



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Η Έννοια της Αποκεντρωμένης Παραγωγής Φωτοβολταϊκής
Ενέργειας στην Ελλάδα και η Επίδραση της Θερμοκρασίας:
Διερεύνηση με Χρήση της Βάσης Δεδομένων PVGIS

Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Χατζόπουλος

Επιβλέπων :

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2024

Ευχαριστίες

Με το πέρας αυτής της διπλωματικής ολοκληρώνεται και η περίοδος των φοιτητικών μου χρόνων. Αναλογιζόμενος τη πορεία μου στο Πολυτεχνείο εργάστηκα σκληρά, απέκτησα νέους φίλους, απέκτησα καινούργιες εμπειρίες και σίγουρα απέκτησα καινούργιες γνώσεις. Το σημαντικότερο, όμως, που μου προσέφερε αυτή η σχολή είναι το αίσθημα ότι μπορώ να επιλύσω οποιοδήποτε πρόβλημα παρουσιαστεί μπροστά μου. Ένα προσόν που είμαι σίγουρος ότι θα μου χρησιμεύσει σε όλη την υπόλοιπη ζωή μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευστρατιάδη, επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ, που με έκανε να αγαπήσω το αντικείμενο της ενέργειας με τα μαθήματα του, μου έδωσε κρίσιμες συμβουλές, με καθοδήγησε σε αυτή τη διπλωματική και συνέβαλλε καθοριστικά στο να παρευρεθώ για πρώτη φορά σε ένα διεθνές επιστημονικό συνέδριο, παρουσιάζοντας την εργασία μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αθανάσιο Ζήσο, υποψήφιο διδάκτωρ της σχολής μας, που βοήθησε πάρα πολύ στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τις συμβουλές του και τις παρεμβάσεις του, και που ήταν πάντα πρόθυμος να μου απαντήσει σε οποιαδήποτε απορία και αν είχα. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους φίλους μου και την κοπέλα μου τη Βασιλική, που με στήριξαν καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να δώσω ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στον αδελφό μου, ο οποίος αποτελεί πρότυπο για μένα και με βοήθησε σε όλους τους τομείς από την αρχή μέχρι το τέλος αυτής τη πορείας.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Η Έννοια της Αποκεντρωμένης Παραγωγής Φωτοβολταϊκής Ενέργειας στην Ελλάδα και η Επίδραση της Θερμοκρασίας: Διερεύνηση με Χρήση της Βάσης Δεδομένων PVGIS

Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Χατζόπουλος

Επιβλέπων :

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2024

Περίληψη

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, και η Ελλάδα, ως μία χώρα με άφθονη ηλιοφάνεια, οφείλει να την αξιοποιήσει και να την καταστήσει βασικό πυλώνα του ενεργειακού της μίγματος. Ωστόσο, το εγχείρημα αυτό αντιμετωπίζει προκλήσεις, καθώς η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα λόγω παραγόντων με έντονη χωρική μεταβλητότητα, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η τοπογραφία, τα αιωρούμενα σωματίδια ή ακόμα και η υγρασία της εκάστοτε περιοχής. Στη παρούσα διπλωματική εργασία αποδεικνύεται ότι τα αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, σε αντίθεση με τα συγκεντρωτικά, είναι ικανά να μειώσουν αυτή την αβεβαιότητα και να αποδώσουν την περισσότερη φωτοβολταϊκή ενέργεια για μεγάλους βαθμούς χωρικής αξιοπιστίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για να αποδειχθεί αυτό είναι η διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής μεταβλητότητας της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας στη χώρα.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες από όλη την ελληνική επικράτεια και συλλέχθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας για αυτές από τη διαδικτυακή βάση δεδομένων PVGIS. Τα δεδομένα αυτά μελετήθηκαν, αναλύθηκαν και επικυρώθηκαν με τη βοήθεια 3 επίγειων σταθμών της χώρας που παρέχουν μετεωρολογικά δεδομένα. Στη συνέχεια, μέσω των δεδομένων αυτών υπολογίστηκε η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας σε καθεμία από τις 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες, υποθέτοντας την ύπαρξη ενός σύγχρονου φωτοβολταϊκού πάνελ σε καθεμία από αυτές. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και ακολούθως μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτά. Έπειτα, μέσω της μεθόδου Monte Carlo, αποδείχθηκε ότι όσο πιο διασκορπισμένο είναι ένα σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ σε περισσότερες γεωγραφικές τοποθεσίες, τόσο μειώνεται η αβεβαιότητα στη παραγωγή και παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλους βαθμούς χωρικής αξιοπιστίας.



National Technical University of Athens
School of Civil Engineering
Department of Water Resources and Environmental
Engineering

The Concept of Decentralized Photovoltaic Energy Production in Greece and the Impact of Temperature: Investigation Using the PVGIS Database

Diploma Thesis

Dimitrios Chatzopoulos

Academic Supervisor :
Andreas Efstratiadis, Assistant Professor NTUA

Athens, June 2024

Abstract

Solar energy is one of the most important forms of renewable energy, and Greece, as a country with abundant sunshine, should utilize it and make it a key pillar of its energy mix. However, this endeavor faces challenges, as the production of photovoltaic energy is characterized by high uncertainty due to factors with significant spatial variability, such as meteorological drivers, topography, airborne particles and even humidity. In this Diploma Thesis, it is demonstrated that decentralized photovoltaic systems, as opposed to centralized ones, are capable of reducing this uncertainty and thus producing more photovoltaic energy for high rates of spatial reliability. A necessary prerequisite to prove this is to investigate the impact of the spatial variability of temperature and solar radiation on photovoltaic energy production in the country.

Specifically, 40 representative well-distributed locations across Greece were selected, for which temperature and solar radiation data were collected from the PVGIS online database. These data were analyzed and validated against the observations of 3 ground stations. Subsequently, using these data, the photovoltaic energy production was calculated for each of the 40 representative locations, assuming the presence of a modern photovoltaic panel at each site. The results were initially analyzed only accounting for the incident solar radiation data, and then the impact of temperature on them was also examined. Finally, following a Monte Carlo approach, it was proven that the more distributed a photovoltaic panel system is across various geographical locations, the lower the uncertainty in production and the more electrical energy is generated for high degrees of spatial reliability.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	i
1 Εισαγωγή	1
1.1 Πρόλογος	1
1.2 Διάρθρωση Εργασίας	2
2 Βασικές Έννοιες στην Παραγωγή Φωτοβολταϊκής Ενέργειας και Βιβλιογραφική Επισκόπηση	3
2.1 Ηλιακή ακτινοβολία	3
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	4
2.3 Εισαγωγή εννοιών απόδοσης και αξιοπιστίας	8
2.4 Βιβλιογραφική επισκόπηση	9
3 Συλλογή, Ανάλυση και Επικύρωση Δεδομένων Ακτινοβολίας και Θερμοκρασίας	11
3.1 Επιλογή αντιπροσωπευτικών τοποθεσιών και λήψη δεδομένων μέσω της πλατφόρμας PVGIS	11
3.2 Χωρική ανάλυση δεδομένων ακτινοβολίας	13
3.3 Επικύρωση δεδομένων ακτινοβολίας	16
3.4 Χωρική ανάλυση και επικύρωση δεδομένων θερμοκρασίας	26
3.5 Συμπεράσματα απο την επικύρωση δεδομένων	30
4 Σημειακή Ανάλυση Παραγωγής Φωτοβολταϊκής Ενέργειας	31
4.1 Κρίσιμοι παράγοντες στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας	31
4.2 Σχέση παραγωγής ενέργειας	31
4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού πάνελ	33
4.4 Αποτελέσματα παραγωγής ενέργειας σε κάθε τοποθεσία	34
4.5 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ενέργειας	39
5 Η Αξία των Αποκεντρωμένων Συστημάτων στην Παραγωγή Φωτοβολταϊκής Ενέργειας: Μια Προσέγγιση Monte Carlo	47
5.1 Η έννοια του αποκεντρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος	47
5.2 Η περιγραφή της μεθόδου Monte Carlo	48

5.3	Τα αποτελέσματα της μεθόδου	49
5.4	Τα αποτελέσματα της μεθόδου αποκλειστικά για τον χειμώνα	55
5.5	Τα αποτελέσματα της μεθόδου αποκλειστικά για το καλοκαίρι	58
6	Σύνοψη, Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	63
6.1	Σύνοψη	63
6.2	Συμπεράσματα	63
6.2.1	Τα δεδομένα από τη βάση δεδομένων PVGIS	63
6.2.2	Η ηλιακή ακτινοβολία και η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ελλάδα	64
6.2.3	Η επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας	64
6.2.4	Η αξία των αποκεντρωμένων συστημάτων στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας	65
6.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	65
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί έναν κρίσιμο πυλώνα για τη μετάβαση της ανθρωπότητας σε ένα καλύτερο και πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Μια από τις κυριότερες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας είναι η ηλιακή, καθώς είναι η αφθονότερη σε σύγκριση με όλες τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι ο ρυθμός με τον οποίο προσπίπτει η ηλιακή ενέργεια πάνω στη Γη είναι 10000 φορές μεγαλύτερος σε σχέση με τον ρυθμό με τον οποίο η ανθρωπότητα καταναλώνει ενέργεια [1]. Επίσης, η ενέργεια που πηγάζει από τον ήλιο μπορεί να αξιοποιηθεί ακόμη και μέσα σε μία συννεφιασμένη μέρα αφού η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διαπεράσει τα σύννεφα και να φτάσει στην επιφάνεια της Γης. Για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Το κόστος κατασκευής φωτοβολταϊκών πάνελ έχει πέσει δραματικά την τελευταία δεκαετία καθιστώντας τα όχι μόνο προσιτά αλλά συχνά τη φθηνότερη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας [1]. Επομένως, μια χώρα σαν την Ελλάδα η οποία μάλιστα είναι αρκετά προικισμένη όσον αφορά την ηλιακή ενέργεια, είναι ανάγκη, να την αξιοποιήσει και να δημιουργήσει τις προϋποθέσεις έτσι ώστε η μορφή ενέργειας αυτή να έχει σημαντική συμβολή στο ενεργειακό μίγμα της χώρας.

Βέβαια, το εγχείρημα καλείται να αντιμετωπίσει προκλήσεις λόγω της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των κλιματικών συνθηκών. Οι μετεωρολογικές συνθήκες, όπως η συχνότητα των ηλιόλουστων ημερών, τα σύννεφα και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε μεγάλο βαθμό [2]. Επιπλέον, η τοπογραφία, τα αιωρούμενα σωματίδια, όπως για παράδειγμα η αφρικανική σκόνη που συχνά κατακλύζει τον ελληνικό ουρανό, αλλά και η υγρασία, είναι παράγοντες που επίσης επηρεάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ [3]. Το ερώτημα είναι με ποιον τρόπο μπορεί να διευθετηθεί η αβεβαιότητα που προκύπτει από τους παραπάνω παράγοντες;

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η απάντηση σε αυτό το ερώτημα, υποθέτοντας όμως πως ο σχεδιασμός αποκεντρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων που εκτείνονται σε όλη τη χώρα και όχι μόνο σε συγκεκριμένα σημεία της μπορεί να δώσει μία

λύση σε αυτό το πρόβλημα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιβεβαίωση αυτής της λύσης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη παραγωγή ηλιακής ενέργειας.

1.2 Διάρθρωση Εργασίας

Στην εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας τέθηκε ένας βασικός στόχος, ο οποίος είναι η ανάδειξη της αξίας των αποκεντρωμένων συστημάτων στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής μεταβλητότητας της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ελλάδα.

Στο 2ο Κεφάλαιο, θα αναλυθούν σε βάθος οι έννοιες της ηλιακής ακτινοβολίας και του φωτοβολταϊκού φαινομένου, δηλαδή του φαινομένου που είναι υπεύθυνο για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Επιπλέον, θα δοθούν ορισμοί σε μερικές ακόμα βασικές έννοιες, η αφομοίωση των οποίων είναι απαραίτητη για την πλήρη κατανόηση των θεμάτων αυτής της εργασίας. Τέλος, θα παρουσιαστούν αρκετά επιστημονικά άρθρα με παραπλήσιο θέμα, αναδεικνύοντας έτσι το ενδιαφέρον τον επιστημόνων σε αυτό το πεδίο.

Στο 3ο Κεφάλαιο, θα επιλεγθούν 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες για όλη την ελληνική επικράτεια και θα συλλεχθούν δεδομένα θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας για αυτές, από την βάση δεδομένων PVGIS. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά θα μελετηθούν, θα αναλυθούν και θα επικυρωθούν με τη βοήθεια 3 επίγειων σταθμών της χώρας που παρέχουν μετεωρολογικά δεδομένα. Η επικύρωση των δεδομένων είναι απαραίτητη για την αξιοπιστία της παρούσας εργασίας.

Στο 4ο κεφάλαιο, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του 3ου Κεφαλαίου, θα υπολογιστεί η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας σε καθμία από τις 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες, υποθέτοντας την ύπαρξη ενός σύγχρονου φωτοβολταϊκού πάνελ σε κάθε μία από αυτές. Τα αποτελέσματα θα αναλυθούν λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και ακολούθως θα μελετηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτά. Με αυτό τον τρόπο, θα διερευνηθεί η επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ελλάδα.

Στο 5ο κεφάλαιο, θα αναδειχθεί η αξία των αποκεντρωμένων συστημάτων στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας μέσω της μεθόδου Monte Carlo. Συγκεκριμένα, θα αποδειχθεί ότι όσο πιο διασκορπισμένο είναι ένα σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ σε περισσότερες γεωγραφικές τοποθεσίες, τόσο μειώνεται η αβεβαιότητα στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά, γίνεται αναφορά για την αβεβαιότητα που προκύπτει στην παραγωγή λόγω παραγόντων με σημαντική χωρική μεταβλητότητα, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η τοπογραφία της εκάστοτε περιοχής, τα αιωρούμενα σωματίδια και η υγρασία [3].

Στο 6ο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν μια σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

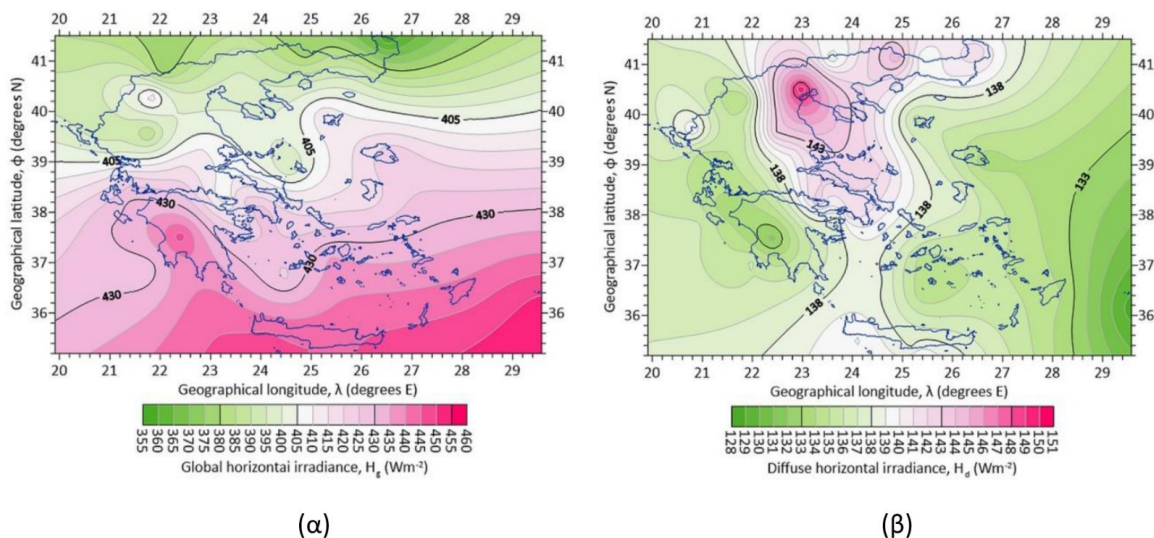
Κεφάλαιο 2

Βασικές Έννοιες στην Παραγωγή Φωτοβολταϊκής Ενέργειας και Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Για να μπορέσουν να γίνουν κατανοητά τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από αυτή την έρευνα είναι σημαντικό να εξεταστεί λεπτομερέστερα η ηλιακή ακτινοβολία, οι συνιστώσες της και οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή της. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης πάνω από μια οριζόντια επιφάνεια είναι γνωστή ως εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία και συμβολίζεται με R_a [3]. Καθώς η ακτινοβολία διεισδύει στην ατμόσφαιρα, ένα μέρος της διασκορπίζεται, ανακλάται ή απορροφάται λόγω των αλληλεπιδράσεων με τα στοιχεία της ατμόσφαιρας όπως οι υδρατμοί, διάφορα αέρια και τα στερεά σωματίδια. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που φθάνει πραγματικά σε ένα οριζόντιο επίπεδο είναι γνωστή ως ηλιακή ακτινοβολία, ολική ακτινοβολία ή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (R_s) και εκφράζεται συνήθως σε W/m^2 ή KWh/m^2 . Η φράση «βραχέων κυμάτων» προέρχεται από το γεγονός ότι ο Ήλιος εκπέμπει ενέργεια μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρά μήκη κύματος [3]. Η ολική ακτινοβολία ισούται με το άθροισμα της άμεσης ακτινοβολίας, R_b , που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης χωρίς να σκεδαστεί στην ατμόσφαιρα και της διάχυτης ακτινοβολίας, R_d , που προσπίπτει από όλες τις κατευθύνσεις λόγω ανάκλασης ή σκέδασης στην ατμόσφαιρα. Η κατανομή μεταξύ άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (π.χ. υγρασία, σκόνη, κλπ.) και την γωνία απόκλισης του ηλίου η οποία εξαρτάται από την ημέρα του χρόνου [3]. Είναι αξιοσημείωτο ότι η διάχυτη ακτινοβολία σε μια μέρα με καθαρό ουρανό αποτελεί περίπου το 15% της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ σε μια πολύ συννεφιασμένη μέρα, όπου το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας τείνει στο 0, περίπου το 25% της εξωγήινης εκπομπής ενέργειας που πηγάζει από τον ήλιο φτάνει στη Γη ως διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία [3]. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται η κατανομή της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας και της διάχυτης ακτινοβολίας στην Ελλάδα, χωρίς την επίδραση της τοπογραφίας, όπως την υπολόγισε στην

εργασία του ο Καμπεζίδης (2021) [4].



Εικόνα 2.1: (α) Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια χωρίς την επίδραση της τοπογραφίας (W/m^2), (β) Μέση ετήσια διάχυτη ακτινοβολία στην Ελλάδα που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια χωρίς την επίδραση της τοπογραφίας (W/m^2) [4]

Προκαλεί ενδιαφέρον ότι η χώρα χωρίζεται σε δύο μέρη όσον αφορά την ηλιακή ακτινοβολία. Όπως μπορούμε να δούμε στην 2.1(α) το βόρειο κομμάτι, δηλαδή το κομμάτι με γεωγραφικό πλάτος πάνω από 39° , δέχεται λιγότερη ακτινοβολία σε σχέση με το νότιο κομμάτι που έχει γεωγραφικό πλάτος μικρότερο των 39° . Αυτό σημαίνει πως το νότιο τμήμα της χώρας μπορεί να παράξει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια μέσω του ήλιου, αν δεν ληφθεί υπόψη η θερμοκρασία, η οποία, όπως θα φανεί και παρακάτω, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ.

2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια να τη διανεμούν στο τοπικό δίκτυο. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι αποτέλεσμα του φωτοβολταϊκού φαινομένου, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Besquerel. Το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια που φέρουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος [5]. Όταν αυτά τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα ηλιακό κελί άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από αυτό. Μόνο τα φωτόνια τα οποία απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ικανά να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Ενδιαφέρον έχει ότι το ποσοστό των φωτονίων που αντανακλώνται από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πάνελ φτάνει περίπου το 30%, αλλά με κατάλληλες επιστρώσεις ή τράχυνση της επιφάνειας μπορεί να μειωθεί στο 3% [6].

Ένα ηλιακό κελί κατασκευάζεται κυρίως από πυρίτιο το οποίο έχει ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες. Κάθε άτομο πυριτίου περιέχει 14 ηλεκτρόνια, τα οποία κατανέμονται σε τρεις ενεργειακές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες στοιβάδες, οι οποίες βρίσκονται πιο κοντά στον πυρήνα, είναι πλήρως κατειλημμένες με 2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα περιλαμβάνει μόνο 4 ηλεκτρόνια αντί για τα αναμενόμενα 8. Για να επιτύχει την πλήρωση

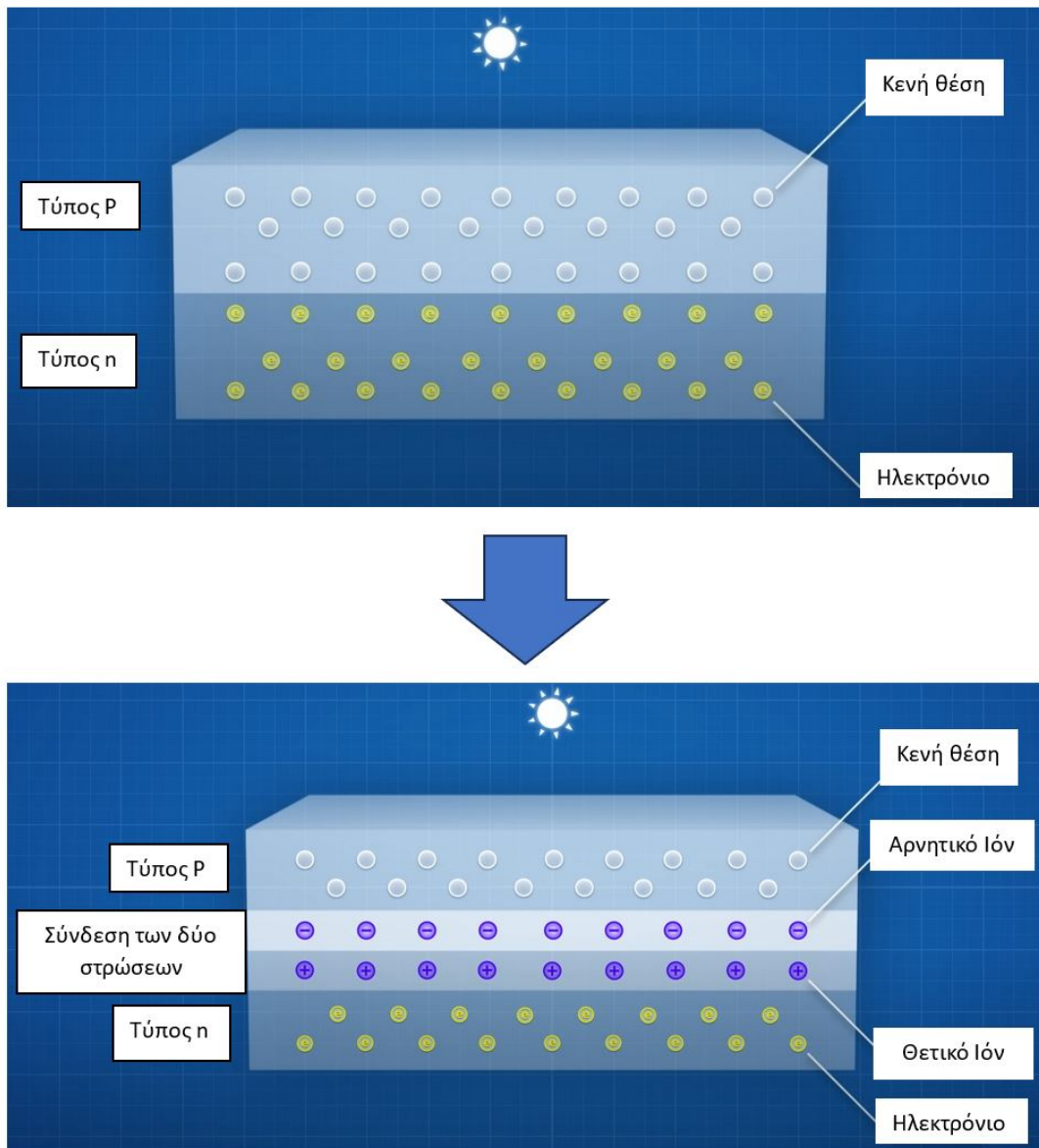
της τελευταίας στοιβάδας, το πυρίτιο μοιράζει ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα και δημιουργεί έτσι μια κρυσταλλική δομή [7].

Όταν το πυρίτιο απορροφά ενέργεια από το ηλιακό φως, μερικά από τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας σπάνε τους δεσμούς τους και αποχωρούν από τα άτομά τους. Ωστόσο, αυτά τα ηλεκτρόνια τα οποία κυκλοφορούν "ψάχνοντας" για να βρουν άλλη κενή θέση, δεν είναι ικανά να δημιουργήσουν ηλεκτρικό ρεύμα. Για να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα θα πρέπει να μειωθούν οι πιθανότητες των ηλεκτρονίων να βρουν μια άλλη κενή θέση και να υποχρεωθούν να κινηθούν προσανατολισμένα μέσα σε ένα κύκλωμα.

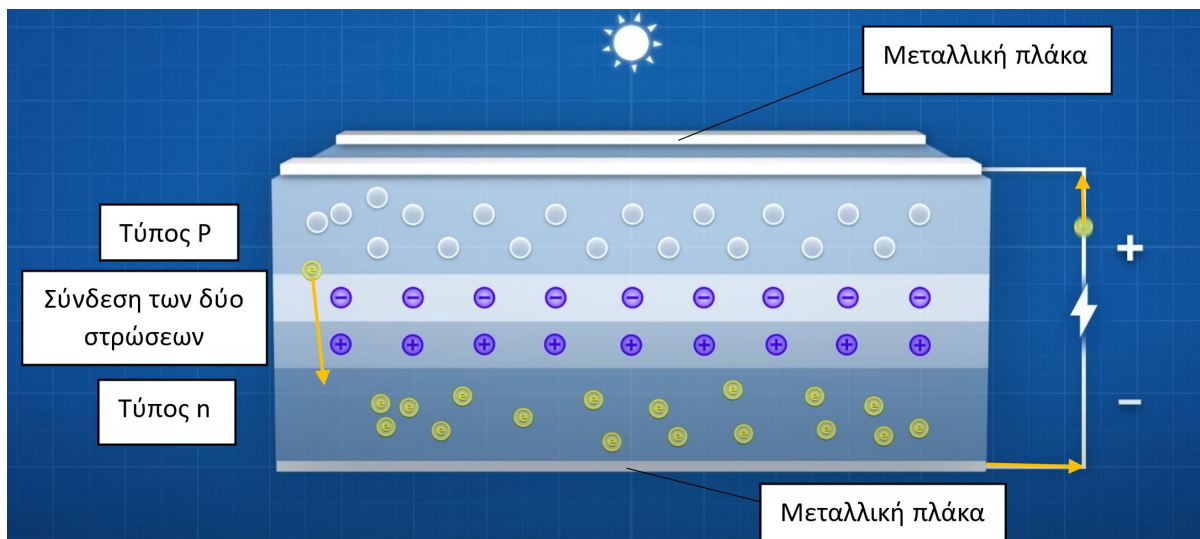
Έτσι, ένα ηλιακό κελί απαρτίζεται από δύο στρώματα κρυστάλλων πυριτίου που αποτελούν ημιαγωγούς και περιέχουν προσμίξεις διαφορετικών χημικών ενώσεων. Στην πάνω στρώση προστίθενται συνήθως προσμίξεις φωσφόρου (όπου το άτομο του έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα), που αναπτύσσει δεσμούς με το πυρίτιο δημιουργώντας αρνητικό φορτίο (n) ενώ στην κάτω στρώση προστίθεται βόριο (όπου το άτομο του έχει 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα) που ομοίως δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο αλλά αναπτύσσεται θετικό (p) φορτίο. Τα ηλεκτρόνια από το πυρίτιο τύπου n πηγαινούν προς τις κενές θέσεις στο πυρίτιο τύπου p μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργείται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην σύνδεση μεταξύ των δύο στρώσεων, όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 2.2.

Το πεδίο αυτό ωθεί τα ηλεκτρόνια, που αποχωρούν από τα άτομα τους λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, να κινούνται από την πάνω στρώση τύπου p προς τη κάτω στρώση τύπου n χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα να επιστρέψουν πίσω. Με αυτό τον τρόπο η πάνω πλευρά φορτίζεται θετικά ενώ η κάτω πλευρά φορτίζεται αρνητικά δημιουργώντας έτσι διαφορά δυναμικού. Προσθέτοντας δύο μεταλλικές πλάκες (μία στη πάνω στρώση και μία στη κάτω) και ένα εξωτερικό κύκλωμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3, τα ηλεκτρόνια θα κινηθούν μέσω της εξωτερικής οδού προς την θετική πλευρά, δηλαδή προς την αρχική τους θέση. Έτσι, δημιουργείται προσανατολισμένη ροή ηλεκτρονίων και κατ' επέκταση ηλεκτρικό ρεύμα.

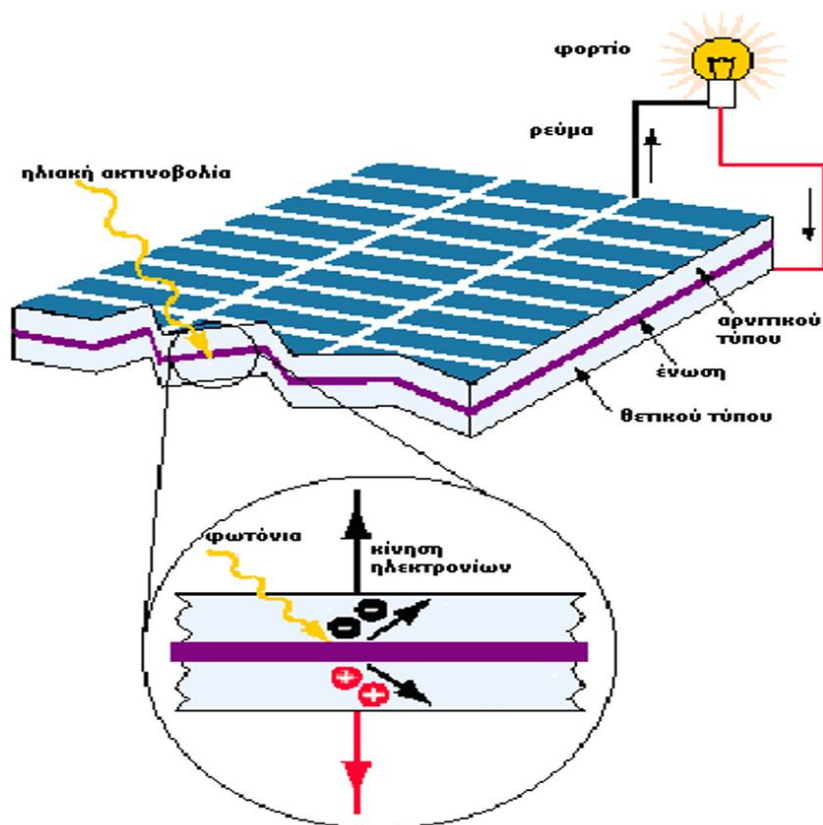
Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται μακροσκοπικά η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ, η οποία βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Εικόνα 2.2: Δημιουργία Ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ανάμεσα στις δύο στρώσεις [6].



Εικόνα 2.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου [6].



Εικόνα 2.4: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο ηλιακό πλαίσιο [5].

2.3 Εισαγωγή εννοιών απόδοσης και αξιοπιστίας

Για τη σωστή κατανόηση όλων των θεμάτων που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι ανάγκη να δοθούν ορισμοί σε μερικές σημαντικές έννοιες. Για παράδειγμα οι συνθήκες STC (Standard Test Conditions – Συνθήκες Τυποποιημένης Δοκιμής) είναι ένα διεθνές πρότυπο για τη μέτρηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, για να επιτευχθεί μια συγκρίσιμη βάση μέτρησης μεταξύ διαφορετικών ηλιακών πλαισίων, οι συνθήκες πρέπει να είναι οι εξής: η θερμοκρασία των ηλιακών κελιών πρέπει να είναι 25°C, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να είναι 1000 W/m², και η μάζα αέρα (AM) πρέπει να είναι 1.5, για 2.74 ώρες [8].

Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος μετατροπής ενέργειας, ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης ενέργειας από το σύστημα προς την προφερόμενη ενέργεια σε αυτό [9]. Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος, που συνήθως συμβολίζεται με η και η σχέση του είναι έντονα μη γραμμική. Αναλυτικότερα, η σχέση του βαθμού απόδοσης εξαρτάται από το «μηχάνημα» που πραγματοποιεί τη μετατροπή της ενέργειας και προσδιορίζεται μόνο εργαστηριακά [9]. Μόνο υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορεί να θεωρηθεί σταθερός βαθμός απόδοσης, όταν η μονάδα παραγωγής λειτουργεί με σταθερή ροή καυσίμου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το σύστημα μετατροπής ενέργειας για το οποίο θα γίνεται αναφορά είναι το φωτοβολταϊκό πάνελ. Η προσφερόμενη ενέργεια σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό, ενώ η αποδιδόμενη είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αυτό. Συνήθως, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πάνελ κυμαίνεται από 0.17 έως 0.22 [10].

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 [9]. Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο συμβολίζεται με C_f και συνήθως εκφράζεται σε ετήσια κλίμακα. Η εξίσωση του είναι η 2.1.

$$C_f = \frac{E}{8760 \cdot P_{\max}} \quad (2.1)$$

Όπου E η πραγματική παραγόμενη ενέργεια μέσα σε ένα έτος, 8760 είναι οι ώρες που απαρτίζουν ένα έτος, και P_{\max} η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει το έργο.

Αξιοπιστία ενός ενεργειακού έργου εκφράζει τη πιθανότητα κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική βάση [11]. Για παράδειγμα το επίπεδο αξιοπιστίας σε ετήσια βάση αναφέρεται στη πιθανότητα κάλυψης της ζήτησης μέσα σε ένα έτος, ενώ το επίπεδο αξιοπιστίας σε μηνιαία βάση αναφέρεται στη πιθανότητα κάλυψης της ζήτησης μέσα σε έναν μήνα.

Ανθεκτικότητα ενός συστήματος εκφράζει την ταχύτητα με την οποία ανακάμπτει το σύστημα μετά από μία αστοχία, δηλαδή την χρονική περίοδο κατά την οποία δεν καλύπτεται η ζήτηση [12]. Όπως και στην έννοια της αξιοπιστίας, αυτή η χρονική περίοδος μπορεί να είναι ένα έτος, ένας μήνας, μία μέρα, ή μία ώρα. Πιο συγκεκριμένα, ανθεκτικότητα ορίζεται ως ο λόγος των περιπτώσεων κατά τις οποίες μια κατάσταση χωρίς αστοχία ακολουθεί μια κατάσταση αστοχίας, προς τις συνολικές περιπτώσεις αστοχίας [12].

2.4 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Πολλοί Έλληνες επιστήμονες έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη της χωρικής μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα, μεταξύ των οποίων οι Τσαλίδης και Θαναηλάκης [13]. Το 1985, διερεύνησαν το ηλιακό κλίμα σε διάφορες περιοχές της χώρας με στόχο την εύρεση της βέλτιστης γωνίας κλίσης για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ με σταθερή κλίση και προσανατολισμό, λαμβάνοντας υπόψη την γεωγραφική θέση όπου θα τοποθετηθούν στη Ελλάδα. Οι Μαμάσης et. al. (2012) [3] διεξήγαγαν μια μελέτη για την επίδραση της τοπογραφίας, όπως η κλίση, ο προσανατολισμός και η σκίαση, στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κάθε περιοχής. Στη μελέτη τους, εισήγαγαν δύο νέους δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση αυτής της επίδρασης, ενώ παράλληλα προέβησαν σε εκτίμηση των δεικτών αυτών για όλη την ελληνική επικράτεια.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στον πρόλογο, η χωρική μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις κλιματικές συνθήκες της κάθε περιοχής, τη τοπογραφία της και την μεταδοτικότητα της ατμόσφαιρας. Οι παραπάνω παράγοντες είναι και αυτοί που επιφέρουν αβεβαιότητα στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ καθώς μεταβάλλονται τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Γίνεται η υπόθεση πως ο σχεδιασμός αποκεντρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων που εκτείνονται σε όλη τη χώρα, και όχι μόνο σε συγκεκριμένα σημεία της, μπορεί να αποτελέσει λύση στο πρόβλημα της αβεβαιότητας στην παραγωγή. Διάφοροι επιστήμονες έχουν τονίσει την αξία των αποκεντρωμένων συστημάτων στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, όπως ο Sapan Thapar (2022) [14], ο οποίος συνέκρινε ένα αποκεντρωμένο σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ στην Ινδία με ένα συγκεντρωτικό, ως προς τον οικονομικό, τον κοινωνικό αλλά και τον τεχνικό τομέα. Σχετικά με τον οικονομικό τομέα, κατέληξε στο συμπέρασμα πως το ενεργειακό κόστος κοντά στο σημείο κατανάλωσης είναι παρόμοιο για τις δύο εγκαταστάσεις, δηλαδή 4.05 INR/KWh για το συγκεντρωτικό σύστημα και 4.07 INR/KWh για το αποκεντρωμένο, όπου INR είναι το εθνικό νόμισμα της Ινδίας. Σχετικά με τον κοινωνικό τομέα, βρέθηκε ότι δημιουργούνται πολλές περισσότερες θέσεις εργασίας στο αποκεντρωμένο σύστημα και ότι είναι αρκετά πιο εύκολο να συμμετάσχουν οι μικρότερες εταιρίες στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ σε αυτό. Στον τεχνικό τομέα, αποδείχθηκε ότι γίνεται πολύ καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας με το αποκεντρωμένο σύστημα καθώς τα πάνελ εκτείνονται σε μια πολύ μεγαλύτερη έκταση της Ινδίας χρησιμοποιώντας το ηλιακό φως πολλές περισσότερες ώρες. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι με το αποκεντρωμένο σύστημα είχαν πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια αρκετοί περισσότεροι άνθρωποι σε σύγκριση με το συγκεντρωτικό σύστημα. Η μελέτη του Sapan Thapar (2022) δεν είναι η μόνη που έχει γίνει στην Ινδία και αφορά τα αποκεντρωμένα συστήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Οι R.B Hiremath et. al. (2009) [15], παρουσίασαν τα πλεονεκτήματα και τα θετικά στοιχεία των αποκεντρωμένων συστημάτων στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας μέσω παραδειγμάτων τέτοιων συστημάτων σε διάφορες περιοχές στην Ινδία.

Εκτός της Ασίας, στην Αμερική, οι S. P. Burger et. al. (2019) [16] ανέλυσαν σε ποιες περιπτώσεις θα πρέπει να προτιμώνται τα αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα έναντι των συγκεντρωτικών μεγαλύτερης κλίμακας συστημάτων. Συγκεκριμένα, υποστήριξαν πως πρέπει να αντιπαρατεθούν το αυξημένο μοναδιαίο κόστος που έχουν τα αποκεντρωμένα συστήματα λόγω της μικρότερης κλίμακας τους, σε σχέση με αυτό των συγκεντρωτικών, λαμβάνοντας, ωστόσο, ταυτόχρονα υπόψη και τη προστιθέμενη τοπική αξία που προσδίδουν στη περιοχή όπου θα τοποθετηθούν. Ανάλογα με το ποιο στοιχείο υπερτερεί, μπορεί κάποιος να αποφασίσει αν συμφέρει η επένδυση σε αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα. Στην

Ελβετία, οι Jonas Schnidrig et. al. (2024) [17] ασχολήθηκαν με το ελβετικό ενεργειακό σύστημα, αναζητώντας τη βέλτιστη λύση σχετικά με την εγκατάσταση συγκεντρωτικών ή αποκεντρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως ο συνδυασμός συγκεντρωτικών και αποκεντρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων μαζί αποτελεί τη βέλτιστη λύση, καθώς ενώ τα συγκεντρωτικά συστήματα είναι απαραίτητα για τη διαχείριση της μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης και διανομής ενέργειας, τα αποκεντρωμένα συστήματα συμβάλλουν στη παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας σε τοπικό επίπεδο και στην αύξηση της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας του δικτύου. Στην Ισπανία, οι J. Ordóñez et. al. (2010) [18] μελέτησαν ένα θεωρητικά ακατόρθωτο αποκεντρωμένο σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ στην Ανδαλουσία, μια γεωγραφική περιοχή της Ισπανίας με το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό στην Ευρώπη. Η Ανδαλουσία δέχεται κατά μέσο όρο ηλιακή ακτινοβολία ίση με $4.75 \text{ KWh/m}^2/\text{day}$ και το ερώτημα που εξετάστηκε ήταν αν η περιοχή θα μπορούσε να γίνει ενεργειακά αυτόνομη με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στις στέγες όλων των σπιτιών της. Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για 2 τύπους φωτοβολταϊκών παλαιάς τεχνολογίας, τα IS-170 και IS-220 της ISOFOTON, εκτιμήθηκε ότι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στις στέγες των σπιτιών της Ανδαλουσίας θα μπορούσε να καλύψει μέχρι και το 78.89% των ενεργειακών αναγκών των κατοίκων. Επίσης, παρουσιάστηκε η μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε πόλη της Ανδαλουσίας ξεχωριστά κατά το έτος 2006, όταν και πραγματοποιήθηκε η ανάλυση. Σε όλο τον κόσμο, δημοσιεύονται ολοένα και περισσότερα επιστημονικά άρθρα σχετικά με την ηλιακή ενέργεια, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της και το αυξανόμενο παγκόσμιο ενδιαφέρον για την αξιοποίησή της.

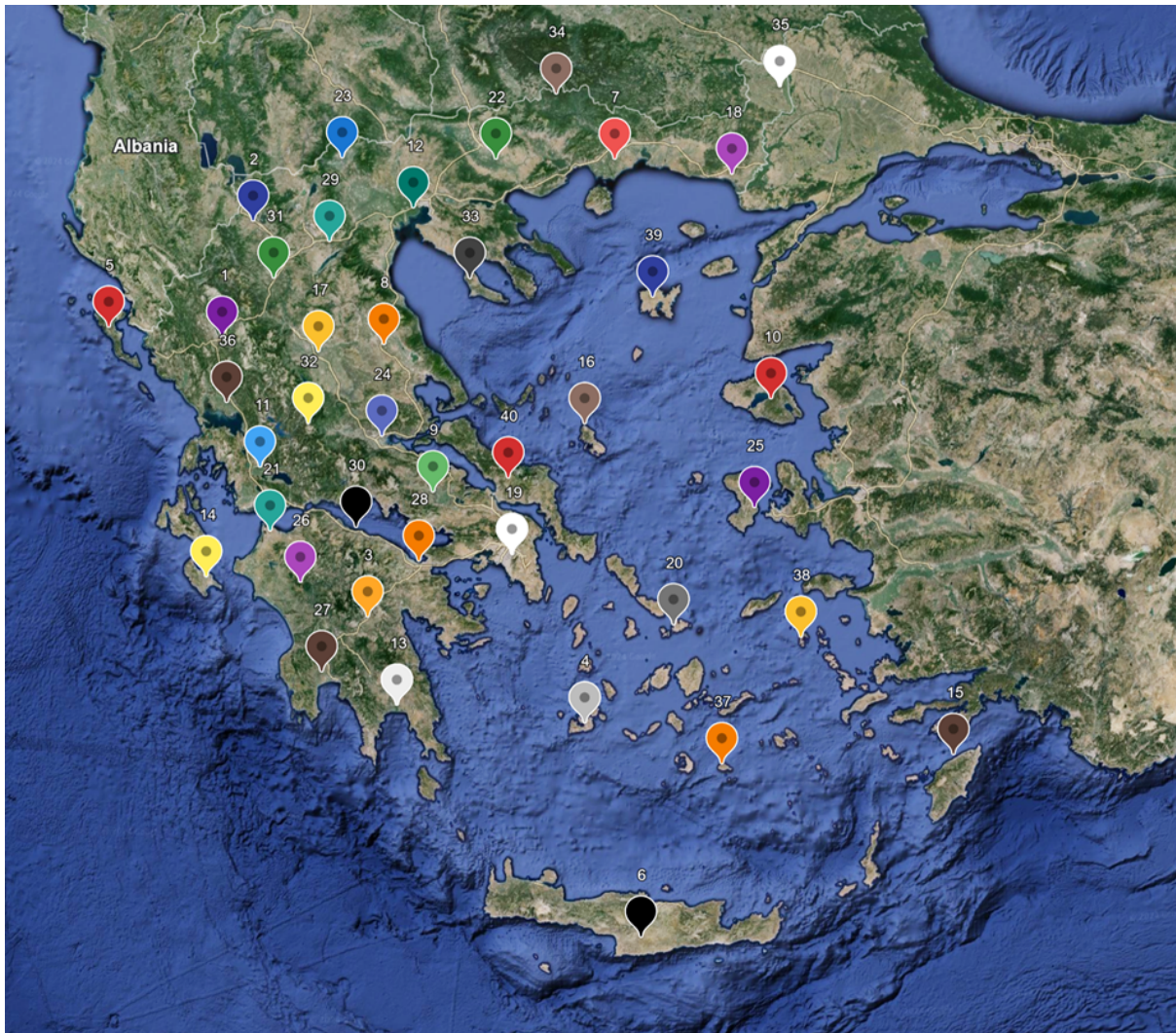
Κεφάλαιο 3

Συλλογή, Ανάλυση και Επικύρωση Δεδομένων Ακτινοβολίας και Θερμοκρασίας

3.1 Επιλογή αντιπροσωπευτικών τοποθεσιών και λήψη δεδομένων μέσω της πλατφόρμας PVGIS

Επιλέχθηκαν 40 τοποθεσίες στην Ελλάδα με στόχο την αντιπροσωπευτική κάλυψη ολόκληρης της ελληνικής επικράτειας. Για τις τοποθεσίες αυτές θα συλλεχθούν δεδομένα ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων και θερμοκρασίας. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται αναλυτικά τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της κάθε τοποθεσίας, όπως το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος, η ονομασία της τοποθεσίας και το γεωγραφικό διαμέρισμα στο οποίο ανήκει. Ακόμη, στην εικόνα 3.1 απεικονίζονται οι 40 τοποθεσίες στον χάρτη της Ελλάδος.

Η συλλογή δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε μέσω της ανοιχτής πρόσβασης διαδικτυακής εφαρμογής Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Αυτή η πλατφόρμα διαθέτει βάσεις δεδομένων ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και άλλων μετεωρολογικών δεδομένων που καλύπτουν σχεδόν ολόκληρο τον πλανήτη. Επιπλέον, παρέχει την δυνατότητα λήψης αυτών των δεδομένων σε μηνιαίο, ημερήσιο ή ακόμα και ωριαίο επίπεδο. Ο χρήστης μπορεί επίσης να υπολογίσει τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο μέρος που τον αφορά, από το φωτοβολταϊκό πάνελ που τον αφορά, με την προϋπόθεση ότι θα έχει εισάγει πρώτα τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας του πάνελ στην εφαρμογή [19]. Στην παρούσα Διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθούν μόνο τα πρωτογενή δεδομένα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που παρέχονται από την πλατφόρμα PVGIS.



Εικόνα 3.1: Τα 40 σημεία στον Χάρτη της Ελλάδος

Η διαδικτυακή εφαρμογή PVGIS έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Οι Thomas Huld et. al. (2012) [20], το 2012, κατάφεραν να βελτιώσουν την υπάρχουσα βάση δεδομένων ακτινοβολίας για την Ευρώπη και την Αφρική χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα από τον οργανισμό Climate Monitoring Satellite Application Facility (CM-SAF), δηλαδή τον οργανισμό όπου ασχολείται με την παρακολούθηση του κλίματος της Γης μέσω δορυφόρων. Η επικύρωση των δεδομένων ολικής ηλιακής ακτινοβολίας της νέας βάσης έγινε χρησιμοποιώντας τιμές ακτινοβολίας από 20 διαφορετικούς σταθμούς και είχε εξαιρετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα μέσα σφάλματα μεταξύ των δεδομένων από τη νέα βάση και των σταθμών ήταν περίπου 2%, κάτι που σημαίνει πως η νέα βάση δεδομένων είναι υψηλής ποιότητας. Βέβαια, υπήρχε μια αμφιβολία για τις πολύ ορεινές περιοχές για τις οποίες δεν ήταν βέβαιο αν η νεότερη βάση δεδομένων ήταν τελικά πιο ακριβής σε σχέση με την παλαιότερη. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα της παρούσας εργασίας προέρχονται από μια ακόμα πιο βελτιωμένη βάση δεδομένων, τη PVGIS-SARAH2, η οποία αποτελεί συνέχεια της PVGIS-SARAH δηλαδή της βάσης που δημιούργησαν οι Thomas Huld et. al. (2012) [19]. Ο Καμπεζίδης (2021) [4] μελέτησε και σύγκρινε τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε 43 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες στην Ελλάδα παίρνοντας δεδομένα από τη διαδικτυακή εφαρμογή PVGIS. Επίσης, συνέλεξε δεδομένα διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από την εφαρμογή και κατάφερε να δημιουργήσει χάρτες ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας για όλη την Ελλάδα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1.

Πίνακας 3.1: Τα 40 σημεία που επιλέχθηκαν για την έρευνα

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

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν για τις 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες σε ωριαία κλίμακα, για τα έτη 2005-2020. Αξίζει να σημειωθεί πως τα ωριαία πρωτογενή δεδομένα ήταν καταγεγραμμένα σύμφωνα με την παγκόσμια ζώνη ώρας (UTC), η οποία είναι 2 ώρες πίσω από την ώρα Ελλάδος. Συνεπώς, για να γίνει η επικύρωση αργότερα, έπρεπε να μετατραπούν σε τοπική ώρα. Επίσης, τα δεδομένα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, δόθηκαν σε μονάδες μέτρησης W/m^2 και αφορούσαν επιφάνειες με μηδενική κλίση και αζιμούθιο, ενώ τα δεδομένα θερμοκρασίας δόθηκαν σε μονάδες Κελσίου ($^{\circ}C$).

3.2 Χωρική ανάλυση δεδομένων ακτινοβολίας

Μια κρίσιμη διαδικασία για την αξιοπιστία της παρούσας εργασίας ήταν η ανάλυση και η επικύρωση των δεδομένων από την πλατφόρμα PVGIS. Αρχικά, τα δεδομένα χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: δεδομένα ακτινοβολίας και δεδομένα θερμοκρασίας για κάθε σημείο ξεχωριστά. Πρώτα, θα πραγματοποιηθεί η χωρική ανάλυση και ύστερα η επικύρωση των

δεδομένων ακτινοβολίας. Υπολογίστηκαν οι ετήσιες και μηνιαίες μέσες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, όλων των σημείων, καθώς και η τυπική απόκλιση κάθε χρονοσειράς, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τα έτη 2005-2020, και παρατηρήθηκε ότι κατά μέσο όρο τη περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία ετησίως τη δέχεται το σημείο 6 στη Κρήτη. Ακόμη, στον πίνακα 3.3 παρατηρείται η μέση ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κάθε γεωγραφικού διαμερίσματος της χώρας. Στον πίνακα αυτόν φαίνεται ότι τα βόρεια γεωγραφικά διαμερίσματα (Μακεδονία, Θράκη, Ήπειρος) δέχονται αισθητά λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία σε σύγκριση με τα νότια (Πελοπόννησος, Νήσοι Αιγαίου Πελάγους, Κρήτη).

Πίνακας 3.2: Μέση τιμή προσπίπτουσας ακτινοβολίας, σε W/m^2 , ετησίως και για κάθε μήνα, κάθε σημείου, καθώς και η τυπική απόκλιση κάθε χρονοσειράς ακτινοβολίας

Τοποθεσία	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέ	Δεκ	Ετησίως	Τυπική απόκλιση
1	82.79	107.33	155.64	207.49	240.36	280.82	298.18	266.89	201.11	145.35	97.50	76.06	180.33	269.07
2	77.46	104.63	157.06	211.71	249.33	285.89	301.73	270.18	198.15	135.60	90.51	70.94	179.81	269.47
3	92.80	120.51	177.33	235.62	269.57	303.98	313.56	285.97	219.58	156.14	111.79	86.51	198.15	288.61
4	95.20	126.91	188.89	253.24	291.36	331.68	335.20	302.36	239.64	166.32	113.35	85.78	211.21	298.55
5	83.40	111.48	169.46	231.43	282.24	320.18	329.62	290.90	217.64	148.52	96.89	75.88	196.89	286.26
6	107.88	136.12	200.43	258.49	295.56	333.26	339.02	306.85	244.29	179.06	128.36	100.05	219.50	305.75
7	79.12	110.96	162.74	225.13	267.84	295.83	309.74	279.95	208.90	139.70	92.26	72.04	187.39	276.16
8	85.81	115.22	168.55	226.64	264.00	294.66	310.73	281.04	207.27	138.96	94.07	75.25	188.88	277.35
9	80.57	109.71	162.35	225.85	263.05	298.51	312.94	282.38	204.21	132.74	93.05	73.21	186.92	278.56
10	78.20	104.60	161.79	227.50	271.81	312.91	329.91	297.26	223.94	150.15	100.14	73.14	194.72	283.33
11	90.22	117.71	171.39	231.78	272.61	312.71	324.78	292.62	218.64	153.42	107.37	83.13	198.42	286.98
12	81.96	108.81	160.31	221.17	263.89	301.20	312.83	277.80	204.58	136.29	88.20	71.52	186.10	276.44
13	100.76	133.14	189.83	248.07	284.57	326.04	332.43	299.75	235.84	163.55	116.70	93.03	210.66	298.98
14	88.51	120.37	175.39	241.89	284.66	320.46	329.50	293.16	218.03	151.22	105.16	81.65	201.22	287.93
15	97.55	128.64	189.73	255.29	293.35	336.07	342.28	307.80	250.23	176.40	123.40	94.67	216.68	304.48
16	74.98	107.74	168.89	235.07	284.11	320.14	328.73	293.13	219.05	143.58	94.24	68.47	195.26	287.12
17	84.37	112.03	165.91	224.02	262.64	297.43	312.33	280.72	206.63	136.44	92.96	74.92	187.91	279.50
18	76.55	108.63	158.13	221.91	271.10	299.97	315.84	285.67	211.62	138.91	89.72	67.59	187.53	277.31
19	92.96	122.08	180.72	241.96	277.40	314.21	324.02	294.92	220.54	153.78	104.78	83.99	201.33	288.74
20	92.51	125.67	188.77	249.64	291.80	330.93	334.25	299.68	239.05	167.14	115.86	86.47	210.53	297.03
21	94.55	125.20	182.77	243.80	285.77	326.05	334.54	298.82	227.82	157.85	111.10	87.35	206.68	294.89
22	80.49	111.81	161.37	219.27	259.42	290.56	304.78	274.79	204.28	139.95	91.61	72.32	184.58	273.39
23	81.06	107.71	154.53	211.24	252.28	289.38	305.70	270.82	198.50	134.51	88.67	71.89	180.90	270.97
24	87.97	115.39	169.21	228.33	267.10	303.04	319.45	288.27	210.41	137.88	96.58	78.16	192.20	284.66
25	87.04	119.13	179.54	245.82	292.59	332.24	342.03	306.05	240.83	165.38	110.92	80.74	208.94	298.69
26	91.33	117.76	171.49	228.24	267.95	311.78	325.46	290.22	222.72	155.07	109.26	85.65	198.47	287.02
27	95.82	124.72	183.30	240.11	277.82	316.64	327.14	290.63	222.85	158.84	112.37	88.93	203.65	291.09
28	96.44	125.53	181.77	243.63	281.70	316.82	327.99	297.08	224.98	155.03	110.44	85.28	204.27	294.22
29	81.67	112.51	160.75	216.62	252.50	286.84	301.82	276.68	201.82	139.08	93.02	72.64	183.35	274.10
30	89.65	116.44	174.41	236.81	274.02	312.53	325.00	293.65	220.52	148.75	105.75	80.56	198.57	289.52
31	76.99	100.68	152.74	208.39	245.73	279.06	294.31	265.53	191.50	128.40	87.74	70.51	175.52	269.43
32	76.69	98.14	149.15	205.03	241.02	280.07	298.73	271.38	195.37	132.26	91.78	71.20	176.31	268.52
33	80.77	109.43	165.07	228.53	275.48	307.86	315.22	281.58	204.17	136.86	89.38	70.56	189.14	278.53
34	78.54	106.46	146.64	197.31	228.43	262.87	281.16	255.65	191.05	133.42	89.01	69.02	170.28	260.48
35	68.15	98.39	153.55	217.10	261.11	286.10	305.78	275.58	203.76	131.37	83.27	61.15	179.18	269.95
36	87.95	118.12	172.28	233.19	274.16	314.84	324.02	289.76	219.25	152.92	102.70	79.25	197.75	286.85
37	97.28	128.23	191.28	253.95	294.25	336.32	338.44	302.94	245.09	172.27	120.23	90.01	214.57	302.27
38	95.37	128.16	189.65	252.39	296.03	334.51	338.60	303.57	244.63	172.21	117.77	87.34	213.73	301.17
39	76.89	111.66	168.28	236.77	287.88	314.64	326.50	294.47	218.87	147.42	99.55	70.60	196.53	286.32
40	79.35	110.24	170.98	234.01	271.79	311.98	327.25	294.49	216.59	146.59	99.59	75.00	195.24	286.31

Πίνακας 3.3: Μέση ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2) κάθε γεωγραφικού διαμερίσματος της χώρας

Γεωγραφικό διαμέρισμα	Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)
Μακεδονία	181.90
Θράκη	183.35
Ήπειρος	189.04
Θεσσαλία	188.40
Στερεά Ελλάδα	191.74
Επάνησα	199.05
Πελοπόννησος	202.92
Νήσοι Αιγαίου Πελάγους	206.91
Κρήτη	219.50

Επίσης, υπολογίστηκαν και οι μέσες τιμές εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας σε ετήσια και μηνιαία βάση. Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που φτάνει στην ατμόσφαιρα, πριν προλάβει ακόμα να διασκορπισθεί, ανακλαστεί ή απορροφηθεί από αυτή όπως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 2.1. Τα αστρονομικά μεγέθη που απαιτούνται για την εκτίμηση της, καθώς και η εξίσωση υπολογισμού της δίνονται στην εικόνα 3.2 [21]. Με βάση αυτά τα μεγέθη βρέθηκε η εξωγήινη ακτινοβολία σε κάθε σημείο, ανά ημέρα, για ένα τυπικό έτος διάρκειας 365 ημερών, και προέκυψαν η ετήσια και οι μηνιαίες μέσες τιμές της. Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά, μαζί με ένα ποσοστό το οποίο δείχνει ποια είναι η μείωση του μέσου όρου της ηλιακής ακτινοβολίας ετησίως, λόγω της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα με τον πίνακα, κατά μέσο όρο τη περισσότερη εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία την δέχεται το σημείο 6 στην Κρήτη, ενώ η μεγαλύτερη μείωση συμβαίνει στο σημείο 34 στα σύνορα Βουλγαρίας.

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 $12/\pi$ δίνει την ώρα δύσης μετά το μεσημέρι	$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$, όπου φ το γεωγραφικό πλάτος σε rad (για $ \varphi >$ $1.161 \text{ rad} = 66.5^\circ$, 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 , $\text{kJ/m}^2/\text{d}$	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)

Εικόνα 3.2: Αστρονομικά μεγέθη που απαιτούνται για την εκτίμηση της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και η εξίσωση της [21].

Πίνακας 3.4: Μέση τιμή εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας, σε W/m^2 , ετησίως και για κάθε μήνα, καθώς και το ποσοστό μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της ατμόσφαιρας

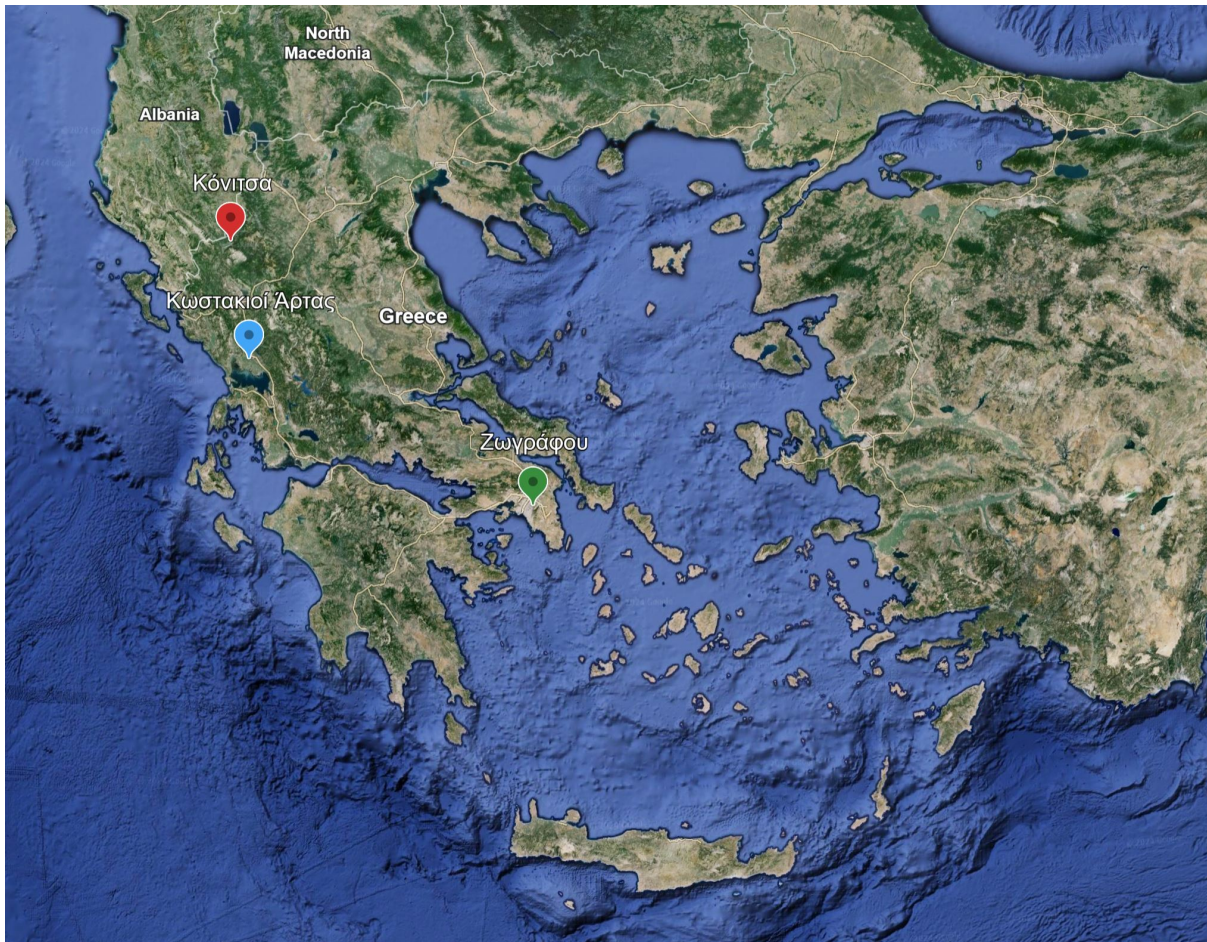
Τοποθεσία	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μά	Ιούν	Ιουλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέ	Δεκ	Ετησίως	Ποσοστό μείωσης
1	178.61	235.57	317.33	400.20	458.34	482.33	470.55	423.73	349.28	263.76	193.91	162.42	328.45	45.10%
2	172.28	229.66	312.59	397.39	457.48	482.51	470.31	421.82	345.36	258.29	187.71	156.05	324.75	44.63%
3	193.49	249.35	328.18	406.45	460.04	481.61	470.82	427.87	358.20	276.42	208.42	177.42	336.94	41.19%
4	199.15	254.54	332.22	408.71	460.56	481.22	470.80	429.32	361.48	281.17	213.93	183.15	340.09	37.90%
5	178.28	235.26	317.07	400.05	458.30	482.34	470.54	423.63	349.07	263.47	193.58	162.08	328.25	40.02%
6	210.78	265.12	340.33	413.12	461.40	480.21	470.54	432.08	368.03	290.80	225.22	194.93	346.43	36.64%
7	168.76	226.35	309.92	395.79	456.96	482.57	470.13	420.72	343.14	255.22	184.26	152.51	322.66	41.92%
8	178.82	235.76	317.48	400.29	458.37	482.32	470.56	423.79	349.41	263.93	194.11	162.62	328.57	42.51%
9	186.72	243.10	323.29	403.67	459.32	481.99	470.75	426.05	354.19	270.69	201.83	170.59	333.12	43.89%
10	181.88	238.61	319.74	401.61	458.75	482.21	470.65	424.68	351.28	266.56	197.10	165.71	330.34	41.05%
11	185.55	242.02	322.44	403.17	459.19	482.05	470.73	425.72	353.49	269.70	200.69	169.41	332.45	40.31%
12	171.41	228.83	311.93	396.99	457.35	482.52	470.27	421.55	344.81	257.53	186.85	155.17	324.23	42.60%
13	198.22	253.69	331.56	408.34	460.48	481.29	470.80	429.09	360.94	280.39	213.02	182.20	339.58	37.96%
14	191.55	247.56	326.79	405.67	459.84	481.73	470.81	427.36	357.06	274.78	206.54	175.46	335.85	40.09%
15	201.48	256.67	333.86	409.62	460.75	481.04	470.77	429.90	362.81	283.11	216.19	185.51	341.38	36.53%
16	183.06	239.71	320.61	402.11	458.90	482.16	470.68	425.02	351.99	267.57	198.25	166.89	331.02	41.01%
17	179.27	236.18	317.81	400.48	458.43	482.31	470.57	423.92	349.68	264.32	194.55	163.07	328.83	42.85%
18	169.66	227.19	310.61	396.20	457.10	482.56	470.18	421.00	343.71	256.01	185.14	153.41	323.20	41.98%
19	190.07	246.19	325.72	405.06	459.69	481.82	470.80	426.96	356.18	273.53	205.09	173.96	335.01	39.90%
20	193.93	249.75	328.50	406.63	460.08	481.59	470.82	427.99	358.46	276.79	208.85	177.87	337.19	37.56%
21	188.97	245.19	324.93	404.60	459.57	481.88	470.78	426.66	355.54	272.60	204.02	172.86	334.40	38.19%
22	168.73	226.32	309.90	395.77	456.96	482.57	470.13	420.71	343.12	255.19	184.23	152.48	322.64	42.79%
23	168.74	226.32	309.91	395.78	456.96	482.57	470.13	420.71	343.12	255.20	184.24	152.49	322.65	43.93%
24	183.76	240.36	321.12	402.41	458.98	482.13	470.69	425.21	352.41	268.17	198.93	167.60	331.42	42.01%
25	187.72	244.03	324.02	404.08	459.44	481.94	470.77	426.32	354.79	271.54	202.80	171.60	333.69	37.38%
26	191.70	247.70	326.90	405.73	459.86	481.72	470.81	427.40	357.15	274.91	206.68	175.62	335.94	40.92%
27	196.49	252.10	330.33	407.66	460.32	481.41	470.81	428.65	359.95	278.94	211.35	180.46	338.62	39.86%
28	190.45	246.55	326.00	405.22	459.73	481.80	470.80	427.07	356.41	273.86	205.47	174.35	335.23	39.07%
29	173.29	230.60	313.35	397.84	457.62	482.48	470.35	422.13	345.99	259.16	188.70	157.06	325.34	43.64%
30	188.68	244.91	324.71	404.48	459.54	481.89	470.78	426.58	355.36	272.35	203.73	172.56	334.23	40.59%
31	175.33	232.51	314.88	398.75	457.91	482.43	470.43	422.75	347.26	260.93	190.70	159.12	326.54	46.25%
32	183.15	239.79	320.67	402.15	458.91	482.16	470.68	425.04	352.04	267.64	198.34	166.98	331.07	46.75%
33	175.20	232.39	314.78	398.69	457.89	482.43	470.43	422.71	347.18	260.82	190.57	158.98	326.46	42.06%
34	165.19	222.99	307.20	394.14	456.41	482.61	469.94	419.58	340.87	252.11	180.76	148.93	320.54	46.88%
35	164.94	222.75	307.01	394.02	456.37	482.61	469.92	419.50	340.71	251.88	180.51	148.68	320.38	44.07%
36	182.12	238.84	319.92	401.71	458.78	482.20	470.66	424.75	351.42	266.77	197.34	165.95	330.48	40.16%
37	201.47	256.66	333.86	409.61	460.75	481.04	470.77	429.90	362.81	283.10	216.19	185.50	341.37	37.14%
38	194.77	250.53	329.10	406.97	460.16	481.53	470.82	428.21	358.95	277.50	209.67	178.72	337.66	36.70%
39	176.26	233.38	315.57	399.16	458.03	482.40	470.47	423.03	347.83	261.73	191.60	160.05	327.08	39.91%
40	185.96	242.40	322.73	403.34	459.24	482.03	470.74	425.83	353.74	270.04	201.08	169.82	332.68	41.31%

3.3 Επικύρωση δεδομένων ακτινοβολίας

Για τη διαδικασία επικύρωσης των δεδομένων ακτινοβολίας, συλλέχθηκαν δεδομένα από τρεις επίγειους σταθμούς στην Ελλάδα μέσω της διαδικτυακής ιστοσελίδας openmeteo.org. Η ιστοσελίδα αυτή διαθέτει δωρεάν μετεωρολογικά δεδομένα από καταγραφές επίγειων σταθμών που βρίσκονται κυρίως στην Ελλάδα. Στόχος ήταν να συγκριθούν τα δεδομένα από αυτούς τους σταθμούς με τα αντίστοιχα από την εφαρμογή PVGIS. Οι σταθμοί που επιλέχθηκαν για την επικύρωση ήταν ο σταθμός στη Ζωγράφου, που βρίσκεται μέσα στο χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο σταθμός στη Κόνιτσα της Ηπείρου και ο σταθμός στους Κωστάκιους Άρτας, στον χώρο του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως η τοποθεσία του σημείου 19 (Αθήνα) ταυτίζεται με αυτή του σταθμού στη Ζωγράφου, συνεπώς δεν χρειάστηκε να γίνει νέα συλλογή δεδομένων για το συγκεκριμένο σημείο από την εφαρμογή PVGIS. Στον πίνακα 3.5 φαίνονται τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των σταθμών, όπως είναι το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος και η ονομασία του κάθε σταθμού, ενώ στην εικόνα 3.3 απεικονίζονται οι σταθμοί στον χάρτη της Ελλάδος.

Πίνακας 3.5: Οι 3 σταθμοί που επιλέγησαν για την επικύρωση

Σταθμός	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
Ζωγράφου	37°58'26" N	23°47'15" E
Κόνιτσα	40°02'26" N	20°44'29" E
Κωστακιοί Άρτας	39°07'19" N	20°56'50" E



Εικόνα 3.3: Οι 3 σταθμοί στον Χάρτη της Ελλάδος

Τα δεδομένα από τους σταθμούς ήταν σε κλίμακα δεκαλέπτων, επομένως για να γίνει η σύγκριση έπρεπε πρώτα να μετατραπούν σε ωραία κλίμακα. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω του Υδρογώμονα, ενός ελεύθερου λογισμικού που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία υδρολογικών χρονοσειρών [22]. Συγκεκριμένα, για κάθε ώρα, σε κάθε χρονοσειρά, υπολογίστηκε η μέση τιμή ακτινοβολίας των αντίστοιχων δεκαλέπτων, όπου υπήρχαν δεδομένα.

Ακολούθησε η συλλογή δεδομένων από την εφαρμογή PVGIS για τους δύο εναπομείναντες σταθμούς, δηλαδή τον σταθμό στη Κόνιτσα της Ηπείρου και αυτόν στους Κωστακίους Άρτας. Απορρίφθηκαν τα προφανή σφάλματα στα δεδομένα από τις δύο πλατφόρμες, όπως τιμές ακτινοβολίας που υπερέβαιναν τα 1367 W/m^2 , δηλαδή την μέση ακτινοβολία που φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης όταν ο ήλιος βρίσκεται στη μέση απόσταση από τον πλανήτη μας [2]. Επίσης, απορρίφθηκαν οι αρνητικές τιμές ακτινοβολίας, καθώς και όσες δεν ήταν μηδενικές κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σημειώνεται ότι τέτοιου είδους σφάλματα υπήρχαν μόνο στις χρονοσειρές που προέρχονταν από τους επίγειους σταθμούς, όμως, για καλύτερη σύγκριση, απορρίφθηκαν και οι τιμές από την εφαρμογή PVGIS που είχαν καταγραφεί στις ώρες των σφαλμάτων. Έπειτα, για κάθε σταθμό ξεχωριστά, έγινε απευθείας σύγκριση των δεδομένων από τις δύο πλατφόρμες και απορρίφθηκαν οι ώρες, και φυσικά οι τιμές τους, όπου υπήρχε διαφορά στην ακτινοβολία μεγαλύτερη των 500 W/m^2 . Η επεξεργασία αυτή έγινε μέσω του λογισμικού Microsoft Excel. Στη συνέχεια, σε κάθε σταθμό, εκτιμήθηκαν οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις για τις δυο χρονοσειρές. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Σύγκριση δεδομένων ακτινοβολίας (W/m^2) από επίγειους σταθμούς και PVGIS

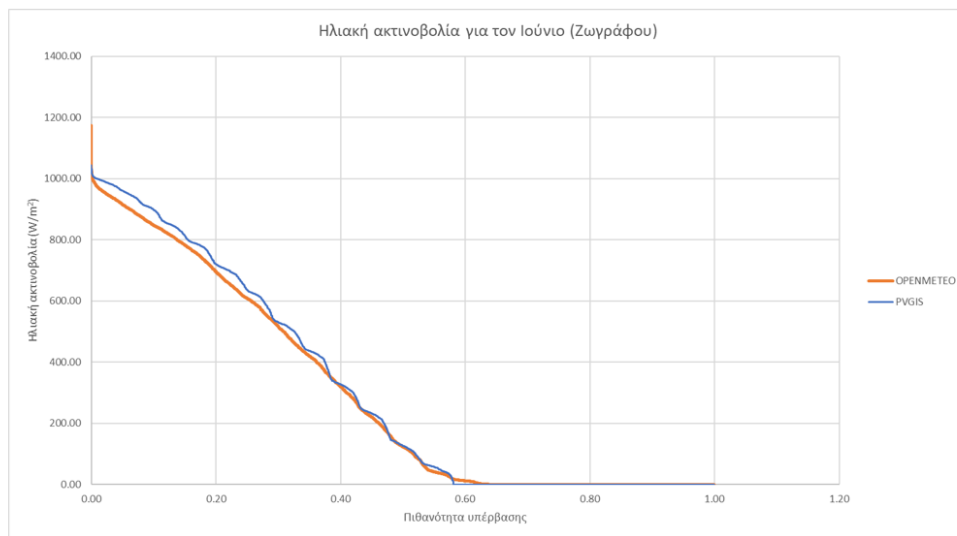
	Σταθμός Ζωγράφου		Σταθμός Κόνιτσα		Σταθμός Κωστακιοί Άρτας	
	Επίγειος σταθμός	PVGIS	Επίγειος σταθμός	PVGIS	Επίγειος σταθμός	PVGIS
Μέση τιμή	197.74	204.21	160.47	172.42	185.83	200.87
Τυπική απόκλιση	280.62	291.81	245.65	265.00	267.70	288.73

Έπειτα, τα δεδομένα χωρίστηκαν ανά μήνα χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού R. Στόχος ήταν να δημιουργηθούν καμπύλες διάρκειας για κάθε βάση δεδομένων ανά μήνα, οι οποίες αν αντιπαραβληθούν στο ίδιο διάγραμμα του μήνα θα φανεί αν τελικά τα δεδομένα ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά σε όρους στατιστικής. Αναλυτικότερα, για να δημιουργηθούν οι καμπύλες διάρκειας έπρεπε πρώτα να ταξινομηθούν τα δεδομένα ακτινοβολίας του κάθε μήνα σε φθίνουσα σειρά και ύστερα να κατασκευαστεί η εμπειρική καμπύλη πιθανότητας υπέρβασης, της οποίας η εξίσωση είναι η 3.1 [23].

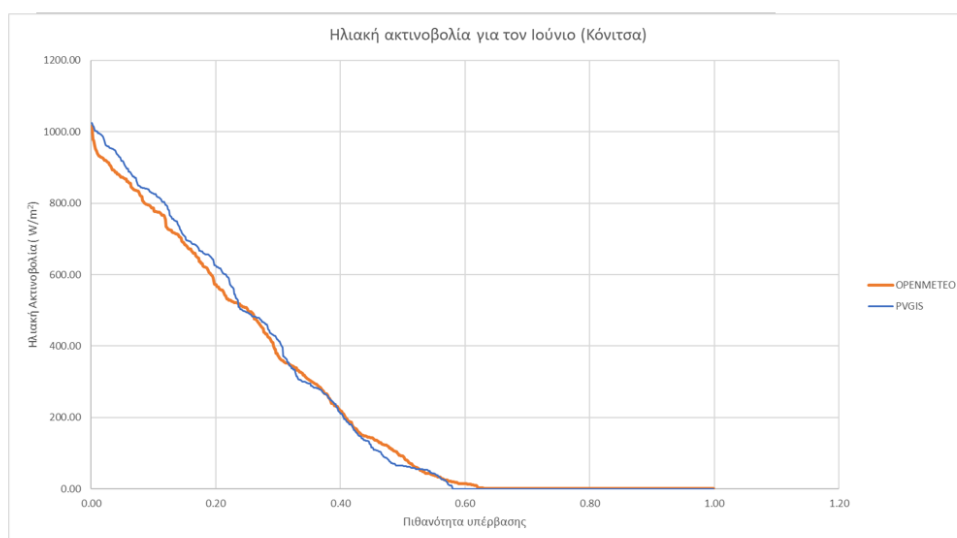
$$P = \frac{m}{N + 1} \quad (3.1)$$

Όπου P είναι η πιθανότητα υπέρβασης, m είναι η θέση της τιμής της ακτινοβολίας στη φθίνουσα σειρά και N είναι το πλήθος των δεδομένων στον κάθε μήνα. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκαν οι καμπύλες διάρκειας για κάθε μήνα, πλατφόρμα και σταθμό, βασιζόμενες στα δεδομένα ακτινοβολίας και τις αντίστοιχες πιθανότητες υπέρβασης. Στις εικόνες 3.4 και 3.5 απεικονίζονται οι καμπύλες διάρκειας που προέκυψαν από δεδομένα των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, και για τους 3 σταθμούς, για έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του καλοκαιριού, τον Ιούνιο, και έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του χειμώνα, τον Ιανουάριο, αντίστοιχα.

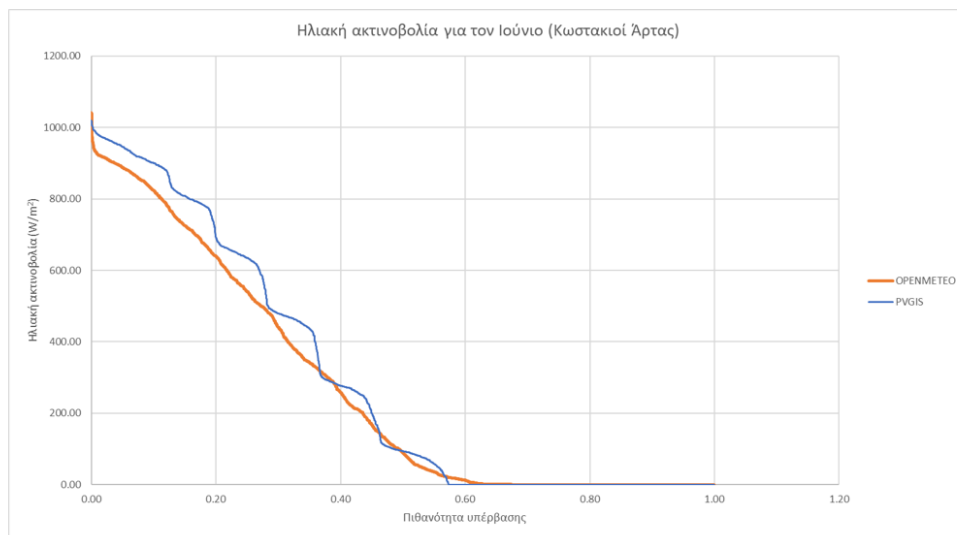
α)



β)



γ)

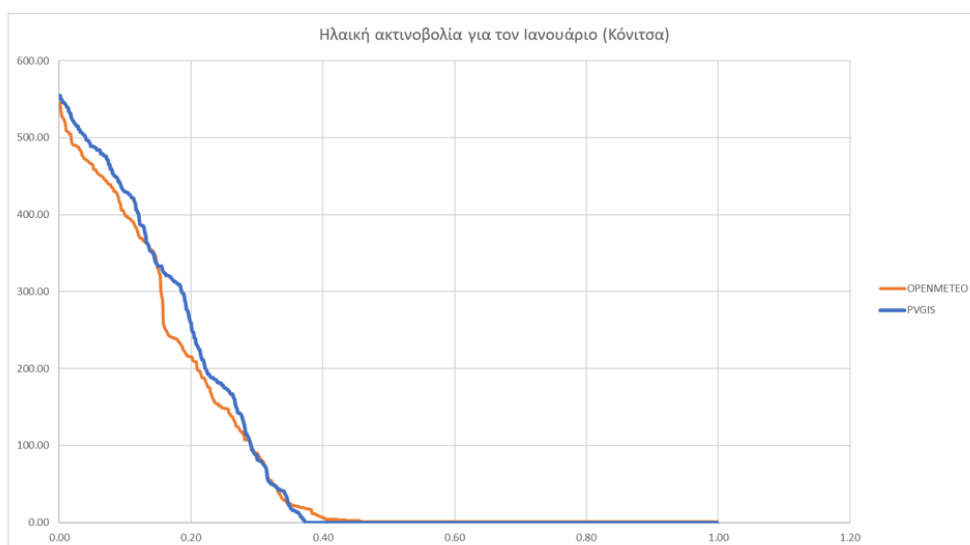


Εικόνα 3.4: α) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα ακτινοβολίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον μήνα Ιούνιο, για τον σταθμό στη ζωγράφου. β) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα ακτινοβολίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιούνιο, για τον σταθμό στη Κόνιτσα. γ) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα ακτινοβολίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιούνιο, για τον σταθμό στους Κωστάκιους Άρτας

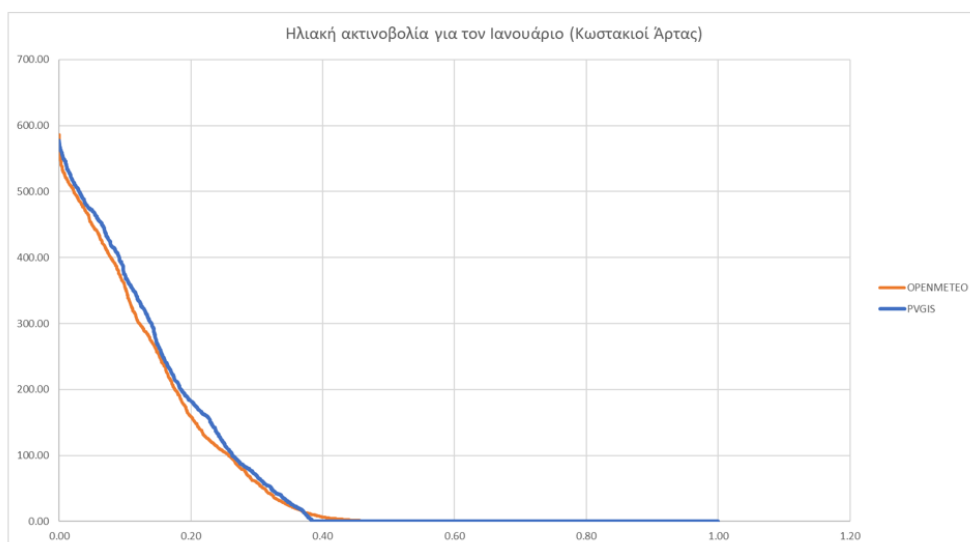
α)



β)



γ)



Εικόνα 3.5: α) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα ακτινοβολίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον μήνα Ιανουάριο, για τον σταθμό στη ζωγράφου. β) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα ακτινοβολίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιανουάριο, για τον σταθμό στη Κόνιτσα. γ) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα ακτινοβολίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιανουάριο, για τον σταθμό στους Κωστακίους Άρτας

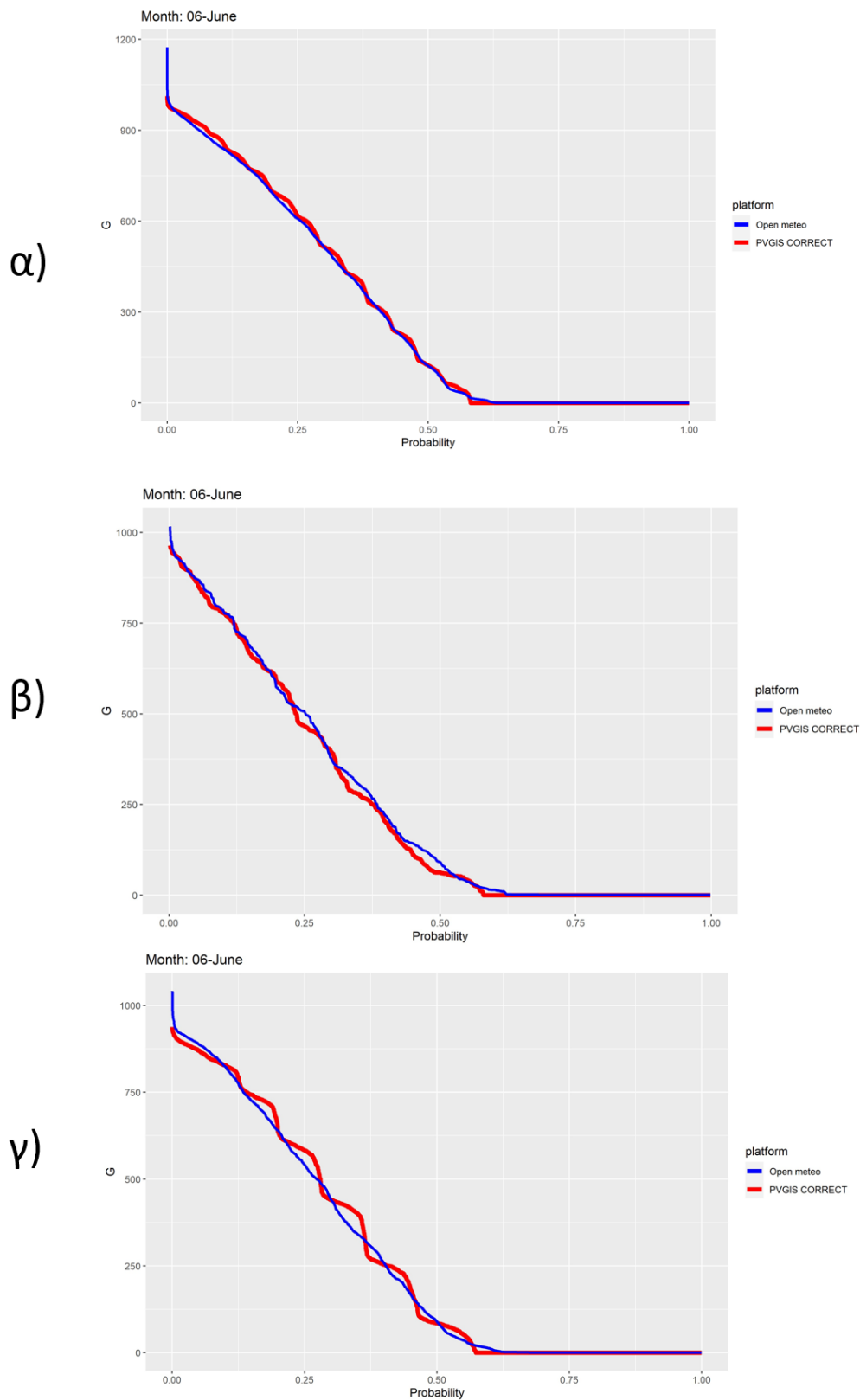
Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.4 και 3.5 τα δεδομένα δεν παρουσιάζουν ακριβώς το ίδιο στατιστικό "προφίλ". Συνεπώς, για τη βελτίωση των δεδομένων ακτινοβολίας από την εφαρμογή PVGIS, τροποποιήθηκε η κάθε χρονοσειρά με τέτοιο τρόπο ώστε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της, να πλησιάζουν τα αντίστοιχα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών που παρήχθησαν από τους επίγειους σταθμούς. Η μέθοδος αυτή είναι δόκιμη καθώς δεν επιδιώκεται μια απόλυτη ταύτιση των καμπυλών αλλά η ίδια συμπεριφορά σε όρους στατιστικής. Αναλυτικότερα, η τροποποίηση έγινε υπολογίζοντας πρώτα την τυποποιημένη χρονοσειρά Z η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 3.2.

$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (3.2)$$

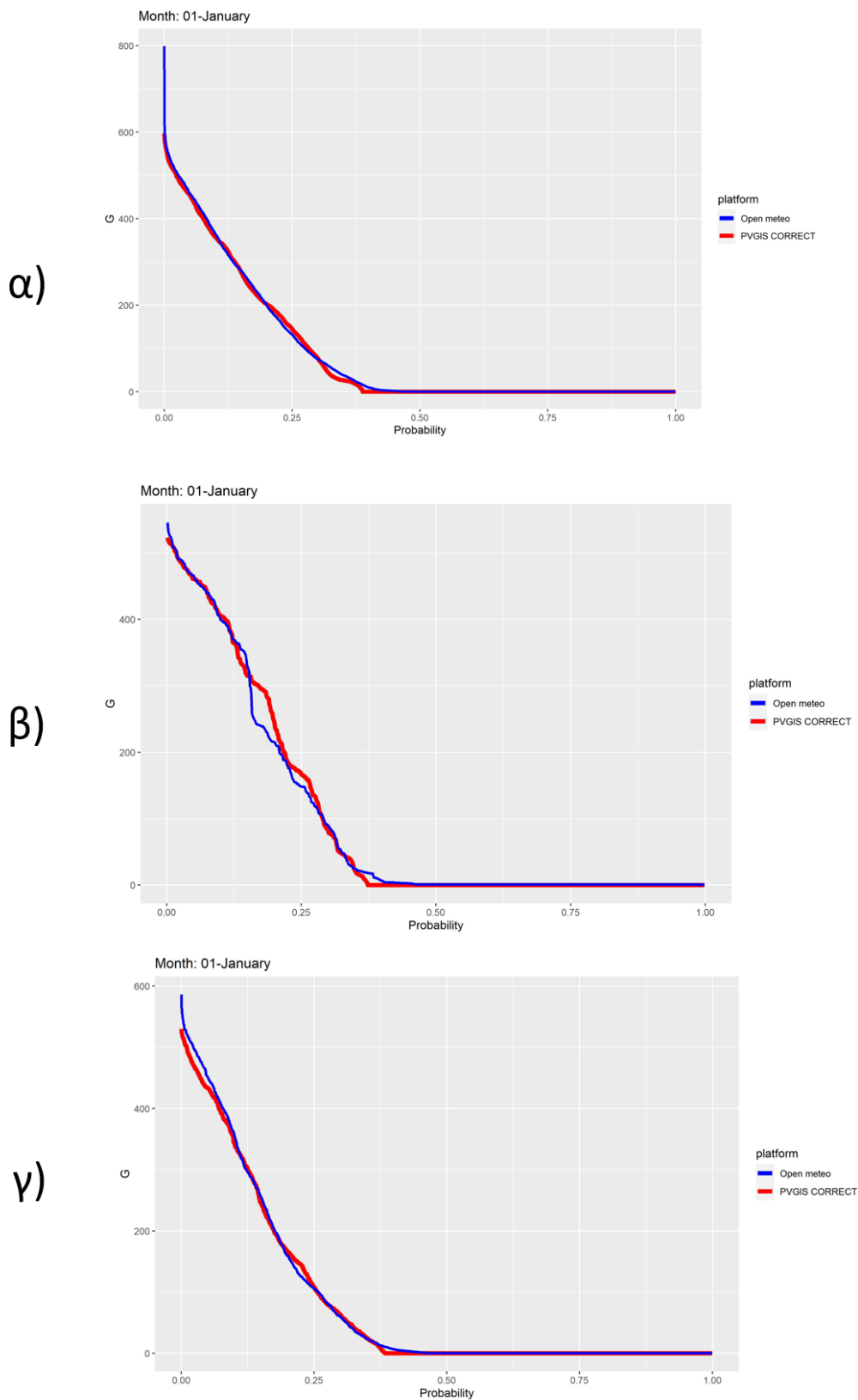
Όπου Z_i η τιμή της τυποποιημένης χρονοσειράς, x_i η τιμή της χρονοσειράς ακτινοβολίας από την εφαρμογή PVGIS, μ η μέση τιμή της χρονοσειράς ακτινοβολίας από την εφαρμογή PVGIS και σ η τυπική απόκλιση της χρονοσειράς ακτινοβολίας από την εφαρμογή PVGIS. Έπειτα, υπολογίστηκε η τροποποιημένη χρονοσειρά ακτινοβολίας με τα επιθυμητά στατιστικά χαρακτηριστικά, μέσω της εξίσωσης 3.3

$$X_{i,\text{correct}} = Z_i \cdot \sigma_2 + \mu_2 \quad (3.3)$$

Όπου $X_{i,\text{correct}}$ η τιμή της τροποποιημένης χρονοσειράς, Z_i η τιμή της τυποποιημένης χρονοσειράς, σ_2 η τυπική απόκλιση της χρονοσειράς ακτινοβολίας από τους επίγειους σταθμούς και μ_2 η μέση τιμή της χρονοσειράς ακτινοβολίας από τους επίγειους σταθμούς. Με αυτό τον τρόπο παρήχθη, για κάθε χρονοσειρά ακτινοβολίας από την πλατφόρμα PVGIS, μια νέα καλύτερη τροποποιημένη χρονοσειρά. Στις εικόνες 3.6 και 3.7 απεικονίζονται οι καμπύλες διάρκειας που προέκυψαν από δεδομένα των τροποποιημένων χρονοσειρών και της ιστοσελίδας openmeteo, και για τους 3 σταθμούς, για έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του καλοκαιριού, τον Ιούνιο, και έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του χειμώνα, τον Ιανουάριο, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.6: α) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα της τροποποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS CORRECT) και της ιστοσελίδας openmeteo (OPENMETEO), για τον μήνα Ιούνιο, για τον σταθμό στη ζωγράφου. β) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα της τροποποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS CORRECT) και της ιστοσελίδας openmeteo (OPENMETEO), για τον Ιούνιο, για τον σταθμό στην Κόνιτσα. γ) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα των τροποποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS CORRECT) και της ιστοσελίδας openmeteo (OPENMETEO), για τον Ιούνιο, για τον σταθμό στους Κωστάκιους Άρτας.



Εικόνα 3.7: α) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα της τροποποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS CORRECT) και της ιστοσελίδας openmeteo (OPENMETEO), για τον μήνα Ιανουάριο, για τον σταθμό στη ζωγράφου. β) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα της τροποποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS CORRECT) και της ιστοσελίδας openmeteo (OPENMETEO), για τον Ιανουάριο, για τον σταθμό στην Κόνιτσα. γ) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα της τροποποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS CORRECT) και της ιστοσελίδας openmeteo (OPENMETEO), για τον Ιανουάριο, για τον σταθμό στους Κωστάκιους Άρτας.

Φαίνονται ότι τα αποτελέσματα είναι καλύτερα, δηλαδή οι καμπύλες πλησίασαν περισσότερο. Ωστόσο, ενδέχεται να υπάρχει περιθώριο για ακόμη μεγαλύτερη σύγκλιση. Συγκεκριμένα, η πλατφόρμα PVGIS δεν παρέχει δεδομένα για μεμονωμένα σημεία αλλά για συγκεκριμένα κελιά πλέγματος [24]. Κάθε κελί του πλέγματος έχει συγκεκριμένες διαστάσεις και μέσα σε αυτό όλα τα σημεία έχουν την ίδια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ήτοι τον σταθμισμένο μέσο όρο της ακτινοβολίας του κελιού αυτού. Συνεπώς, αν βρεθεί μια σχέση που να συνδέει τις χρονοσειρές των 4 γωνιακών σημείων κάθε κελιού, με στόχο την παραγωγή μιας ξεχωριστής χρονοσειράς για σημειακή εκτίμηση της ακτινοβολίας για οποιοδήποτε σημείο εντός του κελιού αυτού, τότε αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στη καλύτερη εκτίμηση της χωρικής διασποράς της ακτινοβολίας μέσω των δορυφορικών δεδομένων. Η σχέση αυτή θα έχει τη μορφή της εξίσωσης 3.4.

$$X_i = X_{1i}W_1 + X_{2i}W_2 + X_{3i}W_3 + X_{4i}W_4 \quad (3.4)$$

Όπου X_i η τιμή της βελτιωμένης χρονοσειράς στο σημείο ενδιαφέροντος, X_{1i} η τιμή της χρονοσειράς στο νοτιοδυτικό σημείο του κελιού, W_1 το σταθμισμένο βάρος του νοτιοδυτικού σημείου του κελιού, X_{2i} η τιμή της χρονοσειράς στο βορειοδυτικό σημείο του κελιού, W_2 το σταθμισμένο βάρος του βορειοδυτικού σημείου του κελιού, X_{3i} η τιμή της χρονοσειράς στο βορειοανατολικό σημείο του κελιού, W_3 το σταθμισμένο βάρος του βορειοανατολικού σημείου του κελιού, X_{4i} η τιμή της χρονοσειράς στο νοτιοανατολικό σημείο του κελιού, W_4 το σταθμισμένο βάρος του νοτιοανατολικού σημείου του κελιού.

Έγινε συλλογή δεδομένων ακτινοβολίας για τα 4 γωνιακά σημεία κάθε σταθμού από την πλατφόρμα PVGIS. Τα σημεία αυτά απέχουν 0.03° σε γεωγραφικό πλάτος και μήκος από τον κάθε σταθμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή τη φορά, τα δεδομένα δεν κατηγοριοποιήθηκαν ανά μήνα.

Για να βρεθούν τα σταθμισμένα βάρη χρησιμοποιήθηκε εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης από το πρόγραμμα Microsoft Excel. Στόχος ήταν να μεγιστοποιηθεί ο δείκτης προσαρμογής ο οποίος φανερώνει αν έχει γίνει καλή προσαρμογή της βελτιωμένης χρονοσειράς σε αυτή από την ιστοσελίδα openmeteo. Ως δείκτης προσαρμογής χρησιμοποιήθηκε ο Kling-Gupta efficiency (KGE). Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται ευρέως στις υδρολογικές επιστήμες και λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1, με το 1 να δηλώνει τέλεια προσαρμογή [25]. Η εξίσωση του δείκτη KGE είναι η 3.5

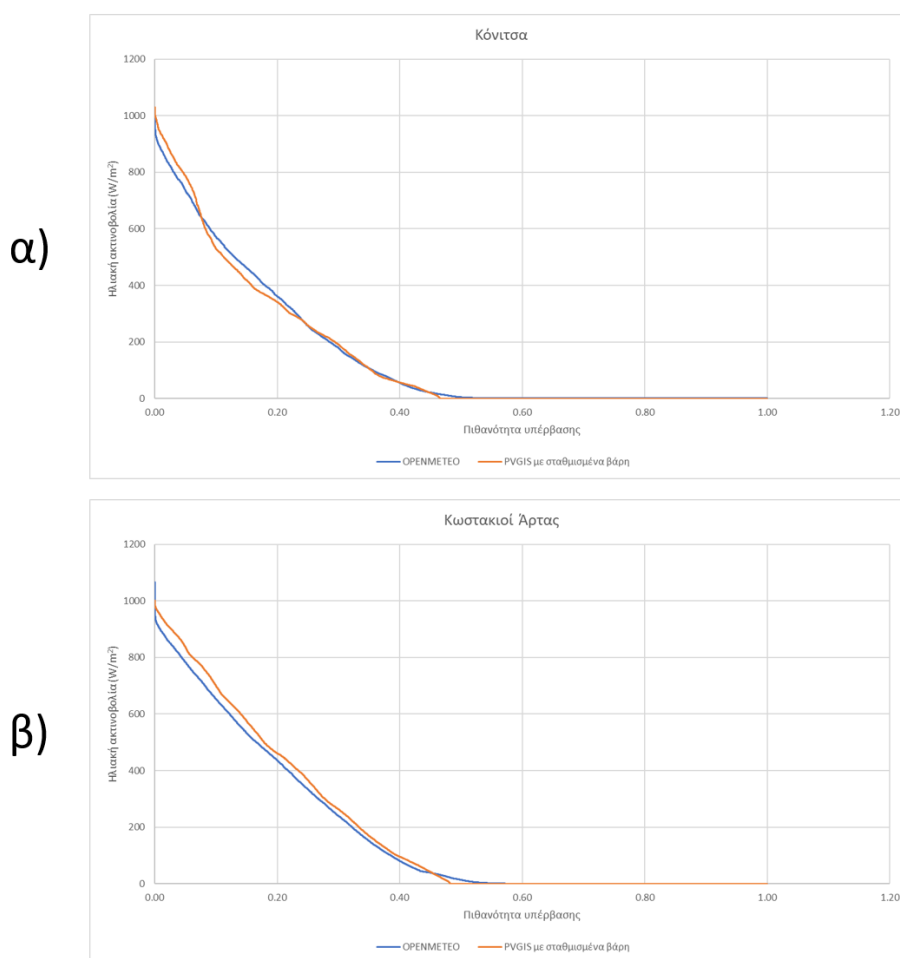
$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (3.5)$$

Όπου KGE ο δείκτης προσαρμογής, r ο συντελεστής συσχέτισης PEARSON των δύο χρονοσειρών, σ_{sim} η τυπική απόκλιση της προσομοιωμένης χρονοσειράς, σ_{obs} η τυπική απόκλιση της παρατηρημένης χρονοσειράς, μ_{sim} η μέση τιμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς και μ_{obs} η μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς [25]. Στον πίνακα 3.7 παρουσιάζονται οι δείκτες προσαρμογής KGE και οι συνιστώσες τους για κάθε σταθμό, σε 2 περιπτώσεις. Στη πρώτη περίπτωση ο δείκτης KGE υποδεικνύει τον βαθμό προσαρμογής της χρονοσειράς από την εφαρμογή PVGIS χωρίς καμία τροποποίηση με την παρατηρημένη χρονοσειρά, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο δείκτης δείχνει το βαθμό προσαρμογής της βελτιωμένης χρονοσειράς με την παρατηρημένη. Στον πίνακα, η μεταβλητή a ισούται με $\sigma_{sim}/\sigma_{obs}$ ενώ η μεταβλητή b ισούται με μ_{sim}/μ_{obs} .

Πίνακας 3.7: Σύγκριση του δείκτη *KGE* και των συνιστωσών του στους τρεις σταθμούς, για δύο περιπτώσεις.

	Σταθμός Ζωγράφου		Σταθμός Κόνιτσα		Σταθμός Κωστακιοί Άρτας	
	1η περίπτωση (PVGIS: χωρίς σταθμισμένα βάρη)	2η περίπτωση (PVGIS: με σταθμισμένα βάρη)	1η περίπτωση (PVGIS: χωρίς σταθμισμένα βάρη)	2η περίπτωση (PVGIS: με σταθμισμένα βάρη)	1η περίπτωση (PVGIS: χωρίς σταθμισμένα βάρη)	2η περίπτωση (PVGIS: με σταθμισμένα βάρη)
<i>KGE</i>	0.930	0.929	0.879	0.947	0.884	0.898
<i>r</i>	0.952	0.954	0.945	0.951	0.975	0.977
<i>a</i>	1.040	1.038	1.079	1.016	1.079	1.069
<i>b</i>	1.033	1.039	1.074	0.989	1.081	1.072

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.7 τα δεδομένα ακτινοβολίας από το PVGIS για τον σταθμό στη Ζωγράφου είναι ήδη τόσο ακριβή που δεν είναι δυνατή περαιτέρω βελτιστοποίηση. Στους άλλους δύο σταθμούς και ειδικά στη Κόνιτσα τα δεδομένα έχουν βελτιστοποιηθεί. Στην εικόνα 3.8 απεικονίζονται οι καμπύλες διάρκειας που προέκυψαν από δεδομένα της βελτιστοποιημένης χρονοσειράς και της ιστοσελίδας *openmeteo*, για τον σταθμό στη Κόνιτσα και αυτόν στους Κωστάκιους Άρτας.



Εικόνα 3.8: α) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα της βελτιστοποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS με σταθμισμένα βάρη) και της ιστοσελίδας *openmeteo* (OPENMETEO) για τον σταθμό στη Κόνιτσα β) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα της βελτιστοποιημένης χρονοσειράς ακτινοβολίας (PVGIS με σταθμισμένα βάρη) και της ιστοσελίδας *openmeteo* (OPENMETEO) για τον σταθμό στους Κωστάκιους Άρτας.

3.4 Χωρική ανάλυση και επικύρωση δεδομένων θερμοκρασίας

Όσον αφορά τα δεδομένα θερμοκρασίας, αρχικά, υπολογίστηκαν οι ετήσιες, μηνιαίες και εποχιακές μέσες τιμές όλων των σημείων, καθώς και η τυπική απόκλιση κάθε χρονοσειράς, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.8. Σημειώνεται ότι για τις εποχιακές μέσες τιμές, οι μόνες εποχές για τις οποίες έγινε εκτίμηση ήταν ο χειμώνας και το καλοκαίρι, όπου χειμερινοί μήνες θεωρούνται ο Δεκέμβριος, ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος, ενώ καλοκαιρινοί μήνες θεωρούνται ο Ιούνιος, ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τα έτη 2005-2020, και παρατηρήθηκε ότι κατά μέσο όρο τη μεγαλύτερη θερμοκρασία ετησίως την έχει το σημείο 37 στην Ανάφη.

Πίνακας 3.8: Μηνιαίες, ετήσιες και εποχιακές μέσες τιμές θερμοκρασίας, σε °C, σε κάθε σημείο, καθώς και η τυπική απόκλιση κάθε χρονοσειράς θερμοκρασίας

Τοποθεσία	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέ	Δεκ	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Ετησίως	Τυπική απόκλιση
1	2.08	3.15	6.12	10.30	14.53	18.91	22.18	22.36	17.63	12.58	8.01	3.72	2.98	21.15	11.84	8.43
2	0.70	2.65	6.13	10.81	15.38	20.04	23.51	23.66	18.47	12.57	7.05	2.42	1.92	22.40	12.00	9.45
3	3.91	4.83	7.52	11.23	15.82	20.32	23.42	23.48	19.26	14.12	9.60	5.61	4.78	22.40	13.30	8.26
4	12.88	13.09	14.21	15.88	19.00	22.79	25.03	25.46	23.54	20.43	17.53	14.65	13.54	24.43	18.74	4.85
5	10.06	10.39	12.05	14.64	18.21	22.11	24.78	25.48	22.55	18.72	15.22	11.72	10.72	24.12	17.20	5.87
6	10.61	10.96	12.74	15.76	19.87	24.04	26.64	26.75	23.76	19.67	15.79	12.37	11.31	25.81	18.28	6.77
7	6.37	7.24	9.61	13.04	17.59	21.84	24.57	25.22	21.24	16.18	12.02	8.10	7.23	23.88	15.29	7.22
8	5.92	7.56	10.61	14.73	20.14	24.98	27.69	27.56	22.73	17.05	12.14	7.54	7.00	26.74	16.60	8.83
9	6.35	7.47	10.22	14.30	19.50	24.09	26.74	26.43	22.15	16.77	12.15	8.12	7.31	25.75	16.23	8.50
10	8.53	9.23	11.22	14.18	18.77	23.28	25.98	26.22	22.44	17.76	13.94	10.41	9.39	25.16	16.87	7.08
11	7.62	8.56	11.01	14.64	18.90	23.34	26.66	27.03	22.64	17.62	13.24	9.32	8.50	25.68	16.76	7.77
12	6.77	8.71	11.71	15.52	20.31	24.71	27.17	27.30	23.00	17.70	13.16	8.43	7.97	26.39	17.08	7.97
13	7.06	7.98	10.61	14.10	18.85	23.58	26.60	26.73	22.25	17.02	12.46	8.58	7.88	25.64	16.36	8.36
14	12.60	12.58	13.67	15.49	18.51	22.05	24.57	25.60	23.65	20.56	17.56	14.42	13.20	24.07	18.47	4.90
15	11.87	12.12	13.60	15.83	19.44	23.18	25.65	26.47	24.27	20.70	17.09	13.75	12.58	25.10	18.70	5.64
16	10.51	11.04	12.59	14.65	18.53	22.78	25.08	25.42	22.57	18.63	15.36	12.19	11.25	24.43	17.48	5.80
17	4.75	6.48	9.79	14.16	19.27	24.16	27.38	27.13	22.02	16.08	10.94	6.35	5.86	26.22	15.76	9.34
18	4.17	5.78	8.94	12.93	17.93	22.38	25.39	25.97	21.13	15.05	10.51	6.17	5.37	24.58	14.74	8.82
19	9.11	9.95	12.25	15.62	20.28	24.81	27.59	27.66	23.69	18.88	14.72	10.94	10.00	26.69	18.00	7.55
20	11.98	12.40	13.76	15.68	18.90	22.76	24.83	25.24	23.08	19.74	16.61	13.65	12.68	24.28	18.25	5.16
21	8.38	9.16	11.38	14.67	18.88	23.42	26.53	26.99	22.85	18.03	13.86	10.01	9.18	25.65	17.05	7.59
22	4.33	6.44	9.99	14.55	19.73	24.34	27.66	28.17	22.88	16.38	10.86	5.75	5.51	26.72	15.97	9.44
23	3.04	5.66	9.74	14.64	19.62	24.34	27.36	27.34	22.05	15.57	9.89	4.68	4.46	26.35	15.37	9.85
24	6.84	8.35	11.36	15.59	20.84	25.41	28.20	28.03	23.47	17.68	12.86	8.57	7.92	27.22	17.31	8.69
25	10.86	11.45	13.04	15.47	19.31	23.38	25.42	25.70	22.75	19.01	15.68	12.52	11.61	24.83	17.91	5.86
26	6.46	7.37	9.79	13.40	17.48	21.89	25.29	25.77	21.30	16.50	12.11	8.04	7.29	24.32	15.49	8.01
27	10.57	11.08	12.91	15.89	19.83	24.18	27.18	27.58	24.02	19.72	15.89	12.27	11.31	26.31	18.46	6.97
28	7.72	8.52	10.89	14.41	19.21	23.73	26.62	26.63	22.60	17.53	13.22	9.48	8.57	25.66	16.76	7.73
29	2.07	3.95	7.60	12.23	17.09	21.54	24.49	24.33	19.49	13.71	8.40	3.65	3.22	23.45	13.26	9.05
30	3.93	4.61	7.26	10.80	15.27	19.63	22.68	22.81	18.67	13.80	9.61	5.76	4.76	21.71	12.95	9.71
31	2.23	3.83	7.10	11.53	16.31	21.09	24.47	24.41	19.35	13.51	8.32	3.83	3.30	23.32	13.05	9.18
32	1.81	2.90	5.92	9.94	14.39	18.74	21.95	21.92	17.40	12.34	7.87	3.64	2.78	20.87	11.61	8.29
33	8.87	9.71	11.58	14.24	18.69	23.17	25.76	26.24	22.60	18.00	14.36	10.59	9.72	25.06	17.02	6.62
34	0.38	1.97	5.27	9.59	14.04	17.89	20.57	20.95	16.69	11.18	6.35	2.07	1.47	19.80	10.62	8.52
35	3.45	5.40	8.79	12.93	18.41	22.90	25.70	26.13	21.39	15.04	10.25	5.55	4.80	24.91	14.71	9.39
36	7.59	9.16	11.92	15.41	19.37	23.53	26.50	26.75	22.47	17.52	13.10	9.04	8.60	25.59	16.90	7.84
37	13.51	13.68	14.70	16.25	19.15	22.64	24.51	25.10	23.51	20.66	17.87	15.13	14.11	24.08	18.92	4.49
38	12.68	12.95	14.12	15.94	19.10	22.76	24.54	25.22	23.14	20.16	17.29	14.39	13.34	24.17	18.55	4.85
39	9.46	9.96	11.65	14.06	18.18	22.44	24.91	25.46	22.19	17.87	14.54	11.29	10.24	24.27	16.87	6.22
40	7.09	8.01	10.48	14.01	18.99	23.27	25.65	25.58	21.91	16.95	12.79	9.02	8.04	24.83	16.19	7.67

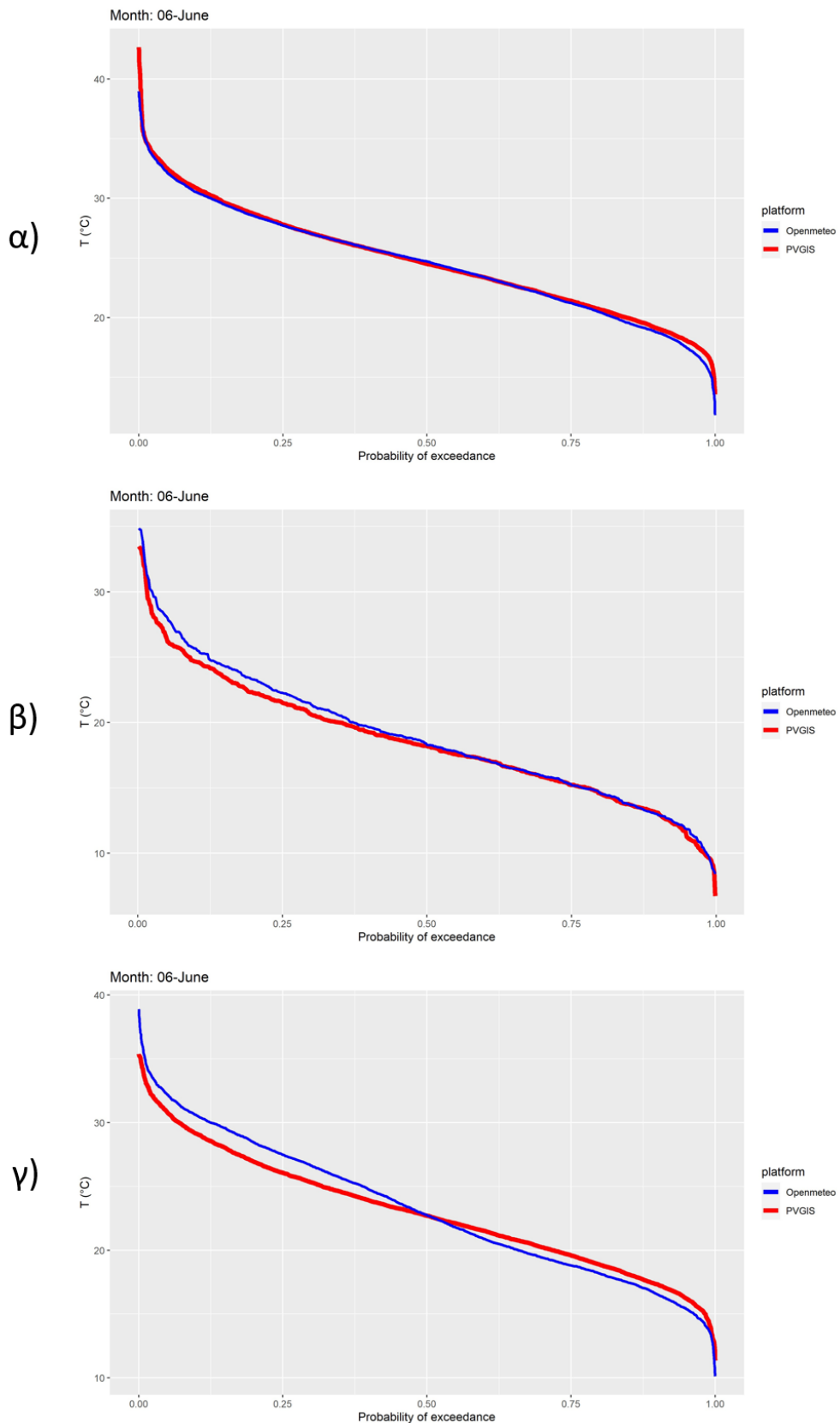
Για τη διαδικασία επικύρωσης των δεδομένων θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι 3 σταθμοί όπως και στην ακτινοβολία. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια, δηλαδή έγινε συλλογή δεδομένων από την ιστοσελίδα openmeteo.org, έγινε η μετατροπή των δεδομένων αυτών από κλίμακα δεκαλέπτων σε ωριαία κλίμακα μέσω του υδρογνώμονα, συλλέχθηκαν τα δεδομένα από την πλατφόρμα PVGIS για τους σταθμούς στη Κόνιτσα και στους Κωστάκιους Άρτας και ακολούθησε ο καθαρισμός σφαλμάτων. Απορρίφθηκαν τα προφανή σφάλματα στα δεδομένα από τις δύο πλατφόρμες, όπως τιμές θερμοκρασίας που υπερέβαιναν τους 50 °C ή ήταν χαμηλότερες από -30 °C. Σημειώνεται ότι τέτοιου είδους σφάλματα υπήρχαν μόνο στις χρονοσειρές που προέρχονταν από τους επίγειους σταθμούς, όμως, για καλύτερη σύγκριση, απορρίφθηκαν και οι τιμές από την εφαρμογή PVGIS που

είχαν καταγραφεί στις ώρες των σφαλμάτων. Έπειτα, για κάθε σταθμό ξεχωριστά, έγινε απευθείας σύγκριση των δεδομένων από τις δύο πλατφόρμες και απορρίφθηκαν οι ώρες, και φυσικά οι τιμές τους, όπου υπήρχε διαφορά στην θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20 °C. Η επεξεργασία αυτή έγινε μέσω του λογισμικού Microsoft Excel. Στη συνέχεια, σε κάθε σταθμό, εκτιμήθηκαν οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις για τις δυο χρονοσειρές, οι τιμές των οποίων φαίνονται στον πίνακα 3.9.

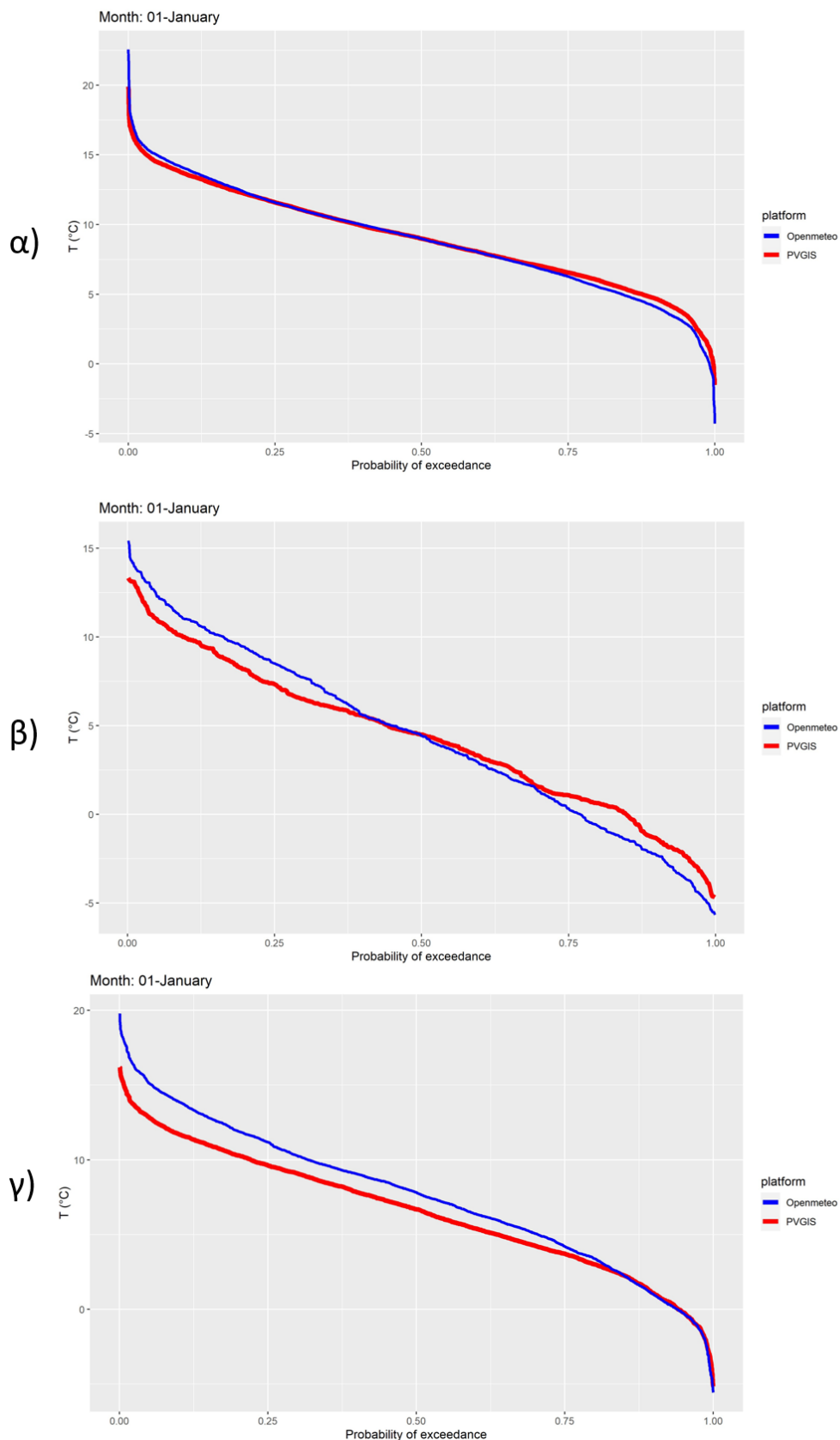
Πίνακας 3.9: Σύγκριση δεδομένων θερμοκρασίας (°C) από επίγειους σταθμούς και PVGIS

	Σταθμός Ζωγράφου		Σταθμός Κόνιτσα		Σταθμός Κωστακαίοί Άρτας	
	Επίγειος σταθμός	PVGIS	Επίγειος σταθμός	PVGIS	Επίγειος σταθμός	PVGIS
Μέση τιμή	17.51	17.62	13.70	13.16	17.38	16.98
Τυπική απόκλιση	7.77	7.67	8.28	8.31	8.24	8.00

Έπειτα, τα δεδομένα χωρίστηκαν ανά μήνα χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού R. Όπως και προηγουμένως, στόχος ήταν να δημιουργηθούν καμπύλες διάρκειας για κάθε πλατφόρμα και μήνα, οι οποίες αν αντιπαραβληθούν στο ίδιο διάγραμμα του μήνα θα φανεί αν τελικά τα δεδομένα ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά σε όρους στατιστικής. Στις εικόνες 3.9 και 3.10 απεικονίζονται οι καμπύλες διάρκειας που προέκυψαν από δεδομένα των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, και για τους 3 σταθμούς, για έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του καλοκαιριού, τον Ιούνιο, και έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του χειμώνα, τον Ιανουάριο, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.9: α) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα θερμοκρασίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον μήνα Ιούνιο, για τον σταθμό στη ζωγράφου. β) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα θερμοκρασίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιούνιο, για τον σταθμό στη Κόνιτσα. γ) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα θερμοκρασίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιούνιο, για τον σταθμό στους Κωστάκιους Άρτας



Εικόνα 3.10: α) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα θερμοκρασίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον μήνα Ιανουάριο, για τον σταθμό στη ζωγράφου. β) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα θερμοκρασίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιανουάριο, για τον σταθμό στη Κόνιτσα. γ) Καμπύλες διάρκειας από δεδομένα θερμοκρασίας των ιστοσελίδων PVGIS και openmeteo, για τον Ιανουάριο, για τον σταθμό στους Κωστάκιους Άρτας

3.5 Συμπεράσματα απο την επικύρωση δεδομένων

Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.9 και 3.10, τα δεδομένα θερμοκρασίας από την πλατφόρμα PVGIS είναι αρκετά ικανοποιητικά. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο ρόλος της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο κρίσιμος όσο της ακτινοβολίας στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ, κάτι που θα αναλυθεί πιο λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3. Συνεπώς μια διαφορά θερμοκρασίας της τάξης του 1 °C, ή και ακόμα μικρότερη, από την πραγματικότητα θεωρείται πως θα έχει ελάχιστη επίδραση στα αποτελέσματα παραγωγής ηλιακής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά η ακτινοβολία διαδραματίζει έναν σημαντικότερο ρόλο στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο, και για αυτό δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στην επικύρωση των δεδομένων της από την ιστοσελίδα PVGIS. Τα αποτελέσματα και σε αυτή τη περίπτωση είναι θετικά και μπορούν να γίνουν ακόμα καλύτερα αν ακολουθηθεί κάποια από τις δύο διαδικασίες που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.3. Εφόσον έχει γίνει η επικύρωση των δεδομένων και βρέθηκε ότι είναι αξιόπιστα, δίνεται η δυνατότητα να ακολουθήσει η αξιοποίηση τους για την παραγωγή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με την επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας.

Κεφάλαιο 4

Σημειακή Ανάλυση Παραγωγής Φωτοβολταϊκής Ενέργειας

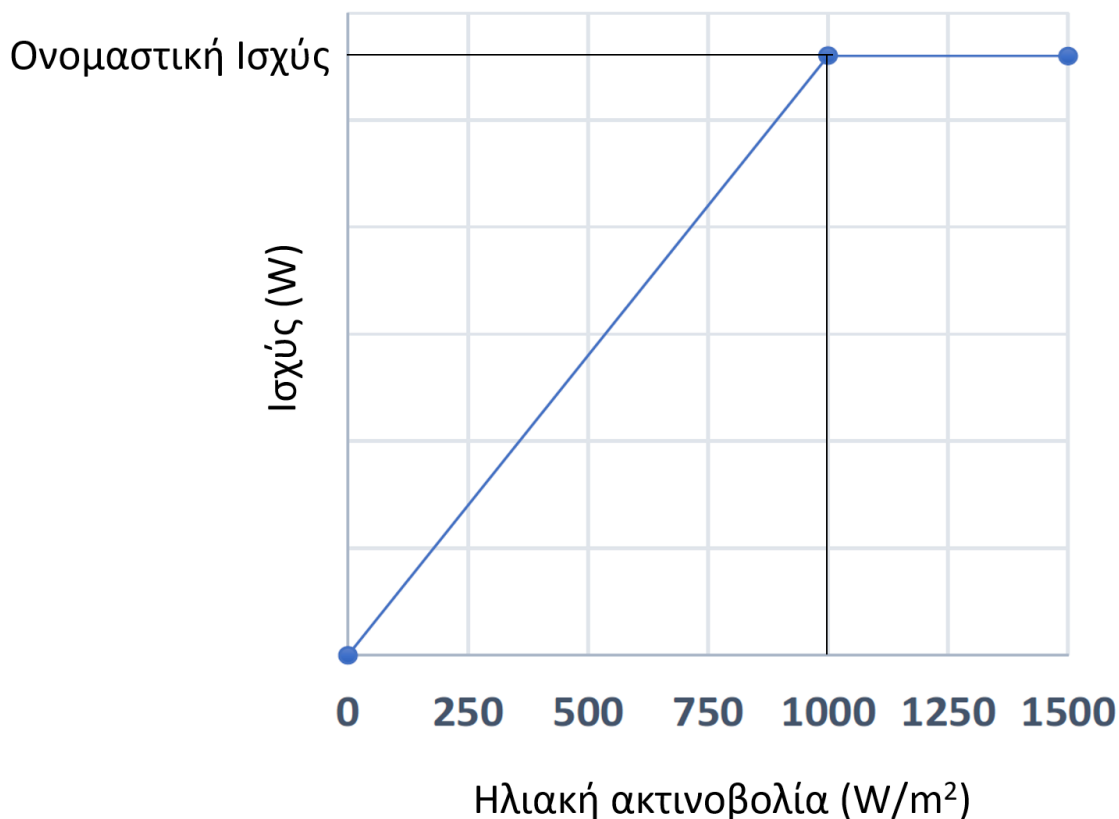
4.1 Κρίσιμοι παράγοντες στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας

Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όπου η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό. Συγκεκριμένα, τον μεγαλύτερο ρόλο στη παραγωγή τον έχει η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς όσο περισσότερη είναι τόσο περισσότερη είναι και η προσφερόμενη ενέργεια. Ωστόσο, η θερμοκρασία των κυψελών του πάνελ επίσης επηρεάζει την παραγωγή. Πιο αναλυτικά, όταν υπερβαίνει τους 25 °C, δηλαδή τη θερμοκρασία για την οποία έχουμε STC συνθήκες, ο βαθμός απόδοσης μειώνεται [2]. Αυτή η μείωση περιγράφεται μέσω του θερμοκρασιακού συντελεστή, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό μείωσης του βαθμού απόδοσης για κάθε βαθμό Κελσίου πάνω από τους 25 °C. Παραδείγματα τιμών για αυτόν τον συντελεστή είναι -0.38%/°C για μονοκρυσταλλικά πάνελ και -0.40%/°C για πολυκρυσταλλικά [2]. Στο υποκεφάλαιο 2.2 παρουσιάζονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ενώ στο υποκεφάλαιο 2.3 παρουσιάζονται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις STC συνθήκες και τον ορισμό του βαθμού απόδοσης.

4.2 Σχέση παραγωγής ενέργειας

Για την εκτίμηση της ισχύος (σε W) ενός φωτοβολταϊκού πάνελ για δεδομένη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (σε W/m²), γίνεται η θεώρηση πως η σχέση μεταξύ των δύο εκφράζεται από το διάγραμμα της εικόνας 4.1 [2]. Σύμφωνα με το διάγραμμα, η σχέση μεταξύ προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και παραγόμενης ισχύος είναι γραμμική μέχρι

τα 1000 W/m^2 , δηλαδή την ακτινοβολία για την οποία έχουμε STC συνθήκες, ενώ στην συνέχεια η ισχύς παραμένει σταθερή. Επίσης, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει το σύστημα επιτυγχάνεται για πρώτη φορά στα 1000 W/m^2 και ονομάζεται ονομαστική ισχύς. Η ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πάνελ δίνεται από τον κατασκευαστή, ο οποίος το έχει λειτουργήσει στις πρότυπες συνθήκες STC και έχει εξακριβώσει την τιμή της [8].



Εικόνα 4.1: Σχέση μεταξύ προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ και παραγόμενης ισχύος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο βαθμός απόδοσης του συστήματος δεν παραμένει σταθερός, αλλά μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία πάνω από τους $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης, που ονομάζεται ονομαστικός (n_{nom}), παρέχεται από τον κατασκευαστή και επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία είναι $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ή χαμηλότερη. Η εξίσωση του πραγματικού βαθμού απόδοσης για οποιαδήποτε θερμοκρασία είναι η 4.1.

$$n_{\text{actual}} = n_{\text{nom}} - a_T \cdot \max(T - 25, 0) \quad (4.1)$$

Όπου n_{act} ο πραγματικός βαθμός απόδοσης, n_{nom} ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης, a_T ο θερμοκρασιακός συντελεστής ($\%/^\circ\text{C}$) και T η θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$).

Έχοντας ορίσει πλέον τη μαθηματική σχέση του πραγματικού βαθμού απόδοσης μπορεί να οριστεί και αυτή της ωριαίας παραγόμενης ισχύος, όπου είναι η 4.2 [26].

$$P_{\text{hourly}} = \frac{n_{\text{act}}}{n_{\text{nom}}} \min [n_{\text{nom}} \cdot R \cdot A_{\text{panel}}, P_{\text{nom}}] \quad (4.2)$$

Όπου P_{hourly} η ωριαία παραγόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό πάνελ, η_{act} ο πραγματικός βαθμός απόδοσης του συστήματος, η_{nom} ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης, R η ηλιακή ακτινοβολία, A_{panel} το εμβαδόν της επιφάνειας του πάνελ και P_{nom} η ονομαστική ισχύς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της ωριαίας παραγόμενης ισχύος σε W ταυτίζεται με την τιμή της ωριαίας παραγόμενης ενέργειας σε Wh , καθώς η ενέργεια ισούται με το γινόμενο της ισχύος με τον χρόνο.

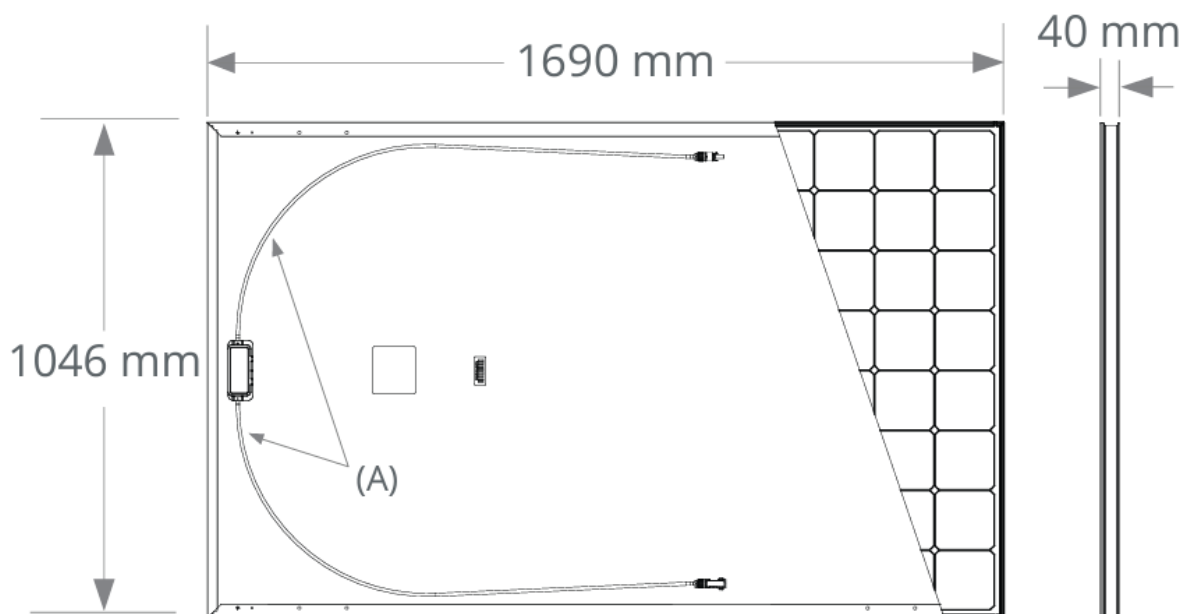
4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού πάνελ

Αφού καθορίστηκε η σχέση υπολογισμού της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, λαμβάνοντας υπόψιν την ακτινοβολία και την θερμοκρασία, παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελ που επιλέχθηκε για την παρούσα έρευνα. Αναλυτικότερα, θα γίνουν υπολογισμοί παραγωγής ενέργειας από το συγκεκριμένο πάνελ σε κάθε σημείο ξεχωριστά.

Το σύγχρονης τεχνολογίας φωτοβολταϊκό πάνελ που επιλέχθηκε, με εμπορική ονομασία SunPower Maxeon 3 (SPR-MAX3-400), είναι ένα μονοκρυσταλλικό πάνελ τελευταίας τεχνολογίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα 4.1 [27]. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή ο θερμοκρασιακός του συντελεστής ισούται με $-0,29\%/^{\circ}C$ [27], ωστόσο δεν θα ληφθεί υπόψη αυτή η τιμή. Οι υπολογισμοί θα γίνουν για 3 διαφορετικούς θερμοκρασιακούς συντελεστές: για $-0\%/^{\circ}C$, για $-0,20\%/^{\circ}C$ και για $-0,40\%/^{\circ}C$. Ο συντελεστής $-0\%/^{\circ}C$ αναφέρεται σε ένα ιδεατό πάνελ το οποίο δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία, ο συντελεστής $-0,20\%/^{\circ}C$ σε ένα πάνελ με πολύ ικανοποιητικό θερμοκρασιακό συντελεστή ενώ ο συντελεστής $-0,40\%/^{\circ}C$ σε ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Μέσω της ανάλυσης αυτής θα διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Στην εικόνα 4.2 φαίνεται το SunPower Maxeon 3 μαζί με τις διαστάσεις του [27].

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πάνελ SunPower Maxeon 3 (SPR-MAX3-400).

Εμβαδόν (m^2)	1.77
Ονομαστική Ισχύς P_{nom} (W)	400
Ονομαστικός Βαθμός Απόδοσης η_{nom}	22.6%



Εικόνα 4.2: Το πάνελ SunPower Maxeon 3 (SPR-MAX3-400) μαζί με τις διαστάσεις του.

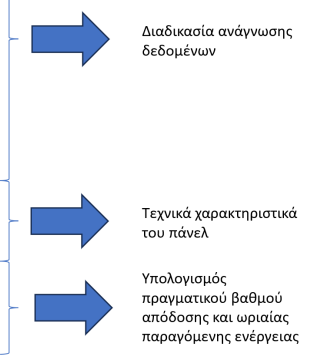
4.4 Αποτελέσματα παραγωγής ενέργειας σε κάθε τοποθεσία

Γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του σύγχρονου πάνελ που θα χρησιμοποιηθεί για την έρευνα, μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της παραγωγής ενέργειας σε κάθε τοποθεσία, σαν να υπήρχε ένα πάνελ SunPower Maxeon 3 εγκατεστημένο σε κάθε μία από αυτές. Θυμίζεται ότι οι τοποθεσίες είναι 40, καλύπτουν όλη την ελληνική επικράτεια και απεικονίζονται στο υποκεφάλαιο 3.1. Η παραγωγή ενέργειας εκτιμήθηκε δημιουργώντας ένα μοντέλο μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R το οποίο λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Ένα απόσπασμα του μοντέλου αυτού φαίνεται στην εικόνα 4.3, όπου απεικονίζεται η διαδικασία ανάγνωσης των δεδομένων από την R, ο υπολογισμός του πραγματικού βαθμού απόδοσης για κάθε ώρα, και τέλος, ο υπολογισμός της ωριαίας παραγόμενης ενέργειας. Αναλυτικότερα, στην αρχή διαβάζονται 40 αρχεία τύπου Excel, όπου το καθένα αντιπροσωπεύει μία τοποθεσία και περιέχει δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, αυτά αποθηκεύονται σε μία λίστα με πολλά μητρώα δεδομένων για να αξιοποιηθούν στη συνέχεια. Έπειτα, εισάγονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελ στον κώδικα, όπως είναι το εμπυδόν του, η ονομαστική ισχύς του, ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης και ο θερμοκρασιακός συντελεστής, ο οποίος θα αλλάζει ανάλογα με την περίπτωση. Τέλος, δημιουργούνται δύο μητρώα με 40 στήλες και σειρές όσες είναι και οι ώρες της περιόδου 2005-2020, όπου θα αποθηκευτούν ο πραγματικός βαθμός απόδοσης και η παραγόμενη ενέργεια για κάθε ώρα.

```

10 file_names=c("shmeio_1_lwannina_hourly_data.xlsx", "shmeio_2_kastoria_hourly_data.xlsx",
11 "shmeio_3_tripolh_hourly_data.xlsx",
12 "shmeio_4_mhlos_hourly_data.xlsx", "shmeio_5_kerkura_hourly_data.xlsx", "shmeio_6_krtht_hourly_data.xlsx",
13 "shmeio_7_kabala-januh_hourly_data.xlsx", "shmeio_8_larisa_hourly_data.xlsx", "shmeio_9_leibadia_hourly_data.xlsx",
14 "shmeio_10_tesbos_hourly_data.xlsx", "shmeio_11_agrinto_hourly_data.xlsx", "shmeio_12_uessalonikh_hourly_data.xlsx",
15 "shmeio_13_greio_hourly_data.xlsx", "shmeio_14_zakynthos_hourly_data.xlsx", "shmeio_15_rodos_hourly_data.xlsx",
16 "shmeio_16_skuros_hourly_data.xlsx", "shmeio_17_trikala_hourly_data.xlsx", "shmeio_18_ahros_hourly_data.xlsx",
17 "shmeio_19_suhna_hourly_data.xlsx", "shmeio_20_mukonos_hourly_data.xlsx", "shmeio_21_patra_hourly_data.xlsx",
18 "shmeio_22_serres_hourly_data.xlsx", "shmeio_23_aridaia_hourly_data.xlsx", "shmeio_24_lamia_hourly_data.xlsx",
19 "shmeio_25_xios_hourly_data.xlsx", "shmeio_26_olumpia_hourly_data.xlsx", "shmeio_27_kalamata_hourly_data.xlsx",
20 "shmeio_28_korinuos_hourly_data.xlsx", "shmeio_29_kozanh_hourly_data.xlsx", "shmeio_30_diakopto_hourly_data.xlsx",
21 "shmeio_31_grebena_hourly_data.xlsx", "shmeio_32_karpenhsi_hourly_data.xlsx",
22 "shmeio_33_salkidikh_hourly_data.xlsx",
23 "shmeio_34_sunora_boulgarias_hourly_data.xlsx", "shmeio_35_orestiada_hourly_data.xlsx",
24 "shmeio_36_arta_hourly_data.xlsx",
25 "shmeio_37_anafh_hourly_data.xlsx", "shmeio_38_patmos_hourly_data.xlsx", "shmeio_39_lhmos_hourly_data.xlsx",
26 "shmeio_40_euboia_hourly_data.xlsx")
27 data<-list()
28 for (file in file_names) {
29   data[[file]] <- read_excel(file)
30 }
31 shmeia<-40
32 n<-matrix(0,nrow=nrow(data[[1]]),ncol=shmeia)
33 area<-1.69*1.046 # (1690x1046 mm)
34 onomastikh_isxys<-400 # (0)
35 onomastikh_apodosh<-onomastikh_isxys/(1000*area)
36 temp.coeff<-0.4/100
37 Energetia<-matrix(0,nrow=nrow(data[[1]]),ncol=shmeia)
38 for (i in 1:shmeia){
39   for (k in 1:nrow(data[[1]])){
40     n[k,i]<-min(onomastikh_apodosh,onomastikh_apodosh-temp.coeff*(data[[i]]$T2m[k]-25))
41     Energetia[k,i]=n[k,i]/onomastikh_apodosh*min(data[[i]]$G(t) [k]*area*onomastikh_apodosh,onomastikh_isxys)
42   }
43 }

```



Εικόνα 4.3: Απόσπασμα του μοντέλου παραγωγής ενέργειας στην R.

Ακολούθως, υπολογίστηκαν η ετήσια και οι μηνιαίες μέσες τιμές παραγωγής ενέργειας σε κάθε σημείο, καθώς και οι μέσες τιμές για τις εποχές του χειμώνα και του καλοκαιριού. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε για 3 θερμοκρασιακούς συντελεστές: $-0\%/^{\circ}\text{C}$, $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$ και $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Συνεπώς, στον πίνακα 4.2 φαίνονται τα αποτελέσματα για τον θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με 0, στον πίνακα 4.3 για τον θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με $-0.20\%/^{\circ}\text{C}$, ενώ στον πίνακα 4.4 για τον θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με $-0.40\%/^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 4.2: Μηνιαίες, ετήσιες και εποχιακές μέσες τιμές παραγωγής ενέργειας, σε KWh, για θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με 0

Τοποθεσία	Ιον	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέ	Δεκ	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Ετησίως
1	24.64	29.13	46.32	59.76	71.53	80.87	88.74	79.43	57.92	43.26	28.08	22.64	76.41	249.03	632.30
2	23.05	28.40	46.74	60.97	74.20	82.33	89.79	80.41	57.07	40.35	26.07	21.11	72.56	252.53	630.49
3	27.62	32.71	52.77	67.86	80.18	87.46	93.28	85.11	63.24	46.47	32.20	25.75	86.07	265.84	694.63
4	28.33	34.44	56.22	72.93	86.70	95.52	99.75	89.98	69.02	49.50	32.64	25.53	88.30	285.26	740.57
5	24.82	30.25	50.43	66.65	83.99	92.21	98.09	86.57	62.68	44.20	27.90	22.58	77.65	276.87	690.37
6	32.11	36.93	59.65	74.44	87.92	95.87	100.83	91.32	70.35	53.29	36.97	29.77	98.81	288.02	769.45
7	23.55	30.11	48.43	64.84	79.71	85.20	92.18	83.31	60.16	41.58	26.57	21.44	75.09	260.69	657.07
8	25.54	31.26	50.16	65.27	78.57	84.86	92.47	83.64	59.69	41.35	27.09	22.40	79.19	260.97	662.30
9	23.98	29.77	48.31	65.05	78.28	85.96	93.13	84.03	58.81	39.50	26.80	21.79	75.54	263.13	655.42
10	23.27	28.39	48.15	65.52	80.89	90.11	98.18	88.47	64.49	44.69	28.84	21.77	73.43	276.76	682.76
11	26.85	31.94	51.00	66.75	81.12	90.05	96.66	87.08	62.97	45.66	30.92	24.74	83.53	273.79	695.74
12	24.39	29.53	47.71	63.70	78.53	86.75	93.10	82.67	58.92	40.56	25.40	21.28	75.20	262.52	652.54
13	29.99	36.13	56.49	71.44	84.68	93.87	98.92	89.21	67.92	48.67	33.61	27.68	93.80	282.00	738.62
14	26.34	32.65	52.20	69.66	84.71	92.29	98.06	87.24	62.79	45.00	30.29	24.30	83.29	277.59	705.54
15	29.03	34.90	56.46	73.52	87.28	96.73	101.84	91.60	72.06	52.50	35.54	28.17	92.11	290.17	759.64
16	22.31	29.24	50.26	67.70	84.55	92.19	97.83	87.24	63.09	42.73	27.14	20.38	71.93	277.26	684.65
17	25.11	30.40	49.38	64.52	78.16	85.66	92.95	83.54	59.51	40.61	26.77	22.30	77.81	262.15	658.90
18	22.78	29.47	47.06	63.91	80.68	86.39	93.99	85.01	60.95	41.34	25.84	20.11	72.37	265.40	657.54
19	27.66	33.12	53.78	69.68	82.54	90.48	96.43	87.77	63.52	45.77	30.18	25.00	85.78	274.67	705.92
20	27.53	34.10	56.18	71.90	86.83	95.29	99.46	89.18	68.85	49.74	33.37	25.73	87.37	283.93	738.16
21	28.14	33.96	54.39	70.21	85.04	93.89	99.56	88.93	65.61	46.98	32.00	25.99	88.09	282.38	724.70
22	23.95	30.35	48.03	63.15	77.20	83.68	90.70	81.78	58.83	41.65	26.38	21.52	75.82	256.16	647.22
23	24.12	29.23	45.99	60.84	75.08	83.34	90.98	80.60	57.17	40.03	25.54	21.39	74.75	254.91	634.30
24	26.18	31.31	50.36	65.76	79.47	87.23	95.05	85.79	60.60	41.03	27.81	23.26	80.75	268.07	673.85
25	25.90	32.33	53.43	70.80	87.06	95.63	101.76	91.08	69.36	49.22	31.95	24.03	82.26	288.47	732.55
26	27.18	31.95	51.04	65.73	79.73	89.78	96.85	86.37	64.14	46.15	31.47	25.49	84.62	273.00	695.88
27	28.52	33.84	54.55	69.15	82.68	91.19	97.36	86.49	64.18	47.27	32.36	26.47	88.82	275.04	714.05
28	28.70	34.06	54.09	70.16	83.81	91.23	97.59	88.41	64.79	46.14	31.81	25.38	88.14	277.23	716.18
29	24.31	30.53	47.84	62.39	75.14	82.60	89.82	82.34	58.12	41.39	26.79	21.62	76.45	254.76	642.89
30	26.68	31.60	51.90	68.20	81.53	89.98	96.70	87.39	63.51	44.27	30.46	23.98	82.26	274.07	696.19
31	22.91	27.33	45.46	60.02	73.13	80.36	87.59	79.02	55.15	38.21	25.27	20.98	71.22	246.97	615.43
32	22.82	26.64	44.39	59.05	71.72	80.64	88.90	80.76	56.27	39.36	26.43	21.19	70.65	250.30	618.17
33	24.04	29.69	49.13	65.82	81.98	88.66	93.81	83.80	58.80	40.73	25.74	21.00	74.73	266.27	663.20
34	23.37	28.90	43.64	56.82	67.98	75.70	83.67	76.08	55.02	39.70	25.64	20.54	72.81	235.46	597.07
35	20.28	26.71	45.70	62.53	77.71	82.40	91.00	82.01	58.68	39.10	23.98	18.20	65.18	255.41	628.28
36	26.18	32.05	51.27	67.16	81.59	90.67	96.43	86.23	63.14	45.51	29.58	23.59	81.81	273.33	693.39
37	28.95	34.79	56.93	73.14	87.56	96.84	100.71	90.15	70.58	51.27	34.63	26.79	90.53	287.70	752.34
38	28.38	34.77	56.44	72.69	88.10	96.33	100.76	90.34	70.45	51.25	33.92	25.99	89.15	287.43	749.42
39	22.88	30.30	50.08	68.19	85.67	90.61	97.17	87.63	63.03	43.87	28.67	21.01	74.19	275.41	689.12
40	23.61	29.92	50.88	67.39	80.88	89.83	97.39	87.64	62.38	43.63	28.68	22.32	75.85	274.86	684.55

Πίνακας 4.3: Μηνιαίες, ετήσιες και εποχιακές μέσες τιμές παραγωγής ενέργειας, σε KWh, για θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$

Τοποθεσία	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέ	Δεκ	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Ετησίως
1	24.64	29.13	46.32	59.76	71.46	80.23	87.16	77.90	57.67	43.25	28.08	22.64	76.41	245.30	628.24
2	23.05	28.40	46.74	60.97	74.09	81.30	87.49	78.31	56.63	40.34	26.07	21.11	72.56	247.09	624.49
3	27.62	32.71	52.77	67.85	79.97	86.35	91.00	83.01	62.72	46.45	32.20	25.75	86.07	260.37	688.39
4	28.33	34.44	56.22	72.93	86.70	95.44	99.33	89.44	68.96	49.50	32.64	25.53	88.30	284.21	739.47
5	24.82	30.25	50.43	66.65	83.99	91.92	97.00	85.14	62.41	44.20	27.90	22.58	77.65	274.07	687.31
6	32.11	36.93	59.65	74.39	87.30	93.48	96.37	87.16	68.86	53.15	36.96	29.77	98.81	277.02	756.14
7	23.55	30.11	48.43	64.84	79.71	84.85	89.45	81.82	60.00	41.57	26.57	21.44	75.09	257.75	653.97
8	25.54	31.26	50.16	65.20	77.76	81.91	87.61	79.30	58.40	41.27	27.09	22.40	79.19	248.82	647.90
9	23.98	29.77	48.31	64.96	77.51	83.32	88.68	80.15	57.59	39.42	26.80	21.79	75.54	252.16	642.29
10	23.27	28.39	48.15	65.52	80.79	88.85	95.24	85.64	63.88	44.67	28.84	21.77	73.43	269.73	675.01
11	26.85	31.94	51.00	66.72	80.76	88.11	92.45	82.79	61.83	45.62	30.92	24.74	83.53	263.35	683.72
12	24.39	29.53	47.71	63.69	78.30	84.85	89.45	79.26	58.07	40.53	25.40	21.28	75.20	253.56	642.47
13	29.99	36.13	56.49	71.41	84.08	91.23	94.22	84.76	66.46	48.56	33.61	27.68	93.80	270.21	724.62
14	26.34	32.65	52.20	69.66	84.71	92.25	97.80	86.62	62.70	45.00	30.29	24.30	83.29	276.68	704.53
15	29.03	34.90	56.46	73.52	87.20	95.93	99.67	89.04	71.25	52.46	35.54	28.17	92.11	284.65	753.19
16	22.31	29.24	50.26	67.70	84.55	91.95	96.91	86.27	63.00	42.73	27.14	20.38	71.93	275.12	682.43
17	25.11	30.40	49.38	64.45	77.47	82.87	88.13	79.32	58.28	40.53	26.77	22.30	77.81	250.33	645.01
18	22.78	29.47	47.06	63.90	80.53	85.00	90.78	81.57	60.07	41.31	25.84	20.11	72.37	257.35	648.43
19	27.66	33.12	53.78	69.64	81.93	87.77	91.65	83.41	62.13	45.67	30.18	25.00	85.78	262.83	691.94
20	27.53	34.10	56.18	71.90	86.83	95.12	98.75	88.37	68.74	49.74	33.37	25.73	87.37	282.24	736.35
21	28.14	33.96	54.39	70.18	84.59	91.75	95.24	84.64	64.44	46.92	32.00	25.99	88.09	271.62	712.24
22	23.95	30.35	48.03	63.09	76.65	81.31	86.20	77.37	57.56	41.58	26.38	21.52	75.82	244.88	633.99
23	24.12	29.23	45.99	60.77	74.52	80.91	86.52	76.60	56.05	39.98	25.54	21.39	74.75	244.04	621.62
24	26.18	31.31	50.36	65.66	78.54	84.11	89.82	81.14	59.07	40.91	27.81	23.26	80.75	255.07	658.18
25	25.90	32.33	53.43	70.80	87.05	95.05	100.37	89.66	69.17	49.22	31.95	24.03	82.26	285.08	728.96
26	27.18	31.95	51.04	65.70	79.35	87.99	92.95	82.45	63.11	46.10	31.46	25.49	84.62	263.39	684.77
27	28.52	33.84	54.55	69.13	82.19	88.73	92.64	81.95	62.71	47.16	32.36	26.47	88.82	263.33	700.25
28	28.70	34.06	54.09	70.14	83.38	89.22	93.82	85.03	63.86	46.09	31.81	25.38	88.14	268.07	705.59
29	24.31	30.53	47.84	62.36	74.97	81.44	87.39	80.17	57.64	41.38	26.79	21.62	76.45	249.00	636.46
30	26.68	31.60	51.90	68.20	81.46	89.42	95.40	86.24	63.30	44.26	30.46	23.98	82.26	271.05	692.89
31	22.91	27.33	45.46	60.01	72.94	79.04	84.85	76.63	54.61	38.20	25.27	20.98	71.22	240.52	608.22
32	22.82	26.64	44.39	59.05	71.65	80.13	87.68	79.71	56.08	39.36	26.43	21.19	70.65	247.52	615.13
33	24.04	29.69	49.13	65.82	81.98	88.16	92.22	82.01	58.59	40.73	25.74	21.00	74.73	262.39	659.10
34	23.37	28.90	43.64	56.82	67.97	75.46	83.02	75.36	54.91	39.70	25.64	20.54	72.81	233.84	595.32
35	20.28	26.71	45.70	62.51	77.34	80.55	87.37	78.34	57.66	39.04	23.98	18.20	65.18	246.25	617.65
36	26.18	32.05	51.27	67.12	81.20	88.58	92.05	81.76	61.85	45.44	29.58	23.59	81.81	262.40	680.66
37	28.95	34.79	56.93	73.14	87.56	96.80	100.49	89.81	70.54	51.27	34.63	26.79	90.53	287.11	751.70
38	28.38	34.77	56.44	72.69	88.10	96.26	100.50	89.91	70.42	51.25	33.92	25.99	89.15	286.67	748.63
39	22.88	30.30	50.08	68.19	85.67	90.41	96.33	86.60	62.96	43.87	28.67	21.01	74.19	273.34	686.98
40	23.61	29.92	50.88	67.36	80.41	88.08	94.28	84.91	61.56	43.57	28.68	22.32	75.85	267.27	675.58

Πίνακας 4.4: Μηνιαίες, ετήσιες και εποχιακές μέσες τιμές παραγωγής ενέργειας, σε KWh, για θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$

Τοποθεσία	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέ	Δεκ	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Ετησίως
1	24.64	29.13	46.32	59.75	71.38	79.60	85.59	76.37	57.42	43.25	28.08	22.64	76.41	241.56	624.18
2	23.05	28.40	46.74	60.96	73.98	80.26	85.19	76.21	56.19	40.33	26.07	21.11	72.56	241.66	618.49
3	27.62	32.71	52.77	67.84	79.75	85.25	88.73	80.91	62.20	46.43	32.20	25.75	86.07	254.89	682.15
4	28.33	34.44	56.22	72.93	86.70	95.36	98.90	88.91	68.90	49.50	32.64	25.53	88.30	283.16	738.36
5	24.82	30.25	50.43	66.65	83.99	91.64	95.92	83.71	62.15	44.20	27.90	22.58	77.65	271.27	684.24
6	32.11	36.93	59.65	74.33	86.68	91.10	91.92	83.00	67.37	53.02	36.95	29.77	98.81	266.02	742.82
7	23.55	30.11	48.43	64.84	79.71	84.50	89.98	80.34	59.84	41.57	26.57	21.44	75.09	254.81	650.87
8	25.54	31.26	50.16	65.12	76.95	78.96	82.75	74.96	57.11	41.19	27.09	22.40	79.19	236.67	633.49
9	23.98	29.77	48.31	64.88	76.74	80.68	84.24	76.26	56.37	39.33	26.80	21.79	75.54	241.18	629.16
10	23.27	28.39	48.15	65.52	80.68	87.59	92.29	82.82	63.27	44.66	28.84	21.77	73.43	262.71	667.25
11	26.85	31.94	51.00	66.69	80.40	86.17	88.24	78.50	60.70	45.57	30.92	24.74	83.53	252.90	671.70
12	24.39	29.53	47.71	63.67	78.07	82.95	85.81	75.86	57.23	40.50	25.40	21.28	75.20	244.61	632.40
13	29.99	36.13	56.49	71.38	83.48	88.60	89.51	80.31	65.00	48.45	33.61	27.68	93.80	258.42	710.63
14	26.34	32.65	52.20	69.66	84.71	92.22	97.54	86.00	62.60	45.00	30.29	24.30	83.29	275.76	703.52
15	29.03	34.90	56.46	73.52	87.12	95.14	97.51	86.47	70.43	52.43	35.54	28.17	92.11	279.13	746.74
16	22.31	29.24	50.26	67.70	84.55	91.70	95.99	85.30	62.91	42.73	27.14	20.38	71.93	272.99	680.21
17	25.11	30.40	49.38	64.38	76.78	80.09	83.32	75.11	57.05	40.46	26.77	22.30	77.81	238.51	631.13
18	22.78	29.47	47.06	63.89	80.39	83.60	87.58	78.14	59.19	41.28	25.84	20.11	72.37	249.31	639.33
19	27.66	33.12	53.78	69.60	81.32	85.06	86.88	79.06	60.74	45.57	30.17	25.00	85.78	250.99	677.95
20	27.53	34.10	56.18	71.90	86.83	94.95	98.03	87.56	68.63	49.74	33.37	25.73	87.37	280.54	734.55
21	28.14	33.96	54.39	70.14	84.15	89.60	90.92	80.35	63.27	46.87	31.99	25.99	88.09	260.87	699.78
22	23.95	30.35	48.03	63.03	76.09	78.93	81.71	72.97	56.28	41.52	26.38	21.52	75.82	233.60	620.75
23	24.12	29.23	45.99	60.70	73.96	78.48	82.07	72.61	54.92	39.93	25.54	21.39	74.75	233.16	608.95
24	26.18	31.31	50.36	65.57	77.62	80.99	84.59	76.49	57.55	40.80	27.81	23.26	80.75	242.07	642.52
25	25.90	32.33	53.43	70.80	87.04	94.48	98.97	88.24	68.98	49.21	31.95	24.03	82.26	281.69	725.36
26	27.18	31.95	51.04	65.68	78.97	86.20	89.04	78.53	62.07	46.06	31.46	25.49	84.62	253.77	673.67
27	28.52	33.84	54.55	69.11	81.70	86.28	87.92	77.41	61.24	47.05	32.36	26.47	88.82	251.61	686.44
28	28.70	34.06	54.09	70.11	82.96	87.22	90.04	81.65	62.92	46.05	31.81	25.38	88.14	258.91	694.99
29	24.31	30.53	47.84	62.36	74.80	80.28	84.96	78.00	57.16	41.37	26.79	21.62	76.45	243.24	630.03
30	26.68	31.60	51.90	68.20	81.39	88.85	94.10	85.09	63.08	44.26	30.46	23.98	82.26	268.04	689.59
31	22.91	27.33	45.46	59.99	72.75	77.72	82.11	74.24	54.07	38.18	25.27	20.98	71.22	234.07	601.01
32	22.82	26.64	44.39	59.05	71.59	79.62	86.46	78.66	55.89	39.35	26.43	21.			

Όπως φαίνεται στους πίνακες 4.2 και 4.3 η περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια ετησίως παράγεται στην τοποθεσία 6, στην Κρήτη. Αυτό, εκ πρώτης όψευς, φαίνεται αναμενόμενο, καθώς στο υποκεφάλαιο 3.2 αποδείχθηκε ότι το σημείο 6 δέχεται τη περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία κατά μέσο όρο ετησίως. Ωστόσο, στον πίνακα 4.4 παρατηρείται μια αλλαγή: με την περαιτέρω αύξηση του θερμοκρασιακού συντελεστή, η περισσότερη ενέργεια παράγεται πλέον στο σημείο 37, στην Ανάφη. Αυτή η αλλαγή δικαιολογείται διότι η τοποθεσία 6 έχει μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία 25.81 °C, ενώ η τοποθεσία 37 έχει 24.08 °C, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.8. Άρα, είναι πιθανό η θερμοκρασία στη Κρήτη να ξεπερνά συχνότερα τους 25 °C, μειώνοντας έτσι την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η ανάλυση αυτή υπογραμμίζει τον σημαντικό ρόλο της θερμοκρασίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ.

Επιπλέον, στον πίνακα 4.5 φαίνονται για όλους τους θερμοκρασιακούς συντελεστές, οι μέσες ετήσιες τιμές παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας για κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα της χώρας, δηλαδή η παραγωγή ενέργειας από το πάνελ όταν βρίσκεται σε ένα "μέσο" σημείο του κάθε γεωγραφικού διαμερίσματος. Στον πίνακα αυτόν παρατηρείται ότι παράγεται αισθητά λιγότερη φωτοβολταϊκή ενέργεια στα βόρεια γεωγραφικά διαμερίσματα της χώρας (Μακεδονία, Θράκη, Ήπειρος), σε σύγκριση με τα νότια (Πελοπόννησος, Νησιά Αιγαίου Πελάγους, Κρήτη), για οποιοδήποτε θερμοκρασιακό συντελεστή. Αυτό είναι λογικό, καθώς στο υποκεφάλαιο 3.2 αποδείχθηκε ότι τα βόρεια γεωγραφικά διαμερίσματα της χώρας δέχονται αισθητά λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τα νότια.

Πίνακας 4.5: Μέση ετήσια παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας (KWh) από το σύγχρονο πάνελ, με την τοποθέτηση του σε κάποιο "μέσο" σημείο κάθε γεωγραφικού διαμερίσματος της χώρας, για όλους τους θερμοκρασιακούς συντελεστές

Γεωγραφικό διαμέρισμα	a=0	a=-0.2%/°C	a=-0.4%/°C
Μακεδονία	637.80	630.63	623.45
Θράκη	642.91	633.04	623.18
Ήπειρος	662.84	654.45	646.05
Θεσσαλία	660.60	646.45	632.31
Στερεά Ελλάδα	672.28	661.14	650.01
Επτάνησα	697.96	695.92	693.88
Πελοπόννησος	711.46	701.25	691.04
Νήσοι Αιγαίου Πελάγους	725.47	722.52	719.58
Κρήτη	769.45	756.14	742.82

Ακόμη, υπολογίστηκαν για κάθε τοποθεσία οι μέσες τιμές ωριαίας παραγόμενης ενέργειας και οι τυπικές αποκλίσεις κάθε χρονοσειράς παραγωγής ενέργειας. Υπενθυμίζεται ότι οι χρονοσειρές αφορούν την περίοδο 2005-2020 και είναι σε ωριαία κλίμακα. Οι μέσες τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6 ενώ οι τυπικές αποκλίσεις στον πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.6: Μέση ωριαία παραγόμενη ενέργεια (Wh) για διάφορους θερμοκρασιακούς συντελεστές

Τοποθεσία	Μέση ωριαία παραγόμενη ενέργεια σε Wh (θερμ. συντ.= 0)	Μέση ωριαία παραγόμενη ενέργεια σε Wh (θερμ. συντ.= -0.2%)	Μέση ωριαία παραγόμενη ενέργεια σε Wh (θερμ. συντ.= -0.4%)
1	72.13	71.67	71.20
2	71.92	71.24	70.56
3	79.24	78.53	77.82
4	84.48	84.36	84.23
5	78.76	78.41	78.06
6	87.78	86.26	84.74
7	74.96	74.60	74.25
8	75.55	73.91	72.27
9	74.77	73.27	71.77
10	77.89	77.00	76.12
11	79.37	78.00	76.63
12	74.44	73.29	72.14
13	84.26	82.66	81.07
14	80.49	80.37	80.26
15	86.66	85.92	85.19
16	78.10	77.85	77.60
17	75.16	73.58	72.00
18	75.01	73.97	72.93
19	80.53	78.93	77.34
20	84.21	84.00	83.80
21	82.67	81.25	79.83
22	73.83	72.32	70.81
23	72.36	70.91	69.47
24	76.87	75.08	73.30
25	83.57	83.16	82.75
26	79.38	78.12	76.85
27	81.46	79.88	78.31
28	81.70	80.49	79.28
29	73.34	72.61	71.87
30	79.42	79.04	78.67
31	70.21	69.38	68.56
32	70.52	70.17	69.83
33	75.66	75.19	74.72
34	68.11	67.91	67.71
35	71.67	70.46	69.25
36	79.10	77.65	76.20
37	85.82	85.75	85.68
38	85.49	85.40	85.31
39	78.61	78.37	78.12
40	78.09	77.07	76.04

Πίνακας 4.7: Τυπικές αποκλίσεις χρονοσειρών ωριαίας παραγόμενης ενέργειας (Wh) για διάφορους θερμοκρασιακούς συντελεστές

Τοποθεσία	Τυπική απόκλιση σε Wh (θερμ. συντ.= 0)	Τυπική απόκλιση σε Wh (θερμ. συντ.= -0.2%)	Τυπική απόκλιση σε Wh (θερμ. συντ.= -0.4%)
1	107.63	106.63	105.69
2	107.78	106.38	105.05
3	115.39	113.95	112.59
4	119.41	119.20	118.98
5	114.50	113.82	113.16
6	122.24	119.40	116.71
7	110.46	109.78	109.11
8	110.94	107.74	104.73
9	111.42	108.42	105.59
10	113.33	111.60	109.94
11	114.79	112.11	109.57
12	110.57	108.31	106.15
13	119.58	116.59	113.77
14	115.17	114.97	114.76
15	121.76	120.37	119.03
16	114.84	114.36	113.88
17	111.80	108.71	105.80
18	110.92	108.90	106.99
19	115.49	112.43	109.53
20	118.80	118.42	118.05
21	117.95	115.24	112.67
22	109.36	106.43	103.67
23	108.39	105.51	102.80
24	113.84	110.35	107.06
25	119.45	118.70	117.97
26	114.80	112.28	109.90
27	116.43	113.43	110.59
28	117.67	115.40	113.23
29	109.64	108.15	106.73
30	115.78	115.03	114.31
31	107.77	106.04	104.41
32	107.39	106.63	105.90
33	111.41	110.50	109.60
34	104.19	103.75	103.32
35	107.98	105.56	103.26
36	114.74	111.91	109.25
37	120.90	120.77	120.64
38	120.46	120.32	120.18
39	114.53	114.07	113.63
40	114.52	112.49	110.57

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.6, η μέση ωριαία παραγόμενη ενέργεια ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με την μέση ετήσια. Δηλαδή, για θερμοκρασιακούς συντελεστές 0 και -0,20%/°C, η μεγαλύτερη μέση ωριαία παραγωγή παρατηρείται στην τοποθεσία 6, ενώ για θερμοκρασιακό συντελεστή -0,40%/°C υπερτερεί η τοποθεσία 37. Αυτό, ήταν προβλέψιμο καθώς είναι λογικό η μέση ωριαία παραγωγή ενέργειας να παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με την μέση ετήσια, επειδή επηρεάζονται από τους ίδιους παράγοντες. Συνεπώς, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών είναι η ίδια με αυτή των αποτελεσμάτων για τη μέση ετήσια παραγωγή. Αναφορικά με τον πίνακα 4.7, για θερμοκρασιακό συντελεστή 0 η μεγαλύτερη διασπορά παρατηρείται στο σημείο 6, ενώ για θερμοκρασιακούς συντελεστές -0,20%/°C και -0,40%/°C η χρονοσειρά με τη μεγαλύτερη διασπορά είναι αυτή του σημείου 37.

4.5 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ενέργειας

Η σημασία του ρόλου της θερμοκρασίας στη παραγωγή ηλιακής ενέργειας αναδείχθηκε έντονα στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 4.4. Πολλές επιστημονικές

μελέτες εξετάζουν την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ, όπως η έρευνα των Qusay Hassan et al. (2016) [28]. Σε αυτή την μελέτη, διερευνήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου που συσχετίζει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ με την θερμοκρασία των κελιών του πάνελ. Επίσης, στην εργασία αυτή αποδείχθηκε ότι η θερμοκρασία διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο κατά την καλοκαιρινή περίοδο, όπου οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν την παραγωγή ηλιακής ενέργειας περισσότερο από κάθε άλλη εποχή. Για να αποδειχθεί αυτό, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα εγκαθιστώντας ένα σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ στο πανεπιστήμιο AGH University of Science and Technology στην Πολωνία, το οποίο λειτουργούσε καθ' όλη τη διάρκεια του 2015. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μείωση της παραγωγής μπορεί να φτάσει μέχρι και 10% κατά τη διάρκεια ενός καλοκαιρινού μήνα, συγκριτικά με την ενέργεια που θα παραγόταν αν το σύστημα λειτουργούσε στις ονομαστικές του συνθήκες. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι κατά τις υπόλοιπες περιόδους, όταν η θερμοκρασία βρίσκεται πολύ κάτω από τους 20 °C, υπήρχε μια αύξηση της παραγωγής ενέργειας, συγκριτικά με την ενέργεια που θα παραγόταν αν το σύστημα λειτουργούσε στις ονομαστικές του συνθήκες. Ωστόσο, αυτή η αύξηση ήταν σχετικά μικρή και δεν μπορούσε να αντισταθμίσει τη μεγάλη μείωση της παραγωγής κατά την καλοκαιρινή περίοδο, όπου παράγεται και το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας μέσα σε ένα έτος. Συνεπώς, η αύξηση της παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας κατά τις μέρες όπου η θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλή, μπορεί να θεωρηθεί ως και αμελητέα. Επίσης, στην έρευνα των P. K. Dash et al. (2015) [29] εκτιμήθηκαν εργαστηριακά οι θερμοκρασιακοί συντελεστές διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι ο μέσος θερμοκρασιακός συντελεστής των μονοκρυσταλλικών πάνελ που συμπεριλήφθηκαν στην έρευνα ήταν $-0.446 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, των πολυκρυσταλλικών ήταν $-0.387 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, ενώ των πάνελ από τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) ήταν $-0.172 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. Συμπερασματικά, η έρευνα καταλήγει ότι τα πάνελ που κατασκευάζονται από CdTe αποτελούν την καλύτερη επιλογή για εγκατάσταση σε θερμά κλίματα. Η έννοια του θερμοκρασιακού συντελεστή ενός φωτοβολταϊκού πάνελ αναλύεται στο υποκεφάλαιο 4.1.

Θα ήταν ενδιαφέρον να εξερευνηθεί περαιτέρω η συνεισφορά του παράγοντα της θερμοκρασίας και στην παρούσα εργασία. Στον πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα ποσοστά μείωσης της μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας, σε όλες τις τοποθεσίες, λόγω της αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή. Συγκεκριμένα, η πρώτη στήλη αναφέρεται στις μειώσεις λόγω της αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από 0 σε $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$, η δεύτερη στήλη στις μειώσεις λόγω της αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$ σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$ και η τρίτη στήλη στις μειώσεις λόγω της αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από 0 σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 4.8: Ποσοστά μείωσης της μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή

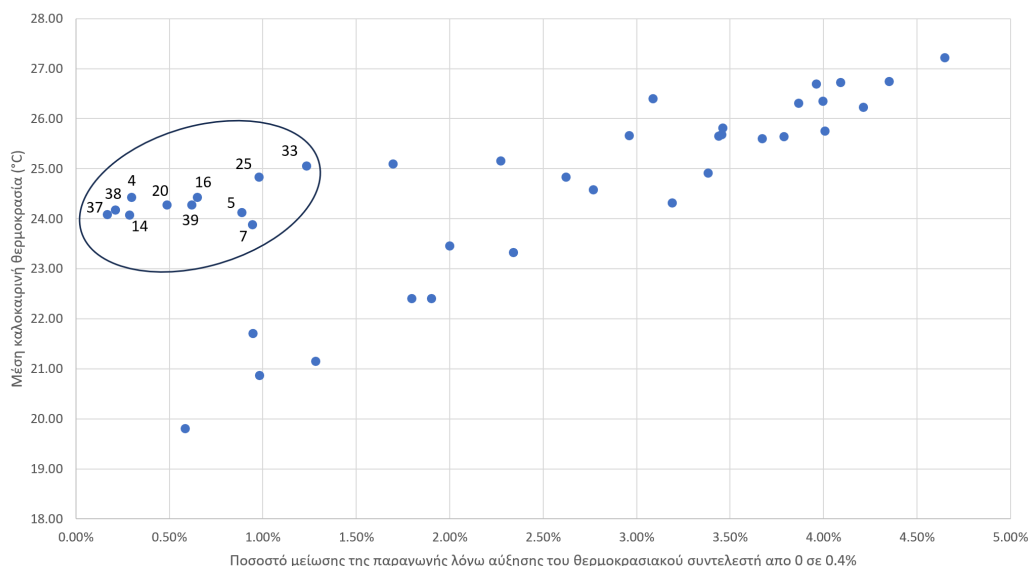
Τοποθεσία	Μειώσεις λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από 0 σε $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$	Μειώσεις λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$ σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$	Μειώσεις λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από 0 σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$
1	0.64%	0.65%	1.28%
2	0.95%	0.96%	1.90%
3	0.90%	0.91%	1.80%
4	0.15%	0.15%	0.30%
5	0.44%	0.45%	0.89%
6	1.73%	1.76%	3.46%
7	0.47%	0.47%	0.94%
8	2.18%	2.22%	4.35%
9	2.00%	2.04%	4.01%
10	1.14%	1.15%	2.27%
11	1.73%	1.76%	3.45%
12	1.54%	1.57%	3.09%
13	1.89%	1.93%	3.79%
14	0.14%	0.14%	0.29%
15	0.85%	0.86%	1.70%
16	0.32%	0.33%	0.65%
17	2.11%	2.15%	4.21%
18	1.38%	1.40%	2.77%
19	1.98%	2.02%	3.96%
20	0.24%	0.24%	0.49%
21	1.72%	1.75%	3.44%
22	2.05%	2.09%	4.09%
23	2.00%	2.04%	4.00%
24	2.32%	2.38%	4.65%
25	0.49%	0.49%	0.98%
26	1.60%	1.62%	3.19%
27	1.93%	1.97%	3.87%
28	1.48%	1.50%	2.96%
29	1.00%	1.01%	2.00%
30	0.47%	0.48%	0.95%
31	1.17%	1.18%	2.34%
32	0.49%	0.49%	0.98%
33	0.62%	0.62%	1.23%
34	0.29%	0.29%	0.59%
35	1.69%	1.72%	3.38%
36	1.84%	1.87%	3.67%
37	0.08%	0.08%	0.17%
38	0.11%	0.11%	0.21%
39	0.31%	0.31%	0.62%
40	1.31%	1.33%	2.62%

Από τον πίνακα 4.8 παρατηρείται ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης της παραγόμενης ενέργειας λόγω της αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή υπάρχουν στην τοποθεσία 24, στην Λαμία, όπου καταγράφεται και η υψηλότερη μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία. Η μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία της τοποθεσίας 24 φαίνεται στον πίνακα 3.8.

Εκ πρώτης όψεως, η μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία αποτελεί τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει την ένταση της μείωσης της παραγόμενης ενέργειας λόγω της αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή. Για να αποδειχθεί αυτό, συγκρίθηκαν οι μέσες καλοκαιρινές θερμοκρασίες σε κάθε τοποθεσία μαζί με τα ποσοστά μείωσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν ο θερμοκρασιακός συντελεστής αλλάζει από 0 σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Έτσι, σχεδιάστηκε και το αντίστοιχο διάγραμμα. Η σύγκριση των δεδομένων παρουσιάζεται στον πίνακα 4.9 ενώ στην εικόνα 4.4 απεικονίζεται το διάγραμμα.

Πίνακας 4.9: Σύγκριση μέσης καλοκαιρινής θερμοκρασίας, σε κάθε τοποθεσία, με τα ποσοστά μείωσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν ο θερμοκρασιακός συντελεστής αλλάζει από 0 σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$

Τοποθεσία	Μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Ποσοστά μείωσης λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από 0 σε $0,40\%/^{\circ}\text{C}$	Γεωγραφικό Διαμέρισμα
1	21.15	1.28%	Ήπειρος
2	22.40	1.90%	Μακεδονία
3	22.40	1.80%	Πελοπόννησος
4	24.43	0.30%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
5	24.12	0.89%	Επτάνησα
6	25.81	3.46%	Κρήτη
7	23.88	0.94%	Μακεδονία
8	26.74	4.35%	Θεσσαλία
9	25.75	4.01%	Στερεά Ελλάδα
10	25.16	2.27%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
11	25.68	3.45%	Στερεά Ελλάδα
12	26.39	3.09%	Μακεδονία
13	25.64	3.79%	Πελοπόννησος
14	24.07	0.29%	Επτάνησα
15	25.10	1.70%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
16	24.43	0.65%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
17	26.22	4.21%	Θεσσαλία
18	24.58	2.77%	Θράκη
19	26.69	3.96%	Στερεά Ελλάδα
20	24.28	0.49%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
21	25.65	3.44%	Πελοπόννησος
22	26.72	4.09%	Μακεδονία
23	26.35	4.00%	Μακεδονία
24	27.22	4.65%	Στερεά Ελλάδα
25	24.83	0.98%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
26	24.32	3.19%	Πελοπόννησος
27	26.31	3.87%	Πελοπόννησος
28	25.66	2.96%	Πελοπόννησος
29	23.45	2.00%	Μακεδονία
30	21.71	0.95%	Πελοπόννησος
31	23.32	2.34%	Μακεδονία
32	20.87	0.98%	Στερεά Ελλάδα
33	25.06	1.23%	Μακεδονία
34	19.80	0.59%	Μακεδονία
35	24.91	3.38%	Θράκη
36	25.59	3.67%	Ήπειρος
37	24.08	0.17%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
38	24.17	0.21%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
39	24.27	0.62%	Νήσοι Αιγαίου Πελάγους
40	24.83	2.62%	Στερεά Ελλάδα



Εικόνα 4.4: Σχέση μεταξύ μέσης καλοκαιρινής θερμοκρασίας και ποσοστού μείωσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν ο θερμοκρασιακός συντελεστής αλλάζει από 0 σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$

Από το διάγραμμα της εικόνας 4.4 διακρίνεται μια γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών:

όσο αυξάνεται η μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία τόσο αυξάνεται και το ποσοστό μείωσης της παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα σημεία που αποκλίνουν από αυτή την τάση. Συγκεκριμένα, τα 11 σημεία που βρίσκονται μέσα στον κύκλο, παρά τις σχετικά υψηλές μέσες καλοκαιρινές θερμοκρασίες τους, δεν εμφανίζουν αντίστοιχα μεγάλες μειώσεις στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σημεία που εμπεριέχονται μέσα στον κύκλο είναι τα 4,5,7,14,16,20,25,33,37,38, και 39 και έχουν όλα ένα κοινό στοιχείο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1 βρίσκονται όλα πολύ κοντά σε ανοιχτή θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα είναι όλα τα σημεία των Νήσων Αιγαίου, εκτός από αυτά στην Ρόδο και τη Λέσβο, τα 2 σημεία των επτανήσων, ένα σημείο στη Χαλκιδική και ένα στη Καβάλα. Η απόκλιση των σημείων αυτών από τα υπόλοιπα, ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι σε τέτοιου είδους τοποθεσίες, οι καλοκαιρινές θερμοκρασίες είναι σχετικά σταθερές, κοντά στους 24°C με 25°C, δηλαδή κοντά στη μέση καλοκαιρινή τιμή τους, και σπάνια ξεπερνάνε κατά πολύ τη τιμή των 25°C. Επομένως, ο βαθμός απόδοσης των πάνελ μειώνεται ελάχιστα έως καθόλου και η μείωση στην παραγωγή ενέργειας δεν είναι μεγάλη. Βέβαια, αυτό μένει να επιβεβαιωθεί. Έτσι, βρέθηκαν οι τυπικές αποκλίσεις θερμοκρασίας για τους καλοκαιρινούς μήνες και επιβεβαιώθηκε ο παραπάνω ισχυρισμός. Στον πίνακα 4.10 παρατηρείται ότι τα σημεία 4,5,14,16,20,25,33,37,38, και 39 έχουν τις 10 μικρότερες τυπικές αποκλίσεις από όλα τα υπόλοιπα σημεία, ενώ το σημείο 7 έχει την 12η μικρότερη. Αναλυτικότερα, οι τιμές αυτών κυμαίνονται από 1.19 °C έως 2.68 °C ενώ των υπολοίπων σημείων από 2.29 °C έως 5.29 °C. Άρα, οι θερμοκρασίες σε αυτά τα 11 σημεία, το καλοκαίρι, είναι πιο πιθανό να παραμένουν σχετικά κοντά στους 25 °C, και σπάνια να ξεπερνάνε κατά πολύ τη τιμή αυτή.

Πίνακας 4.10: Τυπικές αποκλίσεις χρονοσειρών θερμοκρασίας, με τιμές μόνο του καλοκαιριού (°C)

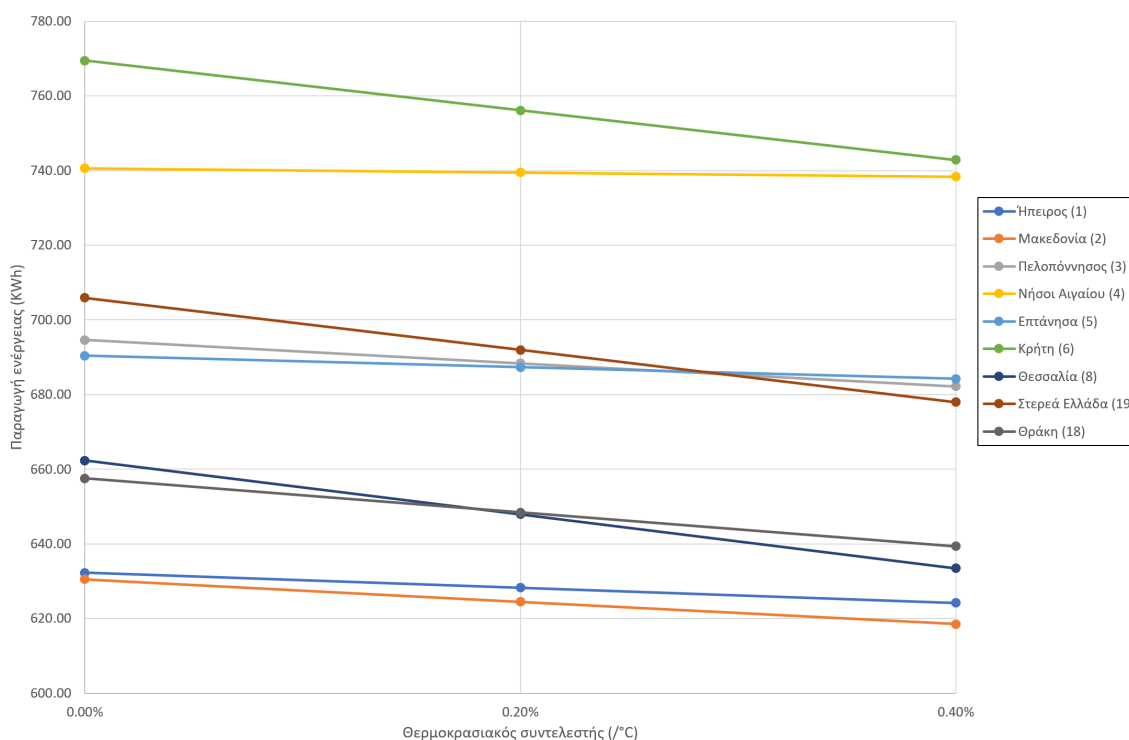
Τοποθεσία	Τυπική απόκλιση χρονοσειράς θερμοκρασίας, με τιμές μόνο του καλοκαιριού (°C)
1	4.99
2	5.29
3	4.89
4	1.32
5	2.14
6	4.10
7	2.68
8	4.49
9	4.85
10	3.39
11	4.26
12	3.33
13	4.83
14	1.37
15	2.29
16	1.75
17	5.08
18	4.61
19	3.94
20	1.58
21	4.28
22	4.49
23	4.82
24	4.39
25	2.15
26	4.99
27	4.16
28	4.05
29	4.51
30	4.03
31	5.15
32	4.52
33	2.07
34	4.57
35	4.95
36	4.48
37	1.19
38	1.45
39	1.87
40	4.00

Αν εξαιρεθούν τα 11 παραπάνω σημεία και εφαρμοστεί η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης για να βρεθεί η σχέση μεταξύ της μέσης καλοκαιρινής θερμοκρασίας και του ποσοστού μείωσης, θα προκύψει η εξίσωση 4.3.

$$y = 160.85x + 20 \quad (4.3)$$

Όπου y η μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία και x το ποσοστό μείωσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν ο θερμοκρασιακός συντελεστής αλλάζει από 0 σε $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Η γραμμική παλινδρόμηση επιτεύχθηκε μέσω του προγράμματος Microsoft Excel και βρέθηκε ότι το R^2 ισούται με 0.85.

Επίσης, δημιουργήθηκε διάγραμμα το οποίο απεικονίζει τη μείωση της μέσης ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή, σε 8 τοποθεσίες. Η κάθε τοποθεσία αντιπροσωπεύει ένα γεωγραφικό διαμέρισμα και πιο συγκεκριμένα συμπεριλήφθηκαν η τοποθεσία 1 για την Ήπειρο, η τοποθεσία 2 για την Μακεδονία, η τοποθεσία 3 για την Πελοπόννησο, η τοποθεσία 4 για τις Νήσους Αιγαίου Πελάγους, η τοποθεσία 5 για τα Επτάνησα, η τοποθεσία 6 για την Κρήτη, η τοποθεσία 8 για την Θεσσαλία, η τοποθεσία 18 για την Θράκη και η τοποθεσία 19 για την Στερεά Ελλάδα. Τα ονόματα κάθε τοποθεσίας φαίνονται στον πίνακα 3.1 ενώ η ακριβής θέση τους στην Ελλάδα στην εικόνα 3.1. Το διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5: Μείωση της μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή στα 9 γεωγραφικά διαμερίσματα στην Ελλάδα. Στο υπόμνημα δίπλα από κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα σε παρένθεση φαίνεται η τοποθεσία που το αντιπροσωπεύει

Από το διάγραμμα της εικόνας 4.5 παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη μείωση συμβαίνει στη Κρήτη, ενώ η μικρότερη στις Νήσους Αιγαίου Πελάγους. Αυτό, συμφωνεί με το προηγού-

μενο συμπέρασμα που εξήχθη στο υποκεφάλαιο 4.4 για την Ανάφη, το νησί του Αιγαίου Πελάγους, το οποίο ξεπερνάει την Κρήτη και όλες τις υπόλοιπες τοποθεσίες, όσον αφορά τη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας, για θερμοκρασιακό συντελεστή $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$.

Κεφάλαιο 5

Η Αξία των Αποκεντρωμένων Συστημάτων στην Παραγωγή Φωτοβολταϊκής Ενέργειας: Μια Προσέγγιση Monte Carlo

5.1 Η έννοια του αποκεντρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος

Σε αντίθεση με τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής, τα αποκεντρωμένα εκτείνονται σε πολλές τοποθεσίες, επιτρέποντας έτσι την τοπική παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας. Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετημένα σε διάφορα σημεία, διασκορπισμένα σε ένα ευρύ γεωγραφικό φάσμα.

Η αξία των αποκεντρωμένων συστημάτων αναδεικνύεται στο υποκεφάλαιο 2.4 της βιβλιογραφικής επισκόπησης, όπου πολλές επιστημονικές μελέτες υπογραμμίζουν τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης, όχι μόνο στη φωτοβολταϊκή ενέργεια αλλά και σε άλλες ανανεώσιμες πηγές γενικότερα. Η βιβλιογραφία τονίζει ότι τα αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα σε διάφορους τομείς σε σύγκριση με τα συγκεντρωτικά, όπως στον κοινωνικό και τον τεχνικό τομέα. Τα πλεονεκτήματα αυτά αναδεικνύονται μέσα από την έρευνα του Sapan Thapar (2022) [14] και περιγράφονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 2.4. Όμως, ειδικά όταν τα αποκεντρωμένα συστήματα συνδυάζονται με τα συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα τους πολλαπλασιάζονται, καθώς μπορούν να συνεισφέρουν στη μείωση του κόστους λειτουργίας και των απωλειών ενέργειας, καθώς και στην αύξηση της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας με την αποσυμφόρηση του δικτύου [26]. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις έννοιες της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 2.3.

5.2 Η περιγραφή της μεθόδου Monte Carlo

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα των αποκεντρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων να μειώσουν την αβεβαιότητα στη παραγωγή ηλιακής ενέργειας, η οποία προκύπτει λόγω παραγόντων με μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι κλιματικές συνθήκες, τα αιωρούμενα σωματίδια ή ακόμα και η υγρασία που υπάρχει στην εκάστοτε τοποθεσία [3]. Για να επιτευχθεί αυτό, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση τύπου Monte Carlo, δηλαδή μια ανάλυση που περιλαμβάνει τυχαιότητα [30]. Οι μέθοδοι τύπου Monte Carlo εισήχθησαν για πρώτη φορά από μαθηματικούς και φυσικούς για τη μελέτη φαινομένων πυρηνικής φυσικής τη δεκαετία του 1940 και αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη των υδρολογικών προσομοιώσεων [30].

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε περιλαμβάνει τη μελέτη 40 διαφορετικών σεναρίων. Το πρώτο σενάριο, το οποίο ονομάστηκε "Βασικό" σενάριο δεν εμπεριέχει τυχαιότητα, και περιλαμβάνει την θεωρητική εγκατάσταση ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος σε κάθε μία από τις 40 τοποθεσίες που έχουν επιλεγεί, και την εκτίμηση των συντελεστών δυναμικότητας τους. Τα υπόλοιπα 39 σενάρια περιλαμβάνουν την εγκατάσταση αποκεντρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε τυχαίους συνδυασμούς τοποθεσιών, με διαφορετικό αριθμό τοποθεσιών σε κάθε σενάριο και ισάριθμα πάνελ σε κάθε τοποθεσία, και την εκτίμηση των συντελεστών δυναμικότητας τους. Για παράδειγμα, στο πρώτο από τα 39 σενάρια υπολογίστηκαν 1000 τυχαίοι συνδυασμοί από δυάδες και υπολογίστηκε ο συντελεστής δυναμικότητας κάθε συνδυασμού, στο δεύτερο από τα 39 σενάρια υπολογίστηκαν 1000 τυχαίοι συνδυασμοί από τριάδες και έγινε η εκτίμηση των συντελεστών δυναμικότητας τους, κ.ο.κ. Στο προτελευταίο σενάριο υπολογίστηκαν 1000 τυχαίοι συνδυασμοί από 39 τοποθεσίες και έγινε ο υπολογισμός του παράγοντα C_f για κάθε συνδυασμό, ενώ στο τελευταίο σενάριο υπολογίστηκε ο παράγοντας C_f ενός αποκεντρωμένου συστήματος που εκτείνεται και στις 40 τοποθεσίες. Ο παράγοντας C_f υπολογίστηκε ως ο λόγος της μέσης ετήσιας πραγματικής παραγωγής ενέργειας του συστήματος προς τη δυνητική ενέργεια που θα είχε παραχθεί ετησίως με συνεχή λειτουργία του έργου στην ονομαστική του ισχύ. Λεπτομερέστερες πληροφορίες σχετικά με τον ορισμό του συντελεστή δυναμικότητας παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 2.3. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι υπολογίστηκαν μόνο 1000 τυχαίοι συνδυασμοί σε κάθε σενάριο, αν και σε κάποιες περιπτώσεις οι διαφορετικοί συνδυασμοί είναι πολύ περισσότεροι, διότι διαφορετικά θα αυξανόταν σημαντικά ο υπολογιστικός φόρτος. Για παράδειγμα, οι διαφορετικοί συνδυασμοί 5 τοποθεσιών από ένα δείγμα 40 τοποθεσιών, χωρίς επανάληψη κάποιας τοποθεσίας σε κάποιο συνδυασμό, υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος Microsoft Excel και της εντολής "COMBIN" και βρέθηκαν 658008 [31].

Ο στόχος της ανάλυσης ήταν να αποδειχθεί ότι όσο αυξάνεται η κατανομή των φωτοβολταϊκών πάνελ σε περισσότερες τοποθεσίες, η διασπορά του συντελεστή δυναμικότητας στους διάφορους συνδυασμούς μειώνεται. Άρα, όσο πιο διασκορπισμένο είναι το αποκεντρωμένο σύστημα στη χώρα, τόσο περισσότερο ο συντελεστής δυναμικότητας διατηρείται κοντά σε μια συγκεκριμένη μέση τιμή για οποιοδήποτε συνδυασμό τοποθεσιών, μειώνοντας έτσι την αβεβαιότητα. Ο λόγος που εκτιμήθηκαν οι συντελεστές δυναμικότητας σε αυτή την έρευνα και όχι οι παραγωγές ενέργειας κάθε συστήματος είναι ότι ο συντελεστής δυναμικότητας αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος που δεν εξαρτάται από τον αριθμό των πάνελ που συνθέτουν το φωτοβολταϊκό σύστημα. Αυτό γίνεται κατανοητό και από τον ορισμό του συντελεστή δυναμικότητας, ο οποίος παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο 2.3.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την υπόθεση πως τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται αποκλειστικά από πάνελ τύπου SunPower Maxeon 3,

δηλαδή το φωτοβολταϊκό πάνελ που χρησιμοποιήθηκε και στο κεφάλαιο 4. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής του πάνελ θεωρήθηκε ίσος με $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$.

Τέλος, αυτή η ανάλυση τύπου Monte Carlo πραγματοποιήθηκε μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R. Ένα απόσπασμα του κώδικα φαίνεται στην εικόνα 5.1. Στο απόσπασμα αυτό δημιουργούνται οι χίλιοι τυχαίοι συνδυασμοί τοποθεσιών από δυάδες, οι χίλιοι τυχαίοι συνδυασμοί τοποθεσιών από τριάδες κ.ο.κ., ενώ παράλληλα υπολογίζεται ο συντελεστής δυναμικότητας για κάθε συνδυασμό.

```
51 sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias<-0
52 cf2<-matrix(0,nrow = 1000,ncol=shmeia-2)
53 for (k in 2:shmeia-1){
54   for (n in 1:1000){
55     i <- sample(1:shmeia, k)
56     for (r in 1:k){
57       sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias<-mesh_ethsia_paragwgh_energeias[i[r]]+sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias
58     }
59     cf2[n,k-1]<-sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias/(k*onomastikh_ixsys*24*365)
60     sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias<-0
61   }
62 }
```

Εικόνα 5.1: Απόσπασμα του κώδικα στην R για την ανάλυση τύπου Monte Carlo

Όπως φαίνεται στον κώδικα, αρχικά, δημιουργείται ένα μητρώο με 1000 σειρές και 38 στήλες. Σε κάθε στήλη του μητρώου αυτού θα αποθηκευτούν οι 1000 συντελεστές δυναμικότητας, που προέρχονται από τους τυχαίους συνδυασμούς κάποιου σεναρίου από τα 38 που εμπειρεύουν τυχαιότητα. Συνεπώς, η πρώτη στήλη θα αναφέρεται στις δυάδες, η δεύτερη στήλη στις τριάδες, η τρίτη στήλη στις τετράδες κ.ο.κ. Η γέννηση των τυχαίων συνδυασμών πραγματοποιείται με μια επανάληψη τύπου "for" όπως φαίνεται στον κώδικα.

5.3 Τα αποτελέσματα της μεθόδου

Αρχικά, εξετάστηκε το "Βασικό" σενάριο. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 5.2, στο "Βασικό" σενάριο υπολογίστηκαν οι συντελεστές δυναμικότητας των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων, υποθέτοντας ότι υπήρχε από ένα σε κάθε μία από τις 40 τοποθεσίες. Ο συντελεστής δυναμικότητας για κάθε τοποθεσία φαίνεται στον πίνακα 5.1. Ο υψηλότερος συντελεστής δυναμικότητας παρατηρείται στην τοποθεσία 37, στην Ανάφη, κάτι το οποίο αναμενόταν και από τα αποτελέσματα μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας του κεφαλαίου 4. Ο λόγος που η Ανάφη έχει την υψηλότερη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας από ένα πάνελ SunPower Maxeon 3 με θερμοκρασιακό συντελεστή $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$ αναλύεται εκτενώς στο υποκεφάλαιο 4.4. Ο μικρότερος συντελεστής δυναμικότητας παρατηρείται στην τοποθεσία 34 στα σύνορα Βουλγαρίας, δηλαδή το σημείο με την λιγότερη μέση ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Οι μέσες ετήσιες τιμές προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας φαίνονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 5.1: Συντελεστές δυναμικότητας σε ετήσια κλίμακα, στο "Βασικό" σενάριο

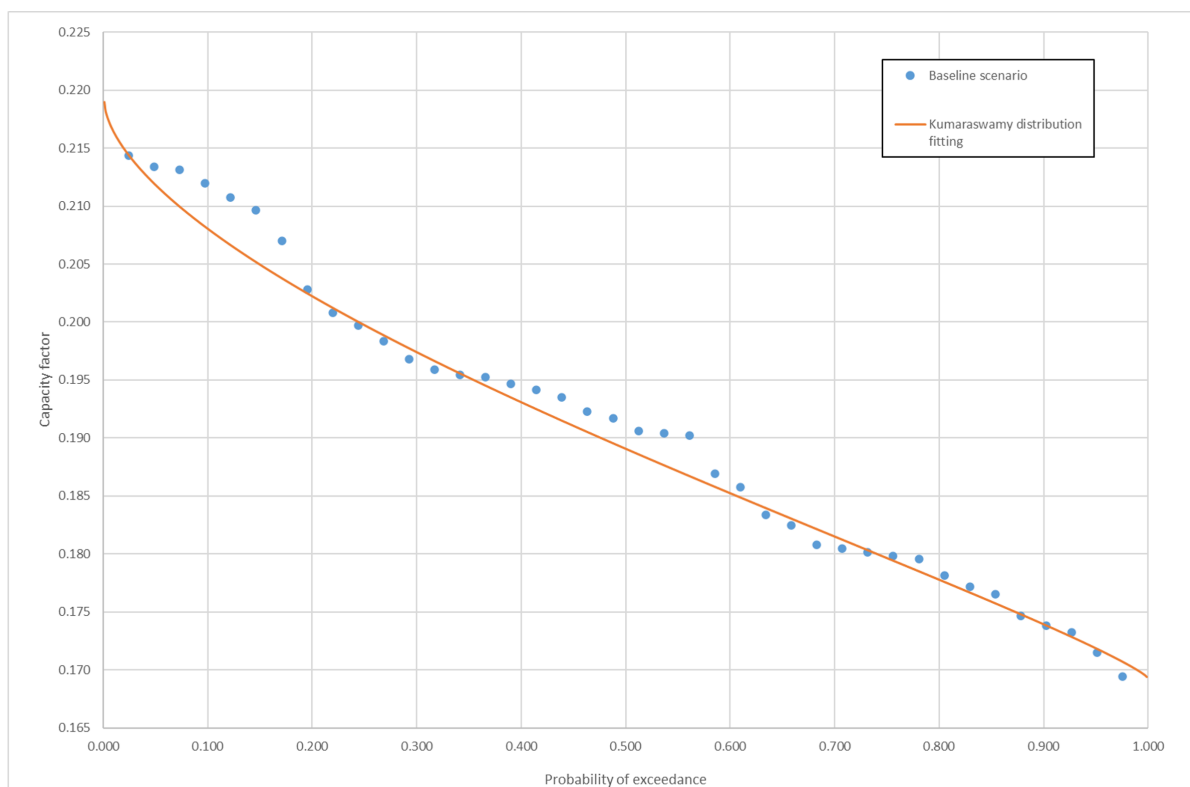
Τοποθεσία	C_f (σε ετήσια κλίμακα)
1	0.178
2	0.177
3	0.195
4	0.211
5	0.195
6	0.212
7	0.186
8	0.181
9	0.180
10	0.190
11	0.192
12	0.180
13	0.203
14	0.201
15	0.213
16	0.194
17	0.180
18	0.182
19	0.193
20	0.210
21	0.200
22	0.177
23	0.174
24	0.183
25	0.207
26	0.192
27	0.196
28	0.198
29	0.180
30	0.197
31	0.172
32	0.175
33	0.187
34	0.169
35	0.173
36	0.191
37	0.214
38	0.213
39	0.195
40	0.190

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οι συντελεστές δυναμικότητας ταξινομήθηκαν σε φθίνουσα σειρά για να κατασκευαστεί η εμπειρική καμπύλη πιθανοτήτων υπέρβασης. Στο υποκεφάλαιο 3.3 περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος κατασκευής αυτής της καμπύλης η οποία βασίζεται στην εξίσωση 3.1 (σχέση Weibull) [23]. Έπειτα, για να παραχθεί ένα συνεχές μοντέλο χωρικής μεταβλητότητας, επιχειρήθηκε να προσαρμοστεί όσο καλύτερα γίνεται στα δεδομένα, η εξίσωση 5.1, που προκύπτει από την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy. Ο Kumaraswamy, το 1976 [32], ανέπτυξε μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζει σε τυχαίες διεργασίες, των οποίων οι μεταβλητές είναι άνω και κάτω φραγμένες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το άνω όριο είναι ο θεωρητικά μέγιστος συντελεστής δυναμικότητας ενώ το κάτω όριο είναι ο θεωρητικά ελάχιστος συντελεστής δυναμικότητας.

$$C_f = C_{fmin} + \left(1 - (1 - p^a)^b\right) (C_{fmax} - C_{fmin}) \quad (5.1)$$

Στην εξίσωση 5.1, ο παράγοντας C_f είναι ο συντελεστής δυναμικότητας, C_{fmin} είναι το θεωρητικά κατώτατο όριο του συντελεστή δυναμικότητας, C_{fmax} είναι το θεωρητικά ανώτατο όριο του συντελεστή δυναμικότητας, τα a και b είναι κάποιες παράμετροι που μεταβάλλονται έτσι ώστε να προσαρμοστεί ορθά η εξίσωση στα αρχικά δεδομένα, και p είναι η πιθανότητα υπέρβασης. Ο σκοπός αυτής της εξίσωσης είναι: με σταθερές τις παραμέτρους C_{fmin} και C_{fmax} και γνωρίζοντας τις τιμές a , b , καθώς και τις τιμές των πιθανοτήτων υπέρβασης, να μπορεί να γίνει η όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση των αρχικών συντελεστών δυναμικότητας.

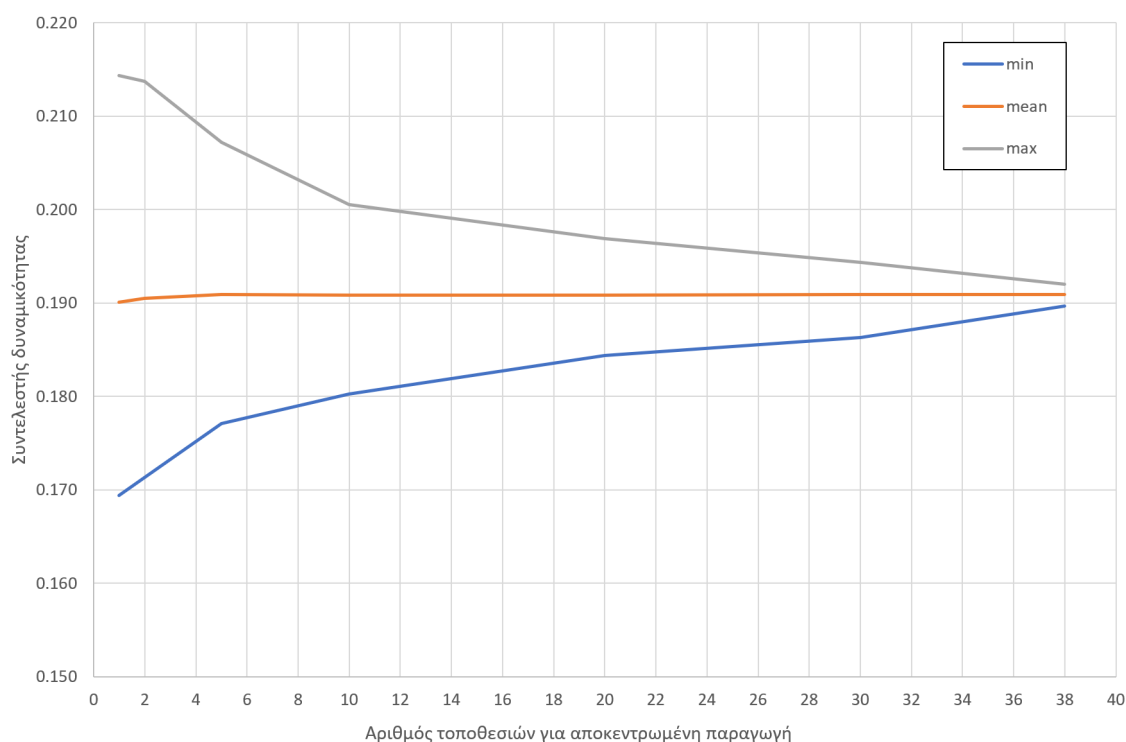
Για να βρεθούν οι παράμετροι a , b χρησιμοποιήθηκε εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης μέσω του προγράμματος Microsoft Excel. Ο στόχος της βελτιστοποίησης ήταν η ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των C_f της εξίσωσης και των αρχικών C_f . Οι παράγοντες C_{fmin} και C_{fmax} ήταν γνωστοί από τους αρχικούς συντελεστές δυναμικότητας. Αφού βρέθηκαν αυτές οι παράμετροι μπορούσε πλέον να γίνει στο ίδιο διάγραμμα η σχεδίαση της προσαρμοσμένης καμπύλης που εξήχθη από την εξίσωση, με τα σημεία που εκφράζουν τη σχέση των αρχικών C_f με τις πιθανότητες υπέρβασης τους. Το διάγραμμα αυτό φαίνεται στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Συντελεστές δυναμικότητας συναρτήσει των πιθανοτήτων υπέρβασης, στο "Βασικό" σενάριο, και η προσαρμοσμένη καμπύλη που προκύπτει από την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy

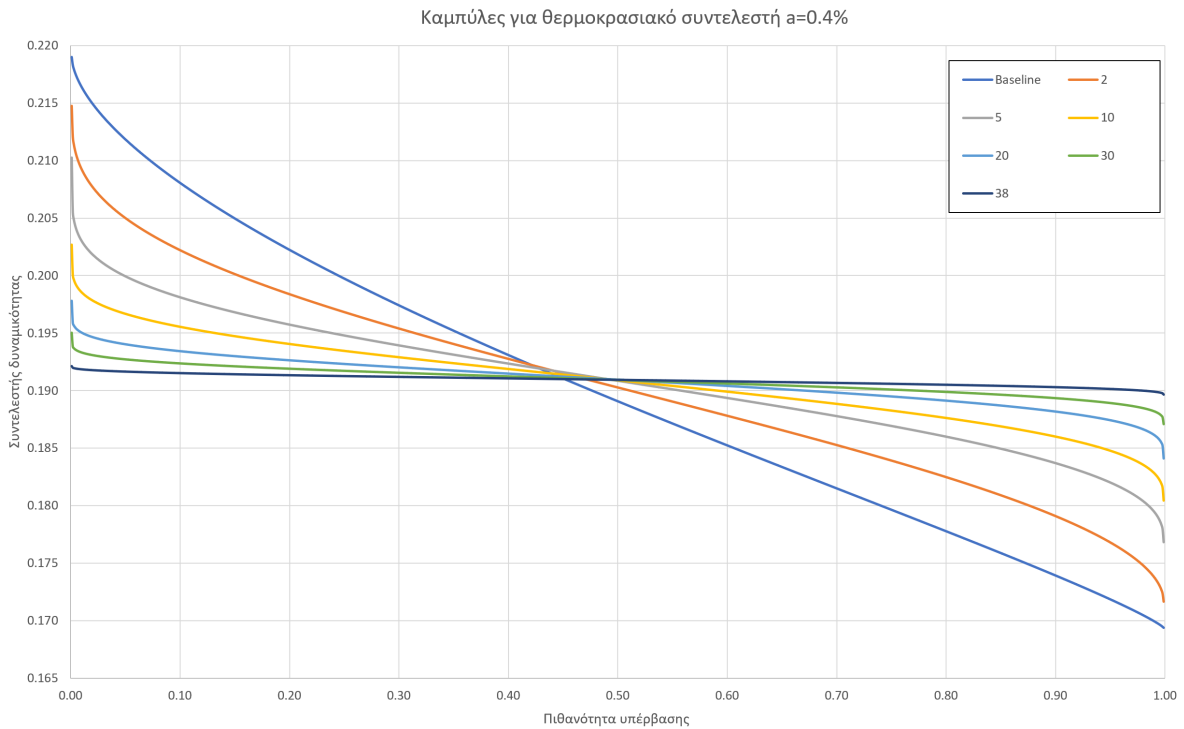
Στη συνέχεια, μελετήθηκαν τα υπόλοιπα 39 σενάρια. Υπολογίστηκαν οι συντελεστές δυναμικότητας κάθε τυχαίου συνδυασμού και κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με το σενάριο στο οποίο ανήκουν. Με πιο απλά λόγια, διακριτοποιήθηκαν οι συντελεστές δυναμικότητας που αφορούσαν αποκεντρωμένα συστήματα με πάνελ σε 2 τοποθεσίες, διακριτοποιήθηκαν οι συντελεστές δυναμικότητας που αφορούσαν αποκεντρωμένα συστήματα με πάνελ σε 3 τοποθεσίες, σε 4 τοποθεσίες κ.ο.κ. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.3 παρατίθενται οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες τιμές του συντελεστή δυναμικότητας για κάθε αριθμό τοποθεσιών που

χρησιμοποιούνται για αποκεντρωμένη παραγωγή. Επίσης, φαίνεται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή του συντελεστή δυναμικότητας για το "Βασικό" σενάριο, δηλαδή το σενάριο που σχετίζεται με παραγωγή από συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτές οι τιμές απεικονίζονται στο διάγραμμα για αριθμό τοποθεσιών ίσο με 1.



Εικόνα 5.3: Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές συντελεστών δυναμικότητας για κάθε αριθμό τοποθεσιών που χρησιμοποιούνται για αποκεντρωμένη παραγωγή, καθώς και η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή των συντελεστών δυναμικότητας για το "Βασικό" σενάριο

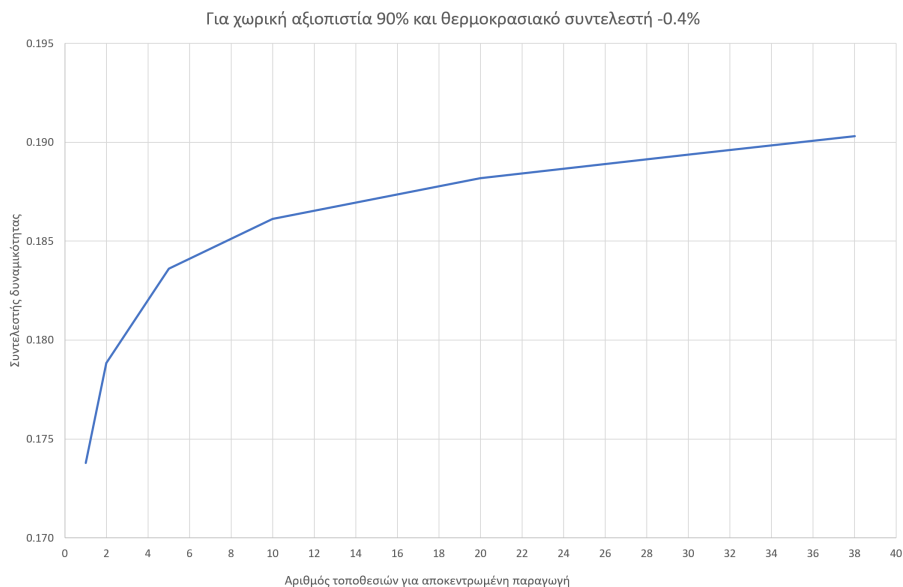
Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα της εικόνας 5.3, όσο αυξάνεται ο αριθμός των τοποθεσιών, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του παράγοντα C_f πλησιάζουν ολοένα και περισσότερο την μέση τιμή του, δηλαδή η διασπορά μειώνεται. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση της αβεβαιότητας, καθώς γίνεται πιο προβλέψιμη η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβαίνει διότι, σε αντίθεση με την παραγωγή ενέργειας από συγκεντρωτικά συστήματα, στην αποκεντρωμένη παραγωγή, παράγοντες που συνήθως μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγή ενέργειας, όπως η νεφοκάλυψη, η θερμοκρασία ή τα αιωρούμενα σωματίδια, είναι λιγότερο πιθανό να επηρεάζουν ταυτόχρονα πολλές διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές [26]. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και στο διάγραμμα της εικόνας 5.4. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται, για τα 7 από τα 40 σενάρια, οι προσαρμοσμένες καμπύλες που προέκυψαν από τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy. Συγκεκριμένα, τα σενάρια είναι το "Βασικό", και αυτά που αναφέρονται σε αποκεντρωμένα συστήματα 2 τοποθεσιών, 5 τοποθεσιών, 10 τοποθεσιών, 20 τοποθεσιών, 30 τοποθεσιών και 38 τοποθεσιών. Οι καμπύλες αυτές δημιουργήθηκαν με τον ίδιο τρόπο που δημιουργήθηκε και αυτή του "Βασικού" σεναρίου στο διάγραμμα της εικόνας 5.2.



Εικόνα 5.4: Προσαρμοσμένες Καμπύλες για 7 σενάρια

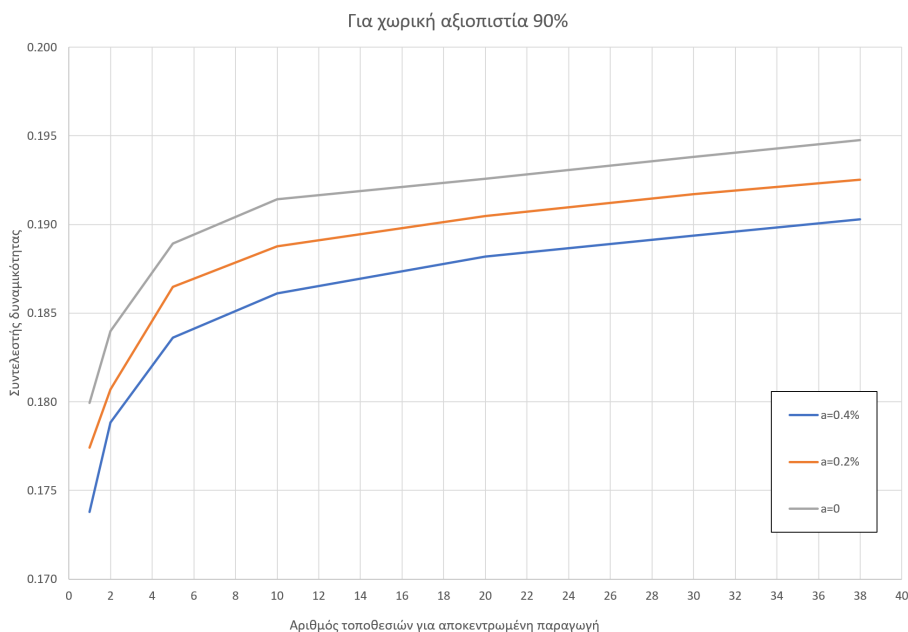
Αναλυτικότερα, στο διάγραμμα της εικόνας 5.4 παρατηρείται το ίδιο μοτίβο, δηλαδή όσο αυξάνεται ο αριθμός των τοποθεσιών, οι καμπύλες αρχίζουν και γίνονται όλο και λιγότερο απότομες, συνεπώς η διασπορά και συνεπακόλουθα η αβεβαιότητα μειώνονται. Επίσης, φαίνεται πως για υψηλές τιμές της πιθανότητας υπέρβασης, όσο αυξάνεται ο διασκορπισμός των φωτοβολταϊκών πάνελ που απαρτίζουν ένα αποκεντρωμένο σύστημα, τόσο πιο πολύ αυξάνεται και ο συντελεστής δυναμικότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα υπέρβασης σε αυτό το διάγραμμα ταυτίζεται με την έννοια της χωρικής αξιοπιστίας. Αυτό συμβαίνει διότι και οι δύο όροι εκφράζουν, για μια συγκεκριμένη τιμή C_f , τη πιθανότητα να επιλεγθεί ένας συνδυασμός τοποθεσιών με συντελεστή δυναμικότητας μεγαλύτερο ή ίσο αυτής της τιμής. Συνεπώς, στα πιο διασκορπισμένα συστήματα, είναι υψηλότερος ο εγγυημένος συντελεστής δυναμικότητας, άρα και η εγγυημένη παραγωγή ενέργειας. Το αντίθετο παρατηρείται για χαμηλές τιμές χωρικής αξιοπιστίας, όπου αυτή τη φορά τους μεγαλύτερους συντελεστές δυναμικότητας τους έχουν τα λιγότερο διασκορπισμένα συστήματα.

Για να γίνουν πιο κατανοητά τα αποτελέσματα και να φανεί καλύτερα ο ρόλος της κλίμακας στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας, δημιουργήθηκε το διάγραμμα της εικόνας 5.5. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται, για χωρική αξιοπιστία ίση με 90%, η σχέση μεταξύ του συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή. Από το διάγραμμα, φαίνεται πιο καθαρά η αύξηση του παράγοντα C_f όταν αυξάνεται ο αριθμός των τοποθεσιών.



Εικόνα 5.5: Η σχέση μεταξύ του συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή, για χωρική αξιοπιστία ίση με 90%

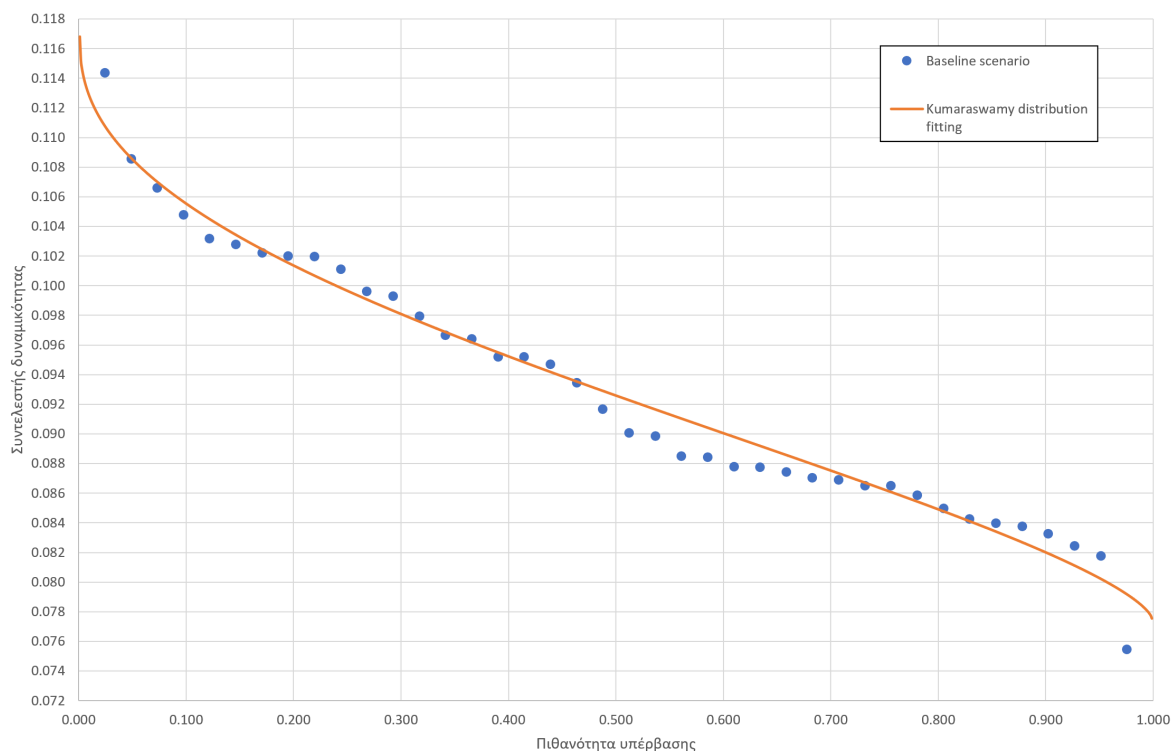
Επιπλέον, για να γίνει αντιληπτή η επίδραση της θερμοκρασίας στους συντελεστές δυναμικότητας, η παραπάνω ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για θερμοκρασιακούς συντελεστές 0 και $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.6 φαίνονται 3 καμπύλες όπου η κάθε μια αντιστοιχεί σε έναν θερμοκρασιακό συντελεστή και εκφράζει, για χωρική αξιοπιστία ίση με 90%, τη σχέση μεταξύ του συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή. Σε αυτό παρατηρείται, ότι η διαφορά μεταξύ των καμπυλών προσεγγίζει τη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιακών συντελεστών, δηλαδή 0.2%. Επίσης, όπως ήταν λογικό, όσο αυξάνεται ο θερμοκρασιακός συντελεστής, μειώνονται οι συντελεστές δυναμικότητας.



Εικόνα 5.6: Η σχέση μεταξύ του συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή, για χωρική αξιοπιστία 90% και όλους τους θερμοκρασιακούς συντελεστές

5.4 Τα αποτελέσματα της μεθόδου αποκλειστικά για τον χειμώνα

Η μέθοδος Monte Carlo θα πραγματοποιηθεί ξανά, αποκλειστικά για τον χειμώνα και για θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Αρχικά, εξετάστηκε το "Βασικό" σενάριο. Όπως και προηγουμένως υπολογίστηκαν οι συντελεστές δυναμικότητας των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων, υποθέτοντας ότι υπήρχε από ένα σε κάθε μία από τις 40 τοποθεσίες. Ωστόσο, αυτή τη φορά οι συντελεστές δυναμικότητας αφορούσαν μόνο την εποχή του χειμώνα, δηλαδή εκτιμήθηκαν ως ο λόγος της μέσης πραγματικής χειμερινής παραγωγής ενέργειας προς την δυνητική ενέργεια που θα είχε παραχθεί μέσα στον χειμώνα με συνεχή λειτουργία του έργου στην ονομαστική του ισχύ. Οι χειμερινοί συντελεστές δυναμικότητας φαίνονται στον πίνακα 5.2 και όπως ήταν φυσιολογικό είναι πιο χαμηλοί από αυτούς που αναφέρονται σε ετήσια κλίμακα. Ο υψηλότερος συντελεστής δυναμικότητας παρατηρείται στην τοποθεσία 6, στην Κρήτη, κάτι το οποίο αναμενόταν και από τα αποτελέσματα μέσης χειμερινής παραγωγής ενέργειας για θερμοκρασιακό συντελεστή $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται στον πίνακα 4.4. Είναι γεγονός, πως η θερμοκρασία μέσα στον χειμώνα δεν διαδραματίζει κάποιο σημαντικό ρόλο στη παραγωγή ενέργειας καθώς σπάνια ξεπερνάει τους 25°C . Συνεπώς, ο θερμοκρασιακός συντελεστής δεν επηρεάζει έντονα τους συντελεστές δυναμικότητας. Σύμφωνα με τον πίνακα 5.2, ο μικρότερος συντελεστής δυναμικότητας παρατηρείται στην τοποθεσία 35, στην Ορεστιάδα της Θράκης. Επίσης, στην εικόνα 5.7 απεικονίζονται οι χειμερινοί συντελεστές δυναμικότητας συναρτήσει των πιθανοτήτων υπέρβασης, στο "Βασικό" σενάριο, και η προσαρμοσμένη καμπύλη που προκύπτει από την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy.

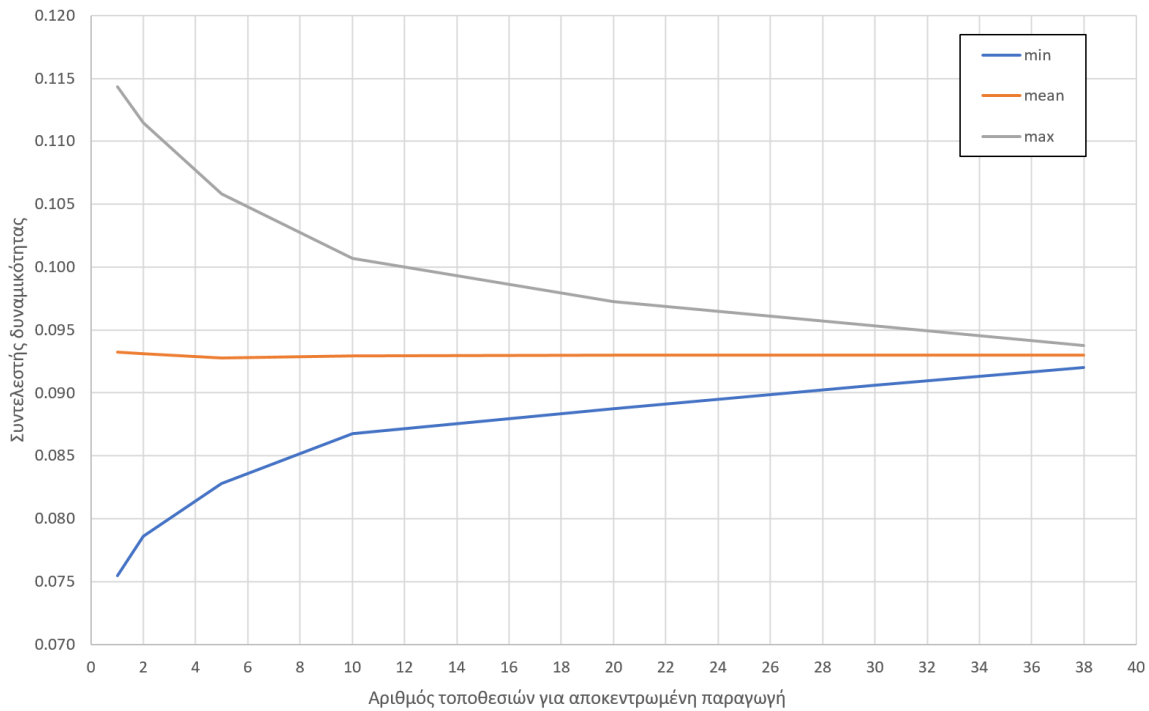


Εικόνα 5.7: Χειμερινοί συντελεστές δυναμικότητας συναρτήσει των πιθανοτήτων υπέρβασης, στο "Βασικό" σενάριο, και η προσαρμοσμένη καμπύλη που προκύπτει από την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy

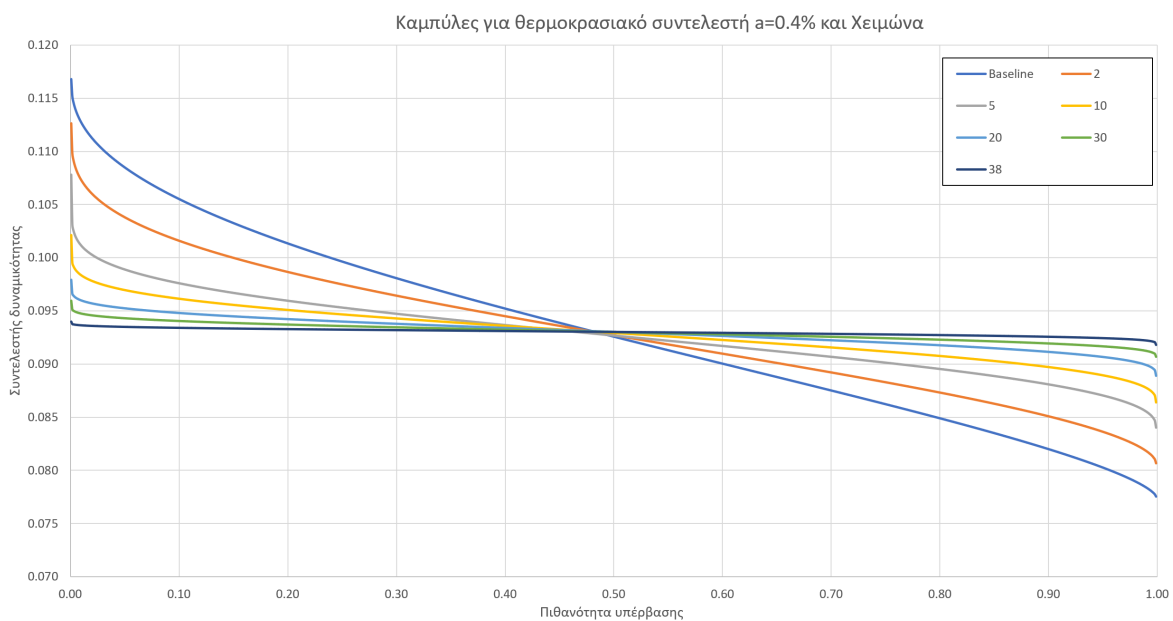
Πίνακας 5.2: Χειμερινοί συντελεστές δυναμικότητας, στο "Βασικό" σενάριο

Τοποθεσία	C _f (για τον χειμώνα)
1	0.088
2	0.084
3	0.100
4	0.102
5	0.090
6	0.114
7	0.087
8	0.092
9	0.087
10	0.085
11	0.097
12	0.087
13	0.109
14	0.096
15	0.107
16	0.083
17	0.090
18	0.084
19	0.099
20	0.101
21	0.102
22	0.088
23	0.087
24	0.093
25	0.095
26	0.098
27	0.103
28	0.102
29	0.088
30	0.095
31	0.082
32	0.082
33	0.086
34	0.084
35	0.075
36	0.095
37	0.105
38	0.103
39	0.086
40	0.088

Στην συνέχεια εξετάστηκαν τα υπόλοιπα 39 σενάρια. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.8 παρατίθενται οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες τιμές του χειμερινού συντελεστή δυναμικότητας για κάθε αριθμό τοποθεσιών που χρησιμοποιούνται για αποκεντρωμένη παραγωγή. Επίσης, φαίνεται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή του χειμερινού συντελεστή δυναμικότητας για το "Βασικό" σενάριο, δηλαδή το σενάριο που σχετίζεται με παραγωγή από συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Επιπλέον, σχεδιάστηκε και το διάγραμμα της εικόνας 5.9 στο οποίο παρουσιάζονται, για τα 7 από τα 40 σενάρια, οι προσαρμοσμένες καμπύλες που προέκυψαν από τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy. Τα σενάρια που συμπεριλήφθηκαν είναι τα ίδια με αυτά του διαγράμματος 5.4. Όπως ήταν αναμενόμενο, και στα δύο διαγράμματα, η φύση των αποτελεσμάτων είναι η ίδια με αυτή των αποτελεσμάτων που αναφέρονται σε ετήσια κλιμακα, με τη μόνη διαφορά ότι οι συντελεστές δυναμικότητας αυτή τη φορά είναι αρκετά πιο χαμηλοί, καθώς αναφέρονται μόνο στον χειμώνα. Ο λόγος για τον οποίο μείωνεται η διασπορά των συντελεστών δυναμικότητας, άρα και η αβεβαιότητα, όσο πιο διασκορπισμένο είναι το αποκεντρωμένο σύστημα, παραμένει ο ίδιος.



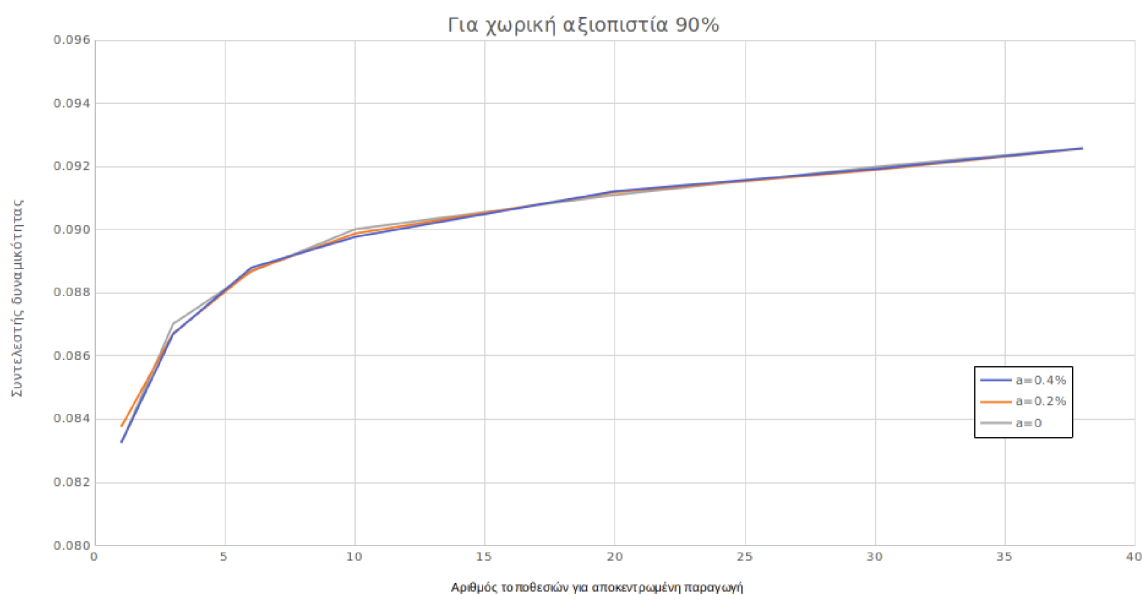
Εικόνα 5.8: Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές συντελεστών δυναμικότητας για κάθε αριθμό τοποθεσιών που χρησιμοποιούνται για αποκεντρωμένη παραγωγή, καθώς και η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή των συντελεστών δυναμικότητας για το "Βασικό" σενάριο. Όλα τα αποτελέσματα αφορούν τον χειμώνα.



Εικόνα 5.9: Προσαρμοσμένες Καμπύλες για 7 σενάρια, για τον χειμώνα

Ακόμη, για να αναδειχθεί η αμελητέα επίδραση της θερμοκρασίας στους συντελεστές δυναμικότητας κατά τους χειμερινούς μήνες, δημιουργήθηκε το διάγραμμα της εικόνας 5.10. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται 3 καμπύλες, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν θερμοκρασιακό συντελεστή και εκφράζει, για χωρική αξιοπιστία ίση με 90%, τη σχέση μεταξύ του συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή. Παρατηρείται ότι οι 3 καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, γεγονός που υποδηλώνει

ότι η αύξηση του θερμοκρασιακού συντελεστή δεν μειώνει καθόλου τους συντελεστές δυναμικότητας.



Εικόνα 5.10: Η σχέση μεταξύ του χειμερινού συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή, για χωρική αξιοπιστία 90% και όλους τους θερμοκρασιακούς συντελεστές

5.5 Τα αποτελέσματα της μεθόδου αποκλειστικά για το καλοκαίρι

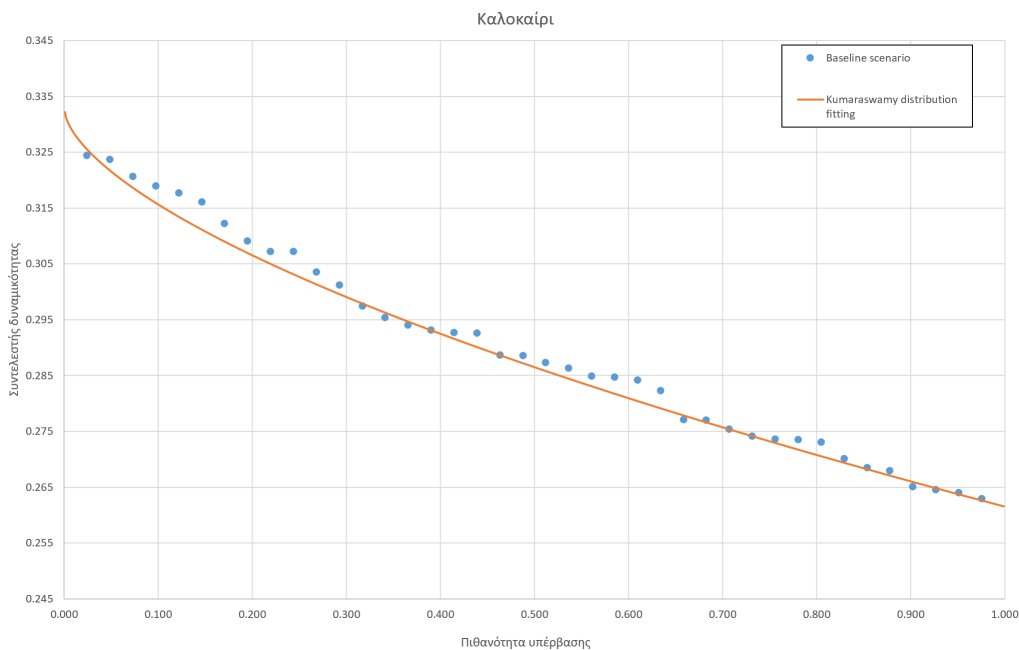
Η μέθοδος Monte Carlo πραγματοποιήθηκε ξανά, αυτή τη φορά αποκλειστικά για το καλοκαίρι, για θερμοκρασιακό συντελεστή ίσο με $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Αρχικά, εξετάστηκε το "Βασικό" σενάριο, του οποίου οι συντελεστές δυναμικότητας αφορούσαν μόνο την εποχή του καλοκαιριού, δηλαδή εκτιμήθηκαν ως ο λόγος της μέσης πραγματικής καλοκαιρινής παραγωγής ενέργειας προς την δυνητική ενέργεια που θα είχε παραχθεί μέσα στο καλοκαίρι με συνεχή λειτουργία του έργου στην ονομαστική του ισχύ. Οι καλοκαιρινοί συντελεστές δυναμικότητας του "Βασικού" σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3 και όπως ήταν φυσιολογικό, είναι πιο υψηλοί από αυτούς που αναφέρονται σε ετήσια κλίμακα. Ο υψηλότερος συντελεστής δυναμικότητας παρατηρείται στην τοποθεσία 37, στην Ανάφη, κάτι που ήταν αναμενόμενο από τα αποτελέσματα μέσης καλοκαιρινής παραγωγής ενέργειας για θερμοκρασιακό συντελεστή $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται στον πίνακα 4.4.

Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη παραγωγή ενέργειας, καθώς είναι η μόνη εποχή κατά την οποία η θερμοκρασία ξεπερνά συχνά τους 25°C . Συνεπώς, είναι λογικό ο υψηλότερος συντελεστής δυναμικότητας να αλλάζει ανάλογα με την εποχή των υπολογισμών. Έτσι, ενώ τον χειμώνα ο υψηλότερος συντελεστής δυναμικότητας ήταν στην Κρήτη, το καλοκαίρι βρίσκεται στην Ανάφη. Περισσότερη ανάλυση σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας στις παραγωγές ενέργειας στην Ανάφη και την Κρήτη υπάρχει στο υποκεφάλαιο 4.4. Επίσης, σύμφωνα με τον πίνακα 5.3, ο μικρότερος συντελεστής δυναμικότητας παρατηρείται στην τοποθεσία 34, στα σύνορα Βουλγαρίας.

Πίνακας 5.3: Καλοκαιρινοί συντελεστές δυναμικότητας, στο "Βασικό" σενάριο

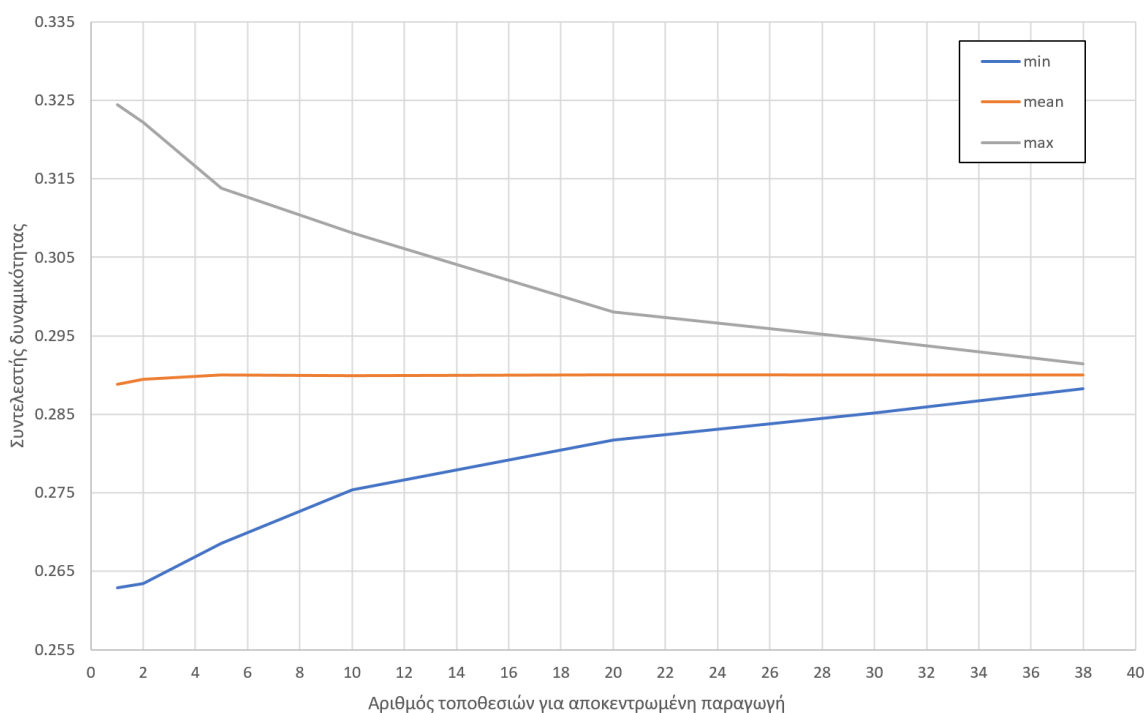
Τοποθεσία	C_T (για τον κειμόνα)
1	0.274
2	0.274
3	0.289
4	0.321
5	0.307
6	0.301
7	0.289
8	0.268
9	0.273
10	0.297
11	0.286
12	0.277
13	0.293
14	0.312
15	0.316
16	0.309
17	0.270
18	0.282
19	0.284
20	0.318
21	0.295
22	0.264
23	0.264
24	0.274
25	0.319
26	0.287
27	0.285
28	0.293
29	0.275
30	0.303
31	0.265
32	0.277
33	0.293
34	0.263
35	0.268
36	0.285
37	0.324
38	0.324
39	0.307
40	0.294

Στην εικόνα 5.11 απεικονίζονται οι καλοκαιρινοί συντελεστές δυναμικότητας συναρτήσεως των πιθανοτήτων υπέρβασης, στο "Βασικό" σενάριο, και η προσαρμοσμένη καμπύλη που προκύπτει από την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy.

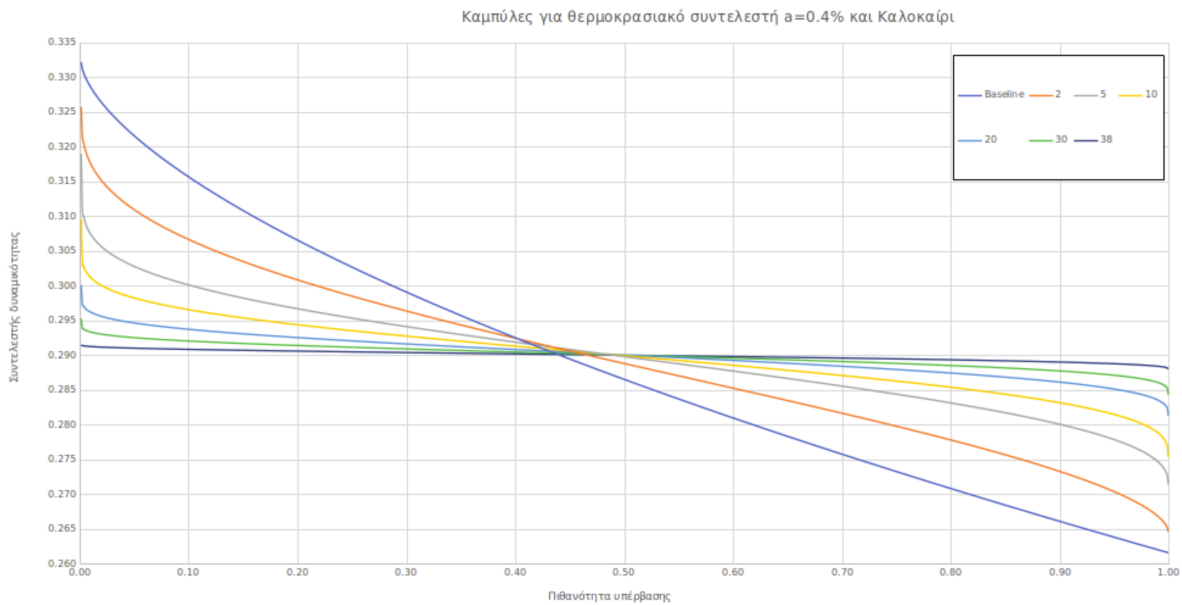


Εικόνα 5.11: Καλοκαιρινοί συντελεστές δυναμικότητας συναρτήσεως των πιθανοτήτων υπέρβασης, στο "Βασικό" σενάριο, και η προσαρμοσμένη καμπύλη που προκύπτει από την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy

Στην συνέχεια εξετάστηκαν τα υπόλοιπα 39 σενάρια. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.12 παρατίθενται οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες τιμές του καλοκαιρινού συντελεστή δυναμικότητας για κάθε αριθμό τοποθεσιών που χρησιμοποιούνται για αποκεντρωμένη παραγωγή. Επίσης, φαίνεται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή του καλοκαιρινού συντελεστή δυναμικότητας για το "Βασικό" σενάριο, δηλαδή το σενάριο που σχετίζεται με παραγωγή από συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Ακόμη, σχεδιάστηκε και το διάγραμμα της εικόνας 5.13 στο οποίο παρουσιάζονται, για τα 7 από τα 40 σενάρια, οι προσαρμοσμένες καμπύλες που προέκυψαν από τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy. Τα σενάρια που συμπεριλήφθηκαν είναι τα ίδια με αυτά του διαγράμματος 5.4. Όπως ήταν αναμενόμενο, και στα δύο διαγράμματα, η φύση των αποτελεσμάτων είναι η ίδια με αυτή των αποτελεσμάτων που αναφέρονται σε ετήσια κλιμακα, με τη μόνη διαφορά ότι οι συντελεστές δυναμικότητας αυτή τη φορά είναι αρκετά πιο υψηλοί, καθώς αναφέρονται μόνο στο καλοκαίρι.

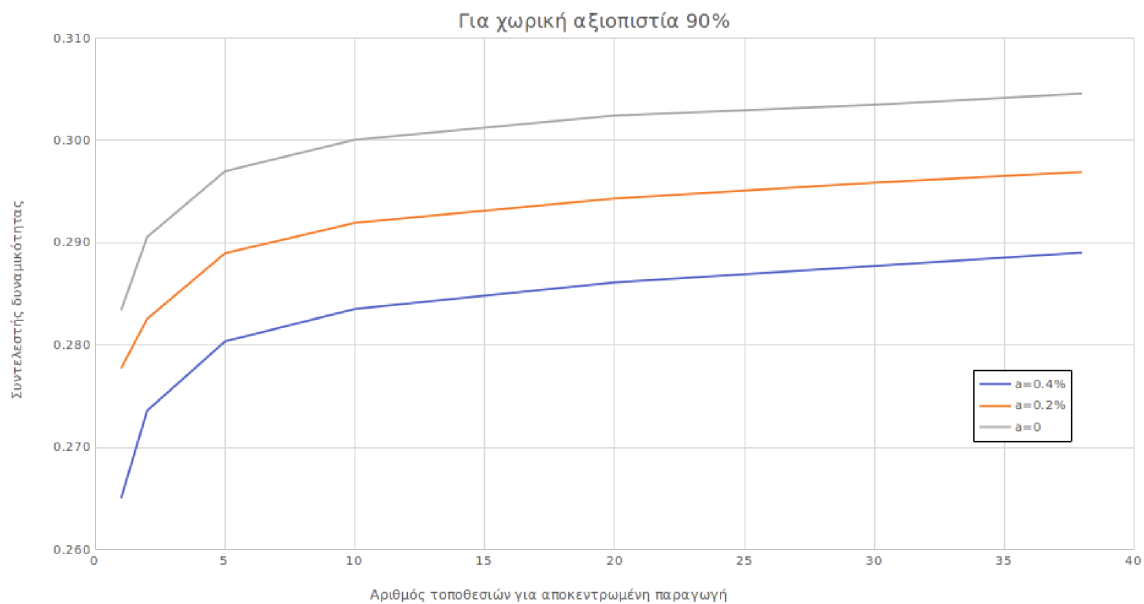


Εικόνα 5.12: Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές συντελεστών δυναμικότητας για κάθε αριθμό τοποθεσιών που χρησιμοποιούνται για αποκεντρωμένη παραγωγή, καθώς και η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή των συντελεστών δυναμικότητας για το "Βασικό" σενάριο. Όλα τα αποτελέσματα αφορούν το καλοκαίρι.



Εικόνα 5.13: Προσαρμοσμένες Καμπύλες για 7 σενάρια, για το καλοκαίρι

Επιπλέον, για να αναδειχθεί η σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στους συντελεστές δυναμικότητας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, δημιουργήθηκε το διάγραμμα της εικόνας 5.14. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται 3 καμπύλες, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν θερμοκρασιακό συντελεστή και εκφράζει, για χωρική αξιοπιστία ίση με 90%, τη σχέση μεταξύ του συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή. Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των 3 καμπυλών, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αύξηση του θερμοκρασιακού συντελεστή μειώνει σημαντικά τους καλοκαιρινούς συντελεστές δυναμικότητας.



Εικόνα 5.14: Η σχέση μεταξύ του καλοκαιρινού συντελεστή δυναμικότητας και του αριθμού τοποθεσιών για αποκεντρωμένη παραγωγή, για χωρική αξιοπιστία 90% και όλους τους θερμοκρασιακούς συντελεστές

Κεφάλαιο 6

Σύνοψη, Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

6.1 Σύνοψη

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκαν 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες από όλη την Ελλάδα και συλλέχθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας για αυτές από τη διαδικτυακή πλατφόρμα PVGIS. Τα δεδομένα αυτά μελετήθηκαν, αναλύθηκαν και επικυρώθηκαν με στατιστική αντιπαραβολή των μετεωρολογικών δειγμάτων τριών επίγειων σταθμών. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα δορυφορικά δεδομένα, υπολογίστηκε η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας για καθεμία από τις 40 επιλεγμένες τοποθεσίες, υποθέτοντας την εγκατάσταση ενός σύγχρονου φωτοβολταϊκού πάνελ σε καθεμία από αυτές. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν λαμβάνοντας αρχικά υπόψη μόνο την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και έπειτα εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτά. Τέλος, μέσω μιας προσέγγισης Monte Carlo παρήχθησαν χωρικές πιθανοτικές σχέσεις που εκφράζουν νόμους κλίμακας για τον συντελεστή δυναμικότητας, που αποτελεί ένα καθολικό μέτρο επίδοσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι αναλύσεις κατέδειξαν ότι τα αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, σε αντίθεση με τα συγκεντρωτικά, είναι ικανά να μειώσουν την αβεβαιότητα που υπάρχει στη παραγωγή ηλιακής ενέργειας, παρέχοντας μάλιστα στατιστικά συνεπείς ποσοστικές εκτιμήσεις της υπόψη μείωσης.

6.2 Συμπεράσματα

6.2.1 Τα δεδομένα από τη βάση δεδομένων PVGIS

Όπως φάνηκε από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3, τα δορυφορικά δεδομένα θερμοκρασίας που παρέχει η πλατφόρμα PVGIS είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά από πλευράς εγκυρότητας. Αντίστοιχα, τα δορυφορικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας είναι επίσης έγκυρα, αν και όχι στο ίδιο επίπεδο με αυτά της θερμοκρασίας. Παρ' όλα αυτά,

χρησιμοποιώντας δεδομένα από κοντινούς επίγειους σταθμούς στη τοποθεσία ενδιαφέροντος, μπορούν να βελτιωθούν και να αποκτήσουν ένα παραπλήσιο στατιστικό "Προφίλ" με αυτό των πραγματικών τιμών προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας της ευρύτερης περιοχής. Επιπλέον, είναι γεγονός πως η πλατφόρμα PVGIS δεν παρέχει δεδομένα για μεμονωμένα σημεία αλλά για συγκεκριμένα κελιά πλέγματος. Αξιοποιώντας δεδομένα από κοντινούς επίγειους σταθμούς, αποδείχθηκε πως μπορεί να βρεθεί ένας γραμμικός συνδυασμός των δορυφορικών δεδομένων που περικλείουν ένα τυχαίο σημείο, που θα εξασφαλίζει μια ικανοποιητική σημειακή εκτίμηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο έδαφος (μέθοδος BLUE). Εξάλλου, στη παρούσα έρευνα, δεν είναι απαραίτητο να βρεθεί η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στις ακριβείς τοποθεσίες που έχουν επιλεγεί, αλλά στην ευρύτερη περιοχή τους. Σε κάθε περίπτωση, ακόμα και αν δεν υπάρχουν επίγειοι σταθμοί, η διαδικτυακή βάση δεδομένων PVGIS είναι αρκετά έγκυρη και καλύπτει ένα μεγάλο κενό δεδομένων προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα.

6.2.2 Η ηλιακή ακτινοβολία και η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ελλάδα

Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα τη περισσότερη ολική ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα, κατά μέσο όρο ετησίως, τη δέχεται το σημείο 6 που βρίσκεται στη Κρήτη (219.5 W/m^2), ενώ τη λιγότερη τη δέχεται το σημείο 34 που βρίσκεται στα σύνορα μεταξύ Ελλάδος και Βουλγαρίας, δηλαδή στη βόρεια Μακεδονία. Όπως ήταν αναμενόμενο, το σημείο 6 είναι το νοτιότερο από τα 40 αντιπροσωπευτικά σημεία της έρευνας ενώ το σημείο 34 είναι το δεύτερο βορειότερο. Η μεγάλη διαφορά στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεταξύ του νότιου και του βόρειου τμήματος της χώρας αποτυπώνεται στον πίνακα 3.3, όπου φαίνεται ότι τα βόρεια γεωγραφικά διαμερίσματα (Θράκη, Μακεδονία, Ήπειρος) δέχονται αισθητά λιγότερη ακτινοβολία σε σύγκριση με τα νότια (Πελοπόννησος, Νησιά Αιγαίου Πελάγους, Κρήτη). Το ίδιο μοτίβο παρατηρείται και στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας, όπου το σύγχρονο φωτοβολταϊκό πάνελ SunPower Maxeon 3, ισχύος 400 W και βαθμού απόδοσης 22.6%, παράγει κατά μέσο όρο ετησίως, αρκετά λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια στα βόρεια γεωγραφικά διαμερίσματα της χώρας σε σύγκριση με τα νότια, ήτοι 640 KWh περίπου στα βόρεια γεωγραφικά διαμερίσματα έναντι 730 KWh στα νότια (οι τιμές αυτές αναφέρονται σε θερμοκρασιακό συντελεστή $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$, όπου είναι και ο θερμοκρασιακός συντελεστής που έχουν τα σύγχρονα φωτοβολταϊκά πάνελ). Η διαφορά στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας μεταξύ του νότιου και του βόρειου τμήματος της χώρας αποτυπώνεται στον πίνακα 4.5.

6.2.3 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας

Εξετάζοντας διαφορετικές τεχνολογίες πάνελ, με θερμοκρασιακούς συντελεστές κυμαινόμενους από 0 (ιδεατή περίπτωση) σε $-0,20\%/^{\circ}\text{C}$ (σύγχρονα πάνελ) έως και $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$ (παλαιές τεχνολογίες), αξιολογήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. Για παράδειγμα, αποδείχθηκε ότι ένα σύγχρονο πάνελ, που ιδεατά δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία, παράγει την περισσότερη ενέργεια στην ενδοχώρα της Κρήτης, όμως το ίδιο πάνελ με θερμοκρασιακό συντελεστή $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$, παράγει τη περισσότερη ενέργεια στην Ανάφη, ένα νησί του Αιγαίου Πελάγους. Αυτό οφείλεται στον υψηλό θερμοκρασιακό

συντελεστή και στο γεγονός ότι η θερμοκρασία στην ενδοχώρα της Κρήτης, φαίνεται να ξεπερνά πολύ συχνότερα τους 25 °C σε σχέση με την Ανάφη. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μια γραμμική σχέση (Εξίσωση 4.3) μεταξύ της μέσης καλοκαιρινής θερμοκρασίας κάποιας περιοχής και του ποσοστού μείωσης στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας από ένα πάνελ του οποίου αυξάνεται ο θερμοκρασιακός συντελεστής. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι όσο αυξάνεται η μεταβλητή της μέσης καλοκαιρινής θερμοκρασίας, αυξάνεται γραμμικά και το ποσοστό μείωσης της παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας για αύξηση του θερμοκρασιακού συντελεστή του πάνελ από 0 σε -0,40%/°C σύμφωνα με την εξίσωση 4.3. Εξαιρέση αποτελούν οι τοποθεσίες που βρίσκονται πολύ κοντά σε ανοιχτή θάλασσα, οι οποίες δεν φαίνεται να ακολουθούν αυτή τη σχέση. Οι τοποθεσίες αυτές αν και έχουν σχετικά υψηλές μέσες καλοκαιρινές θερμοκρασίες, δεν εμφανίζουν αντίστοιχα μεγάλες μειώσεις στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει επειδή οι θερμοκρασίες σε εκείνες τις περιοχές παραμένουν σχετικά σταθερές κοντά στους 24-25 °C κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, λόγω της θαλάσσιας αύρας, και σπάνια ξεπερνούν σημαντικά το όριο των 25 °C. Τέλος, η μεγαλύτερη μείωση στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή παρατηρήθηκε στην ενδοχώρα της Κρήτης, ενώ η μικρότερη μείωση στις Νήσους Αιγαίου Πελάγους, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι τα νησιά του Αιγαίου Πελάγους συνδυάζουν μικρή επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας και υψηλή προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς, αποτελούν τις λιγότερο ευαίσθητες τοποθεσίες στη χώρα, ως προς την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή. Σημειώνεται βεβαίως ότι, με τη βελτίωση της τεχνολογίας, τα σύγχρονα συστήματα έχουν ολοένα και πιο χαμηλούς θερμοκρασιακούς συντελεστές.

6.2.4 Η αξία των αποκεντρωμένων συστημάτων στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφορά στην σημασία των αποκεντρωμένων συστημάτων στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. Η μεθοδολογία Monte Carlo που αναπτύχθηκε, απέδειξε, μέσω στατιστικών νόμων κλίμακας, ότι όσο πιο διασκορπισμένο είναι ένα σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ σε περισσότερες γεωγραφικές τοποθεσίες, τόσο πιο προβλέψιμη είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση της αβεβαιότητας στη παραγωγή η οποία προκύπτει λόγω παραγόντων με έντονη χωρική μεταβλητότητα, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η τοπογραφία της εκάστοτε περιοχής, τα αιωρούμενα σωματίδια και η υγρασία. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι όσο πιο διασκορπισμένο είναι ένα αποκεντρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλους βαθμούς χωρικής αξιοπιστίας. Ακόμη, όπως αναμενόταν, αποδείχθηκε ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα η επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι αμελητέα, ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού είναι σημαντική.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελέτη αυτή αποτελεί μια βάση για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο. Σε μελλοντικές έρευνες, θα μπορούσαν συμπεριληφθούν περισσότερα σημεία τα οποία θα αντιπροσωπεύουν καλύτερα την ελληνική επικράτεια. Επιπλέον, ενώ στη παρούσα διπλωματική εργασία αποδείχθηκε ότι τα αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, σε σύγκριση με τα συγκεν-

τρωτικά, είναι ικανά να αποδώσουν περισσότερη φωτοβολταϊκή ενέργεια με υψηλή χωρική αξιοπιστία, σε μία μελλοντική έρευνα, θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει η διερεύνηση συνδυαστικά με την έννοια της χρονικής αξιοπιστίας. Ακόμη, θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη στην εκτίμηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ο παράγοντας της τοπογραφίας (κλίσεις, προσανατολισμός, σκίαση από φυσικά και τεχνητά εμπόδια), ο οποίος είναι καθοριστικός. Επίσης, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη έρευνα και σε άλλες περιοχές, με διαφορετικό ανάγλυφο και διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά ώστε να διαπιστωθεί αν εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] United Nations. What is renewable energy?
- [2] Mamassis N. and Efstratiadis A. Solar energy, course notes: Renewable energy and hydroelectric works, ntua. 2022.
- [3] Mamassis N., Efstratiadis A., and I.-G. Apostolidou. Topography-adjusted solar radiation indices and their importance in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4):756–775, 2012.
- [4] Harry D. Kambezidis. The solar radiation climate of greece. *Climate*, 9(12):183, 2021.
- [5] Mamassis N. and Efstratiadis A. Solar energy, course notes: Introduction to energy technology, ntua. 2021.
- [6] B. McManus. The mystery flaw of solar panels, real engineering, youtube. 2020.
- [7] Φ. Μαλτέζος. Αποτίμηση Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Σταθμών. *Itia Ntua, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, 2013.
- [8] Γκριντζιά Αικατερίνη. Αποτίμηση Λειτουργίας Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού. *Itia Ntua, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, 2023.
- [9] Efstratiadis A., G.-K. Sakki, and D. Koutsoyiannis. Introduction, course notes: Renewable energy and hydroelectric works, ntua. 2022.
- [10] Mamassis N. and Efstratiadis A. Introduction, course notes: Introduction to energy technology, ntua. 2021.
- [11] Δημήτρης Κουτσογιάννης. Απλά πολυμεταβλητά στάσιμα και κυκλοστάσιμα μοντέλα, Σημειώσεις μαθήματος: Στοχαστικές Μέθοδοι, ΕΜΠ. 2023.
- [12] Χρήστος Μακρόπουλος και Διονύσης Νικολόπουλος. Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Σημειώσεις μαθήματος: Διαχείριση Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ. 2023.
- [13] Ph. Tsalides and A. Thanailakis. Direct computation of the array optimum tilt angle in constant-tilt photovoltaic systems. *Solar Cells*, 14(1):83–94, 1985.
- [14] Sapan Thapar. Centralized vs decentralized solar: A comparison study (india). *Renewable Energy*, 194:687–704, 2022.
- [15] R.B. Hiremath, Bimlesh Kumar, P. Balachandra, N.H. Ravindranath, and B.N. Raghunandan. Decentralised renewable energy: Scope, relevance and applications

- in the indian context. *Energy for Sustainable Development*, 13(1):4–10, 2009.
- [16] S. P. Burger, J. D. Jenkins, S. C. Huntington, and I. J. Perez-Arriaga. Why distributed?: A critical review of the tradeoffs between centralized and decentralized resources. *in IEEE Power and Energy Magazine*, 17(2):16–24, 2019.
- [17] Jonas Schnidrig, Arthur Chuat, Cédric Terrier, François Maréchal, and Manuele Margni. Power to the people: On the role of districts in decentralized energy systems. *Energies*, 17(7):1718, 2024.
- [18] J. Ordóñez, E. Jadraque, J. Alegre, and G. Martínez. Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in andalusia (spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7):2122–2130, 2010.
- [19] Joint Research Centre. Pvgis user manual.
- [20] Thomas Huld, Richard Müller, and Attilio Gambardella. A new solar radiation database for estimating pv performance in europe and africa. *Solar Energy*, 86(6):1803–1815, 2012.
- [21] D. Koutsoyiannis and Th. Xanthopoulos. Engineering hydrology, national technical university, athens.
- [22] Stefanos Kozanis, Antonios Christofides, N. Mamassis, Andreas Efstratiadis, and Demetris Koutsoyiannis. Hydrognomon - open source software for the analysis of hydrological data. 2010.
- [23] A. Efstratiadis, I. Tsoukalas, and D. Koutsoyiannis. Generalized storage-reliability-yield framework for hydroelectric reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*, 66(4):580–599, 2021.
- [24] Joint Research Centre. Sarah-2 solar radiation data.
- [25] Wouter Knoben, Jim Freer, and Ross Woods. Technical note: Inherent benchmark or not? comparing nash–sutcliffe and kling–gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10):4323–4331, 2019.
- [26] Dimitrios Chatzopoulos, Athanasios Zisos, Nikos Mamassis, and Andreas Efstratiadis. The benefits of distributed grid production: An insight on the role of spatial scale on solar pv energy. *European Geosciences Union General Assembly 2024, Session ERE2.3: Spatial and temporal modelling of renewable energy systems*, 2024.
- [27] SunPower.com. Sunpower maxeon 3 spr-max3-400 400wp.
- [28] Qusay Hassan, Marek Jaszczur, Estera Przenzak, and Jasim Abdulateef. The pv cell temperature effect on the energy production and module efficiency. *Contemporary Problems of Power Engineering and Environmental Protection*, 19(1):33–41, 2016.
- [29] Prabir Dash and NC. Gupta. Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules. *Journal of Engineering Research and Applications*, 5(1):1–4, 2015.
- [30] D. Koutsoyiannis. Introduction to simulation, course notes: Stochastic methods, ntua. 2023.

- [31] Microsoft Support. Combin function, microsoft excel.
- [32] P. Kumaraswamy. A generalized probability density function for double-bounded random processes. *Journal of Hydrology*, 46(1):79–88, 1980.