

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ”



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Εκμετάλλευση υπεράκτιων αιολικών και ηλιακών πόρων
στις ελληνικές θάλασσες χρησιμοποιώντας δεδομένα
reanalysis ERA5”



Γιαννακοπούλου Παρασκευή
Επιβλέπων Καθηγητής: **Σουκισιάν Τακβόρ**

Αθήνα 2023

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “Εκμετάλλευση υπεράκτιων αιολικών και ηλιακών πόρων στις ελληνικές θάλασσες χρησιμοποιώντας δεδομένα reanalysis ERA5” πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών με τίτλο “Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη” της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Τακβόρ Σουκισιάν, Διδάκτορα της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ.) καταρχήν γιατί με ενέπνευσε μέσα από τα μαθήματα του να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για την εμπιστοσύνη του και πολύτιμη καθοδήγηση του σε μια απαιτητική χρονική στιγμή για εμένα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Μπελιμπασάκη καθώς και την καθηγήτρια κυρία Ελένη Φλόκα για την προθυμία τους να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής εργασίας μου. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος για τη συμβολή τους στην εξέλιξη μου.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την υποστήριξη και συμπαράσταση σε όλη την προσπάθεια μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται μια μελέτη των αιολικών και ηλιακών πόρων στις ελληνικές θάλασσες προκειμένου να βρεθούν περιοχές οι οποίες είναι κατάλληλες για τη φιλοξενία υβριδικών πάρκων αποτελούμενων από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πλαίσια. Γίνεται μια γενική εισαγωγή για την κλιματική αλλαγή και στη συνέχεια πραγματοποιείται μια αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που προέρχονται από το θαλάσσιο περιβάλλον. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τύποι ανεμογεννητριών και περιγράφονται τα βασικά κριτήρια για την επιλογή των κατάλληλων περιοχών για εγκατάσταση θαλάσσιου αιολικού πάρκου όπως ανεμολογικό καθεστώς, βάθος, απόσταση από κύριο λιμάνι κλπ. Παρόμοια αναφορά πραγματοποιείται και για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Για την εφαρμογή όλων των παραπάνω, έγινε χρήση δεδομένων ταχύτητας ανέμου 100 m πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας και προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μορφή πλέγματος από τη βάση δεδομένων ERA5 του οργανισμού ECMWF. Τα συγκεκριμένα δεδομένα είναι χρονοσειρές που αποτελούνται από μετρήσεις ανά μια ώρα για την εικοσαετία 2000 έως 2019 καλύπτοντας ένα πλέγμα 1665 κορυφών χωρικής ανάλυσης 0.25° για τις ελληνικές θάλασσες στο γεωγραφικό χώρο $[42^\circ - 33^\circ B, 19^\circ - 30^\circ A]$. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν στο προγραμματικό περιβάλλον MATLAB, προκειμένου να υπολογιστούν οι στατιστικές παράμετροι για τη μελέτη του ανεμολογικού καθεστώτος στις ελληνικές θάλασσες. Συγκεκριμένα, οι δείκτες που υπολογίστηκαν είναι η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου για το σύνολο της εικοσαετίας, η μηνιαία μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου για κάθε έναν από τους δώδεκα μήνες του έτους στο σύνολο της εικοσαετίας, οι δείκτες της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας (MAV) και της υπερ-ετήσιας μεταβλητότητας (IAV) για κάθε κορυφή του πλέγματος. Οι ίδιοι στατιστικοί δείκτες υπολογίστηκαν και μελετήθηκαν και για το αιολικό δυναμικό. Παράλληλα υπολογίστηκε η μέση ετήσια τιμή του ηλιακού δυναμικού για το σύνολο της περιόδου μελέτης, η μέση μηνιαία τιμή για κάθε μήνα και η μέση ετήσια (MAV) και υπερ-ετήσια (IAV) μεταβλητότητα για κάθε κορυφή του πλέγματος. Τέλος, εντοπίστηκαν οι κοινές τοποθεσίες όπου το ηλιακό και αιολικό δυναμικό εμφανίσουν τις μέγιστες τιμές τους και μελετήθηκαν η συμπληρωματικότητα και η συνέργεια μεταξύ των δυο ενεργειακών πόρων με τη χρήση του συντελεστή συσχέτισης r , Pearson. Για την οπτικοποίηση και μελέτη των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν χάρτες με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης "m_map".

Λέξεις κλειδιά: θαλάσσια αιολική ενέργεια, θαλάσσια ηλιακή ενέργεια, συμπληρωματικότητα, συνέργεια

Abstract

In the present thesis, a study is conducted on wind and solar resources in the Greek seas to identify areas suitable for hosting hybrid parks consisting of wind turbines and photovoltaic panels. A general introduction is provided on climate change, followed by a reference to renewable energy sources derived from the marine environment. Subsequently, the types of wind turbines are described, and the key criteria for selecting suitable areas for the installation of offshore wind parks, such as wind conditions, depth, distance from the main port, etc., are outlined. Similar reference is made for photovoltaic panels.

To implement all of the above, wind speed data at 100 meters above mean sea level and solar irradiance data in grid format were used from the ERA5 database of the ECMWF organisation. These specific data are time series consisting of hourly measurements for the 20-year period from 2000 to 2019, covering a grid of 1665 spatial resolution points for the Greek seas. The data were processed in the MATLAB programming environment to calculate statistical parameters for studying the wind regime in the Greek seas. Specifically, the calculated indicators include the mean wind speed for the entire 20-year period, the monthly mean wind speed for each of the twelve months in the 20-year period, the indicators of mean annual variability (MAV), and inter-annual variability (IAV) for each grid point. The same statistical indicators were calculated and studied for wind power. Additionally, the mean annual value of solar power for the entire study period, the monthly mean value for each month, and the mean annual (MAV) and inter-annual (IAV) variability for each grid point were computed. Finally, common locations were identified where solar and wind power exhibit their maximum values, and the complementarity and synergy between the two energy resources were studied using the Pearson correlation coefficient.

For the visualisation and study of the results, maps were created using the "m_map" library.

Keywords: Offshore Wind Energy, Offshore Solar Energy, Complementarity, Synergy

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περιεχόμενα	9
Εισαγωγικά	12
1. Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες πηγές ενέργειες από το Θαλάσσιο Περιβάλλον	14
1.1 Υπεράκτια Αιολική Ενέργεια	14
1.2 Υπεράκτια Ηλιακή Ενέργεια	16
1.3 Κυματική ενέργεια	18
1.4 Παλιρροιακή ενέργεια	22
1.5 Ωκεάνια Θερμική ενέργεια	23
1.6 Ωσμωτική Ενέργεια	24
1.7 Μειονεκτήματα και Περιορισμοί Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον	25
1.7.1 Περιοχές Natura 2000	27
1.7.2 Αλληλοσυγκρουόμενες χρήσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος	29
2. Ανεμογεννήτριες και Φωτοβολταϊκά Πλαίσια	31
2.1 Είδη Ανεμογεννητριών	32
2.1.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου Άξονα	32
2.1.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα	35
2.2 Αρχή Λειτουργίας Ανεμογεννητριών και λειτουργικά στοιχεία	35
2.3 Δομές στήριξης πακτωμένων υπεράκτιων ανεμογεννητριών	40
2.3.1 Κατασκευές Βαρύτητας	40
2.3.2 Κατασκευές έδρασης με μονό πυλώνα (Monopile Structure)	41
2.3.3 Κατασκευές Jacket Structure	42
2.3.4 Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου	43
2.4 Πλωτές ανεμογεννήτριες και αγκύρωση πλωτών ανεμογεννητριών	44
2.4.1 Συστήματα τύπου Spar (Spar-buoy)	44
2.4.2 Συστήματα τύπου Tensioned-Leg Platform - TLP	45
2.4.3 Συστήματα ημιβυθιζόμενων κατασκευών Spar-Submersible	45

2.5 Παράγοντες καθορισμού περιοχών για εγκατάσταση αιολικών πάρκων	45
2.6 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια	49
2.7 Εξελίξεις Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη θάλασσα σε Ελλάδα και Ευρώπη	51
3. Περιγραφή διαθέσιμων δεδομένων	55
3.1 Επεξεργασία Ταχύτητας Ανέμου	56
3.2 Επεξεργασία Διεύθυνσης Ανέμου	57
3.3 Επεξεργασία Αιολικού Δυναμικού	59
3.4 Περιγραφή Ηλιακού Δυναμικού	60
3.5 Περιγραφή Συμπληρωματικότητας και Συνέργειας Αιολικού και Ηλιακού Δυναμικού	61
4. Αποτελέσματα Έρευνας	64
4.1 Περιγραφή του διαθέσιμου Αιολικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες	64
4.1.1 Ανεμολογικό Καθεστώς	64
4.1.2 Αιολικό Δυναμικό	75
4.2 Ηλιακό Δυναμικό	86
4.3 Σύγκριση Αιολικού Δυναμικού και Ηλιακού Δυναμικού	96
4.4 Συμπληρωματικότητα και Συνέργεια	99
5. Συμπεράσματα και Προτάσεις	104
5.1 Συμπεράσματα	104
5.2 Προτάσεις	105
6. Βιβλιογραφία	107

Εισαγωγικά

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται σε μακροπρόθεσμες αλλαγές στα κλιματικά πρότυπα της Γης, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας, των βροχοπτώσεων, των μοτίβων ανέμου και άλλων δεικτών. Οφείλεται κυρίως στην αύξηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ιδιαίτερα της καύσης ορυκτών καυσίμων και της αποψίλωσης των δασών. Επιστημονικές έρευνες έχουν αποδείξει ότι αδιαμφισβήτητα η κλιματική αλλαγή προκαλείται από τον άνθρωπο, με πολυάριθμες μελέτες που αποδίδουν την τάση της θέρμανσης στο ενισχυμένο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα ευρήματα της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή IPCC δείχνουν ότι οι παγκόσμιες θερμοκρασίες αυξάνονται με επιταχυνόμενο ρυθμό, οδηγώντας σε εκτεταμένες αλλαγές στο περιβάλλον.

Μία από τις πιο σημαντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας. Τα ρεκόρ καύσωνα καταρρίπτονται πιο συχνά και οι καύσωνες έχουν γίνει πιο έντονοι και παρατεταμένοι σε πολλές περιοχές. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλλει στο λιώσιμο των πάγων και των παγετώνων, οδηγώντας σε άνοδο της στάθμης της θάλασσας και θέτοντας απειλές για τις παράκτιες περιοχές και τα νησιά με χαμηλό υψόμετρο.

Αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων παρατηρούνται επίσης ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής. Σε ορισμένες περιοχές σημειώνονται συχνότερες και έντονες βροχοπτώσεις, οδηγώντας σε αυξημένο κίνδυνο πλημμύρας. Άλλες περιοχές αντιμετωπίζουν παρατεταμένες ξηρασίες, επηρεάζοντας αρνητικά τη γεωργία, τους υδάτινους πόρους και τα οικοσυστήματα.

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει επίσης τα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Τα είδη αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως αλλοιωμένα πρότυπα μετανάστευσης, διαταραγμένα ενδιαιτήματα και αυξημένοι κίνδυνοι εξαφάνισης. Κοραλλιογενείς ύφαλοι, δάση και άλλα οικοσυστήματα απειλούνται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, της οξίνισης των ωκεανών και των αλλαγών στα πρότυπα βροχοπτώσεων.

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής απαιτεί συλλογικές προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την προσαρμογή στο μεταβαλλόμενο κλίμα. Διεθνείς συμφωνίες όπως η Συμφωνία του Παρισιού στοχεύουν στον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη και στην ενίσχυση της παγκόσμιας συνεργασίας για τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι στρατηγικές μετριασμού περιλαμβάνουν τη μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, την προώθηση πρακτικών βιώσιμης χρήσης γης και την υιοθέτηση καθαρότερων τεχνολογιών. Τα μέτρα προσαρμογής περιλαμβάνουν την ενίσχυση της ανθεκτικότητας, την εφαρμογή

στρατηγικών μείωσης του κινδύνου καταστροφών και την ενσωμάτωση των κλιματικών θεμάτων στο σχεδιασμό και τη χάραξη πολιτικής.

Στρέφεται επομένως το ενδιαφέρον της αντικατάστασης της ενέργειας που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, με την ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, πολλές επιστημονικές μελέτες σε διεθνές επίπεδο έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη και ανάπτυξη συστημάτων εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο χερσαίο περιβάλλον.

Όμως το κόστος απόκτησης πόρων γης, καθώς και οι περιορισμένοι διαθέσιμοι χώροι για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις, σε συνδυασμό και με τις δεσμεύσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έστρεψαν το ενδιαφέρον συγκεκριμένα και προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από το θαλάσσιο περιβάλλον.

1. Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από το Θαλάσσιο Περιβάλλον

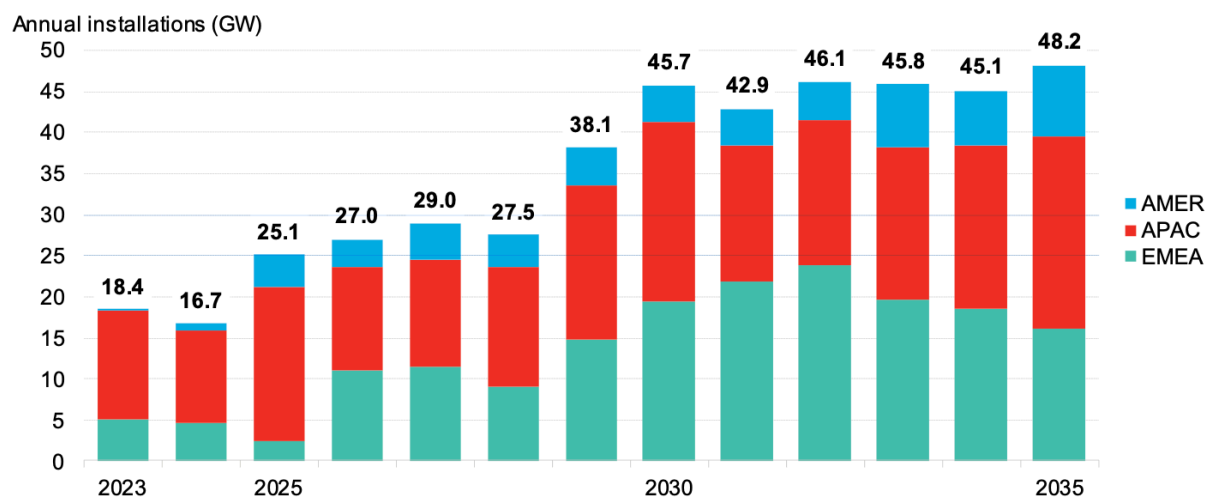
1.1 Υπεράκτια Αιολική Ενέργεια

Η θαλάσσια αιολική ενέργεια, γνωστή και ως υπεράκτια αιολική ενέργεια, είναι η ενέργεια που προέρχεται από την πνοή του ανέμου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας που διαθέτει τεράστιες δυνατότητες για παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η επιστημονική έρευνα έχει επικεντρωθεί σε διάφορες πτυχές της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης των πόρων, της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, της εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, του σχεδιασμού των θαλάσσιων αιολικών πάρκων και της ενσωμάτωσης του στο δίκτυο. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει η υπεράκτια αιολική ενέργεια έναντι της χερσαίας αιολικής ενέργειας είναι οι μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου λόγω των λιγότερων απωλειών, ενώ στη στεριά υπάρχουν περισσότερες απώλειες λόγω της τραχύτητας και των εμποδίων. Παράλληλα, στη θάλασσα η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα, ο διαθέσιμος χώρος είναι πολύ περισσότερος για εγκατάσταση αιολικών πάρκων ενώ τα ευνοϊκά σημεία στη ξηρά είναι ήδη κατελημμένα (Τ.Σουκισιάν). Σε αρκετές χώρες σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και στην Ευρώπη οι επενδύσεις στην υπεράκτια αιολική ενέργεια, έχουν αυξηθεί πάρα πολύ, παρόλα αυτά στη ξηρά γίνονται ακόμα περισσότερες λόγω του κόστους κατασκευής και συντήρησης αιολικών πάρκων.

Επιπλέον, είναι ευρέως γνωστό ότι η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο καθαρές και φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας, και σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, ο άνεμος δεν θα εξαντληθεί ποτέ. Όλες οι μορφές παραγωγής ενέργειας έχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά οι επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας είναι χαμηλές, τοπικές και διαχειρίσιμες. Αυτές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αμελητέες σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Η σημασία της αιολικής ενέργειας πηγάζει από τη φιλική συμπεριφορά της προς το περιβάλλον κι έτσι αναζητείται όπου είναι δυνατόν για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια με την ελπίδα ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση από ορυκτά καύσιμα θα μειωθεί. (M. Bilgili et al.,2012)

Η υπεράκτια αιολική ισχύς βρίσκεται σε συνεχή ετήσια αύξηση τουλάχιστον από το 2009. Το 2022, η παγκόσμια υπεράκτια αιολική ισχύς έφτασε τα 63.200 MW, σημειώθηκε αύξηση συγκρίνοντας με τον προηγούμενο χρόνο το 2021 που η εγκατεστημένη ισχύς ήταν 21.000 MW. Το 2023 οι υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις πρόκειται να φτάσουν τα 18,4 GW. Έξι αγορές θα προσθέσουν πάνω από 1 GW το 2023, συμπεριλαμβανομένης της Ταϊβάν, η οποία θα εγκαταστήσει πάνω από 2 GW νέας ισχύος για πρώτη φορά.

Global offshore wind installations, by region



Source: BloombergNEF. Note: AMER = Americas, APAC = Asia Pacific, EMEA = Europe, the Middle East and Africa.

Εικόνα 1: Παγκόσμιες υπεράκτιες εγκαταστάσεις

(Πηγή: https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2023/03/WFO_Global-Offshore-Wind-Report-2022.pdf)

Η BNEF περιμένει η ετήσια υπεράκτια αιολική ισχύς να φτάσει στα 45.7 GW το 2030. Υποστηριζόμενη από τις αγορές της Κίνας, Μεγάλης Βρετανίας, Γερμανίας και Ολλανδίας. Αναδυόμενες αγορές όπως αυτή των ΗΠΑ, της Ταϊβάν, Γαλλίας, Νότιας Κορέας, Πολωνία και Ιαπωνίας προβλέπεται να κάνουν σημαντικές συνεισφορές και η Νορβηγία, Ινδία, Ισπανία και Ελλάδα θα εγκαταστήσουν τα πρώτα τους project σε βάθος χρόνου δεκαετίας. Απο το 2030 και μετά, νέες αγορές θα συνεχίσουν να συνεισφέρουν και να χτίζουν, συμπεριλαμβανομένου της Κολομβίας, Βραζιλίας και Σουηδίας. Απο το 2031 μέχρι το 2035, η BNEF αναμένει εγκαταστάσεις κατα μέσο όρο ισχύος 45,6 GW ετησίως με άνω όριο τα 48.2 GW το 2035 όπου η ετήσια υπεράκτια αιολική ισχύς θα είναι 4 φορές μεγαλύτερη από εκείνη το 2022.

1.2 Υπεράκτια Ηλιακή Ενέργεια

Ο ήλιος αποτελείται από καυτό πλάσμα συνυφασμένο με μαγνητικά πεδία. Η ενέργεια παράγεται από την πυρηνική σύντηξη πυρήνων υδρογόνου σε ήλιο. Η επιφανειακή θερμοκρασία που επιτυγχάνεται από τον ήλιο είναι 5762 K (Kreith F, Kreider JF, 1978). Η συνολική ενεργειακή απόδοση του ήλιου είναι $3,8 \times 10^{20}$ MW, ένα μικρό ποσό της οποίας $1,7 \times 10^{14}$ kW της συνολικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αναχαιτίζεται από τη Γη. Ωστόσο, η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας για ένα χρόνο είναι μόνο 30 λεπτά ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει στη Γη. Ολόκληρη η ηλιακή ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο δεν φτάνει στη Γη λόγω της ατμοσφαιρικής απορρόφησης της περίθλασης και της σκέδασης.

Καθώς το 70% περίπου της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από νερό, η υπεράκτια ηλιακή ενέργεια μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην ανάγκη σε παγκόσμιο επίπεδο, να επιταχύνουν οι επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι υπεράκτιες πλωτές ηλιακές τεχνολογίες, μπορούν να αντικαταστήσουν την ανάγκη εγκατάστασης περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πολύτιμη γη. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για περιοχές όπου onshore κρίνονται ανεπιθύμητες για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, λόγω αστικοποίησης, γεωργικής χρήσης κλπ. Άλλωστε η ανάπτυξη χερσαίων τεχνολογιών πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική, αντιμετωπίζει όλο και περισσότερα προβλήματα σύνδεσης στο δίκτυο λόγω συμφόρησης, με αποτέλεσμα υψηλό κόστος έργων.

Παρουσιάζονται έτσι κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα στο υδάτινο περιβάλλον έναντι της ξηράς ως προς την τοποθέτηση πλωτών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αρχικά τα υπεράκτια ηλιακά πάνελ μπορούν να επωφεληθούν από την ψυκτική επίδραση του νερού, η οποία βοηθά στη μείωση της θερμοκρασίας των πάνελ και στην αύξηση της απόδοσης τους. Οι ψυχρότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγή ενέργειας συγκριτικά με τα παραδοσιακά πάνελ σε χερσαίες περιοχές. Παράλληλα όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιώντας υδάτινες επιφάνειες, η υπεράκτια ηλιακή ενέργεια προσφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για την επέκταση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς τη χρήση πολύτιμων χερσαίων εδαφών. Μπορούν επίσης να επωφεληθούν από το ανεμπόδιο ηλιακό φως και τη μειωμένη σκίαση, καθώς δεν υπάρχουν ψηλά κτίρια ή βλάστηση που μπορεί να σκιάσει τα πάνελ. Οι πλωτές ηλιακές εγκαταστάσεις μπορούν να βοηθήσουν στην εξοικονόμηση νερού μειώνοντας την εξάτμιση από ταμιευτήρες και λίμνες. Τέλος, οι υπεράκτιες ηλιακές εγκαταστάσεις είναι λιγότερο ορατές από την ακτή σε σύγκριση με μεγάλης κλίμακας χερσαία ηλιακά πάρκα, γεγονός το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση οπτικών ανησυχιών που σχετίζονται με την ανάπτυξη ηλιακής ενέργειας σε γραφικές περιοχές. Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από έντονη ηλιοφάνεια καθόλη τη διάρκεια του χρόνου και υπάρχουν πολλοί ταμιευτήρες νερού, τεχνητές δεξαμενές και λίμνες επομένως τα πλωτά

φωτοβολταϊκά αποτελούν ιδανική λύση για την Ελλάδα. Πρόσφατη μελέτη του ΕΚΛΕΘΕ αποδεικνύει ότι ο συνδυασμός πλωτών φωτοβολταϊκών και υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη θάλασσα (υβριδική εγκατάσταση) χαρακτηρίζεται από μεγάλη συμπληρωματικότητα και υψηλό βαθμό συνέργειας μεταξύ αυτών των δύο πηγών (Τ.Σουκισιάν).

Το μεγαλύτερο πλωτό φωτοβολταϊκό πάρκο στον κόσμο για το 2022 βρίσκεται στην Κίνα και συγκεκριμένα στο Shandong με ισχύ 320 MW.



Εικόνα 2: Το μεγαλύτερο φωτοβολταϊκό πάρκο στον κόσμο για το 2022

(Πηγή: <https://www.ysgsolar.com/blog/5-largest-floating-solar-farms-world-2022-ysg-solar>)

1.3 Κυματική ενέργεια

Η κυματική ενέργεια είναι η ενέργεια η οποία μπορεί να συλλεχθεί από την κινητική και δυναμική ενέργεια των, ανεμογενών κυρίως, θαλάσσιων κυματισμών. Η γένεση καθώς και τα χαρακτηριστικά των κυματισμών διαμορφώνονται κατά κύριο λόγο από τις επικρατούσες ανεμολογικές συνθήκες. Έχει διαπιστωθεί πως η ενέργεια των κυματισμών συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα, το μήκος και τη διάρκεια πνοής του ανέμου. Τα ανεμολογικά αυτά χαρακτηριστικά καθορίζουν παραμέτρους όπως το σημαντικό ύψος και την περίοδο κύματος και την κατεύθυνση των κυματισμών και είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τους ενεργειακούς υπολογισμούς, (Soukissian et al.,2017).

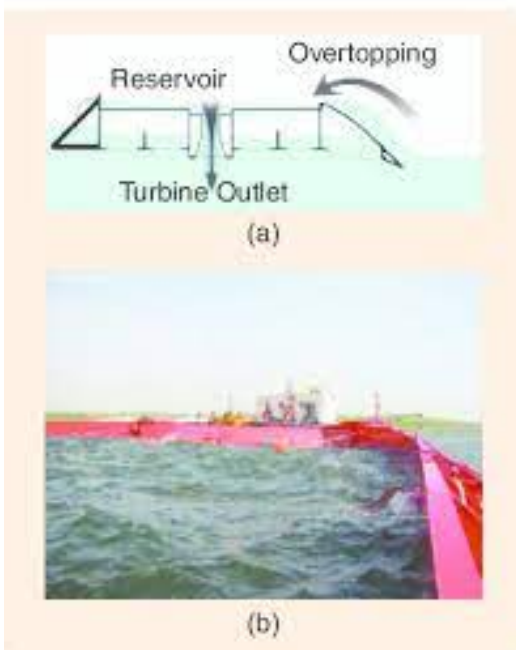
Ανάλογα με τους σεληνιακούς κύκλους, τις παλίρροιας, τους ανέμους και τον καιρό, τα κύματα μπορεί να ποικίλλουν σε μέγεθος και ισχύ. Καθώς τα κύματα κυλούν μέσα στον ωκεανό, δημιουργούν κινητική ενέργεια ή κίνηση. Αυτή η κίνηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία στροβίλων, οι οποίοι, με τη σειρά τους, δημιουργούν ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια και ισχύ. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τρόποι αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιούν την κίνηση προς τα πάνω και προς τα κάτω των κυμάτων για να τροφοδοτήσουν έμβολα/γεννήτριες στροφής.

Αποδεδειγμένα, η κυματική ενέργεια εξαρτάται κατά πολύ από την ταχύτητα του ανέμου, το μήκος και τη περίοδο. Η κυματική ενέργεια έχει πολλά πλεονεκτήματα, ένα εξ αυτών αποτελεί το γεγονός ότι τα κύματα παρουσιάζουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα μεταξύ άλλων θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ενεργειακή απώλεια είναι χαμηλή ακόμα και για μεγάλες αποστάσεις διάδοσης κυμάτων και η εποχιακή μεταβλητότητα του κύματος ως πόρου και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλά συσχετιζόμενες.

Συγκρινόμενη με την υπεράκτια αιολική ενέργεια, η κυματική ενέργεια είναι συνεκτική και χωρικά συγκεντρωμένη. Από την άλλη πλευρά, τα κύματα παρουσιάζουν μια τυχαία μεταβλητότητα σε πολλές χρονικές κλίμακες, ενώ η κυματική προβλεψιμότητα βασίζεται στην προβλεψιμότητα του ανέμου κι έτσι είναι συσχετιζόμενη με σφάλματα και αβεβαιότητα. Επιπλέον, πολλές υδροδυναμικές διεργασίες προκαλούνται από κυματικά φαινόμενα, όπως διάθλαση, δυσκολεύοντας έτσι την μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, αποφέροντας κατασκευαστικές και οικονομικές προκλήσεις.

Για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι μετατροπέων κυματικής ενέργειας (WEC). Σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο Journal of Renewable and Sustainable Energy (Sharma et al., 2018), αυτές οι συσκευές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις κύριες ομάδες: σημειακοί απορροφητές, εξασθενητές κυματισμών, παλλόμενες υδάτινες στήλες και συσκευές υπερχείλισης. Κάθε τύπος WEC έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή

της τεχνολογίας εξαρτάται από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, το βάθος του νερού και την παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 3: Κυριότερες μηχανές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας

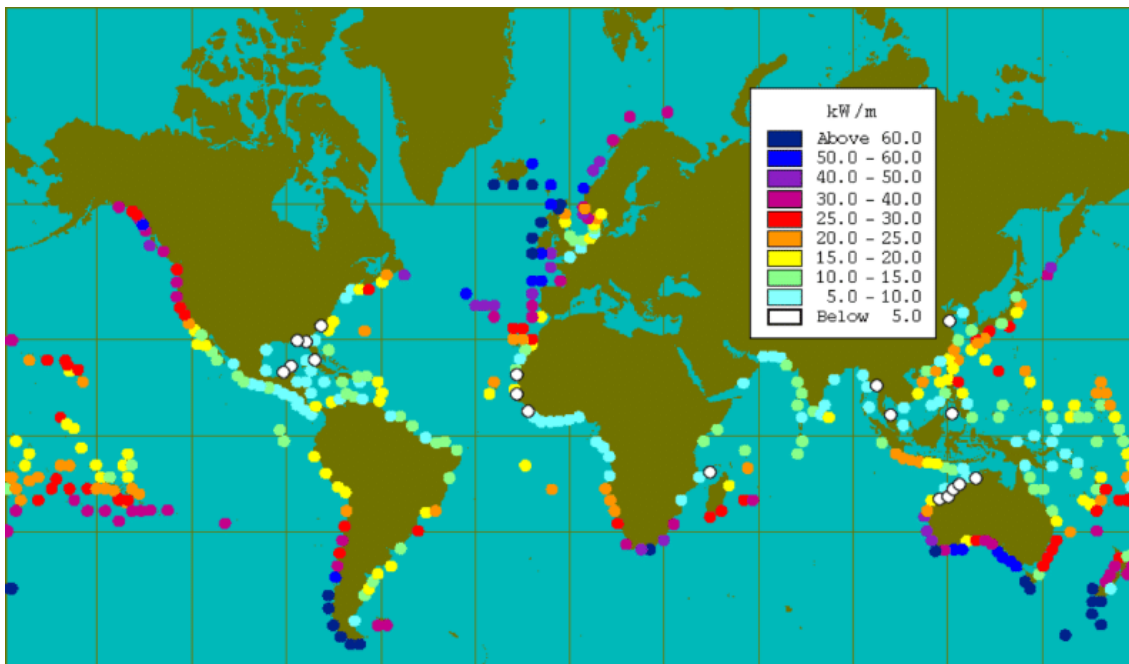
Πηγή: Ted K. A. Brekken et al., (20122)

Μια άλλη σημαντική πτυχή της μετατροπής της κυματικής ενέργειας είναι ο έλεγχος και η ρύθμιση ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό IEEE Transactions on Sustainable Energy (Rodriguez et al., 2017), οι συγγραφείς πρότειναν μια στρατηγική ελέγχου για ένα σημείο απορρόφησης WEC, το οποίο βελτιστοποιεί τη δέσμευση ενέργειας και μετριάξει τον αντίκτυπο των

σφαλμάτων του δικτύου. Η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου δοκιμάστηκε σε προσομοιώσεις και βρέθηκε ότι είναι αποτελεσματική στη βελτίωση της δέσμευσης ενέργειας και στη μείωση των επιπτώσεων των σφαλμάτων του δικτύου.

Η δυνατότητα της κυματικής ενέργειας ως πηγή καθαρής ενέργειας έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον από ερευνητές και επενδυτές. Υπάρχουν πολλά εμπόδια στην εμπορευματοποίηση της κυματικής ενέργειας, όπως το υψηλό κόστος κεφαλαίου, η έλλειψη υποστήριξης πολιτικής και η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη. Ωστόσο, σημειώσαν επίσης ότι αρκετά έργα κυματικής ενέργειας βρίσκονται επί του παρόντος σε λειτουργία ή υπό ανάπτυξη, γεγονός που δείχνει το αυξανόμενο ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία.

Συνολικά, η κυματική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να παρέχει μια σημαντική πηγή καθαρής ενέργειας και να μειώσει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για να ξεπεραστούν οι τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις της μετατροπής της κυματικής ενέργειας και να καταστεί



Εικόνα 4: Μέση ετήσια ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα πλάτους κορυφής κύματος (kW/m)

Πηγή: <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/ocean.shtml>

δυνατή η εμπορευματοποίηση. Οι μελέτες που συζητήθηκαν παραπάνω παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας και τις δυνατότητες για μελλοντική ανάπτυξη της.

Εικόνα: Μέση ετήσια ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα πλάτους κορυφής κύματος (kW/m)

Η κυματική ενέργεια είναι μια αναδυόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που έχει τη δυνατότητα να συμβάλει σημαντικά στο ενεργειακό μείγμα παράκτιων χωρών όπως η Ελλάδα. Συγκεκριμένα, η Ελλάδα έχει σημαντικό δυναμικό κυματικής ενέργειας, ειδικά στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος. Το δυναμικό κυματικής ενέργειας της Ελλάδας είναι περίπου 30 TWh/έτος, που ισοδυναμεί με το 8% της τρέχουσας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας.

Παρά το σημαντικό δυναμικό κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα, η ανάπτυξη της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας είναι περιορισμένη. Παρόλο που η Ελλάδα διαθέτει ευνοϊκό ρυθμιστικό πλαίσιο και καλές υποδομές για τις θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η έλλειψη οικονομικής υποστήριξης και το υψηλό κόστος της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας αποτέλεσαν σημαντικά εμπόδια στην ανάπτυξή της. (Kaldellis et al., 2019)

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές πρωτοβουλίες για την προώθηση της ανάπτυξης της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα. Αναφορικά με τα εμπόδια και τις ευκαιρίες για την εμπορευματοποίηση της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα, η υλοποίηση πιλοτικών έργων, η δημιουργία ενός υποστηρικτικού ρυθμιστικού πλαισίου και η συνεργασία μεταξύ ακαδημαϊκού κόσμου, βιομηχανίας και κυβέρνησης μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα.

Συμπερασματικά, η Ελλάδα διαθέτει σημαντικό κυματικό ενεργειακό δυναμικό που μπορεί να συμβάλει στο ενεργειακό μείγμα της χώρας και να μειώσει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, η ανάπτυξη της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα έχει περιοριστεί λόγω διαφόρων εμποδίων, όπως το υψηλό κόστος της τεχνολογίας και η έλλειψη οικονομικής υποστήριξης. Οι μελέτες που συζητήθηκαν παραπάνω παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα και τις δυνατότητες μελλοντικής ανάπτυξής της.

1.4 Παλιρροιακή ενέργεια

Η παλιρροιακή ενέργεια είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που αξιοποιεί την κινητική ενέργεια των παλιρροιακών ρευμάτων και των κυμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες παλιρροιακής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: παλιρροιακά φράγματα και παλιρροϊκούς στρόβιλους. Τα παλιρροϊκά φράγματα είναι μεγάλης κλίμακας κατασκευές που συσσωρεύουν νερό κατά τη διάρκεια της παλίρροιας και το απελευθερώνουν μέσω των στροβίλων κατά την άμπωτη, ενώ οι παλιρροϊκοί στρόβιλοι είναι συσκευές που χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια των παλιρροιακών ρευμάτων για να περιστρέψουν τα πτερύγια και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παλιρροιακή ενέργεια ως βιώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Το δυναμικό της παλιρροιακής ενέργειας στην Ελλάδα έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές. Η Ελλάδα έχει σημαντικό παλιρροιακό ενεργειακό δυναμικό, ειδικά στο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος. Η ανάπτυξη της παλιρροιακής ενέργειας στην Ελλάδα μπορεί να συμβάλει στην ενεργειακή ασφάλεια της χώρας και να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Τα τελευταία χρόνια έχουν υπάρξει αρκετές πρωτοβουλίες για την προώθηση της ανάπτυξης της παλιρροιακής ενέργειας στην Ελλάδα. Η υλοποίηση ενός έργου παλιρροϊκής ενέργειας στη Χίο μπορεί να προσφέρει μια βιώσιμη πηγή ενέργειας για το νησί και να συμβάλει στην τοπική οικονομία. Η μελέτη υπογραμμίζει επίσης τη σημασία της δέσμευσης των ενδιαφερομένων και την ανάγκη για ένα υποστηρικτικό ρυθμιστικό πλαίσιο για την επιτυχή υλοποίηση έργων παλιρροιακής ενέργειας στην Ελλάδα.

Συμπερασματικά, η παλιρροιακή ενέργεια είναι μια πολλά υποσχόμενη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που μπορεί να συμβάλει στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα και να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι μελέτες που συζητήθηκαν παραπάνω παρέχουν πολύτιμες γνώσεις για τις δυνατότητες της παλιρροιακής ενέργειας στην Ελλάδα και τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ανάπτυξή της. Παρά τα εμπόδια, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παλιρροιακή ενέργεια στην Ελλάδα και έχουν αναληφθεί αρκετές πρωτοβουλίες για την προώθησή της. Με το σωστό ρυθμιστικό πλαίσιο και οικονομική υποστήριξη, η παλιρροιακή ενέργεια έχει τη δυνατότητα να γίνει σημαντική πηγή καθαρής ενέργειας για την Ελλάδα.

Ο τομέας της παλιρροιακής ενέργειας στην Ευρώπη αυξάνεται σταθερά, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 28,5 MW μέχρι το τέλος του 2019. Επίσης οι δυνατότητες της παλιρροιακής ενέργειας στην Ευρώπη είναι μεγάλες, με εκτιμώμενο τεχνικό δυναμικό έως και 100 GW, το οποίο θα μπορούσε παρέχουν έως και το 10% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο μέσος συντελεστής χωρητικότητας των παλιρροιακών στροβίλων στην Ευρώπη ήταν 20,8%, υποδηλώνοντας σχετικά υψηλό επίπεδο απόδοσης. Η μελέτη προτείνει επίσης ότι η χρήση πιο προηγμένων τεχνολογιών, όπως οι τουρμπίνες οριζόντιου άξονα, θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοση και την αξιοπιστία των παλιρροιακών ενεργειακών συστημάτων.

1.5 Ωκεάνια Θερμική ενέργεια

Η θερμική ενέργεια των ωκεανών αφορά την ενέργεια που συσσωρεύεται στους ωκεανούς εξαιτίας των τεράστιων ποσών ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού επιφανειακού νερού και του κρύου βαθέως νερού στον ωκεανό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να παρέχει σημαντικό μερίδιο της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειακών και των βαθέων υδάτων είναι η μεγαλύτερη.

Μία από τις κύριες προκλήσεις στη θερμική ενέργεια των ωκεανών είναι ο σχεδιασμός ενός αποδοτικού και οικονομικά αποδοτικού συστήματος για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η πιο κοινή προσέγγιση είναι η χρήση ενός συστήματος μετατροπής θερμικής ενέργειας ωκεανού (OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion), το οποίο αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας, μια μονάδα παραγωγής ενέργειας και έναν σωλήνα κρύου νερού. Ο εναλλάκτης θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα από το ζεστό επιφανειακό νερό σε ένα λειτουργικό ρευστό, όπως η αμμωνία ή το προπάνιο, το οποίο εξατμίζεται και οδηγεί έναν στρόβιλο για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ο σωλήνας κρύου νερού αντλεί το κρύο βαθύ νερό από τον ωκεανό στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου απορροφά τη θερμότητα και επιστρέφει στον ωκεανό.

Η Μεσόγειος Θάλασσα έχει σημαντικές δυνατότητες για OTEC, με δυναμική ισχύ εξόδου έως και 17 GW, καθώς χαρακτηρίζεται από ζεστά επιφανειακά νερά και σχετικά κρύα βαθιά νερά, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική διαβάθμιση θερμοκρασίας. Αυτή η διαβάθμιση θερμοκρασίας μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας συστήματα OTEC.

Το ετήσιο ενεργειακό δυναμικό του OTEC στις ελληνικές θάλασσες θα μπορούσε να φτάσει έως και τις 5 TWh. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των συστημάτων του OTEC και για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Ο OTEC θα μπορούσε να είναι μια σημαντική συμβολή στους στόχους της Ελλάδας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίοι στοχεύουν στην αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της χώρας.

1.6 Ωσμωτική Ενέργεια

Η Ωσμωτική ενέργεια, είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που αξιοποιεί την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία ανάμειξης δύο διαλυμάτων με διαφορετικές αλατότητες. Μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμη σε περιοχές που υπάρχουν θαλάσσια και γλυκά νερά, όπως για παράδειγμα εκβολές ποταμών σε θαλάσσιες λεκάνες. Στηρίζεται στην αξιοποίηση της ενέργειας που απελευθερώνεται όταν αναμιγνύονται δύο διαλύματα διαφορετικής αλατότητας, όπως το θαλασσινό και το γλυκό νερό. Αυτή η διαδικασία ανάμειξης δημιουργεί μια διαφορά πίεσης σε μια ημιπερατή μεμβράνη, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό όπως συστήματα όσμωσης καθυστερημένης πίεσης (PRO) ή αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (RED).

Η ωσμωτική ενέργεια έχει πολλά πλεονεκτήματα ως θαλάσσια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Πρώτον, είναι μια πλήρως ανανεώσιμη και άφθονη πηγή ενέργειας, καθώς το θαλασσινό και το γλυκό νερό αναμειγνύονται συνεχώς στη φύση. Δεύτερον, η ενεργειακή πυκνότητα της οσμωτικής ενέργειας είναι αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότερη από άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, γεγονός που την καθιστά ελκυστική επιλογή για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, η οσμωτική ενέργεια δεν παράγει εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ή άλλους ρύπους, γεγονός που την καθιστά φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας.

Ωστόσο, η οσμωτική ενέργεια αντιμετωπίζει επίσης αρκετές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να καταστεί βιώσιμη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου της κατασκευής και λειτουργίας συστημάτων οσμωτικής ενέργειας. Μια άλλη πρόκληση είναι η σχετικά χαμηλή απόδοση των συστημάτων οσμωτικής ενέργειας, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες όπως τα υλικά της μεμβράνης και ο ρυθμός ροής των διαλυμάτων. Τέλος, υπάρχουν επίσης ανησυχίες σχετικά με τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων οσμωτικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας, ιδίως όσον αφορά την αλλαγή της αλατότητας του θαλασσινού νερού στις παράκτιες περιοχές.

Πολλά πιλοτικά έργα έχουν ξεκινήσει σε όλο τον κόσμο για να δοκιμαστεί η σκοπιμότητα της οσμωτικής ενέργειας και η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους των συστημάτων οσμωτικής ενέργειας. Για παράδειγμα, στη Νορβηγία έχει ξεκινήσει ένα πιλοτικό έργο που χρησιμοποιεί τεχνολογία PRO, το οποίο στοχεύει να καταδείξει την εμπορική βιωσιμότητα της οσμωτικής ενέργειας ως ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Επιπλέον, αρκετές ερευνητικές μελέτες έχουν διερευνήσει τη χρήση νέων υλικών μεμβράνης και διαμορφώσεων για τη βελτίωση της απόδοσης συστημάτων οσμωτικής ενέργειας.

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η οσμωτική ενέργεια έχει μεγάλες δυνατότητες ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Για παράδειγμα, οι Soukissian et al. (2019) διεξήγαγε μια μελέτη σχετικά με το δυναμικό της οσμωτικής ενέργειας στο Αιγαίο Πέλαγος και διαπίστωσε ότι θα μπορούσε να παράγει έως και 16 GW ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως, αντιπροσωπεύοντας σημαντική συμβολή στο ενεργειακό μείγμα της περιοχής.

Διάφορες μελέτες έχουν γίνει για την απόδοση ενός υβριδικού συστήματος RED-PRO, διαπιστώνοντας ότι θα μπορούσε να επιτύχει υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα RED ή PRO και μόνο.

Συνολικά, η οσμωτική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να παρέχει μια σημαντική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές με μεγάλες διαφορές στην αλατότητα μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού. Η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα είναι πιθανό να οδηγήσει σε βελτιωμένες τεχνολογίες και αυξημένη εμπορική βιωσιμότητα στο μέλλον.

1.7 Μειονεκτήματα και Περιορισμοί Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

Ένας σημαντικός περιορισμός της θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας είναι η διαλείπουσα και μεταβλητή φύση της. Η κυματική και η παλιρροιακή ενέργεια, για παράδειγμα, εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και η ενεργειακή τους απόδοση μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις. Ως αποτέλεσμα, η αποθήκευση ενέργειας και η ενσωμάτωση στο δίκτυο μπορεί να είναι προκλητική και ενδέχεται να απαιτούνται εφεδρικές πηγές ενέργειας. Ομοίως, η θερμική ενέργεια των ωκεανών και η οσμωτική ενέργεια απαιτούν διαφορά θερμοκρασίας ή κλίση αλατότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η διαθεσιμότητά τους μπορεί να περιοριστεί σε συγκεκριμένες τοποθεσίες.

Ένας άλλος περιορισμός της θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου που σχετίζεται με την εγκατάσταση και τη συντήρηση. Η κατασκευή και η λειτουργία θαλάσσιων συσκευών ανανεώσιμης ενέργειας, όπως οι κυματιστικοί και παλιρροϊκοί στρόβιλοι, μπορεί να είναι δαπανηρή, ιδιαίτερα σε σκληρά θαλάσσια περιβάλλοντα. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής των συσκευών θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η

διάβρωση, η βιορρύπανση και οι ακραίες καιρικές συνθήκες, που μπορεί να αυξήσουν το κόστος συντήρησης και επισκευής.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις προκαλούν επίσης ανησυχία για τη θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια. Η κατασκευή και η λειτουργία συσκευών θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί δυνητικά να επηρεάσει τα θαλάσσια οικοσυστήματα και την άγρια ζωή. Για παράδειγμα, οι παλιρροϊκοί στρόβιλοι μπορούν να αποτελέσουν κίνδυνο για τα θαλάσσια θηλαστικά και οι συσκευές κυματικής ενέργειας μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των ψαριών και άλλων θαλάσσιων ειδών. Η προσεκτική επιλογή τοποθεσίας, οι εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τα προγράμματα παρακολούθησης μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση αυτών των επιπτώσεων.

Η πρόσβαση σε υποδομές μεταφοράς και διανομής είναι μια άλλη πρόκληση για τη θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια. Πολλές πιθανές τοποθεσίες θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βρίσκονται σε απομακρυσμένες ή υπεράκτιες τοποθεσίες, γεγονός που μπορεί να κάνει τη σύνδεση με την υπάρχουσα υποδομή μεταφοράς και διανομής δύσκολη και δαπανηρή. Επιπλέον, το κόστος αναβάθμισης και επέκτασης της υποδομής μπορεί να μην είναι οικονομικά εφικτό, ιδιαίτερα για μικρότερης κλίμακας έργα θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ρυθμιστικά και πολιτικά εμπόδια μπορούν επίσης να εμποδίσουν την ανάπτυξη της θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας. Η έλλειψη σαφών κανονιστικών πλαισίων και υποστηρικτικών πολιτικών μπορεί να δημιουργήσει αβεβαιότητα και καθυστέρηση στην ανάπτυξη του έργου. Επιπλέον, η θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να αντιμετωπίσει τον ανταγωνισμό από άλλες πηγές ενέργειας που έχουν ήδη καθιερωθεί και επιδοτηθεί.

Συγκεντρωτικά οι κυριότεροι περιορισμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να είναι:

1. Υψηλό κόστος κεφαλαίου και συντήρησης: Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου και συντήρησης που συνδέεται με την τεχνολογία. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για υπεράκτιες εγκαταστάσεις, όπου το σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει σημαντική φθορά στον εξοπλισμό. Μια μελέτη των Olugbade et al. (2021) διαπίστωσε ότι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης μετατροπών κυματικής ενέργειας αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την ευρεία υιοθέτησή τους.
2. Διαλείπουσα και μεταβλητότητα: Η θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια υπόκειται στην εγγενή μεταβλητότητα του ωκεάνιου περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διακοπτόμενη παραγωγή ενέργειας. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για

τεχνολογίες όπως η κυματική και η παλιρροιακή ενέργεια, οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα καιρικά μοτίβα και τις παλίρροιας.

3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Ενώ η θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια θεωρείται καθαρή πηγή ενέργειας, η εγκατάσταση και η λειτουργία της υποδομής μπορεί να έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, η κατασκευή υπεράκτιων ανεμογεννητριών μπορεί να διαταράξει τα θαλάσσια οικοσυστήματα και να αλλάξει τους οικοτόπους του βυθού.
4. Τεχνολογική ανωριμότητα: Πολλές τεχνολογίες θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βρίσκονται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης και δεν έχουν ακόμη εμπορευματοποιηθεί πλήρως. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε τεχνικές προκλήσεις και αβεβαιότητες σχετικά με την απόδοση και την αξιοπιστία της τεχνολογίας.
5. Έλλειψη δικτυακής υποδομής: Η θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια βρίσκεται συχνά σε απομακρυσμένες υπεράκτιες τοποθεσίες, γεγονός που μπορεί να παρουσιάσει προκλήσεις όσον αφορά τη σύνδεση της ενέργειας με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις και πρόσθετο κόστος στην εγκατάσταση της απαραίτητης υποδομής.
6. Ανησυχίες για τη ναυσιπλοΐα και την ασφάλεια: Οι εγκαταστάσεις θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να προκαλέσουν ανησυχίες για τη ναυσιπλοΐα και την ασφάλεια για πλοία στην περιοχή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμούς στην ανάπτυξη υπεράκτιων έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.7.1 Περιοχές Natura 2000

Το Natura 2000 είναι ένα δίκτυο προστατευόμενων περιοχών που ιδρύθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και την προστασία οικοτόπων και ειδών ευρωπαϊκής σημασίας. Είναι ένα από τα πιο εκτεταμένα δίκτυα προστατευόμενων περιοχών παγκοσμίως, καλύπτοντας πάνω από το 18% της χερσαίας έκτασης της ΕΕ και περισσότερο από το 6% της θαλάσσιας επικράτειάς της. Το δίκτυο αποτελείται από Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για πτηνά και Τοποθεσίες Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ) για άλλα είδη και ενδιαίτηματα.

Το δίκτυο Natura 2000 στοχεύει στη διατήρηση ή αποκατάσταση φυσικών οικοτόπων και ειδών που προκαλούν ανησυχία για τη διατήρηση, διασφαλίζοντας παράλληλα τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων. Τα κράτη μέλη της ΕΕ είναι υπεύθυνα για τον προσδιορισμό και τον καθορισμό περιοχών προς ένταξη στο δίκτυο, καθώς και για την εφαρμογή μέτρων για την προστασία και τη διαχείριση αυτών των περιοχών.

Οι τοποθεσίες Natura 2000 περιλαμβάνουν μια ποικιλία χερσαίων, γλυκών και θαλάσσιων οικοτόπων, όπως δάση, λιβάδια, υγρότοποι, ποτάμια, λίμνες, παράκτιες ζώνες και περιοχές βαθέων υδάτων. Αυτά τα ενδιαίτηματα παρέχουν βασικές υπηρεσίες οικοσυστήματος, όπως η δέσμευση άνθρακα, ο καθαρισμός του νερού, η διατήρηση του εδάφους και η κλιματική ρύθμιση. Υποστηρίζουν επίσης ένα ευρύ φάσμα φυτικών και ζωικών ειδών, πολλά από τα οποία απειλούνται ή κινδυνεύουν με εξαφάνιση.

Το δίκτυο Natura 2000 αντιμετώπισε ορισμένες επικρίσεις και προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων ανησυχιών για το κόστος και την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του, συγκρούσεις με άλλες χρήσεις γης και αναπτυξιακές δραστηριότητες και δυσκολίες στην εξισορρόπηση των στόχων διατήρησης με τις κοινωνικοοικονομικές ανάγκες. Ωστόσο, το δίκτυο προσφέρει επίσης πολλά οφέλη, όπως η προώθηση του οικοτουρισμού, η ενίσχυση της ευαισθητοποίησης και της εκπαίδευσης του κοινού και η συμβολή στην προστασία της παγκόσμιας βιοποικιλότητας.

Πολλές τοποθεσίες Natura 2000 βρίσκονται σε περιοχές που είναι επίσης κατάλληλες για την ανάπτυξη έργων θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό δημιουργεί μια πιθανή σύγκρουση μεταξύ της ανάγκης προστασίας αυτών των τοποθεσιών και της ανάγκης παραγωγής καθαρής ενέργειας. Η ανάπτυξη έργων θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εντός ή κοντά σε τοποθεσίες Natura 2000 μπορεί να έχει αρνητικές παραμέτρους στους οικοτόπους και τα είδη που στοχεύει να προστατεύσει το δίκτυο.

Για παράδειγμα, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μπορούν να θέτουν σε κίνδυνο τα αποδημητικά πουλιά που πετούν στην περιοχή, καθώς και τα θαλάσσια θηλαστικά και τα ψάρια που μπορούν να επηρεαστούν από υποθαλάσσιο θόρυβο και κραδασμούς. Οι συσκευές κυματικής ενέργειας επίσης να έχουν φυσικό αντίκτυπο στους θαλάσσιους οικοτόπους και τα οικοσυστήματα, αλλάζοντας την κατανομή των ειδών και διαταράσσοντας την ισορροπία του οικοσυστήματος.

Σύμφωνα με αυτά τα έγγραφα, η διαδικασία εγκατάστασης εφαρμογών ανανεώσιμης ενέργειας σε περιοχές Natura 2000 περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα βήματα:

1. Διεξαγωγή ενδελεχούς περιβαλλοντικής εκτίμησης για την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων του έργου στην τοποθεσία Natura 2000 και στη βιοποικιλότητά της.
2. Συνεργασία με τα ενδιαφερόμενα μέρη, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών κοινοτήτων, των μη κυβερνητικών οργανώσεων και των σχετικών αρχών, για να διασφαλιστεί ότι λαμβάνονται υπόψη οι ανησυχίες και οι προοπτικές.
3. Προσδιορισμός πιθανών μέτρων μετριασμού για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στην τοποθεσία Natura 2000.

4. Λήψη των απαραίτητων αδειών και εγκρίσεων από τις αρμόδιες αρχές.
5. Παρακολούθηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του έργου κατά τη διάρκεια και μετά την κατασκευή για να διασφαλιστεί ότι οι τυχόν αρνητικές επιπτώσεις ελαχιστοποιούνται και τα μέτρα μετριασμού είναι αποτελεσματικά.

1.7.2 Αλληλοσυγκρουόμενες χρήσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος

- Η αποδοχή από την κοινωνία: Μπορεί να υπάρξει σύγκρουση μεταξύ των τοπικών κοινοτήτων και των κατασκευαστών σχετικά με την εγκατάσταση έργων θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η αλιεία ή άλλες παραδοσιακές χρήσεις της θάλασσας είναι σημαντικές. Ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν ότι η δέσμευση και η συμμετοχή της κοινότητας μπορεί να συμβάλει στη μείωση των συγκρούσεων και στην αύξηση της αποδοχής, ενώ άλλες προτείνουν ότι τα οφέλη των έργων θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να μην είναι ομοιόμορφα κατανομημένα. που οδηγεί σε συγκρούσεις και δυσαρέσκεια.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Ενώ οι τεχνολογίες θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θεωρούνται γενικά φιλικές προς το περιβάλλον, μπορούν να έχουν επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα και την άγρια ζωή. Μπορεί να προκύψουν συγκρούσεις μεταξύ προγραμματιστών, ρυθμιστικών αρχών και περιβαλλοντικών ομάδων σχετικά με την έκταση και τη σημασία αυτών των επιπτώσεων, καθώς και τα μέτρα που λαμβάνονται για τον μετριασμό τους. Ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν ότι τα έργα θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν πράγματι να έχουν θετικά οικολογικά αποτελέσματα, όπως η παροχή οικοτόπου για θαλάσσια είδη αλλά άλλες μελέτες τονίζουν την ανάγκη για προσεκτική επιλογή τοποθεσίας και παρακολούθηση για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων.
- Οικονομική βιωσιμότητα: Μπορεί επίσης να προκύψουν αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα των έργων θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ορισμένες μελέτες προτείνουν ότι αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη, όπως η δημιουργία θέσεων εργασίας και η τοπική οικονομική ανάπτυξη, ενώ άλλες επισημαίνουν το υψηλό αρχικό κόστος και τις αβέβαιες αποδόσεις των επενδύσεων ως σημαντικές προκλήσεις.

2. Ανεμογεννήτριες και Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

Οι ανεμογεννήτριες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Τα βασικά της μέρη είναι η έλικα με τα πτερύγια της (συνήθως δυο έως και τέσσερα πτερύγια) και μια ηλεκτρογεννήτρια συζευγμένη με τον άξονα περιστροφής της έλικας. Ο άνεμος ρέει γύρω από τα αεροδυναμικά πτερύγια και η παραγόμενη δυναμική άνωση έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπής στρέψης η οποία εφαρμόζεται στον άξονα της έλικας. Η περιστροφή του άξονα κινεί την ηλεκτρογεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ισχύ.

Η ανεμογεννήτρια είναι τοποθετημένη σε ένα πύργο σημαντικού ύψους, ώστε να εκτίθεται σε άνεμο όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ταχύτητας και ομαλότερης ροής. Επειδή η διεύθυνση του ανέμου σε μια περιοχή μεταβάλλεται συχνά, η ανεμογεννήτρια πρέπει να στρέφεται ώστε το επίπεδο περιστροφής της έλικας να είναι πάντα κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου. Ένα ανεμόμετρο τοποθετημένο στον πύργο μεταφέρει συνεχώς πληροφορίες για την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου σε μια ηλεκτρική μονάδα, η οποία αναλαμβάνει τη διόρθωση της θέσης της ανεμογεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες με βάση το σχεδιασμό και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που διαθέτουν. Διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και κατακόρυφου άξονα σύμφωνα με τη διεύθυνση περιστροφής των πτερυγίων. Βασικό χαρακτηριστικό κάθε συσκευής αποτελεί η καμπύλη ισχύος, με τους αντίστοιχους συντελεστές που παρέχεται από τον κατασκευαστή και με βάση αυτή πραγματοποιούνται οι ενεργειακοί υπολογισμοί.

Τα θαλάσσια αιολικά πάρκα, γνωστά και ως υπεράκτια αιολικά πάρκα, είναι ένας τύπος υποδομής ανανεώσιμης ενέργειας που αξιοποιεί τη δύναμη του ανέμου από τον ωκεανό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τα χερσαία αιολικά πάρκα, τα οποία βρίσκονται στην ξηρά, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε υδάτινα σώματα, συνήθως σε ρηχά νερά κοντά στις ακτές ή σε βαθύτερα νερά πιο μακριά από τη θάλασσα.

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα γίνονται όλο και πιο δημοφιλή λόγω της δυνατοτήτάς τους να παράγουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας με ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων, ωστόσο, περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητά τους.

Μία από τις τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών και η υποστηρικτική υποδομή. Οι στρόβιλοι πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν στο σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει υψηλά κύματα, ισχυρούς ανέμους και διάβρωση αλμυρού νερού. Η υποστηρικτική υποδομή, όπως τα θεμέλια και τα καλώδια μετάδοσης, πρέπει



Εικόνα 5: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα
Πηγή: The American Society of Mechanical Engineers

επίσης να σχεδιαστεί προσεκτικά ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα και η ασφάλεια ολόκληρου του συστήματος.

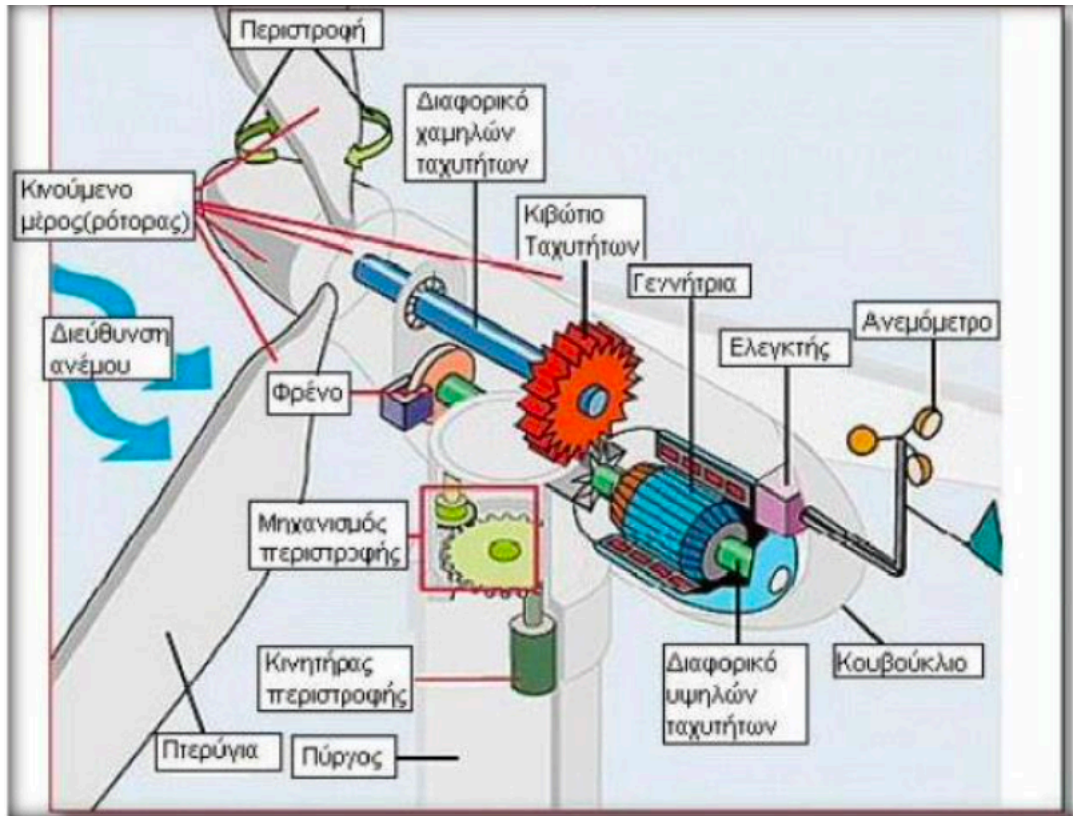
Μια άλλη τεχνική πρόκληση είναι η συντήρηση και η επισκευή των στροβίλων και της υποδομής, η οποία μπορεί να είναι πιο δύσκολη και ακριβή σε υπεράκτια περιβάλλοντα. Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως τα drones και τα τηλεχειριζόμενα οχήματα, μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους και των κινδύνων που σχετίζονται με τις δραστηριότητες συντήρησης και επισκευής.

2.1 Είδη Ανεμογεννητριών

2.1.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα περιστροφής αποτελούν τον πιο κοινό τύπο ανεμογεννητριών που χρησιμοποιείται σε συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας. Διαθέτουν οριζόντιο άξονα ρότορα και πτερύγια που είναι σχεδιασμένα ώστε ο άξονας τους να είναι παράλληλος στη διεύθυνση πνοής του ανέμου. Οι συγκεκριμένες Ανεμογεννήτριες είναι γνωστές για την υψηλή απόδοσή τους, την αξιοπιστία και την ικανότητά τους να παράγουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Ωστόσο, έχουν επίσης ορισμένους περιορισμούς, όπως η ηχορύπανση, ο οπτικός αντίκτυπος και τα χτυπήματα πτηνών. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της απόδοσης των Ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα. Συνολικά, τα HAWT παραμένουν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη

μετατροπή της αιολικής ενέργειας και η συνεχιζόμενη έρευνα στοχεύει να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοσή τους και να μετριάσει τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις τους.



Εικόνα 6: Κύρια μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/Ανεμογεννήτρια>

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούνται από τα εξής μέρη:

- Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει τον δρομέα και την άτρακτο. Όσο υψηλότερος είναι ο πύργος τόσο πιο πολύ η ανεμογεννήτρια έχει πρόσβαση σε ανέμους μεγαλύτερης ταχύτητας.
- Ο δρομέας στον οποίο είναι τοποθετημένα τα πτερύγια.
- Η άτρακτος περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Στο κιβώτιο

ταχυτήτων, τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες ώστε περιστροφής ώστε να καθίσταται δυνατή η παραγωγή ρεύματος. Η γεννήτρια παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 60Hz. Ο άξονας υψηλής κίνησης θέτει τη γεννήτρια σε κίνηση ενώ ο δρομέας στρέφει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας σε περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό. Ένας δίσκος φρένου, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί κατά τρόπο μηχανικό, ηλεκτρικό ή υδραυλικό ώστε να σταματάει ο ρότορας (ηλεκτρικός κινητήρας) σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης. Επίσης, ο ελεγκτής επιτρέπει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από κάποιο κατασκευαστικό όριο και την σταματάει όταν ξεπεραστεί πάλι κάποιο κατασκευαστικό όριο.

- Ο οδηγός ελέγχου εκτροπής (yaw mechanism) εξασφαλίζει ότι ο δρομέας είναι μόνιμα προσανατολισμένος προς τον άνεμο.
- Το ανεμόμετρο το οποίο μετρά την ταχύτητα του ανέμου καθώς επίσης και την κατεύθυνση του και επικοινωνεί με το yaw drive προκειμένου να προσανατολίσει κατάλληλα την ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 6 : Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα
Πηγή: The American Society of Mechanical Engineers

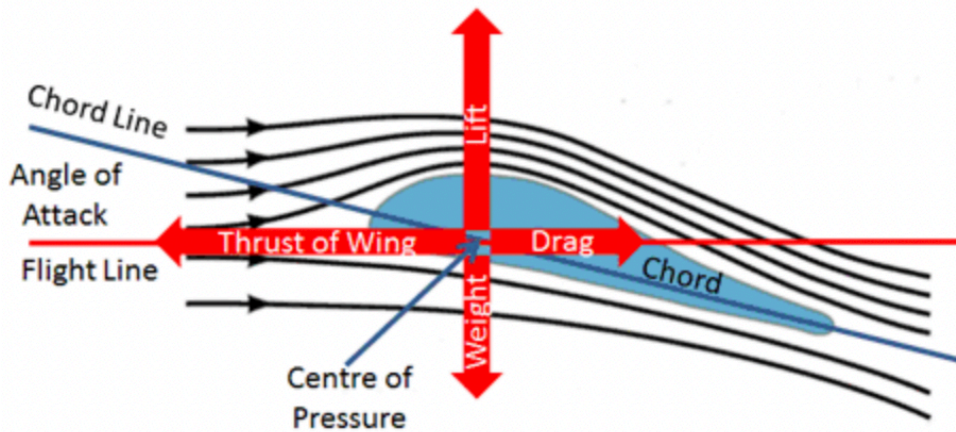
2.1.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν μοναδικό σχεδιασμό στον οποίο ο άξονας του ρότορα είναι κάθετος στο έδαφος, επιτρέποντάς τους να εκμεταλλεύονται τον άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για αστικές ή μικρής κλίμακας εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Οι VAWT έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT), συμπεριλαμβανομένων των χαμηλότερων εκπομπών θορύβου, των χαμηλότερων ταχυτήτων λειτουργίας και της βελτιωμένης απόδοσης σε συνθήκες τυρβώδους ανέμου. Ωστόσο, τα VAWT γενικά έχουν χαμηλότερη απόδοση και απαιτούν υψηλότερο κόστος συντήρησης λόγω του πιο περίπλοκου σχεδιασμού τους. Υπάρχουν διάφοροι τύποι VAWT, συμπεριλαμβανομένων των Darrieus, Savonius και ελικοειδών σχεδίων. Ο στρόβιλος Darrieus έχει μελετηθεί εκτενώς στην επιστημονική βιβλιογραφία, με την έρευνα να επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της απόδοσής του, και στη μείωση του κόστους του. Μελέτη των Zhan et al. (2020) ερεύνησε την αεροδυναμική απόδοση ενός στρόβιλου Darrieus με νέο σχεδιασμό πτερυγίων, διαπιστώνοντας ότι είχε υψηλότερη απόδοση παραγωγής ενέργειας από τα παραδοσιακά σχέδια. Αυτές οι μελέτες υπογραμμίζουν τη δυνατότητα των VAWT να συμβάλλουν στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη σημασία της συνεχούς έρευνας για τη βελτίωση της απόδοσής τους και τη μείωση του κόστους.

2.2 Αρχή Λειτουργίας Ανεμογεννητριών και Λειτουργικά Στοιχεία

Ο άνεμος στρέφει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, που συνδέονται με έναν άξονα. Ο άξονας περνάει σε ένα κιβώτιο μετάδοσης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής που κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα για να λειτουργούν με βάση την αρχή της μεθόδου ανύψωσης ή έλξης (lift or drag method). Είναι η ίδια αρχή που επιτρέπει στα αεροπλάνα και στα πτηνά να πετούν, παράγοντας μια ανυψωτική δύναμη ή δυναμική άνωση (lift force) η οποία είναι κάθετη προς τη διεύθυνση κίνησης. Καθώς η λεπίδα “κόβει” τον αέρα, δημιουργείται μια διαφορά ταχύτητας και πίεσης ανέμου μεταξύ των άνω και κάτω επιφανειών της λεπίδας. Η πίεση στην κάτω επιφάνεια είναι μεγαλύτερη κι έτσι τείνει να “σηκώσει” το πτερύγιο προς τα επάνω. Είναι επιθυμητό αυτή η δύναμη να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Εκτός από την ανυψωτική δύναμη, ασκείται και μια δύναμη έλξης που είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση κίνησης (drag force) και προκαλεί αναταράξεις γύρω από το πίσω μέρος του πτερυγίου καθώς κόβει τον αέρα. Η επίδραση της δύναμης αυτής φρενάρει το πτερύγιο, επομένως είναι επιθυμητό η δύναμη αυτή να είναι όσο μικρότερη γίνεται.



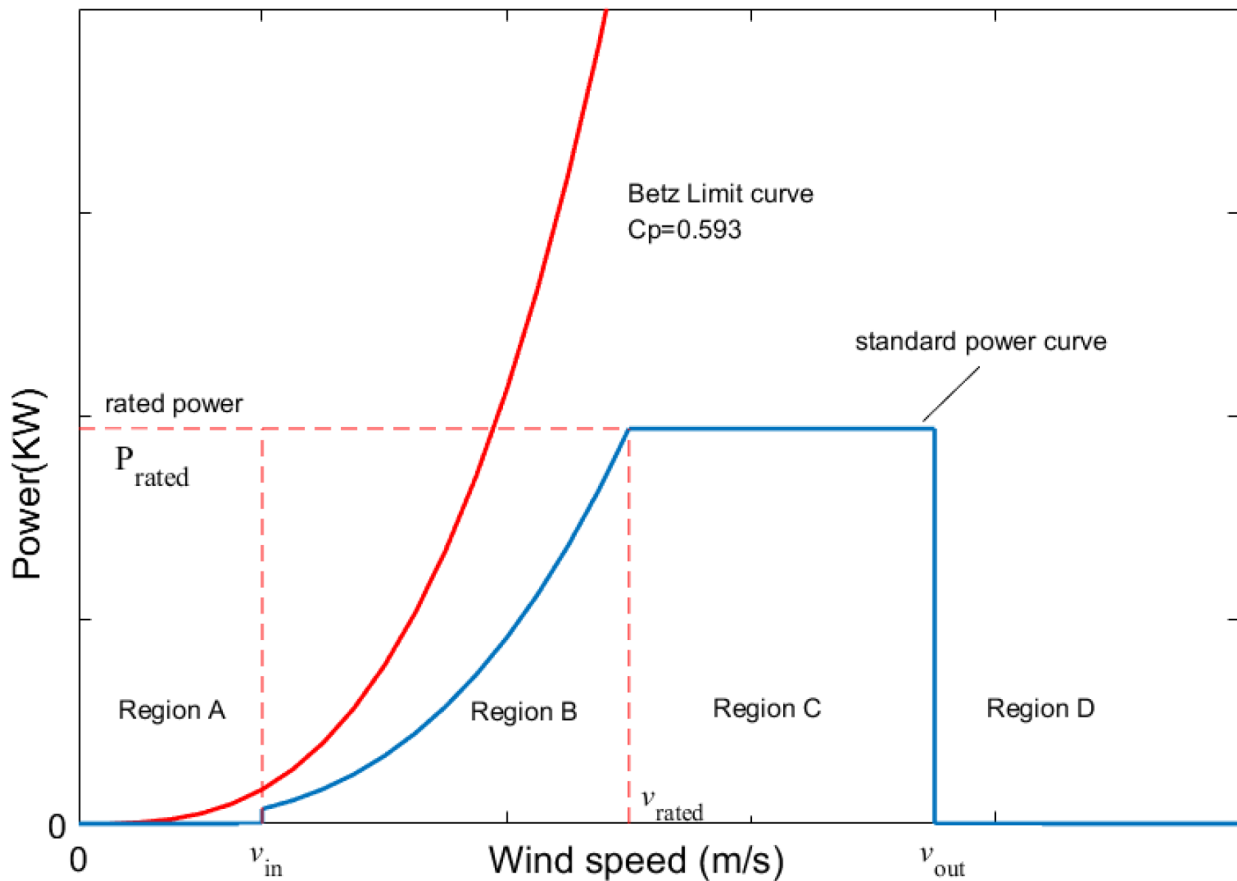
Εικόνα 7: Δυνάμεις άνωσης και οπισθέλκουσας στα πτερύγια της Α/Γ οριζόντιου άξονα

Πηγή: https://www.mpoweruk.com/flight_theory.htm

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες να συλλαμβάνουν αποτελεσματικά την αιολική ενέργεια μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων ανέμου που αντιπροσωπεύουν το χαμηλότερο όριο και το υψηλότερο όριο λειτουργίας. Μέσα σε αυτό το εύρος, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί βέλτιστα, παράγοντας τη βέλτιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ταχύτητα "cut-in speed" αναφέρεται στην ελάχιστη ταχύτητα ανέμου με την οποία μια ανεμογεννήτρια αρχίζει να παράγει χρησιμοποιήσιμη ισχύ. Οι ανεμογεννήτριες απαιτούν μια ορισμένη ελάχιστη ταχύτητα ανέμου για να ξεπεράσουν την αδράνεια και την αντίσταση των πτερυγίων τους και να ξεκινήσουν την περιστροφή. Συνήθως, η ταχύτητα "cut-in speed" για τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες κυμαίνεται μεταξύ 3 έως 4 μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s) ή περίπου 6 έως 9 μίλια ανά ώρα (mph). Κάτω από αυτό το όριο, ο στρόβιλος μπορεί να μην παράγει επαρκή ισχύ ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμος ή πρακτικός.

Από την άλλη πλευρά, η ταχύτητα "cut-off speed", γνωστή και ως "ονομαστική ταχύτητα ανέμου", αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ταχύτητα ανέμου με την οποία μια ανεμογεννήτρια λειτουργεί πιο αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Είναι η ταχύτητα του ανέμου με την οποία ο στρόβιλος φτάνει στην ονομαστική του ισχύ. Η λειτουργία με ταχύτητες ανέμου πέρα από την ταχύτητα "cut-off speed" μπορεί να ασκήσει υπερβολική πίεση στα εξαρτήματα του στρόβιλου και να θέσει σε κίνδυνο τη δομική του ακεραιότητα. Για την αποφυγή ζημιών και τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας, οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί με μηχανισμούς που ελέγχουν την ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας ή καλύπτουν τα πτερύγια για να μειώσουν την έκθεσή τους σε ισχυρούς ανέμους. Η ταχύτητα αποκοπής συνήθως κυμαίνεται



Εικόνα 8: Ενδεικτική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας
 Πηγή: Zhao Xiao et al., 2020

από 25 έως 30 m/s (περίπου 55 έως 67 mph), αν και μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τον ειδικό σχεδιασμό και τις απαιτήσεις της ανεμογεννήτριας.

Εκτός αυτού του εύρους, η ισχύς της ανεμογεννήτριας μειώνεται καθώς οι ταχύτητες ανέμου αποκλίνουν από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ανεμογεννήτριες έχουν μια καμπύλη ισχύος (power curve) που δείχνει τη σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και της παραγωγής ισχύος με ένα βέλτιστο εύρος στη μέση. Ενδεικτικά παρατήθεται στην επομένη εικόνα μια τέτοια καμπύλη ισχύος.

Η καμπύλη ισχύος, χωρίζεται σε τέσσερις περιοχές. Η πρώτη περιοχή (Region A) αντιπροσωπεύει ταχύτητες κάτω από την cut-in speed κάτω από τις οποίες όπως

αναφέρθηκε η ανεμογεννήτρια δεν λειτουργεί. Στη δεύτερη περιοχή (Region B) η ανεμογεννήτρια αρχίζει τη λειτουργία της μέχρι η ταχύτητα να φτάσει την τιμή για την οποία η ανεμογεννήτρια αποδίδει την ονομαστική της ισχύ, η οποία αποτελεί κατασκευαστικό χαρακτηριστικό της. Η τρίτη περιοχή (Region C) αντιπροσωπεύει ταχύτητες μεταξύ των οποίων η ανεμογεννήτρια αποδίδει την ονομαστική της ισχύ και περιέχει την μέγιστη ταχύτητα για την οποία η ανεμογεννήτρια είναι σε λειτουργία (cut off speed). Και τέλος η τέταρτη περιοχή (Region D), αντιπροσωπεύει ταχύτητες που είναι μεγαλύτερες από την ταχύτητα cut off επομένως η ανεμογεννήτρια τίθεται εκ'τος λειτουργίας.

Η θεωρητική ισχύς που αποδίδεται από μια ανεμογεννήτρια δίνεται από την εξίσωση:

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \theta) \rho A_t v_1^3$$

Όπου A_t αποτελεί το εμβαδόν της περιστρεφόμενης επιφάνειας, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα που λαμβάνει προσεγγιστικά την τιμή 1.225 kg/m^3 στην επιφάνεια της θάλασσας, C_p ο συντελεστής ισχύος και v η ταχύτητα του ανέμου.

Ο συντελεστής ισχύος (Capacity Factor) δίνεται από το λόγο της ισχύος που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια P_T , προς τη συνολική ισχύ που περιέχεται στο αεροδυναμικό P .

$$C_p = \frac{P_T}{P}$$

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο συντελεστής ισχύος είναι $16/27$ (~59%) και αντιστοιχεί στο Beltz Limit. Επομένως η θεωρητική αποδοτικότητα που μπορεί να έχει μια τουρμπίνα είναι 59%. Συνηθισμένες τιμές του συντελεστή ισχύος είναι ~30%. Ο συντελεστής ισχύος διαμορφώνεται σε συνάρτηση του λ και του θ , όπου η γωνία θ ισούται με την περιστροφή του πτερυγίου γύρω από τον άξονα του και:

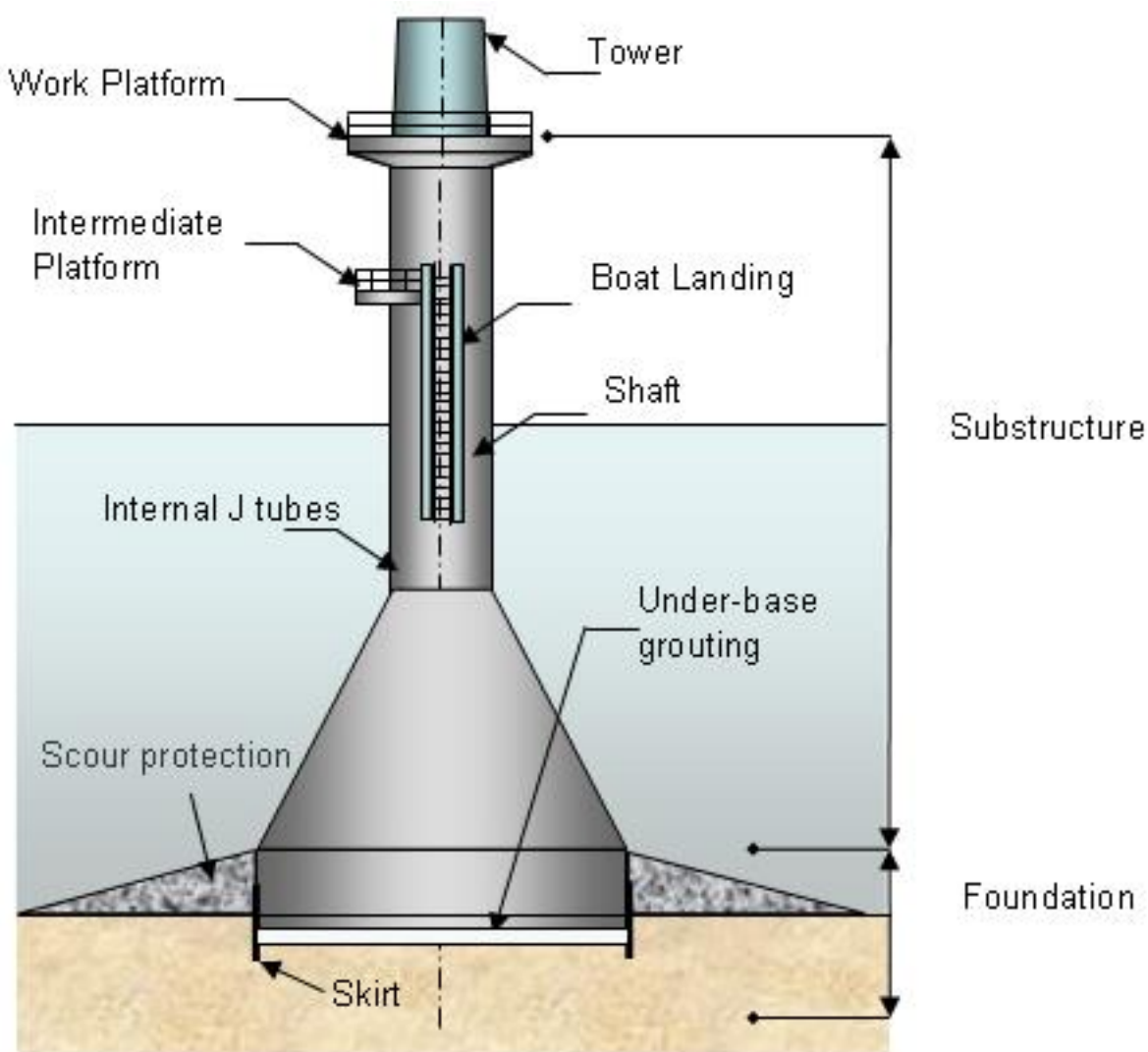
$$\lambda = \frac{\omega R}{v}$$

Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, R η ακτίνα του ρότορα και v η ταχύτητα του ανέμου.

2.3 Δομές στήριξης πακτωμένων υπεράκτιων ανεμογεννητριών

2.3.1 Κατασκευές Βαρύτητας

Οι συγκεκριμένες κατασκευές χρησιμοποιούν το βάρος του θεμελίου ώστε να είναι σε θέση να συγκρατήσει την κατασκευή απέναντι στα φορτία του ανέμου και των κυμάτων. Τα φορτία των κυμάτων είναι μεγαλύτερα όσο αυξάνεται το βάθος του πυθμένα, επομένως το βάρος της θεμελίωσης αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του βάθους της θάλασσας. Οι συγκεκριμένες κατασκευές χρησιμοποιούνται συνήθως σε βάθη όπου η τοποθέτηση πασσάλων στον πυθμένα είναι αρκετά δύσκολη. Το συγκεκριμένο θεμέλιο κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα και για τη χρήση του απαιτείται προετοιμασία του πυθμένα με χαλίκι και τσιμέντο.

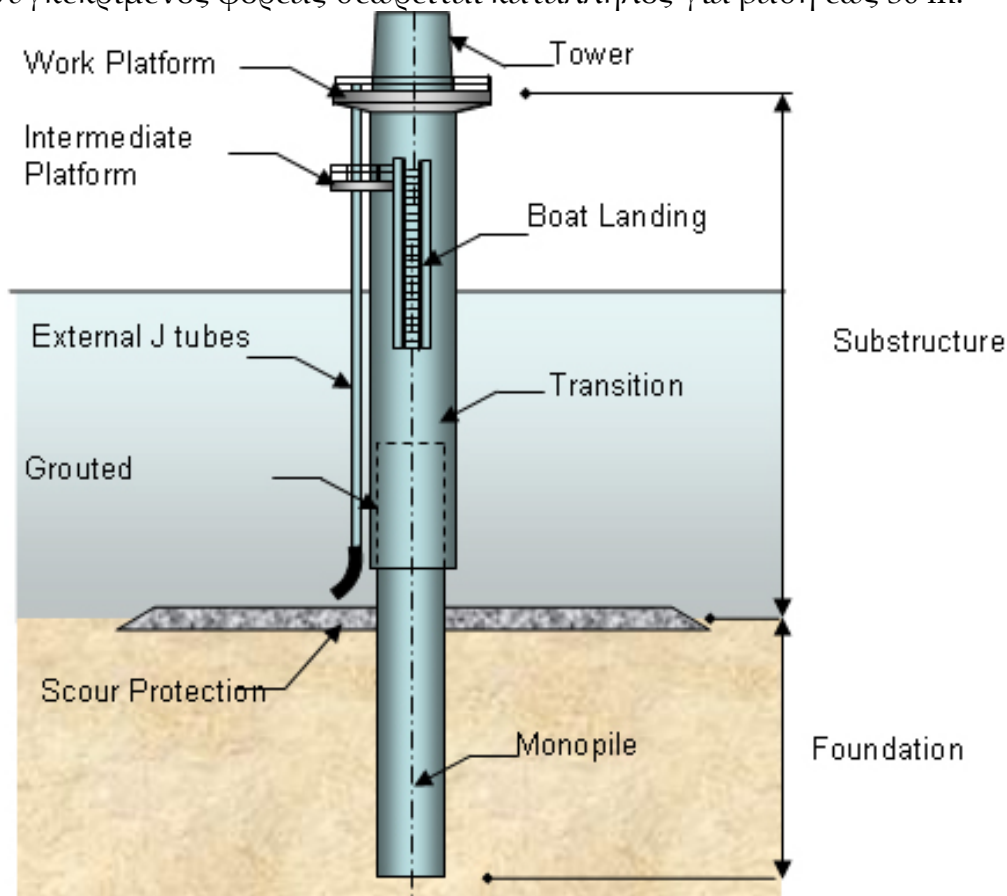


Εικόνα 9: Φορέας στήριξης βαρύτητας

Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures-7.html>

2.3.2 Κατασκευές έδρασης με μονό πυλώνα (Monopile Structure)

Στις συγκεκριμένες κατασκευές ο πύργος της ανεμογεννήτριας είναι κατασκευασμένος από χάλυβα και στηρίζεται σε έναν μονό πυλώνα ο οποίος έχει διάμετρο μέχρι και πάνω από 10 μέτρα ανάλογα με το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και τις περιβαλλοντικές συνθήκες της υπεράκτιας τοποθεσίας. Ο πυλώνας αυτός τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού έως ότου φτάσει σε κατάλληλο βάθος για να παρέχει την απαραίτητη σταθερότητα. Μόλις εγκατασταθεί, χρησιμεύει ως η κύρια δομή στήριξης για τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια ο πύργος τοποθετείται στην κορυφή του πυλώνα και τοποθετούνται τα υπόλοιπα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας. Ο συγκεκριμένος φορέας θεωρείται κατάλληλος για βάθη έως 30 m.

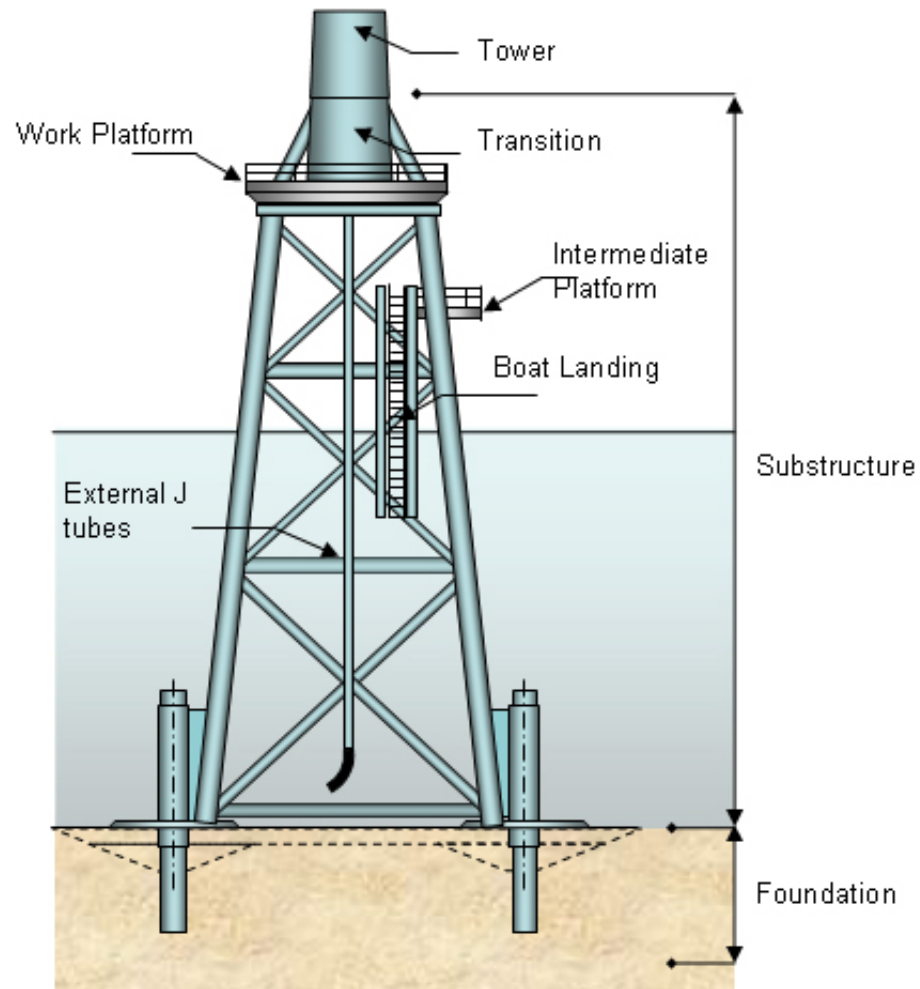


Εικόνα 10: Φορέας στήριξης μορφής monopile

(Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures-7.html>)

2.3.3 Κατασκευές Jacket Structure

Η συγκεκριμένη κατασκευή χρησιμοποιείται πιο σπάνια για μεγαλύτερα βάθη, σε περίπτωση όπου η έδραση με μονό πυλώνα είναι δύσκολη, για την αντιμετώπιση φορτίσεων που ασκούνται στις ανεμογεννήτριες από τον άνεμο καθώς ο φορέας στήριξης παρέχει ακαμψία και σταθερότητα. Είναι κατασκευασμένο από χαλύβδινους σωλήνες συγκολλημένους μεταξύ του, συνήθως διαμέτρου 0,5-1,5 m. Η συγκεκριμένη κατασκευή είναι κατάλληλη για βάθη από 30 έως 60 m.

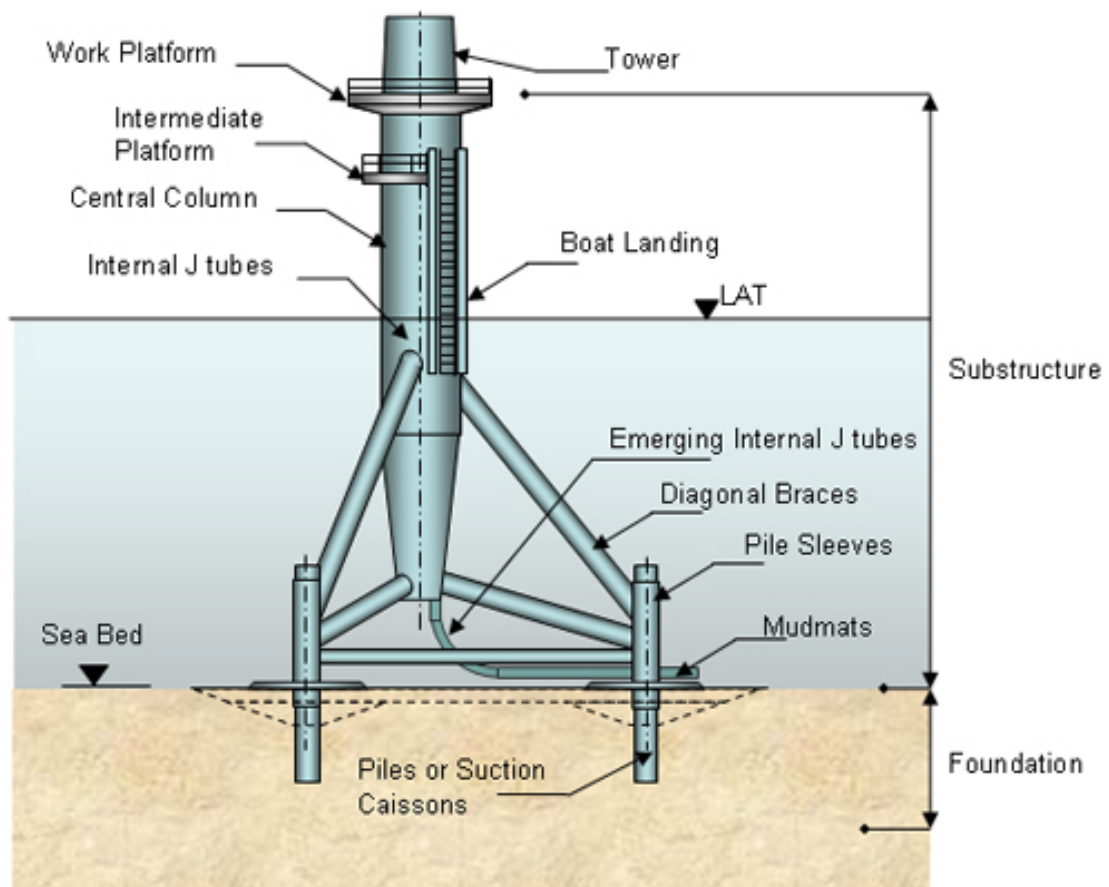


Εικόνα 11: Φορέας στήριξης τύπου Jacket

Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures-7.html>

2.3.4 Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου

Η συγκεκριμένη κατασκευή αποτελείται από τρία κύρια κατακόρυφα χαλύβδινα σωληνωτά πόδια που συνδέονται στην κορυφή και απλώνονται στη βάση, μοιάζοντας με τρίποδο ή τρίποδα κατασκευή. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός παρέχει μια σταθερή βάση που μπορεί να αντέξει τα περιβαλλοντικά φορτία, όπως ο άνεμος, τα κύματα και οι παλιρροϊκές δυνάμεις που δρουν στην ανεμογεννήτρια. Μπορούν να σχεδιαστούν για να εξυπηρετούν διάφορα βάθη νερού και συνθήκες βυθού, συνήθως όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη 20 έως 50 m



Εικόνα 12: Φορέας στήριξης τύπου τριπόδου

Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures-7.html>

2.4 Πλωτές ανεμογεννήτριες και αγκύρωση πλωτών ανεμογεννητριών

Σε περιπτώσεις που το βάθος των κατασκευών πρόκειται να ξεπεράσει τα 60m, προκειμένου να εκμεταλλευτεί το αιολικό δυναμικό που προσφέρεται στην ανοιχτή θάλασσα, οι παραπάνω κατασκευές δεν είναι πια κατάλληλες.

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση πλωτών ανεμογεννητριών στις οποίες ο πυλώνας τους τοποθετείται σε μια πλωτή πλατφόρμα στήριξης. Οι τις βασικές κατηγορίες πλατφορμών στήριξης παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 13: Είδη πλωτών ανεμογεννητριών

Πηγη: <https://www.energyglobal.com/special-reports/03112020/floating-wind-what-are-the-mooring-options/>

2.4.1 Συστήματα τύπου Spar (Spar-buoy)

Η συγκεκριμένη κατασκευή αποτελείται από ένα κυλινδρικό στέλεχος το οποίο προσδένεται με σύστημα καλωδίων ή αλυσίδων αγκύρωσης. Αποτελεί την πιο διαδεδομένη κατασκευή για πλωτές ανεμογεννήτριες γιατί θεωρείται σχετικά απλή

από άποψη σχεδιασμού αλλά και για το λόγο ότι προσφέρει ευστάθεια και επηρεάζεται λιγότερο από τα κύματα λόγω του έρματος που χρησιμοποιείται. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της κατασκευή είναι η ρυμούλκηση λόγω του μεγάλου της βυθίσματος, καθώς όταν το έρμα δεν τοποθετηθεί πριν την εγκατάσταση της , υπάρχει μεγάλη δυσκολία κατά την εγκατάσταση με την ταυτόχρονη προσθήκη του έρματος, ενώ όταν τοποθετηθεί και μεταφερθεί με το έρμα η μεταφορά της καθίσταται δύσκολη. Η συγκεκριμένη κατασκευή είναι κατάλληλη για βάθη μεγαλύτερα των 120 m.

2.4.2 Συστήματα τύπου Tensioned-Leg Platform - TLP

Τα συγκεκριμένα συστήματα χρησιμοποιούνται για την άντληση πετρελαίου και αποτελούνται από κατακόρυφες κολόνες οι οποίες συνδέονται με οριζόντιους πλωτήρες που συνδέονται με σύστημα αγκύρωσης. Η πλατφόρμα από την οποία αποτελείται είναι πλήρως βυθισμένη και συνδέεται με τεταμένους τένοντες/ιμάντες ώστε να επιτυγχάνεται ευστάθεια, γεγονός που την καθιστά ριψοκίνδυνη καθώς μια πιθανή αστοχία κάποιου ιμάντα θα μπορούσε να οδηγήσει σε κατάρρευση της ανεμογεννήτριας. Οι συγκεκριμένες κατασκευές είναι κατάλληλες για βάθη άνω των 50 m.

2.4.3 Συστήματα ημιβυθιζόμενων κατασκευών Spar-Submersible

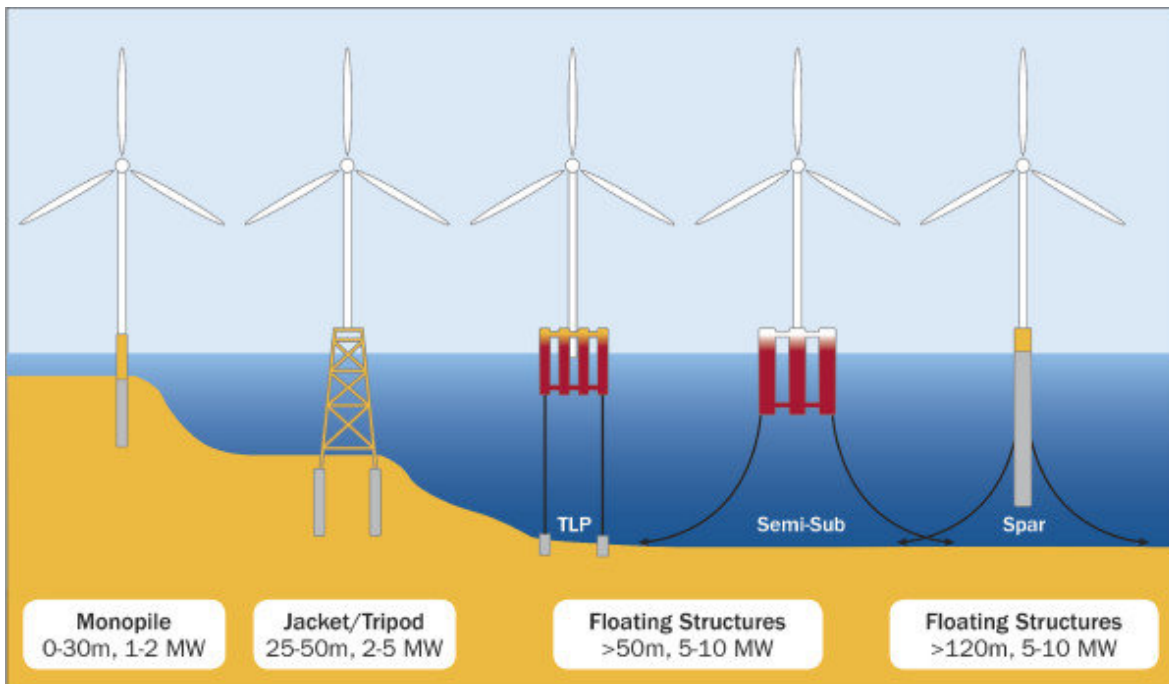
Αποτελούνται συνήθως από πολλαπλούς πυλώνες και πλωτήρες, όπου οι κολόνες παρέχουν κυρίως σταθερότητα ενώ οι πλωτήρες πρόσθετη άνωση. Η κατασκευή διατηρείται στη θέση της μέσω ενός συστήματος πρόσδεσης που αποτελείται συνήθως από αλυσίδες. Το συγκεκριμένο σύστημα όπως και το Spa-Buoy είναι κατάλληλο για βάθη από 100 m και άνω.

πηγη: Assessing Environmental Impacts of Offshore Wind Farms: Lessons Learned and Recommendations for the Future (Helen Bailey, Kate L Brookes, Paul M Thompson)

2.5 Παράγοντες καθορισμού περιοχών για εγκατάσταση αιολικών πάρκων

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν, η επιλογή της τοποθεσίας για την εγκατάσταση πιθανού αιολικού πάρκου έχει μεγάλη σημασία προκειμένου να επιτευχθεί η οικονομικότερη αλλά και αποδοτικότερη λύση. Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν επομένως αυτή την επιλογή είναι:

- Η αξιολόγηση των ανεμολογικού καθεστώτος: Λεπτομερής ανάλυση μακροπρόθεσμων δεδομένων ανέμου, συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας, της



Εικόνα 14: διατάξεις έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών ανάλογα με το βάθος του πυθμένα

κατεύθυνσης, διάρκεια πνοής, είναι απαραίτητα τόσο για τον εντοπισμό περιοχών με υψηλό δυναμικό αιολικής ενέργειας αλλά και για τον καθορισμό του καλύτερου τύπου ανεμογεννήτριας. Αν η περιοχή χαρακτηρίζεται από γενικά μικρές ταχύτητες ανέμου τότε η επιλογή ανεμογεννήτριας με μεγάλη ονομαστική ισχύ είναι λανθασμένη καθώς θα λειτουργεί συνεχώς σε χαμηλές περιοχές ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση, αν η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλες ταχύτητες ανέμου και γίνει επιλογή ανεμογεννήτριας με μικρή ονομαστική ισχύ, ενώ η προσφερόμενη ισχύς είναι πολύ μεγαλύτερη, η ανεμογεννήτρια θα αναγκαστεί να λειτουργεί συνεχώς με την ονομαστική της ισχύ. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα την ελλιπή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Σημαντικές επίσης, είναι και οι ακραίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε μια περιοχή, καθώς και η συχνότητα εμφάνισής τους, ώστε η ανεμογεννήτρια να σχεδιαστεί ώστε να αντέχει την καταπόνηση και να σταματά την παραγωγή ισχύος συχνά.

- **Βάθος νερού:** Εκτίμηση του βάθους νερού σε πιθανές τοποθεσίες για τον προσδιορισμό της σκοπιμότητας για διαφορετικούς τύπους θεμελίωσης, όπως μονόστηλα, τζάκετ ή πλωτές πλατφόρμες. Οι τοποθεσίες σε ρηχά νερά, συνήθως έως και 30 μέτρα, είναι κατάλληλες για θεμέλια σταθερού πυθμένα, όπως μονόστηλα, τζάκετ ή κατασκευές με βάση τη βαρύτητα. Αυτά τα θεμέλια είναι αγκυλωμένα απευθείας στο βυθό της θάλασσας. Για βαθύτερα ύδατα, απαιτούνται πλωτές πλατφόρμες οι οποίες όμως επειδή βρίσκονται σε ερευνητικό και πειραματικό στάδιο, είναι αρκετά πιο κοστοβόρες.
- **Συνθήκες βυθού:** Οι συνθήκες του λυθού επηρεάζουν το σχεδιασμό και την εγκατάσταση των θεμελίων των ανεμογεννητριών. Παράγοντες όπως ο τύπος του

εδάφους, η σύνθεση και η σταθερότητα είναι κρίσιμοι παράγοντες. Θα πρέπει να διεξαχθούν γεωτεχνικές έρευνες για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του εδάφους, της σταθερότητας και της φέρουσας ικανότητας για το σχεδιασμό θεμελίωσης. Για παράδειγμα, αμμώδεις ή σταθερές στρώσεις ιζήματος προτιμώνται για θεμέλια μονοπωλίου, ενώ οι σχηματισμοί αργίλου βράχων είναι κατάλληλοι για θεμέλια με βάση τη βαρύτητα.

- Απόσταση από τη στεριά: Η απόσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου από την ακτή επηρεάζει διάφορες πτυχές συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής, της λειτουργίας, της συντήρησης και των οπτικών επιπτώσεων. Οι κατασκευές που βρίσκονται πιο κοντά στην ακτή έχουν γενικά ευκολότερη πρόσβαση για τις δραστηριότητες της εγκατάστασης και της συντήρησης καθώς και μικρότερα μήκη καλωδίων για σύνδεση με το δίκτυο. Ωστόσο οι κατασκευές που βρίσκονται πιο μακριά από την ακτή, μπορούν να επωφεληθούν από ισχυρότερο αιολικό δυναμικό, μετριάζοντας τις οπτικές επιπτώσεις στις παράκτιες κοινότητες.
- Απόσταση από δίκτυο υποθαλάσσιων καλωδίων: Η απόσταση από ένα υπάρχον δίκτυο υποθαλάσσιων καλωδίων είναι σημαντικός παράγοντας επιλογής τοποθεσίας για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Η εγγύτητα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε ένα υπάρχον υποθαλάσσιο καλωδιακό δίκτυο μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος σύνδεσης στο δίκτυο, ελαχιστοποιείται έτσι η ανάγκη για εκτεταμένη τοποθέτηση καλωδίων και συναφείς κατασκευαστικές δραστηριότητες, καθώς και λιγότερες τεχνικές προκλήσεις κατά τις εργασίες τοποθέτησης καλωδίων. Παράλληλα, μετριάζονται οι απώλειες μετάδοσης και διατηρείται υψηλότερη απόδοση παροχής ενέργειας.
- Απόσταση από λιμάνια: Η απόσταση από τα κύρια λιμάνια είναι ένας σημαντικός παράγοντας επιλογής τοποθεσίας για υπεράκτια αιολικά πάρκα καθώς διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην επιμέλεια, την κατασκευή και τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου αποτελεί ένα αρκετά απαιτητικό έργο, καθώς απαιτείται η κατασκευή και μεταφορά ογκώδους εξοπλισμού (μεγάλα πτερύγια κλπ.). Η εγγύτητα σε λιμάνι μειώνει την απόσταση και το χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά του εξοπλισμού, των υλικών και του προσωπικού στην τοποθεσία του αιολικού πάρκου. Παράλληλα η πρόσβαση σε καλά εξοπλισμένα λιμάνια με κατάλληλη υποδομή, όπως αποθηκευτικοί χώροι και δυνατότητες γερανών, διευκολύνει τη φόρτωση και εκφόρτωση στροβίλων, θεμελίων και άλλων δομικών υλικών.

2.6 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο από τα συστήματα άμεσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα διότι είναι γενικά ανθεκτικές κατασκευές που δεν απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση και οπωσδήποτε δεν έχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η απόδοση τους επηρεάζεται από την ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας SSRD και τη θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής κυψέλης η οποία εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος επομένως η απόδοση τους εξαρτάται προφανώς από την τοποθεσία που θα εγκατασταθούν.

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά πάγκα προσφέρουν αρκετά οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Αρχικά γίνεται εκμετάλλευση υδάτινων επιφανειών κι έτσι δεν τίθεται ζήτημα εύρεσης χερσαίας έκτασης. Επιπλέον τα πλωτά φωτοβολταϊκά πάγκα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση εξαιτίας του φαινομένου “cooling effect” καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Επίσης χρησιμοποιώντας υδάτινες επιφάνειες για την εγκατάστασή τους, επιτυγχάνεται η προστασία δασικών εκτάσεων. Περιορίζεται η εξάτμιση του νερού και βελτιώνεται η ποιότητά του σε περιπτώσεις κλειστών υδάτινων επιφανειών. Τα κυριότερα μειονεκτήματα μιας τέτοιου είδους πλωτής κατασκευής είναι το αρκετά υψηλό κόστος κυρίως λόγω των ανθεκτικών στη διάβρωση υλικών. Επίσης, η δυσκολία σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, η έκθεση σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες (κύμα, άνεμος, ρεύμα), δυσκολίες καθαρισμού και συντήρησης καθώς και διάφορα περιβαλλοντικά ζητήματα που αφορούν μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από την επιφάνεια της κατασκευής κι επομένως πιθανές επιδράσεις στη βιοποικιλότητα.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάζεται από την ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία της κυψελίδας καθώς και από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα πλωτά φωτοβολταϊκά είναι γνωστό ότι είναι περίπου 11% πιο αποδοτικά από τα χερσαία λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας από το νερό. Εξαιτίας όλων των παραπάνω πλεονεκτημάτων, τα πλωτά φωτοβολταϊκά που είναι εγκατεστημένα σε υδάτινα σώματα, όπως δεξαμενές ή λίμνες έχουν αυξηθεί παγκοσμίως και έχουν αναπτυχθεί σε πολλές χώρες όπως η Νότια Κορέα, η Ιαπωνία, η Κίνα και οι ΗΠΑ.

Σημαντικοί παράγοντες επίσης για την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, αποτελεί η κλίση και ο προσανατολισμός τους. Συγκεκριμένα, μπορούν να τοποθετηθούν είτε πακτωμένα ή με συστήματα που προσφέρουν δυνατότητα μεταβολής του προσανατολισμού τους. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που διαθέτουν αυτά τα συστήματα (solar trackers) έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, καθώς αναλόγως με την τοποθεσία μπορούν να αποδώσουν 25% με 40% περισσότερο.

Οι πλωτές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στον κόσμο εκτιμήθηκαν σε 94 MW μέχρι το 2016, εκ των οποίων περίπου 60% ήταν εγκατεστημένες στην Ιαπωνία. Το 2017 ωστόσο, εγκαταστάθηκε στην Κίνα, ένα από τα μεγαλύτερα πλωτά φωτοβολταϊκά έργα στον κόσμο

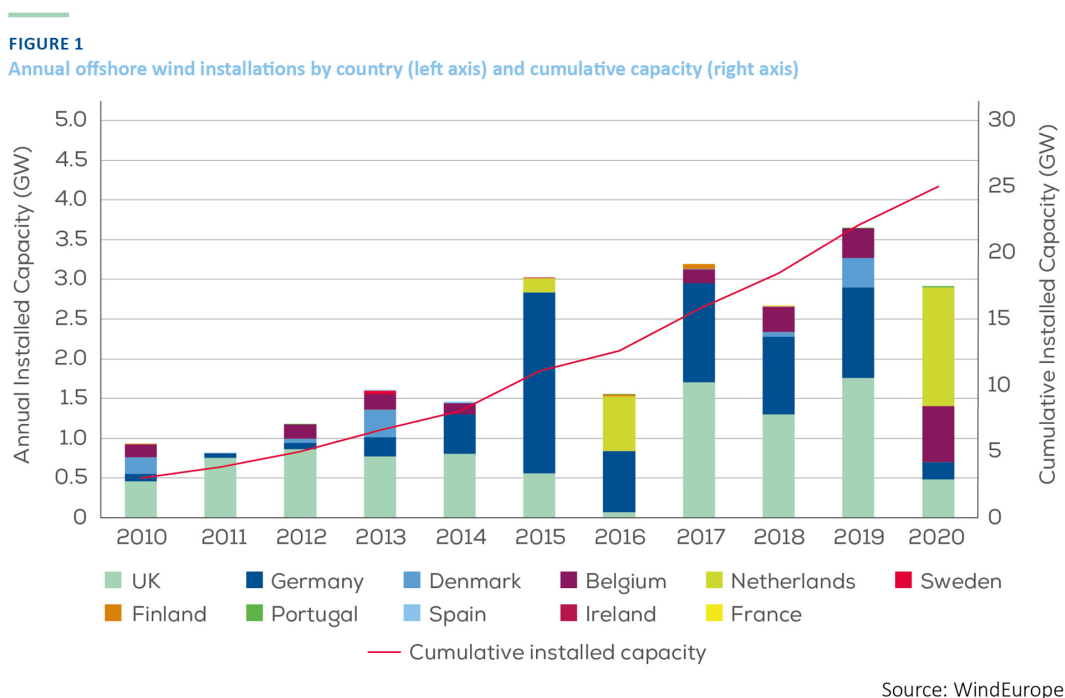
και είναι γνωστό ότι έχει ισχύ 40 MW. Το σύστημα αποτελείται από 120.000 ηλιακούς συλλέκτες καλύπτοντας τις ανάγκες ηλιακής ενέργειας 15.000 νοικοκυριών.

Στην προκειμένη, το μεγαλύτερο πλωτό ηλιακό έργο για το 2023 στον κόσμο πρόκειται να κατασκευαστεί στον μεγαλύτερο ποταμό της πολιτείας Madhya Pradesh, Narmada. Το συγκεκριμένο έργο το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί στο φράγμα Omkareshwar πρόκειται να παρέχει ισχύ 600 MW. (Πηγή: <https://electrek.co/2022/01/07/worlds-largest-floating-solar-farm-comes-online-with-wind-and-storage/>)

2.7 Εξελίξεις Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη θάλασσα σε Ελλάδα και Ευρώπη

Η Ευρώπη με τις 5 θαλάσσιες λεκάνες της, έχει τεράστιο δυναμικό όσον αφορά την υπεράκτια αιολική ενέργεια. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από τη θάλασσα μπορούν να αξιοποιηθούν με μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών, γεγονός που την καθιστά ακρογωνιαίο λίθο της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια.

Επί του παρόντος, η Ευρώπη είναι παγκόσμιος ηγέτης στην κατασκευή βασικών εξαρτημάτων ανεμογεννητριών, καθώς και στη βιομηχανία θεμελίων και καλωδίων: σχεδόν οι μισές από τις ενεργές εταιρείες στον τομέα της αιολικής ενέργειας (χερσαία και υπεράκτια) έχουν την έδρα τους στην Ευρώπη. Πολλά πιλοτικά έργα βρίσκονται ήδη σε λειτουργία και η ανάπτυξη αναμένεται να επιταχυνθεί προς το τέλος αυτής της δεκαετίας. Η εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ισχύς στην Ευρώπη ήταν 14,6 GW το 2021 και αναμένεται να αυξηθεί κατά τουλάχιστον 25 φορές έως το 2030, χρησιμοποιώντας το τεράστιο δυναμικό των θαλασσών της. Αυτή την στιγμή έχει συνολικά εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ισχύ 25 GW όπου αυτό αντιστοιχεί σε 5.402 συνδεδεμένες στο δίκτυο ανεμογεννήτριες σε 12 χώρες.

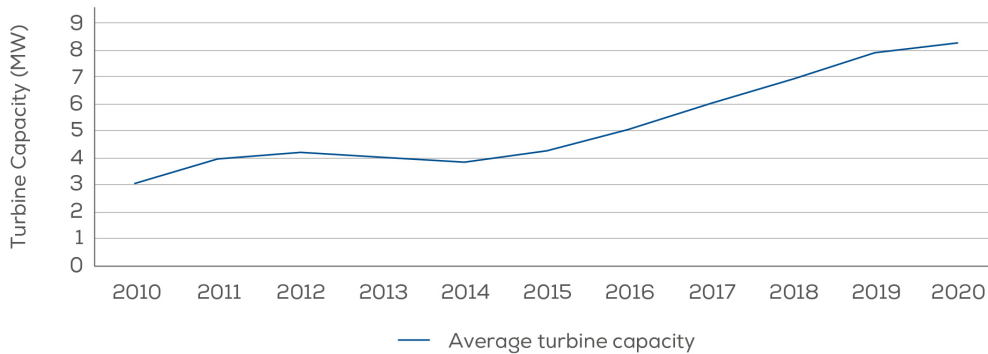


Εικόνα 15: Εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ισχύς ανά χώρα της Ευρωπαϊκής
Πηγή: <https://windeurope.org>

Παράλληλα οι ανεμογεννήτριες συνεχίζουν να αναπτύσσονται, καθώς η μέση ονομαστική ισχύς που εγκαταστάθηκαν το 2020 αυξήθηκε στα 8,2 MW.

FIGURE 6

Yearly average of newly installed offshore wind turbine rated capacity (MW)



Source: WindEurope

Εικόνα 16: Μέση ετήσια εγκατεστημένη υπεράκτια ισχύς
Πηγή: <https://windeurope.org>

Στην Ελλάδα, στα πλαίσια της ανάγκης για μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία και απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, θεσπίστηκε νέο νομικό πλαίσιο για την υπεράκτια αιολική ενέργεια. Με την εφαρμογή αυτού του νομοθετικού πλαισίου, δίνεται η δυνατότητα να εγκατασταθούν αιολικοί σταθμοί σε θαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας. Στόχος είναι η κατασκευή μέχρι το 2030 τουλάχιστον 2 GW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Συνοπτικά, θα προβλέπονται τα εξής:

- Αποτύπωση θαλάσσιων περιοχών που είναι δυνατή η ανάπτυξη Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων.
- Με την έκδοση σχετικού Προεδρικού Διατάγματος, οριοθέτηση μιας ή περισσότερων περιοχών οργανωμένης ανάπτυξης ΥΑΠ που αποτελούν τμήματα των θαλάσσιων περιοχών που εμπεριέχονται στο Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΥΑΠ και θα οριστούν οι όροι ανάπτυξης έργων ΥΑΠ σε αυτές.
- Με απόφαση του Φορέα ΥΑΠ, η οποία θα εκδοθεί εντός δύο μηνών από την δημοσίευση του προεδρικού διατάγματος οριοθέτησης των Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης ΥΑΠ (ΠΟΑΥΑΠ), θα εκκινήσει η διαδικασία χορήγησης Αδειών Έρευνας ΥΑΠ εντός των οριοθετημένων ΠΟΑΥΑΠ. Οι Άδειες Έρευνας ΥΑΠ θα χορηγούνται σε ενδιαφερόμενους που θα πληρούν συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια και θα υποβάλλουν και σχετική εγγυητική επιστολή.
- Οι κάτοχοι των Άδειών Έρευνας ΥΑΠ θα έχουν τη δυνατότητα να εκπονήσουν όλες τις αναγκαίες μετρήσεις και μελέτες εντός των ΠΟΑΥΑΠ για τις οποίες έλαβαν την σχετική Άδεια Έρευνας ΥΑΠ και παράλληλα να συμμετάσχουν στην ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για την δυνατότητα εγκατάστασης Έργου ΥΑΠ και την λήψη λειτουργικής ενίσχυσης.
- Μετά την πάροδο περίπου 2.5 ετών από την χορήγηση των Αδειών Έρευνας ΥΑΠ θα οριστούν – με Υπουργική Απόφαση – επιμέρους Περιοχές Εγκατάστασης ΥΑΠ, εντός των ΠΟΑΥΑΠ, καθώς και εκτίμηση της μέγιστης ισχύος Έργων ΥΑΠ που εκτιμάται ότι μπορεί να εγκατασταθεί σε κάθε μία από αυτές.

- Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) ακολούθως θα προκηρύξει ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για τη χορήγηση λειτουργικής ενίσχυσης στα Έργα ΥΑΠ που θα αναπτυχθούν εντός των Περιοχών Εγκατάστασης ΥΑΠ αυτών.
- Ο κάθε συμμετέχων στον διαγωνισμό θα υποβάλλει διακριτές προσφορές για κάθε Περιοχή Εγκατάστασης ΥΑΠ, που βρίσκεται εντός της ΠΟΑΥΑΠ που έχει λάβει Άδεια Έρευνας ΥΑΠ και για την οποία επιθυμεί την εγκατάσταση Έργου ΥΑΠ.
- Για την επιλογή του Επενδυτή ΥΑΠ και τη χορήγηση λειτουργικής ενίσχυσης, κριτήριο θα είναι η χαμηλότερη τιμή προσφοράς σε ευρώ ανά μεγαβατώρα, για την αποζημίωση της παραγόμενης ενέργειας από το Έργο ΥΑΠ που αναπτύσσεται εντός της συγκεκριμένης Περιοχής Εγκατάστασης ΥΑΠ.
- Ο συμμετέχων, που θα επιλεγεί από την ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για συγκεκριμένη Περιοχή Εγκατάστασης ΥΑΠ, θα έχει το αποκλειστικό δικαίωμα για την αδειοδότηση, ανάπτυξη και εκμετάλλευση του Έργου ΥΑΠ εντός της Περιοχής Εγκατάστασης ΥΑΠ (Επενδυτής ΥΑΠ).

3. Περιγραφή διαθέσιμων δεδομένων

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη προκειμένου να βρεθούν κατάλληλες τοποθεσίες στις ελληνικές θάλασσες για πιθανή εγκατάσταση πλωτού αιολικού και φωτοβολταϊκού πάρκου που να αποδίδουν τις μέγιστες δυνατές ενεργειακές απολαβές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν χάρτες αιολικού και ηλιακού δυναμικού ώστε να προσφέρουν μια σαφή εικόνα για το ανεμολογικό και ηλιακό καθεστώς των περιοχών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στον ευρύτερο ελληνικό χώρο.

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της βάσης δεδομένων ERA5 του ευρωπαϊκού Κέντρου μεσοπρόθεσμων μετεωρολογικών προγνώσεων ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) που αποτελεί την πέμπτη γενιά ατμοσφαιρικής επανανάλυσης του παγκόσμιου κλίματος και καλύπτει την περίοδο από τον Ιανουάριο του 1940 έως σήμερα. Το ERA5 παράγεται από την υπηρεσία Copernicus Climate Change Service του ECMWF και παρέχει ωριαίες εκτιμήσεις μεγάλου αριθμού ατμοσφαιρικών, χερσαίων και ωκεάνιων κλιματικών μεγεθών. Συγκεκριμένα, παρέχει δεδομένα σε 137 επίπεδα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας μέχρι το ύψος των 80 χλμ, προσφέροντας νέα στοιχεία ανά 3 μήνες σε πραγματικό χρόνο, ενώ προσφέρει και ημερήσιες ενημερώσεις με την πάροδο 5 ημερών σε πραγματικό χρόνο. Με τη μέθοδο "reanalysis" πραγματοποιείται ένας συνδυασμός πραγματικών μετρήσεων του παρελθόντος με προβλέψεις μικρής κλίμακας βασισμένες σε προηγούμενες αναλύσεις. Τα δεδομένα reanalysis ERA5 έχουν βελτιωθεί ποιοτικά πάρα πολύ λόγω της αυξανόμενης ζήτησής τους τα τελευταία χρόνια. Πραγματοποιείται προσπάθεια για όσο το δυνατόν πιο πιστή αναπαράσταση των παραμέτρων του περιβάλλοντος, όμως τα συγκεκριμένα δεδομένα δεν είναι πάντα ισοδύναμα με την παρατήρηση του φυσικού κόσμου. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι γίνεται πολύ προσεκτικός έλεγχος των παραγόμενων προβλέψεων οι οποίες συγκρίνονται και αξιολογούνται με προβλέψεις άλλων οργανισμών που εφαρμόζουν την ίδια μέθοδο. Αυτό καθιστά τα δεδομένα αξιόπιστα αφού χρησιμοποιούνται διεθνώς από οργανισμούς και ερευνητές.

Για την διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε χρήση δεδομένων της βάσης ERA5 για την εικοσαετία 2000 έως 2019 σε μορφή χρονοσειράς με χωρική ανάλυση $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Πρόκειται για ένα πλέγμα που αποτελείται από 1665 κορυφές και εκτείνεται γεωγραφικά στον ελλαδικό χώρο που ορίζεται από γεωγραφικό πλάτος $33.0 N^\circ$ έως $42.0 N^\circ$ και γεωγραφικό μήκος $19.0 E^\circ$ έως $30.0 E^\circ$. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις είναι ανά μία ώρα, επομένως 24 μετρήσεις το εικοσιτετράωρο. Για τα 20 χρόνια της χρονοσειράς επομένως οι μετρήσεις αναμένεται να είναι συνολικά περίπου 175.320 για 1665 σημεία στο πλέγμα.

Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα της παρούσας εργασίας αφορούν:

- Την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 100 μέτρων από την μέση στάθμη της θάλασσας. (Μ.Σ.Θ.), ύψος που προσεγγίζει το ύψος μια θαλάσσιας ανεμογεννήτριας.
- Διεύθυνση ταχύτητας ανέμου από 0° έως 360° , με 0° να αντιστοιχεί στο βορρά και 180° στο Νότο.

ο Την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο SSRD (Surface Solar radiance Downwards)

3.1 Επεξεργασία Ταχύτητας Ανέμου

Οι παρούσες μετρήσεις από τη βάση δεδομένων για την ταχύτητα ανέμου αναφέρεται στα 100 m από τη μέση στάθμη θάλασσας, επομένως δε χρειάζεται κάποιο είδος μετατροπής της σε άλλο ύψος διότι το συγκεκριμένο θεωρείται όπως αναφέρθηκε, σε ένα τυπικό ύψος εγκατάστασης ανεμογεννητριών.

Για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων, με βάση τη στιγμιαία ωριαία ταχύτητα του ανέμου u_i , υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα ανέμου για κάθε σημείο του πλέγματος της υπό μελέτης περιοχής.

$$\bar{u} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u_i$$

Όπου M το σύνολο των μετρήσεων για κάθε σημείο του πλέγματος και u_i η ωριαία τιμή της ταχύτητας ανέμου.

Στην πορεία, για τη μελέτη της εποχικότητας για το ανεμολογικό καθεστώς, έγινε υπολογισμός της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου \bar{u}_n για κάθε έναν από του μήνες $n=1,2,\dots,N$ για $N=12$ για όλη τη χρονοσειρά:

$$\bar{u}_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u_{i,n}$$

Όπου M το σύνολο των μετρήσεων του κάθε μήνα.

Για τη μελέτη της εποχικότητας και τον υπολογισμό της ετήσιας και υπερετήσιας μεταβλητότητας, σημαντικό στατιστικό μέγεθος αποτελεί η τυπική απόκλιση, όπου αποτελεί έναν στατιστικό δείκτη διασποράς που δείχνει πόσο διαφοροποιημένες είναι οι τιμές του δείγματος από τη μέση τιμή του. Ο τύπος παρατίθενται παρακάτω:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2, s = \sqrt{s^2}$$

Στη συνέχεια, για την υπό μελέτη περιοχή, μελετώνται δύο ακόμη χρήσιμοι στατιστικοί δείκτες προκειμένου να γίνει πιο λεπτομερής η περιγραφή του ανεμολογικού καθεστώτος καθώς και να ποσοτικοποιηθούν η επίδραση της εποχικότητας και της διαχρονικότητας στο ανεμολογικό καθεστώς. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ο δείκτης Μέσης Ετήσιας Μεταβλητότητας (MAV) και υπερ-ετήσιας Μεταβλητότητας (IAV).

Ο δείκτης της Μέσης ετήσιας Μεταβλητότητας (MAV) ποσοτικοποιεί το μέγεθος μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου που εμφανίζεται από τη μια εποχή του έτους στην άλλη και δίνεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$MAV = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^i \frac{S_{u,y}(j)}{\bar{u}_y(j)}$$

όπου $\bar{u}_{y=j}$ είναι η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου για το έτος j και $S_{u,y}(j)$ είναι η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου ανά έτος.

Όσον αφορά τον δείκτη της υπέρ-ετήσιας μεταβλητότητας (IAV), δείχνει τη μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου μιας περιοχής ανά έτος και η μαθηματική σχέση δίνεται παρακάτω:

$$IAV = \frac{S_{\bar{u}_y(j)}}{\bar{u}}$$

Όπου $S_{\bar{u}_y(j)}$ είναι η τυπική απόκλιση των μέσων τιμών της ταχύτητας του ανέμου για κάθε έτος j και \bar{u} είναι η μέση ετήσια ταχύτητα για το σύνολο των δεδομένων.

3.2 Επεξεργασία Διεύθυνσης Ανέμου

Ο υπολογισμός της μέσης διεύθυνσης για κάθε σημείο του πλέγματος της υπό μελέτη περιοχής γίνεται με βάση την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \tan^{-1}(S/C) , S > 0 , C > 0 \\ \tan^{-1}(S/C) + \pi , C > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{S}{C}\right) + 2\pi , S < 0 , C > 0 \end{cases}$$

Όπου S το άθροισμα των ημιτόνων των γωνιών και C το άθροισμα των συνημιτόνων των γωνιών:

$$C = \sum_{n=0}^n \cos(\theta_i) , S = \sum_{n=0}^n \sin(\theta_i)$$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη “CircStat” (Berens,2009) μέσω της οποίας είναι εφικτό να υπολογιστούν διάφορα στατιστικά μεγέθη γωνιακών μεγεθών ώστε να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί.

3.3 Επεξεργασία Αιολικού Δυναμικού

Στην παρούσα ενότητα γίνεται υπολογισμός του αιολικού δυναμικού το οποίο αποτελεί την ποσότητα της αιολικής ισχύος που υπάρχει διαθέσιμη στην υπό μελέτη περιοχή. Υπολογίστηκε η στιγμιαία τιμή του αιολικού δυναμικού $P_i(W/m^2)$ με βάση τα δεδομένα της χρονοσειράς των τιμών της ταχύτητας του ανέμου στις κορυφές του πλέγματος της υπό μελέτης περιοχής. Σημειώνεται πως η πυκνότητα του αέρα ρ , λαμβάνεται σταθερή και ίση με $1,2258 kg/m^3$. Επομένως ο υπολογισμός του στιγμιαίου αιολικού δυναμικού δίνεται σύμφωνα με την επόμενη μαθηματική σχέση:

$$P_i = \frac{1}{2} \rho u_i^3$$

Όπως και στην περίπτωση του ανέμου, έτσι και για το αιολικό δυναμικό υπολογίζεται η μέση τιμή του αιολικού δυναμικού ως εξής:

$$\bar{P}_{wind} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$$

Η τυπική απόκλιση για το αιολικό δυναμικό δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2, s = \sqrt{s^2}$$

Η Μέση Ετήσια Μεταβλητότητα του αιολικού δυναμικού δίνεται από τον τύπο:

$$MAV = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^i \frac{S_p(j)}{\bar{P}(j)}$$

Η Υπέρ-ετήσια Μεταβλητότητα του αιολικού δυναμικού υπολογίζεται ως εξής:

$$IAV = \frac{S_{\bar{P}(j)}}{\bar{P}}$$

3.4 Περιγραφή Ηλιακού Δυναμικού

Πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας έτσι ώστε να περιγραφεί το ηλιακό δυναμικό στην υπό μελέτη περιοχή. Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκε η μέση τιμή του ηλιακού δυναμικού για το σύνολο των σημείων του πλέγματος της περιοχής μελέτης.

$$\bar{P}_{solar} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SSRD_i$$

Όπου N είναι ο αριθμός του συνόλου των μετρήσεων

Υπολογίστηκε παράλληλα η μέση τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, για κάθε έναν από τους μήνες $n=1,2,\dots,N$ για $N=12$. Ο συγκεκριμένος δείκτης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς κατά τη διάρκεια ενός μήνα ή ανά εποχή, η διάρκεια της ημέρας αλλάζει.

$$\bar{P}_{solar_m} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N SSRD_{i,M=m}$$

Όπου L ο αριθμός του συνόλου των μετρήσεων για κάθε έναν από τους μήνες m.

3.5 Περιγραφή Συμπληρωματικότητας και Συνέργειας Αιολικού και Ηλιακού Δυναμικού

Η Συμπληρωματικότητα αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές πτυχές στις μελέτες σκοπιμότητας για την εγκατάσταση υβριδικών πάρκων. Συγκεκριμένα, αναφέρεται στη “συμπληρωματική” σχέση που μπορεί να επιτευχθεί με το συνδυασμό διαφορετικών μορφών παραγωγής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Διαφορετικές θαλάσσιες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως, υπεράκτια αιολική ενέργεια, παλιρροιακή ενέργεια, κυματική ενέργεια, μπορούν να αλληλοσυμπληρώνονται όσον αφορά τη διαθεσιμότητα των πόρων. Με αυτόν τον τρόπο, μια υβριδική κατασκευή μπορεί να εξασφαλίσει βελτιωμένη συνολική απόδοση. Και λόγω του ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη του αιολικού και του ηλιακού δυναμικού, μπορεί να υπάρχει για παράδειγμα συμπληρωματικότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το συνδυασμό αιολικών και ηλιακών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, καθώς τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράγουν περισσότερη ενέργεια κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ τα αιολικά πάρκα φτάνουν στη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως το χειμώνα.

Η έννοια της συνέργειας, όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αναφέρεται στο συνδυασμό διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνολογιών με τρόπο που ενισχύεται “συνεργατικά” η συνολική αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα. Εν προκειμένω, όταν το αιολικό δυναμικό αυξάνεται και αυξάνεται και το ηλιακό δυναμικό, υποδηλώνεται μια μορφή συνέργειας μεταξύ των δύο μεγεθών.

Η συμπληρωματικότητα μπορεί να προσδιοριστεί χωρικά, χρονικά και χωροχρονικά. Ο υπολογισμός της συμπληρωματικότητας δύο μεγεθών, μπορεί να γίνει με τη χρήση πολλών δεικτών (Kendall's τ , Spearman's ρ), η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη οικογένεια δεικτών περιλαμβάνει διάφορους συντελεστές συσχέτισης (CC, Correlation Coefficient). Ο πιο γνωστός είναι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson ο οποίος χρησιμοποιείται ευραίως για τον χαρακτηρισμό της ισχύος της συμπληρωματικότητας μεταξύ δύο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παίρνει τιμές στο διάστημα [-1, 1], ποσοτικοποιεί την ισχύ συσχέτισης μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών και αποκαλύπτει την κατεύθυνση αυτής της σχέσης. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ των δυο τυχαίων μεταβλητών. Εάν μια τυχαία μεταβλητή αυξάνεται (μειώνεται), τότε η άλλη επίσης αυξάνεται (μειώνεται). Από την άλλη πλευρά, οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν αντίθετη συμπεριφορά, ενώ η συσχέτιση μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών γίνεται πιο αδύναμη καθώς οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης τείνουν στο μηδέν. Κατά συνέπεια στην αξιολόγηση των υβριδικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν συμπληρωματικότητα, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν συνέργεια μεταξύ των πηγών. (Soukissian et. al., 2021) Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε ποσοτικοποίηση της συμπληρωματικότητας και της συνέργειας μεταξύ του αιολικού

και ηλιακού δυναμικού με τη χρήση του συγκεκριμένου συντελεστή. Οι τιμές συσχέτισης στο διάστημα (-0.3 , 0.0) υποδηλώνουν ασθενή συμπληρωματικότητα, στο διάστημα (-0.6 , 0.3) μέτρια συμπληρωματικότητα, στο διάστημα (-0.9,-0.6) ισχυρή συμπληρωματικότητα και (-1.0 , 0.9) πολύ ισχυρή συμπληρωματικότητα.

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, όταν εφαρμόζεται σε ένα δείγμα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}}$$

Όπου \bar{X}, \bar{Y} , είναι οι μέσες τιμές των X και Y αντίστοιχα και X_j, Y_j είναι το μεμονωμένο σημείο του δείγματος των X και Y αντίστοιχα με $j=1, \dots, N$.

4. Αποτελέσματα Έρευνας

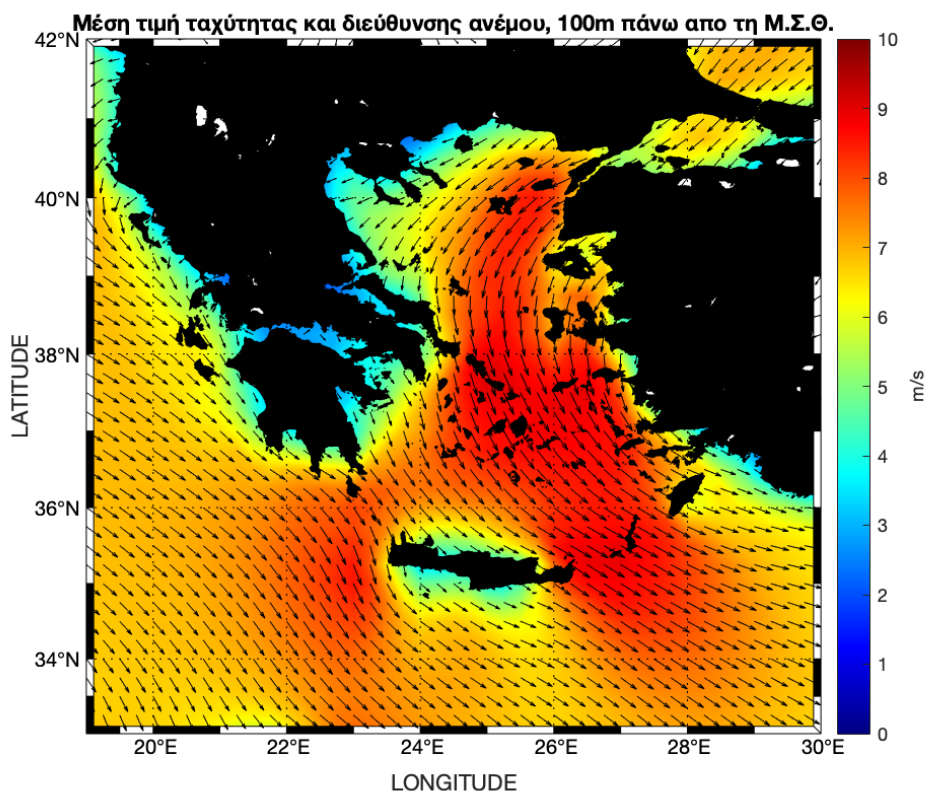
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως προαναφέρθηκε, μελετήθηκε το αιολικό και ηλιακό δυναμικό στις ελληνικές θάλασσες με σκοπό την πιθανή εγκατάσταση υβριδικού πάρκου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πλαίσια. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των δεδομένων με χρήση προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab. Τα αποτελέσματα οπτικοποιήθηκαν με τη βοήθεια της διαθέσιμης βιβλιοθήκης `m_map` του καθηγητή Rich Pawlowic και παρουσιάζονται στην πορεία της παρούσας ενότητας.

4.1 Περιγραφή του διαθέσιμου Αιολικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες

4.1.1 Ανεμολογικό Καθεστώς

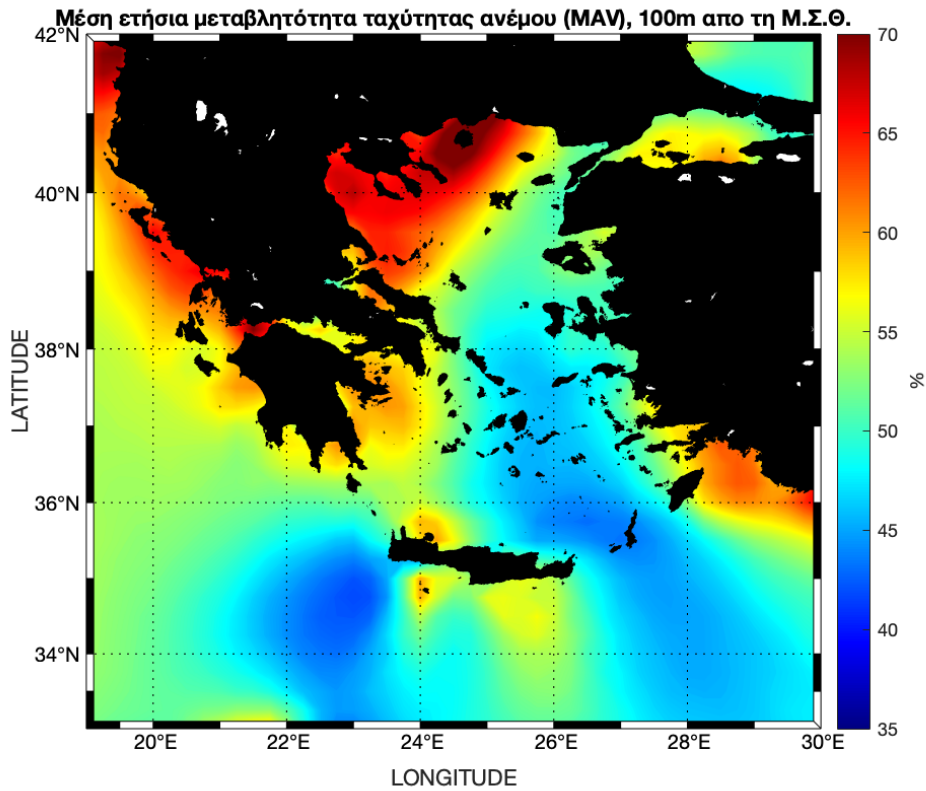
Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα του υπεράκτιου ανέμου 100 μέτρα πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Από τον χάρτη φαίνεται πως οι περιοχές που παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές μέσης ταχύτητας ανέμου συναντώνται κυρίως στο Αιγαίο Πέλαγος, στην ευρύτερη περιοχή των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων, καθώς και στο Βόρειο Αιγαίο αφού η μέση τιμή της ταχύτητας προσεγγίζει τα 9m/s , ενώ τα παράλια χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές ταχύτητας ανέμου.

Οι άνεμοι που πνέουν στο Ιόνιο Πέλαγος, στο Κρητικό καθώς και στο νότιο Αιγαίο Πέλαγος χαρακτηρίζονται από βορειοδυτικές διευθύνσεις. Στην περιοχή του ανατολικού και βόρειου Αιγαίου επικρατούν βόρειοι και βορειοανατολικοί άνεμοι. Η υψηλότερη τιμή της μέσης ταχύτητας ανέμου εντοπίζεται στην περιοχή μεταξύ κεντρικού και βορείου Αιγαίου προσεγγίζοντας τα 9 m/s .

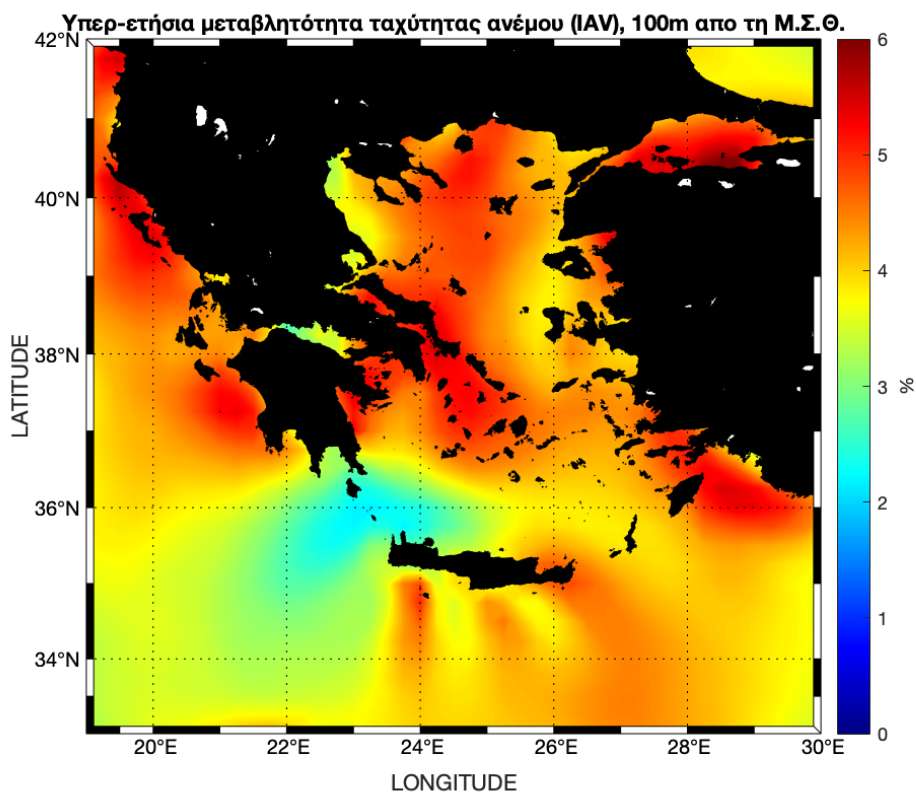


Χάρτης 1: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των δεικτών της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας (MAV) καθώς και την υπερ-ετήσιας μεταβλητότητας (IAV). Οι πιο υψηλές τιμές του δείκτη μέσης ετήσιας μεταβλητότητας παρατηρούνται στη περιοχή του νησιού της Θάσου καθώς η ετήσια μεταβλητότητα προσεγγίζει το 70%. Ως προς την υπέρ-ετήσια μεταβλητότητα οι τιμές που παρουσιάζονται είναι αρκετά χαμηλές και κάτω από 5%, ποσοστό αρκετά ικανοποιητικό για μελλοντική εγκατάσταση θαλάσσιου αιολικού πάρκου αφού η απόδοση από έτος σε έτος σε θα έχει μεγάλες διαφορές.



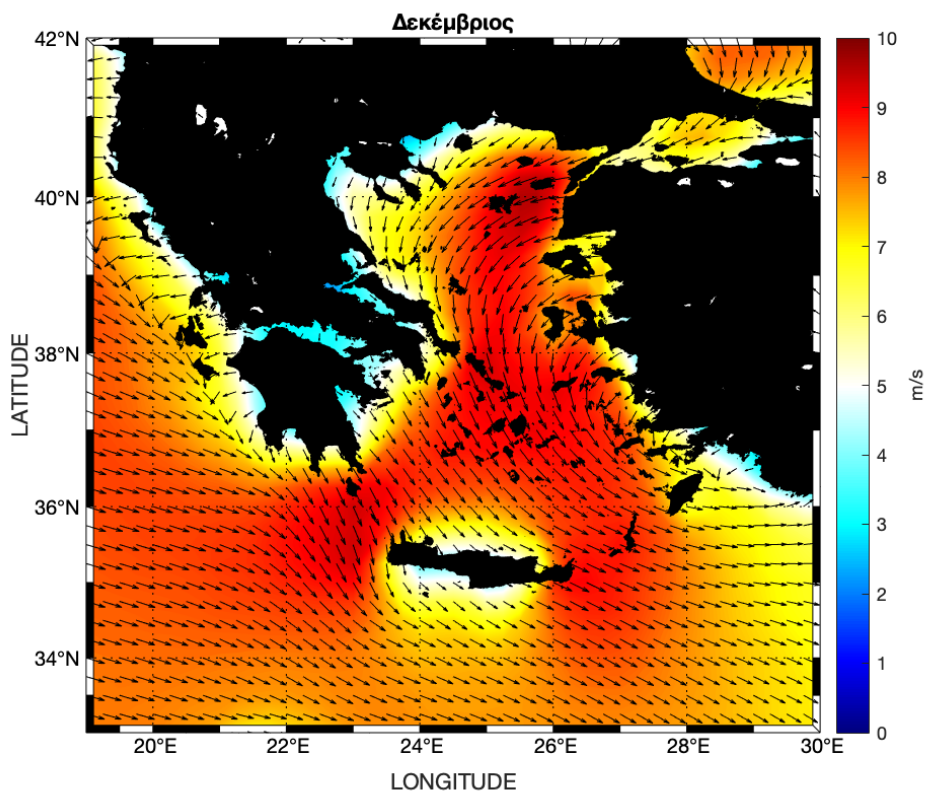
Χάρτης 2: Χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας (MAV) της ταχύτητας ανέμου που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες



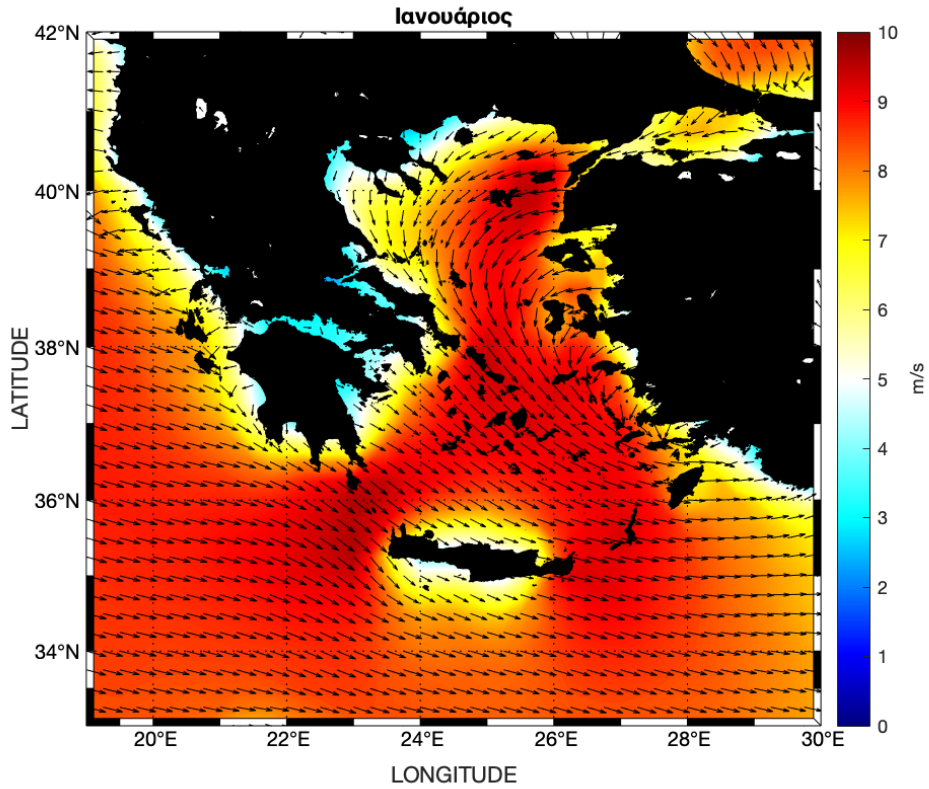
Χάρτης 3: Χωρική κατανομή της μέσης υπερ-ετήσιας μεταβλητότητας (IAV) της ταχύτητας ανέμου που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια πιο λεπτομερής παρουσίαση του ανεμολογικού καθεστώτος στην περιοχή των ελληνικών θαλασσών καθώς μελετάται η μέση τιμή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου στην υπό μελέτη περιοχή ανά μήνα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στις επόμενες εικόνες.

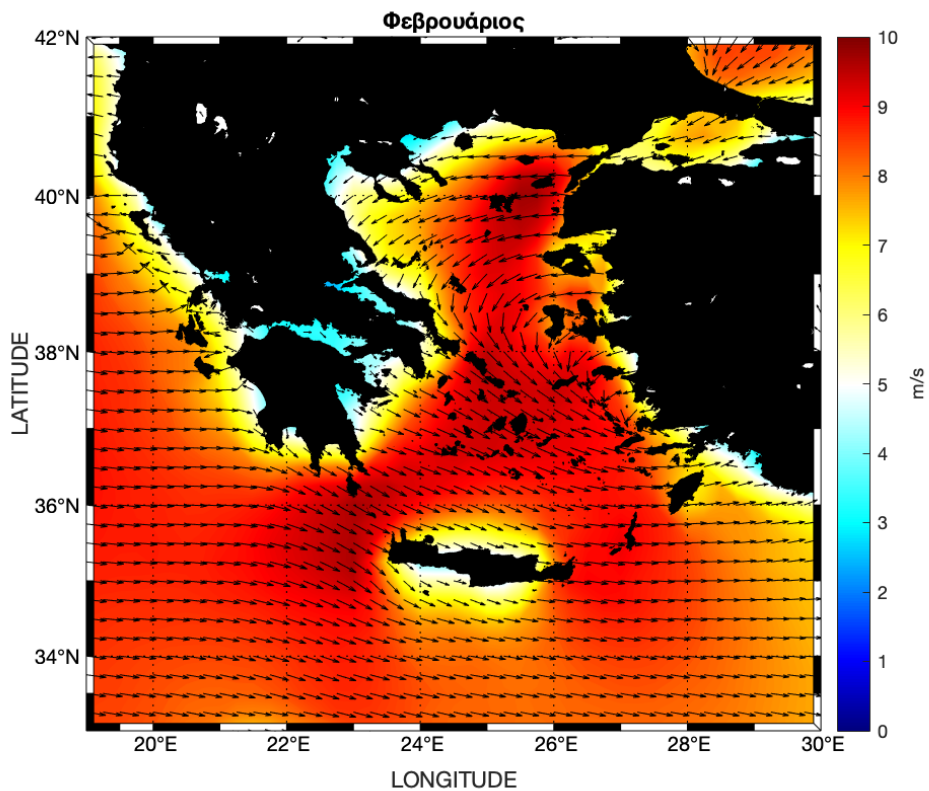
Κατά τους χειμερινούς μήνες η μέση ταχύτητα ανέμου φαίνεται να έχει ομοιόμορφη χωρική κατανομή προσεγγίζοντας τιμές 9 με 10 m/s σε περιοχές όπως δυτικά της Κρήτης, στις Κυκλάδες καθώς και στα Δωδεκάνησα.



Χάρτης 4: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου τον Δεκέμβριο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

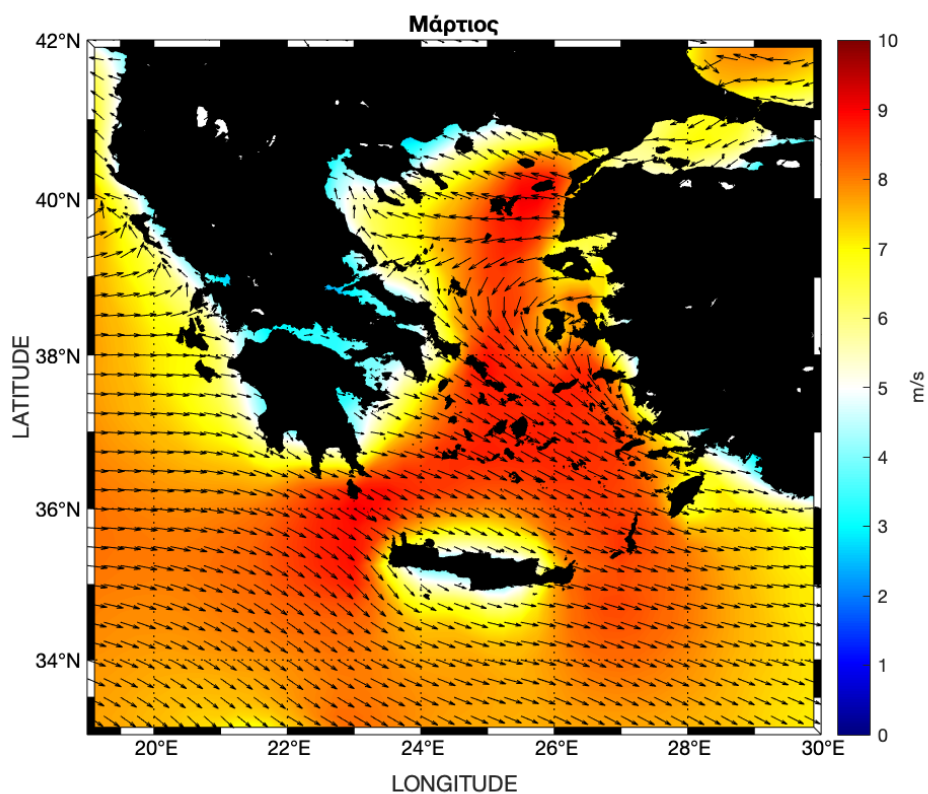


Χάρτης 5: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου τον Ιανουάριο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

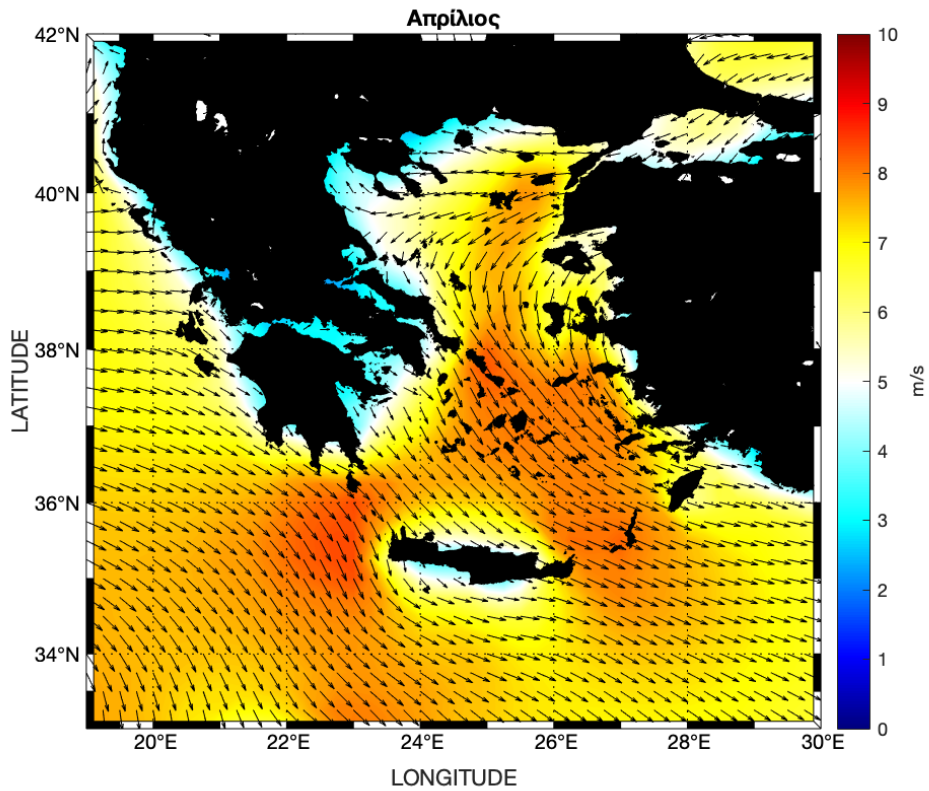


Χάρτης 6: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Φεβρουάριο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

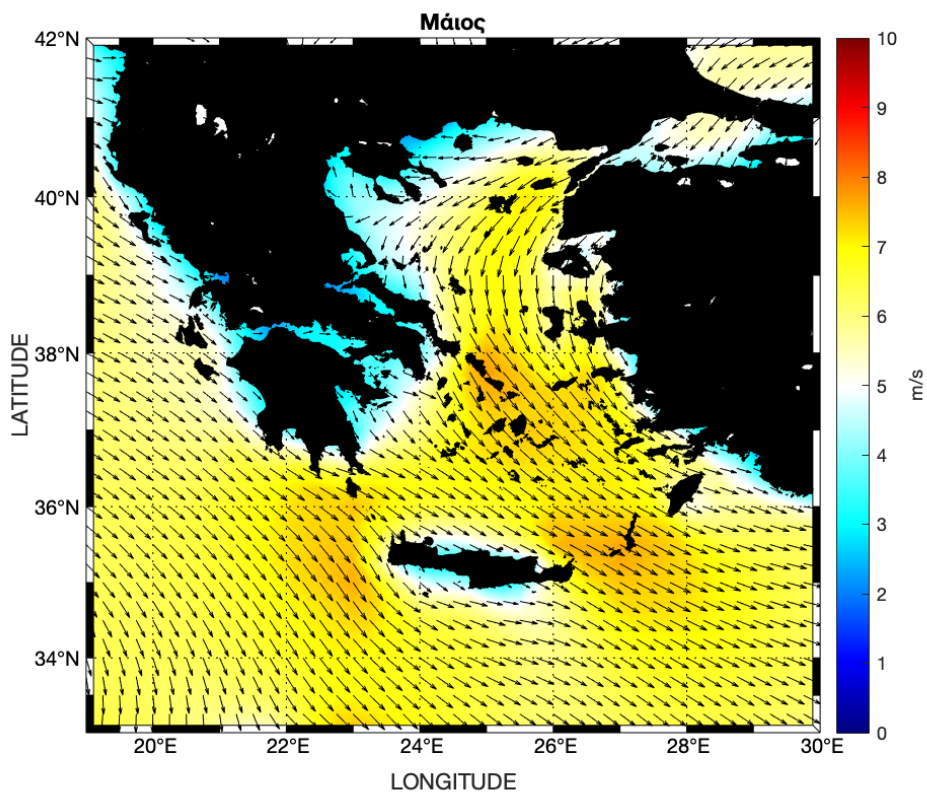
Στην πορεία κατά τους εαρινούς μήνες παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στους μήνες. Συγκεκριμένα οι υψηλότερες ταχύτητες παρατηρούνται κυρίως τον Μάρτιο κατά τον οποίο η μέση τιμή ξεπερνάει τα 8 m/s και σε κάποιες περιοχές τα 9m/s. Τον Απρίλιο η τιμή της μέσης ταχύτητας παρουσιάζεται μειωμένη καθώς κυμαίνεται στα 7 με 8 m/s ενώ τον Μάιο η μείωση στη μέση τιμή της ταχύτητας φαίνεται να είναι ακόμη μεγαλύτερη με τιμές κάτω από 7 m/s, εκτός από ορισμένες περιοχές που προσεγγίζουν και ξεπερνάνε αυτή τη τιμή.



Χάρτης 7: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Μάρτιο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

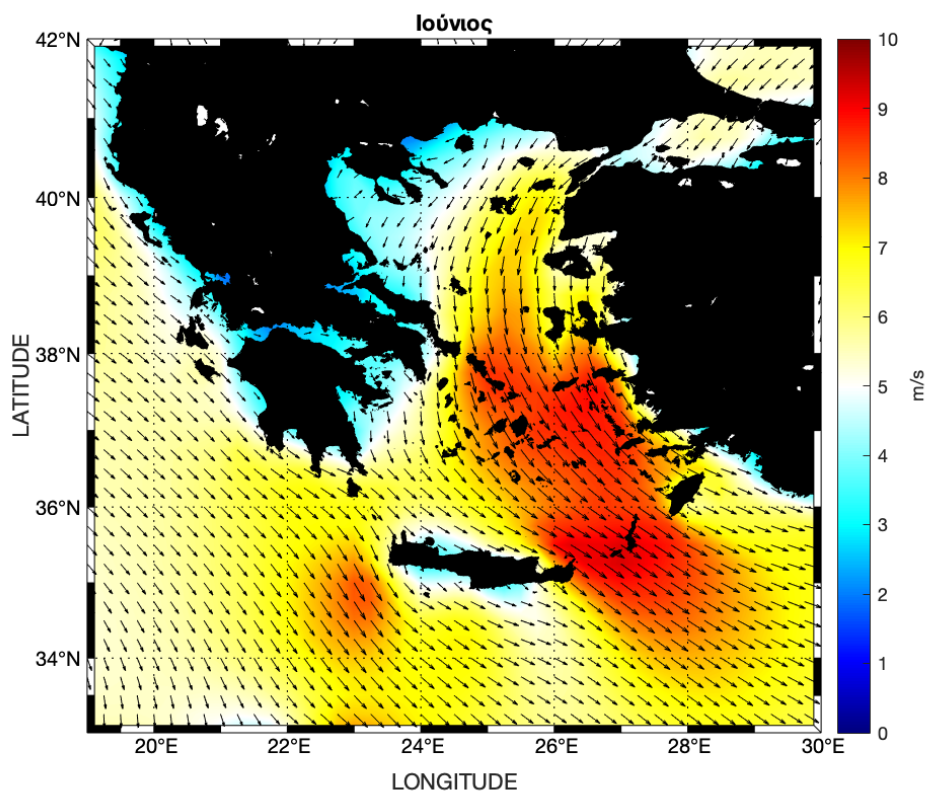


Χάρτης 8: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Απρίλιο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

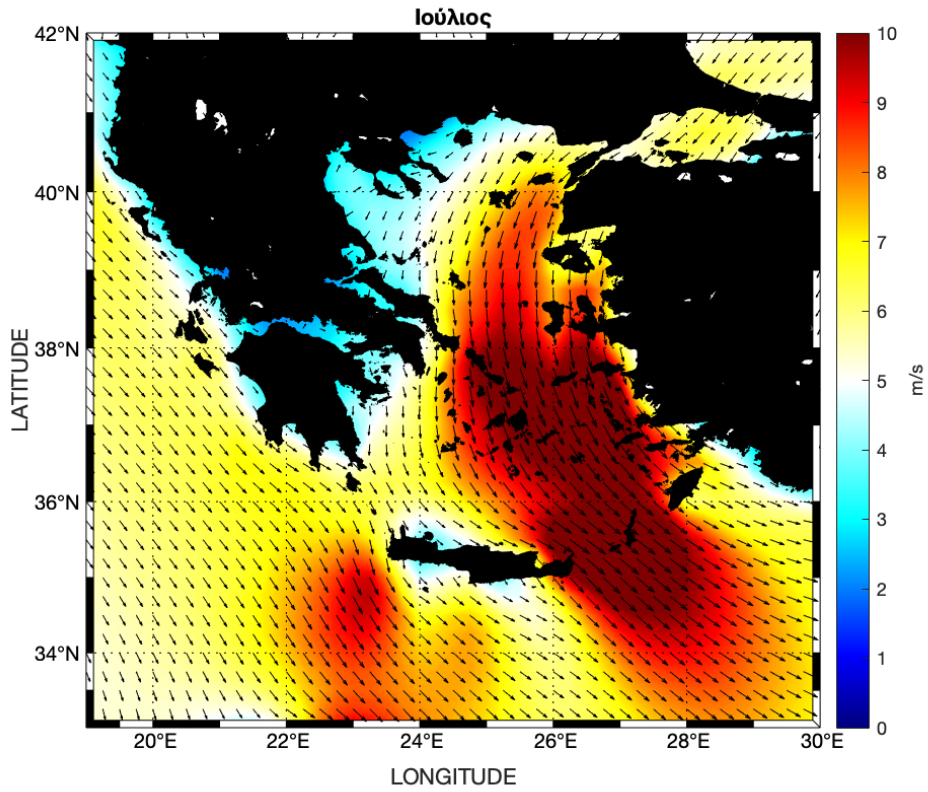


Χάρτης 9: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Μάιο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

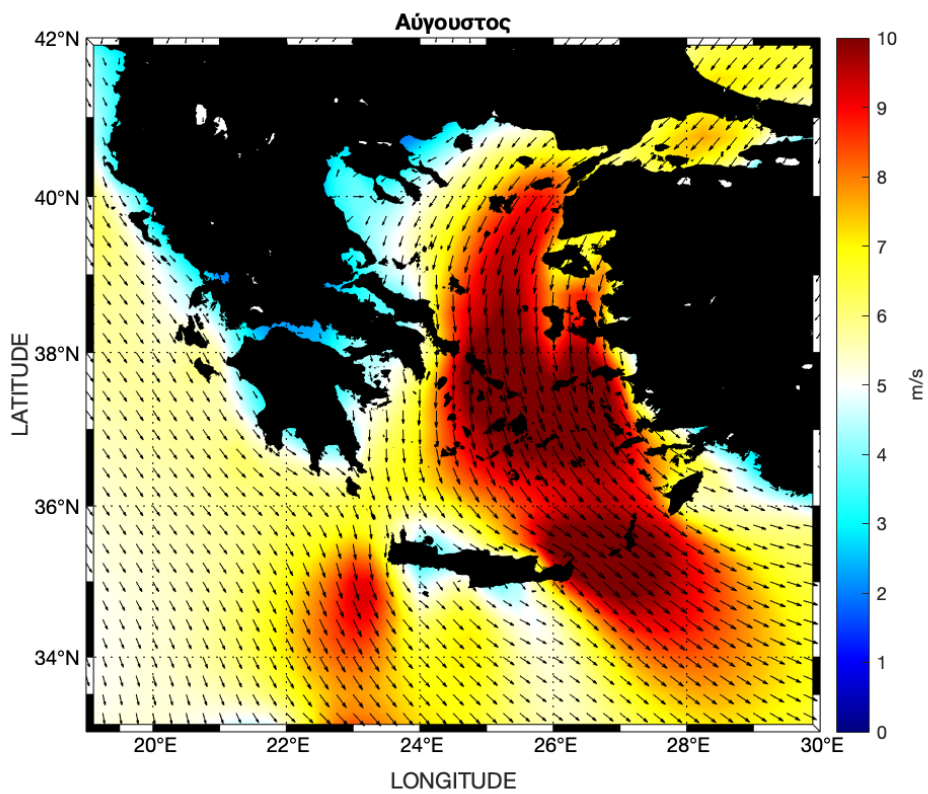
Σχετικά με τους θερινούς μήνες, όπως φαίνεται και από τις μετέπειτα εικόνες οι ταχύτητες παρουσιάζουν αρκετά υψηλές τιμές, ιδιαίτερα κατά τους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου, προσεγγίζοντας τα 9 με 10 m/s. Η υψηλές αυτές ταχύτητες φαίνεται να είναι αποτέλεσμα των θερινών μελεμιών στην περιοχή ιδιαίτερα των Κυκλάδων αλλά και γενικότερα του Αιγαίου Πελάγους. Κατά τον Ιούνιο δε, οι τιμές παρουσιάζονται πιο χαμηλές με τιμές που προσεγγίζουν τα 8 m/s.



Χάρτης 10: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου τον Ιούνιο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

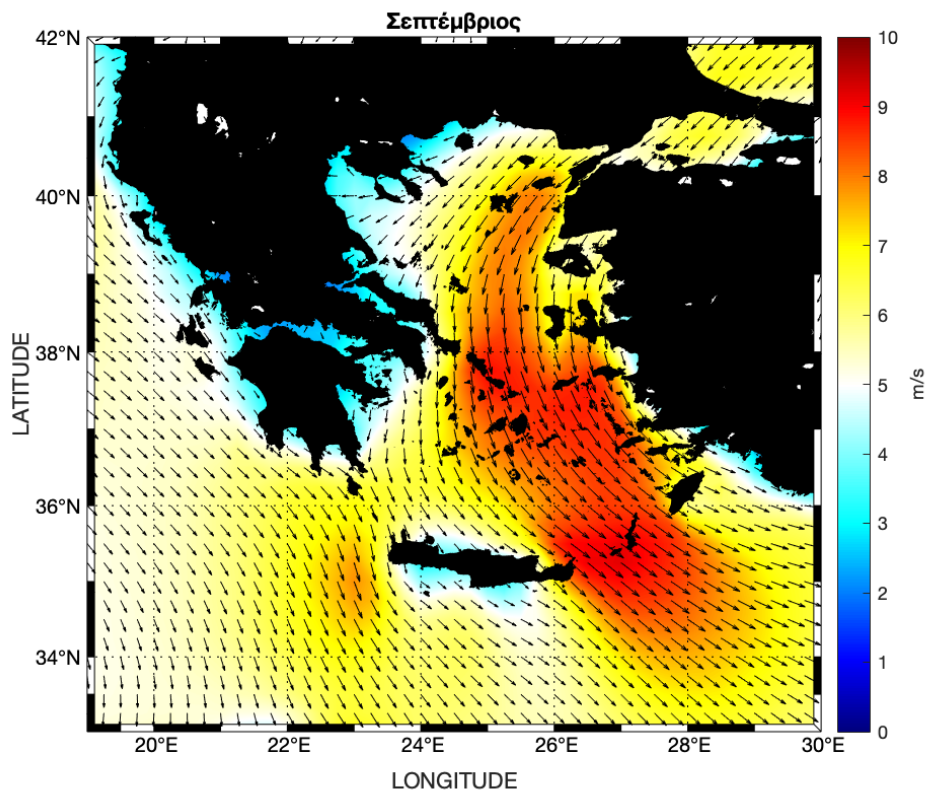


Χάρτης 11: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου τον Ιούλιο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

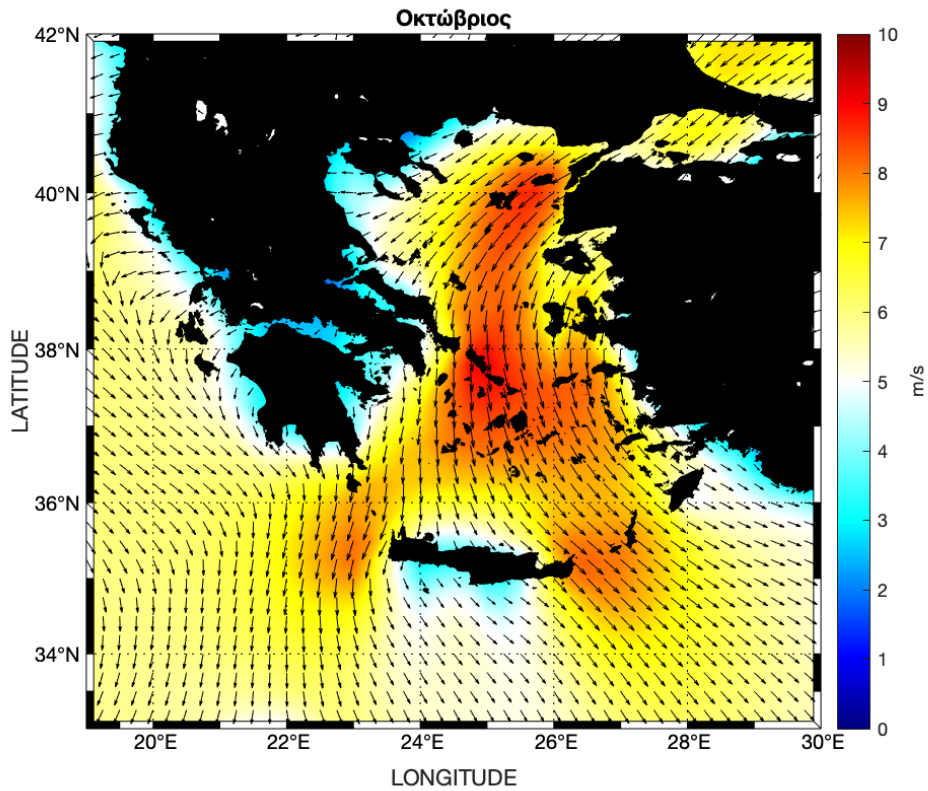


Χάρτης 12: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Αύγουστο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

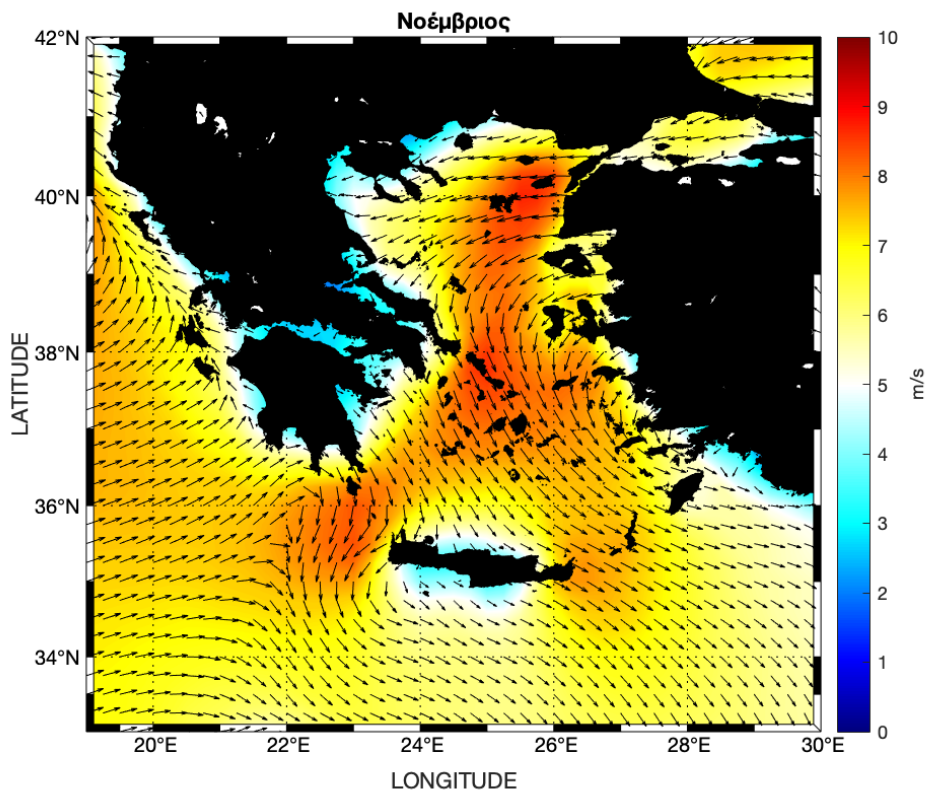
Τέλος κατά την περίοδο του Φθινοπώρου, οι μήνες του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου φαίνεται να έχουν παρόμοιες χωρικές κατανομές της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου, προσεγγίζοντας τιμές πάνω από 7m/s σε περιοχές των Κυκλάδων καθώς και Ανατολικά της Κρήτης. Κατά το μήνα του Νοεμβρίου παρουσιάζεται μια αύξηση της μέσης τιμής της ταχύτητας δυτικά της Κρήτης προσεγγίζοντας τιμές πάνω από 7m/s.



Χάρτης 13: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Σεπτέμβριο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες



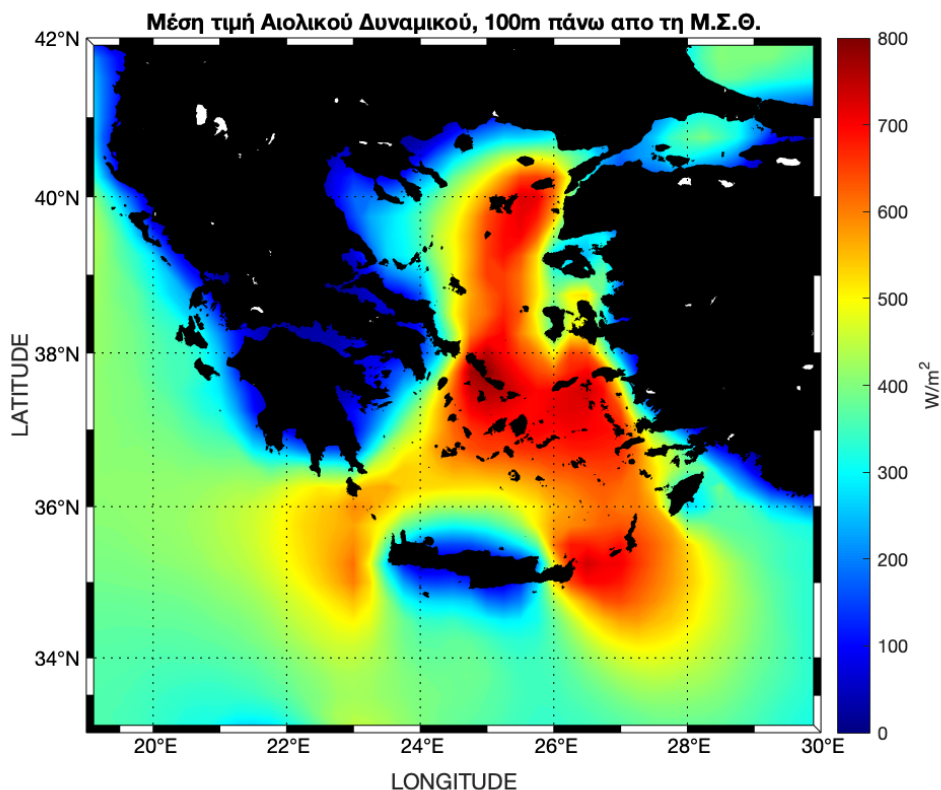
Χάρτης 14: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Οκτώβριο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες



Χάρτης 15: Χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου το Νοέμβριο που πνέει πάνω από τις ελληνικές θάλασσες

4.1.2 Αιολικό Δυναμικό

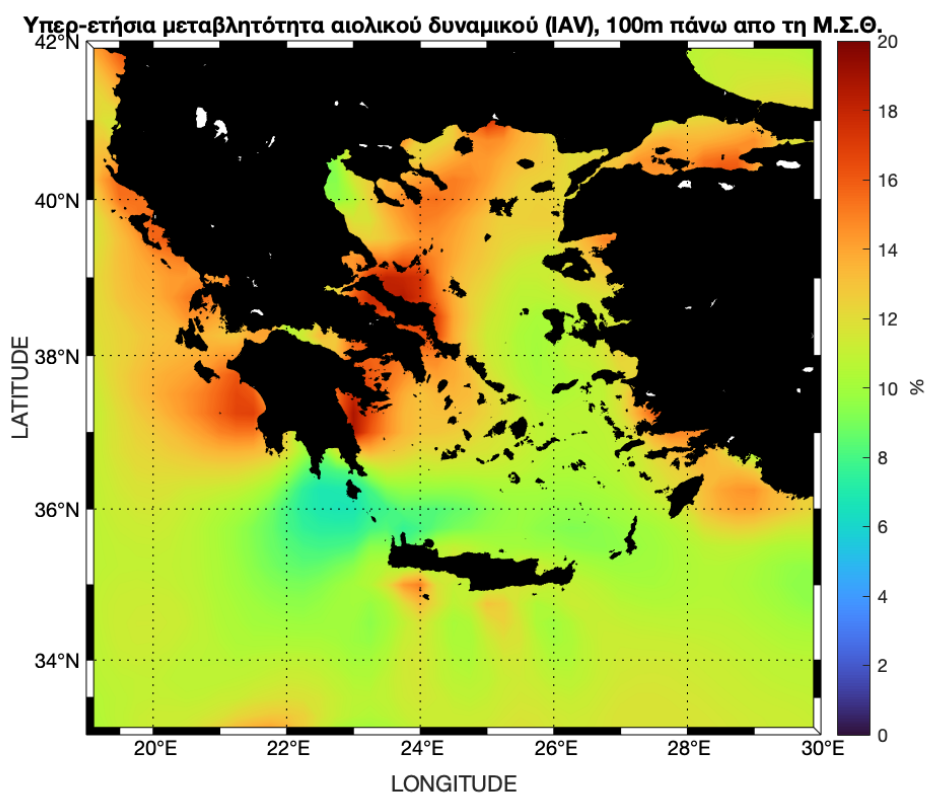
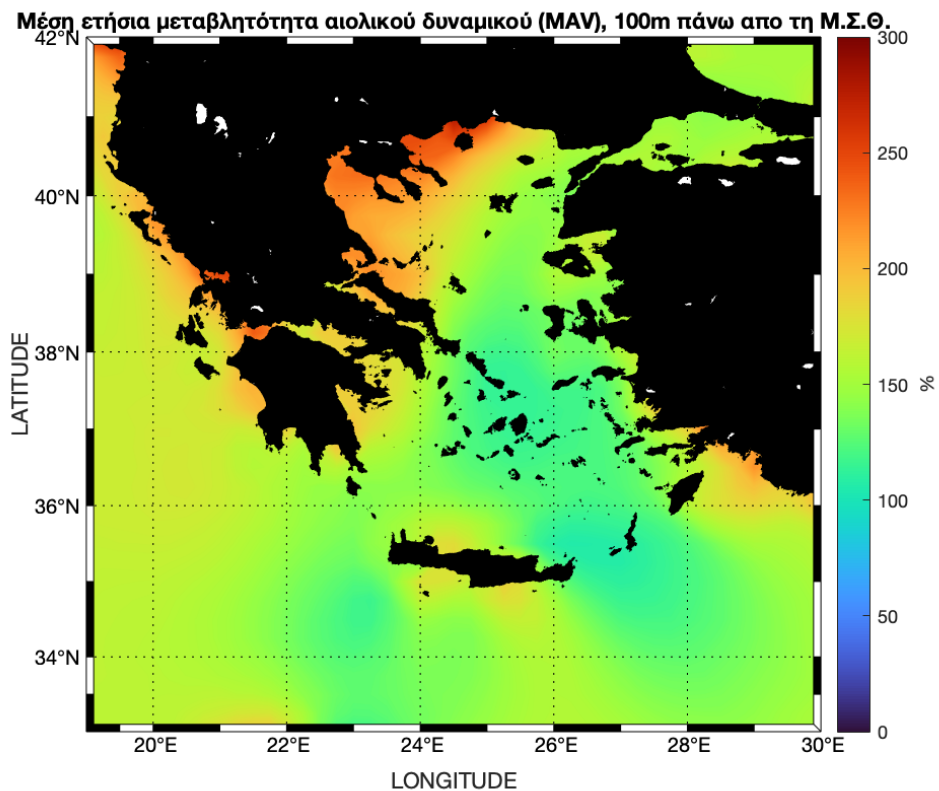
Στην πορεία παρουσιάζεται η μέση τιμή του Αιολικού Δυναμικού στα 100 μέτρα πάνω από τη μέση στάθμη θάλασσας. Παρατηρείται πως προσεγγίζονται αρκετά υψηλές τιμές που προσεγγίζουν και τα 800 W/m^2 στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου Πελάγους και ιδιαίτερα στις κυκλάδες.



Χάρτης 16: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος

Στις επόμενες εικόνες φαίνονται η χωρική κατανομή των δεικτών της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας (MAV) και την υπερ-ετήσιας μεταβλητότητας (IAV) του αιολικού δυναμικού. Όσον αφορά τη χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας του αιολικού δυναμικού, έχει παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη της μέσης ταχύτητας ανέμου. Παρατηρούνται τιμές που προσεγγίζουν το 200 με 250% σε περιοχές των Σποράδων, του βορειοδυτικού Αιγαίου καθώς και στην περιοχή της Θάσου. Χαμηλές τιμές παρατηρούνται στο κεντρικό Αιγαίο Πέλαγος, ανατολικά της Κρήτης. Σχετικά με τον δείκτη της υπερ-ετήσιας μεταβλητότητας εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένος σε περιοχές κοντά στη χερσαία Ελλάδα, ανατολικά και Δυτικά της Πελοποννήσου με

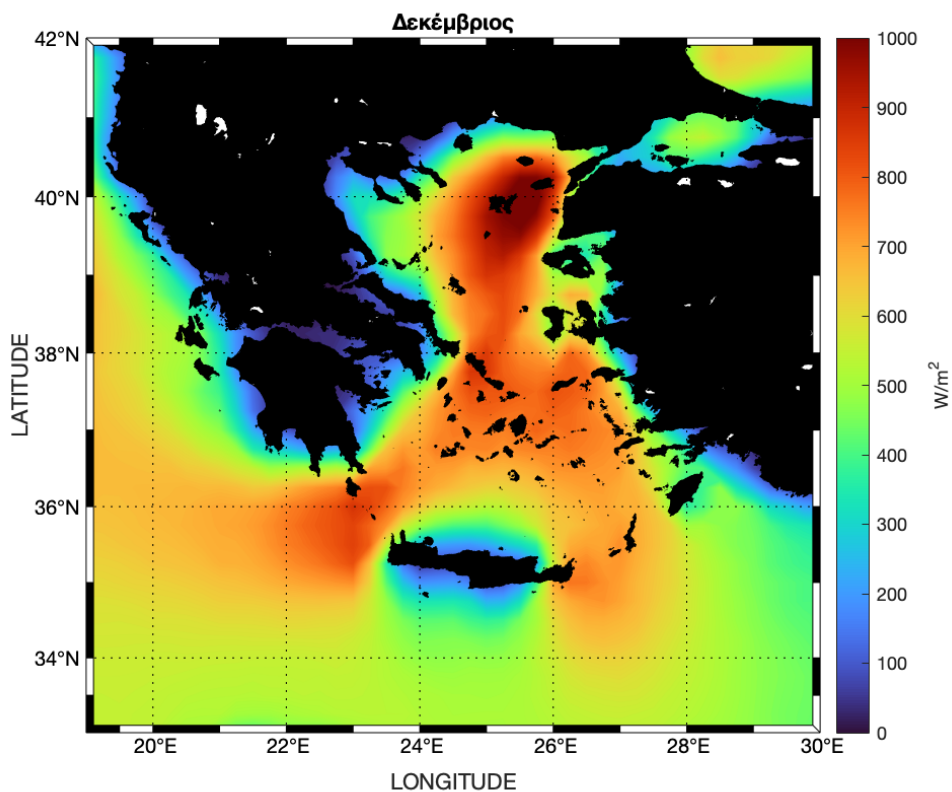
τιμές που προσεγγίζουν το 16% ενώ σε περιοχές ανοιχτά της Εύβοιας εμφανίζονται τιμές που προσεγγίζουν το 18%.



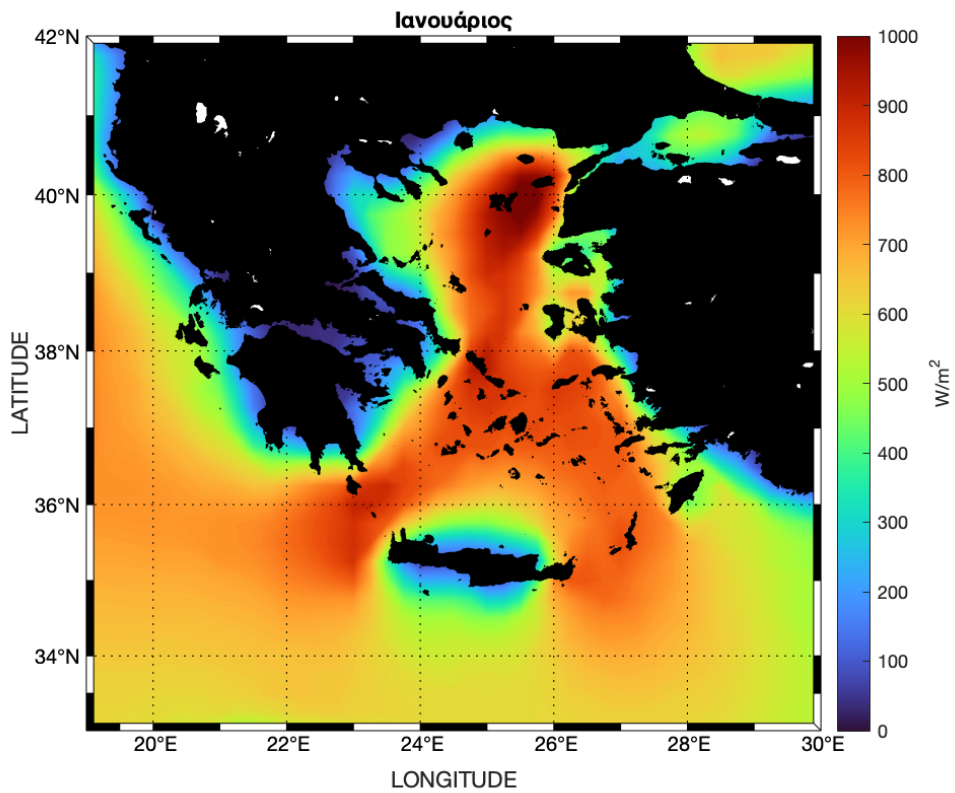
Χάρτης 17: Χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας (MAV) (επάνω) και υπερ-ετήσιας μεταβλητότητας (κάτω) του αιολικού δυναμικού

Στην πορεία, παρουσιάζεται όπως και στην περίπτωση της ταχύτητας του ανέμου, μια πιο λεπτομερής ανάλυση των ελληνικών θαλασσών για το αιολικό δυναμικό ανά μήνα.

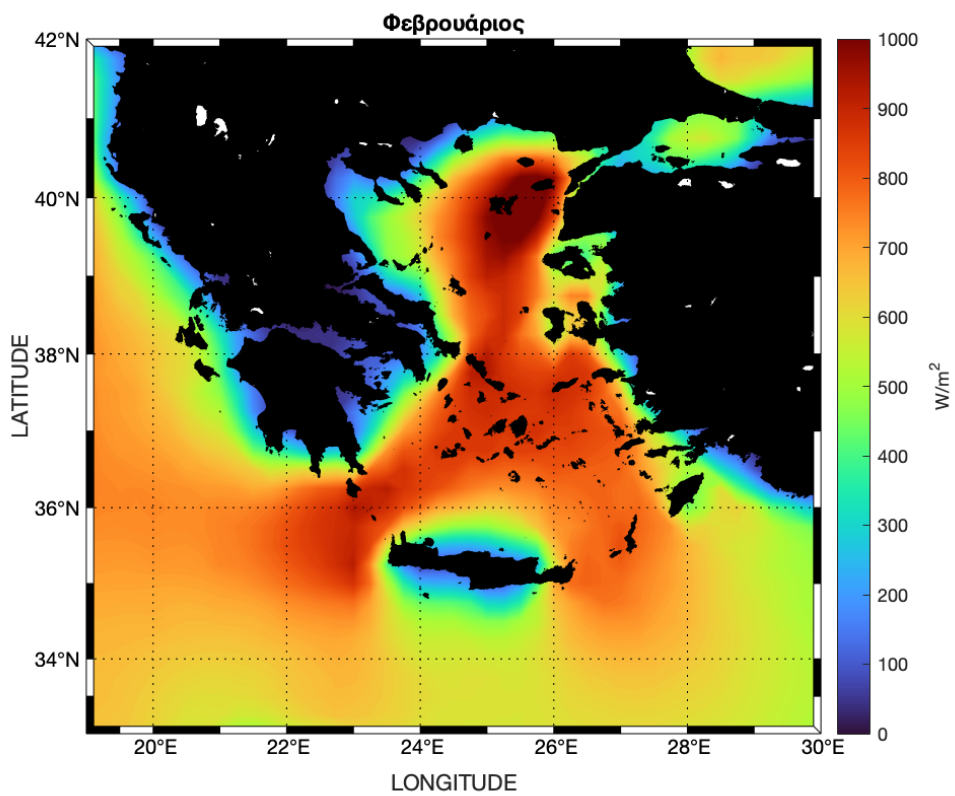
Κατά τη διάρκεια του Χειμώνα, η κατανομή της μέσης τιμής του αιολικού δυναμικού εμφανίζει παρόμοια χωρική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα κατά το μήνα του Δεκεμβρίου στο βορειοανατολικό Αιγαίο εμφανίζονται τιμές μεγαλύτερες του 800 W/m^2 ενώ γενικότερα οι τιμές στις υπόλοιπες περιοχές κυμαίνονται στα 700 W/m^2 - 800 W/m^2 . Κατά τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο, εμφανίζονται τιμές που προσεγγίζουν τα 800 W/m^2 και στις κυκλάδες, κεντρικό Αιγαίο Πέλαγος καθώς και νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου.



Χάρτης 18: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Δεκέμβριο

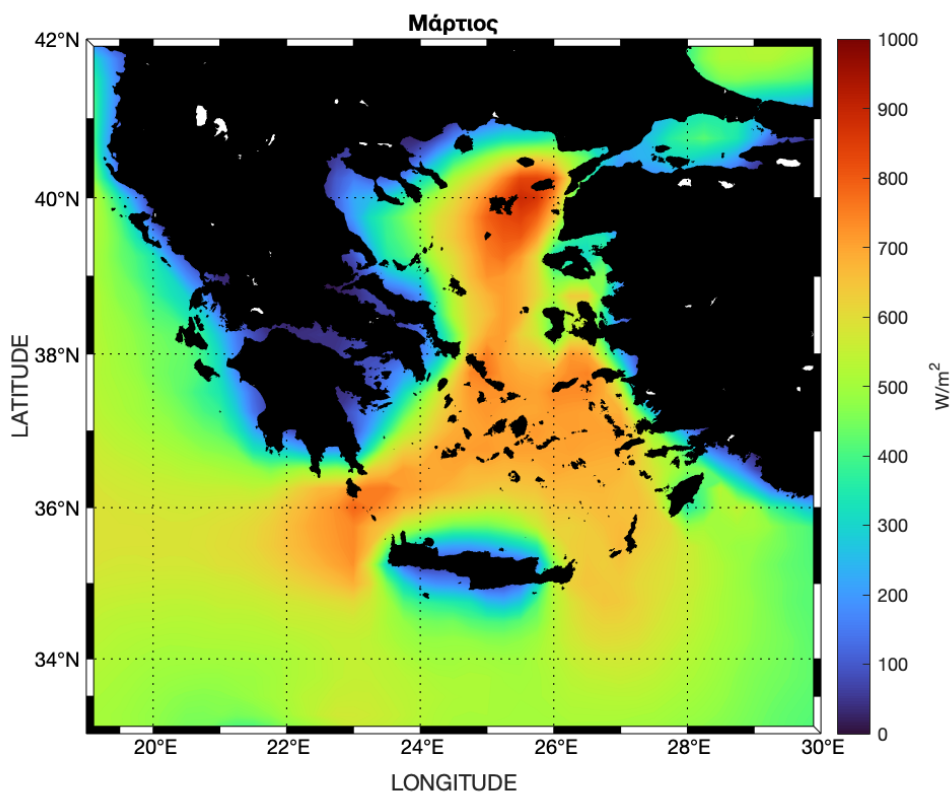


Χάρτης 19: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος τον Ιανουάριο

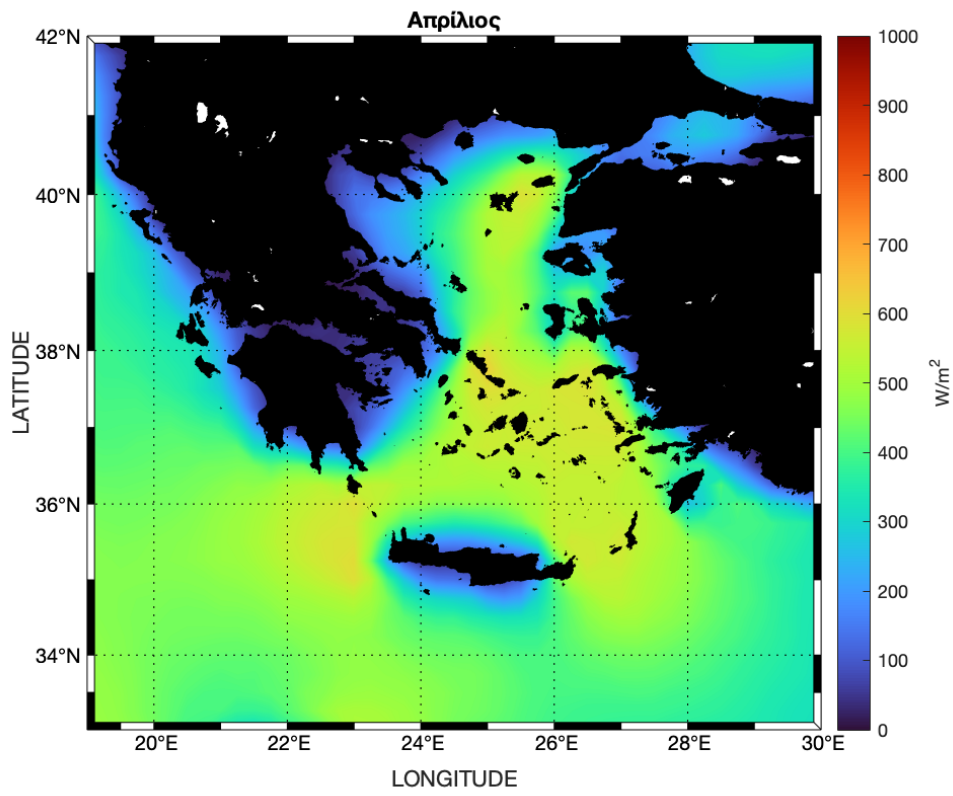


Χάρτης 20: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Φεβρουάριο

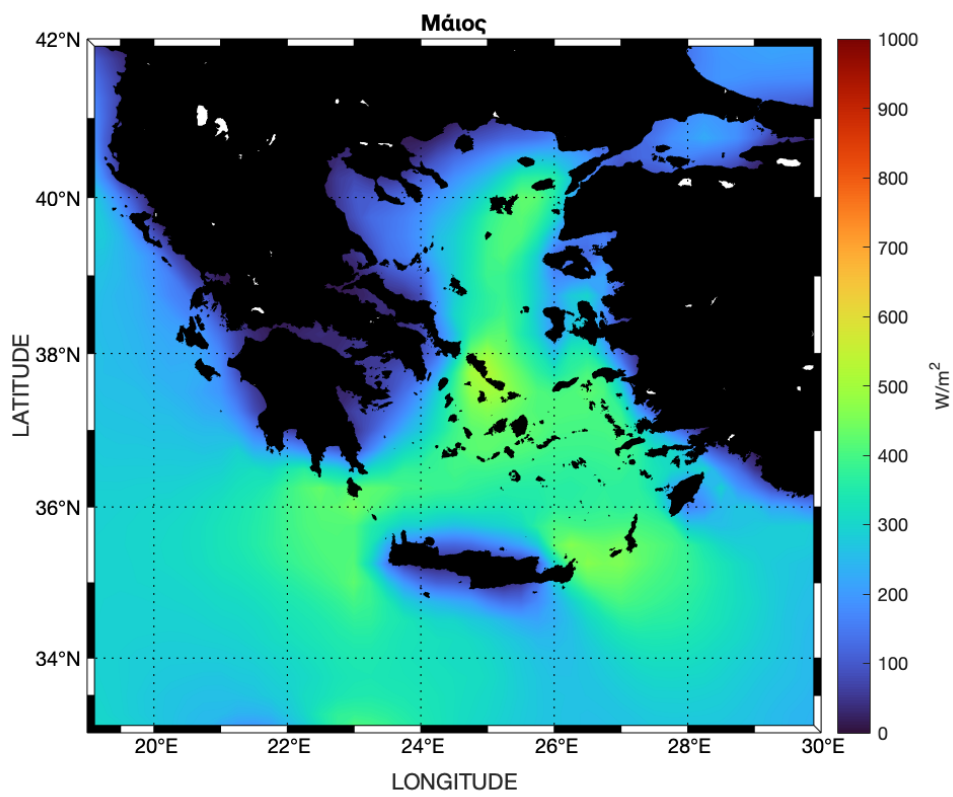
Η χωρική κατανομή της μέσης τιμής του αιολικού δυναμικού κατά τους εαρινούς μήνες φαίνεται να μοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη χωρική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου της ίδια εποχή. Συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται κατά το μήνα του Μαρτίου, όπου εμφανίζονται τιμές που προσεγγίζουν και ξεπερνάνε τα 700 W/m^2 στο μεγαλύτερο μέρος του Αιγαίου Πελάγους. Τον Απρίλιο η μέση τιμή του αιολικού δυναμικού φαίνεται να μειώνεται καθώς ανέρχεται σε τιμές κοντά στα 600 W/m^2 ενώ κατά τον Μάιο, εμφανίζονται ιδιαίτερα χαμηλές τιμές που προσεγγίζουν τα 400 W/m^2 με 500 W/m^2 , ενώ σε αρκετά σημεία η μέση τιμή του αιολικού δυναμικού είναι κάτω από 300 W/m^2 .



Χάρτης 21: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος τον Μάρτιο

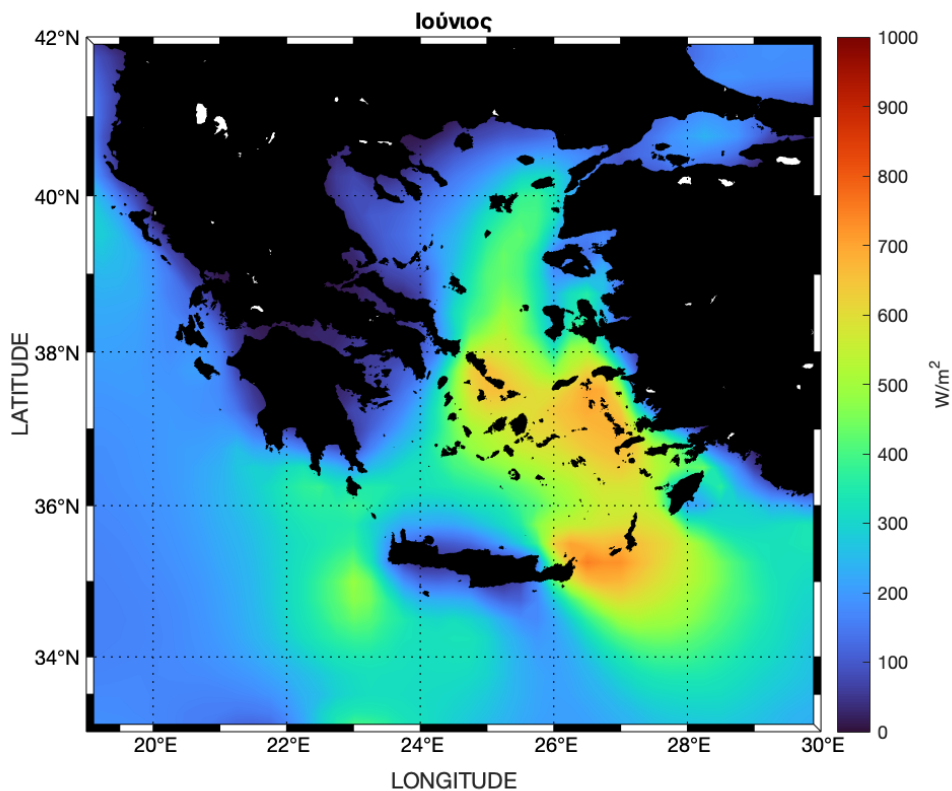


Χάρτης 22: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Απρίλιο

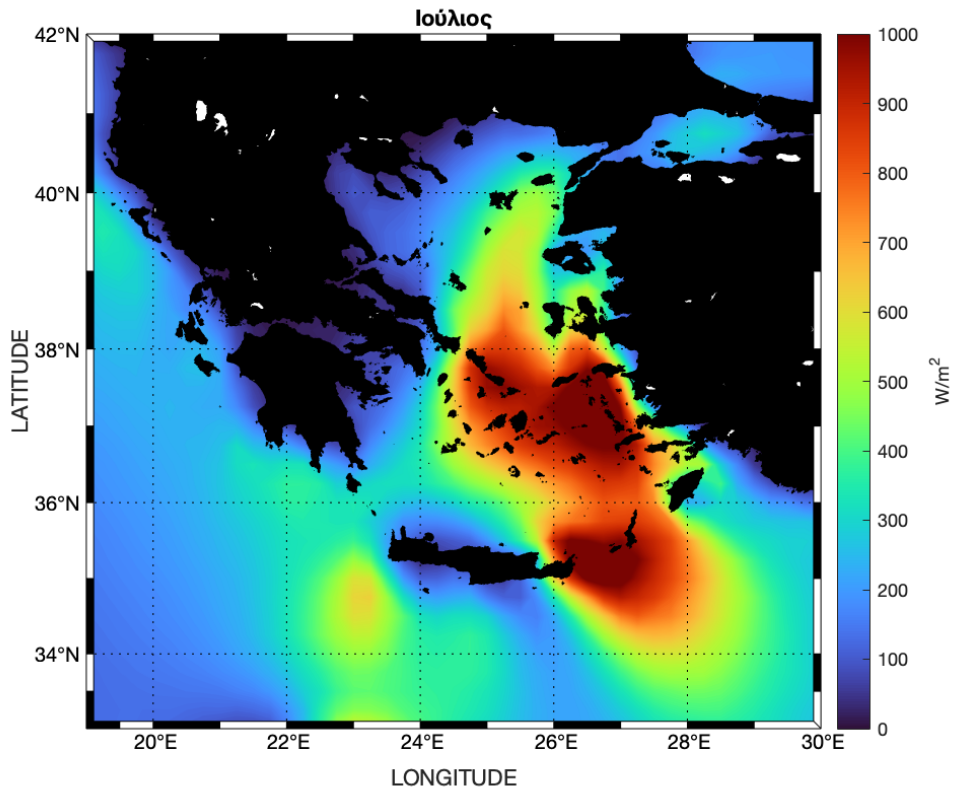


Χάρτης 23: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Μάιο

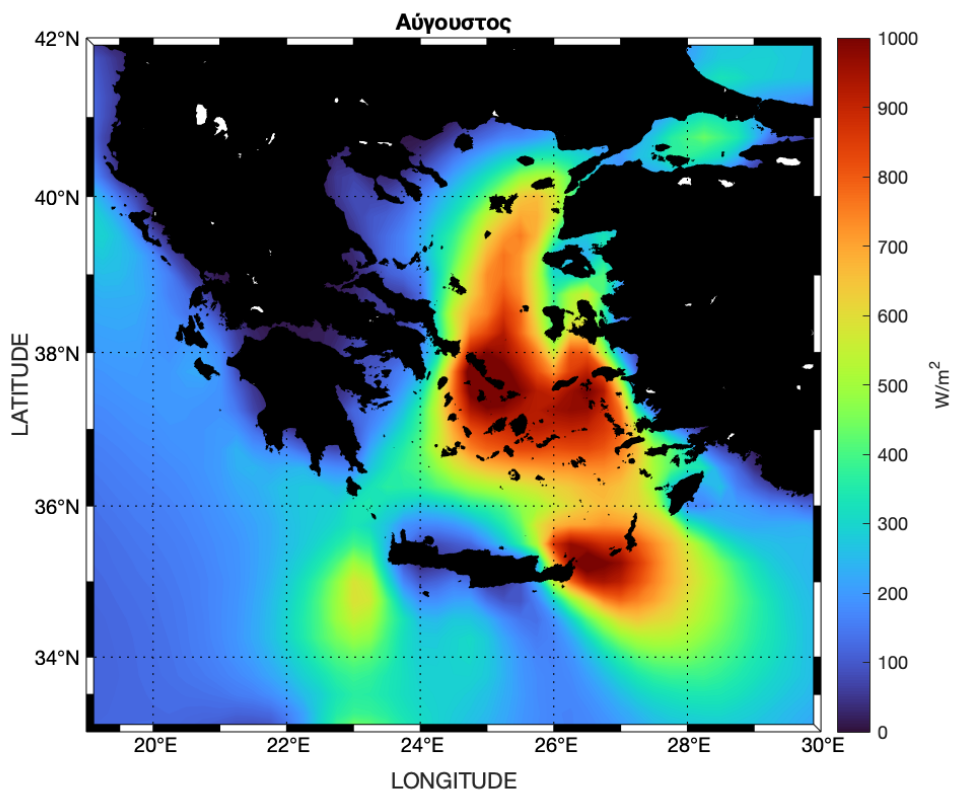
Στην περίοδο των θερινών μηνών, όπως και στην περίπτωση της μέσης τιμής ταχύτητας ανέμου, έτσι και στη χωρική κατανομή της μέσης τιμής του αιολικού δυναμικού, παρουσιάζονται αυξημένες τιμές ιδιαίτερα κατά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο λόγω των θερινών μελτεμιών. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερα υψηλές τιμές που ξεπερνούν τα $900\text{W}/\text{m}^2$ και προσεγγίζουν τα $1000\text{W}/\text{m}^2$ παρουσιάζονται στις κυκλάδες, στα Δωδεκάνησα καθώς και στο δυτικό τμήμα της Κρήτης, ανοιχτά της Κάσου.



Χάρτης 24: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Ιούλιο

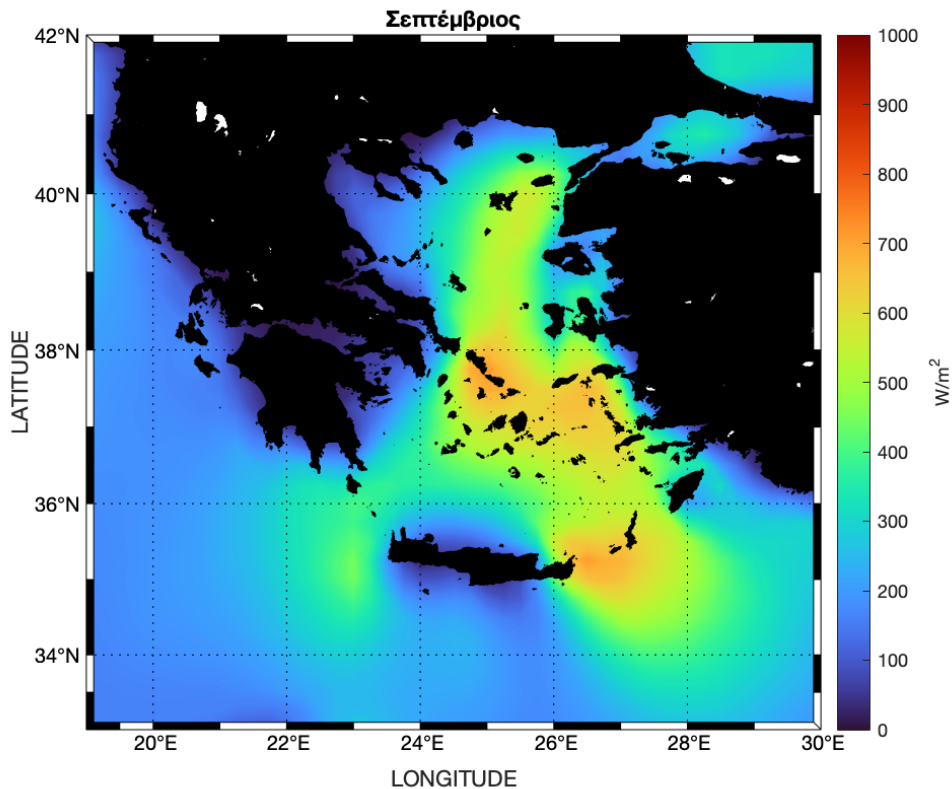


Χάρτης 25: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος τον Ιούλιο

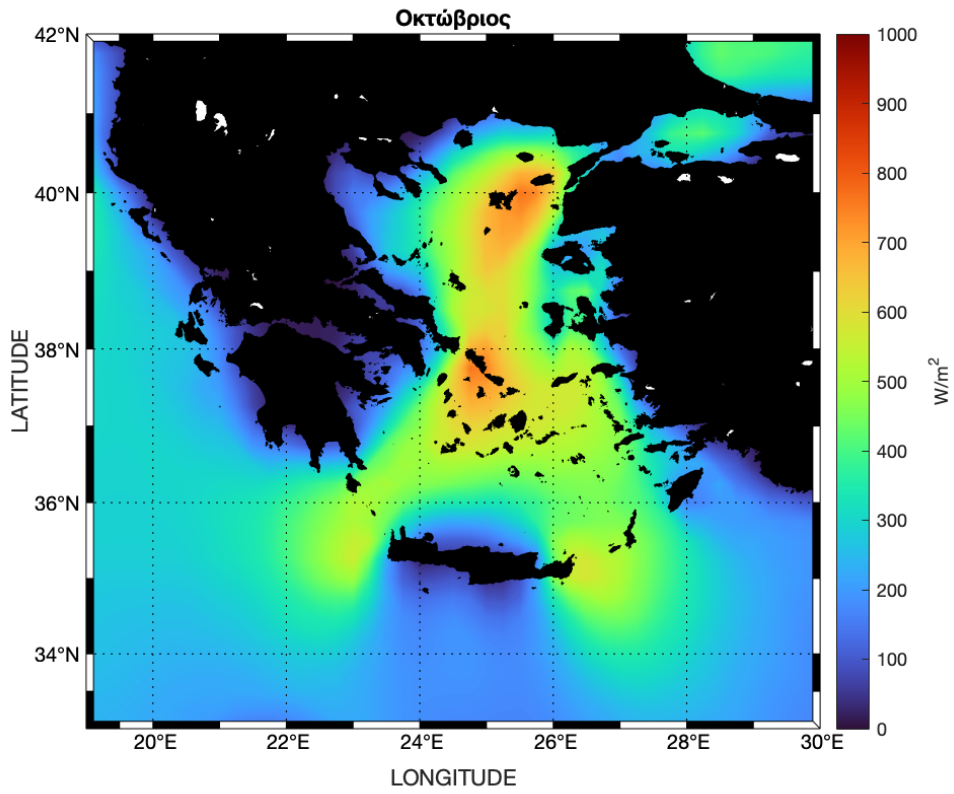


Χάρτης 26: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος τον Αύγουστο

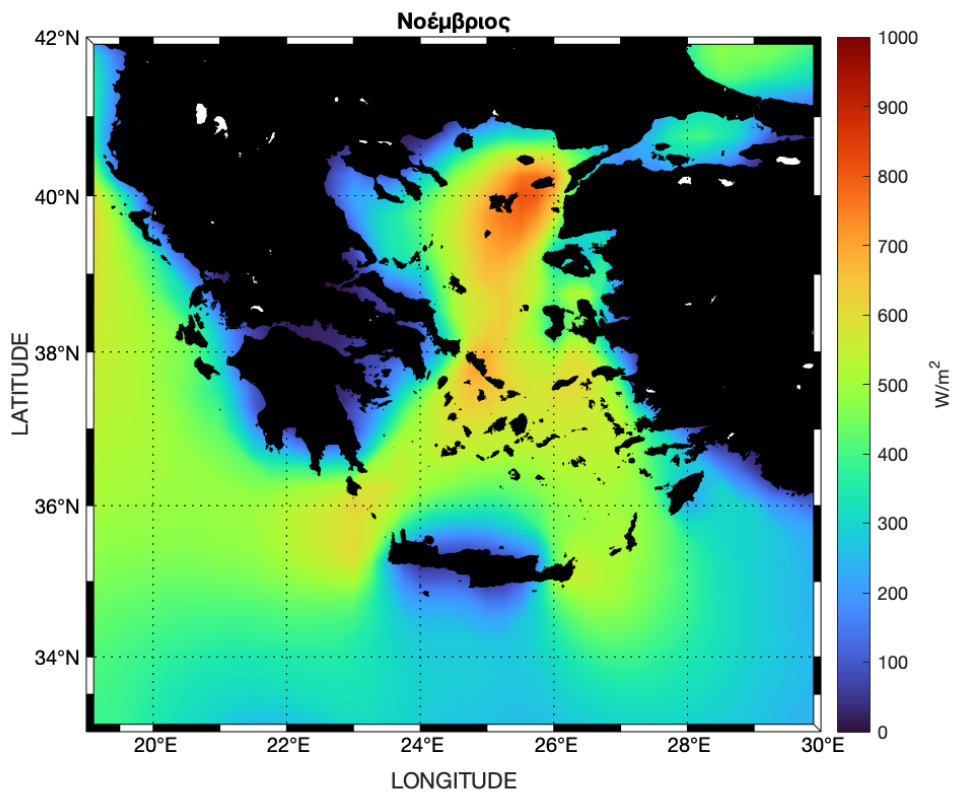
Ακολουθούν οι εικόνες για τη χωρική κατανομή του αιολικού δυναμικού κατά την περίοδο του Φθινοπώρου. Υψηλότερες τιμές παρουσιάζονται κατά το μήνα του Νοεμβρίου, όπου η μέση τιμή του αιολικού δυναμικού ξεπερνά τα $800\text{W}/\text{m}^2$ στο βόρειο Αιγαίο Πέλαγος μεταξύ των νησιών της Λήμνου, Ίμβρου και Σαμοθράκης. Το Οκτώβριο καθώς κατά το μήνα του Σεπτεμβρίου, παρατηρούνται τιμές ελαφρώς μειωμένες, προσεγγίζοντας τα $700\text{W}/\text{m}^2$.



Χάρτης 27: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Σεπτέμβριο



Χάρτης 28: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Οκτώβριο

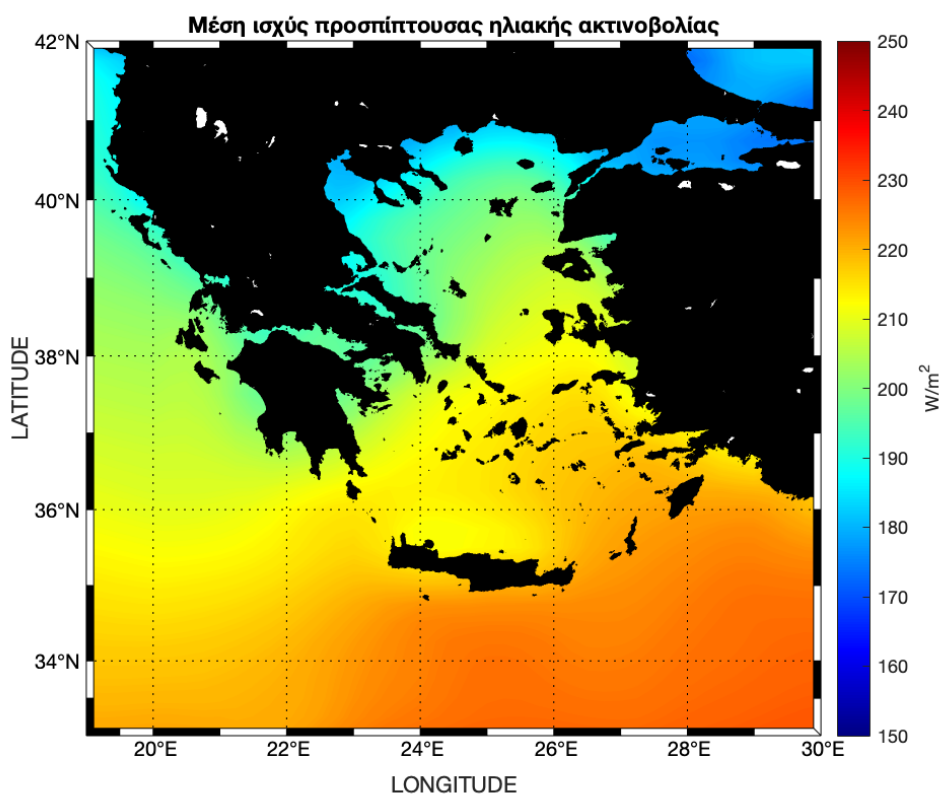


Χάρτης 29: Χωρική κατανομή της μέσης αιολικής ισχύος το Νοέμβριο

4.2 Ηλιακό Δυναμικό

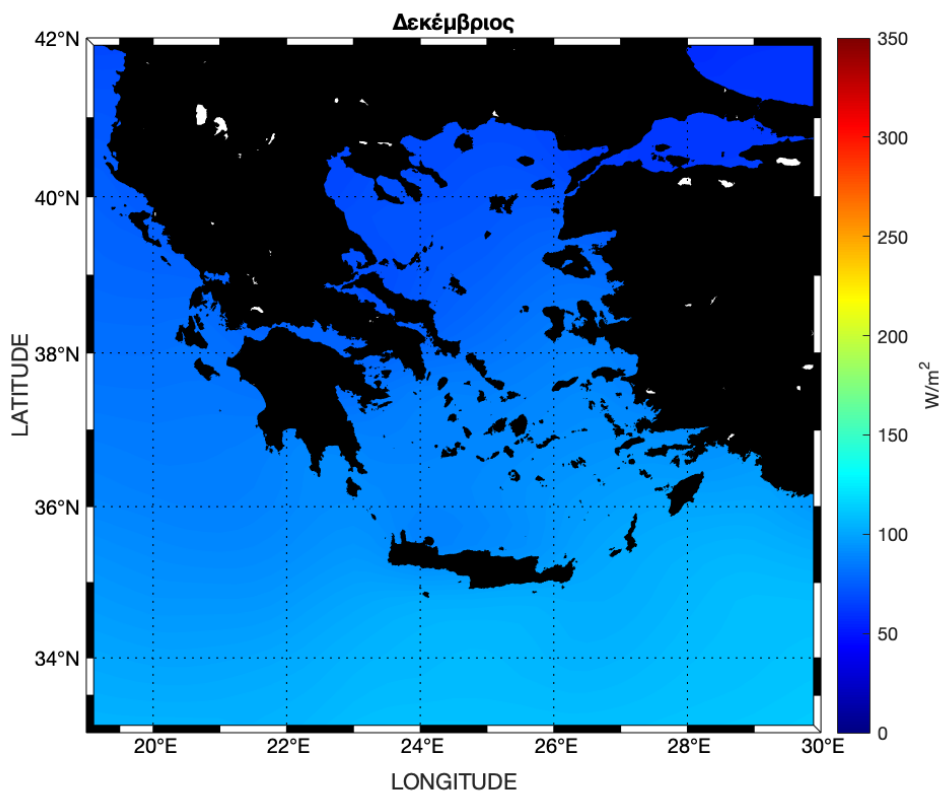
Στην πορεία γίνεται μελέτη του ηλιακού δυναμικού στην υπό μελέτη περιοχή. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της μέσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στο νότιο ανατολικό Αιγαίο πέλαγος στην περιοχή των δωδεκανήσων με τιμές που φτάνουν τα 220 W/m^2 , καθώς και νότια της Κρήτης με τιμές που προσεγγίζουν τα 230 W/m^2 . Χαμηλότερες τιμές, κάτω από 210 W/m^2 παρατηρούνται στο βόρειο Αιγαίο Πέλαγος.

Στην πορεία πραγματοποιείται όπως και στην περίπτωση του αιολικού δυναμικού, μια αναλυτικότερη περιγραφή της μέσης τιμής του ηλιακού δυναμικού στην υπό μελέτη περιοχή μας.

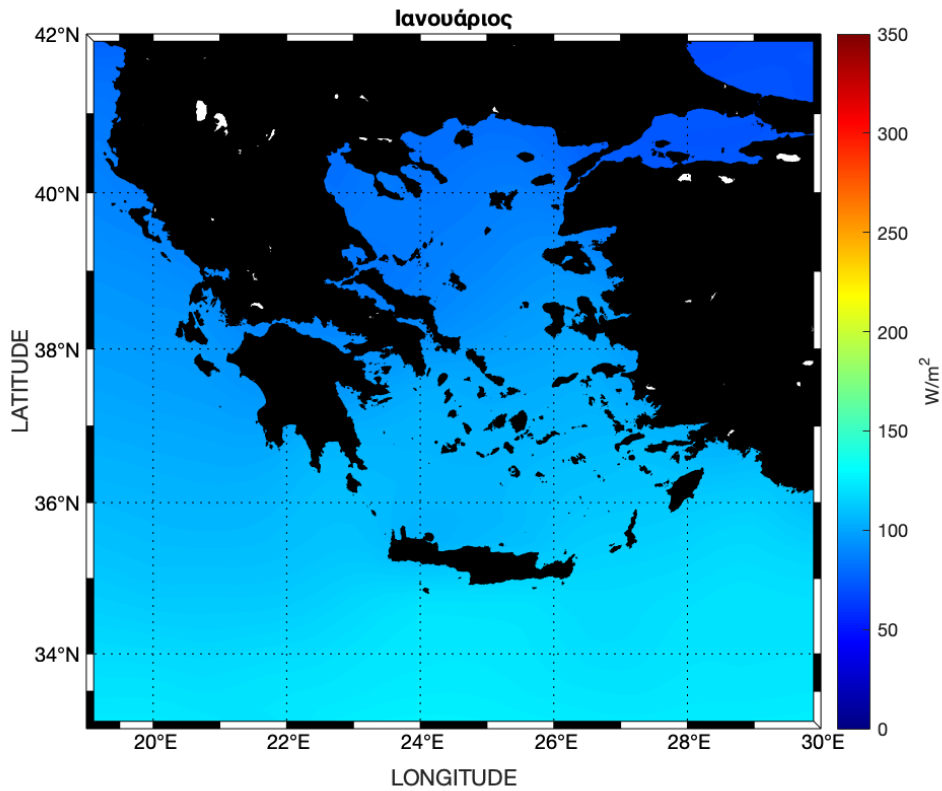


Χάρτης 30: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής του ηλιακού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες

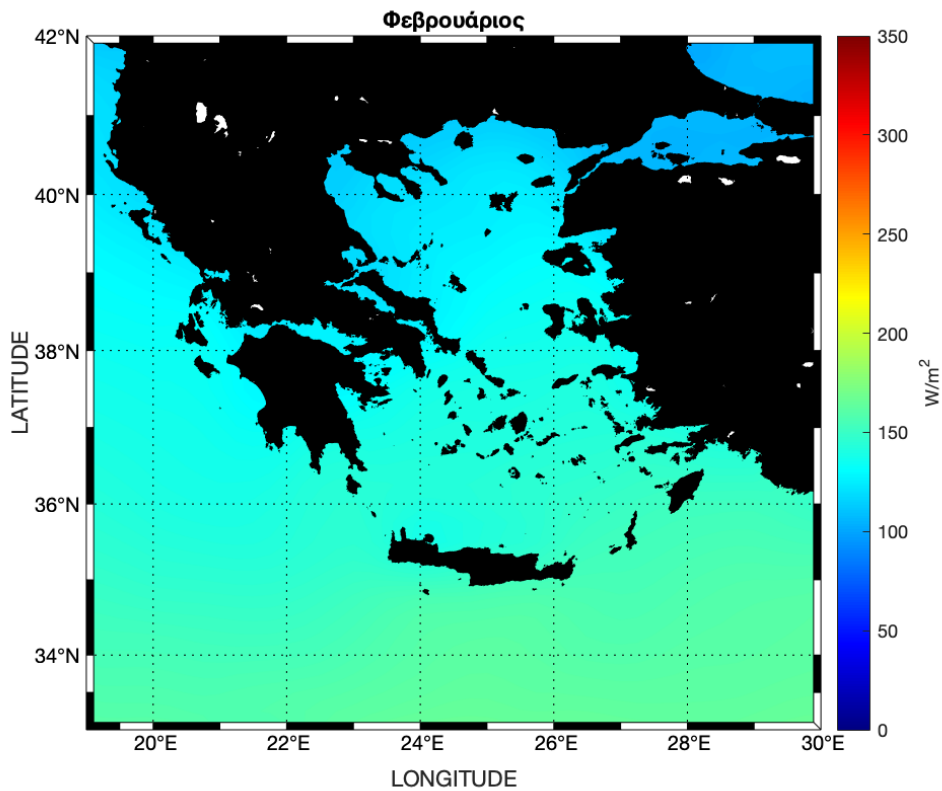
Με βάση τις εικόνες που ακολουθούν, για την περίοδο του χειμώνα, παρατηρείται ότι κατά κόρον η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει χαμηλές τιμές στη υπό μελέτη περιοχή. Οι μήνες του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Το Δεκέμβριο, προσεγγίζονται τιμές κατώτερες του 120 W/m^2 στο κεντρικό Αιγαίο, ενώ στο βόρειο Αιγαίο οι τιμές παρουσιάζονται ακόμα πιο χαμηλές και κάτω από 100 W/m^2 . Η εικόνα της μέσης ηλιακής ακτινοβολίας δεν φαίνεται να παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις και κατά το μήνα του Ιανουαρίου με τιμές που προσεγγίζουν τα 100 W/m^2 . Τέλος, κατά την περίοδο του Φεβρουαρίου, η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας φαίνεται να προσεγγίζει μεγαλύτερες τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 130 W/m^2 με 200 W/m^2 .



Χάρτης 31: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Δεκέμβριο στις ελληνικές θάλασσες

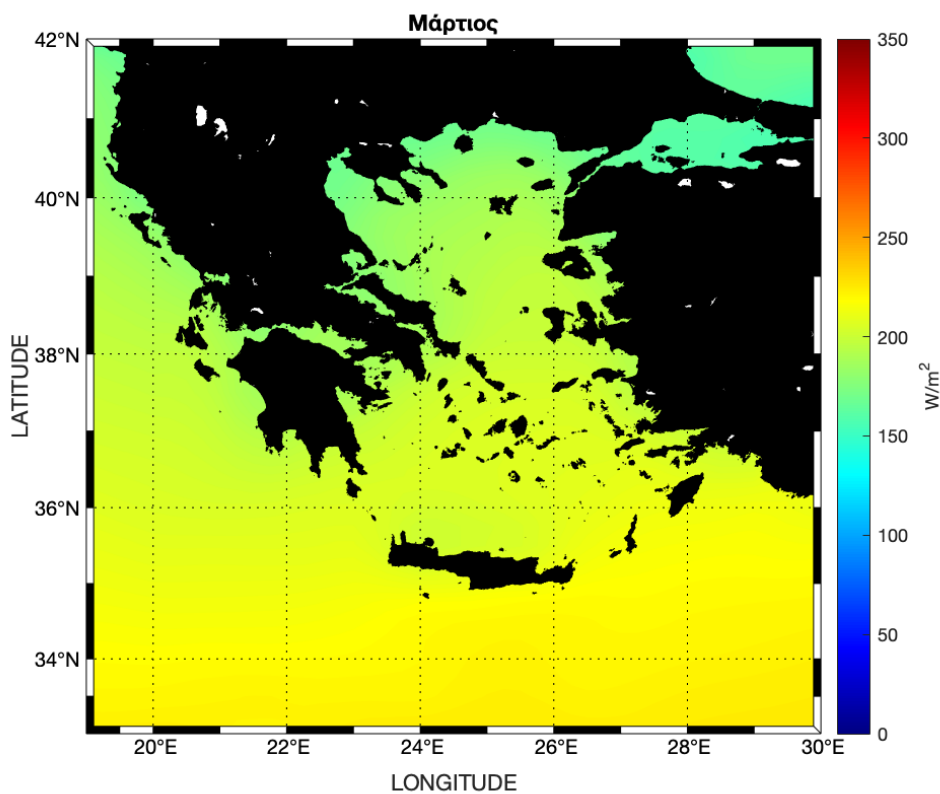


Χάρτης 32: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Ιανουάριο στις ελληνικές θάλασσες

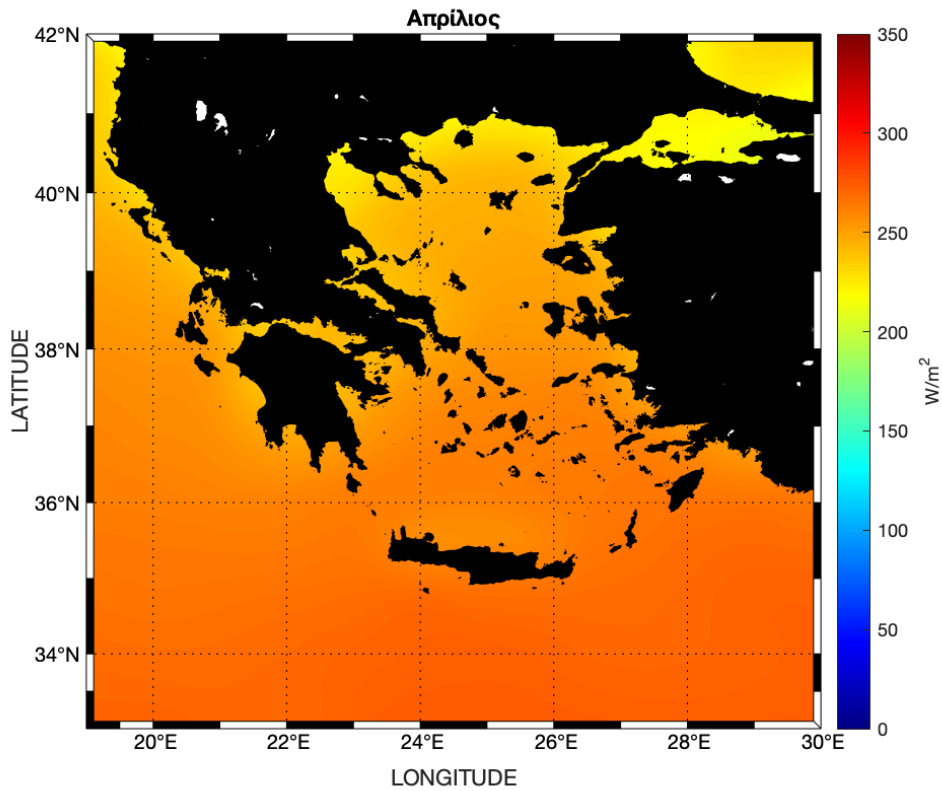


Χάρτης 33: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Φεβρουάριο στις ελληνικές θάλασσες

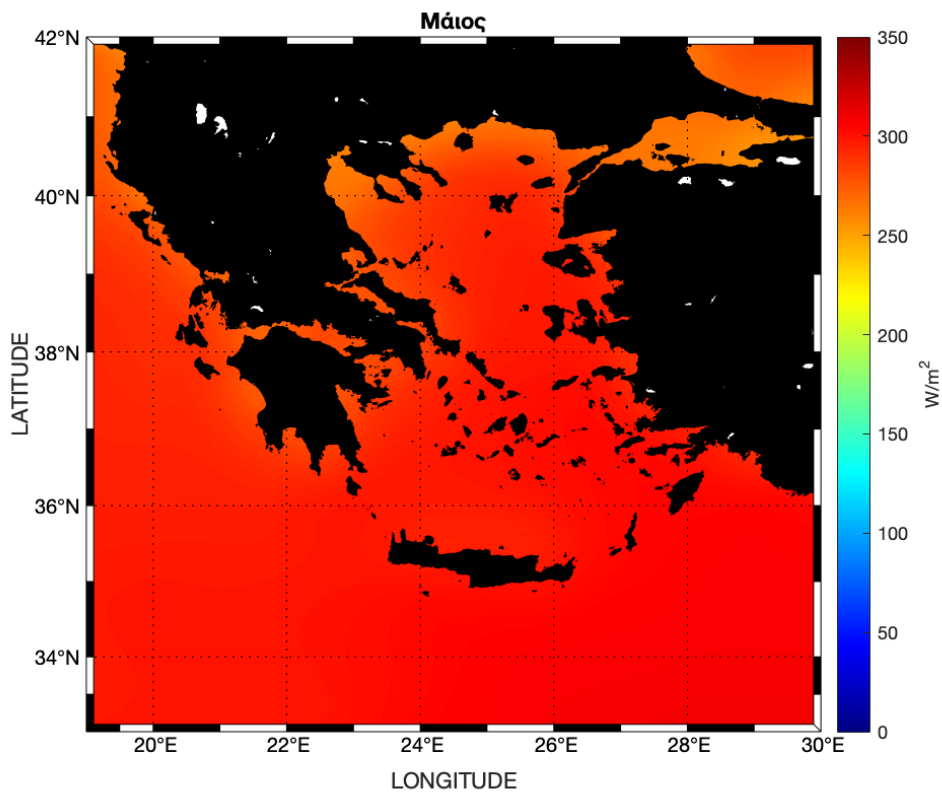
Στις επόμενες εικόνες, κατά τους εαρινούς μήνες, η μέση τιμή του ηλιακού δυναμικού παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις όπως φαίνεται παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα, κατά τον πρώτο μήνα της Άνοιξης οι τιμές φαίνεται να προσεγγίζουν τα 220 W/m^2 . Κατά τον μήνα του Απριλίου, παρατηρείται αύξηση στη μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας προσεγγίζοντας και ξεπερνώντας τα 250 W/m^2 . Το Μάιο, η υπό μελέτη περιοχή, παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερες τιμές μέσης ηλιακή ακτινοβολίας ξεπερνώντας τα 300 W/m^2 στο μεγαλύτερο μέρος των ελληνικών θαλασσών.



Χάρτης 34: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Μάρτιο στις ελληνικές θάλασσες

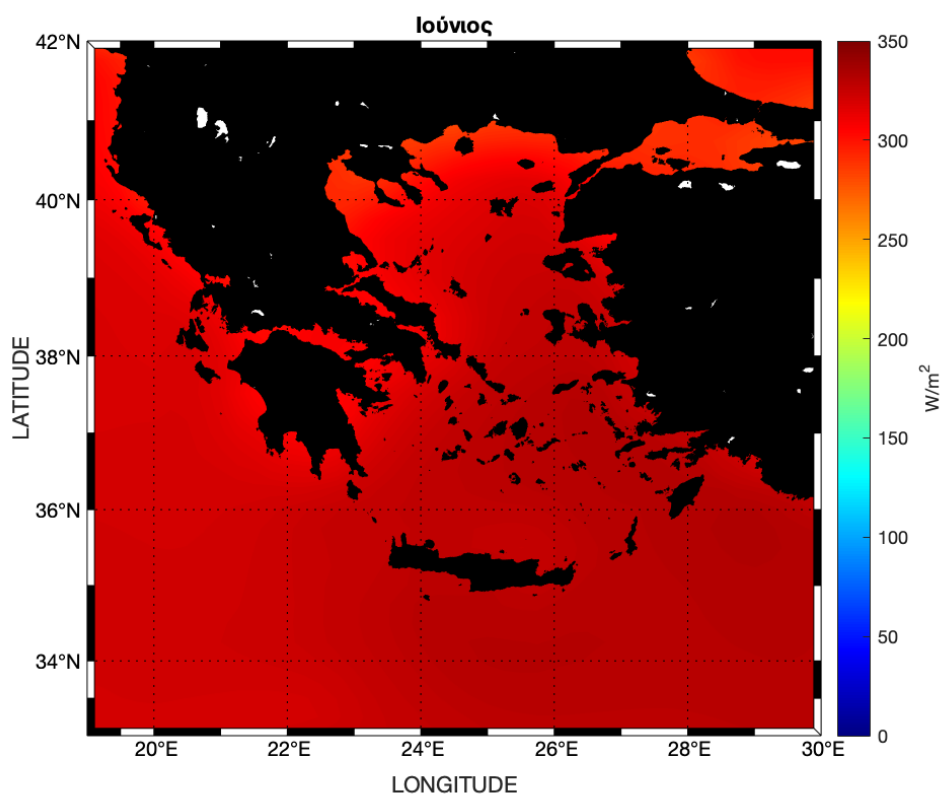


Χάρτης 35: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Απρίλιο στις ελληνικές θάλασσες

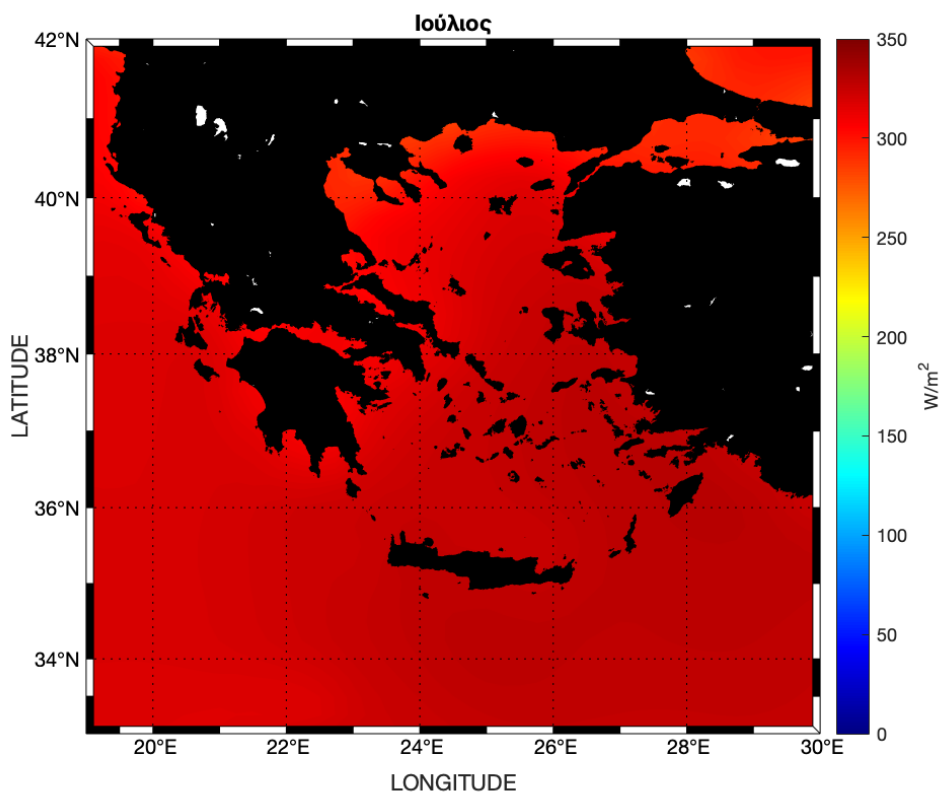


Χάρτης 36: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Μάιο στις ελληνικές θάλασσες

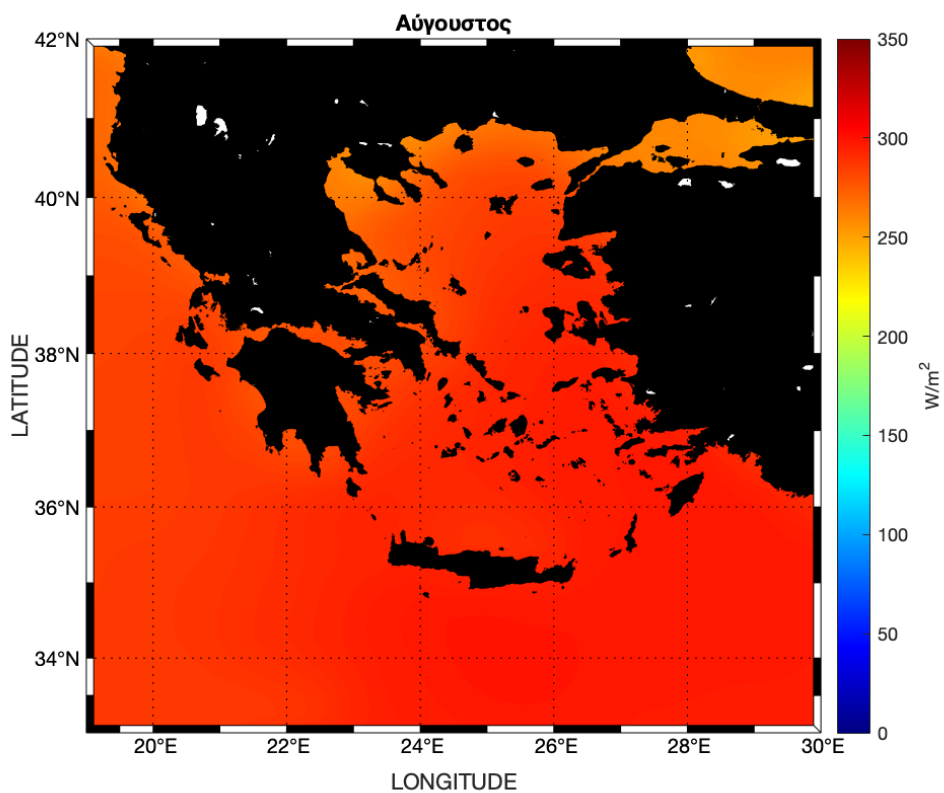
Για τους μήνες του Ιουνίου και του Ιουλίου, η μέση τιμή του ηλιακού δυναμικού εμφανίζει αρκετά υψηλές τιμές όπως διακρίνεται στις εικόνες που ακολουθούν. Συγκεκριμένα εμφανίζονται τιμές που προσεγγίζουν ακόμη και τα 350 W/m^2 σχεδόν σε όλη την υπό μελέτη περιοχή ενώ τον μήνα του Αυγούστου, η μέση τιμή του ηλιακού δυναμικού φαίνεται να μειώνεται με τιμές που δεν προσεγγίζουν τα 300 W/m^2 .



Χάρτης 37: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Ιούνιο στις ελληνικές θάλασσες

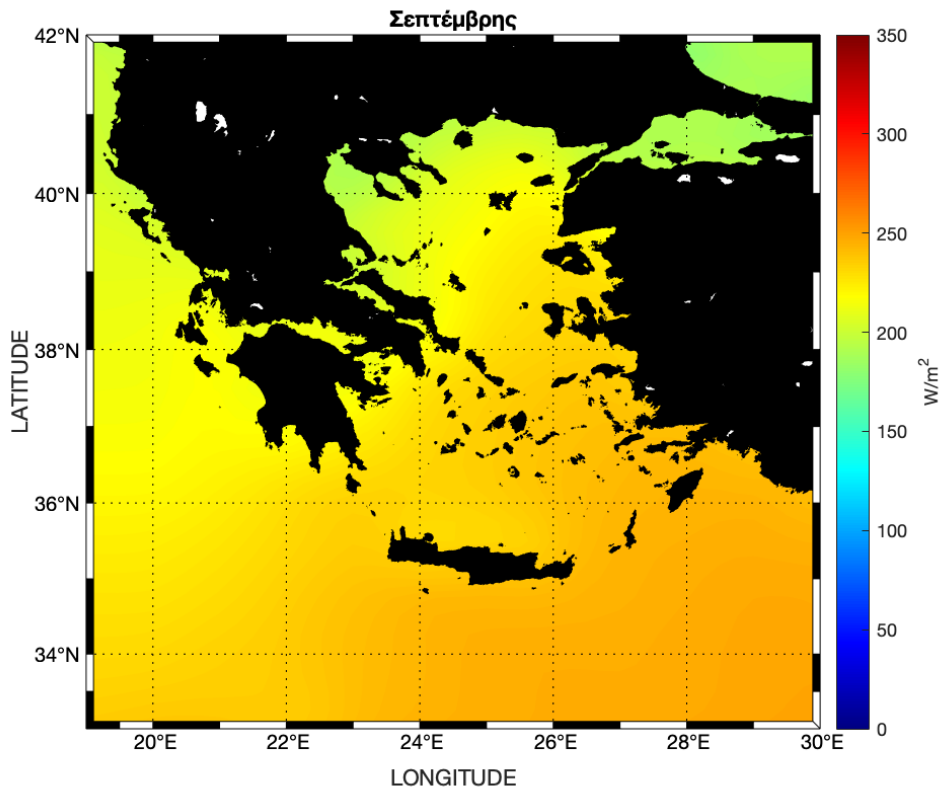


Χάρτης 38: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Ιούλιο στις ελληνικές θάλασσες

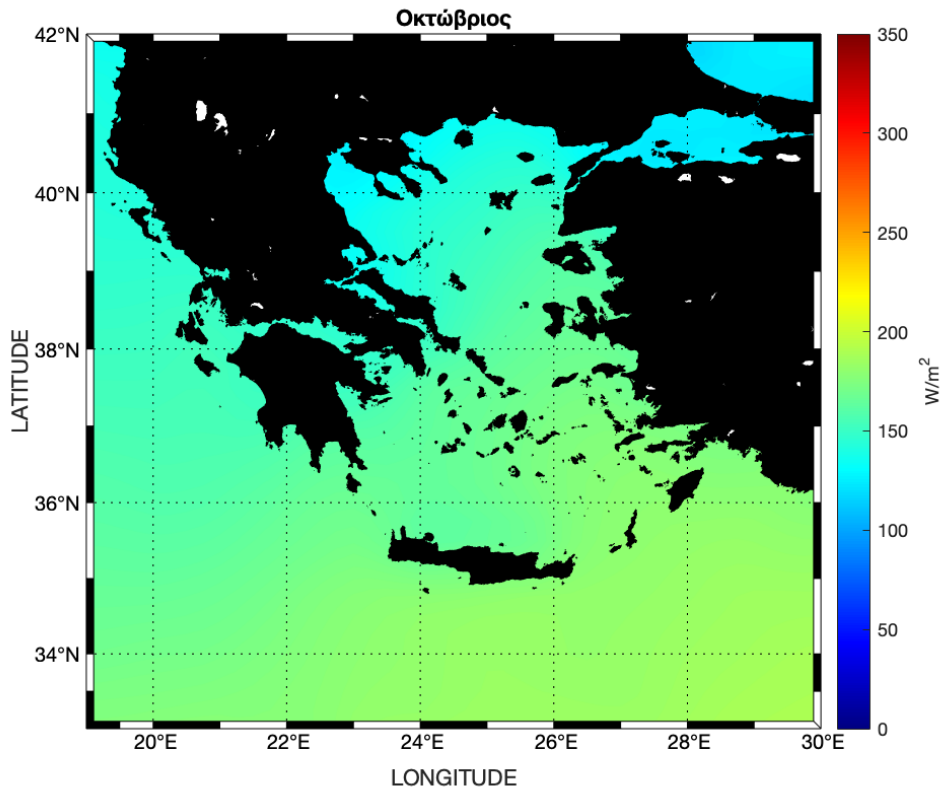


Χάρτης 39: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Αύγουστο στις ελληνικές θάλασσες

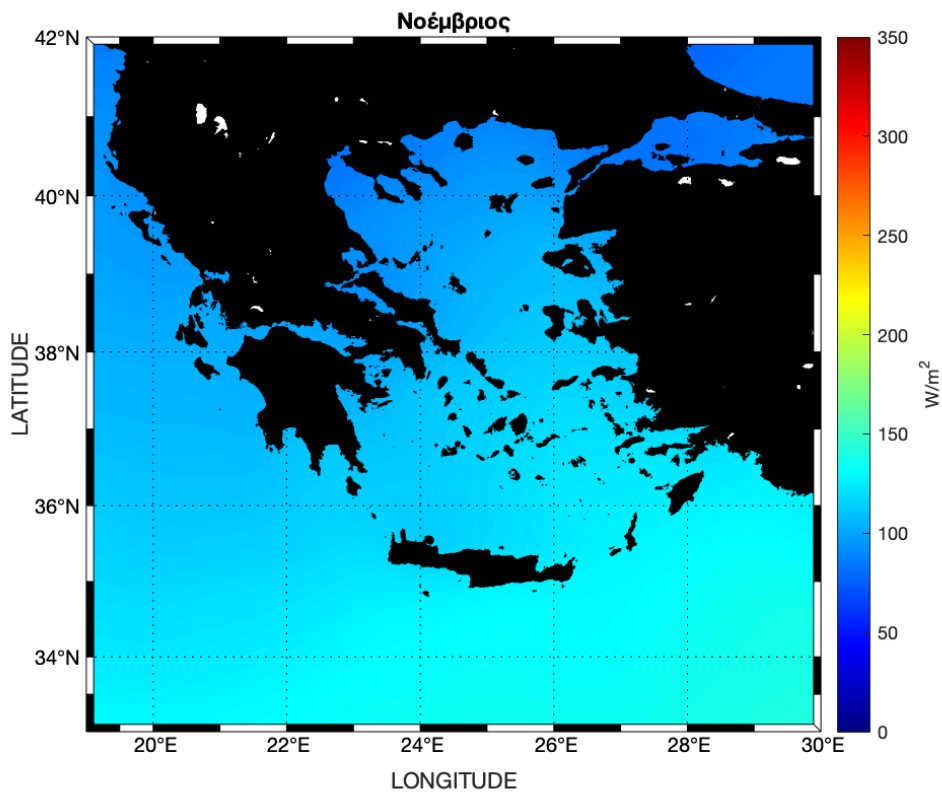
Τέλος, κατά τη διάρκεια των φθινοπωρινών μηνών, η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις. Το Σεπτέμβριο παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές σχεδόν σε όλη την υπό μελέτη περιοχή για την εποχή του φθινοπώρου όπου σημειώνονται τιμές μεταξύ 200 W/m^2 και 250 W/m^2 . Τον Οκτώβριο σημειώνεται μείωση στη μέση τιμή της μέσης τιμή του ηλιακού δυναμικού με τιμές μεταξύ 150 W/m^2 και 200 W/m^2 , ενώ τον μήνα του Νοεμβρίου, η μείωση στη μέση τιμή είναι ακόμη μεγαλύτερη καθώς αυτή δεν ξεπερνά 150 W/m^2 .



Χάρτης 40: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Σεπτέμβριο στις ελληνικές θάλασσες



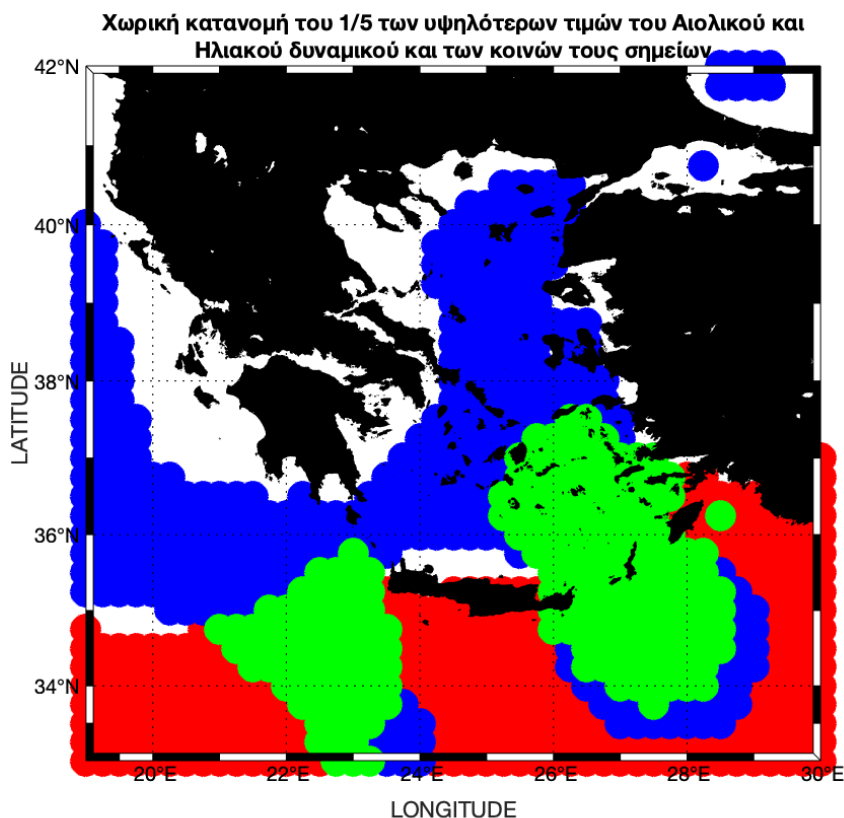
Χάρτης 41: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Οκτώβριο στις ελληνικές θάλασσες



Χάρτης 42: Χωρική κατανομή της μέσης τιμής ηλιακού δυναμικού τον Νοέμβριο στις ελληνικές θάλασσες

4.3 Σύγκριση Αιολικού Δυναμικού και Ηλιακού Δυναμικού

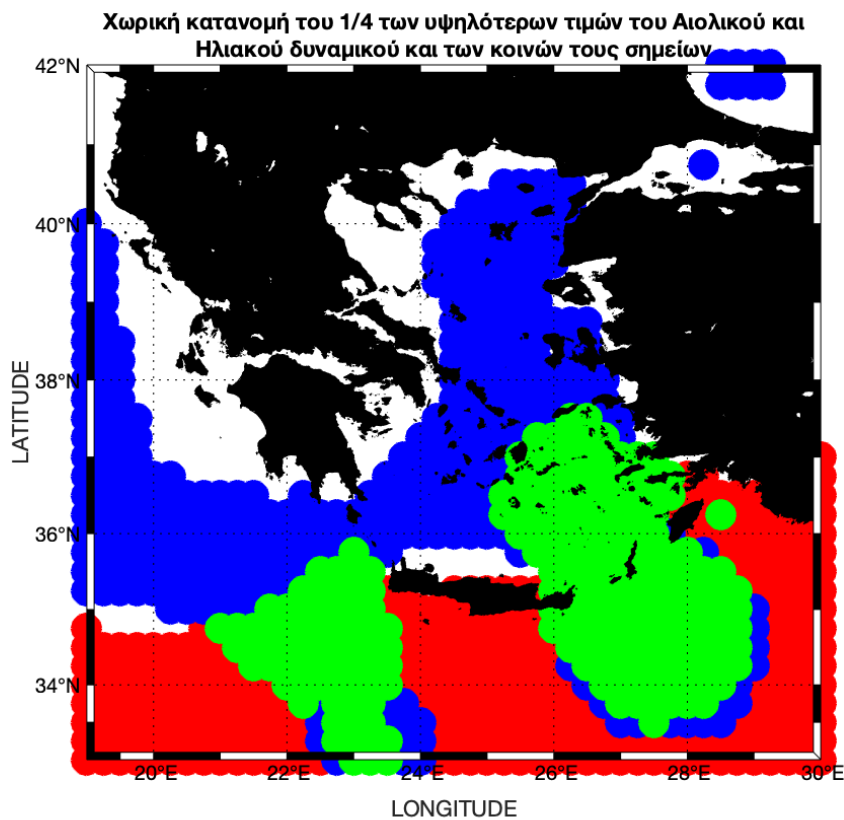
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αναζήτηση των θέσεων στην υπό μελέτη περιοχή μας, στις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία και το αιολικό δυναμικό παρουσιάζουν τις μέγιστες μέσες τιμές τους προκειμένου να βρεθούν περιοχές για την εγκατάσταση πιθανών υβριδικών κατασκευών. Συγκεκριμένα, έγινε προσπάθεια μελέτης της χωρικής κατανομής του μεγίστου 20%, 25% και 30% των μέσων τιμών κάθε δυναμικού καθώς και οι τοποθεσίες όπου οι τιμές αυτές συμπίπτουν.



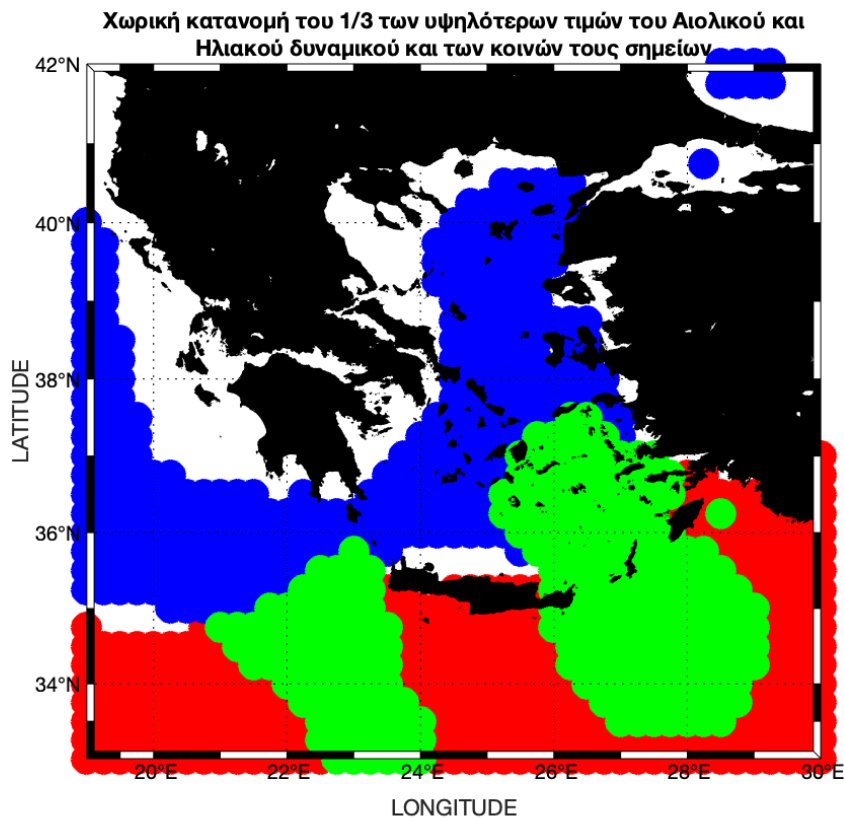
Χάρτης 43: Χωρική κατανομή του 20% των σημείων που εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές αιολικού και ηλιακού δυναμικού και εντοπισμός κοινών τοποθεσιών

Στα σχήματα που προηγούνται παραπάνω, με χρώμα μπλε παρουσιάζονται τα σημεία της περιοχής μελέτης στα οποία παρατηρούνται υψηλότερες τιμές του αιολικού δυναμικού. Με χρώμα κόκκινο σηματοδοτούνται τα σημεία εκείνα για τα οποία το ηλιακό δυναμικό έχει τις υψηλότερες τιμές. Και τέλος, με χρώμα πράσινο παρουσιάζεται η επικάλυψη για τις κοινές περιοχές με τις υψηλότερες τιμές για το ηλιακό και αιολικό δυναμικό.

Έπειτα από παρατήρηση των παραπάνω, διαπιστώνεται πως η χωρική ταύτιση είναι σαφής για ένα μεγάλο μέρος του νοτιοανατολικού Αιγαίου, στην ευρύτερη περιοχή των δωδεκανήσων καθώς και στην περιοχή ανατολικά της Κρήτης.



Χάρτης 44: Χωρική κατανομή του 25% των σημείων που εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές αιολικού και ηλιακού δυναμικού και εντοπισμός κοινών τοποθεσιών



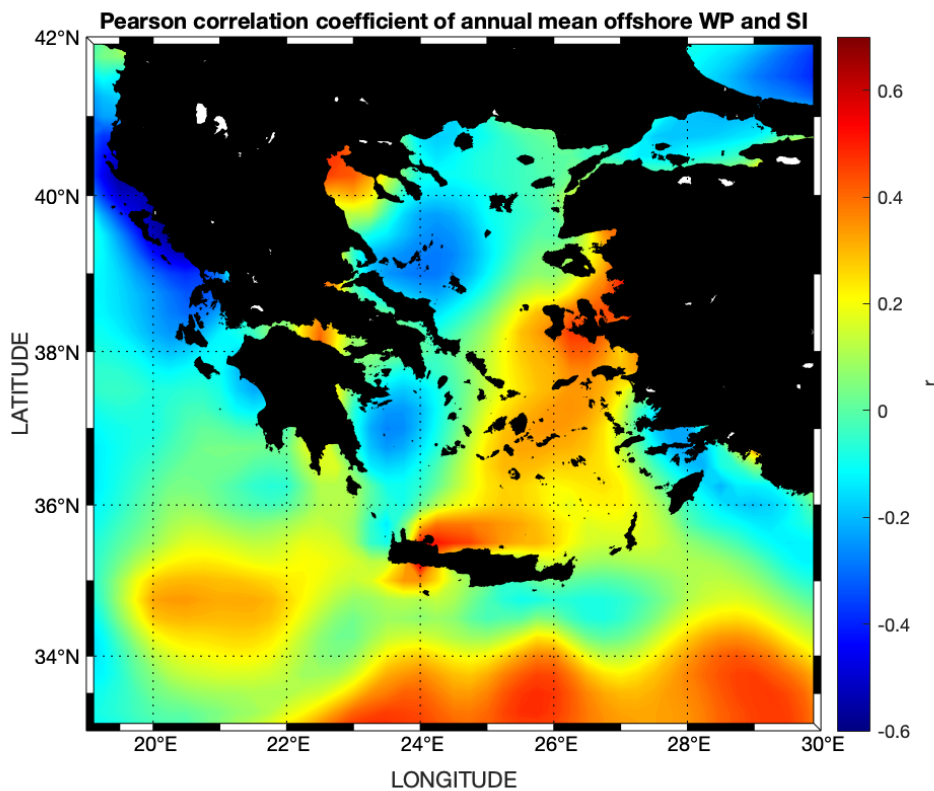
Χάρτης 45: Χωρική κατανομή του 33% των σημείων που εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές αιολικού και ηλιακού δυναμικού και εντοπισμός κοινών τοποθεσιών

4.4 Συμπληρωματικότητα και Συνέργεια

Κρίθηκε σκόπιμο στην παρούσα ενότητα, να διερευνηθούν και να μετρηθούν η συμπληρωματικότητα και η ενέργεια της αιολικής και ηλιακής ενέργειας, έτσι ώστε να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα για τη συσχέτιση μεταξύ αυτών των δύο μεγεθών.

Ο συντελεστής συσχέτισης, CC (correlation coefficient) χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιβλιογραφία για τον χαρακτηρισμό της ισχύος της συμπληρωματικότητας μεταξύ δύο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, το CC χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει τη συσχέτιση μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών. Παίρνει τιμές μεταξύ $[-1, 1]$, ποσοτικοποιεί την ισχύ συσχέτισης μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών και αποκαλύπτει την κατεύθυνση αυτής της σχέσης. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ των δύο τυχαίων μεταβλητών. Για παράδειγμα, εάν η μία τυχαία μεταβλητή αυξάνεται (μειώνεται), τότε η άλλη επίσης αυξάνεται (μειώνεται). Οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν μια αντίθετη συμπεριφορά, ενώ η συσχέτιση μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών γίνεται ασθενέστερη καθώς οι τιμές του CC τείνουν στο 0. Κατά συνέπεια, στην αξιολόγηση των υβριδικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι αρνητικές τιμές του CC υποδηλώνουν συμπληρωματικότητα, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ενέργεια μεταξύ των πηγών. Υπάρχουν διάφορες μορφές συντελεστών συσχέτισης CC, στην παρούσα εργασία όμως έγινε υπολογισμός και μελέτη του συντελεστή συσχέτισης Pearson's Correlation Coefficient.

Στην πορεία παρατίθεται, η χωρική κατανομή του συντελεστή συσχέτισης Pearson's Correlation Coefficient σε ετήσια, μηνιαία και ωριαία κλίμακα, καθώς και συζητούνται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

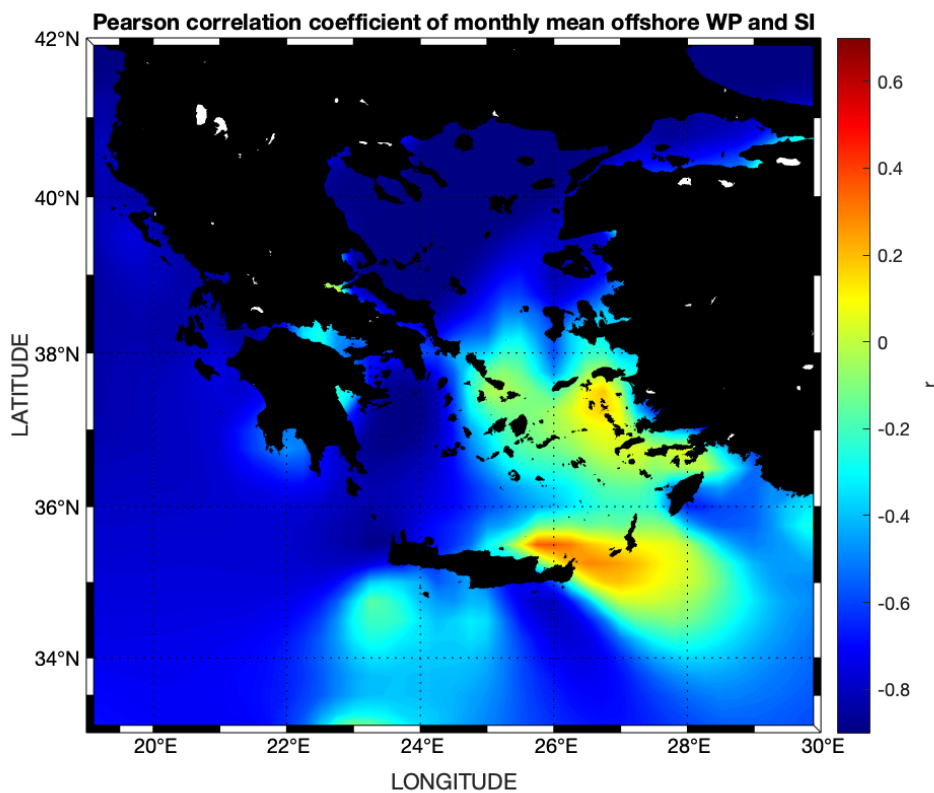


Χάρτης 46: Συντελεστής συσχέτισης Pearson των ετήσιων μέσων τιμών του αιολικού και ηλιακού δυναμικού

Σε ετήσια κλίμακα όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω εικόνα, στην περιοχή που μελετάται παρατηρούνται τιμές και αρνητικές αλλά και θετικές για το r . Η ελάχιστη τιμή του φαίνεται να είναι κατά μήκος του Ιονίου Πελάγους, και ιδιαίτερα στην ευρύτερη περιοχή της Κέρκυρας με το r να προσεγγίζει και να ξεπερνά το -0.4 . Αρνητικές τιμές επίσης εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή των σποράδων με το r να προσεγγίζει το -0.2 , καθώς και ανατολικά της Πελοποννήσου καθώς και στο βόρειο Αιγαίο Πέλαγος. Υποδηλώνεται με αυτόν τον τρόπο στις προαναφερθέντες περιοχές μια μέτρια έως ισχυρή συμπληρωματικότητα.

Παράλληλα γίνονται διακριτές θετικές τιμές προσεγγίζοντας το 0.5 στο μεγαλύτερο μέρος των Κυκλάδων, στα νησιά Πάρος, Νάξο, Φολέγανδρος, Σίκινος και Ίος. Θετικές τιμές επίσης παρουσιάζονται και στα νησιά Ικαρία, γάμος και Χίος, καθώς επίσης και στην βορειοδυτική και νοτιοδυτική περιοχή της Κρήτης όπου το r προσεγγίζει και ξεπερνάει το 0.5 . Αυτές οι περιοχές επομένως υποδηλώνουν συνέργεια μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και του αιολικού δυναμικού.

Χαμηλές θετικές τιμές φαίνονται να εμφανίζονται σε αρκετά νησιά των Κυκλάδων (Άνδρος, νέα, Σύρος, Κύθνος) όπου το r παίρνει τιμές κάτω από 0.2 .



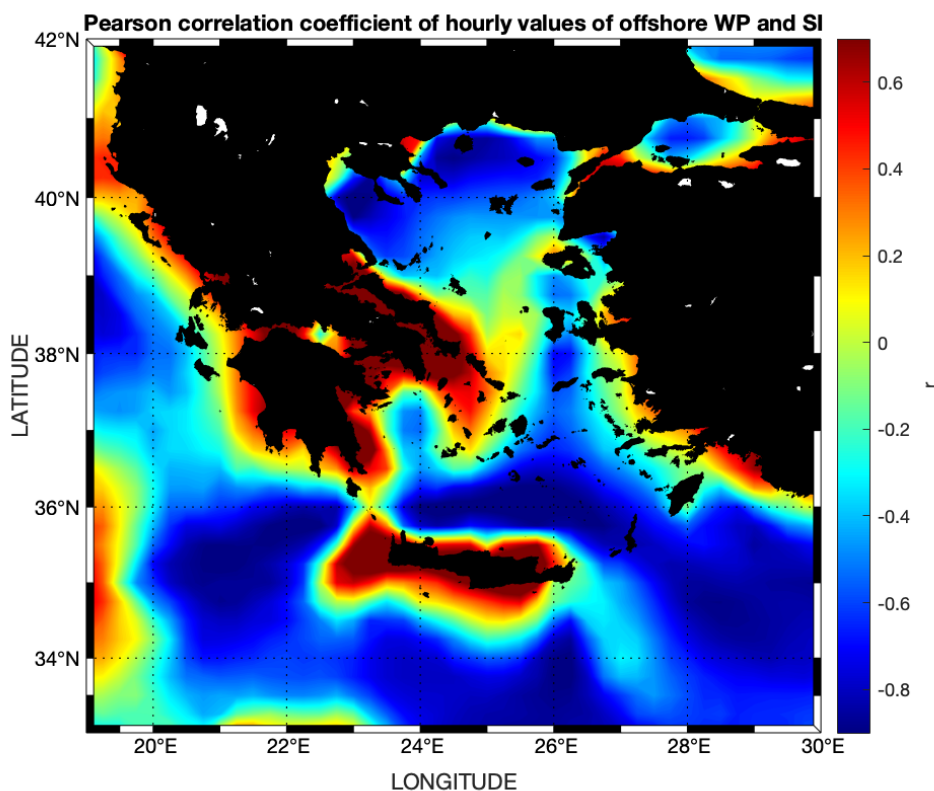
Χάρτης 47: Συντελεστής συσχέτισης Pearson των μηνιαίων μέσων τιμών του αιολικού και ηλιακού δυναμικού

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης Pearson's υπολογισμένος σε μηνιαία κλίμακα. Παρατηρείται ότι για την πλειοψηφία των σημείων στην περιοχή που μελετάται, το r λαμβάνει αρνητικές τιμές. Κατα κύριο λόγο στο μεγαλύτερο μέρος του Αιγαίου Πελάγους αλλά και του Ιονίου, το r προσεγγίζει αρκετά χαμηλές τιμές που προσεγγίζουν το -0.6 . Αυτές οι περιοχές επομένως υποδηλώνουν μια ισχυρή συμπληρωματικότητα μεταξύ αιολικού και ηλιακού δυναμικού.

Πέραν αυτών των περιοχών, παρουσιάζονται και θετικές τιμές του r κοντά στο 0, σε περιοχές των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων, υποδηλώνοντας έτσι μια ασθενή συμπληρωματικότητα.

Στη βορειοδυτική περιοχή της Κρήτης, νοτιοανατολικά της Κάσου, εμφανίζονται θετικές τιμές του r που προσεγγίζουν τιμές πάνω από 0.2 φανερώνονται έτσι μια ασθενή συνέργεια μεταξύ ηλίου και ανέμου.

Τέλος, παρουσιάζεται η μελέτη του συντελεστή συσχέτισης Pearson's στην υπό μελέτη περιοχή, σε ωριαία κλίμακα. Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής συσχέτισης επηρεάζεται από τη διαδοχή της ημέρας και της νύχτας. Παρατηρούνται έτσι αρκετά υψηλές και αρκετά χαμηλές τιμές του συντελεστή. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως κοντά στις ακτές εμφανίζονται υψηλές τιμές που προσεγγίζουν και ξεπερνάνε το 0.6, γύρω από την Πελοπόννησο, Αττική, Στερεά Ελλάδα και Κρήτη. Φανερώνεται έτσι ισχυρή συνέργεια μεταξύ των δύο μεγεθών.



Χάρτης 48: Συντελεστής συσχέτισης Pearson των ωριαίων μέσων τιμών του αιολικού και ηλιακού δυναμικού

Αντίθετα, στο μεγαλύτερο μέρος των Κυκλάδων, των Δωδεκανήσων και του βόρειου Αιγαίου εμφανίζονται αρνητικές τιμές που ξεπερνάνε το -0.6 αποκαλύπτοντας ισχυρή συμπληρωματικότητα μεταξύ αιολικού και ηλιακού δυναμικού.

5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως κύριο σκοπό τη μελέτη αιολικών και ηλιακών πόρων στις ελληνικές θάλασσες με απώτερο σκοπό την πιθανή εγκατάσταση ενός υβριδικού πάρκου αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πλαίσια. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των ανεμολογικών παραμέτρων και των παραμέτρων της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τη βάση δεδομένων ERA5 που είναι διαθέσιμα από τον οργανισμό ECMWF και αφορούσαν χρονοσειρές για την ταχύτητα του ανέμου και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία για τη δεκαετία 2000 με 2019 στις ελληνικές θάλασσες και συγκεκριμένα στο γεωγραφικό πλάτος $[42^\circ - 33^\circ]$ και γεωγραφικό μήκος $[19^\circ - 30^\circ]$. Οι μετρήσεις των συγκεκριμένων δεδομένων είναι ανά μία ώρα και η χωρική κάλυψη ανά 0.25° γεωγραφικές μοίρες και η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μελέτη του ανεμολογικού καθεστώτος στην ευρύτερη περιοχή των ελληνικών θαλασσών. Από τη μελέτη, προέκυψε ότι οι ελληνικές θάλασσες χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλές τιμές μέσης ταχύτητας ανέμου σε αρκετές περιοχές για το μεγαλύτερο διάστημα του έτους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Αιγαίο Πέλαγος καθώς και οι περιοχές γύρω από την Κρήτη, όπου εντοπίζεται η μεγαλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας ανέμου που προσεγγίζει τα 9 m/s . Παράλληλα στο Αιγαίο Πέλαγος, πέραν του ότι εντοπίζεται η μεγαλύτερη μέση τιμή της ταχύτητας, παρουσιάζονται υψηλές ταχύτητες σε όλη τη διάρκεια του έτους γεγονός πολύ σημαντικό για τη συλλογή της αιολικής ενέργειας.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού στην υπό μελέτη περιοχή των ελληνικών θαλασσών από τον οποίο προέκυψε ότι η μέση τιμή του αιολικού δυναμικού ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό τη χωρική κατανομή της μέσης ταχύτητας του ανέμου. Συγκεκριμένα, στο Αιγαίο παρατηρούνται τιμές που προσεγγίζουν ακόμα και τα 800 W/m^2 και ιδιαίτερα στην περιοχή των νησιών της Άνδρου και της Τήνου. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού όπου παρατηρούνται τα μελτέμια στο κεντρικό Αιγαίο, όπου προσεγγίζουν ακόμα και τα 1000 W/m^2 , ενώ και κατά τους μήνες του Χειμώνα παρατηρούνται εξίσου υψηλές τιμές αιολικού δυναμικού που προσεγγίζουν τα 900 W/m^2 . Παράλληλα, υπολογίστηκαν και οι δείκτες της ετήσιας μεταβλητότητας και της υπέρ-ετήσιας μεταβλητότητας όπου εμφανίζουν υψηλές τιμές στο βόρειο Αιγαίο και χαμηλότερες στο κεντρικό και νότιο Αιγαίο.

Έγινε έτσι αντιληπτό, ότι τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά καθώς και τα στατιστικά στοιχεία του αιολικού δυναμικού παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις ελληνικές θάλασσες. Στην πορεία μελετήθηκε με αντίστοιχο τρόπο και το διαθέσιμο ηλιακό

δυναμικό από το οποίο προέκυψε ότι οι περιοχές του κεντρικού Αιγαίου και της Κρήτης η μέση τιμή του δυναμικού προσεγγίζει τα 220 W/m^2 . Ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όπως είναι αναμενόμενο, η μέση τιμή της ταχύτητας του ηλιακού δυναμικού, κυμαίνεται μεταξύ 300 W/m^2 και 350 W/m^2 , ενώ αξιοσημείωτες τιμές χαρακτηρίζουν και τους εαρινούς μήνες κατά τους οποίους το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει χαμηλές γενικότερα τιμές.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη του ηλιακού και αιολικού δυναμικού με σκοπό την εύρεση πιθανών τοποθεσιών για συνεκμετάλλευση των δυο πόρων. Πιθανές τοποθεσίες για εκμετάλλευση του αιολικού και ηλιακού δυναμικού φαίνεται να είναι τα Δωδεκάνησα, η ευρύτερη περιοχή ανατολικά της Κρήτης, το νησί Κάρπαθος και Κάσος, καθώς και δυτικά της Κρήτης. Σε αυτές τις περιοχές εντοπίζεται το 20%, 25% και 33% των ανώτερων τιμών του αιολικού και ηλιακού δυναμικού.

Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης Pearson, σε ένα μεγάλο μέρος των Κυκλάδων, κυρίως ανατολικά, στην περιοχή των Δωδεκανήσων καθώς και ανατολικά της Κρήτης παρουσιάζονται θετικές τιμές του συντελεστή γεγονός που δείχνει ότι υπάρχει συνέργεια μεταξύ αιολικού και ηλιακού δυναμικού κάτι που επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι σε αυτές τις περιοχές παρατηρούνται οι ανώτερες τιμές για κάθε δυναμικό. Ο δείκτης λαμβάνει αρνητικές τιμές στο βόρειο Αιγαίο κυρίως καθώς και ανατολικά της Πελοποννήσου, περιοχές οι οποίες υποδηλώνουν έντονη συμπληρωματικότητα μεταξύ αιολικού και ηλιακού δυναμικού.

5.2 Προτάσεις

- Δεδομένων όλων των παραπάνω, ένα βασικό επόμενο βήμα θα μπορούσε να είναι η μελέτη των συσκευών συλλογής αιολικής και ηλιακής ενέργειας προκειμένου να υπολογιστούν οι ενεργειακές απολαβές στην υπό μελέτη περιοχή. Με δεδομένο τους πνέοντες ανέμους στις ελληνικές θάλασσες θα μπορούσε να γίνει επιλογή κατάλληλης ανεμογεννήτριας με cut-in και cut-out ταχύτητα εντός του εύρους των πνέοντων ανέμων. Παράλληλα, το ίδιο θα μπορούσε να γίνει και με την κατάλληλη επιλογή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σύμφωνα με τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας που προηγήθηκαν.
- Παράλληλα, θα μπορούσε να γίνει μια αναφορά στο κόστος παραγωγής ενός τέτοιου υβριδικού πάρκου, καθώς και μελέτη των αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας του.
- Ενδιαφέρον επίσης θα ήταν να μελετηθούν εκτενέστερα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα έχει η συγκεκριμένη κατασκευή ενός τέτοιου πάρκου, καθώς και τα εμπόδια και οι τεχνικές δυσκολίες που θα συναντηθούν λόγω της φύσης του θαλάσσιου πυθμένα.

- Τέλος, προκειμένου να καταστεί όσον το δυνατόν αποδοτικότερη η συνεκμετάλλευση και των δυο πόρων, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω μελέτη της συμπληρωματικότητας και συνέργεια τους καθώς και ο υπολογισμός τους με διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης.

6. Βιβλιογραφία

- Soukissian T, Karathanasi F, Dimitrios K. Zaragkas.(2021). Energy Conversion and Management“Exploiting offshore wind and solar resources in the Mediterranean using ERA5 reanalysis data”
- Soukissian T., Papadopoulos A., Skrimizeas P., Karathanasi F. , Axaopoulos P., Avgoustoglou E., H. Kyriakidou H., Tsalis C., Voudouri A. , Gofa F., and Katsafados P., “Assessment of offshore wind power potential in the Aegean and Ionian Seas based on high-resolution hindcast model results” 2017
- Soukissian T., Karathanasi F., Axaopoulos P., Voukouvalas E. and Kotroni V., 2018, “Offshore wind climate analysis and variability in the Mediterranean Sea”
- M. Bilgili, B. Sahin, A. Yasar, E. Simsek, 2012, Electric energy demands of Turkey in residential and industrial sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 404-414
- Zhang, Y., & Yang, H. (2020). A review of offshore wind power development and policies in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109961.
- McCormick, C., & Koubi, V. (2020). The politics of offshore renewable energy: A review and comparative assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110358.
- Duarte, C. M., et al. (2020). The role of blue carbon in climate change mitigation. *Nature Communications*, 11(1), 1-13.
- Schipa, I., et al. (2019). A review of the potential environmental impacts of offshore wind farms on the marine environment. *Environmental Research Letters*, 14(8), 083001.
- Neumann, T., et al. (2019). The economics of tidal energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 321-334.
- Machado, R., et al. (2018). Wave energy in Europe: Current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2356-2367.
- Yuan, Z., et al. (2018). A review of tidal energy technologies and their potential for China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 927-940.
- Smith, H. C., & Stirling, P. (2017). The social acceptance of marine energy as a future electricity source: A review. *Energy Policy*, 108, 457-469.

- Rajagopalan, K., et al. (2016). A review on ocean renewable energy: Status, challenges and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 180-205.
- Gamage, S., & McMillan, D. (2016). Review of offshore floating wind turbine aerodynamics and analysis. *Wind Energy*, 19(2), 335-353.
- Σουκισιάν, Τ. (2021, March). Διάλεξη: "Εισαγωγή στις Ανεμογεννήτριες". Α.Π.Ε. από τη Θάλασσα - ΔΠΜΣ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία.
- Falcao, A. F. de O., & Estanqueiro, A. (2013). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 899-918.
- Masters, G. M., & Ela, E. (2016). Renewable energy in the marine environment. *Marine Technology Society Journal*, 50(1), 53-67.
- Lam, K. C., & Ahmadi, A. (2017). Tidal energy: An overview of the state of the art and recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1479-1495.
- Gaudiosi, G., Arena, F., & Fortuna, L. (2019). Recent advances in offshore wind energy. *Energies*, 12(17), 3251.
- Yang, Y., & Chou, S. K. (2020). Recent developments in floating offshore wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109951.
- Li, Y., Yang, Z., Yang, G., & Xu, B. (2020). Current status and future perspectives of marine current energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109609.
- Zhu, D., Chen, Z., & Jia, J. (2021). Ocean thermal energy conversion (OTEC): A comprehensive review of technology and development. *Energy Conversion and Management*, 238, 114014.
- Moreno, B., Pastor, E., & Del Pico, J. (2021). Advances in marine renewable energy: State of the art and future trends. *Energies*, 14(8), 2353.
- Yuan, Z., & Yang, X. (2021). Harnessing the power of marine bioenergy: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110182.
- Sharshir, S. W., Abdo, M. A., & Kader, M. A. (2022). A comprehensive review of wave energy conversion technologies and potential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111896
- Ζάραγκας Δημήτριος., Διπλωματική Εργασία: "Συνδυαστική Μελέτη Διαθέσιμου Θαλάσσιου Αιολικού Δυναμικού και της Ηλιακής Ενέργειας στη Μεσόγειο Θάλασσα"

- Hongfu Zhang, Zhiqiang Li, Dabo Xin, Jian Zhan (2020). Improvement of Aerodynamic Performance of Savonius Wind Rotor using Straight-Arc Curtain
- Humans Sharma, Ahteshamul Haque, Zainul (2018). "Solar energy harvesting wireless sensor network nodes:A survey." Renewable and Sustainable Energy Reviews 10, 023704 (2018)
- Antoni Mr Cantarellas, Daniel Remon, Pedro Rodriguez (2017). "Adaptive Vector Control of Wave Energy Converters." IEEE Transactions on Industry Applications (2382-2391)
- John K. Kardelis, Theodoris Chrysikos (2019)."Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations." International Journal of Sustainable Energy.(312-332)
- Zhao Xiao, Qiancheng Zhao, Xuebing Yang, Anfeng Zhu (2020) "A Power Performance Online Assessment Method of a Wind Turbine Based on the Probabilistic Area Metric" Wind Power Technologies
- Ted K. A. Brekken, Belinda Batten, (2011), IEEE control systems, "From Blue to Green", 31(5):18-24.

Διαδικτυακοί χώροι

- <https://www.energyglobal.com/special-reports/03112020/floating-wind-what-are-the-mooring-options/>
- <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/offshore-wind-in-europe-key-trends-and-statistics-2020/>
- https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en
- <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>
- <https://www.statista.com/statistics/476327/global-capacity-of-offshore-wind-energy/>
- <https://gwec.net/globalwindreport2023/>
- <https://electrek.co/2022/01/07/worlds-largest-floating-solar-farm-comes-online-with-wind-and-storage/>

- <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/wind-turbine-design.html>
- <https://www.technologyreview.com/2014/06/30/13044/two-bladed-wind-turbines-make-a-comeback/>
- <https://windeurope.org>