδυασμό με την ανάγκη για ενεργειακή ασφάλεια και την απεξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα, αύξησαν τη ζήτηση. Παράλληλα, το ολοένα και πιο ενισχυμένο επενδυτικό ενδιαφέρον, η ανάπτυξη ενεργειακών κοινοτήτων και η περιβαλλοντική συνείδηση της τελευταίας δεκαετίας έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην επέκταση της χρήσης των φωτοβολταϊκών.

3.3 Υπολογισμός και ανάλυση Συντελεστή Δυναμικότητας (Capacity Factor)

Ο συντελεστής δυναμικότητας (capacity factor) είναι ένας αδιάστατος δείκτης που μετρά την αποδοτικότητα ενός ενεργειακού συστήματος, όπως τα φωτοβολταϊκά. Εκφράζει τη σχέση μεταξύ της πραγματικής ενέργειας που παράγει το σύστημα σε μια χρονική περίοδο και της δυνητικά μέγιστης ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί αν το σύστημα λειτουργούσε συνεχώς στη μέγιστη ισχύ του. Στα φωτοβολταϊκά, ο συντελεστής δυναμικότητας επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ηλιοφάνεια, οι καιρικές (π.χ., θερμοκρασία, υγρασία) και ατμοσφαιρικές συνθήκες (π.χ., συγκέντρωση σωματιδίων), η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και οι απώλειες του συστήματος [17]. Η αρχική ανάλυση βάσει των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί πραγματοποιείται σε ωριαία κλίμακα για το διάστημα 01/01/2015 έως και 31/12/2023. Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο συμβολίζεται με CF και συνήθως εκφράζεται σε ετήσια κλίμακα. Η εξίσωση είναι η (3.1).

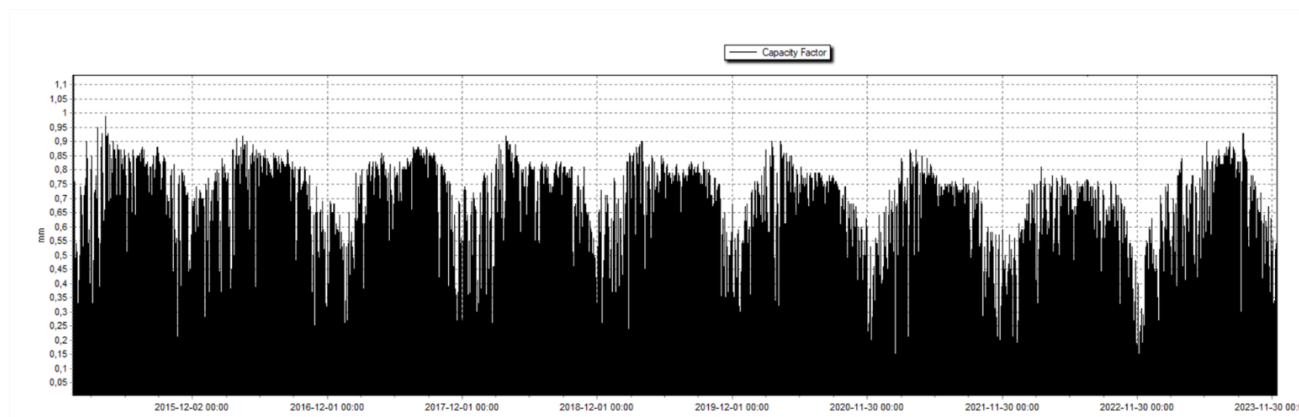
$$CF = \frac{E}{P_{max} T} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_{max} T} \quad (3.1)$$

Πρόκειται για τον λόγο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη θεωρητικά μέγιστη που μπορεί να παραχθεί από ένα έργο (ή σύστημα έργων) συνολικής ισχύος P_{max} σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, T . Κατά κανόνα αναφέρεται στην ετήσια κλίμακα, για την οποία η θεωρητικά μέγιστη παραγωγή ενέργειας είναι ίση με την μέγιστη (ονομαστική) ισχύ του έργου επί τις ώρες του έτους ($T = 8760$ h). Με τον τρόπο αυτό, συνιστά την ταυτότητα του έργου. Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ο συντελεστής δυναμικότητας είναι συνήθως χαμηλότερος από άλλες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, κυμαινόμενος μεταξύ 17% και 22% σε σταθερές εγκαταστάσεις σε ετήσια βάση [12]. Συστήματα με μηχανισμούς παρακολούθησης της ηλιακής ακτινοβολίας (tracking systems) μπορούν να φτάσουν σε υψηλότερες τιμές, περίπου 30%, καθώς εκμεταλλεύονται με βέλτιστο τρόπο την ηλιακή ενέργεια [2] [16]. Η χαμηλότερη τιμή αλλά και οι διάφορες εναλλαγές που παρατηρούνται οφείλεται στην περιοδικότητα της ηλιακής δραστηριότητας, τόσο σε ημερήσιο όσο και σε εποχικό επίπεδο καθώς και στις προβλεπόμενες απώλειες.

Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι κρίσιμος για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας ενός συστήματος. Με βάση αυτόν, γίνεται ο βέλτιστος δυνατός σχεδιασμός ενεργειακών έργων και εκτίμηση του κόστους παραγωγής, ενώ καθιστά εφικτή τη σύγκριση των φωτοβολταϊκών με επιμέρους τρόπους παραγωγής ενέργειας.

Στην παρούσα ανάλυση, η χρήση του δείκτη αυτού επιτρέπει τη διαχρονική σύγκριση της παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας σε σχετικούς όρους και όχι σε απόλυτες τιμές, καθώς οι τελευταίες εξαρτώνται από την εκάστοτε εγκατεστημένη ισχύ.

Επομένως, βάσει των δεδομένων παραγωγής ενέργειας (βλ. Υποκεφάλαιο 3.14) και των δεδομένων εγκατεστημένης ισχύος (βλ. Υποκεφάλαιο 3.2), υπολογίστηκαν οι ωριαίοι συντελεστές δυναμικότητας. Στο Σχήμα 3.10 προκύπτει η χρονοσειρά για τους συντελεστές δυναμικότητας στο διάστημα 2015-2023 σε ωριαία βάση για την Ελλάδα. Παράλληλα, παρουσιάζεται ξεκάθαρα η εποχική και ημερήσια περιοδικότητα του εν λόγω



δείκτη.

Σχήμα 3.10.: Χρονοσειρά συντελεστή δυναμικότητας για την Ελλάδα, 2015-2023

Έχοντας υπολογίσει τις ωριαίες τιμές του συντελεστή δυναμικότητας για την συγκεκριμένη οκταετία στον Πίνακα 3.1 προκύπτουν οι ετήσιοι μέση όροι και στον Πίνακα 3.2 οι εποχικοί μέσοι όροι. Παρά το γεγονός πως η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου, παρατηρείται πως ο συντελεστής δυναμικότητας μέχρι το 2022 έχει μία καθοδική τάση και αυξάνεται εκ νέου το 2023. Αυτό οφείλεται σε πολλούς παράγοντες όπως η γήρανση των ήδη υφιστάμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων και η ανεπαρκής συντήρησή τους. Παράλληλα, υπάρχει κορεσμός στην επιλογή των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης φωτοβολταϊκών συστημάτων, επομένως οι νέες θέσεις που αξιοποιούνται για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας δεν είναι οι πλέον ιδανικές για την πλήρη ενεργειακή εκμετάλλευση του συστήματος.

Πίνακας 3.1: Ετήσιοι μέσοι όροι capacity factor

Έτος	Μέσος ετήσιος CF
2023	0,178
2022	0,166
2021	0,173
2020	0,184
2019	0,188
2018	0,184
2017	0,198
2016	0,196
2015	0,195

Πίνακας 3.2: Εποχιακοί μέσοι όροι capacity factor

Εποχή	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015
Χειμώνας	0,106	0,111	0,108	0,129	0,122	0,121	0,115	0,138	0,133
Άνοιξη	0,171	0,191	0,214	0,207	0,214	0,215	0,224	0,217	0,215
Καλοκαίρι	0,255	0,221	0,238	0,244	0,252	0,241	0,268	0,264	0,258
Φθινόπωρο	0,178	0,146	0,128	0,160	0,170	0,161	0,180	0,167	0,174

Ακόμα πιο αναλυτικά έχουν υπολογιστεί στον Πίνακα 3.3 οι μηνιαίοι μέσοι όροι του συντελεστή δυναμικότητας για το χρονικό διάστημα της ανάλυσης. Όπως έχει αναφερθεί, ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή δυναμικότητας είναι η εποχικότητα. Το καλοκαίρι λόγω της αυξημένης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας η παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη και ως εκ τούτου η τιμή του υπόψη συντελεστή. Τον χειμώνα λόγω μειωμένης ηλιοφάνειας αλλά και γενικά μεγαλύτερης σκίασης από τα σύννεφα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποδίδουν λιγότερο. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως ο παράγοντας της θερμοκρασίας επηρεάζει την απόδοση με αντίστροφο τρόπο. Δηλαδή, σε αυξημένη θερμοκρασία το ηλιακό πάνελ τείνει να υπερθερμαίνεται και να μειώνει την παραγωγή ενέργειας. Στον Πίνακα 3.4 φαίνονται οι μέσοι μηνιαίοι όροι της ηλιακής ακτινοβολίας για τα 40 σημεία της Ελλάδας από τα οποία έχουν ληφθεί δεδομένα μέσω της πλατφόρμας PVGIS (βλ. Κεφάλαιο 4). Τους μήνες που η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη αυξάνεται και ο συντελεστής δυναμικότητας (π.χ., οι καλοκαιρινοί μήνες).

Πίνακας 3.3: Μηνιαίοι μέσοι όροι capacity factor

Μήνας	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015
Ιανουάριος	0,100	0,110	0,100	0,129	0,105	0,127	0,101	0,123	0,121
Φεβρουάριος	0,148	0,137	0,150	0,167	0,151	0,119	0,145	0,154	0,146
Μάρτιος	0,166	0,162	0,186	0,182	0,217	0,183	0,196	0,174	0,149
Απρίλιος	0,175	0,194	0,209	0,205	0,202	0,238	0,239	0,244	0,244
Μάιος	0,172	0,218	0,246	0,233	0,224	0,224	0,236	0,234	0,251
Ιούνιος	0,219	0,218	0,237	0,245	0,250	0,228	0,252	0,258	0,244
Ιούλιος	0,281	0,244	0,246	0,252	0,249	0,252	0,277	0,274	0,277
Αύγουστος	0,265	0,201	0,230	0,236	0,257	0,244	0,274	0,259	0,254
Σεπτέμβριος	0,210	0,188	0,182	0,202	0,224	0,210	0,236	0,215	0,212
Οκτώβριος	0,180	0,163	0,121	0,161	0,180	0,165	0,190	0,163	0,152
Νοέμβριος	0,117	0,087	0,083	0,117	0,107	0,108	0,113	0,124	0,158
Δεκέμβριος	0,105	0,070	0,086	0,074	0,089	0,109	0,117	0,128	0,138

Πίνακας 3.4: Μηνιαίοι μέσοι όροι ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)

Μήνας	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015
Ιανουάριος	151,3	161,7	137,5	172,9	114,3	153,0	117,1	142,8	143,9
Φεβρουάριος	203,9	178,7	194,3	192,6	174,7	135,3	172,7	174,7	162,4
Μάρτιος	220,3	205,2	216,6	213,5	245,1	199,7	223,2	200,0	165,1
Απρίλιος	237,0	259,3	242,5	241,4	231,0	274,5	264,7	278,9	258,2
Μάιος	221,1	287,8	292,4	275,8	248,9	260,4	261,2	253,2	276,9
Ιούνιος	270,7	283,6	290,6	285,8	289,8	265,6	283,4	285,9	272,2
Ιούλιος	312,2	307,1	307,0	304,0	293,0	291,1	299,0	306,1	310,1
Αύγουστος	293,4	279,7	304,0	298,2	311,2	291,9	305,2	289,2	293,2
Σεπτέμβριος	242,6	269,9	253,7	264,6	275,7	257,2	262,7	242,7	250,7
Οκτώβριος	225,6	234,0	179,7	215,9	232,1	211,2	236,0	178,3	185,3
Νοέμβριος	156,8	160,9	139,7	171,2	144,4	147,5	152,8	154,6	193,3
Δεκέμβριος	142,4	131,1	125,0	117,9	125,5	131,6	139,6	157,9	176,3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας και Θερμοκρασίας

4.1 Επιλογή αντιπροσωπευτικών τοποθεσιών και λήψη δεδομένων μέσω της πλατφόρμας PVGIS

Προκειμένου να ληφθούν επαρκή και αντιπροσωπευτικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για το διάστημα 2015-2023 επιλέχθηκαν 40 σημεία σε όλη την Ελλάδα. Το γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό διαμέρισμα των 40 σημείων παρατίθεται στον Πίνακα 4.1 και η χωροθέτησή τους στην χώρα στο Σχήμα 4.1.

Τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από την online πλατφόρμα PVGIS και είναι πρωτογενή. Το PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) είναι ένα διαδικτυακό εργαλείο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που παρέχει δεδομένα και εργαλεία για την εκτίμηση της ηλιακής ενέργειας και την απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε όλον τον κόσμο, με ελεύθερη πρόσβαση. Αξιοποιεί δορυφορικά δεδομένα για να υπολογίσει την ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία και περαιτέρω μετεωρολογικούς παράγοντες από φωτοβολταϊκά πάνελ στις επιθυμητές από τον χρήστη τοποθεσίες, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η κλίση και ο προσανατολισμός των πάνελ. Επιπλέον, παρέχει την δυνατότητα λήψης αυτών των δεδομένων σε μηνιαίο, ημερήσιο ή ακόμα και ωριαίο επίπεδο. Ακόμα, η πλατφόρμα επιτρέπει την λήψη δεδομένων παραγωγής ενέργειας επιλέγοντας την εκάστοτε τεχνολογία φωτοβολταϊκών [24].



Σχήμα 4.1: Χωροταξική κατανομή των 40 σημείων στη χώρα

Πίνακας 4.1: Τα 40 σημεία που επιλέχθηκαν για την έρευνα

	Τοποθεσία	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό διαμέρισμα
1	Ιωάννινα	39°35'06"N	20°55'56"E	Ήπειρος
2	Καστοριά	40°28'26"N	21°12'07"E	Μακεδονία
3	Τρίπολη	37°29'28"N	22°24'32"E	Πελοπόννησος
4	Μήλος	36°41'30"N	24°28'31"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
5	Κέρκυρα	39°37'57"N	19°47'47"E	Επτάνησα
6	Κρήτη	35°02'33"N	24°59'22"E	Κρήτη
7	Καβάλα	40°58'05"N	24°49'12"E	Μακεδονία
8	Λάρισα	39°33'23"N	22°31'40"E	Θεσσαλία
9	Λειβαδιά	38°26'42"N	23°01'26"E	Στερεά Ελλάδα
10	Λέσβος	39°07'34"N	26°19'13"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
11	Αγρίνιο	38°36'34"N	21°20'24"E	Στερεά Ελλάδα
12	Θεσσαλονίκη	40°35'49"N	22°48'02"E	Μακεδονία
13	Γύθειο	36°49'24"N	22°41'47"E	Πελοπόννησος
14	Ζάκυνθος	37°45'52"N	20°50'53"E	Επτάνησα
15	Ρόδος	36°21'43"N	27°58'48"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
16	Σκύρος	38°57'38"N	24°29'41"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
17	Τρίκαλα	39°29'36"N	21°53'08"E	Θεσσαλία
18	Έβρος	40°50'31"N	25°59'50"E	Θράκη
19	Αθήνα	37°58'25"N	23°47'14"E	Στερεά Ελλάδα
20	Μύκονος	37°25'44"N	25°19'47"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
21	Πάτρα	38°07'40"N	21°27'16"E	Πελοπόννησος
22	Σέρρες	40°58'22"N	23°37'29"E	Μακεδονία
23	Αριδαία	40°58'17"N	22°04'41"E	Μακεδονία
24	Λαμία	38°51'44"N	22°31'16"E	Στερεά Ελλάδα
25	Χίος	38°18'14"N	26°07'53"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
26	Ολυμπία	37°44'35"N	21°45'27"E	Πελοπόννησος
27	Καλαμάτα	37°04'02"N	21°58'35"E	Πελοπόννησος
28	Κόρινθος	37°55'09"N	22°53'32"E	Πελοπόννησος
29	Κοζάνη	40°19'56"N	21°58'12"E	Μακεδονία
30	Διακοπτό	38°10'11"N	22°17'05"E	Πελοπόννησος
31	Γρεβενά	40°02'44"N	21°25'25"E	Μακεδονία
32	Καρπενήσι	38°56'53"N	21°48'12"E	Στερεά Ελλάδα
33	Χαλκιδική	40°03'51"N	23°22'09"E	Μακεδονία
34	Δράμα	41°28'06"N	24°14'06"E	Μακεδονία
35	Ορεστιάδα	41°30'14"N	26°30'48"E	Θράκη
36	Άρτα	39°05'31"N	20°59'42"E	Ήπειρος
37	Ανάφη	36°21'47"N	25°46'09"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
38	Πάτμος	37°18'36"N	26°32'53"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
39	Λήμνος	39°54'57"N	25°10'38"E	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
40	Εύβοια	38°33'09"N	23°45'03"E	Στερεά Ελλάδα

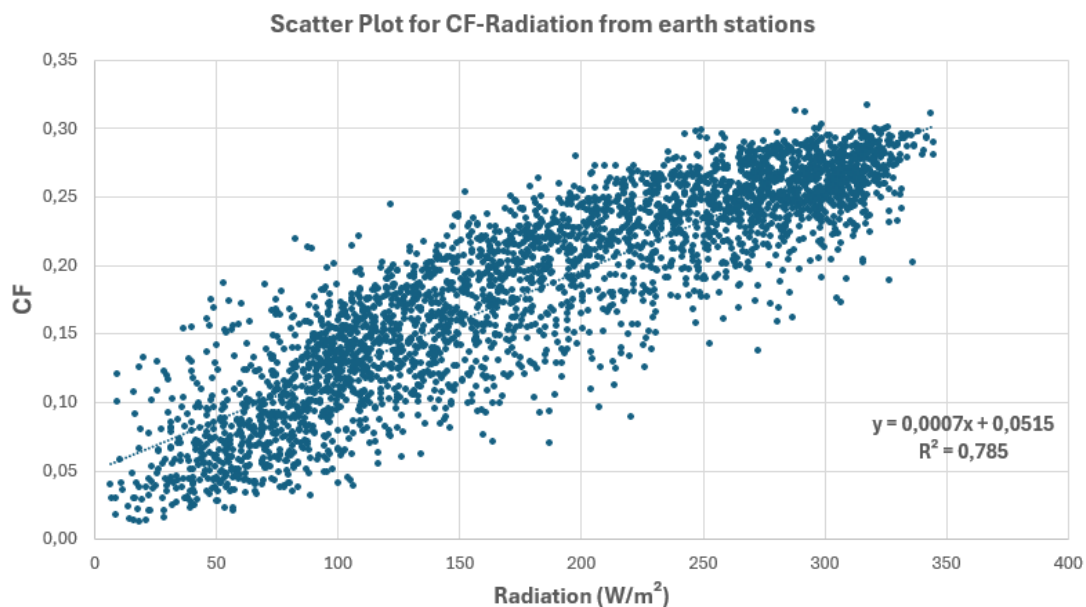
Κατά κύριο λόγο η χρήση του PVGIS εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς, όπως στην έρευνα, τον σχεδιασμό έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την υποστήριξη πολιτικών για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Χαρακτηριστικό είναι και το παράδειγμα των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων (ΗΑΕ), όπου η πλατφόρμα χρησιμοποιήθηκε στον κλάδο της έρευνας από τους Abdallah et al [25]. Πιο συγκεκριμένα, PVGIS αξιοποιήθηκε στην επικύρωση των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου που ανέπτυξαν οι ερευνητές, προσφέροντας ακριβή δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή των ΗΑΕ, κάτι που επιτρέπει την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην περιοχή. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι όταν χρησιμοποιείται ένα μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό σύστημα με μέγιστη ισχύ 5 kWp, η μηνιαία εναλλαγή της γωνίας κλίσης σε όλα τα εμιράτα

των ΗΑΕ δύναται να παράξει περίπου 15% περισσότερη ηλιακή ενέργεια από ότι τα μη κεκλιμένα ηλιακά πάνελ. Η βέλτιστη εναλλαγή προτάθηκε να είναι 2 φορές τον χρόνο σε εξαμηνιαία βάση. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ετήσια σταθερή βέλτιστη γωνία των 23° για τα ΗΑΕ προσφέρει περίπου 8% μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με ένα οριζόντιο ηλιακό πάνελ.

Στις 25 Σεπτεμβρίου 2024 η πλατφόρμα του PVGIS αναβαθμίστηκε, φέρνοντας στο προσκήνιο το SARAH-3. Το SARAH-3 (Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat, Version 3) είναι ένα εξελιγμένο σύνολο δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται στο διαδικτυακό αυτό εργαλείο, και απαρτίζεται από δορυφορικές μετρήσεις του EUMETSAT CM SAF. Προσφέρει στον χρήστη ωριαία δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας από το 1983 έως σήμερα, καλύπτοντας την Ευρώπη, την Αφρική, τη Μέση Ανατολή και τον Ατλαντικό Ωκεανό. Η μετάβαση από το SARAH-2 στο SARAH-3 έφερε βελτιώσεις στη χωρική και χρονική ανάλυση, με ακριβέστερη απεικόνιση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω βελτιωμένων αλγορίθμων και διορθώσεων στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται βελτιώσεις στην εκτίμηση της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας και επικαιροποιήσεις δεδομένων μέχρι και πρόσφατα [24].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα δεδομένα συλλέχθηκαν για 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες σε ωριαία κλίμακα, για τα έτη 2015-2023. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα ωριαία πρωτογενή δεδομένα καταγράφηκαν σύμφωνα με την παγκόσμια ζώνη ώρας (UTC), η οποία είναι δύο ώρες πίσω από την ώρα Ελλάδος. Ως εκ τούτου, για να μπορέσουν να συσχετισθούν με τον συντελεστή δυναμικότητας της Ελλάδας από το προηγούμενο κεφάλαιο, ήταν αναγκαίο να μετατραπούν σε τοπική ώρα. Επιπλέον, τα δεδομένα για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία παρέχονταν σε μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας (W/m^2) και αφορούσαν επιφάνειες με μηδενική κλίση και αζιμούθιο, ενώ τα δεδομένα θερμοκρασίας παρέχονταν σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}C$).

Η επικύρωση των δορυφορικών δεδομένων που λήφθηκαν από την πλατφόρμα PVGIS πραγματοποιήθηκε μέσω της λήψης επίγειων δεδομένων από 3 σταθμούς στην Ελλάδα. Οι σταθμοί βρίσκονται στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, στους Κωστακιούς και στην Κόνιτσα και τα απαραίτητα επίγεια δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας λήφθηκαν μέσω του Open-Meteo. Το Open-Meteo Stations είναι μια πλατφόρμα που παρέχει δεδομένα καιρού από μετεωρολογικούς σταθμούς σε μορφή χρονοσειρών. Οι σταθμοί συλλέγουν πληροφορίες όπως θερμοκρασία, υγρασία, άνεμο και βροχόπτωση, επιτρέποντας την ανάλυση και πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών. Οι χρονοσειρές αναλύθηκαν και συσχετίστηκαν με τον συντελεστή δυναμικότητας μέσω της διαδικασίας που θα αναλυθεί στην συνέχεια του κεφαλαίου και υπήρχε ικανοποιητική ταύτιση στα αποτελέσματα τόσο των επίγειων όσο και των δορυφορικών δεδομένων. Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς μεταξύ Συντελεστή Δυναμικότητας και των μέσων όρων ηλιακής ακτινοβολίας των 3 επίγειων σταθμών. Ο συντελεστής συσχέτισης $R^2 = 0,785$ υποδηλώνει ισχυρή θετική συσχέτιση, δηλαδή το 78,5% της μεταβολής του CF μπορεί να εξηγηθεί από την ακτινοβολία. Σε χαμηλές τιμές ακτινοβολίας (κάτω από τα $100 W/m^2$), η διασπορά είναι μεγαλύτερη, κάτι που μπορεί να υποδηλώνει περισσότερους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον CF. Σε κάθε περίπτωση, η συσχέτιση είναι αποδεκτή σε σχέση με τις τιμές για τα δορυφορικά στοιχεία που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

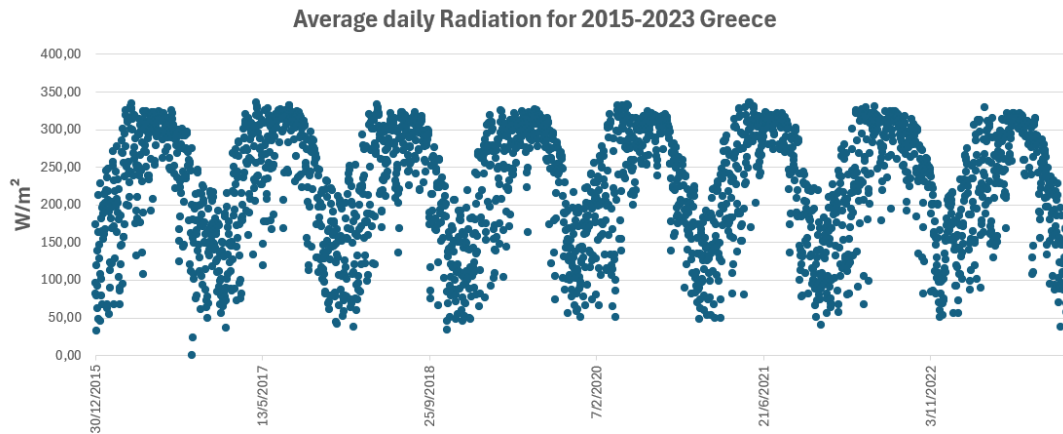


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Διασποράς ακτινοβολίας και συντελεστή δυναμικότητας από τους επίγειους σταθμούς, 2015-2023.

4.2 Ανάλυση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας

Για κάθε ένα από τα 40 σημεία που επιλέχθηκαν για την ανάλυση λήφθηκαν μέσω της πλατφόρμας PVGIS τα ωριαία πρωτογενή δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα δεδομένα από τους σταθμούς ήταν σε ωριαία κλίμακα, επομένως για να υπάρχει καλύτερη εποπτεία στην μοντελοποίηση μετατράπηκαν σε ημερήσια. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω του Υδρογνώμονα, ενός ελεύθερου λογισμικού που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία υδρολογικών χρονοσειρών [26]. Συγκεκριμένα, για κάθε ώρα, σε κάθε χρονοσειρά, υπολογίστηκε η μέση τιμή ακτινοβολίας των αντίστοιχων ωρών, όπου υπήρχαν δεδομένα. Παράλληλα, από την ανάλυση του Κεφαλαίου 3 έχουν προκύψει μέσω του Υδρογνώμονα οι ημερήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για το διάστημα μελέτης.

Έχοντας συλλέξει τα ωριαία δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και έχοντάς τα αναγάγει σε ημερήσια και για τα 40 σημεία σε όλη την Ελλάδα, θα υπολογιστεί για κάθε ημέρα ο μέσος όρος ακτινοβολίας όλων των σημείων και θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση. Χωροταξικά τα σημεία έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλη την επικράτεια, επομένως θεωρείται πως οι μέσες τιμές δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας είναι αντιπροσωπευτική τιμή για το τι συμβαίνει σε επίπεδο χώρας. Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται σε μορφή γραφήματος οι μέσες τιμές ακτινοβολίας σε W/m^2 σε σχέση με τον χρόνο. Είναι ξεκάθαρη η περιοδικότητα του φαινομένου, καθώς τους καλοκαιρινούς μήνες υπάρχει αφθονία σε ηλιοφάνεια ενώ τους χειμερινούς λόγω συννεφιάς η ακτινοβολία είναι περιορισμένη. Παράλληλα, η ωριαία διάρκεια σε ημέρα αυξάνεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, επομένως υπάρχει μεγαλύτερη ημερήσια ακτινοβολία.

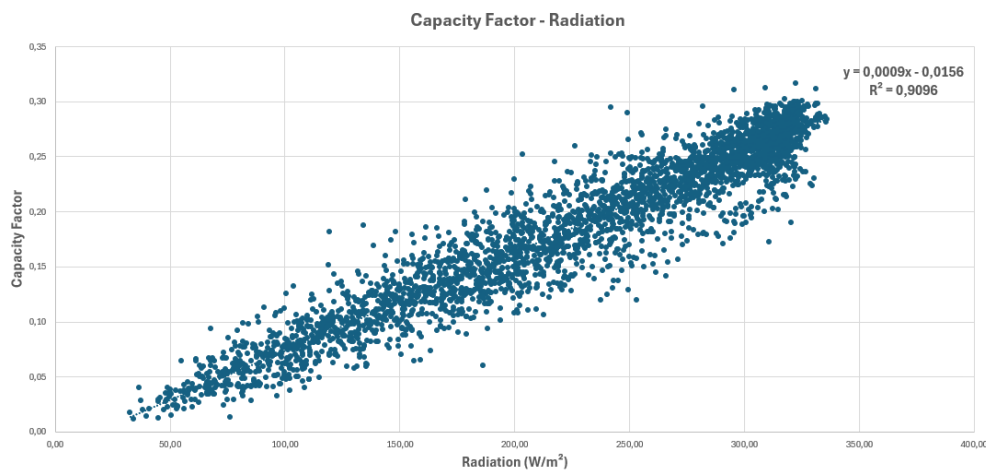


Σχήμα 4.3: Μέσοι όροι ηλιακής ακτινοβολίας για το διάστημα 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα

Έπειτα, εκτιμάται η εξάρτηση του συντελεστή δυναμικότητας από την ηλιακή ακτινοβολία, με υπολογισμό του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (Pearson) μεταξύ των αντίστοιχων συνόλων δεδομένων. Ποιοτικά, αυτό σημαίνει ότι αξιολογείται ο βαθμός στον οποίο δύο μεταβλητές σχετίζονται γραμμικά μεταξύ τους. Τιμές κοντά στο +1 δείχνουν ισχυρή θετική συσχέτιση (όταν η μία τιμή αυξάνεται, αυξάνεται και η άλλη). Έτσι, μπορούμε να κατανοήσουμε αν και πόσο ισχυρά συνδέονται δύο μεταβλητές, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την ανάλυση δεδομένων. Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται σε μορφή διαγράμματος διασποράς (Scatter Plot) η σχέση μεταξύ συντελεστή δυναμικότητας και ακτινοβολίας σε επίπεδο χώρας. Τα εξωκείμενα σημεία (outliers) έχουν εντοπιστεί με οπτικό τρόπο και έχουν αφαιρεθεί από τις χρονοσειρές.

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 μεταξύ των δύο μεγεθών έχει την τιμή 0,9096, η οποία δηλώνει υψηλή συσχέτιση μεταξύ των δυο μεταβλητών. Η εξίσωση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι η εξής, όπου το x παίρνει τιμές ηλιακής ακτινοβολίας :

$$y = 0,0009x - 0,0156 \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.4: Scatter Plot του συντελεστή δυναμικότητας και της ακτινοβολίας

Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς όση περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία δέχεται ένα φωτοβολταϊκό πάνελ τόσο αυξάνεται και η δυνατότητα να παράξει ενέργεια, αυξάνεται η αποδοτικότητά του και ως εκ τούτου ο συντελεστής δυναμικότητας. Στον Πίνακα 4.2 παραθέτονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και συντελεστή δυναμικότητας για κάθε ένα από τα 40 σημεία.

Πίνακας 4.1: Τα 40 σημεία που επιλέχθηκαν για την έρευνα

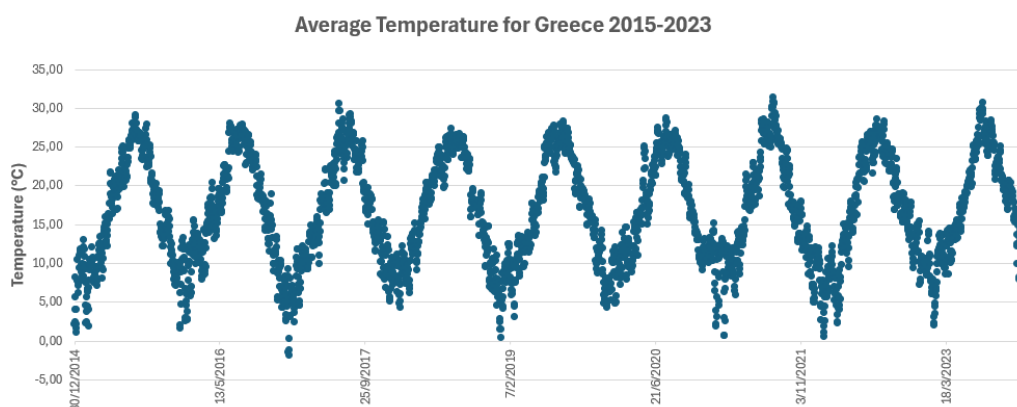
	Τοποθεσία	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Συντελεστής Συσχέτισης
1	Ιωάννινα	39°35'06"N	20°55'56"E	0,7512
2	Καστοριά	40°28'26"N	21°12'07"E	0,8330
3	Τρίπολη	37°29'28"N	22°24'32"E	0,8382
4	Μήλος	36°41'30"N	24°28'31"E	0,7670
5	Κέρκυρα	39°37'57"N	19°47'47"E	0,7806
6	Κρήτη	35°02'33"N	24°59'22"E	0,7115
7	Καβάλα	40°58'05"N	24°49'12"E	0,7979
8	Λάρισα	39°33'23"N	22°31'40"E	0,8862
9	Λειβαδιά	38°26'42"N	23°01'26"E	0,8580
10	Λέσβος	39°07'34"N	26°19'13"E	0,7666
11	Αγρίνιο	38°36'34"N	21°20'24"E	0,8269
12	Θεσσαλονίκη	40°35'49"N	22°48'02"E	0,8703
13	Γύθειο	36°49'24"N	22°41'47"E	0,8147
14	Ζάκυνθος	37°45'52"N	20°50'53"E	0,8186
15	Ρόδος	36°21'43"N	27°58'48"E	0,7100
16	Σκύρος	38°57'38"N	24°29'41"E	0,8329
17	Τρίκαλα	39°29'36"N	21°53'08"E	0,8827
18	Έβρος	40°50'31"N	25°59'50"E	0,7802
19	Αθήνα	37°58'25"N	23°47'14"E	0,8375
20	Μύκονος	37°25'44"N	25°19'47"E	0,7711
21	Πάτρα	38°07'40"N	21°27'16"E	0,8333
22	Σέρρες	40°58'22"N	23°37'29"E	0,8373
23	Αριδαία	40°58'17"N	22°04'41"E	0,8240
24	Λαμία	38°51'44"N	22°31'16"E	0,8729
25	Χίος	38°18'14"N	26°07'53"E	0,7865
26	Ολυμπία	37°44'35"N	21°45'27"E	0,8247
27	Καλαμάτα	37°04'02"N	21°58'35"E	0,8235
28	Κόρινθος	37°55'09"N	22°53'32"E	0,8624
29	Κοζάνη	40°19'56"N	21°58'12"E	0,8553
30	Διακοπτό	38°10'11"N	22°17'05"E	0,8825
31	Γρεβενά	40°02'44"N	21°25'25"E	0,8668
32	Καρπενήσι	38°56'53"N	21°48'12"E	0,8597
33	Χαλκιδική	40°03'51"N	23°22'09"E	0,8778
34	Δράμα	41°28'06"N	24°14'06"E	0,7399
35	Ορεστιάδα	41°30'14"N	26°30'48"E	0,7660
36	Άρτα	39°05'31"N	20°59'42"E	0,8137
37	Ανάφη	36°21'47"N	25°46'09"E	0,7349
38	Πάτμος	37°18'36"N	26°32'53"E	0,7633
39	Λήμνος	39°54'57"N	25°10'38"E	0,8254
40	Εύβοια	38°33'09"N	23°45'03"E	0,8347

4.3 Ανάλυση δεδομένων θερμοκρασίας

Για κάθε ένα από τα 40 σημεία που επιλέχθηκαν για την ανάλυση λήφθηκαν μέσω της πλατφόρμας PVGIS τα ωριαία πρωτογενή δεδομένα της θερμοκρασίας. Τα δεδομένα από τους σταθμούς ήταν σε ωριαία κλίμακα, επομένως για να υπάρχει καλύτερη εποπτεία στην μοντελοποίηση μετατράπηκαν σε ημερήσια. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω του Υδρογνώμονα, ενός ελεύθερου λογισμικού που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία υδρολογικών

χρονοσειρών [26]. Συγκεκριμένα, για κάθε ώρα, σε κάθε χρονοσειρά, υπολογίστηκε η μέση τιμή θερμοκρασίας των αντίστοιχων ωρών, όπου υπήρχαν δεδομένα. Ομοίως με το υποκεφάλαιο 4.2 υπολογίστηκε ο συνολικός μέσος όρος θερμοκρασίας για όλη την Ελλάδα για κάθε ημέρα από το 2015 έως και το 2023 από όλα τα 40 σημεία.

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζονται σε μορφή γραφήματος οι μέσες τιμές θερμοκρασίας σε °C σε σχέση με τον χρόνο. Είναι ξεκάθαρη η περιοδικότητα του φαινομένου, καθώς τους καλοκαιρινούς μήνες παρουσιάζεται άνοδος της θερμοκρασίας σε όλη την επικράτεια ενώ τους χειμερινούς μήνες κάθοδος. Η περιοδικότητα στην πραγματικότητα είναι διπλή καθώς υπάρχει τόσο εποχική περιοδικότητα στο φαινόμενο (Χειμώνας, Άνοιξη, Καλοκαίρι, Φθινόπωρο) όσο και ημερήσια (το μεσημέρι υπάρχει αυξημένη θερμοκρασία ενώ το βράδυ μειωμένη), σε μικρότερο βαθμό. Η περιοδικότητα τόσο της θερμοκρασίας όσο και της ακτινοβολίας θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια.



Σχήμα 4.5: Μέσοι όροι θερμοκρασίας για το διάστημα 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα

Η συσχέτιση αποκλειστικά της θερμοκρασίας με τον συντελεστή δυναμικότητας δεν οδηγεί σε απόλυτα συμπεράσματα. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σχετίζεται πιο άμεσα με την παραγωγή ηλιακής ενέργειας και ως εκ τούτου με την απόδοση του συστήματος, ενώ η θερμοκρασία μπορεί να δράσει τόσο θετικά όσο και αρνητικά. Σε κάθε περίπτωση, η υπέρμετρη άνοδος της θερμοκρασίας δύναται να θέσει σε μερική καταστολή τα φωτοβολταϊκά συστήματα λόγω υπερθέρμανσής τους.

4.4 Αφαίρεση περιοδικότητας Ηλιακής Ακτινοβολίας

Παραπάνω έχει θιχτεί το φαινόμενο της περιοδικότητας στην Ηλιακή Ακτινοβολία, το οποίο έχει διττή σημασία. Η περιοδικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από αστρονομικούς και κλιματικούς παράγοντες. Αφενός, η εποχική περιοδικότητα σε επίπεδο έτους οφείλεται στη μεταβολή της ηλιακής γωνίας και της διάρκειας της ημέρας λόγω της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο. Στην Ελλάδα, η ακτινοβολία είναι μέγιστη το καλοκαίρι και ελάχιστη τον χειμώνα, όπως επιβεβαιώνεται από τα παραπάνω διαγράμματα. Αφετέρου, η ημερήσια περιοδικότητα σχετίζεται με την ανατολή και τη δύση του Ήλιου, με την ηλιακή ακτινοβολία να κορυφώνεται το μεσημέρι, το οποίο πάλι επιβεβαιώνεται στις προηγούμενες αναλύσεις.

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η απομάκρυνση της περιοδικότητας από το φαινόμενο της ακτινοβολίας. Η απομάκρυνση της περιοδικότητας στη χρονοσειρά της ηλιακής ακτινοβολίας είναι καίρια για την ανάλυση μακροπρόθεσμων τάσεων και την κατανόηση των πραγματικών μεταβολών. Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει έναν έντονο ετήσιο κύκλο λόγω της τροχιάς της Γης και της εποχικής μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Αν διατηρηθεί αυτή η περιοδικότητα στη χρονοσειρά, οι μακροπρόθεσμες ανοδικές ή καθοδικές τάσεις κρύβονται και δεν είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς αν υπάρχουν διακυμάνσεις οι οποίες δύναται να συνδεθούν με την κλιματική αλλαγή, τη μεταβολή της ατμοσφαιρικής διαφάνειας ή την αυξημένη παρουσία αερολυμάτων και ρύπανσης.

Επιπλέον, η αφαίρεση του παράγοντα της εποχικής περιοδικότητας επιτρέπει την ακριβέστερη ανίχνευση ακραίων αποκλίσεων και βελτιώνει την ακρίβεια των στατιστικών μοντέλων και προβλέψεων. Τα ακραία φαινόμενα, όπως νεφοκάλυψη, σπάνιες καιρικές συνθήκες ή ανθρωπογενείς επιδράσεις, γίνονται πιο εμφανή όταν αφαιρείται η αναμενόμενη περιοδική διακύμανση. Ακόμα, τα περισσότερα στατιστικά και μοντέλα μηχανικής μάθησης λειτουργούν βέλτιστα όταν τα δεδομένα δεν περιέχουν ισχυρές περιοδικές συνιστώσες, επιτρέποντας πιο ακριβείς προβλέψεις και συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών περιοχών ή χρονικών περιόδων. Επομένως, η απομάκρυνση της περιοδικότητας είναι απαραίτητη για την αξιόπιστη ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας και των παραγόντων που την επηρεάζουν.

Η μέθοδος που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται στην προσαρμογή μιας συνημιτονοειδούς συνάρτησης (cosine fitting) για να μοντελοποιήσει την ετήσια περιοδικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία. Ουσιαστικά η μέθοδος αποσυνθέτει την χρονοσειρά $x(t)$ σε περιοδικό μέρος (αναπαριστά την διακύμανση λόγω περιοδικότητας) και σε υπόλοιπο (διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της εκτιμώμενης περιοδικότητας, δηλαδή η μη περιοδική συνιστώσα). Η μέθοδος χρησιμοποιεί τη γενική μορφή (4.2):

$$x^*(t) = x_L + (x_U - x_L) \left\{ 1 - \frac{1}{\alpha} \cos \left[2\pi \cdot \frac{J(t) - T_{LAG}}{365} \right] \right\} \quad (4.2)$$

Όπου:

x_L, x_U : όρια διακύμανσης περιοδικής διεργασίας ακτινοβολίας

$J(t)$: δείκτης της ημέρας του έτους (Julian day $J=1$ την 1/1, $J=2$ την 2/1 κ.ο.κ)

T_{LAG} : παράμετρος χρονικής υστέρησης

α : ελέγχει το εύρος της ταλάντωσης

Ο όρος $\cos \left[2\pi \cdot \frac{J(t) - T_{LAG}}{365} \right]$ αναπαριστά την ετήσια ταλάντωση της ακτινοβολίας.

Οι παράμετροι x_L, x_U, T_{LAG} και α προσδιορίζεται μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης (fitting) κάνοντας χρήση του επιλυτή (SOLVER) του Microsoft Excel. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με στόχο την μεγιστοποίηση του συντελεστή Kling-Gupta Efficiency (KGE), ο οποίος είναι ένα στατιστικό μέτρο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός μοντέλου πρόβλεψης. Ο συντελεστής προκύπτει ως εξής:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4.3.)$$

Όπου:

r: συντελεστής Pearson

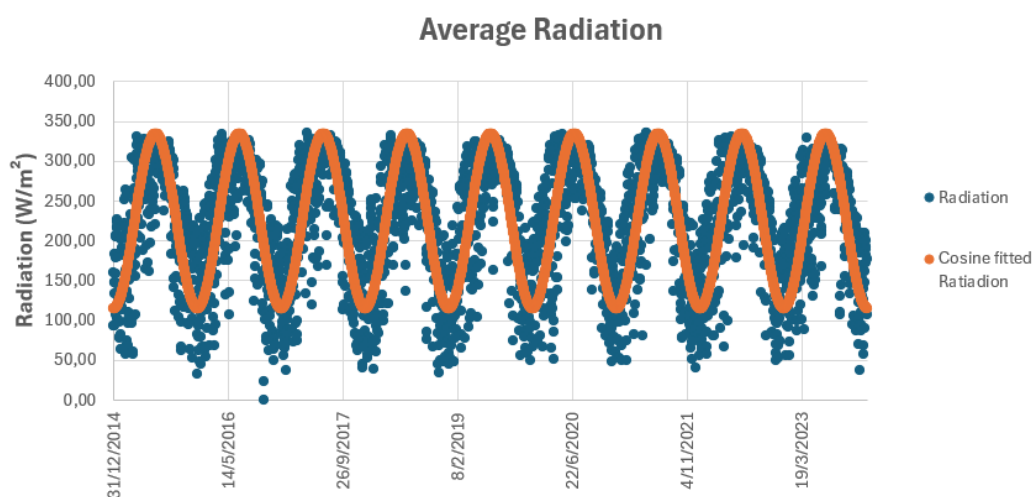
$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$, τυπικές αποκλίσεις προσομοιωμένης και παρατηρημένης χρονοσειράς

$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$, μέσες τιμές προσομοιωμένης και παρατηρημένης χρονοσειράς

Αφού πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση παράγεται η αντιπροσωπευτική χρονοσειρά της διεργασίας X, όπου X στην δεδομένη ανάλυση είναι η ηλιακή ακτινοβολία, και η απόκλιση της παρουσιάζεται στην εξίσωση (4.4):

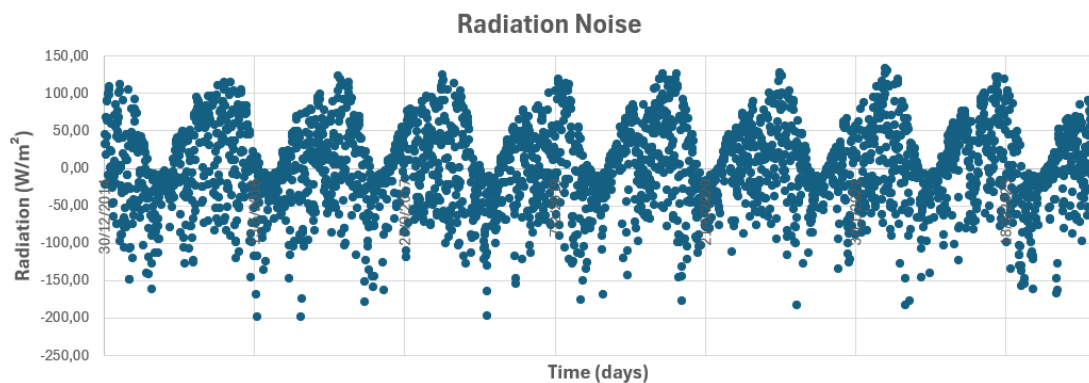
$$\Delta x(t) = x(t) - x^*(t) \quad (4.4)$$

Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της ακτινοβολίας σε σχέση με τον χρόνο καθώς και η μεταβολή της ακτινοβολίας με την απομάκρυνση της εποχικής συνιστώσας. Φαίνεται να υπάρχουν πολύ μικρότερες διακυμάνσεις το οποίο είναι θεμιτό βάση της μεθόδου. Η μπλε διασπορά των σημείων αντιπροσωπεύει τις αρχικές μετρήσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν εποχική διακύμανση και στοχαστικές διακυμάνσεις. Η πορτοκαλί καμπύλη είναι η περιοδική συνάρτηση που απεικονίζει την απόκλιση της ακτινοβολίας από την αναμενόμενη. Έτσι, αποκαλύπτονται πιο εύκολα μακροπρόθεσμες τάσεις και ανωμαλίες που δεν σχετίζονται με την ετήσια περιοδικότητα.



Σχήμα 4.6: Κανονική και αποπροσαρμοσμένη κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας για το διάστημα 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται ο θόρυβος της χρονοσειράς.

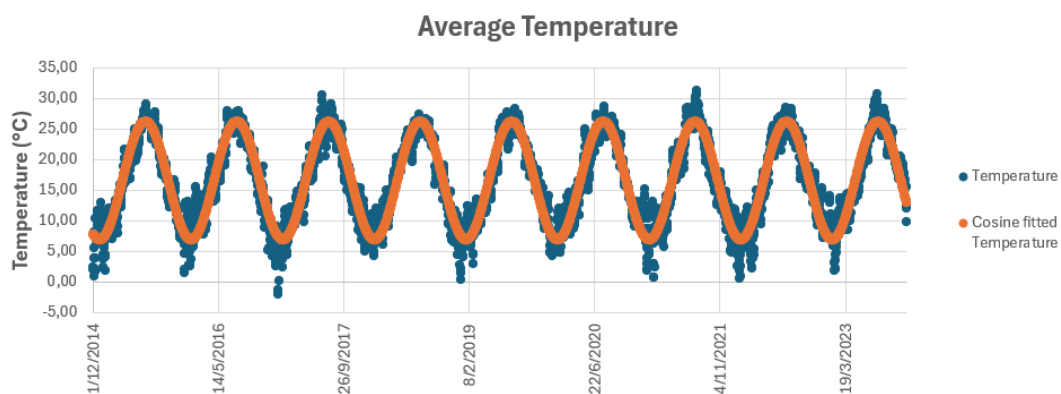


Σχήμα 4.7: Θόρυβος της χρονοσειράς ηλιακής ακτινοβολίας σε ημερήσια κλίμακα, 2015-2023

4.5 Αφαίρεση περιοδικότητας θερμοκρασίας

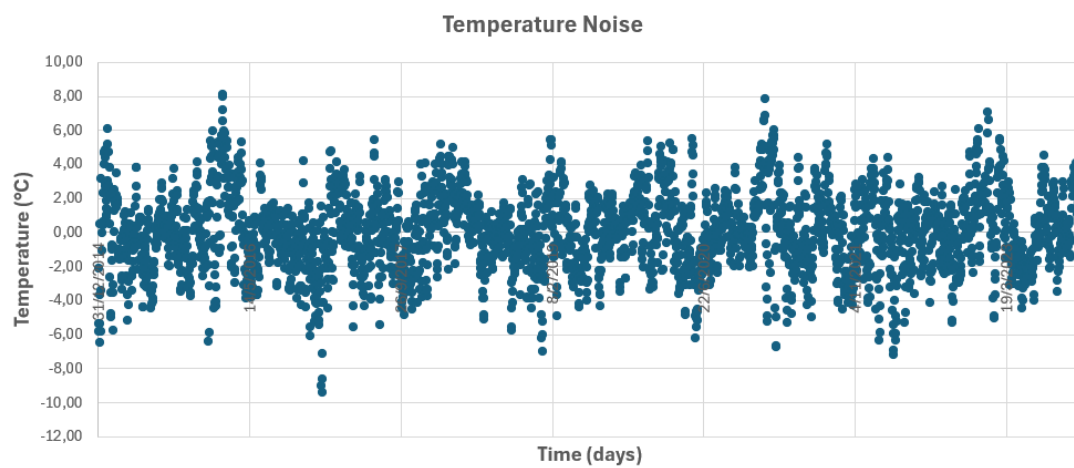
Για την απομάκρυνση της περιοδικότητας από την μεταβολή της θερμοκρασίας έχει εφαρμοστεί η ίδια μεθοδολογία με το υποκεφάλαιο 4.4. Η διακύμανση της θερμοκρασίας παρουσιάζει την ίδια περιοδικότητα με την ηλιακή ακτινοβολία και γι' αυτόν το λόγο πραγματοποιείται η απομάκρυνσή της. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τον χρόνο καθώς και η μεταβολή της θερμοκρασίας με την απομάκρυνση της εποχικής συνιστώσας. Παρατηρείται ένας σαφής ετήσιος κύκλος με τα μέγιστα να εμφανίζονται τους καλοκαιρινούς μήνες και τα ελάχιστα τους χειμερινούς. Αυτή η περιοδικότητα απορρέει από τις φυσικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας λόγω των εποχών και των μεταβολών στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Η μπλε διασπορά των σημείων απεικονίζει τις πραγματικές ημερήσιες θερμοκρασίες, ενώ η πορτοκαλί καμπύλη αντιπροσωπεύει τη θεωρητική εποχική συνιστώσα που αφαιρέθηκε. Με αυτή τη διαδικασία, είναι εφικτός ο εντοπισμός μακροπρόθεσμων τάσεων, όπως πιθανές αυξήσεις στη μέση θερμοκρασία λόγω κλιματικής αλλαγής. Γύρω από την πορτοκαλί καμπύλη παρουσιάζονται οι μέρες με ασυνήθιστα ψηλές ή αντίστοιχα χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.8: Κανονική και αποπροσαρμοσμένη κατανομή θερμοκρασίας για το διάστημα 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα

Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται ο θόρυβος της χρονοσειράς. Στον θόρυβο της χρονοσειράς θερμοκρασίας δεν φαίνεται να ακολουθείται κάποια τάση.



Σχήμα 4.9: Θόρυβος της χρονοσειράς θερμοκρασίας σε ημερήσια κλίμακα, 2015-2023

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μοντέλα Ανάλυσης και Πρόγνωσης Συντελεστή Δυναμικότητας

5.1 Μοντέλα Πρόγνωσης και Αναγκαιότητά τους

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν δυναμικό χαρακτήρα και η απόδοσή τους συνδέεται άρρηκτα με την γεωγραφική τους τοποθεσία και τις καιρικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση των έργων ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας στα υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα αποτελεί σημαντική πρόκληση. Η ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα, μεταξύ άλλων ΑΠΕ είναι μια αρκετά βιώσιμη πηγή λόγω του χωροταξικού πλεονεκτήματος της χώρας και της αφθονίας ηλιοφάνειας. Ωστόσο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα εξαρτάται από διάφορους περιβαλλοντικούς και μεταβλητούς παράγοντες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η νέφωση. Αυτές οι μεταβολές καθιστούν την πρόγνωση της αποδοτικότητάς τους απαραίτητη για τη βέλτιστη ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης και τη μείωση του κόστους λειτουργίας. Η ακριβής πρόβλεψη της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι καίρια για [29]:

- **Τους διαχειριστές δικτύων**, ώστε να εξασφαλίσουν τη σταθερότητα του ηλεκτρικού συστήματος και να διαχειριστούν τις διακυμάνσεις της παραγωγής, σύμφωνα με την εθνική νομοθεσία.
- **Τους παραγωγούς ενέργειας**, για τη βελτίωση της διαχείρισης των ενεργειακών πόρων, την αποδέσμευση από ορυκτούς πόρους και συμβατικές μορφές ενέργειας και την αποφυγή ποινών από αποκλίσεις στην παραγωγή.
- **Τις αγορές ενέργειας και τους επενδυτές**, για την βελτιστοποίηση των συναλλαγών και την αποτελεσματική κατανομή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, η χρήση καθαρών μορφών ενέργειας θα γίνει πιο ελκυστική και προσεγγίσιμη για τους χρήστες, καθώς όταν υπάρχει πρόγνωση λόγω όλων των παραπάνω συντελεστών η ενέργεια θα είναι πιο φθηνή.

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή ακριβών μοντέλων πρόγνωσης απαιτεί την επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας. Τα μοντέλα πρόγνωσης διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιούν τα δεδομένα και τη μαθηματική τους προσέγγιση. Τα μοντέλα πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της απόδοσης των φωτοβολταϊκών μπορούν να διακριθούν στις εξής βασικές κατηγορίες [29] [30]:

➤ **Εμπειρικά & Φυσικά Μοντέλα**

- Εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της φυσικής κατάστασης και της δυναμικής κίνησης της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει χώρα στην ατμόσφαιρα, βασίζονται δηλαδή στην κατανόηση και μοντελοποίηση της λειτουργίας του συστήματος.

- Περιλαμβάνουν παραμετρικά μοντέλα μεταφοράς ενέργειας, Sky Imagery, Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού (Numerical Weather Prediction “NWP”) και μοντέλα δορυφορικής απεικόνισης (Satellite-Imaging models)

➤ Χρονοσειρές & Στατιστικά Μοντέλα

- Χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα για να αναγνωρίσουν τάσεις και εποχικές μεταβολές. Εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα ιστορικά δεδομένα, την ευκολία εφαρμογής και την ικανότητα εξαγωγής των παρελθοντικών δεδομένων για την πρόβλεψη χρονοσειρών, χωρίς να βασίζεται στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος.
- Παραδείγματα: Persistence Model (μοντέλο εμμονής), ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), Holt-Winters, Moving Average (MA) και Vector Autoregression (VA).

➤ Μηχανική Μάθηση & Τεχνητή Νοημοσύνη

- Περιλαμβάνουν αλγόριθμους Machine Learning (ML) και Deep Learning (DL) για την πρόγνωση της απόδοσης βάσει πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ μεταβλητών.
- Παραδείγματα: Random Forest, XGBoost, Νευρωνικά Δίκτυα (LSTM, GRU, Transformers).

➤ Υβριδικά Μοντέλα & Συνδυασμός Μεθόδων

- Συνδυάζουν φυσικά, στατιστικά και ML μοντέλα για τη βελτίωση της ακρίβειας. Με άλλα λόγια, αυτή η ιδέα αφορά την ανάμειξη διαφορετικών μοντέλων με μοναδικά χαρακτηριστικά για την αντιμετώπιση των περιορισμών ενός μεμονωμένου μοντέλου, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση πρόβλεψης
- Εφαρμογή τεχνικών postprocessing & model blending για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει εφαρμογή ενός μοντέλου εμμονής (persistence). Ένα παράδειγμα εφαρμογής ενός τέτοιου μοντέλου αποτελεί η μελέτη των Kumler A, Xie Y. και Zhang Y. το 2019. Ακολουθώντας τον αλγόριθμο ανάκτησης νεφών που προτάθηκε από τους Xie και Liu (2013), οι επιφανειακές παρατηρήσεις του GHI (Global Horizontal Irradiance ή ολική οριζόντια ακτινοβολία) αποσυντίθενται σε ποσοστό νεφών χρησιμοποιώντας προσομοιωμένη εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία και εκάστοτε ζενίθια γωνία για το τρέχον βήμα χρόνου. Όταν η ζενίθια ηλιακή γωνία μεταβάλλεται με το χρόνο, δύναται να προβλεφθεί το μελλοντικό ποσοστό νεφών[31].

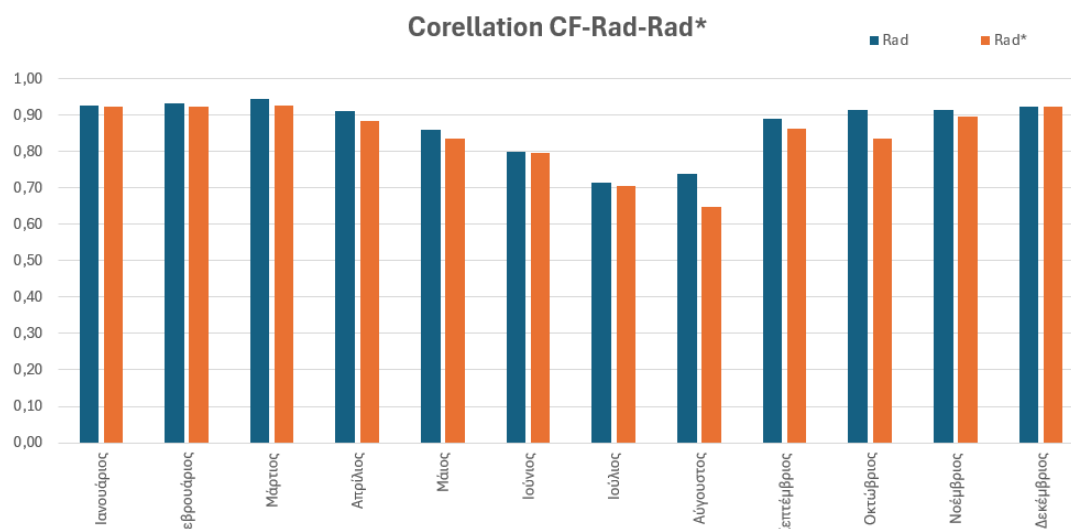
Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τον χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης, τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των δεδομένων, καθώς και τις απαιτήσεις ακρίβειας. Ο συνδυασμός διαφορετικών προσεγγίσεων οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθιστώντας την πρόγνωση κρίσιμο εργαλείο για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Για τη μέγιστη ιδιοκατανάλωση, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις πρέπει να προγραμματίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η παραγωγή να συγχρονίζεται με το προβλεπόμενο προφίλ φορτίου. Οι αξιόπιστες ηλιακές προβλέψεις ενημερώνουν τους

prosumers για τις περιόδους έλλειψης ή αφθονίας ηλιακής ενέργειας, μειώνοντας την αβεβαιότητα στη φωτοβολταϊκή παραγωγή και βελτιώνοντας τη σταθερότητα του συστήματος. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των μοντέλων πρόβλεψης, αυτά βασίζονται στις χωρικές και χρονικές αναλύσεις, τη μετεωρολογική μεταβλητότητα, τις παραμέτρους εισόδου και τους αλγόριθμους εκπαίδευσης.

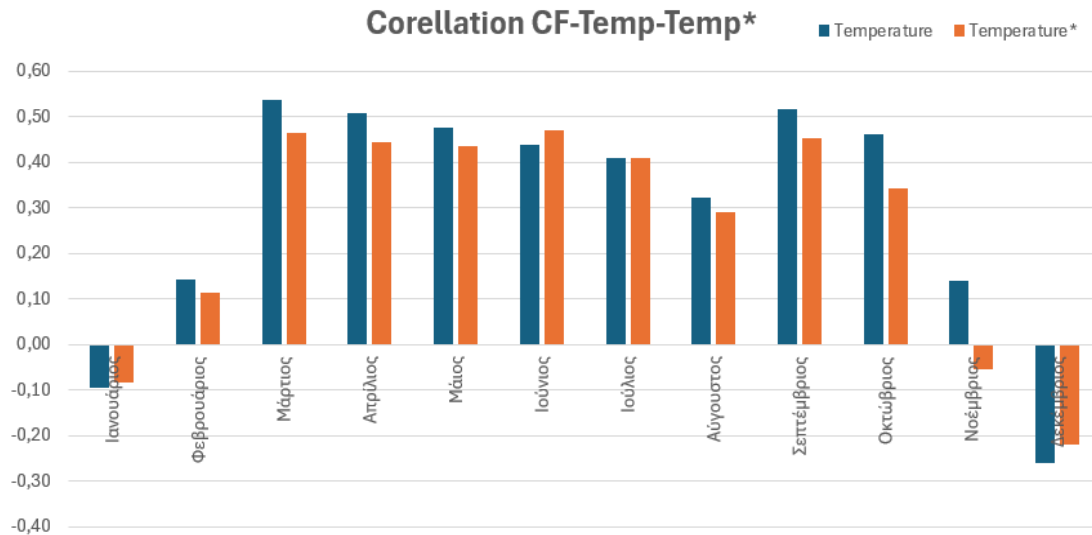
Στα επόμενα υποκεφάλαια θα αναλυθούν εκτενώς τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και αξιολόγηση για το καθένα. Πριν τις αναλύσεις παρατίθεται ο Πίνακας 5.1 ο οποίος περιέχει την συσχέτιση σε μηνιαία κλίμακα του συντελεστή δυναμικότητας που υπολογίστηκε σε σχέση με τις τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του μέσου όρου των 40 σημείων της Ελλάδας, μέσω του PVGIS, με και χωρίς περιοδικότητα. Στα Σχήματα 5.1 και 5.2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της παρακάτω συσχέτισης.

Πίνακας 5.1: Συσχέτιση σε μηνιαία κλίμακα Συντελεστή Δυναμικότητας με Ακτινοβολία και Θερμοκρασία με και χωρίς περιοδικότητα (*)

Μήνας	Ακτινοβολία	Ακτινοβολία*	Θερμοκρασία	Θερμοκρασία*
Ιανουάριος	0,9267	0,9242	-0,0961	-0,0843
Φεβρουάριος	0,9338	0,9224	0,1432	0,1143
Μάρτιος	0,9435	0,9266	0,5380	0,4663
Απρίλιος	0,9121	0,8850	0,5079	0,4439
Μάιος	0,8608	0,8348	0,4778	0,4371
Ιούνιος	0,7988	0,7965	0,4375	0,4696
Ιούλιος	0,7138	0,7049	0,4101	0,4107
Αύγουστος	0,7392	0,6470	0,3219	0,2923
Σεπτέμβριος	0,8904	0,8639	0,5178	0,4527
Οκτώβριος	0,9139	0,8364	0,4619	0,3419
Νοέμβριος	0,9136	0,8970	0,1399	-0,0545
Δεκέμβριος	0,9237	0,9230	-0,2611	-0,2188



Σχήμα 5.1: Γράφημα συσχέτισης Συντελεστή Δυναμικότητας με Ακτινοβολία (Radiation) και Ακτινοβολία χωρίς περιοδικότητα (Radiation*)



Σχήμα 5.2: Γράφημα συσχέτισης Συντελεστή Δυναμικότητας με Θερμοκρασία (Temperature) και Θερμοκρασία χωρίς περιοδικότητα (Temperature*)

5.2 Γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης

Οι μετεωρολογικές διεργασίες, όπως η ηλιοφάνεια και η θερμοκρασία, επηρεάζουν άμεσα την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία ενισχύει την παραγωγή, ενώ η συννεφιά και οι ακραίες θερμοκρασίες δύναται να τη μειώσουν. Για κάθε χρονοσειρά, κάθε σημείου τόσο για δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας όσο και δεδομένα θερμοκρασίας έγινε συσχετισμός στην θέση n με την χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας στην θέση n (ίδιο βήμα). Στο γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης και στη συνέχεια στο τύπου δύναμης, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας συσχετίζονται βέλτιστα από την χρονοσειρά του μέσου όρου ακτινοβολιών για όλη την Ελλάδα ($r=0,95371$) ενώ τα δεδομένα θερμοκρασίας συσχετίζονται καλύτερα πάλι από την χρονοσειρά των μέσων όρων θερμοκρασίας ($r=0,70644$).

Η ανάλυση πραγματοποιείται σε μηνιαία κλίμακα για τα έτη 2015-2023. Για παράδειγμα, όλα τα δεδομένα του μήνα Ιανουαρίου της εννιαετίας αναλύονται μαζί κ.ο.κ. Αυτό επιλέγεται επειδή η επίδραση της θερμοκρασίας είναι αισθητή από χειμερινούς σε καλοκαιρινούς μήνες και η συσχέτιση του μοντέλου είναι χαμηλή αν δεν επιλεγεί η ανάλυση από μήνα σε μήνα. Χρησιμοποιείται η χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας όπου δεν έχει απομακρυνθεί η περιοδικότητα και εφαρμόζεται η γραμμική εξίσωση 5.2.1:

$$CF_t = aRad_t + bTemp_t \quad (5.2.1)$$

Όπου:

CF_t : οι προσομοιωμένες τιμές του συντελεστή δυναμικότητας που υπολογίζονται

Rad_t : οι πραγματικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

$Temp_t$: οι πραγματικές τιμές θερμοκρασίας

α, b: συντελεστές όρων εξίσωσης

Με αυτή την μέθοδο υπολογίζεται μία νέα χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας. Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές α και b υπολογίζεται για κάθε τιμή του συντελεστή (πραγματική τιμή και προσομοιωμένη) το τετραγωνικό σφάλμα. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού σφάλματος της χρονοσειράς με τον επιλυτή SOLVER του Microsoft Excel. Έτσι προκύπτουν οι συντελεστές για κάθε μήνα (Πίνακας 5.2.1) και η συσχέτιση του συντελεστή μαζί με το σφάλμα (Πίνακας 5.2.2). Στον Πίνακα 5.2.3. η αξιολόγηση μίας σχέσης δύο συνόλων (Capacity Factor – Capacity Factor forecasted) βάση του συντελεστή Pearson (CORREL στο Excel).

Πίνακας 5.2.1: Συντελεστές για την εξίσωση (5.2.1)

Μήνας	$\alpha (\cdot 10^{-4})$	$b (\cdot 10^{-4})$
Ιανουάριος	5,49	2999
Φεβρουάριος	8,29	0,68
Μάρτιος	8,47	2,44
Απρίλιος	8,45	1,56
Μάιος	8,39	2,45
Ιούνιος	8,96	-5,84
Ιούλιος	8,61	-0,02
Αύγουστος	9,68	-16,3
Σεπτέμβριος	7,98	1,85
Οκτώβριος	8,01	-3,65
Νοέμβριος	7,55	-5,77
Δεκέμβριος	8,18	-24,1

Πίνακας 5.2.2.: Συσχέτιση και σφάλμα γραμμικού μοντέλου προσομοίωσης

Μήνας	CORREL	Τετραγωνικό σφάλμα
Ιανουάριος	0,966	0,042
Φεβρουάριος	0,934	0,098
Μάρτιος	0,944	0,125
Απρίλιος	0,912	0,166
Μάιος	0,860	0,177
Ιούνιος	0,801	0,143
Ιούλιος	0,714	0,108
Αύγουστος	0,748	0,118
Σεπτέμβριος	0,890	0,138
Οκτώβριος	0,914	0,114
Νοέμβριος	0,914	0,092
Δεκέμβριος	0,934	0,068

Πίνακας 5.2.3.: Αξιολόγηση βάση του CORREL

CORREL	Αξιολόγηση
1	Ισχυρή θετική συσχέτιση
0	Καμία συσχέτιση
-1	Ισχυρή αρνητική συσχέτιση

Το γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης φαίνεται να αποδίδει σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό, με ιδιαίτερη έμφαση τους χειμερινούς μήνες, για τους οποίους προκύπτει συντελεστής συσχέτισης μεγαλύτερος από 0,93 και τετραγωνικό σφάλμα αρκετά μικρό. Μάλιστα, η πλειονότητα των μηνών χαρακτηρίζεται από συντελεστές συσχέτισης μεγαλύτερους του 0,90, δηλαδή οι τάσεις των πραγματικών δεδομένων ακολουθούνται με συνέπεια. Την άνοιξη και το φθινόπωρο το τετραγωνικό σφάλμα είναι ελαφρώς μεγαλύτερο, ωστόσο η απόδοση είναι αποδεκτή, καθώς υπάρχει συσχέτιση μεγαλύτερη από 0,85 τους μήνες αυτούς. Μία εξήγηση για την αύξηση του σφάλματος από τον χειμώνα προς το καλοκαίρι αποτελεί η υπέρμετρη άνοδος της θερμοκρασίας, η οποία επηρεάζει και την συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων (υπενθυμίζεται ότι υπάρχει μείωση του βαθμού απόδοσης, για θερμοκρασίες άνω των 25°C). Παρόλα αυτά, παραμένει ένα ικανοποιητικό μοντέλο ανάλυσης του συντελεστή δυναμικότητας.

5.3 Μοντέλο προσομοίωσης τύπου δύναμης

Για κάθε χρονοσειρά, κάθε σημείου τόσο για δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας όσο και δεδομένα θερμοκρασίας έγινε συσχετισμός στην θέση n με την χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας στην θέση n (ίδιο βήμα). Στο γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης και στη συνέχεια στο τύπου δύναμης, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας συσχετίζονται βέλτιστα από την χρονοσειρά του μέσου όρου ακτινοβολιών για όλη την Ελλάδα ($r=0,95371$) ενώ τα δεδομένα θερμοκρασίας συσχετίζονται καλύτερα πάλι από την χρονοσειρά του μέσου όρου θερμοκρασιών ($r=0,70644$).

Η ανάλυση πραγματοποιείται σε μηνιαία κλίμακα για τα έτη 2015-2023. Για παράδειγμα, όλοι οι Γενάρηδες της εννιαετίας αναλύονται μαζί κ.ο.κ. Χρησιμοποιείται η χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας όπου δεν έχει απομακρυνθεί η περιοδικότητα και εφαρμόζεται η δυναμική εξίσωση 5.3.1:

$$CF_t = a(Rad_t^b)(Temp_t + T_0)^c \quad (5.3.1)$$

Όπου:

CF_t : προβλεπόμενη τιμή συντελεστή δυναμικότητας για ημέρα t

Rad_t : ηλιακή ακτινοβολία για ημέρα t (πραγματικό δεδομένο)

$Temp_t$: θερμοκρασία για ημέρα t (πραγματικό δεδομένο)

a, b, c, T_0 : συντελεστές των όρων της εξίσωσης

Με αυτή την μέθοδο υπολογίζεται μία νέα χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας. Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές a, b, c, T_0 υπολογίζεται για κάθε τιμή του συντελεστή (πραγματική τιμή και προσομοιωμένη) το τετραγωνικό σφάλμα. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού σφάλματος της χρονοσειράς με τον επιλυτή SOLVER του Microsoft Excel. Έτσι προκύπτουν οι συντελεστές για κάθε μήνα (Πίνακας 5.3.1) και η συσχέτιση του συντελεστή μαζί με το σφάλμα. (Πίνακας 5.3.2)

Πίνακας 5.3.1: Συντελεστές για την εξίσωση (5.3.1)

Μήνας	$a(\cdot 10^{-4})$	$b(\cdot 10^{-4})$	$c(\cdot 10^{-4})$	T_0
Ιανουάριος	56,2	1000	-5268	40,0
Φεβρουάριος	751	11,5	1994	19,9
Μάρτιος	9,31	9809	103	0,00
Απρίλιος	221	52,4	7615	6,95
Μάιος	532	972	2970	4,49
Ιούνιος	9,60	1000	-442	-6,39
Ιούλιος	14,3	9117	2,00	8,82
Αύγουστος	15,8	1000	-1607	28,6
Σεπτέμβριος	7,89	9772	452	10,9
Οκτώβριος	7,67	1000	50,3	-2,23
Νοέμβριος	7,68	1000	-217	5,82
Δεκέμβριος	96,5	1000	-7238	30,0

Πίνακας 5.3.2: Συσχέτιση και σφάλμα μοντέλου τύπου δύναμης προσομοίωσης

Μήνας	CORREL	Τετραγωνικό σφάλμα
Ιανουάριος	0,930	0,082
Φεβρουάριος	0,263	0,740
Μάρτιος	0,944	0,125
Απρίλιος	0,541	0,698
Μάιος	0,687	0,471
Ιούνιος	0,802	0,142
Ιούλιος	0,714	0,107
Αύγουστος	0,746	0,121
Σεπτέμβριος	0,891	0,138
Οκτώβριος	0,914	0,115
Νοέμβριος	0,914	0,093
Δεκέμβριος	0,930	0,076

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο αποδίδει πολύ καλά σε αρκετούς μήνες, με συσχέτιση πάνω από 0,90 και χαμηλό τετραγωνικό σφάλμα σε Ιανουάριο, Μάρτιο, Σεπτέμβριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρή προσαρμογή στα πραγματικά δεδομένα. Ωστόσο, σε μήνες όπως ο Φεβρουάριος (CORREL = 0,26 με τετραγωνικό σφάλμα 0,74) και ο Απρίλιος (CORREL = 0,54 με τετραγωνικό σφάλμα 0,69), η απόδοση του μοντέλου είναι αισθητά χαμηλότερη, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε αυξημένη μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών, στη μη γραμμική επίδραση των μετεωρολογικών παραγόντων στον συντελεστή δυναμικότητας ή σε διαφοροποιήσεις στην ποιότητα των δεδομένων. Συνολικά, το μοντέλο καταγράφει ικανοποιητική απόδοση στους περισσότερους μήνες, αλλά υπάρχουν μήνες όπου η πρόβλεψη είναι λιγότερο ακριβής, πιθανώς λόγω αυξημένης αστάθειας των εξωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν την παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στις οποίες τα μοντέλα παλινδρόμησης είναι αρκετά ευαίσθητα.

5.4 Γραμμικό Μοντέλο πρόγνωσης

Για κάθε χρονοσειρά, κάθε σημείου τόσο για δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας όσο και δεδομένα θερμοκρασίας έγινε συσχετισμός στην θέση n με την χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας στην θέση $n+1$ (της επόμενης ημέρας). Στο γραμμικό μοντέλο πρόγνωσης και στη συνέχεια στο δυναμικό, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας συσχετίζονται βέλτιστα από την χρονοσειρά του μέσου όρου ακτινοβολιών για όλη την Ελλάδα ($r=0,757421$) ενώ τα δεδομένα θερμοκρασίας συσχετίζονται καλύτερα από την χρονοσειρά του μέσου όρου των 40 σημείων της χώρας ($r=0,656$).

Χρησιμοποιείται η χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας όπου δεν έχει απομακρυνθεί η περιοδικότητα και εφαρμόζεται η γραμμική εξίσωση 5.4.1:

$$CF_t = aRad_{t-1} + bTemp_{t-1} + cCF_{t-1} \quad (5.4.1.)$$

όπου για να προβλεφθεί ο συντελεστής δυναμικότητας μίας ημέρας πολλαπλασιάζουμε την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία και τον συντελεστή δυναμικότητας της προηγούμενης ημέρας με τους συντελεστές a, b και c αντίστοιχα. Το άθροισμα των γινομένων προβλέπει τον ζητούμενο capacity factor. Οι συντελεστές a, b και c προκύπτουν από βελτιστοποίηση που πραγματοποιείται με στόχο την μεγιστοποίηση του συντελεστή NSE*, μία παραλλαγή του δείκτη NSE.

Ο Nash-Sutcliffe Efficiency Persistence (NSE*) είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης προβλεπτικών μοντέλων, ιδιαίτερα σε υδρολογικές και ενεργειακές εφαρμογές, όπως τα φωτοβολταϊκά. Ο NSE* ποσοτικοποιεί το πόσο καλά ένα μοντέλο προσομοιώνει τις πραγματικές τιμές σε σχέση με τη χρήση της τιμής της προηγούμενης ημέρας ως πρόβλεψη.. Ορίζεται ως 5.4.2:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - O_{t-1})^2} \quad (5.4.2)$$

όπου:

O_t : οι παρατηρούμενες τιμές (πραγματικά δεδομένα) την χρονική στιγμή t

P_t : οι προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου την χρονική στιγμή t

O_{t-1} : οι παρατηρούμενες τιμές (πραγματικά δεδομένα) την χρονική στιγμή $t-1$

N : πλήθος δεδομένων

Στον Πίνακα 5.4.1. φαίνεται η αξιολόγηση ενός μοντέλου βάση του συντελεστή NSE.

Πίνακας 5.4.1: Αξιολόγηση βάση του NSE

NSE	Αξιολόγηση
NSE = 1	Τέλεια πρόβλεψη
NSE > 0,75	Πολύ καλό μοντέλο
0 < NSE < 0,75	Μέτρια ακρίβεια
NSE = 0	Το μοντέλο δεν είναι καλύτερο από τη χρήση της τιμής της προηγούμενης ημέρας
NSE < 0	Το μοντέλο έχει χειρότερη απόδοση από την τιμή της προηγούμενης ημέρας (κακή πρόβλεψη)

Στον Πίνακα 5.4.2. φαίνεται η συσχέτιση με τον συντελεστή δυναμικότητας και ο συντελεστής NSE για κάθε μήνα ενώ στον Πίνακα 5.4.3. οι συντελεστές α, b και c που προέκυψαν κατόπιν βελτιστοποίησης για την εξίσωση (5.4.1).

Πίνακας 5.4.2.: Συσχέτιση Γραμμικού μοντέλου Forecasting

Μήνας	CORREL	NSE
Ιανουάριος	0,336	0,013
Φεβρουάριος	0,324	0,042
Μάρτιος	0,529	0,063
Απρίλιος	0,532	0,090
Μάιος	0,481	0,145
Ιούνιος	0,484	0,104
Ιούλιος	0,625	0,065
Αύγουστος	0,740	0,043
Σεπτέμβριος	0,651	0,044
Οκτώβριος	0,571	0,171
Νοέμβριος	0,571	0,128
Δεκέμβριος	0,596	0,064

Πίνακας 5.4.3.: Συντελεστές γραμμικής εξίσωσης (5.4.1)

Μήνας	$a \cdot 10^{-4}$	$b \cdot 10^{-4}$	$c \cdot 10^{-4}$
Ιανουάριος	6,85	24,3	9,11
Φεβρουάριος	7,22	14,1	30,0
Μάρτιος	3,96	22,3	3923
Απρίλιος	0,82	37,9	6301
Μάιος	0,59	44,0	5423
Ιούνιος	0,72	26,1	6425
Ιούλιος	1,91	7,53	6948
Αύγουστος	0,14	10,8	8570
Σεπτέμβριος	3,13	20,3	3764
Οκτώβριος	0,40	38,6	5450
Νοέμβριος	0,07	23,0	7254
Δεκέμβριος	1,44	8,90	7116

Όπως έχει αναφερθεί, ο συντελεστής CORREL δείχνει την γραμμική συσχέτιση μεταξύ της χρονοσειράς του πραγματικού συντελεστή δυναμικότητας και του forecasted

συντελεστή δυναμικότητας. Η ελάχιστη τιμή είναι του μήνα Φεβρουαρίου (0,324) και η μέγιστη τον Αύγουστο (0,740). Η μέγιστη τιμή ήταν αναμενόμενο να παρουσιαστεί καλοκαιρινό μήνα, καθώς λόγω της υψηλής ηλιοφάνειας και την άνοδο της θερμοκρασίας η συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πιο σταθερή και αποδοτική. Τους χειμερινούς μήνες η συσχέτιση είναι αρκετά πιο χαμηλή, λόγω μεταβλητότητας των καιρικών συνθηκών και μετεωρολογικών παραγόντων. Ο συντελεστής NSE αξιολογεί την απόδοση του μοντέλου συγκρίνοντάς το με τη μέση τιμή της πραγματικής χρονοσειράς. Η ελάχιστη τιμή είναι του μήνα Ιανουαρίου (0,0127) και η μέγιστη τον Οκτώβριο (0,171). Οι τιμές κυμαίνονται σε πολύ χαμηλό επίπεδο και σύμφωνα με τον πίνακα αξιολόγησης το μοντέλο έχει χαμηλή απόδοση. Συμπερασματικά, το γραμμικό μοντέλο forecasting έχει χαμηλή απόδοση, ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες.

5.5 Μοντέλο πρόγνωσης τύπου Δύναμης

Για κάθε χρονοσειρά, κάθε σημείου τόσο για δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας όσο και δεδομένα θερμοκρασίας έγινε συσχετισμός στην θέση n με την χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας στην θέση $n+1$ (της επόμενης ημέρας). Στο γραμμικό μοντέλο πρόγνωσης, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας συσχετίζονται βέλτιστα από την χρονοσειρά του μέσου όρου ακτινοβολιών για όλη την Ελλάδα ($r=0,757421$) ενώ τα δεδομένα θερμοκρασίας συσχετίζονται καλύτερα από την χρονοσειρά του μέσου όρου των σημείων της χώρας ($r=0,656001$).

Η ανάλυση πραγματοποιείται σε μηνιαία κλίμακα για τα έτη 2015-2023. Για παράδειγμα, όλοι πρώτοι μήνες της εννιαετίας αναλύονται μαζί κ.ο.κ. Χρησιμοποιείται η χρονοσειρά του συντελεστή δυναμικότητας όπου δεν έχει απομακρυνθεί η περιοδικότητα και εφαρμόζεται η δυναμική εξίσωση 5.3.1:

$$CF_t = a(Rad_{t-1}^b)(Temp_{t-1} + T_0)^c(CF_{t-1})^d \quad (5.5.1.)$$

Όπου:

CF_t : προβλεπόμενη τιμή συντελεστή δυναμικότητας για ημέρα t

CF_{t-1} : συντελεστής δυναμικότητας για ημέρα $t-1$ (πραγματικό δεδομένο)

Rad_{t-1} : ηλιακή ακτινοβολία για ημέρα $t-1$ (πραγματικό δεδομένο)

$Temp_{t-1}$: θερμοκρασία για ημέρα $t-1$ (πραγματικό δεδομένο)

a, b, c, d, T_0 : συντελεστές των όρων της εξίσωσης

Οι συντελεστές a, b, c, d και T_0 προκύπτουν βάση βελτιστοποίησης από τον επιλυτή (SOLVER) με σκοπό τον μεγιστοποίηση του συντελεστή NSE (βλ. Εξίσωση 5.2.2.). Από τους Πίνακες 5.2.3 και 5.4.1 φαίνεται η αξιολόγηση από τους συντελεστές Pearson (CORREL) και NSE. Στον Πίνακα 5.5.1. φαίνεται η συσχέτιση με τον συντελεστή δυναμικότητας και ο συντελεστής NSE για κάθε μήνα ενώ στον Πίνακα 5.5.2. οι συντελεστές a, b, c, d και T_0 που προέκυψαν κατόπιν βελτιστοποίησης για την εξίσωση (5.3.1).

Πίνακας 5.5.1.: Συσχέτιση μοντέλου Forecasting τύπου δύναμης

Μήνας	CORREL	NSE
Ιανουάριος	0,400	0,260
Φεβρουάριος	0,373	0,317
Μάρτιος	0,538	0,214
Απρίλιος	0,525	0,216
Μάιος	0,481	0,145
Ιούνιος	0,257	0,015
Ιούλιος	0,247	-0,252
Αύγουστος	0,452	-0,701
Σεπτέμβριος	-0,021	0,147
Οκτώβριος	0,556	0,191
Νοέμβριος	0,546	0,139
Δεκέμβριος	0,608	0,166

Πίνακας 5.5.2: Συντελεστές όρων δυναμικής εξίσωσης 5.5.1

Μήνας	$a(\cdot 10^{-4})$	$b(\cdot 10^{-4})$	$c(\cdot 10^{-4})$	$d(\cdot 10^{-4})$	T
Ιανουάριος	2005	351	23,8	3369	18,3
Φεβρουάριος	2180	1573	-2600	1891	17,8
Μάρτιος	1804	1122	341	4044	200
Απρίλιος	1406	1111	1198	3470	6,36
Μάιος	0,59	44,04	5423	30,0	-9,00
Ιούνιος	470	357	3987	-285	8,00
Ιούλιος	259	13,09	5930	-9,98	20,0
Αύγουστος	38,7	2903	-1011	-582	20,0
Σεπτέμβριος	6547	-1449	2258	7168	9,00
Οκτώβριος	42,4	2795	6411	2366	40,0
Νοέμβριος	342	3080	903	3236	35,0
Δεκέμβριος	973	2529	-558	3913	55,0

Το δυναμικό μοντέλο forecasting έχει λίγο καλύτερη απόδοση τον χειμώνα, με σχετικά αυξημένες τιμές NSE (έως 0,31) και σχετικά ικανοποιητική συσχέτιση (CORREL 0,40-0,60), δείχνοντας ότι καταγράφει καλύτερα τη μεταβλητότητα της απόδοσης κατά τους χειμερινούς μήνες όπου οι μετεωρολογικές και καιρικές συνθήκες δεν είναι τόσο σταθερές και προβλέψιμες. Ωστόσο, το καλοκαίρι η απόδοσή του μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, με αρνητικές τιμές NSE (έως -0,70) και εξαιρετικά χαμηλή συσχέτιση, ειδικά τον Σεπτέμβριο (-0,02), γεγονός που υποδηλώνει αδυναμία πρόβλεψης στις σταθερές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας όπου παρουσιάζονται το καλοκαίρι.

Συμπερασματικά για τα μοντέλα πρόγνωσης, τόσο για το γραμμικό όσο και για το τύπου δύναμης υπάρχει απουσία συσχέτισης και χαμηλή απόδοση τους χειμερινούς και τους καλοκαιρινούς μήνες αντίστοιχα για το καθένα. Συγκριτικά με το γραμμικό μοντέλο, το μοντέλο τύπου δύναμης παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα τον χειμώνα, με υψηλότερες τιμές NSE (π.χ. Φλεβάρης 0,04 έναντι του 0,31) και μία ελαφρώς καλή συσχέτιση CORREL (μέγιστα έως 0,40-0,60). Ωστόσο, το καλοκαίρι η απόδοσή του υποβαθμίζεται σημαντικά, με αρνητικές τιμές NSE (έως και -0,70) και εμφανώς χαμηλότερη συσχέτιση, ειδικά τους μήνες Ιούλιο-Σεπτέμβριο, όπου το γραμμικό μοντέλο είχε καλύτερη απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο τύπου δύναμης προσομοιώνει

καλύτερα τις καιρικές και μετεωρολογικές διεργασίες τον χειμώνα, αλλά αποτυγχάνει να προβλέψει σωστά τη σταθερότητα της απόδοσης το καλοκαίρι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

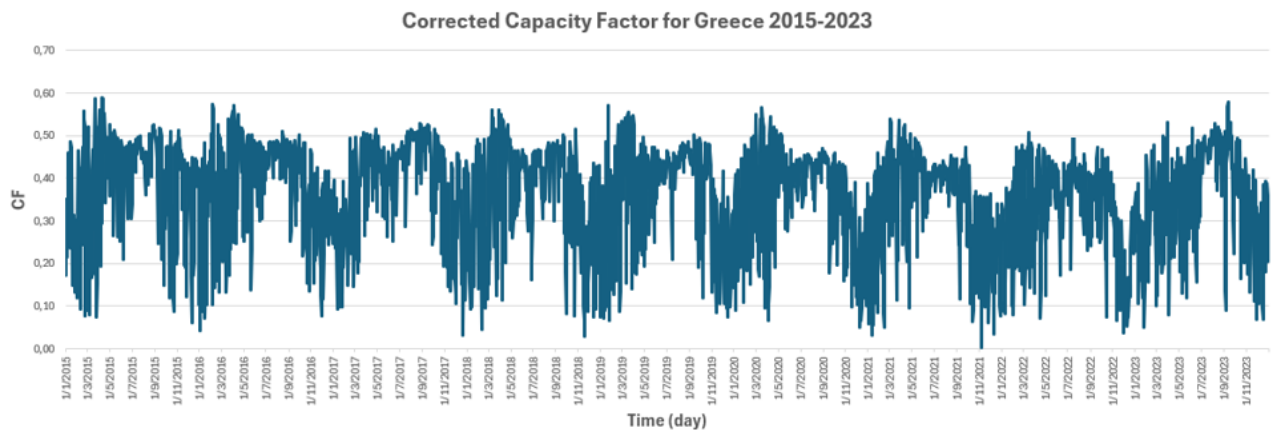
Διόρθωση Συντελεστή Δυναμικότητας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τιμή του συντελεστή δυναμικότητας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η ηλιοφάνεια, οι καιρικές συνθήκες και η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο προτείνεται η διόρθωση των τιμών του capacity factor λαμβάνοντας υπόψιν αποκλειστικά τις καθαρές ώρες ηλιοφάνειας μέσα στην ημέρα, χωρίς να συνυπολογίζονται οι ώρες στις οποίες δεν υπάρχει Ήλιος. Οι βασικοί λόγοι που προτείνεται αυτή η διόρθωση είναι δύο, ώστε ο συντελεστής δυναμικότητας να αντικατοπτρίζει την πραγματική απόδοση των υπό μελέτη Φ/Β συστημάτων. Πρώτον, η παραγωγή ενέργειας δεν μπορεί να βασιστεί σε 24 ώρες συνεχούς λειτουργίας, καθώς το φως του ήλιου είναι διαθέσιμο μόνο για έναν περιορισμένο αριθμό ωρών κάθε ημέρα, το οποίο είναι διαφορετικό για κάθε ημέρα του χρόνου. Ο αριθμός αυτός, γνωστός ως αστρονομική διάρκεια ημέρας, εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την Ιουλιανή ημέρα, καθορίζοντας έτσι το διαθέσιμο εύρος ηλιακής ακτινοβολίας. Δεύτερον, ακόμα και κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας, η μέγιστη ακτινοβολία που μπορεί να δεχθεί ένα φωτοβολταϊκό πάνελ είναι περιορισμένη. Η πραγματική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή είναι συχνά μικρότερη από τα 1000 W/m^2 , ακόμα και υπό ιδανικές συνθήκες με πεντακάθαρο ουρανό. Με άλλα λόγια, η θεωρητική μέγιστη ισχύς παραγωγής είναι πρακτικά αδύνατο να επιτευχθεί συνεχώς, γεγονός που καθιστά αναγκαία την επανεκτίμηση του συντελεστή δυναμικότητας με βάση ρεαλιστικές παραμέτρους. Η διόρθωση που προτείνεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι υπολογιστικά πολύπλοκη και εκτός του ερευνητικού αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επομένως, πραγματοποιείται μόνο η πρώτη διόρθωση.

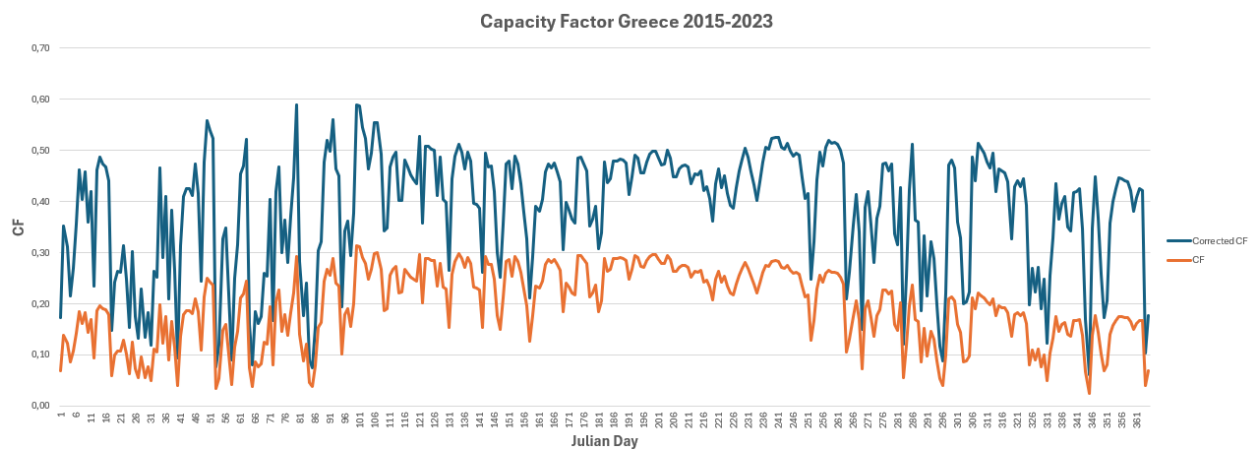
Τα αστρονομικά μεγέθη που απαιτούνται για την εκτίμηση του διορθωμένου συντελεστή, καθώς και η εξίσωση υπολογισμού της δίνονται στο Σχήμα 6.1. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η νέα χρονοσειρά των τιμών για τα έτη 2015-2023 σε ημερήσια κλίμακα και στο Σχήμα 6.3. παρατίθενται οι δύο χρονοσειρές για τον διορθωμένο και μη διορθωμένο συντελεστή. Η μέγιστη τιμή που παρουσιάζεται είναι 0,58957 (10/04/2015) ενώ η ελάχιστη πλησιάζει την τιμή 0,0022 (07/11/2021). Το παράδοξο είναι πως ενώ οι μέγιστες τιμές του συντελεστή δυναμικότητας αναμένονται τους καλοκαιρινούς μήνες, κατόπιν διόρθωσης οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται την άνοιξη. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο ότι την άνοιξη υπάρχει περίσσεια ηλιοφάνεια και σχετικά υψηλή θερμοκρασία χωρίς όμως να επηρεάζονται και να δυσλειτουργούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ομοίως για τις ελάχιστες τιμές, ενώ θα ήταν λογικό να παρουσιάζονται τον χειμώνα παρατηρούνται αρκετές κατά το φθινόπωρο. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα προσδιορίζεται από έναν συντελεστή ο οποίος υπολογίζεται από την πραγματική μέγιστη παραγωγή ενέργειας με βάση τη δυνητική ακτινοβολία και τις ώρες της κάθε ημέρας.

Μέγεθος	Σύμβολο μονάδες	Επεξήγηση	Τύπος υπολογισμού
Αριθμός ημέρας	J , αδιά- στατος	1 την 1η Ιανουαρίου, 365 την 31η Δεκεμβρίου	
Ηλιακή απόκλιση	δ , rad	Το γεωγραφικό πλάτος, όπου οι ακτίνες πέφτουν κάθετα το μεσημέρι	$\delta = -0.409 \times$ $\cos\left(\frac{2\pi}{365}J + 0.16\right)^\dagger$ (Ισχύει $ \delta \leq 0.409 \text{ rad} =$ 23.4°)
Γωνία ώρας δύσης ηλίου	ω_s , rad	Αν πολλαπλασιαστεί επί 12/π δίνει την ώρα δύσης μετά το μεσημέρι	$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$, όπου φ το γεωγραφικό πλάτος σε rad (για $ \varphi >$ 1.161 rad = 66.5°, δεν ορί- ζεται – δεν δύει ο ήλιος)
Αστρονο- μική διάρ- κεια ημέρας	N , h	Ο αριθμός των ωρών από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου	$N = (24 / \pi) \omega_s$
Ηλιακή σταθερά	I_s , kW/m ²	Η κάθετη ροή ηλιακής ενέργειας στο όριο της ατμόσφαιρας, για τη μέ- ση απόσταση γης-ηλίου	$I_s = 1.367 \text{ kW/m}^2$
Εκκεντρό- τητα	d_r , αδιά- στατη	Το τετράγωνο του λόγου της μέσης απόστασης γης-ηλίου προς την απόσταση τη μέρα J	$d_r = 1 + 0.034 \times$ $\cos\left(\frac{2\pi}{365}J - 0.05\right)^\dagger$
Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβο- λία	S_0 , kJ/m ² /d	Η ημερήσια ροή ηλιακής ενέργειας στο όριο της ατμόσφαιρας σε οριζόντιο επίπεδο	$S_0 = \frac{I_s t_d d_r}{\pi} (\omega_s \sin \varphi \sin \delta$ $+ \sin \omega_s \cos \varphi \cos \delta)$ όπου $t_d = 86\,400 \text{ s}$ (η μέση διάρκεια ημέρας)

Σχήμα 6.1.: Αστρονομικά μεγέθη που απαιτούνται για την διόρθωση του συντελεστή δυναμικότητας [27]



Σχήμα 6.2.: Διορθωμένος Συντελεστής Δυναμικότητας για την Ελλάδα 2015-2023



Σχήμα 6.3: Σύγκριση χρονοσειρών ημερήσιας κλίμακας του διορθωμένου και μη συντελεστή δυναμικότητας, Ελλάδα 2015-2023

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Σύνοψη, Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

7.1. Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν ωριαία δεδομένα παραγωγής ενέργειας λόγω φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα και η αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύς των συστημάτων για τα έτη 2015-2023. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκε ο συντελεστής δυναμικότητας και δημιουργήθηκε η χρονοσειρά του σε ωριαία κλίμακα για τα αναφερόμενα έτη. Στην συνέχεια επιλέχθηκαν 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες στην Ελλάδα και μέσω της πλατφόρμας PVGIS συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν ωριαία δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για κάθε τοποθεσία.. Οι τρεις χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν (συντελεστής δυναμικότητας, ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία) μετατράπηκαν από ωριαία σε ημερήσια κλίμακα και με την χρήση 4 στατιστικών μοντέλων ανάλυσης και πρόβλεψης του συντελεστή δυναμικότητας έγινε απόπειρα να συσχετιστούν οι μεταβλητές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας με τον συντελεστή δυναμικότητας σε γραμμική και σχέση τύπου δύναμης σε μία ανάλυση μήνα προς μήνα. Έπειτα από την ανάλυση των 4 μοντέλων κρίθηκε αποδοτικό το Γραμμικό Μοντέλο Προσομοίωσης του οποίου η συσχέτιση ήταν υψηλή καθ' όλη την διάρκεια του έτους και το τετραγωνικό σφάλμα χαμηλό. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση αφαίρεσης της περιοδικότητας από τις χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για να βελτιώσει την ακρίβεια των στατιστικών μοντέλων και προβλέψεων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία πρώτη ανάλυση και σύσταση για την διόρθωση του συντελεστή δυναμικότητας, με αναφορά στην αστρονομική διάρκεια της εκάστοτε ημέρας αντί της υπόθεσης 24ωρης διάρκειας.

7.2. Συμπεράσματα

Συγκριτικά ανάμεσα στα 4 μοντέλα που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης (linear simulation model) έχει πολύ υψηλή γραμμική συσχέτιση και χαμηλό τετραγωνικό σφάλμα σε όλους σχεδόν τους μήνες. Παρουσιάζει σταθερή και αξιόπιστη απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, με τα καλύτερα αποτελέσματα στους χειμερινούς μήνες και καλή προσαρμογή και στους καλοκαιρινούς μήνες. Το γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης (linear forecasting model) και το μοντέλο προσομοίωσης τύπου δύναμης (dynamic simulation model) ακολουθούν με αισθητά χαμηλότερη απόδοση και ακρίβεια. Συγκεκριμένα, το γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης παρουσιάζει γενικά χαμηλές τιμές συσχέτισης και NSE, κάτι που υποδηλώνει αδυναμία στο να αποτυπώσει τις μεταβολές του συντελεστή δυναμικότητας. Παράλληλα, το μοντέλο προσομοίωσης τύπου δύναμης έχει αισθητά χαμηλή απόδοση σε μήνες όπως Φεβρουάριος και Απρίλιος ενώ τους υπόλοιπους έχει ικανοποιητική. Το δυναμικό μοντέλο πρόβλεψης παρουσιάζει χαμηλές τιμές συσχέτισης και υψηλό σφάλμα σε σχεδόν όλους τους μήνες, δείχνοντας αδυναμία στην ακριβή πρόβλεψη των δεδομένων. Συνολικά, το γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης είναι το πιο αξιόπιστο μοντέλο για την πρόβλεψη του συντελεστή δυναμικότητας, με το δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης να προσφέρει μερικά καλύτερα αποτελέσματα από το γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης, το οποίο παρουσιάζει την πιο αδύναμη απόδοση.

Η χαμηλή απόδοση των μοντέλων μπορεί να εξηγηθεί από διάφορους παράγοντες. Πρώτον, οι απλές σχέσεις παλινδρόμησης που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα δεν μπορούν κατά κανόνα να αποτυπώσουν πάντα τις μη γραμμικές επιδράσεις μεταξύ των επιλεγμένων διεργασιών της ανάλυσης, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον συντελεστή δυναμικότητας. Επιπροσθέτως, οι καιρικές συνθήκες στην Ελλάδα είναι συχνά απρόβλεπτες και μεταβλητές, κάτι που αποτελεί εμπόδιο στην πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας γενικότερα. Η ποιότητα των δεδομένων είναι επίσης σημαντική και αν αυτά είναι ελλιπή ή ανακριβή, επηρεάζεται η ακρίβεια των προβλέψεων. Αξίζει να επισημανθεί πως τα μοντέλα αυτά είναι απλοϊκά και βασίζονται σε δεδομένα του παρελθόντος (ιστορικές χρονοσειρές), χωρίς να λαμβάνουν υπόψη άλλες παράμετροι ή καθυστερήσεις που ενδέχεται να έχουν επίδραση στην παραγωγή ενέργειας. Επομένως, χρειάζεται να υπάρχει και ένα μεγάλο χρονικό εύρος δεδομένων (τουλάχιστον δεκαετίας) για να μπορέσουν να αποτυπωθούν όλες οι διακυμάνσεις στο πέρασμα του χρόνου.

Επιπροσθέτως, σε επιχειρησιακό επίπεδο αξίζει να αναφερθεί πως το σημείο της Ελλάδας (από τα 40 που εξετάσθηκαν) με την ισχυρότερη θετική συσχέτιση μεταξύ συντελεστή δυναμικότητας και ηλιοφάνειας είναι η Λάρισα με συντελεστή συσχέτισης 0,8862. Δηλαδή, όταν η ηλιοφάνεια στην Λάρισα αυξάνεται, υπάρχει επίσης αύξηση του συντελεστή δυναμικότητας σε όλη την Ελλάδα (και το αντίστροφο). Επομένως, η συγκεκριμένη πόλη είναι αρκετά ενδεικτική για το τι συμβαίνει στην υπόλοιπη χώρα και μέσω εκείνης δίνεται μία ικανοποιητική προσέγγιση του συντελεστή δυναμικότητας.

Τέλος, προκειμένου ένα μοντέλο πρόβλεψης να μπορέσει να γίνει αξιόπιστο και ακριβές προτείνεται η χρήση μη γραμμικών μοντέλων και τεχνικών μηχανικής μάθησης, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, που μπορούν να αναγνωρίσουν πιο σύνθετες σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων. Ακόμα, η ενσωμάτωση περισσότερων παραμέτρων, όπως η υγρασία, η νεφοκάλυψη και ο άνεμος, θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια των προβλέψεων, ωστόσο στην Ελλάδα δεν υπάρχει επαρκής καταγραφή ιδιαίτερα για τα ανεμολογικά στην επιθυμητή χωρική κατανομή. Κλείνοντας, η χρήση εξελιγμένων τεχνικών βελτιστοποίησης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια της εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου και να αυξήσει την ακρίβεια των μελλοντικών προβλέψεων.

7.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελέτη αυτή αποτελεί μια βάση για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο. Σε μελλοντικές έρευνες, θα μπορούσαν να εξεταστούν διάφοροι τομείς που θα ενίσχυαν τη βελτίωση των προβλέψεων του συντελεστή δυναμικότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Πρώτον, η χρήση πιο σύνθετων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με τα γραμμικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη μελέτη. Επίσης, η διεύρυνση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται, όπως η υγρασία, οι άνεμοι ή άλλες καιρικές συνθήκες, καθώς και η χρήση δεδομένων υψηλότερης συχνότητας, θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια των προβλέψεων. Ακόμα, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η υπολογιστικά πολύπλοκη ανάλυση της διόρθωσης του συντελεστή δυναμικότητας σε σχέση με την αστρονομική διάρκεια της ημέρας και να δημιουργηθούν εκ νέου τα μοντέλα πρόβλεψης με χρήση της χρονοσειράς Σ.Δ. που θα δημιουργηθεί.

Βιβλιογραφία

- [1] Mamassis N. and Efstratiadis A. Solar energy, course notes: Renewable energy and hydroelectric works, NTUA. 2022.
- [2] Mamassis N. and Efstratiadis A. Solar energy, course notes: Introduction to energy technology, NTUA. 2021.
- [3] Mamassis N. and Efstratiadis A. Introduction, course notes: Introduction to energy technology, NTUA. 2021.
- [4] TI-Soft. "Τι πρέπει να γνωρίζετε για τα ηλεκτρικά δεδομένα των φωτοβολταϊκών πάνελ στη STC." TI-Soft. Πρόσβαση 14 Δεκεμβρη 2024. <https://www.ti-soft.com/el/support/help/electricaldesign/libraries/products/pvmodules/what-must-know/electrical-data-at-stc>.
- [5] ΑΔΜΗΕ. "Μηνιαία Δελτία Ενέργειας." ΑΔΜΗΕ. Πρόσβαση 25 Μαρτίου 2024. <https://www.admie.gr/agora/enimerotika-deltia/miniaia-deltia-energeias>.
- [6] IEA-PVPS. "Solar Resource for High Penetration and Large-Scale Applications." IEA-PVPS. Πρόσβαση 18 Νοεμβρίου 2024. <https://iea-pvps.org/research-tasks/solar-resource-for-high-penetration-and-large-scale-applications/>.
- [7] ΔΑΠΕΕΠ. "Μηνιαίο Δελτίο Ειδικού Λογαριασμού." ΔΑΠΕΕΠ. Πρόσβαση 25 Μαρτίου 2024. <https://www.dapeep.gr/dimosieuseis/miniaio-deltio-eidikou-logariasmy/>.
- [8] Statista. "Solar photovoltaics self-consumption capacity in Greece from 2020 to 2022." Statista. Πρόσβαση 15 Νοεμβρίου 2024. <https://www.statista.com/statistics/1452211/solar-photovoltaics-self-consumption-capacity-greece/>.
- [9] ENTSO-E. "Installed Generation Capacity Aggregation." ENTSO-E Transparency Platform. Πρόσβαση 9 Μαρτίου 2024. <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/installedGenerationCapacityAggregation/show>.
- [10] The Green Tank. "Το μέλλον της ενέργειας: Πράσινη μετάβαση και ενεργειακές κοινότητες." The Green Tank. Πρόσβαση 18 Οκτωβρίου 2024. <https://thegreentank.gr/2024/01/18/to-mellon-tis-energeias-prasini-metavasi-kai-energeiakes-koinotites/>.
- [11] European Commission, Joint Research Centre. "PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System." European Commission. Πρόσβαση 10 Αυγούστου 2024. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- [12] Δ. Χατζόπουλος (2024), Η έννοια της αποκεντρωμένης παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ελλάδα και η επίδραση της θερμοκρασίας: Διερεύνηση με χρήση της βάσης δεδομένων PVGIS
- [13] Abufarha, I. (2018). Έλεγχος και πιστοποίηση της ποιότητας στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

- [14] Δημητροπούλου, Κ. (2024). Η εξέλιξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα-Προβλέψεις (Master's thesis, Πανεπιστήμιο Πειραιώς).
- [15] Οικονόμου, Δ. (2024). Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φωτοβολταϊκής παραγωγής με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων τύπου μακράς βραχείας μνήμης (long-short term memory).
- [16] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Utility-Scale Photovoltaics. Πρόσβαση Δεκέμβρης 2024. https://atb.nrel.gov/electricity/2021/utility-scale_pv
- [17] Φλωράκης, Φ. (2018). Διερεύνηση επενδυτικού σχεδίου φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- [18] Θανόπουλος, Ν. (2022). Εφαρμογή της τεχνολογίας των λεπτών υμενίων σε σύγχρονα φωτοβολταϊκά συστήματα.
- [19] Σπανάκης, Ε. (2001). *Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και των φωτογενών μεταβολών τους στο άμορφο υδρογονωμένο πυρίτιο: ο ρόλος του υδρογόνου* (Doctoral dissertation, Πανεπιστήμιο Κρήτης. Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Φυσικής).
- [20] Union of Concerned Scientists (UCSUSA). How solar panels work. Πρόσβαση Νοέμβριος 2024. <https://www.ucsusa.org/resources/how-solar-panels-work>
- [21] Αράπογλου, Β. (2024). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα: ανάλυση υφιστάμενης κατάστασης και προβλέψεις (Master's thesis, Πανεπιστήμιο Πειραιώς).
- [22] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Η Ευρώπη θέτει φιλόδοξους στόχους. Πρόσβαση Νοέμβριος 2024 <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20171124STO88813/ananeosimes-piges-energeias-i-europsi-thetei-filodoxous-stochous>
- [23] European Commission. The European Green Deal. Πρόσβαση Νοέμβρης 2024 https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [24] Joint Research Centre. PVGIS user manual.
- [25] Ramez Abdallah, Adel Juaidi, Tareq Salameh, Mejdi Jeguirim, Hüseyin Çamur, Youssef Kassem, Samer Abdala (2021) *Assessment of Solar Energy Potential and Photovoltaic Power Generation*.
- [26] Stefanos Kozanis, Antonios Christofides, N. Mamassis, Andreas Efstratiadis, and Demetris Koutsoyiannis. Hydrognomon - open source software for the analysis of hydrological data. 2010.
- [27] D. Koutsoyiannis and Th. Xanthopoulos. Engineering hydrology, national technical university, Athens.
- [28] Λούρος, Α. Δ. (2017). *Το φαινόμενο του σχήματος της πάπιας (Duck chart, Duck curve) στην Ελλάδα για τα έτη 2015 και 2016* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).
- [29] Elke Lorenz, Bijan Nouri, Sylvain Cros, Kristian Pagh Nielsen, Rafael Fritz, et al. Forecasting, Solar Radiation and Photovoltaic Power. Best Practices Handbook for the

Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Fourth Edition,
, 2024, ff10.2172/2448063ff. ffhal-4840535ff

[30] S. Sobri, S. Koohi-Kamali, and N. A. Rahim, "Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 156, pp. 459–497, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2017.11.019.

[31] Kumler, A., Xie, Y., & Zhang, Y. (2019). A Physics-based Smart Persistence model for Intra-hour forecasting of solar radiation (PSPI) using GHI measurements and a cloud retrieval technique. *Solar Energy*, 177, 494-500.

