#### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΟΛΓΑ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΣΕ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ

ΠΜΣ – Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον Τμήμα Φυσικής Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων





## ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

 $<\!\!<\!\!\text{ATMO}\Sigma\Phi\text{AIPIKE}\Sigma \text{ E}\Pi\text{I}\Sigma\text{THME}\Sigma \text{ KAI}\Pi\text{E}\text{PIBA}\Lambda\Lambda\text{O}\text{N}\!\!>\!\!>$ 

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΣΕ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ

### ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΟΛΓΑ

#### AM 831

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΑΤΖΗΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2024** 

# Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ПЕРІЛНҰН	. 8
ABSTRACT	11
ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	26
1.1 НЛІАКН АКТІΝОВОЛІА	26
1.2 ANEMOΣ	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	36
2.1 ΕΠΑΝΑΝΑΛΥΣΗ (REANALYSIS) - ΕΠΙΓΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	36
2.1.1 ERA5 REANALYSIS	36
2.1.2 ΕΠΙΓΕΙΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ GEBA	38
2.1.3 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΕΘΝΙΚΗΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (ΕΜΥ)	40
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΑΓΛΟΡΙΘΜΟΣ	42
2.2.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ERA5 REANALYSIS	45
2.2.2 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ	50
3.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΤΟΥ ERA5 REANALYSIS	50
3.1.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (SSR)	Σ 50
3.1.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥΣ	Έ 55
3.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ	59
3.2.1 ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	60
3.2.2 ΜΕΣΗ ΕΠΟΧΙΚΗ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	66
3.3 ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ	74

3.3.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΤΟΠΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	74
3.3.2 ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΜΕΣΗ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗ ΒΑΣΗ	77
3.3.2.1 ЕПОХІКН МЕТАВОЛН 7	7
3.3.2.2 <b>ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ</b>	0
3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	5
3.4.1 ΕΥΡΥΤΕΡΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ	5
3.4.2 ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ	6
3.4.3 ΙΟΝΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ	8
3.4.4 KPHTH 8	39
3.4.5 BOPEIA ЕЛЛАДА 9	1
<b>3.4.6 ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ 9</b>	)2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	)6
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΑΝΑΦΟΡΩΝ</b> 10	0
ПАРАРТНМА	)3

### Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Νικόλαο Χατζηαναστασίου, ο οποίος με την πολύτιμη βοήθεια και εμπειρία του με οδήγησε στην ολοκλήρωση του στόχου μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Μιχάλη Σταμάτη, καθώς και το μεταδιδακτορικό ερευνητή Mario-Bruno Korras-Karasa, οι οποίοι με την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου προσέφεραν με βοήθησαν να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία. Ακόμη, ευχαριστώ και όλους τους υπόλοιπους καθηγητές του ΠΜΣ «Ατμοσφαιρικές Επιστήμες και Περιβάλλον», κ. Μπαρτζώκα Αριστείδη, κ. Κασσωμένο Παύλο, κ. Λώλη Χρήστο και κ. Μπάκα Νικόλαο, οι οποίοι με εισήγαγαν στο κόσμο της Μετεωρολογίας, της Κλιματολογίας και των Ατμοσφαιρικών Επιστημών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που χωρίς τη δική τους στήριξη στις μεταπτυχιακές μου σπουδές και όχι μόνο, τίποτα από όλα τα παραπάνω δεν θα είχαν γίνει πραγματικότητα.

Ευαγγέλου Όλγα

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, καθώς και σύγκριση μεταξύ τους για τη χρονική περίοδο ογδόντα δύο ετών από το 1940 έως και το 2022. Οι φυσικές παράμετροι, πρωτογενή δεδομένα των οποίων γρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή, είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος και η ταχύτητα του ανέμου. Τα δεδομένα των παραμέτρων αυτών αντλήθηκαν από το ERA5 reanalysis για τη χρονική περίοδο μελέτης (1940 – 2022), σε γωρική ανάλυση  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  και μηνιαία βάση. Η κλιματολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος, για τη ταχύτητα του ανέμου στα 10m, καθώς και για το αιολικό δυναμικό τόσο στα 50 όσο και στα 100m, ύψη τα οποία είναι τα δημοφιλέστερα για την τοποθέτηση ανεμογεννητριών στην περιοχή της Ελλάδας. Ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού στα προαναφερθέντα ύψη έγινε με αναγωγή της ταχύτητας του ανέμου στα ενδιαφερόμενα ύψη με χρήση κατάλληλης θεωρητικής σχέσης και δεδομένων. Στην παραπάνω ανάλυση πραγματοποιήθηκε και αξιολόγηση των δεδομένων του ERA5 reanalysis, μέσω σύγκρισης με δεδομένα επίγειων σταθμών GEBA για την ηλιακή ακτινοβολία και μετεωρολογικών σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY) για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m. Στα πλαίσια αυτής της σύγκρισης βρέθηκε ότι η επίδοση του ERA5 είναι αρκετά ικανοποιητική για τις δύο μελετώμενες φυσικές παραμέτρους. Τα μηνιαία δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό μέσων ετήσιων και εποχικών κλιματολογικών τιμών για την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, καθώς και για το αιολικό δυναμικό στα 50 και 100m.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι το ηλιακό και το αιολικό δυναμικό λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους στα θαλάσσια τμήματα της περιοχής μελέτης και τις ελάχιστες στα ηπειρωτικά. Όσον αφορά στο ηλιακό δυναμικό, οι τιμές του βρέθηκαν να κυμαίνονται από 162.7 έως και 225 W/m<sup>2</sup>, ενώ η μέση τιμή του είναι ίση με 195  $\pm$ 17.7 W/m<sup>2</sup>. Οι μέγιστες τιμές του παρατηρούνται κατά τη θερινή περίοδο, στις περιοχές του νότιου Αιγαίου και του Καρπάθιου Πελάγους, ενώ οι ελάγιστες κατά τη γειμερινή στις ηπειρωτικές περιοχές (Μακεδονία και Θράκη). Οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, βρέθηκαν να κυμαίνονται από 1.3 έως και 7.9 m/s με τη μέση τιμή να είναι ίση με 4.3 ± 2.1 m/s. Ακόμη, οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m, κυμαίνονται από 6.5 έως και 453.1 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $150.4 \pm 126.5$  W/m<sup>2</sup>, ενώ οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 100m, κυμαίνονται αντίστοιγα από 9.8 έως και 595.8 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $184.7 \pm 146.8$  W/m<sup>2</sup>. Αντίθετα με την ηλιακή ακτινοβολία, η ταγύτητα του ανέμου στα 10m και το αιολικό δυναμικό στα 50 και 100m, έχουν τις μεγαλύτερες τιμές τους στις περιοχές του Αιγαίου και του Καρπάθιου Πελάγους, κατά τη γειμερινή και τη θερινή περίοδο και τις ελάγιστες την εαρινή περίοδο. Οι αυξημένες τιμές του αιολικού δυναμικού το θέρος στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους οφείλονται στην επικράτηση των Ετησίων ανέμων. Κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης το ηλιακό δυναμικό αυξήθηκε κατά 1.6% για όλη την περιογή (και έως 2.6% τοπικά), ενώ το αιολικό δυναμικό στα 50m και στα 100m μειώθηκε κατά 19.4% και 19.5% για όλη την περιοχή, αντίστοιχα, με εξαίρεση να αποτελούν για το τελευταίο, οι ηπειρωτικές περιοχές της Θεσσαλίας και της Μακεδονίας. Τέλος, η σύγκριση των δυναμικών ανέδειξε ότι τη θερμή περίοδο του έτους (Μάιο-Σεπτέμβριο) είναι πιο συμφέρουσα η αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού, ενώ την ψυχρή περίοδο (Νοέμβριο-Μάρτιο) του αιολικού για την Ελλάδα. Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελούν οι περιοχές του Αιγαίου Πελάγους και της Κρήτης, όπου το ηλιακό δυναμικό επικρατεί του αιολικού δυναμικού στα 100m, μόνο τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο.

### Abstract

In the present study, the solar and wind potentials over the broader Greek region was studied and compared to each other for the 82-year period from 1940 to 2022. The physical parameters, for which raw data were used in this analysis were the incoming solar radiation at the Earth's surface and wind speed at 10m above the surface. The relevant necessary data were taken from the ERA5 reanalysis for the study period at  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  spatial resolution and on monthly basis. A climatological analysis was conducted for the incoming solar radiation reaching the ground (SSR), the wind speed at 10 m, and the wind potentials at 50 m and 100m, which are the most common heights for installation of wind turbines in Greece. The calculation of wind potential and the extrapolation of wind speed at the aforementioned heights was made based on existing theoretical formulation and using appropriate input data. Also, in the analysis the data of ERA5 reanalysis were evaluated through comparison against ground-based station data from GEBA stations for SSR and meteorological station data, from the Hellenic National Meteorological Service (HNMS) for the wind speed at 10m. It was found that the performance of ERA5 reanalysis is reasonable for the studied ERA5 physical parameters. The original monthly data were used to compute annual and seasonal climatological averages for SSR, wind speed at 10m, as well as wind potential at 50 m and 100 m.

The obtained results indicate that solar and wind potential reach their maximum values over the marine areas of the study region and their minimum values over the mainland. As it concerns solar potential, its values were found to range from 162.71 to 225.03 W/m<sup>2</sup>, with an average value of  $194.96 \pm 17.7$  W/m<sup>2</sup>. The maximum values are observed during summer, especially in the southern Aegean and the Carpathian Seas, while its minimum values are found during winter, specifically in the mainland areas (Macedonia and Thrace). The values of wind speed at 10m were found to range from 1.3 to 7.91 m/s, with an average value of  $4.31 \pm 2.05$  m/s. Wind potential values at 50m range from 6.45 to 453.12 W/m<sup>2</sup>, with an average value of  $150.42 \pm 126.54$  W/m<sup>2</sup>, while wind potential at 100 m ranges from 9.84 to 595.79 W/m<sup>2</sup>, with an average value of  $184.7 \pm 146.82$  W/m<sup>2</sup>. Unlike SSR, wind speed at 10m and wind potential at 50m and 100m exhibit their highest values in the Aegean and Carpathian Sea regions during the winter and summer seasons and their lowest values during spring. The increased values of wind potential in summer over the Aegean Sea region are due to the occurrence of the Etesian winds. The solar potential increased during the study period, by 1.6% for the whole region (and up to 2.6% locally), while the wind potential at 50m and at 100m, decreased by 19.4% and 19.5% for the whole region, with the exception of the continental regions of Thessaly and Macedonia for the latter. Finally, the comparison between the two potentials showed that during the warm period of the year (May-September), the utilization of solar potential is more beneficial, whereas during the cold period (November-March), the exploitation of wind potential is more advantageous for Greece. An exception to the above conclusions are the regions of Aegean Sea and Crete,

where solar potential is predominant to wind potential at 100m, only in April, May, and June.

### Λίστα Ακρωνυμίων

IPCC: International Pannel on Climate Change IEA: International Energy Agency ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας SRB: Surface Radiation Budget SEVIRI: Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager MSG: Meteosat Second Generation DNI: Direct Normal Irradiance MRM: Meteorological Radiation Model ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts NWP: Numerical Weather Prediction Model ERA5: ECMWF Reanalysis v5 C3S: Copernicus Climate Change Service GEBA: Global Energy Balance Archive SSR: Surface Solar Radiation ΕΜΥ: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία ΑΟΣ: Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα BSRN: Baseline Surface Radiation Network

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή είναι πλέον μία πραγματικότητα, της οποίας τα αποτελέσματα βιώνονται καθημερινά. Η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης, το λιώσιμο των πάγων, η γενικότερη μεταβολή του κλίματος πάνω στον πλανήτη είναι κάποια από τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής. Στην τελευταία έκθεση (AR6) του IPCC (International Pannel on Climate Change), η οποία αναφέρεται στη χρονική περίοδο από τον Οκτώβριο του 2015 έως και τον Ιούλιο του 2023, επιβεβαιώνεται η συνεχιζόμενη αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα Ε1. Σύμφωνα με αυτό, παρατηρείται ότι σε μέση πλανητική κλίμακα, υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας της Γης κατά 1°C. Ωστόσο, η αύξηση αυτή δεν είναι ομοιόμορφη για όλες τις περιοχές του πλανήτη, καθώς η περιοχή της Αρκτικής σημειώνει τις μεγαλύτερες τιμές αύξησης έως και 2.4 C°. Έχει παρατηρηθεί ότι κύριος παράγοντας για την αύξηση αυτή είναι οι έξτρα ποσότητες αερίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) κ.α., που έχουν προστεθεί στην ατμόσφαιρα της Γης. Όντως, όπως φαίνεται στο Σχήμα Ε2, σύμφωνα με την πλέον σύγγρονη αναφορά του IPCC (2021), ο κύριος παράγοντας για τη θέρμανση του πλανήτη, με πολύ μεγάλο επίπεδο εμπιστοσύνης, είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), έχοντας συνεισφέρει 1.68  $W/m^2$ , στη συνέχεια το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) με 0.97  $W/m^2$  και μεγάλο επίπεδο εμπιστοσύνης, οι αλογονάνθρακες με 0.18 W/m<sup>2</sup> και μεγάλο επίπεδο εμπιστοσύνης και τέλος το N<sub>2</sub>O με 0.17 W/m<sup>2</sup> και πολύ μεγάλο επίπεδο εμπιστοσύνης. Τα παραπάνω εκπεμπόμενα ατμοσφαιρικά αέρια συνεισφέρουν και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτά τα αυξημένα ατμοσφαιρικά αέρια έχουν ανθρωπογενή προέλευση, καθώς ο άνθρωπος μέσα από καθημερινές δραστηριότητες ρυπαίνει το περιβάλλον απελευθερώνοντάς τα μέσω καύσεως ορυκτών καυσίμων. Το ανθρωπογενές φαινόμενο του θερμοκηπίου και η μόλυνση του περιβάλλοντος από ανθρωπογενείς δραστηριότητες θεωρείται ο κύριος λόγος για τον οποίο ο πλανήτης μας υφίσταται την πρόσφατη παγκόσμια θέρμανση (IPCC, 2021). Η ζήτηση και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις βιομηγανίες, αλλά και τους καταναλωτές, τις επόμενες δύο δεκαετίες αναμένεται να αυξηθούν με εκθετικό ρυθμό (Heshmati et al, 2015). Ο ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, θα είναι μεγαλύτερος από εκείνο της κατανάλωσης των πηγών ενέργειας (π.γ. υγρά καύσιμα, φυσικό αέριο και άνθρακας) (ΙΕΑ 2012). Παράλληλα, οι συνεχώς αυξανόμενες τιμές των ορυκτών καυσίμων, όπως του αργού πετρελαίου και οι αυξανόμενες ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές συνέπειες λόγω των εκπομπών των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου, έχουν αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον για εναλλακτικές μορφές ενέργειας (Heshmati et al, 2015). Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο η αξιοποίηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, είναι η μη ελεγχόμενη καύση ορυκτών καυσίμων, η οποία και είναι υπεύθυνη για τις ανεπιθύμητες συνέπειες που το ανθρώπινο είδος καλείται να αντιμετωπίσει. Είναι λοιπόν ζωτικής σημασίας να χρησιμοποιηθούν άλλες πηγές ενέργειας, οι οποίες θα είναι φιλικές προς το

περιβάλλον, ενώ παράλληλα θα προσφέρουν ένα σταθερό ενεργειακό σύστημα χωρίς συμβιβασμούς όσον αφορά στην αποδοτικότητά του. Η πυρηνική ενέργεια, ενώ αποτελεί μία αποδοτική πηγή ενέργειας, δεν προτιμάται, λόγω της επικινδυνότητας που έχει η χρήση της.



**Σχήμα Ε1.** Η χωρική κατανομή της μεταβολής της θερμοκρασίας, του πλανήτη κατά την περίοδο αναφοράς (1850-1900) σε συνθήκες μέσης πλανητικής θέρμανσης κατά 1°C. (Figure TS.3 in IPCC, 2021, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/technical-summary/figure-ts-3/).





Ειδικότερα, μετά από το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό Daiichi της Φουκοσίμα το 2011, η πυρηνική ενέργεια δεν είναι επιθυμητή ως εναλλακτική μορφή ενέργειας.

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα, έρχονται να δώσουν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από την ενέργεια η οποία προέρχεται από μία ανεξάντλητη πηγή. Παραδείγματα τέτοιας ανεξάντλητης πηγής είναι ο Ήλιος, ο άνεμος, τα ποτάμια, τα κύματα της θάλασσας, ακόμη και η βιομάζα. Όλες οι παραπάνω πηγές, αλλά και πολλές άλλες, μπορούν να «χαρίσουν» στον άνθρωπο, ενέργεια η οποία προέρχεται απευθείας από φυσικά φαινόμενα της Γης, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία πρώτον δεν αποτελούν απεριόριστη μορφή ενέργειας και δεύτερον για να καταστεί δυνατή η απόκτησή τους οι συνέπειες για το περιβάλλον είναι καταστροφικές, χωρίς να αναφερθούν οι επιπτώσεις σε αυτό μόνο από τη καύση τους. Όμως, ποιες από όλες τις προαναφερόμενες πηγές είναι ικανές να προσφέρουν τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας; Η πιο άφθονη πηγή ενέργειας στη Γη είναι η ηλιακή ενέργεια, παρέχοντας περίπου  $5 \times 10^6$  EJ/έτος, ενέργεια που ήταν δέκα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας το 2007 (Chen, 2011). Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας από τον άνθρωπο παρατηρείται από την αρχαιότητα (οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν την ηλιακή ενέργεια με καθρέφτες με σκοπό τον φωτισμό θρησκευτικών τελετών, ενώ υπήρχαν ατμόπλοια τα οποία λειτουργούσαν με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας κ.α.). Παρ' όλα αυτά, η ηλιακή ενέργεια είναι η λιγότερο αξιοποιήσιμη ανάμεσα στις υπόλοιπες μορφές ΑΠΕ. Με τα σημερινά δεδομένα, μόνο το 0.1% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης καλύπτεται από την ηλιακή ενέργεια, ενώ αξιοποιείται μόνο το 0.00001% της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας (Chen, 2011). Ωστόσο παρατηρείται ότι, το ενδιαφέρον της

Πίνακας ΠΕ1. Οι κυριότερες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η πρώτη στήλη του Πίνακα αναφέρεται στο ποσό της ενέργειας που παράγεται από την κάθε πηγή ανά έτος, η δεύτερη στήλη στο χρησιμοποιούμενο ποσό ενέργειας, ενώ η τρίτη στο επί τοις εκατό ποσό που αζιοποιείται (Chen, 2011).

Type	Resource	Implemented	Percentage
	(EJ/year)	(EJ/year)	Explored
Solar	2,730,000	0.31	0.0012%
Wind	2,500	4.0	0.16%
Geothermal	1,000	1.2	0.10%
Hydro	52	9.3	18%

επιστημονικής κοινότητας έχει αυξηθεί σε σχέση με τη μελέτη και την ανάπτυξη της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, ειδικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων, με αποτέλεσμα η ανάπτυξή τους να είναι ραγδαία (Σχήμα Ε3). Για αυτόν το λόγο, αναμένεται η ηλιακή ενέργεια στο δεύτερο μισό του εικοστού πρώτου αιώνα, να αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας, ξεπερνώντας και τις ενεργειακές πηγές ορυκτών καυσίμων (Chen, 2011).



**Σχήμα Ε3.** Συνολική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε παγκόσμια κλίμακα κατά τη χρονική περίοδο 2010 έως και 2020 (IEA, Global Energy Review 2021, International Energy Agency (IEA), Paris, 2021).

Όμως, ποια άλλη εναλλακτική μορφή ενέργειας εκτός από την ηλιακή μπορεί να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο; Στον Πίνακα ΠΕ1 φαίνεται ότι σε ό,τι αφορά στην παραγόμενη ποσότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ανά έτος η αιολική ενέργεια είναι δεύτερη αμέσως μετά την ηλιακή ενέργεια. Ο άνεμος, είναι μία ακόμη ατελείωτη μορφή ενέργειας, ένα φυσικό φαινόμενο που συνδέεται άρρηκτα με την ηλιακή ακτινοβολία. Το αιολικό δυναμικό, αυτό διαθέτει την αιολική ενέργεια, αξιοποιείται από τον άνθρωπο από το 200 π.Χ, όπου οι Πέρσες χρησιμοποιούσαν ανεμόμυλους για την άλεση δημητριακών, τεχνολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε αργότερα και από άλλους λαούς (π.χ. Γάλλους, Δανούς κ.α.) (Sathyajith, 2006). Οι πρώτες μορφές ανεμογεννητριών ξεκίνησαν κατά το 1900, ενώ η κατασκευή της πρώτης ανεμογεννήτριας ειδικά σχεδιασμένης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έγινε το 1890 στη Δανία. Το 1931 εγκαταστάθηκε στη Ρωσία το πρώτο σύστημα κοινής ωφέλειας με ανεμογεννήτρια, η οποία έφτανε να παράγει 100kW, τοποθετημένη στις ακτές της Κασπίας Θάλασσας, λειτούργησε επί δύο χρόνια και παρήγαγε περίπου 20000kW (Sathyajith, 2006). Η αιολική ενέργεια, αποτελεί την πλέον ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Σημειώνεται ότι το 2004 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς ήταν ίση με 39434MW (Sathyajith, 2006).

Στο Σχήμα E3 παρατίθεται η συνολική παγκόσμια χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, για τη χρονική περίοδο 2010 – 2020, σύμφωνα με την έκθεση του IEA, 2021. Παρατηρείται ότι η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, από την οποία και τα δέκα έτη αναφοράς, χρησιμοποιούνται έως και περίπου 4400 TWH ενέργειας. Τα χρησιμοποιούμενα ποσά ενέργειας από την συγκεκριμένη πηγή δεν σημείωσαν

σημαντική αύξηση την περίοδο αναφοράς (έως 1100 TWH). Στη συνέχεια έρχεται η αιολική ενέργεια, της οποίας η χρήση το 2010 κυμαινόταν από περίπου 3400 έως και 3600 TWH, ενώ με το πέρασμα των ετών η χρήση της σημείωσε αυξητική τάση, με το μέγιστο να σημειώνεται το 2020, όπου η χρησιμοποιούμενη ενέργεια κυμαινόταν από 4400 έως και 6000 TWH. Η χρήση ενέργειας από το ηλιακό δυναμικό, σημείωσε και αυτή όπως και η αιολική ενέργεια, μεγάλη αύξηση για την αναφερόμενη χρονική περίοδο. Συγκεκριμένα το 2020, χρησιμοποιήθηκαν από 6000 έως και περίπου 6900 TWH. Τις μεγαλύτερες τιμές έχει η ενέργεια προερχόμενη από βιομάζα, με αυτές να κυμαίνονται για το 2020, από περίπου 6900 έως και 7600 TWH. Έτσι, παρόλο που σε παγκόσμια κλίμακα η ενέργεια από τη βιομάζα παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές όσον αφορά στη χρήση της, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια σημείωσαν ραγδαία αύξηση, από το 2010 έως το 2020 με τα ποσά χρησιμοποιούμενης ενέργειας να είναι και αυτά μεγάλα.

Η μελέτη των δύο αυτών μορφών ενέργειας, της ηλιακής και της αιολικής, είναι υψίστης σημασίας, καθώς αποτελούν εναλλακτικές μορφές ενέργειας οι οποίες όχι μόνο μπορούν να συντελέσουν στην αντιμετώπιση του προβλήματος της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αλλά είναι ικανές να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τη συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή κατανάλωση. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, επιλέχθηκε ως θέμα της παρούσας εργασίας η μελέτη του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο σε κλιματολογική βάση για τα τελευταία ογδόντα δύο (82) έτη, καθώς και η σύγκριση των δυναμικών αυτών μεταξύ τους, με σκοπό την διερεύνηση της υπεροχής του ενός δυναμικού σε σχέση με το άλλο.

Το ζήτημα της μελέτης του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο έχει απασχολήσει αρκετά την ελληνική επιστημονική (και όχι μόνο) κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Αρχικά θα αναλυθούν οι μελέτες που έχουν ολοκληρωθεί για την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια θα αναλυθούν αυτές για το αιολικό δυναμικό.

Οι μελέτες για το ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας, ξεκινούν από πολύ παλιά, (π.χ. από τους Katsoulis & Papachristopoulos 1978; Flocas 1980; Katsoulis & Leontaris 1981; Kouremenos et al. 1985; Katsoulis 1987; Kouremenos et al. 1987; Pisimanis et al. 1987; Sahsamanoglou & Bloutsos 1989; Katsoulis 1991; Katsoulis et al. 1991; Sahsamanoglou & Makrogiannis 1991; Kambezidis et al. 1994, 1997). Ωστόσο οι μελέτες αυτές, ασχολήθηκαν με τον προσδιορισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες ή τον προσδιορισμό των σχέσεων μεταξύ της άμεσης, της διάχυτης και της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ οι περιοχές μελέτης αφορούσαν κυρίως την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη (Fotiadi et al., 2006). Ακόμη, οι μελέτες αυτές υλοποιήθηκαν κυρίως με χρήση δεδομένων από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς, οι οποίοι μάλιστα δε διέθεταν μεγάλο πλήθος μετρήσεων. Ενώ έγινε προσπάθεια εκτίμησης της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, οι μετρήσεις προέκυψαν και πάλι από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς, με περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Περνώντας σε πιο πρόσφατες μελέτες, οι Fotiadi et al. (2006), υπολόγισαν το ισοζύγιο της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, χρησιμοποιώντας για πρώτη φορά ένα φυσικό προσδιοριστικό μοντέλο διάδοσης ακτινοβολίας. Οι υπολογισμοί του μοντέλου έγιναν σε μέση μηνιαία βάση και σε χωρική ανάλυση  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  γεωγραφικό μήκος και πλάτος, για τη χρονική περίοδο 17 ετών από το 1984 έως το 2000, ενώ τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν ένας συνδυασμός διαφόρων παραμέτρων των νεφών, μαζί με ατμοσφαιρικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία σε διαφορετικά ύψη (επίπεδα) της ατμόσφαιρας, η πίεση της ατμόσφαιρας και η υγρασία. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για νέφη μαζί με μετεωρολογικά δεδομένα (προφίλ ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και υγρασίας) με υψηλότερη χωρική ανάλυση  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , τα οποία εξήχθησαν από τη βάση δεδομένων NASA Langley με χρονική κάλυψη από το 1985 έως το 1995. Η μελέτη αυτή, έδειξε ότι η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στην περίοδο μελέτης, 1984 - 2000, η οποία ήταν σύμφωνη με την παγκόσμια ηλιακή λάμπρυνση (Wild et al., 2005).

Σε συνέχεια των ερευνών για την κατανομή του ηλιακού δυναμικού στην Ελλάδα, οι Nikitidou et al. (2015) υπολόγισαν την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια, γρησιμοποιώντας πληροφορίες νεφών προερχόμενες από δορυφορικές εικόνες. Στη συγκεκριμένη εργασία, πληροφορίες για ιδιότητες των νεφών αντλήθηκαν από το όργανο του SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), του δορυφόρου MSG (Meteosat Second Generation). Έτσι, αποκτήθηκαν δεδομένα για την παγκόσμια επιφανειακή ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια καθώς και το DNI (direct normal irradiance) με χρονική ανάλυση δεκαπέντε (15) λεπτών. Επίσης εκτιμήθηκαν, η ημερήσια ηλιακή ενέργεια καθώς και τα αντίστοιχα ετήσια και μηνιαία αθροιστικά ποσά. Τα δεδομένα αυτά κάλυπταν μία χρονική περίοδο έξι (6) ετών από το 2008 έως το 2013. Τα αποτελέσματα της μελέτης συγκρίθηκαν με δεδομένα επίγειων μετεωρολογικών σταθμών, οι οποίοι μετρούν την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, μέσω πυρανομέτρων που διαχειρίζονται από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας, έδειξαν ότι οι μεγαλύτερες τιμές της ηλιακής ενέργειας, παρατηρούνται τους θερινούς μήνες, κυρίως πάνω από την περιοχή της Νότιας Πελοποννήσου, της Κρήτης και των Κυκλάδων, όπου οι τιμές φτάνουν τα 250 kWh/m<sup>2</sup>. Επίσης, η ετήσια ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται σε μία οριζόντια επιφάνεια, κυμαίνεται από 1400 έως και 1500 kWh/m<sup>2</sup> πάνω από τη Βόρεια Ελλάδα και 1800 έως 1900 kWh/m<sup>2</sup> πάνω από τη Νότια Πελοπόννησο, την Κρήτη και τα υπόλοιπα νησιά. Όσον αφορά στην παράμετρο DNI, παρατηρήθηκε αύξηση κατά 9% στη Βόρεια Ελλάδα και 15% στη Νότια όπου η ηλιοφάνεια είναι ήδη υψηλή. Αυτό οδηγεί σε ετήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, περίπου ίσες με 2000 kWh/m<sup>2</sup> στις νότιες περιοχές της Ελλάδας.

Ακόμη, οι Kazantzidis et al. (2016) κατασκεύασαν έναν ηλιακό χάρτη για την περιοχή της Ελλάδας, χρησιμοποιώντας εκτιμήσεις μοντέλου. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Meteorological Radiation Model (MRM), το οποίο δημιουργήθηκε από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Το μοντέλο αυτό, χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα, όπως θερμοκρασία του αέρα, σχετική υγρασία, βαρομετρική πίεση, καθώς και τη διάρκεια ηλιοφάνειας, με σκοπό τον υπολογισμό

μέσω αυτών της ηλιακής ακτινοβολίας για περιοχές όπου δεν υπάρχουν δεδομένα (μετρήσεις) της παραμέτρου αυτής. Χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα των παραπάνω μετεωρολογικών παραμέτρων για 39 μετεωρολογικούς σταθμούς, οι οποίοι ήταν κατανεμημένοι σε όλη την περιοχή μελέτης και τα δεδομένα αυτά να εισήχθησαν στο μοντέλο, το οποίο με τη σειρά του υπολόγισε ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για όλη την περιοχή της Ελλάδας. Στη συνέχεια, με τη μέθοδο της παρεμβολής (interpolation), κατασκευάστηκε ένας ηλιακός χάρτης για την περιοχή της Ελλάδας, παρέχοντας ετήσιες τιμές για την ηλιακή ενέργεια της χώρας. Τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών, κάλυπταν την χρονική περίοδο δεκαπέντε (15) ετών, από το 1985 έως το 1999. Βάσει αυτού του ηλιακού χάρτη για την περιοχή της Ελλάδας, παρατηρήθηκε ότι κατά τη χειμερινή περίοδο η ηλιακή ακτινοβολία είχε τις χαμηλότερες τιμές της, οι οποίες κυμαίνονταν από 150 έως και 250 kWh/m<sup>2</sup>, ενώ την εαρινή περίοδο τις μέγιστες, από 420 έως και 520 kWh/m<sup>2</sup>. Παράλληλα φάνηκε ότι οι θαλάσσιες εκτάσεις της περιοχής μελέτης είχαν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις χερσαίες περιοχές.

Επίσης, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες για την περιοχή της Ελλάδας σχετικά με το αιολικό δυναμικό. Αυτές χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1980, όταν οι Lalas, Tselepidaki and Theoharatos (1982), υπολόγισαν το αιολικό δυναμικό για την περιοχή του Αιγαίου Πελάγους. Η ανάλυση αυτή ήταν στατιστική και βασίστηκε στην κατανομή Weibull, ενώ τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντλήθηκαν από είκοσι δύο (22) επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς. Στη συνέχεια, οι Katsoulis and Metaxas (1992), μελέτησαν το αιολικό δυναμικό της Δυτικής Ελλάδας με δεδομένα από δεκατρείς (13) επίγειους σταθμούς, ενώ τα αποτελέσματα οπτικοποιήθηκαν με τη χρήση των συναρτήσεων Weibull. Ο Katsoulis (1992), χρησιμοποίησε την ίδια στατιστική κατανομή, αλλά αυτή τη φορά για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο. Παρόλο που οι μελέτες αυτές ήταν χρήσιμες, υπήρχε η ανάγκη για χρήση μοντέλων και δεδομένων με μεγαλύτερη χρονική διάρκεια.

Η Kotroni et al. (2014), δημιούργησε έναν υψηλής ανάλυσης άτλαντα ανέμων για την περιοχή της Ελλάδας βάσει μοντέλου. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος για τον άνεμο στη μελετώμενη περιοχή, χρησιμοποιώντας δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου από το ECMWF reanalysis, για τη χρονική περίοδο είκοσι (20) ετών, 1989-2008. Η χωρική ανάλυση της βάσης δεδομένων ECMWF-Interim, είναι τα 80km, ενώ η καταγραφή των δεδομένων γίνεται ανά έξι (6) ώρες. Στη συνέγεια, γρησιμοποιήθηκε το μοντέλο NWP (Numerical Weather Prediction Model) MM5 (το οποίο χρησιμοποιείται από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών από το 2000), με βάσει του οποίου εξήχθη ο άτλαντας ανέμων ο οποίος περιείχε δώδεκα μήνες ενός τυπικού μετεωρολογικού έτους. Ο άτλαντας είχε χωρική ανάλυση 2×2 km<sup>2</sup>. Στη μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε και η αξιολόγηση της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, η οποία αντλήθηκε από το reanalysis, με χρήση μετρήσεων από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς. Η ταχύτητα του ανέμου υπολογίστηκε στα 50m, ενώ εξήχθη και το αιολικό δυναμικό για την περιοχή μελέτης. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε και σε μηνιαία βάση. Η παραπάνω ανάλυση έδειξε ότι, όσον αφορά στις ηπειρωτικές περιοχές, η βορειοανατολική Ελλάδα μαζί με την Αττική,

την Εύβοια, τη Νότια Πελοπόννησο και το νότιο τμήμα της Κρήτης, παρουσιάζουν τις μέγιστες μέσες τιμές αιολικού δυναμικού, με αυτές να κυμαίνονται από 300 έως και πάνω από 600 W/m<sup>2</sup>, ενώ στις θαλάσσιες περιοχές το αιολικό δυναμικό στο Αιγαίο Πέλαγος (500 W/m<sup>2</sup>), φαίνεται να ξεπερνά κατά πολύ αυτό του Ιονίου (300 W/m<sup>2</sup>). Παράλληλα, η εποχική μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου, ανέδειξε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου πάνω από την Αττική, την Κρήτη και τις γύρω θαλάσσιες περιοχές, καθώς και τα νησιά του Αιγαίου.

Μία ακόμη έρευνα σχετική με τις ταχύτητες του ανέμου που επικρατούν στην Ελλάδα, είναι αυτή των Tyrlis and Lelieveld (2013), οι οποίοι ανέλυσαν την κλιματολογία και τη δυναμική των θερινών Ετησίων πάνω από την Ανατολική Μεσόγειο. Οι Ετησίες είναι δροσεροί και σχετικά ξηροί B-BA άνεμοι που πνέουν στην περιοχή του Αιγαίου κατά το θέρος, λόγω του συνδυασμού του θερμικού χαμηλού της ΝΔ Ασίας με την περιοχή υψηλών πιέσεων στην Ευρώπη και την κεντρική Μεσόγειο. Η παραπάνω ανάλυση στηρίχθηκε στη βάση δεδομένων ERA-40, από όπου αντλήθηκαν δεδομένα ανά έξι (6) ώρες του γεωδυναμικού ύψους, της θερμοκρασίας και των συνιστωσών του ανέμου σε χωρική ανάλυση περίπου 1.1° ×1.1°. Η χρονική διάρκεια των δεδομένων αυτών ήταν από το 1958 έως και το 2002, με αποτέλεσμα να ληφθούν υπόψιν σαράντα πέντε (45) ολόκληρα καλοκαίρια για την υλοποίηση της ανάλυσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, οι Ετησίες φαίνεται να εμφανίζονται με μεγαλύτερη ένταση από τα μέσα Ιουλίου έως και τα μέσα Αυγούστου, ενώ παράλληλα μειώνεται η συχνότητα εμφάνισής τους για την περίοδο Ιούνιος - Ιούλιος – Αύγουστος - Σεπτέμβρης, γεγονός που είναι σύμφωνο με προηγούμενες μελέτες.

Τέλος, οι Kardakaris, Boufidi and Soukissian (2021), μελέτησαν το συνδυασμό της αιολικής παραθαλάσσιας ενέργειας και της κυματικής για τις ελληνικές θάλασσες, βάσει δεδομένων από το ERA5 reanalysis. Πιο αναλυτικά, δεδομένα για τα κύματα και τον άνεμο χρησιμοποιήθηκαν από το ERA5, για τη χρονική περίοδο είκοσι (20) ετών από το 2000 έως και το 2019. Τα δεδομένα που αντλήθηκαν από το ERA5 για την συγκεκριμένη μελέτη ήταν, το ύψος των κυμάτων με χωρική ανάλυση  $0.50^\circ \times 0.50^\circ$ και η ταχύτητα του ανέμου στα 100m, με χωρική ανάλυση 0.25° × 0.25°. Καθώς γρησιμοποιήθηκε το ERA5 reanalysis για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, ήταν αναγκαία η αξιολόγηση με πραγματικά επίγεια δεδομένα. Έτσι, στην παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν in-situ δεδομένα από το θαλάσσιο δίκτυο παρακολούθησης των ελληνικών θαλασσών, POSEIDON. Η επίδοση του ERA5 reanalysis για τα συγκεκριμένα δεδομένα ήταν ικανοποιητική, ενώ σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό στις παράκτιες περιοχές, αυτό φαίνεται να παίρνει τις μέγιστες τιμές του, οι οποίες κυμαίνονται από  $600 - 800 \text{ W/m}^2$ , στον κεντρικό άξονα του Αιγαίου Πελάγους, κατά τη χειμερινή περίοδο, αλλά και κατά τη θερινή όταν επικρατούν οι Ετησίες.

Παρόμοιες μελέτες με τις παραπάνω, για το ηλιακό και το αιολικό δυναμικό έχουν υλοποιηθεί και σε άλλες χώρες. Για παράδειγμα, οι Perdigão et al. (2017) υλοποίησαν μία κλιματολογική μελέτη για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την Ιβηρική Χερσόνησο. Χρησιμοποίησαν δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει

στο έδαφος (SW), τα οποία αντλήθηκαν από το μοντέλο WRF για χρονική περίοδο εξήντα (60) ετών, από το 1950 έως το 2010. Η ανάλυσή τους έδειξε ότι πάνω από την Ιβηρική Χερσόνησο οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνονταν από 130 W/m<sup>2</sup> στις βόρειες περιοχές έως και περίπου 230 W/m<sup>2</sup> στα νοτιοανατολικά τμήματα της χερσονήσου. Η ηλιακή ακτινοβολία επιφανείας παρουσίαζε αύξηση από τις βόρειες προς τις νότιες περιοχές και από τις δυτικές προς τις ανατολικές. Όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό, οι Aboobacker et al. (2021), εκτίμησαν το αιολικό δυναμικό, σε κλιματολογική βάση (μηνιαίες, εποχικές, ετήσιες και δεκαετείς μέσες τιμές) για χερσαίες και παραθαλάσσιες υποπεριοχές του Κατάρ χρησιμοποιώντας ωριαία δεδομένα ταχύτητας του ανέμου στα 10m από το ERA5 reanalysis, με χωρική ανάλυση  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , για σαράντα έτη (40) από το 1979 έως το 2018. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των δεδομένων του ERA5, με δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών. Η μελέτη έδειξε ότι το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό για την περιοχή του Κατάρ είναι μέτριο, με τις μεγαλύτερες τιμές αυτού να απαντώνται πάνω από τις βόρειες και βορειοανατολικές περιοχές, όπου το μέσο αιολικό δυναμικό για τα σαράντα (40) έτη μελέτης φτάνει τα 186 W/m<sup>2</sup>, ενώ το μέσο ετήσιο δυναμικό φτάνει έως τα 212 W/m<sup>2</sup>. Οι παραθαλάσσιες περιοχές του Κατάρ εμφάνισαν μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό σε σχέση με τις χερσαίες. Οι μέσες μηνιαίες τιμές του αιολικού δυναμικού ήταν υψηλότερες κατά την περίοδο Δεκέμβριο-Μάρτιο (έως 282 W/m<sup>2</sup>) και τον Ιούνιο (έως 247 W/m<sup>2</sup>), λόγω της επικράτησης των χειμερινών και καλοκαιρινών ανέμων shamal.

Παρόλο που οι έρευνες που προαναφέρθηκαν προσέγγισαν το ζήτημα του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ελληνικό χώρο, είχαν κάποιες ελλείψεις ή αδυναμίες, οι οποίες χρήζουν βελτίωσης. Έτσι για παράδειγμα, είναι αναγκαίο να γίνει μία μελέτη με δεδομένα που καλύπτουν μία μεγαλύτερη χρονική περίοδο (η μεγαλύτερη περίοδος στις προηγούμενες μελέτες ήταν τα είκοσι έτη). Μία τέτοια μελέτη, κλιματολογικού τύπου, μπορεί να καλύπτει το ζήτημα των διαχρονικών και δεκαετών μεταβολών του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού του ευρύτερου ελληνικού χώρου. Επίσης, στις προηγούμενες μελέτες για την ηλιακή ενέργεια η χωρική ανάλυση ήταν χαμηλή (έως 1° × 1°), ενώ είναι επιθυμητό να είναι αυτή όσο το δυνατόν υψηλότερη. Ακόμη, η υπάρχουσα βιβλιογραφία περιλαμβάνει έρευνες οι οποίες μελετούν ξεγωριστά το ηλιακό και το αιολικό δυναμικό και όχι συγκριτικά. Ωστόσο, η σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών δυναμικών είναι μεγάλης σημασίας, καθώς είναι ενδιαφέρον να είναι γνωστό ποιο από τα δύο δυναμικά υπερτερεί σε μια περιογή, όπως ο ευρύτερος ελληνικός χώρος, αλλά και πότε το ένα δυναμικό υπερτερεί του άλλου. Ακόμη, θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί η σύγκριση μεταξύ των δύο δυναμικών και για συγκεκριμένες υποπεριογές του ευρύτερου ελληνικού γώρου, δεδομένης της πιθανότητας διαφορετικών γαρακτηριστικών/ευρημάτων.

Τις παραπάνω ανάγκες και προτεραιότητες προσπαθεί να καλύψει η παρούσα εργασία, η οποία ασχολείται με τη μελέτη του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο σε κλιματολογική βάση, αλλά και με τη σύγκριση μεταξύ των δύο δυναμικών. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος, καθώς και ο άνεμος στα 10m, που αντλούνται από το ERA5 reanalysis. Τα δεδομένα αυτά έχουν χωρική ανάλυση 0.25° × 0.25° ( περίπου 27 km × 27 km), με χρονική κάλυψη ογδόντα δύο (82) ετών, από το 1940 έως και το 2022.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία σύντομη αναφορά σε χρήσιμες θεωρητικές πληροφορίες για την ηλιακή ακτινοβολία και τον άνεμο. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, αλλά και ο τρόπος εξαγωγής των αποτελεσμάτων μέσω του αλγορίθμου που δημιουργήθηκε. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, αλλά και για συγκεκριμένες επιλεγμένες υποπεριοχές αυτού (Αιγαίο Πέλαγος, Ιόνιο Πέλαγος, Κρήτη, Βόρεια Ελλάδα, Πελοπόννησος). Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας γίνεται μία σύνοψη της εργασίας, εξάγονται τα συμπεράσματα και συζητούνται προοπτικές επέκτασης της εργασίας.

### Κεφάλαιο 1° ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

#### 1.1 Ηλιακή Ακτινοβολία

Η βασικότερη πηγή ενέργειας για τη Γη είναι ο Ήλιος. Με την ενέργεια που προέρχεται από αυτόν εξελίσσονται τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται πάνω στη Γη, συμπεριλαμβανομένων αυτών της ατμόσφαιρας. Η ενέργεια που εκπέμπεται από τον Ήλιο και διαδίδεται μέσω του διαστήματος εισέρχεται στη Γη κυρίως υπό μορφή ακτινοβολίας. Στα πλαίσια της διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας, γίνονται ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας του εδάφους, όπως επίσης και μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων της ατμόσφαιρας (Κατσαφάδος et al., 2023). Η Γη στρέφεται γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτική τροχιά, με τον Ήλιο να βρίσκεται σε μία από τις δύο εστίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασής της από τον Ήλιο (Iqbal, 1983). Η μέση απόσταση Γης – Ήλιου ονομάζεται μία αστρονομική μονάδα, ενώ περιγράφεται από τη σχέση:

#### $1AU = 1.49 \times 10^8 \ km$



Σχήμα 1.1. Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο (Iqbal, 1983).

Παρατηρώντας το Σχήμα 1.1, φαίνεται ότι η ελάχιστη απόσταση Γης – Ήλιου απαντάται περίπου στα 0.983 AU, ενώ η μέγιστη στα 1.017 AU. Η Γη βρίσκεται στο κοντινότερο σημείο με τον Ήλιο (περιήλιο) στις 3 Ιανουαρίου και στο μακρινότερο (αφήλιο) στις 4 Ιουλίου, ενώ παράλληλα η Γη βρίσκεται στη μέση απόσταση της σε σχέση με τον Ήλιο στις 4 Απριλίου και στις 5 Οκτωβρίου (Iqbal, 1983). Όσον αφορά στην ενέργεια που προσλαμβάνει η Γη από τον Ήλιο, αυτή χαρακτηρίζεται από τη ροή ενέργειας που προσπίπτει στη μονάδα του χρόνου σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη προς τις ακτίνες, που βρίσκεται στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας, στη μέση απόσταση Γης-Ήλιου. Αυτή η ροή ενέργειας, με τιμή ίση με 1366 W/m<sup>2</sup>, είναι η μέση ηλιακή σταθερά. Για να υπολογιστεί η συνολική ισχύς που δέχεται η Γη, δηλαδή το φωτιζόμενο τμήμα της (ημισφαίριο), αρκεί να πολλαπλασιαστεί η ηλιακή σταθερά με το εμβαδό κύκλου που αποτελεί τη διατομή της σφαίρας της Γης, δηλαδή με τον όρο  $\pi R_{\Gamma}^2$ , όπου π ο σταθερός αριθμός 3.14 και  $R_{\Gamma} = 6.371 \times 10^6 m$ , η ακτίνα της Γης. Συνεπώς από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι:

Συνολική Ισχύς = 1366 ×  $\pi R_{\Gamma}^2 \cong 1.73 \times 10^{17} W$ 



Σχήμα 1.2. Ετήσια ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της Γης (Chen, 2011).

Όσον αφορά στην συνολική ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη Γη από τον Ήλιο, για ένα έτος είναι ίση με περίπου 5.46 × 10<sup>24</sup> J. Αν θεωρηθεί ότι η ισχύς που υπολογίστηκε παραπάνω, κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της Γης, τότε αρκεί να υπολογιστεί ο παρακάτω τύπος, για να βρεθεί η ισχύς ανά μονάδα επιφανείας:

$$\frac{P_{\Gamma}}{A} = \frac{1366 \times \pi R_{\Gamma}^2}{4\pi R_{\Gamma}^2} = 341.5 \ W/m^2$$

Βέβαια, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει ακριβώς λόγω του ωοειδούς σχήματος της Γης, με αποτέλεσμα η κλίση πρόσπτωσης των ακτίνων του Ήλιου να διαφέρει από τόπο σε τόπο. Συνεπώς, προσλαμβάνονται μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, που οδηγούν και σε ενεργειακό πλεόνασμα εκεί, σε μία εκτεταμένη ζώνη του Ισημερινού, όπου οι ακτίνες του Ήλιου προσπίπτουν υπό μικρότερη γωνία σε σχέση με τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, τα οποία δέχονται μικρότερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας που οδηγούν σε ενεργειακό έλλειμα. Για την εξισορρόπηση του πλεονάσματος και ελλείματος ενέργειας γίνεται μεταφορά ενέργειας από τα μικρά στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Στο Σχήμα 1.3 περιγράφεται το ενεργειακό ισοζύγιο Γης. Σχεδόν το 30% της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται στο διάστημα, ενώ το 20% απορροφάται από τα σύννεφα και τα ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια (Chen, 2011). Έστω ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία ισούται με 100 ποσοστιαίες μονάδες. Οι υπόλοιποι αριθμοί που εμφανίζονται αντιπροσωπεύουν μέρος των 100 αυτών μονάδων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3, από τις 100 μονάδες ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχονται στο σύστημα Γης – Ατμόσφαιρας, οι 19 απορροφώνται στην ατμόσφαιρα από τα διάφορα αέρια, τα αερολύματα και τα νέφη, οι 51 απορροφώνται από την επιφάνεια του εδάφους και οι 30 ανακλώνται στο διάστημα, οι 20 από τα νέφη, οι 4 από την επιφάνεια της Γης και οι 6 από τα μόρια των αερίων της ατμόσφαιρας. Το Σχήμα 1.3 περιλαμβάνει και δείχνει επίσης και το ισοζύγιο της γήινης, μεγάλου μήκους κύματος, ακτινοβολίας, όμως αυτή δεν μας αφορά στην παρούσα εργασία και δε περιγράφεται εδώ. Στην ουσία στην παρούσα εργασία και δε περιγράφεται εδώ. Στην ουσία στην επιφάνεια της Γης, δεδομένου ότι αυτό συνιστά το ηλιακό δυναμικό που εκμεταλλεύονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα.



**Σχήμα 1.3.** Σχηματική αναπαράσταση του παγκόσμιου ενεργειακού ισοζυγίου. Οι αριθμοί είναι προσεγγιστικές τιμές οι οποίες προέρχονται από παρατηρήσεις εδάφους και δεδομένα από δορυφόρους (Ahrens C. D., 2006).

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η φυσική παράμετρος η οποία μελετάται στην παρούσα εργασία είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει (εισέρχεται) στην επιφάνεια της Γης ή αλλιώς SSR (Surface Solar Radiation). Στο Σχήμα 1.4 (Stamatis et al., 2023), απεικονίζεται μία πρόσφατη απεικόνιση της παγκόσμιας μέσης κλιματολογικής χωρικής κατανομής της SSR για τη χρονική περίοδο 1984 έως 2018, βάσει του μοντέλου FORTH-RTM (radiative transfer model). Στο ίδιο Σχήμα φαίνονται οι μέσες τιμές της παραμέτρου αυτής από μετρήσεις των σταθμών GEBA (Global Energy Balance Archive) και BSRN (Baseline Surface Radiation Network). Παρατηρείται ότι, οι τιμές της SSR κυμαίνονται από 25 έως 314.77 W/m<sup>2</sup>, ενώ η μέση τιμή της είναι ίση με 183.02 W/m<sup>2</sup>. Οι μεγαλύτερες τιμές της παρατηρούνται στα μικρά γεωγραφικά πλάτη, περίπου ανάμεσα στις 30° νότια και στις 30° βόρεια του Ισημερινού, ενώ οι μικρότερες τιμές της παρατηρούνται στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Όσον αφορά στον ελληνικό χώρο, οι τιμές της SSR

είναι κοντά στα 100 με 120 W/m<sup>2</sup>, τιμές που είναι μικρότερες συγκριτικά με αυτές της Μεσογείου θάλασσας (περίπου 220 W/m<sup>2</sup>) και των βόρειων περιοχών της Αφρικής (περίπου 260 W/m<sup>2</sup>).

Το μέγεθος των τιμών και η χωρική κατανομή της SSR εξηγούνται από τους παράγοντες από τους οποίους αυτή εξαρτάται. Αυτοί είναι κυρίως αστρονομικοί παράγοντες, όπως η απόσταση Ήλιου – Γης και η ζενίθια γωνία του Ήλιου και η θέση ενός τόπου (γεωγραφικό πλάτος), αλλά και η μεταβλητότητα της σύνθεσης της γήινης ατμόσφαιρας, η οποία συνδέεται κυρίως με τα αερολύματα και τα νέφη, τα αέρια της ατμόσφαιρας (κυρίως υδρατμούς, όζον και διοξείδιο του άνθρακα) και τις ανθρώπινες δραστηριότητες (Hatzianastassiou et al., 2020, Wild et al., 2009, López et al., 2019, Luo et al., 2019). Οι παραπάνω παράγοντες, εκτός της διαμόρφωσης των γεωγραφικών χαρακτηριστικών της SSR, είναι ικανοί να εξηγήσουν και τη διαχρονική μεταβολή της, οδηγώντας είτε σε σκίαση (dimming), είτε σε λάμπρυνση (brightening). Για παράδειγμα, η αύξηση ή η μείωση των φορτίων των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων, μπορεί να μειώσει είτε να αυξήσει την SSR, ένα φαινόμενο που μεγιστοποιείται υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (Stamatis et al., 2023). Έτσι παρατηρήθηκε ότι, από το 1950 έως το 1980 ηλιακή εξασθένηση σε αρκετά σημεία της Γης, την οποία διαδέχτηκε η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Αυτή η μετάβαση από την εξασθένιση της SSR, στη λάμπρυνση συνδέθηκε με την αντίστοιχη μείωση των εκπομπών αερολυμάτων, από την δεκαετία του 1980, ιδίως σε βιομηχανικές περιοχές (Stamatis et al., 2023). Τέλος οι Stamatis et al. (2023), απέδειξαν ότι για τη χρονική περίοδο 1984 έως 2018, σε παγκόσμια κλίμακα η συμβολή της συνολικής νεφοκάλυψης στο φαινόμενο της σκίασης/λάμπρυνσης της SSR ήταν μεγαλύτερη από αυτήν του οπτικού πάχους των αερολυμάτων, παρόλο που και οι δύο παράμετροι οδήγησαν σε λάμπρυνση. Συνεπώς, για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, επιβεβαιώθηκε ο κυρίαρχος ρόλος των νεφών για τη διαμόρφωση της κατανομής της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 1.4.** Η παγκόσμια μέση χωρική κατανομή της SSR, από το μοντέλο FORTH-RTM για τη χρονική περίοδο 1984 έως 2018. Στο Σχήμα φαίνεται και ο μέσος όρος της SSR, όπως και η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της, καθώς και οι τιμές SSR από τους σταθμούς GEBA και BSRN, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογήσουν το μοντέλο RTM (Stamatis et al., 2023).

### 1.2 Ανεμος

Ο άνεμος είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο παρατηρείται στη Γη λόγω του διαφορετικού ρυθμού θέρμανσης του εδάφους και του υπερκείμενου αέρα. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως "στοχαστικό", καθώς τα χαρακτηριστικά του δεν ακολουθούν κάποιο νόμο της φυσικής, αλλά μεταβάλλονται απρόβλεπτα από τόπο σε τόπο (Sathyajith, 1967). Εκτός από τις καθημερινές και εποχικές διακυμάνσεις, το μοτίβο του ανέμου είναι ικανό να αλλάξει από έτος σε έτος ακόμη και σε ποσοστό 10 έως και 30 τοις εκατό (Sathyajith, 1967). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο άνεμος εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Υπενθυμίζεται ότι, η Γη λαμβάνει περίπου  $1.7 \times 10^{14}$  kW ενέργειας από τον Ήλιο σε μορφή ηλιακής ακτινοβολίας (Sathyajith, 1967). Αποτέλεσμα της ακτινοβολίας αυτής, είναι η θέρμανση του εδάφους και του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία είναι πιο έντονη στα μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, όπου οι ακτίνες του Ήλιου προσπίπτουν με μικρότερη γωνία σε σχέση με τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, όπως αναλύθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Μάλιστα, κυρίως λόγω της κατανομής αυτής της SSR δημιουργείται ενεργειακό πλεόνασμα στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές και έλλειμα στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και στις πολικές περιοχές. Για την εξισορρόπηση αυτών των ανισοτήτων, η ατμόσφαιρα μεταφέρει θερμό αέρα προς τους πόλους και ψυχρό αέρα προς τον Ισημερινό (Ahrens and Henson, 2023). Αυτή η άνιση θέρμανση της επιφάνειας της Γης, είναι και το υποκείμενο αίτιο της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (Ahrens and Herson, 2023). Το Σχήμα 1.5 αναφέρεται στην εξιδανικευμένη κατανομή ανέμων και πιέσεων στο σύστημα Γης-ατμόσφαιρας. Από το Σχήμα 1.5 φαίνεται ότι στους πόλους εντοπίζονται περιοχές υψηλών επιφανειακών πιέσεων, ενώ στον Ισημερινό υπάρχει ένας ευρύς αυλώνας χαμηλών επιφανειακών πιέσεων. Πάνω από τα τροπικά νερά του Ισημερινού ο αέρας είναι θερμός, η οριζόντια βαροβαθμίδα είναι ασθενής δημιουργώντας ασθενείς ανέμους (Ahrens and Herson, 2023). Ο θερμός και υγρός αέρας κινείται ανοδικά, με αποτέλεσμα πολλές φορές να συμπυκνώνεται σε σωρειτόμορφα νέφη, τα οποία δημιουργούν καταιγιδοφόρα συστήματα κατακόρυφης ανάπτυξης. Ο ανερχόμενος αέρας φτάνει στην τροπόπαυση, η οποία λειτουργεί σαν εμπόδιο που υποχρεώνει τον αέρα να κινηθεί πλευρικά προς τους πόλους (Ahrens and Herson, 2023). Η δύναμη Coriolis (της οποίας η επίδραση σε μία αέρια μάζα απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6), εκτρέπει αυτή τη ροή προς τα δεξιά στο Βόρειο Ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο Νότιο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυτικοί άνεμοι στα ανώτερα στρώματα, και στα δύο ημισφαίρια (Ahrens and Herson, 2023). Καθώς ο αέρας κινείται από τους Τροπικούς προς τους πόλους, ψύγεται λόγω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ αρχίζει και να συγκλίνει, όσο πλησιάζει τα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Αυτή η σύγκλιση δημιουργεί αύξηση της μάζας του αέρα στα ανώτερα στρώματα, πράγμα που με τη σειρά του προκαλεί αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια. Επομένως στα μέσα γεωγραφικά πλάτη (κοντά στις 30°), παρατηρούνται ζώνες υψηλών πιέσεων που αποκαλούνται υποτροπικά υψηλά (Ahrens and Herson, 2023). Λόγω της ασθενούς βαροβαθμίδας στο κέντρο του βαρομετρικού υψηλού, δημιουργούνται μόνο ασθενείς άνεμοι, πάνω από τους ωκεανούς. Κοντά στο γεωγραφικό πλάτος 30°, μέρος του επιφανειακού αέρα κινείται προς τον Ισημερινό, όμως λόγω της επίδρασης της δύναμης Coriolis, η κίνηση αυτή δε γίνεται σε ευθεία ροή, με αποτέλεσμα άνεμοι να πνέουν από τα βορειοανατολικά στο Βόρειο Ημισφαίριο και από τα νοτιοανατολικά στο Νότιο Ημισφαίριο, δημιουργώντας έτσι τους αληγείς ανέμους. Όμως, στα γεωγραφικά πλάτη κοντά στις 30°, ο επιφανειακός αέρας δεν κινείται εξ' ολοκλήρου προς τον Ισημερινό, αλλά μέρος αυτού κινείται προς τους πόλους και εκτρέπεται προς τα ανατολικά δημιουργώντας δυτικούς ανέμους. Στη συνέχεια, ο ήπιος επιφανειακός αέρας κινείται από γεωγραφικό πλάτος 30° προς τους πόλους και συναντά ψυχρό αέρα που κινείται από τους πόλους προς τα κάτω (Ahrens and Herson, 2023). Αυτές οι δύο αέριες μάζες, δεν αναμειγνύονται αλλά διαχωρίζονται από ένα όριο το οποίο ονομάζεται πολικό μέτωπο, μία ζώνη γαμηλών πιέσεων γνωστή ως υποπολικό γαμηλό. Από το Σγήμα 1.5 φαίνεται ότι, πίσω από το πολικό μέτωπο ο ψυχρός αέρας εκτρέπεται από τη δύναμη Coriolis, με αποτέλεσμα η ροή να είναι από τα βορειοανατολικά και να επικρατούν οι πολικοί ανατολικοί άνεμοι. Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, οι αληγείς ανατολικοί άνεμοι πνέουν από το υποτροπικό υψηλό προς τον Ισημερινό, οι δυτικοί άνεμοι πνέουν από το υποτροπικό υψηλό προς το πολικό μέτωπο και οι πολικοί άνεμοι πνέουν από τους πόλους προς το πολικό μέτωπο.



**Σχήμα 1.5.** Σχηματική απεικόνιση της γενικής κυκλοφορίας και κατανομή των ανέμων και των πιέσεων (Pearson Prentice Hall, 2004).



Low pressure region Σχήμα 1.6. Η επίδραση της δύναμης Coriolis, στη κατεύθυνση του ανέμου (Sathyajith, 1967).

Εκτός από το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, ενδιαφέρον έχει να αναφερθούν και κάποια μικρότερης κλίμακας συστήματα ανέμων. Από κλιματολογικής άποψης, οι άνεμοι μπορούν να διαχωριστούν στους εποχικούς, στους ημερήσιους και στους τοπικούς (Φλόκας, 1992). Ένα παράδειγμα εποχικών ανέμων είναι οι μουσσώνες. Αυτοί, είναι άνεμοι που δημιουργούνται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ωκεανών και ηπείρων, τόσο το χειμώνα όσο και το θέρος. Καθώς τη χειμερινή περίοδο οι θάλασσες είναι πιο θερμές από τις ηπειρωτικές εκτάσεις και η πίεση, είναι μικρότερη πάνω από τις θάλασσες, άνεμοι πνέουν σταθερά από την ξηρά προς τη θάλασσα (Φλόκας, 1992). Το αντίστροφο συμβαίνει τη θερμή περίοδο, με αποτέλεσμα άνεμοι να πνέουν από τη θάλασσα προς την ξηρά. Αυτή η εποχική αντιστροφή των ανέμων παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή ανάπτυξη στην ανατολική και νότια Ασία (Ahrens and Herson, 2023). Στη συνέχεια, ένα παράδειγμα τοπικού ανέμου αποτελεί ο άνεμος τύπου Foehn. Ο άνεμος αυτός γνωστός και ως «λίβας», είναι θερμός, ξηρός καταβατικός που παρατηρείται στις υπήνεμες πλαγιές βουνών. Όταν πνέουν άνεμοι τύπου Foehn σε μία περιοχή, η θερμοκρασία ανεβαίνει απότομα ακόμη και 20°C ή περισσότερο σε μικρό χρονικό διάστημα ενώ, παρατηρείται και απότομη πτώση της σχετικής υγρασίας περιστασιακά σε επίπεδα κάτω του 5% (Ahrens and Herson, 2023). Τέλος, ένα ακόμη παράδειγμα τοπικών ανέμων είναι οι Ετησίες (μελτέμια). Είναι σταθεροί, ΒΑ – ΒΔ ή και δυτικοί άνεμοι στα νότια Δωδεκάνησα, που πνέουν στην ανατολική λεκάνη της Μεσογείου και ιδιαίτερα στο Αιγαίο Πέλαγος από τον Μάϊο μέχρι και τον Οκτώβριο, ενώ οφείλονται στο θερινό ελάχιστο των Ινδιών αλλά και στον Αντικυκλώνα των Αζορών (Φλόκας, 1992). Συνεπώς, ο άνεμος είναι ένα φυσικό

φαινόμενο του οποίου τα χαρακτηριστικά αλλάζουν από τόπο σε τόπο. Η ταχύτητά του, όσο και η διεύθυνση τουλάγιστον μέγρι τα 100m από την επιφάνεια του εδάφους, μπορούν να επηρεαστούν από τοπικούς παράγοντες και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Παρακάτω ακολουθούν κάποια παραδείγματα επίδρασης των ημερήσιων ανέμων και η επίδρασης τους στον τόπο που ενεργούν. Η θαλάσσια και απόγειος αύρα είναι ένα παράδειγμα ημερήσιων ανέμων που επηρεάζουν το μοτίβο του ανέμου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ξηρά θερμαίνεται πιο γρήγορα και έντονα από τη θάλασσα, λόγω της μικρής θερμοχωρητικότητας της πρώτης, με αποτέλεσμα ο αέρας που βρίσκεται πάνω από την ξηρά να ανυψώνεται και να κατευθύνεται προς τη θάλασσα, όπου ο αέρας είναι πιο ψυχρός. Αυτή η ανύψωση και στη συνέχεια πτώση του αέρα δημιουργεί ένα μικρό σύστημα κυκλοφορίας, το οποίο έλκει άνεμο από τη θάλασσα προς τη ξηρά και ονομάζεται θαλάσσια αύρα. Το βράδυ καθώς η θερμοκρασία πέφτει, η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται, καθώς πλέον η ξηρά ψύγεται πιο γρήγορα από τη θάλασσα, με αποτέλεσμα αέρας να πνέει από την ξηρά προς τη θάλασσα, η κυκλοφορία αυτή ονομάζεται απόγειος αύρα. Άλλο ένα παράδειγμα είναι οι ορεινές κοιλάδες. Ο αέρας εκεί πάνω από την επιφάνεια, θερμαίνεται και ανυψώνεται κατά μήκος της πλαγιάς κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτός, αντικαθίσταται από ψυχρό αέρα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται άνεμοι από την κοιλάδα προς το βουνό. Το φαινόμενο αυτό αντιστρέφεται τη νύχτα όπου η ροή ξεκινά από το βουνό και καταλήγει στην κοιλάδα δημιουργώντας υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις ισχυρούς ορεινούς ανέμους. Η διάτμηση του ανέμου, η δυναμική αστάθεια, η τύρβη, φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μέσα στο ΑΟΣ (Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα), τα φυσικά εμπόδια που υπάρχουν λόγω ορογραφίας είναι κάποια άλλα παραδείγματα που αποδεικνύουν ότι ο άνεμος είναι ένα φαινόμενο που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε τόπου (Sathyajith, 1967).

Τέλος, το κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου, εξαρτάται από το τύπο εδάφους. Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να επιβραδυνθεί από την τριβή που δέχεται λόγω της επιφάνειας του εδάφους (φαινόμενο του οριακού στρώματος). Η αντίσταση που δημιουργείται λόγω της τριβής, μπορεί να οφείλεται είτε στην τραχύτητα (το μήκος τραχύτητας του εδάφους), είτε στη βλάστηση και στα κτήρια, είτε σε άλλες υποδομές που υπάρχουν πάνω στο έδαφος (Sathyajith, 1967). Στο Σχήμα 1.7, απεικονίζεται ένα τυπικό κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το ύψος. Παρατηρείται ότι η ταχύτητα αυξάνεται συναρτήσει του ύψους μη γραμμικά. Ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, εξαρτάται από το μήκος τραχύτητας του εδάφους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8 όπου δείχνεται ότι για μεγαλύτερες τιμές του μήκους τραχύτητας ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου είναι πιο έντονος. Τύποι εδάφους με πυκνή βλάστηση, δέντρα ή δάση επιβραδύνουν αρκετά τον άνεμο. Αντιθέτως, τα επίπεδα και ομαλά εδάφη δεν έχουν μεγάλη επίδραση στη ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, παρατηρείται ότι το μήκος τραχύτητας επηρεάζει αρκετά τη διαμόρφωση του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δειχθεί και μαθηματικά ο τρόπος με τον οποίο το μήκος τραχύτητας εμπλέκεται στον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού.



**Σχήμα 1.7.** Η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους (Sathyajith, 1967).



**Σχήμα 1.8.** Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου, συναρτήσει διαφορετικών μηκών τραχύτητας (Sathyajith, 1967).

### Κεφάλαιο 2º ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 Επανανάλυση (Reanalysis) - Επίγεια δεδομένα

#### 2.1.1 ERA5 Reanalysis

To ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) είναι επανανάλυση (reanalysis) πέμπτης γενιάς του μοντέλου ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast), που υλοποιήθηκε από την υπηρεσία Copernicus Climate Change Service (C3S). To ERA5 παρέγει ωριαίες εκτιμήσεις για μεγάλο αριθμό ατμοσφαιρικών, γερσαίων και ωκεάνιων κλιματικών μεταβλητών, από τον Ιανουάριο του 1940 έως και σήμερα. Τα δεδομένα καλύπτουν τον πλανήτη σε πλέγμα 27.5 χιλιομέτρων, ενώ παράλληλα αναλύουν την ατμόσφαιρα σε 137 επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι και 80 χιλιόμετρα (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5). Mε χωρική ανάλυση 0.25° × 0.25° γεωγραφικό πλάτος και μήκος (περίπου 27.5 km), το ERA5 προσφέρει την υψηλότερη χωρογρονική ανάλυση από όλα τα reanalyses που παρέχουν παγκόσμια κάλυψη (Potisomporn et al., 2023). Επίσης, το γεγονός ότι οι μετρήσεις του ERA5 reanalysis εκτείνονται από το 1940 έως και σήμερα είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα, καθώς προσφέρει στην επιστημονική κοινότητα μεγάλο χρονικό εύρος μετρήσεων, οι οποίες προέργονται από ένα συνδυασμό παρατηρήσεων από προηγούμενες βραχυπρόθεσμες μετεωρολογικές προβλέψεις που επανεκτελούνται με σύγγρονα μοντέλα πρόβλεψης καιρού. Για το λόγο αυτό, το ERA5 reanalysis παρέχει την πληρέστερη δυνατή εικόνα του καιρού και του κλίματος τόσο για το παρόν όσο και για το παρελθόν (https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2023/fact-sheetreanalysis). Στο Σχήμα 2.1. απεικονίζεται η διαδικασία με την οποία παράγονται τα δεδομένα μέσω reanalysis, όπου παρατηρείται ο συνδυασμός παλαιότερων βραχυπρόθεσμων μετεωρολογικών προγνώσεων με παρατηρήσεις μέσω αφομοίωσης δεδομένων (data assimilation). Η αφομοίωση αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση διαφόρων μαθηματικών τεχνικών, πιο συγκεκριμένα η μέθοδος που χρησιμοποιείται στο ECMWF είναι η 4D-Var (four-dimensional variational data assimilation). Η διαδικασία είναι παρόμοια με την εξαγωγή καθημερινών μετεωρολογικών προγνώσεων, οι οποίες βασίζονται στην ανάλυση και παρατήρηση της τρέχουσας κατάστασης του καιρού. Έτσι, το reanalysis αποτελεί ένα συνδυασμό βραχυπρόθεσμων μετεωρολογικών προγνώσεων και δορυφορικών δεδομένων, ο οποίος παράγει και το τελικό αποτέλεσμα το οποίο γρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία (https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2023/fact-sheet-reanalysis).


**Σχήμα 2.1.** Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας παραγωγής των δεδομένων reanalysis (<u>https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2023/fact-sheet-reanalysis</u>, 2023).

Στην παρούσα εργασία, από το ERA5 χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος (Solar Surface Radiation, SSR), καθώς και η ταχύτητα του ανέμου στα 10m από το έδαφος. Αρχικά, όσον αφορά στην SSR οι τιμές της είναι μηνιαίες με χωρική ανάλυση 0.25° × 0.25° (περίπου 27.5 km) και χρονική κάλυψη 82 ετών, από τον Ιανουάριο του 1940 έως και το Δεκέμβριο του 2022. Η παράμετρος αυτή περιλαμβάνει τόσο την άμεση όσο και τη διάγυτη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης. Τα δεδομένα αυτά της ηλιακής ακτινοβολίας συσσωρεύονται για μία ημέρα (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels monthly-means?tab=overview) και στη συνέγεια γρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μέσων μηνιαίων τιμών, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία. Η παράμετρος της SSR δίνεται σε J/m<sup>2</sup>, όμως καθώς η πιο συνηθισμένη μονάδα μέτρησης για την ηλιακή ακτινοβολία είναι τα W/m<sup>2</sup>, έγινε μετατροπή διαιρώντας με την περίοδο συσσώρευσης δηλαδή τη 1 ημέρα (W=J/s). Στη συνέχεια, από το ERA5 χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος της οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου στα 10m από την επιφάνεια της Γης, με χωρική ανάλυση 0.25° × 0.25°. Η παράμετρος αυτή εκφράζεται σε m/s. Τέλος, από το ERA5 αντλήθηκε και η παράμετρος του μήκους τραγύτητας, που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού (βλ. Κεφάλαιο 2.2) και πάλι με χωρική ανάλυση  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ .

Αν και το ERA5 reanalysis είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη χωροχρονικών φαινομένων σε μεγάλη χρονική κλίμακα, είναι αναγκαίο η επίδοσή του να αξιολογείται με δεδομένα/μετρήσεις από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς του ευρύτερου

ελληνικού χώρου, τόσο για την SSR όσο και για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, τα οποία περιγράφονται στην επόμενη ενότητα.

# 2.1.2 Επίγειοι σταθμοί GEBA

Για την αξιολόγηση της επίδοσης του ERA5 για την παράμετρο της SSR χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς GEBA. Ειδικότερα, η βάση δεδομένων Global Energy Balance Archive (GEBA), αποτελεί μία βάση επίγειων μετρήσεων, η οποία βρίσκεται στο Institute for Climate and Atmospheric Sciences του ΕΤΗ στη Ζυρίγη (Ζυρίγη, Ελβετία). Παρέχει μέσες μηνιαίες τιμές 15 συνιστωσών της ροής ενέργειας (ολική, διάχυτη και άμεση ακτινοβολία, επιφανειακή λευκαύγεια, κ.λπ.) που μετρήθηκαν σε 2500 σταθμούς κατανεμημένους σε πλανητική κλίμακα, με 500.000 μηνιαίες τιμές (Stamatis et al., 2022). Για την παράμετρο της SSR, μηνιαία δεδομένα μετρούνται με πυρανόμετρα και συλλέγονται από 1397 σταθμούς για τη χρονική περίοδο 1980-2017 (Michalsky, 1999, Wild, 2013). Για την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, εντοπίστηκαν 22 διαθέσιμοι σταθμοί με δεδομένα από το 1955 έως και το 2021. Στον Πίνακα Π2.1, παρατίθενται τα στοιχεία των διαθέσιμων σταθμών GEBA, για την περιοχή μελέτης, ενώ η θέση τους φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Στον Πίνακα Π2.1 αναγράφονται οι κωδικές ονομασίες των σταθμών, καθώς και τα ονόματα των πόλεων στις οποίες βρίσκονται οι σταθμοί. Ακόμη, αναφέρονται το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του κάθε σταθμού, η γρονική διάρκεια την οποία καλύπτουν οι μετρήσεις τους, καθώς και το υψόμετρο του κάθε σταθμού εκπεφρασμένο σε μέτρα από τη στάθμη της θάλασσας. Οι μηνιαίες τιμές της SSR παρέγονται σε W/m<sup>2</sup>. Στο Σχήμα 2.2 εκτός από τη γεωγραφική κατανομή των 22 διαθέσιμων σταθμών, παρέχεται και ο συνολικός αριθμός των μηνών για τους οποίους οι σταθμοί παρείχαν μετρήσεις. Παρατηρείται στο Σχήμα 2.2 ότι ο αριθμός των διαθέσιμων μηνών με μετρήσεις κυμαίνεται από 12 έως 564. Οι σταθμοί GEBA, φαίνεται να παρέχουν στην πλειοψηφία τους τιμές για 100 με 200 μήνες, ενώ υπάρχουν αρκετοί σταθμοί για τους οποίους η διαθεσιμότητα αυξάνεται έως τους 400 μήνες.

**Πίνακας Π2.1:** Οι σταθμοί GEBA με την κωδική τους ονομασία καθώς και την ονομαστική. Παρέχονται για τον κάθε σταθμό οι γεωγραφικές συντεταγμένες του, το πρώτο και το τελευταίο έτος για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις, καθώς και το υψόμετρο του πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Σταθμοί GEBA	Latitude (°)	Longitude (°)	First	Last Year	Altitude
			Year		(m)
1182 (Sofia)	42.683	23.333	1964	2010	588
1183(Cherni Vrah)	42.583	23.250	1964	1995	2285
1184 (Chirpan)	42.200	25.333	1983	1999	175
1185 (Kurdjali)	41.650	25.366	1964	1977	240
1186 (Sandanski)	41.516	23.266	1985	2005	206
1306 (Trikala)	40.583	22.550	1981	1993	1
1307 (Arta)	39.166	21.000	1979	1993	11
1308 (Aliartos)	38.383	23.099	1977	1993	110
1309(Filadelfia/Athens)	38.050	23.666	1977	1993	138
1310 (Sikiwna)	37.983	22.733	1981	1993	150
1311 (Athens)	37.966	23.716	1955	1985	107
1312 (Andravida)	37.916	21.283	1978	1993	12
1313 (Argos/Pyrgela)	37.600	22.783	1982	1993	13
1314 (Tymbakion)	35.000	24.766	1977	1993	7
1430 (Izmir)	38.433	27.066	1983	1983	25
1452 (Pristina)	42.650	21.150	1968	1990	573
1453 (Bar)	42.100	19.099	1964	1991	6
1454 (Skopje)	41.983	21.466	1964	1976	240
1455 (Ulcinj)	41.916	19.216	1964	1965	97
1456 (Bitola)	41.050	21.366	1969	1990	586
3703 (Thessaloniki)	40.630	22.960	1992	2021	60
3772 (Kogen)	41.550	24.733	1996	1998	1750



**Σχήμα 2.2.** Η γεωγραφική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών GEBA στην περιοχή ενδιαφέροντος των οποίων δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Παρέχεται επίσης για τον κάθε σταθμό ο αριθμός των μηνών με διαθέσιμα δεδομένα.

## 2.1.3 <u>Μετεωρολογικοί σταθμοί Εθνικής Μετεωρολογικής</u> <u>Υπηρεσίας (EMY)</u>

Για την αξιολόγηση της παραμέτρου της ταχύτητας του ανέμου στα 10m από την επιφάνεια του εδάφους, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από την EMY για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, υπολογίζονταν για κάθε μέρα ανά τρεις ώρες, ενώ ο υπολογισμός γινόταν σε μονάδα μέτρησης κόμβων (knots). Επίσης σημειώνεται ότι τα δεδομένα των σταθμών καλύπτουν τη χρονική περίοδο 47 ετών από το 1955 έως και το 2002. Στον Πίνακα Π2.2, αναγράφονται αναλυτικά τα ονόματα και οι κωδικές ονομασίες των δεκατεσσάρων (14) σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ακόμη, αναφέρονται οι γεωγραφικές τους συντεταγμένες (γεωγραφικό μήκος και πλάτος), το πρώτο και το τελευταίο έτος για το οποίο ο κάθε σταθμός είχε καταγράψει μετρήσεις, ενώ δίνεται και το υψόμετρο σε m του κάθε σταθμού από τη στάθμη της θάλασσας. Καθώς τα δεδομένα του ανέμου από το ERA5 ήταν μηνιαία, τα δεδομένα των σταθμών μετατράπηκαν από τρίωρα σε μηνιαία. Ακόμη, χρειάστηκε να γίνει η μετατροπή των δεδομένων των σταθμών από κόμβους σε m/s (1knot = 0.51 m/s). Στο Σχήμα 2.3, παρατίθεται η γεωγραφική κατανομή των διαθέσιμων σταθμών, καθώς και ο αριθμός των μηνών με διαθέσιμα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου στα 10m. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των μηνών κυμαίνεται από 29 έως 576, με τον μικρότερο αριθμό μηνών να είναι για τους σταθμούς της Ιεράπετρας (29) και του Αγρινίου (37). Με εξαίρεση αυτούς τους δύο σταθμούς, η διαθεσιμότητα των δεδομένων για τους υπόλοιπους σταθμούς, είναι ικανοποιητική (με περισσότερους από 484 μήνες).

**Πίνακας Π2.2.** Οι σταθμοί της ΕΜΥ με την κωδική τους ονομασία καθώς και την ονομαστική. Παρέχονται για τον κάθε σταθμό οι γεωγραφικές συντεταγμένες του, το πρώτο και το τελευταίο έτος για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις, καθώς και το υψόμετρο του πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Σταθμοί ΕΜΥ	Longitude (°)	Latitude (°)	First	Last	Altitude
			year	year	(m)
672 (Αγρίνιο)	21.35	38.6	1956	2002	24
627 (Αλεξανδρούπολη)	25.916	40.85	1955	2002	2.5
754 (Ηράκλειο)	25.18	35.33	1955	2002	37
756 (Ιεράπετρα)	25.73	35	1956	2002	10
642 (Ιωάννινα)	20.816	39.7	1956	2002	483
641 (Κέρκυρα)	19.916	39.616	1955	2002	2
632 (Κοζάνη)	21.783	40.3	1955	2002	625
648 (Λάρισα)	22.416	39.633	1955	2002	71
650 (Λήμνος Αεροδρόμιο)	25.233	39.916	1974	2002	3
667 (Μυτιλήνη)	26.6	39.066	1955	2002	4.2
732 (Νάξος)	25.383	37.1	1955	2002	9
749 (Ρόδος)	28.083	36.4	1955	2002	34.7
710 (Τρίπολη)	22.4	37.533	1957	2002	652.4
651 (Λήμνος Πόλη)	25.066	39.883	1956	1973	13



**Σχήμα 2.3.** Η γεωγραφική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ στην περιοχή ενδιαφέροντος των οποίων δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Παρέχεται επίσης για τον κάθε σταθμό ο αριθμός των μηνών με διαθέσιμα δεδομένα.

#### 2.2 Μεθοδολογία – Αλγόριθμος

Για τον υπολογισμό του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, κατά την περίοδο 82 ετών (1940 – 2022), είναι απαραίτητες δύο παράμετροι: i) η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος (SSR) και ii) η ταχύτητα του ανέμου στα 10m από την επιφάνεια της Γης. Για τον υπολογισμό αυτό δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος του οποίου η λειτουργία βασίζεται στις δύο αυτές παραμέτρους (SSR και ταχύτητα του ανέμου στα 10m). Με τον αλγόριθμο αυτόν και αντλώντας δεδομένα από το ERA5 reanalysis κατέστη εφικτός ο υπολογισμός του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού.

Όσον αφορά στο ηλιακό δυναμικό, είναι γνωστό ότι αυτό εκφράζεται απευθείας από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος, συνεπώς δεν είναι απαραίτητοι περεταίρω υπολογισμοί. Αντιθέτως, το αιολικό δυναμικό δεν ταυτίζεται με την ταχύτητα του ανέμου, με τον υπολογισμό του σε κάποιο ύψος Η από την επιφάνεια της Γης να γίνεται μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V(Z_R)^3$$
(1.1)

$$\rho = 1,226 \, e^{-(3,1089 \, 10^{-5} H)} \tag{1.2}$$

$$V(Z_R) = V(Z) \frac{\ln \left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)}{\ln \left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$
(1.3)

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ανέμου στο μελετώμενο ύψος, Η το ύψος (η απόσταση) της πτερωτής της ανεμογεννήτριας από την επιφάνεια της Γης,  $V(Z_R)$  η ταχύτητα του ανέμου στο υπό μελέτη ύψος, V(Z) η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος στο οποίο τα δεδομένα του ανέμου είναι διαθέσιμα (στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα 10m),  $Z_R$  το ύψος (επίπεδο της ατμόσφαιρας) στο οποίο βρίσκεται η πτερωτή και σε αυτό ανάγεται η ταχύτητα του ανέμου, Z το ύψος στο οποίο είναι διαθέσιμα τα δεδομένα του ανέμου και  $Z_0$  το μήκος τραχύτητας, το οποίο αντλήθηκε και αυτό όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, από το ERA5 reanalysis για την περιοχή μελέτης.

Όσον αφορά στην ανάλυση του ανέμου, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να μελετηθεί η ταχύτητα του ανέμου στα 10m, ύψος στο οποίο ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα τόσο του ERA5 reanalysis όσο και αυτά των μετρήσεων από τους μετεωρολογικούς Σταθμούς. Το αιολικό δυναμικό υπολογίστηκε για ύψος ανεμογεννήτριας στα 50m και στα 100m, δηλαδή ύψη στα οποία τοποθετούνται συχνότερα ανεμογεννήτριες στον ευρύτερο ελληνικό χώρο. Ακόμη, επιλέχθηκε η παράμετρος του ανέμου να μελετηθεί στα 10m ως προς την ταχύτητά της, έτσι ώστε η ανάλυση να καταστεί πιο ολοκληρωμένη. Η κλιματολογική ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου να μελετηθεί στα 10m ως προς την ταχύτητά της παραμέτρου να είναι αντικειμενική και να μην επηρεάζεται από το ύψος τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας.

Ο αλγόριθμος δημιουργήθηκε έτσι ώστε να εξάγει αποτελέσματα για το ηλιακό δυναμικό, την ταχύτητα του ανέμου στα 10m και το αιολικό δυναμικό στα 50m και 100m για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια κλιματολογική βάση, για την περίοδο αναφοράς των 82 ετών (1940 – 2022). Στο διάγραμμα ροής (flow chart) που ακολουθεί στο Σχήμα 2.4, απεικονίζεται η δομή λειτουργίας του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, τα αρχικά δεδομένα (SSR και ταχύτητα του ανέμου στα 10m) εισάγονται στον αλγόριθμο από το ERA5 reanalysis, ενώ αυτά αξιολογήθηκαν με επίγειους σταθμούς GEBA για την SSR και με επίγειους σταθμούς της EMY για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m. Έτσι, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων για το ηλιακό δυναμικό, την ταχύτητα του ανέμου στα 10m αλλά και για το αιολικό δυναμικό στα 50m και 100m, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4. Διάγραμμα ροής (flowchart) της δομής και της λειτουργίας του αλγόριθμου που δημιουργήθηκε για την εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, του αιολικού δυναμικού στα 50m και 100m, καθώς και της αζιολόγησης των δεδομένων του ERA5 reanalysis απέναντι σε επίγειους σταθμούς για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στον αλγόριθμο εισάγονται μηνιαία δεδομένα ERA5 reanalysis της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m. Υπενθυμίζεται ότι τα δεδομένα έχουν χωρική ανάλυση 27.5 km × 27.5 km (0.25° × 0.25°) καλύπτοντας τη χρονική περίοδο 82 ετών, από το 1940 - 2022. Έτσι, αρχίζοντας από τα αρχικά μηνιαία δεδομένα πραγματοποιήθηκαν μεσοποιήσεις σε εποχική και ετήσια βάση και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μεσοποιήσεις των μηνιαίων και ετήσιων τιμών σε μέση κλιματολογική βάση για την περίοδο μελέτης.

Για τη μελέτη της γεωγραφικής κατανομής του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού, ο αλγόριθμος υπολόγισε αρχικά τη μέση ετήσια κλιματολογική (χρονικά μεσοποιημένες τιμές για την περίοδο μελέτης 1940-2022) χωρική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m από το έδαφος, του αιολικού δυναμικού στα 50m από το έδαφος καθώς και του αιολικού δυναμικού στα 100m από το έδαφος. Αυτή η μέση κλιματολογική χωρική κατανομή υπολογίσθηκε επίσης σε μηνιαίο και εποχικό επίπεδο. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι τάσεις μεταβολής των παραπάνω παραμέτρων, καθώς και οι αντίστοιχες σχετικές επί τοις εκατό τάσεις μεταβολής. Για τον υπολογισμό των τάσεων μεταβολής στον αλγόριθμο εφαρμόσθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο, όταν τα εκάστοτε δεδομένα ακολουθούν γραμμική τάση, η μαθηματική σχέση που τα συνδέει είναι η παρακάτω (Καμαράτος, 2017):

$$y = a + bx \tag{1.4}$$

όπου α και b σταθερές που μπορούν να προσδιοριστούν από τη γραφική παράσταση, μετά τη χάραξη της καλύτερης δυνατής ευθείας που ακολουθούν τα δεδομένα (Καμαράτος, 2017). Η σταθερά α δίνεται από την τιμή της y στο σημείο x=0 :

$$\alpha = y|_{x=0} \tag{1.5}$$

Η σταθερά b είναι η κλίση της ευθείας της γραμμικής παρεμβολής και δίνεται από τη σχέση

$$b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$
(1.6)

όπου (x1, y1) και (x2, y2) είναι δύο σημεία της ευθείας (Καμαράτος, 2017). Ο υπολογισμός της γραμμικής τάσης μεταβολής έγινε για κάθε κυψελίδα της περιοχής μελέτης με σκοπό να εξαχθεί η χωρική κατανομή των τάσεων μεταβολής. Ακόμη, στον αλγόριθμο υπολογίστηκε και η στατιστική σημαντικότητα των τάσεων μεταβολής με τη χρήση της παραμέτρου pvalue, ώστε να εντοπισθούν οι στατιστικά σημαντικές τάσεις μεταβολής, στο επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας 95%. Δηλαδή οι τάσεις μεταβολής που έχουν τιμές για την παράμετρο pvalue μικρότερες ή ίσες με 0.05, θεωρούνται στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν εφαρμόζοντας το μη παραμετρικό τεστ Mann Kendall, κατά τη διάρκεια των ογδόντα δύο ετών μελέτης. Το τεστ αυτό χρησιμοποιείται σε δεδομένα μεγάλης χρονοσειράς, ώστε να διαπιστωθεί αν αυτά σημειώνουν στατιστικά σημαντική, είτε θετική, είτε αρνητική, είτε μηδενική τάση (Mann, 1945, Kendall, 1975). Οι απόλυτες τάσεις μεταβολής υπολογίσθηκαν και σε μηνιαία βάση. Όσον αφορά στον υπολογισμό των επί τοις εκατό τάσεων μεταβολής, αυτές υπολογίστηκαν πολλαπλασιάζοντας την κλίση με το εκατό και διαιρώντας με την αντίστοιχη μέση τιμή. Στα πλαίσια της κλιματικής μελέτης των μελετώμενων παραμέτρων, υπολογίστηκε η γρονική μεταβολή αυτών για την περίοδο μελέτης (1940-2022). Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η διαχρονική μεταβολή του ηλιακού δυναμικού, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m και του αιολικού δυναμικού στα 50m και στα 100m για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο. Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκε η μέση τιμή για κάθε έτος των διαθέσιμων δεδομένων, έτσι ώστε να παρουσιάζεται η μεταβολή από έτος σε έτος των μέσων ετήσιων πανελλαδικών (γεωγραφικά μεσοποιημένων) τιμών των μελετώμενων παραμέτρων. Η διαχρονική μεταβολή υπολογίσθηκε και ανά μήνα, όπως και ανά εποχή.

### 2.2.1 Αξιολόγηση του ERA5 reanalysis

Για τον έλεγχο της επίδοσης των δεδομένων του ERA5 επιλέχθηκε να συγκριθεί η τιμή στο σημείο του πλέγματος που βρίσκεται πιο κοντά στο σταθμό. Επίσης δοκιμάστηκε η αξιολόγηση να γίνει όχι μόνο για το κοντινότερο σημείο αλλά και για τα τέσσερα και οκτώ κοντινότερα σημεία του ERA5 και στον κάθε σταθμό. Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με τη χρήση των τεσσάρων και οκτώ κοντινότερων σημείων, φάνηκε να μην υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προήλθαν

από την αξιολόγηση με το κοντινότερο σημείο. Για αυτόν το λόγο επιλέχθηκε τελικά η αξιολόγηση να γίνει για το κοντινότερο γειτονικό σημείο. Και για τα δύο δυναμικά η αξιολόγηση υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μηνιαίες τιμές της SSR και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m. Όμως, για την ηλιακή ακτινοβολία η αξιολόγηση έγινε με χρήση μηνιαίων απεποχοποιημένων (deseasonalized) ανωμαλιών, λόγω του ότι η παράμετρος αυτή (SSR) χαρακτηρίζεται από έντονη/διακριτή εποχικότητα. Οι μηνιαίες απεποχοποιημένες ανωμαλίες, ορίστηκαν στον αλγόριθμο ως:  $F_{i,anomaly} = F_i - \overline{F_i}$ , όπου  $F_i$  είναι η τιμή της παραμέτρου (SSR) για το μήνα i (i = 1-12) ενός έτους και  $\overline{F_i}$  είναι η αντίστοιχη μηνιαία μέση κλιματολογική τιμή μεσοποιημένη για όλα τα έτη της περιόδου μελέτης. Η διαδικασία αυτή του υπολογισμού των απεποχοποιημένων ανωμαλιών (GEBA). Αντίθετα, η αξιολόγηση της ταχύτητας του ανέμου του ERA5 δεν κρίθηκε απαραίτητο να γίνει με μηνιαίες απεχοποιημένες ανωμαλίες απαραίτητο να γίνει του αγίρι του εποχοποιημένων αυτολογισμού του επαραμέτρου αυτή του επολογισμού των απεποχοποιημένων ανωμαλιών ακολουθήθηκε για τις τιμές της SSR τώσο του ΕRA5 που Σταθμών (GEBA). Αντίθετα, η αξιολόγηση της ταχύτητας του ανώμαλίες επειδή η παράμετρος αυτή γενικά δε χαρακτηρίζεται από εποχικότητα.

Για την ποσοτικοποίηση του βαθμού συμφωνίας / διαφωνίας του ERA5 και των σταθμών χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) στατιστικές παράμετροι: η μέση απόκλιση (BIAS), η επί τοις εκατό μέση απόκλιση (BIAS%), ο συντελεστής συσχέτισης Pearson (R), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) καθώς και το επί τοις εκατό σχετικό RMSE (RRMSE), των οποίων οι ορισμοί είναι οι εξής:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i - M) (G_i - G)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (M_i - M)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (G_i - G)^2}}$$
(1.7)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (M_i - G_i)^2}$$
(1.8)

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(M_i - G_i)^2}}{G} 100\%$$
(1.9)

$$BIAS = M - G \tag{1.10}$$

$$BIAS(\%) = \frac{M-G}{G} 100\%$$
(1.11)

όπου n είναι ο αριθμός των μηνιαίων δεδομένων, Mi και Gi είναι οι μηνιαίες τιμές (για τον -i μήνα) τιμές του ERA5 και του εκάστοτε επίγειου σταθμού, αντίστοιχα, ενώ M και G είναι οι μέσες τιμές του ERA5 και του επίγειου σταθμού, αντίστοιχα. Η μεταβλητή R (Εξίσωση (1.7)), είναι ο συντελεστής συσχέτισης που αποτιμά πόσο έντονα σχετίζονται (συνδιακυμαίνονται) οι μελετώμενες παράμετροι, ενώ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE), (Εξίσωση (1.8)) ποσοτικοποιεί το μέσο μέγεθος του σφάλματος, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ του reanalysis και του σταθμού. Επίσης, υπολογίζεται και η κανονικοποιημένη τιμή του RMSE (Εξίσωση (1.9)). Η μέση απόκλιση (BIAS, Εξίσωση (1.10)) υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών του ERA5 και της μέσης τιμής του σταθμού. Σημαντική είναι όμως και η σχετική

εκατοστιαία μέση απόκλιση (BIAS%, Εξίσωση (1.11)). Επισημαίνεται ότι δεν υπολογίσθηκαν μόνο οι συνολικές μέσες τιμές των παραπάνω στατιστικών παραμέτρων, δηλαδή χρησιμοποιώντας όλους τους σταθμούς, αλλά και η γεωγραφική τους κατανομή, δηλαδή ξεχωριστά για τον κάθε σταθμό.

#### 2.2.2 Περιοχές ενδιαφέροντος μελέτης

Η μελέτη και σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού πραγματοποιήθηκε αρχικά για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο. Τα γεωγραφικά όρια της συνολικής περιοχής μελέτης είναι για το γεωγραφικό πλάτος οι 34.5° και 45° και για το γεωγραφικό μήκος οι 19° και 29°. Η έκταση της περιοχής είναι 1.050.000 km<sup>2</sup>. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η γεωγραφική περιοχής μελέτης.



**Σχήμα 2.5.** Η γεωγραφική περιοχή μελέτη (ευρύτερος ελληνικός χώρος) του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού.

Η σύγκριση των δύο δυναμικών επιλέχθηκε να υλοποιηθεί για τις εξής πέντε (5) υποπεριοχές: το Αιγαίο Πέλαγος, το Ιόνιο Πέλαγος, την Κρήτη, τη Βόρεια Ελλάδα και την Πελοπόννησο. Η επιλογή του Αιγαίου και του Ιονίου Πελάγους ως υποπεριοχές για τη σύγκριση των δύο δυναμικών, έγινε καθώς, βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, αλλά και της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, τα δύο αυτά πελάγη έχουν τις μέγιστες τιμές ηλιακού δυναμικού (Kazantzidis et al., 2016) αλλά και του αιολικού δυναμικού στην εν λόγω περιοχή. Η περιοχή της Κρήτης είναι και αυτή μία περιοχή στην οποία εμφανίζονται πολύ μεγάλες τιμές του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού,

ειδικά στις παράκτιες περιοχές της, ενώ το ίδιο ισχύει για τις παράκτιες περιοχές της Πελοποννήσου. Η Βόρεια Ελλάδα, επιλέχθηκε με σκοπό τη σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού και σε χερσαία τμήματα του ευρύτερου ελληνικού χώρου. Στον Πίνακα Π2.3 παρουσιάζονται τα όρια γεωγραφικού μήκους και πλάτους των μελετώμενων υποπεριοχών, ενώ στο Σχήμα 2.6 φαίνονται οι εν λόγω υποπεριοχές στον ευρύτερο ελληνικό χώρο.

Πίνακας Π2.3. Οι υποπεριοχές μελέτης του ευρύτερου ελληνικού χώρου για τις οποίες μελετήθηκε το ηλιακό και το αιολικό δυναμικό. Στον Πίνακα αναγράφονται τα γεωγραφικά όρια (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) καθώς και η έκταση των εν λόγω υποπεριοχών.

Υποπεριοχές	Latitude (°)	Longitude (°)	Έκταση (km <sup>2</sup> )
Κρήτη	34,5 - 36	23 – 27	60.000
Πελοπόννησος	36 - 38,5	21-23,5	62.500
Αιγαίο Πέλαγος	35,6-40,5	24 – 27	147.000
Βόρεια Ελλάδα	39,6-41,8	21 – 27	132.000
Ιόνιο Πέλαγος	36-40	19 – 21	80.000



Σχήμα 2.6. Οι γεωγραφικές υποπεριοχές μελέτης του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο. (1) Βόρεια Ελλάδα, (2) Ιόνιο Πέλαγος, (3) Αιγαίο Πέλαγος, (4) Πελοπόννησος, (5) Κρήτη.

# Κεφάλαιο 3° ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

# 3.1 Αξιολόγηση της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας του ανέμου του ERA5 reanalysis

Αυτή η ενότητα αφιερώνεται στην αξιολόγηση της επίδοσης των δεδομένων του ERA5 reanalysis που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, μέσω σύγκρισης με αντίστοιχα δεδομένα επίγειων μετεωρολογικών σταθμών. Η αξιολόγηση αυτή είναι απαραίτητο να γίνει προκειμένου να εκτιμηθεί και να επιβεβαιωθεί το επίπεδο εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων της εργασίας. Επισημαίνεται ότι δεν πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση για το αιολικό δυναμικό, αλλά μόνο για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, καθώς αυτή είναι η παράμετρος που καταγράφεται από τους επίγειωνς σταθμούς. Υπενθυμίζεται ότι, η επιφανειακή ηλιακή ακτινοβολία (SSR) του ERA5 reanalysis, αξιολογείται με αντίστοιχα δεδομένα που προέρχονται από τους μετεωρολογικός σταθμούς της παγκόσμιας βάσης δεδομένων Global Energy Balance Archive (GEBA), ενώ η ταχύτητα του ανέμου αξιολογείται με μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY).

#### 3.1.1 <u>Αξιολόγηση της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας (SSR)</u>

Για την αξιολόγηση της SSR, έγινε χρήση δεδομένων από τους Σταθμούς GEBA, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Τα διαγράμματα διάχυσης που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1α και 3.1β, αναφέρονται στην αξιολόγηση της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας (SSR) του ERA5 reanalysis. Η αξιολόγηση γίνεται με χρήση τόσο μηνιαίων τιμών της SSR, όσο και των αντίστοιχων απεποποχοποιημένων ανωμαλιών (αποχών). Η χρήση και των απεποχοποιημένων ανωμαλιών της SSR κρίθηκε επιβεβλημένη γιατί όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (βλ. Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.2.1), η εποχικότητα της SSR είναι διακριτή, με αποτέλεσμα τυχόν συνδιακύμανση των τιμών του ERA5 και αυτών των Σταθμών, να οφείλεται στην επογικότητα αυτή. Δίπλα σε κάθε Σχήμα, αναφέρονται τα ονόματα των Σταθμών GEBA, ενώ τα διαφορετικά χρώματα στα γραφήματα υποδηλώνουν τα σημεία που αντιστοιχούν σε κάθε σταθμό. Επίσης, στα διαγράμματα διάγυσης παρουσιάζεται η γραμμική παρεμβολή με μαύρο χρώμα, καθώς και η ευθεία 1:1 με κόκκινο χρώμα και διακεκομμένες γραμμές. Στο κάθε γράφημα παρέχονται επίσης και οι εξής βασικές στατιστικές παράμετροι: R (Συντελεστής Συσχέτισης Pearson), RMSE (Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα), Bias (Μέση Απόκλιση), Slope (Κλίση), Inter ο σταθερός όρος (διατομή, intercept) της ευθείας γραμμικής παρεμβολής και n το πλήθος των διαθέσιμων σημείων (ζευγών τιμών).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1α, η επίδοση των δεδομένων SSR του ERA5 reanalysis, για την SSR είναι ικανοποιητική. Αυτό φαίνεται και από το συντελεστή συσχέτισης Pearson, ο οποίος είναι ίσος με 0.94. Επίσης, φαίνεται ότι η μέση απόκλιση (bias) είναι

σχετικά μικρή (13.87 W/m<sup>2</sup> ή 8.55%), όπως και το rmse, που είναι ίσο με 31.22 W/m<sup>2</sup> ή 19.24%. Παρόλα αυτά, όταν η σύγκριση επιγειρείται με γρήση απεπογοποιημένων ανωμαλιών (Σχήμα 3.1β) οι στατιστικοί δείκτες χειροτερεύουν και ο συντελεστής συσχέτισης ελαττώνεται στην τιμή 0.68, ενώ η κλίση της ευθείας γίνεται ίση με 0.49. Στην περίπτωση αυτή, μάλιστα, αποκαλύπτονται οι συστάδες σημείων που αποκλίνουν περισσότερο από την ευθεία 1:1, υποδηλώνοντας τους περισσότερο προβληματικούς Σταθμούς. Αυτοί είναι οι Σταθμοί Aliartos, Filadelfia, Argos, Trikala, Arta και Tymbakion. Για τους Σταθμούς αυτούς παρατίθεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π1), η διαχρονική μεταβολή της SSR του κάθε σταθμού σε σχέση με την αντίστοιχη διαχρονική μεταβολή του ERA5 reanalysis. Έτσι παρατηρείται ότι, σε κάποιους από αυτούς τους Σταθμούς υπάργει είτε υπερεκτίμηση του ERA5 ως προς τα μέγιστα είτε υποεκτίμηση ως προς τα ελάχιστα των τιμών της SSR. Για παράδειγμα, στο σταθμό Filadelfia, από το έτος 1978 έως και το 1994, οι τιμές του ERA5 είναι μεγαλύτερες από αυτές του Σταθμού, καθώς η διαφορά των μεγίστων είναι 50 W/m<sup>2</sup>, με το ERA5 να σημειώνει μέγιστα έως και 300 W/m<sup>2</sup>, ενώ η τιμή του Σταθμού είναι 250 W/m<sup>2</sup>. Μεγάλες διαφορές παρατηρούνται και στις τιμές του σταθμού Aliartos, όπου από το έτος 1988 έως και το 1994, παρατηρείται υπερεκτίμηση των μεγίστων τιμών της SSR, από το ERA5 έως και περίπου 150 W/m<sup>2</sup>. Το ίδιο συμβαίνει και για τους Σταθμούς Argos, Trikala, Arta και Tymbakion, όπου για σχεδόν όλα τα έτη λειτουργίας αυτών, παρατηρείται συστηματική υπερεκτίμηση των τιμών της SSR (έως και 150 W/m<sup>2</sup>) για τις μέγιστες τιμές της, από το ERA5 reanalysis.





Σχήμα 3.1. Διαγράμματα διάχυσης (scatterplots) για την αζιολόγηση των δεδομένων του ERA5 reanalysis. Στο Σχήμα 3.1α παρέχεται η αζιολόγηση των μέσων μηνιαίων τιμών της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας (SSR) με αντίστοιχα δεδομένα των Σταθμών GEBA, ενώ στο Σχήμα 3.1β η αζιολόγηση των ανωμαλιών (αποχών) των μέσων μηνιαίων τιμών της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας με αντίστοιχα δεδομένα GEBA.

Κρίθηκε απαραίτητο η επίδοση του ERA5 να μελετηθεί και πιο λεπτομερώς εκτός από τα διαγράμματα διάχυσης που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και αφορούν στη γενική σύγκριση τους με τους επίγειους Σταθμούς. Για αυτόν το λόγο εξήχθησαν τα Σχήματα 3.2α και β, τα οποία παρέχουν αποτελέσματα της σύγκρισης ανά Σταθμό, με σκοπό τη διερεύνηση γεωγραφικής διαφοροποίησης της επίδοσης των δεδομένων reanalysis. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν για κάθε Σταθμό την κλίση και το συντελεστή συσχέτισης Pearson, υπολογισμένα με μηνιαίες απεποχοποιημένες ανωμαλίες της SSR. Οι υπολογισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας μηνιαίες απεποχοποιημένες ανωμαλίες για τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, που κατέγραψε το κοντινότερο πλεγματικό σημείο του ERA5 στον κάθε Σταθμό GEBA. Στον υπολογισμό αυτό στον αλγόριθμο τέθηκε ως ελάχιστο όριο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι αντιπροσωπευτικά και ρεαλιστικά, οι διαθέσιμες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας προερχόμενες από τους Σταθμούς, να ξεπερνούν τουλάχιστον τις δώδεκα μέσα στα χρόνια μελέτης. Έτσι, παρατηρήθηκε ότι ένας Σταθμός μόνο (1430, Izmir), δεν ικανοποιεί το απαιτούμενο κριτήριο καθώς κατέγραψε έξι τιμές για μόνο ένα έτος (1983). Για τους Σταθμούς GEBA που βρίσκονται στον ελληνικό χώρο, οι τιμές της κλίσης φαίνεται να κυμαίνονται από 0.1 έως 0.7. Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές τις κλίσης είναι εμφανώς μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές στους Σταθμούς που βρίσκονται εκτός του ελλαδικού χώρου (π.γ. Σόφια, Cherni Vrah, Pristina κ.α). Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην πιο έντονη γεωμορφολογία της Ελλάδας έναντι της Νότιας Βαλκανικής Χερσονήσου. Παρόλα αυτά οι τιμές της κλίσης του Σχήματος 3.2α μπορούν να θεωρηθούν σχετικά ικανοποιητικές, αφού οι τιμές κλίσης που αναμένονται όταν χρησιμοποιούνται απεποχοποιημένες ανωμαλίες SSR, είναι γενικά μικρότερες από ό,τι όταν χρησιμοποιούνται τιμές SSR. Οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης (R) παρέχονται στο Σχήμα 3.2β, με αυτές να κυμαίνονται από 0.1 έως 0.8. Παρατηρείται ότι οι Σταθμοί οι οποίοι βρίσκονται στον ελλαδικό γώρο, έγουν σγετικά μικρή συσχέτιση, με τους Σταθμούς Tymbakion, Filadelfia, Arta, Adravida, Aliartos και Trikala να παρουσιάζουν R μικρότερο από 0.4, σε αντίθεση με τους Σταθμούς Argos, Athens, Sikiwna και Thessaloniki οι οποίοι παρουσιάζουν R, μεγαλύτερο από 0.5. Όσον αφορά στους Σταθμούς εκτός του ελλαδικού χώρου, αυτοί φαίνεται να έχουν καλύτερους συντελεστές συσχέτισης από αυτούς εντός του ελλαδικού χώρου, με μόνο δύο Σταθμούς (Cherni Vrah και Kurdjali) να έχουν R μικρότερο από 0.5. Το γεγονός ότι οκτώ (8) Σταθμοί συνολικά στην περιοχή μελέτης, έχουν μικρό συντελεστή συσχέτισης, μπορεί να οφείλεται στην τοποθεσία των Σταθμών. Η ορογραφία δεν φαίνεται να ευθύνεται για αυτήν την απόκλιση των τιμών, καθώς οι επτά από τους οκτώ προβληματικούς Σταθμούς έχουν υψόμετρο κάτω από 250m, με εξαίρεση το Σταθμό Cherni Vrah που βρίσκεται σε υψόμετρο 2385m.





Σχήμα 3.2. Γεωγραφική κατανομή ανά Σταθμό, της υπολογισθείσας κλίσης της ευθείας γραμμικής παρεμβολής στο διάγραμμα διάχυσης των απεποχοποιημένων ανωμαλιών της SSR του ERA5 reanalysis και των Σταθμών GEBA (α). Στο Σχήμα (β) παρέχεται η γεωγραφική κατανομή των υπολογισμένων συντελεστών συσχέτισης Pearson μεταξύ των απεποχοποιημένων ανωμαλιών της SSR του ERA5 reanalysis και των Σταθμών GEBA.

Στο Σγήμα 3.3 παρέγονται, ανά σταθμό, η μέση απόκλιση (bias, Σχήμα 3.3α), η αντίστοιχη επί τοις εκατό μέση απόκλιση (Σχήμα 3.3β), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (rmse, Σχήμα 3.3γ) και τέλος το αντίστοιχο επί τοις εκατό rmse (Σχήμα 3.3δ). Παρατηρείται ότι οι τιμές της μέσης απόκλισης κυμαίνονται από -10.28 - 58.49 W/m<sup>2</sup>. Οι τιμές αυτές για τον ελληνικό χώρο είναι σχετικά μικρές και ικανοποιητικές, με εξαίρεση τους Σταθμούς Trikala, Athens και Tymbakion, καθώς όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3β οι αντίστοιχες τιμές της επί τοις εκατό μέσης απόκλισης (bias%) δεν ξεπερνούν το 43% και κυμαίνονται βασικά από -10 έως +20%. Ακόμη, οι τιμές της παραμέτρου rmse (Σχήμα 3.3γ) είναι επίσης ικανοποιητικές καθώς κυμαίνονται από 10.8 - 72.26 W/m<sup>2</sup>, με αντίστοιχες επί τοις εκατό τιμές rmse% (Σχήμα 3.3δ), που δεν ξεπερνούν το 53.14% και βασικά κυμαίνονται από -10 έως 20%. Σημειώνεται ότι τα παρουσιαζόμενα εδώ αποτελέσματα της αξιολόγησης των τιμών του ERA5 reanalysis για την παράμετρο SSR, βρίσκονται σε σχετική συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των Stamatis et al. (personal PhD data), οι οποίοι υλοποιήσαν αντίστοιχη αξιολόγηση των μηνιαίων τιμών του ERA5 reanalysis για την SSR, για διάφορες περιοχές του πλανήτη, για τη χρονική περίοδο 1984 - 2018. Σύμφωνα με αποτελέσματά τους, όσον αφορά στα διαγράμματα διάγυσης για τις μηνιαίες τιμές της SSR, η κλίση είναι ίση με 0.94, ο συντελεστής συσχέτισης 0.98, η μέση απόκλιση (bias) 3.61 W/m<sup>2</sup> και το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα 18.01 W/m<sup>2</sup>, τιμές που βρίσκονται κοντά στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Ακόμη, οι παραπάνω πραγματοποιήσαν την αξιολόγηση και με μηνιαίες απεπογοποιημένες ανωμαλίες με την κλίση να είναι ίση με 0.6 και το συντελεστή συσχέτισης 0.76, τιμές που είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της παρούσας εργασίας. Όσον αφορά στη γεωγραφική κατανομή των στατιστικών παραμέτρων, οι Stamatis et al. (personal PhD data), έδειξαν ότι οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή συσχέτισης (από 0.8 έως και 1) σε παγκόσμια κλίμακα, βρίσκονται στην περιοχή της Ευρώπης, της Βόρειας Αμερικής, της Κίνας και της Αυστραλίας, τιμές που είναι παρόμοιες με την πλειοψηφία αυτών της παρούσας εργασίας. Το ίδιο ισχύει και για τη στατιστική παράμετρο rmse%, όπου φαίνεται ότι στην περιοχή της Ευρώπης, οι τιμές του να κυμαίνονται από 10 έως και 20%.



**Σχήμα 3.3.** Γεωγραφική κατανομή ανά Σταθμό, της υπολογισθείσας μέσης απόκλισης (bias) των μηνιαίων τιμών της SSR του ERA5 reanalysis και των Σταθμών GEBA (α), των επί τοις εκατό τιμών μέσης απόκλισης (bias%, β), των υπολογισμένων τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ)

# 3.1.2 <u>Αξιολόγηση της ταχύτητας του ανέμου με επίγειους</u> σταθμούς

Για την αξιολόγηση της ταχύτητας του ανέμου έγινε η χρήση δεδομένων επίγειων μετεωρολογικών σταθμών της EMY. Στο διάγραμμα διάχυσης του Σχήματος 3.4 συγκρίνονται τα μηνιαία δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου στα 10m του ERA5 reanalysis, με τα αντίστοιχα δεδομένα από τους Σταθμούς της EMY. Στο ίδιο Σχήμα αναγράφονται οι στατιστικές παράμετροι που υπολογίστηκαν, ενώ παρουσιάζεται η

γραμμική τάση παρεμβολής με μωβ χρώμα, καθώς και η ευθεία 1:1 με κόκκινο χρώμα και διακεκομμένες γραμμές. Φαίνεται να υπάργει μία συστηματική υποεκτίμηση από το reanalysis στους Σταθμούς του Ηρακλείου Κρήτης, της Λάρισας, της Τρίπολης, των Ιωαννίνων, της Ιεράπετρας και της Κοζάνης. Η υποεκτίμηση αυτή, όπως φαίνεται στο Παράρτημα (Σχ. Π3) είναι για τους περισσότερους από τους προαναφερθέντες Σταθμούς συστηματική. Η μεγάλη αυτή συστηματική διαφορά μπορεί να αποδοθεί είτε στην ύπαρξη ορογραφίας είτε σε σχετικά μεγάλη απόσταση του πλεγματικού σημείου από τη θέση του σταθμού της ΕΜΥ, δεδομένης της ιδιαίτερα μεγάλης χωρικής μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου και του επηρεασμού της από τον περιβάλλοντα χώρο. Ωστόσο, παρά τη συστηματική υποεκτίμηση που αναφέρθηκε, γενικότερα η επίδοση του ERA5 για τον άνεμο είναι ικανοποιητική, όπως αποδεικνύουν και οι στατιστικές παράμετροι, καθώς ο συντελεστής συσγέτισης Pearson είναι ίσος με 0.79, η μέση απόκλιση (bias) είναι μικρή (0.52 m/s ή 14.20%), η κλίση της γραμμικής τάσης παρεμβολής (slope), είναι αρκετά κοντά στην ευθεία 1:1 (0.86), η τιμή rmse είναι σχετικά ικανοποιητική (1.44 m/s ή 39.26%). Μάλιστα, αν αφαιρεθούν τα προβληματικά σημεία (τα οποία αντιπροσωπεύουν το 39% του συνολικού αριθμού σημείων του διαγράμματος διάχυσης), ο συντελεστής συσγέτισης βελτιώνεται (0.87), ενώ η κλίση μειώνεται (0.71) όπως και το bias (1.19 m/s ή 27.33%), αλλά και το rmse (1.54 m/s ή 35.46%) (Σχ. Π2).

Όπως έγινε και για την SSR, η αξιολόγηση της ταγύτητας του ανέμου του ERA5 reanalysis έγινε και πιο λεπτομερώς, ανά Σταθμό. Έτσι, στο Σχήμα 3.5 παρατίθενται οι χωρικές κατανομές, ανά Σταθμό, της κλίσης της ευθείας γραμμικής παρεμβολής και του συντελεστή συσχέτισης Pearson, για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m (Σχήμα 3.5α και 3.5β αντίστοιχα). Οι τιμές της κλίσης είναι γενικά ικανοποιητικές, ενώ κυμαίνονται από 0.03 έως 0.99. Οι Σταθμοί της Τρίπολης, των Ιωαννίνων, του Ηρακλείου, της Λάρισας και της Ιεράπετρας φαίνεται να έχουν μικρές τιμές κλίσης (έως και περίπου 0.4), όπως ήδη συζητήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson (R) είναι επίσης γενικά ικανοποιητικός, έχει όμως τιμές που κυμαίνονται από 0.23 έως 0.91. Οι Σταθμοί που έγουν R μικρότερο από 0.4, είναι οι Σταθμοί των Ιωαννίνων, της Λάρισας και της Κοζάνης. Το γεγονός ότι οι Σταθμοί οι οποίοι έχουν μικρή κλίση δεν έχουν και μικρό R, δεν είναι ασυνήθιστο καθώς η κλίση και το R είναι διαφορετικές στατιστικές παράμετροι οι οποίες αντιπροσωπεύουν διαφορετικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης παραμέτρου. Για παράδειγμα η συνδιακύμανση για ένα Σταθμό, μπορεί να είναι καλή, όμως να συνοδεύεται από υπο/υπερεκτίμηση των τιμών της μελετώμενης παραμέτρου.



**Σχήμα 3.4.** Διάγραμμα διάχυσης για την αζιολόγηση των δεδομένων της ταχύτητας του ανέμου στα 10m του ERA5 reanalysis με δεδομένα σταθμών της EMY. Με διαφορετικά χρώματα επισημαίνονται τα αποτελέσματα για τον κάθε σταθμό.





Σχήμα 3.5. Γεωγραφική κατανομή ανά Σταθμό, της υπολογισθείσας κλίσης της ευθείας γραμμικής παρεμβολής στο διάγραμμα διάχυσης των μηνιαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου στα 10m του ERA5 reanalysis και των Σταθμών της EMY (α). Στο Σχήμα (β) παρέχεται η γεωγραφική κατανομή των υπολογισμένων συντελεστών συσχέτισης Pearson μεταξύ των μηνιαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου στα 10m του ERA5 reanalysis και των Σταθμών της EMY.

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζονται οι χωρικές κατανομές των παραμέτρων bias (Σχήμα 3.6α), bias% (Σχήμα 3.6β), rmse (Σχήμα 3.6γ) και rmse% (Σχήμα 3.6δ). Η απόκλιση (bias) έχει τιμές από -1.73 έως και 2.05 m/s, τιμές ικανοποιητικές που επιβεβαιώνεται και από την αντίστοιχη κατανομή του bias%, όπου οι τιμές για την πλειοψηφία των Σταθμών κυμαίνονται κάτω από το 20%, με εξαίρεση τους Σταθμούς της Κέρκυρας και του Αγρινίου, όπου φτάνουν το 60%. Καλή επίδοση υποδεικνύουν και τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rmse), με μικρές τιμές κυμαινόμενες από 0.57 έως 2.11 m/s και αντίστοιχες επί τοις εκατό τιμές rmse% (Σχήμα 3.6γ), για την πλειοψηφία των Σταθμών που δεν ξεπερνούν το 50%. Εξαίρεση αποτελεί ο Σταθμός στο Αγρίνιο, όπου παρατηρείται μεγάλη τιμή (240.91%). Σημειώνεται ότι, τα αποτελέσματα της παραπάνω αξιολόγησης για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m του ERA5 reanalysis, βρίσκουν σύμφωνα τα αποτελέσματα των Gutiérrez et al. (2024), οι οποίοι αξιολόγησαν την ταχύτητα του ανέμου του ERA5 reanalysis, κάτω από τα 50m, για την περιοχή της Ευρώπης και τη χρονική περίοδο 1979-2018, χρησιμοποιώντας επίγεια δεδομένα από τη βάση δεδομένων Met Ofce Hadley Centre's Integrated Surface Database, HadISD. Στην εργασία αυτή το ERA5 και τα επίγεια δεδομένα είγαν ικανοποιητικό συντελεστή συσγέτισης ίσο με 0.83. Την καλή αυτή συσχέτιση ανέδειξε και η σύγκριση σε εποχική κλίμακα μεταξύ των επίγειων τιμών και αυτών του ERA5, όπου φάνηκε ότι το ERA5 είναι σε θέση να περιγράφει ικανοποιητικά τα παγκόσμια χαρακτηριστικά χαμηλών ανέμων που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης (Gutiérrez et al., 2024).



**Σχήμα 3.6.** Γεωγραφική κατανομή ανά Σταθμό, της υπολογισθείσας μέσης απόκλισης (bias) των μηνιαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου στα 10m του ERA5 reanalysis και των Σταθμών GEBA (a), των επί τοις εκατό τιμών μέσης απόκλισης (bias%, β), των υπολογισμένων τιμών του σχετικού τετραγωνικού σφάλματος (rmse, γ) και των επί τοις εκατό τιμών του σχετικού τετραγωνικού σφάλματος (rmse%, δ).

# 3.2 Γεωγραφική κατανομή του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές των μέσων ετήσιων κλιματολογικών τιμών (μεσοποιημένων ως προς το χρόνο για όλη την περίοδο μελέτης 1940-2022), της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια (SSR), της ταχύτητας του ανέμου στα 10m από το έδαφος, του αιολικού δυναμικού στα 50m καθώς και του αιολικού δυναμικού στα 100m από το έδαφος. Επίσης, δίνονται οι αντίστοιχες γεωγραφικές κατανομές των τεσσάρων προαναφερόμενων παραμέτρων, σε εποχική βάση με σκοπό, βάσει αυτών των κατανομών να καταστεί δυνατή η μελέτη της ενδοετήσιας διακύμανσής τους στον ευρύτερο ελληνικό χώρο.

### 3.2.1 Μέση ετήσια κλιματολογική κατανομή

Η γεωγραφική κατανομή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (SSR) και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m στον ευρύτερο ελληνικό χώρο για τη γρονική περίοδο 1940-2022 παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.7 και 3.8, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 3.7, οι τιμές της SSR, που είναι ταυτόχρονα και οι τιμές του ηλιακού δυναμικού, σε μέση ετήσια βάση αναφέρονται σε W/m<sup>2</sup>, με τα σκούρα μπλε χρώματα να αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές και τα κόκκινα χρώματα σε υψηλές. Οι τιμές της SSR στον ευρύτερο ελληνικό χώρο και σε μέση ετήσια βάση κυμαίνονται από 162.7 έως 225.03 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $194.96 \pm 17.7$  W/m<sup>2</sup> και οι μεγαλύτερες τιμές (κόκκινα χρώματα) παρατηρούνται στα νότια τμήματα της περιοχής, ιδιαίτερα τα θαλάσσια. Συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στο νότιο Αιγαίο (224 W/m<sup>2</sup>), καθώς και στο Καρπάθιο Πέλαγος (225.03 W/m<sup>2</sup>), ενώ μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στο Ιόνιο Πέλαγος (209 W/m<sup>2</sup>) και λίγο μικρότερες σε παράκτιες περιοχές της Πελοποννήσου, της Κρήτης, της Εύβοιας, της Δυτικής, αλλά και της Βόρειας Ελλάδας. Αντιθέτως με τα θαλάσσια τμήματα της περιογής μελέτης, τα ηπειρωτικά τμήματα χαρακτηρίζονται από μικρότερες τιμές της SSR. Ειδικότερα, οι χαμηλότερες τιμές στην ελληνική περιοχή, απαντώνται στη Μακεδονία και τη Θράκη (μπλε χρώματα) όπου η SSR κυμαίνεται από  $170 - 180 \text{ W/m}^2$ . Η διαφοροποίηση στις τιμές SSR μεταξύ των νότιων και των βόρειων τμημάτων της περιοχής μελέτης, είναι αναμενόμενη, καθώς τα νοτιότερα τμήματα της περιοχής μελέτης, βρίσκονται σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη από τα βόρεια με αποτέλεσμα η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει πιο κάθετα στην επιφάνεια σε σχέση με τα βορειότερα γεωγραφικά πλάτη. Ακόμη, το φορτίο των αερολυμάτων είναι μικρότερο πάνω από τα θαλάσσια τμήματα σε σχέση με τα ηπειρωτικά, γεγονός που επίσης εξηγεί τις μεγαλύτερες τιμές πάνω από τα θαλάσσια τμήματα, αφού τα αερολύματα είναι βασικός παράγοντας επίδρασης στη διαμόρφωση της SSR. Η γεωγραφική κατανομή των τιμών της SSR, είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα των Kambezidis et al. (2016) οι οποίοι υπολόγισαν τιμές της SSR σε μέση ετήσια βάση για τη χρονική περίοδο 1985-1999 που κυμαίνονται από 165.59 έως 207.8 W/m<sup>2</sup>. Και στην εργασία αυτή οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν στα θαλάσσια τμήματα και ειδικότερα στο Καρπάθιο Πέλαγος, όπου κυμαίνονταν από 203.3-207.8 W/m<sup>2</sup>, ενώ οι μικρότερες τιμές παρατηρήθηκαν στη Μακεδονία, από 165.59 έως 171.3 W/m<sup>2</sup>. Οι τιμές της SSR για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, αξίζει να συγκριθούν με τιμές γειτονικών περιοχών, αλλά και γενικότερα με την περιοχή της Ευρώπης. Οι Perdigão et al. (2017), υπολόγισαν την προσπίπτουσα ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (SW), για την περιοχή της Ιβηρικής Χερσονήσου για χρονική περίοδο εξήντα (60) ετών, από το 1950 έως το 2010. Σύμφωνα με τους παραπάνω, η μέση ετήσια τιμή της SW για την Ιβηρική Χερσόνησο είναι περίπου 190 W/m<sup>2</sup>, ενώ οι τιμές της κυμαίνονται από 140 έως και 230 W/m<sup>2</sup>, τιμές λίγο μικρότερες από αυτές του ευρύτερου ελληνικού χώρου, (οι τιμές της SSR σε μέση ετήσια βάση, κυμαίνονται από 162.71 έως 225.03 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 194.96 W/m<sup>2</sup>). Ακόμη, οι Pravalie et al. (2018), υπολόγισαν την ολική οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία (GHI) και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI), σε παγκόσμια κλίμακα για τη γρονική περίοδο 1994 - 2015, χρησιμοποιώντας δεδομένα από μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας, χωρικής ανάλυσης 1km. Σύμφωνα με τους παραπάνω, όσον αφορά στην παράμετρο GHI μεσοποιημένη για όλα τα έτη, για την περιοχή της Ευρώπης, οι τιμές της παραμέτρου στα βόρεια τμήματα της ηπείρου (Γερμανία, Πολωνία, Αγγλία, Ρωσία, κα.), είναι μικρότερες (136.1 W/m<sup>2</sup>), σε σχέση με τις περιοχές στα νότια τμήματα της ηπείρου (Ιταλία, Ελλάδα, Τουρκία, κα.). Οι τιμές των τελευταίων, κυμαίνονται από 187.5 έως 210.5 W/m<sup>2</sup>. Επομένως, με βάση την εργασία αυτή, οι τιμές του ευρύτερου ελληνικού χώρου είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τιμές περιοχών που βρίσκονται βορειότερα αυτού.

Στο Σχήμα 3.8, η γωρική κατανομή των τιμών της ταγύτητας του ανέμου στα 10m αποδεικνύει ότι η αντίθεση μεταξύ ηπειρωτικών και θαλάσσιων περιοχών είναι έντονη, με τις πρώτες να έχουν χαμηλές τιμές και τις δεύτερες υψηλές. Στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, παρατηρείται ότι η ταχύτητα του ανέμου σε μέση ετήσια (κλιματολογική) βάση κυμαίνεται από 1.3 έως 7.9 m/s, με τη μέση τιμή να είναι  $4.31 \pm 2.05$  m/s και τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στα θαλάσσια τμήματα της περιοχής μελέτης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Ειδικότερα, οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στο κεντρικό Αιγαίο Πέλαγος, στην περιοχή των Κυκλάδων καθώς, και στη θαλάσσια περιοχή ανατολικά της Κρήτης, στο Καρπάθιο Πέλαγος, όπου η ταχύτητα του ανέμου φτάνει τα 7.9 m/s. Σημειώνεται επίσης ότι, μεγάλες τιμές παρατηρούνται και πάνω από το Ιόνιο Πέλαγος (έως και 6.2 m/s). Αντίθετα, η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπερνά τα 3 m/s στα γερσαία τμήματα της περιογής μελέτης, με τις τιμές της ταγύτητας του ανέμου να κυμαίνονται εκεί από 1.3 έως 3m/s και τις ελάχιστες τιμές (1.3 m/s, σκούρα μπλε χρώματα), να παρατηρούνται στην Κεντρική, Ανατολική και Βόρεια Ελλάδα. Ακόμη, οι χαμηλές τιμές που παρατηρούνται στην Κρήτη, οφείλονται στην ορογραφία της περιοχής, λόγω των Λευκών Όρων στα δυτικά του νησιού, στον Ψηλορείτη κεντρικά και στο όρος Δίκτη στα ανατολικά. Η κατανομή αυτή της ταχύτητας του άνεμου στα 10m (μικρές τιμές στα ηπειρωτικά τμήματα και μεγάλες στα θαλάσσια), είναι αναμενόμενη, καθώς οι ηπειρωτικές περιογές έγουν μικρότερες τιμές ταγύτητας λόγω των φυσικών ή τεχνητών εμποδίων, τα οποία εμποδίζουν τη ροή του ανέμου και λόγω της μικρής τριβής που χαρακτηρίζει το νερό (Ahrens and Herson, 2023). Η παραπάνω γεωγραφική κατανομή είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα των Emmanouil et al. (2016), οι οποίοι χρησιμοποιώντας μοντέλο υψηλής χωρικής ανάλυσης, υπολόγισαν την ταχύτητα του ανέμου στα 10m από την επιφάνεια και το αιολικό δυναμικό, για τις θαλάσσιες και παράκτιες περιοχές του ελληνικού χώρου, για τη γρονική περίοδο 2001-2010. Σύμφωνα με την εργασία αυτή, οι τιμές της ταγύτητας του ανέμου στα 10m, στα θαλάσσια τμήματα του ελληνικού χώρου κυμαίνονται από 0 έως 8m/s, με τις μικρότερες τιμές (από 0 έως 3 m/s) να παρατηρούνται στις παράκτιες περιοχές και τις μεγαλύτερες (από 4 έως 8 m/s) στις θαλάσσιες, πιο συγκεκριμένα στον κεντρικό άξονα του Αιγαίου Πελάγους.

Σε ό,τι αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 50m σε μέση ετήσια βάση (Σχήμα 3.9α) διαπιστώνεται ότι η χωρική κατανομή του δε διαφέρει από αυτήν της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, με τις ελάχιστες τιμές να παρατηρούνται στα ηπειρωτικά τμήματα και τις μέγιστες στα θαλάσσια της περιοχής μελέτης. Γενικότερα, σε μέση ετήσια βάση οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m, κυμαίνονται από 6.45 έως 453.12 W/m<sup>2</sup>, με

τη μέση τιμή να είναι 144.51  $\pm$  126.86 W/m<sup>2</sup> και τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στα θαλάσσια τμήματα. Ειδικότερα, οι μεγαλύτερες τιμές (450 W/m<sup>2</sup>), παρατηρούνται στο Αιγαίο Πέλαγος καθώς και στο Καρπάθιο Πέλαγος. Μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στη θαλάσσια περιογή δυτικά της Κρήτης (350 – 400 W/m<sup>2</sup>). Από την άλλη πλευρά, το Ιόνιο Πέλαγος φαίνεται να έχει μικρότερες τιμές (έως και 260.81  $W/m^2$ ) σε σγέση με το Αιγαίο. Όσον αφορά στις τιμές της παραμέτρου στα ηπειρωτικά τμήματα, αυτές κυμαίνονται από 6.45 έως και 50  $W/m^2$ , με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται για την περιοχή της Μακεδονίας και της Ηπείρου. Τα αποτελέσματα των μέγιστων τιμών για το αιολικό δυναμικό στα 50m είναι σύμφωνα με αυτά των Kotroni et al. (2013) οι οποίοι χρησιμοποιώντας δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m από την επιφάνεια, με χωρική ανάλυση 2km × 2km, υπολόγισαν το αιολικό δυναμικό στα 50m από την επιφάνεια, για ένα τυπικό μετεωρολογικό χρόνο. Η γεωγραφική κατανομή σε μέση κλιματολογική βάση, ανέδειξε ότι οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στα θαλάσσια τμήματα, συγκεκριμένα στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους, όπου τοπικά το δυναμικό φτάνει έως και τα 700  $W/m^2$ , ενώ πάνω από το Ιόνιο Πέλαγος, η τιμή του φτάνει τα 300 W/m<sup>2</sup>. Από την άλλη πλευρά, στις ηπειρωτικές περιοχές η παραπάνω εργασία υπολόγισε το αιολικό δυναμικό στα 50m να έχει τιμές από 100 έως και περίπου 500  $W/m^2$ , με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στις οροσειρές. Το αποτέλεσμα αυτό δε φαίνεται να συμφωνεί με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Το γεγονός αυτό, μπορεί να οφείλεται στο ότι η χωρική ανάλυση που παρέχει το ERA5 reanalysis, είναι αρκετά μεγαλύτερη των 2 Km × 2 km (υπενθυμίζεται ότι η χωρική ανάλυση του ERA5 είναι 0.25° × 0.25°, δηλαδή περίπου 25 Km  $\times$  25 km), με αποτέλεσμα να εξομαλύνεται η ορογραφία και το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Όσον αφορά στη σύγκριση του αιολικού δυναμικού στα 50m στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, με το δυναμικό άλλων περιοχών, οι Aboobacker et al. (2021), υπολόγισαν το αιολικό δυναμικό στα 90m από την επιφάνεια για την περιογή του Qatar, χρησιμοποιώντας ωριαία δεδομένα ανέμου από το ERA5 reanalysis, για σαράντα (40) έτη από το 1979 έως και το 2018. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τους οι τιμές της παραμέτρου μεσοποιημένες για όλα τα έτη μελέτης, κυμαίνονται από 0 έως 250 W/m<sup>2</sup>, τιμές μικρότερες από αυτές του ευρύτερου ελληνικού χώρου, ειδικά αν ληφθεί υπόψιν ότι οι τιμές των Aboobacker et al. (2021) αναφέρονται και σε μεγαλύτερο ύψος (90 έναντι 50 m). Από την άλλη πλευρά, οι Balog et al. (2015), υπολόγισαν το αιολικό δυναμικό για την περιοχή της Μεσογείου, για τη χρονική περίοδο 1989-2010, χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα από το δορυφόρο QuikSCAT. Βρήκαν ότι το αιολικό δυναμικό στα 10m από την επιφάνεια μεσοποιημένο για όλα τα έτη της μελέτης, κυμαίνεται από 100 έως και 500 W/m<sup>2</sup>, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στο Κόλπο των Λεόντων (Gulf of Lion) και στη θαλάσσια περιοχή γύρω από την Κρήτη. Συνεπώς, οι τιμές του ευρύτερου ελληνικού χώρου για το αιολικό δυναμικό είναι μικρές σε σχέση με την περιοχή της Μεσογείου, ιδιαίτερα καθώς οι παραπάνω τιμές για τη Μεσόγειο αναφέρονται στο αιολικό δυναμικό στα 10m και όχι στα 50m.



**Σχήμα 3.7.** Γεωγραφική κατανομή της ισχύος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (SSR). Οι τιμές έχουν ληφθεί μεσοποιημένες για τη χρονική περίοδο 1940-2022 από το ERA5 reanalysis.



**Σχήμα 3.8.** Γεωγραφική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στα 10m από την επιφάνεια. Οι τιμές έχουν ληφθεί μεσοποιημένες για τη χρονική περίοδο 1940-2022 από το ERA5 reanalysis.



Σχήμα 3.9. Γεωγραφική κατανομή του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, στα 50m (Σχήμα 3.2α) καθώς και στα 100m (Σχήμα 3.2β) από την επιφάνεια. Οι τιμές αναφέρονται στη χρονική περίοδο 1940-2022 και βασίζονται στην ταχύτητα ανέμου του ERA5 reanalysis.

Στο Σχήμα 3.9β, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή σε μέση ετήσια βάση του αιολικού δυναμικού στα 100m. Και σε αυτήν την περίπτωση η χωρική κατανομή δε διαφέρει από αυτήν του Σχήματος 3.8, όπως και αυτήν του Σχήματος 3.9α. Όμως παρατηρείται ότι, οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 100m για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές του δυναμικού στα 50m (όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, αναμένεται η ταχύτητα του ανέμου, άρα και το αιολικό δυναμικό, να αυξάνεται με το ύψος, βλ. Σχήμα 1.6) καθώς κυμαίνονται από 9.84 – 595.79 W/m<sup>2</sup> με τη μέση τιμή να υπολογίζεται στα 178.04  $\pm$  147.55 W/m<sup>2</sup>. Οι μεγαλύτερες τιμές

παρατηρούνται και πάλι στα θαλάσσια τμήματα, με τη μεγαλύτερη (595.79  $W/m^2$ ) να καταγράφεται νότια της νήσου Ίμβρος. Πιο συγκεκριμένα, τις μεγαλύτερες τιμές  $(περίπου 400 - 500 \text{ W/m}^2)$ , τις έχει το Αιγαίο και το Καρπάθιο Πέλαγος, σε αντίθεση με το Ιόνιο όπου οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 100m. δεν ξεπερνούν τα 305.44 W/m<sup>2</sup>. Αντίθετα, τα ηπειρωτικά τμήματα του ευρύτερου ελληνικού χώρου έχουν χαμηλές τιμές (9.84 - 50 W/m<sup>2</sup>) για το αιολικό δυναμικό στα 100m, ενώ οι παράκτιες περιοχές έχουν μεγαλύτερες τιμές (100-140 W/m<sup>2</sup>). Στην ξηρά οι ελάχιστες τιμές (περίπου 10 - 15 W/m<sup>2</sup>) φαίνεται να εμφανίζονται ανατολικά της οροσειράς της Πίνδου καθώς και στη Βόρεια Ελλάδα. Οι τιμές αυτές, αλλά και η κατανομή του αιολικού δυναμικού στα 100m στην περιοχή μελέτης μας, είναι σύμφωνες με τα αποτελέσματα των Kardakaris et al. (2021), οι οποίοι υπολόγισαν το αιολικό δυναμικό στα 100m από την επιφάνεια, όπως και την ενέργεια των κυμάτων, στις παράκτιες περιοχές του ελληνικού χώρου, χρησιμοποιώντας δεδομένα ανέμου στα 10m από το ERA5 reanalysis, για τη χρονική περίοδο είκοσι (20) ετών (2000-2019). Οι Kardakaris et al. (2021) βρήκαν ότι οι μεγαλύτερες τιμές του αιολικού δυναμικού στα 100m (650-800 W/m<sup>2</sup>) παρατηρούνται στον κεντρικό άξονα του Αιγαίου Πελάγους, με αυτές να εκτείνονται από τα νησιά Λήμνο και Σαμοθράκη, μέχρι το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων και από τα νησιά Σάμος και Ικαρία, μέχρι την θαλάσσια έκταση από την Κρήτη μέχρι την Κάσο.

Παρόλο που στην ενότητα 3.4, η σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού θα γίνει λεπτομερέστερα, αξίζει να γίνει μία αναφορά στις βασικές διαφορές των δύο δυναμικών, βάσει των γεωγραφικών κατανομών των μέσων ετήσιων κλιματολογικών τιμών τους που παρουσιάστηκαν στην παρούσα ενότητα. Διαπιστώνεται ότι η μέση τιμή του ηλιακού δυναμικού για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο (194.96  $\pm$  17.7 W/m<sup>2</sup>), είναι μεγαλύτερη από αυτές του αιολικού δυναμικού τόσο στ<br/>α $50m~(144.51\pm126.86$  $W/m^2$ ) όσο (αν και λιγότερο) και στα 100m (178.04 ± 147.55 W/m<sup>2</sup>). Επιπλέον, το εύρος τιμών του ηλιακού δυναμικού (162.7 - 225.03  $W/m^2$ ) είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με αυτό του αιολικού δυναμικού στα 50m ( $6.45 - 453.12 \text{ W/m}^2$ ) και στα 100m (9.84 – 595.79 W/m<sup>2</sup>) γεγονός που δείχνει ότι υπάρχουν περιοχές με τιμές αιολικού δυναμικού σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες του ηλιακού δυναμικού, ενώ στον αντίποδα, υπάρχουν άλλες περιοχές όπου το αιολικό δυναμικό υπολείπεται σημαντικά του ηλιακού. Παρατηρείται επίσης ότι το Ιόνιο Πέλαγος έχει μεγάλες τιμές για το ηλιακό δυναμικό (209  $W/m^2$ ) και το αιολικό δυναμικό στα 50 και 100m (250 και 300 W/m<sup>2</sup>, αντίστοιγα), κάτι που ισχύει και για το Αιγαίο Πέλαγος, όπου η μέγιστη τιμή του για το ηλιακό δυναμικό είναι 224 W/m<sup>2</sup>, ενώ για το αιολικό δυναμικό στα 50 και 100m είναι 450 και 500 W/m<sup>2</sup>, αντίστοιχα. Στις εν λόγω θαλάσσιες περιοχές, όπως προαναφέρθηκε, το αιολικό δυναμικό είναι υπέρτερο του ηλιακού. Αντίθετα, στα ηπειρωτικά τμήματα σημειώνονται μεγαλύτερες τιμές για το ηλιακό δυναμικό σε σχέση με το αιολικό και στα δύο ύψη. Παραδείγματος χάριν, η Πελοπόννησος, ενώ έχει τιμές για το ηλιακό δυναμικό περίπου 200  $W/m^2$ , για το αιολικό δυναμικό στα 50m έχει τιμές χαμηλότερες από 50  $W/m^2$ , ενώ στα 100m χαμηλότερες από 100  $W/m^2$ .

### 3.2.2 Μέση εποχική κλιματολογική κατανομή

Η εποχική γεωγραφική κατανομή της SSR και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m στον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά την περίοδο μελέτης (1940-2022), παρατίθεται στο Σχήμα 3.10. Τα εποχικά αποτελέσματα αναφέρονται σε μεσοποιημένες εποχικές τιμές των τριών μηνών της κάθε εποχής, δηλαδή των Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου για το γειμώνα, των Μαρτίου-Απριλίου-Μαΐου για την άνοιξη, των Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου, για το θέρος και των Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου-Νοεμβρίου για το φθινόπωρο. Σημειώνεται ότι, τα σχήματα για την κάθε εποχή, της κάθε παραμέτρου, έχουν κοινή κλίμακα ώστε η σύγκριση μεταξύ των εποχών να είναι εύκολη. Στο Σγήμα 3.10α παρατηρούνται μικρές τιμές της SSR το χειμώνα, που είναι οι μικρότερες του έτους και κυμαίνονται από 70.87-127.76 W/m<sup>2</sup>, ενώ η μέση τιμή της SSR για τη χειμερινή περίοδο είναι ίση με 99.44  $\pm$  14.05 W/m<sup>2</sup>. Παρόλα αυτά, παρατηρείται μία διαφοροποίηση στις τιμές της SSR μεταξύ του νότιου και του βόρειου ελλαδικού χώρου, με τις τιμές να αυξάνονται προς τα μικρότερα γεωγραφικά πλάτη (νότια), γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη γωνία με την οποία προσπίπτουν οι ηλιακές ακτίνες στην επιφάνεια των νοτιότερων περιοχών. Η γεωγραφική αυτή διαφοροποίηση είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα των Fotiadi et al. (2006), οι οποίοι υπολόγισαν την SSR στην περιογή της Ελλάδας γρησιμοποιώντας ένα φυσικό προσδιοριστικό μοντέλο διάδοσης ακτινοβολίας με δεδομένα εισόδου από δορυφόρους (ISCCP-D2) και reanalysis (NCEP/NCAR). Οι υπολογισμοί του μοντέλου αυτού πραγματοποιήθηκαν σε μηνιαία βάση, με χωρική ανάλυση  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  γεωγραφικού πλάτους και μήκους, για τη χρονική περίοδο δεκαεπτά (17) ετών από το 1984 έως το 2000. Σύμφωνα με τους παραπάνω, η διαφοροποίηση στις τιμές του νότιου και του βόρειου ελλαδικού χώρου, δεν οφείλονται μόνο στην πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων στο έδαφος, αλλά και στην νεφοκάλυψη. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα δεδομένα ISCCP-D2, τον Ιανουάριο η συνολική νεφοκάλυψη μειώνεται από περίπου 75% στη βόρεια Ελλάδα σε 60% στην Κρήτη, ενώ τον Ιούλιο τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 50% και 20% (Fotiadi et al., 2006). Αυτός ο παράγοντας, η νεφοκάλυψη, εξηγεί και τις διαφορές στις τιμές μεταξύ βόρειας και νότιας Ελλάδας στην παρούσα εργασία. Το ίδιο φαινόμενο, δηλαδή η αύξηση των τιμών της SSR προς νότο παρατηρείται, για τους ίδιους λόγους, και στις υπόλοιπες εποχές του έτους. Κατά την εαρινή περίοδο (Σγήμα 3.10γ) παρατηρείται σημαντική αύξηση των τιμών της SSR σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο, με τις τιμές να κυμαίνονται από 195.63-263.9 W/m<sup>2</sup> και τη μέση τιμή να είναι ίση με 232.11  $\pm$  20.01 W/m<sup>2</sup>. Και για αυτή την εποχή παρατηρείται επίσης η προαναφερθείσα διαφοροποίηση μεταξύ νότιου και βόρειου ελληνικού χώρου, όμως τώρα είναι πιο είναι ευδιάκριτη. Ακόμη μεγαλύτερη αύξηση των τιμών της SSR παρατηρείται το θέρος (Σχήμα 3.10ε), όταν και μεγιστοποιούνται οι τιμές και κυμαίνονται από 245.82-320.48 $\mathrm{W/m^2},$ ενώ η μέση τιμή είναι ίση με  $293.28 \pm 20.58 \text{ W/m}^2$ . Παρατηρείται και πάλι ότι οι μέγιστες τιμές (320.48 W/m<sup>2</sup>) σημειώνονται στη νότια Ελλάδα, ενώ οι μικρότερες (~ 292.22 W/m<sup>2</sup>) στη βόρεια. Τέλος, κατά τη φθινοπωρινή περίοδο (Σχήμα 3.10η), παρατηρείται μείωση των τιμών της SSR σε σχέση με το θέρος, με τις τιμές της SSR να κυμαίνονται από 122.93-189.57 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να ισούται με  $154.31 \pm 17.93$  W/m<sup>2</sup>. Ακόμη παρατηρείται ότι, σε όλες τις εποχές, οι μεγαλύτερες γεωγραφικές διαφορές εμφανίζονται με το γεωγραφικό πλάτος και όχι τόσο με το γεωγραφικό μήκος. Παρόλα αυτά, παρατηρούνται και μικρές διαφορές με το γεωγραφικό μήκος, ιδιαίτερα μεταξύ των τιμών της SSR πάνω από θαλάσσιες και ηπειρωτικές περιοχές, με τις τιμές αυτές να είναι μεγαλύτερες πάνω από τη θάλασσα, γεγονός που οφείλεται σε διάφορες φυσικές παραμέτρους, κυρίως στη νεφοκάλυψη (Fotiadi et al., 2006). Επίσης, η εποχική χωρική κατανομή βρίσκει σύμφωνα και πάλι τα αποτελέσματα των Fotiadi et al. (2006), οι οποίοι υπολόγισαν την SSR για τους ενδιάμεσους και αντιπροσωπευτικούς μήνες κάθε εποχής, δηλαδή Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Οκτώβριο. Σύμφωνα με την παραπάνω εργασία, οι τιμές της SSR κυμαίνονται από 250- $330 \text{ W/m}^2$  το θέρος και από 45 έως περίπου 100 W/m<sup>2</sup> το χειμώνα. Η αντίστοιχη μηναία κλιματολογική μελέτη για την SSR της παρούσας εργασίας παρατίθεται στο Παράρτημα (Σχήμα Π4). Σε αυτήν παρατηρούνται γενικά τα ίδια χαρακτηριστικά κατανομής στο χώρο και το χρόνο όπως και στους Fotiadi et al. (2006), όμως σε μεγαλύτερη χωρική λεπτομέρεια. Έτσι, παρατηρείται ότι το μέγιστο της SSR σημειώνεται τον Ιούλιο (329.93 W/m<sup>2</sup>), ενώ το ελάχιστο το Δεκέμβριο (52.87 W/m<sup>2</sup>). Τέλος, σημειώνεται ότι οι χαμηλές τιμές της SSR που παρατηρούνται στα βόρεια τμήματα της Ελλάδας κατά τη χειμερινή περίοδο, οφείλονται στην εντονότερη νεφοκάλυψη, η οποία εν μέρει οφείλεται στους ΒΑ ανέμους που κυριαργούν πάνω από την περιοχή την ψυχρή περίοδο του έτους, οι οποίοι αυξάνουν τα ορογραφικά νέφη μεταφέροντας υγρές αέριες μάζες εμπλουτισμένες σε υγρασία από το πέρασμα τους πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος (Kambezidis et al., 2016). Αντίθετα, είναι γνωστό ότι κατά τη θερινή περίοδο η νεφοκάλυψη στην Ελλάδα είναι μικρή, λόγω των αντικυκλωνικών συνθηκών που επικρατούν πάνω από αυτή, γεγονός που εν μέρει εξηγεί τις μεγάλες τιμές της SSR τότε.

Η εποχική γεωγραφική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, δίνεται στο Σχήμα 3.10. Οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου κατά τη χειμερινή περίοδο (Σχήμα 3.10β) κυμαίνονται από 1.3 έως 8.49 m/s, με τη μέση τιμή να ισούται με  $4.75 \pm 2.47$ m/s. Είναι εμφανές ότι οι μικρότερες τιμές παρατηρούνται στις ηπειρωτικές περιοχές, ενώ οι μεγαλύτερες στις θαλάσσιες. Αυτό οφείλεται στους ασθενείς ανέμους που επικρατούν στις ηπειρωτικές περιοχές, της περιοχής μελέτης, οι οποίοι οφείλονται στα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια (Katsoulis, 1991). Είναι γνωστό ότι όταν ο αέρας μετακινείται από μια περιοχή με μεγάλη τριβή (ξηρά), σε μία περιοχή με μειωμένη (νερό), αυξάνεται η ταχύτητά του (Ahrens and Herson, 2023). Ειδικότερα, οι μεγαλύτερες τιμές (8.36 m/s) παρατηρούνται στο Αιγαίο, Καρπάθιο και Ιόνιο Πέλαγος με το τελευταίο να έχει λίγο χαμηλότερες τιμές (έως και 7.62 m/s). Τη χειμερινή περίοδο φαίνεται η ταχύτητα του ανέμου να παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές της, ιδιαίτερα πάνω από θαλάσσιες περιοχές. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το ότι κατά τη γειμερινή περίοδο υπάρχουν συχνότερα υφέσεις στην περιοχή μελέτης, δεδομένου ότι οι υφέσεις στη Μεσόγειο κινούνται από δυσμάς προς ανατολάς, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν και την περιογή μελέτης (Φλόκας, 1997) και να αυξάνεται έτσι η ταγύτητα του ανέμου ιδιαίτερα πάνω από τις θαλάσσιες περιοχές. Κατά την εαρινή περίοδο (Σχήμα 3.10δ) οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου κυμαίνονται από 1.41 έως 6.96 m/s και η μέση τιμή είναι ίση με  $4.02 \pm 1.87$  m/s δηλαδή λίγο μικρότερη από το χειμώνα.

Και πάλι οι τιμές στις ηπειρωτικές περιοχές είναι πολύ χαμηλές (έως και 3 m/s), ενώ στις θαλάσσιες μεγαλύτερες (έως και 6.87 m/s). Κατά τη θερινή περίοδο (Σγήμα 3.10ζ) οι τιμές του ανέμου κυμαίνονται από 1.33 έως 8.66 m/s και η μέση τιμή ισούται με 3.92 ± 1.94 m/s. Είναι αξιοσημείωτο ότι κατά την εποχή αυτή, οι θαλάσσιες περιοχές του Νότιου Αιγαίου και του Καρπάθιου Πελάγους έχουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές από εκείνες της άνοιξης (έως και 8.06 m/s), ενώ είναι αρκετά μεγαλύτερες και από τις τιμές στο Ιόνιο Πέλαγος (έως και 5.72 m/s), γεγονός που οφείλεται στους Ετησίες ανέμους, οι οποίοι συνδέονται με το βαρομετρικό χαμηλό της Ασίας, το οποίο σχηματίζεται κατά τη θερινή περίοδο και την επέκταση του Αντικυκλώνα των Αζορών. Το μέγιστο της ταχύτητας του ανέμου παρατηρείται κατά το μήνα Αύγουστο (9.34 m/s), ενώ το ελάχιστο κατά τον μήνα Νοέμβριο (1.22 m/s), όπως φαίνεται και στο Σχήμα Π5 του Παραρτήματος. Τέλος, τη φθινοπωρινή περίοδο (Σχήμα 3.10θ) η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από 1.24 έως 7.74 m/s και η μέση τιμή είναι ίση με  $4.07 \pm 2.02$  m/s. Παρατηρείται και πάλι ότι οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σημειώνονται στα θαλάσσια τμήματα και οι μικρότερες στα ηπειρωτικά, ενώ οι τιμές στα θαλάσσια τμήματα του Αιγαίου Πελάγους είναι μικρότερες από εκείνες του θέρους. Σημειώνεται ότι η παραπάνω εποχική κατανομή για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, βρίσκει σύμφωνα τα αποτελέσματα των Emmanouil et al. (2016), οι οποίοι υπολόγισαν την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, σε εποχική βάση, για διάρκεια 10 ετών από το 2001 έως το 2010, χρησιμοποιώντας μοντέλο υψηλής χωρικής ανάλυσης (0.05° × 0.05°), για τα θαλάσσια τμήματα του ελληνικού χώρου. Οι παραπάνω βρήκαν ότι η ταχύτητα του ανέμου παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές της το χειμώνα και το θέρος. Πιο ειδικά, σύμφωνα με τους παραπάνω, οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται από 0 έως 9 m/s και για τις δύο εποχές. Κατά τη χειμερινή περίοδο, οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στον κεντρικό άξονα του Αιγαίου Πελάγους, στο Ιόνιο Πέλαγος αλλά και στο Καρπάθιο. Κατά τη θερινή περίοδο, παρόλο που τα μέγιστα και τα ελάγιστα των τιμών δεν αλλάζουν, οι τιμές στο Ιόνιο Πέλαγος (περίπου 5 m/s), είναι μικρότερες από αυτές του Αιγαίου και του Καρπάθιου Πελάγους (περίπου 9 m/s). Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τους Emmanouil et al., οι ελάχιστες τιμές (0-3 m/s) παρατηρούνται στις παράκτιες περιοχές της μελετώμενης περιοχής και για τις δύο εποχές, γεγονός που είναι σύμφωνο με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Η εποχική γεωγραφική κατανομή του αιολικού δυναμικού στα 50 και 100m παρατίθεται στο Σχήμα 3.11 (αριστερή και δεξιά στήλη, αντίστοιχα) και δε διαφέρει ουσιαστικά από αυτήν της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, που σχολιάστηκε ήδη στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι, οι τιμές του αιολικού δυναμικού και στις δύο περιπτώσεις είναι μέγιστες τη χειμερινή περίοδο, μειώνονται την εαρινή, τη θερινή περίοδο σημειώνεται και πάλι το μέγιστο στο Αιγαίο, ιδιαίτερα στο νότιο και το Καρπάθιο Πέλαγος, λόγω των Ετησίων και τέλος τη φθινοπωρινή περίοδο οι τιμές μειώνονται εκ νέου. Ενδεικτικά, το αιολικό δυναμικού στα 100m) έχει μικρότερες της κλίμακας είναι μικρότερο από εκείνο του δυναμικού στα 100m) έχει μικρότερες κλίματολογικές τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50 και 100m. Σε μηνιαία βάση, το

αιολικό δυναμικό στα 50m και στα 100m, όσον αφορά τις θαλάσσιες περιοχές, σημειώνει τις μεγαλύτερες τιμές του τον Αύγουστο (784.2 και 925.93 W/m<sup>2</sup>, αντίστοιχα), ενώ τις ελάχιστες το Μάιο (230.92 και 285.94 W/m<sup>2</sup>, αντίστοιχα).





Σχήμα 3.10. Γεωγραφική κατανομή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (SSR, αριστερή στήλη) και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m (δεξιά στήλη) στον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά την περίοδο 1940 - 2022. Τα αποτελέσματα δίνονται για τις τέσσερις (4) εποχές του έτους, συγκεκριμένα για το χειμώνα (Δεκέμβριος-Ιανουάριος-Φεβρουάριος, πρώτη γραμμή), για την άνοιξη (Μάρτιος-Απρίλιος-Μάιος, δεύτερη γραμμή), για το καλοκαίρι (Ιούνιος-Ιούλιος-Αύγουστος, τρίτη γραμμή) και για το φθινόπωρο (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος-Νοέμβριος).













Σχήμα 3.11. Γεωγραφική κατανομή στα 50m (αριστερή στήλη) και στα 100m από το έδαφος (δεξιά στήλη) του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά την περίοδο 1940 - 2022. Τα αποτελέσματα δίνονται για τις τέσσερις (4) εποχές του έτους, συγκεκριμένα για το χειμώνα (Δεκέμβριος-Ιανουάριος-Φεβρουάριος, πρώτη γραμμή), για την άνοιζη (Μάρτιος-Απρίλιος-Μάιος, δεύτερη γραμμή), για το καλοκαίρι (Ιούνιος-Ιούλιος-Αύγουστος, τρίτη γραμμή) και για το φθινόπωρο (Σεπτέμβριος-Οκτώβριος-Νοέμβριος, τέταρτη γραμμή).

Προκειμένου να υπάργει μια πιο άμεση και εύκολη αντίληψη των τιμών του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό γώρο, στους Πίνακες 3.1 και 3.2 δίνονται οι μεσοποιημένες τιμές και το εύρος διακύμανσης των τιμών, του ηλιακού δυναμικού και του αιολικού δυναμικού στα 50m και 100m από την επιφάνεια της Γης. Τα αποτελέσματα δίνονται σε μηνιαία, εποχική και ετήσια βάση. Για το ηλιακό δυναμικό (Πίνακας Π3.1), παρατηρείται ότι σε μηνιαία βάση οι τιμές του αυξάνονται από το Δεκέμβριο μέχρι και τον Ιούλιο, ενώ στη συνέχεια μειώνονται. Όντως, οι μεγαλύτερες τιμές (254.45-329.93 W/m<sup>2</sup>) παρατηρούνται τον Ιούλιο, ενώ οι ελάγιστες (52.87-105.08 W/m<sup>2</sup>) το Δεκέμβριο. Όσον αφορά στο εύρος διακύμανσης των τιμών, αυτό δεν είναι μεγάλο, καθώς η μεγαλύτερη διαφορά που σημειώνεται μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων τιμών, είναι 83 W/m<sup>2</sup> (τον Ιούλιο). Οι μέσες μηνιαίες τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m και στα 100m (Πίνακας Π3.2) αυξάνονται από το Δεκέμβριο μέχρι και το Φεβρουάριο, μειώνονται από το Μάρτιο μέχρι τον Απρίλιο, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται αύξηση των τιμών από τον Ιούνιο μέχρι και τον Αύγουστο, όταν και τα δυναμικά έγουν τις μέγιστες τιμές τους  $(5.88-784.2 \text{ W/m}^2)$ για το αιολικό δυναμικό στα 50m και 8.83-925.93  $W/m^2$  στα 100m). Σε αντίθεση με τις τιμές του ηλιακού δυναμικού, το εύρος διακύμανσης των τιμών του αιολικού δυναμικού και στα δύο ύψη είναι μεγάλο (λόγω των μικρών τιμών των ηπειρωτικών

περιοχών της περιοχής μελέτης σε σχέση με αυτές των θαλάσσιων, όπως έχει προαναφερθεί), με τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων τιμών να είναι 779 W/m<sup>2</sup> για το αιολικό δυναμικό στα 50m και 917 W/m<sup>2</sup> στα 100m το μήνα Αύγουστο. Επίσης, οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m, είναι πάντοτε μικρότερες από αυτές στα 100m (σε μηνιαία, εποχικά και ετήσια βάση). Ειδικότερα, φαίνεται οι ελάχιστες τιμές για κάθε μήνα να διαφέρουν κατά περίπου 4 W/m<sup>2</sup>, ενώ οι μέγιστες τιμές κατά περίπου 50 με 140 W/m<sup>2</sup>.

**Πίνακας Π3.1.** Μεσοποιημένες τιμές και εύρος διακύμανσης των τιμών του ηλιακού δυναμικού (σε παρένθεση) στον ευρύτερο ελληνικό χώρο. Τα αποτελέσματα δίνονται σε μηνιαία, εποχική και ετήσια βάση και αναφέρονται (μεσοποιημένα) στην περίοδο 1940-2022

ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ						
ΜΗΝΑΣ	W/m <sup>2</sup>	ЕПОХН	W/m <sup>2</sup>	έτος		
Δεκέμβριος	77.97 (52.87-105.08)					
Ιανουάριος	91.28 (62.45-119.33)	ΧΕΙΜΩΝΑΣ	99.44 (70.87-127.76)			
Φεβρουάριος	128.79 (97.08-159.87)					
Μάρτιος	183.3 (147.87-217.02)					
Απρίλιος	237.99 (198.65-269.55)	ANOIEH	232.11 (195.63-263.9)			
Μάιος	275.03 (227.82-305.43)					
Ιούνιος	302.94 (249.88-332.51)					
Ιούλιος	303.67 (254.45-329.93)	ΘΕΡΟΣ	293.28 (245.82-320.48)			
Αύγουστος	273.22 (231.28-299.42)			194 96 (162 71-225 03)		
Σεπτέμβριος	214.55 (176.02-248.59)			194.90 (102.71-223.03)		
Οκτώβριος	148.77 (116.5-183.97)	ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ	154.31 (122.93-189.57)			
Νοέμβριος	98.88 (72.43-132.55)					
Πίνακας Π3.2. Μεσοποιημένες τιμές και εύρος διακύμανσης των τιμών του αιολικού δυναμικού (σε παρένθεση) στα 50m και στα 100m από την επιφάνεια της Γης, στον ευρύτερο ελληνικό χώρο. Τα αποτελέσματα δίνονται σε μηνιαία, εποχική και ετήσια βάση και αναφέρονται (μεσοποιημένα) στην περίοδο 1940-2022. Σε κάθε κελί η πρώτη γραμμή αναφέρεται στις τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m και η δεύτερη στα 100m.

ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ				
ΜΗΝΑΣ	W/m <sup>2</sup>	ЕПОХН	W/m <sup>2</sup>	ΕΤΟΣ
Δεκέμβριος	208.97 (5.18-643.8)/ 255.61 (8.2-876.14)	ΧΕΙΜΩΝΑΣ	297.14 (5.97-635.81)/ 266.77 (9.45-865.21)	150.42 (6.45-453.12)/ 184.7 (9.84-595.79)
Ιανουάριος	224.78 (5.79-645.09)/ 274.79 (9.15-877.87)			
Φεβρουάριος	219.95 (6.94-618.63)/ 269.78 (10.22-841.75)			
Μάρτιος	178.79 (7.41-506.28)/ 219.78 (10.86-688.77)	ANOIEH	126.32 (7.16-334.18)/ 155.45 (10.65-454.59)	
Απρίλιος	118.92 (7.31-311.49)/ 146.33 (11.1-394.26)			
Μάιος	81.24 (6.16-230.92)/ 100.25 (9.36-285.94)			
Ιούνιος	92.02 (5.72-388.87)/ 113.26 (8.69-455.51)	ΘΕΡΟΣ	124.12 (5.92-643.07)/ 152.81 (9-756.96)	
Ιούλιος	138.8 (6.14-770.72)/ 170.71 (9.3-909.93)			
Αύγουστος	141.53 (5.88-784.2)/ 174.47 (8.83-925.93)			
Σεπτέμβριος	122.22 (5.74-538.52)/ 150.39 (8.86-634.08)	ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ	133.43 (5.23-462.32)/ 163.91 (8.28-615.17)	
Οκτώβριος	127.52 (5.05-485.84)/ 156.95 (7.89-653.71)			
Νοέμβριος	150.7 (4.88-479.62)/ 184.56 (7.73-652.56)			

# 3.3 Χρονική μεταβολή του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης που αφορούν στη χρονική μεταβολή των δύο δυναμικών, καθώς και της ταχύτητας του ανέμου. Πρώτα παρέχονται τα αποτελέσματα σε τοπικό επίπεδο (κυψελίδας) τόσο σε ετήσια όσο και μηνιαία βάση και στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα σε μέσο περιοχικό επίπεδο (μεσοποιημένες τιμές για την περιοχή μελέτης), τόσο σε εποχική όσο και σε διαχρονική βάση (έτος-με-έτος μεταβολή).

### 3.3.1 <u>Χρονική μεταβολή του ηλιακού και του αιολικού</u> δυναμικού σε τοπικό επίπεδο

Οι απόλυτες, καθώς και οι επί τοις εκατό, γραμμικές τάσεις μεταβολής της SSR και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, στον ευρύτερο ελληνικό χώρο παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12. Τα κόκκινα χρώματα αναφέρονται σε θετικές τάσεις μεταβολής (αύξηση), ενώ τα μπλε χρώματα σε αρνητικές (μείωση). Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών, κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης φαίνεται να σημειώθηκε αύξηση του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού στη μεγαλύτερη έκταση του ευρύτερου ελληνικού χώρου, με εξαίρεση τη βορειοδυτική και βόρεια Ελλάδα (Ηπειρος, Μακεδονία και Θράκη), οι οποίες σημείωσαν μείωση έως και 1 W/m<sup>2</sup> ή 0.5%. Ωστόσο η αύξηση αυτή αφενός είναι μικρή (έως 4.44  $W/m^2$  ή 1.6%), αφετέρου μη στατιστικά σημαντική. Μία αντίστοιχη αύξηση της SSR έως και 10 W/m<sup>2</sup>, όμως για τη χρονική περίοδο 1984-2000, βρέθηκε από τους Fotiadi et al. (2006). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη διαχρονική μεταβολή του ηλιακού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά την περίοδο μελέτης όμως ανά μήνα παρατίθενται στο Παράρτημα (Σχήμα Π8). Παρατηρούνται γενικά τα ίδια γεωγραφικά χαρακτηριστικά με κυρίαρχη την τάση μείωσης της SSR, με εξαίρεση τη θερινή περίοδο, έως και το Σεπτέμβριο, όταν και σημειώθηκε γενικά μείωση της SSR.

Σε αντίθεση με την ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου στα 10m (Σχήμα 3.12β και 3.12δ) φαίνεται ότι κατά την περίοδο μελέτης (1940-2022) μειώθηκε (έως και κατά 0.39 m/s ή 6%) στις περισσότερες περιοχές, ιδιαίτερα στις θαλάσσιες, και κατ' εξοχήν στο Αιγαίο Πέλαγος. Τα ευρήματα βρίσκονται σε συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, οι Tyrlis and Lelieveld (2013), μελέτησαν τη δυναμική των Ετησίων ανέμων πάνω από την περιοχή του ελληνικού χώρου, χρησιμοποιώντας ωριαία δεδομένα του γεωδυναμικού ύψους, της θερμοκρασίας και των συνιστωσών του ανέμου, από τη βάση δεδομένων ΕRA-40, για σαράντα πέντε (45) καλοκαίρια από το 1958-2002. Βρήκαν ότι γι' αυτήν τη χρονική περίοδο σημειώθηκε μείωση της συχνότητας εμφάνισης των Ετησίων ανέμων κατά τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο-Σεπτέμβριο. Αντίθετα, στις ηπειρωτικές περιοχές παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στα 10m έως και περίπου 0.1 m/s ή 4%, ιδιαίτερα στη

Θεσσαλία και τη Μακεδονία. Αντίθετα με την ηλιακή ακτινοβολία, οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% σε μεγάλες εκτάσεις, ιδιαίτερα στο βόρειο, νότιο και νοτιοανατολικό, Αιγαίο αλλά και σε μεγάλη έκταση του ηπειρωτικού κορμού της Ελλάδας (Ήπειρο, Δυτική Μακεδονία, Θεσσαλία, Δυτική Ελλάδα). Επίσης, φαίνεται ότι σε όρους σγετικών επί τοις εκατό τάσεων μεταβολής, οι μεταβολές της ταγύτητας του ανέμου είναι μεγαλύτερου μεγέθους από εκείνες της SSR. Ωστόσο, για την εξαγωγή ακριβούς/ορθής αντίληψης, είναι πιο σωστό να συγκριθούν οι μεταβολές της SSR (του ηλιακού δυναμικού) με τις μεταβολές του αιολικού δυναμικού που ακολουθούν. Πραγματοποιήθηκε επίσης και η αντίστοιχη μελέτη για την απόλυτη τάση μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου ανά μήνα και τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα (Σχήμα Π9). Φαίνεται ότι στα θαλάσσια τμήματα της περιοχής μελέτης και πιο συγκεκριμένα στο Αιγαίο Πέλαγος σημειώθηκε μείωση, με εξαίρεση τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Νοέμβριο, κατά τους οποίους σημειώθηκε αύξηση σε σημαντικές εκτάσεις του. Επίσης, φαίνεται ότι πάνω από τις ηπειρωτικές εκτάσεις της Ελλάδας σημειώθηκε κατά βάση μικρή μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

Οι απόλυτες, καθώς και οι επί τοις εκατό γραμμικές τάσεις μεταβολής του αιολικού δυναμικού στα 50m και 100m παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.13. Παρατηρείται ότι η χωρική κατανομή και των δύο αιολικών δυναμικών, δε διαφέρει από αυτή της ταχύτητας του ανέμου στα 10m. Έτσι, το αιολικό δυναμικό στα 50m μειώνεται για την περίοδο μελέτης έως και 66.67  $W/m^2$  ή 20%, με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται και πάλι στις θαλάσσιες περιοχές, ιδιαίτερα στο βόρειο, νότιο και νοτιοανατολικό Αιγαίο. Στις ηπειρωτικές περιοχές η μεταβολή του αιολικού δυναμικού στα 50 m είναι περίπου μηδενική αλλά και στατιστικά σημαντική. Στο Σχήμα 3.13β, όπου παρουσιάζονται οι τάσεις μεταβολής του αιολικού δυναμικού στα 100m, η χωρική κατανομή είναι ίδια με αυτή στο αιολικό δυναμικό στα 50m, με τη μόνη διαφορά ότι η μείωση φτάνει τα 90.03 W/m<sup>2</sup> ή 20%. Και σε αυτή την περίπτωση η μεταβολή είναι στατιστικά σημαντική. Αντιθέτως, οι ηπειρωτικές περιοχές της Θεσσαλίας και της Μακεδονίας, σημειώνουν θετικές τάσεις μεταβολής έως και 21% και για τα δύο δυναμικά ενώ στο Αιγαίο η μείωση φτάνει έως και το 23%. Οι επί τοις εκατό τάσεις μεταβολής του αιολικού στα 50 και 100m αποδεικνύουν ότι η γενικότερη μείωση που παρατηρείται είναι στατιστικά σημαντική με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, όπως σχολιάστηκε και για την ταχύτητα του ανέμου στην προηγούμενη παράγραφο. Συνεπώς, (εφόσον οι απόλυτες τάσεις μεταβολής του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού, σε W/m<sup>2</sup>, είναι άμεσα συγκρίσιμες) οι μεταβολές του αιολικού δυναμικού είναι ισχυρότερες από τις αντίστοιχες του ηλιακού δυναμικού, μάλιστα σημαντικά (κατά μία τάξη μεγέθους).



Σχήμα 3.12 Γεωγραφική κατανομή των απόλυτων, (πρώτη γραμμή, α-β) καθώς και των σχετικών επί τοις εκατό, (δεύτερη γραμμή, γ-δ) τάσεων μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (SSR) και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m κατά την περίοδο 1940-2022. Στην αριστερή στήλη (α-γ) παρέχονται τα αποτελέσματα για την SSR και στη δεξιά για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m. Επίσης, με τα σύμβολα (μαύρες κουκκίδες) επισημαίνονται οι περιοχές στις οποίες οι υπολογισθείσες τάσεις μεταβολής βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% με την εφαρμογή του τεστ Mann-Kendall.



(%)

(δ)

Σχήμα 3.13. Γεωγραφική κατανομή των απόλυτων, (πρώτη γραμμή, α-β) καθώς και των σχετικών επί τοις εκατό, (δεύτερη γραμμή, γ-δ) τάσεων μεταβολής του αιολικού δυναμικού στα 50m από την επιφάνεια και στα 100m κατά την περίοδο 1940-2022. Στην αριστερή στήλη (α-γ) παρέχονται τα αποτελέσματα για το αιολικό δυναμικό στα 50m και στη δεξιά για αυτό στα 100m. Επίσης, με τα σύμβολα (μαύρες κουκκίδες) επισημαίνονται οι περιοχές στις οποίες οι υπολογισθείσες τάσεις μεταβολής βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% με την εφαρμογή του τεστ Mann-Kendall.

## 3.3.2 <u>Χρονική μεταβολή του ηλιακού και του αιολικού</u> δυναμικού σε μέση περιοχική βάση

#### 3.3.2.1 Εποχική μεταβολή

Η εποχική μεταβολή του ηλιακού δυναμικού (Σχήμα 3.14α) και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m (Σχήμα 3.14β), για τη διάρκεια της περιόδου μελέτης (1940-2022) και τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14. Οι τιμές είναι γεωγραφικά μεσοποιημένες, για όλα τα έτη μελέτης, αλλά και για τον κάθε μήνα. Επομένως, φαίνεται ότι το ηλιακό δυναμικό έχει τιμές που κυμαίνονται από 77.98 έως

και 303.52 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 194.52 ± 80.95 W/m<sup>2</sup>. Οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται τους θερινούς μήνες, ιδιαίτερα τον Ιούνιο και τον Ιούλιο, αποτέλεσμα που συμφωνεί και με την εποχική γεωγραφική κατανομή του Σχήματος 3.10, ενώ οι ελάχιστες τιμές σημειώνονται τους χειμερινούς μήνες. Παρατηρείται αύξηση των τιμών του ηλιακού δυναμικού, από τον Ιανουάριο μέχρι και τον Ιούλιο, ενώ στη συνέχεια το δυναμικό ακολουθεί σταθερή μείωση, από τον Αύγουστο μέχρι και το Δεκέμβριο. Οι θερινές τιμές είναι περίπου τριπλάσιες από τις χειμερινές, γεγονός που υποδεικνύει έναν ισχυρό εποχικό κύκλο.

Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου στα 10m (Σχ. 3.14β), οι τιμές της κυμαίνονται από 3.5 έως 4.79 m/s, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 4.19 ± 0.5 m/s. Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές, σημειώνονται τους χειμερινούς μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Δεκέμβριο, ενώ οι μικρότερες τους μήνες Μάιο και Ιούνιο.

Η εποχική μεταβολή για το αιολικό δυναμικό στα 50m και στα 100m, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15 (Σχήματα 3.15α και 3.15β, αντίστοιχα). Η εποχική κατανομή των δύο δυναμικών δε διαφέρει από αυτή της ταχύτητας του ανέμου, όμως εμφανίζεται ένας ισχυρότερος και διακριτός εποχικός κύκλος με μέγιστες χειμερινές τιμές και ένα δευτερεύον ασθενές μέγιστο στο δεύτερο μισό του θέρους. Το αιολικό δυναμικό στα 50m κυμαίνεται από 81.03 έως 225.62 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 150.55  $\pm$  46.07 W/m<sup>2</sup>. Αντίστοιχα, οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 100m κυμαίνονται από 99.99 έως 275.82 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 184.86  $\pm$  53.96 W/m<sup>2</sup>. Είναι εμφανές ότι οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m, είναι μικρότερες από τις τιμές του αιολικού δυναμικού στα 100m, γεγονός που όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα είναι σύμφωνο με τη βιβλιογραφία (βλ. Σχήμα 1.6).





**Σχήμα 3.14.** Εποχική μεταβολή του ηλιακού δυναμικού (α) και του αιολικού δυναμικού στα 10m (β) στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, κατά τη διάρκεια περιόδου μελέτης 1940-2022. Στα δύο σχήματα παρέχονται οι μεταβολές μήνα με μήνα.





**Σχήμα 3.15.** Εποχική μεταβολή του αιολικού δυναμικού στα 50m (α) και στα 100m (β) στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, κατά τη διάρκεια περιόδου μελέτης 1940-2022. Στα δύο σχήματα παρέχονται οι μεταβολές μήνα με μήνα.

### 3.3.2.2 Διαχρονική μεταβολή

Η διαχρονική μεταβολή της SSR και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά την περίοδο 1940-2022 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16. Πιο συγκεκριμένα, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή από έτος σε έτος των μέσων ετήσιων περιοχικών (γεωγραφικά μεσοποιημένων) τιμών των μελετώμενων παραμέτρων. Παρουσιάζονται, επίσης, αφενός η γραμμική τάση μεταβολής (μέσω γραμμικής παρεμβολής) καθώς και η πολυωνυμική παρεμβολή 6<sup>ου</sup> βαθμού, που εφαρμόσθηκαν στις χρονοσειρές των δύο παραμέτρων. Η τάση γραμμικής παρεμβολής από την παρατήρηση της τάσης μεταβολής των παραμέτρων συνολικά για όλα τα έτη μελέτης, ενώ η πολυωνυμική παρεμβολή για την παρατήρηση των αυξομειώσεων των μελετώμενων παραμέτρων, στις δεκαετίες της περιόδου μελέτης. Ακόμη, η επιλογή η πολυωνυμική παρεμβολή να αποδοθεί με πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού (ενώ δοκιμάσθηκαν και παρεμβολές διαφορετικού βαθμού), έγινε με σκοπό την ακριβέστερη προσαρμογή (overfitting) στα δεδομένα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.16α, η SSR κυμαίνεται από 177.43 έως και 202.54 W/m<sup>2</sup>, η μέση τιμή είναι ίση με 193.24 W/m<sup>2</sup>, ενώ η από έτος σε έτος διακύμανση είναι σχετικά μικρή σε σχέση με τη μέση τιμή. Όσον αφορά στις δεκαετείς τάσεις μεταβολής της SSR, στη βάση της πολυωνυμικής παρεμβολής, φαίνεται ότι από το 1940 έως και το 1970, η SSR μειώνεται, ενώ ύστερα και περίπου έως και το 1990 αυξάνεται. Στη συνέχεια, έως και περίπου το 2010 παρατηρείται σταθεροποίηση της παραμέτρου, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται αύξηση. Οι αντίθετες αυτές δεκαετείς τάσεις μεταβολής αναιρούνται σε ικανό βαθμό, ώστε σύμφωνα με την εφαρμοσθείσα γραμμική παρεμβολή και την εξαχθείσα τάση, φαίνεται ότι η SSR αυξήθηκε ελάχιστα στον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά την περίοδο μελέτης 1940-2022. Πιο συγκεκριμένα,

σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, η SSR αυξήθηκε κατά 1.2  $W/m^2$ , ή κατά 0.62%, δηλαδή ελάγιστα. Η αύξηση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική, γεγονός που φαίνεται και οπτικά από την κλίση της γραμμή τάσης. Αντίστοιχη μικρή αύξηση έχει παρατηρηθεί και σε παγκόσμια κλίμακα λόγω του ότι, τα αερολύματα όπως και τα νέφη σημείωσαν μείωση τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο, με αποτέλεσμα περισσότερο μέρος της εισεργόμενης ηλιακής ακτινοβολίας να φτάνει στο έδαφος γωρίς να υποστεί σκέδαση είτε απορρόφηση από αερολύματα ή νέφη (Stamatis et al., 2023). Επιπλέον, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά των Fotiadi et al. (2006), οι οποίοι υπολόγισαν την διαχρονική μεταβολή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας (DSR Flux), για τον ελληνικό χώρο και τη χρονική περίοδο 1984 έως 2000, χρησιμοποιώντας μοντέλο με χωρική ανάλυση 2.5° × 2.5° και βρήκαν θετική κλίση της γραμμικής τάσης παρεμβολής και ίση με 0.55. Όντως, φαίνεται στο Σχήμα 3.16α ότι κατά την λόγω χρονική περίοδο (1984-2000) η SSR υπέστη αύξηση. Για μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η παραπάνω ανάλυση (μελέτη διαγρονικής μεταβολής γραμμική/πολυωνυμική μεταβολής) και τάση πραγματοποιήθηκε και σε μηνιαία κλιματική βάση και τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα (Σχήμα Π10). Σε αυτό παρατηρείται ότι η ελαφρά γραμμική αύξηση της SSR παρατηρείται σε όλο το έτος, με εξαίρεση τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, όταν και έλαβε χώρα μείωση της SSR (έως και 6.99 W/m<sup>2</sup>), κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Παράλληλα, η μείωση αυτή είναι στατιστικά σημαντική μόνο για τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Όσον αφορά στην ταχύτητα του ανέμου στα 10m (Σχήμα 3.16β), παρατηρείται ότι οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται από 3.92 έως 4.35 m/s, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 4.19 m/s. Παρατηρείται ότι to το εύρος της διακύμανσης είναι μικρό σε σχέση με τη μέση τιμή όλων των ετών. Βάσει της πολυωνυμικής παρεμβολής, φαίνεται ότι οι δεκαετείς μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου δεν είναι τόσο μεγάλες όσο οι αντίστοιχες της SSR. Ωστόσο, από το 1940 έως περίπου το 1950 παρατηρείται μείωση της ταχύτητας του ανέμου, ενώ την επόμενη δεκαετία, έως το 1960 παρατηρείται σταθεροποίηση. Ύστερα, από το 1960 και έως περίπου το 1985 επικρατεί εκ νέου μείωση, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται ελαφρά αύξηση έως και το 2010 και πιο έντονη αύξηση στη συνέχεια. Από την εφαρμοσθείσα γραμμική παρεμβολή και την εξαχθείσα τάση, φαίνεται ότι η ταχύτητα του ανέμου στα 10m μειώθηκε, στον ευρύτερο ελληνικό γώρο, κατά την περίοδο μελέτης 1940-2022, καθώς η κλίση της γραμμικής τάσης παρεμβολής εμφανίζεται αρνητική. Αντίθετα με την SSR, η μείωση της ταχύτητας του ανέμου είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Έτσι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά η ταχύτητα του ανέμου μειώθηκε κατά 0.073 m/s ή 1.7%. Σημειώνεται ότι η φυσική ερμηνεία των μεγίστων και ελαγίστων του Σχήματος 3.16β, όπως των δύο μεγίστων, του 1979 και του 2001 και των δύο ελαγίστων, του 2003 και του 2014, είναι δύσκολη, καθώς ο άνεμος είναι μία συνεγώς και έντονα μεταβαλλόμενη παράμετρος (Sathyajith, 1967) και δεν επιχειρήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η παραπάνω ανάλυση πραγματοποιήθηκε και σε μηνιαία κλιματική βάση, όπως έγινε και για την SSR, η οποία παρατίθεται στο Σχήμα Π11 του Παραρτήματος. Η παραπάνω ανάλυση έδειξε ότι μόνο κατά τους μήνες Απρίλιο, Μάϊο και Νοέμβριο σημειώθηκε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, αντίθετα με τη γενική τάση μείωσης, αύξηση έως και 0.13 m/s, που όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Η διαγρονική μεταβολή του αιολικού δυναμικού στα 50 και 100m παρατίθεται στο Σχήμα 3.17. Παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά της διαχρονικής μεταβολής, είναι ακριβώς ίδια με αυτά του ανέμου στα 10m που συζητήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, γι' αυτό και δε συζητούνται περαιτέρω εδώ. Και στα δύο σγήματα φαίνεται μείωση, η οποία είναι πιο έντονη σε σχέση με αυτήν της ταχύτητας του ανέμου στα 10m. Βρίσκεται ότι η μεταβολή (μείωση) του αιολικού δυναμικού στα 50m είναι ίση με -11.59 W/m<sup>2</sup> ή 7.7%, ενώ στα 100m ίση με -14.79 W/m<sup>2</sup> ή 8%. Και οι δύο αυτές μειώσεις είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, ενώ τα μέγιστα και τα ελάγιστα που παρατηρήθηκαν στην ταχύτητα του ανέμου είναι διακριτά και στα Σγήματα 3.17α και 3.17β. Επιπλέον, από το Σγήμα 3.17α παρατηρείται ότι οι γεωγραφικά μεσοποιημένες τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m, κυμαίνονται από 111.08 έως 164.72 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $142.18 \pm 9.97$  W/m<sup>2</sup>. Και σε αυτήν την περίπτωση το εύρος διακύμανσης των τιμών είναι μικρό, όπως άλλωστε είναι και η διακύμανση αυτή κάθε αυτή σε σχέση με τη μέση τιμή όλων των ετών. Για το αιολικό δυναμικό στα 100m (Σχ. 3.17β), φαίνεται ότι οι τιμές του κυμαίνονται από 138.79 έως 207.41 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $178.19 \pm 12.74$  W/m<sup>2</sup>. Παρατηρείται και πάλι ότι το εύρος των τιμών είναι σχετικά μικρό αλλά μεγαλύτερο από αυτό για το αιολικό δυναμικό στα 50m. Σημειώνεται ότι η διακύμανση των τιμών είναι σχετικά μικρή σε σχέση με τη μέση τιμή όλων των ετών της περιόδου μελέτης.

Τα προηγούμενα αποτελέσματα του υποδεικνύουν ότι κατά τη διάρκεια των 82 ετών μελέτης (1940-2022), το ηλιακό δυναμικό στον ευρύτερο ελληνικό χώρο δε μεταβλήθηκε πρακτικά, στην πραγματικότητα αυξήθηκε πολύ ελαφρά, ενώ το αιολικό δυναμικό ελαττώθηκε. Τέτοιες μεταβολές των δυναμικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν σημαντικές στα πλαίσια της αξιοποίησής τους, ενώ το ίδιο ισχύει και σε μελλοντικές μεταβολές τους και τις επενδύσεις που γίνονται για την αξιοποίησή τους.



Σχήμα 3.16. Διαχρονική μεταβολή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (α) και της ταχύτητας του ανέμου στα 10m (β) για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης 1940-2022. Στα δύο σχήματα παρέχονται οι χρονοσειρές μέσων ετήσιων τιμών, στις οποίες εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή (μπλε γραμμές) και πολυωνυμική παρεμβολή (6<sup>ου</sup> βαθμού, κόκκινες καμπύλες).



Σχήμα 3.17. Διαχρονική μεταβολή του αιολικού δυναμικού στα 50m (α) και στα 100m (β) για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης 1940-2022. Στα δύο σχήματα παρέχονται οι χρονοσειρές μέσων ετήσιων τιμών, στις οποίες εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή (μπλε γραμμές) και πολυωνυμική παρεμβολή (6<sup>ου</sup> βαθμού, κόκκινες καμπύλες).

#### 3.4 Σύγκριση ηλιακού και αιολικού δυναμικού

Σε αυτήν την ενότητα αναλύεται η σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού τόσο για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο (όλη την περιοχή μελέτης) όσο και σε περιοχική κλίμακα. Η σύγκριση αυτή είναι σημαντικό να γίνει, αφού μέχρι τώρα δεν έχει πραγματοποιηθεί σύγκριση ανάμεσα στα δύο αυτά δυναμικά για τον ελληνικό χώρο. Συνεπώς, είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ποιο από τα δύο δυναμικά υπερτερεί στον

ευρύτερο ελληνικό χώρο, αλλά και πότε το ένα δυναμικό υπερτερεί του άλλου, ώστε να διαπιστωθεί πότε είναι συμφέρουσα η αξιοποίηση της ενέργειας του εκάστοτε δυναμικού. Η σύγκριση γίνεται δίνοντας έμφαση και σε ό,τι αφορά στην ενδοετήσια κύμανση των δύο δυναμικών κατά την περίοδο μελέτης (1940-2022). Για τον σκοπό αυτό υπολογίστηκε για το κάθε δυναμικό η τιμή για κάθε μήνα κάθε έτους της χρονικής περιόδου και στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή του κάθε μήνα από όλα τα έτη της περιόδου μελέτης. Όπως προαναφέρθηκε, η σύγκριση των δύο δυναμικών έγινε εκτός του ευρύτερου ελληνικού χώρου, στο σύνολο του και για τις εξής υποπεριοχές: το Αιγαίο Πέλαγος, το Ιόνιο Πέλαγος, την Κρήτη, τη Βόρεια Ελλάδα και την Πελοπόννησο.

#### 3.4.1 Ευρύτερος ελληνικός χώρος

Η σύγκριση των δύο δυναμικών για τον ευρύτερο ελληνικό γώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18, ξεχωριστά για το αιολικό δυναμικό στα 50 και 100m να στα Σχήματα 3.18α και 3.18β, αντίστοιγα. Οι τιμές του ηλιακού δυναμικού κυμαίνονται από 77.98 έως 303.52 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή του να είναι ίση με 194.72  $\pm$  80.95 W/m<sup>2</sup>. Όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 50m, οι τιμές κυμαίνονται από 81.03 έως 225.62  $W/m^2$ , με τη μέση τιμή να είναι 150.55 ± 46.07  $W/m^2$ . Έτσι, ενώ το ηλιακό δυναμικό σε μέση ετήσια βάση έγει μεγαλύτερες τιμές από το αιολικό, ωστόσο αυτό δεν ισχύει για τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο, όταν το αιολικό δυναμικό υπερισχύει του ηλιακού (έως και κατά 130 W/m<sup>2</sup>), δηλαδή κατά τους γειμερινούς μήνες. Τους υπόλοιπους μήνες, των μεταβατικών επογών του έτους και ιδιαίτερα τους θερινούς, το ηλιακό δυναμικό είναι αυτό που υπερισχύει του αιολικού, μάλιστα κατά πολύ (έως και 210 W/m<sup>2</sup> τον Ιούνιο). Τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.18 δείγνουν λοιπόν ότι για μια πιο αποδοτική διαγείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον ευρύτερο ελληνικό χώρο είναι προτιμότερο να γίνεται εναλλαγή χρήσης τους κατά τους θερινή και την ψυχρή περίοδο του έτους, εφόσον πρέπει να λειτουργεί μόνο μία πηγή. Επίσης, εάν πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο μία πηγή ΑΠΕ καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, τότε πρέπει να προτιμηθεί η ηλιακή. Ωστόσο, είναι αποδοτικότερο να γίνεται εναλλαγή μεταξύ των δύο πηγών. Το αιολικό δυναμικό στα 100m έχει τιμές οι οποίες κυμαίνονται από 99.99 έως και 275.82 W/m<sup>2</sup>, με μία μέση τιμή να είναι ίση με  $184.86 \pm 53.96 \text{ W/m}^2$ , η οποία προσεγγίζει πολύ την ετήσια μέση τιμή του ηλιακού δυναμικού. Πλέον, φαίνεται ότι το αιολικό δυναμικό ξεπερνά το ηλιακό όχι μόνο τους τέσσερις μήνες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αλλά και τους μήνες Μάρτιο και Οκτώβριο, δηλαδή κατά τους μισούς μήνες του έτους. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του αιολικού δυναμικού με το ύψος, γεγονός που οφείλεται στην αντίστοιγη αύξηση της ταγύτητας του ανέμου από τα 50m στα 100m. Βέβαια, από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ακόμη και με αυτή την αύξηση οι τιμές του αιολικού δυναμικού δεν ξεπερνούν αυτές του ηλιακού σε μέση ετήσια βάση. Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι οι ανεμογεννήτριες με πτερύγια στο ύψος των 100m είναι ακριβότερες από εκείνες σε ύψος 50m, γεγονός που εν μέρει αντισταθμίζει το οικονομικό όφελος από το ισχυρότερο διαθέσιμο αιολικό δυναμικό στο μεγαλύτερο ύψος (Lee et al., 2019).



**Σχήμα 3.18.** Σύγκριση μεταξύ του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στον ευρύτερο ελληνικό χώρο. Η σύγκριση γίνεται στα 50m (α) και στα 100m (β).

#### 3.4.2 Αιγαίο Πέλαγος

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο δυναμικών για την περιοχή του Αιγαίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19. Το ηλιακό δυναμικό έχει τιμές από 81.81 έως 319.08  $W/m^2$ , με τη μέση τιμή να είναι ίση με 204.76 ± 85.07  $W/m^2$ . Από την άλλη πλευρά, το αιολικό δυναμικό στα 50m έχει τιμές μεγαλύτερες για τη συγκεκριμένη περιοχή σε

σχέση με τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, κυμαινόμενες από 135.38 έως 412.45 και με μέση τιμή ίση με  $287.82 \pm 85.98 \text{ W/m}^2$ . Άρα για την περιογή του Αιγαίου, το αιολικό δυναμικό ξεπερνά τις τιμές του ηλιακού, σε αντίθεση με τον ευρύτερο ελληνικό χώρο για τον οποίο συνέβαινε το αντίθετο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σύμφωνο με τη βιβλιογραφία και οφείλεται στο γεγονός ότι οι άνεμοι στο Αιγαίο είναι ισχυρότεροι, μάλιστα τόσο πολύ ώστε ακόμη και το θέρος (Ετησίες) να καθιστούν το αιολικό δυναμικό ισοδύναμο με το ηλιακό. Από το Σχήμα 3.19α, παρατηρείται ότι το αιολικό δυναμικό ξεπερνά το ηλιακό κατά τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο, Οκτώβριο και Νοέμβριο, δηλαδή οκτώ (8) μήνες, ενώ το ηλιακό δυναμικό υπερτερεί μόνο τους μήνες Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο για την περιοχή του Αιγαίου. Το αιολικό δυναμικό στα 100m (Σχήμα 3.19β) είναι ακόμη μεγαλύτερο του αιολικού στα 50m, έχοντας τιμές κυμαινόμενες από 162.86 έως 500.28  $W/m^2$  και μέση τιμή ίση με 348.19 ± 104.75  $W/m^2$ , δηλαδή περίπου 150% μεγαλύτερη από του ηλιακού. Οι μήνες που υπερτερεί το αιολικό δυναμικό του ηλιακού σε αυτή την περίπτωση, είναι εννέα (9), με επιπλέον μήνα τον Ιούλιο, ενώ στην ουσία το ηλιακό δυναμικό υπερτερεί του αιολικού στα 100m μόνο σε δύο (2) μήνες, τους Μάιο και Ιούνιο. Έτσι λοιπόν, φαίνεται ότι στην περιοχή του Αιγαίου περισσότερο χρήσιμο προς εκμετάλλευση είναι το αιολικό δυναμικό.





**Σχήμα 3.19.** Σύγκριση μεταξύ του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στο Αιγαίο Πέλαγος. Η σύγκριση γίνεται στα 50m (a) και στα 100m (β).

#### 3.4.3 Ιόνιο Πέλαγος

Η περιοχή του Ιονίου Πελάγους είναι η επόμενη περιοχή για την οποία πραγματοποιήθηκε η σύγκριση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.20. Το ηλιακό δυναμικό παρατηρείται να παίρνει τιμές από 80.68 έως 313.02 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 200.1 ± 83.22 W/m<sup>2</sup>. Το αιολικό δυναμικό στα 50m, έχει τιμές από 86.71 έως 310.71 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 172.27 ± 82.90 W/m<sup>2</sup>. Παρατηρείται ότι στην περιοχή του Ιονίου το αιολικό δυναμικό στα 50m υπερισχύει του ηλιακού για όλους τους χειμερινούς μήνες, αλλά και τους μήνες Μάρτιο και Νοέμβριο. Αντίθετα, το ηλιακό ξεπερνά το αιολικό τους υπόλοιπους μήνες του έτους. Όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 100m, οι τιμές του κυμαίνονται από 101.66 έως 367.29 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 203 ± 98.33 W/m<sup>2</sup>. Από το Σχήμα 3.20β παρατηρείται ότι οι μήνες για τους οποίους το αιολικό δυναμικό υπερτερεί του ηλιακού, είναι ουσιαστικά οι ίδιοι με αυτούς για το αιολικό στα 50m, ενώ τον Οκτώβριο καθίσταται ισοδύναμο με το ηλιακό δυναμικό.



**Σχήμα 3.20.** Σύγκριση μεταξύ του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στο Ιόνιο Πέλαγος. Η σύγκριση γίνεται για το αιολικό δυναμικό στα 50m (α) και στα 100m (β).

#### <u>3.4.4 Κρήτη</u>

Η σύγκριση των δύο δυναμικών για την περιοχή της Κρήτης παρατίθεται το Σχήμα 3.21. Οι τιμές του ηλιακού δυναμικού κυμαίνονται από 96.54 έως 326.89 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 216.79 ± 82.08 W/m<sup>2</sup>. Οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m από την άλλη, κυμαίνονται από 139.47 έως 350.26 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 252.77 ± 66.67 W/m<sup>2</sup>. Παρατηρείται ότι το αιολικό δυναμικό ξεπερνά ήδη το ηλιακό στα 50m για την περιοχή της Κρήτης, τόσο τους χειμερινούς μήνες, όσο και

τους μήνες Μάρτιο, Οκτώβριο και Νοέμβριο, ενώ το ηλιακό δυναμικό παρατηρείται να κυριαρχεί (έστω και κατά λίγο) τους υπόλοιπους έξι μήνες. Στο Σχήμα 3.21β, φαίνεται ότι το αιολικό δυναμικό στα 100m παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 166.8 έως 420.81 W/m<sup>2</sup>, έχοντας μέση τιμή ίση με 303.15 ± 80.43 W/m<sup>2</sup>. Παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση το ηλιακό δυναμικό ξεπερνά το αιολικό, μόνο για τρεις μήνες (Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο), με το αιολικό δυναμικό στα 100m, να ξεπερνά το ηλιακό ακόμη και τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, μήνες κατά τους οποίους το ηλιακό δυναμικό έχει τις μέγιστες τιμές του.



**Σχήμα 3.21.** Σύγκριση μεταξύ του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού της Κρήτης. Η σύγκριση γίνεται για το αιολικό δυναμικό στα 50m (α) και στα 100m (β).

#### 3.4.5 Βόρεια Ελλάδα

Η σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού για την περιοχή της Βόρειας Ελλάδας παρατίθεται στο Σχήμα 3.22. Οι τιμές του ηλιακού δυναμικού παρατηρείται να κυμαίνονται από 67.69 έως 287.58 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $180.25 \pm$ 79.06 W/m<sup>2</sup>. Από την άλλη πλευρά, το αιολικό δυναμικό στα 50m κυμαίνεται από 37.15 έως 119.29 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $78.53 \pm 28.25$  W/m<sup>2</sup>. Σε αυτή την περιογή η διαφορά μεταξύ των τιμών του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού είναι μεγάλη με τις πρώτες να ξεπερνούν κατά πολύ τις δεύτερες (είναι τετραπλάσιες σε ετήσια βάση), επιβεβαιώνοντας έτσι τις μεγάλες τιμές που έχει ο άνεμος πάνω από τις θαλάσσιες περιογές και τις μικρές τιμές πάνω από τις ηπειρωτικές. Παρατηρείται ότι, το αιολικό δυναμικό στα 50m, υπερισχύει ουσιαστικά του ηλιακού μόνο τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο. Όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 100m (Σγήμα 3.22β), παρατηρείται ότι οι τιμές κυμαίνονται από 50.92 έως 154.91 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $103.84 \pm 35.75 \text{ W/m}^2$ . Έτσι, ούτε και σε αυτήν την περίπτωση (στα 100m) το αιολικό δυναμικό ξεπερνά ουσιαστικά το ηλιακό, με τους μήνες όπου αυτό γίνεται να είναι μόνο οι Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος. Σε μέση ετήσια βάση, το αιολικό δυναμικό είναι και πάλι σημαντικά υποδεέστερο του ηλιακού, άρα αυτό συμβαίνει τόσο στα 50m όσο και στα 100m. Η Β. Ελλάδα είναι η περιοχή με το χαμηλότερο αιολικό δυναμικό, γεγονός που είχε φανεί και στις γεωγραφικές κατανομές. Άρα, στην περιοχή αυτή αναμφίβολα περισσότερο χρήσιμο προς εκμετάλλευση είναι το ηλιακό δυναμικό.





**Σχήμα 3.22.** Σύγκριση μεταξύ του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στην Βόρεια Ελλάδα. Η σύγκριση γίνεται για το αιολικό δυναμικό στα 50m (α) και στα 100m (β).

#### 3.4.6 Πελοπόννησος

Η σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού, για την περιοχή της Πελοποννήσου, παρατίθεται στο Σχήμα 3.23. Έτσι, φαίνεται ότι οι τιμές του ηλιακού δυναμικού κυμαίνονται από 82.20 έως 312.15  $W/m^2$ , με τη μέση τιμή να είναι ίση με  $200.94 \pm 82.53$  W/m<sup>2</sup>. Από την άλλη πλευρά, το αιολικό δυναμικό στα 50m κυμαίνεται από 73.32 έως 197.32 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να είναι ίση με 119.78 ± 45.45 W/m<sup>2</sup>. Παρατηρείται ότι το ηλιακό δυναμικό υπερισχύει του αιολικού τους περισσότερους μήνες (Μάρτιο, Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο, Οκτώβριο), ενώ το αιολικό δυναμικό ξεπερνά το ηλιακό μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες καθώς και το Νοέμβριο. Όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 100m, από το Σχήμα 3.23β φαίνεται ότι κυμαίνεται από 92.08 έως 242.96 W/m<sup>2</sup>, με τη μέση τιμή να απαντάται στα 148.17 ± 55.5 W/m<sup>2</sup>. Από το Σχήμα 3.23β, φαίνεται ότι οι τιμές του αιολικού δυναμικού έχουν αυξηθεί, όμως και πάλι δεν καταφέρνουν να υπερισχύσουν του ηλιακού δυναμικού, περισσότερους μήνες σε σχέση με το αιολικό δυναμικό στα 50m. Και για την περιοχή της Πελοποννήσου, σε μέση ετήσια βάση το αιολικό δυναμικό δεν ξεπερνά το ηλιακό δυναμικό ούτε στα 50m ούτε στα 100m. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και σύμφωνο με τις γεωγραφικές κατανομές, αφού η Πελοπόννησος είναι ηπειρωτική περιοχή με μικρό αιολικό δυναμικό, αντίθετα με τις θαλάσσιες περιοχές.



**Σχήμα 3.23.** Σύγκριση μεταξύ του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού της Πελοποννήσου. Η σύγκριση γίνεται για το αιολικό δυναμικό στα 50m (α) και στα 100m (β).

Βάσει των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή, προκύπτει ότι στις περισσότερες υποπεριοχές μελέτης για τις οποίες πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των δύο δυναμικών, παρατηρείται ότι οπωσδήποτε τη θερμή περίοδο του έτους (Μάιο – Σεπτέμβριο) είναι πιο συμφέρουσα η αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού, ενώ την ψυχρή περίοδο (Νοέμβριο – Μάρτιο) αυτή του αιολικού. Αυτό ισχύει για την Ελλάδα, τη Βόρεια Μακεδονία, το Ιόνιο καθώς και την Πελοπόννησο και για τα δύο

αιολικά δυναμικά (στα 50 και 100m). Εξαίρεση αποτελούν οι περιοχές του Αιγαίου Πελάγους και της Κρήτης, για τις οποίες και σε ό,τι αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 100m, το ηλιακό δυναμικό επικρατεί του αιολικού μόνο τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, σε μέση ετήσια βάση το ηλιακό δυναμικό υπερτερεί του αιολικού, τόσο στα 50 όσο και στα 100m, τόσο για το σύνολο του ελληνικού χώρου όσο και σε όλες τις υποπεριοχές εκτός από την Κρήτη και Αιγαίο Πέλαγος όπου το αιολικό (και στα δύο ύψη) υπερτερεί του ηλιακού. Επίσης, στο Ιόνιο Πέλαγος τα δύο δυναμικά είναι ισοδύναμα, σε ό,τι αφορά στο αιολικό στα 100m, ενώ το ηλιακό είναι υπέρτερο σε ό,τι αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 50m.

### Κεφάλαιο 4° ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η μελέτη του ηλιακού και αιολικού δυναμικού για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, σε κλιματολογική βάση για τα τελευταία ογδόντα δύο (82) χρόνια (1940 – 2022), καθώς και η σύγκριση μεταξύ τους. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, αντλήθηκαν από το ERA5 reanalysis με χωρική ανάλυση  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  για τις παραμέτρους της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, καθώς και του μήκους τραχύτητας. Ακόμη, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε και η αξιολόγηση των δεδομένων επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας του ανέμου, του ERA5 reanalysis με αντίστοιγα δεδομένα από επίγειους σταθμούς. Η ηλιακή ακτινοβολία αξιολογήθηκε με δεδομένα των ακτινομετρικών σταθμών αναφοράς του δικτύου GEBA, ενώ η ταγύτητα του ανέμου στα 10m με δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών της EMY. Το αιολικό δυναμικό υπολογίστηκε στα 50m και 100m από την επιφάνεια, καθώς σε αυτά τα ύψη τοποθετούνται συχνότερα οι ανεμογεννήτριες στην περιοχή της Ελλάδας. Ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού πραγματοποιήθηκε με αλγόριθμο, ο οποίος βρίσκει με αναγωγή την ταχύτητα του ανέμου στα 50m και 100m από την αρχική ταχύτητα στα 10m. Τα αρχικά διαθέσιμα μηνιαία δεδομένα (ανά έτος), μεσοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μέσων ετήσιων και μηνιαίων κλιματικών δεδομένων για την περίοδο των 82 ετών (1940 – 2022). Παρήχθησαν οι γεωγραφικές κατανομές του ηλιακού δυναμικού, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m και του αιολικού δυναμικού στα 50 και 100m, σε ετήσια αλλά και επογική βάση. Στη συνέγεια, υπολογίστηκαν οι γεωγραφικές κατανομές των τάσεων μεταβολής των μελετώμενων παραμέτρων, καθώς και οι αντίστοιχες επί τοις εκατό τάσεις μεταβολής. Ακόμη, μέσω του αλγορίθμου υπολογίζεται η χρονική μεταβολή των παραμέτρων όπου παρουσιάζεται η διαχρονική τους μεταβολή. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στα 50m και 100m, τόσο για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, όσο και για υποπεριοχές αυτού και επίσης σε ετήσια όσο και εποχική βάση.

Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

Το ERA5 reanalysis έχει, σε ό,τι αφορά στην επιφανειακή ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, ικανοποιητική επίδοση σε σχέση με αντίστοιχες επίγειες μετρήσεις από Σταθμούς που βρίσκονται στον ελληνικό χώρο. Σε ό,τι αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία εκτιμήθηκε μία μέση απόκλιση (bias) ίση με 13.87 W/m<sup>2</sup> ή 8.55% και ένας συντελεστής συσχέτισης Pearson ίσος με 0.94. Για την αξιολόγηση της ηλιακής ακτινοβολίας με απεχοποιημένες ανωμαλίες, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson βρέθηκε ίσος με 0.68. Για την

ταχύτητα του ανέμου στα 10m η αξιολόγηση ανέδειξε ένα bias ίσο με 0.52 m/s ή 14.21% και συντελεστή Pearson ίσο με 0.79. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ενθαρρυντικά για την αξιοπιστία των εκτιμώμενων δυναμικών, του ηλιακού και του αιολικού, στην παρούσα εργασία. Ωστόσο, για τη ταχύτητα του ανέμου στα 10m, παρατηρήθηκε μία υποεκτίμηση των τιμών του ERA5 reanalysis για μερικούς σταθμούς, συγκεκριμένα αυτούς του Ηρακλείου, της Κοζάνης, της Ιεράπετρας, των Ιωαννίνων, της Λάρισας και της Τρίπολης.

- Για όλες τις μελετώμενες παραμέτρους (ηλιακό δυναμικό, ταχύτητα του ανέμου • στα 10m, αιολικό δυναμικό στα 50 και 100m), παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές σημειώνονται πάνω από θαλάσσιες περιοχές της μελετώμενης περιοχής, ενώ οι μικρότερες πάνω από τα χερσαία (ηπειρωτικά) τμήματα. Πιο συγκεκριμένα, σε μέση ετήσια βάση, οι τιμές του ηλιακού δυναμικού πάνω από θαλάσσιες περιογές φτάνουν τα 225.03 W/m<sup>2</sup>, ενώ πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές τα 162.71 W/m<sup>2</sup>. Αντίστοιχα, οι τιμές του αιολικού δυναμικού στα 50m και 100m πάνω από θαλάσσιες περιοχές φτάνουν τα 453.12 W/m<sup>2</sup> και τα  $595.79 \text{ W/m}^2$  αντίστοιγα, ενώ πάνω από τις ηπειρωτικές περιογές τα 6.45 W/m<sup>2</sup> και τα 9.84 W/m<sup>2</sup>, αντίστοιχα. Επίσης σε όλα τα μελετώμενα δυναμικά, οι τιμές πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος, ήταν μεγαλύτερες από αυτές του Ιονίου. Η διαφορά μεταξύ των δύο μεγάλων Πελάγων φτάνει για το ηλιακό δυναμικό (SSR) τα 15 W/m<sup>2</sup>, για την ταγύτητα του ανέμου στα 10m τα 2m/s, το αιολικό δυναμικό στα 50m τα 190  $W/m^2$  και για το αιολικό δυναμικό στα 100m, τα 194.56 W/m<sup>2</sup>.
- Σε μέση ετήσια κλιματολογική (για τα 82 έτη μελέτης) και περιοχική βάση, το ηλιακό δυναμικό υπολογίσθηκε ίσο με 194.96 ± 17.7 W/m<sup>2</sup>, ενώ το αιολικό δυναμικό στα 50m και στα 100m ίσο με 150.42 ± 126.54 W/m<sup>2</sup> και 184.7 ± 146.82 W/m<sup>2</sup>, αντίστοιχα, υποδεικνύοντας ότι το ηλιακό δυναμικό είναι πιο διαθέσιμο προς εκμετάλλευση. Ωστόσο, οι προαναφερθείσες μέσες τυπικές αποκλίσεις δείχνουν μια υπολογίσιμη μεταβολή από έτος σε έτος, που είναι μεγαλύτερη για το αιολικό δυναμικό στα 100m. Το εύρος διακύμανσης των μέσων ετήσιων τιμών των τριών δυναμικών είναι 162.71-225.03 W/m<sup>2</sup> για το ηλιακό δυναμικό, 6.45-453.12 W/m<sup>2</sup> για το αιολικό δυναμικό στα 50m και 9.84-595.79 W/m<sup>2</sup> για αυτό στα 100m.
- Από την εξέταση της απόλυτης, αλλά και της επί τοις εκατό τάσης μεταβολής, προέκυψε ότι το ηλιακό δυναμικό σημείωσε αύξηση κατά την περίοδο μελέτης (1940 2022), η οποία όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η αύξηση φτάνει έως και το 2.6%, στην περιοχή της Βόρειας Πελοποννήσου, της Βορειοδυτικής Κρήτης, καθώς και της θαλάσσιας έκτασης δυτικά της Κρήτης και νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή της Βορειοδυτικής και Βόρειας Ελλάδας όπου σημειώνεται μείωση έως και 0.5%. Αντιθέτως, η ταχύτητα του ανέμου και το αιολικό δυναμικό στα 50m και 100m μειώθηκαν για την περίοδο μελέτης, με τη μείωση να είναι στατιστικά σημαντική, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η μείωση αυτή

δεν ξεπερνά το 6%,για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m, ενώ η μείωση αυτή παρατηρείται στη θαλάσσια περιοχή νοτιοανατολικά του Καρπάθιου Πελάγους και στο Κρητικό Πέλαγος. Όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό στα 50m και 100m, η μείωση φτάνει έως και το 21% και για τις δύο περιπτώσεις, ενώ παρατηρείται στο Θρακικό Πέλαγος, στη θαλάσσια περιοχή νοτιοανατολικά του Καρπάθιου Πελάγους και στο Κρητικό Πέλαγος. Και στις τρεις περιπτώσεις σημειώνεται αύξηση των παραμέτρων για την περιοχή της Θεσσαλίας και της Μακεδονίας έως και 6% για τη ταχύτητα του ανέμου στα 10m και έως και 21% για το αιολικό δυναμικό στα 50 και 100m.

- Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για το αιολικό δυναμικό οι μεγαλύτερες τιμές του σημειώνονται κατά τη θερινή περίοδο, ενώ οι ελάχιστες κατά τη χειμερινή. Αντιθέτως, η ταχύτητα του ανέμου στα 10m και το αιολικό δυναμικό στα 50m και 100m, σημειώνουν μέγιστες τιμές κατά τη χειμερινή περίοδο και ελάχιστες κατά την εαρινή. Κατά τη διάρκεια των μηνών Ιουλίου και Αυγούστου, σημειώνεται αύξηση και στις τρεις παραμέτρους, γεγονός που, σε ό,τι αφορά στο αιολικό δυναμικό, οφείλεται στους Ετησίες ανέμους.
- Τέλος, όσον αφορά στη σύγκριση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού στα 50m και 100m, φαίνεται ότι γενικά, το ηλιακό δυναμικό είναι περισσότερο εκμεταλλεύσιμο στον ευρύτερο ελληνικό χώρο, όμως αυτό δεν ισχύει απαραίτητα σε όλες τις εποχές και όχι τουλάχιστον στον ίδιο βαθμό ανά περιοχή. Έτσι, τη θερμή περίοδο του έτους (Μάιο – Σεπτέμβριο) είναι πιο περισσότερο διαθέσιμο στην Ελλάδα το ηλιακό δυναμικό, ενώ την ψυχρή περίοδο (Νοέμβριο – Μάρτιο) το αιολικό. Εξαίρεση αποτελούν οι περιοχές του Αιγαίου Πελάγους και της Κρήτης, όπου στη σύγκριση των δυναμικών για τα 100m, το ηλιακό δυναμικό και για τις δύο περιογές επικρατεί του αιολικού μόνο τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο. Επίσης, σε ό,τι αφορά στη γεωγραφική (ανά περιοχή) διαφοροποίηση, το ηλιακό δυναμικό είναι περισσότερο διαθέσιμο (με φθίνουσα σειρά ανά περιοχή) στις περιοχές Κρήτη, Αιγαίο Πέλαγος, Πελοπόννησος, Ιόνιο Πέλαγος, Βόρεια Ελλάδα. Αντίστοιχα, το αιολικό δυναμικό στα 50m είναι περισσότερο διαθέσιμο στις περιογές Αιγαίο Πέλαγος, Κρήτη, Ιόνιο Πέλαγος, Πελοπόννησος, Βόρεια Ελλάδα, ενώ αυτό στα 100m είναι περισσότερο διαθέσιμο στις περιοχές Αιγαίο Πέλαγος, Κρήτη, Ιόνιο Πέλαγος, Πελοπόννησος, Βόρεια Ελλάδα.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη του ηλιακού και αιολικού δυναμικού για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο με χρήση δεδομένων από το ERA5 reanalysis. Επίσης πραγματοποιήθηκε και η αξιολόγηση του ERA5 με δεδομένα επίγειων σταθμών. Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας, μελλοντικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από διαφορετικό reanalysis (π.χ. MERRA2), ώστε να αξιολογηθεί εάν ισχύουν τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη βάσει του ERA5. Επισημαίνεται ότι ήδη, σε ό,τι αφορά τόσο στο ηλιακό δυναμικό (SSR) όσο και στην ταχύτητα ανέμου, μελέτες έχουν δείξει την ύπαρξη διαφορών

μεταξύ των προϊόντων διαφόρων reanalyses για διάφορες περιοχές του πλανήτη (Torralba et al. 2017, Boilley and Wald, 2014). Ειδικά για την παράμετρο της ταχύτητας του ανέμου, με βάση την εν μέρει προβληματική σύγκριση με επίγειες μετρήσεις των προϊόντων ERA5, θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθεί αν κάποιο άλλο reanalysis αποδίδει λίγο καλύτερα τις μετρούμενες τιμές της παραμέτρου αυτής στους προαναφερθέντες έξι (6) προβληματικούς Σταθμούς, στους οποίους παρατηρήθηκε συστηματική υποεκτίμηση. Ακόμη, σε μελλοντική μελέτη θα έχει ενδιαφέρον η ίδια μελέτη να υλοποιηθεί και για άλλες περιοχές, για παράδειγμα για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, καθώς έτσι θα μπορέσουν να συγκριθούν τα δυναμικά του ευρύτερου ελληνικού χώρου με τα αντίστοιχα γειτονικών χωρών. Τέλος, επισημαίνεται και υπενθυμίζεται ότι τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία που αφορούν στη σύγκριση μεταξύ των δύο δυναμικών περιορίζονται μόνο σε αυτά καθαυτά τα δυναμικά και όχι στο πόσο τελικά συμφέρει και για ποιο δυναμικό είναι περισσότερο ωφέλιμη η αξιοποίησή τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να εκτιμηθεί το πόσο συμφέρουσα είναι η αξιοποίηση ενός δυναμικού και μάλιστα για ποιο σε μεγαλύτερο βαθμό, πρέπει να συνεκτιμηθούν και άλλοι παράγοντες που έχουν να κάνουν με το κόστος εκμετάλλευσης, για παράδειγμα το κόστος αγοράς συστήματος ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών), κόστος εγκατάστασης τους ή το κόστος σύνδεσης τους με το δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής. Για αυτό βέβαια και για την εξαγωγή τελικών συμπερασμάτων απαιτείται σγετική οικονομοτεγνική μελέτη.

### <u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

Iqbal, Muhammad. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press.

Julian, Chen. (2011). Physics of Solar Energy. (n.d.).

Perdigão, J., Salgado, R., Magarreiro, C., Soares, P. M. M., Costa, M. J., & Dasari, H. P. (2017). An Iberian climatology of solar radiation obtained from WRF regional climate simulations for 1950–2010 period. *Atmospheric Research*, *198*, 151–162. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.016

Lee, J. T., Kim, H. G., Kang, Y. H., & Kim, J. Y. (2019). Determining the optimized hub height of wind turbine using the wind resource map of South Korea. *Energies*, *12*(15). https://doi.org/10.3390/en12152949

Shahzad, U. (n.d.). *ITEE Journal The Need For Renewable Energy Sources*. http://www.conserve-energy-

Stamatis, M., Hatzianastassiou, N., Korras-Carraca, M. B., Matsoukas, C., Wild, M., & Vardavas, I. (2022). Interdecadal Changes of the MERRA-2 Incoming Surface Solar Radiation (SSR) and Evaluation against GEBA & BSRN Stations. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(19). <u>https://doi.org/10.3390/app121910176</u>

Katsoulis, B. D., & Leontaris, S. N. (1981). THE DISTRIBUTION OVER GREECE OF GLOBAL SOLAR RADIATION ON A HORIZONTAL SURFACE. In *Agricultural Meteorology* (Vol. 23).

Emmanouil, G., Galanis, G., Kalogeri, C., Zodiatis, G., & Kallos, G. (2016). 10-year high resolution study of wind, sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas. *Renewable Energy*, 90, 399–419. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.031

Fotiadi, A., Hatzianastassiou, N., Stackhouse, J. W., Matsoukas, C., Drakakis, E., Pavlakis, K. G., Hatzidimitriou, D., & Vardavas, I. (2006a). Spatial and temporal distribution of long-term short-wave surface radiation over Greece. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *132*(621), 2693–2718. https://doi.org/10.1256/qj.05.163

*I. Fyrippis, Petros J. Axaopoulos-2010- Wind energy Potential Assessment in Naxos.* (n.d.).

Jörnnaltmann, A. S. (n.d.). The Development of Renewable Energy Sources and its Signii cance for the Environment.

Kabouris, J., & Hatziargyriou, N. (n.d.). Wind Power in Greece-Current Situation, Future Developments and Prospects.

Kambezidis, H. D. (2021). The solar radiation climate of Greece. *Climate*, 9(12). https://doi.org/10.3390/cli9120183

Kardakaris, K., Boufidi, I., & Soukissian, T. (2021). Offshore wind and wave energy complementarity in the greek seas based on ERA5 data. *Atmosphere*, *12*(10). https://doi.org/10.3390/atmos12101360

Katopodis, T., Markantonis, I., Politi, N., Vlachogiannis, D., & Sfetsos, A. (2020). High-resolution solar climate atlas for greece under climate change using the weather research and forecasting (WRF) model. *Atmosphere*, *11*(7). https://doi.org/10.3390/ATMOS11070761

Katsoulis, B. D. (1993a). A Survey on the Assessment of Wind Energy Potential in Greece. In *Theor. Appl. Climatol* (Vol. 47). Springer-Verlag.

Katsoulis, B. D., & Metaxas, D. A. (1992). *THE WIND ENERGY POTENTIAL OF WESTERN GREECE* (Vol. 49, Issue 6).

Kazadzis, S., Founda, D., Psiloglou, B. E., Kambezidis, H., Mihalopoulos, N., Sanchez-Lorenzo, A., Meleti, C., Raptis, P. I., Pierros, F., & Nabat, P. (2018). Long-term series and trends in surface solar radiation in Athens, Greece. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(4), 2395–2411. https://doi.org/10.5194/acp-18-2395-2018

Kazantzidis, A., Nikitidou, E., Salamalikis, V., Tzoumanikas, P., & Zagouras, A. (2018). New challenges in solar energy resource and forecasting in Greece. *International Journal of Sustainable Energy*, *37*(5), 428–435. https://doi.org/10.1080/14786451.2017.1280495

Kosmopoulos, P. G., Kazadzis, S., Taylor, M., Bais, A. F., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Keramitsoglou, I., & Kiranoudis, C. (2017). *Estimation of the Solar Energy Potential in Greece Using Satellite and Ground-Based Observations* (pp. 1149–1156). https://doi.org/10.1007/978-3-319-35095-0\_165

Kotroni, V., Lagouvardos, K., & Lykoudis, S. (2014). High-resolution model-based wind atlas for Greece. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 30, pp. 479–489). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.016

Lalas, D. P., Tselepidaki, H., & Theoharatos, G. (1983). AN ANALYSIS OF WIND POWER POTENTIAL IN GREECE. In *Solar Energy* (Vol. 30, Issue 6).

Mentis, D. (2014). Electrifying Greece with solar and wind energy. *Thermal Science*, *18*(3), 709–720. https://doi.org/10.2298/TSCI1403709M

Nikitidou, E., Kazantzidis, A., Tzoumanikas, P., Salamalikis, V., & Bais, A. F. (2015). Retrieval of surface solar irradiance, based on satellite-derived cloud information, in Greece. *Energy*, *90*, 776–783. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.103

Potisomporn, P., Adcock, T. A. A., & Vogel, C. R. (2023a). Evaluating ERA5 reanalysis predictions of low wind speed events around the UK. *Energy Reports*, *10*, 4781–4790. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.035

Shahzad, U. (n.d.). *ITEE Journal The Need For Renewable Energy Sources*. http://www.conserve-energy-

Tyrlis, E., & Lelieveld, J. (n.d.-a). *Climatology and Dynamics of the Summer Etesian Winds over the Eastern Mediterranean*\*. <u>https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-035.s1</u>

Vogiatzis, N., Kotti, K., Spanomitsios, S., & Stoukides, M. (2004). Analysis of wind potential and characteristics in North Aegean, Greece. *Renewable Energy*, *29*(7), 1193–1208. https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.11.017

Zempila, M. M., Giannaros, T. M., Bais, A., Melas, D., & Kazantzidis, A. (2016). Evaluation of WRF shortwave radiation parameterizations in predicting Global Horizontal Irradiance in Greece. *Renewable Energy*, *86*, 831–840. <u>https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.057</u>

Boilley, A., & Wald, L. (2015). Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy*, 75, 135–143. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.042

Torralba, V., Doblas-Reyes, F. J., & Gonzalez-Reviriego, N. (2017). Uncertainty in recent near-surface wind speed trends: A global reanalysis intercomparison. *Environmental Research Letters*, *12*(11). <u>https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8a58</u>

Bandoc, G., Prăvălie, R., Patriche, C., & Degeratu, M. (2018). Spatial assessment of wind power potential at global scale. A geographical approach. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 200, pp. 1065–1086). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.288

Mahmoodi, K., Ghassemi, H., & Razminia, A. (2019). Temporal and spatial characteristics of wave energy in the Persian Gulf based on the ERA5 reanalysis dataset. *Energy*, *187*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115991

Prăvălie, R., Patriche, C., & Bandoc, G. (2019). Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 209, pp. 692–721). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.239

Κεφάλαιο 2. (2023). https://doi.org/10.57713/kallipos-218

https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis

https://geba.ethz.ch/

http://www.emy.gr/emy/el/

ПАРАРТНМА



**Σχήμα Π1.** Η διαχρονική διακύμανση των μηνιαίων τιμών της SSR του ERA5 reanalysis και των 6 μετεωρολογικών σταθμών GEBA, για τους οποίους υπάρχουν οι μεγαλύτερες διαφορές. Με το πορτοκαλί χρώμα απεικονίζονται οι τιμές των σταθμών, ενώ με το μπλε χρώμα οι τιμές του ERA5.



Σχήμα Π2. Διάγραμμα διάχυσης για την αζιολόγηση των δεδομένων της ταχύτητας του ανέμου στα 10m του ERA5 reanalysis με δεδομένα σταθμών της EMY, χωρίς τους έζι προβληματικούς Σταθμούς (Ηράκλειο, Ιεράπετρα, Ιωάννινα, Κοζάνη, Λάρισα, Τρίπολη). Με διαφορετικά χρώματα επισημαίνονται τα δεδομένα του κάθε σταθμού.





μετεωρολογικούς σταθμούς GEBA. Με το πορτοκαλί χρώμα απεικονίζονται οι τιμές των σταθμών, ενώ με το μπλε οι τιμές του ERA5.

#### Ιανουάριος











#### <u>Φεβρουάριος</u>



<u>Απρίλιος</u>





#### Ιούλιος expver = 1 24°E 25.5°E 27<u>°E 28.5°E</u> 19.5°E 21°E 22.5°E <sup>W/m<sup>2</sup></sup>300 42°N 42°N 250 40.5°N 40.5°N 200 39°N 39°N 150 37.5°N 37.5°N 100 36°N 36°N 50 27°E 28.5°E 21°E 24°E 25.5°E 19.5°E 22.5°E

Σεπτέμβριος

25.5°E

27°E

28.5°E

42°N

40.5°N

39°N

37.5°N

36°N

28.5°E

<sup>W/m²</sup>300

250

200

150

100

50

expver = 1 24°E

19.5°E

42°N

40.5°N

39°N

37.5°N

36°N

19.5°E

21°E

22.5°E

24°E

25.5°E

27°E

21°E

22.5°E

<u>Αύγουστος</u>



Οκτώβριος expver = 1 24°E 25.5°E 22.5°E 27°E 28.5°E 19.5°E 21°E <sup>W/m<sup>2</sup></sup>300 42°N 42°N 250 40.5°N 40.5°N 200 39°N 39°N 150 37.5°N 37.5°N 100 36°N 36°N 50 28.5°E 19.5°E 21°E 22.5°E 24°E 25.5°E 27°E



Σχήμα Π4. Η πανελλαδική γεωγραφική κατανομή σε μηνιαία κλιματική βάση για την SSR για την περίοδο μελέτης 1940-2022.
### <u>Φεβρουάριος</u>



<u>Απρίλιος</u>



Ιούνιος



#### Ιανουάριος



<u>Μάρτιος</u>



Μάιος



### Ιούλιος



#### Σεπτέμβριος





24°E 25.5°E

27°E

22.5°E

36°N

19.5°E

21°E



Αύγουστος





**Σχήμα Π5.** Η πανελλαδική χωρική κατανομή σε μηνιαία κλιματική βάση για της ταχύτητας του ανέμου στα 10m για την περίοδο μελέτης 1940-2022.

9 8

7

6

5

4

3

2

36°N

28.5°E

# Ιανουάριος











# <u>Φεβρουάριος</u>



Απρίλιος



Ιούνιος



# <u>Ιούλιος</u>



#### Σεπτέμβριος



# <u>Νοέμβριος</u>





# Αύγουστος



# Οκτώβριος





### Ιανουάριος



Μάρτιος







# <u>Φεβρουάριος</u>



Απρίλιος



Ιούνιος



# Ιούλιος



#### <u>Σεπτέμβριος</u>



# <u>Νοέμβριος</u>



**Σχήμα Π7.** Η πανελλαδική γεωγραφική κατανομή σε μηνιαία κλιματική βάση για του αιολικού δυναμικού στα 100m για την περίοδο μελέτης 1940-2022.

#### 19.5°E 21°E 22.5°E expver = 1 24°E 25.5°E 27°E 28.5°E <sup>W/m<sup>2</sup></sup>800 700 42°N 42°N 600 40.5°N 40.5°N 500 39°N 39°N 400 300 37.5°N 37.5°N 200 36°N 36°N 100 21°E 22.5°E 25.5°E 27°E 28.5°E 19.5°E 24°E

#### Οκτώβριος







#### Αύγουστος

<u>Ιανουάριος</u>



<u>Μάρτιος</u>



<u>Μάιος</u>



<u>Φεβρουάριος</u>



<u>Απρίλιος</u>



<u>Ιούνιος</u>



Ιούλιος Αύγουστος ∆(SSR) W/m<sup>2</sup>  $\Delta(SSR) W/m^2$ 0.4 0.4 0.2 0.2 0.0 0.0 -0.2 -0.2 -0.4 -0.4 Σεπτέμβριος Οκτώβριος Δ(SSR) W/m<sup>2</sup> Δ(SSR) W/m<sup>2</sup> 0.4 0.4 0.2 0.2 0.0 0.0 -0.2 -0.2 -0.4 -0.4 <u>Δεκέμβριος</u> Νοέμβριος  $\Delta(SSR) W/m^2$  $\Delta(SSR) W/m^2$ 0.4 0.4 0.2 0.2 0.0 0.0 -0.2 -0.2 -0.4 -0.4

**Σχήμα Π8.** Γεωγραφική κατανομή των απόλυτων τάσεων μεταβολής, της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (SSR), σε μηνιαία βάση κατά την περίοδο 1940-2022. Επίσης, με τα σύμβολα (μαύρες κουκκίδες) επισημαίνονται οι περιοχές στις οποίες οι υπολογισθείσες τάσεις μεταβολής βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% με την εφαρμογή του τεστ Mann-Kendall.

#### <u>Φεβρουάριος</u>



<u>Απρίλιος</u>



Ιούνιος



<sup>∆w m/</sup>0.015 0.010

-0.005

-0.015

0.010

0.005

0.000

-0.005

-0.010

-0.015

0.010

0.005

0.000

-0.005

-0.010

-0.015

0.005 0.000 -0.010



<u>Μάρτιος</u>



Ιανουάριος







**Σχήμα Π9.** Γεωγραφική κατανομή των απόλυτων τάσεων μεταβολής, της ταχύτητας του ανέμου στα 10m, σε μηνιαία βάση κατά την περίοδο 1940-2022. Επίσης, με τα σύμβολα (μαύρες κουκκίδες) επισημαίνονται οι περιοχές στις οποίες οι υπολογισθείσες τάσεις μεταβολής βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% με την εφαρμογή του τεστ Mann-Kendall.

Ιανουάριος <u>Φεβρουάριος</u> 145 105 6.826 W/m<sup>2</sup>, e ror = 0.025, pvalue = 0.001 0.039, pvalue = 0.766 140 100 135 95 SSR (W/m<sup>2</sup>) (\_\_\_\_\_\_130 90 ۶ 125 ک<sup>א</sup> 85 120 80 115 75 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1910 1915 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1910 1915 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 (*β*) (α) <u>Μάρτιος</u> <u>Απρίλιος</u> 210 = 5.144 W/m<sup>2</sup>, error = 0.047, pvalue = 0.181 or = 0.051, pvalue = 0.409 400 147 260 200 250 190 6 <sub>2</sub> ผู้ 240 <sup>1/M</sup> 180 85 230 170 220 160 210 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 (δ) (%) <u>Ιούνιος</u> <u>Μάιος</u> 300 slope = -0.341 W/m<sup>2</sup>, error = 0.042, pvalue = 0.922 - 0.276 W/m<sup>2</sup> 320 290





119

Ιούλιος

Αύγουστος



Σχήμα Π10. Διαχρονική μεταβολή της επιφανειακής ηλιακής ακτινοβολίας για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, σε μηνιαία κλιματική βάση κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης 1940-2022. Στα δύο σχήματα παρέχονται οι χρονοσειρές μέσων ετήσιων τιμών, στις οποίες εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή (μπλε γραμμές) και πολυωνυμική παρεμβολή (6<sup>ου</sup> βαθμού, κόκκινες καμπύλες).

Ιανουάριος

<u>Φεβρουάριος</u>



Ιούλιος Αύγουστος 4.8 4.4 slope = -0.259 W/m<sup>2</sup>, error = 0.001, pvalue = 0.001 4.6 4.2 wind at 10m (m/s) 8.8 wind at 10m (m/s) 4.4 4.0 3.6 3.8 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1910 1915 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 1940 1945 1950 1955 1960 *(θ)* (ŋ) <u>Οκτώβριος</u> Σεπτέμβριος 5.0 4.4 0.259 slope .001. pv 4.8 4.2 4.6 ය 4.0 ප ê 4.4 wind at 10m (n 8.6 m (n at 10m at 10m u 4.0 3.8 3.4 3.6 3.2 3.4 1950 1960 1965 2990 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 1955 2020 1940 1945 1950 1955 1940 1985 2910 2915 2980 2995 2000 2005 2010 2015 (l)(к) Νοέμβριος Δεκέμβριος one = 0.049 W/m<sup>2</sup> error = 0.001 pvalue = 0.671 5.5 5.0 4.8 5.0 (s/u) 4.4 100 2.0 4.5 4.5 wind at 1 4.2 4.0 4.0 3.8 3.6 3.5 1960 1940 1945 1950 1955 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2020 2025 2020  $(\lambda)$ (µ)

Σχήμα Π11. Διαχρονική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου στα 10m για τον ευρύτερο ελληνικό χώρο, σε μηνιαία κλιματική βάση κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης 1940-2022. Στα δύο σχήματα παρέχονται οι χρονοσειρές μέσων ετήσιων τιμών, στις οποίες εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή (μπλε γραμμές) και πολυωνυμική παρεμβολή (6<sup>ου</sup> βαθμού, κόκκινες καμπύλες).