



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Εφαρμογή τεχνικών επιλογής χαρτοφυλακίου στην αξιοποίηση του ανανεώσιμου  
ενεργειακού δυναμικού της Ελλάδας»

«Applying portfolio selection techniques to increase the utilization of the Greek  
renewable energy potential»

ΚΑΤΣΑΠΡΑΚΑΚΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Θωμαΐδης Νικόλαος

Χίος, Οκτώβριος, 2023

Στην οικογένεια μου

**Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής διπλωματικών εργασιών του ΤΜΟΔ. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.**

## **Ευχαριστίες:**

Με την ολοκλήρωση της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα τα οποία με βοήθησαν στην εκπόνηση της και την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου υποχρεώσεων.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Θωμαΐδη Νικόλαο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος αλλά και για την βοήθεια που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γεώργιο Δούνια και τον κύριο Βασίλειο Κούτρα για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Γρηγόριο και Σταυρούλα, όπως και την αδερφή μου, Πηνελόπη, για την στήριξη τους σε όλα τα χρόνια της φοίτησης μου καθώς χωρίς αυτούς δεν θα είχα καταφέρει τίποτα.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας από τους βασικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για την καταπολέμηση του κινδύνου της κλιματικής αλλαγής είναι η απολιγνιτοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο εθνικό παραγωγικό μίγμα. Ωστόσο, ο υψηλός βαθμός στοχαστικότητας που χαρακτηρίζει την εκροή αυτών των μονάδων δυσχεραίνει την ομαλή ένταξη των ΑΠΕ. Σε σενάρια υψηλού βαθμού διείσδυσης, ο κίνδυνος παραγωγικότητας (volume risk) των ΑΠΕ αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας και διαχείρισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με αρνητικές συνέπειες στο τιμολόγιο των καταναλωτών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην αποτίμηση του κινδύνου παραγωγικότητας αιολικών και ηλιακών σταθμών στην Ελλάδα και στην ανάπτυξη ενός βέλτιστου σχεδίου γεωγραφικής διασποράς της εγκατεστημένης ισχύος. Η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης (utilization rate) του χαρτοφυλακίου σταθμών και την αύξηση της αξιοπιστίας της συγκεντρωτικής προσφοράς ενέργειας.

Για την υλοποίηση της διπλωματικής θα χρησιμοποιηθούν δευτερογενείς πηγές δεδομένων, όπως η βάση EMHIRES (European Meteorological derived High resolution RES).<sup>1</sup> Η βάση αυτή δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να μελετήσουν την επίπτωση της μεταβλητότητας των μετεωρολογικών συνθηκών και του κλίματος κάθε περιοχής της Ευρώπης στην παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Τα δεδομένα της εργασίας αποτελούνται από ωριαίες χρονολογικές σειρές συντελεστών απόδοσης (capacity factors) αιολικής και ηλιακής ενέργειας για διάστημα τριακονταετίας (1986-2015) για κάθε μία από τις περιφέρειες της Ελλάδας (επίπεδο χωρικής ανάλυσης NUTS-2). Η αποτίμηση του κινδύνου παραγωγής θα γίνει με την εφαρμογή εργαλείων περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης, ενώ η εύρεση του βέλτιστου σχεδίου τεχνολογικής και γεωγραφικής κατανομής της διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας θα επιτευχθεί με τη χρήση τεχνικών επιχειρησιακής έρευνας. Οι υπολογισμοί θα γίνουν σε περιβάλλον MATLAB με την ανάπτυξη σχετικών συναρτήσεων (m-files).

---

<sup>1</sup> Βλ. ιστοσελίδα: <https://zenodo.org/records/>

### **Λέξεις κλειδιά**

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), ενεργειακή απόδοση, κίνδυνος παραγωγικότητας, βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου, χωρική και τεχνολογική διαφοροποίηση χαρτοφυλακίου

## **ABSTRACT**

One of the main objectives of the Union (EU) to combat the risk of climate change is to link electricity production with increasing the penetration rates of renewable energy sources (RES) in the national production mix. However, the high degree of stochasticity that characterizes the output of these units makes it difficult for the smooth integration of RES. In scenarios with a high degree of penetration, the volume risk of RES significantly increases the cost of operation and management of the electricity system with negative consequences on the consumer's tariff.

This thesis aims to assess the productivity risk of wind and solar plants in Greece and to develop an optimal plan for the geographical dispersion of the installed capacity. The optimization will be carried out with a view to maximizing the utilization rate of the station portfolio and increasing the reliability of the aggregated energy supply.

For the implementation of the thesis, secondary data sources will be used, such as the EMHIRE database (European Meteorological derived High resolution RES).<sup>2</sup> This database enables users to study the impact of the variability of weather conditions and the climate of each region of Europe on the production of wind and solar energy. The data of the work consists of hourly time series of capacity factors of wind and solar energy for a thirty-year period (1986-2015) for each of the regions of Greece (NUTS-2 level of spatial analysis). The assessment of the production risk will be done by applying descriptive statistical analysis tools, while finding the optimal technological and geographical distribution plan of the available production capacity will be achieved by using operational research techniques. The calculations will be done in a MATLAB environment with the development of relevant functions (m-files).

### **Keywords**

Renewable Energy Sources (RES), utilization rate, volume risk, portfolio optimization, spatial and technological portfolio diversification

---

<sup>2</sup> See website: <https://zenodo.org/records/>

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος εικόνων .....	9
Κατάλογος πινάκων .....	10
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	11
1.1 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας .....	11
1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας .....	11
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο .....	12
2.1 Αιολική ενέργεια .....	13
2.1.1 Ανεμογεννήτριες .....	14
2.2 Ηλιακή ενέργεια .....	15
2.2.1 Φωτοβολταϊκά .....	16
2.3 Σύγχρονη θεωρία χαρτοφυλακίου .....	17
2.3.1 Προφίλ κινδύνου .....	17
2.3.2 Ανάλυση Μέσου-Διακύμανσης .....	17
2.3.3 Συντελεστής Απόδοσης .....	18
2.3.4 Αποτελεσματικό Σύνορο .....	18
Κεφάλαιο 3: Ορισμός Προβλήματος .....	20
3.1 Βελτιστοποίηση Χαρτοφυλακίου .....	20
3.2 Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης .....	21
3.3 Χαρτοφυλάκιο Μέγιστης Απόδοσης .....	22
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα έρευνας .....	23
4.1 Δεδομένα Έρευνας .....	23
4.2 Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Διακύμανσης .....	31
4.3 Χαρτοφυλακίου Μέγιστης Απόδοσης .....	33
4.4 Αποτελεσματικό Σύνορο .....	35
4.5. Σύνθετο Χαρτοφυλάκιο .....	39
4.6 Σύγκριση .....	44
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα .....	45
Βιβλιογραφία .....	47
Παράρτημα Α .....	49
Παράρτημα Β .....	58



## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η χρήση τους .....	12
Εικόνα 2: Χωρική κατανομή της αιολικής δυναμικότητας για κάθε περιφέρεια της Ελλάδας .....	14
Εικόνα 3: Ταξινόμηση τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας .....	15
Εικόνα 4: Στόχοι Ελλάδας για την ηλιακή ισχύ .....	16
Εικόνα 5: Αποτελεσματικό Σύνορο .....	19
Εικόνα 6: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της αιολικής ενέργειας όλων των περιφερειών .....	26
Εικόνα 7: Τυπική απόκλιση συντελεστών για τα αιολικά δεδομένα ανά περιφέρεια..	27
Εικόνα 8: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της ηλιακής ενέργειας όλων των περιφερειών .....	27
Εικόνα 9: Τυπική απόκλιση συντελεστών για τα ηλιακά δεδομένα ανά περιφέρεια..	27
Εικόνα 10: Πίνακας συσχέτισης συντελεστών απόδοσης αιολικής ενέργειας .....	29
Εικόνα 11: Πίνακας συσχέτισης συντελεστών απόδοσης ηλιακής ενέργειας .....	30
Εικόνα 12: Αποτελεσματικό σύνορο για τα αιολικά δεδομένα .....	35
Εικόνα 13: Αποτελεσματικό σύνορο για τα ηλιακά δεδομένα .....	36
Εικόνα 14: Αποτελεσματικό σύνορο αιολικού χαρτοφυλακίου μαζί με τις μεμονωμένες τιμές των περιφερειών .....	36
Εικόνα 15: Αποτελεσματικά Σύνορα .....	42

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Περιφέρειες Ελλάδας σε επίπεδο χωρικής ανάλυσης NUTS-2 .....	24
Πίνακας 2: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της αιολικής ενέργειας κάθε περιφέρειας για βάθος χρόνου τριάντα ετών .....	24
Πίνακας 3: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της ηλιακής ενέργειας κάθε περιφέρειας για βάθος χρόνου τριάντα ετών .....	25
Πίνακας 4: Περιγραφική στατιστική ανάλυση για τον συντελεστή απόδοσης της αιολικής ενέργειας .....	25
Πίνακας 5: Περιγραφική στατιστική ανάλυση για τον συντελεστή απόδοσης της ηλιακής ενέργειας .....	26
Πίνακας 6: Σύνθεση χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης για τα αιολικά δεδομένα .....	31
Πίνακας 7: Σύνθεση χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης για τα ηλιακά Δεδομένα .....	32
Πίνακας 8: Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης και η τυπική απόκλιση του συντελεστή .....	32
Πίνακας 9: Σύνθεση χαρτοφυλακίου μέγιστης απόδοσης για τα αιολικά δεδομένα..	33
Πίνακας 10: Σύνθεση χαρτοφυλακίου μέγιστης απόδοσης για τα ηλιακά δεδομένα.	34
Πίνακας 11: Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης και η τυπική απόκλιση του συντελεστή .....	34
Πίνακας 12: Απεικόνιση βέλτιστων αιολικών χαρτοφυλακίων .....	38
Πίνακας 13: Απεικόνιση βέλτιστων ηλιακών χαρτοφυλακίων .....	39
Πίνακας 14: Σύνθεση χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης αιολικών και ηλιακών σταθμών.....	40
Πίνακας 15: Σύνθεση χαρτοφυλακίου μέγιστης απόδοσης αιολικών και ηλιακών σταθμών .....	41
Πίνακας 16: Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης και η τυπική απόκλιση του συντελεστή .....	42
Πίνακας 17: Βέλτιστα σύνθετα χαρτοφυλάκια .....	43

## **Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή**

### **1.1 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας**

Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πλέον αισθητή αφού κάθε χώρα ξεχωριστά επενδύει όλο και περισσότερο σε αυτές. Με την αύξηση του πληθυσμού η ανάγκη για ενέργεια μεγαλώνει καθημερινά. Για την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων, λαμβάνοντας υπόψη και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναμένεται να γίνουν η κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Δύο είδη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που θα μελετηθούν σε αυτή τη διπλωματική είναι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια.

Ο βασικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση του κινδύνου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικούς και ηλιακούς σταθμούς στην Ελλάδα και η παρουσίαση ενός βέλτιστου σχεδίου διασποράς ως προς την εγκατεστημένη ισχύ. Το βέλτιστο αυτό σχέδιο θα αναπτυχθεί με κριτήριο την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του χαρτοφυλακίου αιολικών και ηλιακών σταθμών αλλά και μεγιστοποίηση της σταθερότητας της συγκεντρωτικής προσφοράς ενέργειας.

### **1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας**

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη: Με την ολοκλήρωση του πρώτου κεφαλαίου και την διατύπωση του στόχου της παρούσας διπλωματικής ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο όπου περιλαμβάνει όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που είναι απαραίτητο για την κατανόηση βασικών εννοιών που χρησιμοποιούνται. Ορίζονται οι κύριες έννοιες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που θα εξεταστούν και περιγράφεται η σύγχρονη θεωρία χαρτοφυλακίου. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της έρευνας και των δειγμάτων και παρουσιάζονται τα δεδομένα και η μεθοδολογία που βασίζεται στην βελτιστοποίηση του χαρτοφυλακίου. Ακολούθως, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την χρήση των δεδομένων όπου καταλήγουμε σε σημαντικές πληροφορίες για την διασπορά της εγκατεστημένης ισχύος. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της έρευνας βάση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε.

## Κεφάλαιο 2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει κάνει την χρήση της ενέργειας απαραίτητη για πολλές δραστηριότητες στην καθημερινότητα, ενώ παράλληλα η αύξηση του πληθυσμού έχει κάνει μεγαλύτερη την ανάγκη της. Η κάλυψη αυτών των αναγκών και η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων που επικρατούν στη Γη, οδήγησε στην εξέλιξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες αποτελούν την σημαντικότερη και παράλληλα μοναδική λύση για τις αυξανόμενες προκλήσεις.<sup>3</sup>

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρούνται φυσικές πηγές ροής ενέργειας.<sup>4</sup> Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πόροι όπου με την πάροδο του χρόνου δεν θα εξαντληθούν και έχουν πιο μικρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο από πηγές ενέργειας βλαβερές για τη φύση όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Αυτοί οι πόροι συγκαταλέγονται στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπου εξ ορισμού μελλοντικά κάποια στιγμή θα τελειώσουν. Στην Εικόνα 1 φαίνονται οι κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι επιλογές που υπάρχουν για την χρήση τους.

Energy source	Energy conversion and usage options
Hydropower	Power generation
Modern biomass	Heat and power generation, pyrolysis, gasification, digestion
Geothermal	Urban heating, power generation, hydrothermal, hot dry rock
Solar	Solar home system, solar dryers, solar cookers
Direct solar	Photovoltaic, thermal power generation, water heaters
Wind	Power generation, wind generators, windmills, water pumps
Wave	Numerous designs
Tidal	Barrage, tidal stream

Εικόνα 1: Κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η χρήση τους.

(Πηγή: Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S., 2011, 1514)

Βλέποντας τα αρνητικά αποτελέσματα που έχει δημιουργήσει η χρήση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη φύση η απόφαση για την επένδυση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μονόδρομος. Με βάση αυτά τα δεδομένα η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο έως το 2030 την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% και την αύξηση του ποσοστού του μεριδίου των

<sup>3</sup> Owusu & Asumadu-Sarkodie 2016, 4

<sup>4</sup> Ο.π., 5

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κατανάλωση ενέργειας για το 2030 σε τουλάχιστον 42,5% για την επίτευξη του τελικού στόχου στο 45%.<sup>5</sup>

## 2.1 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι αυτή που παράγεται από τον άνεμο και είναι μία από τις κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η αιολική ενέργεια θεωρείται ως μια ώριμη και χωρίς ρύπους τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται σε αρκετές χώρες του κόσμου. Έχει κάνει μια πολύ μεγάλη τεχνολογική πρόοδο και για αυτό το λόγο είναι μία ανταγωνιστική πηγή ενέργειας.<sup>6</sup> Σε περιπτώσεις ανάγκης μικρής ποσότητας ενέργειας, για απομακρυσμένες περιοχές η αιολική ενέργεια είναι μια πολύ καλή επιλογή ενώ για περισσότερη ευελιξία θα ήταν προτιμότερο να συνδυαστεί και με άλλες τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνέχεια.<sup>7</sup>

Στις μέρες μας η επένδυση στον τομέα της αιολικής ενέργειας έχει αυξηθεί σε πολλές χώρες καθώς όλο και περισσότερες επιχειρήσεις επενδύουν σε αιολικά πάρκα. Ομοίως και για την Ελλάδα τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδο στην παραγωγή αιολικής ενέργειας. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύ για το έτος 2022 ήταν 4.682,9 MW και ο εκτιμώμενος στόχος για το 2030 είναι 10.000 MW.<sup>8</sup>

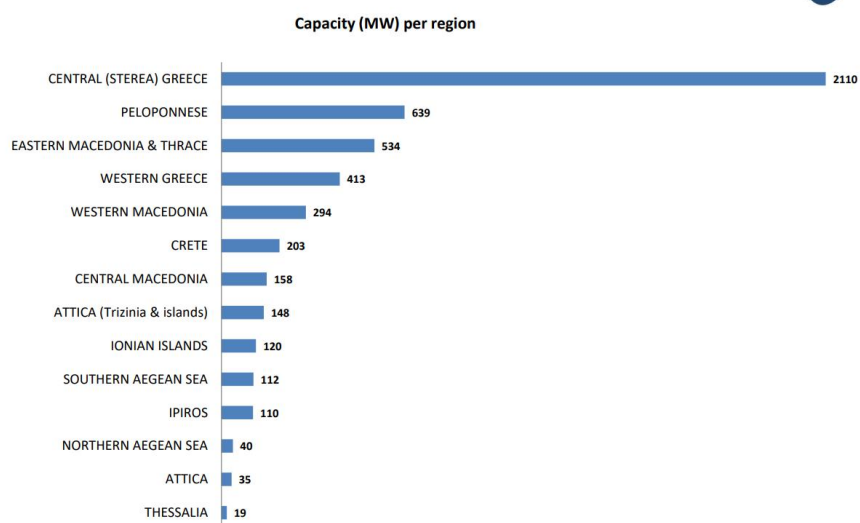
Με τα νέα στοιχεία της ΕΛΕΤΑΕΝ του Ιουνίου του 2023 η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύ αυξήθηκε κατά 252,5 MW συγκριτικά με το τέλος του 2022 με τελική τιμή 4.935,4 MW. Τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά για την επίτευξη του στόχου των 10.000 MW έως το 2030, καθώς μόλις σε ένα εξάμηνο η αύξηση ήταν σημαντική, και επιβεβαιώνει την αύξηση των επενδύσεων στην αιολική ενέργεια. Στην Εικόνα 2 φαίνεται η χωρική κατανομή της αιολικής δυναμικότητας για κάθε περιφέρεια της Ελλάδας σε φθίνουσα σειρά.

<sup>5</sup> Ciucci 2023, 1 (ΑΡΘΡΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ)

<sup>6</sup> Caralis, Perivolaris, Rados & Zervos 2008, 1

<sup>7</sup> Panwar, Kaushik & Kothari 2011, 1517

<sup>8</sup> Βλ. ιστοσελίδα: <https://eletaen.gr/>



Εικόνα 2: Χωρική κατανομή της αιολικής δυναμικότητας για κάθε περιφέρεια της Ελλάδας.

(Πηγή: Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, 2023)

### 2.1.1 Ανεμογεννήτριες

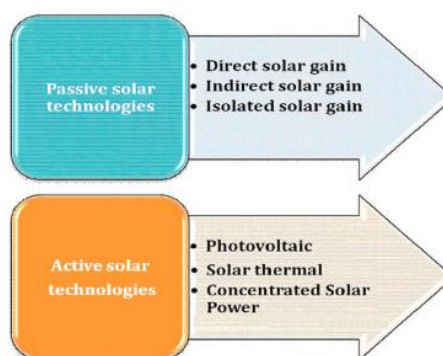
Ο ρόλος της ανεμογεννήτριας είναι να μετατρέπει την δύναμη του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμεύει από την φόρτιση μιας μπαταρίας μέχρι και την παροχή ρεύματος σε σπίτι αναλόγως το μέγεθος της. Ένα σύνολο ανεμογεννητριών αποτελούν ένα αιολικό πάρκο το οποίο στοχεύει στην μείωση των εκπομπών.

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον άξονα όπου περιστρέφονται, στον κάθετο ή στον οριζόντιο άξονα. Λόγω χρονικής κατασκευής, μιας και χρησιμοποιήθηκαν πρώτα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιας περιστροφής είναι πιο συνηθισμένες οι οποίες παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια συγκριτικά με αυτές του κάθετου άξονα. Στην Ελλάδα, ο αριθμός των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών ανέρχεται στους 2.823.

## 2.2 Ηλιακή ενέργεια

Όπως προαναφέρθηκε η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μελλοντικά θα βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το τεχνολογικό επίπεδο που έχει φτάσει η αιολική και η ηλιακή ενέργεια δίνει την δυνατότητα να είναι ανταγωνιστικές στο θέμα του κόστους συγκριτικά με τις συμβατικές γεννήτριες χωρίς επιδοτήσεις.<sup>9</sup> Η ηλιακή ενέργεια ορίζεται ως το άθροισμα των μορφών ενέργειάς που προέρχεται από τον ήλιο και χαρακτηρίζεται ως μία ατελείωτη μορφή ενέργειας. Συγκριτικά με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρείται η πιο άφθονη.<sup>10</sup>

Οι τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας που χρησιμοποιούνται πλέον μπορούν να ταξινομηθούν σε παθητικές και ενεργητικές. Στην Εικόνα 3 φαίνεται η εν λόγω ταξινόμηση. Η παθητική τεχνολογία είναι αυτή η οποία συσσωρεύει την ηλιακή ενέργεια, χωρίς όμως να την μετατρέπει σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, ενώ η ενεργητική τεχνολογία με την βοήθεια εξοπλισμού μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε μια άλλη μορφή ενέργειας.<sup>11</sup> Ένα παράδειγμα ενεργητικής τεχνολογίας είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας.



Εικόνα 3: Ταξινόμηση τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας.

(Πηγή: Kabir et al. 2018, 896)

<sup>9</sup> Odeh & Watts 2019, 442

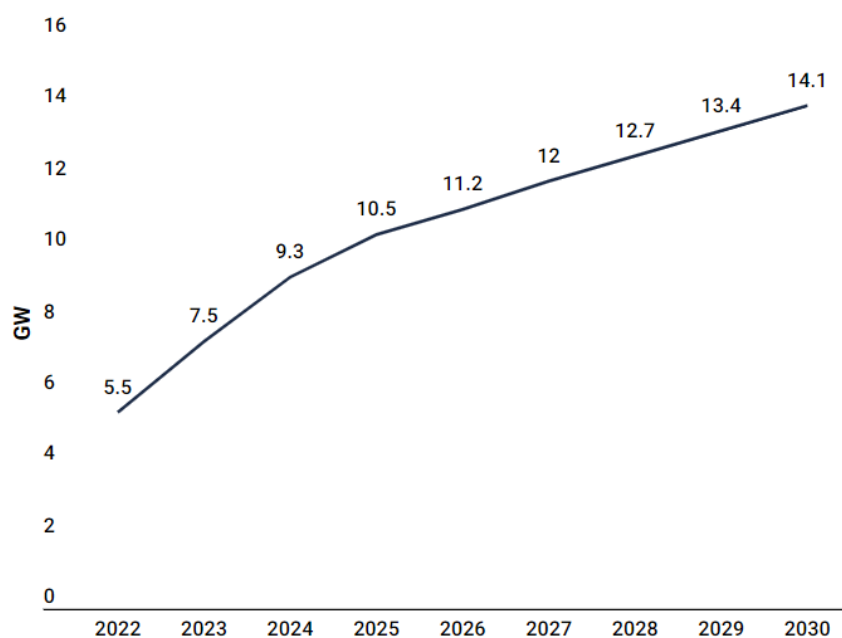
<sup>10</sup> Panwar et al. 2011, 1515

<sup>11</sup> Kabir et al. 2018, 896

## 2.2.1 Φωτοβολταϊκά

Με τον όρο φωτοβολταϊκά ορίζεται το σύνολο των φωτοβολταϊκών κυττάρων όπου με τη βοήθεια της ακτινοβολίας του ηλίου στοχεύουν στη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα φωτοβολταϊκά ανήκουν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην κατηγορία της ενεργητικής τεχνολογίας. Χάρης στην αφθονία και την αξιοπιστία της ηλιακής ενέργειας, η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους τρόπους.<sup>12</sup>

Τα φωτοβολταϊκά είναι αρκετά διαδεδομένα στην Ελλάδα με όλο και περισσότερες επιχειρήσεις και νοικοκυριά να τα εμπιστεύονται για χρήση. Τα πλεονεκτήματα από την χρήση φωτοβολταϊκών, κυρίως για το περιβάλλον, έχουν γίνει γνωστά σε όλους με αποτέλεσμα η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά να αυξάνεται διαρκώς. Σύμφωνα με την έρευνα της SolarPower Europe το 2022, η συνολική ηλιακή ισχύ της Ελλάδας υπολογίστηκε στα 5,5 GW. Στην Εικόνα 4 φαίνεται ο εθνικός στόχος για τα επίπεδα ηλιακής ισχύος μέχρι και το 2030.



Εικόνα 4: Στόχοι Ελλάδας για την ηλιακή ισχύ.

(Πηγή: SolarPower Europe, <https://tinyurl.com/2jeszmtj>)

<sup>12</sup> Χυε 2017, 1



## 2.3 Σύγχρονη θεωρία χαρτοφυλακίου

Οι πυλώνες της θεωρίας του χαρτοφυλακίου προτάθηκαν αρχικά από τον Markowitz και δηλώνει ότι ο κίνδυνος ενός χαρτοφυλακίου ελαχιστοποιείται όταν αποτελείται από διαφορετικά περιουσιακά στοιχεία απ' ό,τι μεμονωμένων στοιχείων.<sup>13</sup> Στην ενότητα αυτή θα γίνει ανάλυση του κινδύνου και θα εξεταστούν αναλυτικότερα βασικές έννοιες γύρω από την θεωρία του χαρτοφυλακίου.

### 2.3.1 Προφίλ κινδύνου

Ο κίνδυνος υπάρχει μέσα σε όλες στις αποφάσεις και στις επιλογές που κάνει ο κάθε επενδυτής, όμως αλλάζει ανάλογα με το έργο. Σύμφωνα με αυτό, οι επενδυτές μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτοί που αγνοούν τον κίνδυνο και επιθυμούν το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος. Στοχεύουν στη μεγιστοποίηση των κερδών ακόμα και αν ο κίνδυνος είναι υψηλός. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι επενδυτές όπου δεν κυνηγάνε ούτε υψηλά κέρδη ούτε τα αποφεύγουν. Ομοίως και με τα επίπεδα κινδύνου. Τέλος, στην τρίτη κατηγορία ανήκουν αυτοί που αποφεύγουν τον κίνδυνο. Στόχος τους είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου ακόμα και αν αυτό συνεπάγεται με μείωση των κερδών.

### 2.3.2 Ανάλυση Μέσου-Διακύμανσης

Το θεμέλιο της σύγχρονης θεωρίας χαρτοφυλακίου είναι η Ανάλυση Μέσου-Διακύμανσης. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην επίτευξη του στόχου όσων επενδυτών επιθυμούν, τη μεγιστοποίηση της μελλοντικής απόδοσης για ένα συγκεκριμένο επίπεδο κινδύνου, ή και αντίστροφα, την ελαχιστοποίηση του κινδύνου για ένα συγκεκριμένο επίπεδο απόδοσης που επιθυμούν.<sup>14</sup> Με άλλα λόγια η ανάλυση αυτή στηρίζεται στο προφίλ κινδύνου όπου αναλύθηκε προηγουμένως.

Τα δύο μέτρα που αναφέρθηκαν, και θα χρησιμοποιηθούν ιδιαίτερα στο υπόλοιπο της παρούσας διπλωματικής, είναι η απόδοση και ο κίνδυνος. Για λόγους

---

<sup>13</sup> Markowitz 1952, 77

<sup>14</sup> Cunha & Ferreira 2014, 19

σαφήνειας και αποφυγή παρερμηνειών η απόδοση και ο κίνδυνος του χαρτοφυλακίου είναι η αναμενόμενη ενέργεια που παράγεται και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα. Ο τρόπος εύρεσης αυτών των μέτρων θα αναλυθεί παρακάτω.

### 2.3.3 Συντελεστής Απόδοσης

Ο συντελεστής απόδοσης (capacity factor) είναι ένας δείκτης αποδοτικότητας ενεργειακών περιουσιακών στοιχείων και βοηθάει στην αξιολόγηση τεχνολογιών παραγωγής ισχύος. Είναι στοχαστικός καθώς εξαρτάται από τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες και δείχνει την ενέργεια που παράχθηκε από έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο  $t$ . Ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$r_t = \frac{\text{Ενέργεια που παράχθηκε σε συγκεκριμένο χρόνο } t \text{ (kWh)}}{\text{Μέγιστη παραγώμενη ενέργεια (kWh)}}$$

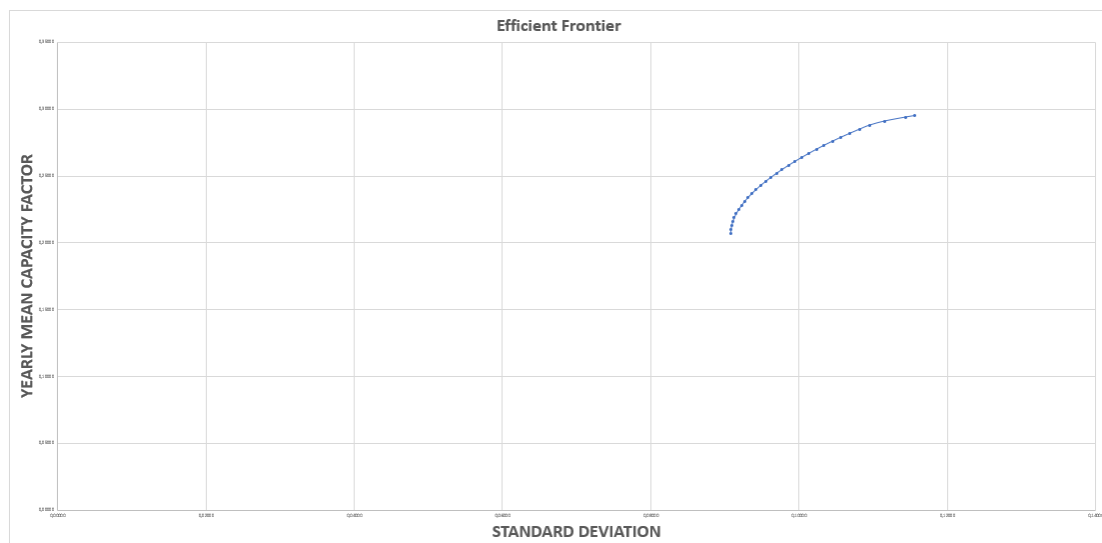
όπου  $t$  ο χρόνος που παράχθηκε η ενέργεια. Ο συντελεστής απόδοσης παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ . Όταν η τιμή του ισούται με 0 σημαίνει πως δεν παράχθηκε ενέργεια στο χρονικό διάστημα αναφοράς, ενώ όταν ισούται με 1 σημαίνει πως η εγκατάσταση παράγει στη μέγιστη δυνατή ισχύ.

### 2.3.4 Αποτελεσματικό Σύνορο

Το αποτελεσματικό σύνορο (efficient frontier) αποτελείται από το σύνολο των βέλτιστων χαρτοφυλακίων που παρουσιάζουν την βέλτιστη αναλογία απόδοσης-κινδύνου. Για κάθε χαρτοφυλάκιο του αποτελεσματικού συνόρου, δεν υφίσταται άλλο που να πετυχαίνει καλύτερη απόδοση χωρίς μεγαλύτερη έκθεση στον κίνδυνο ή χαμηλότερα επίπεδα κινδύνου χωρίς μείωση της απόδοσης. Τα βέλτιστα αυτά χαρτοφυλάκια επιλέγονται βάση τριών κριτηρίων: της μέσης απόδοσης, του κινδύνου και της συνδιακύμανσης των αποδόσεων μεταξύ των περιουσιακών στοιχείων.

Το σύνολο των βέλτιστων χαρτοφυλακίων αυτών απεικονίζονται σε γράφημα με σχήμα καμπύλης όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Για την απεικόνιση του

αποτελεσματικού συνόρου χρησιμοποιείται ο μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης, άξονας y, και η τυπική απόκλιση του συντελεστή ως άξονας x. Η αρχή του αποτελεσματικού συνόρου είναι το χαρτοφυλάκιο με τον ελάχιστο κίνδυνο, ή αλλιώς το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης, και το τέλος του είναι το χαρτοφυλάκιο με τον μεγαλύτερο μέσο ετήσιο συντελεστή απόδοσης, δηλαδή το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης. Ο τρόπος εύρεσης αυτών των χαρτοφυλακίων θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 5: Αποτελεσματικό Σύνορο.

Η μελέτη του αποτελεσματικού συνόρου είναι πολύ χρήσιμη καθώς αντλούνται σημαντικές πληροφορίες και κατευθύνει τους επενδυτές, ανάλογα με τα προσωπικά κριτήρια που έχει ο καθένας, να επενδύσει στο χαρτοφυλάκιο που αυτός επιθυμεί. Τα χαρτοφυλάκια τα οποία είναι πάνω από το αποτελεσματικό σύνορο δεν είναι βέλτιστα καθώς για μια συγκεκριμένη τιμή παραγωγής ενέργειας έχουν πιο υψηλό επίπεδο κινδύνου. Ομοίως, ούτε τα χαρτοφυλάκια που βρίσκονται κάτω από το αποτελεσματικό σύνορο είναι βέλτιστα αφού για ένα δεδομένο επίπεδο κινδύνου δεν προσφέρουν μεγάλη απόδοση στην παραγωγή ενέργειας.

## Κεφάλαιο 3. Ορισμός Προβλήματος

Έχοντας αναλύσει όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο προκειμένου να γίνει πιο κατανοητός ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα είναι πλέον πιο εύκολη η ανάλυση της έρευνας και της μεθοδολογίας για την βελτιστοποίηση του χαρτοφυλακίου. Προηγουμένως αναφέρθηκε, ότι από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυτές που θα μελετηθούν είναι η αιολική και η ηλιακή. Επομένως, σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η στρατηγική χωρικής και τεχνολογικής διασποράς με στόχο την ελαχιστοποίηση του κινδύνου έχοντας υψηλά επίπεδα αιολικής και ηλιακής ενέργειας.

### 3.1 Βελτιστοποίηση Χαρτοφυλακίου

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου εξασφαλίζει ότι ανάλογα με τον στόχο που έχει οριστεί και κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς θα βρεθούν τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια. Για τον υπολογισμό και την εύρεση αυτών τα χαρτοφυλακίων χρησιμοποιούνται δύο βασικά μέτρα όπου προαναφέρθηκαν στην ενότητα της σύγχρονης θεωρίας χαρτοφυλακίου. Τα δύο αυτά μέτρα είναι ο μέσος όρος, δηλαδή ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης, και η τυπική απόκλιση του συντελεστή δηλαδή ο κίνδυνος.

Πιο αναλυτικά για τον υπολογισμό του μέσου όρου πολλαπλασιάζεται το διάνυσμα του βάρους κάθε περιφέρειας, δηλαδή το ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, με το διάνυσμα του μέσου συντελεστή απόδοσης της αντίστοιχης περιφέρειας. Το ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος που κατανέμεται σε κάθε περιφέρειας είναι μεταβλητή απόφασης και αποφασίζεται είτε από τον επενδυτή είτε από τον φορέα συσσωρευτικής εκπροσώπησης (aggregator). Ο τύπος υπολογισμού είναι ο εξής:

$$\mu_{\rho} = \mu'w = \sum_{i=1}^N \mu_i w_i$$

με,

- ❖  $\mu$ : το διάνυσμα με τον μέσο συντελεστή απόδοσης κάθε περιφέρειας
- ❖  $w$ : το διάνυσμα με το βάρος κάθε περιφέρειας στο χαρτοφυλάκιο
- ❖  $\mu_i$ : ο μέσος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης της περιφέρειας  $i$

- ❖  $w_i$ : το βάρος της περιφέρειας  $i$  στο χαρτοφυλάκιο
- ❖  $N$ : ο αριθμός των περιφερειών

Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\sigma_p = \sqrt{w' \Sigma w} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i w_j \sigma_{ij}}$$

με,

- ❖  $\Sigma$ : ο πίνακας συνδιακύμανσης των συντελεστών απόδοσης των περιφερειών και υπολογίζεται ως εξής:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \text{var}_{EL30} & \sigma_{EL30,EL41} \dots & \sigma_{EL30,EL65} \\ \sigma_{EL41,EL30} & \text{var}_{EL41} \dots & \sigma_{EL41,EL65} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{EL65,EL30} & \sigma_{EL65,EL41} \dots & \text{Var}_{EL65} \end{pmatrix}$$

Όπως αναφέρθηκε η εύρεση των βέλτιστων χαρτοφυλακίων γίνεται κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί είναι οι εξής δύο:

1.  $0 \leq w_i \leq 1$ , δηλαδή ο βαθμός συμμετοχής κάθε περιφέρειας στο χαρτοφυλάκιο να μην είναι αρνητικός και μεγαλύτερος της μονάδας.
2.  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ , το άθροισμα των ποσοστών της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος που έχει κατανεμηθεί σε όλες τις περιφέρειες να είναι 100%.

### 3.2 Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης

Το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης (Minimum Variance - MV) είναι μία από τις δύο περιπτώσεις που διατυπώθηκε στην ενότητα 2.3.2. Το χαρτοφυλάκιο αυτό εξασφαλίζει στους επενδυτές ελάχιστο κίνδυνο χωρίς κάποια δέσμευση ως προς την απόδοση. Για την εύρεση αυτού του χαρτοφυλακίου στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της

τυπικής απόκλισης  $\sigma_p$ , συγκεκριμένα η ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας της παραγωγής ενέργειας, και η ικανοποίηση των περιορισμών. Το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης προκύπτει από την επίλυση του παρακάτω προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\text{Ελαχιστοποίηση του } \sigma_p = \sqrt{w' \Sigma w} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i w_j \sigma_{ij}}$$

$$\text{με } 0 \leq w_i \leq 1 \text{ και } \sum_{i=1}^N w_i = 1$$

### 3.3 Χαρτοφυλάκιο Μέγιστης Απόδοσης

Η δεύτερη ακραία περίπτωση ενεργειακού σχεδιασμού είναι το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης (Maximum Yield - MR) όπου ο επενδυτής εξασφαλίζει την μεγιστοποίηση του μέσου συντελεστή απόδοσης του δικτύου σταθμών παραγωγής ενέργειας χωρίς έλεγχο επί του κινδύνου (όπως μετράτε από τη διακύμανση της εκροής του δικτύου). Η εύρεση αυτού του χαρτοφυλακίου γίνεται με την επίλυση του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\text{Μεγιστοποίηση του } \mu_p = \mu' w = \sum_{i=1}^N \mu_i w_i \quad , \text{ με } 0 \leq w_i \leq 1 \text{ και } \sum_{i=1}^N w_i = 1$$

## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα έρευνας

Στο κεφάλαιο αυτό, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που θα παρουσιαστούν, θα εφαρμοστεί η διαδικασία βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου που αναφέρθηκε Κεφάλαιο 3. Τα ευρήματα που προκύπτουν μέσα από τη διαδικασία αυτή, στη συνέχεια θα αναλυθούν.

### 4.1 Δεδομένα έρευνας

Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας έχουν ληφθεί από την βάση EMHIRES (European Meteorological derived High resolution RES generation time series for present and future scenarios). Η βάση αυτή διαθέτει δεδομένα αιολικής και ηλιακής ενέργειας για 28 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και για τις γειτονικές τους.<sup>15</sup> Τα δεδομένα, ηλιακά και αιολικά, είναι ωραίες χρονολογικές σειρές συντελεστών απόδοσης για βάθος χρόνου τριάντα ετών (01/01/1986 - 31/12/2015) στην Ελλάδα. Το επίπεδο χωρικής ανάλυσης είναι NUTS-2, δηλαδή το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει όλες τις περιφέρειες της Ελλάδας. Στον Πίνακα 1 αναγράφονται οι 13 περιφέρειες της Ελλάδας μαζί με τον αντίστοιχο κωδικό τους «EL» που τους έχει δοθεί.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα δεδομένα αφορούν διάστημα τριακονταετίας, επομένως για λόγους διευκόλυνσης η ανάλυση από τις ωραίες χρονολογικές σειρές συντελεστών απόδοσης θα γίνει σε ετήσια βάση. Στον Πίνακα 2 και Πίνακα 3 αντίστοιχα φαίνεται ο μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης αιολικής και ηλιακής ενέργειας για κάθε περιφέρεια ξεχωριστά. Στον οριζόντιο άξονα η αρίθμηση από 1 έως 13 δηλώνει τις περιφέρειες με την σειρά που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 1 ενώ στον κάθετο άξονα οι αριθμοί από 1 έως 30 δείχνουν τα έτη.

---

<sup>15</sup> Gonzalez et al. 2016, 3

Πίνακας 1: Περιφέρειες Ελλάδας σε επίπεδο χωρικής ανάλυσης NUTS-2.

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ
Αττική	EL30
Βόρειο Αιγαίο	EL41
Νότιο Αιγαίο	EL42
Κρήτη	EL43
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	EL51
Κεντρική Μακεδονία	EL52
Δυτική Μακεδονία	EL53
Ήπειρος	EL54
Θεσσαλία	EL61
Ιόνια Νησιά	EL62
Δυτική Ελλάδα	EL63
Στερεά Ελλάδα	EL64
Πελοπόννησος	EL65

Πίνακας 2: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της αιολικής ενέργειας κάθε περιφέρειας για βάθος χρόνου τριάντα ετών.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.2424	0.2787	0.3119	0.2107	0.2905	0.1963	0.1020	0.1636	0.1282	0.2347	0.1804	0.2347	0.1804
2	0.2356	0.2810	0.3403	0.2523	0.2736	0.2074	0.1412	0.1754	0.1298	0.2295	0.1792	0.2295	0.1792
3	0.2149	0.2421	0.3053	0.2343	0.2483	0.1937	0.1390	0.1717	0.1340	0.2092	0.1836	0.2092	0.1836
4	0.2428	0.2495	0.2846	0.2130	0.2597	0.1870	0.1142	0.1706	0.1159	0.2317	0.1924	0.2317	0.1924
5	0.2320	0.2674	0.3090	0.2303	0.2593	0.1814	0.1034	0.1547	0.1166	0.2236	0.1638	0.2236	0.1638
6	0.2547	0.2601	0.3034	0.2454	0.2688	0.1876	0.1063	0.1722	0.1283	0.2377	0.1875	0.2377	0.1875
7	0.2631	0.2583	0.2997	0.2363	0.2812	0.2116	0.1420	0.1920	0.1353	0.2475	0.2059	0.2475	0.2059
8	0.2488	0.2600	0.2994	0.2299	0.2788	0.2014	0.1239	0.1906	0.1519	0.2361	0.2019	0.2361	0.2019
9	0.2508	0.2642	0.3258	0.2626	0.2635	0.1901	0.1167	0.1743	0.1263	0.2346	0.1881	0.2346	0.1881
10	0.2184	0.2471	0.2935	0.2143	0.2706	0.1950	0.1194	0.1697	0.1172	0.2158	0.1887	0.2158	0.1887
11	0.2268	0.2530	0.3099	0.2381	0.2615	0.1811	0.1006	0.1639	0.1485	0.2183	0.2048	0.2183	0.2048
12	0.2356	0.2468	0.3012	0.2165	0.2701	0.2025	0.1349	0.1886	0.1501	0.2283	0.2087	0.2283	0.2087
13	0.2340	0.2435	0.2910	0.2198	0.2841	0.2118	0.1395	0.1942	0.1290	0.2314	0.2019	0.2314	0.2019
14	0.1939	0.2195	0.2838	0.2168	0.2411	0.1806	0.1200	0.1612	0.1243	0.1954	0.1801	0.1954	0.1801
15	0.2321	0.2376	0.3057	0.2360	0.2469	0.1812	0.1155	0.1654	0.1188	0.2201	0.1812	0.2201	0.1812
16	0.2583	0.2770	0.3193	0.2446	0.3145	0.2284	0.1423	0.2111	0.1486	0.2552	0.2181	0.2552	0.2181
17	0.1749	0.1875	0.2450	0.1998	0.2255	0.1721	0.1187	0.1437	0.1219	0.1694	0.1679	0.1694	0.1679
18	0.2742	0.2818	0.3348	0.2618	0.2940	0.2019	0.1098	0.1796	0.1371	0.2551	0.2002	0.2551	0.2002
19	0.2434	0.2623	0.3072	0.2367	0.2701	0.2006	0.1310	0.1816	0.1287	0.2324	0.2140	0.2324	0.2140
20	0.2211	0.2451	0.2974	0.2222	0.2700	0.1899	0.1098	0.1735	0.1225	0.2175	0.1870	0.2175	0.1870
21	0.2540	0.2519	0.2897	0.2179	0.2675	0.1797	0.0919	0.1655	0.1054	0.2381	0.1810	0.2381	0.1810
22	0.2177	0.2418	0.2848	0.2156	0.2571	0.1818	0.1064	0.1561	0.1211	0.2099	0.1900	0.2099	0.1900
23	0.2458	0.2453	0.2759	0.2064	0.2681	0.1917	0.1153	0.1640	0.1274	0.2317	0.1946	0.2317	0.1946
24	0.2302	0.2425	0.2926	0.2283	0.2503	0.1736	0.0969	0.1520	0.1138	0.2195	0.1957	0.2195	0.1957
25	0.2239	0.2384	0.2782	0.2110	0.2612	0.1905	0.1199	0.1771	0.1340	0.2215	0.2079	0.2215	0.2079
26	0.2866	0.2528	0.2754	0.1984	0.2875	0.1916	0.0958	0.1810	0.1370	0.2648	0.2030	0.2648	0.2030
27	0.2748	0.2525	0.2934	0.2417	0.2957	0.2113	0.1269	0.1888	0.1378	0.2571	0.2026	0.2571	0.2026
28	0.2503	0.2536	0.3061	0.2425	0.2565	0.1835	0.1105	0.1671	0.1232	0.2383	0.1989	0.2383	0.1989
29	0.1744	0.1919	0.2219	0.1526	0.2110	0.1483	0.0856	0.1258	0.1059	0.1716	0.1543	0.1716	0.1543
30	0.2534	0.2442	0.2658	0.1966	0.2609	0.1782	0.0956	0.1567	0.1019	0.2388	0.1701	0.2388	0.1701



**Πίνακας 3: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της ηλιακής ενέργειας κάθε περιφέρειας για βάθος χρόνου τριάντα ετών.**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.1900	0.1970	0.2012	0.1955	0.1730	0.1639	0.1573	0.1667	0.1615	0.1798	0.1767	0.1706	0.1790
2	0.1812	0.1878	0.1953	0.1913	0.1620	0.1596	0.1579	0.1658	0.1600	0.1757	0.1724	0.1650	0.1728
3	0.1823	0.1853	0.1920	0.1892	0.1659	0.1673	0.1641	0.1680	0.1657	0.1793	0.1756	0.1692	0.1784
4	0.1911	0.1964	0.2036	0.1950	0.1717	0.1766	0.1745	0.1791	0.1761	0.1906	0.1874	0.1772	0.1878
5	0.1916	0.1977	0.2044	0.1962	0.1728	0.1764	0.1716	0.1731	0.1769	0.1873	0.1832	0.1772	0.1869
6	0.1806	0.1852	0.1932	0.1904	0.1590	0.1603	0.1569	0.1663	0.1602	0.1813	0.1753	0.1625	0.1762
7	0.1892	0.1958	0.2020	0.1960	0.1735	0.1742	0.1711	0.1740	0.1741	0.1842	0.1812	0.1755	0.1812
8	0.1930	0.1982	0.2052	0.2023	0.1724	0.1739	0.1676	0.1785	0.1729	0.1909	0.1865	0.1781	0.1869
9	0.1888	0.1877	0.1982	0.1971	0.1663	0.1669	0.1687	0.1717	0.1689	0.1839	0.1813	0.1736	0.1833
10	0.1866	0.1891	0.1982	0.1965	0.1647	0.1652	0.1594	0.1632	0.1657	0.1781	0.1750	0.1702	0.1790
11	0.1728	0.1824	0.1897	0.1842	0.1560	0.1517	0.1473	0.1537	0.1508	0.1693	0.1650	0.1560	0.1666
12	0.1856	0.1893	0.1982	0.1926	0.1652	0.1681	0.1685	0.1742	0.1669	0.1841	0.1806	0.1712	0.1789
13	0.1865	0.1855	0.1948	0.1926	0.1642	0.1671	0.1665	0.1730	0.1702	0.1833	0.1827	0.1734	0.1823
14	0.1886	0.1890	0.2000	0.1970	0.1676	0.1680	0.1633	0.1651	0.1686	0.1786	0.1749	0.1728	0.1796
15	0.1924	0.1990	0.2026	0.1944	0.1815	0.1793	0.1724	0.1801	0.1779	0.1873	0.1857	0.1790	0.1844
16	0.1867	0.1878	0.1949	0.1925	0.1659	0.1668	0.1662	0.1691	0.1700	0.1824	0.1795	0.1735	0.1804
17	0.1828	0.1851	0.1950	0.1921	0.1601	0.1595	0.1568	0.1653	0.1626	0.1783	0.1755	0.1688	0.1787
18	0.1773	0.1880	0.1916	0.1862	0.1677	0.1662	0.1594	0.1702	0.1611	0.1772	0.1727	0.1625	0.1690
19	0.1828	0.1914	0.1969	0.1940	0.1665	0.1661	0.1620	0.1649	0.1659	0.1777	0.1741	0.1680	0.1759
20	0.1840	0.1883	0.1961	0.1919	0.1646	0.1690	0.1598	0.1674	0.1673	0.1782	0.1771	0.1687	0.1769
21	0.1853	0.1874	0.1946	0.1899	0.1605	0.1624	0.1582	0.1691	0.1609	0.1830	0.1772	0.1651	0.1771
22	0.1928	0.1951	0.2020	0.1938	0.1744	0.1716	0.1630	0.1698	0.1684	0.1846	0.1807	0.1750	0.1830
23	0.1894	0.1914	0.1996	0.1941	0.1690	0.1679	0.1613	0.1658	0.1686	0.1817	0.1772	0.1727	0.1811
24	0.1851	0.1840	0.1938	0.1896	0.1583	0.1621	0.1569	0.1593	0.1625	0.1756	0.1708	0.1669	0.1743
25	0.1829	0.1830	0.1944	0.1949	0.1569	0.1615	0.1544	0.1571	0.1619	0.1746	0.1697	0.1665	0.1750
26	0.1888	0.1962	0.1977	0.1886	0.1730	0.1726	0.1650	0.1792	0.1665	0.1884	0.1857	0.1702	0.1805
27	0.1881	0.1909	0.1971	0.1917	0.1724	0.1707	0.1637	0.1712	0.1712	0.1830	0.1791	0.1740	0.1815
28	0.1886	0.1895	0.1967	0.1955	0.1656	0.1667	0.1635	0.1630	0.1705	0.1784	0.1743	0.1726	0.1774
29	0.1820	0.1843	0.1940	0.1877	0.1561	0.1573	0.1552	0.1629	0.1604	0.1764	0.1726	0.1665	0.1743
30	0.1886	0.1915	0.1976	0.1876	0.1690	0.1693	0.1657	0.1759	0.1704	0.1870	0.1834	0.1727	0.1795

Στη συνέχεια, για καλύτερη ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων ακολουθεί περιγραφική στατιστική ανάλυση ανά περιφέρεια. Τα αποτελέσματα για τα αιολικά και ηλιακά δεδομένα απεικονίζονται στον Πίνακα 4 και Πίνακα 5 αντίστοιχα.

**Πίνακας 4: Περιγραφική στατιστική ανάλυση για τον συντελεστή απόδοσης της αιολικής ενέργειας.**

	Μέση Τιμή	Τ. Απόκλιση	Κύρτωση	Επι/ούσα Τιμή*	Εύρος	Διακύμανση	Ασυμμετρία	Διάμεσος
<b>Αττική</b>	0,237	0,3012	3,23	0	1	0,0907	1,2262	0,088
<b>Βόρειο Αιγαίο</b>	0,2493	0,2443	2,9859	0	0,99	0,0597	0,9864	0,165
<b>Νότιο Αιγαίο</b>	0,2951	0,2465	2,3541	0	1	0,0607	0,6495	0,236
<b>Κρήτη</b>	0,2244	0,2489	3,5488	0	1	0,0619	1,2117	0,129
<b>Αν. Μακεδονία και Θράκη</b>	0,2663	0,2727	2,7928	0	1	0,0744	0,9617	0,166
<b>Κεντρική Μακεδονία</b>	0,191	0,1877	4,6005	0	1	0,0352	1,3372	0,1325
<b>Δυτική Μακεδονία</b>	0,1158	0,1839	8,4884	0	1	0,0338	2,2815	0,034
<b>Ήπειρος</b>	0,1711	0,2258	5,3118	0	1	0,051	1,6985	0,074
<b>Θεσσαλία</b>	0,1274	0,1916	7,1	0	1	0,0367	2,0651	0,041
<b>Ιόνια Νησιά</b>	0,2272	0,2608	3,0741	0	0,993	0,068	1,1261	0,111
<b>Δυτική Ελλάδα</b>	0,1911	0,2331	4,4383	0	1	0,0544	1,4517	0,092
<b>Κεντρική Ελλάδα</b>	0,2272	0,2608	3,0741	0	0,993	0,068	1,1261	0,111
<b>Πελοπόννησος</b>	0,1911	0,2331	4,4383	0	1	0,0544	1,4517	0,092

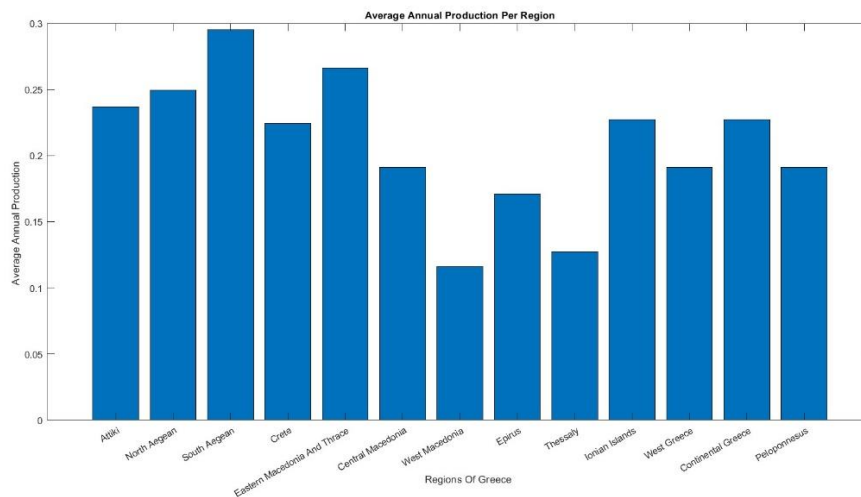
Σημείωση: \* όταν υπάρχουν πολλές τιμές που εμφανίζονται εξίσου συχνά, η λειτουργία επιστρέφει ως επικρατούσα τιμή την μικρότερη από αυτές τις τιμές.

Πίνακας 5: Περιγραφική στατιστική ανάλυση για τον συντελεστή απόδοσης της ηλιακής ενέργειας.

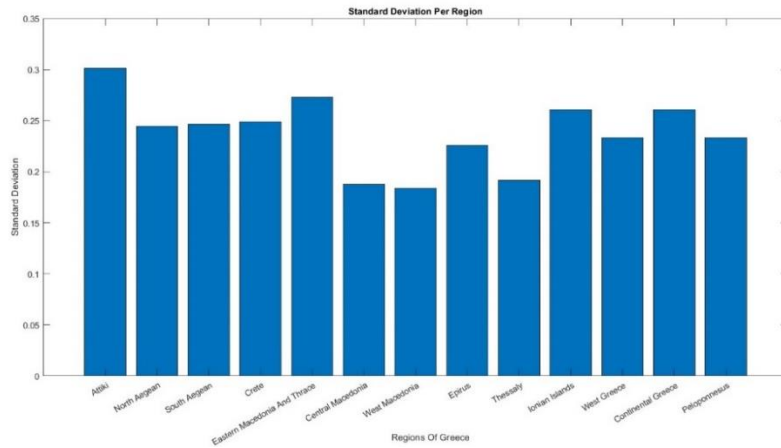
	Μέση Τιμή	Τ. Απόκλιση	Κύρτωση	Επι/ούσα Τιμή*	Εύρος	Διακύμανση	Ασυμμετρία	Διάμεσος
Αττική	0,1862	0,2656	2,8205	0	0,9379	0,0705	1,1505	0
Βόρειο Αιγαίο	0,19	0,2715	2,8433	0	0,9405	0,0737	1,1562	0
Νότιο Αιγαίο	0,1973	0,275	2,6635	0	0,9271	0,0756	1,0836	0
Κρήτη	0,1927	0,2715	2,88253	0	0,966	0,0737	1,1374	0
Αν. Μακεδονία και Θράκη	0,1665	0,2432	3,1366	0	0,9197	0,0591	1,2478	0
Κεντρική Μακεδονία	0,1669	0,2441	3,0663	0	0,922	0,0596	1,2352	0
Δυτική Μακεδονία	0,1626	0,2413	3,2963	0	0,9345	0,0582	1,304	0
Ήπειρος	0,1688	0,247	3,1034	0	0,9281	0,061	1,2472	0
Θεσσαλία	0,1688	0,245	3,1119	0	0,9032	0,06	1,2525	0
Ιόνια Νησιά	0,1813	0,2593	2,8895	0	0,9415	0,0672	1,1706	0
Δυτική Ελλάδα	0,1778	0,2534	2,8615	0	0,9254	0,0642	1,1615	0
Κεντρική Ελλάδα	0,1705	0,2468	3,0672	0	0,9017	0,0609	1,2263	0
Πελοπόννησος	0,1789	0,2543	2,8845	0	0,9176	0,0647	1,163	0

Σημείωση: \* όταν υπάρχουν πολλές τιμές που εμφανίζονται εξίσου συχνά, η λειτουργία επιστρέφει ως επικρατούσα τιμή την μικρότερη από αυτές τις τιμές.

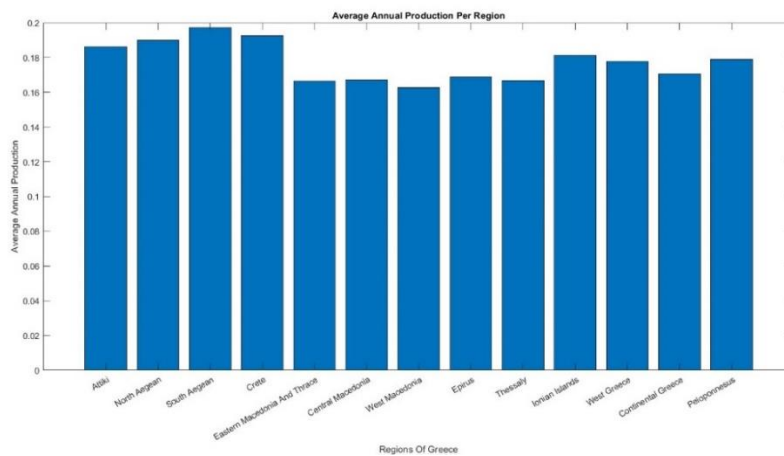
Επιπρόσθετα, στα παρακάτω γραφήματα, Εικόνα 6 και Εικόνα 8, φαίνεται ο μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της αιολικής και ηλιακής ενέργειας όλων των περιφερειών. Ακόμα, στην Εικόνα 7 και Εικόνα 9 απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των συντελεστών για τα αιολικά και ηλιακά δεδομένα ανά περιφέρεια αντίστοιχα.



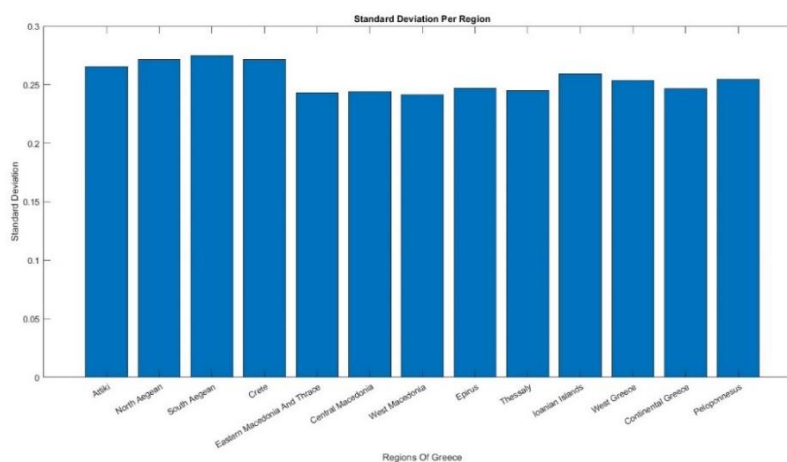
Εικόνα 6: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της αιολικής ενέργειας όλων των περιφερειών.



Εικόνα 7: Τυπική απόκλιση των συντελεστών για τα αιολικά δεδομένα ανά περιφέρεια.



Εικόνα 8: Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης της ηλιακής ενέργειας όλων των περιφερειών.



Εικόνα 9: Τυπική απόκλιση των συντελεστών για τα ηλιακά δεδομένα ανά περιφέρεια.

Από την περιγραφική στατιστική ανάλυση και τα παραπάνω γραφήματα παρατηρούνται τα ακόλουθα.

➤ Για την αιολική ενέργεια:

- i. Ο μέγιστος μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης είναι 29.51% παρατηρείται για την περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου (EL42) και ακολουθούν οι περιφέρειες της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (EL51) και του Βορείου Αιγαίου (EL41) με τιμές 26.63% και 24.93% αντίστοιχα. Άρα, συμπεραίνεται ότι το υψηλότερο αιολικό δυναμικό βρίσκεται στην Ανατολική Ελλάδα.
- ii. Αντίθετα, ο ελάχιστος μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης παρατηρείται στη περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας (EL53) με τιμή 11.58% και ακολουθούν οι περιφέρειες της Θεσσαλίας (EL61) και της Ηπείρου (EL54) με τιμές 12.74% και 17.11% αντίστοιχα. Άρα, συμπεραίνεται ότι το χαμηλότερο αιολικό δυναμικό βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Ελλάδας.
- iii. Η μέγιστη τυπική απόκλιση των συντελεστών εμφανίζεται στην περιφέρεια της Αττικής (EL30) με τιμή 30.12% και η ελάχιστη στη περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας (EL53) με τιμή 18.39%. Επομένως, συμπεραίνεται ότι οι εν λόγω περιφέρειες έχουν τα υψηλότερα επίπεδα χρονικής μεταβλητότητας της παραγωγής αιολικής ενέργειας (κίνδυνος παραγωγικότητας – volumetric risk).

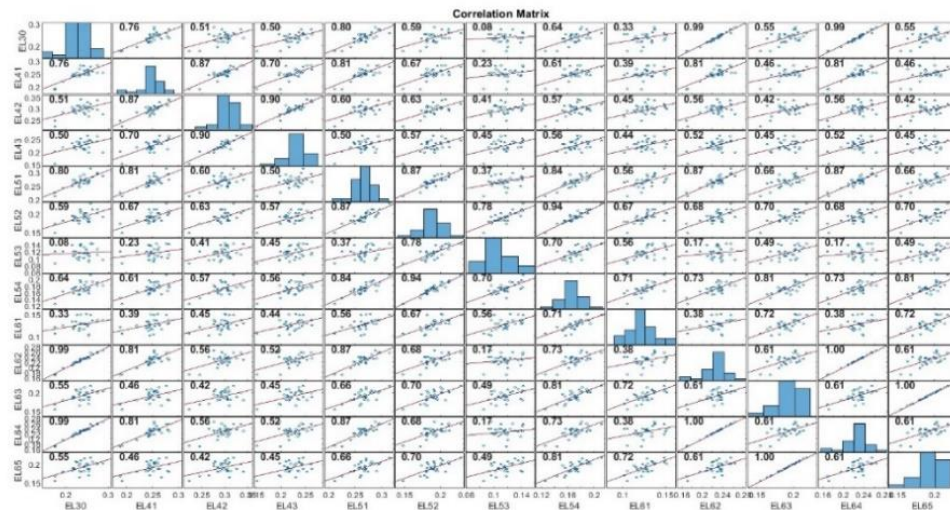
➤ Για την ηλιακή ενέργεια:

- i. Ο μέγιστος μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης είναι 19.73% και παρατηρείται στη περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου (EL42) και ακολουθούν οι περιφέρειες της Κρήτης (EL43) και του Βορείου Αιγαίου (EL41) με τιμές 19.27% και 19% αντίστοιχα. Άρα, συμπεραίνεται ότι το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Ελλάδας.
- ii. Αντίθετα, ο ελάχιστος μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης παρατηρείται στη περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας (EL53) με τιμή 16.26% και ακολουθούν οι περιφέρειες της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (EL51) και της Κεντρικής Μακεδονίας (EL52) με τιμές 16.65% και 16.69%

αντίστοιχα. Άρα, συμπεραίνεται ότι το χαμηλότερο ηλιακό δυναμικό βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα και συγκεκριμένα στην Μακεδονία.

- iii. Η μέγιστη τυπική απόκλιση των συντελεστών εμφανίζεται στην περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου (EL42) με τιμή 27.5% και η ελάχιστη στη περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας (EL53) με τιμή 24.13%. Επομένως, συμπεραίνεται ότι οι παραπάνω περιφέρειες έχουν τα υψηλότερα επίπεδα χρονικής μεταβλητότητας της παραγωγής ηλιακής ενέργειας (κίνδυνος παραγωγικότητας – volumetric risk).

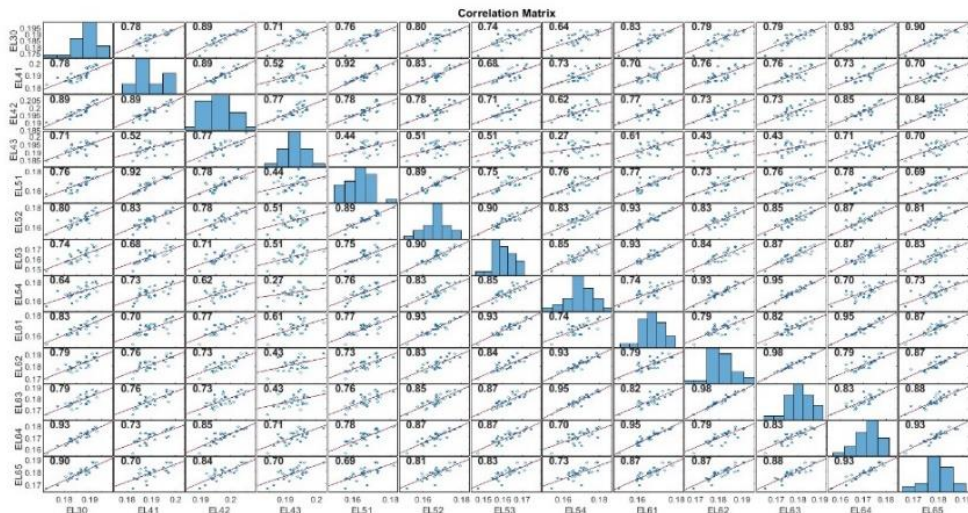
Τέλος, στην Εικόνα 10 και στην Εικόνα 11, παρουσιάζεται ο πίνακας συσχέτισης (correlation matrix) για την αιολική και ηλιακή ενέργεια προκειμένου να απεικονιστεί η συσχέτιση των συντελεστών απόδοσης μεταξύ των περιφερειών. Οι πληροφορίες που προκύπτουν από τους σχετικούς πίνακες είναι σημαντικές για τους επενδυτές. Για παράδειγμα, ένας επενδυτής θα απέφυγε να επενδύσει σε δύο περιφέρειες με ίδια παραγωγή καθώς όταν θα υπάρχει χαμηλή παραγωγή ενέργειας στη μία περιφέρεια, θα υπάρχει και στη δεύτερη, με αποτέλεσμα να προκύπτει χαμηλό συνολικό κέρδος.



Εικόνα 10: Πίνακας συσχέτισης συντελεστών απόδοσης αιολικής ενέργειας.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός που παρουσιάζεται τόσο μεγαλύτερη είναι η συσχέτιση. Ο πίνακας συσχέτισης των συντελεστών απόδοσης της αιολικής ενέργειας επαληθεύει τα συμπεράσματα της περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται σε διάστημα μεταξύ [-1,1]. Όσο πλησιάζει η τιμή στο θετικό άκρο παρατηρείται υψηλή τιμή θετικής

συσχέτισης ενώ όταν τείνει στο αρνητικό άκρο παρατηρείται υψηλή τιμή αρνητικής συσχέτισης. Αυτή η συσχέτιση συνήθως παρατηρείται σε γειτονικές περιφέρειες. Όταν η τιμή του συντελεστή συσχέτισης είναι κοντά στο μηδέν υπάρχει απουσία συσχέτισης και η δυνατότητα διασποράς του κινδύνου παραγωγής μεγαλώνει. Στη περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας, που βρέθηκε η μικρότερη τυπική απόκλιση των συντελεστών απόδοσης, παρατηρούνται συσχετίσεις κοντά στο μηδέν. Μία από αυτές είναι με την περιφέρεια Αττικής, με τιμή 0.08, που είχε την μεγαλύτερη τυπική απόκλιση. Ακόμα, παρατηρείται ότι οι περιφέρειες των Ιονίων Νήσων με της Στερεάς Ελλάδας και οι περιφέρειες της Δυτικής Ελλάδας με της Πελοποννήσου έχουν τιμή συσχέτισης 1, δηλαδή υψηλή θετική συσχέτιση. Για τα ηλιακά δεδομένα, οι περιφέρειες της Ηπείρου με της Κρήτης έχουν την μικρότερη συσχέτιση ενώ οι περιφέρειες των Ιονίων Νήσων με της Δυτικής Ελλάδας την μεγαλύτερη.



Εικόνα 11: Πίνακας συσχέτισης συντελεστών απόδοσης ηλιακής ενέργειας.

## 4.2 Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης

Με την χρήση των εξισώσεων της ενότητας 3.2, και την ικανοποίηση των περιορισμών, έγινε η βελτιστοποίηση του χαρτοφυλακίου. Η σύνθεση του χαρτοφυλακίου απεικονίζεται στον Πίνακα 6 για τα αιολικά δεδομένα και στον Πίνακα 7 για τα ηλιακά.

Πίνακας 6: Σύνθεση χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης αιολικών σταθμών.

Περιφέρεια	Συντελεστής συμμετοχής (%)
Αττική	0
Βόρειο Αιγαίο	0
Νότιο Αιγαίο	35.55
Κρήτη	0
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	0
Κεντρική Μακεδονία	0.02
Δυτική Μακεδονία	6.19
Ήπειρος	0
Θεσσαλία	25.45
Ιόνια Νησιά	0
Δυτική Ελλάδα	32.79
Στερεά Ελλάδα	0
Πελοπόννησος	0

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6 και Πίνακα 7 φαίνεται το ποσοστό της συνολικής ισχύος που πρέπει να εγκατασταθεί σε κάθε περιφέρεια προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας της παραγωγής αιολικής ενέργειας. Τα ποσοστά ικανοποιούν τους περιορισμούς που έχουν τεθεί καθώς όλα είναι μεγαλύτερα του μηδενός και το άθροισμα τους ισούται με την μονάδα.

Πίνακας 7: Σύνθεση χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης ηλιακών σταθμών.

Περιφέρεια	Συντελεστής Συμμετοχής (%)
Αττική	0
Βόρειο Αιγαίο	0
Νότιο Αιγαίο	5.58
Κρήτη	69.83
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	0
Κεντρική Μακεδονία	0
Δυτική Μακεδονία	0
Ήπειρος	0
Θεσσαλία	0
Ιόνια Νησιά	24.6
Δυτική Ελλάδα	0
Στερεά Ελλάδα	0
Πελοπόννησος	0

Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης  $\mu_p$  και η τυπική απόκλιση του συντελεστή  $\sigma_p$  για το αιολικό και ηλιακό χαρτοφυλάκιο δίνονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης και η τυπική απόκλιση του συντελεστή.

	ΑΙΟΛΙΚΟ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟ	ΗΛΙΑΚΟ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟ
$\mu_p$	20.72%	19.02%
$\sigma_p$	9.24%	2.47%



### 4.3 Χαρτοφυλάκιο Μέγιστης Απόδοσης

Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι το χαρτοφυλάκιο αυτό εξασφαλίζει στους επενδυτές την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Με την χρήση των εξισώσεων της ενότητας 3.3, και την ικανοποίηση των περιορισμών, έγινε η βελτιστοποίηση του. Η σύνθεση του χαρτοφυλακίου απεικονίζεται στον Πίνακα 9 για τα αιολικά δεδομένα και στον Πίνακα 10 για τα ηλιακά.

Πίνακας 9: Σύνθεση χαρτοφυλακίου μέγιστης απόδοσης αιολικών σταθμών.

Περιφέρεια	Συντελεστής Συμμετοχής (%)
Αττική	0
Βόρειο Αιγαίο	0
Νότιο Αιγαίο	100
Κρήτη	0
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	0
Κεντρική Μακεδονία	0
Δυτική Μακεδονία	0
Ήπειρος	0
Θεσσαλία	0
Ιόνια Νησιά	0
Δυτική Ελλάδα	0
Στερεά Ελλάδα	0
Πελοπόννησος	0

Από τον Πίνακα 9 και Πίνακα 10 παρατηρείται ότι το 100% της συνολικής ισχύος πρέπει να εγκατασταθεί στην περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου όπου έχει την μεγαλύτερη αναμενόμενη παραγόμενη ενέργεια, ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος, στα αιολικά ( $\mu=29.51\%$ ) και στα ηλιακά δεδομένα ( $\mu=19.73\%$ ). Επομένως, ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης ( $\mu_p$ ), θα είναι η αντίστοιχη τιμή του μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης, της περιφέρειας του Νοτίου Αιγαίου για το αιολικό και ηλιακό χαρτοφυλάκιο.

Πίνακας 10: Σύνθεση χαρτοφυλακίου μέγιστης απόδοσης ηλιακών σταθμών.

Περιφέρεια	Συντελεστής Συμμετοχής (%)
Αττική	0
Βόρειο Αιγαίο	0
Νότιο Αιγαίο	100
Κρήτη	0
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη	0
Κεντρική Μακεδονία	0
Δυτική Μακεδονία	0
Ήπειρος	0
Θεσσαλία	0
Ιόνια Νησιά	0
Δυτική Ελλάδα	0
Στερεά Ελλάδα	0
Πελοπόννησος	0

Πίνακας 11: Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης και η τυπική απόκλιση του συντελεστή.

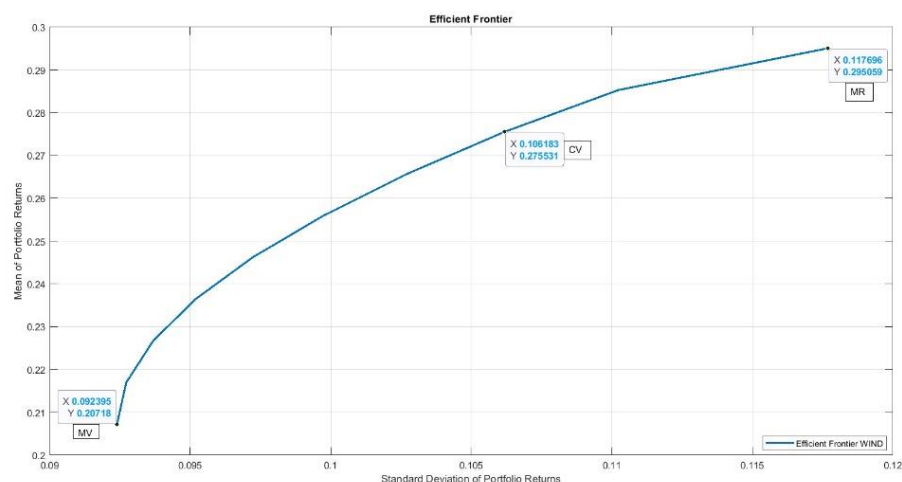
	ΑΙΟΛΙΚΟ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟ	ΗΛΙΑΚΟ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟ
$\mu_p$	29.51%	19.73%
$\sigma_p$	11.77%	2.81%

Έχοντας παρουσιάσει και τα δύο χαρτοφυλάκια, ελάχιστης διακύμανσης και μέγιστης απόδοσης, επιβεβαιώνεται αυτό που διατυπώθηκε στη θεωρία. Αν ο επενδυτής θέλει να μειώσει τον κίνδυνο, θα χάσει ένα μέρος από την αναμενόμενη παραγόμενη ενέργεια, ενώ αν στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, θα πρέπει να είναι πρόθυμος σε μεγαλύτερα επίπεδα κινδύνου.

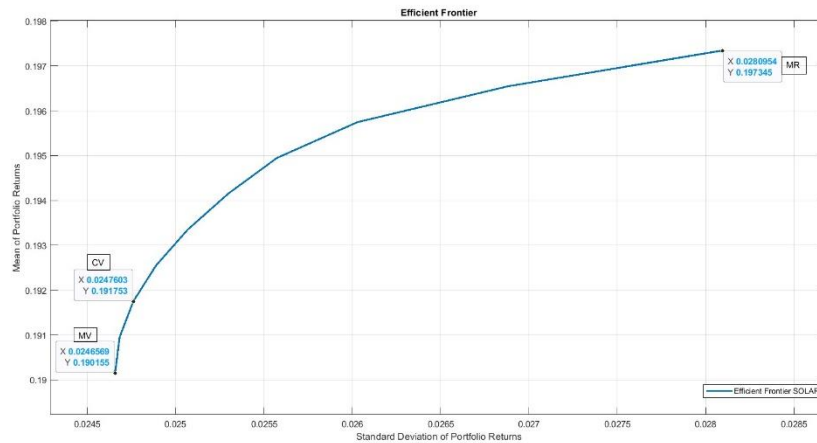
## 4.4 Αποτελεσματικό Σύνορο

Στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής, στην ενότητα 2.3.4, διατυπώθηκε ότι το αποτελεσματικό σύνορο αποτελείται από το σύνολο των βέλτιστων χαρτοφυλακίων, ικανοποιώντας τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Η αρχή του αποτελεσματικού συνόρου είναι το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης και το τέλος του είναι το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης.

Πέρα από τους περιορισμούς που υπήρχαν για την εύρεση του βέλτιστου χαρτοφυλακίου,  $0 \leq w_i \leq 1$  και  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ , προστέθηκε ακόμα ένας. Ο περιορισμός αυτός αναφέρει ότι για συγκεκριμένη τιμή του αναμενόμενου συντελεστή ενεργειακής απόδοσης αναζητείται η ελάχιστη τυπική απόκλιση του συντελεστή απόδοσης. Υπολογίστηκαν όλα τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια και βρέθηκε το αποτελεσματικό σύνορο για τα αιολικά και ηλιακά δεδομένα. Το γράφημα στην Εικόνα 12 απεικονίζει το αποτελεσματικό σύνορο για τα αιολικά δεδομένα και στην Εικόνα 13 για τα ηλιακά.

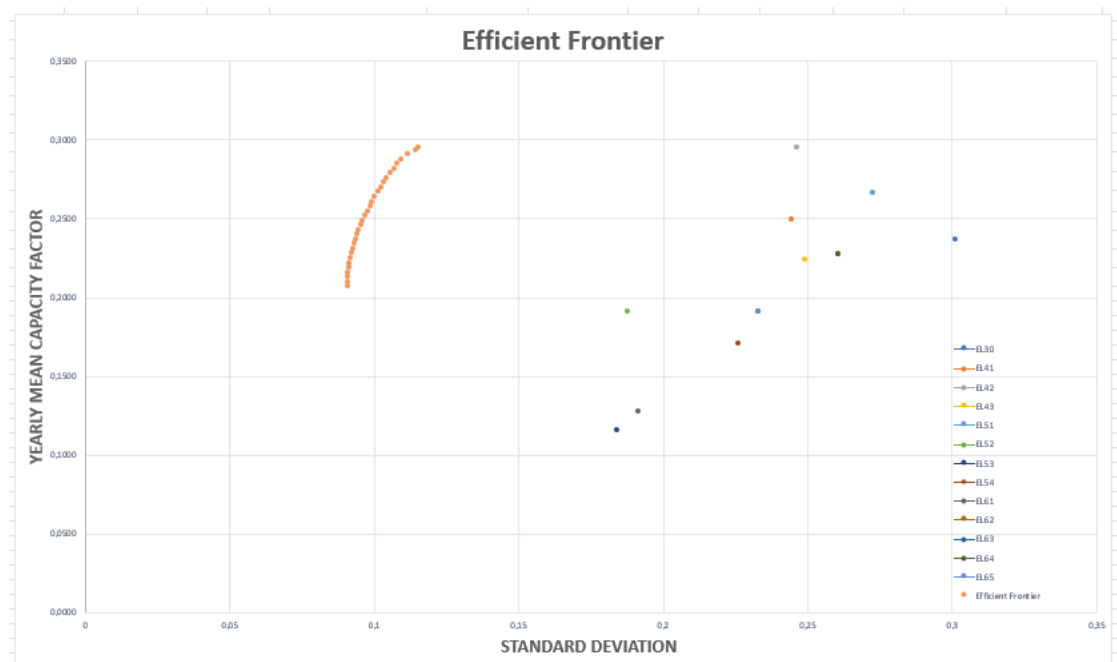


Εικόνα 12: Αποτελεσματικό σύνορο για τα αιολικά δεδομένα.



**Εικόνα 13:** Αποτελεσματικό σύνορο για τα ηλικιακά δεδομένα.

Στα παραπάνω δυο γραφήματα έχουν σημειωθεί τρία βέλτιστα χαρτοφυλάκια. Στο κάτω μέρος είναι το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης (MV) και στη κορυφή το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης (MR). Το τρίτο χαρτοφυλάκιο είναι το χαρτοφυλάκιο το οποίο έχει το μικρότερο συντελεστή μεταβλητότητας (Coefficient of Variation - CV). Ο συντελεστής μεταβλητότητας ορίζεται ως το πηλίκο της τυπικής απόκλισης προς τον μέσο όρο. Είναι ένα στατιστικό μέτρο μεταβλητότητας για τον λόγο αυτό επιλέγεται το χαρτοφυλάκιο με τη μικρότερη τιμή του πηλίκου.



**Εικόνα 14:** Αποτελεσματικό σύνορο αιολικού χαρτοφυλακίου μαζί με τις μεμονωμένες τιμές των περιφερειών.

Στην Εικόνα 14 απεικονίζεται το αποτελεσματικό σύνορο των αιολικών χαρτοφυλακίων μαζί με τις μεμονωμένες τιμές των περιφερειών. Παρατηρείται ότι οι περιφέρειες βρίσκονται κάτω από το αποτελεσματικό σύνορο δηλώνοντας έτσι ότι επενδύοντας μόνο σε μία περιφέρεια θα είχε ως αποτέλεσμα ενός άκαρπου σχεδίου κατανομής της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.

Στον Πίνακα 12 που ακολουθεί, παρουσιάζονται μερικά από τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια για τα αιολικά δεδομένα τα οποία σχηματίζουν το αποτελεσματικό σύνορο. Μελετώντας τον σχετικό πίνακα συνοψίζονται τα εξής συμπεράσματα:

- i. Οι περιφέρειες της Αττικής (EL30), του Βορείου Αιγαίου (EL41), της Κρήτης (EL43), της Ηπείρου (EL54), των Ιονίων Νήσων (EL62) και της Στερεάς Ελλάδας (EL64) δεν δίνουν καμία αξία στο χαρτοφυλάκιο μας. Οι περιφέρειες αυτές έχουν μηδενικό ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.
- ii. Οι περιφέρειες της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (EL51), της Κεντρικής Μακεδονίας (EL52) και της Δυτικής Μακεδονίας (EL53) δίνουν μικρή έως ελάχιστη αξία στο χαρτοφυλάκιο. Τα ποσοστά της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αυτών των περιφερειών είναι είτε μικρά είτε κοντά στο μηδέν.
- iii. Οι περιφέρειες της Θεσσαλίας (EL61), της Δυτικής Ελλάδας (EL63) και της Πελοποννήσου (EL65) όσο κινούμαστε προς τα πάνω, δηλαδή προς το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης, το ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος μειώνεται. Αντίθετα, η περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου (EL42) δίνει αξία σε όλα τα χαρτοφυλάκια. Το ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αυξάνεται όσο κινούμαστε προς τα πάνω μέχρι που γίνεται 100% στο χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης.

Πίνακας 12: Απεικόνιση βέλτιστων αιολικών χαρτοφυλακίων.

TRIALS	Portfolio Expected Return - $\mu$	Std Dev of Portfolio - $\sigma$	Attiki	NorthAegean	SouthAegean	Crete	EasternMacedoniaandThrace	CentralMacedonia	WestMacedonia	Epirus	Thessaly	IonianIslands	WestGreece	ContinentalGreece	Peloponnese
1	0.20721	0.09079	0.00%	0.00%	35.56%	0.00%	0.00%	0.01%	6.20%	0.00%	25.44%	0.00%	17.76%	0.00%	15.03%
2	0.21000	0.09081	0.00%	0.00%	37.29%	0.00%	0.00%	0.00%	5.89%	0.00%	24.25%	0.00%	16.28%	0.00%	16.29%
3	0.21300	0.09090	0.00%	0.00%	39.06%	0.00%	0.00%	0.00%	5.57%	0.00%	22.82%	0.00%	16.28%	0.00%	16.28%
4	0.21600	0.09105	0.00%	0.00%	40.88%	0.00%	0.00%	0.00%	5.24%	0.00%	21.46%	0.00%	16.21%	0.00%	16.21%
5	0.21900	0.09126	0.00%	0.00%	42.69%	0.00%	0.00%	0.00%	4.91%	0.00%	20.10%	0.00%	16.15%	0.00%	16.15%
6	0.22200	0.09152	0.00%	0.00%	44.15%	0.00%	0.60%	0.00%	4.61%	0.00%	18.83%	0.00%	15.88%	0.00%	15.93%
7	0.22500	0.09185	0.00%	0.00%	45.96%	0.00%	0.60%	0.00%	4.28%	0.00%	17.47%	0.00%	15.82%	0.00%	15.87%
8	0.22800	0.09223	0.00%	0.00%	47.78%	0.00%	0.61%	0.00%	3.94%	0.00%	16.15%	0.00%	15.73%	0.00%	15.78%
9	0.23100	0.09264	0.00%	0.00%	47.66%	0.00%	3.83%	0.00%	3.78%	0.00%	15.23%	0.00%	14.73%	0.00%	14.76%
10	0.23400	0.09311	0.00%	0.00%	48.83%	0.00%	4.91%	0.00%	3.51%	0.00%	14.03%	0.00%	14.34%	0.00%	14.38%
11	0.23700	0.09363	0.00%	0.00%	50.01%	0.00%	5.99%	0.00%	3.23%	0.00%	12.83%	0.00%	13.96%	0.00%	13.99%
12	0.24000	0.09420	0.00%	0.00%	51.18%	0.00%	7.06%	0.00%	2.96%	0.00%	11.63%	0.00%	13.57%	0.00%	13.60%
13	0.24300	0.09481	0.00%	0.00%	52.35%	0.00%	8.14%	0.00%	2.68%	0.00%	10.43%	0.00%	13.18%	0.00%	13.21%
14	0.24600	0.09548	0.00%	0.00%	53.53%	0.00%	9.28%	0.00%	2.47%	0.00%	9.24%	0.00%	12.73%	0.00%	12.76%
15	0.24900	0.09619	0.00%	0.00%	54.69%	0.00%	10.30%	0.00%	2.13%	0.00%	8.03%	0.00%	12.42%	0.00%	12.44%
16	0.25200	0.09694	0.00%	0.00%	55.86%	0.00%	11.38%	0.00%	1.85%	0.00%	6.83%	0.00%	12.03%	0.00%	12.05%
17	0.25500	0.09774	0.00%	0.00%	57.03%	0.00%	12.45%	0.00%	1.58%	0.00%	5.63%	0.00%	11.06%	0.00%	11.25%
18	0.25800	0.09858	0.00%	0.00%	58.20%	0.00%	13.53%	0.00%	1.30%	0.00%	4.43%	0.00%	10.12%	0.00%	11.24%
19	0.26100	0.09946	0.00%	0.00%	59.39%	0.00%	14.65%	0.00%	1.18%	0.00%	3.14%	0.00%	9.22%	0.00%	11.24%
20	0.26400	0.10038	0.00%	0.00%	60.54%	0.00%	15.69%	0.00%	0.75%	0.00%	2.03%	0.00%	8.36%	0.00%	11.63%
21	0.26700	0.10134	0.00%	0.00%	61.74%	0.00%	16.78%	0.00%	0.60%	0.00%	0.75%	0.00%	7.58%	0.00%	12.55%
22	0.27000	0.10234	0.00%	0.00%	62.98%	0.00%	17.95%	0.00%	0.13%	0.00%	0.00%	0.00%	6.89%	0.00%	12.05%
23	0.27300	0.10339	0.00%	0.00%	64.63%	0.00%	19.53%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.26%	0.00%	9.58%
24	0.27600	0.10450	0.00%	0.00%	66.34%	0.00%	21.15%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.56%	0.00%	6.95%
25	0.27900	0.10567	0.00%	0.00%	68.06%	0.00%	22.77%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.77%	0.00%	4.40%
26	0.28200	0.10689	0.00%	0.00%	69.77%	0.00%	24.39%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.97%	0.00%	2.87%
27	0.28500	0.10817	0.00%	0.00%	71.48%	0.00%	26.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.25%	0.00%	1.25%
28	0.28800	0.10953	0.00%	0.00%	75.35%	0.00%	24.65%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
29	0.29100	0.11154	0.00%	0.00%	85.76%	0.00%	14.24%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
30	0.29400	0.11440	0.00%	0.00%	96.18%	0.00%	3.82%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
31	0.29510	0.11560	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Ομοίως, στον Πίνακα 13 για τα ηλικιακά δεδομένα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- i. Οι περιφέρειες του Βορείου Αιγαίου (EL41), της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (EL51), της Κεντρικής Μακεδονίας (EL52), της Δυτικής Μακεδονίας (EL53), της Θεσσαλίας (EL61), της Δυτικής Ελλάδας (EL63), της Στερεάς Ελλάδας (EL64) και της Πελοποννήσου (EL65) δεν δίνουν καμία αξία στο χαρτοφυλάκιο μας. Οι περιφέρειες αυτές έχουν μηδενικό ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.
- ii. Οι περιφέρειες της Αττικής (EL30) και της Ηπείρου (EL54) δίνουν μικρή έως ελάχιστη αξία στο χαρτοφυλάκιο. Τα ποσοστά της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αυτών των περιφερειών είναι είτε μικρά είτε κοντά στο μηδέν.
- iii. Οι περιφέρειες της Κρήτης (EL43) και των Ιονίων Νήσων (EL62) όσο κινούμαστε προς τα πάνω, δηλαδή προς το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης, το ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος μειώνεται. Αντίθετα, η περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου (EL42) δίνει αξία σε όλα τα χαρτοφυλάκια. Το ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αυξάνεται όσο κινούμαστε προς τα πάνω μέχρι που γίνεται 100% στο χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης.

Πίνακας 13: Απεικόνιση βέλτιστων ηλιακών χαρτοφυλακίων.

TRIALS	Portfolio Expected Return - $\mu$	Std Dev of Portfolio - $\sigma$	Attiki	NorthAegean	SouthAegean	Crete	EasternMacedoniaandThrace	CentralMacedonia	WestMacedonia	Epirus	Thessaly	IonianIslands	WestGreece	ContinentalGreece	Peloponnese
1	0.1887	0.0045	0.11%	0.00%	0.00%	68.07%	0.00%	0.00%	0.00%	3.29%	0.00%	28.53%	0.00%	0.00%	0.00%
2	0.1890	0.0045	0.11%	0.00%	0.00%	67.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	32.39%	0.00%	0.00%	0.00%
3	0.1893	0.0045	0.11%	0.00%	1.05%	68.65%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	30.19%	0.00%	0.00%	0.00%
4	0.1896	0.0045	0.11%	0.00%	3.68%	67.60%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	28.62%	0.00%	0.00%	0.00%
5	0.1899	0.0045	0.10%	0.00%	6.31%	66.54%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	27.05%	0.00%	0.00%	0.00%
6	0.1902	0.0046	0.10%	0.00%	8.94%	65.48%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	25.48%	0.00%	0.00%	0.00%
7	0.1905	0.0046	0.10%	0.00%	11.57%	64.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	23.91%	0.00%	0.00%	0.00%
8	0.1908	0.0046	0.10%	0.00%	14.20%	63.36%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	22.34%	0.00%	0.00%	0.00%
9	0.1911	0.0046	0.10%	0.00%	16.83%	62.30%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	20.77%	0.00%	0.00%	0.00%
10	0.1914	0.0046	0.10%	0.00%	19.46%	61.24%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	19.20%	0.00%	0.00%	0.00%
11	0.1917	0.0046	0.10%	0.00%	22.09%	60.18%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	17.63%	0.00%	0.00%	0.00%
12	0.1920	0.0046	0.10%	0.00%	24.72%	59.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	16.06%	0.00%	0.00%	0.00%
13	0.1923	0.0047	0.10%	0.00%	27.35%	58.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	14.49%	0.00%	0.00%	0.00%
14	0.1926	0.0047	0.09%	0.00%	29.99%	57.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.92%	0.00%	0.00%	0.00%
15	0.1929	0.0047	0.09%	0.00%	32.62%	55.94%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	11.35%	0.00%	0.00%	0.00%
16	0.1932	0.0047	0.09%	0.00%	35.25%	54.88%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	9.78%	0.00%	0.00%	0.00%
17	0.1935	0.0047	0.09%	0.00%	37.88%	53.82%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	8.21%	0.00%	0.00%	0.00%
18	0.1938	0.0048	0.09%	0.00%	40.51%	52.76%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.64%	0.00%	0.00%	0.00%
19	0.1941	0.0048	0.09%	0.00%	43.14%	51.70%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.08%	0.00%	0.00%	0.00%
20	0.1944	0.0048	0.09%	0.00%	45.77%	50.64%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.51%	0.00%	0.00%	0.00%
21	0.1947	0.0048	0.09%	0.00%	48.40%	49.58%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.94%	0.00%	0.00%	0.00%
22	0.1950	0.0049	0.08%	0.00%	51.03%	48.52%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.37%	0.00%	0.00%	0.00%
23	0.1953	0.0049	0.09%	0.00%	56.66%	43.26%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
24	0.1956	0.0050	0.09%	0.00%	63.17%	36.74%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
25	0.1959	0.0050	0.09%	0.00%	69.70%	30.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
26	0.1962	0.0051	0.10%	0.00%	76.22%	23.68%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
27	0.1965	0.0052	0.10%	0.00%	82.75%	17.15%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
28	0.1968	0.0052	0.10%	0.00%	89.28%	10.62%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
29	0.1971	0.0053	0.11%	0.00%	95.80%	4.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
30	0.1973	0.0054	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

## 4.5 Σύνθετο Χαρτοφυλάκιο

Στην Ενότητα αυτή θα εξεταστεί το πλήρες χαρτοφυλάκιο αιολικών και ηλιακών σταθμών. Το χαρτοφυλάκιο αυτό θα ονομαστεί «σύνθετο χαρτοφυλάκιο». Έχοντας μελετήσει ξεχωριστά την βελτιστοποίηση των αιολικών και ηλιακών χαρτοφυλακίων, στην ενότητα αυτή θα γίνει η βελτιστοποίηση του σύνθετου χαρτοφυλακίου. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συζητηθούν και θα συγκριθούν.

Η έννοια του σύνθετου χαρτοφυλακίου δεν είναι κάτι διαφορετικό από όσα έχουν ειπωθεί μέχρι τώρα. Στο χαρτοφυλάκιο αυτό γίνεται συνδυασμός των αιολικών και ηλιακών πόρων. Η διαφορά είναι στη κατανομή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Δηλαδή, αν έστω  $N$  ο αριθμός των περιφερειών, η τάξη του σύνθετου χαρτοφυλακίου είναι  $2*N$ . Με την βοήθεια του MATLAB έγινε η βελτιστοποίηση του χαρτοφυλακίου βρίσκοντας το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης και το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης. Οι εξισώσεις και οι περιορισμοί που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν και προηγουμένως. Η σύνθεση του χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης φαίνεται στο Πίνακα 14 και για το χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης στο Πίνακα 15.

Πίνακας 14: Σύνθεση χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης αιολικών και ηλιακών σταθμών.

Περιφέρεια	Συντελεστής Συμμετοχής (%)
Αττική (αιολικός σταθμός)	0
Βόρειο Αιγαίο (αιολικός σταθμός)	0
Νότιο Αιγαίο (αιολικός σταθμός)	0
Κρήτη (αιολικός σταθμός)	5.24
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (αιολικός σταθμός)	0
Κεντρική Μακεδονία (αιολικός σταθμός)	0
Δυτική Μακεδονία (αιολικός σταθμός)	0
Ήπειρος (αιολικός σταθμός)	0
Θεσσαλία (αιολικός σταθμός)	3.88
Ιόνια Νησιά (αιολικός σταθμός)	0
Δυτική Ελλάδα (αιολικός σταθμός)	0
Στερεά Ελλάδα (αιολικός σταθμός)	0
Πελοπόννησος (αιολικός σταθμός)	0
Αττική (ηλιακός σταθμός)	0
Βόρειο Αιγαίο (ηλιακός σταθμός)	0
Νότιο Αιγαίο (ηλιακός σταθμός)	22.21
Κρήτη (ηλιακός σταθμός)	52.72
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (ηλιακός σταθμός)	0
Κεντρική Μακεδονία (ηλιακός σταθμός)	0
Δυτική Μακεδονία (ηλιακός σταθμός)	0
Ήπειρος (ηλιακός σταθμός)	0
Θεσσαλία (ηλιακός σταθμός)	0
Ιόνια Νησιά (ηλιακός σταθμός)	15.95
Δυτική Ελλάδα (ηλιακός σταθμός)	0
Στερεά Ελλάδα (ηλιακός σταθμός)	0
Πελοπόννησος (ηλιακός σταθμός)	0



Πίνακας 15: Σύνθεση χαρτοφυλακίου μέγιστης απόδοσης αιολικών και ηλιακών σταθμών.

Περιφέρεια	Συντελεστής Συμμετοχής (%)
Αττική (αιολικός σταθμός)	0
Βόρειο Αιγαίο (αιολικός σταθμός)	0
Νότιο Αιγαίο (αιολικός σταθμός)	100
Κρήτη (αιολικός σταθμός)	0
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (αιολικός σταθμός)	0
Κεντρική Μακεδονία (αιολικός σταθμός)	0
Δυτική Μακεδονία (αιολικός σταθμός)	0
Ήπειρος (αιολικός σταθμός)	0
Θεσσαλία (αιολικός σταθμός)	0
Ιόνια Νησιά (αιολικός σταθμός)	0
Δυτική Ελλάδα (αιολικός σταθμός)	0
Στερεά Ελλάδα (αιολικός σταθμός)	0
Πελοπόννησος (αιολικός σταθμός)	0
Αττική (ηλιακός σταθμός)	0
Βόρειο Αιγαίο (ηλιακός σταθμός)	0
Νότιο Αιγαίο (ηλιακός σταθμός)	0
Κρήτη (ηλιακός σταθμός)	0
Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (ηλιακός σταθμός)	0
Κεντρική Μακεδονία (ηλιακός σταθμός)	0
Δυτική Μακεδονία (ηλιακός σταθμός)	0
Ήπειρος (ηλιακός σταθμός)	0
Θεσσαλία (ηλιακός σταθμός)	0
Ιόνια Νησιά (ηλιακός σταθμός)	0
Δυτική Ελλάδα (ηλιακός σταθμός)	0
Στερεά Ελλάδα (ηλιακός σταθμός)	0
Πελοπόννησος (ηλιακός σταθμός)	0

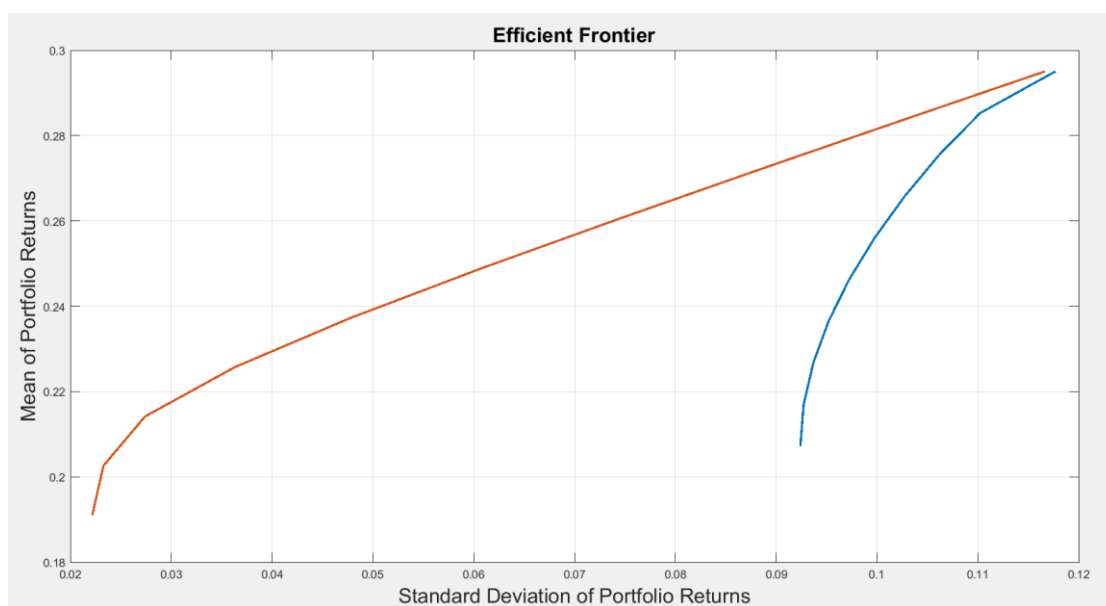
Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι στο χαρτοφυλάκιο μέγιστης απόδοσης έχει τοποθετηθεί το 100% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στη περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου όπου έχει τον μεγαλύτερο μέσο ετήσιο συντελεστή απόδοσης

( $\mu=29.51\%$ ). Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής  $\mu_p$  και η τυπική απόκλιση του συντελεστή  $\sigma_p$  για τα δύο παραπάνω χαρτοφυλάκια φαίνονται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης και η τυπική απόκλιση του συντελεστή.

	Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης	Χαρτοφυλάκιο Μέγιστης Απόδοσης
$\mu_p$	19.10%	29.51%
$\sigma_p$	2.22%	11.67%

Στην Εικόνα 15 απεικονίζεται το αποτελεσματικό σύνορο το οποίο σχηματίζεται από τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια. Μερικά από τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια παρουσιάζονται στον Πίνακα 17.



Εικόνα 15: Αποτελεσματικά Σύνορα.



Στην Εικόνα 15 με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το αποτελεσματικό σύνορο που σχηματίζεται από τα σύνθετα χαρτοφυλάκια ενώ με μπλε το αποτελεσματικό σύνορο που αποτελείται μόνο από αιολικούς σταθμούς. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω σύγκριση είναι τα εξής.

- i. Η τυπική απόκλιση του συντελεστή απόδοσης στο χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης μειώνεται σημαντικά από 9.2% σε 2.2% ενώ ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης μειώνεται ελάχιστα από 20.71% σε 19.10%. Οι αλλαγές των ποσοστών είναι ένδειξη της αποτελεσματικότητας του συνδυασμού των πόρων.
- ii. Το χαρτοφυλάκιο με τον μικρότερο συντελεστή μεταβλητότητας (CV) είναι πιο αποτελεσματικό στην σύνθεση χαρτοφυλακίου αφού το πηλίκο από 0.38 μειώνεται σε 0.11.

Επομένως, είναι πιο αποτελεσματικό η σύνθεση ενός σύνθετου χαρτοφυλακίου που θα περιέχει αιολικούς και ηλιακούς σταθμούς.

## 4.6 Σύγκριση

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως χαρτοφυλάκια αποτελούμενα από διαφορετικές περιφέρειες είναι πιο αξιόπιστα από ότι χαρτοφυλάκια αποτελούμενα από μία μόνο περιφέρεια. Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί πως μέσα από την προσπάθεια για την εύρεση των βέλτιστων χαρτοφυλακίων φαίνεται ότι η συσχέτιση μεταξύ των περιφερειών παίζει σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Για αυτό το λόγο, η σύνθεση των βέλτιστων χαρτοφυλακίων δεν επιτρέπει σε περιφέρειες με υψηλή συσχέτιση να έχουν μεγάλο ποσοστό από την συνολική εγκατεστημένη ισχύ.

Επίσης, αν επιλέξει αιολικά ή ηλιακά χαρτοφυλάκια κάποιος είναι άποψη δική του. Αυτό ισχύει και για το επίπεδο κινδύνου που επιθυμεί. Όμως είναι σημαντικό να τονιστεί είναι ότι η χωρική και η τεχνολογική διαφοροποίηση αυξάνει την αξιοπιστία των χαρτοφυλακίων. Επιβεβαιώθηκε από την απεικόνιση των αποτελεσματικών συνόρων μεταξύ των σύνθετων χαρτοφυλακίων και των χαρτοφυλακίων αποτελούμενα μόνο από αιολικούς σταθμούς. Στα σύνθετα χαρτοφυλάκια η τυπική απόκλιση του συντελεστή απόδοσης στο χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης ήταν σημαντικά μικρότερη ενώ ο αναμενόμενος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης ήταν ελάχιστα

μικρότερος. Επομένως, οι στρατηγικές αυτές μπορούν να βοηθήσουν τον επενδυτή να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο και να μεγιστοποιήσει την απόδοση.

## **Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό θα συνοψιστούν όλα τα αποτελέσματα της έρευνας από την αρχή μέχρι το τέλος προκειμένου να απαντηθούν όλα τα ερωτήματα και να δοθεί μια απάντηση στον στόχο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τα πρώτα αποτελέσματα προέκυψαν από την περιγραφική στατιστική ανάλυση όπου έγινε κατανοητό το πως συμπεριφέρθηκε η κάθε περιφέρεια τα τελευταία τριάντα χρόνια τόσο για την ηλιακή όσο και την αιολική ενέργεια. Έπειτα από την σύγκριση τους φάνηκε ότι η περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου (EL42) έχει τον μεγαλύτερο μέσο ετήσιο συντελεστή απόδοσης για τα αιολικά και ηλιακά δεδομένα. Αντίθετα, η περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας (EL51) έχει τον μικρότερο μέσο ετήσιο συντελεστή απόδοσης για τα αιολικά και ηλιακά δεδομένα. Ακόμα, για την αποφυγή ενός υψηλού επιπέδου κινδύνου στη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των χαρτοφυλακίων πρέπει να υπολογίζεται η μεταβλητότητα. Η περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας παρουσιάζει την μεγαλύτερη ενώ η περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου την μικρότερη μεταβλητότητα για τα αιολικά και ηλιακά δεδομένα. Τέλος, μεγάλη σημασία έχει η συσχέτιση των συντελεστών απόδοσης όπως φαίνεται από τον πίνακα συσχετίσεων (correlation matrix). Για τα αιολικά δεδομένα, οι περιφέρειες της Δυτικής Μακεδονίας με του Νοτίου Αιγαίου έχουν την μικρότερη συσχέτιση ενώ επίσης παρατηρείται ότι οι περιφέρειες των Ιονίων Νήσων με της Στερεάς Ελλάδας και οι περιφέρειες της Δυτικής Ελλάδας με της Πελοποννήσου έχουν τιμή συσχέτισης 1, δηλαδή υψηλή συσχέτιση. Οι υψηλές συσχέτισης θα πρέπει να αποφεύγονται καθώς συνεπάγονται με υψηλά επίπεδα κινδύνου. Για τα ηλιακά δεδομένα, οι περιφέρειες της Ηπείρου με της Κρήτης έχουν την μικρότερη συσχέτιση ενώ οι περιφέρειες των Ιονίων Νήσων με της Δυτικής Ελλάδας την μεγαλύτερη.

Έπειτα, εφαρμόστηκε η θεωρία της βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίων βάση την ανάλυση μέσου-διακύμανσης (mean-variance). Βρέθηκαν οι συνθέσεις των χαρτοφυλακίων ελάχιστης διακύμανσης (MV) και μέγιστης απόδοσης (MR), για τα αιολικά και ηλιακά δεδομένα, και υπολογίστηκε ο αναμενόμενος συντελεστής

ενεργειακής απόδοσης και η τυπική απόκλιση του συντελεστή για το αιολικό και ηλιακό χαρτοφυλάκιο. Μέσα από την έρευνα αποδείχθηκε ότι η χωρική διαφοροποίηση μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του χαρτοφυλακίου. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι ορισμένες περιφέρειες προσφέρουν ελάχιστη έως και μηδενική αξία στα βέλτιστα χαρτοφυλάκια τόσο για τα αιολικά όσο και τα ηλιακά δεδομένα. Για τον λόγο αυτό δεν θα πρέπει να επιλέγονται και να συμπεριλαμβάνονται στα χαρτοφυλάκια. Στη συνέχεια έγινε βελτιστοποίηση του σύνθετου χαρτοφυλακίου, δηλαδή χαρτοφυλάκια τα οποία περιλαμβάνουν αιολικούς και ηλιακούς σταθμούς. Αποδείχθηκε ότι η τεχνολογική διαφοροποίηση μπορεί να αυξήσει περισσότερο την αξιοπιστία των χαρτοφυλακίων.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της έρευνας μας έδειξαν τα οφέλη χωρικής και τεχνολογικής διαφοροποίησης με στόχο την μείωση του κινδύνου παραγωγής αιολικής και ηλεκτρικής ενέργειας και την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Η βέλτιστη κατανομή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος είναι σε θέση να αυξήσει την αξιοπιστία των χαρτοφυλακίων.

## Βιβλιογραφία

- Caralis, G., Perivolaris, Y., Rados, K., & Zervos, A. (2008). On the effect of spatial dispersion of wind power plants on the wind energy capacity credit in Greece. *Environmental Research Letters*, 3(1), 015003.
- Cunha, J., & Ferreira, P. V. (2014). Designing electricity generation portfolios using the mean-variance approach.
- Drake, B., & Hubacek, K. (2007). What to expect from a greater geographic dispersion of wind farms?—A risk portfolio approach. *Energy Policy*, 35(8), 3999-4008.
- Gonzalez Aparicio I., Zucker A., Careri F., Monforti-Ferrario F., Huld T., Badger J., (2016). EMHIRES dataset Part I: Wind power generation, European Meteorological derived High resolution RES generation time series for present and future scenarios. Publications Office of the European Union.
- Gonzalez Aparicio I., Zucker A., Careri F., Monforti-Ferrario F., Huld T., Badger J., (2017). EMHIRES dataset Part II: Solar power generation, European Meteorological derived High resolution RES generation time series for present and future scenarios, Part II: PV generation using the PVGIS model. Publications Office of the European Union.
- Hu, J., Harmsen, R., Crijns-Graus, W., & Worrell, E. (2019). Geographical optimization of variable renewable energy capacity in China using modern portfolio theory. *Applied Energy*, 253, 113614.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900.
- Liu, S., Jian, J., Wang, Y., & Liang, J. (2013). A robust optimization approach to wind farm diversification. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 409-415.
- Mangram, M. E. (2013). A simplified perspective of the Markowitz portfolio theory. *Global journal of business research*, 7(1), 59-70.
- Markowitz, H., 1952. Portfolio selection. *Journal of Finance* 7, 77–91.
- Marling, H., & Emanuelsson, S. (2012). The Markowitz portfolio theory.
- Martinopoulos, G., & Tsalikis, G. (2018). Diffusion and adoption of solar energy conversion systems—The case of Greece. *Energy*, 144, 800-807.
- Odeh, R. P., & Watts, D. (2019). Impacts of wind and solar spatial diversification on its market value: A case study of the Chilean electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111,442-461.

Odeh, R. P., & Watts, D. (2019). Impacts of wind and solar spatial diversification on its market value: A case study of the Chilean electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 442-461.

Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990.

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1513-1524.

Papadaskalopoulos, A., & Christofakis, M. (2008). Spatial cohesion in Greece: The impact of GDP revision in the measurement of spatial inequalities in Greece and policy dimensions. *Social Cohesion and Development*, 3(1), 45-54.

Santos-Alamillos, F. J., Thomaidis, N. S., Quesada-Ruiz, S., Ruiz-Arias, J. A., & Pozo-Vázquez, D. (2016). Do current wind farms in Spain take maximum advantage of spatiotemporal balancing of the wind resource?. *Renewable Energy*, 96, 574-582.

Santos-Alamillos F. J., Brayshaw D. J., Methven J., Thomaidis Nikolaos, Ruiz-Arias J. A., Pozo-Vázquez D., (2017). Exploring the meteorological potential for planning a high performance European Electricity Super-grid: optimal power capacity distribution among countries. *Environmental Research Letters*.

Santos-Alamillos F.J., Thomaidis Nikolaos, Usaola-García J., Ruiz-Arias J.A., Pozo-Vazquez D., (2017). Exploring the mean-variance portfolio optimization approach for planning wind repowering actions in Spain. *Renewable Energy*. τόμ.106 σ.335-342.

Shahzad, U. (2012). The need for renewable energy sources. *energy*, 2, 16-18.

Thomaidis Nikolaos, Santos-Alamillos F.J., Pozo-Vázquez D., Usaola-García J., (2016). Optimal management of wind and solar energy resources. *Computers & Operations Research*. Vol.66 σ.284–291.

Xue, J. (2017). Photovoltaic agriculture-New opportunity for photovoltaic applications in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1-9.

## **Δικτυογραφία**

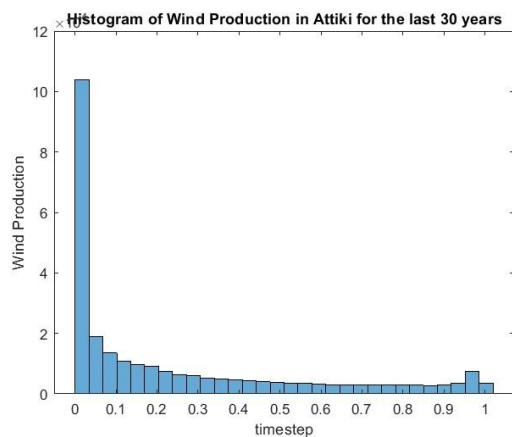
EMHIRES database (European Meteorological derived HIgh resolution RES): <https://zenodo.org/records/> (Τελευταία πρόσβαση 17/10/2023)

Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ): <https://eletaen.gr/> (Τελευταία πρόσβαση 17/10/2023)

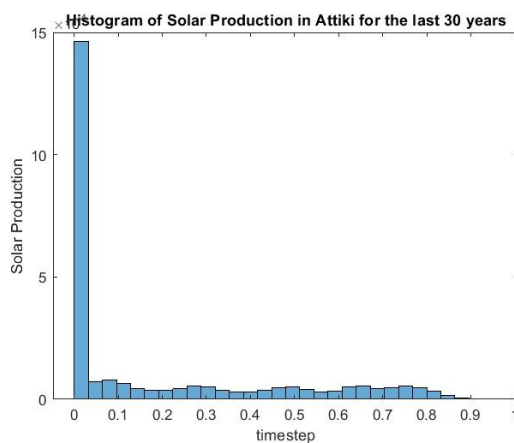


## Παράρτημα Α

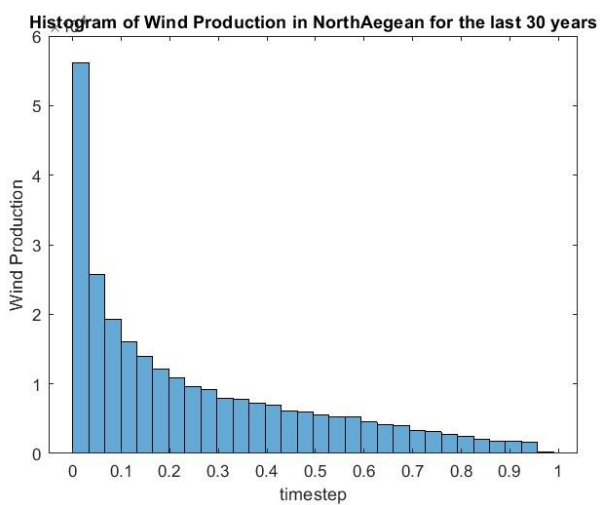
### ➤ Ιστόγραμμα



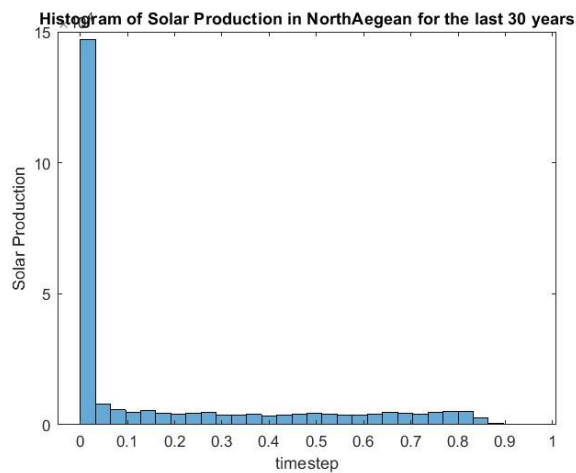
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Αττική.



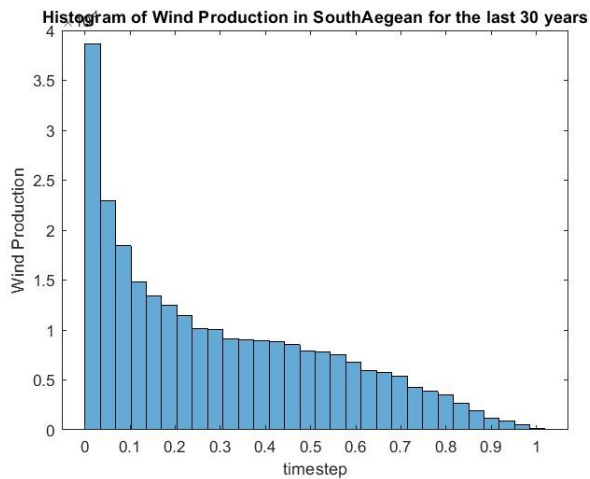
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Αττική.



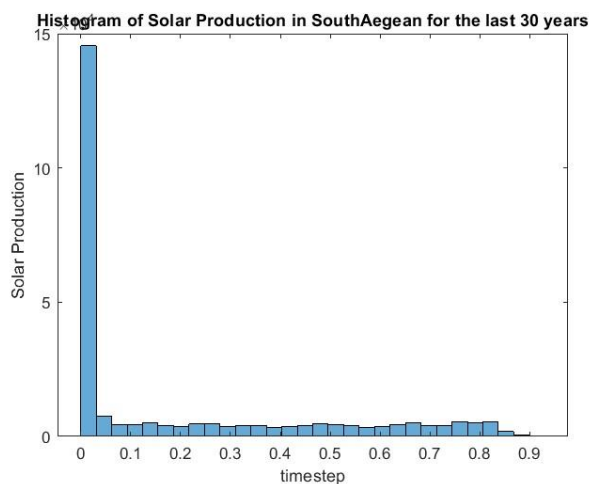
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στο Βόρειο Αιγαίο.



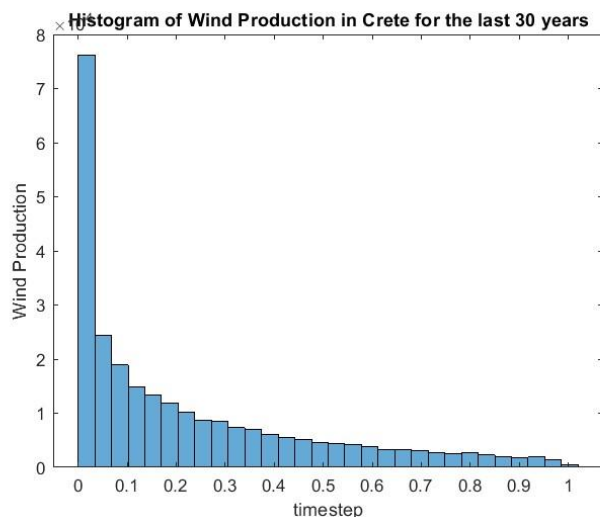
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στο Βόρειο Αιγαίο.



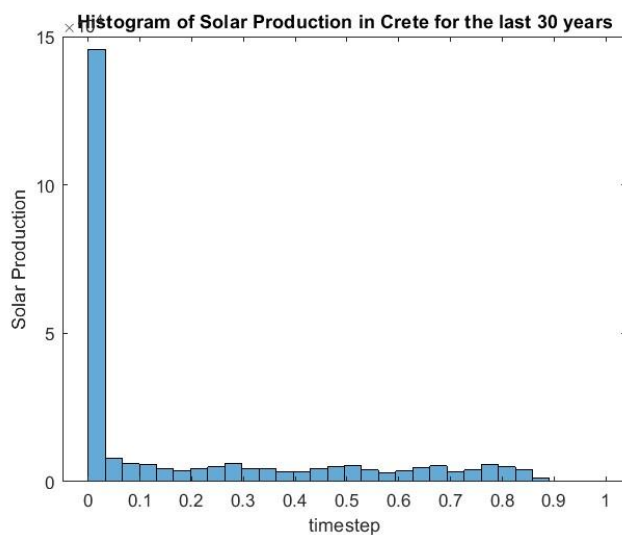
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στο Νότιο Αιγαίο.



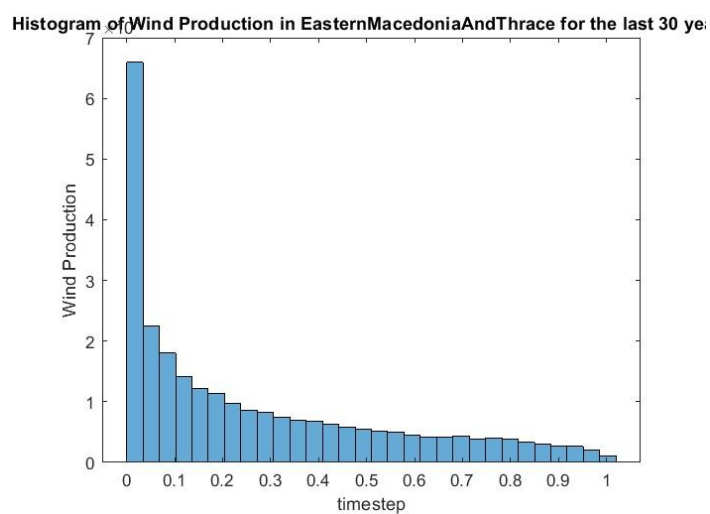
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στο Νότιο Αιγαίο.



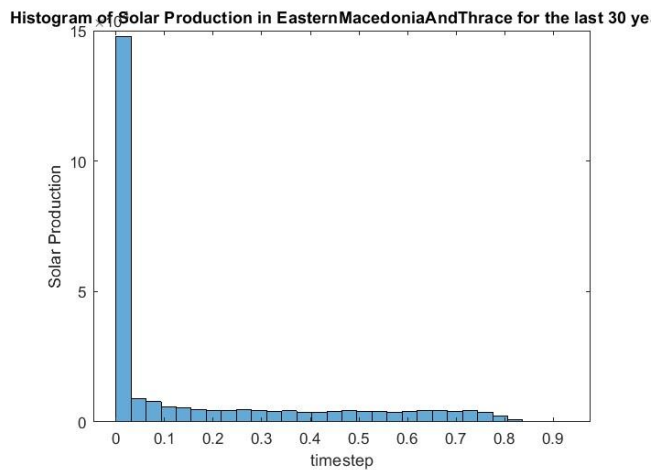
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Κρήτη.



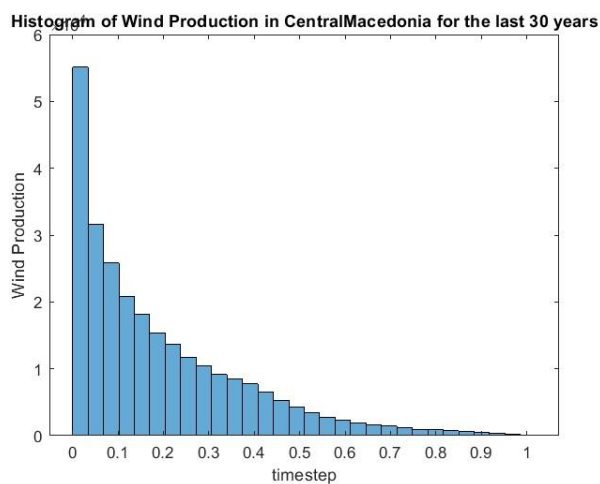
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Κρήτη.



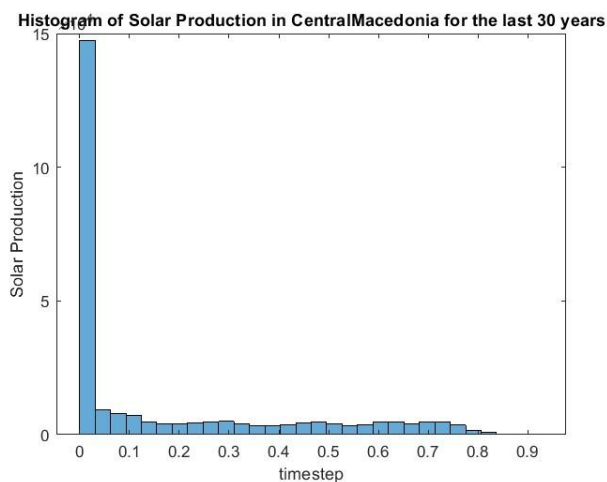
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Ανατολική Μακεδονία και Θράκη.



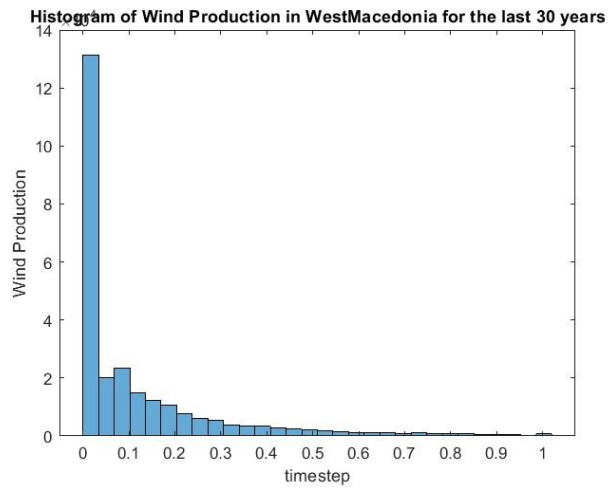
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Ανατολική Μακεδονία και Θράκη.



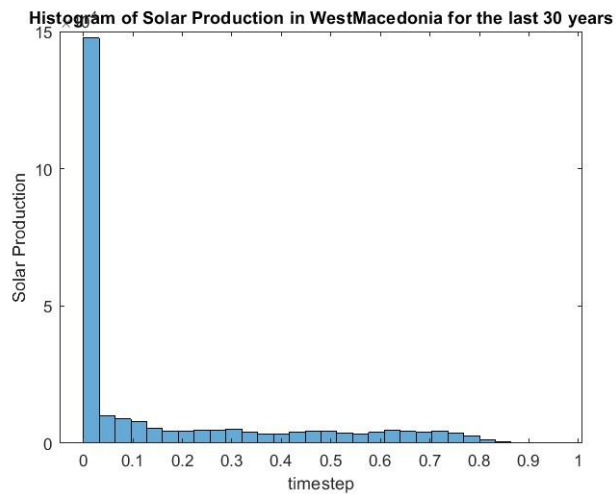
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Κεντρική Μακεδονία.



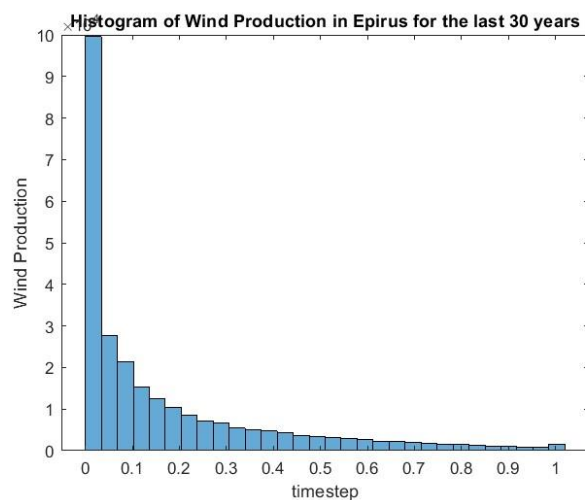
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Κεντρική Μακεδονία.



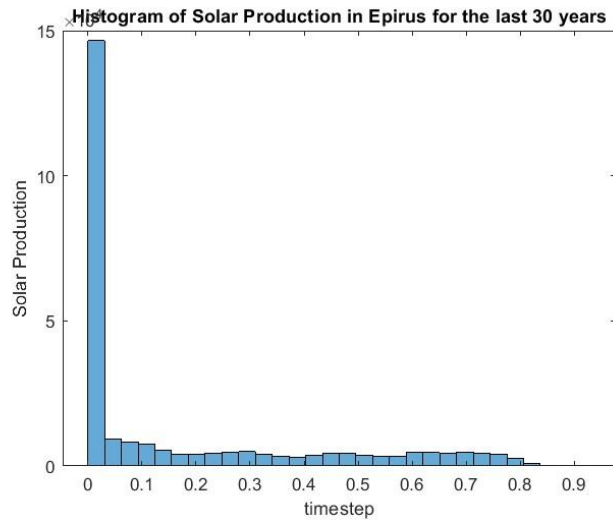
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Δυτική Μακεδονία.



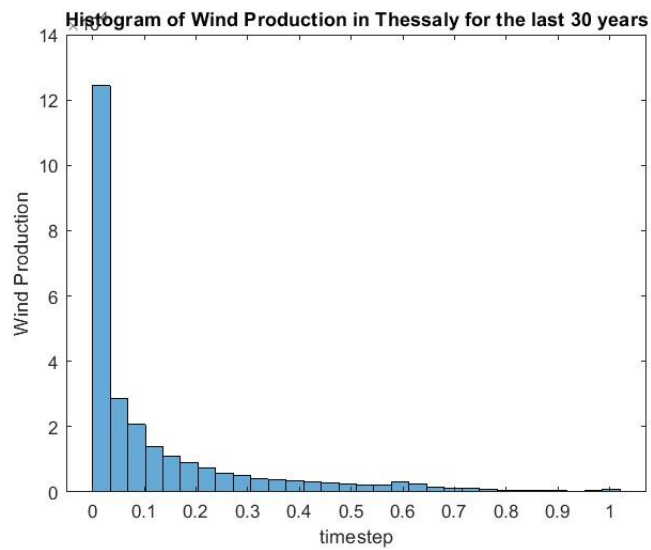
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Δυτική Μακεδονία.



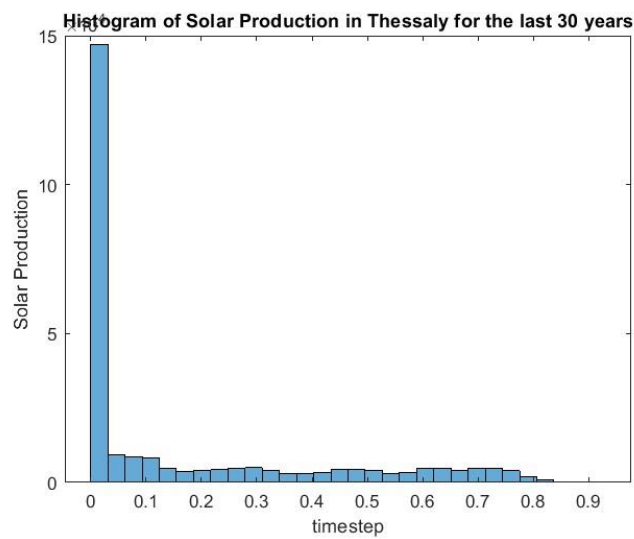
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Ήπειρο.



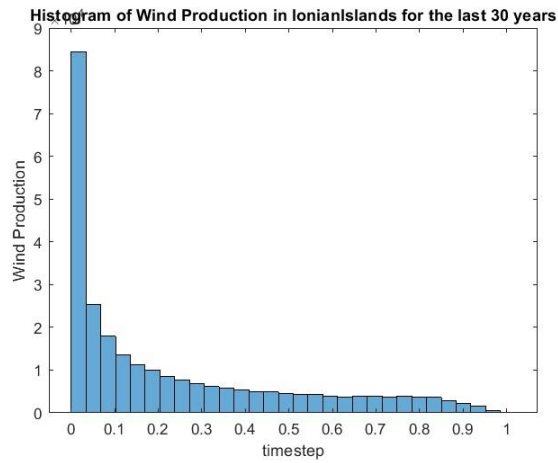
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Ήπειρο.



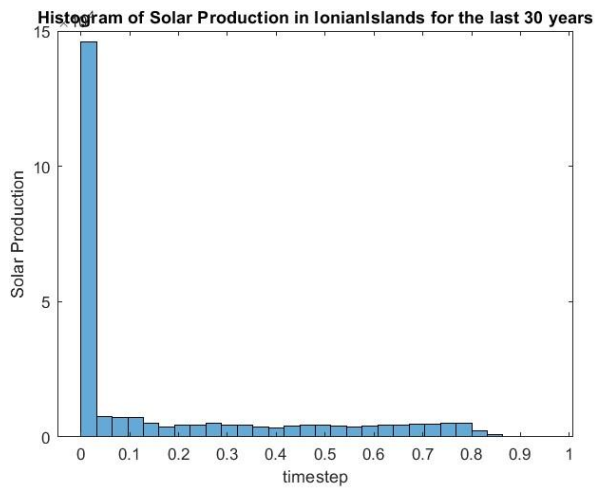
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Θεσσαλία.



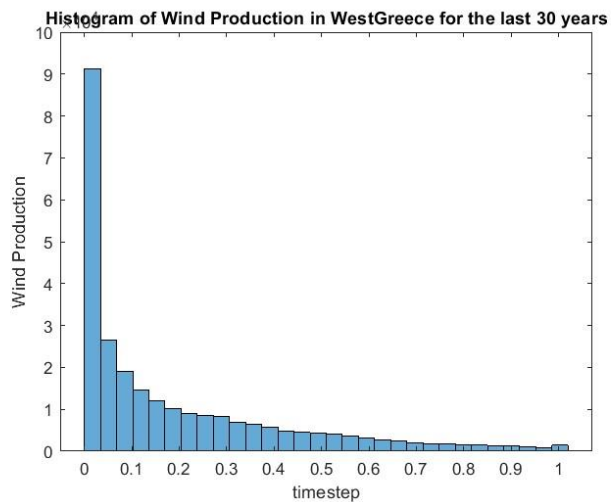
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Θεσσαλία.



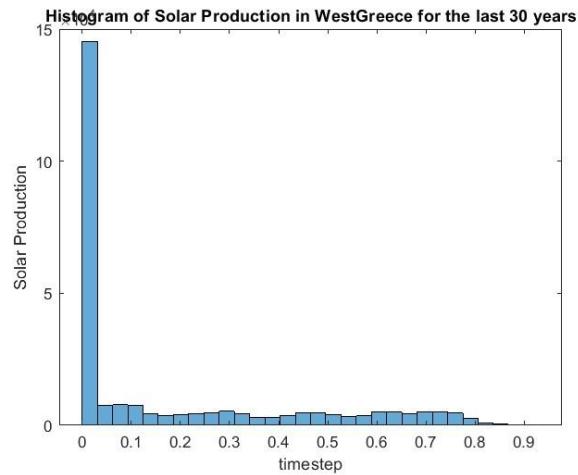
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στα Ιόνια Νησιά.



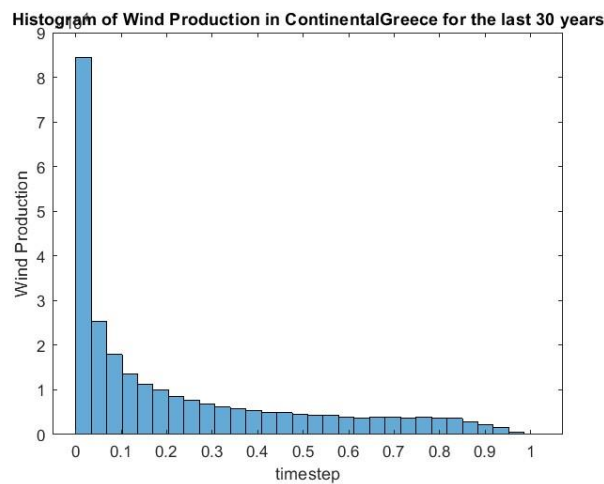
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στα Ιόνια Νησιά.



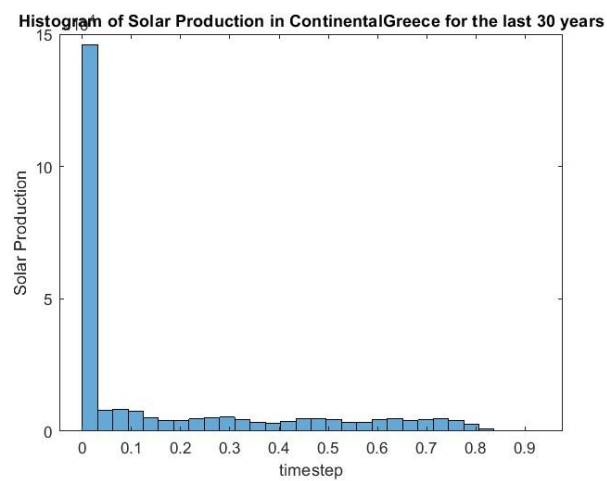
Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Δυτική Ελλάδα.



Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Δυτική Ελλάδα.

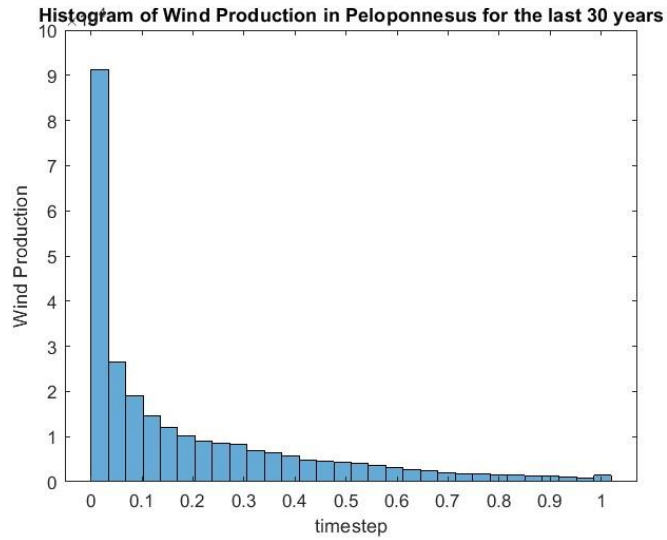


Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Στερεά Ελλάδα.

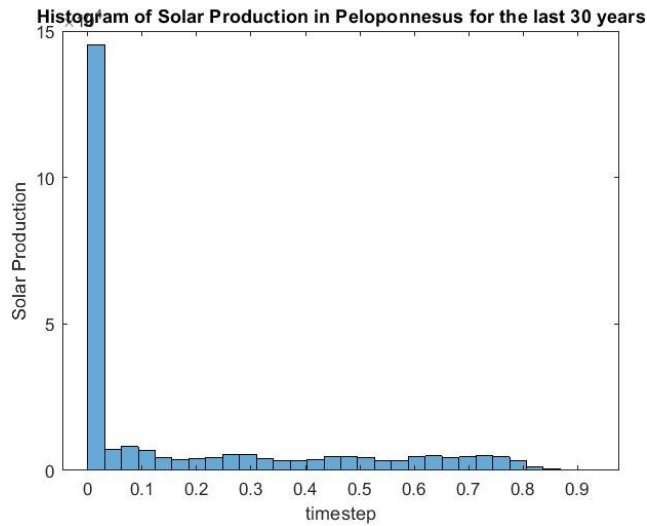


Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Στερεά Ελλάδα.



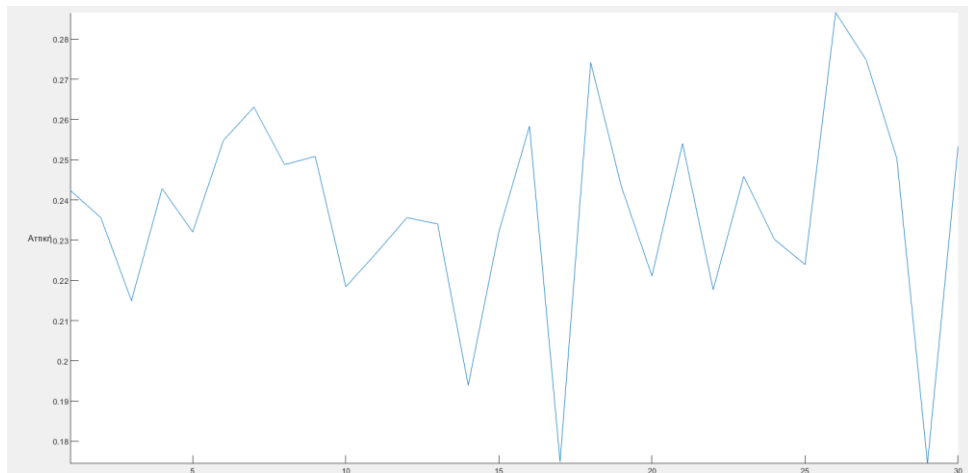


Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Πελοπόννησο.

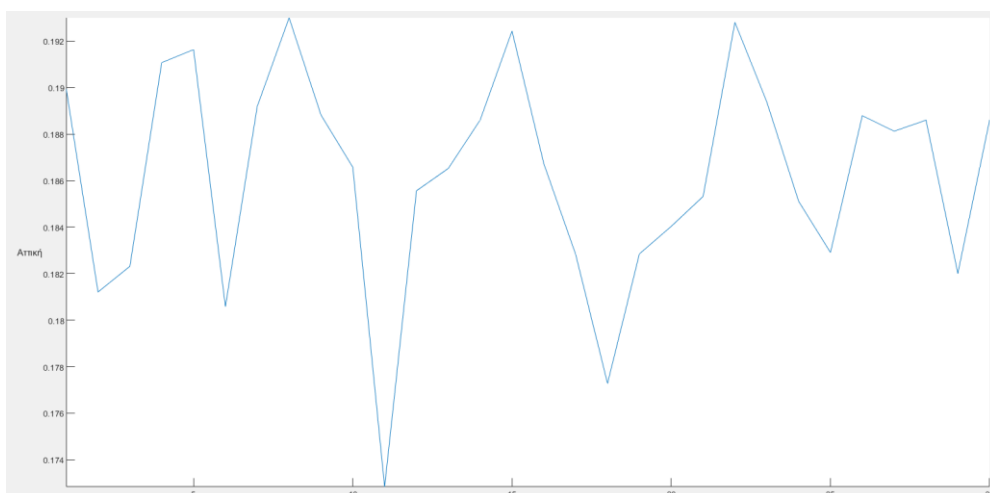


Ιστόγραμμα μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Πελοπόννησο.

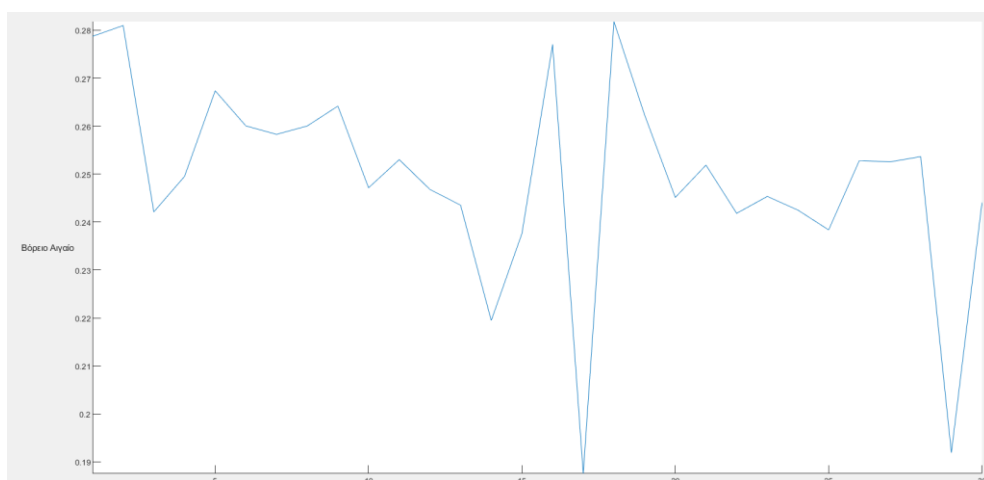
## ➤ Line Plot



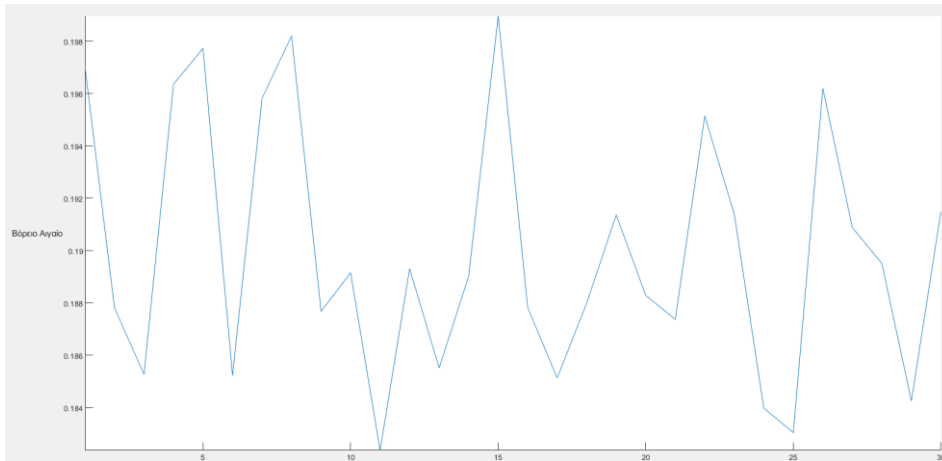
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Αττική.



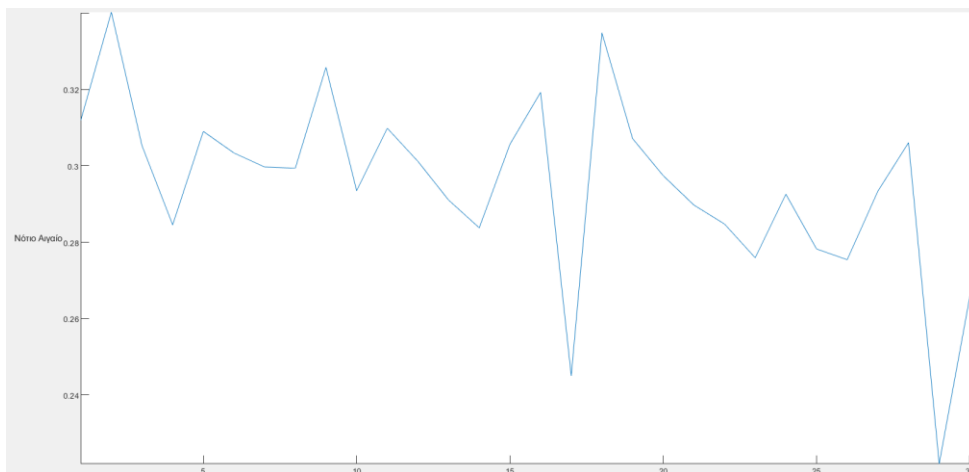
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Αττική.



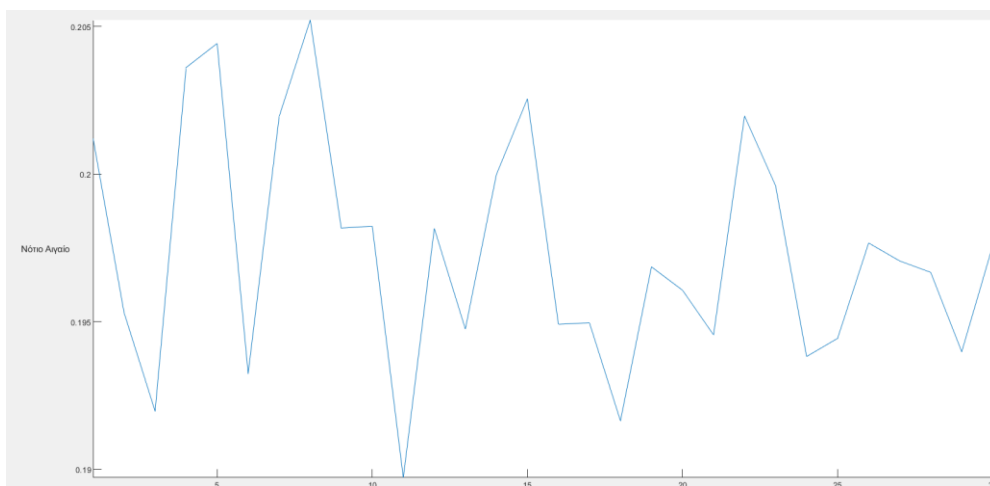
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στο Βόρειο Αιγαίο.



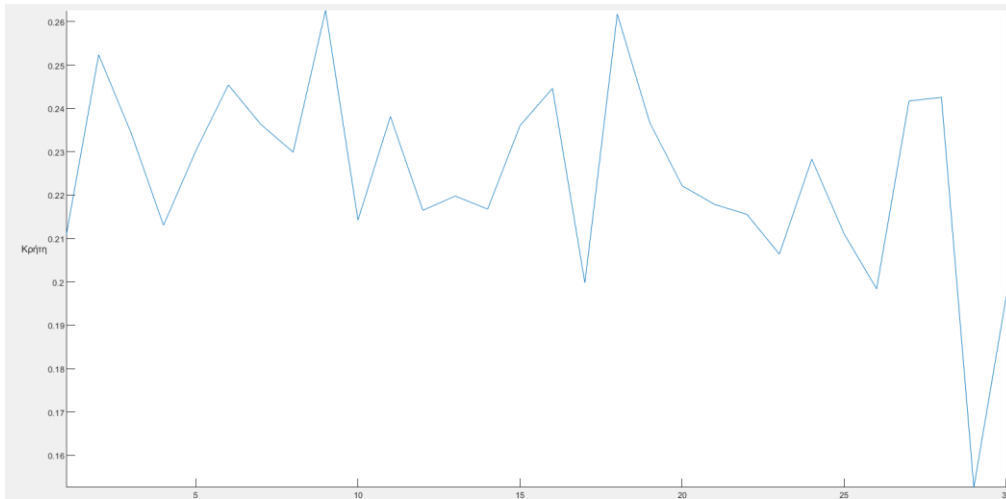
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στο Βόρειο Αιγαίο.



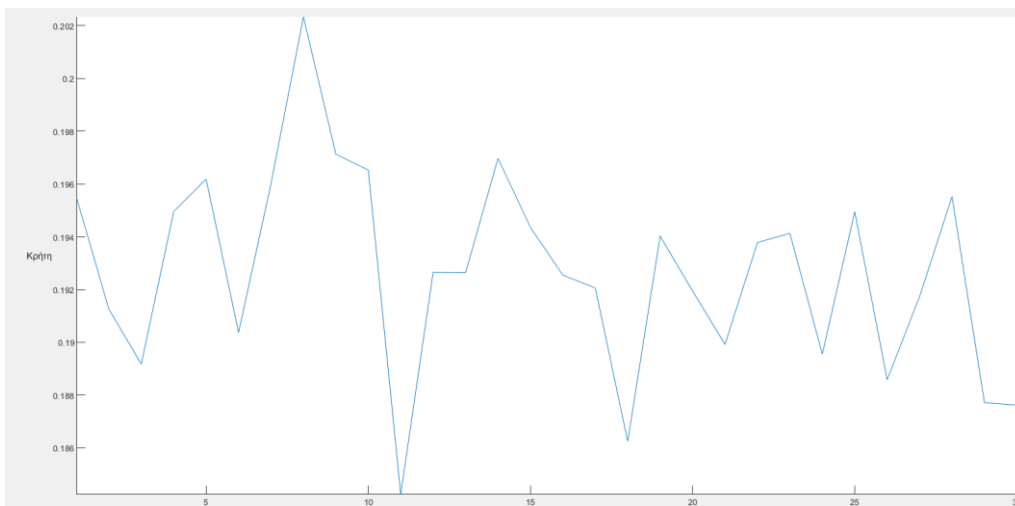
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στο Νότιο Αιγαίο.



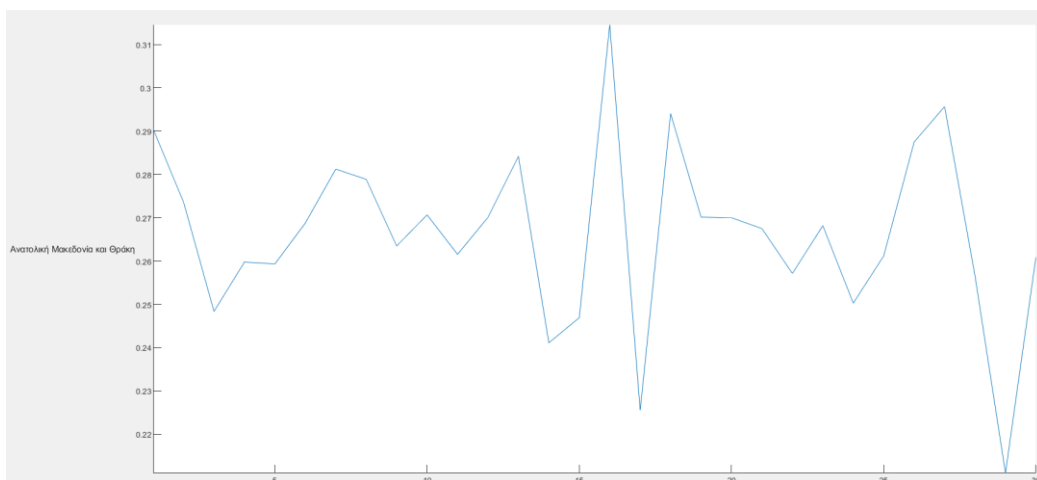
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στο Νότιο Αιγαίο.



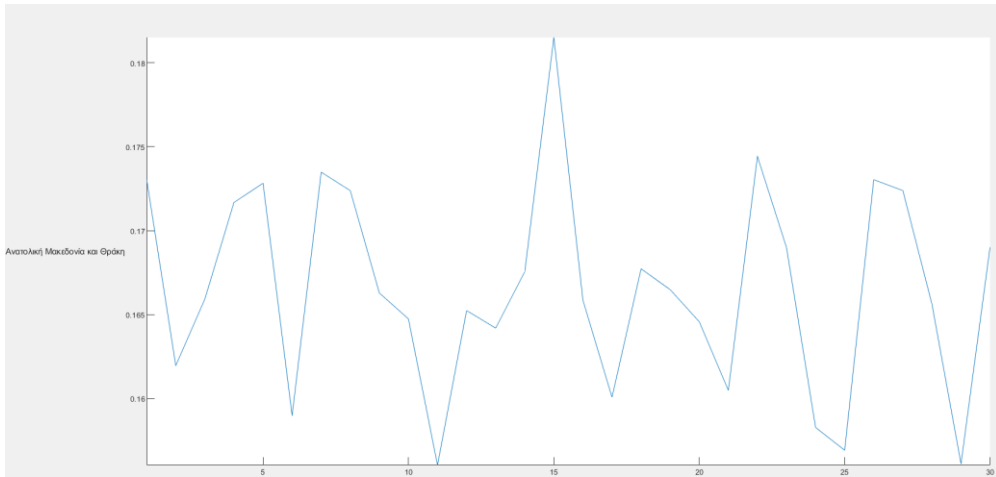
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Κρήτη.



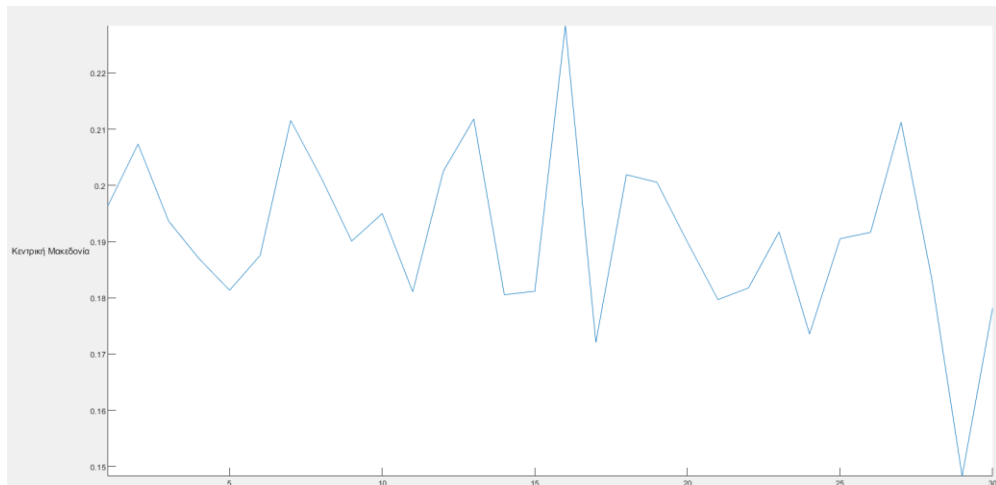
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Κρήτη.



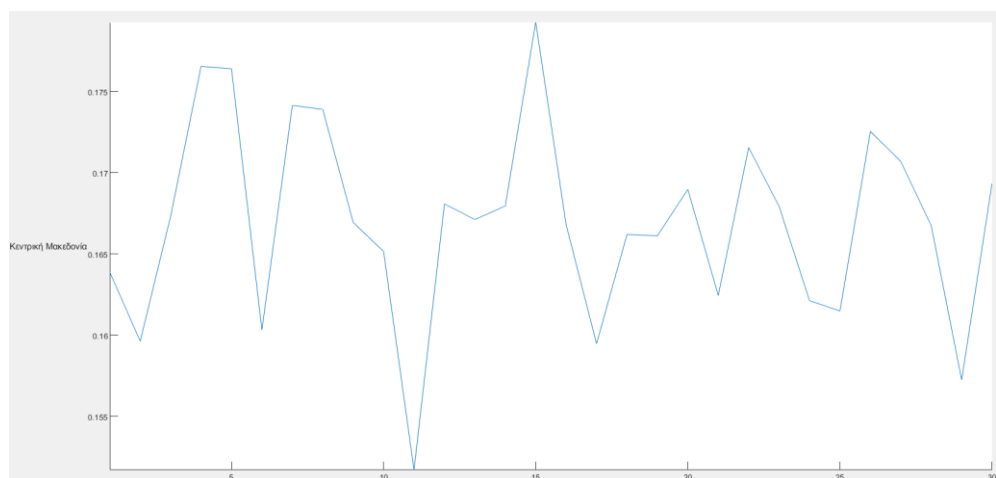
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Ανατολική Μακεδονία και Θράκη.



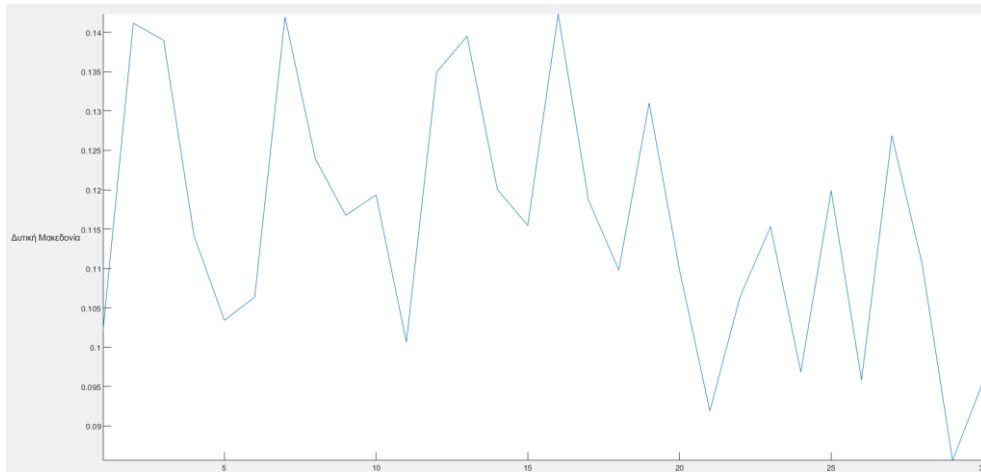
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Ανατολική Μακεδονία και Θράκη.



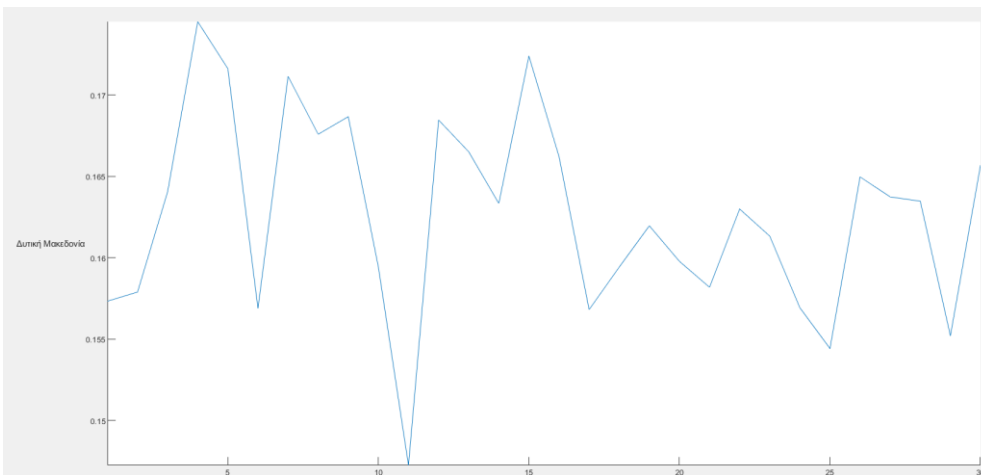
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Κεντρική Μακεδονία.



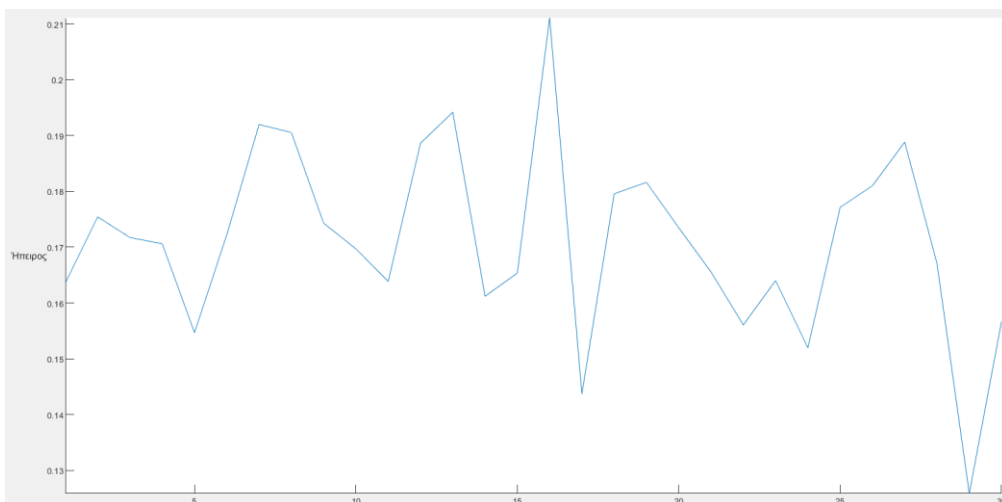
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Κεντρική Μακεδονία.



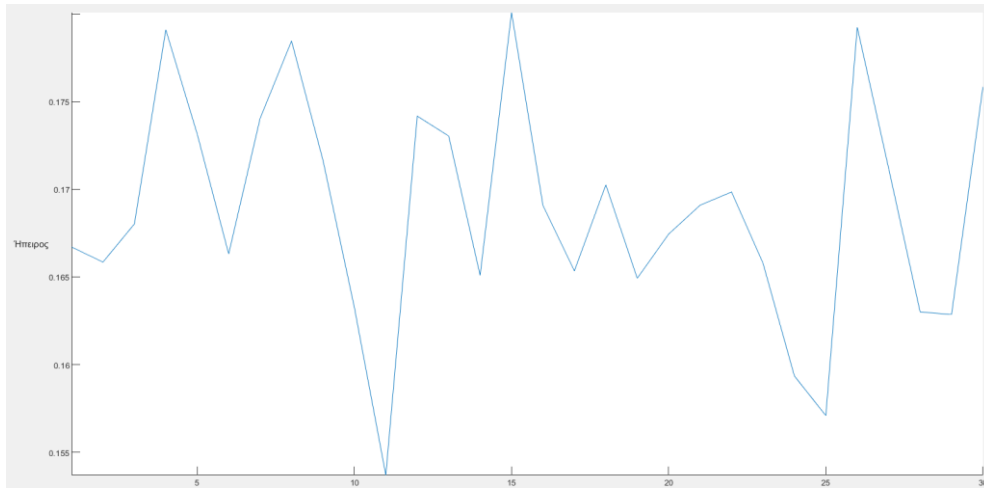
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Δυτική Μακεδονία.



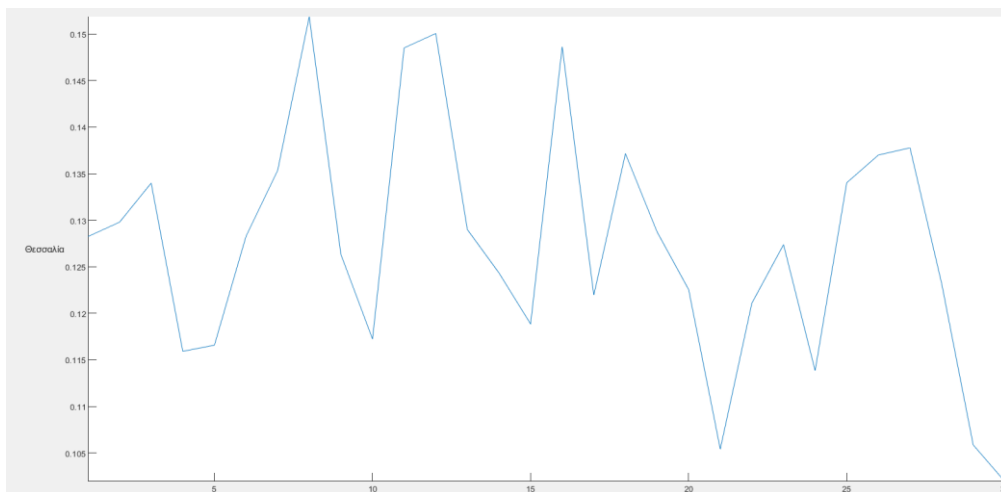
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Δυτική Μακεδονία.



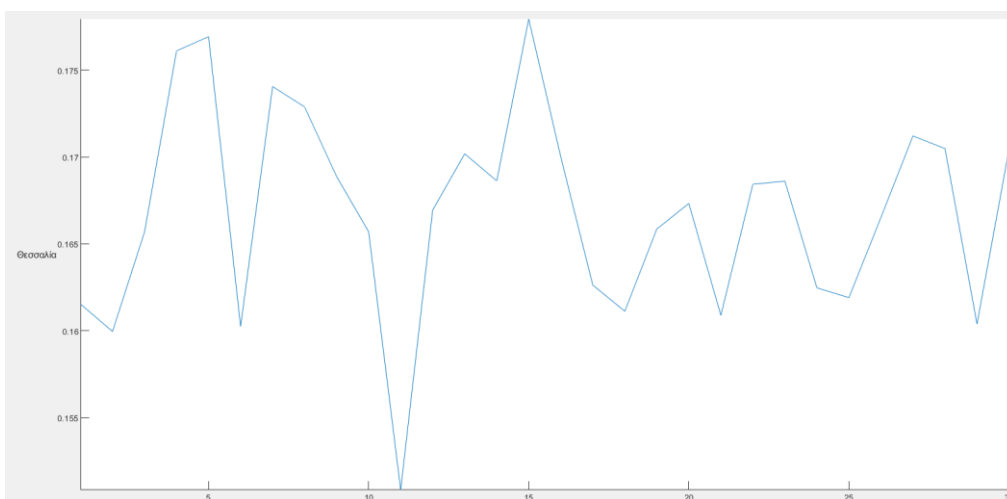
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Ήπειρο.



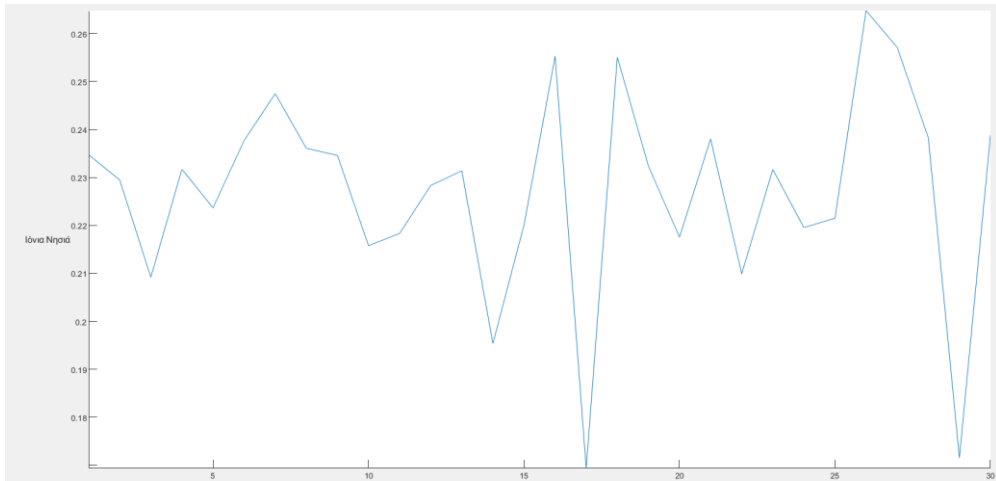
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Ήπειρο.



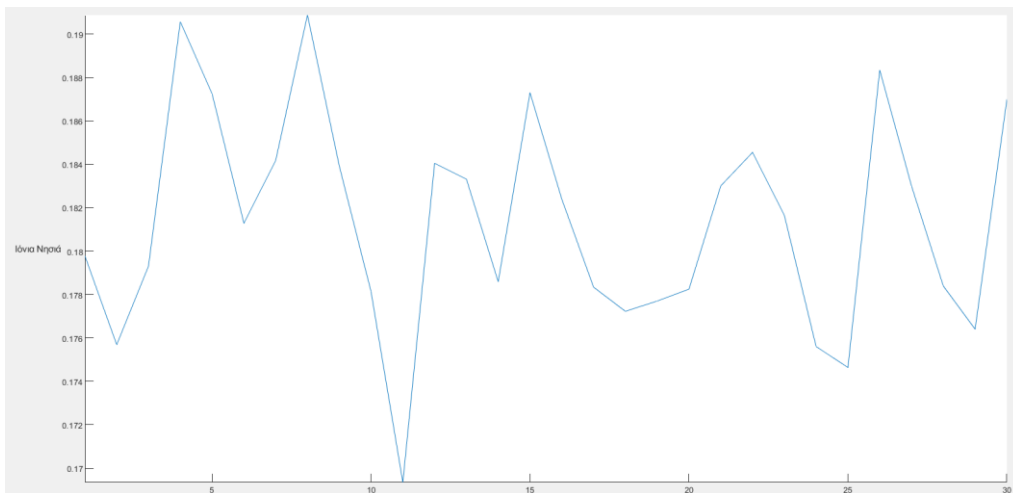
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Θεσσαλία.



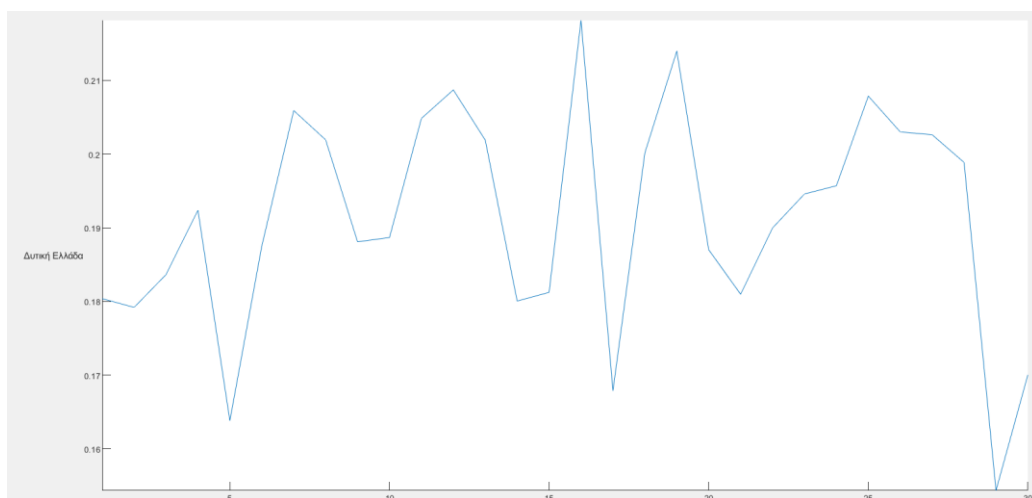
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Θεσσαλία.



Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στα Ιόνια Νησιά.

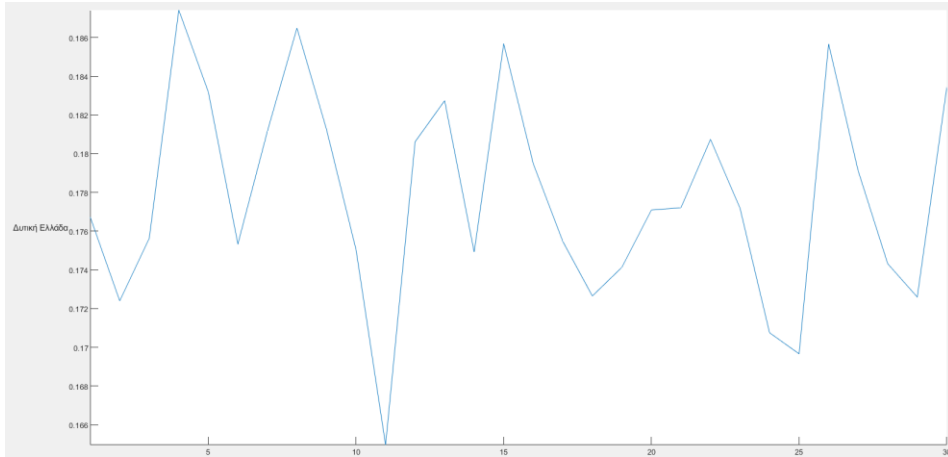


Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στα Ιόνια Νησιά.

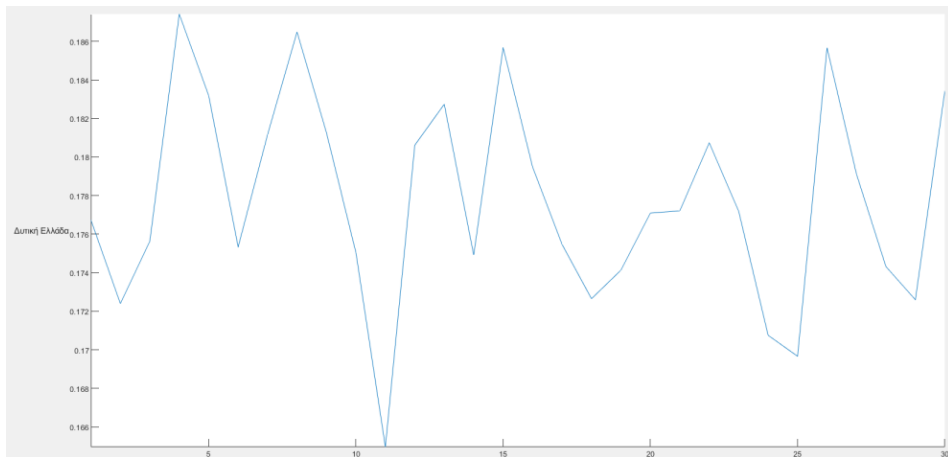


Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Δυτική Ελλάδα.

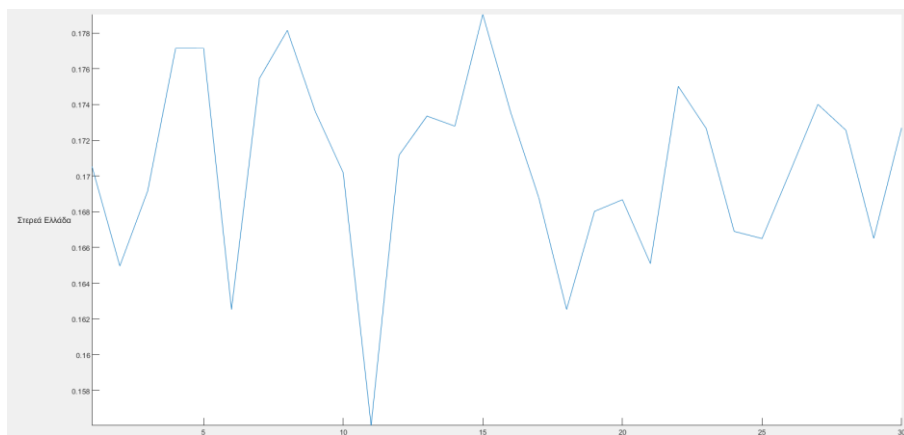




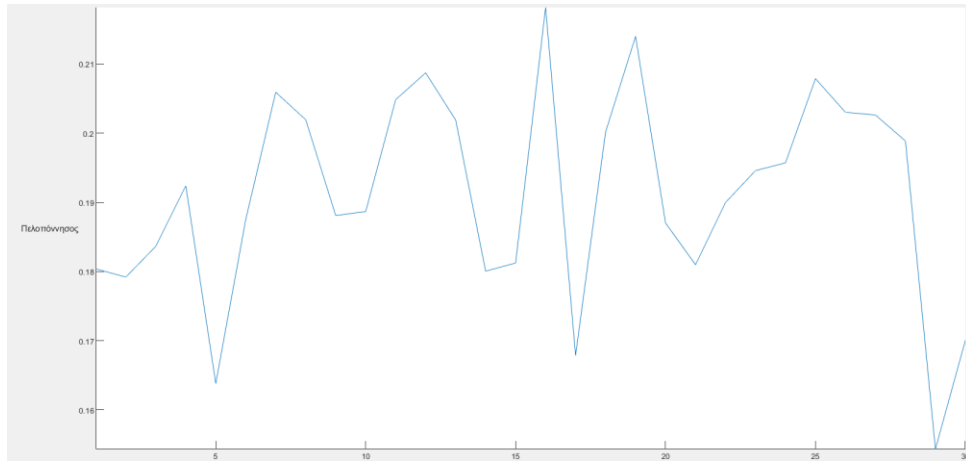
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Δυτική Ελλάδα.



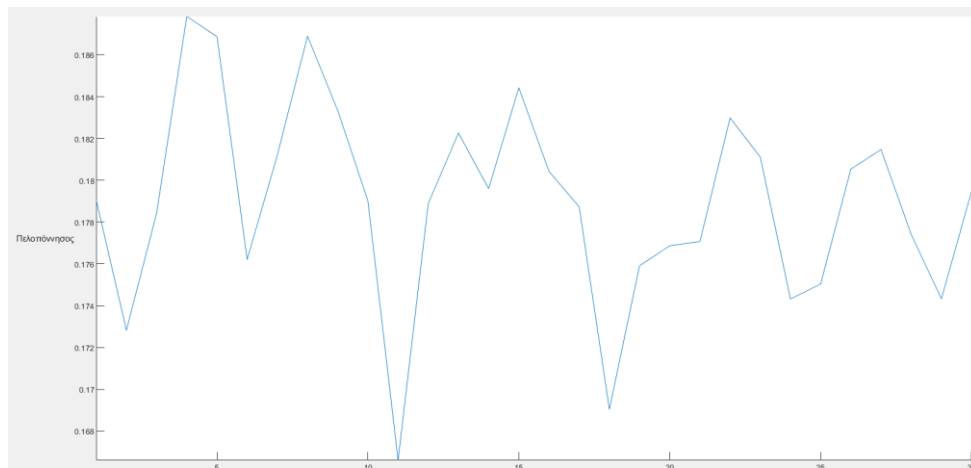
Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στη Στερεά Ελλάδα.



Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στη Στερεά Ελλάδα.



Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης αιολικής ενέργειας στην Πελοπόννησο.



Line plot μέσου ετήσιου συντελεστή απόδοσης ηλιακής ενέργειας στην Πελοπόννησο.